



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

CFD PŘI NÁVRHU AERODYNAMIKY ZÁVODNÍCH AUTOMOBILŮ

CFD METHODS FOR DESIGN OF RACE CAR AERODYNAMICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Černík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Daniel Černík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

CFD při návrhu aerodynamiky závodních automobilů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výpočtové modelování proudění (CFD) je dnes nedílnou součástí při návrhu aerodynamiky automobilů. Vývoj vozů Formule 1 je dokonce jedním z motorů dalšího intenzivního rozvoje CFD. CFD ovšem není jen nástrojem pro tvarovou optimalizaci, vizualizaci proudění nebo zjištění silových poměrů na obtékaných površích. Je také perfektním prostředkem pro lepší pochopení samotné podstaty některých aerodynamických jevů.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je zpracování rešerše využití CFD v oblasti návrhu závodních automobilů a v části praktické připravit učební pomůcku (video, prezentace, manuál) pro předmět Hydromechanika, která bude na základě výpočtových simulací zadního přitlačného křídla ilustrovat jednotlivé proudové jevy: vznik vzlaku a odporu (třecí vs. tvarový, indukovaný odpor), odtržení mezní vrstvy (různé možnosti vizualizace), úplav, atd.

Seznam doporučené literatury:

CENGEL, Yunus A. a John M. CIMBALA. Fluid Mechanics - Fundamentals and Applications. 2. Boston: McGraw Hill, 2010.

KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. 1. Cambridge, USA: Bentley Publishers, 2006.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Předložená bakalářská práce se zabývá využitím CFD při návrhu aerodynamiky závodních automobilů, konkrétně Formule 1. V první kapitole jsou popsány základní pojmy mechaniky tekutin. V dalších kapitolách jsou zmíněny způsoby zjišťování aerodynamických vlastností vozů Formule 1, úvod do CFD a aerodynamické prvky vozu Formule 1. Následuje kapitola věnovaná využití CFD ve Formuli 1. Poslední kapitolou je praktická část, kde je řešeno obtékání zadního přitlačného křídla vozu Formule 1 ve 2D prostoru pomocí CFD.

Klíčová slova

Aerodynamika, CFD, Formule 1

Abstract

This bachelor's thesis deals with usage of CFD in design of race car aerodynamics, more specifically Formula 1 cars. The first part describes basic concepts of fluid dynamics. Following chapters talk about methods for determining aerodynamic properties of Formula 1 cars, introduction to CFD and aerodynamic devices on Formula 1 car. Next chapter is devoted to usage of CFD in Formula 1 industry. The last chapter deals with CFD simulations of Formula 1 rear wing in 2D.

Key words

Aerodynamics, CFD, Formula 1

Bibliografická citace

ČERNÍK, Daniel. *CFD při návrhu aerodynamiky závodních automobilů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132391>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **CFD při návrhu aerodynamiky závodních automobilů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 20. 5. 2021

Daniel Černík

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Ing. Pavlu Rudolfovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování této bakalářské práce. Rovněž bych rád poděkoval mé rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

Obsah

Úvod	11
1 Aerodynamika	12
1.1 Laminární proudění a turbulentní proudění	12
1.2 Reynoldsovo číslo	12
1.3 Mezní vrstva	12
1.4 Odtržení mezní vrstvy, úplav, vírové struktury	13
1.5 Aerodynamický odpor, vztlak, boční síla	14
1.6 Princip funkce křidel	15
2 Způsoby zjišťování aerodynamických vlastností Formule 1	16
2.1 Testování na silnici	16
2.2 Aerodynamický tunel	17
2.3 CFD	18
2.4 Zhodnocení	19
3 CFD	20
3.1 Druhy CFD softwarů	20
3.2 Postup CFD výpočtu	20
3.3 Síť	20
3.4 OP	22
3.4.1 OP stěna	22
3.4.2 OP vstup a výstup	22
3.4.3 Symetrická OP	23
3.5 Výpočet turbulentního proudění a turbulentní modely	23
3.6 Oblasti využití CFD	24
4 Aerodynamické prvky Formule 1	25
4.1 Přední přitlačné křídlo	26
4.2 Zadní přitlačné křídlo	27
4.3 Podlaha a difuzor	27
4.4 Barge boardy	29
5 CFD ve Formuli 1	30
5.1 Výpočetní hardware a software ve F1	30
5.2 Simulace monopostu F1 pomocí CFD	30
5.3 Úplav tvořený vozem F1	32
5.4 Simulace monopostů F1 jedoucích za sebou	33
5.5 Vývoj více-elementového předního křídla	37
5.6 Zhodnocení CFD ve F1	40
6 CFD výpočet více-elementového přitlačného křídla	41
6.1 Kalibrace	41
6.1.1 Dekompozice	41
6.1.2 Síť	41
6.1.3 Zjemnění sítě v oblasti mezní vrstvy profilu	42
6.1.4 OP a výpočet	43
6.1.5 Postprocessing	45

6.2	Simulace více-elementového křídla	46
6.2.1	Dekompozice	47
6.2.2	Sít' a OP	47
6.2.3	Postprocessing	48
	Závěr	49
	Seznam použitých zdrojů	50
	Seznam použitých symbolů a zkratk	54
	Seznam příloh	55

Úvod

Závodní automobily byly dříve hlavně o silných motorech. Později však začala vznikat různá omezení na výkon a objem motoru a bylo nutné najít jinou cestu, jak být v cíli dřív než soupeři. Tou cestou se stala aerodynamika. Konkrétně ve Formuli 1 se první aerodynamické prvky začaly objevovat v 60. letech. Prvně se jednalo o jednoduchá přitlačná křídla, která se postupně rozvíjela i s dalšími aerodynamickými prvky. Dospělo to až do takové fáze, jakou můžeme vidět v roce 2021, kde jsou všechny aerodynamické prvky složitě tvarované a každý z nich plní určitou funkci. Pro správné fungování aerodynamiky vozu musí být zaručena spolupráce jednotlivých prvků dohromady.

Obrovskou pomocí při návrhu aerodynamiky závodních vozů byl rozvoj počítačových technologií a tím pádem možnost řešení rovnic mechaniky tekutin numericky pomocí CFD (z anglického slova Computational Fluid Dynamics). CFD ve Formuli 1 inženýrům slouží jako virtuální prostředí pro testování aerodynamických vlastností vozů F1. Klíčovým faktorem jsou čas a peníze. Svým finančním zázemím si týmy F1 mohou dovolit investovat do superpočítačů s velkým výkonem připravených počítat úlohy CFD. Z časového hlediska je mnohdy náročné testovat fyzický model vozu, případně nemožné, pokud ještě není vyrobený. Proto nastupuje CFD, které je vhodné i pro řešení „what if“ studií. Například lze v celku rychle zjistit, jak se změní proudění kolem vozu, pokud se změní poloha nějakého aerodynamického prvku.

1 Aerodynamika

Aerodynamika je věda zabývající se pohybem plynů a jejich interakcí s pevnými objekty, které jsou umístěny v jejich proudovém poli jako překážky. Jedná se o podoblast mechaniky tekutin [1].

1.1 Laminární proudění a turbulentní proudění

Laminární proudění je charakterizováno rovnoměrným pohybem částic ve vrstvách, které jsou na sebe rovnoběžné. Dochází pouze k minimálnímu míšení, a to především na mikroskopické úrovni [2]. Při jednorozměrném proudění v trubici má rychlostní profil tvar paraboloidu, přičemž nejvyšší rychlost je ve středu. Laminární proudění se vyskytuje při malých rychlostech a u viskózních tekutin, jakými jsou například oleje. Při zvyšování rychlosti si začneme všimnout náznaků neustáleného pohybu, což naznačuje přechodovou oblast mezi laminárním a turbulentním prouděním. Při dalším zvyšování rychlosti se proudění změní na zcela turbulentní, které je charakterizováno velice neuspořádaným pohybem částic a míšením. Je to dáno tím, že částice mají kromě postupné rychlosti i tzv. flukтуаční (turbulentní) složku rychlosti. Flukтуаční složka mění v čase velikost i směr. Rychlostní profil se svým tvarem blíží profilu ideální kapaliny, v důsledku přítomnosti turbulence, avšak s nulovou rychlostí u stěny potrubí [3]. Porovnání laminárního (vlevo) a turbulentního (vpravo) proudění vidíme na obrázku č. 1.

Při řešení většiny inženýrských problémů převládá turbulentní proudění. Jeho charakter ale bohužel komplikuje výpočty.



Obrázek 1: Laminární a turbulentní proudění [2]

1.2 Reynoldsovo číslo

K určení, zda se jedná o laminární nebo turbulentní proudění, slouží bezrozměrná veličina zvaná Reynoldsovo číslo.

Reynoldsovo číslo je definováno vztahem

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} [-] \quad (1.1)$$

kde ρ je hustota média, v je střední rychlost proudícího média, L je charakteristický rozměr (např. čelní plocha vozidla) a μ je dynamická viskozita média.

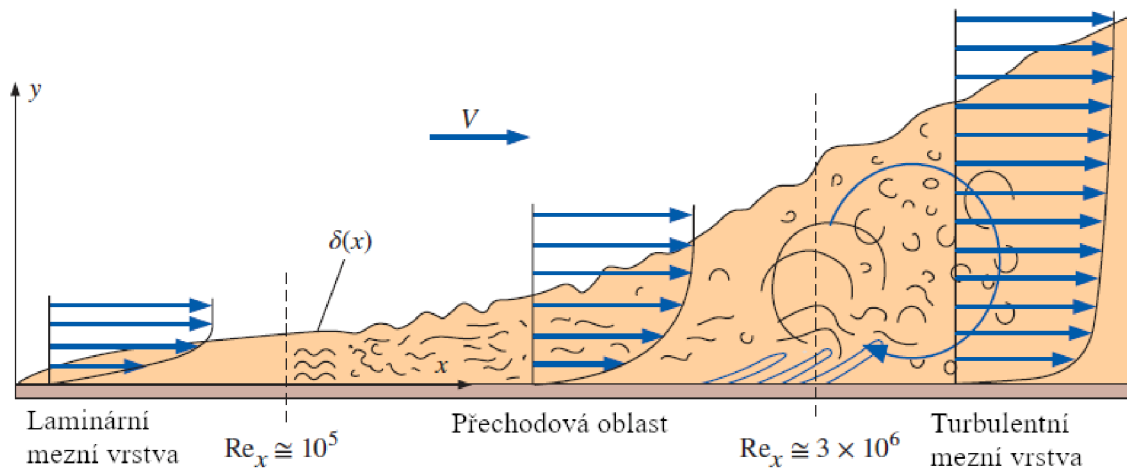
Reynoldsovo číslo lze formulovat jako podíl setrvačných a viskózních sil. Setrvačné síly souvisí s hybností tekutiny. Viskózní síly jsou vlastně smykové síly, které se tvoří mezi vrstvami tekutiny. Z toho vyplývá, že pokud převažují viskózní síly, tak bude tekutina proudit laminárně, protože smykové síly zabrání vzniku flukтуаční složky rychlosti. Naopak pokud převažují setrvačné síly, bude proudění turbulentní. To znamená, že laminární proudění značí malé Reynoldsovy čísla a turbulentní velké Reynoldsovy čísla. Experimentálně se zjistilo, že proudění v úzké trubici je laminární pro hodnoty $Re < 2300$. Mezi 2300 a 4000 je přechodová fáze a při více než 4000 je proudění turbulentní [3].

1.3 Mezní vrstva

Proudění kolem obtékaného tělesa lze rozdělit na 2 oblasti: tenká mezní vrstva u povrchu tělesa, kde nelze zanedbat účinky viskózních sil, a oblast mimo mezní vrstvu, kde je viskozita

zanedbatelná a uvažujeme zde vlastnosti ideální tekutiny. V těsné blízkosti u stěny dochází k ulpívání tekutiny. Jak sledujeme proudění dál od stěny, tak se rychlost zvyšuje, až dosáhne 99% hodnoty volného proudění [4].

Chování mezní vrstvy je možné sledovat na tenké rovné desce umístěné v proudění, které je rovnoběžné s deskou, viz obrázek č. 2. Mezní vrstva se začíná tvořit na náběžné hraně a je laminární. Reynoldsovo číslo se lineárně zvyšuje se vzdáleností, a tudíž tloušťka mezní vrstvy roste také. V určité vzdálenosti se začínají objevovat narušení proudů a vrstva nemůže zůstat laminární, začíná tedy přechodová fáze, kde se mezní vrstva mění na turbulentní. Začátek přechodu charakterizuje kritická hodnota Reynoldsova čísla, $Re = 1 \times 10^5$. Při dosažení hodnoty $Re = 3 \times 10^6$ je mezní vrstva kompletně turbulentní. Tloušťku mezní vrstvy δ nelze přesně definovat. Tloušťka mezní vrstvy je větší u turbulentního proudění [3].

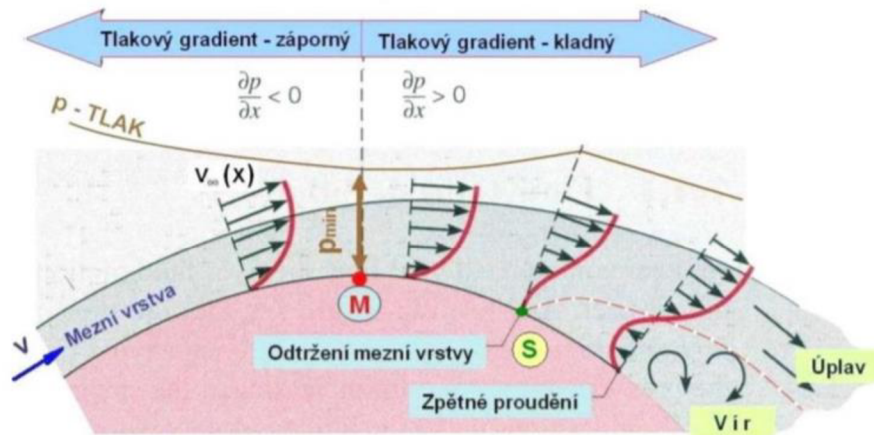


Obrázek 2: Mezní vrstva, upraveno z [3]

1.4 Odtržení mezní vrstvy, úplav, vírové struktury

Při obtékání nekonečně dlouhé tenké desky se mezní vrstva neodtrhne, protože se nemění statický tlak. Jiná situace nastane u tvarovaných profilů, jako jsou například profily přitlačných křídel. Odtržení mezní vrstvy sledujeme na obrázku č. 3. Proudění má u náběžné hrany nízkou rychlost a vysoký tlak, který se postupně snižuje až dosáhne minimální hodnoty v bodě „M“. Tloušťka mezní vrstvy je malá a proudění nemá tendenci se odtrhnout. V tomto úseku je tlakový gradient záporný. Směrem doprava od bodu M se tlak zvyšuje, v této části je tlakový gradient kladný. V bodě „S“ vzniká inflexní bod. Část proudění změnila směr a dochází ke zpětnému proudění [3].

Oblast za tělesem, kde došlo k odtržení mezní vrstvy, se nazývá úplav. Úplav je charakterizován nízkou rychlostí v centru a vysokou rychlostí na krajích a také vysokými smykovými napětími [3].



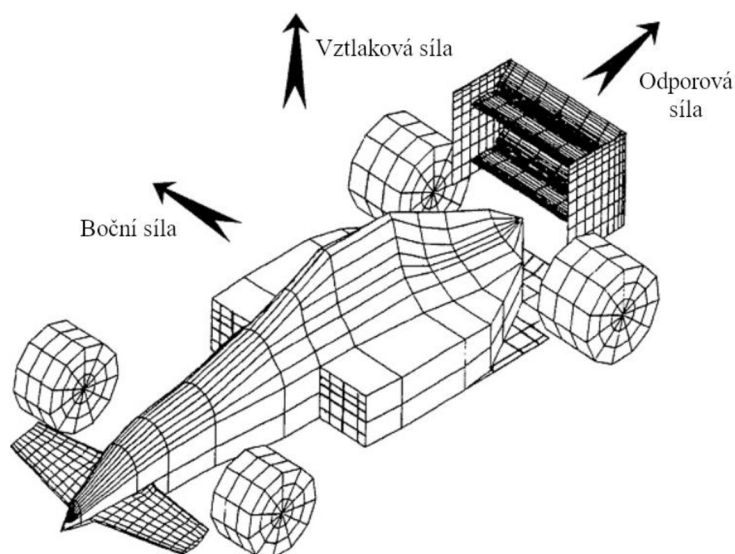
Obrázek 3: Odrážení mezní vrstvy [5]

Vířivost je vektorové pole, které udává lokální míru okamžité rotace oblasti tekutiny. V mechanice tekutin má význam, který se dá přirovnat k úhlové rychlosti v mechanice tuhých těles [6].

Vír je lokální struktura v zavířené oblasti tekutiny. Víry mají trubkové jádro a kolem jeho osy obíhají proudnice, kterými mohou být přímky nebo křivky. Turbulentní proudění je plné vírů o různých velikostech, směrech a energiích [3].

1.5 Aerodynamický odpor, vztlak, boční síla

Existují 2 základní síly, které působí na vozidlo. Tlaková síla, která působí kolmo na povrch vozidla a smyková síla, která působí rovnoběžně s povrchem vozidla. Obě síly se podílejí na vzniku vztlaku a odporu. Další silou, která působí na vozidlo, je boční síla, která je vyvolána působením účinků bočního větru. Výsledné silové působení na vozidlo vidíme na obrázku č. 4 [7].



Obrázek 4: Síly působící na vozidlo, upraveno z [7]

Odporová síla (odpor) působí proti směru tělesa a obecně se skládá ze 3 složek. Tlaková složka, která převažuje u těles kulatého a hranatého tvaru. Složka třecí je typická pro tělesa proudnicového tvaru, kde vlivem mezní vrstvy na povrchu působí smykové síly proti pohybu tělesa. Poslední složkou je indukovaný odpor, který je způsoben víry na konci křídel.

Vztlaková síla (vztlak) působí v normálovém směru a podle tvaru obtékaného tělesa může být kladná nebo záporná. V druhém případě se jedná o přítlačnou sílu (přítlak), která se využívá u závodních automobilů. Přítlačná síla zvyšuje tření pneumatiky s vozovkou, a tím pádem umožňuje řidiči projet zatáčku vyšší rychlostí, aniž by vozidlo ztratilo trakci. Se zvyšující se přítlačnou silou narůstá odporová síla, takže je auto pomalejší na rovinkách. Celé je to tedy o kompromisu mezi nejvyšší přítlačnou silou a nejmenší odporovou silou, nelze mít oboje najednou [7].

Odporové a vztlakové síly závisí na hustotě média, rychlosti proudění, tvaru a velikosti obtékaného tělesa atd. a není praktické udávat tyto síly pro velké množství situací. Místo toho se používají příslušná bezrozměrná čísla, které charakterizují vztlak a odpor působící na těleso. Těmi jsou koeficient odporu C_D a koeficient vztlaku C_L .

C_D je definován následovně

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S} [-] \quad (1.2)$$

kde F_D je odporová síla, ρ je hustota média, v je rychlost tělesa a S je čelní plocha.

C_L je definován následovně

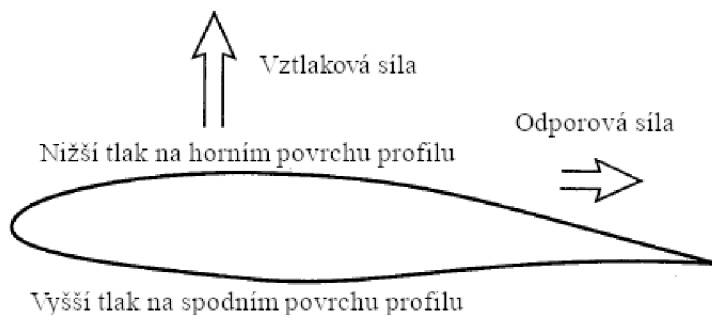
$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S} [-] \quad (1.3)$$

kde F_L je odporová síla, ρ je hustota média, v je rychlost tělesa a S je čelní plocha.

1.6 Princip funkce křídel

Křídla letadel jsou tvarována tak, že na spodním povrchu křídla je vyšší tlak než na horním povrchu křídla. Rozdíl tlaků na křídlo působí silou, která ho zvedá do vertikálního směru [8]. Názorné zobrazení je na obrázku č. 5. U závodních vozidel jsou profily křídel obrácené, tím pádem je vyšší tlak na horním povrchu křídla a vzniká přítlak.

Křídlo pohybující se vzduchem je ve směru pohybu nakloněno pod určitým úhlem vůči proudění vzduchu. Úhel mezi tětvou křídla a směrem proudění se nazývá úhel náběhu a ovlivňuje vztlak, který křídlo generuje. Pokud je úhel náběhu příliš velký, proudění se odtrhne od křídla a nastává jev „stall“, při kterém křídlo ztrácí vztlak a zvyšuje se jeho odpor [9].



Obrázek 5: Vznik vztlaku, upraveno z [7]

2 Způsoby zjišťování aerodynamických vlastností Formule 1

Nezbytnou součástí návrhu závodního automobilu je vyhodnocení jeho aerodynamických charakteristik. V této kapitole budou přiblíženy 3 metody, které se používají v dnešním motorsportu. Jedná se o testování na silnici, testování v aerodynamickém tunelu a CFD.

Každá metoda má své výhody a nevýhody, velkou roli hraje dostupnost určitých testovacích prostor a také finanční hledisko. Primárně se zjišťují následující charakteristiky: koeficient vztlaku a odporu, rozložení tlaku na povrchu vozidla a vizualizace proudění [8].

2.1 Testování na silnici

Často užívané praktiky jsou Aero rakes a Flow-vis paint. Aero Rakes jsou síťové konstrukce uchycené k vozu, na kterých jsou umístěny Kielovy sondy, což jsou variace Pitotovy trubice, které fungují na principu Bernoulliho rovnice, viz obrázek č. 6. Lze pomocí nich nepřímou změřit rychlost vzduchu na základě znalosti statického a celkového tlaku. Celkový tlak se měří Kielovými sondami, ale navíc je potřeba ještě odběr statického tlaku. Rychlost figuruje v rovnici dynamického tlaku a dá se poté dopočítat z rozdílu tlaku celkového a statického. Konstrukce se obvykle připevňují za přední a zadní nápravu na měření úplavu za koly nebo před přední křídlo k ověření jeho správné funkce [10].



Obrázek 6: Aero rakes [10]

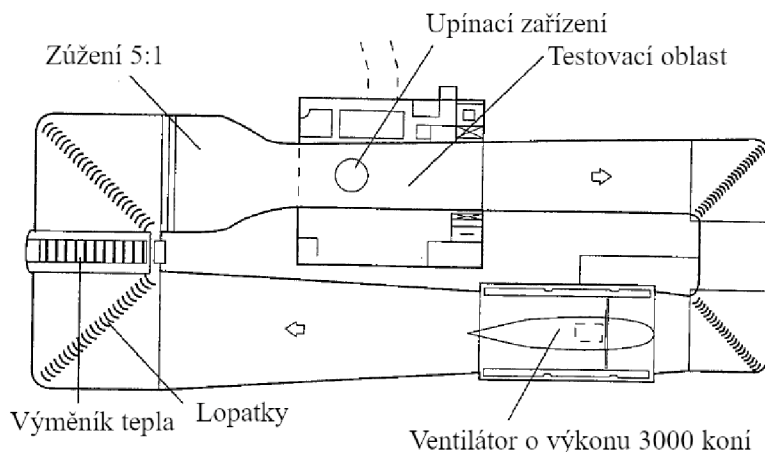
Flow-vis paint, což je vlastně směs oleje (většinou parafín) a fluorescenčního prášku, se nanese na část auta, kterou chceme zkoumat. Vůz vyjede, dokud je nátěr stále mokrý. Při jízdě vzduch roznáší směs po karoserii a když zaschne, zanechá stopu proudění na voze. Pořízené snímky poté slouží k validaci dat zjištěných v aerodynamickém tunelu nebo z CFD [11]. Nátěr aplikovaný na voze F1 vidíme na obrázku č. 7.



Obrázek 7: Flow-vis paint [11]

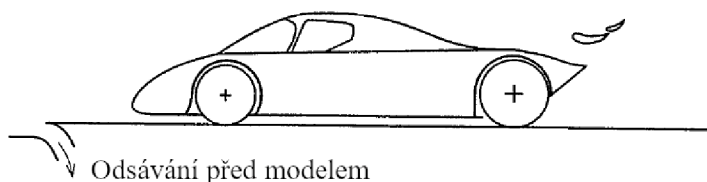
2.2 Aerodynamický tunel

Aerodynamický tunel je zařízení, ve kterém je možno sledovat proudění vzduchu kolem automobilu a další aerodynamické charakteristiky. Podle konstrukce se dělí na otevřený a uzavřený okruh. Pro použití ve F1 se jako vhodnější jeví tunel s uzavřeným okruhem, protože je levnější na provoz a proudění vzduchu v něm je jednodušší na regulaci. Konstrukci s uzavřeným okruhem vidíme na obrázku č. 8 [12].



Obrázek 8: Aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem,
upraveno z [7]

Ventilátor o vysokém výkonu vytváří proudění, ale dodává mu i nežádoucí turbulence. Ke zredukování turbulence slouží lopatky, která mají za snahu proudění zrovnoměnit. Před testovacím úsekem jsou sériově umístěny voštiny a ty rovněž napomáhají k dalšímu zrovnoměření proudění. Zúžení před testovacím úsekem nutí proudění zvýšit rychlost. Velikost modelu, který jsme schopni efektivně měřit v aerodynamickém tunelu, závisí na rozměrech testovací oblasti, protože pokud je model hodně velký a stěny blízko modelu, tak dojde k ovlivnění a proudění kolem modelu se bude chovat jinak než v realitě. Dalším nežádoucím aspektem je tvorba mezní vrstvy na pohybujícím se pásu pod vozidlem. Pás komplikuje měření, ale je nutný, protože jinak bychom nemohli počítat s úplavy, které se tvoří za koly, a celkově by bylo měření méně přesné. V aerodynamickém tunelu je podlaha stacionární vůči proudícímu vzduchu a tvoří se na ní mezní vrstva. Jakmile do tunelu umístíme model, mezní vrstva na podlaze se spojí s mezní vrstvou spodní části modelu a výsledky budou zkreslené. Konstrukčních řešení, jak zamezit tvorbě mezní vrstvy na pohybujícím se pásu, je mnoho. Asi nejjednodušší je těsně před modelem vysávat vzduch směrem do podlahy, viz obrázek č. 9. Sací efekt odstraní mezní vrstvu před modelem a nová vrstva, která se tvoří za odsáváním, je podstatně menší [12].

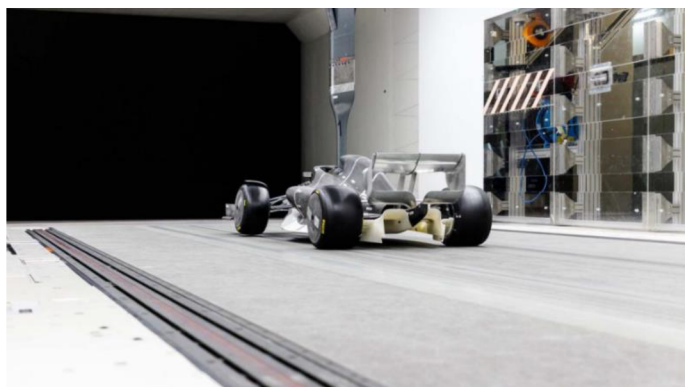


Obrázek 9: Jedna z možností eliminace mezní vrstvy v
aerodynamickém tunelu, upraveno z [7]

Používání aerodynamického tunelu je omezené pravidly F1 tak, aby týmy s menším rozpočtem mohly konkurovat bohatším týmům. Každý tým musí na začátku sezóny oznámit, který aerodynamický tunel bude používat po celou sezónu, a v průběhu ho nemůže změnit. Sezóna je rozdělena do takzvaných ATP (z anglického slova aerodynamic testing period), kterých je celkově 6 a každá trvá několik týdnů. Tým může za jednu ATP provést maximálně 400 testů v aerodynamickém tunelu a celkově 100 hodin měření. Měření v aerodynamickém tunelu může probíhat při rychlosti vzduchu maximálně 50 m/s a nesmí se používat reálné vozy F1, nýbrž pouze modely maximálně 60% velikosti [13].

Model je upevněn v testovací oblasti tunelu přes upínací zařízení, viz obrázek č. 10. Existuje více stylů upnutí, ale pro měření vozidel se toto řešení jeví jako nejvhodnější, protože nejméně ovlivňuje výsledné aerodynamické síly působící na vozidlo. Příklad, odpor a boční síla jsou obvykle měřeny přes senzory v tomto upínacím zařízení. Vnitřek modelu je plný různých snímačů tlaku a motorů na ovládání volantu. Proudění kolem modelu lze sledovat například použitím nitřových sond, které se vhodně rozmístí po modelu a při měření se přizpůsobují proudění vzduchu. O něco názornější je použití barevných plynů, které se přes trubici vypouští před model. Dají se tak sledovat místa odtržení proudu, místa, kde se tvoří víry, nebo jestli vzduch proudí do chladičů atd. Proud plynu ovšem narušuje okolní proudění, a proto je tato metoda spíše vhodná na sledování proudění z makroskopického hlediska [12].

Tým Alfa Romeo Sauber využívá aerodynamický tunel o výkonu ventilátoru 3MW, kterým má průměr rotoru 9,4 m a dokáže vyvinout rychlosti vzduchu 80 m/s. Cena takového aerodynamického tunelu se pohybuje kolem 60 až 100 milionů dolarů [12].



Obrázek 10: Model vozu F1 v aerodynamickém tunelu [14]

2.3 CFD

CFD je soubor numerických metod, pomocí kterých lze získat přibližné řešení problémů týkajících se mechaniky tekutin a přenosu tepla [15]. Rovnice mechaniky tekutin jsou známé už od minulého století, avšak analytické řešení je velmi obtížné. Příchod výkonnějších výpočetních systémů přinesl rozvoj v CFD. Prostředí výpočtu si lze představit jako virtuální testovací část aerodynamického tunelu s reálnými rozměry. V tomto ohledu skýtá CFD mnoho výhod. Především není potřeba mít fyzický model automobilu. Jakmile proběhne výpočet, tak je možno odečíst různé hodnoty z jakéhokoliv místa na automobilu, narozdíl od aerodynamického tunelu, kde lze získat hodnoty pouze v místech, kde jsou umístěny senzory. Velice výhodné je vyzkoušet si více způsobů designu, např. různé nastavení předního přítláčného křídla. Pomocí CFD jdou navíc získat hodnoty, které defacto jinak zjistit nejdou, to jsou třeba smyková napětí, rozložení tlaku po celém vozidle nebo jenom v určitém průřezu. Pro rozsáhlé CFD simulace je potřeba mít dostatečně výkonný superpočítač. CFD výpočet by měl být experimentálně ověřen, aby byla zaručena správnost řešení.

Stejně jako tomu bylo u aerodynamického tunelu, tak i u CFD existují jisté restrikce pro jeho používání. Hlavním omezením je, že tým smí za 1 ATP provést výpočty maximálně rovny 6 MAUh, což je veličina popisující kolik výpočetního výkonu může tým použít na řešení CFD výpočtů [13].

CFD by neměl být hlavní stavební kámen aerodynamiky. Jako příklad může sloužit pokus týmu Virgin Racing, který v roce 2010 navrhnul aerodynamický paket monopostu s použitím pouze CFD. Ačkoliv ušetřili velké množství peněz na provozu aerodynamického tunelu, tak nakonec skončili na posledním místě [16].

2.4 Zhodnocení

Velký rozvoj CFD v posledních letech znamenal posunutí vývoje aerodynamiky na vyšší úroveň. Není vyloučeno, že v budoucnosti dosáhne CFD takové úrovně, že už nebude potřeba využívat aerodynamické tunely v takové míře jako je tomu dnes. Momentálně mají aerodynamické tunely stále stěžejní roli v návrhu aerodynamiky F1. Testování na silnici je důležité z hlediska validace dat naměřených v aerodynamickém tunelu a spočítaných v CFD.

3 CFD

Mechanika tekutin je založena na rovnici kontinuity (3.1) a Navierově – Stokesově rovnici (3.2).

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \operatorname{grad} \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta \vec{v} + \vec{a} \quad (3.2)$$

kde \vec{v} je rychlost tekutiny, ρ je hustota, ν je kinematická viskozita, p je tlak a \vec{a} jsou účinky hmotnostních sil.

Analytické řešení Navierových – Stokesových rovnic je možné pouze v několika případech laminárního proudění. Tyto rovnice jsou známé už od 30. let minulého století, avšak až díky nástupu nových technologií a pokroku v počítačové technice jsme schopni počítat proudění numericky pomocí CFD.

CFD je momentálně v situaci, že umí velice dobře řešit laminární proudění, ale je prakticky nemožné pomocí CFD řešit turbulentní proudění bez volby správného modelu turbulence. Žádný model turbulence není univerzální, avšak standardní turbulentní modely vyhovují velké části praktických inženýrských problémů a lze pomocí nich dosáhnout relativně přesných výsledků. Podmínkou je ovšem validace za pomocí experimentálních dat [3].

3.1 Druhy CFD softwarů

Na trhu je velké množství CFD softwarů, dokonce i určité CAD softwary v sobě mají zabudované jednoduché CFD moduly pro méně komplexní a rychlé analýzy. Mezi nejznámější patří:

Komerční: Ansys Fluent, CFX, Star-CCM+, Numeca, SimScale, Comsol CFD Module
Open-source: OpenFOAM Foundation Ltd, OpenFOAM+

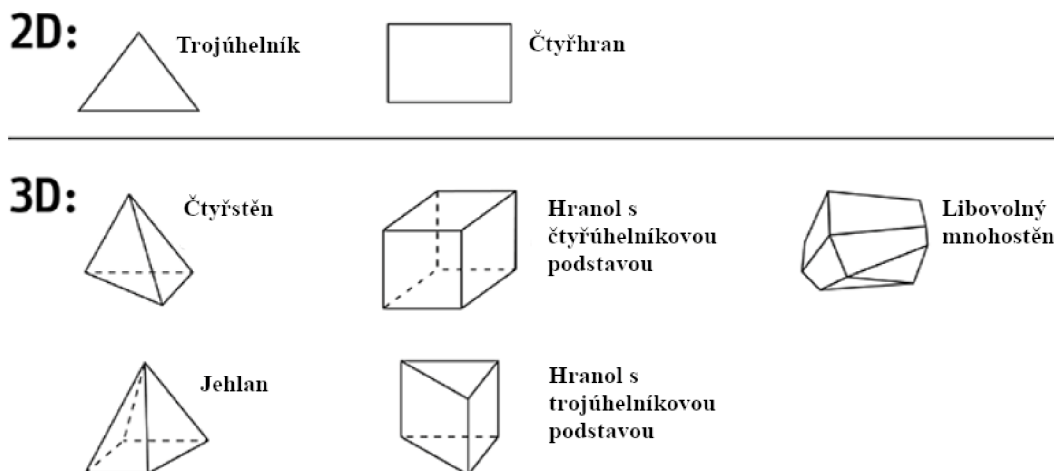
3.2 Postup CFD výpočtu

Tvorba geometrie je prvním krokem. Ansys Fluent má na tvorbu geometrie zabudované 2 moduly, avšak lze použít jakýkoliv jiný CAD software a výsledný soubor poté převést do vhodného formátu. Model pro CFD výpočet by měl být co nejvíce zjednodušený, tj. neměl by obsahovat křivky o malých rozměrech a složité tvary. Dále přichází na řadu síť a volba okrajových podmínek (dále jen OP) viz 3.3 a 3.4. V případě turbulentního proudění se zvolí turbulentní model viz 3.5. Nastavení výpočtu je příliš komplexní na to, aby bylo obsaženo v této kapitole, a proto bude popsáno na konkrétním případě v 6. kapitole zároveň s postprocessingem, což je poslední krok CFD výpočtu a spočívá ve vyhodnocení výsledků z CFD simulace.

3.3 Síť

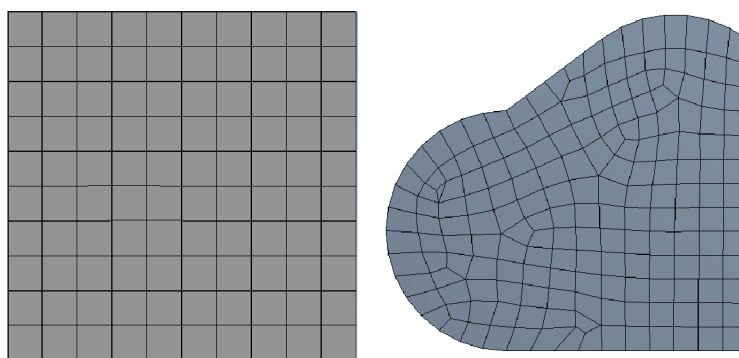
Vytvořenou geometrii rozdělíme na konečný počet menších elementů, tzv. buněk. Pro 2D domény jsou to plochy a pro 3D objemy. Buňky si lze představit jako diskrétní lokální aproximace větší domény. Kvalita sítě ovlivňuje přesnost, konvergenci a rychlost řešení [3].

Podle tvaru buněk rozdělujeme síť na trojúhelníkovou a čtyřhrannou pro 2D. U 3D buněk je možností více: čtyřstěnná, hranolová, jehlanová nebo mnohostěnná, viz obrázek č. 11.



Obrázek 11: Druhy prvků, upraveno z [17]

Síť lze dále rozdělit podle toho, jestli je strukturovaná nebo nestrukturovaná. Strukturovaná síť je charakterizována pravidelným rozdělením, které zaručuje efektivní vyplnění prostoru. Geometrie se strukturovanou sítí je rychlejší na výpočet. Nevýhodou je, že zakřivené nebo zaoblené tvary se aproximují, aby se zachovala pravidelnost rozložení. V nestrukturované síti je rozložení buněk velice rozmanité a výpočet je časově náročnější, protože je obtížnější si zapamatovat informaci o každé buňce. Nestrukturovaná síť se používá při výpočtech u složitějších geometrií, protože se dokáže přizpůsobit komplexnějším tvarům. Na obrázku č. 12 můžeme vidět strukturovanou síť (vlevo) a nestrukturovanou síť (vpravo) [3].



Obrázek 12: Strukturovaná a nestrukturovaná síť

Ve většině případů je vhodné doménu rozdělit na více částí. Mluvíme o kombinaci strukturované a nestrukturované sítě a zároveň použití různých druhů buněk, pokud je to potřeba. Tomu se říká hybridní síť. Například pokud tušíme, že u objektu dojde k odtržení proudění, tak v oblasti za ním zmenšíme velikost buněk pro dosažení přesnějších hodnot. Pro správné zachycení mezní vrstvy je vhodné kolem objektu vytvořit strukturovanou síť s malou výškou jednotlivých vrstev. Použití kvalitně vytvořené hybridní sítě snižuje výpočetní čas a nároky na paměť počítače [3].

Nehledě na to, jestli použijeme strukturovanou, nestrukturovanou nebo hybridní síť, tak je to kvalita sítě, na které závisí výsledek CFD výpočtu. Kvalitu sítě hodnotíme na základě určitých parametrů.

Nejdůležitější parametr je šikmost, který udává, jak moc se tvar buňky liší od ideálního tvaru. Hodnota šikmosti leží v intervalu 0 až 1, přičemž 0 je ideální tvar a 1 je kompletně

zdegenerovaná buňka. Zdegenerované buňky jsou charakteristické tím, že jejich uzly jsou téměř koplanární (kolineární ve 2D). Hodnota šikmosti by neměla být vyšší než 0,85. Buňky s velkou šikmostí jsou nevhodné, protože při řešení diferenciálních rovnic se uvažuje, že jsou buňky relativně rovnostranné/rovnoramenné [18]. Šikmost buňky je definována jako

$$Skw = \max\left(\frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e}\right) \quad (3.3)$$

kde θ_{max} je největší úhel v buňce, θ_{min} je nejmenší úhel v buňce a θ_e je úhel pro rovnoramennou buňku (60° pro trojúhelník, 90° pro čtverec).

Další důležitý parametr je hladkost, která udává, jak jsou 2 buňky vedle sebe rozdílné ve velikosti. Velký rozdíl ve velikostech je nežádoucí a má za následek numericky nepřesné řešení.

Třetím důležitým parametrem je poměr stran, který udává poměr nejdelší strany vůči nejkratší straně. Pro rovnostrannou buňku bude poměr stran 1. Pro méně pravidelné buňky bude poměr stran větší než 1, protože strany se liší v délkách. U trojúhelníkových, čtyřbokých a jehlanových buněk vylepšujeme šikmost s hladkostí a poměr stran se zároveň zlepší také. U čtyřúhelníkových a hranolových buněk je nutné sledovat poměr stran, hladkost a zároveň šikmost, protože je možné mít skok ve velikosti mezi 2 buňkami s malou šikmostí nebo buňky s velkým poměrem stran a malou šikmostí [18].

3.4 OP

Přestože pro 2 CFD výpočty může být stejná výpočetní doména, stejná síť i matematické rovnice, tak jsou to OP, které udávají chování proudění při daném výpočtu. Obecně rozdělujeme OP do 3 skupin, patří mezi ně Dirichletova OP, Neumannova OP a Robinova OP. Dirichletova OP určuje hodnotu proměnné na hranici. V mechanice tekutin popisuje například podmínku ulpívání na stěně, protože je tam hodnota rychlosti rovna 0. Neumannova OP určuje derivaci proměnné na hranici. Používá se, když je potřeba určit míru změny hodnoty dané proměnné. Běžným příkladem v mechanice tekutin je OP na výstupu, kde je gradient proměnných toku nastaven na nulu. Robinova OP je kombinací hodnoty proměnné a její derivace. Používá se u řešení komplexnějších úloh. Příkladem je Newtonův ochlazovací zákon v úlohách přenosu tepla [15]. Další rozdělení OP je podle toho, kde je předepisujeme. Následující názvy OP jsou specifické pro software ANSYS Fluent, ale jejich význam je stejný napříč ostatními softwary. Mezi některé z nich patří: stěna, vstup, výstup a symetrická [3].

3.4.1 OP stěna

Jedná se o nejjednodušší OP. Normálová složka rychlosti je rovna nule po celé délce stěny, jelikož tekutina nemůže procházet přes stěnu. Kvůli podmínce ulpívání obvykle předepisujeme tečnou složku rychlosti rovnu nule u nepohyblivé stěny při viskózním proudění. U většiny CFD softwarů lze také simulovat pohybující se stěny nebo stěny se specifikovaným smykovým napětím [3].

3.4.2 OP vstup a výstup

Existuje několik možností, jak předepsat OP na hranicích, přes které tekutina vstupuje do domény (vstup) nebo doménu opouští (výstup). Rozdělujeme je na podmínky specifikované rychlostí nebo podmínky specifikované tlakem.

Na rychlostním vstupu předepisujeme rychlost proudění po celé ploše vstupu. Pokud se jedná o turbulentní proudění, tak se musí ještě předepsat parametry turbulence [3].

Na tlakovém vstupu předepisujeme celkový tlak po celé ploše vstupu. Jako příklad lze uvést proudění plynu do domény z tlakové nádoby o známém tlaku [3].

Na tlakovém výstupu tekutina vystupuje z domény. Předepisujeme statický tlak po celé ploše výstupu. Ve většině případů se výstupní tlak předepisuje jako atmosférický. Například atmosférický tlak bude na výstupu při řešení úlohy proudění výfukových plynů z výfuku

automobilu. U tlakových vstupů se předepisují parametry turbulence a u tlakových výstupů pouze tehdy, když dochází ke zpětnému proudění. Zpětné proudění na tlakovém výstupu značí, že výpočetní doména není dostatečně velká a je tedy nutné ji zvětšit [3].

U rychlostních vstupů se nepředepisuje hodnota tlaku, jelikož se tlak dopočítává z pohybových rovnic. Tlak na vstupu se přizpůsobí tak, aby odpovídal zbytku proudění a byly zachovány matematické rovnice. Stejně pravidlo platí i pro tlakový vstup, kde se rychlost nezadá, ale dopočítá se tak, aby odpovídala zbytku proudění [3].

Při řešení běžných CFD úloh se volí 1 nebo více rychlostních vstupů a 1 nebo více tlakových výstupů.

3.4.3 Symetrická OP

Některé hranice výpočetní domény nejsou ani stěny či vstupy/výstupy, ale spíše uplatňují určitý druh symetrie. Symetrická OP umožňuje řešit pouze část modelu, pokud vykazuje symetrický tvar a tím pádem se snižují nároky na výpočetní výkon. Symetrická OP také zabrání průniku tekutiny skrz stěnu [3].

3.5 Výpočet turbulentního proudění a turbulentní modely

CFD simulace turbulentního proudění jsou daleko složitější než v případě laminárního proudění. Je to z toho důvodu, že turbulentní proudění je vždy trojrozměrné, časově proměnné, proudnice se mezi sebou kříží a vznikají víry ve všech směrech. Některé CFD softwary využívají techniku zvanou DNS (z anglického slova direct numerical simulation), která řeší časově proměnné proudění v celém rozsahu turbulentního proudění. DNS výpočty vyžadují extrémně jemnou síť, velký výpočetní výkon a obrovskou porci výpočetního času. Dnešní superpočítače stále nedokážou řešit DNS výpočty při velkých Reynoldsových číslech a očekává se, že ještě nějakou dobu potrvá, než toho budou schopny [3].

Je tedy nezbytné zavést určité zjednodušení, abychom mohli řešit komplexnější problémy zcela turbulentního proudění při velkých Reynoldsových číslech. O úroveň níž než DNS je metoda LES (z anglického slova large eddy simulation). Pomocí této metody se počítají velké vírové struktury a menší víry se modelují. Základním předpokladem je, že menší víry se chovají izotropicky, tj. že nezávisí na orientaci souřadného systému a statisticky se vždy chovají stejně, nehledě na to, v jaké oblasti turbulentního pole se nachází. LES vyžaduje menší výpočetní výkon než DNS, ale v dnešní době pořád není zcela dobře využitelné [3].

Další úroveň snížení náročnosti spočívá v tom, že namodelujeme všechny vírové struktury s použitím turbulentního modelu. Cílem není vyřešit nestacionární charakteristiky vírových struktur, ani těch největších. Místo toho se zavedou matematické modely, které berou v potaz míšení a difuzi způsobené turbulentními víry [3].

Navierova – Stokesova rovnice (3.3) v základním tvaru není vhodná pro řešení turbulentního proudění. Proto je nahrazena rovnicí RANS (z anglického slova Reynolds-averaged Navier – Stokes). Za pomoci RANS můžeme řešit turbulentní proudění skutečné tekutiny. RANS je definována jako

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \text{grad} \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \Delta \vec{v} + \vec{a} + \frac{1}{\rho} \text{grad} \tau_{ij, \text{turbulent}} \quad (3.4)$$

V porovnání s rovnicí 3.3 je na pravé straně navíc člen $\tau_{ij, \text{turbulent}}$, který uvažuje turbulentní fluktuace, též známý jako Reynoldsův tenzor napětí. Navierova – Stokesova rovnice v základním tvaru obsahuje 4 neznámé a tenzor napětí obsahuje 6 neznámých, celkově tedy 10 neznámých. Při řešení disponujeme pouze 4 rovnicemi a dalších 6 je dodáno modely turbulence.

V dnešní době existuje mnoho turbulentních modelů, které lze rozdělit na algebraické, 1-rovnicové, 2-rovnicové a modely Reynoldsova napětí. Mezi nejznámější modely turbulence patří $k-\epsilon$ a $k-\omega$. Oba jsou 2-rovnicové modely, což znamená, že přidávají dvě transportní rovnice, které se počítají zároveň s momentovými rovnicemi. Díky tomu se musí na vstup

a výstup přidat dvě další OP, které definují parametry turbulence. Například u $k-\varepsilon$ modelu specifikujeme k (turbulentní kinetická energie) a ε (turbulentní míra disipace) [3].

Nesmíme ovšem zapomínat, že řešení pomocí turbulentních modelů je pouze aproximací přesného řešení a závisí na matematických konstantách. Modely se kalibrují za pomoci přesného numerického řešení a výsledků experimentu. Vyplatí se znovu zdůraznit, že žádný turbulentní model není univerzální a co funguje pro jeden případ turbulentního proudění, nemusí fungovat u jiného. Toto tvrzení platí nezávisle na tom, zda zjemňujeme a vylepšujeme síť, na rozdíl od úloh laminárního proudění, kde zjemnění sítě obvykle znamená přesnější výsledky, za předpokladu, že jsou správně nastavené OP [3].

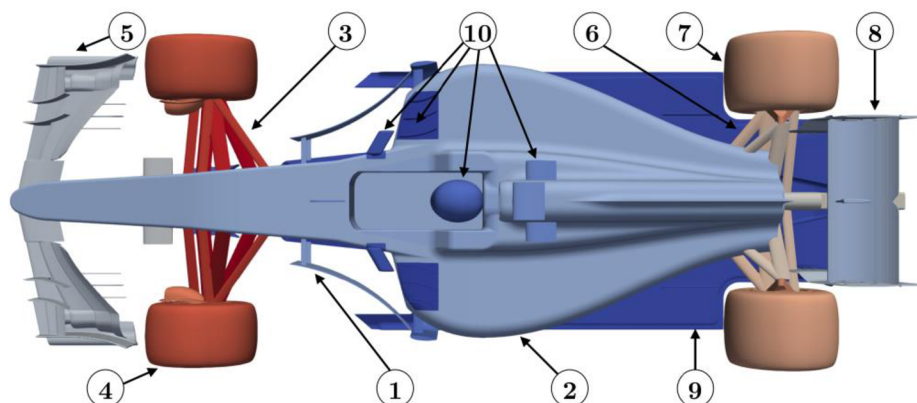
3.6 Oblasti využití CFD

F1 má na svědomí největší vzestup CFD, který se poté promítl do jiných druhů motorsportu a také do automobilového průmyslu. Dalšími odvětvími, kde se využívá CFD, jsou letecký průmysl, procesní průmysl, turbínářství, biomechanika atd.

4 Aerodynamické prvky Formule 1

Aerodynamika hraje ve F1 velkou roli. I přes neustálé omezování pravidly jsou inženýři schopni rok, co rok navrhovat rychlejší vozy než kdy dřív, a to také díky aerodynamice, protože o tom, jestli vyhraje nebo prohraje, rozhodují setiny. Na nynějších vozech F1 najdeme velké množství aerodynamických prvků. V této kapitole budou představeny ty hlavní, jimiž jsou přední a zadní přitlačné křídlo, difuzor s podlahou a barge boardy.

Na obrázku č. 13 vidíme části vozu F1 a poté v tabulce č. 1 jejich přínos k celkovému přitlaku a odporu.



Obrázek 13: Části vozu F1 [19]

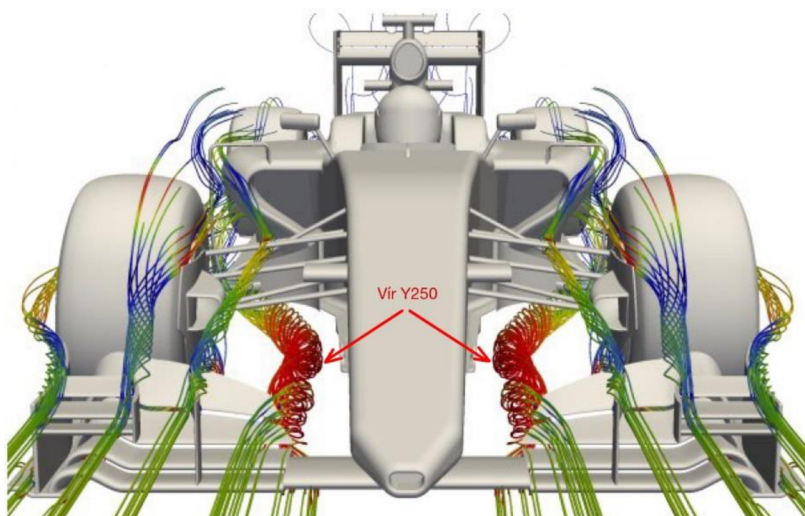
Z tabulky č. 1 je patrné, že největší část přitlaku poskytuje přední křídlo (23 %), zadní křídlo (35 %) a podlaha s difuzorem (61 %). Karoserie vozu spolu s koly a odpružením tvoří vztlak. Vozy F1 spadají do kategorie vozů s nezakrytými koly, a právě úplavy od předních a zadních kol přispívají velkou mírou k celkovému odporu vozu, dohromady o 30 %. Přední křídlo přispívá necelými 13 %, zadní křídlo 20 % a spodní část vozu 15 % k celkovému odporu [19].

Tabulka 1: Příspěvky k přitlaku a odporu od jednotlivých aerodynamických prvků, upraveno z [19]

Prvek	Příspěvek k přitlaku (%)	Příspěvek k odporu (%)
1 - Barge boardy	-1,71	+2,97
2 - Karoserie	+21,10	+10,7
3 - Přední odpružení	+2,36	+2,88
4 - Přední kola	+2,94	+10,30
5 - Přední křídlo	-22,84	+12,69
6 - Zadní odpružení	-0,40	+3,93
7 - Zadní kola	+1,42	+20,06
8 - Zadní křídlo	-35,46	+20,38
9 - Podlaha a difuzor	-61,09	+15,05
10 - Ostatní části	-6,65	+1

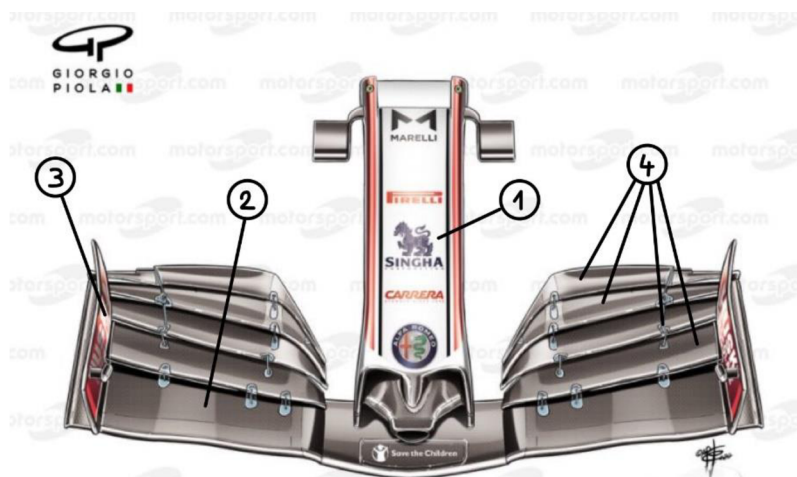
4.1 Přední přítláčné křídlo

Přední křídlo je první část monopostu, která se potkává s prouděním vzduchu, a tudíž jsou na něj kladeny velké požadavky, protože při jeho nesprávné funkci se stává aerodynamika celého vozu neefektivní. Přední křídlo se v dnešní době skládá z více elementů, většinou z 5. Podstatnou funkcí předního křídla je nasměrovat vzduch tak, aby se dostal k dalším částem vozidla, hlavně k podlaze a k difuzoru, k zadnímu křídlu a do chladičů. Přední křídlo pracuje s přísavným efektem. Čím má křídlo nižší jízdní výšku, tím menší plocha je pod křídlem a tím menší je tlak, který musí být vykompenzován vyšší rychlostí na základě Bernoulliho rovnice [20]. Elementy předního křídla jsou tvarovány tak, aby generovaly víry. Nejznámější vír na voze F1, vír Y250, viz obrázek č. 14, který směřuje od předního křídla k barge boardu dále podél karoserie, odvádí úplav předního kola do boku od vozidla a tvoří clonu mezi okolním prouděním a prouděním pod vozidlem [21].



Obrázek 14: Proudění kolem předního křídla vozu F1,
upraveno z [20]

Obrázek č. 15 zobrazuje konstrukci předního křídla vozu F1. Na nosu (1) je uchycen hlavní element předního křídla (2) s placatou částí uprostřed, který definuje šířku a jízdní výšku předního křídla, která je podle pravidel stejná pro všechny týmy. Bočnice (3) jsou lehce zaoblené, aby efektivně směřovaly proudění kolem předních kol a vzduch nenarážel přímo do nich, protože to by způsobilo nárůst odporu. Další funkcí bočnic je zabránění vzduchu o vysokém tlaku na povrchu křídla, aby přecházel směrem vespod ke vzduchu s nižším tlakem a tím by vznikl indukovaný odpor. Určitý indukovaný odpor přesto vzniká, ale bočnice ho efektivně zredukuje. Klapky (4) jsou tvarovány tak, aby vytvářely víry, které korigují proudění podél vozu dále [22].

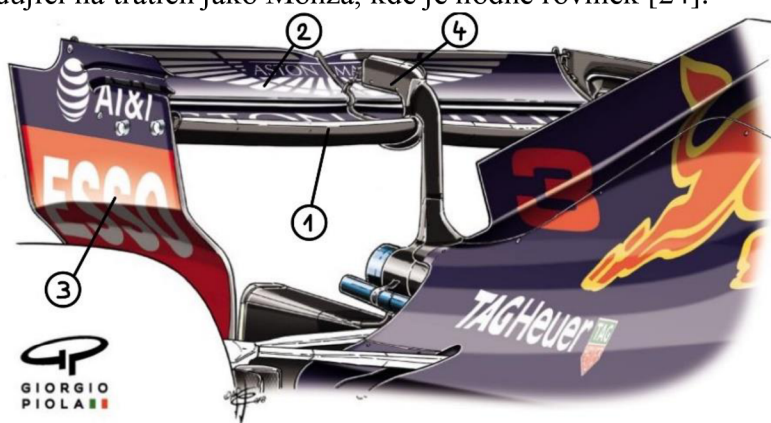


Obrázek 15: Části předního křídla, upraveno z [23]

4.2 Zadní přítlačné křídlo

Zadní přítlačné křídlo vozu F1, viz obrázek č. 16, se v dnešní době skládá ze 2 elementů (1) a (2). Více-elementové křídlo se používá při velkých úhlech náběhu, přičemž každý další element křídla má větší úhel náběhu než ten před ním. Kdybychom místo více-elementového křídla při stejném úhlu náběhu použili pouze 1 element, došlo by k odtržení proudění a křídlo by nefungovalo efektivně. Části na krajích jsou bočnice (3), které jako u předního křídla zabraňují vzduchu o vysokém tlaku vstoupit na spodní stranu křídla s nízkým tlakem, a vznikal by tak velký indukovaný odpor. Na bočnicích se nachází různé výřezy, drážky a zaoblení, které také pomáhají co nejvíce omezit indukovaný odpor křídla. Víry na konci křídel jsou při vyšších rychlostech zřetelně viditelné [24].

Drag reduction system (dále jen DRS) (4) je jediné pravidly povolené zařízení, které umožňuje aerodynamickému prvku změnit tvar během závodu. Pokud řidič aktivuje DRS, tak pneumaticky nebo elektricky řízený motor narovná druhý element zadního křídla (2), čímž sníží jeho úhel náběhu a mezi 2 elementy se vytvoří velká mezera, kterou může vzduch proudit. Na tratích existují tzv. DRS zóny, ve kterých může řidič DRS aktivovat. Po aktivování DRS klesne přítlak zadního křídla a zároveň i odpor zadního křídla a vůz se stává rychlejším na rovině. DRS je rozhodující na tratích jako Monza, kde je hodně rovinek [24].



Obrázek 16: Části zadního křídla, upraveno z [25]

4.3 Podlaha a difuzor

Podlaha s difuzorem je z hlediska poměru přítlaku vůči odporu nejefektivnější aerodynamický prvek na voze F1. Vzduch je veden pod nosem k podlaze vozidla a vystupuje na zadní části

přes difuzor. Vzduch mezi podlahou a vozovkou má vyšší rychlost, než je rychlost volného proudění na základě rovnice kontinuity. Zároveň pokud má vzduch vysokou rychlost, tak musí mít nižší tlak na základě Bernoulliho rovnice. Na výstupu z difuzoru se rychlost sníží a tlak se naopak tedy zvýší. To, že nad vozem je vyšší tlak než pod vozem, tvoří kýžený přitlak. Tomuto jevu se také říká přísavný efekt [26].

Přísavný efekt byl ve F1 nejpůvodnější v 80. letech, kdy se na vozech mohly používat výsuvné bočnice, které zabraňovaly vzduchu kolem karoserie přístup k podlaze. Tyto prvky byly zanedlouho zakázány, protože vytvářely velký přitlak, a když došlo k narušení proudění pod podlahou, přitlak se dramaticky snížil a auto se stalo neovladatelným, což způsobilo několik závažných nehod [27].

Difuzor vozu F1 má podélné hrany, které mohou být rovné nebo různě zakřivené a slouží k separaci proudění o různých energiích. Vnější hrany zajistí, aby se rozrušené proudění od pneumatik nedostalo do vnitřní oblasti difuzoru a tím pádem nenarušil jeho funkci. Další hrany potom maximalizují efektivitu difuzoru. Difuzor funguje i bez těchto hran, ale zdaleka není tak účinný. Podlaha s difuzorem jsou prvky velice náchylné na jakékoliv odchylky, proto musí být připraveny pracovat za různých podmínek. Pokud by tomu tak nebylo a řidič by v zatáčce najel na obrubník, vůz by díky tomu ztratil velkou část přitlaku a mohlo by dojít k nehodě [26].

Vůz F1 má na podlaze připevněnou dřevěnou desku, která slouží k ověření, zda tým nepodváděl a neměl nastavenou nízkou jízdní výšku. Na konci závodu se změří tloušťka desky a pokud je tenčí než povolená hodnota, tým je ze závodu diskvalifikován. Tření podlahy o zem je doprovázeno velkým množstvím jisker, které lze pozorovat při každé Velké ceně [28]. Jedno z možných konstrukčních řešení difuzoru je znázorněno na obrázku č. 17.



Obrázek 17: Difuzor vozu F1 [29]

4.4 Barge boardy

Barge boardy byly ve F1 poprvé představeny v 90. letech a jsou velice důležité z aerodynamického hlediska vozu F1. Barge board je v podstatě několik různě tvarovaných lopatek usazených na obou stranách vozidla za předními koly, viz obrázek č. 18. Jejich hlavní funkcí je korigovat víry vytvořené předním křídlem, aby odváděly úplav z předního kola pryč od karoserie. Dále usměrňují proudění kolem vozidla a vytváří clonu, aby okolní vzduch nevstupoval k podlaze a narušoval přísavný efekt [30].



Obrázek 18: Barge boardy [31]

5 CFD ve Formuli 1

Do F1 je díky ohromnému počtu sponzorů a sledovanosti vkládáno neuvěřitelné množství peněz, vyšší než v jakémkoliv jiném motorsportu. To znamená, že nároky na vozidla jsou obrovské, a tím pádem musí být spolehlivé a výkonné i prostředky na návrh a výrobu vozidel. CFD je finančně náročné hlavně z hlediska hardware, ale ten si týmy F1 díky velkým financím mohou dovolit. Velká konkurence a kompetitivnost tlačí inženýry k neustálému zlepšování modelů a výpočtů, protože i nepatrná změna konstrukce monopostu může rozhodnout o vítězství. Z vývoje CFD ve F1 těží další druhy motorsportu a automobilový průmysl.

Na následujících stránkách bude přibliženo využití CFD ve F1. Bude zobrazen výpočetní hardware a software některých týmů, dostane se na simulaci celého auta, simulaci dvou aut jedoucích za sebou a také na to, jaké efekty způsobuje úplav od prvního auta na druhé a porovnání předních křídel v CFD.

5.1 Výpočetní hardware a software ve F1

Výpočetní zázemí je klíčový faktor pro CFD výpočty. Bude zde uvedeno, jaké superpočítače používají nebo používaly některé týmy. Týmy F1 nemají ve zvyku sdílet informace o jejich zázemí, proto je většina informací o jejich superpočítačích zastaralejší.

Tým Racing Point Force India používá cluster o výkonu 25 teraflopů, který má 28 uzlů na preprocessing a postprocessing a 432 výpočetních uzlů s celkově 7000 jádry v systému. Cluster má 400TB úložiště, které je s uzly spojeno pomocí 10Gb/s Ethernetových přepínačů. Tým dříve používal cluster o výkonu 5 teraflopů, ale ten se teď používá k simulaci kol. Pro CFD simulace využívají programy CATIA a ENOVIA od společnosti Dassault Systemes [32].

Tým Sauber F1 v roce 2003 disponoval superpočítačem jménem Albert. Albert byl vybaven 500 procesory a 1TB paměti RAM [33]. V roce 2007 se rozhodli pro vylepšení a postavili výkonnější stroj jménem Albert 2, který je oproti svému předchůdci až 3x rychlejší. Konkrétně se jedná o 1024 procesorů, celkovou paměť RAM přes 2TB a maximální výkon 12,2 teraflopů [34]. Společně s Ferrari a Red Bull používá Sauber ANSYS Fluent na CFD simulace [35].

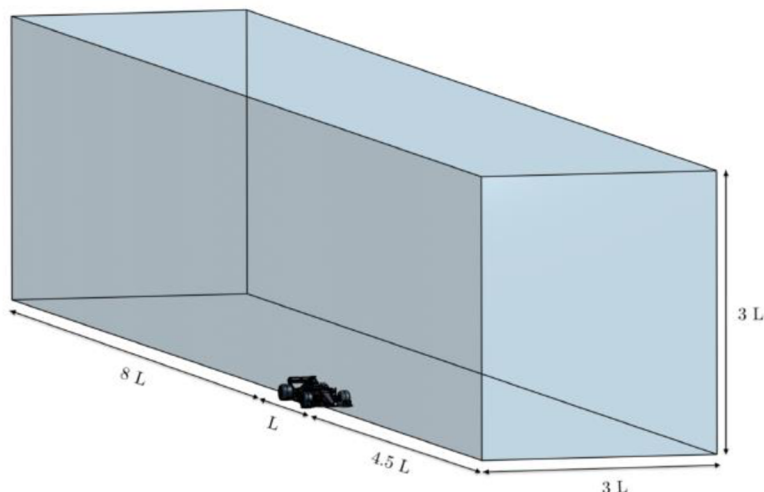
V roce 2008 si tým Renault nechal postavit výkonný superpočítač od společnosti Appro. Superpočítač je při maximálním zatížení schopen vyvinout výkon až 38 teraflopů. Má 128 uzlů/512 quad core procesorů a paměť RAM 4,4 TB [36]. Renault používá CFD software Simcenter STAR-CCM+ [37].

Superpočítače najdou využití i přímo ve vedení F1. S pomocí AWS (Amazon Web Services) jsou schopni řešit i ty nejnáročnější úlohy. Výpočty pomocí AWS probíhají na cloudu a podle Roba Smedleyho je výpočetní výkon až 2500x vyšší, než když superpočítače ve F1 začínaly. Superpočítač u AWS se 7300 jádry je schopen řešit CFD úlohy s celkově 2,7 miliardami buněk. Pokud bychom vzali nejvýkonnější počítač na trhu, tak by mu výpočet jediného vozu zabral asi 14 dní. Zhruba 200 jádrový systém, který používají v centrále F1, to zvládne za 4 dny. Systém AWS dokáže vypočítat simulaci 2 automobilů najednou za necelých 8 hodin [38].

5.2 Simulace monopostu F1 pomocí CFD

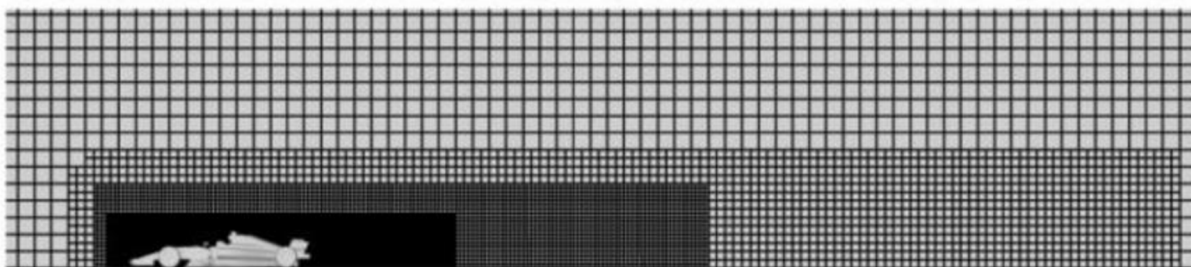
V roce 2017 proběhly změny pravidel týkající se aerodynamické skladby vozu F1. Na rok 2022 jsou plánovány další změny, jejichž příčinami jsou úplav tvořený vozem F1 a přílišné zatížení pneumatik vozu vlivem velkého přítlaku vozů F1. Úplav, který se tvoří za vozem F1, má negativní účinky na vůz jedoucí za ním, což vede ke snížení efektivity jeho aerodynamických prvků [39]. Studie [19], která vyšla v roce 2020 se zaměřuje na vůz F1 právě z roku 2017 a má za cíl objasnit, jestli jsou změny na rok 2022 oprávněné. Simulace vozů jedoucích za sebou je popsána v kapitole č. 5.4.

Jako 3D model byl zvolen PERRIN F1, který je založen na skutečném voze z roku 2017 a souhlasí s pravidly FIA. Obsahuje množství detailů, jako jsou generátory vírů, křídélka a lopatky. Rozměry výpočetní domény jsou ukázány na obrázku č. 19. Pro zachycení chování úplavu a správné určení odporu vozu je doména rozlehlá za vozem [19].



Obrázek 19: Výpočetní doména [19]

Síť je tvořena hexahedrálními prvky a je zjemněná v blízkosti modelu a za modelem, právě kvůli správnému vymodelování úplavu a dalších vírových struktur, viz obrázek č. 20. Celkový počet buněk je 19,2 milionu. Pro výpočet byl zvolen turbulentní model $k-\omega$ SST a OP byly zvoleny následovně: vstupní rychlost 50 m/s (při této rychlosti lze velice dobře měřit v aerodynamickém tunelu pro validaci dat), tlakový výstup nastaven na atmosférický tlak, rychlost „silnice“ 50 m/s, podmínka nenulové rychlosti na krajních stěnách a horní stěně výpočetní domény, úhlová rychlost kol a symetrická OP [19].



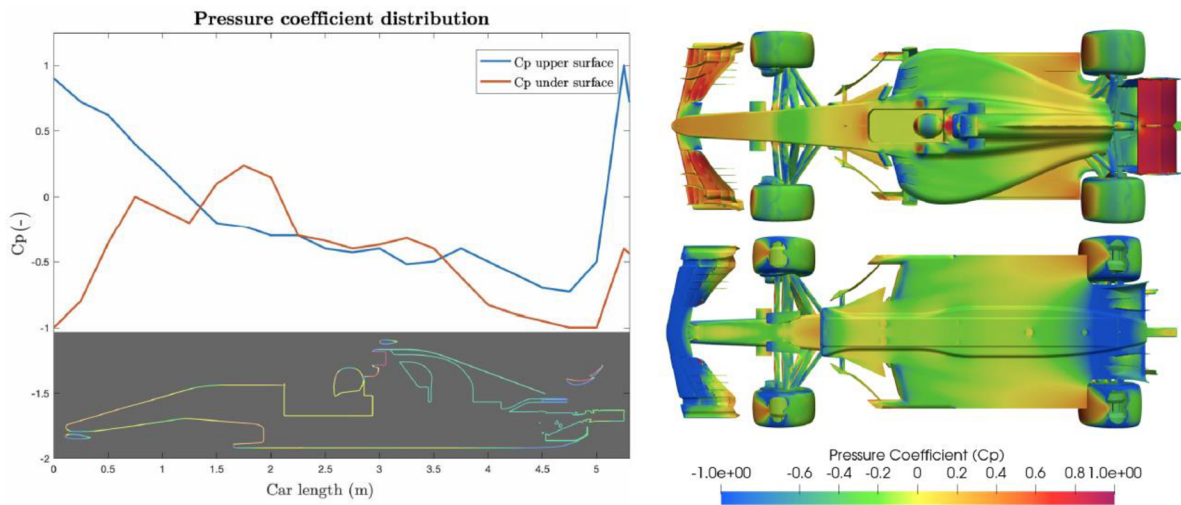
Obrázek 20: Výpočetní síť [19]

Hlavními sledovanými parametry v postprocessingu jsou koeficienty vztlaku SC_L a odporu SC_D , poměr přitlak/odpor C_L/C_D a parametr FB (poměr mezi přitlakem generovaným na přední nápravě a celkovým přitlakem, z anglického slova front balance). Výpočet se proti referenčním hodnotám liší nejvíce o 6,5 %, viz tabulka č. 2 [19].

Tabulka 2: Aerodynamické charakteristiky, upraveno z [19]

	SC_L (m ²)	SC_D (m ²)	C_L/C_D	FB (%)
Ref. data	-3,59	1,23	2,92	44,80
Výp. simulace	-3,43	1,15	2,98	41,23
Chyba (%)	4,45	6,50	2,15	7,97

Jak již bylo zmíněno, velkou výhodou CFD je možnost sledování libovolné vlastnosti po celém voze. Na obrázku č. 21 je zobrazen graf s křivkami tlakového koeficientu spolu s grafickým znázorněním rozložení tlakového koeficientu na voze.

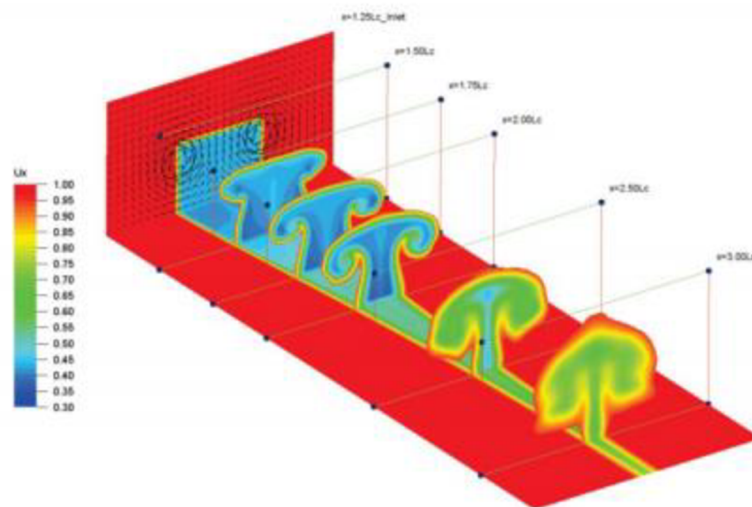


Obrázek 21: Rozložení tlakového koeficientu na povrchu vozu F1 [19]

Horní pohled ukazuje, že zóny vysokého tlaku se nachází na předním křídle a zadním křídle, což dokazuje, že křídla jsou velkými generátory přítlaku. Na spodním pohledu můžeme vidět, že zóny nízkého tlaku jsou na spodních částech křidel, což se dá očekávat, pokud křídla fungují správně. Zóny nízkého tlaku podél podlahy a difuzoru značí, že vůz funguje správně v přísavném efektu. Vidíme plynulou změnu z oblasti středního tlaku do oblasti nízkého tlaku značící, že vzduch zrychluje, a nakonec zvýšení tlaku vzduchu na výstupu z difuzoru. Nicméně, oblast blízko zadních kol vykazuje zvýšení tlaku, což narušuje přísavný efekt a negativně ovlivňuje přítlak vozu [19].

5.3 Úplav tvořený vozem F1

Úplav vozu F1 je z velké části tvořen víry z konců zadního křídla, kde každý z nich rotuje opačným směrem. Rozpětí zadního křídla F1 je poměrně malé, a to vede k vzájemné interakci mezi víry. Nízká jízdní výška napomáhá tomu, že víry s sebou strhávají proudění blízko země. Na obrázku č. 22 můžeme vidět „houbovitý“ tvar úplavu, kde vlevo je situace těsně za vozem



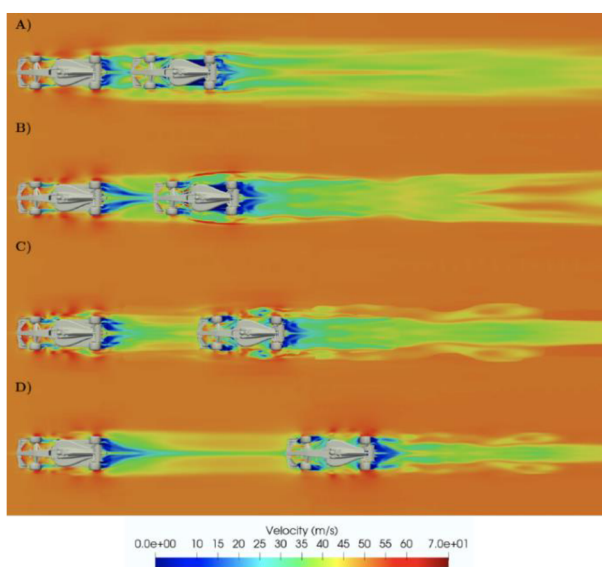
Obrázek 22: Úplav tvořený vozem F1 [40]

F1 a směrem doprava se úplav od vozu vzdaluje. Úplav se projevuje i ve vzdálenosti několika délek vozidla a postupně ztrácí na významnosti [41].

Úplav vedoucího vozu má na pronásledující vůz velký vliv z hlediska aerodynamických vlastností. Pronásledující vůz jedoucí v úplavu ztrácí přítlak, ale také odpor. Ze snížení odporu vlivem jízdy v úplavu těží vozy na rovných částech tratě. Nicméně v závodech F1 je mnohdy rozhodující, jak rychle umí vůz projet zatáčkou, aniž by ztratil trakci. Ztráta přítlaku pro druhý vůz znamená, že musí zatáčkou projet pomaleji. Jízda v úplavu ovlivňuje funkci klíčových aerodynamických prvků jako jsou přítlačná křídla a podlaha s difuzorem. Detailnější analýza je zpracována v následující podkapitole.

5.4 Simulace monopostů F1 jedoucích za sebou

Byly uvažovány 4 situace, kdy je mezera mezi vedoucím a pronásledujícím vozem 0,25L, 0,5L, 1L a 2L, přičemž L je délka vozu. Všechny 4 situace společně s vykreslením kontur rychlosti vidíme na obrázku č. 23 [19].



Obrázek 23: Různé vzdálenosti mezi vozy F1 [19]

Výsledky ukazují, že pokles v aerodynamických koeficientech je znát již od vzdálenosti 2L (přibližně 10,6 m) až do nejkratší vzdálenosti 0,25L (méně než 1,5 m). Snížení hodnoty přítlaku se pohybuje mezi -23,5 % a -62 % v nejhorsím případě. Hodnota odporu se snižuje od -14,2 % do -40 %, viz tabulka č. 3 [19].

Tabulka 3: Pokles hodnot aerodynamických koeficientů v závislosti na vzdálenosti mezi vozy F1, upraveno z [19]

Vzdálenost	SC_L (m ²)	SC_D (m ²)	C_L/C_D	FB
0,25L	-62 %	-40 %	-37 %	+28,5 %
0,5L	-54,1 %	-30,7 %	-34 %	+35,8 %
1L	-42,3 %	-21 %	-27 %	+40,7 %
2L	-23,5 %	-14,2 %	-11 %	+26,1 %

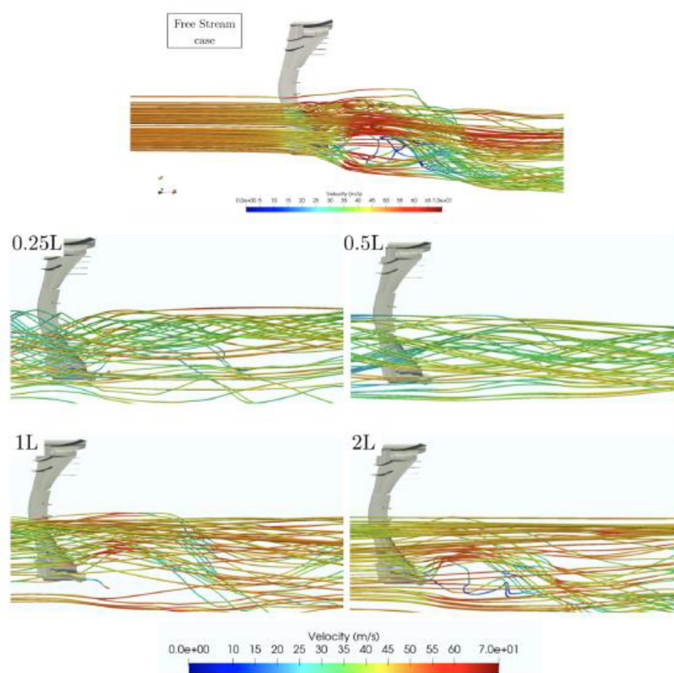
Kromě ztráty přítlaku pozorujeme na druhém vozě nárůst v koeficientu FB v rozmezí od +26 % do +40 %. Rychlý nárůst aerodynamického zatížení na přední nápravu má za následek přetáčivost vozu (tzn. vůz zatáčí více než řidič chtěl, a tím pádem se odtrhává zadní část a vůz jde do smyku) a nebezpečí při rychlé jízdě v ostřejších zatáčkách [19].

Tabulka č. 4 poukazuje na ztrátu přítlaku předního křídla druhého vozu, která se začíná projevovat od vzdálenosti 1L až do kritické hodnoty -38 %, které dosáhne ve vzdálenosti 0,25L [19].

Tabulka 4: Změna aerodynamických charakteristik předního křídla v závislosti na vzdálenosti mezi vozy F1, upraveno z [19]

Vzdálenost	SC _L (m ²)	SC _D (m ²)
0,25L	-38 %	-36,1 %
0,5L	-29 %	-19,3 %
1L	-10,7 %	-1,1 %
2L	-3,6 %	+3 %

Na obrázku č. 24 vidíme znázornění proudnic. Ve vzdálenosti 2L je velikost rychlosti skoro stejná jako u volného proudění, ačkoliv se zde vyskytují oblasti nízkých rychlostí ve středové části křídla. Bočnice a prvky křidel jsou nicméně pořád funkční a dobře navigují proudění k dalším aerodynamickým částem vozu. Ve vzdálenosti 1L se rychlost proudění snižuje a přední křídlo pomalu ztrácí možnost regulování proudění. Ve vzdálenostech 0,25L a 0,5L jde na přední křídlo proudění o nízké kinetické energii, a tím pádem se křídlo stává nefunkčním. Schopnost generování vírů a usměrňování proudění je nevýznamná, protože křídlo operuje v oblasti silného úplavu [19].



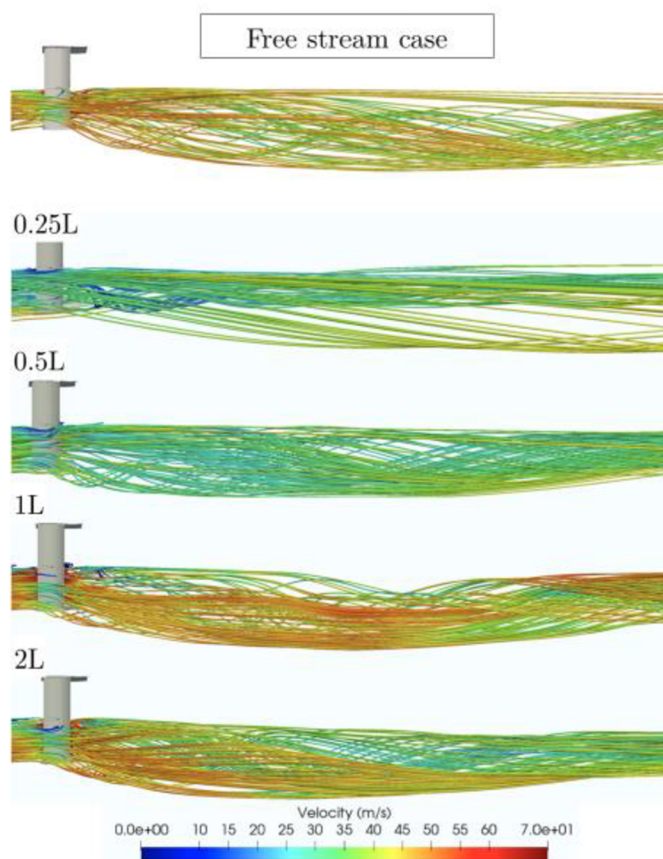
Obrázek 24: Proudnice kolem předního křídla vozu F1 [19]

Nyní se přesuneme dále k zadnímu křídlu. Z tabulky č. 5 je vidět, že zadní křídlo ztrácí velkou porci přitlaku už ve vzdálenosti 2L, která se postupně zvyšuje až do vzdálenosti 0,25L. Můžeme tedy říct, že zadní křídlo je náchylnější na ztrátu aerodynamických vlastností v oblasti úplavu než přední křídlo, které pocítuje výrazné ztráty až ve vzdálenostech 0,25L a 0,5L. To vysvětluje nárůst aerodynamického zatížení na přední nápravě se snižující se vzdáleností mezi vozy [19].

Tabulka 5: Změna aerodynamických charakteristik zadního křídla v závislosti na vzdálenosti mezi vozy F1, upraveno z [19]

Vzdálenost	SC _L (m ²)	SC _D (m ²)
0,25L	-57,9 %	-53,3 %
0,5L	-54,8 %	-50,6 %
1L	-52 %	-48 %
2L	-40,3 %	-36,2 %

Na obrázku č. 25 je vidět, že zadní křídlo funguje bez problémů ve volném proudění, ale čím se vzdálenost mezi vozy snižuje, tím se snižuje i funkčnost zadního křídla. Největší propad je vidět mezi vzdálenostmi 1L a 0,5L, jakmile vůz vstupuje do oblasti nejsilnějšího úplavu a proudění má nižší rychlost [19].



Obrázek 25: Proudnicové vizualizace kolem zadního křídla vozu F1 [19]

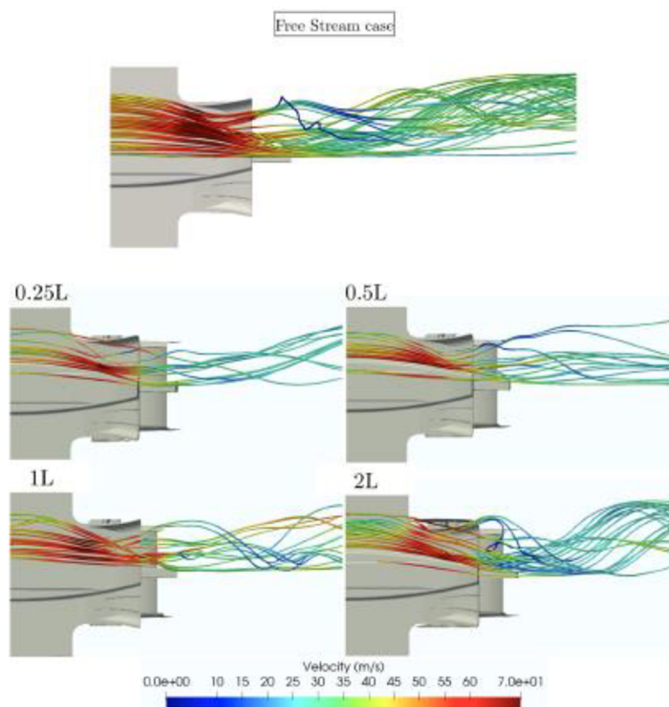
Difuzor s podlahou je posledním ze 3 hlavních aerodynamických prvků na voze F1. Z tabulky č. 6 je patrné, že difuzor s podlahou v oblasti úplavu trpí nejvíce co se týče ztráty aerodynamických vlastností, jelikož při vzdálenosti 0,25L ztrácí až 70 % přitlaku a odpor je snížen o 57 %. Ztráta plynule narůstá se snižující se vzdáleností mezi vozy. Zajímavým

zjištěním je, že difuzor s podlahou generují největší přítlak při jízdě ve volném proudění, ale ztrácí nejvíce ze všech aerodynamických prvků při jízdě v úplavu [19].

Tabulka 6: Změna aerodynamických charakteristik podlahy s difuzorem v závislosti na vzdálenosti mezi vozy F1, upraveno z [19]

Vzdálenost	SC _L (m ²)	SC _D (m ²)
0,25L	-70,2 %	-57,2 %
0,5L	-62,8 %	-48,7 %
1L	-46,1 %	-29 %
2L	-25,3 %	-16,9 %

Proudnice, jak je možno vidět na obrázku č. 26, popisují, jak se mění chování difuzoru a podlahy při vstupu do oblasti úplavu. V oblasti volného proudění je k difuzoru přes přední

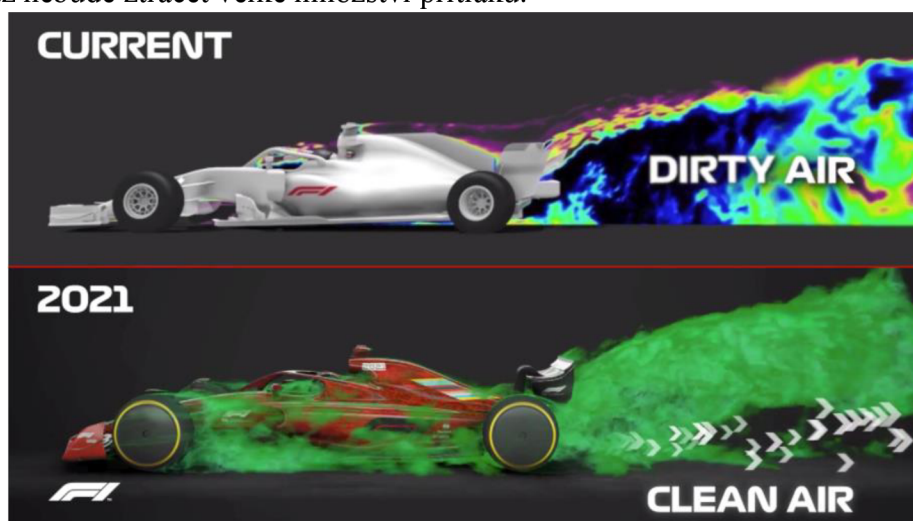


Obrázek 26: Proudnice difuzoru a podlahy vozu F1

křídlo a podlahu vedeno proudění o vysoké energii. Ve vzdálenosti 2L vidíme proudění o stále velké kinetické energii. Jakmile se vzdálenost mezi vozy sníží, schopnost fungování difuzoru s podlahou se snižuje, protože proudění vstupující k podlaze je značně narušené. V případech 0,25L a 0,5L je k difuzoru přiváděno proudění o velmi nízké kinetické energii, což vede na velké ztráty přítlaku [19].

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že změny aerodynamické skladby vozů pro sezónu 2022 jsou oprávněné. Nynější vozy F1 jsou velice dobře nastavené pro jízdu v podmínkách volného proudění, ale ztrácí při jízdě v úplavu. Konkrétně se jedná o ztráty v aerodynamickém zatížení od 23 % po 62 % v případě, že jsou vozy od sebe vzdáleny 0,25L. Přední křídlo začíná ztrácet významné množství přítlaku až když se vozy hodně přiblíží, kdežto zadní křídlo ztrácí hned od vzdálenosti 2L a nárůst ztrát je lineární. Nejvíce postiženým prvkem je difuzor s podlahou, který zaznamenává ztráty v přítlaku od 25 % až po znatelných 70 % [19].

Díky změnám pravidel týkajících se aerodynamiky vozů pro sezónu 2022 bude pronásledující vůz ztrácet pouze 10 % svého přítlaku, což je velký rozdíl oproti nynější ztrátě v přítlaku. Tyto výsledky vyplynuly z testování v aerodynamickém tunelu a CFD simulací. Změny pravidel umožní jezdcům více předjíždět a bude k vidění více soubojů „kolo na kolo“. Jak bude vypadat proudění po úpravě aerodynamických prvků můžeme vidět na obrázku č. 27, který je lehce matoucí, protože FIA tyto změny plánovala už pro sezónu 2021, ale nakonec se rozhodli je posunout až na sezónu 2022 [42]. Úplav, který se tvoří za nynějšími vozy F1 je příliš velký. Aerodynamické změny mají usměrnit úplav směrem nahoru a vytvořit oblast nenarušeného proudění blízko u vozovky. K přednímu křídlu pronásledujícího vozu se dostane proudění o vyšší kinetické energii, které bude dále vedeno k podlaze s difuzorem a zadnímu křídlu a vůz nebude ztrácet velké množství přítlaku.



Obrázek 27: Tvar úplavu za vozem F1 [42]

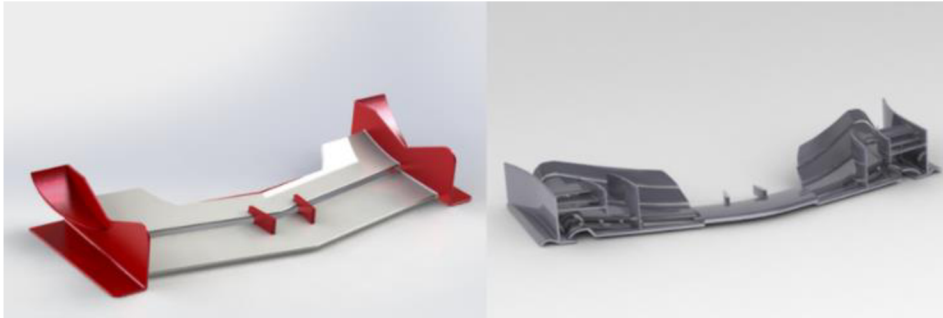
5.5 Vývoj více-elementového předního křídla

Výše byla zobrazena CFD simulace celého vozu, přičemž se ukázalo, jak jsou ovlivněny parametry předního křídla ve volném proudění a v úplavu.

Parametry předního křídla se mění před každým závodem. Inženýři se vždy snaží najít optimální nastavení pro danou trať a na výběr mají velké množství kombinací. V tomto ohledu CFD skýtá velké výhody, protože inženýři mohou otestovat velké množství nastavení za relativně krátký čas, což by v aerodynamickém tunelu nebylo možné. Například trati v Monze dominují rovinky, a proto se zde hodí nastavení s co nejmenším koeficientem odporu C_D , tím pádem bude přední křídlo nastaveno na menší úhel náběhu. Na druhou stranu okruh v Monaku je plný zatáček a má jenom omezený počet rovných úseků, které nejsou ani příliš dlouhé, tudíž ani nelze dosáhnout maximální rychlosti. Lepší čas lze dosáhnout jedině v zatáčkách, a tedy nastavení s vyšším úhlem náběhu a koeficientem vztlačku C_L se jeví jako možnost. Nastavení předního křídla samozřejmě závisí na ostatních faktorech jako jsou například počasí, pořadí na startu, atd [43].

Na následujících stránkách bude zobrazeno porovnání předního křídla vozu Ferrari F2004 z roku 2004 a Red Bull RB13 z roku 2017.

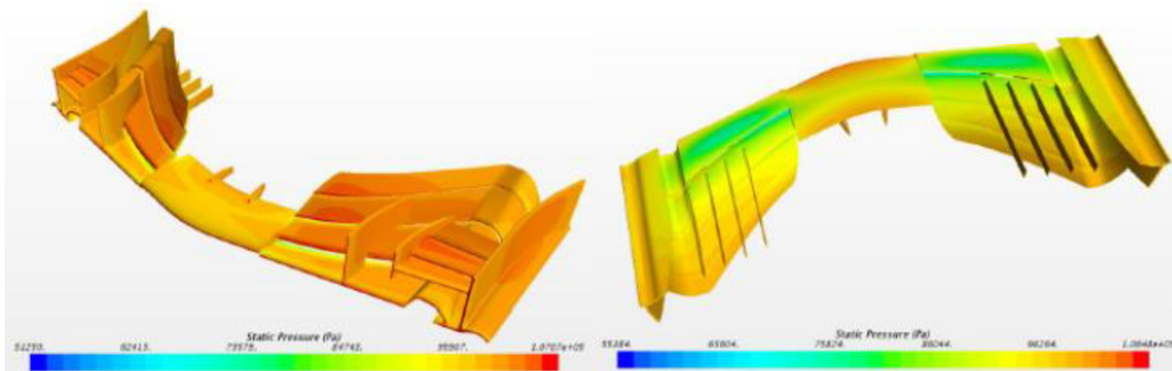
Na obrázku č. 28 vidíme modely předních křídel. Přední křídlo F2004 (vlevo) se skládá ze 2 elementů a přední křídlo RB13 (vpravo) z více elementů [21].



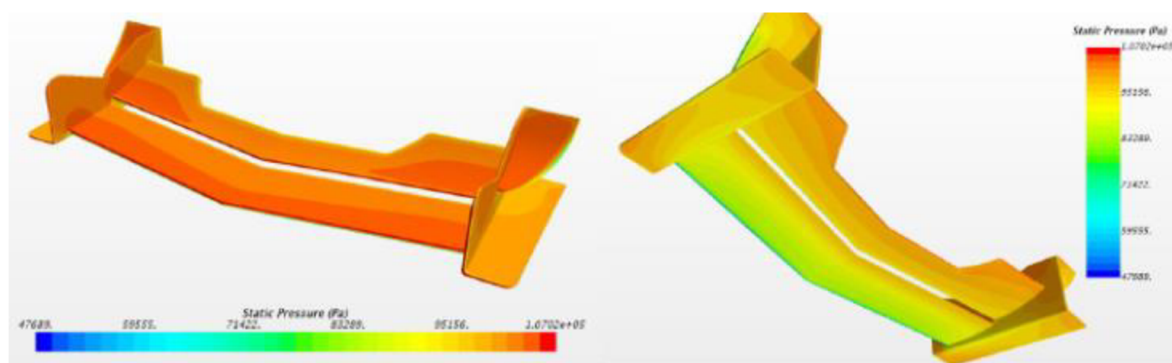
Obrázek 28: Přední křídla F2004 a RB13 [21]

Byly zkoumány případy proudění při rychlostech 50 m/s a 90 m/s, které slouží jako rychlostní vstupy. Tlakový výstup má hodnotu atmosférického tlaku. Úlohy byly řešeny pomocí symetrické OP, aby se ušetřily výpočetní prostředky. Musely být vytvořeny 2 různé domény, protože každé křídlo má podle tehdejších pravidel jinou šířku (1400 mm z roku 2004 a 1800 mm novější křídlo). Obě křídla byla umístěna ve světlé výšce odpovídající pravidlům z roku 2017. Jako turbulentní model byl zvolen k- ϵ [21].

Na obrázku č. 29 a obrázku č. 30 vidíme grafické znázornění statického tlaku na RB13, respektive F2004. Všimněme si oblasti vysokého tlaku na přední hraně předního křídla. Zde jsou tzv. stagnační body, kde je rychlost proudění nulová a statický tlak maximální [21].



Obrázek 29: Kontury statického tlaku křídla RB13 [21]



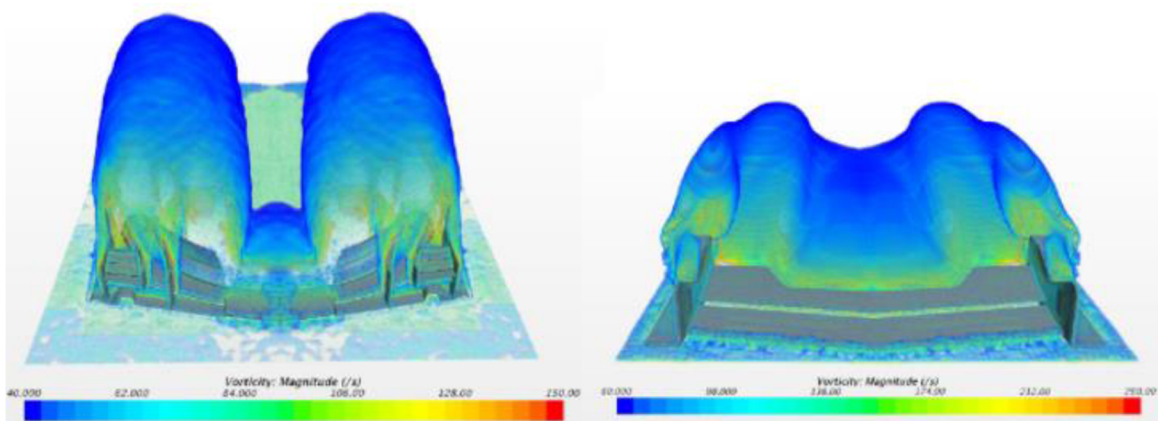
Obrázek 30: Kontury statického tlaku křídla F2004 [21]

V tabulce č. 7 je porovnání aerodynamických sil, které produkuje polovina křídla. Novější křídlo produkuje asi o 15 % víc přítlaku než křídlo z roku 2004. Je to dáno hlavně tím, že novější křídla mají vyšší úhel náběhu [21].

Tabulka 7: Porovnání aerodynamických vlastností křídel F2004 a RB13, upraveno z [21]

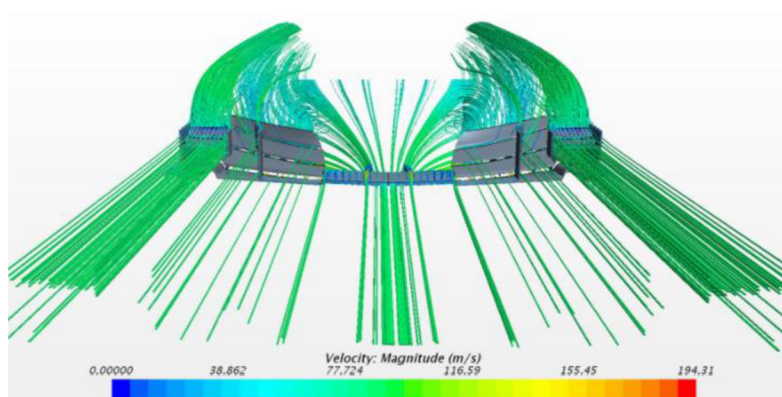
	50 m/s			90 m/s		
	F2004	RB13	Rozdíl	F2004	RB13	Rozdíl
Odpor (N)	74,11	179,27	141,89 %	248,66	581,43	133,82 %
Přítlak (N)	722,7	833,03	15,27 %	2425,89	2789,54	14,99 %

Úplavy tvořené předními křídly můžeme porovnat na obrázku č. 31. Znalost chování úplavu předního křídla je klíčová, protože pokud nefunguje přední křídlo, nefunguje ani zbytek aerodynamického balení. Vidíme, že mezi tvary úplavů je velký rozdíl [21].



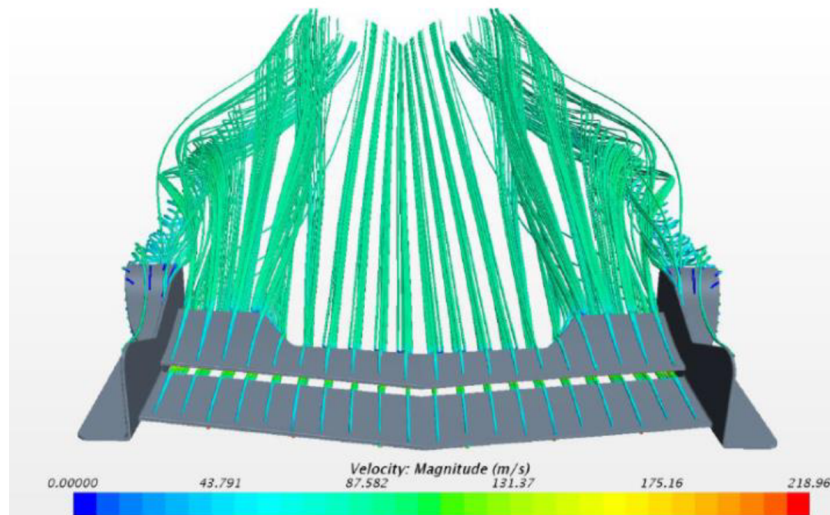
Obrázek 31: Úplavy od křídel RB13 a F2004 [21]

Potvrzení, že konstrukce předních křídel šla velkým krokem dopředu, vidíme na obrázku č. 32, kde má křídlo z roku 2017 daleko lepší schopnost odvádět proudění kolem předních kol než starší přední křídlo. Tvar proudění za předním křídlem bude samozřejmě jiný, protože do simulace nebyly zahrnuty další prvky vozu [21].



Obrázek 32: Proudění kolem křídla RB13 [21]

Při pohledu na křídlo F2004, viz obrázek č. 33, je vidět, že proudění směřuje spíše dovnitř a naráží do předních kol, což zvyšuje odpor. Je to dáno tím, že konstrukce křídel byla tehdy omezena šířkou. Na krajích křídla vidíme určité vírové struktury, které mají za úkol tvořit jakési utěsnění mezi podlahou a okolním prostředím, a tím pádem zvýšit efektivitu spodní části vozu [21].



Obrázek 33: Proudění kolem křídla F2004 [21]

CFD simulace zadního přitlačného křídla zde není zmíněna, protože bude následovat v 6. kapitole i s popsáním nastavení výpočtu a následného postprocessingu.

5.6 Zhodnocení CFD ve F1

S nástupem pokročilejších a výkonnějších počítačů se ještě více zvedne užitečnost CFD. Bude zajímavé sledovat, jestli se postupem času začne CFD používat více než aerodynamické tunely. Samozřejmě je diskutabilní, v jakém poměru, protože validace dat z CFD bude nutná pořád. Pokud se bude nadále rozvíjet CFD ve F1, budou z toho těžit další průmyslové odvětví.

6 CFD výpočet více-elementového přitlačného křídla

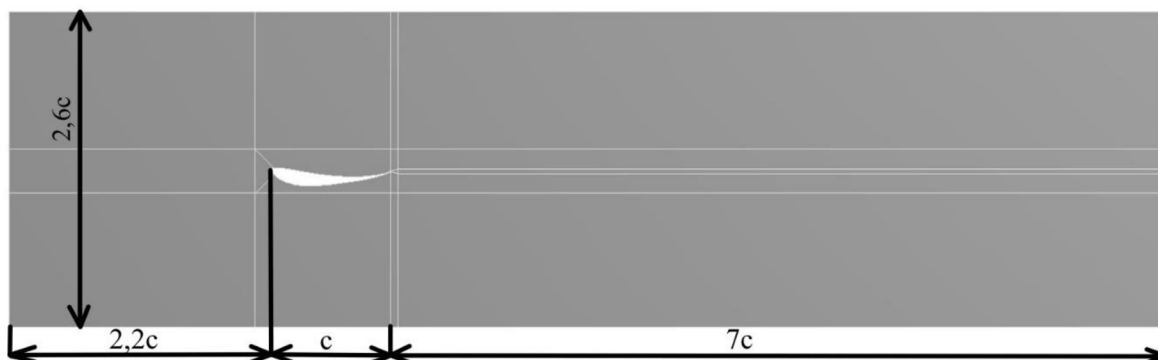
V této kapitole bude znázorněn CFD výpočet více-elementového křídla, které reprezentuje zadní přitlačné křídlo F1 ve 2D příčném řezu. Výsledky v této kapitole slouží jako podklad pro vypracování učební pomůcky do předmětu Hydromechanika. Ke studii byl vybrán aerodynamický profil S1223, který se vyznačuje vysokým koeficientem vztlaku C_L při nízkých Reynoldsových číslech. Všechny výpočty probíhaly v softwaru Ansys Fluent 2020 R1.

6.1 Kalibrace

Každý CFD výpočet by měl být porovnán s experimentálními výsledky, aby se předešlo chybným výsledkům. Kalibrace byla provedena vůči experimentálním hodnotám měřených v aerodynamickém tunelu v publikaci Low Speed Airfoil Data V1 [44] pro Reynoldsovo číslo $Re = 300\,000$. Kalibrace byla provedena na samostatném profilu, přičemž nastavení výpočtového modelu je aplikováno na více-elementové křídlo.

6.1.1 Dekompozice

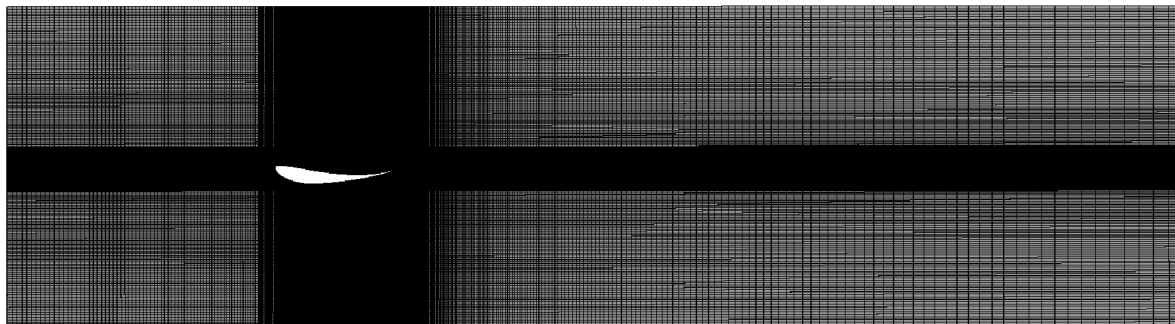
Byla zvolena délka tělavy aerodynamického profilu $c = 23$ cm, což zhruba odpovídá reálným rozměrům hlavního elementu zadního křídla F1. Na obrázku č. 34 je zobrazena dekompozice a její hlavní rozměry.



Obrázek 34: Výpočetní doména pro kalibraci

6.1.2 Síť

Rozdělení výpočetní domény na více bloků umožňuje vytvoření strukturované sítě s čtyřhrannými prvky, viz obrázek č. 35. Zhuštění sítě směrem k profilu je docíleno pomocí funkce „Edge sizing“ a nastavením parametru „Bias“. V oblastech zájmu je síť dostatečně hustá, naopak např. na okrajích domény, kde proudění není zajímavé z hlediska řešeného problému, je síť poměrně hrubá. Konečný počet prvků je 280 tisíc.



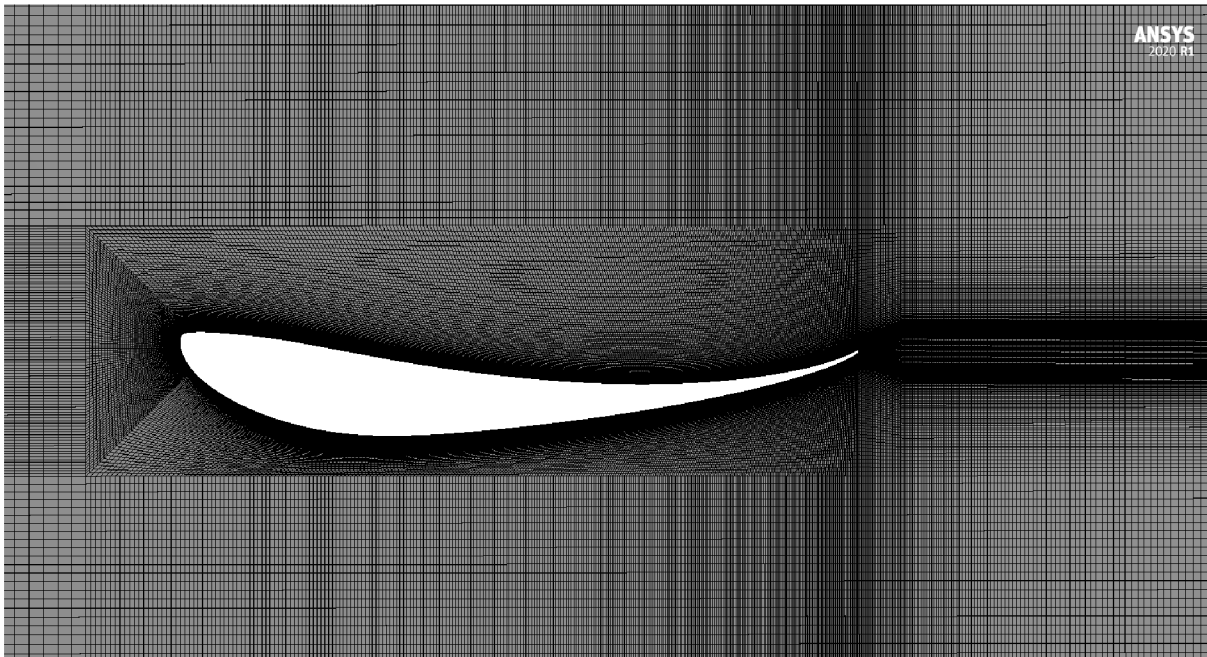
Obrázek 35: Výpočetní síť pro kalibraci

6.1.3 Zjemnění sítě v oblasti mezní vrstvy profilu

Mezní vrstvu lze rozdělit na tři podvrstvy. V bezprostřední blízkosti u stěny se nachází viskózní podvrstva. Následuje přechodová podvrstva a poté vnější oblast, též zvaná plně turbulentní vrstva. Chování tekutiny v oblasti mezní vrstvy lze řešit 2 způsoby. Můžeme použít tzv. stěnové funkce nebo přímo namodelovat proudění u stěny [45]. Vzdálenost od stěny je vyjádřena bezrozměrnou veličinou y^+ [46].

Stěnové funkce neřeší oblasti ovlivněné viskozitou, výpočetní síť může být hrubá a hodnota y^+ by měla být vyšší než 30. Přímé modelování proudění u stěny řeší i viskózní podvrstvu a je tedy nutné mít u stěny dostatečně jemnou síť, nejlépe když je $y^+ < 1$ [45].

Od začátku bylo uvažováno použití turbulentního modelu $k-\omega$ SST, pro který je doporučeno mít parametr $y^+ < 1$. Detail na zjemněnou síť vidíme na obrázku č. 36.



Obrázek 36: Detail na zjemnění sítě u stěn profilu

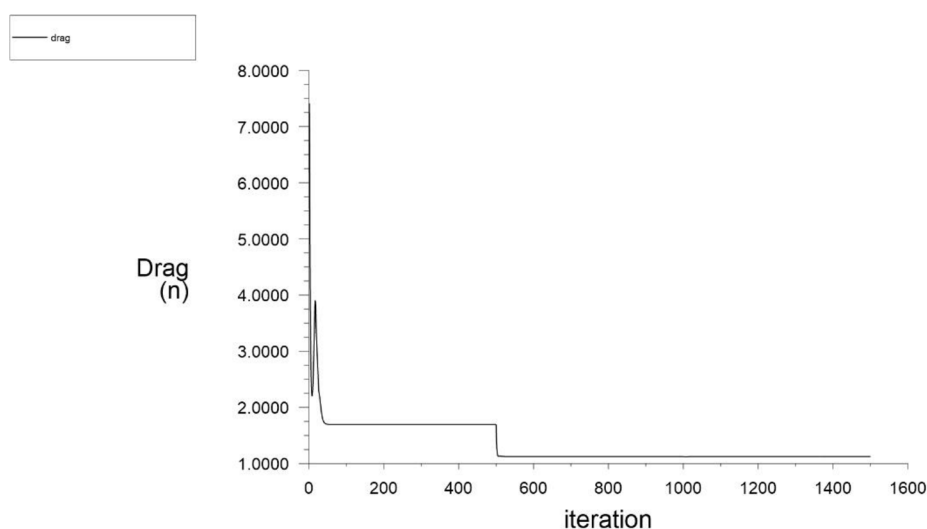
6.1.4 OP a výpočet

Výpočet v případě kalibrace probíhal pro rychlost proudění na vstupu $v = 19$ m/s, aby byla hodnota Reynoldsova čísla $Re = 300\,000$. Hodnoty hustoty vzduchu a dynamické viskozity jsou z databáze Ansys Fluent pro teplotu 288 K a atmosférický tlak 101 325 Pa.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 19 \cdot 0,23}{1,7894 \cdot 10^{-5}} = 299164 \approx 300\,000 \quad (6.1)$$

Jako další OP byl zvolen tlakový výstup s hodnotou atmosférického tlaku. Turbulentní intenzita na vstupu i výstupu je 2 % a jako hydraulický průměr byla nastavena maximální tloušťka profilu, která odpovídá hodnotě 0,028 m. Uvažujeme proudění viskózní tekutiny, ale na horní a spodní stěně výpočetní domény je zanedbáno ulpívání tekutiny. Při výpočtu je uvažováno stacionární proudění.

Numerické schéma výpočtu bylo nastaveno následovně: „Pressure-Velocity Coupling“ nastaveno na „Coupled“. Diskretizace rovnic gradientu, tlaku, hybnosti, turbulentní kinetické energie a její disipace byly prvně nastaveny jako „First order upwind“ a spočítány na 500 iterací. Poté byly přenastaveny na „Second order upwind“ a provedlo se dalších 500 iterací. Nakonec se nastavily na „Third order MUSCL“ a opět proběhlo 500 iterací. Hodnoty přítlaku a odporu se po 1500 iteracích ustálily a výpočet byl zastaven. Na obrázku č. 37 lze vidět postup iterací odporové síly působící na aerodynamický profil.



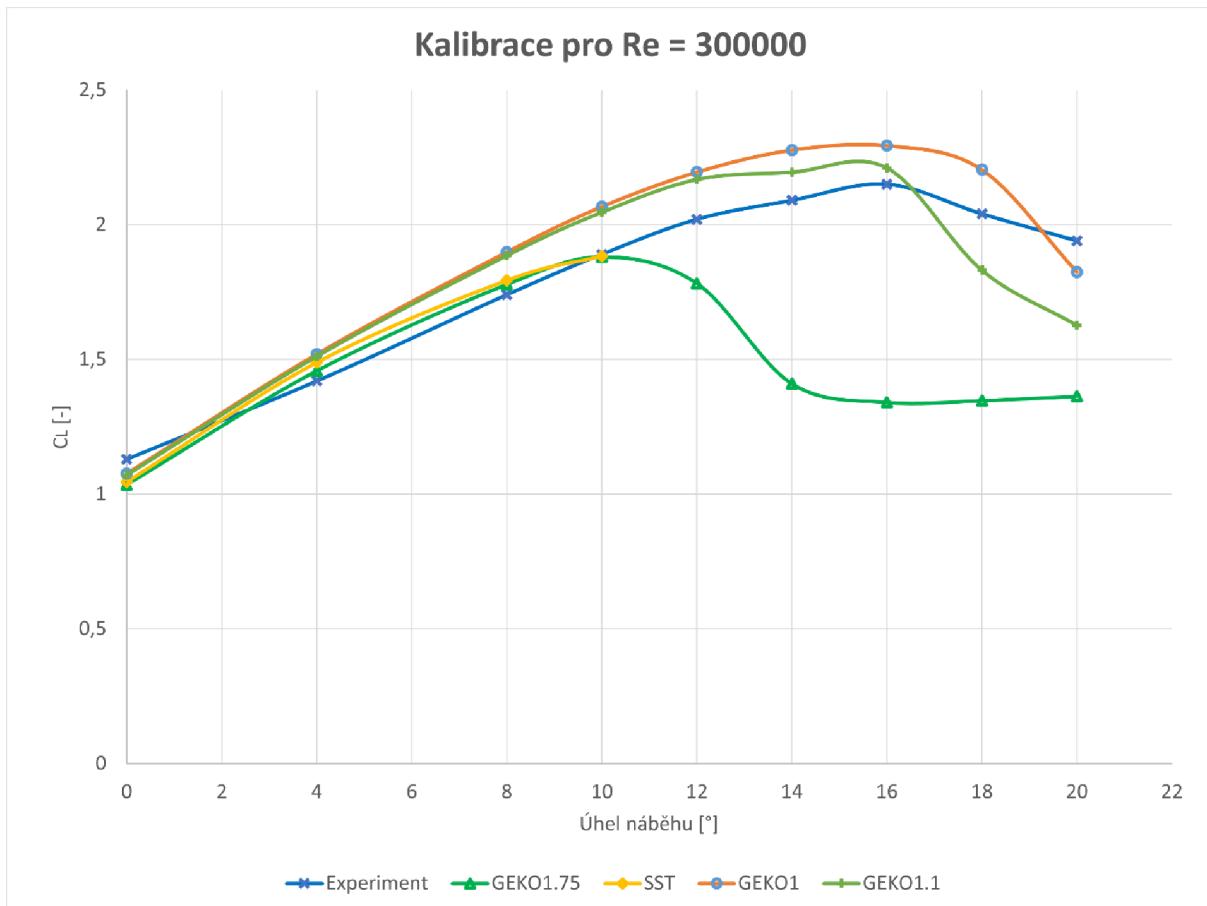
Obrázek 37: Postup iterací u hodnoty odporové síly

Výsledky kalibrace vidíme na obrázku č. 38. Při použití turbulentního modelu $k-\omega$ SST došlo k problémům s konvergencí při vyšších úhlech náběhu. Tento problém byl vyřešen použitím turbulentního modelu GEKO, který taktéž patří do rodiny $k-\omega$. GEKO má podobné požadavky na kvalitu sítě v blízkosti stěn jako SST, takže síť zůstala nezměněna.

GEKO umožňuje uživateli přizpůsobit si vlastnosti modelu v závislosti na situaci pomocí několika parametrů. V této práci se měnil parametr CSEP, který ovlivňuje chování modelu v oblasti odtržení proudění, tedy při vyšších úhlech náběhu, s čím byl problém u modelu SST. Výchozí hodnota parametru $CSEP = 1,75$ odpovídá turbulentnímu modelu SST. Tato skutečnost je patrná na obrázku č. 38 zobrazující závislost koeficientu vztlaku na úhlu náběhu, kde vidíme, že křivka GEKO1.75 kopíruje křivku SST do úhlu náběhu 10° . V tomto místě křivka SST končí kvůli výše zmíněným problémům s konvergencí. Nicméně křivka GEKO1.75 nedokázala napodobit křivku experimentálních hodnot a ukazuje špatné místo odtržení proudění.

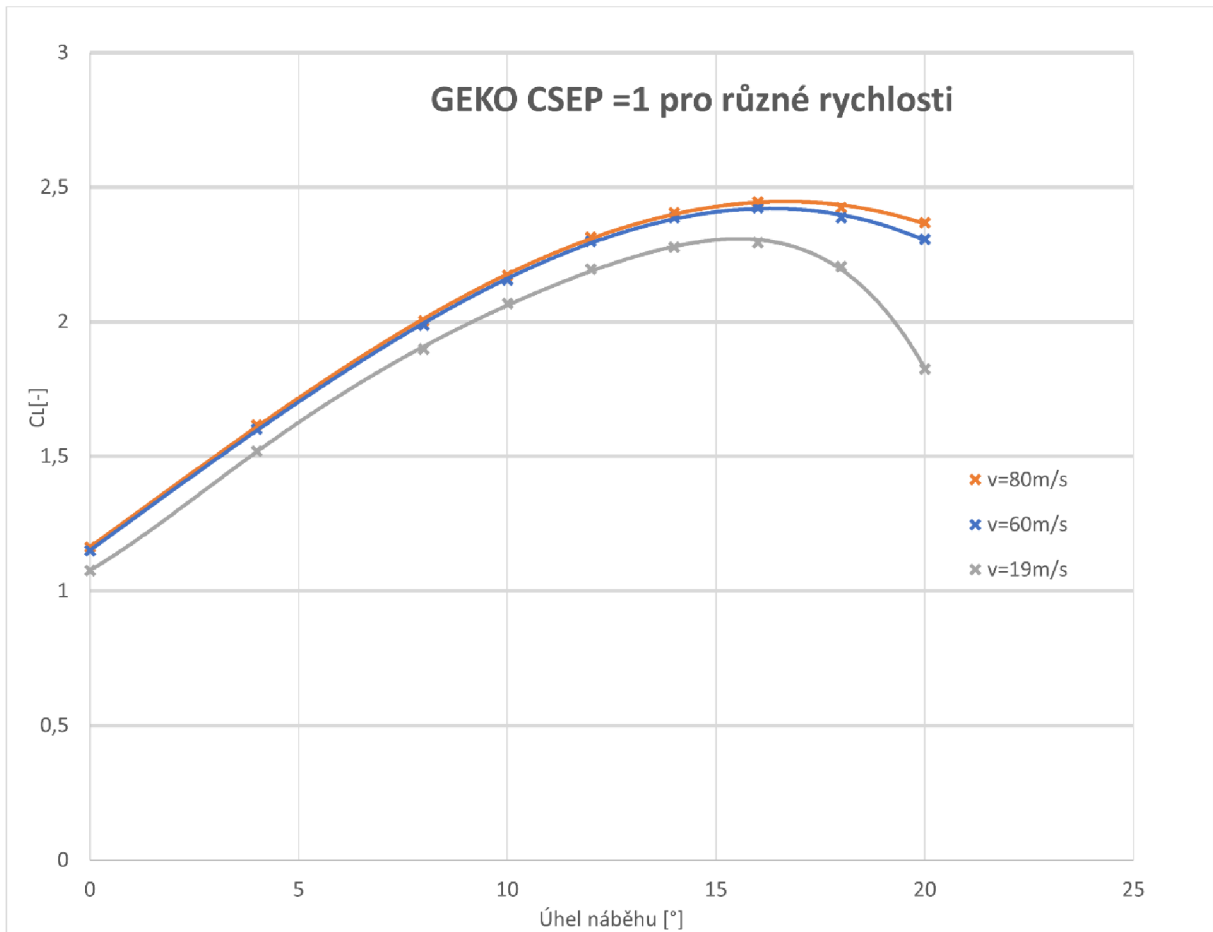
Byla provedena další úprava parametru CSEP, tentokrát na hodnoty 1 a 1,1. Vidíme, že i malá změna parametru CSEP vede k výrazné změně chování turbulentního modelu a je třeba k celé situaci přistupovat s citem.

Situaci nejlépe popisuje křivka s hodnotou parametru CSEP = 1, kde nejvyšší odchylka oproti experimentální hodnotě je 8,5 % při úhlu náběhu 10°. Je také správně vystihnout kritický úhel náběhu 16°. Turbulentní model GEKO s parametrem CSEP = 1 byl shledán vhodným a použit při všech ostatních výpočtech v této práci.



Obrázek 38: Výsledky kalibrace – závislost koeficientu vztlaku na úhlu náběhu pro různé turbulentní modely

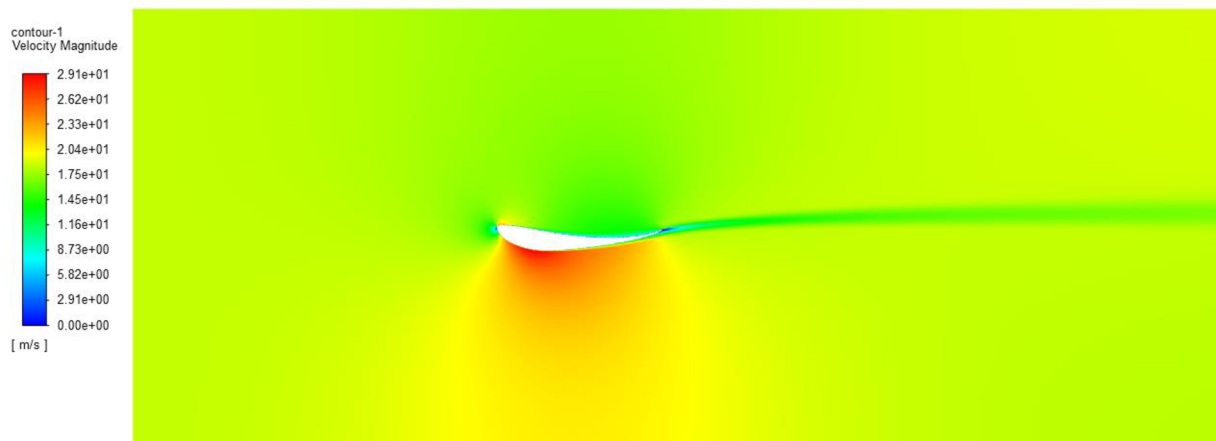
Vozy F1 málokdy jezdí rychlostí 19 m/s, a proto byly vytvořeny výpočetní modely i pro rychlosti 60 m/s a 80 m/s. Úpravou členu rychlosti v rovnici č. 6.1 dostaneme hodnoty Reynoldsova čísla 945 000, resp. 1 260 000. Křivky pro 19 m/s, 60 m/s a 80 m/s jsou zobrazeny na obrázku č. 39.



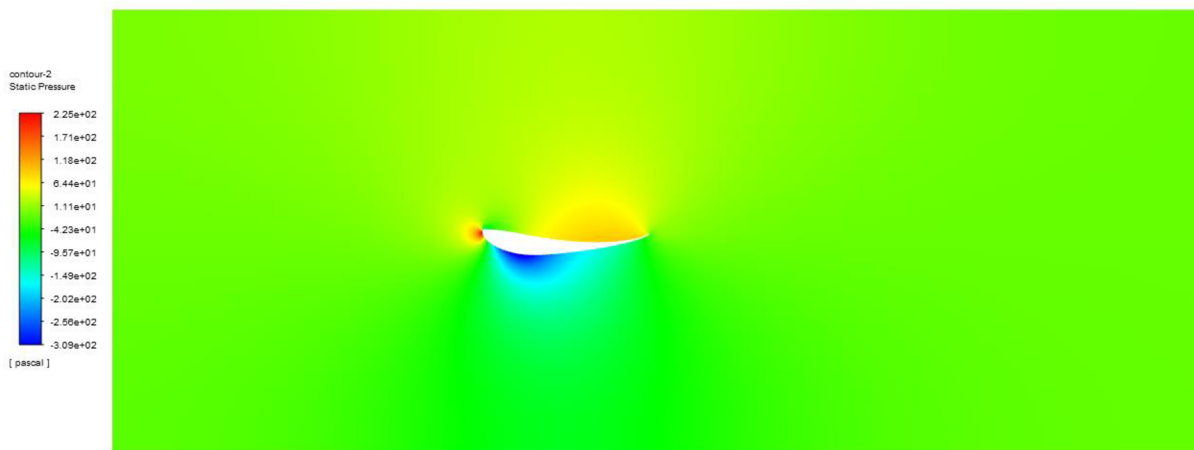
Obrázek 39: Závislost koeficientu vztlaku na úhlu náběhu pro různé rychlosti za použití turbulentního modelu GEKO s CSEP=1

6.1.5 Postprocessing

CFD softwary nabízí nejenom různé možnosti grafické vizualizace dat, ale také umí např. vykreslit grafy závislostí různých veličin. Dále je možné nechat si vypsát konkrétní číselné hodnoty veličin, které uživatele zajímají. Na obrázku č. 40 vidíme kontury rychlosti při úhlu náběhu 0° . Dle očekávání je vyšší rychlost na spodní hraně profilu, kde je tím pádem i oblast podtlaku. Malá modrá oblast u náběžné hrany značí stagnační bod, kde je rychlost nulová. Tato skutečnost je reflektována oblastí s vysokým tlakem na náběžné hraně viz obrázek č. 41.

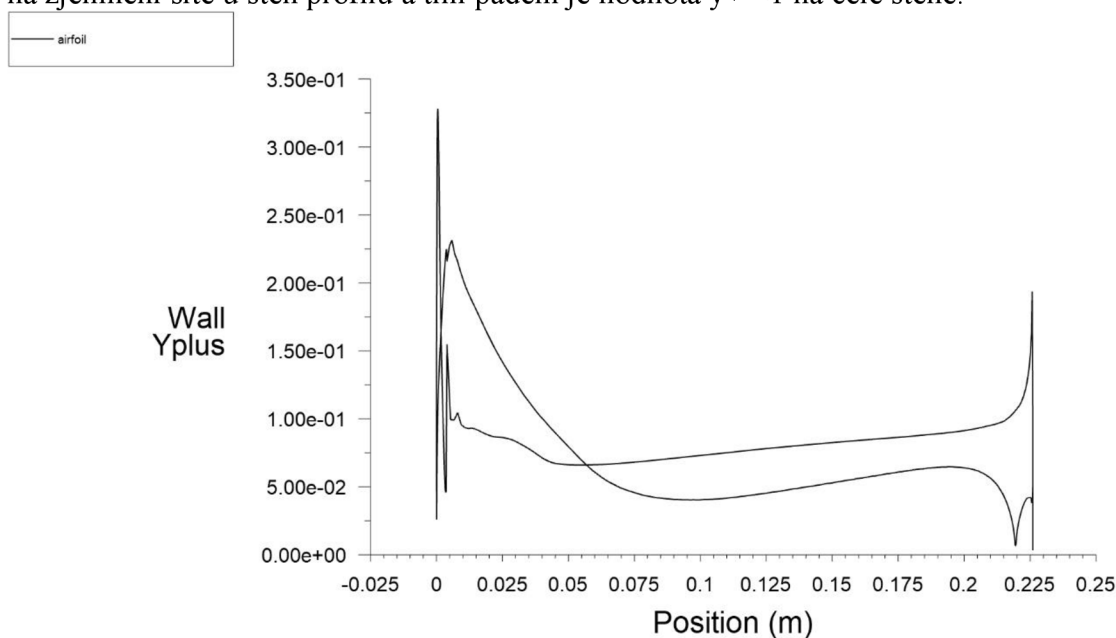


Obrázek 40: Kontury rychlosti



Obrázek 41: Kontury tlaku

Hodnotu y^+ na stěně aerodynamického profilu vidíme na grafu č. 42. Byl kladen důraz na zjemnění sítě u stěn profilu a tím pádem je hodnota $y^+ < 1$ na celé stěně.



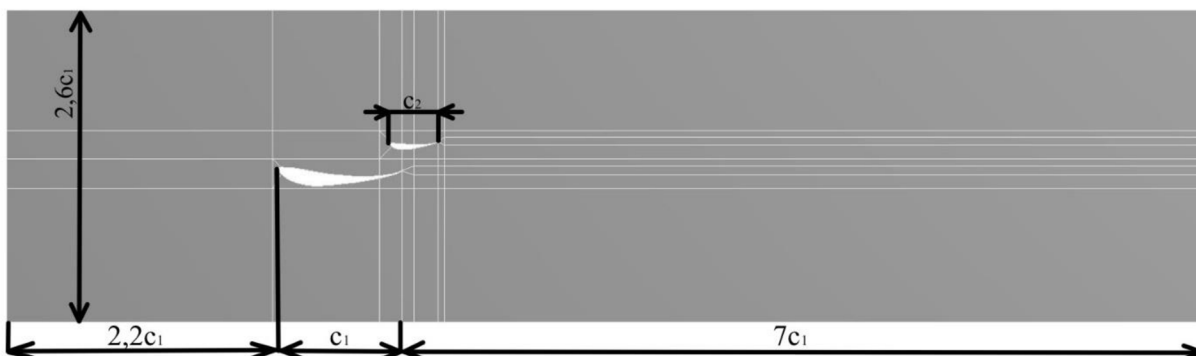
Obrázek 42: Hodnota y^+ na stěnách profilu

6.2 Simulace více-elementového křídla

Na základě kalibrace samostatného elementu byly vytvořeny simulace křídla se 2 elementy, jako je tomu u dnešních vozů F1. Byly provedeny výpočty pro 2 situace. V první situaci „DRS ON“ je druhý element v pozici nulového úhlu náběhu. V případě „DRS OFF“ má druhý element nenulový úhel náběhu.

6.2.1 Dekompozice

Rozměry výpočetní domény pro případ více-elementového křídla vidíme na obrázku č. 43. Hlavní element má délku tětiny $c_1 = 23$ cm a druhý element $c_2 = 0,4 \cdot c_1 = 9,2$ cm.

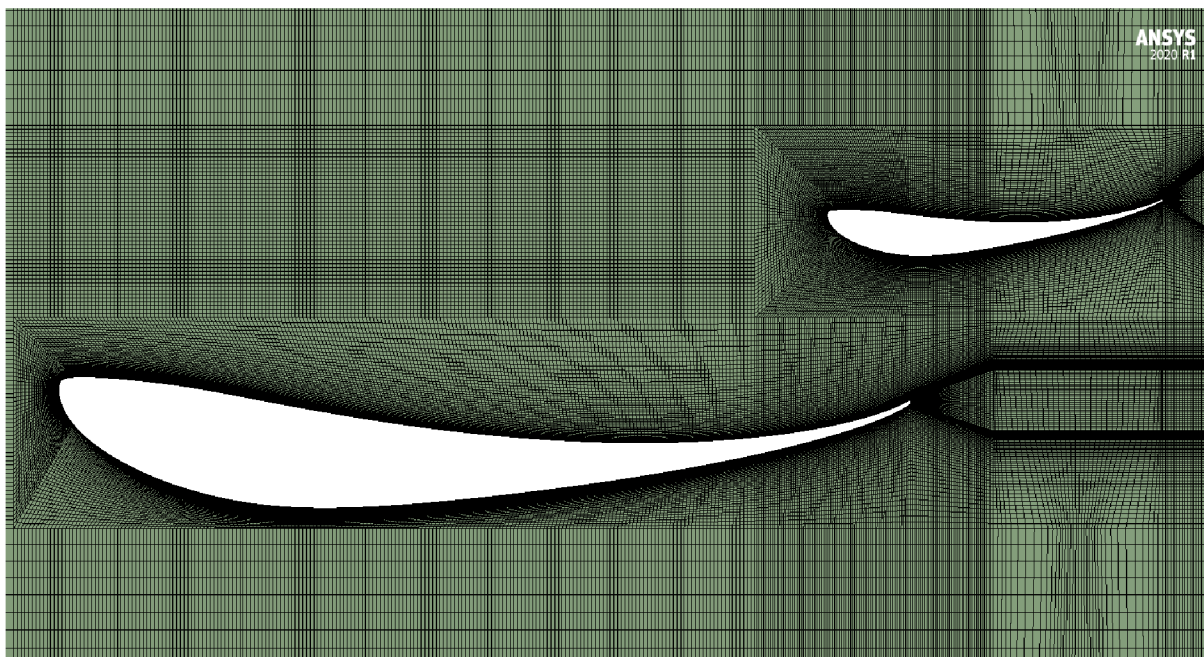


Obrázek 43: Rozměry výpočetní domény pro více-elementové křídlo

6.2.2 Síť a OP

Diskretizaci výpočetní domény pro situaci „DRS on“ s detailem na aerodynamické profily vidíme na obrázku č. 44. Nastavení funkcí „Edge sizing“ a „Bias“ je převzato z 6.1.2 a aplikováno na tento případ. Konečný počet prvků je 400 tisíc.

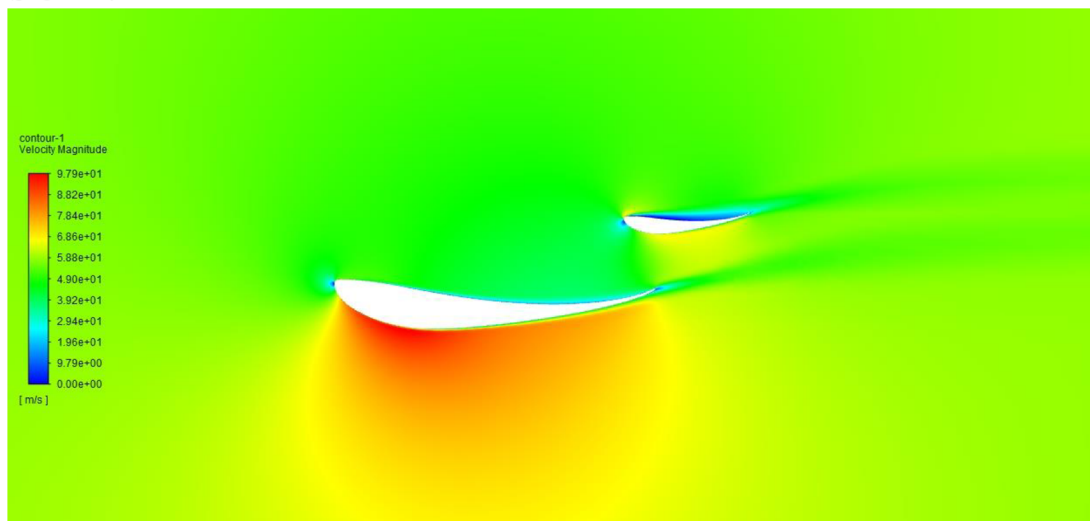
Nastavení OP zůstalo taktéž stejné jako v 6.1.4. Postup výpočtu zůstal rovněž stejný a probíhal pro rychlost $v = 60$ m/s. Jako turbulentní model byl použit GEKO s parametrem CSEP = 1.



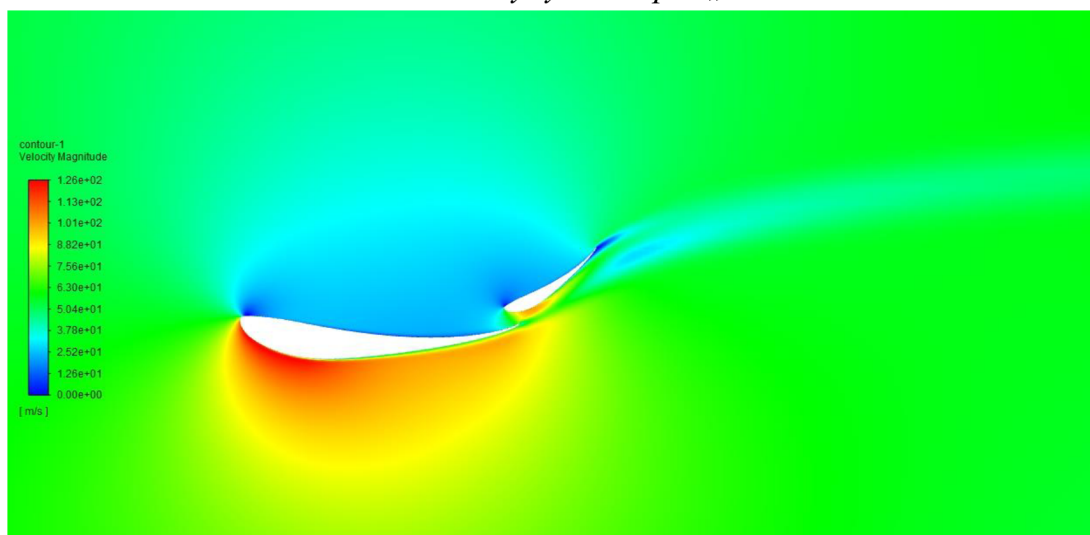
Obrázek 44: Výpočetní síť pro více-elementové křídlo s „DRS ON“

6.2.3 Posprocessing

Na obrázku č. 45 a obrázku č. 46 vidíme kontury rychlosti pro případ „DRS ON“, resp. „DRS OFF“.



Obrázek 45: Kontury rychlosti pro „DRS ON“



Obrázek 46: Kontury rychlosti pro „DRS OFF“

V tabulce č. 8 je zobrazeno vyhodnocení silového působení na více-elementové křídlo při situaci s deaktivovaným a aktivovaným systémem DRS. Při aktivaci DRS klesne přítlak křídla více než o polovinu původní hodnoty, ale na rovných částech tratě tato změna nemá na ovládání vozu velký vliv. Zároveň klesne odpor křídla o více než 2,5násobek původní hodnoty, což může vozy F1 zrychlit až o 10 km/h.

Tabulka 8: Vyhodnocení silového působení na více-elementové křídlo s funkcí DRS

	Vztlaková síla F_L	Odporová síla F_D
DRS OFF	-1925 N	46 N
DRS ON	-801 N	18 N

Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit rešerši týkající se využití CFD při návrhu aerodynamiky závodních automobilů a poté výukovou pomůcku pro předmět 5HY-Hydrromechanika. Práce se konkrétně zaměřuje na závodní automobily F1.

V rešeršní části jsou nejprve vysvětleny základní pojmy mechaniky tekutin, aby čtenář získal povědomí o řešeném problému. V práci se hovoří o dalších způsobech zjišťování aerodynamiky vozů F1. Jedná se o testování v aerodynamickém tunelu, které má stále stěžejní roli při návrhu aerodynamiky vozů F1, a poté testování na silnici, které slouží především k validaci dat.

Třetí kapitola pojednává o úvodu do CFD. Je zde vysvětlen postup CFD výpočtu od vytvoření sítě, volbu okrajových podmínek a modelu turbulence.

Čtvrtá kapitola je věnována aerodynamickým prvkům vozu F1. Je kladen důraz především na přední a zadní přitlačné křídlo, difuzor s podlahou a barge boardy.

V páté kapitole se řeší problematika využití CFD ve F1. Jednou z hlavních oblastí zájmu v aerodynamice F1 je úplav tvořený vozem F1. Vůz při jízdě v úplavu ztrácí velkou porci přitlaku a je v nevýhodě oproti vedoucímu vozu, ke kterému se dostává relativně nenarušené proudění. V práci jsou uvedeny konkrétní hodnoty a celkový dopad na aerodynamické vlastnosti pronásledujícího vozu. Změny pravidel týkajících se aerodynamiky F1 mají za cíl zredukovat úplav za vozem F1 a tím pádem by se závody měly stát vyrovnanější. Dále je v této kapitole uvedeno porovnání předních přitlačných křídel z roku 2004 a 2013 pomocí CFD.

Praktická část je věnována simulacím zadního přitlačného křídla vozu F1 ve 2D prostoru. K simulacím byl zvolen aerodynamický profil Selig S1223. Jako první byla provedena kalibrace výpočtu s experimentálními hodnotami naměřenými v aerodynamickém tunelu. Byl zvolen turbulentní model GEKO s parametrem CSEP = 1, který při kalibraci nejlépe vystihoval křivku naměřených dat a největší odchylka v jednom bodě byla 8,5 %. Nastavení z kalibrace bylo poté použito na více-elementové křídlo s funkcí DRS. Simulace z této kapitoly slouží jako podklad pro vytvoření výukové pomůcky.

Do budoucna by bylo vhodné na tuto práci navázat a rozvinout problematiku i do 3D prostoru. Dal by se simulovat celý model vozu F1, který by byl vhodným způsobem zjednodušený. Případně simulovat jenom některý aerodynamický prvek, např. zadní přitlačné křídlo, ale s překážkou před ním, která by ovlivňovala proudění a napodobovala tak karoserii vozu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] What is aerodynamics. *SimScale* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-aerodynamics/>
- [2] Laminar flow vs Turbulent flow. *Theengineeringconcepts* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.theengineeringconcepts.com/laminar-flow-vs-turbulent-flow/>
- [3] ÇENGEL, Yunus a John CIMBALA. *Fluid Mechanics: Fundamentals and applications*. 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2017. ISBN 9781259696534.
- [4] On Boundary Layers: Laminar, Turbulent and Skin Friction. *Aerospaceengineeringblog* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://aerospaceengineeringblog.com/boundary-layers/>
- [5] JANALÍK, Jaroslav a Pavel ŠTÁVA. *Mechanika tekutin*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. ISBN 8024800381.
- [6] Vorticity. *Science Direct* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/vorticity>
- [7] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Revised 2nd edition. [Cambridge]: Bentley Publishers.com, 2006. ISBN 9780837601427.
- [8] Dynamics of flight. *NASA.gov* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/UEET/StudentSite/dynamicsofflight.html>
- [9] Inclination effects on lift. *NASA.gov* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/incline.html>
- [10] SMEDLEY, Rob. F1 aero rakes: Rob Smedley on aero rakes. *Formula1* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.formula1.com/en/latest/article.smedley-what-are-aero-rakes.1F74d3YVUBzRRiZz9D3nZ4.html>
- [11] SMEDLEY, Rob. Testing explained: Rob Smedley on flow-vis paint. *Formula1* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.formula1.com/en/latest/article.testing-explained-rob-smedley-on-flow-vis.7nU2VePGlVrhIGa8wgCoLE.html>
- [12] How WIND TUNNELS Work - F1 explained - Sauber F1 Team. *Youtube* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=KC0E0wU6inU&t=1055s>
- [13] 2021 FORMULA 1 SPORTING REGULATIONS. *Fia* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: https://www.fia.com/sites/default/files/2021_formula_1_sporting_regulations_-_iss_7_-_2021-03-19.pdf
- [14] FIRST LOOK: Formula 1's 2021 car in the wind tunnel. *Formula 1* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.formula1.com/en/latest/article.first-look-formula-1s-2021-car-in-the-wind-tunnel.6ye3S7Pb8NRX1K7PjTBxtS.html>
- [15] ZIKANOV, Oleg. *Essential computational fluid dynamics*. 1st ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2010. ISBN 9780470423295.
- [16] Marussia Virgin Racing Split With Nick Wirth, To Build F1 Cars The Traditional Way. *Kunalsf1blog* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z:

- <https://www.kunalsf1blog.com/marussia-virgin-racing-split-with-nick-wirth-to-build-f1-cars-the-traditional-way/>
- [17] ANSYS Meshing Solutions. *Fluidcodes* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://fluidcodes.com/software/platform/ansys-meshing-solutions/>
- [18] Reporting Mesh Statistics. *Romeo.univ-reims* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://romeo.univ-reims.fr/documents/fluent/tgrid/ug/chp15.pdf>
- [19] GUERRERO, Alex a Robert CASTILLA. *Aerodynamic Study of the Wake Effects on a Formula 1 Car* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/en13195183](https://doi.org/10.3390/en13195183)
- [20] Secrets of Formula 1 Part 3 – The role of the Front Wing. *Totalsimulation* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.totalsimulation.co.uk/secrets-formula-1-part-3-role-front-wing/>
- [21] OGGIONI, Thomas. Aerodynamics of Formula One Front Wing and its Evolution. *Linkedin* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/aerodynamics-formula-one-front-wing-its-evolution-thomas-oggioni>
- [22] Front Wing Endplate. *Formula 1 Dictionary* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: http://www.formula1-dictionary.net/f_w_endplate.html
- [23] PIOLA, Giorgio. What F1's 2020 front wing designs tell us about each team. *Motorsport* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.motorsport.com/f1/news/2020-front-wing-designs-tech/4789058/>
- [24] How do F1 Rear Wings Work?. *Youtube* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=7pWuI2Fk57U>
- [25] TECH INSIGHT: How Ferrari, Mercedes and Red Bull solved the Baku wing conundrum. *Formula1* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.formula1.com/en/latest/article.tech-insight-how-ferrari-mercedes-and-red-bull-solved-the-baku.5D9rBoJK7u4e4Iq0o4wgUA.html>
- [26] TOET, Willem. How do motorsport diffusers work?. *Linkedin* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: https://www.linkedin.com/pulse/how-do-motorsport-ground-effect-diffusers-work-willem-toet?trk=portfolio_article-card_title
- [27] Days that Shook the F1 World - Ground effects banned, 1982. *Sidepodcast* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://sidepodcast.com/post/days-that-shook-the-f1-world-part-4-ground-effects-banned-1982>
- [28] Plank or skid block. *Formula 1 Dictionary* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: http://www.formula1-dictionary.net/plank_or_skidblock.html
- [29] Diffuser ban to make F1 cars two seconds slower. *Motor1* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.motor1.com/news/21731/diffuser-ban-to-make-f1-cars-two-seconds-slower/>
- [30] Barge Boards. *Formula 1 Dictionary* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: http://www.formula1-dictionary.net/barge_boards.html
- [31] HUGHES, Mark a Giorgio PIOLA. TECH TUESDAY - How Red Bull have played barge board catch up. *Formula1* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.formula1.com/en/latest/article.tech-tuesday-how-red-bull-have-played-barge-board-catch-up.2y1p4Uu3ygiUskYmUAsM8k.html>
- [32] MORGAN, Timothy Prickett. FORMULA ONE RACING CAN DRIVE CFD INNOVATION FASTER. *Thenextplatform* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z:

- <https://www.nextplatform.com/2016/02/05/formula-one-racing-can-drive-cfd-innovation-faster/>
- [33] Supercomputing in F1 – Unlocking the Power of CFD. *Formula 1 Dictionary* [online]. 2005 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <http://www.formula1-dictionary.net/Big/Supercomputing%20in%20F1%20-%20Unlocking%20the%20Power%20of%20CFD.pdf>
- [34] BMW Sauber presents new supercomputer. *Motorsport.com* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.motorsport.com/f1/news/bmw-sauber-presents-new-supercomputer/240144/>
- [35] F1 Engineering And Computational Fluid Dynamics Explained. *Engr.utexas* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.engr.utexas.edu/news/archive/7432-formula1cfd>
- [36] Appro Supercomputer to Support Renault's F1 Team. *Digitalengineering247* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.digitalengineering247.com/article/appro-supercomputer-to-support-renaults-f1-team/products>
- [37] Racing team uses Simcenter STAR-CCM+ and Fibersim to support continuous innovation. *Plm.automation.siemens* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/customers/renault-formula-one/39570/>
- [38] PECKHAM, Oliver. How Formula 1 Used Cloud HPC to Build the Next Generation of Racing. *Hpcwire* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.hpcwire.com/2019/12/12/how-formula-1-used-cloud-hpc-to-build-the-next-generation-of-racing/>
- [39] F1 Explained: 2021 Rule Changes with James Allison. *Youtube* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=UMwqR9M4SM8&t=521s>
- [40] NEWBON, J.J., D.B SIMS-WILLIAMS a R.G. DOMINY. *Analysis of the Impacts of Formula 1 Car Wakes on the Aerodynamic Performance of a Following Vehicle* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://dro.dur.ac.uk/22384/>
- [41] NEWBON, Joshua, David SIMS-WILLIAMS a Robert DOMINY. *Aerodynamic Analysis of Grand Prix Cars Operating in Wake Flows* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.4271/2017-01-1546>
- [42] THORN, Dan. OUR POPULAR (AND UNPOPULAR!) THOUGHTS ON THE 2021 F1 REGULATIONS. *Wtf1* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://wtf1.com/post/our-popular-and-unpopular-thoughts-on-the-2021-f1-regulations/>
- [43] REDDY, J. a Mayank GUPTA. FINDING THE OPTIMUM ANGLE OF ATTACK FOR THE FRONT WING OF AN F1 CAR USING CFD. *Wseas* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2006elounda2/papers/538-154.pdf>
- [44] SELIG, Michael, James GUGLIELMO, Andy BROEREN a Philippe GIGUERE. *Summary of low speed airfoil data*. 1st ed. Virginia Beach, Va.: SoarTech Publications, 1995. ISBN 0-9646747-1-8.
- [45] VLČEK, Petr. *Modelování turbulentního proudění* [online]. Praha, 2013 [cit. 2021-05-11]. ISBN 978-80-01-05285-3. Dostupné z:

<http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

- [46] EGGENSPIELER, Gilles. *Turbulence Modeling* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z:
<http://fluid.itcmp.pwr.wroc.pl/~pblasiak/CFD/UsefulInformation/turbulence-summary-4.pdf>

Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol	Veličina	Jednotka
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
v	Rychlost	[m/s]
L	Charakteristický rozměr	[m]
μ	Dynamická viskozita	[Pa·s]
C_D	Koeficient odporu	[-]
F_D	Odporová síla	[N]
S	Čelní plocha	[m ²]
C_L	Koeficient vztlaku	[-]
F_L	Vztlaková síla	[N]
ν	Kinematická viskozita	[m ² /s]
p	Tlak	[Pa]
Skw	Šikmost	[-]
θ_{max}	Největší úhel v buňce	[°]
θ_{min}	Nejmenší úhel v buňce	[°]
θ_e	Úhel pro rovnoramennou buňku	[°]

Seznam příloh

- 1 Prezentace: Proudové jevy pomocí CFD