

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**

**Simulace obtékání zadního křídla  
studentské formule**

**Kateřina Burešová**

**2016**

**Vedoucí práce: Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.**



## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

- pro:                    **Kateřinu BUREŠOVOU**
- program:            **Teoretický základ strojního inženýrství**
- obor:                 **bez oboru**
- název česky:        **Simulace obtékání zadního křídla studentské formule**
- název anglicky:    **Numerical Simulation of Formula Student Rear Wing Flow**

### *Zásady pro vypracování:*

- 1) Proveďte rešerši aerodynamiky zadního křídla formule s důrazem na vysvětlení vzniku aerodynamických sil.
- 2) Proveďte validační výpočet obtékání samostatného profilu za použití komerčního programu ANSYS Fluent. Získané výsledky porovnejte s daty z literatury.
- 3) Proveďte vlastní řešení obtékání zadního křídla studentské formule za použití nástrojů počítačové dynamiky tekutin.
- 4) Popište získaná proudová pole a diskutujte výsledky numerických řešení.

Rozsah průvodní zprávy: 30 stran včetně obrázků

Rozsah grafických prací:

Seznam doporučené literatury:

- 1) R. H. Barnard, Road Vehicle Aerodynamic Design - An Introduction, Longman, 1996
- 2) W. H. Hucho, Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering, Society of Automotive Engineers Inc, 1998

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 25. 4. 2016

Datum odevzdání bakalářské práce: 26. 8. 2016

.....  
Prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.  
Vedoucí Ú 12112

.....  
Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
Děkan fakulty

V Praze dne 25. 4. 2016

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

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

V Praze dne .....

podpis

## Poděkování

Tato práce by nevznikla bez mého působení v týmu elektrické formule eForce FEE Prague Formula, kterému děkuji za umožnění vývoje a hlavně následné výroby zadního křídla naší nejnovější formule. Velký dík také patří Marku Pátému jako mému předchůdci, který mi předal velkou dávku svých zkušeností a znalostí a kolegovi Jiřímu Teichmannovi, který se podílel na simulacích celého monopostu. Dále bych chtěla poděkovat svému školiteli, panu Ing. Tomáši Hyhlíkovi, Ph.D. za profesionální vedení, ucelené rady, trpělivost a nekonečnou víru, že tato práce může být ještě lepší. Poděkování si zaslouží i moji rodiče, kteří mě při studiu podporují.

## Anotační list

Jméno autora:	Kateřina Burešová
Instituce:	České Vysoké Učení Technické v Praze Fakulta strojní 12112 – Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky Technická 4, 166 07 Praha 6
Obor:	Teoretický základ strojního inženýrství
Název práce:	Simulace obtékání zadního křídla studentské formule
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Hyhlík, Ph. D.
Bibliografické údaje:	Počet stran 47 Počet obrázků 40 Počet tabulek 8
Rok:	2016
Klíčová slova:	Studentská formule, profil, Formula Student, aerodynamika, simulace, výpočet, křídlo, zadní křídlo
Keywords:	Formula Student, airfoil, aerodynamic, simulation, calculation, wing, rear wing

### Anotace:

Tato práce řeší návrh přítlačného zadního křídla pro použití na studentské formuli. K tomuto účelu jsou zahrnuty základní teoretické znalosti vzniku aerodynamických sil. Rovněž je v práci popsán vývoj a pravidla potřebná k návrhu aerodynamických prvků Formula Student. Část práce se zabývá základním validačním výpočtem a jeho podrobným popisem.

### Abstract:

This thesis deals with the design of a rear wing used on a formula student car. To that end, basic theoretical findings of aerodynamic forces generation are covered. The development and the rules needed for designing the aerodynamic devices of Formula Student competition are also covered. The thesis then highlights the basic validation calculation and thoroughly describes it.

## Obsah

1	Úvod.....	11
1.1	Pozice aerodynamických prvků ve Formuli Student.....	11
1.2	Vývoj aerodynamických prvků vozů kategorie Formula Student.....	11
1.3	Pravidla pro konstrukci aerodynamických prvků.....	13
1.4	Vývoj aerodynamických prvků týmu eForce FEE Prague Formula.....	15
2	Cíl práce a motivace.....	17
3	Teoretický základ.....	18
3.1	Popis aerodynamického profilu.....	18
3.2	Aerodynamické síly a jejich vznik.....	19
3.3	Rozložení tlaku po aerodynamickém profilu.....	19
3.4	Mezní vrstva.....	20
3.5	Bezrozměrné součinitele.....	21
3.5.1	Tlakový koeficient $C_p$ .....	21
3.5.2	Třecí koeficient $C_f$ .....	22
3.5.3	Součinitel vztlaku $C_l$ .....	22
3.5.4	Součinitel odporu $C_d$ .....	22
3.5.5	Součinitel boční síly $C_y$ .....	23
3.5.6	Součinitel klopného momentu $C_m$ .....	23
4	Validační výpočet.....	24
4.1	Geometrie výpočetního modelu.....	24
4.2	Tvorba sítě.....	24
4.3	Nastavení výpočtu.....	25
4.4	Výpočet.....	26
4.5	Výsledky validačního výpočtu.....	26
5	Vlastní řešení obtékání zadního křídla studentské formule.....	35
5.1	Základní náležitosti návrhu aerodynamiky závodních aut.....	35

5.2	Koncept nového vozu a aerodynamických prvků .....	35
5.3	Terminologie zadního křídla.....	35
5.4	Konstrukční možnosti zadního křídla, volba hlavního profilu .....	36
5.5	2D simulace zadního křídla .....	37
5.6	3D simulace zadního křídla .....	38
5.7	Realita simulací celého monopostu.....	40
5.8	Diskuse řešení a výsledky nového zadního křídla.....	42
6	Závěr.....	45
	Literatura .....	46



## Seznam použitých symbolů a zkratek

$C_d$	součinitel odporu	(1)
$C_f$	třecí koeficient	(1)
$C_l$	součinitel vztlaku	(1)
$C_m$	součinitel klopného momentu	(1)
$C_p$	tlakový koeficient	(1)
$C_y$	součinitel boční síly	(1)
$D$	odporová síla	(N)
$\delta$	tloušťka mezní vrstvy	(m)
$l$	referenční délka	(m)
$L$	vztlaková síla	(N)
$M_y$	klopný moment	(N·m)
$p$	tlak	(Pa)
$p_0$	tlak okolí	(Pa)
$\rho_0$	hustota proudící tekutiny	(kg·m <sup>-3</sup> )
$S$	referenční plocha	(m <sup>2</sup> )
$\tau$	smykové napětí	(N·mm <sup>2</sup> )
$v$	rychlost	(m·s <sup>-1</sup> )
$x$	x-ová souřadnice	(m)
$x/c$	bezrozměrná x-ová souřadnice	(1)
$Y$	boční síla	(N)

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Jedno z prvních přitlačných křídel v soutěži, Formula SAE Missouri, rok 1991 [12] .....	12
Obrázek 2: GFR11c, monopost amerického týmu Global Formula Racing, který zapříčinil návrat přitlačných křídel do Formule Student, rok 2011 [13] .....	13
Obrázek 3: Znázornění povolených zón pro aerodynamické prvky vozu Formula Student [7] .....	15
Obrázek 4: Proudění okolo monopostu FSE.03, rok 2014 .....	15
Obrázek 5: Proudění okolo monopostu FSE.04x, rok 2015 .....	16
Obrázek 6: Symetrický a prohnutý profil [14] .....	18
Obrázek 7: Popis aerodynamického profilu [15] .....	18
Obrázek 8: Aerodynamické síly působící na těleso [3] .....	19
Obrázek 9: Rozložení tlaků po aerodynamickém profilu [16] .....	20
Obrázek 10: Proudící tekutina okolo ploché desky [3] .....	20
Obrázek 11: Schématické znázornění mezní vrstvy na automobilu [3] .....	21
Obrázek 12: Změna mezní vrstvy [3] .....	21
Obrázek 13: Goe 226 .....	24
Obrázek 14: Vytvořená síť pro výpočet .....	25
Obrázek 15: Zjemnění sítě v okolí simulovaného profilu .....	25
Obrázek 16: Závislost tlakového koeficientu $C_p$ na $x/c$ získaná výpočtem 1. modelu .....	27
Obrázek 17: Závislost tlakového koeficientu $C_p$ na $x/c$ získaná výpočtem 2. modelu .....	28
Obrázek 18: Závislost tlakového koeficientu $C_p$ na $x/c$ získaná výpočtem 3. modelu .....	28
Obrázek 19: Závislost tlakového koeficientu $C_p$ na $x/c$ získaná výpočtem 4. modelu .....	29
Obrázek 20: Závislost tlakového koeficientu $C_p$ na $x/c$ získaná výpočtem 5. modelu .....	29
Obrázek 21: Porovnání průběhu tlakového koeficientu $C_p$ na podtlakové straně profilu .....	29
Obrázek 22: Porovnání průběhu tlakového koeficientu $C_p$ na přetlakové straně profilu .....	30

Obrázek 23: Závislost třecího koeficientu $C_f$ na $x/c$ získaná výpočtem 1. modelu ..	31
Obrázek 24: Závislost třecího koeficientu $C_f$ na $x/c$ získaná výpočtem 2. modelu ..	31
Obrázek 25: Závislost třecího koeficientu $C_f$ na $x/c$ získaná výpočtem 3. modelu ..	32
Obrázek 26: Závislost třecího koeficientu $C_f$ na $x/c$ získaná výpočtem 4. modelu ..	32
Obrázek 27: Závislost třecího koeficientu $C_f$ na $x/c$ získaná výpočtem 5. modelu ..	33
Obrázek 28: Porovnání průběhu třecího koeficientu $C_f$ na podtlakové straně profilu .....	33
Obrázek 29: Porovnání průběhu třecího koeficientu $C_f$ na přetlakové straně profilu .....	33
Obrázek 30: Popis zadního křídla .....	36
Obrázek 31: Goe 525.....	36
Obrázek 32: Be 122-125.....	37
Obrázek 33: Be 122-155.....	37
Obrázek 34: Be 122-185.....	37
Obrázek 35: Be 153-175.....	37
Obrázek 36: Výsledky 2D simulací zadního křídla.....	38
Obrázek 37: Výsledky 3D simulace samostatného zadního křídla .....	40
Obrázek 38: Porovnání rozložení tlaků po horní straně zadního křídla .....	42
Obrázek 39: Porovnání rozložení tlaků po spodní straně zadního křídla.....	42
Obrázek 40: FSE.05x [11].....	44

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Náhradní označení zvolených turbulentních modelů .....	26
Tabulka 2: Nastavení validačního výpočtu .....	26
Tabulka 3: Porovnání výsledků validačních výpočtů pro všech 5 turbulentních modelů.....	34
Tabulka 4: Nastavení výpočtu pro 2D simulace zadního křídla.....	37
Tabulka 5: Nastavení výpočtu pro 3D simulace samostatného zadního křídla.....	39
Tabulka 6: Porovnání použití původního a prohnutého zadního profilu .....	41
Tabulka 7: Porovnání vztlakových a odporových součinitelů monopostu FSE.04x a FSE.05x.....	43
Tabulka 8: Porovnání přítlaků a odporů monopostu FSE.04x a FSE.05x.....	43

# 1 Úvod

## 1.1 Pozice aerodynamických prvků ve Formuli Student

Aerodynamické prvky studentských formulí jsou již od svého počátku velmi často skloňovanou konstrukční skupinou, a to zejména pro svou funkci, nebo respektive pro její domnělý nedostatek. Ze své podstaty jsou všechny dynamické disciplíny seriálu Formula Student velmi pomalé. Špičkové monoposty dosahují maximální rychlosti okolo 110 km/h, a to při disciplíně, která má za úkol prověřit zrychlení vozu. Z tohoto důvodu je použití aerodynamických prvků skutečně sporné, protože s rostoucí přítlakovou silou roste i síla odporová. Při základní úvaze tedy s použitím aerodynamických prvků při disciplíně „Acceleration“ roste čas, což se jistě negativně promítne na hodnocení.

Na druhé straně stojí vytrvalostní závod na 22 kilometrů, Endurance, který je koncipován jako specifická technická trať. Průměrná rychlost v tomto závodě je mezi 50 a 60 km/h. Trať je 3 metry široká, plná ostrých zatáček, slalomů a pouze z pravidla s jedním rychlejším úsekem. Na podobné trati je tedy možné získat náskok pouze při co nejrychlejší průjezdu právě všudypřítomnými zatáčkami. V tomto směru je aeropaket velmi žádaný.

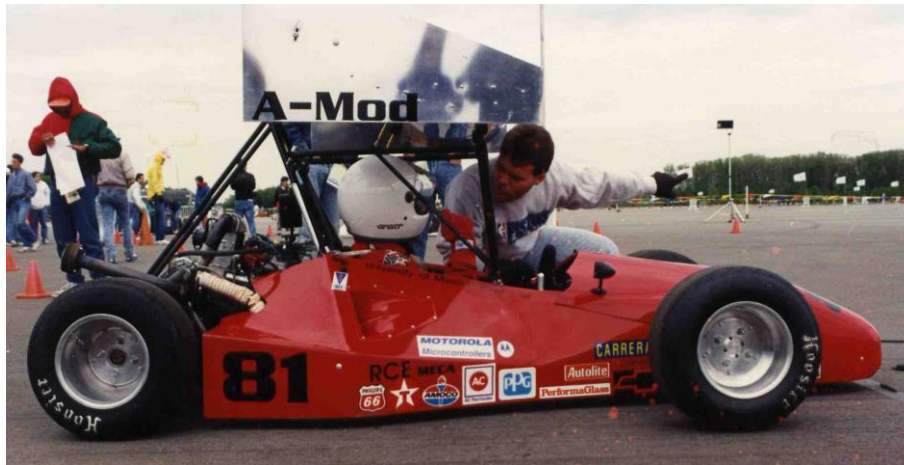
V podobném kalkulování je potřeba také zahrnout bodovou bilanci. Test akcelerace je při prvním místě hodnocen 75 body z celkového 1000. Na druhé straně disciplína Endurance je hodnocena při prvním místě 325 body, což jasně mluví pro použití aerodynamických prvků.

Z těchto základních specifikací vyplývá velmi konkrétní úkol. Každý tým se k otázce aerodynamiky svého vozu staví jinak, ale všechny spojuje nelehký úkol, jak vybalancovat nejen poměr přítlakové a odporové síly, ale i zvážit, zda je v jeho silách navrhnout a zkonstruovat aeropaket, jehož pozitiva převáží všechna negativa.

## 1.2 Vývoj aerodynamických prvků vozů kategorie Formula Student

Soutěži Formula SAE se poprvé konala v roce 1981, první přítlaková křídla se objevila o 10 let později, tedy v roce 1991. Na tehdejších závodech představily přítlakové křídlo 2 týmy, Michigan a Missouri. Formule týmu Missouri je ukázána na obrázku 1. Přítlakové křídlo bylo velmi prostorné, umístěné v oblasti nad hlavou pilota. I přes velmi dobré umístění obou týmů v dynamických disciplínách se toto

řešení nesetkalo s pochopením a následně vedlo ke změně pravidel omezující polohu a rozměry přídatných aerodynamických prvků na monopostu. Změna pravidel měla za následek ústup přitlačných křidel. Ty sice nevymizely, ale ani se nestaly masovou záležitostí.



*Obrázek 1: Jedno z prvních přitlačných křidel v soutěži, Formula SAE Missouri, rok 1991 [12]*

Počátkem 21. století začalo opět více týmů zkoušet své možnosti na poli aerodynamiky. Zlom nastal u formule týmu Monash Motorsport. Tým byl schopen otestovat své aerodynamické prvky ve větrném tunelu v měřítku 1:1. Po jejich drobných úspěších se konečně aerodynamické prvky začaly na studentských formulích objevovat častěji. Zatím se ale stále nejednalo o běžnou součást každé formule.

Rok 2011 je možné označovat za skutečně přelomový rok pro aerodynamické prvky ve Formuli Student. Nejprestižnějšího závodu, Formula Student Germany, se sice zúčastnil pouze jediný tým, který použil na svém monopostu přitlačná křídla (Global Formula Racing, Oregon State University, k vidění na obrázku 2), ale obsadil 2 první místa ze 4 dynamických disciplín a rovněž získal celkové první místo. To zcela změnilo postavení tohoto konstrukčního celku, a tak se z aerodynamiky studentských formulí konečně stala plnohodnotná disciplína. Rapidní nárůst aeropaketů vyvrcholil v roce 2014, kdy drtivá většina týmů předvedla v průběhu sezóny své řešení. Důsledkem byla změna pravidel, a to zejména ve velikosti a umístění na monopostu, platná již pro závodní sezónu 2014/2015. Ve zkratce se přední přitlačný element zmenšil o 25% a ten zadní o celou 1/3.



*Obrázek 2: GFR11c, monopost amerického týmu Global Formula Racing, který zapříčinil návrat přitlačných křidel do Formule Student, rok 2011 [13]*

Pravidla platící do roku 2015 byla v jistých ohledech velmi benevolentní, a tak se postupně povedlo i ne příliš vyspělým týmům relativně úspěšně nasadit aerodynamické prvky. Změny v pravidlech ale naprosto logicky omezily funkčnost, a tak závodní sezóna roku 2015 byla zcela ve znamení nových, redukováných aeropaketů, které přes všechna negativní očekávání stále fungovala a týmy, které si je vyvinuly, posunula ještě dál.

### **1.3 Pravidla pro konstrukci aerodynamických prvků**

Podmínky, které musí splňovat aerodynamické prvky, jsou v oficiálních pravidlech soutěže v článku 9 [7]. Zde následuje výňatek o poloze a velikosti všech základních aerodynamických celků. Schématické rozložení je zobrazeno na obrázku 3.

#### **T9.1 Aerodynamika a ground efekt**

Všechny aerodynamické prvky musí splňovat následující požadavky:

#### **T9.2 Umístění předního prvku**

T9.2.1 Při pohledu ze shora nesmí být žádná část aerodynamického zařízení, křídla, under tray a splitteru:

- a) Více jak 700 mm před předními pneumatikami
- b) Širší než vnější rozměr pneumatik měřený ve výšce náboje.

T9.2.2 Při pohledu zepředu nesmí být aerodynamický prvek výše než 250 mm nad zemí, pokud má šířku větší, než 25 mm. Výjimku tvoří svislé plochy, koncové desky (endplaty), jejichž tloušťka nedosahuje 25 mm.

Poznámka: Pravidlo platí s pozicí kol při jízdě vpřed.

### T9.3 Umístění zadního prvku

T9.3.1 Při pohledu ze shora nesmí být žádná část aerodynamického zařízení, křídla, under tray a splitteru

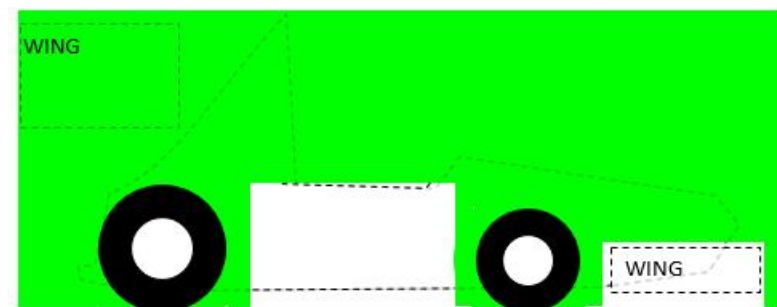
- a) Více jak 250 mm za zadními pneumatikami
- b) Méně jak nejzazší poloha opěrky hlavy
- c) Širší, než vnitřní rozměr pneumatik měřený ve výšce náboje

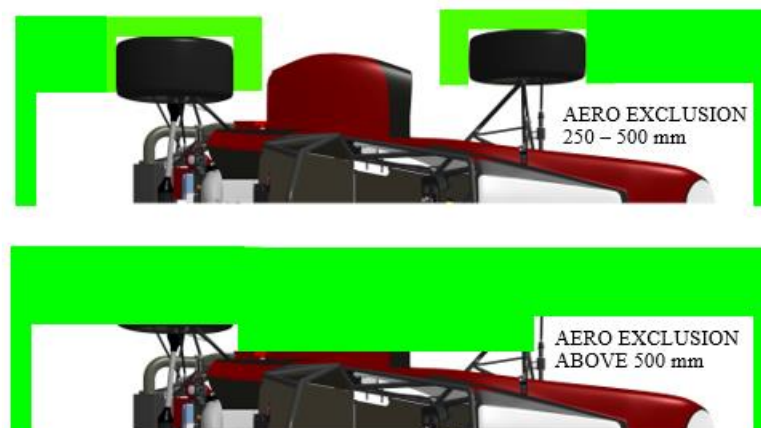
T9.3.2 Při pohledu z boku nesmí být vyšší než 1,2 m nad zemí, měřeno bez pilota.

### T9.4 Umístění obecného prvku

T9.4.1 Při pohledu ze shora může aerodynamický prvek zasahovat pouze do spojnice vnějšího rozměru předního a zadního kola ve výšce náboje.

T9.4.2 S výjimkou případů povolených v odstavci T9.3.1, jakýkoli aerodynamický prvek, nebo karoserie, který se nachází mezi předním a zadním kolem nesmí přesahovat více jak 500 mm nad zemí, měřeno bez pilota. (Karoserie, nebo svislé podélné plochy nesmí přesáhnout 400 mm nad zemí.)

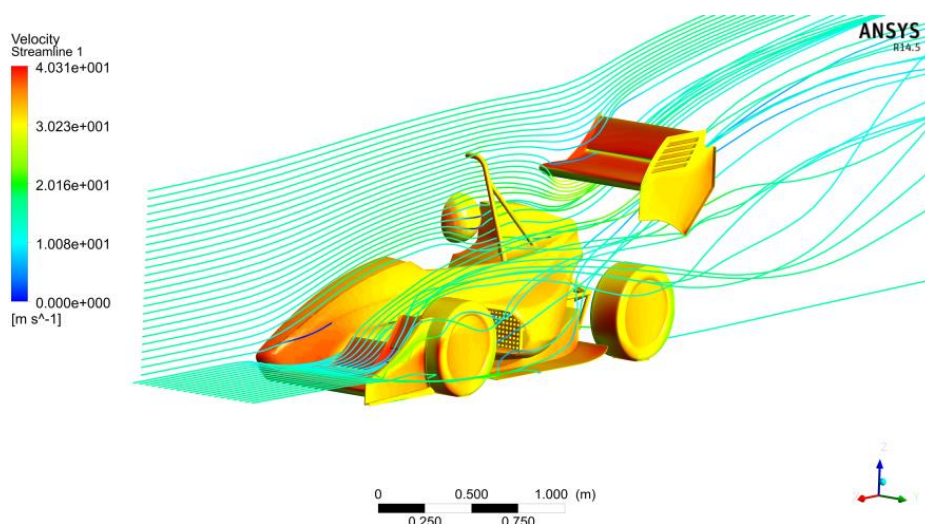




Obrázek 3: Znáznornění povolených zón pro aerodynamické prvky vozu Formula Student [7]

#### 1.4 Vývoj aerodynamických prvků týmu eForce FEE Prague Formula

Po masivním nárůstu přitlačných křídel v soutěži se tým jediné české elektroformule rozhodl vyvinout svůj první aeropaket pro závodní sezónu 2013/2014. Aby se zjistila rentabilita této konstrukce, tak se jedna z prvních odsimulovaných variant vyrobila a použila při posezónních testech na předchozím monopostu (FSE.02). Ostré jízdy ukázaly, že aerodynamické prvky mají zatím své nedostatky, ale v globálním měřítku mají i své skutečné opodstatnění. Na základě tohoto výsledku začal tým pracovat na vývoji plnohodnotné sestavy přitlačných křídel pro vůz FSE.03. Ta jsou k vidění na obrázku 4. Po zkušenostech z první iterace se podařilo odstranit většinu nedostatků.

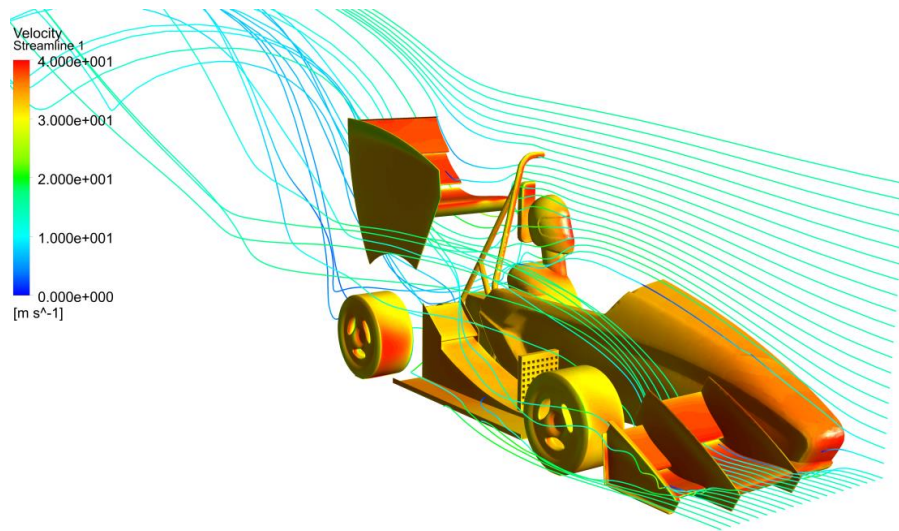


Obrázek 4: Proudění okolo monopostu FSE.03, rok 2014

Po sezóně s FSE.03 další vývoj ovlivnila již zmíněná změna pravidel. Veškeré zkušenosti s numerickými výpočty zůstaly, ale bylo nutné navrhnout většinu



aeropaketu zcela znovu. I tak se ve výsledku povedlo pro monopost FSE.04x získat přítláčnou sílu 506,05 N a odporovou sílu 241,12 N při 16 m/s. Tento výsledek byl technickými komisaři uznán jako uspokojivý a rovněž i piloti formule ho velmi chválili. Sestava přítláčných křídél pro FSE.04x je na obrázku 5.



*Obrázek 5: Proudění okolo monopostu FSE.04x, rok 2015*

## 2 Cíl práce a motivace

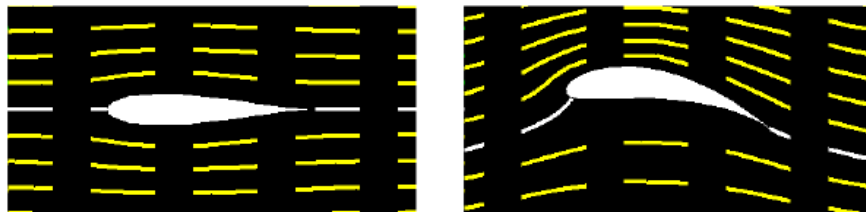
Slavný citát Enza Ferrari říká [17], že aerodynamika je jen pro ty, co neumí dělat motory. Zda je toto tvrzení pravdivé, je na uvážení. Pro některé je aerodynamika vozů fascinací a nejzajímavější částí mechaniky kontinua a pro jiné samozřejmost, nad kterou se nepozastaví.

Cílem této práce je vypracovat nejen dokumentaci pro vývoj nového zadního křídla elektrické studentské formule, protože zde navržené křídlo se bude skutečně vyrábět, ale také mnohem hlouběji proniknout do problematiky aerodynamiky nízkých rychlostí. Ve Formuli Student se nehodnotí jen funkčnost konstrukčních celků, ale také znalosti jejich konstruktérů. To je zde ta motivace.

### 3 Teoretický základ

#### 3.1 Popis aerodynamického profilu

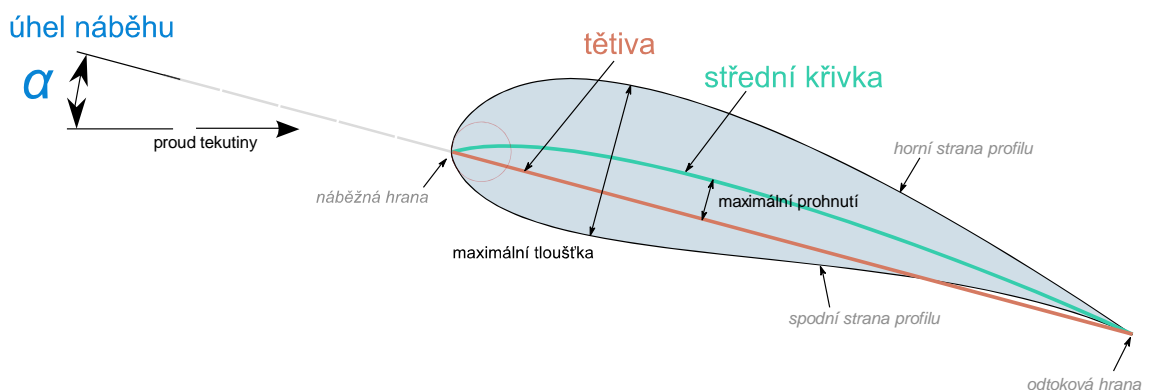
Pro správnou orientaci v problematice aerodynamických profilů je nutné zopakovat následující pojmy. Profily je možné rozdělit do dvou základních skupin, na profily symetrické a nesymetrické, prohnuté (obrázek 6).



Obrázek 6: Symetrický a prohnutý profil [14]

Základní geometrické prvky zobrazuje obrázek 7:

- Tětiva – spojnice náběžné a odtokové hrany profilu
- Střední křivka profilu – křivka, která spojuje středy vepsaných kružnic do profilu
- Maximální tloušťka profilu – maximální vzdálenost mezi horní a spodní stranou profilu
- Maximální prohnutí profilu – maximální vzdálenost mezi tětivou a střední křivkou

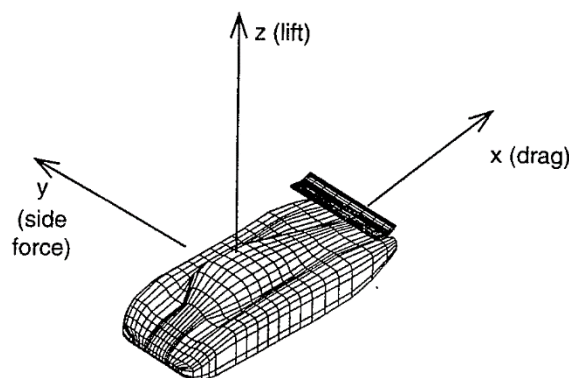


Obrázek 7: Popis aerodynamického profilu [15]

Polohu profilu v prostoru dále popisuje úhel náběhu  $\alpha$ , který svírá tětiva profilu se směrem proudící tekutiny.

### 3.2 Aerodynamické síly a jejich vznik

Na profilu, respektive na jakémkoli jiném objektu generuje sílu pouze působící tlak a smykové napětí, přesně řečeno rozložení této dvojice po jeho povrchu. Smykové napětí  $\tau$  působí v tečném směru na povrch a tlak  $p$  působí v normálovém směru od povrchu tělesa. Integrací působícího tlaku a smykového napětí po povrchu geometrie je možné vypočítat celkovou sílu a moment, které působí na daný objekt. Celkovou sílu je dále možné rozložit na sílu vztlakovou  $L$  (od anglického slova „lift“) a sílu odporovou  $D$  (od anglického slova „drag“), s tím, že působící tlak přispívá jak ke vzniku vztlakové síly  $L$ , tak i odporové síly  $D$ , zatímco působící smykové napětí přispívá pouze ke vzniku odporové síly  $D$ . Vztlaková síla  $L$  působí ve směru osy  $z$ , ve směru kolmém na proud obtékající tekutiny a odporová síla  $D$  působí ve směru osy  $x$ , tečně k proudu obtékající tekutiny. Výsledné síly jsou zaznamenány na obrázku 8. Z něj je patrné konečné zavedení tří základních působících sil, ke vztlakové síle  $L$  a odporové síle  $D$  se přidává síla boční  $Y$  (anglicky „side force“), působící ve směru osy  $y$ . V případě aerodynamiky vozu vztlaková síla působí kolmě k vozovce a odporová síla působí rovnoběžně s vozovkou proti směru jízdy.



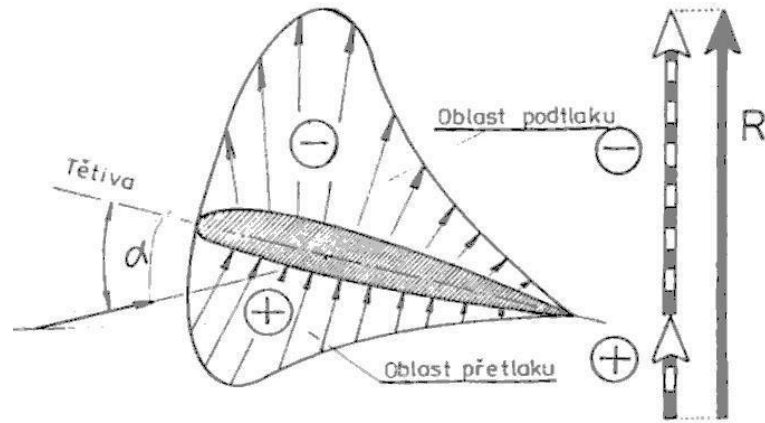
Obrázek 8: Aerodynamické síly působící na těleso [3]

Pro jednoznačný popis těchto sil jsou zavedeny koeficienty, které snižují počet neznámých a umožňují použití teorie podobnosti. Tyto koeficienty jsou dále popsány v kapitole 3.5.

### 3.3 Rozložení tlaku po aerodynamickém profilu

Tlak působící na profil není po celé jeho délce stejný. U nesymetrických profilů je rozdílný tlak způsoben zakřivenou geometrií a úhlem náběhu. Horní strana profilu je z pravidla delší, než spodní, vzduch proudící přes profil po horní straně má tedy vyšší rychlost, a tak generuje tlak menší, než je tlak okolí. Naopak, vzduch proudící

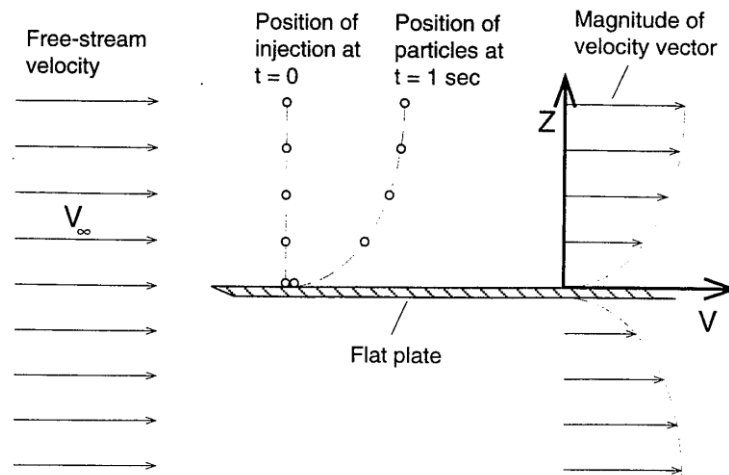
přes spodní stranu profilu plyne pomaleji, a tak generuje tlak větší, než je tlak okolí. Konkrétní rozložení tlaku je blíže dáno geometrií a již zmíněným úhlem náběhu profilu, příklad rozložení je zobrazen na obrázku 9. Střed tlaku je určen pomocí numerického výpočtu a experimentálními zkouškami.



Obrázek 9: Rozložení tlaků po aerodynamickém profilu [16]

### 3.4 Mezní vrstva

Mezní vrstva může být popsána jako tekutina proudící okolo ploché desky ponořené do jednotného proudu tekutiny, jako je zobrazeno na obrázku 10.

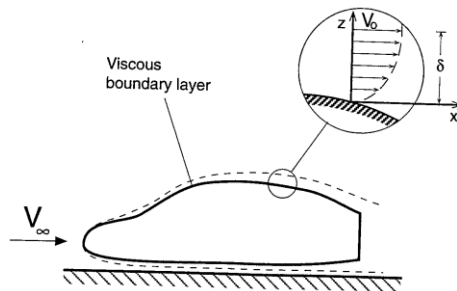


Obrázek 10: Proudící tekutina okolo ploché desky [3]

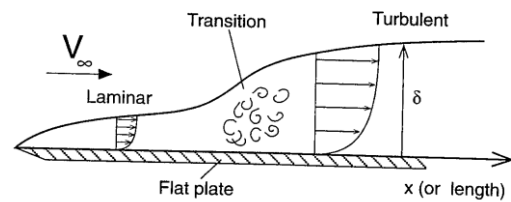
Díky přítomnosti viskozity tekutiny je rychlost proudu tekutiny  $v$  na povrchu stacionární desky rovna nule, zatímco existuje tenká vrstva tekutiny, kde se postupně rychlost zvyšuje na rychlost proudící tekutiny okolí.

Vrstva, kde se rychle mění tangenciální rychlost, se nazývá mezní vrstva, jejíž tloušťka  $\delta$  roste s vzdáleností od počátku desky. Mezní vrstva samozřejmě existuje

i na mnohem komplikovanějších geometriích, jako je například automobil (obrázek 11), formule a jiné. Tloušťka vrstvy je na automobilu jedoucím 100 km/h na čelní straně tenká několik milimetrů, zatímco na koncové straně to může být i několik centimetrů. Větší mezní vrstva tvoří více odporové síly vznikající třecím napětím  $\tau$ . Příliš velké zvětšení mezní vrstvy může mít za následek odtržení proudu a tím rapidní nárůst odporové síly a ztrátu přitlaku. V tomto případě tvořeného přitlačnými křídly.



Obrázek 11: Schématické znázornění mezní vrstvy na automobilu [3]



Obrázek 12: Změna mezní vrstvy [3]

Pro porozumění problematice mezní vrstvy je nutné podotknout, že mezní vrstva může být jak laminární, tak turbulentní. Ve většině reálných případů mezní vrstva okolo objektu začíná jako laminární, ale končí jako turbulentní. Tuto změnu schématicky popisuje obrázek 12. V principu, v nerozděleném proudu tekutiny je mezní vrstva laminární, ale jak roste lokální vzdálenost (stejně jako lokální Reynoldsové číslo), tak se proud tekutiny stává turbulentním. Místo, kde se proud mění, se nazývá přechodová oblast. Jak ukazuje obrázek 12, turbulentní mezní vrstva je tlustší, než laminární. Jak už bylo zmíněno, s rostoucí tloušťkou mezní vrstvy roste smykové napětí. Pro popis této změny se zavádí třecí koeficient, který bude popsán v kapitole 3.5.2.

### 3.5 Bezrozměrné součinitele

Aerodynamické součinitele charakterizují geometrii obtékaného objektu. Jejich pomocí lze vypočítat aerodynamické síly pro různé rychlosti proudění, média a velikost objektu.

#### 3.5.1 Tlakový koeficient $C_p$

Hodnotu tlakového koeficientu  $C_p$  je možné vypočítat z dílčích hodnot tlaku působícího na geometrii pomocí rovnice (3.5.1.1), kde  $p$  představuje tlak působící

na profil (geometrii),  $p_0$  je tlak okolí,  $\rho_0$  je hustota obtékaného média a  $v^2$  je kvadrát rychlosti obtékaného média.

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v^2} \quad (3.5.1.1)$$

Získaný tlakový koeficient označuje bezrozměrné působení tlaku a pomáhá určit vhodnost geometrie pro danou aplikaci.

### 3.5.2 Třecí koeficient $C_f$

Třecí koeficient  $C_f$  je možné vypočítat z dílčích smykových napětí  $\tau$  pomocí rovnice (3.5.2.1), kde  $\tau$  představuje smykové napětí působící na profil (geometrii),  $\rho_0$  je hustota obtékaného média a  $v^2$  je kvadrát rychlosti obtékaného média.

$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v^2} \quad (3.5.2.1)$$

### 3.5.3 Součinitel vztlaku $C_l$

Součinitel vztlaku  $C_l$  vypovídá o vztlakové síle působící na geometrii a je možné jej vypočítat ze vztlakové síly  $L$  pomocí rovnice (3.5.3.1), kde  $L$  je síla působící ve směru osy  $z$ ,  $\rho_0$  je hustota obtékané tekutiny,  $v^2$  je kvadrát rychlosti obtékané tekutiny a  $S$  je referenční plocha. Pro aerodynamický profil, respektive křídlo letadla je referenční plocha  $S$  obsah půdorysu křídla.

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v^2 \cdot S} \quad (3.5.3.1)$$

### 3.5.4 Součinitel odporu $C_d$

Součinitel odporu  $C_d$  vypovídá o odporové síle působící na geometrii a je možné jej vypočítat z odporové síly  $D$  pomocí rovnice (3.5.4.1), kde  $D$  je síla působící ve směru osy  $x$ ,  $\rho_0$  je hustota obtékané tekutiny,  $v^2$  je kvadrát rychlosti obtékané tekutiny a  $S$  je referenční plocha.

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v^2 \cdot S} \quad (3.5.4.1)$$

### 3.5.5 Součinitel boční síly $C_y$

Součinitel boční síly  $C_y$  vypovídá o boční síle působící na geometrii a je možné jej vypočítat z boční síly  $Y$  pomocí rovnice (3.5.5.1), kde  $Y$  je síla působící ve směru osy  $y$ ,  $\rho_0$  je hustota obtékané tekutiny,  $v^2$  je kvadrát rychlosti obtékané tekutiny a  $S$  je referenční plocha.

$$C_y = \frac{Y}{\frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v^2 \cdot S} \quad (3.5.5.1)$$

### 3.5.6 Součinitel klopného momentu $C_m$

Součinitel odporu  $C_m$  vypovídá o momentu působící na geometrii a je možné jej vypočítat z momentu  $M_y$  pomocí rovnice (3.5.6.1), kde  $M_y$  je moment působící na geometrii,  $\rho_0$  je hustota obtékané tekutiny,  $v^2$  je kvadrát rychlosti obtékané tekutiny,  $S$  je referenční plocha a  $l$  je referenční délka. Referenční délka  $l$  je střední délka tětiny profilu.

$$C_m = \frac{M_y}{\frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v^2 \cdot S \cdot l} \quad (3.5.5.1)$$

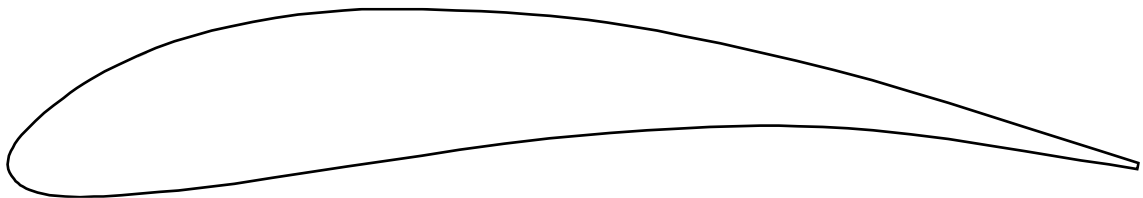


## 4 Validační výpočet

### 4.1 Geometrie výpočetního modelu

Pro validační výpočet byl zvolen profil s názvem Goe 226 [8], který je použit jako klapka pro všechny dílčí aerodynamické celky elektrické formule. Profil Goe 226 se vyznačuje maximální tloušťkou 13,9% tětivy v poloze 19,7% tětivy a maximálním zakřivením 8,1% tětivy v poloze 49,7% tětivy. Již v minulosti byl ověřen jako vhodná volba a tým jej používá již 4. rokem. Schématické zobrazení profilu Goe 226 je na obrázku 13.

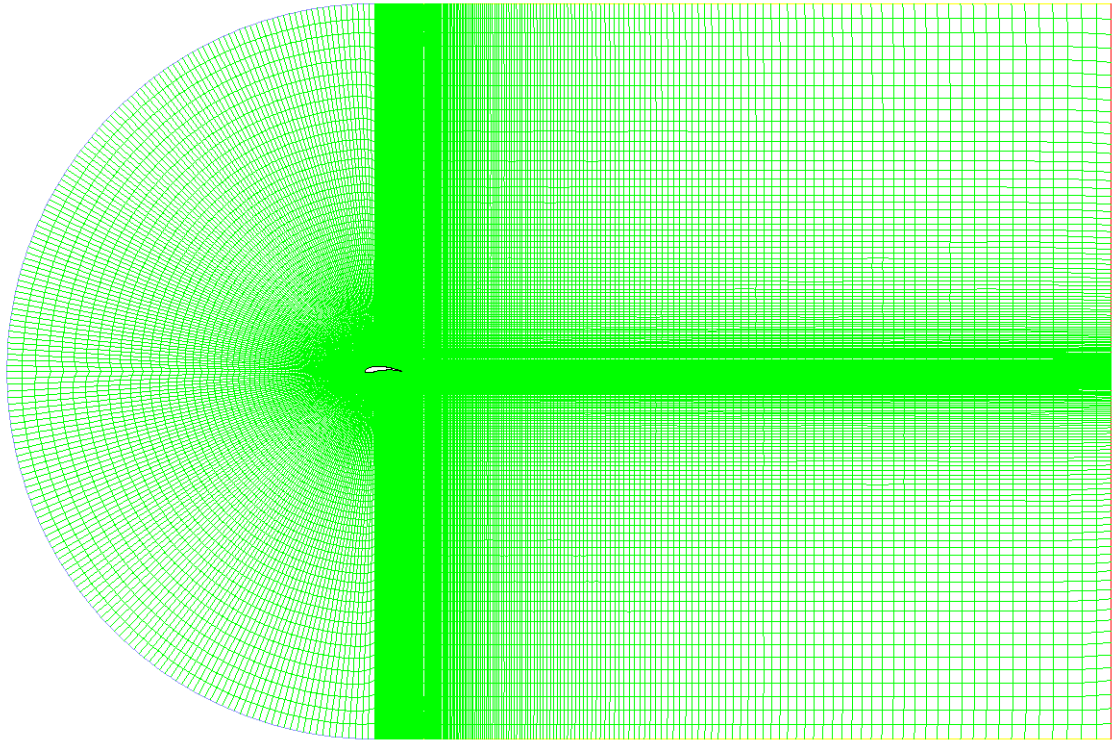
Geometrie byla vytvořena v programu Geometry, který je umístěn v Ansys Workbench s důrazem na vhodné okolí profilu pro vytvoření požadované sítě.



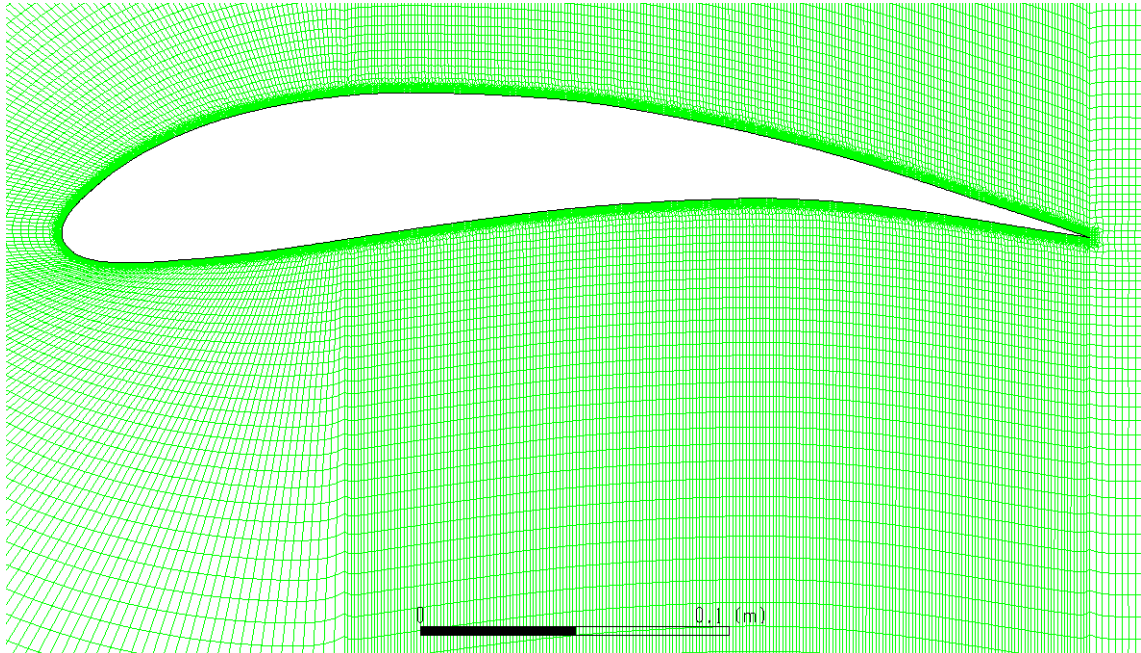
Obrázek 13: Goe 226

### 4.2 Tvorba sítě

Pro validační výpočet byla doporučena síť C Mesh, od které se odvíjí tvar okolí simulovaného profilu. Pro profil délky 20 cm byl vytvořen tunel s délkou 9 metrů a výškou 6 metrů, který je pro vytvoření optimální sítě rozdělen do 6 sektorů. Rozvržení sítě je zobrazeno na obrázku 14. Po dostatečném zjemnění sítě v okolí profilu má vytvořená síť 142 795 buněk. Detail zjemnění sítě v okolí profilu je zobrazen na obrázku 15.



Obrázek 14: Vytvořená síť pro výpočet



Obrázek 15: Zjemnění sítě v okolí simulovaného profilu

### 4.3 Nastavení výpočtu

Validační výpočet byl postupně proveden pro profil Goe 226 s pěti doporučenými modely turbulence, k-epsilon Realizable Non Equilibrium Wall Functions; k-epsilon,

Realizable Scalable Wall Functions; k-omega BSL; k-omega SST a Spalart-Allmaras. Z volby modelů plyne, že je vždy uvažováno pouze turbulentní proudění okolo profilu. Pro zjednodušení bylo zvoleno náhradní označení turbulentních modelů patrné z tabulky 1.

Turbulentní model	Náhradní označení
k-epsilon Realizable Non Equilibrium Wall Functions	1. model
k-epsilon Realizable Scalable Wall Functions	2. model
k-omega BSL	3. model
k-omega SST	4. model
Spalart-Allmaras	5. model

Tabulka 1: Náhradní označení zvolených turbulentních modelů

Pro tento konkrétní výpočet bylo použito 5 typů okrajových podmínek. Pro vstup tekutiny do tunelu je nastavena podmínka *Velocity Inlet*, která definuje vstupní rychlost 16 m/s ve směru osy *x* a turbulentní vlastnosti. Intenzita turbulence je 5% a poměr turbulentní viskozity je 10. Na výstupu z tunelu je podmínka *Pressure Outlet*. Samotný profil má podmínku *Wall*, ostatní hraniční části tunelu jsou definovány jako *Symmetry* a vyplňující prostor tunelu je *Interior - Fluid*.

#### 4.4 Výpočet

Aby výpočet konvergoval ke svému řešení, bylo nutné v jeho průběhu změnit nastavení. Inicializace výpočtu proběhla standardní cestou. V tabulce 2 je rozepsáno nastavení výpočtu pro prvních 1000 iterací a druhé pro dalších 5000 iterací.

	1000 iterací	5000 iterací
<b>Flow Courant Number</b>	20	20
<b>Scheme</b>	Coupled	Coupled
<b>Gradient</b>	Least Squares Cell Based	Least Squares Cell Based
<b>Pressure</b>	Second Order	Second Order
<b>Momentum</b>	First Order Upwind	Second Order Upwind
<b>Turbulent Kinetic Energy</b>	First Order Upwind	Second Order Upwind
<b>Turbulent Dissipation Rate</b>	First Order Upwind	Second Order Upwind

Tabulka 2: Nastavení validačního výpočtu

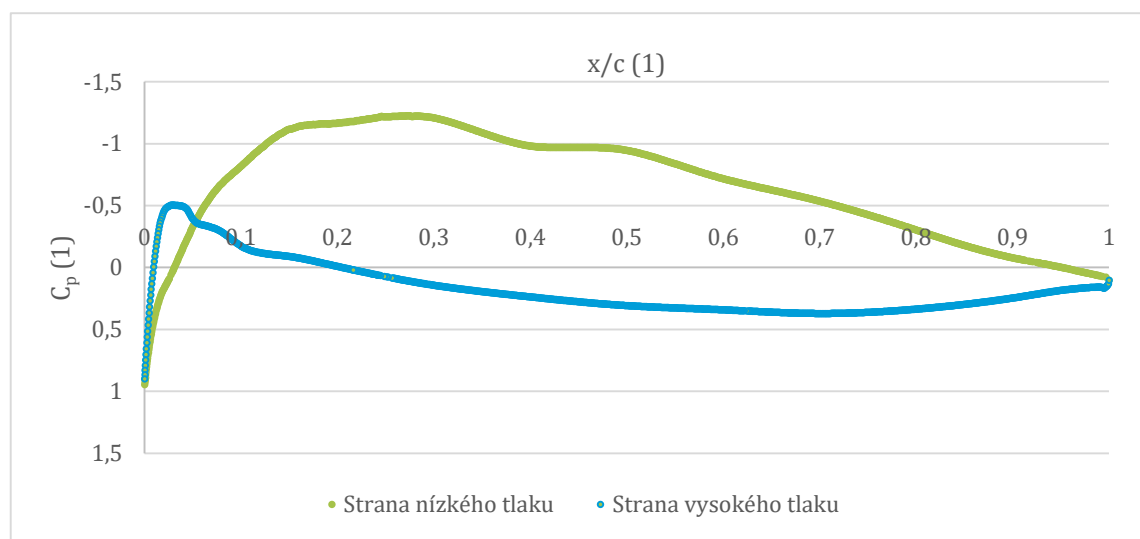
#### 4.5 Výsledky validačního výpočtu

Výsledky simulace jsou patrné nejen při výpisu odporové a vztahové síly, ale také ze závislosti tlakového koeficientu  $C_p$  a třecího koeficientu  $C_f$  na absolutní *x*-ové

souřadnici profilu  $x/c$ . Na obrázcích 16 až 20 jsou zobrazeny závislosti tlakového koeficientu  $C_p$  pro všech 5 použitých turbulentních modelů včetně jejich porovnání na obrázcích 21 a 22. Na obrázcích 23 až 27 jsou pak zobrazeny závislosti třecího koeficientu  $C_f$ , opět včetně jejich porovnání na obrázcích 28 a 29.

Absolutní x-ová souřadnice je vypočtena z rovnice (4.5.1), kde  $x$  je x-ová souřadnice profilu,  $x_a$  je nejmenší možná x-ová souřadnice a  $x_b$  je maximální x-ová souřadnice. V tomto případě je  $x_a = 0 \text{ m}$  a  $x_b = 0,2 \text{ m}$ .

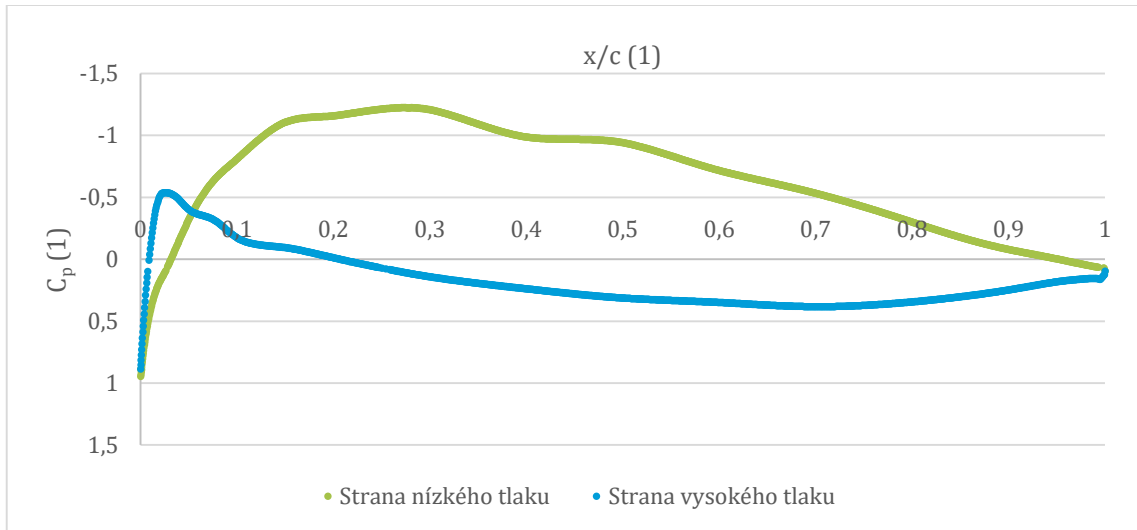
$$x/c = \frac{x - x_a}{x_b - x_a} \quad (4.5.1)$$



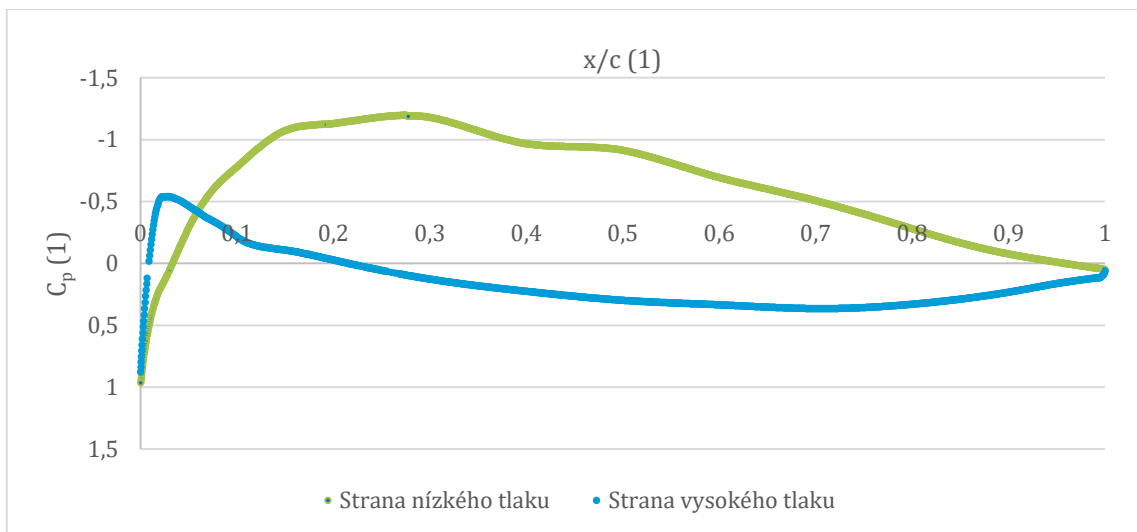
Obrázek 16: Závislost tlakového koeficientu  $C_p$  na  $x/c$  získaná výpočtem 1. modelu

Na obrázku 16 je zobrazena závislost tlakového koeficientu  $C_p$  na absolutní souřadnici  $x/c$  pro 1. model. Dle očekávání je graf rozdělen na dvě části, jeden průběh charakterizuje velikost tlakového koeficientu na spodní straně profilu, přetlakové, a druhý na horní straně, podtlakové. Tlakový koeficient se na horní straně profilu nachází v drtivé většině v záporných hodnotách  $C_p$ . Výjimku tvoří oblast u náběžné hrany, kde je tlakový koeficient kladný. Nulový tlakový koeficient je v místě  $x/c = 0,3$ . Na přetlakové straně profilu je tlakový koeficient většinou kladný, výjimku tvoří opět okolí náběžné hrany, kde je mezi  $x/c = 0,02$  a  $x/c = 0,2$  tlakový koeficient záporný. Na odtokové hraně je na obou stranách profilu tlakový koeficient  $C_p = 0,17$ , z toho plyne, že tlakový koeficient na podtlakové straně profilu je u odtokové hrany také kladný. Nulový tlakový koeficient je dále na podtlakové straně profilu v  $x/c = 0,96$ .

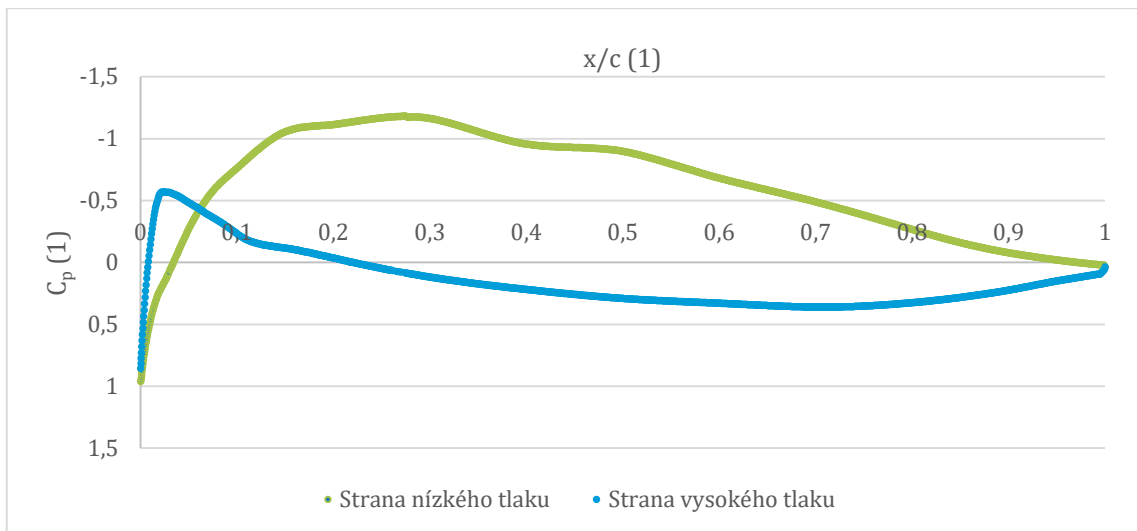
Co se týká závislosti tlakového koeficientu  $C_p$  na absolutní x-ové souřadnici  $x/c$  pro další 4 turbulentní modely, výsledky simulací jsou totožné. Jednotlivé průběhy pro ostatní modely jsou k vidění na obrázcích 17, 18, 19 a 20. Porovnání všech pěti výsledků je zobrazeno na obrázcích 21 a 22 zvláště pro přetlakovou a podtlakovou stranu profilu.



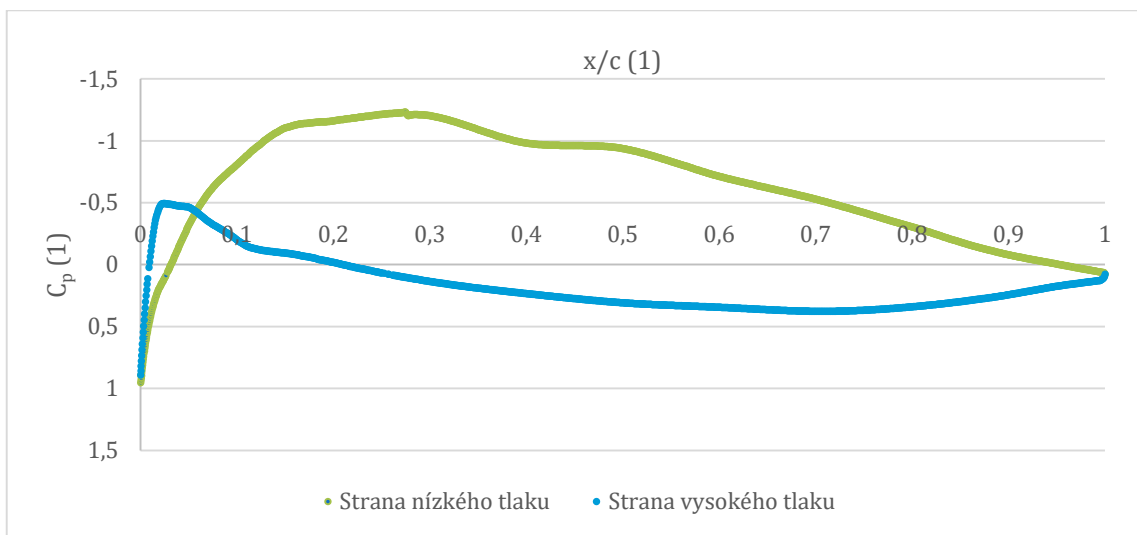
Obrázek 17: Závislost tlakového koeficientu  $C_p$  na  $x/c$  získaná výpočtem 2. modelu



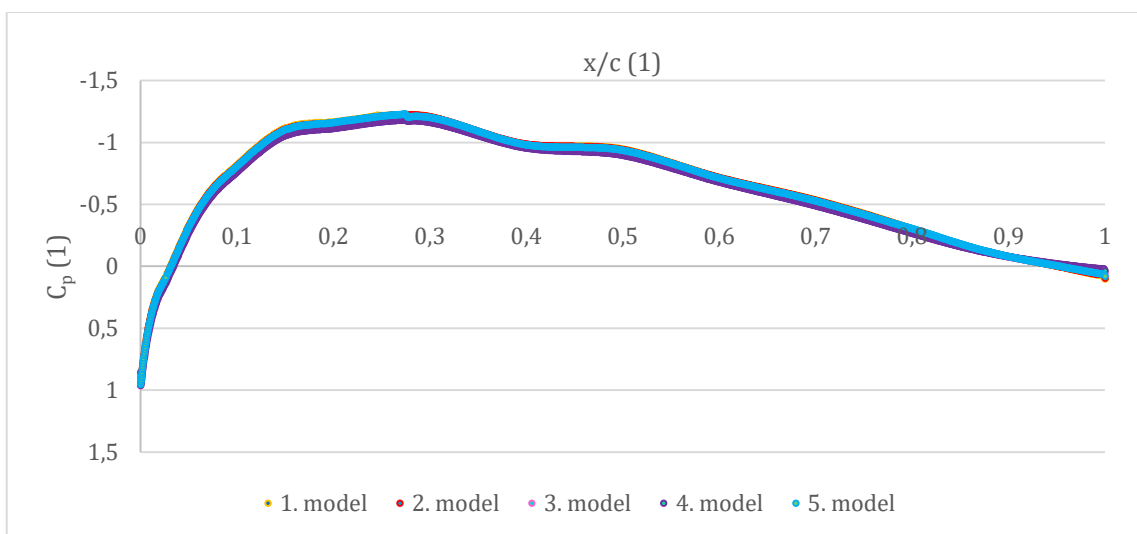
Obrázek 18: Závislost tlakového koeficientu  $C_p$  na  $x/c$  získaná výpočtem 3. modelu



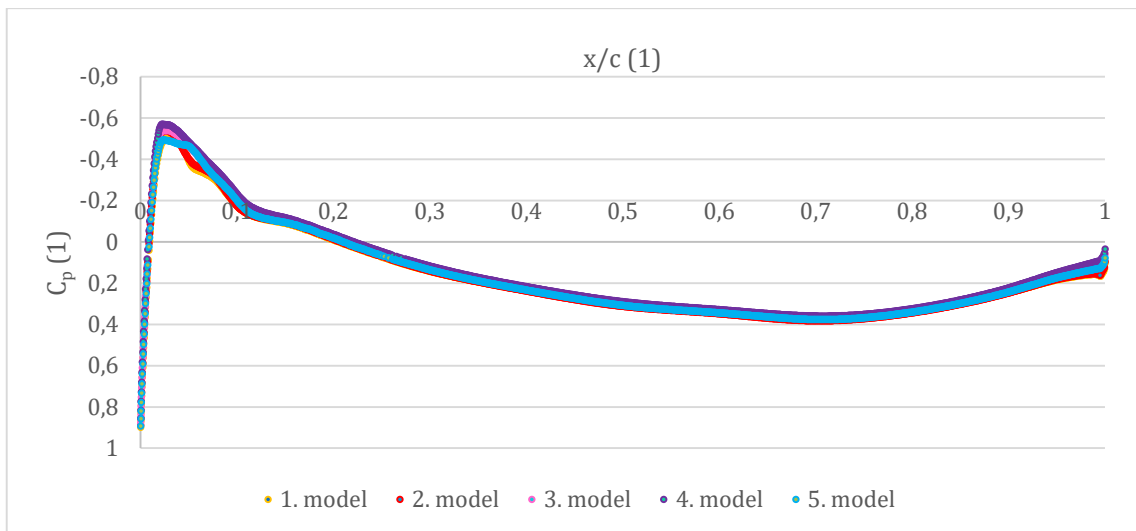
Obrázek 19: Závislost tlakového koeficientu  $C_p$  na  $x/c$  získaná výpočtem 4. modelu



Obrázek 20: Závislost tlakového koeficientu  $C_p$  na  $x/c$  získaná výpočtem 5. modelu

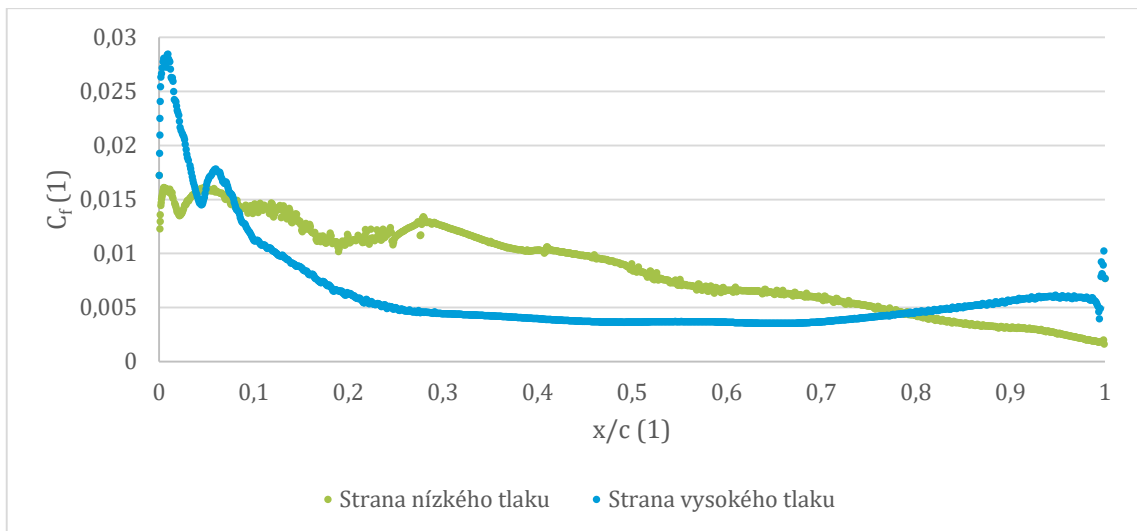


Obrázek 21: Porovnání průběhu tlakového koeficientu  $C_p$  na podtlakové straně profilu



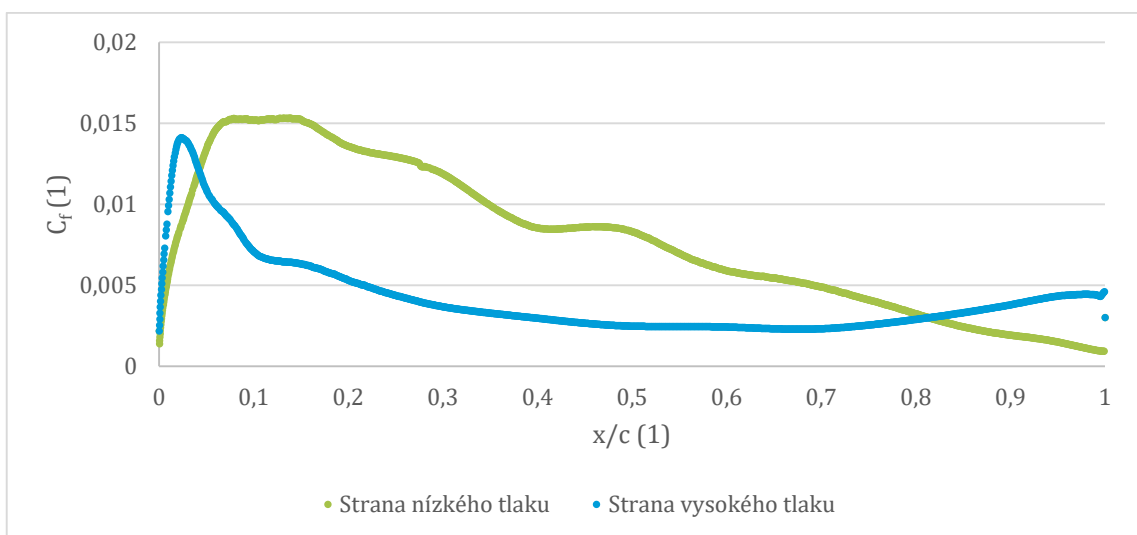
Obrázek 22: Porovnání průběhu tlakového koeficientu  $C_p$  na přetlakové straně profilu

Závislost  $C_f$  na absolutní x-ové souřadnici profilu  $x/c$  pro 1. model je zobrazena na obrázku 23. Třecí koeficient nabývá pouze kladných hodnot, své maximum má na přetlakové straně u náběžné hrany a je  $C_f = 0,028$ . Poté nastává propad na hodnotu  $C_f = 0,0145$  a opětovný růst na hodnotu  $C_f = 0,0173$  v poloze  $x/c = 0,063$ . Dále na přetlakové straně třecí koeficient klesá na hodnotu  $C_f = 3,5 \times 10^{-3}$  v poloze  $x/c = 0,63$ , poté opět roste na hodnotu  $C_f = 5,7 \times 10^{-3}$ , která se nachází u odtokové hrany. Na podtlakové straně profilu se maximum třecího koeficientu nachází opět u náběžné hrany, ale dosahuje pouze hodnoty  $C_f = 0,016$ , poté s drobnými výjimkami v poloze  $x/c = 0,05$ ,  $x/c = 0,12$  a  $x/c = 0,28$  klesá až na hodnotu  $C_f = 1,6 \times 10^{-3}$  u odtokové hrany profilu. Průběh tlakového koeficientu u 1. modelu je nejednoznačný.



Obrázek 23: Závislost třecího koeficientu  $C_f$  na  $x/c$  získaná výpočtem 1. modelu

Průběh takového koeficientu získaného výpočtem 2. modelu je zobrazen na obrázku 24. Oproti průběhu z 1. modelu je průběh jasnější. Maximum na podtlakové straně nastává v poloze  $x/c = 0,08 \div 0,15$ , a to  $C_f = 0,015$ , poté klesá až na hodnotu  $C_f = 9,6 \times 10^{-4}$  u odtokové hrany profilu. Na přetlakové straně nastává maximum v okolí náběžné hrany  $C_f = 0,014$ , poté hodnota třecího koeficientu klesá na  $C_f = 2,3 \times 10^{-3}$  v poloze  $x/c = 0,7$ , kde opět začne růst na  $C_f = 4,5 \times 10^{-3}$  u odtokové hrany profilu. V tomto jediném případě nastává maximální třecí koeficient na přetlakové straně profilu.

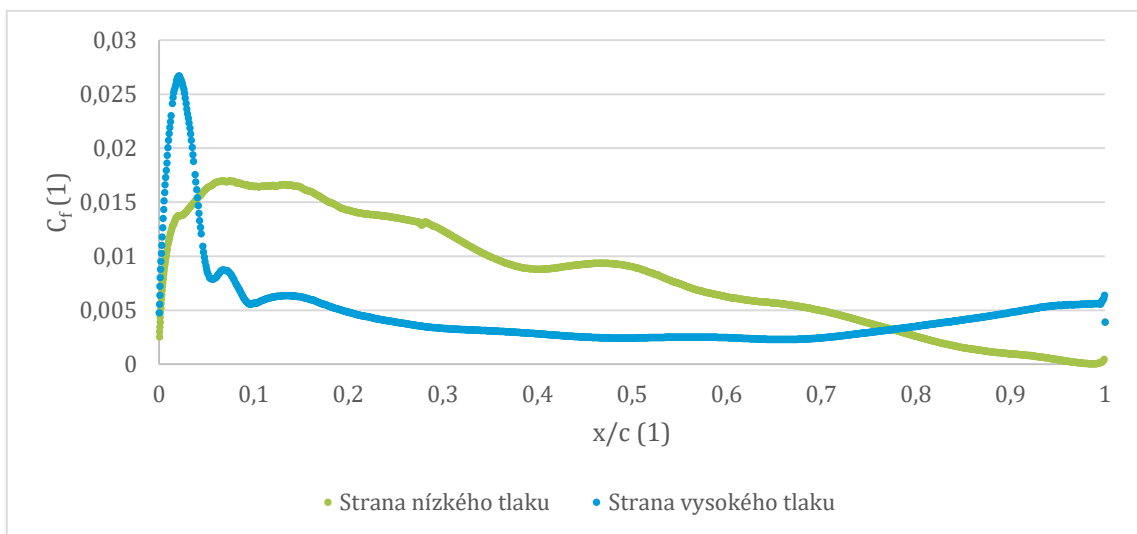


Obrázek 24: Závislost třecího koeficientu  $C_f$  na  $x/c$  získaná výpočtem 2. modelu

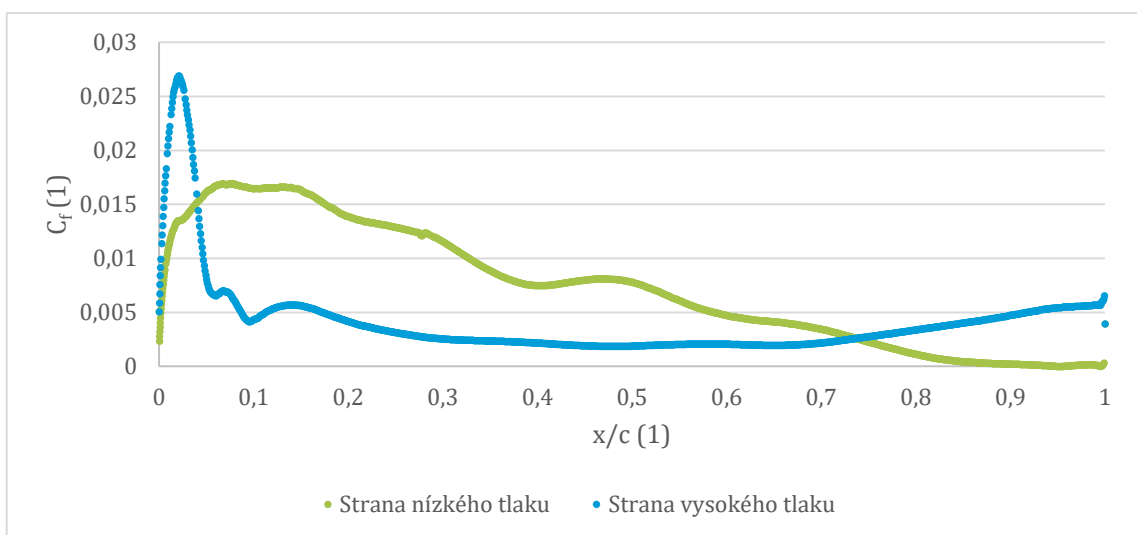
Průběh získaný výpočtem 3. modelu je zobrazen na obrázku 25 a řádově odpovídá průběhům získaným ze 4. modelu na obrázku 26 a 5. modelu na obrázku 27.



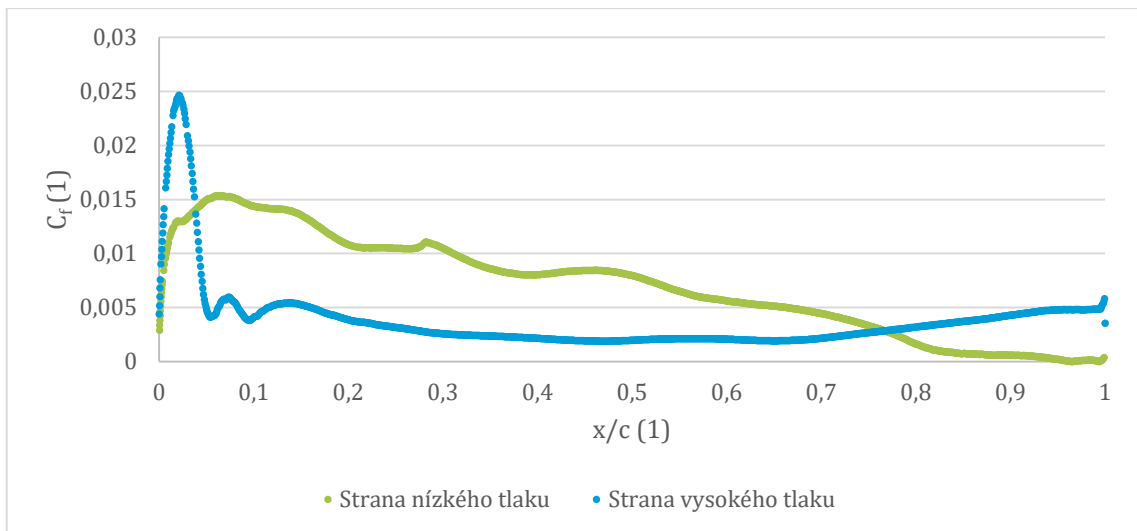
Maximální třecí koeficient je na přetlakové straně u náběžné hrany profilu a je roven  $C_f = 0,014$ , poté rychle klesá na hodnotu  $C_f = 6,6 \times 10^{-3}$  v poloze  $x/c = 0,12$ . Dále pozvolna klesá na hodnotu  $C_f = 2,3 \times 10^{-3}$  v poloze  $x/c = 0,7$ . Třecí koeficient je u odtokové hrany profilu na přetlakové straně roven  $C_f = 4,6 \times 10^{-3}$ . Na podtlakové straně nastává maximum třecího koeficientu v poloze  $x/c = 0,08 \div 0,15$ , a to  $C_f = 0,015$ . Poté třecí koeficient pozvolna klesá na  $C_f = 9,5 \times 10^{-4}$  u odtokové hrany profilu. Srovnání průběhů třecích koeficientů je zobrazeno na obrázku 28 pro podtlakovou stranu profilu a na obrázku 29 pro přetlakovou stranu profilu.



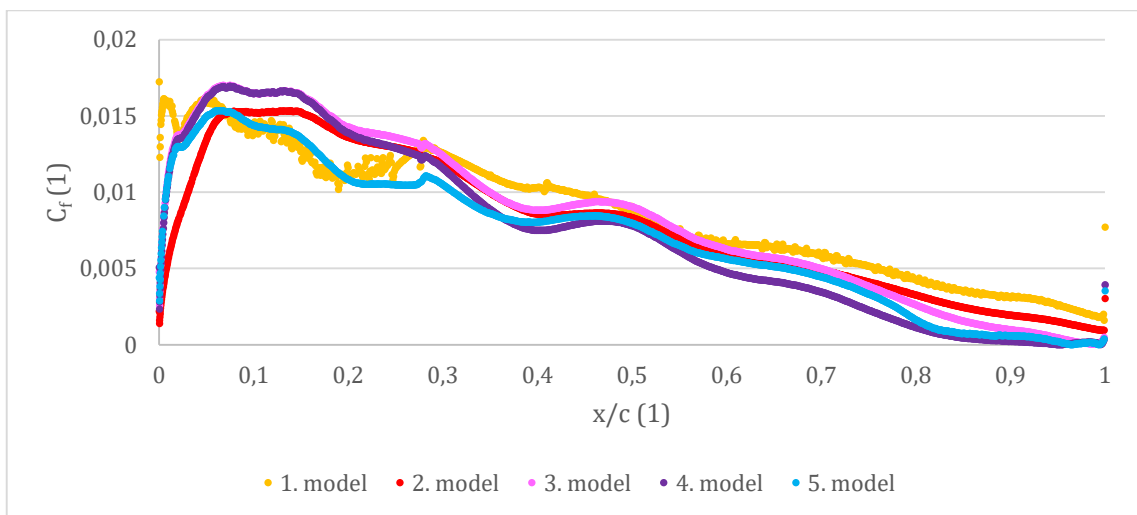
Obrázek 25: Závislost třecího koeficientu  $C_f$  na  $x/c$  získaná výpočtem 3. modelu



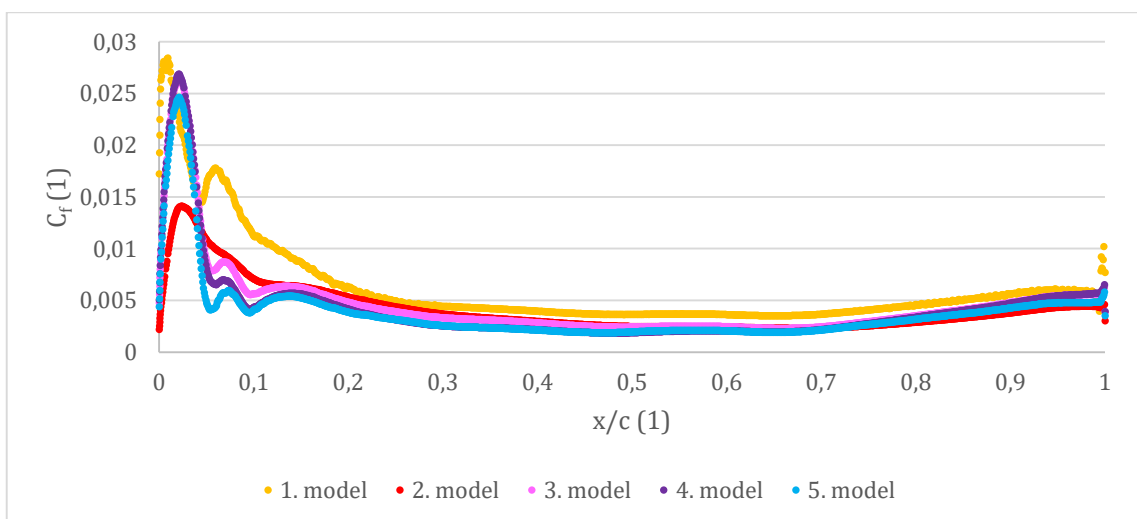
Obrázek 26: Závislost třecího koeficientu  $C_f$  na  $x/c$  získaná výpočtem 4. modelu



Obrázek 27: Závislost třecího koeficientu  $C_f$  na  $x/c$  získaná výpočtem 5. modelu



Obrázek 28: Porovnání průběhu třecího koeficientu  $C_f$  na podtlakové straně profilu



Obrázek 29: Porovnání průběhu třecího koeficientu  $C_f$  na přetlakové straně profilu

Po srovnání tlakového a třecího koeficientu se zde dále nabízí již zmíněné porovnání získaných odporových a vztlakových sil, respektive odporových a vztlakových součinitelů. Vztlakový součinitel je vypočten dle rovnice (3.5.3.1) a odporový dle rovnice (3.5.4.1). Srovnání následuje v tabulce 3.

	1. model	2. model	3. model	4. model	5. model
Odporová síla D (N)	0,75854	0,67701	0,76388	0,73711	0,66806
Vztlaková síla L (N)	26,17260	26,13429	24,91125	24,24763	25,91312
Součinitel odporu $C_d$ (1)	0,02419	0,02159	0,02436	0,02350	0,02130
Součinitel vztlaku $C_l$ (1)	0,83459	0,83336	0,79436	0,77320	0,82631
$C_l/C_d$	34,50382	38,60268	32,61166	32,89565	38,78833

*Tabulka 3: Porovnání výsledků validačních výpočtů pro všech 5 turbulentních modelů*

Z tohoto srovnání je patrné, že nejvíce optimistický je v tomto případě 5. model a nejvíce pesimistický je 3. model, odchylky jsou takřka zanedbatelné. Odporové součinitele se nejvíce liší o 12,54 % a vztlakové o 4,82%. Teorie říká, že odporový koeficient je závislý na tlakovém i třecím koeficientu. Odchylka v získaných průbězích třecího koeficientu na absolutní x-ové souřadnici je pravděpodobnou příčinou následné 12,54% odchylky odporového součinitele  $C_d$ .

Referenční hodnoty bezrozměrných koeficientu odečtených z programu Xfoil pro odpovídající Reynoldsovo číslo a úhel náběhu jsou  $C_l = 0,93$  a  $C_d = 0,015$ .

## 5 Vlastní řešení obtékání zadního křídla studentské formule

### 5.1 Základní náležitosti návrhu aerodynamiky závodních aut

Důvody navrhování aerodynamických prvků, potažmo přitlačných křídel je možné shrnout do 4 následujících bodů [1]:

1. Vysoký přítlak (opak vztlaku) může být požadován pro zvýšení adheze na vozovku.
2. Rozložení přitlačné síly mezi přední a zadní nápravou by mělo být vyvážené
3. Odpor vzduchu by měl být minimální
4. Aerodynamické prvky by měly adekvátně chladit motor, převodovku, brzdy a pilota

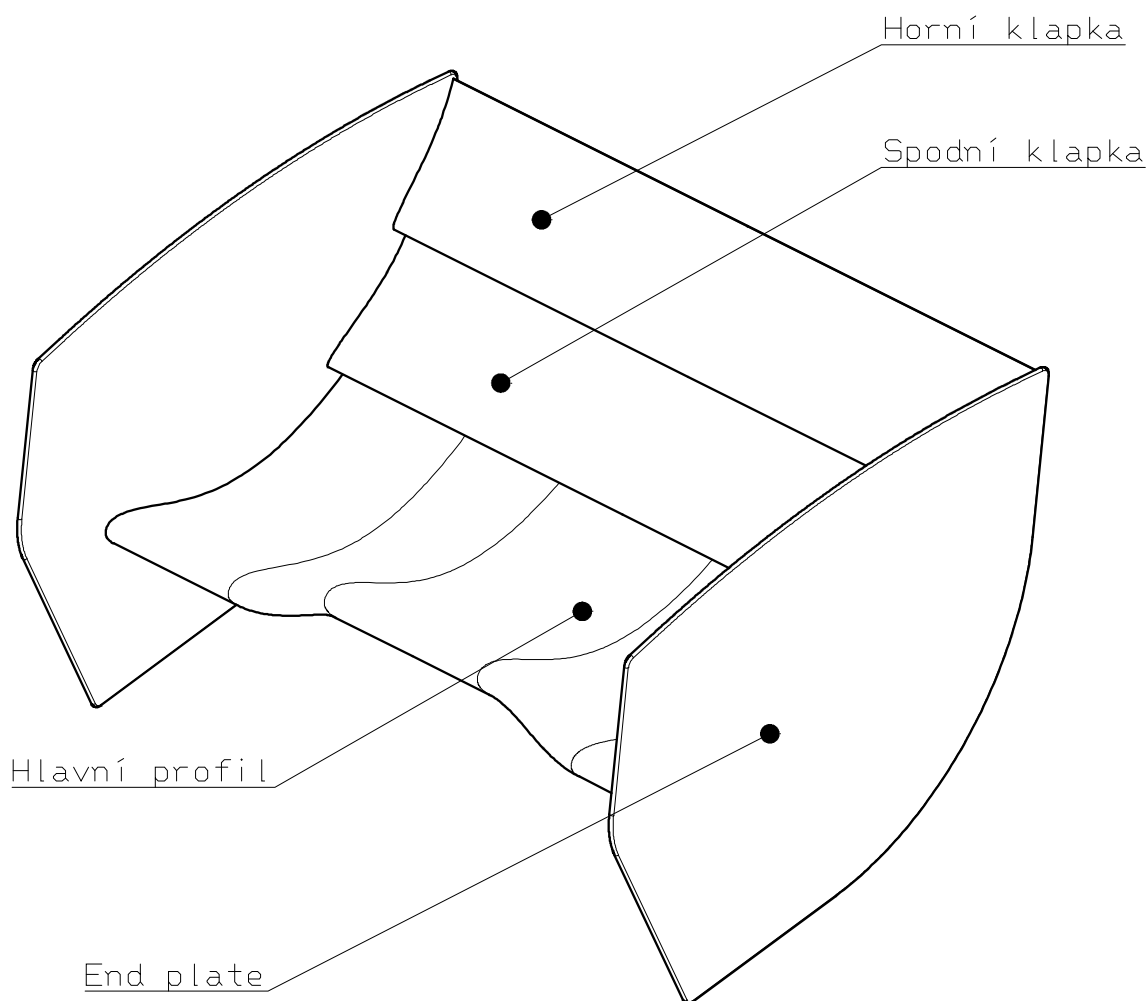
Všechny tyto body je nutné aplikovat pro návrh aerodynamických prvků studentské formule, respektive nového zadního křídla. Návrh zadního křídla je ovlivněn samozřejmě jeho hlavním účelem, zvýšením přítlaku celého vozu. Na druhou stranu je nežádoucí zvyšovat přítlak až s nesmyslným nárůstem odporu a rozvážením působících sil oproti požadovanému rozložení na přední a zadní nápravu. Návrh zadního křídla minimálně ovlivňují požadavky na správné chlazení monopostu.

### 5.2 Koncept nového vozu a aerodynamických prvků

V sezóně 2015/2016 bylo rozhodnuto pro jednu z dosavadních největších mechanických změn. Vůz FSE.05x nebude používat tradiční konstrukci prostorového trubkového rámu, ta bude nahrazen nosnou strukturou, kompozitním monokokem. Nástup monokoku poskytl v jistých oblastech volnou ruku, a tak jeho některé části byly navrženy přímo s ohledem na aplikaci přitlačných křídel. První optimalizací je viditelně zvednutá přední část, díky které bude přední křídlo generovat přítlak po celé své délce. Monokok, s ohledem na minimální rozměry, je rovněž velmi štíhlý, a tak bylo rozhodnuto vyvinout přitlačné křídlo po celé povolené střední části vozu. Tato základní sestava bude doplněna několika dalšími vychytávkami, jako například splitter. Požadavky této koncepce na zadní křídlo jsou vhodné ovlivnění přítlaku a jeho rozvážení mezi nápravami.

### 5.3 Terminologie zadního křídla

Pro správnou orientaci v problematice zadního křídla jsou na obrázku 30 popsány všechny jeho prvky.



Obrázek 30: Popis zadního křídla

#### 5.4 Konstrukční možnosti zadního křídla, volba hlavního profilu

Stávající zadní křídlo používalo jako svůj hlavní profil letecký profil Goe 525 [10] na obrázku 31. Pro návrh nového zadního křídla byla uvažována dostupnost automobilových profilů, které navrhl Enrico Benzing [9] na počátku druhé poloviny 20. století. Profily byly ve své době používány například i ve Formuli 1. Tato aplikace mnohem lépe odpovídá požadavku Formula Student na nízko rychlostní aerodynamické profily.

Z 6 vytvořených profilů byly dle dostupných dat vytipovány 4, Be 153-175 (obrázek 35), Be 122-125 (obrázek 32), Be 122-155 (obrázek 33) a Be 122-185 (obrázek 34).



Obrázek 31: Goe 525



Obrázek 32: Be 122-125



Obrázek 33: Be 122-155



Obrázek 34: Be 122-185



Obrázek 35: Be 153-175

## 5.5 2D simulace zadního křídla

Vzhledem ke zkušenostem týmu se simulacemi bylo rozhodnuto rovnou simulovat celou sestavu tříprvkového zadního křídla. Výpočetní geometrie byla vytvořena v programu Catia, výpočetní síť byla vygenerována v podprogramu Ansys Meshing s počtem buněk mezi 58 000 až 62 000 s ohledem na konkrétní hlavní profil a nastavení polohy profilů. Výpočet byl následně proveden v programu Ansys Fluent 17 s nastavením dle tabulky 4.

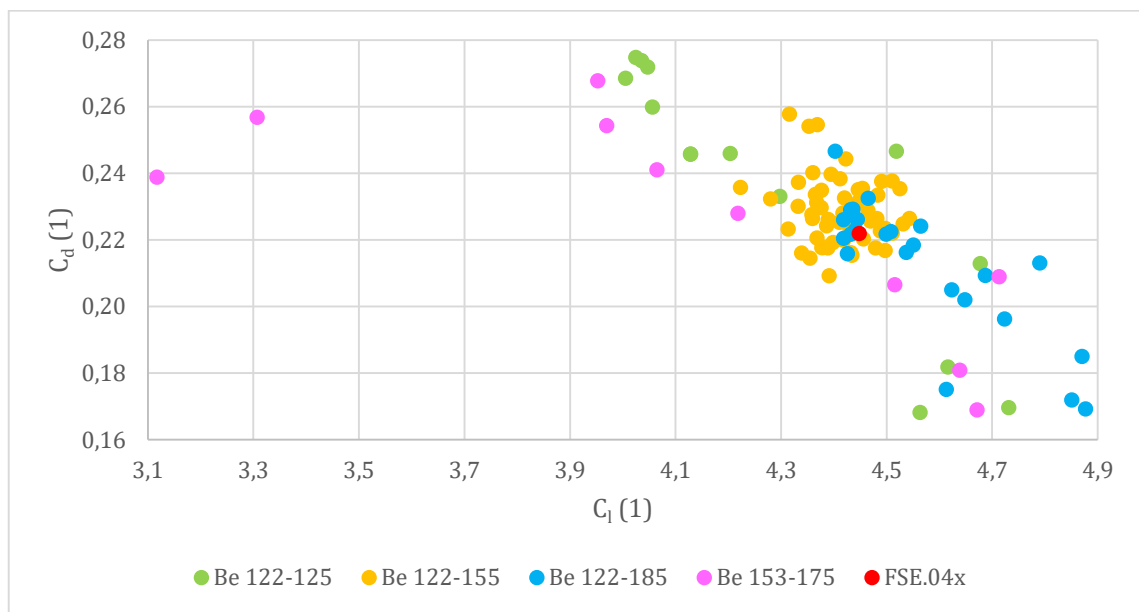
Základní nastavení	
Prostor	2D
Typ řešiče	Pressure-based
Model turbulence	k-omega, SST
Okrajové podmínky	
Hlavní profil, klapky	Wall
Okolí (tekutina)	Interior
Vstup do tunelu	Velocity inlet, 16 m/s
Výstup z tunelu	Pressure outlet
Ostatní stěny tunelu	Symmetry
Metody výpočtu	
Scheme	Simple
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind
Výpočet	
Typ inicializace výpočtu	Hybrid Initialization
Počet iterací	1000

Tabulka 4: Nastavení výpočtu pro 2D simulace zadního křídla

Pro všechny 4 vytipované nové hlavní profily bylo provedeno v součtu 106 2D simulací s různým nastavením vzájemné polohy. Z programu Ansys Fluent byla odečtena přítláčná, respektive vztlaková síla  $L$  a odporová síla  $D$ , která byla přepočtena rovnicí (3.5.3.1) na součinitel vztlaku  $C_l$  a rovnicí (3.5.4.1) na součinitel odporu  $C_d$ .

Pro porovnání byl rovněž proveden nový výpočet stávajícího nastavení zadního křídla modelu FSE.04x, který disponuje po přepočtení ve 2D prostoru koeficientem  $C_l = 4,45$  a  $C_d = 0,22$ .

Výsledky všech 2D simulací jsou zaznamenány na obrázku 36. Za použitelné lze považovat ty výsledky, které leží napravo a pod zobrazeným bodem nastavení FSE.04x. Výsledky a úvaha o nejvhodnějším nastavení ukazují na profil Be-122-185, který při neoptimálnějším nastavení generuje  $C_l = 4,88$  a  $C_d = 0,17$ .



Obrázek 36: Výsledky 2D simulací zadního křídla

## 5.6 3D simulace zadního křídla

Po 2D simulacích přišla na řadu i simulace křídla ve 3D. Dle očekávání jsou výsledky přítláčné a odporové síly ve 3D menší, a to z důvodu omezení šířky křídla na požadovaných 960 mm. Simulaci také částečně ovlivňuje přítomnost hraničních desek, endplatů.

Výsledky 2D simulací ukázaly, že nejvhodnějším profilem je Be 122-185, dále Be 153-175, Be 122-125 a Be 122-155. Tyto výsledky omezily počet kombinací, které se následně počítaly pro zadní křídlo ve 3D.

Pro zrychlení a zjednodušení výpočtu se simulovala pouze symetrická polovina zadního křídla. Geometrie pro vytvoření sítě byla vytvořena v programu Catia V5 a podprogramu Ansys Geometry. Síť byla vygenerována v podprogramu Ansys Meshing, počet buněk sítě se pohybuje okolo 2 500 000 s ohledem na geometrii. Výpočet byl shodně s 2D simulacemi proveden v programu Ansys Fluent 17 s nastavením z tabulky 5. Nyní bylo provedeno 38 3D simulací zadního křídla. K porovnání výsledků sloužil opět přepočítání odporového a vztlakového součinitele.

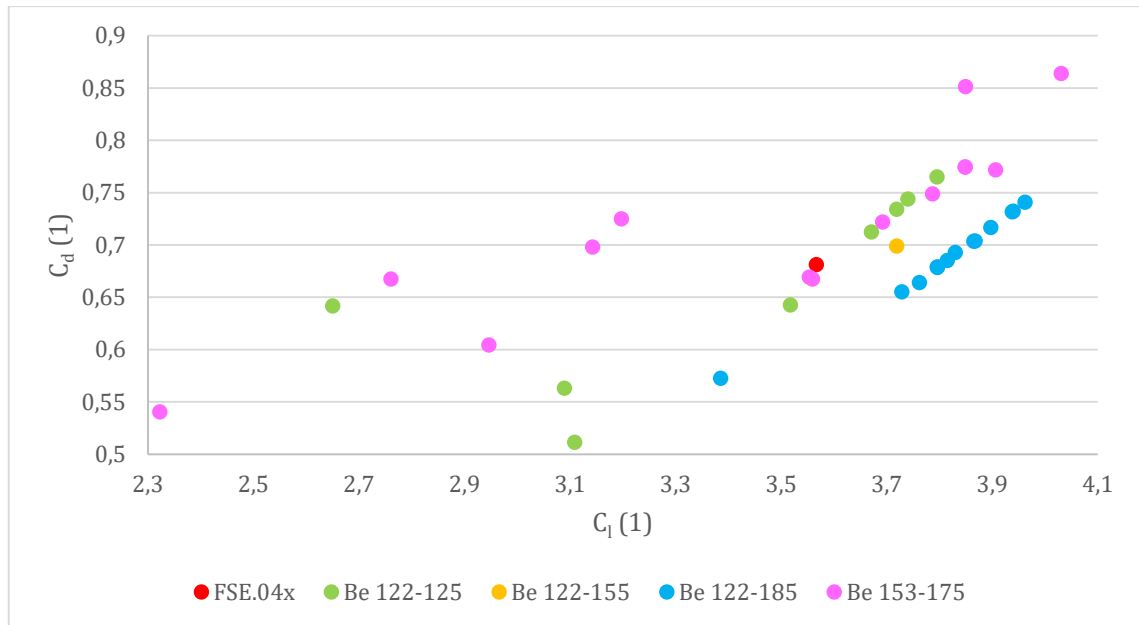
Základní nastavení	
Prostor	3D
Typ řešiče	Pressure-based
Model turbulence	k-omega, SST
Okrajové podmínky	
Hlavní profil, klapky, end plate	Wall
Okolí (tekutina)	Interior
Vstup do tunelu	Velocity inlet, 16 m/s, x-component of flow direction
Výstup z tunelu	Pressure outlet
Symetrie	Symmetry
Ostatní stěny tunelu	Velocity inlet, 16 m/s, x-component of flow direction
Metody výpočtu, Pseudo Transient, High Order Term Relaxation	
Scheme	Coupled
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind
Výpočet	
Typ inicializace výpočtu	Hybrid Initialization
Počet iterací	500

*Tabulka 5: Nastavení výpočtu pro 3D simulace samostatného zadního křídla*



Kritériem pro nevhodnější postavení křídla vůči sobě se opět stalo porovnání se zadním křídlem FSE.04x. Porovnávána byla vztlaková a přítláčná síla, respektive součinitel vztlaku a součinitel odporu.

Zadní přítláčné křídlo monopostu FSE.04x je charakterizováno vztlakovým součinitelem  $C_l = 3,56$  a odporový  $C_d = 0,68$ .



Obrázek 37: Výsledky 3D simulace samostatného zadního křídla

Výsledky, které splňují požadavky na nové zadní křídlo, jsou na obrázku 37 umístěny napravo a pod zobrazením FSE.04x. Rovněž, z výsledků je možno předpokládat, že pro nové zadní křídlo bude nevhodnější profil Be 122-185, který požadavky splňuje nejčastěji, a to i pro nulový úhel náběhu hlavního profilu.

## 5.7 Realita simulací celého monopostu

Pro první simulaci celého monopostu byla zvolena varianta zadního křídla s úhlem náběhu hlavního profilu  $0^\circ$  a hlavním profilem Be 122-185. Na tvorbě sítě a nastavení simulace vozu se podílela celá aerodynamická skupina týmu eForce FEE Prague Formula. Pro výpočet byla použita síť vytvořená v podprogramu Fluent Meshing, nastavení simulace vychází ze zkušeností z dřívějších výpočtů.

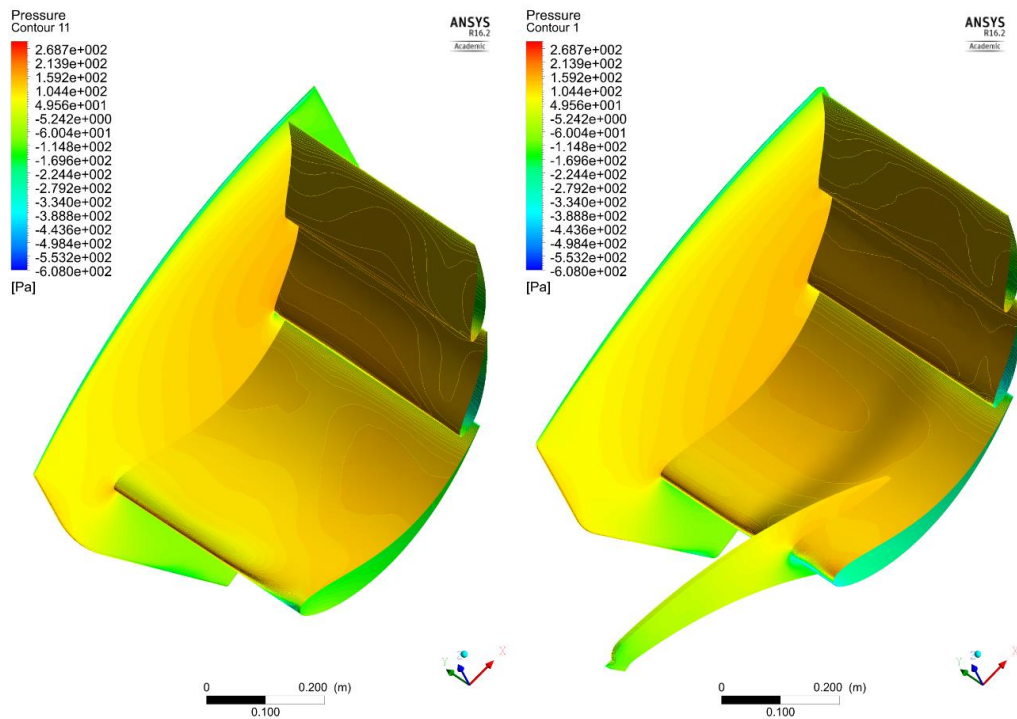
První výpočet nebyl pro zvolenou variantu zadního křídla příznivý, ukázalo se, že správně funguje pouze střední část sestavy. Proto bylo nutné zadní křídlo přepracovat tak, aby fungovalo po celé délce.

Vzhledem k již započaté výrobě klapek zadního křídla bylo rozhodnuto změnit pouze zadní hlavní profil a nastavení klapek vůči sobě. Volba padla na prohnutí hlavního zadního profilu podél y-ové osy tak, aby vzduch plynoucí nejen za helmou pilota, ale i z bočních profilů pokračoval na hlavní zadní profil. Aby bylo možné použít již vyrobené zadní klapky, tak byla prohnuta pouze náběžná hrana profilu. Odtoková hrana zůstala původní, bez prohnutí.

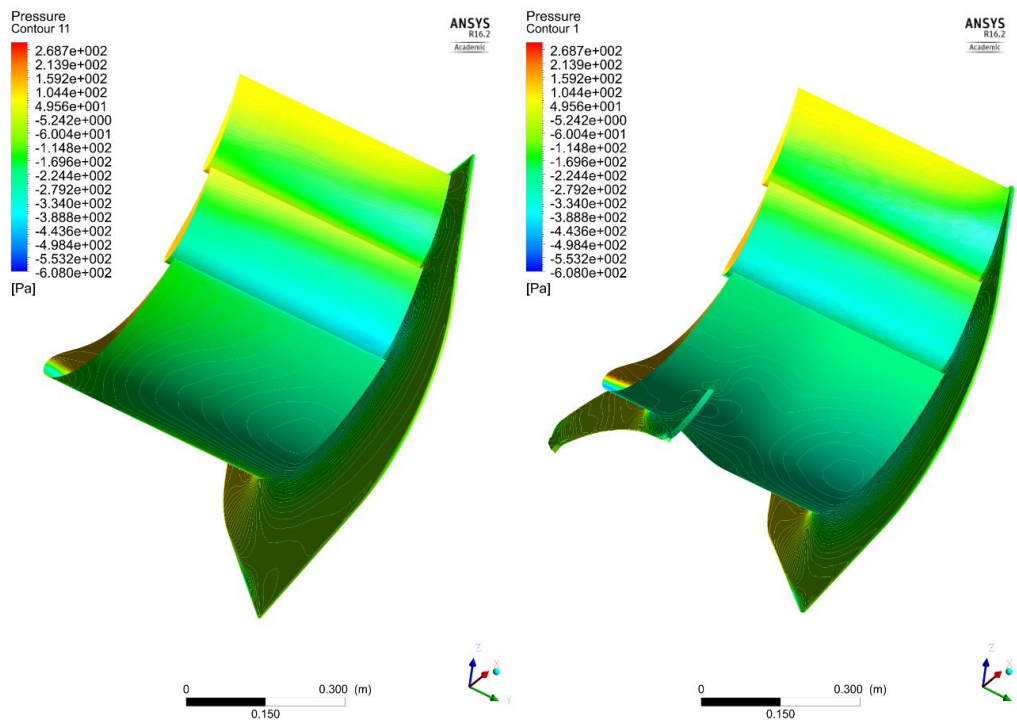
S touto změnou bylo dosaženo zlepšení jak u samotného hlavního profilu, sestavy zadního křídla, tak i celého monopostu. Zlepšení je patrné z tabulky, tentokrát pro porovnání byly použity absolutní hodnoty přítláčných a odporových sil a jejich poměry – efektivita, a to díky shodnému nastavení výpočtu. I přes to, že samostatný prohnutý zadní profil není tak efektivní, jako původní, tak efektivita celého zadního křídla a celého monopostu je lepší. Zlepšení je dále patrné na obrázku 38 a 39, kde je zobrazeno rozložení tlaků po sestavě zadního křídla v simulaci celého monopostu. Na obrázku 38 je vidět zvětšení tlaku působící na krajní horní část hlavního profilu a celou spodní klapku. Dále je na obrázku 39 patrné snížení tlaku působící na spodní stranu hlavního profilu.

	Původní hlavní profil			Prohnutý hlavní profil		
	Přítlak (N)	Odpor (N)	Efektivita (1)	Přítlak (N)	Odpor (N)	Efektivita (1)
Hlavní profil	126,0590	7,5949	16,5980	154,4219	14,4111	10,7155
Spodní klapka	50,5252	49,0029	1,0311	48,9118	51,0220	0,9586
Horní klapka	17,8189	37,0829	0,4805	18,4948	38,7193	0,4777
Zadní end plate	-1,5991	1,5183	-1,0532	0,7113	1,5960	0,4457
Zadní křídlo	192,8041	95,1989	2,0253	222,5398	105,7485	2,1044
FSE.05x	478,3349	225,4924	2,1213	574,3673	241,6791	2,3766

*Tabulka 6: Porovnání použití původního a prohnutého zadního profilu*



Obrázek 38: Porovnání rozložení tlaků po horní straně zadního křídla



Obrázek 39: Porovnání rozložení tlaků po spodní straně zadního křídla

## 5.8 Diskuse řešení a výsledky nového zadního křídla

Vzhledem k zásadním změnám, které monopost FSE.05x prodělal oproti monopostu FSE.04x je velmi složité diskutovat o vylepšení a přínosu nového zadního křídla pro

samotný monopost. U monopostu FSE.05x se povedlo jak navýšit přítlak, tak i vylepšit poměr mezi samotným přítlakem a odporem. To dokazují i vztlakové, respektive odporové součinitele uvedené v tabulce 7. Hodnota vztlakového koeficientu také odpovídá udávané hodnotě vztlakového koeficientu z literatury [3], který je pro prototypní automobil okolo  $C_l = -3$ . Vzhledem k vývoji aerodynamických prvků pro použití v nízkých rychlostech je odporový koeficient  $C_d$  větší než 1.

Přítlak celého monopostu je pak navýšen o 13,5%, zatímco odpor o pouhých 0,23%, poměr mezi přítlakem a odporem, efektivita aerodynamiky vozu, se zvýšil o 13,24 %, to vše je porovnáváno s monopostem FSE.04x. Dosažené výsledky je možné považovat za velmi uspokojivé. Zlepšení nastalo i u samotného zadního křídla, kdy přítlak vzrostl o 3,2% a odpor klesl o 1,54 %. Efektivita zadního křídla tedy v součtu vzrostla o 4,77%. Srovnání absolutních hodnot je provedeno v tabulce 8. Většina změn pramení z nové nosné konstrukce, monokoku, která umožnila využití předního křídla po celé délce, na rozdíl od starého, kde fungují pouze jeho boky, nebo použití profilů na boku monopostu na rozdíl od difuzoru na minulé verzi.

	FSE.04x		FSE.05x	
	Vztlak	Odpor	Vztlak	Odpor
Síla (N)	-506,0476	241,1198	-574,3673	241,6791
Čelní ploch (m <sup>2</sup> )	1,1334		1,2300	
Součinitel (1)	-2,8475	1,3568	-2,9781	1,2531

Tabulka 7: Porovnání vztlakových a odporových součinitelů monopostu FSE.04x a FSE.05x

	FSE.04x			FSE.05x		
	Přítlak (N)	Odpor (N)	Efektivita (1)	Přítlak (N)	Odpor (N)	Efektivita (1)
Hlavní profil	130,3323	8,1598	15,9724	154,4219	14,4111	10,7155
Spodní klapka	22,0069	53,9888	0,4076	48,9118	51,0220	0,9586
Horní klapka	65,1680	42,7452	1,5246	18,4948	38,7193	0,4777
Zadní end plate	-1,7749	2,5053	-0,7084	0,7113	1,5960	0,4457
Zadní křídlo	215,7324	107,3992	2,0087	222,5398	105,7485	2,1044
Celý monopost	506,0476	241,1198	2,0987	574,3673	241,6791	2,3766

Tabulka 8: Porovnání přítlaků a odporů monopostu FSE.04x a FSE.05x

Samotné zadní křídlo ukazuje, jak zdánlivě jednoduchá řešení jsou aplikovatelná a jak reálně fungují. Velký posun zadního křídla nastal po zvolení odlišného hlavního profilu, který svým původním použitím lépe vyhovuje aplikaci ve Formuli Student.

Letošní vývoj také poukázal na neadekvátnost samostatných simulací. 2D simulace mají své opodstatnění zejména při výběru nových profilů, ale nejlepší nastavení ve 2D nemusí být nutně nejlepší nastavení ve 3D simulacích. Samostatné 3D simulace zadního křídla jsou dle publikovaných zkušeností Saunderse a Wordleyho [5] neadekvátní. Dle jejich práce se při simulaci celého monopostu Formula Student přitlak zadního křídla sníží přibližně o 30 %. Tato informace se potvrdila i ve vlastních výpočtech. Do proudění okolo zadního křídla simulovaného s celým monopostem vstupuje proudění takřka okolo celého vozu, zejména okolo helmy pilota a v případě FSE.05x i okolo bočních přitlačných elementů.

Znalosti získané pro vývoj aerodynamických prvků FSE.05x (obrázek 40) budou jistě zužitkovány i pro vývoj nadcházejícího aeropaketu FSE.06. Cílem následujícího vývoje je ještě další proniknutí do problematiky aerodynamiky nízkých rychlostí. Již nyní je možné stanovit plán na další vývojovou sezónu. V první řadě je nutné validovat všechny vypočtené hodnoty reálnými zkouškami, ať už běžným měřením na závodní dráze s formulí, či jednodušší validační zkouškou v aerodynamickém tunelu. Na základě těchto zkoušek bude kalibrováno nastavení nadcházejících výpočtů. S ohledem na markantní letošní změny bude další rok ve znamení odladění stávajícího řešení. Motivací pro drobné změny jsou nejen finanční důvody, nákladnost výroby nových forem při změně profilů, ale také reálně krátká doba, za kterou je nutné vyvinout, vyrobit a odzkoušet finální řešení.



Obrázek 40: FSE.05x [11]

## 6 Závěr

Cílem této práce bylo provést rešerši aerodynamiky zadního křídla studentské formule s důrazem na vysvětlení vzniku aerodynamických sil.

Na začátku práce byl diskutován přínos aerodynamických prvků jako návrhového celku pro vozy Formula Student, jejich opodstatnění a důvody pro zaobírání se touto problematikou. Rovněž byl uveden krátký vhled do historie aerodynamických prvků této soutěže a pravidla soutěže, které musí tato konstrukce splňovat.

Validační výpočet provedený v další kapitole ukazuje použití poněkud specifické sítě pro samostatný aerodynamický profil a porovnání několika běžných turbulentních modelů.

Znalosti z předchozích kapitol dále umožnily provést vlastní řešení obtékání zadního křídla, jehož konstrukce byla následně použita pro nový monopost týmu eForce FEE Prague Formula s velmi uspokojivými výsledky. Nové zadní křídlo ukázalo další cestu vývoje aerodynamických prvků. Kromě vylepšení samotného přítlaku a efektivity aerodynamických prvků bylo možné také porovnat vztakový a odporový koeficient s udávanými hodnotami z literatury.

## Literatura

- [1] BARNARD, R. H. Road Vehicle Aerodynamic Design – An Introduction. London, 1996. Longman.
- [2] HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering. Germany, 1998. Society of Automotive Engineers Inc.
- [3] KATZ, Joseph. Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Cambridge, USA, 1995. Bentley Publishers.
- [4] MILLIKEN, William, F. a MILLIKEN, Douglas L. Race Car Vehicle Dynamics. Warrendale, 1995. SAE International.
- [5] WORDLEY, Scott a SAUNDERS, Jeff. Aerodynamics for Formula SAE: Initial Design and Performance Prediction [online]. [cit 9. 8. 2016]. Dostupné z: <http://www.sae.org/technical/papers/2006-01-0806>.
- [6] SAE. Competition History 1981 – 2004 [online]. [cit 6. 5. 2016]. Dostupné z: <http://www.sae.org/students/fsaehistory.pdf>.
- [7] SAE. 2015 Formula SAE® Rules [online]. [cit 8. 5. 2016]. Dostupné z: [http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16\\_fsaerules.pdf](http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsaerules.pdf).
- [8] PROFIL GOE 226 [online]. [cit 30. 4. 2016]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=goe226-il>.
- [9] BENZING, Enrico. Aerodynamické profily [online]. [cit 1. 5. 2016]. Dostupné z: <http://www.benzing.it/enrico.profilo.htm>.
- [10] PROFIL GOE 525 [online]. [cit 30. 4. 2016]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=goe525-il>.
- [11] FSE.05x [online]. [cit 10. 8. 2016]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/filipfabian/28608100460/>.
- [12] FORMULA SAE MISSOURI [online]. [cit 6. 5. 2016]. Dostupné z: [http://formulasae.mst.edu/wp-content/uploads/sites/4/2015/09/14436767414\\_5e402a3e93\\_o.jpg](http://formulasae.mst.edu/wp-content/uploads/sites/4/2015/09/14436767414_5e402a3e93_o.jpg).
- [13] GLOBAL FORMULA RACING [online]. [cit 6. 5. 2016]. Dostupné z: <http://www.global-formula-racing.com/wp-content/uploads/2016/02/gfr11c.jpg>.
- [14] SYMETRICKÝ A ZAKŘIVENÝ PROFIL [online]. [cit 11. 8. 2016]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Images/shape.gif>.

- [15] POPSANÝ PROFIL [online]. [cit 12. 8. 2016].  
Dostupné z: <http://www.slideshare.net/asertseminar/transonic-turbulent-flow-around-an-aerofoil-using-cfd>.
- [16] ROZLOŽENÍ TLAKŮ PO AERODYNAMICKÉM PROFILU [online].  
[cit 12. 8. 2016]. Dostupné z:  
<http://www.laazatec.cz/images/telo2004/pruvodce/procleti4.jpg>.
- [17] FERARRI, Enzo. Aerodynamics are for people who can't build engines  
[online]. [cit 13. 8. 2016]. Dostupné z:  
<http://www.brainyquote.com/quotes/quotes/e/enzoferrar291952.html>.