



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů  
a kolejových vozidel

Metodika návrhu aerodynamiky vozu  
Formula Student

Aerodynamics design methodology of  
Formula Student car

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
2021

Bc. Martin ŠEVČÍK

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ  
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový  
Vedoucí práce: Ing. Petr Hatschbach, CSc.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ševčík** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **438352**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Metodika návrhu aerodynamiky vozu Formula Student**

Název diplomové práce anglicky:

**Aerodynamics design methodology of Formula Student car**

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte komplexní metodiku návrhu a posuzování vnější aerodynamiky vozu Formula Student v tomto rozsahu:

- Otestování různých výpočetních modelů CFD výpočtu celého vozu.
- Validací měření pomocí vhodné experimentální metody.
- Porovnáním simulací a experimentu zvolení vhodného výpočetního modelu.
- Stanovení metodiky simulací různých jízdních režimů vozu v soutěži Formula Student.
- Vytvoření účelné automatizace procesu simulace a vyhodnocení.
- Vytvoření systému pro správu, prohlížení a porovnávání simulačních dat.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Petr Hatschbach, CSc., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **14.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **14.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **19.09.2021**

\_\_\_\_\_  
Ing. Petr Hatschbach, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Oldřich Vítěk, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Anotační záznam

Jméno autora: Bc. Martin Ševčík

Název práce: Metodika návrhu aerodynamiky vozu Formula Student

Anglický název: Aerodynamic design methodology of Formula Student car

Rozsah práce:

- 102 stran
- 100 obrázků
- 5 tabulek
- 22 grafů

Akademický rok: 2020/2021

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

Studijní program: Strojní inženýrství – Dopravní, letadlová a transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Petr Hatschbach, CSc.

Klíčová slova: Aerodynamika, CFD, metodika, Formula Student, měření

Key words: Aerodynamics, CFD, methodology, Formula Student, measurement



## Abstrakt

Tématem této diplomové práce je příprava metodiky návrhu aerodynamických prvků pro vůz Formula Student pro tým CTU CarTech. Součástí práce je prvotní nastavení 3D CFD analýz celého vozu s různými výpočetními modely, jejich validace experimentálním měřením přímo na trati a výběr jednoho vhodného. Dále je připravena metodika simulací různých jízdních režimů vozu vyskytujících se na tratích soutěží Formula Student. Na závěr je celý výpočetní postup automatizován v programovacím jazyce Java a vytvořen systém na správu dat.

## Abstract

The topic of this diploma thesis is preparation of the methodology for design of aerodynamic elements for Formula Student race car for the CTU CarTech team. Part of the work is the initial setup of 3D CFD analyzes of the whole car with various computational models, their validation by experimental measurements directly on the track and the selection of suitable one. Furthermore, a methodology is prepared for simulations of various driving modes of the car occurring on the tracks of Formula Student competitions. Finally, the whole computational process is automated in the Java programming language and a data management system is created.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: “Metodika návrhu aerodynamiky vozu Formula Student” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: 8.7.2021

.....

(podpis autora)



## Poděkování (nepovinné)

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu, panu Ing. Petru Hatschbachovi, CSc., za vedení, rady, pomoc a podporu při tvorbě této diplomové práce.

Díky patří také panu doc. Ing. Oldřichovi Vítkovi, PhD. a panu doc. Ing. Tomášovi Hyhlíkovi, PhD. za velmi cenné a užitečné rady ohledně CFD problematiky.

Velice děkuji firmě 4Jtech, zejména panu Ing. Janu Čížkovi, PhD. a panu Ing. Janu Punčochářovi za možnost uskutečnění validačního měření, pomoc a rady při jeho realizaci a vyhodnocení.

Děkuji členům týmu CTU CarTech nejen za důvěru, podporu a pomoc při zpracování této práce, ale také za všechny zážitky, přátelství a skvěle strávený čas v dílně nebo na trati.

Na závěr bych rád vyjádřil své díky mé rodině. Za úžasnou podporu a pomoc po dobu celého mého studia, které by bez nich nebylo možné.



## Obsah

1 Úvod.....	10
1.1 Formula Student SAE .....	11
2 Cíl práce .....	13
3 Aerodynamika vozidel .....	14
3.1 Bernoulliho rovnice .....	14
3.2 Reynoldsovo číslo .....	14
3.3 Laminární a turbulentní proudění .....	14
3.4 Mezní vrstva .....	15
3.5 Tlakový koeficient.....	16
3.6 Aerodynamické síly působící na vozidlo .....	16
3.7 Obtékání pneumatik.....	19
3.8 Přítlačné křídlo.....	20
4 CFD.....	23
4.1 Základní rovnice mechaniky tekutin.....	23
4.1.1 Rovnice kontinuity.....	23
4.1.2 Zákon zachování hybnosti .....	23
4.1.3 Zákon zachování energie .....	24
4.1.4 Stavová rovnice.....	24
4.2 Modelování turbulentního proudění.....	24
4.2.1 RANS .....	25
4.2.1.1 Spalart Allmaras.....	26
4.2.1.2 Model $k - \epsilon$ .....	26
4.2.1.3 Model $k - \omega$ .....	27
4.2.1 DNS .....	28
4.2.2 LES.....	28
4.3 Modelování proudění u stěny .....	28
4.4 Metoda konečných objemů.....	30
4.5 Algoritmus SIMPLE.....	32
5 Experimentální metody v aerodynamice vozidel .....	34
5.1 Měření tlaku .....	34
5.2 Aerodynamický tunel.....	35



5.3 Pitot – statická sonda .....	38
5.4 Vizualizace proudění.....	39
5.5 Particle Image Velocimetry.....	40
6 Příprava výpočetního modelu .....	41
6.1 CAD model .....	41
6.2 Výpočetní doména a okrajové podmínky.....	43
6.3 Modelování rotace pneumatiky .....	44
6.4 Modelování chlazení.....	45
6.5 Výpočetní síť.....	49
6.6 Nastavení simulace .....	56
6.7 Sledované hodnoty.....	58
6.8 Vyhodnocení.....	59
7 Měření přínosu aerodynamických prvků.....	63
8 Validační měření tlakovými pásky .....	65
8.1 Tlakové pásky.....	65
8.2 Umístění senzorů.....	65
8.3 Průběh měření.....	66
8.4 Vyhodnocení.....	67
8.4.1 Přední přitlačné křídlo .....	68
8.4.2 Podlaha .....	70
8.4.3 Zadní křídlo .....	71
8.4.4 Boční strana monokoku.....	73
8.5 Kontrolní měření.....	74
8.6 Zhodnocení měření.....	75
9 Simulace jízdních stavů.....	77
10 Automatizace výpočetního procesu .....	83
10.1 Pojmenování úloh.....	83
10.2 Automatizační skript.....	84
10.3 Protokol a sdílená vývojová tabulka .....	90
10.4 Porovnávání výsledků .....	91
11 Závěr .....	93
12 Použitá literatura .....	94



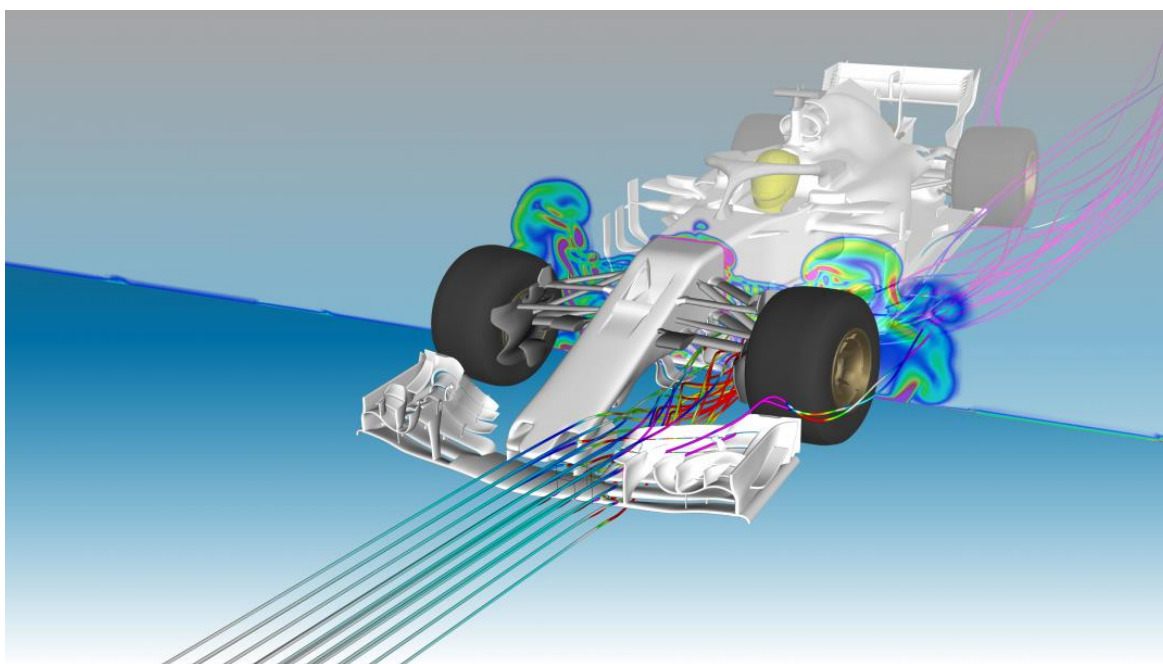


13 Seznam obrázků.....	96
14 Seznam tabulek .....	98
15 Seznam grafů .....	99
16 Seznam použitých symbolů a zkratk.....	100



## 1 Úvod

To, že je aerodynamika důležitým faktorem při návrhu závodních automobilů, věděli konstruktéři již ve 20. letech minulého století. Primárním cílem tehdy bylo snížení aerodynamického odporu pro dosažení maximální rychlosti a nižší spotřeby paliva. Postupem času se z aerodynamiky stala jedna z dominantních oblastí při vývoji vozu. Nejde již pouze o odpor vzduchu, ale také o vztlačovou a boční sílu a jejich rozložení mezi jednotlivé nápravy, přívod vzduchu do sání spalovacího motoru, či chlazení brzd a motoru. Aerodynamická oddělení výrobců závodních vozů mají na starosti jakoukoli tekutinu s nimi spojenou – ať už se jedná o palivo v nádrži, výfukové plyny, nebo vzduch obtékající karoserii. V současné době můžeme vídat na vozech vrcholných soutěží jako je Formule 1, WRC, či Le Mans velice komplikované aerodynamické tvary, které jsou výsledkem rozsáhlého vývoje. Pro dosažení požadovaných aerodynamických vlastností vozu je tedy nutná kvalitní vývojová metodika. Dříve byl primárním nástrojem pro vývoj aerodynamický tunel spolu s experimentálními měřeními přímo na trati. S rozvojem výpočetní techniky se stále ve větší míře využívá výpočetních CFD (CFD = Computational Fluid Dynamics) metod, které poskytují komplexní představu o aerodynamice vozu především díky téměř neomezeným možnostem vizualizace proudění (Obr. 1) a šetří množství nákladů spojených s výrobou prototypových dílů pro experimenty. Nespornou výhodou je také možnost simulací velkého množství geometrických variant nebo jízdních stavů v krátkém čase a v případě automatizace výpočtů i velkého množství získaných dat s minimální prací aerodynamika. Kvalitní výpočty obtékání vozů jsou však velice výpočetně náročné a je téměř nezbytné využít vysoce výkonných výpočetních center.



Obr. 1 Vůz týmu Alfa Romeo v CFD [1]



Ačkoli tyto metody dosahují stále lepších přesností, tak mají svá omezení a není možné se na ně plně spolehnout a je tedy nutné je pravidelně experimentálně validovat. Metodika návrhu je tedy kombinací experimentů na závodní trati, měření v aerodynamickém tunelu a CFD. Měření v tunelu i výpočetní kapacity jsou velice finančně náročné a často v motorsportu i regulované a je tedy nutné je využívat efektivně. Výjimkou byl tým Virgin Racing účastníci se šampionátu Formule 1, který aerodynamiku svých vozů navrhoval pouze pomocí CFD, ale nikdy žádných lepších výsledků nedosahoval. V soutěži Formula Student došlo k velkému rozvoji aerodynamiky kolem roku 2012 a pokud chce tým pomýšlet na nejvyšší příčky, tak se bez aerodynamických prvků již neobejde. Většina týmů nemá k dispozici aerodynamický tunel, do kterého by bylo možné umístit reálné vozidlo, či jeho zmenšený model, a proto tedy spoléhá hlavně na CFD simulace, experimenty na trati nebo měření dílčích částí v menších aerodynamických tunelech.

### 1.1 Formula Student SAE

Formula Student je mezinárodní studentská soutěž pro studenty bakalářských a navazujících magisterských programů. Jejím cílem je prohloubení a rozšíření znalostí studentů získaných při studiu a jejich příprava na praxi. Zadáním soutěže je vývoj a výroba jednomístného závodního speciálu s odkrytými koly pro víkendového závodníka. Návrh vozu je omezen technickými regulami tak, jak je tomu zvykem v běžných automobilových soutěžích. Aby byl dodržen vzdělávací účel soutěže, tak jsou technické regule v rámci bezpečných mezí napsány volně. Například není omezen typ motoru, velikost a výrobce pneumatik, nebo minimální hmotnost. Aerodynamika vozů je omezena pouze maximálními rozměry vztahenými na pneumatiky a vozovku, minimálními rádiusy hran a maximálními průhyby při různých zatíženích. To studentům poskytuje velkou svobodu při návrhu vozu a na soutěžích je tedy možné vidět celou řadu rozdílných řešení. Samotné závody nejsou pouze o jízdě vozu na trati. Základem jsou technické přejímky, kde se ověří soulad vozu s technickými regulami. Následně si musí studenti svá technická řešení obhájit v rámci statických disciplín, kde se hodnotí samotný postup návrhu vozu, cena vozu a jeho možná prodejní strategie. Je běžné, že při těchto disciplínách padají i teoretické inženýrské otázky, a tím jsou prověřeny i znalosti studentů. V disciplínách dynamických již vůz soutěží přímo v jízdě na trati v různých disciplínách – jízdě v osmičce, akceleraci, kvalifikační jízdě na 1km okruhu a vytrvalostním závodě na 22km s výměnou jezdců. Od roku 2009 má svůj tým i Fakulta strojní ČVUT v Praze. Tým nese název CTU CarTech, skládá se ze zhruba 40 studentů, pracuje již na návrhu vozu s pořadovým číslem 13 a pravidelně se účastní soutěží Formula Student v kategorii vozů se spalovacím motorem. První vůz týmu, který byl osazen aerodynamickým balíčkem byl FS.04, avšak pouze pro účely testování po závodní sezóně. Vůz FS.05 pro sezónu 2013 byl osazen předním a zadním křídlem již od svého prvního



výjezdu. Od té doby mají již všechny vozy týmu aerodynamický balíček, který každoročně prochází intenzivním vývojem (Obr.2).



*Obr. 2 Vůz FS.11 týmu CTU CarTech na okruhu v Mostě*



## 2 Cíl práce

Cílem této práce je návrh metodiky pro vývoj aerodynamických prvků vozu Formula Student pro tým CTU CarTech. V první části bych chtěl teoreticky popsat základní aerodynamické pojmy, aerodynamiku závodních automobilů a počítačovou dynamiku tekutin s možnostmi jejího experimentálního ověření. Dále provedu několik CFD simulací v softwaru STAR-CCM+ s různým nastavením výpočetní sítě, fyzikálního modelu výpočtu a porovná je mezi sebou. V další kapitole provedu měření pomocí tlakových pásek přímo na testovací trati na monopostu FS.11 a po zpracování dat zhodnotím jejich vhodnost použití pro validaci CFD simulací. V závěru provedu simulace různých jízdních stavů vozu a zautomatizuji celý proces včetně postprocessingu. Výstupem z práce by měla být ucelená metodika pro návrh aerodynamických prvků včetně optimalizace na různé jízdní režimy a připravený kompletní pracovní postup včetně zpracování dat.



## 3 Aerodynamika vozidel

### 3.1 Bernoulliho rovnice

Jednou ze základních rovnic mechaniky tekutin je zákon zachování energie pro ustálené proudění ideální tekutiny neboli Bernoulliho rovnice:

$$p_{1s} + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_{2s} + \frac{1}{2}\rho v_2^2 = p_c = konst. \quad (1)$$

Kde  $p_s$  je statický tlak,  $p_c$  tlak celkový,  $\rho$  hustota a  $v$  rychlost. Člen  $\frac{1}{2}\rho v^2$  se nazývá dynamický tlak. Z rovnice tedy vyplývá, že součet tlakové a kinetické energie bude rovný celkové energii a po proudnici bude konstantní. Důležitým poznatkem je vztah mezi rychlostí a tlakem. S rostoucí rychlostí bude statický tlak klesat a s klesající rychlostí bude naopak stoupat. [2]

### 3.2 Reynoldsovo číslo

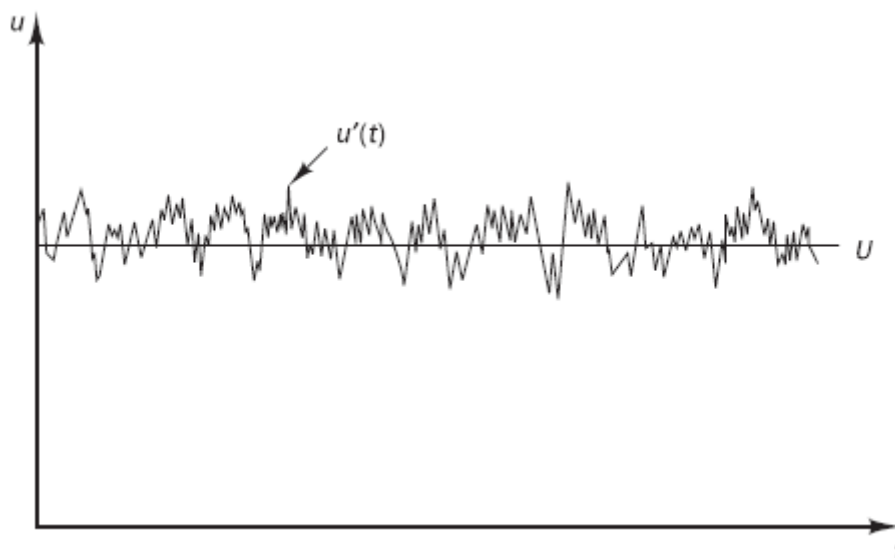
Poměr mezi setrvačnými a vazkými silami určuje bezrozměrné (podobnostní) Reynoldsovo číslo, které je definováno rovnicí:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2)$$

Kde  $D$  je charakteristický rozměr (např. u obtékání válce jeho průměr),  $\rho$  je hustota,  $v$  je rychlost a  $\mu$  je dynamická viskozita. Na jeho základě lze určit podobnost mezi dvěma prouděními, nebo porovnáním s kritickým Reynoldsovým číslem, zda je proudění laminární nebo turbulentní. Hodnota kritického Reynoldsova čísla silně závisí na zkoumaném problému. Se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem se bude zvyšovat i vliv setrvačných sil a vliv sil třecích bude naopak menší. [3]

### 3.3 Laminární a turbulentní proudění

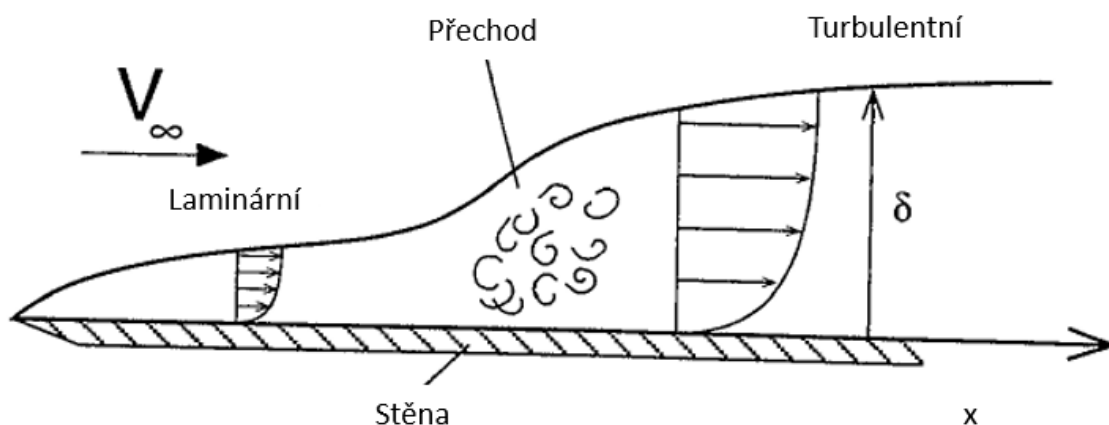
Z hlediska proudění lze rozlišit dva základní režimy. Při laminárním proudění se tekutina pohybuje v paralelních vrstvách ve směru průměrné rychlosti. Nedochozí k žádnému kolmému proudění, mísení vrstev ani k tvorbě vírů. Po překročení kritického Reynoldsova čísla přechází proudění v turbulentní. Pro něj jsou charakteristické chaotické změny rychlosti (Obr.3) a tlaku, tvorba vírů, nestacionárnost, či trojrozměrnost. V turbulentním proudění se vyskytují víry různých velikostí. Většinu energie obsahují velké víry, které se postupně rozpadají na menší. Tato disipace energie je zakončena rozpadem nejmenších vírů na teplo. [3] [4]



Obr. 3 Typický průběh rychlosti u turbulentního proudění [4]

### 3.4 Mezní vrstva

Při obtékání stěny dojde vlivem viskozity k zastavení nejbližší vrstvy tekutiny u povrchu a rychlost je zde tedy nulová. S rostoucí vzdáleností od stěny rychlost narůstá zpět do rychlosti okolního nenarušeného proudění. Tento nárůst rychlosti se nazývá mezní vrstva. Zpočátku je mezní vrstva laminární, ale se stoupající vzdáleností (a lokálním Reynoldsovým číslem) po povrchu roste její tloušťka, stává se nestabilní a přechází v turbulentní (Obr.4). Tento přechod se s rostoucí rychlostí přesunuje po povrchu více směrem dopředu.

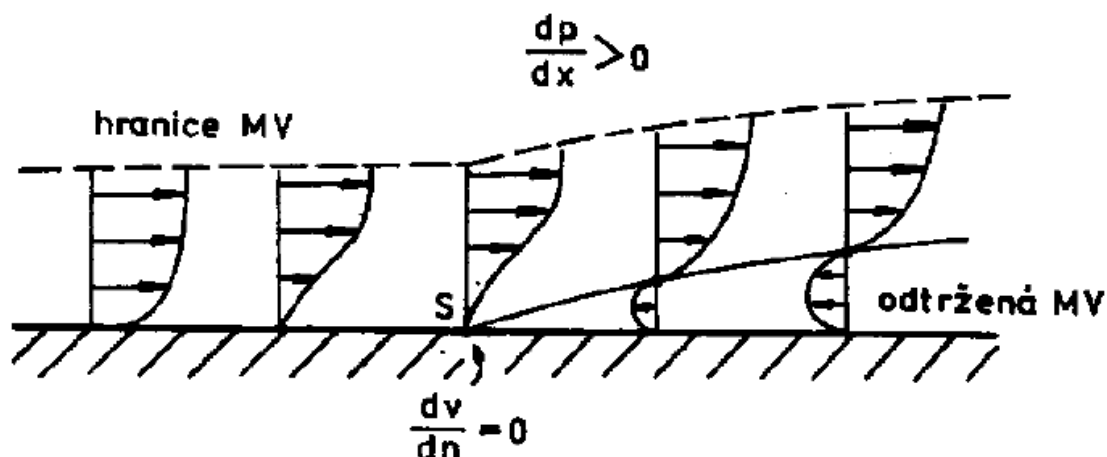


Obr. 4 Přechod laminární mezní vrstvy na turbulentní [3]

Turbulentní mezní vrstva je tlustší, dochází v ní k přenosu hybnosti i v kolmém směru na směr průměrné rychlosti proudění a oproti laminární mezní vrstvě bude oddáleno její odtržení, ale zároveň bude vyšší její třecí odpor. Z toho vyplývá, že pokud chceme dosáhnout co nejnižšího odporu, tak je vhodné udržet mezní vrstvu co nejdéle laminární. Naopak v případě vysoce zakřivených ploch (např. přitlačné křídlo, zadní část karoserie) je lepší mezní vrstva turbulentní, která vydrží déle přilnutá. Odtržení mezní vrstvy je nežádoucí jev, při kterém dojde k výraznému poklesu vztlaku, a je důsledkem tření a



nepříznivého tlakového gradientu, při kterém tlak po směru proudění narůstá. V blízkosti stěny je proudění stále více zpomalené a snižuje se stoupání rychlostního profilu. V určitém bodě překoná tření a nepříznivý tlakový gradient kinetickou energii lokálního proudění a dojde ke zpětnému proudění – odtržení mezní vrstvy (Obr.5). [5]



Obr. 5 Odtržení mezní vrstvy [5]

### 3.5 Tlakový koeficient

Tlakový koeficient je bezrozměrné číslo ukazující na velikost lokální statického tlaku a je dán rovnicí:

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2} \quad (3)$$

Kde  $p$  je lokální statický tlak,  $p_\infty$  je statický tlak v nenarušeném proudu vzduchu,  $\rho$  je hustota a  $v_\infty$  rychlost nenarušeného proudění nebo rychlost pohybujícího se tělesa. Pomocí tlakového koeficientu je možné mezi sebou porovnávat rozložení tlaků získaná při různých rychlostech. Obdobně lze napsat i vztah pro koeficient celkového tlaku:

$$c_{ptot} = \frac{P_{tot} - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2} \quad (4)$$

Místo statických tlaků se v něm vyskytuje lokální celkový tlak  $P_{tot}$  a celkový tlak nenarušeného proudu vzduchu  $P_\infty$ . Ukazuje tedy lokální poměrnou velikost součtu tlakové a kinetické energie. Díky tomu je možné sledovat kolik energie z nenarušeného proudu vzduchu ještě v proudění zbývá. [3][6]

### 3.6 Aerodynamické síly působící na vozidlo

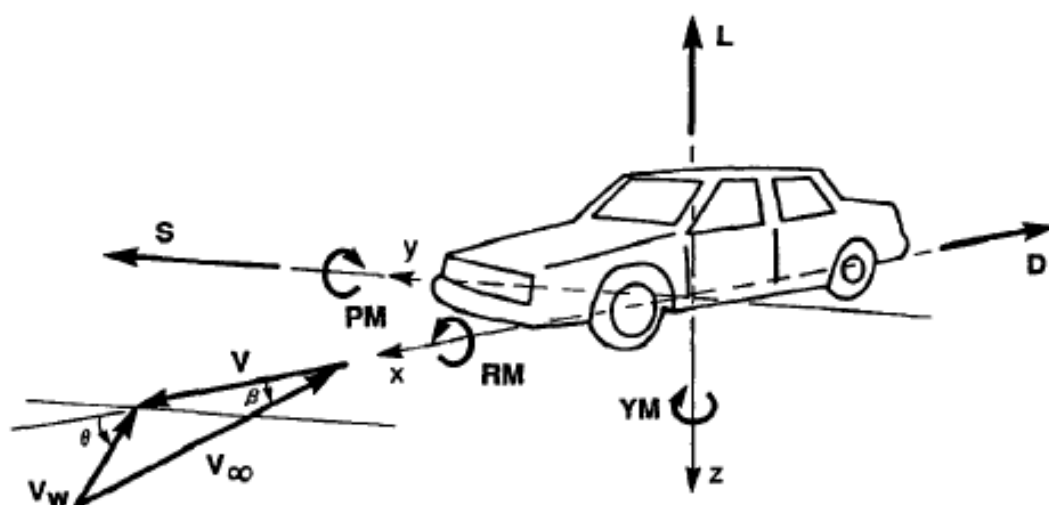
Aerodynamické síly vycházejí ze dvou zdrojů: rozložení tlaku (působící kolmo) a tečného napětí po povrchu. Celková působící síla a moment je výsledkem integrálu tlaku a tečného napětí po celém povrchu tělesa a je možné ji vyjádřit vztahem:





$$F = \frac{1}{2} \rho A c v^2 \quad (5)$$

Kde  $\rho$  hustota,  $A$  je referenční plocha,  $c$  aerodynamický koeficient a  $v$  rychlost proudění. Při jízdě vozidla lze působící sílu rozložit do tří složek a třech příslušných momentů (Obr. 3). V podélné ose  $x$  je to odpor (na obrázku  $D$  z anglického Drag) a klonivý moment (RM – Roll Moment). Ve svislé ose  $z$  je to síla vztlaková (L – Lift) a moment zatáčivý (YM – Yaw Moment). V ose příčné  $y$  působí boční síla (S – Side) a moment klopivý (PM – Pitch Moment). Působíště těchto sil se nazývá centrum tlaku.



Obr. 6 Aerodynamické síly a momenty působící na vozidlo [7]

Při práci v aerodynamice se ale častěji používají koeficienty sil a momentů:

$$c = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2 A} \quad (6)$$

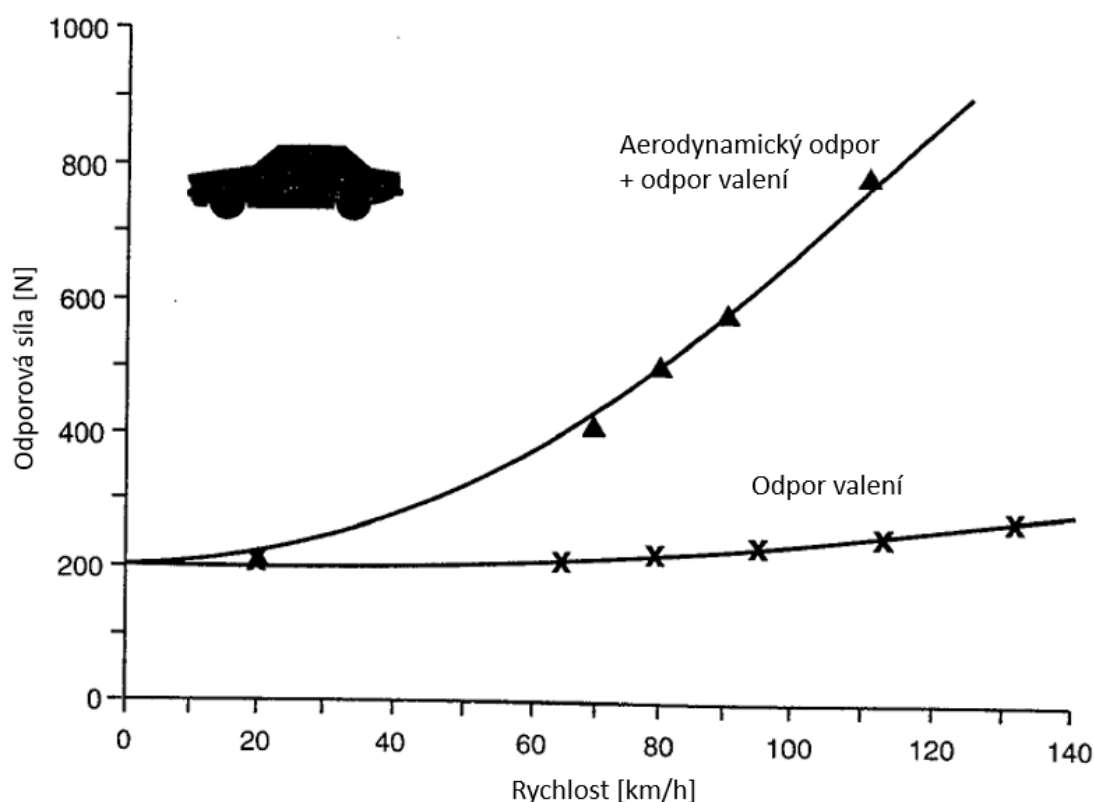
$$c_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2 A l} \quad (7)$$

kde  $F$  je aerodynamická síla,  $\frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2$  dynamický tlak,  $A$  referenční plocha a  $l$  referenční délka. Hodnoty referenční plochy a délky se liší dle zkoumané geometrie. V automobilovém průmyslu se standardně používá čelní plocha vozidla a jeho rozvor. Převedením síly na bezrozměrný koeficient dojde k odstranění vlivu rychlosti, hustoty a velikosti a spolu se znalostí referenční plochy je tedy možné porovnávat více vozidel mezi sebou. Označení koeficientů odpovídá silám, ze kterých jsou vytvořeny (případně z osy, ve které působí) a dostáváme tedy  $c_d$  pro koeficient odporu,  $c_l$  pro koeficient vztlaku apod.

Vlastnosti vozidla jsou působením aerodynamických sil značně ovlivňovány. Aerodynamický odpor působí proti směru pohybu vozidla a má přímý vliv na maximální rychlost a spotřebu paliva. U vozidel je dominantní příčinou vzniku odporu nesymetrické rozložení tlaku před a za vozidlem. V přední části karoserie dochází ke zpomalení proudění



(ve stagnačním bodě až k zastavení) a vzniku přetlaku. V okolí pneumatik, podvozku a za vozidlem dochází k odtržení proudění a vzniku podtlaku. Úplav může být ještě zvětšen indukovanými víry vznikajícími díky rozdílu tlaků nad a pod vozidlem nebo na koncích přítlačných křídel. Na vzniku odporu se podílí i tření mezi obtékajícím vzduchem a karoserií a je tedy ovlivněn kvalitou povrchu vozu. V porovnání s odporem tlakovým je třecí mnohem menší. Vzhledem k tomu, že aerodynamické síly rostou s druhou mocninou rychlosti je aerodynamický odpor od určité rychlosti dominantní složkou jízdních odporů a spotřebuje tedy velké množství hnacího výkonu, který by jinak mohl být využit na akceleraci a dosažení vyšší maximální rychlosti (Obr.7).



Obr. 7 Jízdní odpory působící na vozidlo [3]

Maximální síla, kterou jsou schopny pneumatiky přenést, je dána vertikálním zatížením a adhezním koeficientem, který je daný typem použité pneumatiky. Vertikální zatížení je určeno tíhou vozidla a vztlakem. Rozložením tlaku a rychlosti okolo karoserie nevzniká pouze odpor, ale zároveň vztlak. Vztlak je z hlediska chování vozu nežádoucí, protože působí svisle vzhůru a zatížení pneumatik tedy snižuje. Tvarem karoserie nebo přidáním aerodynamických prvků, jako jsou přítlačná křídla nebo podlahový difuzor, lze vztlak zcela odstranit nebo dokonce vytvořit sílu opačného směru – přítlak. Nejen že se díky tomu zvýší maximální rychlost, kterou je možné projet zatáčku, ale zlepší se také brzdě vlastnosti vozu a zkrátí se jeho brzděná dráha. To je významné zejména u závodních vozidel. Ideálním stavem by tedy byla co nejvyšší hodnota přítlaku s minimálním odporem. To však není



možné, protože s rostoucím přítlakem přirozeně roste i odpor a hodnoty přítlaku a odporu budou vždy určitým kompromisem pro dané podmínky. Pro vyjádření účinnosti aerodynamické konfigurace vozu se definuje poměr přítlaku ku odporu neboli aerodynamická efektivita:

$$A_{ef} = \frac{c_l}{c_d} \quad (8)$$

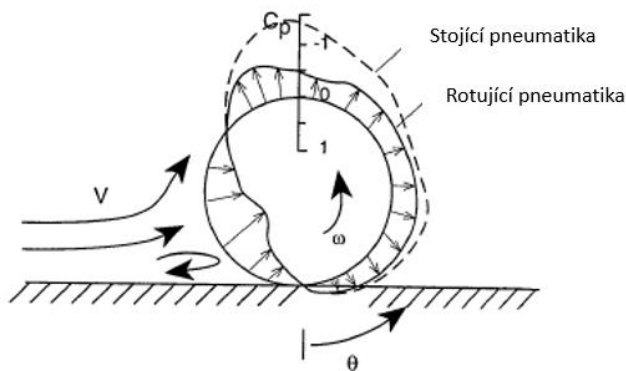
U vztlaku/přítlaku není důležitá pouze jeho velikost, ale také jeho rozložení mezi nápravami které určuje, která náprava bude mít více aerodynamické přilnavosti. Toto rozložení je dáno pozicí centra tlaku mezi přední a zadní nápravou a vyjadřuje se buď částí přítlačné síly působící na danou nápravu anebo procentuálně. Procentuální vyjádření vztlaku na přední nápravu je dáno vztahem:

$$A_{bal} = \frac{c_{lf}}{c_l} 100 \quad (9)$$

Kromě pozice centra tlaku je také vzhledem ke stabilitě vozu důležitá znalost jeho vzájemné polohy vůči těžišti. Pokud se nachází před těžištěm, tak moment vytvořený aerodynamickou boční silou bude vozidlo stáčet více do vnitřku zatáčky a vůz tak bude nestabilní a náchylnější na přetáčení. V případě, že je centrum tlaku za těžištěm, stáčí působící moment vozidlo směrem ze zatáčky a vozidlo tak bude stabilnější. [3]

### 3.7 Obtékání pneumatik

Obtékání rotující pneumatiky zásadně ovlivňuje proudění okolo vozu. Obzvláště je tomu tak u vozidel s odkrytými koly. Pochopení komplexního úplavu za pneumatikou a jeho ovlivnění je klíčové, ale zároveň velice obtížné. Pneumatika se za jízdy pod různými zatíženími deformuje a dochází tak ke změně jejího tvaru a tedy i úplavu. To však není snadné replikovat v aerodynamickém tunelu ani v CFD. Pro základní pochopení lze vycházet z obtékání válce. Ve volném prostoru dojde za válcem k odtržení a periodickému úplavu. Umístěním válce k vozovce dojde ke snížení periodického odtrhávání, ale úplav je zde stále veliký. Zároveň na přední straně válce v kontaktu s vozovkou dojde k zastavení proudění, nárůstu tlaku a jeho vytlačení po stranách kontaktní plochy pneumatiky s vozovkou. U reálné rotující pneumatiky je situace obdobná, ale bod odtržení se posouvá dopředu po směru rotace. Za tímto bodem bude téměř konstantní rozložení tlaku, které způsobí vznik odporu a vztlaku (Obr.8). U stojící pneumatiky lze vzhledem k lokálně přilnutému proudění na horní straně očekávat vyšší rychlost proudění, nižší tlak a tedy i vyšší vztlak a odpor než u pneumatiky rotující.

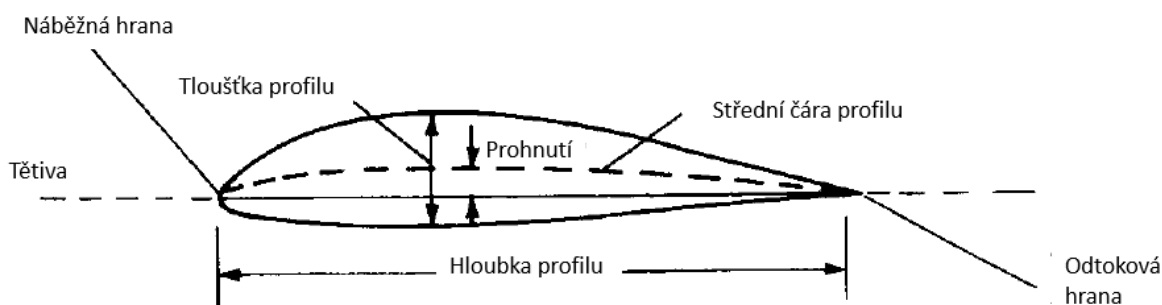


Obr. 8 Rozložení tlaku na stojící a rotující pneumatice [3]

Rotující pneumatika může být tedy zdrojem velké části celkového odporu vozidla a zároveň ovlivňuje účinnost prvků umístěných v jejich blízkosti. Vhodné je tedy kola pokud možno zakrýt. To ale pravidla soutěží s vozy s odkrytými koly včetně Formula Student zakazují, aby si vozy ponechaly svůj charakter, a proto se využívá různých deflektorů nebo vírů s vysokou energií pro odklonění a zmenšení úplavu pneumatiky. [3]

### 3.8 Přítlačné křídlo

Jak bylo vysvětleno v kapitole 3.6, tak přítlačná síla může značně vylepšit chování vozu a snížit čas na kolo na závodní trati. Jednou z možností vytvoření přítlačné síly je přítlačné křídlo. Základem každého křídla je jeho 2D profil, kterých existuje obrovské množství s různými vlastnostmi. Jejich základní geometrické charakteristiky jsou uvedeny na (Obr.9). V motorsportu byly původně využívány profily určené pro letecký průmysl, ale postupem času si většina výrobců závodních vozů s přítlačnými křídly začala navrhovat profily vlastní.

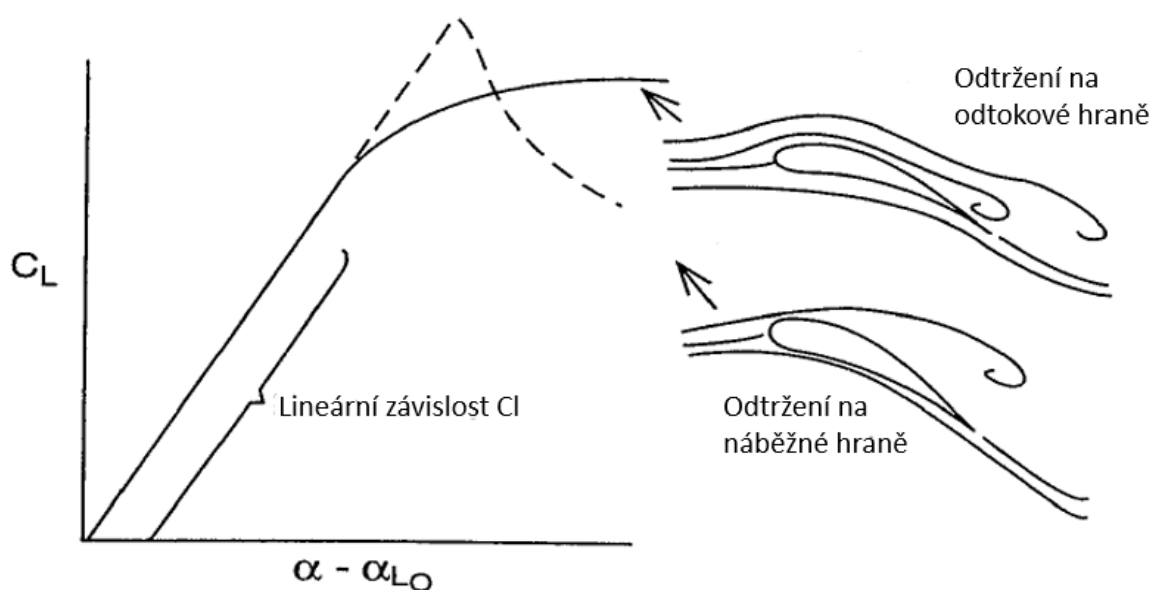


Obr. 9 Geometrické charakteristiky profilu [8]

Tekutina obtékající profil se rozdělí na dvě části – jedna proudí po spodní straně profilu a druhá po té horní. V místě rozdělení bude rychlost proudění nulová a tlak zde bude odpovídat tlaku celkovému. Toto místo se nazývá stagnační bod. Vzduch po horní straně profilu proudí rychleji než po té spodní a dle Bernoulliho rovnice dojde tedy na horní straně k podtlaku a na té spodní k přetlaku. Integrací tlaku po celé ploše profilu získáme výslednou působící sílu. Tu lze rozložit na dvě složky – vodorovnou (odpor) a svislou (vztlak). Přítlačnou sílu lze získat otočením profilu. Působíště této celkové síly se nazývá centrum tlaku a je zde

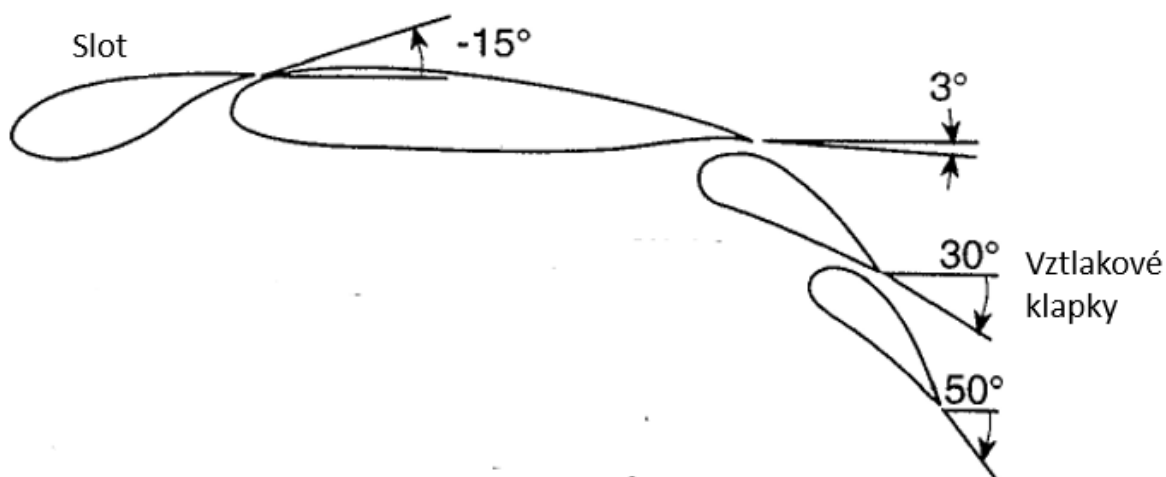


nulový působící moment. Hlavními parametry určující velikost síly, kterou je profil schopný vygenerovat, je délka tělavy (hloubka profilu), jeho tloušťka, prohnutí a úhel mezi tělavy a směrem nabíhajícího proudu vzduchu – úhel náběhu. Limitem úprav těchto parametrů pro dosažení vyššího vztlaku je vznik nepříznivého tlakového gradientu a odtržení mezní vrstvy. S tím přichází i nárůst tlakového odporu, který je značně vyšší než odpor třecí, a zároveň vysoký pokles vztlaku. Tento jev je tedy nežádoucí. U tenkých profilů s ostrou náběžnou hranou nastává při vyšších úhlech náběhu u náběžné hrany profilu náhlé odtržení. U tlustších profilů s větším prohnutím se odtržení postupně vyvíjí a dojde k němu blíže k odtokové hraně. Toto odtržení je výhodnější z hlediska menší náchylnosti na úhel náběhu než u odtržení na náběžné hraně. (Obr.10)



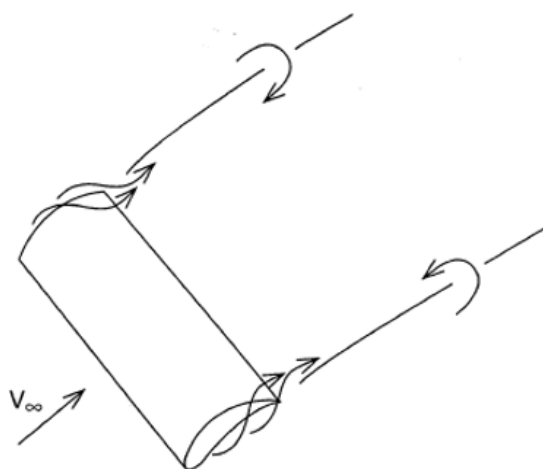
Obr. 10 Závislost součinitele vztlaku  $C_L$  na úhlu náběhu a odtržení proudění [3]

Zvětšení celkového prohnutí a délky tělavy, aniž by došlo k odtržení mezní vrstvy, lze dosáhnout přidáním dalších elementů a vytvoření tak víceprvkového křídla (Obr.11). Nejpoužívanější možností u křidel v motorsportu je přidání jedné nebo více vztlakových klapek. Tím nejenže dojde ke zvýšení prohnutí celého křídla, ale také k vytvoření štěrbinu mezi jednotlivými profily. Vzduch s vysokou energií projde štěrbinou na sací stranu křídla a zvýší rychlost zbrzděných částic mezní vrstvy a oddálí tím odtržení proudění. Zároveň lze úpravou úhlu náběhu klapky nastavovat celkové hodnoty přítlaku či aerodynamického rozvážení pro konkrétní podmínky či trať. Méně častou možností je použití tzv. slotu (Obr.11). Jeho efekt doplnění energie mezní vrstvy je podobný jako u vztlakové klapky s tím rozdílem, že přídatný profil je umístěn před náběžnou hranu hlavního profilu. Slot je spíše než u křidel v motorsportu využíván u křidel dopravních letadel.



Obr. 11 Geometrie více prvkového křídla [3]

Přirozenou vlastností vzduchu je snaha přecházet z oblasti s vyšším tlakem do oblasti s tlakem nižším. Přítlačné křídlo si tedy není schopné udržet tlakové rozložení v blízkosti svých konců, vzduch z tlakové strany přeteče do podtlakové a dojde ke vzniku silného víru (Obr.12) a snížení generovaného přítlaku a zvýšení indukovaného odporu. Aby se tomuto jevu zamezilo, tak se konce křídel osazují vertikálními deskami označovanými jako endplate. (Obr.13). [3]



Obr. 12 Koncové víry křídla [3]



Obr. 13 Endplate na zadním křídle vozu F1 [9]



## 4 CFD

CFD – Computational Fluid Dynamics slouží pro analýzu proudění tekutin nebo přestupů tepla pomocí výpočtového modelování. Uplatnění nachází v automobilovém, leteckém či lodním průmyslu, ale také při různých chemických procesech, návrzích budov a v mnohém dalším. Velkou výhodou CFD je snížení nákladů na výrobu fyzických prototypů pro testy a měření, úspora času při vývoji, možnost zkoumání systémů u kterých je to nebezpečné nebo nemožné a také téměř neomezené možnosti vizualizace výsledků a množství dat. Proces výpočtu se skládá ze tří základních kroků:

- 1) Preprocessing – příprava geometrie, definice okrajových podmínek, generování výpočetní sítě a výběr vhodných fyzikálních modelů a vlastností tekutiny
- 2) Řešení – integrace základních rovnic mechaniky tekutin, převedení integrálních rovnic na soustavu algebraických rovnic (diskretizace) a její iterativní řešení
- 3) Postprocessing – analýza výsledků [4]

### 4.1 Základní rovnice mechaniky tekutin

#### 4.1.1 Rovnice kontinuity

Zákon zachování hmotnosti vyjadřuje rovnice kontinuity, kterou je možné pro trojrozměrné stlačitelné proudění zapsat ve tvaru:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (10)$$

kde  $\rho$  je hustota tekutiny,  $t$  je čas a  $u$  je rychlost. Pokud je rychlost menší než 0,3 Machova čísla, tak je možné vzduch považovat za nestlačitelný, rovnici kontinuity zjednodušit a člen  $\frac{\partial \rho}{\partial t}$  vyřadit. Tím zbyde v rovnici pouze člen druhý, který v integrálním tvaru vyjadřuje tok hmoty přes hranice kontrolního objemu. [6]

#### 4.1.2 Zákon zachování hybnosti

Zákon zachování hybnosti vychází z Newtonova druhého pohybového zákona a vyjadřuje rovnost změny hybnosti částice a sil na ní působících. Pro obecnou veličinu  $\varphi$  ho lze vyjádřit vztahem:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varphi u) = -\text{div}(pI) + \text{div}T + f_b \quad (11)$$

kde  $f_b$  jsou vnější objemové síly (gravitační a odstředivé),  $p$  tlak a  $T$  je tenzor třecích napětí. Dosazením složek rychlosti  $u, v, w$  za  $\varphi$  dostáváme sadu tří pohybových rovnic ve směrech  $x, y, z$  kartézského souřadného systému. [6]



#### 4.1.3 Zákon zachování energie

Energetická rovnice vychází z prvního zákona termodynamiky, který říká, že zvýšení energie částice tekutiny je rovno součtu dodaného tepla a práce částici tekutiny:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \text{div}(\rho E \varphi) = \text{div}(\varphi \sigma) - \text{div} q + f_b * \varphi + S_E \quad (12)$$

kde  $E$  je celková energie na jednotku objemu,  $q$  tepelný tok,  $\sigma$  tenzor napětí (součet normálových a tečných) a  $S_E$  je zdroj energie. [6]

#### 4.1.4 Stavová rovnice

Rovnice kontinuity spolu s třemi rovnicemi zachování hybnosti a energetickou rovnicí vytvoří systém 5 parciálních diferenciálních rovnic. Zde se vyskytuje 7 neznámých -  $u, v, w, p, \rho, i, T$ . Vztah mezi termodynamickými veličinami  $p, \rho, i, T$  lze získat za předpokladu termodynamické rovnováhy, který lze popsat dvěma veličinami a zbylé dopočítat pomocí stavových rovnic:

$$p = \rho r T \quad (13)$$

$$i = c_v T \quad (14)$$

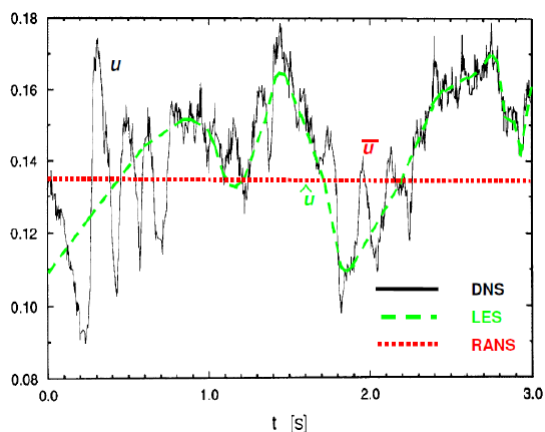
kde  $p$  je tlak,  $\rho$  hustota,  $r$  plynová konstanta,  $T$  teplota,  $i$  specifická vnitřní energie a  $c_v$  měrná tepelná kapacita při stálém objemu. Využití nacházejí v případě řešení stlačitelného proudění, kde díky změnám v rychlosti a tlaku může dojít i ke změně hustoty. V případě nestlačitelného proudění stačí pro řešení proudového pole pouze rovnice kontinuity, 3 rovnice zachování hybnosti a v případě řešení přestupů tepla ještě rovnice energetická. [4]

#### 4.2 Modelování turbulentního proudění

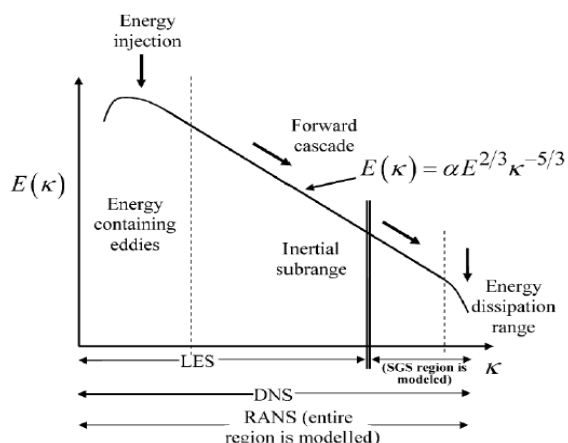
Převážná většina problémů proudění v technické praxi je turbulentních. Velikost fluktuací je v turbulentním proudění často velice malá s vysokými frekvencemi a proto jejich řešení v čase a prostoru je velice výpočetně náročné. Místo přímého řešení řídicích rovnic se tedy využívá průměrované, či filtrované veličiny turbulentního proudění a vliv malých vírů se aproximuje. Turbulentní modely mohou být rozděleny do dvou základních kategorií:

- Reynolds Averaged Navier Stokes – RANS
- Simulace řešící měřítko – LES (Large Eddy Simulation), DES (Detached Eddy Simulation) [6]





Obr. 14 Možnosti modelování turbulence [10]



Obr. 15 Energetické vírové spektrum [11]

#### 4.2.1 RANS

Nejpoužívanějším a výpočetně nejméně náročným způsobem modelování turbulence je metoda Reynoldsova středování (Reynolds Averaged Navier Stokes – RANS). RANS pomocí turbulentních modelů modeluje celé spektrum turbulentních vírů s časově zprůměrovanými hodnotami proudového pole. Menší náročnost této metody je však vykoupena nespolehlivými predikcemi přechodu do turbulence či odtržení proudění a proto by simulace provedené její pomocí měly být vždy experimentálně validovány.

Reynolds popsal turbulenci pomocí rozložení obecné veličiny  $\varphi$  na její průměrnou složku  $\bar{\varphi}$  a složku flukтуаční  $\varphi'$ :

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi'(t) \quad (15)$$

kde platí, že:

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (16)$$

Po časovém zprůměrování řídicích rovnic dostáváme:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u}) = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{\varphi})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{\varphi} \bar{u}) = -\text{div}(\bar{p}I) + \text{div}(\bar{T} + T_{RANS}) + f_b \quad (18)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{E})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{E} \bar{u}) = -\text{div}(\bar{p} \bar{u}) + \text{div}(\bar{T} + T_{RANS}) * \bar{u} - \text{div} \bar{q} + f_b \bar{u} \quad (19)$$

kde  $\bar{\varphi}$  je střední hodnota obecné veličiny,  $\bar{p}$  je střední hodnota tlaku,  $I$  je jednotkový tenzor,  $\bar{T}$  střední tenzor třecích napětí,  $f_b$  výslednice vnějších sil,  $\bar{E}$  střední hodnota celkové energie na jednotku hmoty a  $\bar{q}$  střední tepelný tok. Novým členem oproti původním rovnicím je člen  $T_{RANS}$  nazývaný tenzor Reynoldsových napětí:



$$T_{RANS} = -\rho \begin{pmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'w'} \end{pmatrix} + \frac{2}{3} \rho k I \quad (20)$$

kde  $k$  je turbulentní kinetická energie. V tomto tenzoru se však vyskytují další neznámé a je tedy nutné přidat k řešení další rovnice pro výpočet Reynoldsových turbulentních napětí, aby bylo možné provést řešení celé soustavy. To se provádí pomocí modelů turbulence, které mohou mít jednu, dvě či více dalších rovnic. Turbulentních modelů je celá řada s různými variantami a jejich použití závisí na konkrétní aplikaci. Dále budou představeny pouze ty nejběžnější. [6]

#### 4.2.1.1 Spalart Allmaras

Model Spalart Allmaras řeší navíc jednu transportní rovnici pro upravenou difuzivitu  $\tilde{\nu}$ . Primárně byl navržen pro letecké aplikace a poskytuje dobré výsledky pro mezní vrstvu s velkým tlakovým gradientem. Transportní rovnice je dána vztahem:

$$\frac{\partial(\rho\tilde{\nu})}{\partial t} + \text{div}(\rho\tilde{\nu}\bar{v}) = \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \text{div}[(\mu + \rho\tilde{\nu})\text{div}\tilde{\nu}] + P_{\tilde{\nu}} + S_{\tilde{\nu}} \quad (21)$$

kde  $\bar{v}$  je střední rychlost,  $\mu$  dynamická viskozita,  $\sigma_{\tilde{\nu}}$  je konstanta modelu stanovovaná z experimentů pro základní typy turbulentního proudění,  $P_{\tilde{\nu}}$  je produkce a  $S_{\tilde{\nu}}$  je zdrojový členy definovaný uživatelem.

Turbulentní viskozita se vypočte ze vztahu:

$$\mu_t = \rho f_{v1} \tilde{\nu} \quad (22)$$

kde  $f_{v1}$  je tlumicí funkce napodobující pokles turbulentního míchání v blízkosti stěn. [6]

#### 4.2.1.2 Model $k - \varepsilon$

Turbulentní model  $k - \varepsilon$  má dvě další samostatné transportní rovnice pro turbulentní kinetickou energii a disipaci turbulentní kinetické energie. V praxi je jedním z nejpoužívanějších v mnoha verzích.

Vztah pro turbulentní kinetickou energii je definován následovně:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (23)$$

Disipace turbulentní kinetické energie je definována takto:

$$\varepsilon = 2\nu \overline{S'_{ij} S'_{ij}} \quad (24)$$

kde  $S'_{ij}$  jsou složky tenzoru deformace.

Transportní rovnice popisující turbulenci jsou dány vztahy:



$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho k \bar{v}) = \operatorname{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \operatorname{div} k \right] + P_k - \rho(\varepsilon - \varepsilon_0) + S_k \quad (25)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \varepsilon \bar{v}) = \operatorname{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \operatorname{div} \varepsilon \right] + \frac{1}{T_c} C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} f_2 \rho \left( \frac{\varepsilon}{T_c} - \frac{\varepsilon_0}{T_0} \right) + S_\varepsilon \quad (26)$$

kde  $\bar{v}$  je střední rychlost,  $\mu$  dynamická viskozita,  $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$  jsou konstanty modelu,  $P_k, P_\varepsilon$  jsou členy produkce,  $f_2$  je tlumící funkce a  $S_k, S_\varepsilon$  jsou zdrojové členy definované uživatelem.

Turbulentní viskozita se vypočte ze vztahu:

$$\mu_t = \rho C_\mu f_u k T \quad (27)$$

kde  $C_\mu$  je konstanta modelu,  $f_u$  je tlumící funkce a  $T$  je časové turbulentní měřítko.

Ve své standardní variantě je model  $k - \varepsilon$  použitelný pouze pro proudění s vysokými Reynoldsovými čísly protože vyžaduje plně turbulentní proudění a zanedbává efekty molekulární viskozity. [6]

#### 4.2.1.3 Model $k - \omega$

Dalším často používaným dvourovnicovým modelem je model  $k - \omega$ . Místo rovnice pro disipaci turbulentní energie však řeší rovnici pro specifickou disipaci energie  $\omega$  definovanou následovně:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (28)$$

Jeho výhodou oproti modelu  $k - \varepsilon$  je lepší predikce chování proudění při nepříznivých tlakových gradientech v mezní vrstvě a tedy lepší předpověď odtržení proudění a je ho tedy možné použít v celé mezní vrstvě až do viskózní podvrstvy v blízkosti stěny. Naopak nevýhodou je citlivost výpočtů v mezní vrstvě na specifickou disipaci energie ve volném proudění mimo smykové vrstvy. Transportní rovnice jsou dány vztahy:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho k \bar{v}) = \operatorname{div}[(\mu + \sigma_k \mu_t) \operatorname{div} k] + P_k - \rho \beta^* f_{\beta^*} (\omega k - \omega_0 k_0) + S_k \quad (29)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \omega \bar{v}) = \operatorname{div}[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \operatorname{div} \omega] + P_\omega - \rho \beta f_\beta (\omega^2 - \omega_0^2) + S_\omega \quad (30)$$

kde  $\bar{v}$  je střední rychlost,  $\mu$  dynamická viskozita,  $\sigma_k, \sigma_\omega, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$  jsou konstanty modelu,  $P_k, P_\omega$  jsou členy produkce,  $f_\beta$  je faktor úprav natažení vírů,  $f_{\beta^*}$  je faktor úprav volné smykové vrstvy,  $S_k, S_\omega$  jsou zdrojové členy definované uživatelem a  $k_0, \omega_0$  jsou hodnoty okolní turbulence působící proti jejímu rozpadu.

Turbulentní viskozita se vypočte dle vztahu:

$$\mu_t = \rho k T \quad (31)$$



Aby byla spojena funkčnost modelu  $k - \epsilon$  dále od stěny a robustnost a přesnost modelu  $k - \omega$  v blízkosti stěny, tak byl model  $k - \omega$  modifikován a vznikl model Shear Stress Transport  $k - \omega$  (SST  $k - \omega$ ). Do rovnice pro  $\omega$  je zaveden člen  $div k \cdot div \omega$ . Díky tomu se může transportní rovnice pro  $\omega$  potenciálně změnit na rovnici, která poskytuje stejné výsledky jako rovnice pro  $\epsilon$ . Proto je zde použita funkce, která podle vzdálenosti od stěny mezi jednotlivými modely přepíná. To z něj činí pro praktické použití velice užitečný model, který poskytuje dobré výsledky jak v blízkosti od stěny, tak ve volném proudění. [6]

#### 4.2.1 DNS

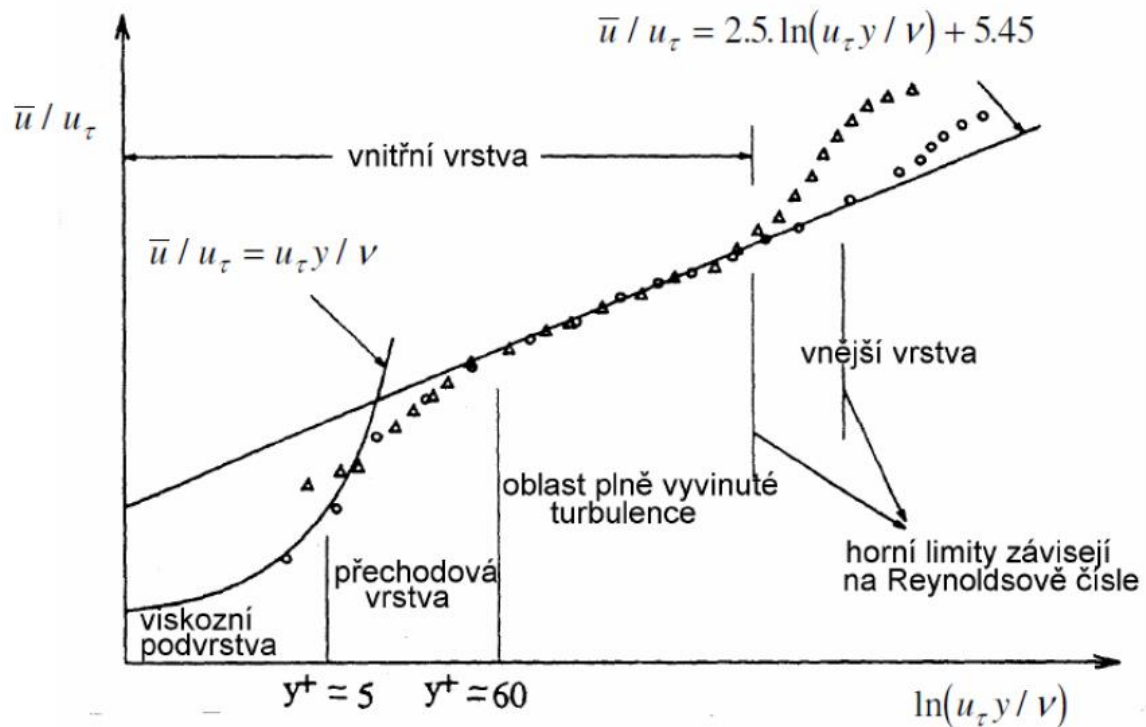
DNS (Direct Numerical Simulation) neboli metoda přímé numerické integrace turbulencí nemodeluje, ale umožňuje přímé řešení celého spektra velikostí turbulentních fluktuací. Díky tomu poskytuje detailní popis proudového pole, který je možné považovat za rovný experimentu. Aby bylo možné řešit i ty nejmenší víry a nejrychlejší fluktuace, je nutné použít velice jemnou síť a malý časový krok. Kvůli těmto nárokům je DNS nepoužitelná pro technickou praxi a využívá se hlavně u teoretických úloh s velmi zjednodušenou geometrií, například pro validaci nových turbulentních modelů. [4]

#### 4.2.2 LES

Metoda velkých vírů (LES – Large Eddy Simulation) přímo řeší velké víry nesoucí hlavní podíl energie proudění a ty malé modeluje. Využívá pro to filtrování Navier – Stokesových rovnic. Filtrace odstraní malé víry, které jsou téměř isotropní, mají univerzální chování a je proto jednodušší je popsat modelem. Vzhledem k řešení pouze velkých může být použita hrubší síť a větší časový krok než při DNS, ale i tak je LES výpočetně mnohem náročnější než RANS. Díky časově závislému řešení velkých vírů poskytuje LES větší rozsah pohybů, než pouze střední hodnoty a tedy i přesnější popis proudového pole. Hybridním přístupem je DES – Detached Eddy Simulation. Ten vychází z RANS, ale v místech s dostatečně jemnou sítí přepíná na LES. [4]

### 4.3 Modelování proudění u stěny

Stěny jsou ve většině problémů proudění zdrojem vírů, vznikají na nich velké gradienty počítaných veličin a přesné modelování v blízkosti stěny v mezní vrstvě je proto klíčové pro proudění ve zbytku výpočetní oblasti. Turbulentní mezní vrstvu lze rozdělit do dvou hlavních oblastí – vnější vrstvu, kde dominují turbulentní efekty a vnitřní vrstvu, která se dá dále rozdělit na tři části. V nejtěsnější blízkosti je téměř laminární viskózní podvrstva. Na ní navazuje přechodová vrstva, kde se projevují jak efekty viskozity, tak turbulence. Přechodová vrstva přechází v oblast platnosti tzv. logaritmického zákona.



Obr. 16 Rozdělení mezní vrstvy [10]

V CFD se mezní vrstva modeluje pomocí prismatických buněk, které plynule narůstají směrem od stěny. Správné vyřešení mezní vrstvy určuje výška první buňky u stěny a jejich celkový počet. Správná výška první buňky pro danou aplikaci se posuzuje podle bezrozměrné hodnoty  $y^+$ :

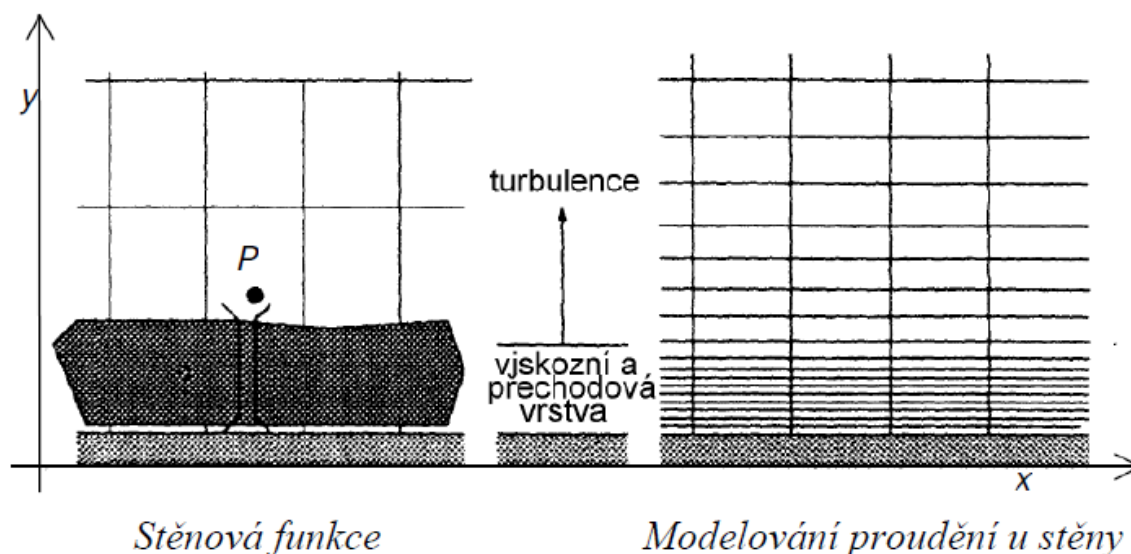
$$y^+ = \frac{y\rho\mu_t}{\nu} \quad (32)$$

$$\mu_t = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (33)$$

kde  $y$  je absolutní vzdálenost od stěny,  $\nu$  je kinematická viskozita,  $\tau_w$  je tečné napětí na stěně a  $\mu_t$  je tzv. třecí rychlost.  $y^+$  se dá představit jako lokální Reynoldsovo číslo, které určuje relativní podíl turbulence a viskozity. Z hlediska  $y^+$  máme k dispozici dva způsoby k řešení mezní vrstvy. Prvním je detailní modelování proudění u stěny a umístění první buňky do viskózní podvrstvy ( $y^+ < 1$ ). K tomu je nutné použít odpovídající model turbulence, který je schopný řešit mezní vrstvu až ke stěně. Druhou možností je použití stěnových funkcí, které překlenou viskózní podvrstvu a přechodovou vrstvu a první buňka může být umístěna až do oblasti platnosti logaritmického zákona ( $30 < y^+ < 300$ ). Přechodové oblasti ( $5 < y^+ < 30$ ) je dobré se v obou případech vyhnout. Jak je patrné z obr. 17, tak obě metody mají značně odlišné nároky na síť v blízkosti stěny. Modelování proudění až ke stěně sice poskytuje přesnější zachycení proudění a jeho odtržení, ale síť



v blízkosti stěny musí být jemná a tím rostou i výpočetní nároky. Zatímco při použití stěnových může být síť relativně hrubá. [6]



Obr. 17 Možnosti modelování proudění u stěny [10]

#### 4.4 Metoda konečných objemů

Metoda konečných objemů používaná pro výpočty proudění rozděljuje výpočetní oblast na konečný počet kontrolních objemů – tzv. výpočetní síť – a výpočet následně probíhá přes hranice těchto objemů. Numerické metody obecně převádí matematický model na systém algebraických rovnic pomocí diskretizace řídicích rovnic v prostoru a čase. Lineární rovnice jsou poté řešeny pomocí algebraického iterativního řešiče. V případě řešení neustáleného proudění je požadovaný časový interval rozdělen na dílčí intervaly, které se nazývají časové kroky. Výpočetní doména je rozdělena na kontrolní objemy (buňky), které dohromady tvoří výpočetní síť. Řídicí rovnice jsou integrovány přes objemy těchto buněk. S použitím Gaussovy věty o divergenci lze zapsat transportní rovnici pro obecnou veličinu  $\varphi$  v integrálním tvaru:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \varphi dV + \int_A \varphi v \varphi dA = \int_A \Gamma \text{div} \varphi dA + \int_V S_\varphi dV \quad (34)$$

kde  $V$  představuje kontrolní objem a  $A$  jeho plochu. První člen na levé straně vyjadřuje časovou změnu veličiny  $\varphi$  uvnitř kontrolního objemu a druhý zmenšení veličiny  $\varphi$  díky konvekci přes hranice kontrolního objemu. Na pravé straně se nachází zvětšení  $\varphi$  díky difuzi a zdrojový člen. Následuje převod zintegrovaných rovnic na soustavu algebraických rovnic pro každý kontrolní objem.

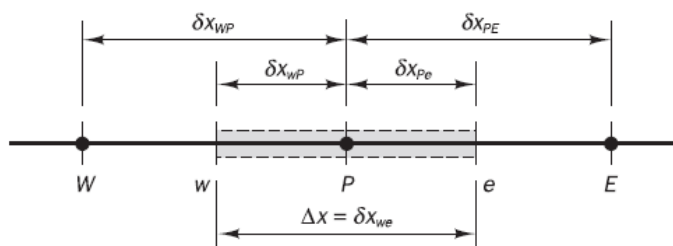
Pro zjednodušení je tato metoda představena na ilustračním příkladu ustálené 1-D difuze:

$$\frac{d}{dx} \left( \Gamma \frac{d\varphi}{dx} \right) + S = 0 \quad (35)$$



kde  $\Gamma$  je koeficient difuze a  $S$  je zdrojový člen.

Prvním krokem je vytvoření výpočetní sítě (Obr. 18). Body W, P a E jsou středy kontrolních objemů a w, e jsou jeho hranice.



Obr. 18 1-D výpočetní síť [4]

Následuje již zmíněná diskretizace řídicí rovnice – tedy její integrace přes kontrolní objemy:

$$\int_{\Delta V} \frac{d}{dx} \left( \Gamma \frac{d\varphi}{dx} \right) dV + \int_{\Delta V} S = \left( \Gamma A \frac{d\varphi}{dx} \right)_e - \left( \Gamma A \frac{d\varphi}{dx} \right)_w + \bar{S} \Delta V = 0 \quad (36)$$

kde  $A$  je čelní plocha stěny kontrolního objemu,  $\Delta V$  je objem a  $\bar{S}$  je průměrná hodnota zdroje v kontrolním objemu. Aby bylo dosaženo užitečné formy této diskretizované rovnice, tak je potřeba získat hodnoty koeficientu difuze a  $\frac{d\varphi}{dx}$  na stěnách buněk. V tuto chvíli se totiž nachází ve středu buněk. Pro výpočet gradientů je používáno aproximace rozložení veličin mezi středy buněk. Nejjednodušší možností je lineární aproximace. To se nazývá metoda centrální diference. Pro výpočet koeficientu difuze to vypadá následovně:

$$\Gamma_w = \frac{\Gamma_W + \Gamma_P}{2} \quad (37)$$

$$\Gamma_e = \frac{\Gamma_P + \Gamma_E}{2} \quad (38)$$

A pro difuzní tok:

$$\left( \Gamma A \frac{d\varphi}{dx} \right)_e = \Gamma_e A_e \left( \frac{\varphi_E - \varphi_P}{\delta_{x_{PE}}} \right) \quad (39)$$

$$\left( \Gamma A \frac{d\varphi}{dx} \right)_w = \Gamma_w A_w \left( \frac{\varphi_P - \varphi_W}{\delta_{x_{PE}}} \right) \quad (40)$$

Zdrojový člen může být v praktických aplikacích funkcí závislé proměnné. V metodě konečných objemů lze takový zdrojový člen zapsat v lineární formě:

$$\bar{S} \Delta V = S_u + S_p \varphi_P \quad (41)$$

Pro výpočet hodnot  $\varphi$  na stěnách byla vyvinuta řada různých diferenčních schémat. Například již zmíněné centrální, upwind, QUICK a další. Ta mají při náhradě derivací Taylorovým polynomem určitou přesnost, která závisí na zanedbání členů s vyššími řády. Čím vyšší řád diferenční schéma tedy má, tím přesnější náhrada derivace bude.



Dosazením těchto interpolací do původní rovnice a její úpravou dostáváme:

$$\left( \frac{\Gamma_e}{\delta_{x_{PE}}} A_e + \frac{\Gamma_w}{\delta_{x_{WP}}} A_w - S_p \right) \varphi_P = \left( \frac{\Gamma_w}{\delta_{x_{WP}}} A_w \right) \varphi_w + \left( \frac{\Gamma_e}{\delta_{x_{PE}}} A_e \right) \varphi_E + S_u \quad (42)$$

Rovnice může být zavedením koeficientů  $a_p, a_w, a_E$  přepsána do tvaru:

$$a_p \varphi_P = a_w \varphi_w + a_E \varphi_E + S_u \quad (43)$$

Rovnice v takovéto formě musí být zavedena pro všechny středy buněk ve výpočetní oblasti. V případě buněk na hranicích oblasti jsou do rovnice zavedeny okrajové podmínky. Výsledná soustava lineárních rovnic ve středech buněk je následně v maticovém tvaru řešena pro získání rozložení  $\varphi$  ve výpočetní doméně. [4]

#### 4.5 Algoritmus SIMPLE

Pro řešení proudového pole se v CFD využívá algoritmů, které iterativním způsobem vypočtou všechny potřebné veličiny. Jedním z nejpoužívanějších je algoritmus SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations). Ten je používán v upravené verzi i ve STAR-CCM+, nicméně jeho základní princip zůstává stejný.

Na začátek je proveden odhad tlakového pole  $p^*$ , který je použit do diskretizovaných pohybových rovnic pro výpočet složek rychlosti  $u^*, v^*$ :

$$a_{i,f} u_{i,f}^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + (p_{i-1,f}^* - p_{i,f}^*) A_{i,f} + b_{i,f} \quad (44)$$

$$a_{i,f} v_{i,f}^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + (p_{i,f-1}^* - p_{i,f}^*) A_{i,f} + b_{i,j} \quad (45)$$

kde  $u$  je rychlost,  $a$  jsou koeficienty obsahující kombinaci konvekčního toku na jednotku hmotnosti a difúzní vodivosti,  $A$  je plocha stěny kontrolního objemu a  $b$  je zdroj hybnosti.

Dále je provedena oprava tlakového pole výpočtem korekce tlaku  $p'$ . Spolu s tím musí rychlostní pole splňovat rovnici kontinuity, díky níž je tlaková korekce  $p'$  získána.

Nyní je třeba vypočítat korekce tlaku (rovnice 46) a rychlostí (rovnice 47 a 48):

$$p_{i,j} = p_{i,j}^* + p'_{i,j} \quad (46)$$

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (47)$$

$$v_{i,j} = v_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (48)$$

kde  $d$  jsou koeficienty fungující jako podrelaxační faktory.

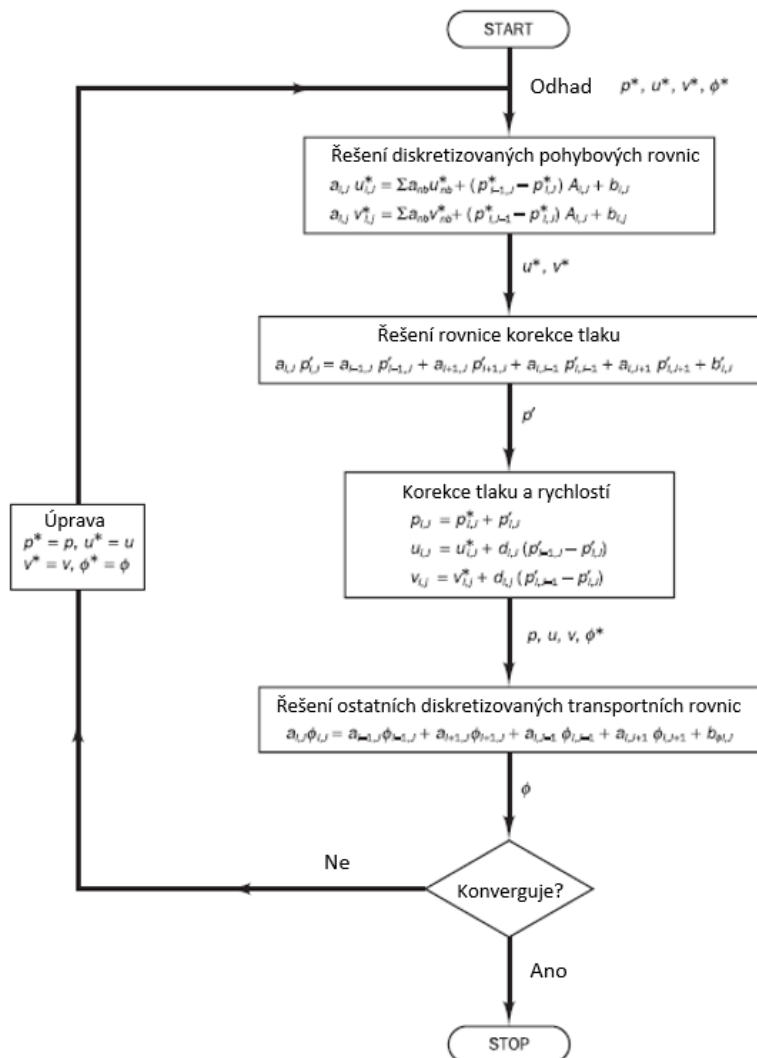
Dosazením korekce tlaku do momentových rovnic získáváme správné rychlostní pole. Vypočtené pole složek rychlosti a tlaku se použijí pro výpočet dalších transportních rovnic – energetické a rovnice modelu turbulence.





Nakonec je provedena kontrola konvergence. Pokud je splněna, tak řešení končí. Pokud ne, tak se celý proces opakuje s počátečními hodnotami proudového pole vypočtenými v předchozí iteraci. [4]

Celý proces je schematicky zobrazen na následujícím obrázku:



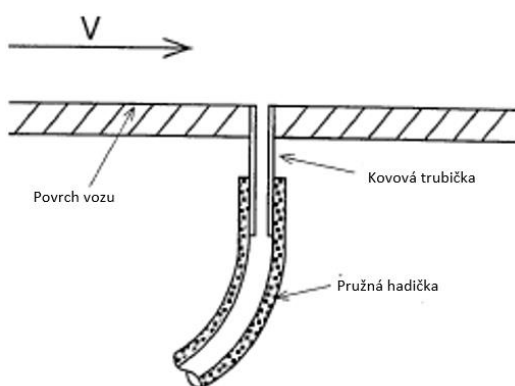
Obr. 19 Schéma SIMPLE algoritmu [4]



## 5 Experimentální metody v aerodynamice vozidel

### 5.1 Měření tlaku

Jak bylo zmíněno dříve, tak rozložení tlaku po povrchu je z hlediska aerodynamiky naprosto klíčové. Z jeho znalosti lze optimalizovat tvar karoserie pro dosažení požadovaných vlastností, nebo sledovat místa odtržení. Statický tlak na povrchu lze získat navrtáním otvorů kolmo na karoserii vozu. K otvoru je připojena kovová trubička a k ní následně pružná hadička vedoucí do tlakového převodníku (Obr.20,21). Pro získání podrobného rozložení tlaku je nutné připravit těchto spoustu otvorů a použít převodník s dostatečným počtem kanálů, což spolu s hadičkami pro jejich propojení značně komplikuje zástavbové nároky této metody obzvláště jedná-li se o zmenšený model do aerodynamického tunelu.

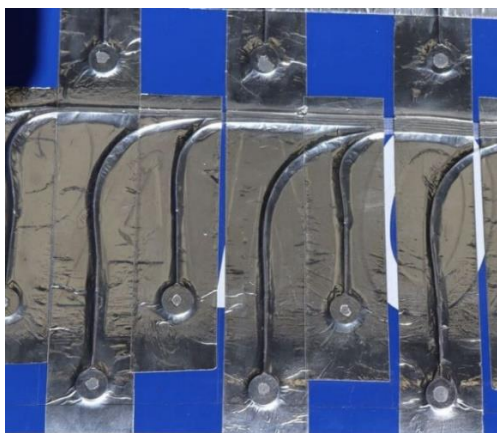


Obr. 20 Umístění tlakových odběrů [3]



Obr. 21 P16-A [12]

V případě, že je potřeba měřit tlaky na vozidle, u kterého není možné narušit jeho povrch (např. u již používaného vozu, u dílů které následně čekají další testy apod.), lze použít snímače, které se umístí přímo na povrch (Obr.22,23). Jejich nespornou výhodou je snadná a rychlá aplikovatelnost nalepením na povrch vozu. Tím ale dochází k ovlivnění proudění tvarem senzorů vystupujících nad povrch, ale také měřených hodnot lokálním tlakovým polem okolo senzoru. Nezanedbatelný je i vliv potřebné kabeláže a příslušenství. [3]



Obr. 22 Tlakové snímače na povrchu vozu [13]

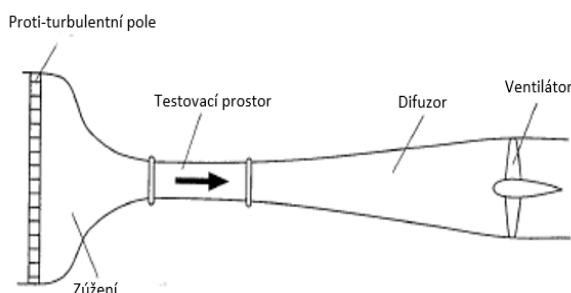


Obr. 23 Tlakový pásek 4Jtech [14]

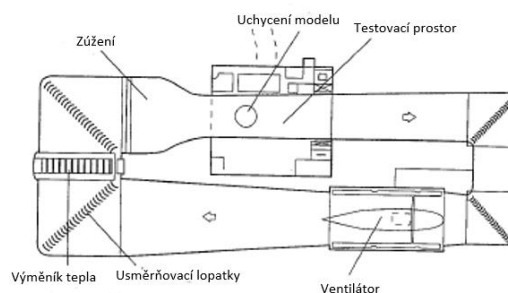


## 5.2 Aerodynamický tunel

Aerodynamické tunely jsou laboratorní zařízení pro zkoumání aerodynamických vlastností měřeného tělesa (auto, letadlo atd.). Měřený objekt je zde umístěn stacionárně v testovacím prostoru se vši potřebnou měřicí technikou a vzduch proudí okolo něho. Velkou výhodou tunelů je jejich kontrolovatelné prostředí téměř nezávislé na atmosférických podmínkách a tedy i dobrá opakovatelnost měření. U aerodynamických tunelů pro automobilový průmysl se využívají dva hlavní typy – s otevřeným a uzavřeným okruhem. U obou z nich je vzduch tunelem proháněn ventilátorem. U otevřeného tunelu (Obr.24) je vzduch jednou stranou tunelu nasáván a druhou stranou vypouštěn zpět do atmosféry. Výhodou tohoto typu tunelu jsou nízké pořizovací náklady a snadné odvětrání spalin, nebo vizualizačních médií (např. kouře). Náklady na provoz jsou ovšem vyšší než u tunelu uzavřeného (Obr.25). Problémem taky může být vítr v okolí nasávacího otvoru, nebo v chladném počasí nízká teplota vzduchu uvnitř tunelu. Z těchto důvodů jsou otevřené tunely používány spíše na univerzitách, nebo v menších institucích. Vzhledem k nižším provozním nákladům jsou v automobilovém průmyslu využívány převážně tunely uzavřené ve kterých vzduch cirkuluje v uzavřeném okruhu.



Obr. 24 Otevřený tunel [3]



Obr. 25 Uzavřený tunel [3]

Ačkoli se tento způsob testování může zdát jako ideální, pojí se s ním řada problémů, obzvláště při měření automobilů. Třením vzduchu o stěny tunelu dochází během delších měření k nárůstu jeho teploty. To lze vyřešit použitím výměníků vzduchu s okolím tunelu umístěnými za ventilátorem, aby část ohřátého vzduchu odešla vně tunelu a byla vyměněna za čerstvý chladný vzduch. Druhým řešením je použití výměníku tepla. Ten slouží nejen k ochlazení vzduchu ohřátého třením, ale i k možnému simulování různých klimatických podmínek. Dalším problémem je samotný testovací prostor a umístění vozidla v něm. Při jeho obtékání dochází k ovlivnění proudového pole okolo a pokud ho umístíme mezi dvě stěny, které jsou moc blízko vozidlu, tak dojde k nežádoucímu urychlení vzduchu a ovlivnění výsledků měření. Pro dosažení podmínek co nejvíce podobných jízdě po vozovce v otevřeném prostoru by tedy bylo ideální co největšího průřezu testovacího sekce tunelu. S tím ale přichází i zvyšující se nároky na výkon ventilátoru a tedy i provozní náklady. Většina tunelů tedy používá otevřené testovací prostory, nebo stěny testovacího prostoru se

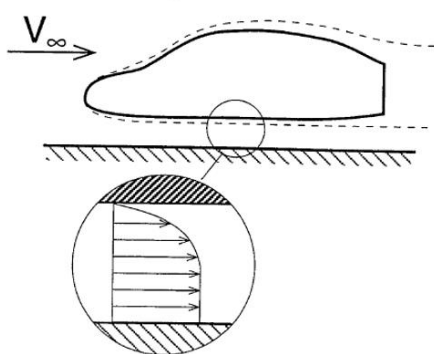


šterbinami. S tím souvisí i velikost použitého měřeného objektu. Ideálem by bylo použít skutečné vozidlo, nebo v počátečních fázích návrhu jeho model v měřítku 1:1 pro zachování správného Reynoldsova čísla a všech detailů vozu, ale s tím přichází i vyšší náklady na výrobu modelu (Obr.26) a požadavky na velikost testovacího prostoru. Při použití zmenšených modelů musí být pro zachování Reynoldsova čísla zvýšena rychlost proudění v tunelu, což je často nereálné. Při měření zmenšeného modelu se u přilnutého proudění dá očekávat, že se proudění bude chovat stejně při menších i větších Reynoldsových čísel a jeho vliv bude znát pouze u tření v mezní vrstvě. Problém však nastává u proudění odtrženého (okolo pneumatik, křidel, v zadní části vozu atd.), kde se dají očekávat velké rozdíly mezi prouděními v různých Reynoldsových číslech.

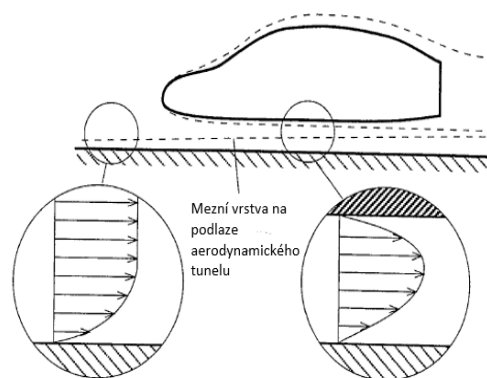


*Obr. 26 Model vozu F1 v aerodynamickém tunelu [15]*

Vozidlo se v provozu pohybuje v blízkosti vozovky, což simulaci reálných podmínek v tunelu značně komplikuje. Problém nastává u mezní vrstvy mezi vozidlem a vozovkou. V ní dochází k zastavení vzduchu v blízkosti povrchu a při reálné jízdě vozidla se tvoří pouze na podlaze vozu (Obr.27). V aerodynamickém tunelu je však místo vozu v pohybu vzduch a výsledný rychlostní profil mezi vozidlem a podlahou tunelu je tedy výsledkem dvou mezních vrstev (Obr.28). Vznik mezní vrstvy na podlaze tunelu má obzvlášť velký vliv v případě vozů s nízkou jízdní výškou.



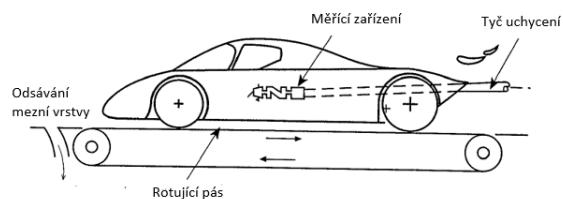
Obr. 27 Mezní vrstva v reálném provozu [3]



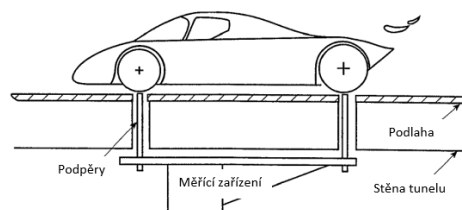
Obr. 28 Mezní vrstva v aerodynamickém tunelu [3]

Tlusté mezní vrstvě na podlaze tunelu se lze vyhnout umístěním modelu na desku vyvýšenou nad podlahu tunelu. Na ní sice mezní vrstva také vzniká, ale vzhledem ke krátké vzdálenosti, kterou musí vzduch na desce absolvovat než se dostane pod vozidlo je mnohem nižší než na podlaze. Dalším možným řešením je odsávání mezní vrstvy před testovaným vozidlem. Nově se tvořící mezní vrstva je pak mnohem nižší než původní. Problém lze také vyřešit umístěním pod vozidlo pohybující se pás, který simuluje ubíhání vozovky (Obr.24). Nese to sebou však i několik komplikací. Vozidlo musí být uchyceno externím držákem za střechu, nebo zadní část vozu a dochází tak k ovlivnění proudění. Problematické je také měření sil na rotujících kolech na ubíhající vozovce. Z toho důvodu řada tunelů využívá ubíhající pás pouze pod střední částí vozu mezi koly. U závodních vozidel, u kterých je velká část přítlaku generována pod tlakem z podlahových difuzorů, může dojít k přisátí pásu směrem k vozu. Tento jev lze odstranit přisáváním pásu k desce umístěné pod ním, což je ale technicky náročné a zvyšuje to náklady na vybavení tunelu. Limitem ubíhajících pásů je také jejich maximální rychlost, která bývá nižší než maximální rychlost tunelu a omezuje tedy rozsah možných měřených rychlostí.

Způsobů uchycení vozidla v tunelu a měření působících sil existuje několik. Nejjednodušším z nich je umístění kol vozu přímo na platformy, které jsou s minimální mezerou oddělené od podlahy tunelu a spojené se šestikomponentními váhami (Obr.30). Tyto 4 platformy bývají umístěné v otočném stole, který umožňuje natočení vozu okolo svislé osy a vystavení různým úhlům náběhu vzduchu. Zároveň také umožňují rotaci kol, která odpovídá rychlosti proudění. Této možnosti se nejčastěji využívá v případě rotujícího pásu pouze v oblasti mezi koly. Pokud bychom chtěli použít tunel s rotujícím pásem i pod koly, tak je nutné model uchytit externím držákem. Z hlediska narušení proudění je vhodnější umístit držák v zadní části vozu než na jeho střechu. Měřicí zařízení pro měření sil je pak zabudováno mezi vůz a držák (Obr.29). [3]



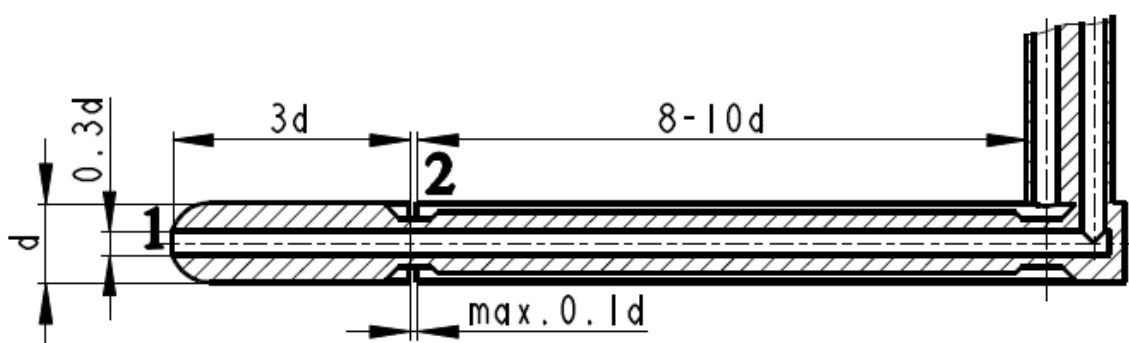
Obr. 29 Uchycení vozu na rotujícím pásu [3]



Obr. 30 Uchycení vozu přes kola [3]

### 5.3 Pitot – statická sonda

Pro zjištění rychlosti proudění se nejčastěji používá Pitot - statická sonda. Ta má tvar L se zaobleným koncem (Obr.29). Její princip spočívá v měření celkového a statického tlaku. Výpočtem z jejich rozdílu získáme rychlost proudění.



Obr. 31 Pitot - statická sonda [16]

Pro měření celkového tlaku se využívá odběr na čele sondy a pro měření statického tlaku jsou to odběry umístěné radiálně na těle sondy v dostatečné vzdálenosti od jejího čela. V případě nízkých rychlostí je možné vzduch považovat za nestlačitelný a zapsáním Bernoulliho rovnice pro místa 1 a 2 získat:

$$p_1 + \frac{1}{2} \times \rho \times v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \times \rho \times v_2^2 \quad (49)$$

Vzhledem k tomu, že v místě 1 dojde k zastavení proudění a rychlost je zde tedy nulová, lze rovnici (49) upravit do tvaru:

$$p_1 + 0 = p_2 + \frac{1}{2} \times \rho \times v_2^2 \quad (50)$$

Jednoduchou matematickou úpravou rovnice získáme rovnici pro výpočet rychlosti proudění:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \times (p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (51)$$

Pro správnou funkci Pitot – statické sondy je klíčové její umístění. Měla by být na místě nenarušeného proudění měřeným objektem. Z toho důvodu je na závodních vozech zpravidla umístěna vpředu na karoserii vozu (Obr.33).



Speciální variantou Pitot – statické sondy je tzv. Kielova trubice (Obr.32). Oproti Pitot – statické sondě se liší ochranou otvoru měřícího celkový tlak a tím i menší směrovou citlivostí na nabíhající proud vzduchu.



*Obr. 32 Detail Kielovy trubice [17]*

Tyto sondy je možné velmi často vidat umístěné v měřících mřížích na vozech F1 (Obr.33). Pole naměřených hodnot je pak možné porovnat s daty ve stejných místech z CFD či aerodynamického tunelu. [3][8]



*Obr. 33 Vůz Mercedes AMG F1 W10 osazený mříží s Kielovými trubicemi [18]*

#### 5.4 Vizualizace proudění

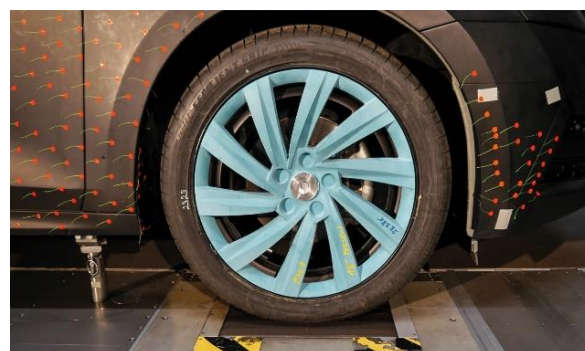
Vizualizace proudění je velice užitečným nástrojem pro sledování proudění na povrchu zkoumaného objektu nebo mimo něj. Umožňuje zobrazení směru proudění či míst odtržení ať už přímo v provozu nebo v aerodynamickém tunelu. Pro sledování proudění přímo na povrchu vozidla lze použít kontrastní barvy (Obr.34). Jedná se o olejovitou tekutinu smíchanou s kontrastním pigmentem. Barva se nanese na sledovaný díl a buď pohybem vozu po trati, nebo prouděním vzduchu v aerodynamickém tunelu je roznášena po dílu. Nevýhodou je zašpinění vozidla či prostoru tunelu. Druhou možností jsou kousky bavlnky nalepené jedním svým koncem na povrchu vozidla (Obr.35). Pokud je proudění přilnuté,



tak budou bavlnky stabilní a směřovat ve směr proudění. Naopak u proudění odtrženého budou bavlnky rychle kmitat a směřovat mimo směr proudění. Je tedy nezbytné zkoumané místo při měření snímat kamerou.



Obr. 34 Kontrastní barva na voze Red Bull [19]

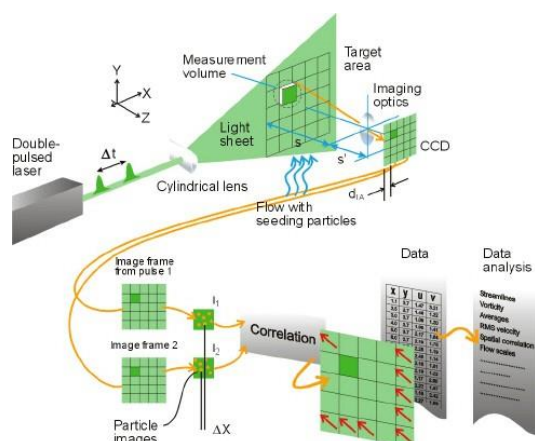


Obr. 35 Bavlnky na voze ŠKODA [20]

Pro zobrazení proudění v aerodynamických tunelech se často využívá vypouštění proudů kouře do testovacího prostoru, ale to je vhodné spíše pro zkoumání makroskopických vlastností proudění než pro detailní porozumění proudovému poli. [3]

## 5.5 Particle Image Velocimetry

Pro měření okamžité rychlosti v rovině proudového pole lze využít metody PIV – Particle Image Velocimetry. Proudící tekutina v aerodynamickém tunelu je nasycena drobnými částicemi, které musí být dostatečně malé (typicky 10 – 100  $\mu\text{m}$ ) a s hustotou co nejvíce se blížíci hustotě tekutiny, aby se jejich pohyb dal považovat za shodný z dynamikou proudění. Sledovaná plocha je osvětlována laserem a rychle za sebou snímána kamerou (Obr.36,37). Software následně vyhodnotí směr a vzdálenost posunutí jednotlivých částic a pomocí známého času mezi snímky sestaví dvojrozměrné pole vektorů rychlosti. Velkou výhodou je detailní proměření proudového pole, a to i při neustáleném proudění bez ovlivnění proudění měřicí technikou. Při použití více kamer je možné získat i třetí složku vektoru rychlosti. Zařízení na měření PIV jsou však velmi drahá a náročná na kalibraci a nutnost správně syceného proudu částic s sebou přináší řadu problémů. [21]



Obr. 36 Schéma měření PIV [22]



Obr. 37 PIV v aerodynamickém tunelu [23]





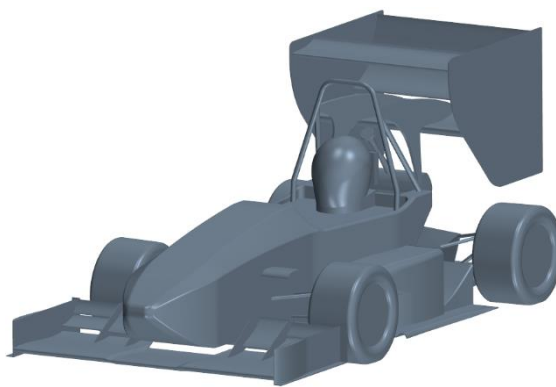
## 6 Příprava výpočetního modelu

### 6.1 CAD model

Prvním krokem CFD výpočtu je příprava CAD geometrie. Hlavní konstrukční model vozu (Obr.38) je vytvářen v programu Catia V6 od firmy Dassault Systemes. Ten však vzhledem ke své detailnosti není pro výpočet vhodný a bylo nezbytné ho zjednodušit (Obr.39). Při přípravě CAD modelu pro CFD výpočty je nutné uvažovat nad úrovní detailů, které jsou pro chování proudění důležité a které je možné v modelu ponechat. S rostoucími detaily modelu je sice model bližší reálnému vozu, ale roste s tím i velikost výpočetní sítě a tedy časové a výpočetní nároky na výpočet. Byly proto odstraněny veškeré šroubové spoje, zaslepeny dutiny a zjednodušen motorový prostor s nápravami a kolovou skupinou. Přidána byla také náhrada pilota jehož ochranná přilba značně ovlivňuje proudění směrem k zadnímu křídlu.



Obr. 38 CAD model vozu FS.11



Obr. 39 CFD model vozu FS.11

Je důležité dávat pozor na drobné nepřesnosti, mezery či ostré hrany, které by následně mohly působit potíže při síťování a vést k nepřesným výsledkům nebo díky nekvalitním buňkám k divergenci řešení (Obr.40). Všechny díly do sebe proto vždy o pár milimetrů zasahují, aby mezi nimi nemohla vzniknout žádná štěrbina (Obr.41). Díly, které jsou v kontaktu plocha na plochu (např. kontakt difuzoru s podlahou monokoku) byly spojeny dohromady a rozděleny na podsestavy přímo až ve STAR-CCM+.

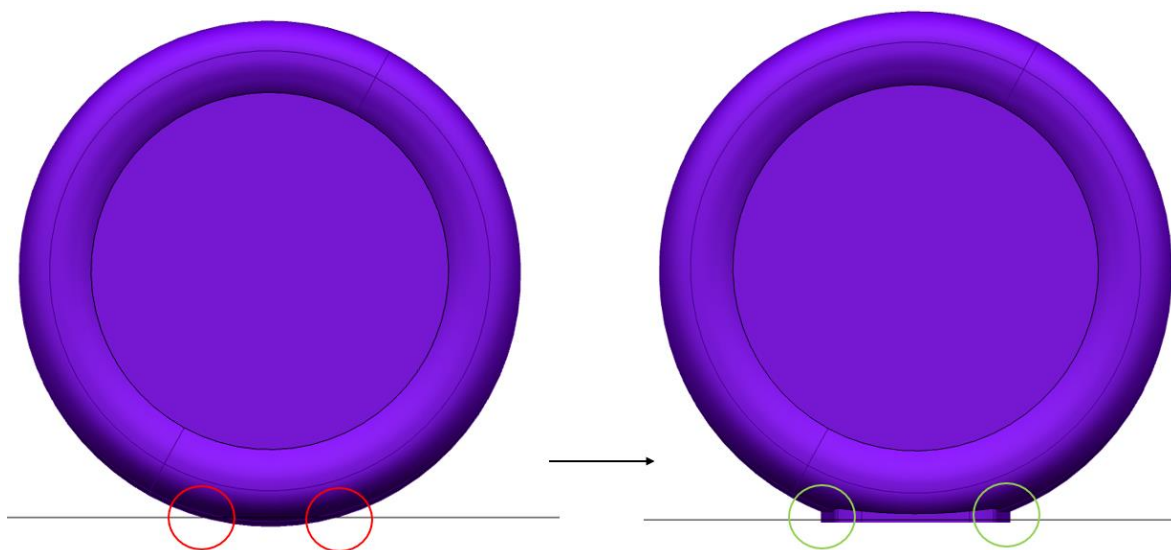


Obr. 40 Detail nevhodného kontaktu dílů



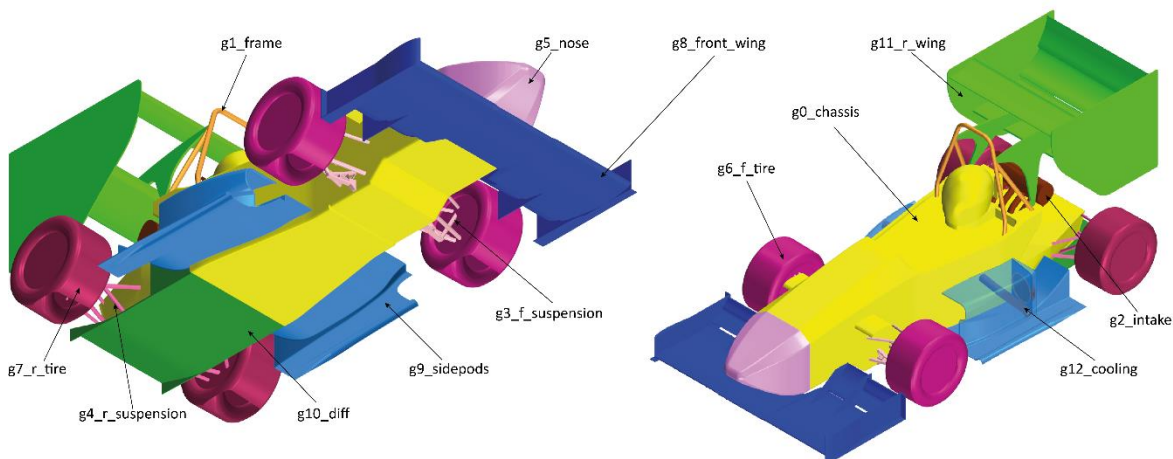
Obr. 41 Ošetření kontaktu dílů mezi sebou

Problematickým je kontakt pneumatiky s vozovkou. Vzhledem k deformaci pneumatiky a vzniku kontaktní plochy je její model lehce zasazen do vozovky a v jejím kontaktu s válcovou plochou vzniká klínovitá štěrbina, která by způsobila deformace buněk výpočetní sítě. Proto byl mezi vozovku a pneumatiku vložen kvádr, který zde vytvoří krátkou hranu, která je již pro síť přívětivější (Obr.42).



Obr. 42 Ošetření kontaktu pneumatiky s vozovkou

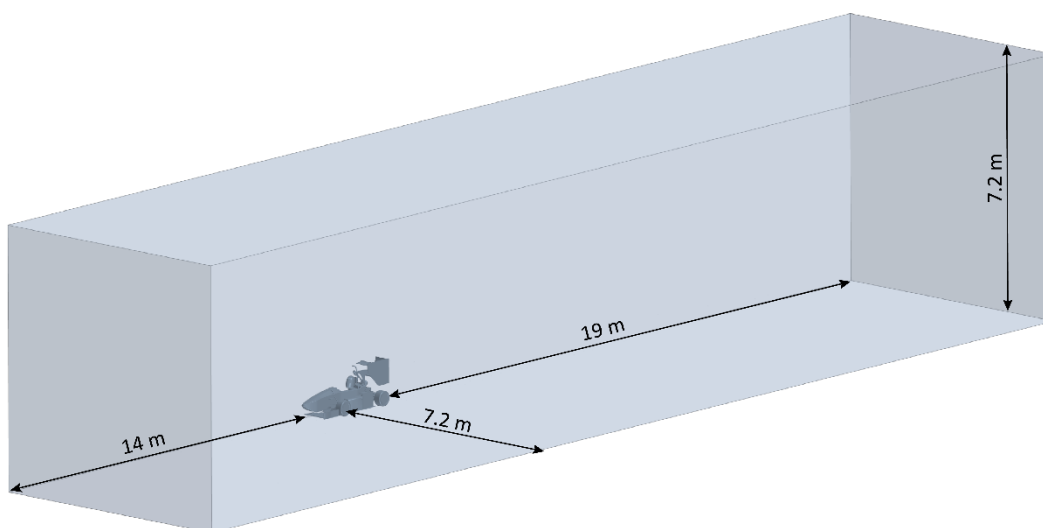
Vůz je rozdělen do samostatných podsestav dle Obr. 43. Každá podsestava má své unikátní označení začínající na písmeno „g“ (z anglického group = skupina) pro usnadnění pozdějšího výběru geometrie v automatizovaném postprocessingu. Následuje pořadové číslo podsestavy a slovní označení. Kompletní vůz nese pak označení g00.



Obr. 43 Rozdělení vozu na podsestavy

## 6.2 Výpočetní doména a okrajové podmínky

Výpočetní prostor okolo vozu byl vytvořen ve tvaru kvádrů. Rozměry domény byly zvoleny dle doporučení pro výpočty externí aerodynamiky od firmy Siemens (nejméně 4 délky vozu před ním, 6 za ním, nejméně 5 šířek do strany a nejméně 6 výšek vozu do výšky). Pro snížení výpočetních nároků je vůz pro úvodní výpočty považován za symetrický a v doméně je tedy umístěna pouze jeho levá polovina. Tvar a rozměry domény a umístění vozu uvnitř ní jsou zobrazeny na Obr. 44. Čelní plocha poloviny vozu je  $0,527 \text{ m}^2$  a poměr zaplnění průřezu výpočetní domény vozem je tedy 1 %, což je dostačující. Je nutné mít rozměry domény dostatečně velké, aby byl dostatek prostoru na rozvinutí proudového pole a nedocházelo k jeho ovlivnění stěnami.

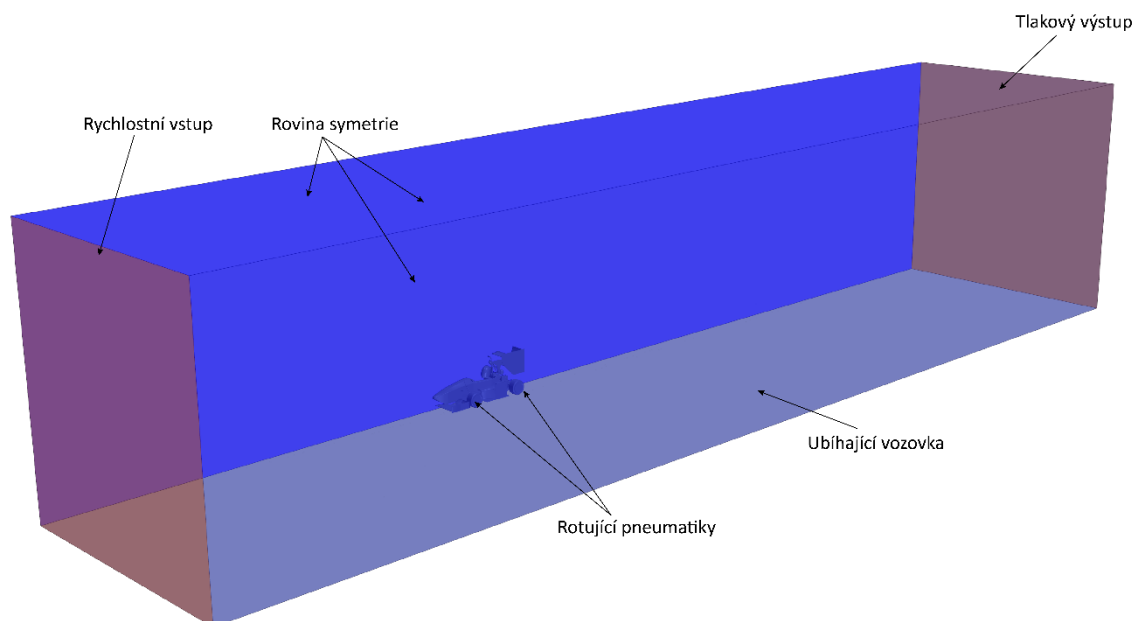


Obr. 44 Rozměry výpočetní domény

Proudění v doméně je vyvozeno nastavením normálové rychlosti na vstupní ploše. Na výstupu je definován pouze relativní tlak 0 Pa vůči nastavenému referenčnímu („atmosférickému“) tlaku. Horní a boční stěny domény jsou nastaveny jako roviny symetrie.



To znamená, že na těchto plochách vzduch neulpívá, nevzniká gradient žádné z veličin, je zde nulové tečné napětí a také nulový tok skrz ní. Pro simulaci ubíhající vozovky pod vozem je vozovce přiřazena rychlost stejné velikosti jako je rychlost na vstupu do domény.



Obr. 45 Nastavení okrajových podmínek

### 6.3 Modelování rotace pneumatiky

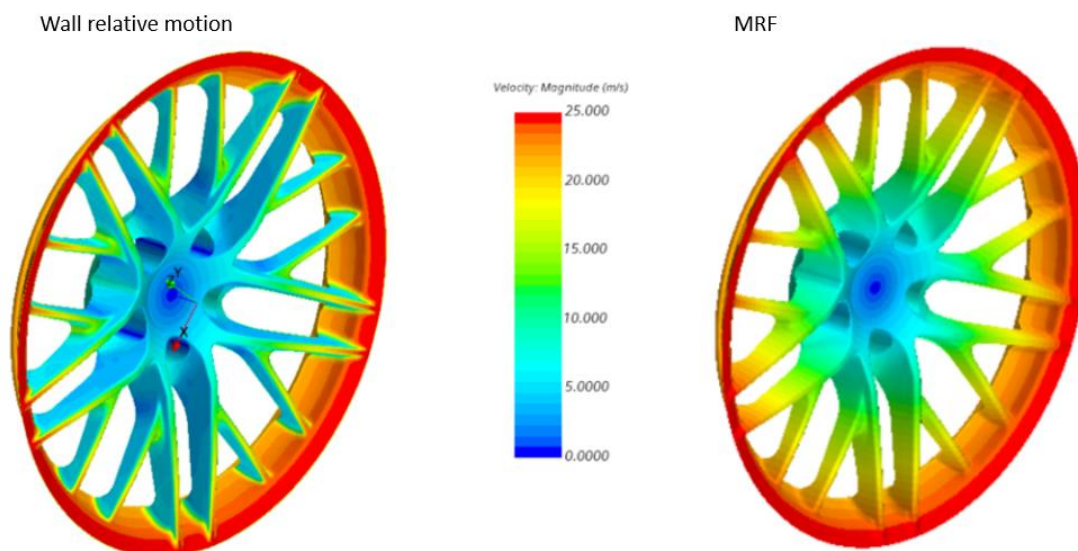
Rotace pneumatiky značně ovlivňuje její obtékání a nesmí být tedy ze simulace vynechána. STAR-CCM+ pro to nabízí 3 možné přístupy:

#### 1. Wall relative motion

Nejjednodušší možností je aplikování tečné rychlosti povrchu rotující geometrie. Tato metoda nemůže být aplikována na plochy, kde se vyskytuje i rychlost normálová, není tedy vhodná pro kola s promodelovanými paprsky ráfků nebo vzorkem pneumatiky, ale pro plné disky s hladkými pneumatikami. Při jejím použití stačí nadefinovat osu rotace a úhlovou rychlost.

#### 2. MRF – Moving Reference Frame

Nedostatek chybějící normálové rychlosti z předchozí metody doplňuje metoda MRF. Geometrie, kde se předpokládá normálová rychlost, je oddělena do samostatného rotujícího regionu, který je se zbytkem domény spojen pomocí rozhraní, na kterém je nastavena tečná rychlost. Nedochozí zde k žádnému pohybu sítě a je tedy možné využít MRF u stacionárních výpočtů. Tento model je nezbytné použít u kol, kde je promodelován ráfek i s jeho paprsky, aby došlo ke korektnímu rozložení rychlosti (Obr.46).



Obr. 46 Rozložení rychlosti na ráfku při použití metod 1 a 2 [6]

### 3. RBM – Rigid Body Motion

Nejpřesnější možností je reálný pohyb sítě a tedy rotace kola. Je zřejmé, že tuto metodu již nelze použít při stacionárních výpočtech a tím tedy roste i její výpočetní náročnost. Postup je obdobný jako u MRF – je potřeba vytvořit oblast ráfku, které je nastavena rotace. Je důležité, aby tato oblast byla rotačně symetrická.

Vzhledem k použitému stacionárnímu výpočtu a jednoduchému modelu pneumatiky (Obr. 42) byl pro rotaci použit první model Wall relative motion. Úhlová rychlost rotace pneumatiky odpovídá rychlosti vzduchu na vstupu do domény a rychlosti ubíhající vozovky a poloměru pneumatiky.

### 6.4 Modelování chlazení

Na vozech CTU CarTech jsou pro chlazení motoru využívány dva vodní chladiče umístěné v bočnicích vozu doplněné o elektrické ventilátory. Chladič se skládá ze sestavy komor plochého průřezu kterými proudí chladící kapalina. Mezi těmito komorami jsou lamely pro zvýšení teplosměnné plochy, kterými proudí vzduch. Štěrbiny v těchto lamelách jsou velice malé a proto je velice náročné až nemožné v nich modelovat proudění v CFD. Při výpočtech externí aerodynamiky se proto chladič nahrazuje porézním regionem a jeho účinky na externí proudění jsou zohledněny ve ztrátových koeficientech a modeluje tedy tlakovou ztrátu a vnitřní odpor chlazení. Z hlediska geometrie je dostačující vytvořit jednoduchý kvádr, který respektuje vnější tvar chladiče.

STAR-CCM+modeluje účinky porézního regionu pomocí dalšího zdrojového členu v rovnici pro hybnost, který je dán vztahem:

$$f_p = -Pv_s \quad (52)$$



kde  $P$  je tenzor porézního odporu a  $v_s$  je tzv. povrchová rychlost, která je definovaná vztahem k fyzikální rychlosti jako:

$$v_s = \chi v \quad (53)$$

kde  $\chi$  je porozita chladiče definovaná poměrem objemu tekutiny v chladiči  $V_f$  a celkového objemu chladiče  $V$ :

$$\chi = \frac{V_f}{V} \quad (54)$$

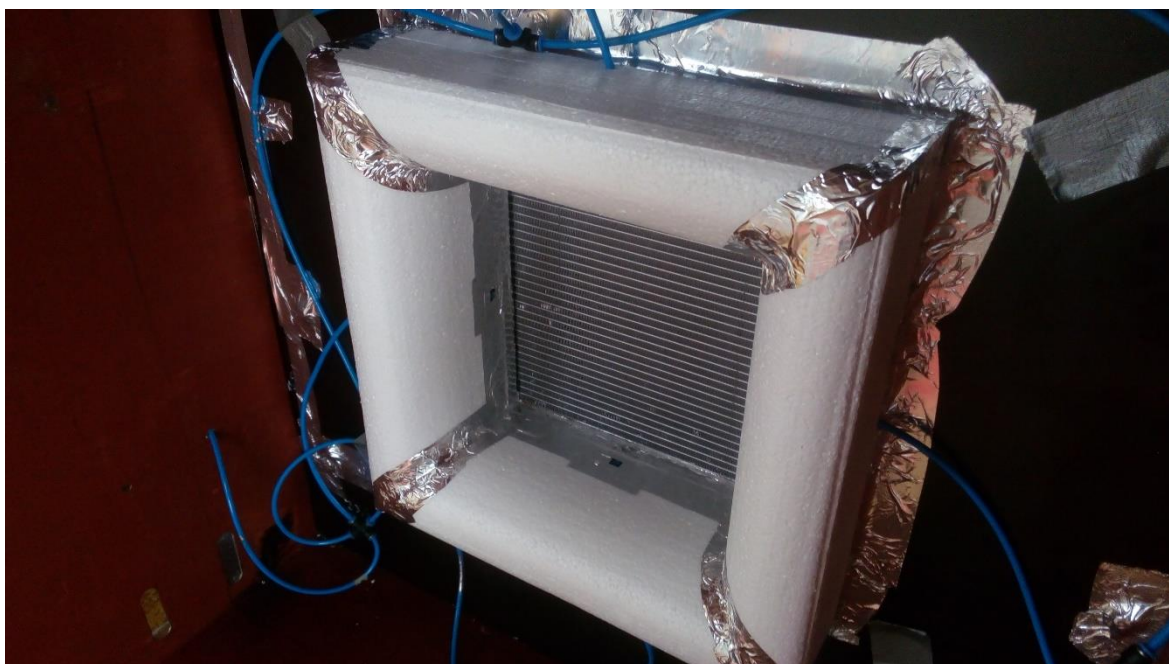
Tenzor porézního odporu se skládá ze dvou složek a je dán vztahem:

$$P = P_v + P_i |v_s| \quad (55)$$

kde  $P_v$  je tenzor viskózního odporu a  $P_i$  je tenzor odporu setrvačných sil. Tyto tenzory se již přímo zadávají do Star CCM+ a získávají se experimentálně pro konkrétní typ jádra chladiče. Proto je nutné získat závislost tlakové ztráty chladiče na rychlosti. Dosazením rovnice (53) do (55) získáme závislost na tlakové ztrátě vztažené k tloušťce chladiče:

$$\frac{\Delta p}{L} = -(P_v + P_i |v_s|) v \quad (56)$$

Vzhledem k tomu, že chladiče jsou vyráběné na míru firmou Hanon Systems a katalogová data pro ně nejsou dostupná, tak bylo nezbytné provést vlastní měření. To provedl kolega Otakar Volek v aerodynamickém tunelu firmy 4Jtech, kde byl do testovacího prostoru umístěn jeden chladič přímo z vozidla (Obr.47). Výsledná křivka tlakové ztráty byla získána z odběrů statického tlaku před a za chladičem v rozsahu měřených rychlostí od 0,9 m/s do 12,3 m/s.



Obr. 47 Chladič umístěný v aerodynamickém tunelu

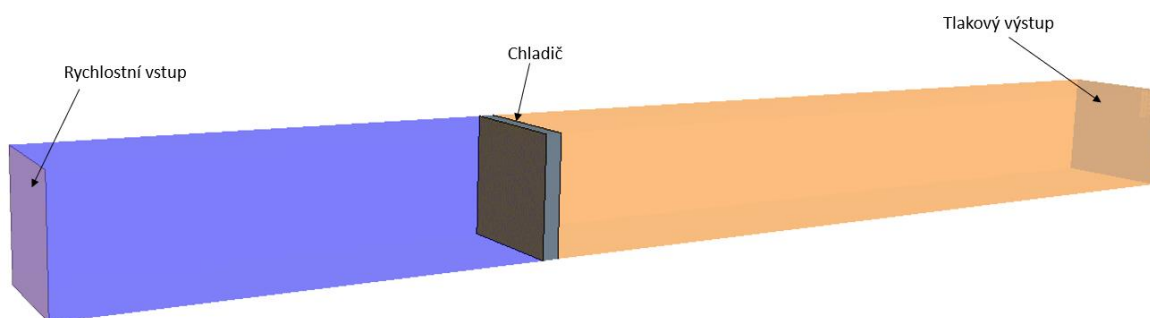


Závislost bylo následně proložena kvadratickou funkcí  $y = ax^2 + bx$ , kde koeficient  $a$  odpovídá tenzoru  $P_i$  a koeficient  $b$  v tenzoru  $P_v$ . Ty však platí pouze ve směru proudění (v tomto případě osa  $x$ ). Pro směry  $y$  a  $z$  musí být nastavená hodnota složek tenzoru dostatečně vysoká, aby to odpovídalo stavu, kdy těmito směry nemůže proudění procházet. Výsledné tenzory mají tvar:

$$P_i = \begin{bmatrix} 120 & 0 & 0 \\ 0 & 10000 & 0 \\ 0 & 0 & 10000 \end{bmatrix} \quad (57)$$

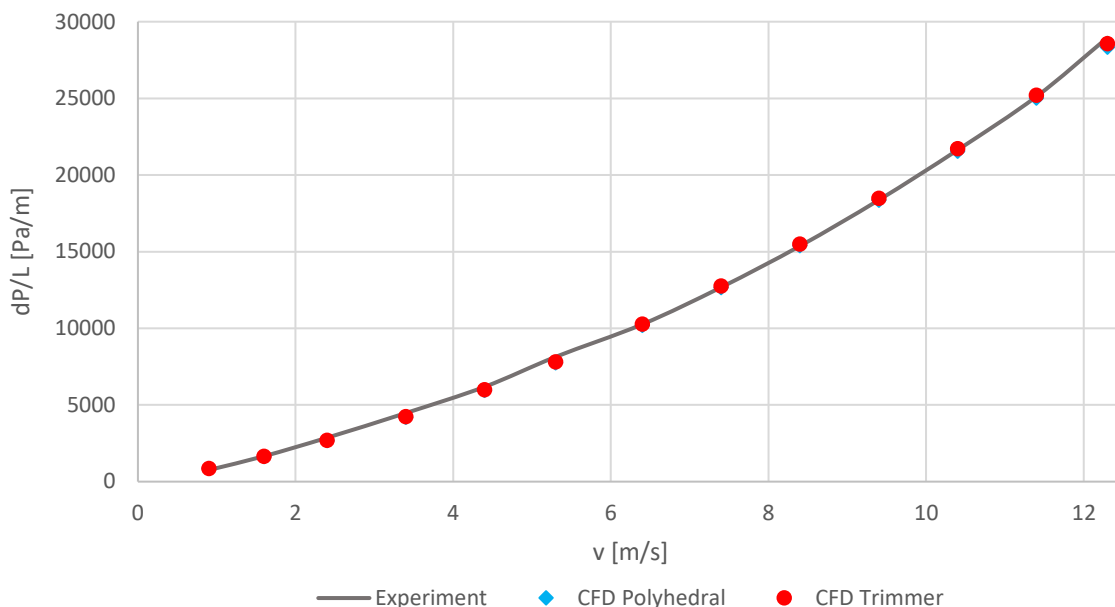
$$P_v = \begin{bmatrix} 846 & 0 & 0 \\ 0 & 10000 & 0 \\ 0 & 0 & 10000 \end{bmatrix} \quad (58)$$

Hodnota porozity byla získána od výrobce a má hodnotu 0,705. Porozita spolu s tenzory byla následně použita pro zjednodušený CFD model, který replikoval experiment (Obr. 48) pro všechny měřené rychlosti a pro dva různé typy buněk sítě – mnohostěny (Polyhedral) a šestistěny (Trimmer). Rychlost byla měněna na okrajové podmínce rychlostního vstupu. Jako model turbulence byl použit RANS Realizable  $k - \epsilon$  two layer.



Obr. 48 Model experimentu v CFD

Vyhodnocována byla taktéž tlaková ztráta mezi vstupní a výstupní stranou vztažená na tloušťku chladiče a následně byla porovnána s naměřenými daty (Graf 1, Tab. 1). V nižších rychlostech jsou odchylky celkem velké (až 12,5%). Při takto nízkých rychlostech může být proudění laminární a tudíž ho použitý turbulentní model není schopný správně vyřešit. S rostoucí rychlostí odchylka od měření klesá až do řádově desetin procenta a nastavení tenzorů a porozity se tak dá považovat za správné a vhodné k použití u výpočtů celého vozu.



Graf 1 Validace chladiče

v [m/s]	0,9	1,6	2,4	3,4	4,4	5,3	6,4	7,4	8,4	9,4	10,4	11,4	12,3
Polyhedral	11,4%	1,5%	6,5%	6,2%	3,8%	4,9%	0,8%	0,1%	0,1%	0,2%	0,4%	0,5%	2,2%
• Trimmer	12,5%	0,7%	5,8%	5,5%	3,1%	4,2%	0%	0,6%	0,8%	0,6%	0,4%	0,3%	1,4%

Tab. 1 Chyba CFD modelu vůči měření

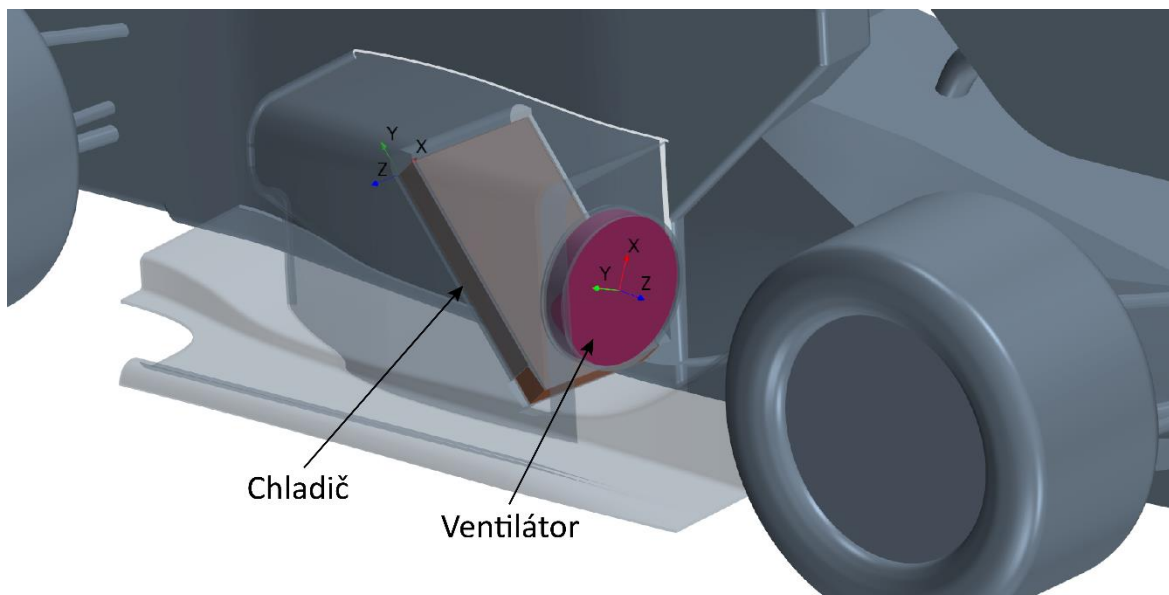
Nezbytnou součástí chladičích systémů je i axiální ventilátor umístěný za chladičem. Ten lze ve STAR-CCM+ modelovat různými způsoby. Nejrealističtější možností je přímo uvedení lopatek do pohybu v nestacionární simulaci a nebo použití metody MRF. To však vyžaduje detailní model lopatek ventilátoru, který nebyl v době tvorby práce k dispozici. Další možností je použití náhradního modelu, který používá zjednodušenou geometrii a efekty ventilátoru na okolní proudění modeluje. Pomocí importované výkonové křivky ventilátoru spojují tyto modely nárůst tlaku s průtokem nebo rychlostí. Tyto náhrady nabízí dvě další možnosti – Fan Interface a Momentum Source. Fan Interface je jednoduchý model, který simuluje funkci ventilátoru na ploše rozhraní mezi dvěma regiony, je robustnější a rychleji konverguje. Momentum Source je složitější a na rozdíl od Fan Interface modeluje větrák jako objemovou oblast a zavádí do rovnice hybnosti zdroje pro nárůst víření a tlaku. Pro další výpočty byl vzhledem k jednoduchosti zvolen model Fan Interface.

Výsledná konfigurace chladičích systémů v CFD modelu je zobrazena na Obr. 49. Z hlediska CAD geometrie byl vytvořen model, který respektuje vnější tvar chladiče a ventilátoru a je součástí regionu pro externí aerodynamiku vozu. Jádrem chladiče ve tvaru kvádra a náhrada lopatek ventilátoru ve tvaru válce byly přiřazeny samostatným regionům, které jsou s původním propojeny na svých vstupech a výstupech pomocí rozhraní ve STAR-CCM+ nazývaných interfaces. Region pro chladič byl nastaven jako porézní s parametry dle experimentu a následného ověření. Region pro ventilátor byl nastaven pro běžný průtok

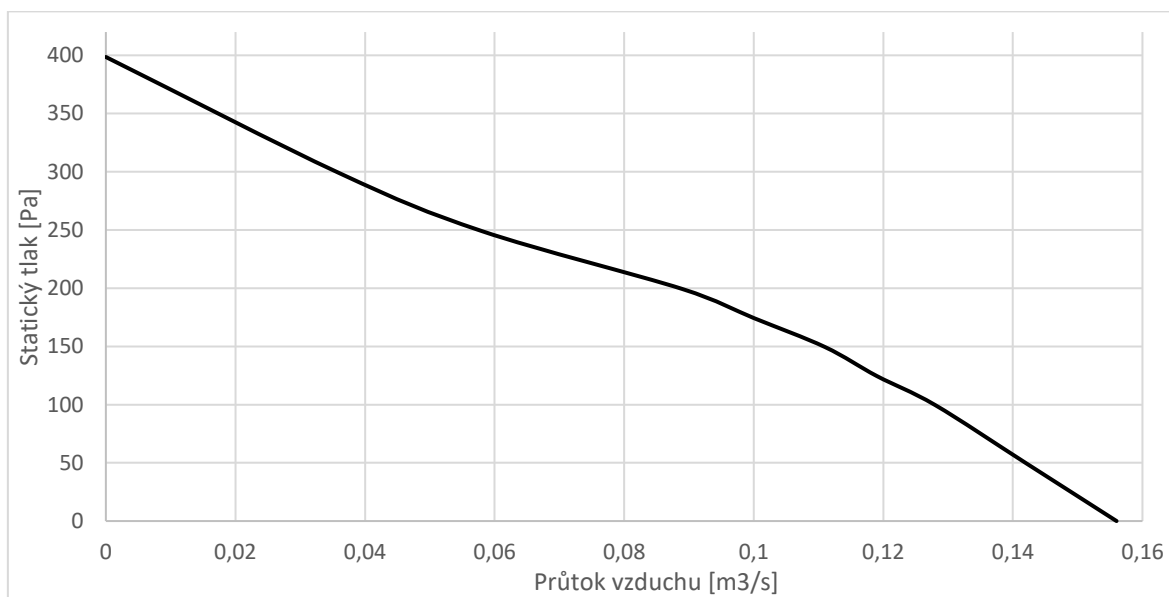




tekutiny a rozhraní jeho výstupu byl přiřazen model Fan Interface s výkonovou křivkou získanou z technického listu používaného ventilátoru Spal VA 67 (Graf 2). Také byly vytvořeny dva lokální souřadné systémy – jeden pro chladič pro přiřazení směrů tenzorům viskózního a setrvačného odporu a druhý pro ventilátor pro definování směru tlakového skoku.



Obr. 49 Konfigurace chlazení v CFD modelu



Graf 2 Výkonová křivka ventilátoru Spal VA 67

## 6.5 Výpočetní síť

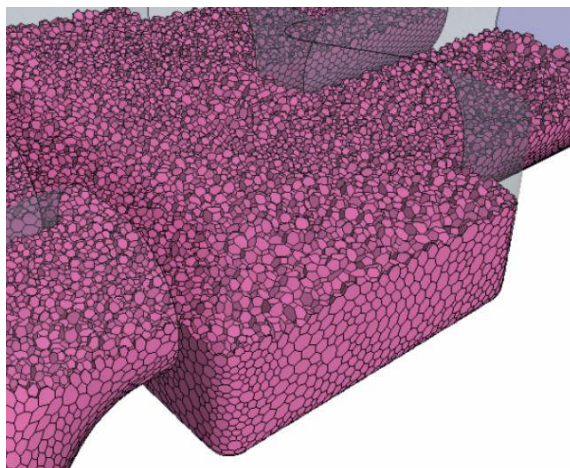
Výpočetní síť a její kvalita jsou rozhodující pro úspěšnou CFD simulaci. Je nutné zajistit dostatečnou jemnost sítě okolo všech požadovaných detailů pro podchycení sledovaných jevů, zajistit co nejvyšší možnou kvalitu sítě bez deformovaných či nepoužitelných buněk a



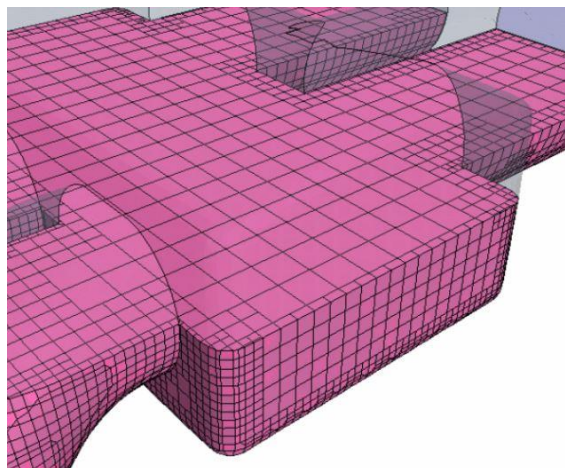
zvolit vhodné nastavení sítě v blízkosti stěn. Počet buněk sítě má zásadní vliv na rychlost výpočtu a proto je její nastavení nutné provádět také s přihlédnutím k dostupným výpočetním možnostem.

Základním pravidlem pro vytvoření dobré objemové sítě je kvalitní podkladová geometrie. Ta by neměla obsahovat žádné průsečné plochy, drobné štěrbiny a měla by být uzavřená. Proto byl před každým výpočtem použit nástroj Surface remesher. Ten vezme importovanou geometrii ve formátu .stp a vytvoří na ní vlastní povrchovou síť tvořenou trojúhelníkovými elementy. Okolo ní je pak vytvořena samotná objemová síť.

Pro porovnání byly vybrány dva nejpoužívanější síťovací nástroje, které STAR-CCM+ nabízí – Polyhedral a Trimmer doplněné o prismatické buňky v mezní vrstvě. Třetí možností je použití tetrahedrální sítě složené ze čtyřstěnů. U tohoto typu sítě je ale náročné správné zachycení gradientů veličin protože každá buňka má pouze tři sousedy, jejichž středy se nachází v jedné rovině a pro zachycení gradientu v rovině na ní kolmé by vyžadovalo vysoké množství buněk. Nástroj Polyhedral (Obr. 50) využívá jako typ elementu mnohostěn (v průměru 14 stěn na 1 buňku). Jeho výhodou je robustnost a jednoduchost stavby sítě. Oproti Trimmeru však vyžaduje až dvojnásobek paměti RAM na stejný počet buněk. Nejdříve dojde k vytvoření podkladové sítě s buňkami ve tvaru čtyřstěnů, které jsou následně spojeny v mnohostěny. Trimmer staví síť z buněk ve tvaru pravidelných šestistěnů. Na začátku vytvoří podkladovou síť s jednotnou velikostí buněk po celé doméně, kterou následně postupně ořezává a zjemňuje násobky 2 okolo geometrie až na požadovanou velikost buněk u stěn a v objemových zjemněních (Obr.51). Trimmer je oproti mnohostěnné síti téměř 2x méně náročný na operační paměť.



Obr. 50 Mnohostěnná síť



Obr. 51 Šestistěnná síť

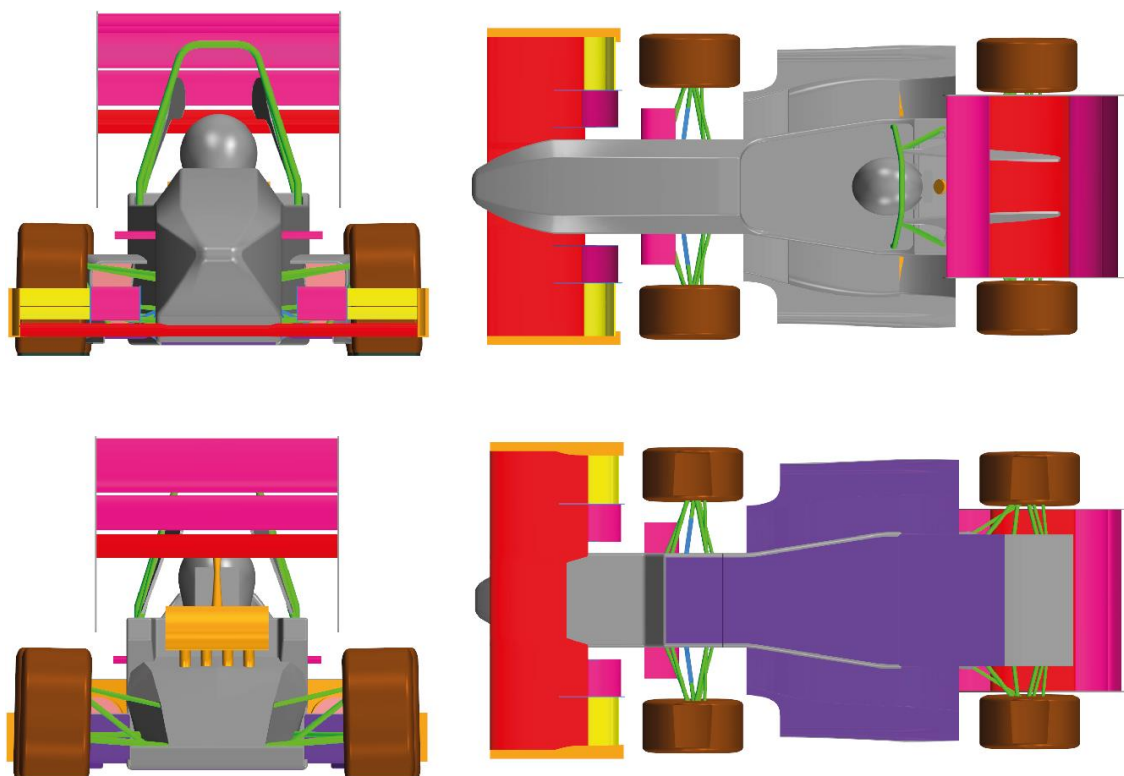
Na voze se nacházejí díly různých velikostí a komplikovaností tvarů – od malých profilů křídel, přes díly náprav ve tvaru trubek, až po velké rovinné plochy bočnic křídel a pokud by byly nastaveny parametry jemnosti sítě na povrchu jednotně tak, aby zachovaly tvar i těch nejmenších ploch, tak by síť obsahovala velké množství buněk. Proto bylo potřeba provést



lokální nastavení. STAR-CCM+ pro to nabízí řadu parametrů, kterými lze povrchovou síť upravovat. Převážně byly upravovány tři nejdůležitější – minimální a cílová velikost buňky a počet bodů umístěných na kružnici pro regulaci jemnosti sítě na zakřivených plochách. Bylo vytvořeno několik kategorií nastavení dle velikosti a typu plochy (Tab. 2 , Obr. 52). Pro zajištění plynulosti přechodu mezi jednotlivými velikostmi byl nastaven poměr růstu sousedních povrchových buněk na 1,3. Povrchová síť pro oba typy sítě je zobrazena na Obr. 53 a Obr. 54

Název	Cílová velikost [mm]	Min. velikost [mm]	Počet bodů na kružnici
Podlaha	5	1,25	36
Trubky	5	0,625	45
Plocha velká	10	1,25	36
Plocha střední	10	0,625	36
Plocha malá	5	0,3125	36
Pneumatiky	10	1,25	40
Křídlo velké	5	0,3125	36
Křídlo střední	5	0,15625	42
Křídlo malé	2,5	0,078125	48

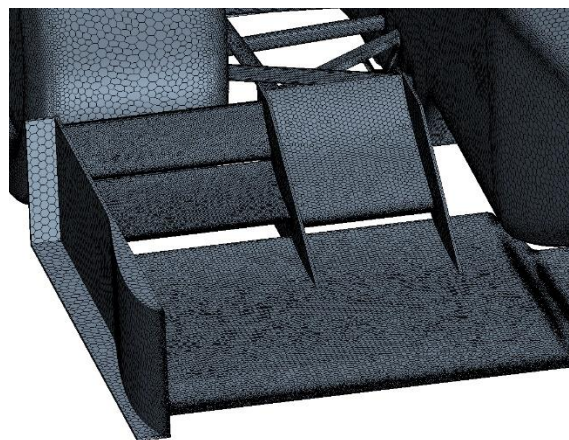
Tab. 2 Nastavení parametrů povrchové sítě



Obr. 52 Rozdělení ploch vozu dle nastavení povrchové sítě

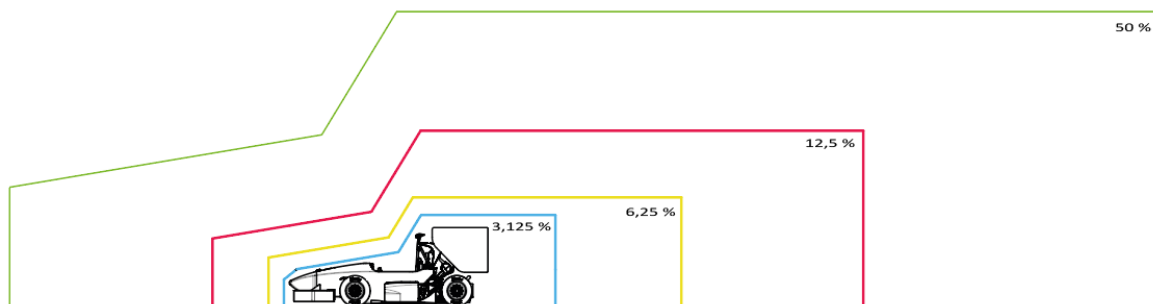


Obr. 53 Povrchová síť trimmer



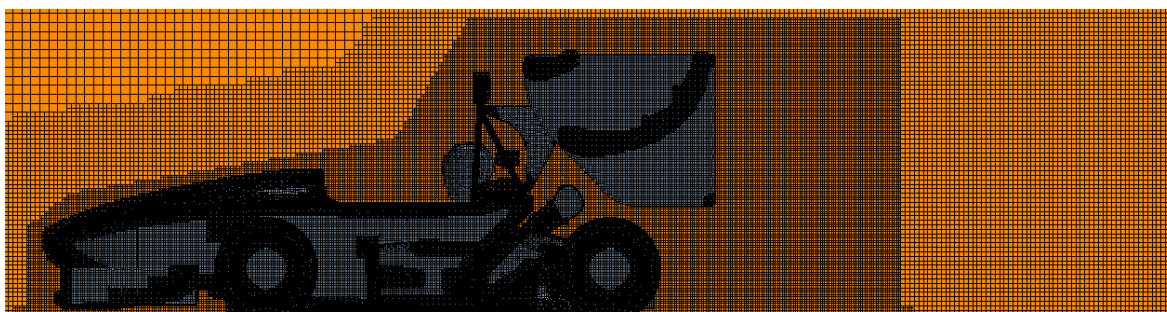
Obr. 54 Povrchová síť polyhedral

Vzhledem k rozměrům domény a velikosti nejmenší požadované buňky není možné použít pouze jeden rozměr buňky ani pro celý její objem, ale provést zjemnění i objemové. Jako základní velikost buňky bylo zvoleno 320 mm a všechny ostatní hodnoty k ní byly procentuálně vztaženy. Tato základní velikost se nacházela pouze v nejvzdálenějších oblastech domény a postupně se směrem k vozu zmenšovala (Obr. 55). Velikost objemové buňky v blízkosti vozu byla tedy 10 mm. Důležité bylo zachovat dostatečné zjemnění v úplavu vozu a plynulost přechodu mezi jednotlivými velikostmi buněk.

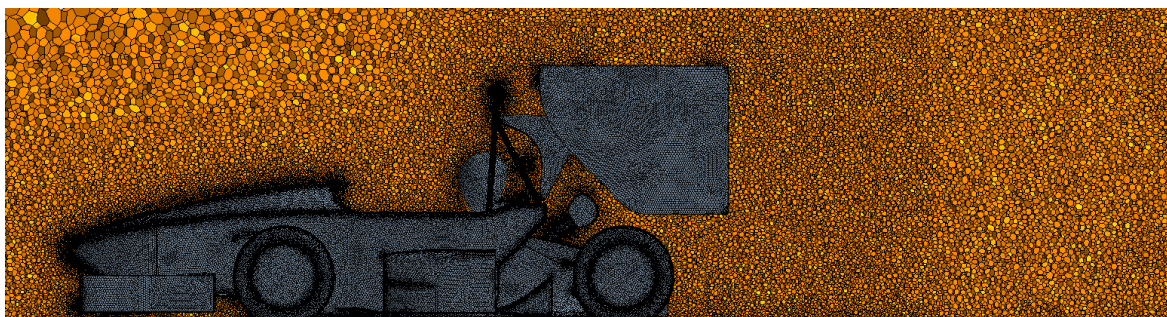


*Obr. 55 Rozložení velikosti objemových buněk*

Aby byl dodržen plynulý přechod mezi jednotlivými objemovými zjemněními a přechod mezi povrchovou a objemovou sítí, byla nastavena rychlost objemového růstu na střední, která zajišťuje vložení 2 vrstev buněk než dojde k přechodu na další velikost. Výsledná šestistěnná a mnohostěnná objemová síť je zobrazena na Obr. 56 a Obr. 57.

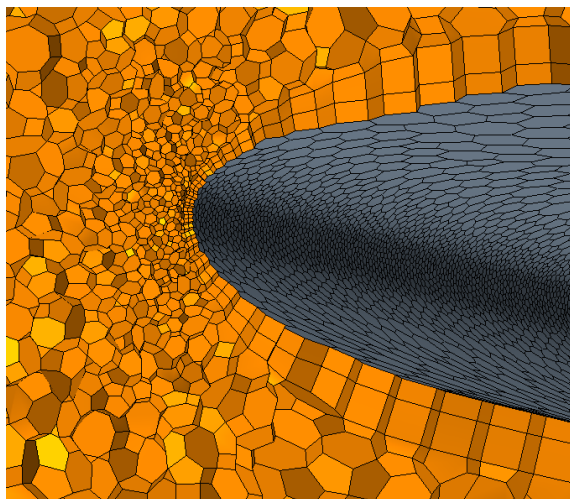


*Obr. 56 Objemová síť Trimmer*

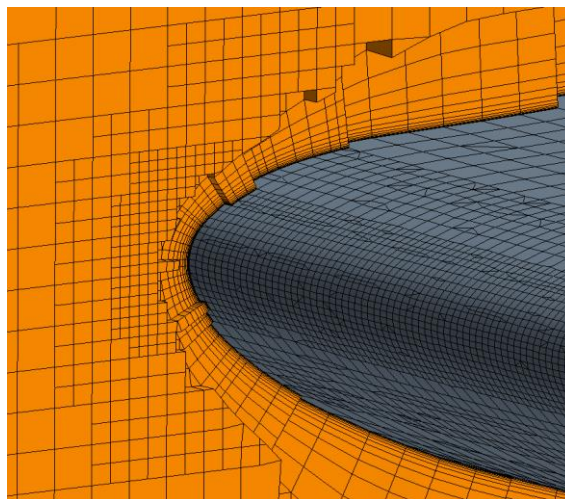


*Obr. 57 Objemová síť Polyhedral*

Způsoby modelování proudění u stěny byly popsány v kapitole 4.3. Vybranému způsobu musí odpovídat i výpočetní síť v blízkosti stěny. Ta se tvoří pomocí prismatických buněk, jejichž stěny leží v normálovém směru od povrchu blízko sebe. Vzhledem k tomu, že gradienty veličin jsou v tomto směru násobně vyšší než ve směru tečném, je možné ho díky těmto buňkám lépe zachytit. Při tvorbě prismatických buněk bylo postupováno dle doporučení firmy Siemens. Pro dosažení  $y^+ > 30$  při použití stěnových funkcí byly tedy použity 2 prismatické vrstvy, výška první buňky byla 1,6 mm a celková výška 4,5 mm (Obr. 58). Pro detailní modelování proudění u stěny a  $y^+ < 1$  bylo použito 10 prismatických vrstev s celkovou výškou 6 mm a výškou první buňky 0,025 mm (Obr. 59).



Obr. 58 2 prismatické vrstvy



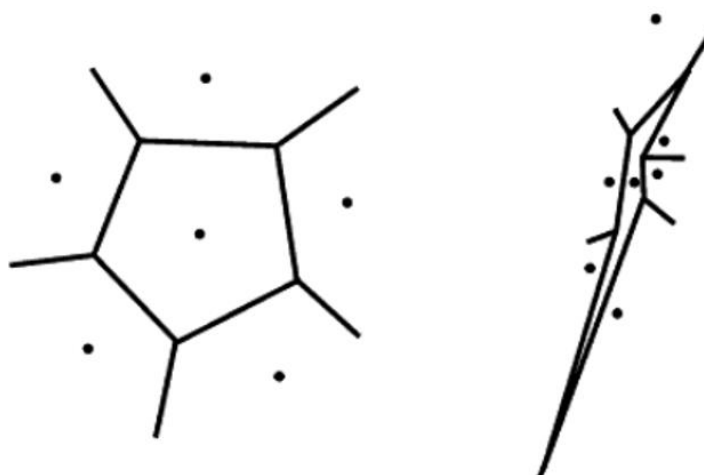
Obr. 59 10 prismatických vrstev

Pro pozdější validaci byly tedy připraveny celkem 4 výpočetní sítě. Ty se lišily v použitém typu buněk (Polyhedral a Trimmer) a v přístupu k modelování proudění u stěny.

Z hlediska kvality se dá výpočetní síť hodnotit řadou způsobů. Základem je posoudit, zda je síť dostatečně jemná v oblastech vysokých gradientů, aby byly podchyceny všechny charakteristiky proudění, zda je síť optimálně rozložena z hlediska plynulosti změn velikostí buněk a zda prismatické vrstvy odpovídají požadovanému způsobu modelování proudění u stěny. Pro kontrolu kvality sítě a její vhodnost pro výpočet bylo použito několik parametrů:

- Kvalita buněk

Základní posouzení kvality buněk probíhá pomocí funkce relativního rozložení středů buněk vůči stěnám okolních buněk a orientace stěn. Ploché buňky s vysoce neortogonálními plochami mají obecně nízkou kvalitu buněk. Buňka s hodnotou 1 je považována za perfektní (např. kubická buňka). Hodnota buněk s nízkou kvalitou se blíží nule. Hodnoty pod 0,00001 jsou nepřijatelné.

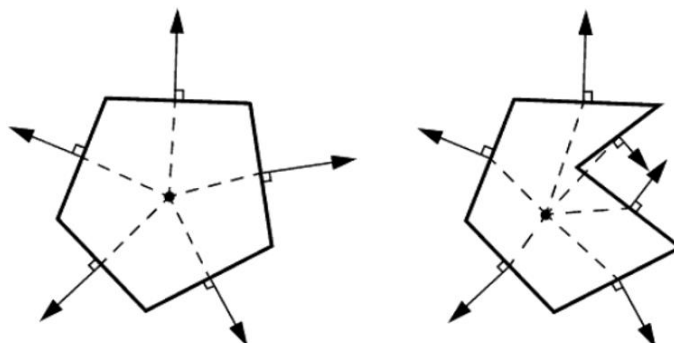


Obr. 60 Kvalitní a nekvalitní buňka



- Validita stěn

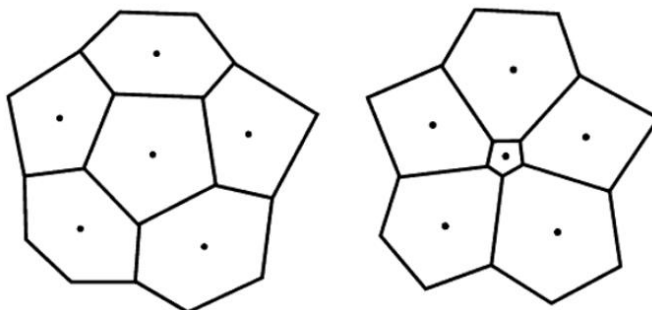
Tento parametr posuzuje kvalitu stěn buněk. Pokud normály stěn směřují z těžiště buňky směrem ven, tak je přiřazena hodnota 1 a buňka je považována za kvalitní. Pokud je buňce přiřazena hodnota menší než 1, tak to znamená že normály směřují směrem dovnitř buňky a jsou nepřijatelné. Buňky s hodnotou menší než 0,5 mají tzv. negativní objem.



Obr. 61 Normály stěn buňky

- Změna velikosti objemu

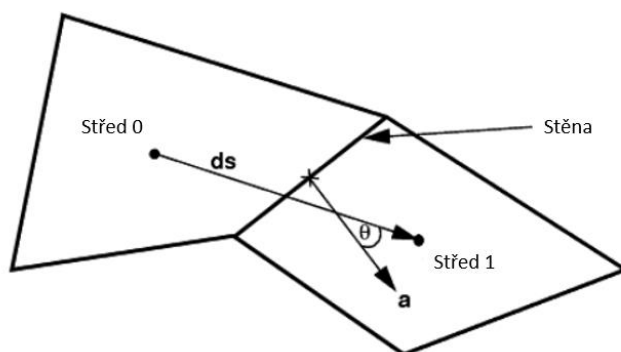
Poměr mezi velikostí buňky a velikostí jejího největšího souseda se nazývá změna velikosti objemu. Hodnota 1 tedy znamená, že jsou sousední buňky stejné velikosti. Velké rozdíly mezi velikostmi sousedních buněk mohou způsobit nepřesnosti či nestabilitu řešiče. Za pro výpočet nevhodné buňky se považují ty se změnou velikosti objemu menší než 0,01.



Obr. 62 Ukázka změny velikosti objemu buňky

- Šikmost buňky

Šikmost buňky vyhodnocuje zda jsou středy buněk na každé straně jejich stěn v takovém úhlu, aby umožňovaly difuzi veličin. Úhel šikmosti  $\Theta$  se nachází mezi spojnicí středů a normálou společné stěny. Dokonale ortogonální síť značí hodnota úhlu  $0^\circ$ . Kvalitní síť by měla mít úhel šikmosti menší než  $85^\circ$ .



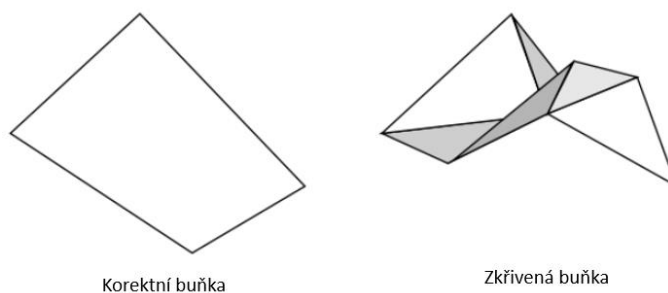
Obr. 63 Úhel šikmosti buněk

- Zkřivení buněk

Zkřivené či deformované buňky mohou působit problémy s konvergencí řešení. Úhel zkřivení buněk je definován následovně:

$$\varphi = 2 \arctan \left( \frac{d}{L} \right) \quad (59)$$

kde  $d$  je vzájemná vzdálenost promítnutá na normálu stěny a  $L$  je charakteristické délkové měřítko definované jako odmocnina z plochy stěny. Tento úhel je následně nelineárně zmenšen a transformován na parametr zkřivení, který nabývá hodnot 0 až 1 a pro úspěšné řešení by měl být udržen pod 0,15.



Obr. 64 Zkřivení buněk

STAR-CCM+ nabízí pro všechny tyto parametry předpřipravené funkce na jejich vyhodnocení. Všechny 4 výpočetní sítě představené požadavky na kvalitu splňovaly. Hodnoty  $y^+$  a tedy správnost nastavení prismatických buněk se vyhodnocuje až po skončení výpočtu.

## 6.6 Nastavení simulace

Všechny 4 výpočty byly provedeny jako stacionární s RANS modelováním turbulence. Jako modely turbulence byly použity SST  $k - \omega$  pro sítě s podrobnou sítí v blízkosti stěny a Realizable  $k - \epsilon$  two layer pro hrubší sítě. Ve všech případech byl pro modelování proudění u stěny použit model All  $y^+$  Wall treatment, který kombinuje přístup pro nízké a vysoké  $y^+$ .





V případě  $y^+ > 30$  použije stěnové funkce a v případě  $y^+ < 1$  naopak ne. Oblasti  $5 < y^+ < 30$  je obecně vhodné se vyhnout, nicméně tento model dává rozumné výsledky i pro ni.

Tyto úvodní výpočty sloužily k porovnání s následně provedeným experimentem a proto byla vybrána jako referenční rychlost výpočtu 100 km/h (27,78 m/s). Ta byla výrobcem senzorů doporučena pro měření, aby byly změny měřených tlaků dostatečně znatelné. Úhlová rychlost otáčení pneumatik odpovídající poloměru pneumatiky a referenční rychlosti byla nastavena jako 123,47 rad/s. Parametry média – vzduchu byly brány jako parametry vzduchu ve standardní atmosféře. To je model, který předpokládá při hladině moře tlak 101325 Pa a teplotu 15 °C, čemuž odpovídá hustota 1,225 kg/m<sup>3</sup>. Za referenční plochu použitou pro výpočet silových koeficientů byla uvažována čelní plocha vozu. Ta byla zjištěna přímo ve STAR-CCM+, který nabízí funkci na změření průměrné plochy geometrie a pro vůz FS.11 to bylo 1,053m<sup>2</sup>.

Pro modely turbulence bylo nutné nastavit počáteční podmínky na vstupu do domény pro  $k$ ,  $\varepsilon$  a  $\omega$ . Turbulentní kinetická energie se vypočte ze vztahu:

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 = \frac{3}{2} * (27,78 * 0,05)^2 = 2,891 J * kg^{-1} \quad (60)$$

kde  $U$  je rychlost na vstupu a  $I$  je turbulentní intenzita pro volné proudění běžně brána jako 5 %.

Rychlost turbulentní disipace se vypočte dle:

$$\varepsilon = C_\mu \frac{3}{4} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} = 0,09^{\frac{3}{4}} * \frac{2,891^{\frac{3}{2}}}{0,504} = 1,602 m^2 * s^{-3} \quad (61)$$

kde  $C_\mu$  je empirická konstanta pro turbulentní modely běžně brána přibližně jako 0,09 a  $l$  je turbulentní délkové měřítko vypočtené z charakteristického rozměru domény ( $L = 7,2 m$ ) jako  $0,07 * L$ .

Specifická rychlost turbulentní disipace se vypočte jako:

$$\omega = \frac{k^{\frac{1}{2}}}{C_\mu^{\frac{1}{4}} * l} = \frac{2,891^{\frac{1}{2}}}{0,09^{\frac{1}{4}} * 0,504} = 6,158 s^{-1} \quad (62)$$

Pro řešení byl použit řešič nazývaný ve STAR-CCM+ jako Segregated solver. Ten vychází ze SIMPLE algoritmu a řeší transportní rovnice postupně. Využívá vazby mezi tlakem a rychlostí, kde je omezení zachování hmotnosti v rychlostním poli splněno řešením rovnice korekce tlaku. Rovnice pro korekci tlaku je konstruována z rovnice kontinuity a rovnic hybnosti tak, že je hledáno predikované rychlostní pole, které splňuje rovnici kontinuity, čehož je dosaženo korekcí tlaku.



Nakonec byly tedy připraveny 4 výpočetní modely, které se lišily v použitém turbulentním modelu, přístupu k modelování mezní vrstvy a typu použité sítě. Shrnutí je uvedeno v tabulce:

Název	V1_a	V1_b	V2_a	V2_b
Model turbulence	Realizable k - $\epsilon$ two layer	SST k - $\omega$	Realizable k - $\epsilon$ two layer	SST k - $\omega$
y+	>30	<1	>30	<1
Typ sítě	Polyhedral	Polyhedral	Trimmer	Trimmer
Počet buněk	11,6	16,5	13,5 mil	19,6 mil
Referenční rychlost [m/s]	27,78			
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	1,225			
Tlak [Pa]	101325			
Referenční plocha [m <sup>2</sup> ]	1,053			

Tab. 3 Nastavení úvodních výpočtů

### 6.7 Sledované hodnoty

Ještě před spuštěním výpočtu je dobré připravit parametry, které budou v průběhu iteračního řešení zaznamenávány pro pozdější průměrování vybraného počtu hodnot a analýzu konvergence řešení. Primárním zájmem CFD simulace externí aerodynamiky vozu je zjištění silového působení a rozložení těchto sil mezi nápravami a z toho důvodu byly připraveny funkce sledující koeficienty vztlaku a odporu jak celého vozu, tak pro jednotlivé sestavy (definované v kapitole 6.1 na Obr. 43), přítlak a odpor (jako síly) pro celý vůz a hmotnostní průtok jdoucí do chladiče. Pro všechny tyto funkce byly nastaveny statistické funkce, které po skončení výpočtu provedou aritmetický průměr z posledních 300 iterací. Pro výpočet vztlakových koeficientů na jednotlivé nápravy byly připraveny dva jednoduché vzorce, které vycházejí z momentových rovnic k osám obou náprav a následně jsou převedeny na bezrozměrné koeficienty:

$$c_{lf} = \frac{L_f}{\frac{1}{2}\rho v_{ref}^2 A_{ref}} = \frac{M_r}{\frac{1}{2}\rho v_{ref}^2 A_{ref} W_b} \quad (63)$$



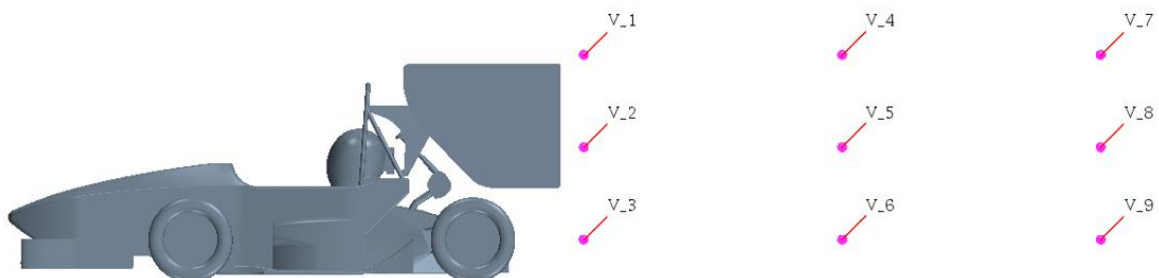
$$c_{lr} = \frac{L_r}{\frac{1}{2} \rho v_{ref}^2 A_{ref}} = \frac{M_f}{\frac{1}{2} \rho v_{ref}^2 A_{ref} W_b} \quad (64)$$

kde  $L_f, L_r$  jsou vztlaky na přední (index  $f$  - front) a zadní (index  $r$  - rear) nápravu,  $M_f, M_r$  momenty okolo os jednotlivých náprav (zjišťované přímo předdefinovanou funkcí ve STAR-CCM+) a  $W_b$  je rozvor náprav. Jednoduchým poměrem vztlaku působícího na přední nápravu ku vztlaku celkovému získáme procentuální rozvážení vztlaku na přední nápravu:

$$A_{bal} = \frac{c_{lf}}{c_l} * (-100) \quad (65)$$

Hodnota mínus u násobení 100 vychází z předpokladu, že vůz generuje přítlak, vztlak se záporným znaménkem a zajišťuje, že výsledné procentuální rozložení vyjde kladné.

Dalším parametrem pro sledování konvergence je ustálení hodnot proudového pole. Proto bylo v doméně za vozem umístěno 9 kontrolních bodů ve kterých byla v průběhu výpočtu sledována a zaznamenávána rychlost proudění.

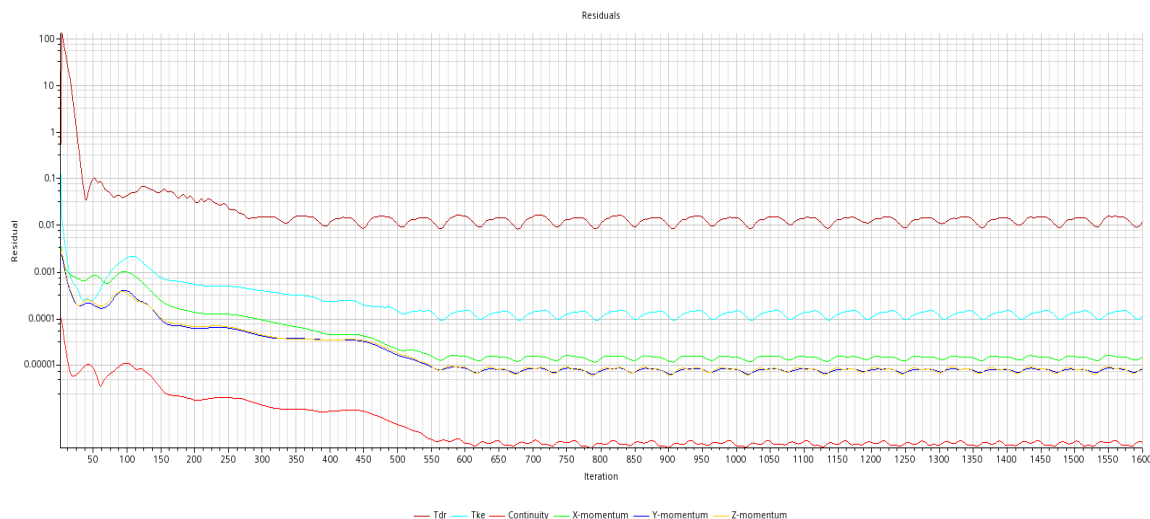


Obr. 65 Rozmístění kontrolních bodů

## 6.8 Vyhodnocení

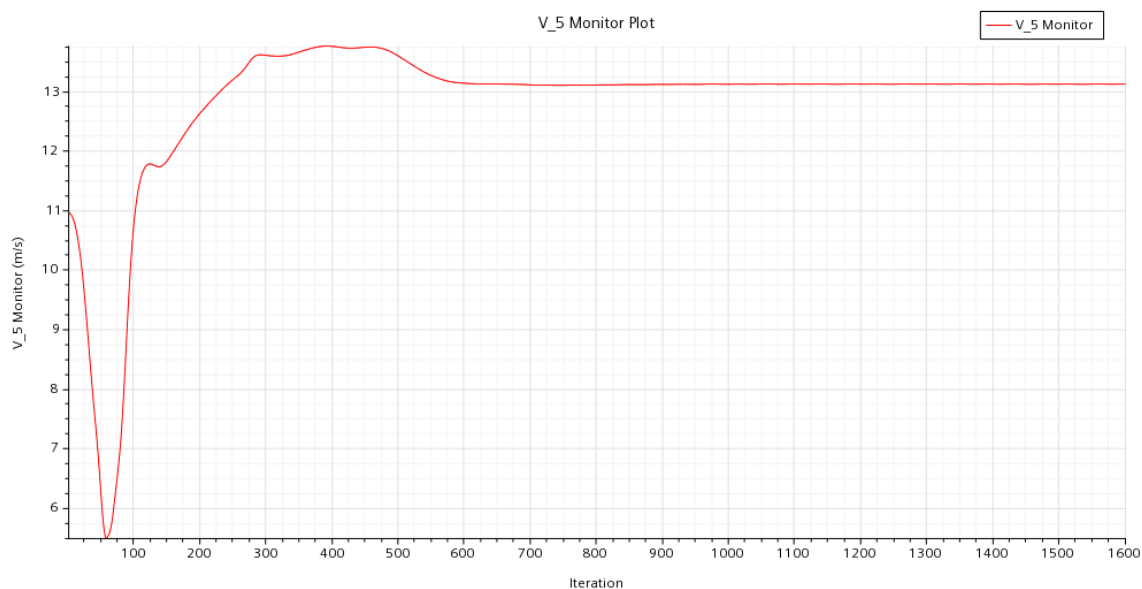
Pro vyhodnocení úspěšné konvergence výpočtů byly použity tři metriky – residua, ustálení rychlostí ve sledovaných bodech a ustálení integrálních hodnot.

Diskretizované transportní rovnice jsou řešeny v každé buňce. V ideálním případě by byly přesně vyřešeny a na jejich pravé straně by byla 0. Vzhledem k jejich nelinearitě je nutné k řešení použít iterativní numerické schéma a na pravé straně bude tedy vždy nějaká chyba – residuum. Každá buňka má tedy vlastní hodnotu residua a absolutní konečná hodnota residuí jednotlivých rovnic je kvadratickým průměrem residuí ze všech buněk. Obecně není snadné určit jaká absolutní hodnota residuí se dá považovat za dostatečně zkonvergovanou, protože se bude pro každý typ úlohy lišit a neměl by to být tedy hlavní parametr sledování konvergence výpočtu. Důležité je sledovat jejich pokles minimálně o několik řádů a zda jsou ustálená bez větších gradientů.

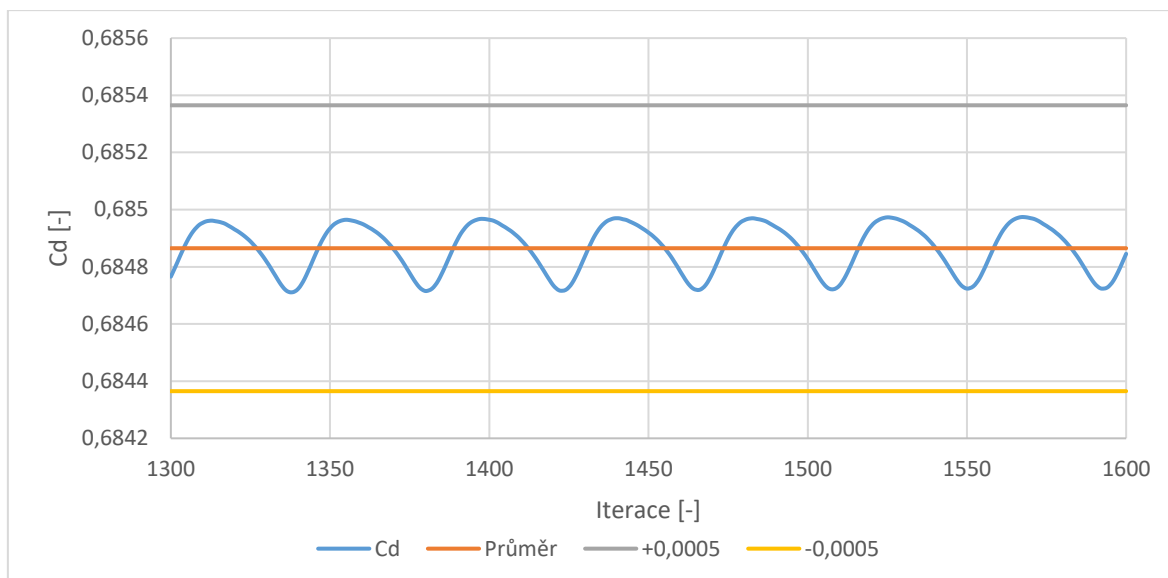


*Graf 3 Residua varianty V2\_a*

Hodnoty residuí jsou však pouze numerickým parametrem, nikoli inženýrskou hodnotou. Proto bylo vyhodnoceno ustálení hodnot proudového pole – konkrétně rychlostí v různých bodech domény (viz. 6.7 Obr. 65) a ustálení sledovaných integrálních hodnot – koeficientu vztlaku a odporu. Cílem bylo aby na nich již nebyly žádné gradienty, sledované rychlosti aby oscillovaly maximálně v rozmezí setin m/s a integrální hodnoty byly v rozmezí  $\pm 0,0005$  kolem průměrné hodnoty v posledních 300 iteracích. To bylo u všech výpočtů splněno a pro ilustraci je to zobrazeno na následujících grafech z výpočetní varianty V2\_a:

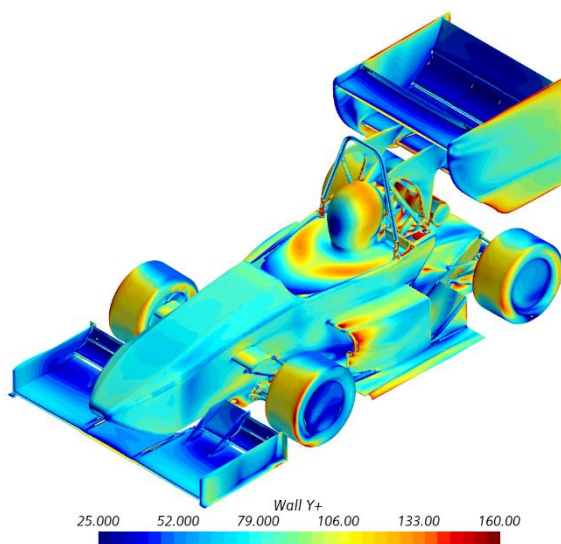


*Graf 4 Ustálení rychlosti v bodě 5 varianty V2\_a*

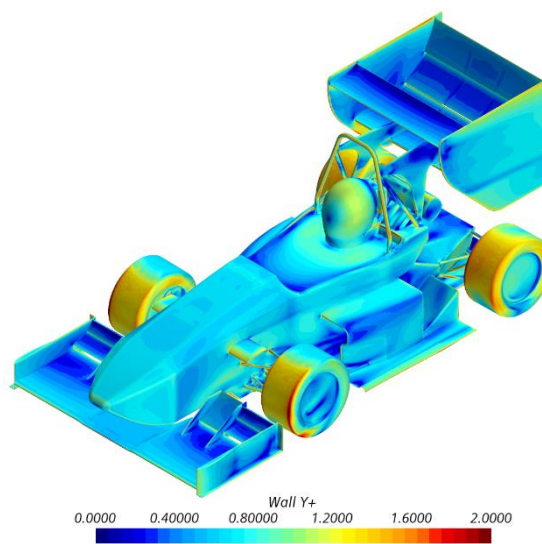


*Graf 5 Ustálení odporového koeficientu varianty V2\_a*

Pro kontrolu nastavení výšky první prismatické buňky u stěny byly vyhodnoceny hodnoty  $y^+$ . Geometrie vozu je velmi komplexní s velkými rozdíly v rychlostech proudění okolo ní a proto je dosažení konstantní hodnoty  $y^+$  po celém povrchu nemožné. Hodnoty  $y^+$  pro výpočty V1\_a a V2\_a se pohybovaly mezi 25 a 160 a u V1\_b a V2\_b mezi 0 a 2. Oboje se dá považovat vzhledem k přístupu k modelování proudění u stěny a použitému turbulentnímu modelu za dostačující.

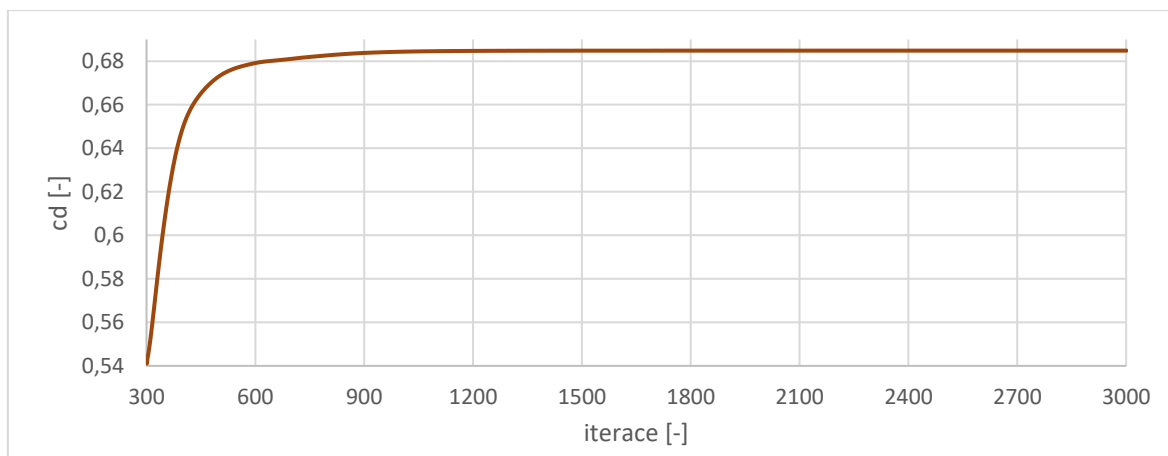


*Obr. 66 Rozložení  $y^+$  u V1\_a*



*Obr. 67 Rozložení  $y^+$  u V1\_b*

Počty iterací po které je nutné jednotlivé výpočty nechat běžet byly stanoveny z plovoucích průměrů koeficientů vztlaku a odporu. Díky tomu je možné najít počet iterací při kterých již nemá smysl dále pokračovat ve výpočtu, protože integrální hodnoty se změní již naprosto minimálně. Pro začátek byl počet iterací, po který má výpočet proveden ,stanoven na 3000 a následně bylo určeno, že pro simulace s hrubší sítí v mezní vrstvě postačuje pro ustálení 1600 iterací (Graf 6) a pro simulace s jemnější sítí 2800 iterací.



Graf 6 Plovoucí průměr Cd varianty V2\_a

Dle předešlých metrik je možné říci, že výpočty byly úspěšně zkonvergované. To však neznamená, že jsou fyzikálně správně a je nutné je porovnat s experimentem a vybrat který z nich odpovídá reálnému proudění nejvíce. Výsledná integrální data a doby výpočtu jsou uvedeny v Tabulce 4:

Název	V1_a	V1_b	V2_a	V2_b
Cl [-]	-1,536	-1,497	-1,556	-1,488
Cd [-]	0,698	0,672	0,685	0,659
%f	46	48	44,8	49,5
Průtok [kg/s]	0,16	0,150	0,167	0,157
Počet iterací	1600	2800	1600	2800
Doba výpočtu [h]	17	38	17,5	39

Tab. 4 Výsledky úvodních výpočtů

Z výsledků je zřejmé, že mezi sítí s mnohostěny a šestistěny není velký rozdíl. To koresponduje i s informacemi od výrobce STAR-CCM+, který tvrdí, že by výsledky mezi nimi měly být srovnatelné. Větší rozdíly jsou až mezi jednotlivými přístupy k modelování mezní vrstvy. V případě detailního modelování až ke stěně je vidět značný úbytek přitlačné síly oproti použití stěnových funkcí. Při kontrole integrálních veličin jednotlivých komponent byl nejvyšší úbytek přitlačné síly zřetelný u zadního křídla, které má již velice agresivní geometrii a vliv přilnutí mezní vrstvy zde bude nejvýraznější. To potvrzuje i aerodynamické rozvážení, které se přesunulo v obou případech více směrem k přední nápravě. Rozdíly však nebyly pouze v integrálních veličinách ale také v časové náročnosti výpočtů. Díky většímu množství buněk v mezní vrstvě byla celková síť větší a spolu s větším počtem iterací nutným ke konvergenci byl celkový čas výpočtů více jak dvojnásobný.



## 7 Měření přínosu aerodynamických prvků

Pro úvodní ověření přínosu aerodynamických prvků na časy na kolo a chování vozu bylo provedeno jednoduché měření. Z vozu bylo odebráno přední a zadní křídlo a boční křídélko nad přední nápravou (Obr. 68, Obr. 69). Boční podlahy jsou k vozu permanentně přilepeny a tudíž není možné je odebrat. Na voze byl také ponechána podlaha a difuzor v zadní části vozu, protože zajišťuje ochranu suché vany spalovacího motoru. Vzhledem k tomu, že přední a zadní křídlo na voze tvoří až 70% přitlačné síly, tak by rozdíl v chování vozu měl být více než znatelný.

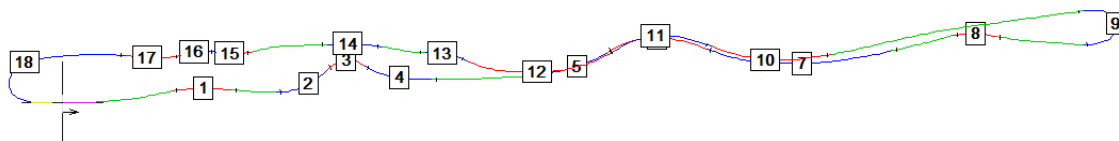


Obr. 68 FS.11 bez předního a zadního křídla



Obr. 69 Kompletně osazená FS.11

Pro měření byla využita testovací trať na letišti v Plzni, kterou tým CTU CarTech pravidelně využívá ke svým testováním. Postavený okruh měl na délku 549 m a svým charakterem a typem zatáček přibližně odpovídal tratím závodů Formula Student (Obr. 70) Pilot v každé konfiguraci vozu odjel 10 kol. Obě jízdy byly provedeny stejným pilotem ve stejný den pro zachování maximální možné porovnatelnosti.

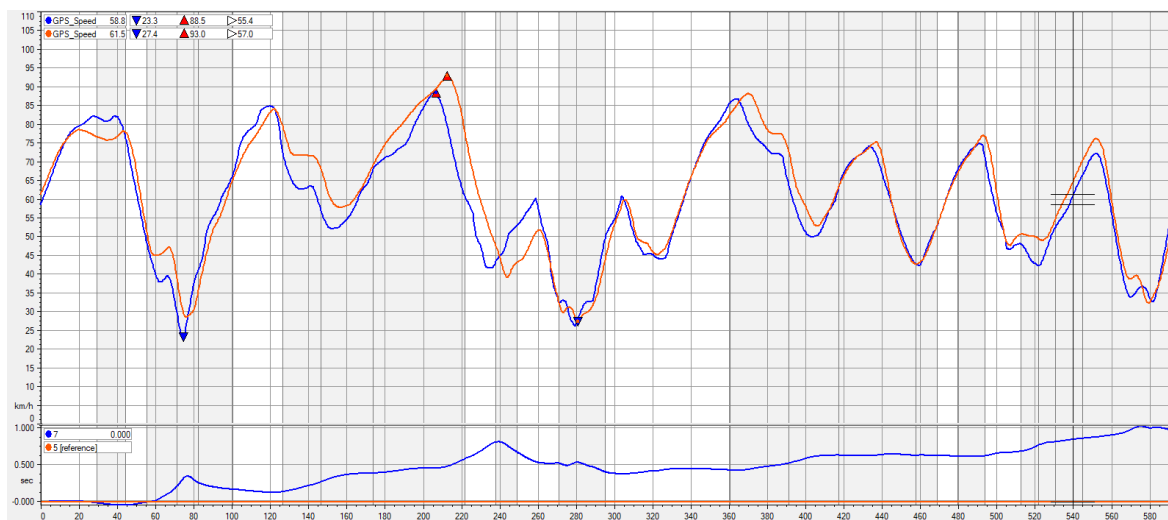


Obr. 70 Testovací trať na letišti v Plzni

Nejrychlejší kolo vozu s přitlačnými křídly bylo o 0,977 s rychlejší než vozu bez nich, průměrná odchylka mezi jednotlivými koly byla dokonce 1,9s. Jakmile si pilot na jízdu s vozem s menším přitlakem zvykl, tak byly časy na kolo o poznání konzistentnější, ale stále o poznání pomalejší než při jízdě s křídly. Dle slov pilota auto pocitově neztratilo tolik přilnavosti jak očekával a díky snížení hmotnosti vozu a momentů setrvačnosti rychleji reagovalo. Celkově však bylo nestabilní, nedotáčivé a pod plynem se v zatáčkách začínalo přetáčet. Porovnání průběhu rychlostí z nejrychlejších kol obou jízd je na Grafu 7, kde



modrá křivka znázorňuje jízdu bez křidel a červená jízdu s nimi. Je patrné, že s přítlačnými křídly si pilot mohl dovolit brzdit do zatáček později a udržet si v průjezdu zatáčkou vyšší rychlost. Největší rozdíl lze pozorovat u zatáček projížděných ve vyšší rychlosti, či u závěrečného slalomu. Na rovinkách kde pilot akceleroval je znatelný různý sklon průběhu akcelerace. V případě jízdy bez křidel je strmější díky velkému snížení odporu vzduchu, nicméně pilot musel začít díky sníženému přítlaku dříve brzdit.



*Graf 7 Porovnání průběhu rychlosti z obou nejrychlejších kol*

Obecně lze tedy říci, že prvky generující přítlačnou sílu mají na snížení časů na kolo velice pozitivní vliv a vyplatí se je i za cenu zvýšené hmotnosti vozu, momentů setrvačnosti a odporu na vůz nasadit a věnovat se jejich vývoji.

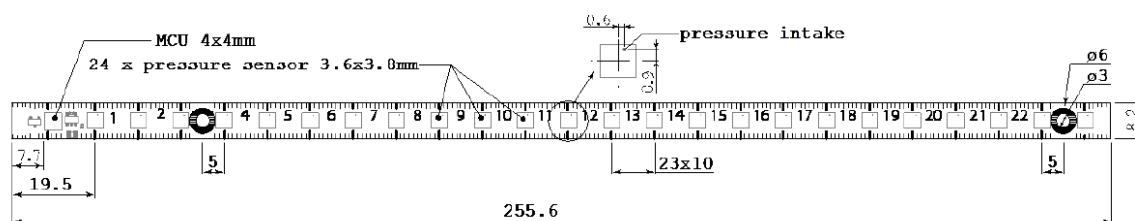




## 8 Validační měření tlakovými pásky

### 8.1 Tlakové pásky

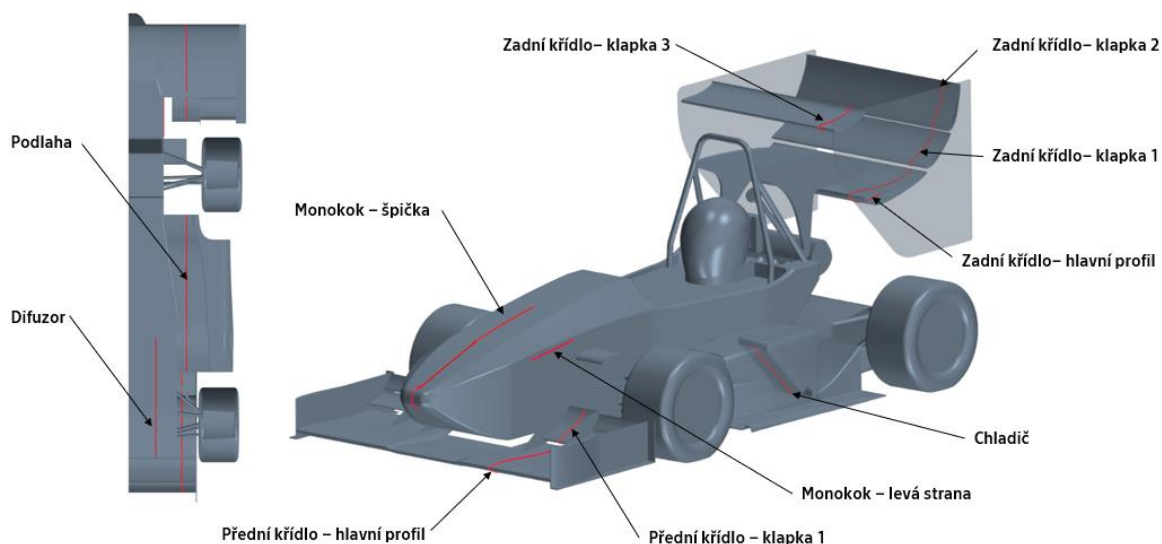
Pro validační měření CFD modelu byly vybrány tlakové pásky vyvinuté firmou 4Jtech. Jejich předností je snadná a rychlá aplikovatelnost. Jsou schopny měřit v rozsahu 93 – 107 kPa a 15 – 40° C s přesností menší než 10 Pa. Na povrch vozidla se připevňují pomocí lepicí pásky, čímž odpadá nákladná výroba testovacích dílů se zabudovanými tlakovými odběry a samotná příprava měření není vysoce časově náročná. Na jednom ohebném pásku se nachází buď 5, 10, 12 nebo 24 absolutních tlakových senzorů umístěných v 10mm rozestupech (Obr.71), referenční značky pro identifikaci pozice pásku a konektory pro zapojení kabeláže, či dalších pásků.



Obr. 71 Schéma tlakového pásku []

### 8.2 Umístění senzorů

Přítlačná křídla jsou základním prvkem aerodynamického balíčku vozu. Proto byly pásky umístěny na přední (hlavní profil, první klapka) a zadní (hlavní profil, první, druhá a třetí klapka) křídlo. U předního křídla, které je ještě v nenarušeném proudu vzduchu a s mírným úhlem náběhu bylo očekáváno přilnuté proudění, které naznačuje i CFD. Křídlo zadní je složeno ze čtyř prvků s vysokým úhlem náběhu, zvláště u klapky 2 a je možné, že zde dochází k odtržení proudění ačkoli v CFD tomu tak není. Z diskuze a informací od konkurenčních týmů vyplynulo, že od podlahové části vozu získávají velkou část své přítlačné síly. To se našemu týmu ale dlouhodobě nedaří a zároveň se náš CFD model zdá málo citlivý na změny převážně v oblasti podlahového difuzoru. Proto byly umístěny pásky na boční podlahu a podlahový difuzor. Dále byl pásek umístěn na přední stranu chladiče, boční stranu monokoku a horní stranu monokoku přes špičku vozu, kde se nachází stagnační bod (Obr. 72).



Obr. 72 Umístění tlakových pásků na voze FS.11

Dohromady bylo na voze umístěno 38 pásků s celkovým počtem 670 senzorů. Na povrch vozu byly připevněny pomocí předřezané lepicí folie, která zakrývala celý povrch pásku kromě samotných snímačů tlaku. Pro zajištění byly okraje folie přelepeny pruhy lepicí pásky. Každý pásek je označen unikátním číslem, které souhlasí s číslem v softwaru pro zpracování dat. Aby byla z fotografií jasná identifikace umístění, bylo u prvního senzoru pásku vždy fixem připsáno i jeho číslo (Obr. 73). Pásky byly umístěny buď samostatně anebo častěji zapojeny do série s dalšími a následně spojeny kabeláží s jednotkami pro sběr dat, které měl pilot po své levé straně v kokpitu vozu (Obr. 74). Jednotky komunikovaly pomocí ethernetového rozhraní s notebookem, který byl v kokpitu vozu po pilotově pravé straně.



Obr. 73 Instalace tlakového pásku



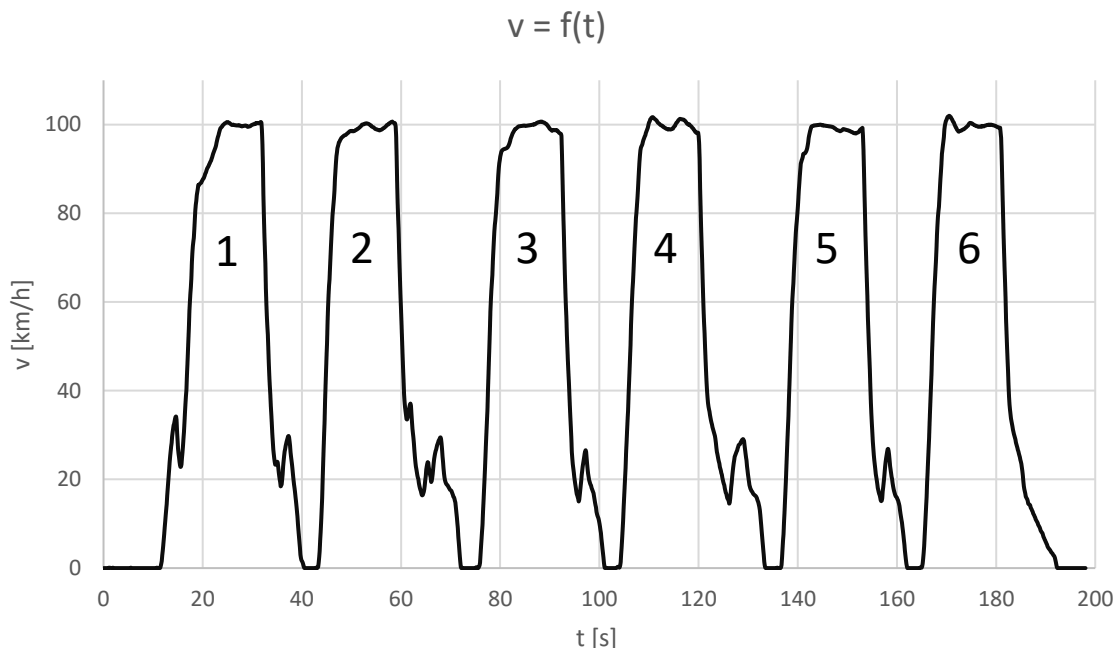
Obr. 74 Jednotky pro sběr dat

### 8.3 Průběh měření

Měření proběhlo na letišti v Panenském Týnci na voze FS.11 pro sezónu 2019. Vůz byl v kompletním stavu a nastavení v jakém se běžně účastní závodů. Jako jízdní rychlost pro měření bylo zvoleno 100 km/h (27,78 m/s), aby měřené změny tlaků byly dostatečně výrazné. Měření bylo provedeno v přímém směru v 6 opakováních. Mezi každou jízdou se pilot otočil a na chvíli zastavil aby byl v naměřených datech patrný skok a bylo možné jednotlivé jízdy od sebe správně odlišit. Bylo nutné zajistit, aby pilot udržel požadovanou



rychlost alespoň 8-10 s, aby mohlo dojít k ustálení měřených hodnot. Rychlost jízdy byla udržována pouze nohou pilota na plynovém pedálu a tudíž se dá předpokládat, že její udržení nebylo naprosto přesné. Průběhy rychlostí s označením jednotlivých měřících jízd jsou na Grafu 8.



*Graf 8 Průběh rychlosti při měřících jízdách*

Průměrná rychlost ve všech jízdách vyšla velmi blízko požadovaným 100 km/h a rozptyl rychlosti v měřených úsecích se až na poslední jízdu pohyboval okolo 2km/h. To se dá považovat za přijatelné udržení rychlosti.

Jízda	1	2	3	4	5	6
Průměrná rychlost [km/h]	99,9	99,7	99,8	99,1	99,9	99,9
Rozptyl [km/h]	1,6	2	2,1	1,9	1,6	3,7

*Tab. 5 Průměrné rychlosti a jejich rozptyl z jednotlivých měřících jízd*

#### 8.4 Vyhodnocení

Snímače měří absolutní tlak. Na začátku každého měření byl v klidovém stavu vozu proveden nulový odečet statického tlaku. Odečtením klidového statického tlaku od naměřeného byl získán relativní statický tlak v každém bodě měření. Jeho podělením dynamickým tlakem vypočteným z rychlosti vozu byl získán tlakový koeficient  $C_p$  (dle rovnice 3). Data byla vždy průměrována v časovém úseku, kdy se pilot snažil udržet



konstantní rychlost (viz. Graf 8). Celý tento proces byl proveden techniky firmy 4Jtech v jejich vlastním softwaru pro zpracování dat.

Při vyhodnocení naměřených dat byl objeven problém s ovlivněním slunečním svitem. Měření bylo provedeno v odpoledních hodinách a vůz byl tedy vždy v jednom jízdním směru vystaven přímému slunečnímu osvětlení a data ze sudých jízd tedy vykazovala nesmyslné hodnoty a proto jsou z vyhodnocení vyřazena a v grafech se nachází pouze data z jízd lichých (100\_1, 100\_3, 100\_5). Výjimkou jsou data z boční podlahy, které jsou ze spodní strany vozu a jsou před slunečním svitem chráněna. Tlakové pásky byly doposud používané převážně v aerodynamických tunelech, kde tento problém nenastává a tato jejich nečinnost se nemohla projevit. Data z pásky umístěného na vstupu do chladiče byla velmi ovlivněna jeho vysokou teplotou která dosahovala až 115°C a bohužel tedy nebylo možné je použít. Vyřazena musela být také data z difuzoru. Ten se nachází v blízkosti vozovky a tak byl pásek ovlivněn jejími nerovnostmi, odletujícími kameny, či z asfaltu vyčnívající trávou.

V grafech se vždy nacházejí naměřená data označená plnou čarou a body dle měřících senzorů. Spolu s tím tam jsou data získaná z CFD analýz popsaných v kapitole 6.6. V případě dat z přitlačných křídel začínají data vždy u odtokové hrany přetlakové strany a pokračují na stranu podtlakovou. Stagnační bod se tedy nachází ve středu grafu.

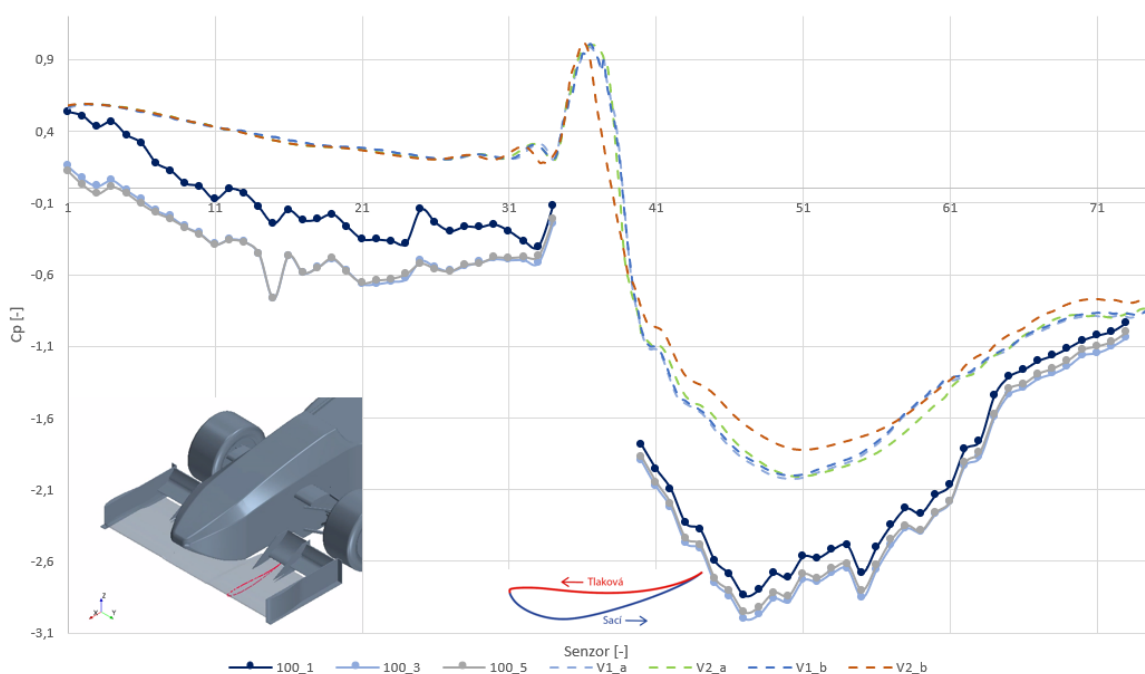
#### 8.4.1 Přední přitlačné křídlo

Přední přitlačné křídlo je z hlediska aerodynamiky závodního vozu zcela klíčové. Nejenže generuje přitlak, ale vzhledem ke své pozici zároveň určuje proudění vzduchu okolo zbytku vozu a zásadně tak ovlivňuje funkci ostatních aerodynamických prvků a chlazení vozu. Jeho funkce je značně závislá na tzv. přízemním efektu, kdy blízkostí křídla k zemi je zmenšen prostor pro proudění vzduchu mezi ním a vozovkou a dle rovnice kontinuity dojde se zmenšením průtočného průřezu ke zvýšení rychlosti a tedy snížení tlaku. To ještě více umocní podtlak na spodní straně křídla a dochází k nárůstu přitlaku. Tento jev obecně platí pro díly v blízkosti vozovky. Přední křídlo na voze FS.11 se skládá z velkého hlavního profilu, jedné vztlakové klapky v oblasti mezi monokokem a předním kolem a dvěma menšími vztlakovými klapkami za sebou přímo před předním kolem.

Porovnání naměřených dat s vypočtenými pro hlavní profil předního křídla je na Grafu 9. Z grafu je patrné že v oblasti náběžné hrany chybí naměřená data. To je způsobeno jejím vysokým zakřivením a nemožností ohnout přes ní pásek. I kdyby to možné bylo, tak vzhledem ke vzdálenosti senzorů mezi sebou bychom získali pouze jeden měřený bod a to by pro proměření nebylo dostačující. Hlavní profil má malý úhel náběhu a společně s nenarušeným prouděním nebylo očekáváno žádné odtržení. Všechny 4 CFD modely se mezi sebou povětšinou shodují velmi dobře. Jediná větší odchylka nastává na podtlakové

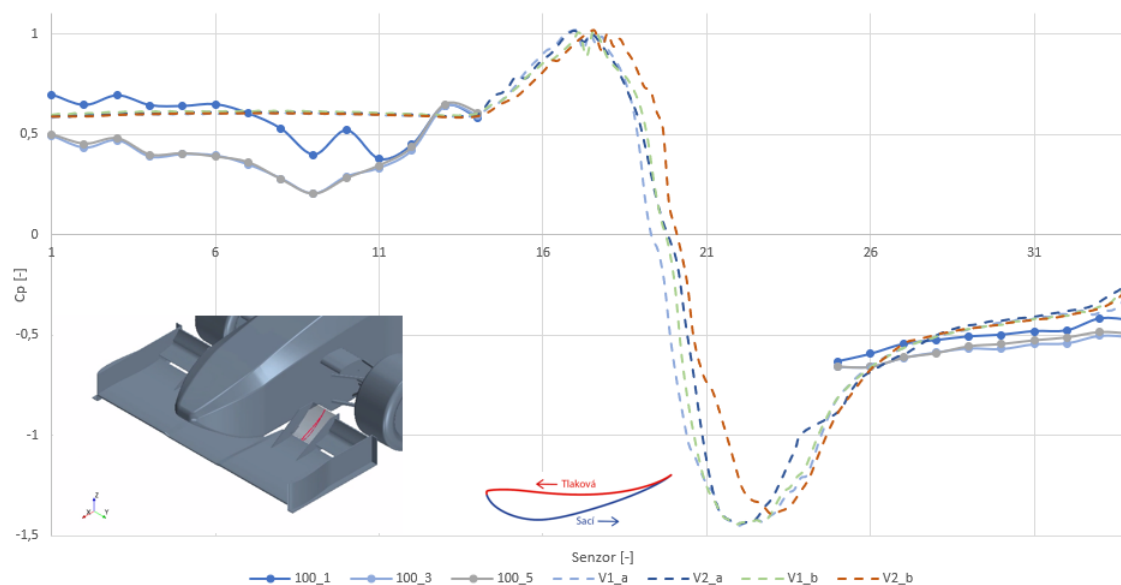


straně u modelu V2\_b. Je zde však velmi výrazný rozdíl oproti měření. Pásek na přetlakové straně nebyl ničím zakryt (bočnicemi, jinými díly) a byl tedy vystaven slunečnímu svitu i v lichých jízdách a díky tomu data vůbec neodpovídají výpočtům a nelze z nich nic vyvodit. Hodnoty  $C_p$  zde dosahují až -0,6, což je v tomto místě nesmyslné.  $C_p$  na podtlakové straně má podobný průběh jak v CFD, tak v naměřených datech, která však mají mnohem nižší hodnoty podtlaku. To bylo způsobeno zatížením vozu při jízdě a tedy změnou jízdní výšky a přiblížením předního křídla k vozovce. Z maximálního koeficientu vztlaku z CFD vyplývá, že při rychlosti měření 100 km/h mohl přítlak způsobit na celém voze zatížení až 77,5 kg, což se jistě projeví snížením jízdní výšky a tedy přiblížením křídla k vozovce. Bohužel v době měření nebyly na voze funkční potenciometry snímající stlačení tlumičů a nebylo tedy možné zjistit přesné zatížení a jízdní výšku a tedy replikovat přesně tento stav v CFD.



Graf 9 Přední křídlo - hlavní profil

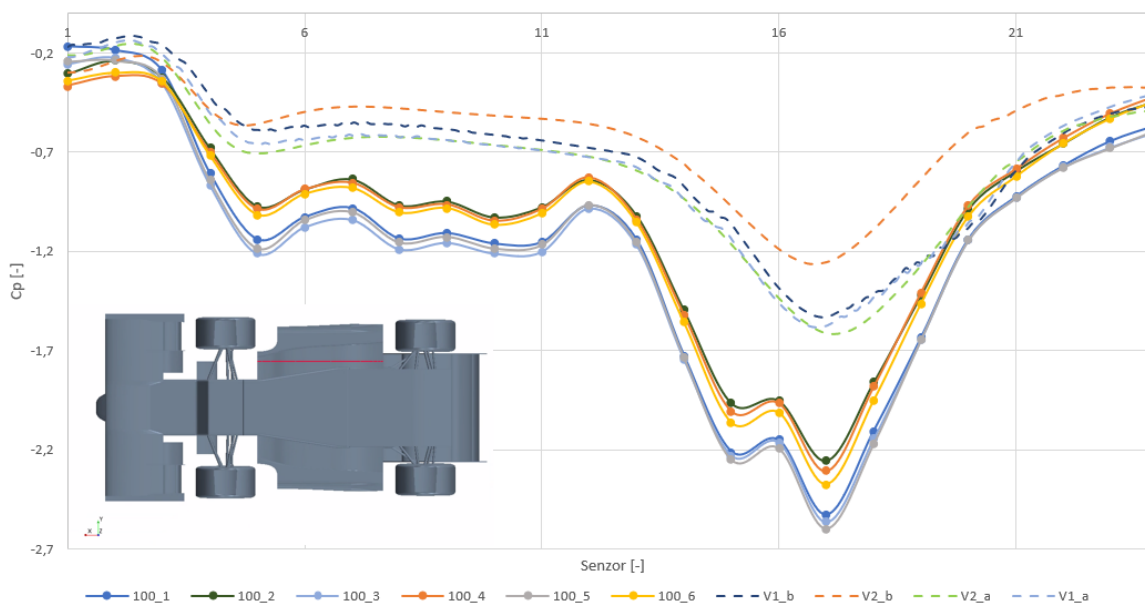
V případě první vztlakové klapky za hlavním profilem je situace již odlišná. Klapka je umístěna s úhlem náběhu  $32^\circ$  vůči hlavnímu profilu a je již v dostatečné vzdálenosti od vozovky, aby byla méně ovlivněna vzdáleností k ní. Obdobně jako u hlavního profilu chybí naměřená data okolo náběžné hrany. V tomto případě je vynechaný úsek o něco větší (Graf 10), jelikož klapka je menší (délka tělavy 200 mm), má tedy i menší náběžnou hranu. Proto byl přes náběžnou hranu a do štěrbin mezi profily umístěn spojovací kabel mezi pásky na horní a spodní straně profilu. Přetlaková strana byla v tomto případě opět ovlivněna slunečním svitem, i když v tomto případě již méně. Na podtlakové straně je shoda celkem dobrá, ale směrem ke konci profilu se data mírně rozbíhají.



Graf 10 Přední křídlo - klapka

#### 8.4.2 Podlaha

Velkou změnou na voze FS.11 oproti jeho předchůdcům bylo použití bočních podlah ve tvaru Venturiho tunelu pro lepší využití boční části vozu pro generování přitlaku. Velkou měrou to bylo umožněno i změnou konceptu chlazení, kdy místo jednoho velkého chladiče na levé straně byly použity dva menší na obou stranách vozu, čímž zde vznikl větší prostor pro úpravy podlah. Vzhledem k tomu, že se podlaha stejně jako přední křídlo nachází v blízkosti vozovky, je srovnání zobrazené na Grafu 11 ovlivněno zatížením a snížením jízdní výšky. Ve vstupní části do podlahy, kde je ještě dostatečná vzdálenost od vozovky je shoda velmi dobrá. Jakmile se začne profil podlahy snižovat, je zde patrný vyšší podtlak způsobený přiblížením podlahy k vozovce. Trend Cp však zůstává převážně podobný CFD výpočtům a odpovídá i poloha maximálního podtlaku v hrdle podlahy. Za ním však naměřená data ukazují strmý nepříznivý gradient, který by mohl vést k odtržení proudění v podlaze a bylo by vhodné se na tuto oblast při budoucích návrhových úpravách zaměřit. Na výstupu podlahy, který má tvar difuzoru, se naměřená data opět shodují a potvrzují tak předpoklad závislosti na jízdní výšce.

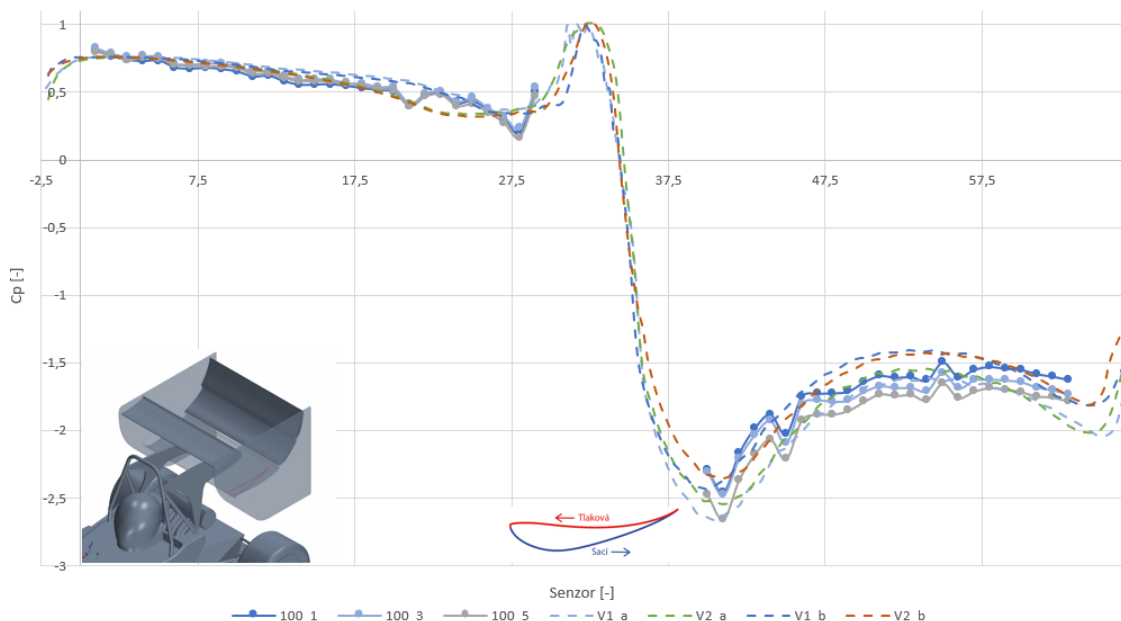


Graf 11 Podlaha

### 8.4.3 Zadní křídlo

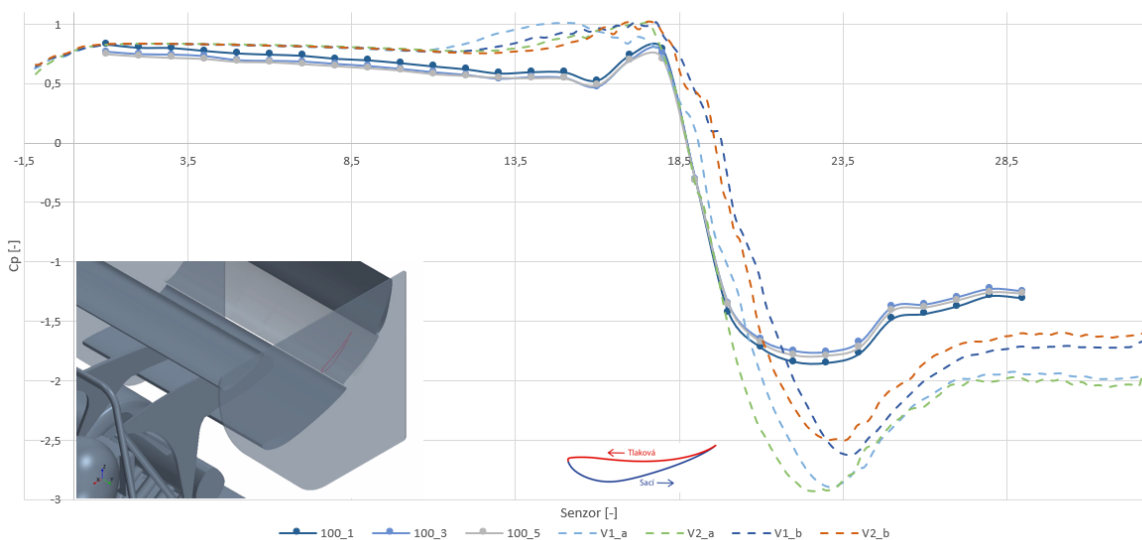
Zadní křídlo se nachází již ve značně narušeném turbulentním proudu. To je způsobeno převážně ochranným rámem, hlavou pilota a její opěrkou, otevřeným kokpitem, sáním vzduchu do motoru, ale i úplavem jdoucím od přední části vozu a od pneumatik. Aby bylo jeho použitím dosažen požadovaného přitlaku pro vyvážení přitlaku od předního křídla, bylo použito víceprvkové křídlo skládající se z hlavního profilu a za ním následujících dvou vztlakových klapek a přídavného profilu s Gurneyho klapkou v přední horní části křídla. Celé křídlo je uchyceno k vozu pomocí plochých úchytů vedoucích z hlavního profilu k ochrannému rámu v co možná největším zákrytu za ním. Obzvláště druhá vztlaková klapka se nachází již s celkem agresivním úhlem náběhu  $68^\circ$ , takže zde lze očekávat možnost odtržení proudění. To však CFD výpočty nenaznačují.

Obdobně je tomu i u naměřených dat (Graf 12) na hlavním profilu, která se velice dobře shodují s vypočtenými a nejsou zde žádné známky odtržení. Drobná odchylka se nachází na přetlakové straně při nárůstu tlaku na stagnační. To může být způsobeno nepřesným srovnáním pozice dat z pásku s těmi z CFD. Z obdobných důvodů jako u předního křídla i zde nejsou proměřena místa přímo na náběžné hraně.



Graf 12 Zadní křídlo - hlavní profil

Na první vztlakové klapce, která se nachází za hlavním profilem se již odtržení projevuje. Přetlaková strana se zpočátku shoduje, ale směrem ke stagnačnímu bodu se odchylka zvyšuje (Graf 13). V tomto místě byl pásek přehnutý přes náběžnou hranu a vzhledem k jeho mechanickým vlastnostem nebylo možné přesně kopírovat tvar malé náběžné hrany klapky a tím vznikla tato nepřesnost. Na podtlakové straně je v naměřených datech znatelné odtržení proudění. To ani jeden z výpočetních modelů však neukazuje, ale tentokrát mají jednotlivé modely mezi sebou větší rozdíly. Modely označené jako *\_b* s detailním modelováním mezní vrstvy a modelem turbulence  $k - \omega$  mají obdobný průběh jako modely *\_a* se stěnovými funkcemi, ale mají nižší hodnoty maximálního podtlaku, a tak se více blíží naměřeným hodnotám. Nicméně k nim mají stále celkem daleko a nedá se říci, že by dokázaly odtržení podchytit.

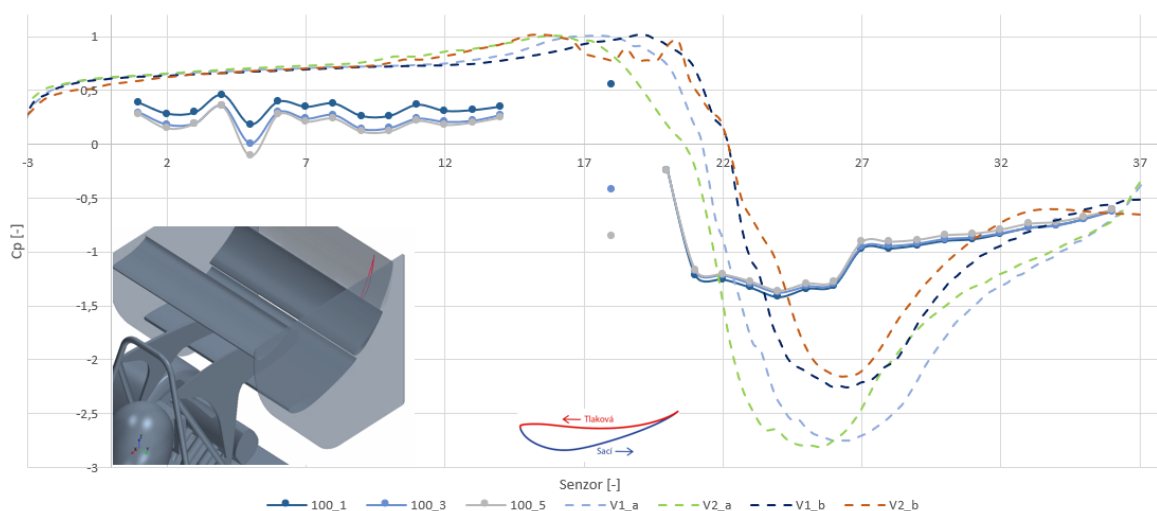


Graf 13 Zadní křídlo - první klapka



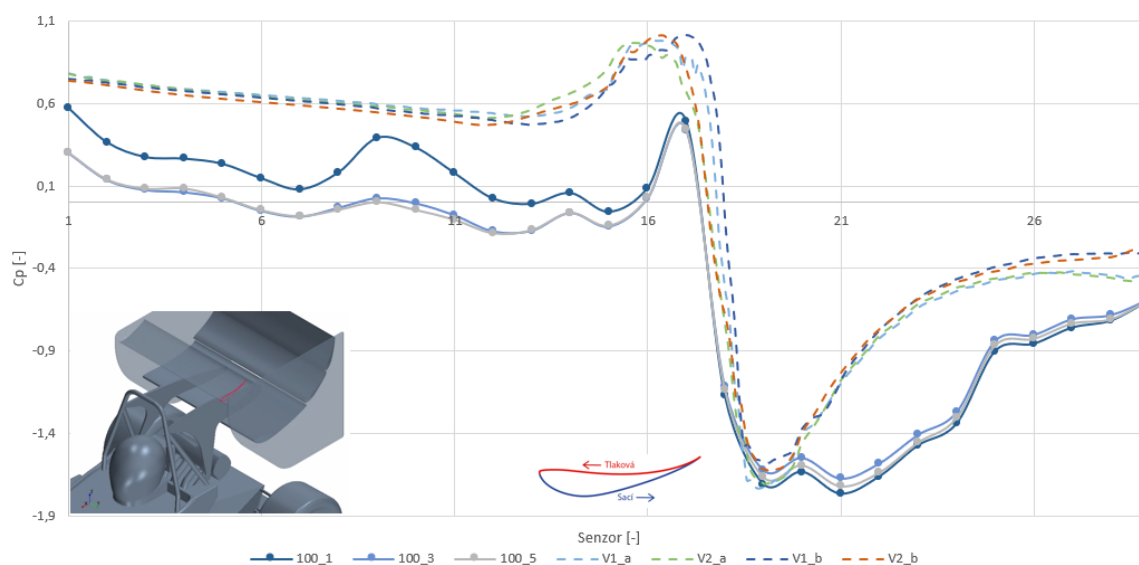


Vzhledem k odtržení první klapky se dá očekávat odtržení i na klapce druhé za ní následující. To měření potvrdilo (Graf 14). Zároveň se zde potvrdil rozdíl mezi jednotlivými přístupy k modelování mezní vrstvy. V tomto případě byl mezi nimi však rozdíl vyšší.



Graf 14 Zadní křídlo - druhá klapka

Horní profil zadního křídla se nachází v téměř maximální výšce jakou pravidla pro oblast zadního křídla umožňují, aby byl v co možná nejméně narušeném proudu vzduchu. S tím se dá opět očekávat ovlivnění přetlakové strany slunečním svitem. Toto očekávání se potvrdilo a je patrné z Grafu 15. Naopak shoda podtlakového maxima na spodní straně profilu je velice dobrá. Dále se však měřená data s vypočtenými rozbíhají.



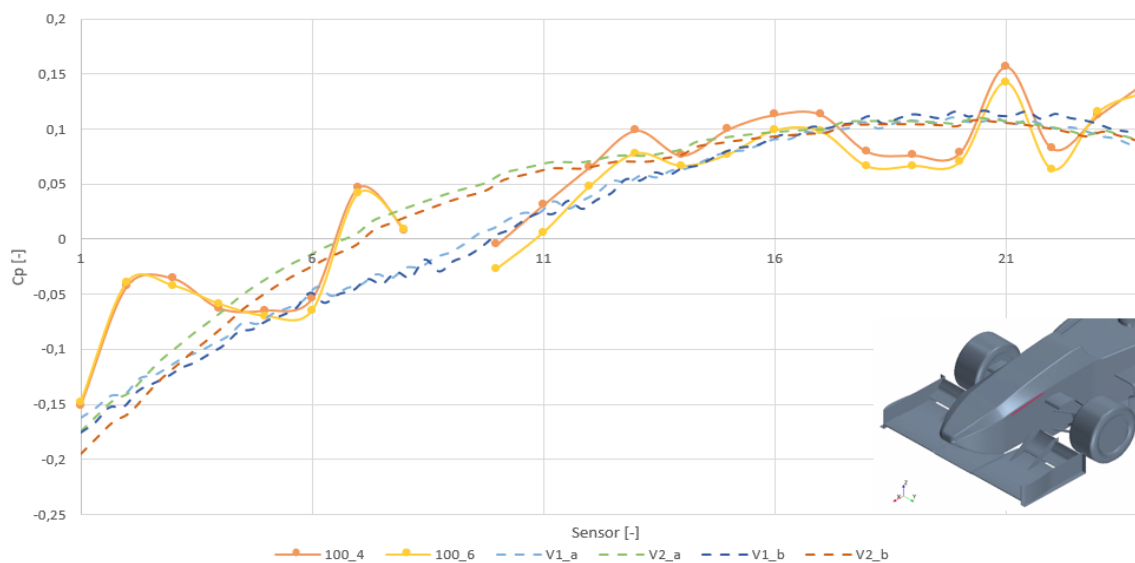
Graf 15 Zadní křídlo – horní profil

#### 8.4.4 Boční strana monokoku

Pásek na boční straně monokoku se nacházel na velmi odkrytém místě a proto byla většina naměřených dat nepoužitelných vzhledem k působícímu slunečnímu svitu. Nicméně



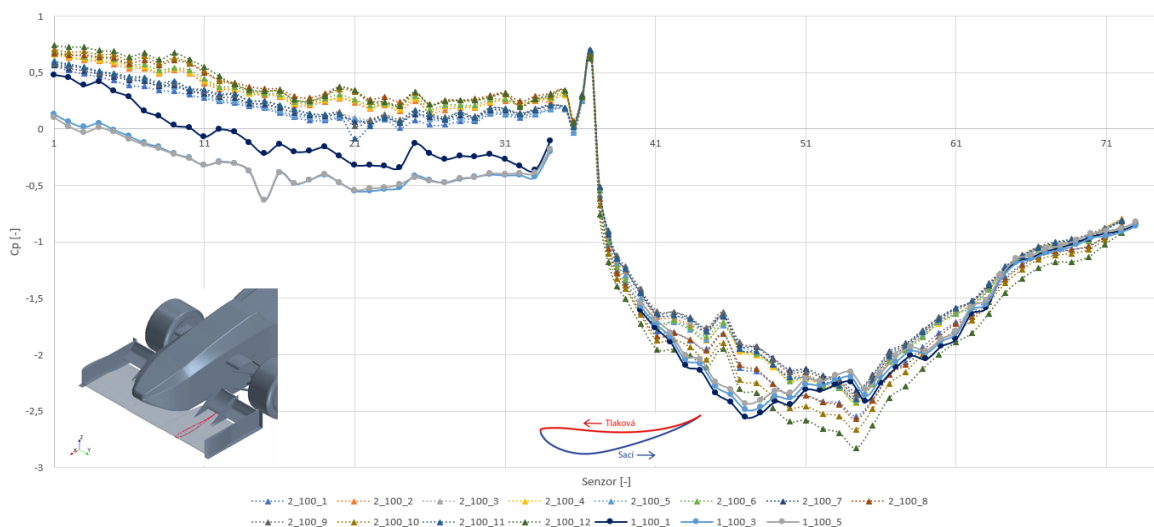
alespoň v jízdách 4 a 6 je možné sledovat podobný trend průběhu  $C_p$  jaký vyšel z CFD (Graf 16).



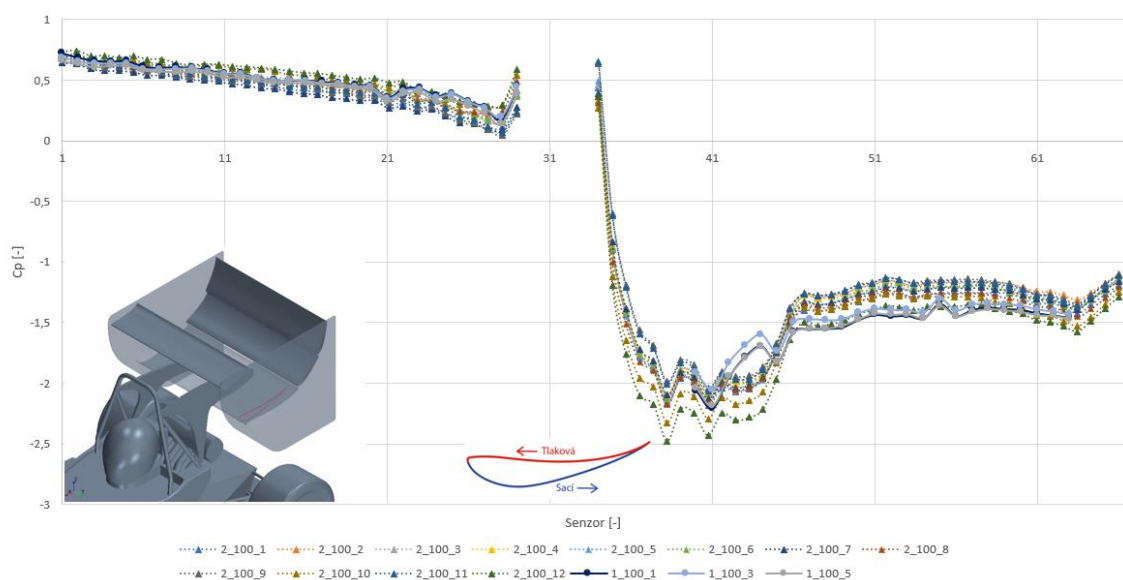
Graf 16 Boční strana monokoku

### 8.5 Kontrolní měření

Aby bylo ověřeno, že se dá na data z prvního měření spolehnout, bylo měření provedeno podruhé. Měřilo se stejným způsobem opět na letišti v Panenském Týnci, ale tentokrát bylo z důvodů úspory času použito méně pásků. Ty byly umístěny pouze na hlavním profilu předního (Graf 17) a zadního křídla (Graf 18) a monokoku. Data z prvního měření jsou v grafech zobrazena opět plnými čarami a indexem „1“. Ta z měření druhého mají křivky tečkované, index „2“ a místo bodů v místě senzorů jsou použity trojúhelníky. Mezi oběma měřeními je vidět výborná shoda. Větší nepřesnost se nachází na přetlakové straně hlavního profilu předního křídla. To je opět způsobeno osvitem slunečními paprsky. Druhé měření bylo na rozdíl od prvního provedeno v dopoledních hodinách s lehce zataženou oblohou a nebylo tím tedy ovlivněno. Data z prvního měření je tedy možné považovat za důvěryhodná.



Graf 17 Přední křídlo - hlavní profil



Graf 18 Zadní křídlo - hlavní profil

## 8.6 Zhodnocení měření

Hlavním cílem měření bylo vybrat nejpřesnější výpočetní model pro budoucí CFD výpočty pro návrh aerodynamiky vozu. Tato metoda se na to však neukázala úplně vhodná. Nicméně měření ukázalo několik nedostatků vozu a oblastí vývoje na které je dobré se do budoucna zaměřit. Hlavním z nich byla silná závislost vozu na jízdní výšce. CFD výpočty se v historii týmu prováděly pouze s vozem v jeho statické poloze, což se ukázalo jako značně nedostačující a je třeba se zaměřit i na různé jízdní režimy, protože aerodynamika vozu je na nich značně závislá. Metodika těchto výpočtů je připravena v následující kapitole. Měření také odhalilo odtržení proudění na zadním přitlačném křídle. To generuje podstatnou část přitlaku celého vozu a lze tedy očekávat jeho ztrátu v zadní části vozu a tedy větší zatížení přední nápravy. Zadní křídlo tedy bude určitě potřeba upravit a následně



opětovně úpravy experimentálně validovat. Pozornost si určitě vyžaduje i boční podlaha vozu u které měření ukázalo strmý nepříznivý tlakový gradient, který by mohl vyústit v odtržení proudění.

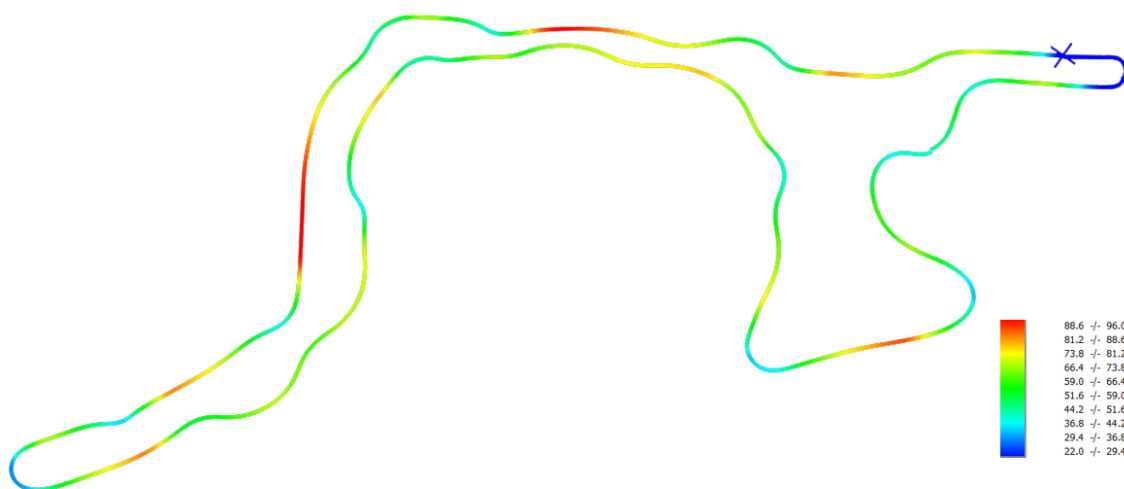
V průběhu měření a vyhodnocení se vyskytla řada problémů, či chyb, které mohly promluvit do přesnosti měření. Prvním z nich bylo již zmiňované ovlivnění slunečním svitem. Tento fakt nebyl bohužel před začátkem měření znám a poslouží tak firmě 4Jtech pro budoucí vývoj této měřicí metody. Dalším faktorem který mohl mít na vyhodnocení zásadní vliv je samotné umístění pásků a jeho následná replikace v CFD výpočtu. Pásky byly na vůz umístěny ručně, stejně tak byla zjišťována a zaznamenávána jejich poloha. Pro přesnější spárování dat z měření a výpočtů by bylo vhodnější využít například naskenování pozice pásků 3D ramenem a následné přenesení bodů do CFD modelů. Přesnost samotných snímačů pak byla dle výrobce menší než 10 Pa na jejich plném rozsahu (93 – 107 kPa).

Nakonec byl tedy pro další výpočty zvolen model V2\_a s šestistěnnými elementy sítě, modelem turbulence Realizable  $k - \epsilon$  two layer a s použitím stěnových funkcí. Ač se výpočty s detailním modelováním mezní vrstvy jeví jako o něco přesnější, tak stejně nedokážou odtržení proudění přesně odhalit a jejich vysoká časová náročnost se tedy v běžném vývoji týmu nevyplatí a je výhodnější použít modely se stěnovými funkcemi pro vyzkoušení více geometrických variant v rámci jedné vývojové fáze vozu. Detailní modelování mezní vrstvy bych doporučil pouze ke kontrolním výpočtům v případech agresivních geometrií, kde je možné odtržení očekávat. Rozdíly mezi jednotlivými typy elementů sítě se ukázaly jako minimální a zvolen byl tedy šestistěn (Trimmer) vzhledem k jeho menší náročnosti na RAM paměť a o něco lepší uživatelské přívětivosti při tvoření sítě.



## 9 Simulace jízdních stavů

Na závodech Formula Student je několik dynamických disciplín. Jízda v osmičce, akcelerace na rovince dlouhé 75m, kvalifikační jízda (autokros) a hlavní vytrvalostní závod (endurance). Kvalifikační jízda spolu s hlavním závodem se jezdí na 1km dlouhém okruhu. Ten se skládá ze zatáček s různými poloměry, krátkých rovinek a slalomů. Tratě na různých závodech se pochopitelně liší, ale jejich charakter zůstává stále stejný. Na Obr. 75 je mapa trati ze závodů ve španělské Barceloně s rozložením rychlosti vozu. Je tedy zřejmé, že vůz na trati většinu času akceleruje, brzdí, nebo se nachází v zatáčce a výpočetní stav vozu v přímé jízdě se statickou jízdní výškou ve kterém byl vůz doposud navrhován není příliš vypovídající.



Obr. 75 Mapa trati disciplíny Endurance v Barceloně

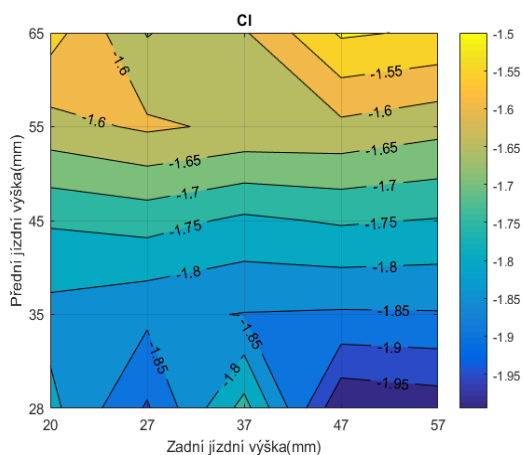
Pro vyjádření aerodynamického chování vozu v různých operačních bodech na trati se využívá tzv. aerodynamických map. Mapy obecně slouží k vyjádření závislostí různých parametrů mezi sebou. V tomto případě se jedná o závislost aerodynamických parametrů jako je vztlak, odpor, či rozvážení na geometrickém stavu vozu. Tím může být jízdní výška, nastavení úhlu náběhu křidel nebo pozice vozu v konkrétním místě na trati. Tyto mapy jsou důležité z hlediska hledání optimálního nastavení vozu pro danou trať nebo další optimalizaci aerodynamických prvků.

Jako první byly vytvořeny závislosti pro různé jízdní výšky. Pro ně byl jako základ využit výpočet  $V2\_a$  pouze s polovinou vozu a postupně byla měněna přední a zadní jízdní výška v rozsahu, který se může vyskytnout na trati – 20 mm až 57 mm. Změna byla prováděna vždy po 10 mm. Spolu s tím byla měněna i pozice náprav vozu tak, aby odpovídala jeho propružení. Na to bylo použito geometrických operací přímo ve STAR-CCM+ a nebylo tedy nutné upravovat vstupní .stp soubory přímo v CAD programu. Se změnou stavu vozu musela být vždy upravena pozice referenčních souřadných systémů pro chladič a ventilátor chlazení. Pro vytvoření těchto map bylo potřeba celkem 25 výpočtů s časovou náročností

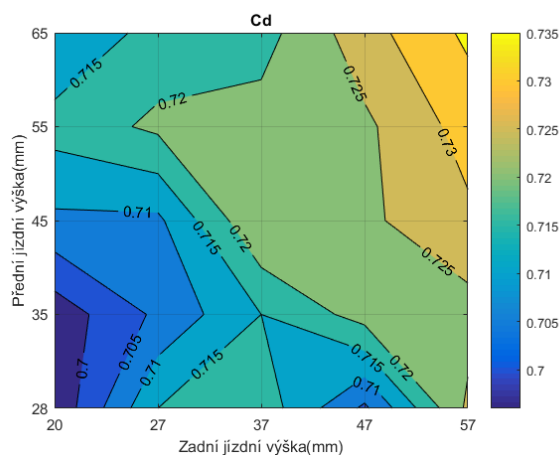


více než 600 h a je tedy zřejmé, že není možné tyto mapy vytvářet při každé drobnější změně geometrie.

Z těchto výpočtů byly následně vytvořeny mapy závislostí integrálních parametrů celého vozu, ale i jednotlivých částí. Na Grafu 19 a Grafu 20 jsou zobrazeny mapy koeficientu vztlaku  $C_l$  a odporu  $C_d$  pro celý vůz. Z mapy pro vztlakový koeficient vyplývá, že vztlak vozu FS.11 byl téměř nezávislý na zadní jízdní výšce. To by mohlo být způsobené necitlivou zadní částí vozu, což naznačuje i měření a předchozí zkušenosti s vývojem v této oblasti. Dále si je možné všimnout velkého rozsahu vztlakového koeficientu, který se pohyboval v rozmezí -1,507 až -1,995. Dle očekávání byly na změnu jízdní výšky díky přízemnímu efektu nejvíce citlivé díly v blízkosti vozovky – přední křídlo, boční podlahy a difuzor. Pro předvídatelnější chování vozu by v budoucím vývoji tedy bylo dobré se zaměřit na menší citlivost těchto dílů na změny jízdní výšky, případně upravit zavěšení vozu tak, aby se vůz více pohyboval v oblastech aerodynamicky výhodnějších.

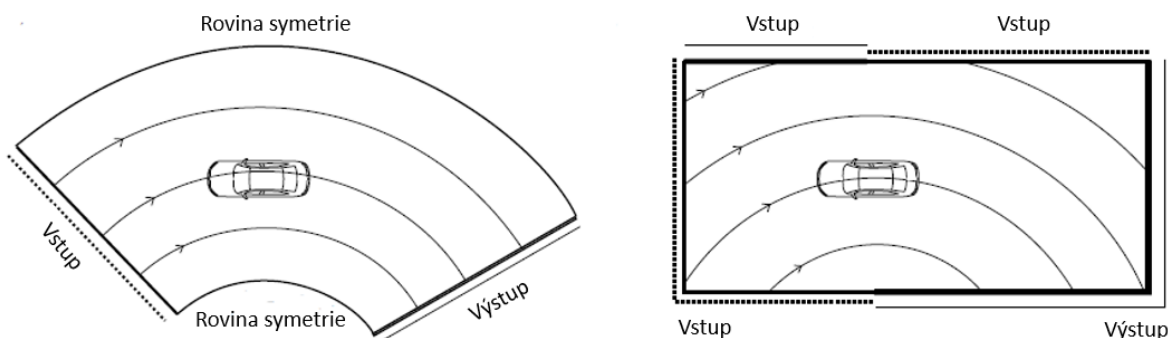


Graf 19 Mapa vztlakového koeficientu



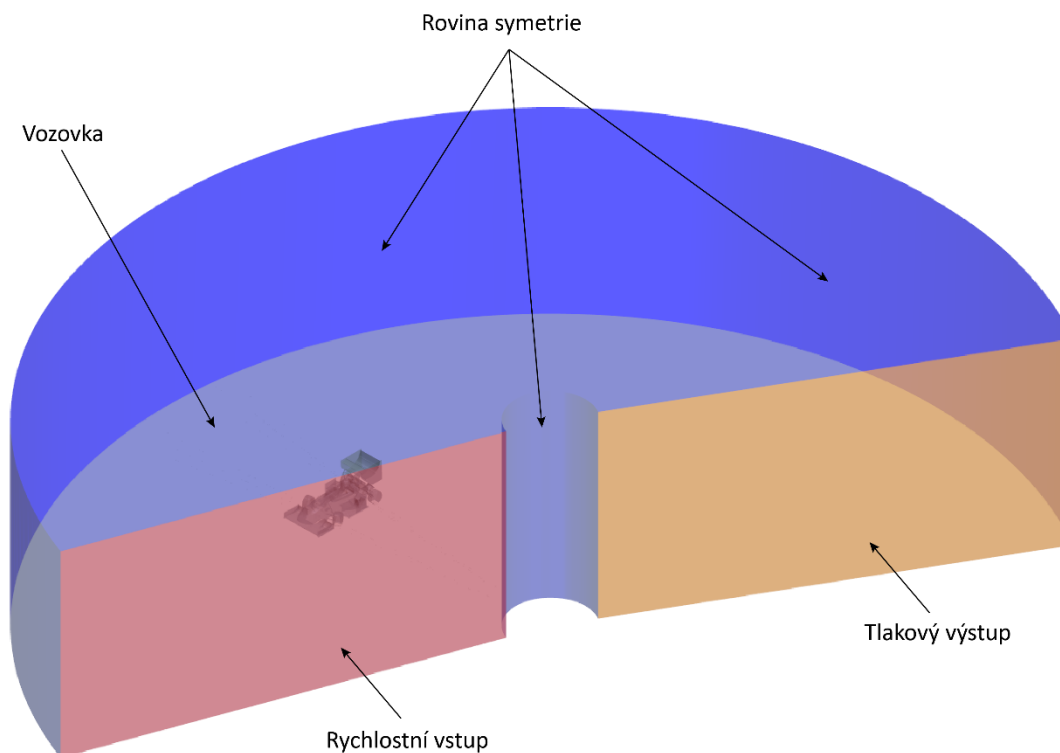
Graf 20 Mapa odporového koeficientu

Aerodynamické mapy poskytují představu jak se vůz chová v různých nastaveních jízdní výšky nebo stavech na trati, ale stále neposkytují plný obrázek chování vozu na celé trati. Proto byl připraven výpočet simulující jízdu v zatáčce. Pro zjednodušení byl předpokládán konstantní pohyb vozu zatáčkou s konstantním poloměrem. Při takovém průjezdu se vůz pohybuje po kružnici a proudění okolo něj je tedy zakřivené. Pro replikaci tohoto typu proudění je možné využít dvou způsobů (Obr. 76). Buď vytvořit zakřivenou doménu a vozem skrz ní rotovat a nebo doménu ponechat přímou a zakřivené proudění definovat funkcí skrz ní. Toto může být zaměněno s natočením vozu v přímé doméně s přímým prouděním skrz ní jako v případě přímé jízdy, ale toto zjednodušení nelze použít, protože při jízdě v zatáčce je různý úhel náběhu v přední a zadní části vozu a je to tedy vhodnější pro simulace bočního větru.



Obr. 76 Možnosti modelování zakřiveného proudění [24]

K modelování zakřiveného proudění byla použita první metoda s rotací pomocí MRF popsaným v kapitole 6.3. Okrajové podmínky zůstaly velmi podobné přímé jízdě. Rozdílem bylo vyvození rychlosti proudění. Na rychlostním vstupu a vozovce byla nastavena referenční rychlost 0 m/s a geometrii vozu byla nastavena úhlová rychlost okolo středu zatáčky. Pro vyzkoušení této metodiky byl vybrán stav disciplíny skid – pad (jízda v osmičce). Zde je známý poloměr zatáčky daný pravidly a spolu s předpokladem jízdy vozu u vnitřní strany osmičky byl nastaven jako 8,4m . Rychlost jízdy vozu byla získána analýzou dat z této disciplíny – 10,4 m/s. Odpovídajícím způsobem byla upravena i poloha vozu (Obr. 79). Vzhledem k tomu, že bylo předpokládáno ustálené zatočení bez akcelerace či brzdění, byl úhel podélného náklonu nastaven na 0°. Byl tedy nastaven pouze boční náklon 1,1° a zatočení předních kol – vnitřní 25,8° a vnější 16,5°.



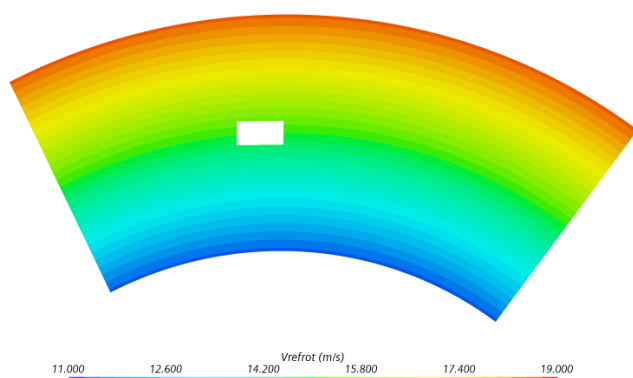
Obr. 77 Okrajové podmínky u simulace zatáčky



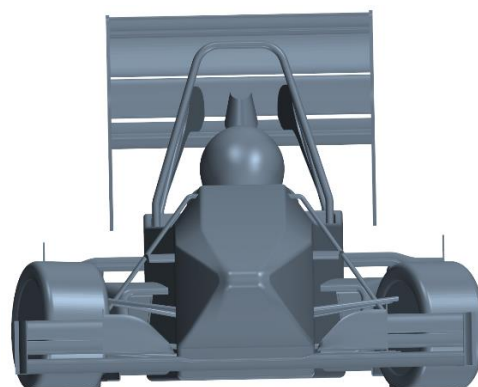
Vzhledem k tomu, že vzduch doménou již neproudí v přímé trajektorii s konstantní rychlostí, ale po kružnici a rychlost s rostoucím poloměrem stoupá, tak již není možné pro výpočet tlakového koeficientu a koeficientu celkového tlaku pro vizualizaci výsledků použít jako referenční rychlost konstantu, ale funkci. Ta je dána součinem úhlové rychlosti pohybu vozu v zatáčce a lokálního poloměru:

$$v_{refrot} = \omega \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2} \quad (66)$$

kde  $\omega$  je úhlová rychlost,  $x_s$  a  $y_s$  jsou souřadnice středu zatáčky a  $x, y$  jsou lokální souřadnice uvnitř domény. Oboje souřadnice jsou vztaženy k souřadnému systému vozu v ose zadní nápravy. Výsledné rozložení referenční rychlosti je na Obr. 78. Další důležitou změnou byla úprava vyhodnocení odporu vzduchu. Ten je definovaný jako odpor tělesa proti směru jeho pohybu. Vzhledem k tomu, že v tomto případě již není pohyb přímý, tak nelze použít výpočet  $C_d$  ve směru osy  $x$ . V zakřiveném proudění odpovídá odpor momentu tečné síly okolo středu zatáčky, který působí v opačném směru k pohybu. Proto byla pro výpočet koeficientu odporu použita funkce koeficientu momentu s referenční délkou odpovídající poloměru zatáčky. Ostatní silové účinky změnu nevyžadovaly.



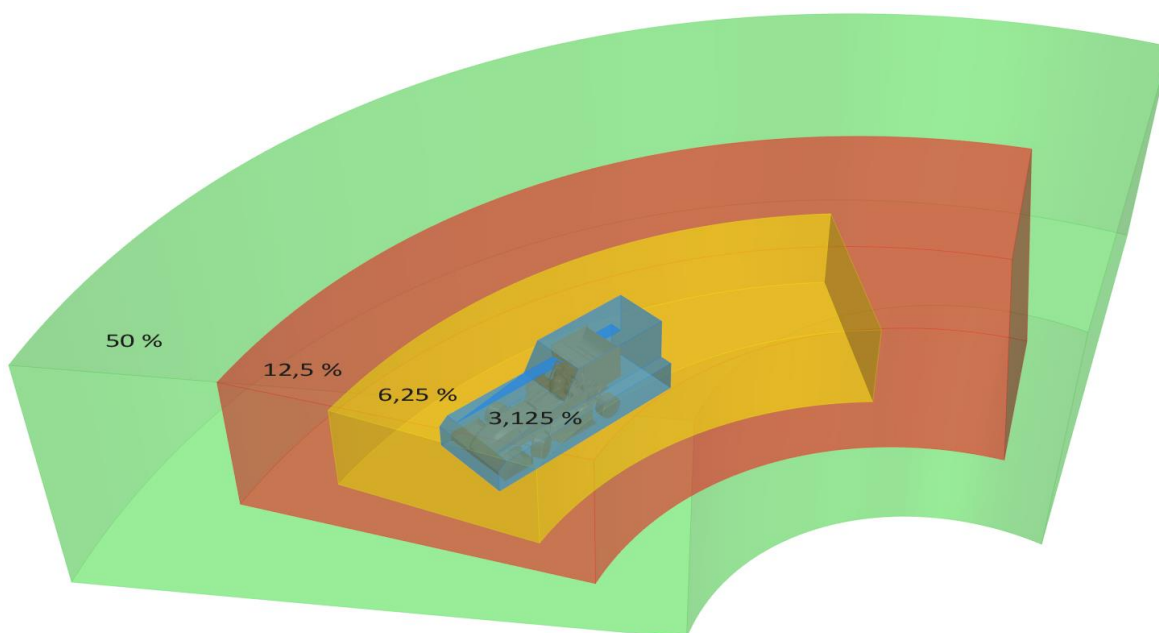
Obr. 78 Rozložení referenční rychlosti



Obr. 79 Naklonění vozu a zatočení kol

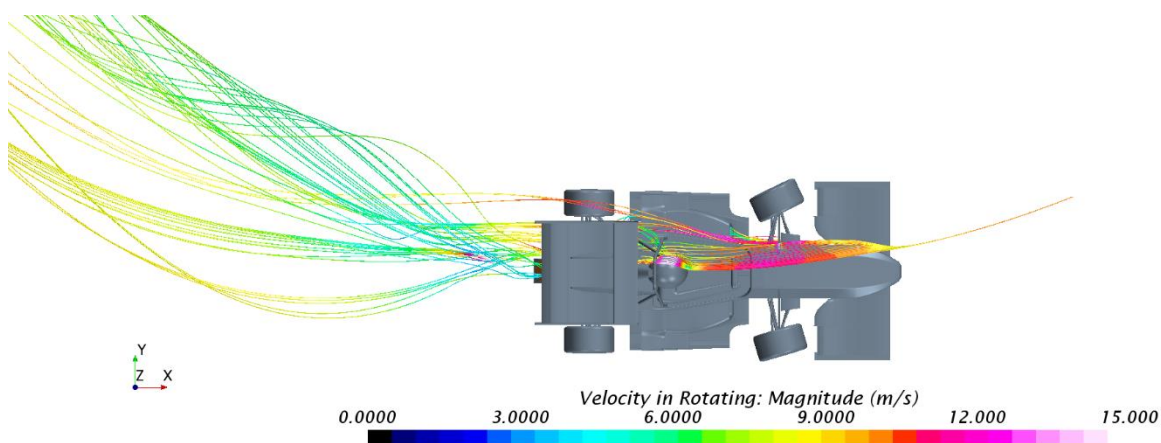
Nastavení výpočtu včetně výpočetní sítě opět odpovídá verzi V2\_a. Jedinou změnou byla úprava tvaru oblastí pro zjemnění sítě, aby odpovídaly zakřivené výpočetní doméně:





*Obr. 80 Oblasti zjemnění objemových buněk u zakřivené úlohy*

Výsledné zakřivené proudění okolo vozu je zobrazeno na Obr. 81. Vzhledem k tomu, že zde již nebylo možné využít symetrie a provést výpočet pouze s polovinou vozu, narostl počet buněk na 29 milionů, což je více než dvojnásobek oproti symetrickému výpočtu. Náročnost tohoto výpočtu, ale není jen v době samotného řešení, ale i v preprocessingové fázi. Pro transformaci samotné geometrie vozu byly připraveny geometrické operace a stačí tedy pouze zadat hodnoty naklonění vozu a zatočení kol. Nicméně je nutné ručně upravit pozice souřadných systémů pro rotaci kol a chlazení pro obě strany vozu. Takto připravená simulace je obecně použitelná pro jakýkoli poloměr zatáčky vyskytující se na tratích Formula Student.

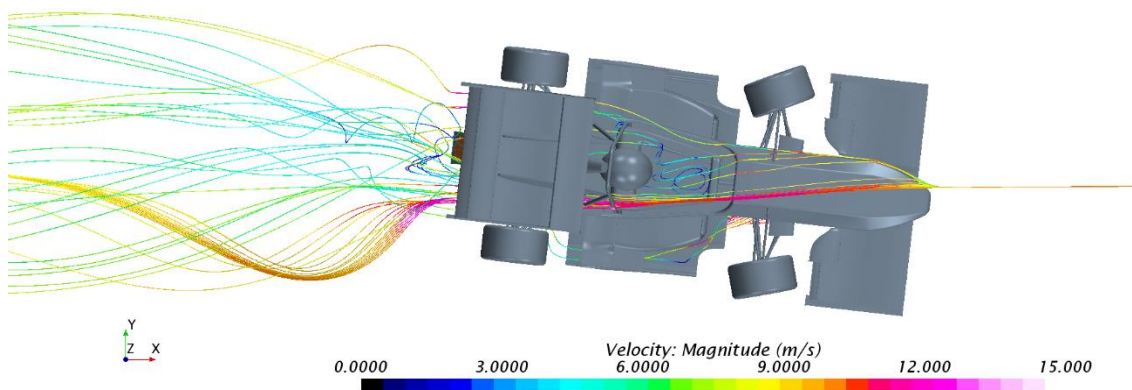


*Obr. 81 Proudnice zakřiveného proudění*

Pro porovnání vlivu zakřiveného proudění a bočního větru byla připravena simulace s celým vozem pouze natočeným o 6,5° v přímé doméně. Natočení vozu, jeho naklonění, zatočení kol a referenční rychlost odpovídaly pro porovnání stavu disciplíny skid-pad počítané v předchozím v zakřivené doméně. V tomto není nutné upravovat ani referenční rozložení

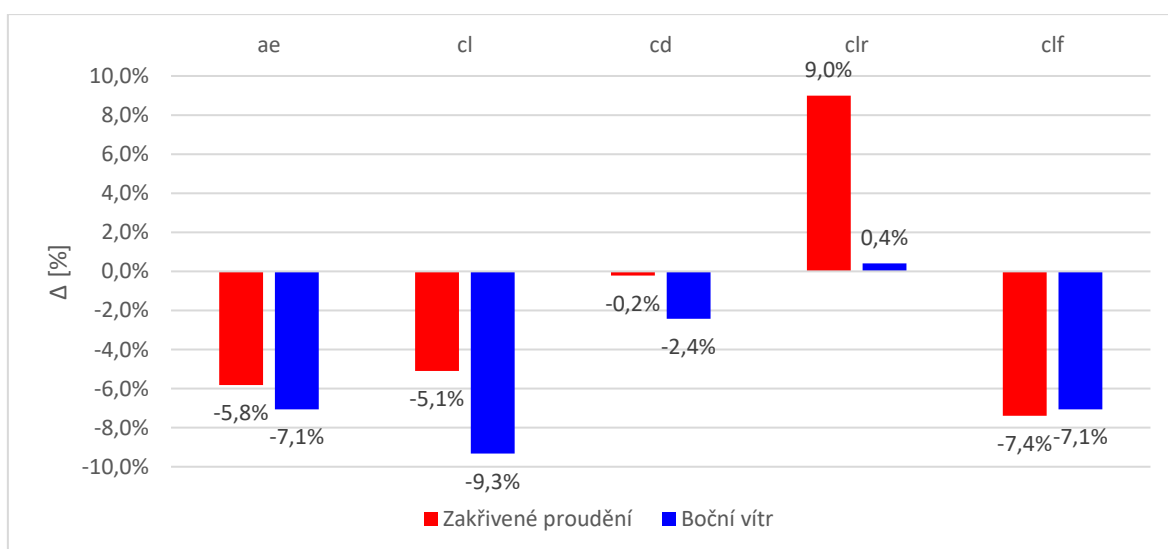


rychlosti pro post-processing, ani výpočet silových koeficientů. Rozdíl v charakteru proudění je zřejmý z Obr. 82.



Obr. 82 Proudnice u simulace bočního větru

Na grafu 21 je porovnání výsledků (aerodynamická efektivita, vztlak, odpor a vztlaky na jednotlivé nápravy) z výpočtů zakřiveného proudění a bočního větru. Výsledky jsou procentuálně vztaženy k přímé jízdě. Při prvním pohledu na vztlak a odpor je zřejmé, že není možné tyto dva typy výpočtů považovat za rovnocenné, ale každý z nich reprezentují jiný stav a typ proudění. V obou případech je zde očekávaný zbytek přitlaku oproti přímé jízdě. Nejvíce zbytek byl v oblasti předního křídla. Tomu odpovídá i ztráta přitlaku působícího na přední nápravu. Vzhledem k naklopení vozu je vnější část křídla blíže k vozovce a vnitřní naopak od ní dále z čehož pramení snížení přitlaku. Zatočení kol mělo vliv také na průtok vzduchu do chlazení, který se snížil v případě simulace bočního větru až o 20%.



Graf 21 Porovnání výsledků zakřiveného proudění a bočního větru

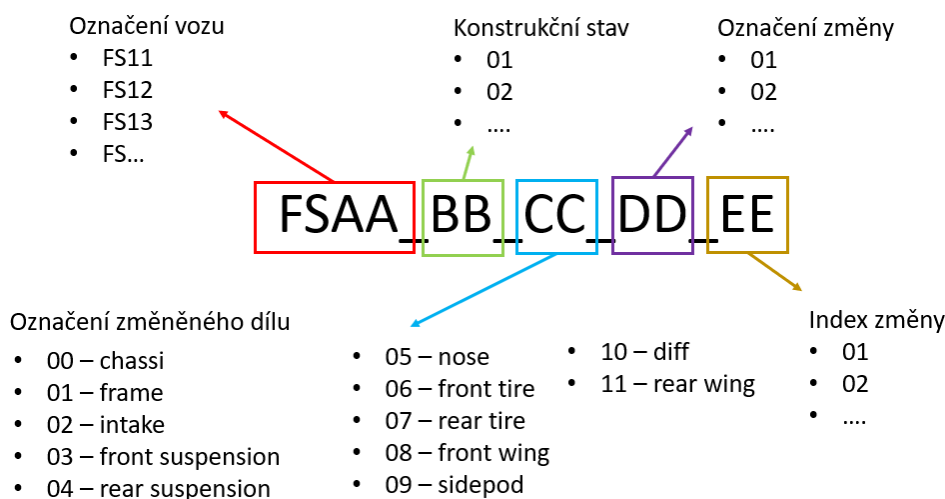


## 10 Automatizace výpočetního procesu

V průběhu vývoje jednoho vozu jsou běžně provedeny desítky až jednotky stovek CFD simulací. Příprava, spuštění a vyhodnocení těchto výpočetních úloh zahrnuje velké množství rutinních operací uživatele, které jsou časově náročné a mohou být snadno automatizovány. Díky tomu se může aerodynamik věnovat samotnému aerodynamickému návrhu místo zdlouhavého získávání výsledků ze simulací. Dalším problémem, který s tím souvisí je jednotnost a konzistentnost výsledků. Tým se každoročně značně obměňuje a v případě, kdy by každý člen pracující na aerodynamických prvcích přistupoval k vyhodnocování výsledků svým vlastním způsobem (např. jiné rozsahy barevných škál, řezy rovinami v rozdílných souřadnicích, různé referenční hodnoty atd. ), tak by téměř nebylo možné porovnávat výsledky mezi jednotlivými simulacemi v rámci vývoje jednoho vozu ani mezi různými sezónami.

### 10.1 Pojmenování úloh

Cílem jednotného pojmenování byla jasná identifikovatelnost vozu, jeho stavu a dílu na kterém byla změna v geometrii provedena. Výsledné schéma pojmenování je na Obr. 83. Na první pozici se nachází označení vozu, které je v týmu zavedeno názvem „FS“ a jeho pořadovým číslem v historii. Na druhé pozici je tzv. konstrukční stav vozu. To je uzavřený stav geometrie, na které si jednotliví aerodynamici mění pouze svoji součást, zbytek vozu zůstává neměnný a mohou tedy sledovat vliv pouze jejich změny geometrie na parametry vozu. Potom, co se najde více dílů s potenciálním přínosem, se sehrají do nového konstrukčního stavu, zkontroluje se jejich funkčnost jako celku a pokračuje se dále. Následuje označení dílu, na kterém byla provedena změna dle již představeného rozdělení. Název končí dvěma pozicemi pro označení změny. První značí změnu a druhá její index. Označení změn jsou individuální a měly by označovat větší konstrukční změny a její konfigurace.

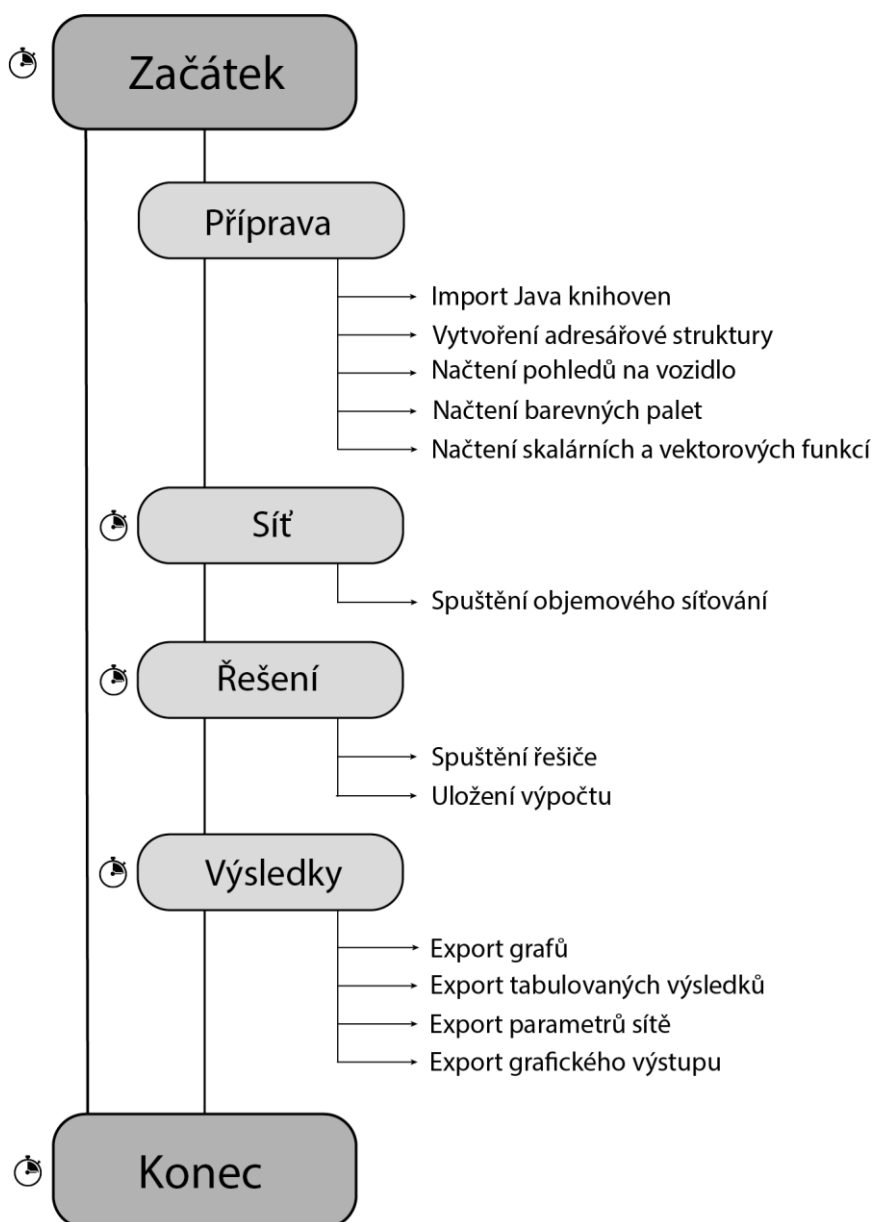


Obr. 83 Schéma pojmenování úloh



## 10.2 Automatizační skript

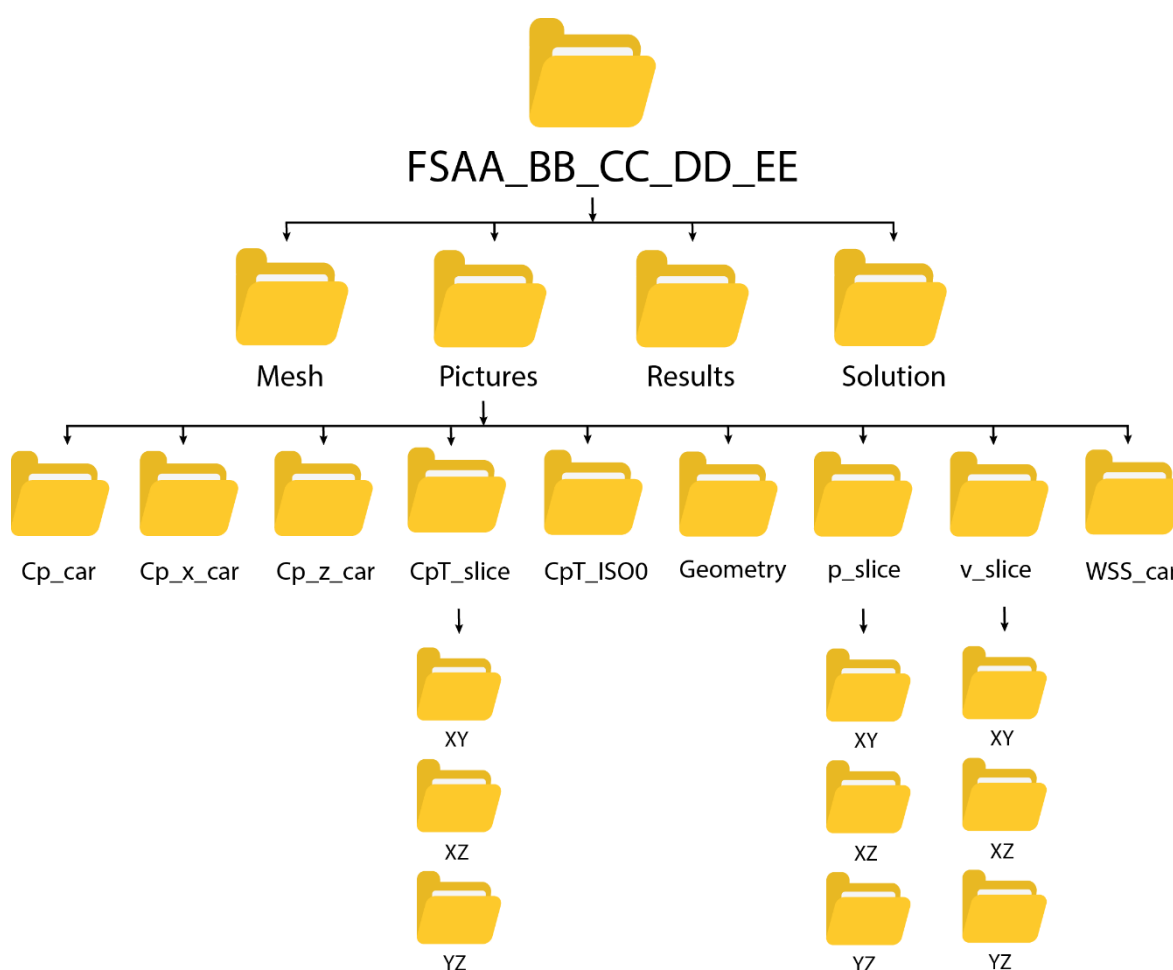
Následovala příprava automatizačního skriptu. Ten byl vytvořen v programovacím jazyce Java a jeho schéma je na Obr. 84. STAR-CCM+ umožňuje nahrávání prováděných operací a jejich zaznamenávání do Java souborů a jejich následné spuštění. Tímto způsobem byla vytvořena většina operací, které skript vykonává. Jednotlivé operace byly nahrávány zvlášť, následně upravovány do obecných tvarů pro použití na jakémkoli zařízení s libovolnou úlohou. Na závěr byly poskládány do jednoho uceleného skriptu. Uživateli tedy stačí do předem připravené vzorové simulace nahrát požadovanou geometrii ve formátu .stp, simulaci nahrát na výpočetní server, spustit skript a po jeho dokončení si vyzvednout výsledky. V průběhu běhu skriptu jsou do textového souboru zaznamenávány časové údaje pro pozdější analýzu doby trvání jednotlivých operací a úlohy jako celku.



Obr. 84 Schéma automatizačního skriptu

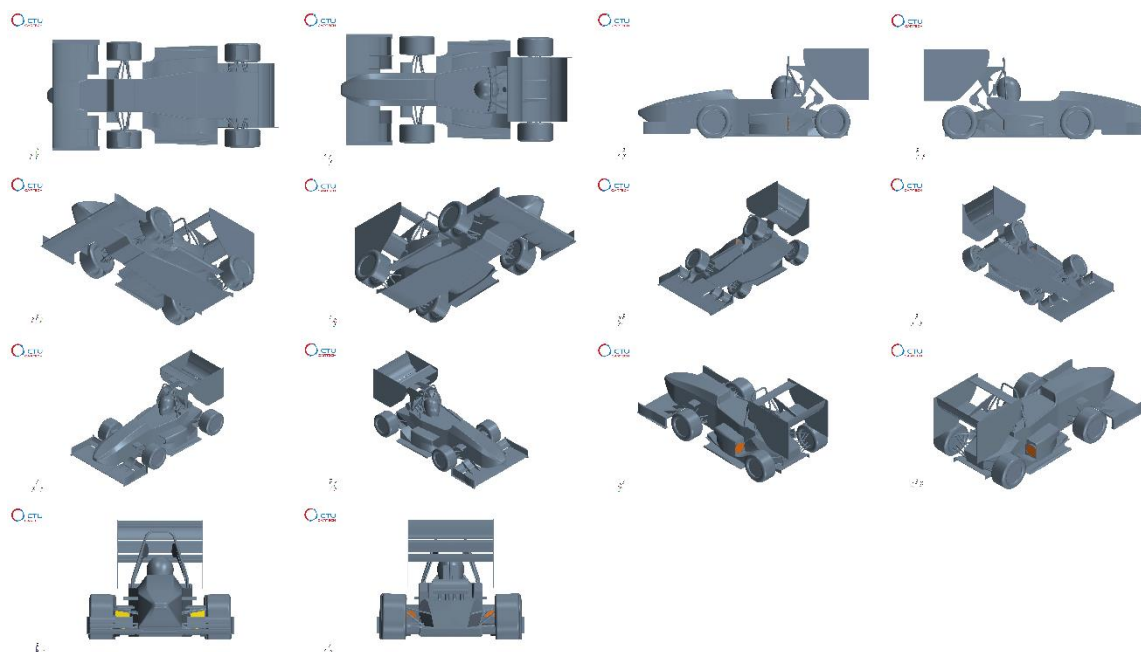


V přípravné fázi dojde k importování Java knihoven, vytvoření adresářové struktury (Obr. 85) pro následné ukládání výstupu ze simulace, načtení pohledů na vozidlo, barevných palet a skalárních a vektorových funkcí, které jsou použity v závěrečné fázi k postprocessingu. Hlavní adresář nese stejný název jako výpočetní úloha, která je v něm umístěna. Do adresáře Mesh jsou po skončení výpočtu umístěny soubory s kvalitativními parametry sítě a jejich histogramy jak ve formátu .csv, tak ve formátu .jpg. Pro grafický výstup spolu s 3D vizualizačními soubory je připraven adresář Pictures, který obsahuje složku pro každou ukládanou veličinu a v případě řezů rovinami i složku pro příslušnou rovinu. Adresář Results slouží pro uložení výsledků integrálních veličin ve formátu .csv spolu s akumulovanými grafy pro vztlak a odpor. Pro údaje o průběhu řešení jako je graf residuí nebo grafy ustálení sledovaných rychlostí ve výpočetní doména slouží adresář Solution.



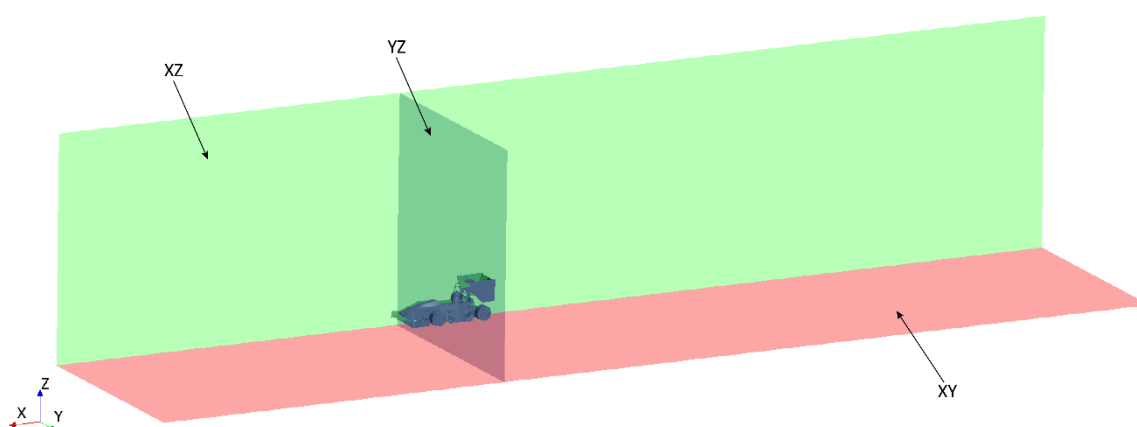
Obr. 85 Adresářová struktura jedné výpočetní úlohy

Základní sada pohledů na vozidlo obsahuje 14 pohledů – zepředu, zezadu, levá i pravá strana, horní a spodní pohled a kombinace horních a dolních šikmých bočních pohledů zepředu i zezadu (Obr. 86). Tato sada je načtena v úvodní části skriptu a použita vždy, když dochází k obarvení vozu požadovanou veličinou a uložení každého pohledu do samostatného .jpg obrázku.



Obr. 86 Sada pohledů na vozidlo

Pro řezy rovinami byly předem připraveny roviny ve všech 3 směrech – XY,XZ,YZ (Obr. 87). Roviny respektují běžný kartézský souřadný systém. Nicméně jejich počátky se neshodují s počátkem souřadného systému vozu, který se nachází v ose zadní nápravy. Tyto roviny jsou při generování řezů posunovány, a proto byl jejich počátek umístěn do jejich prvních souřadnic, kterými řezy začínají. Rovina YZ se posunuje po 50 mm až do vzdálenosti 4,5m od svého počátku který je umístěn před špičkou vozu a vygeneruje 90 snímků. Rovina XZ začíná v rovině symetrie a po 50 mm se posouvá až do vzdálenosti 0,8 m a vygeneruje 16 snímků. Rovina XY začíná v rovině vozovky a posunuje se také po 50 mm do výšky 1,5 m a vygeneruje 30 snímků.



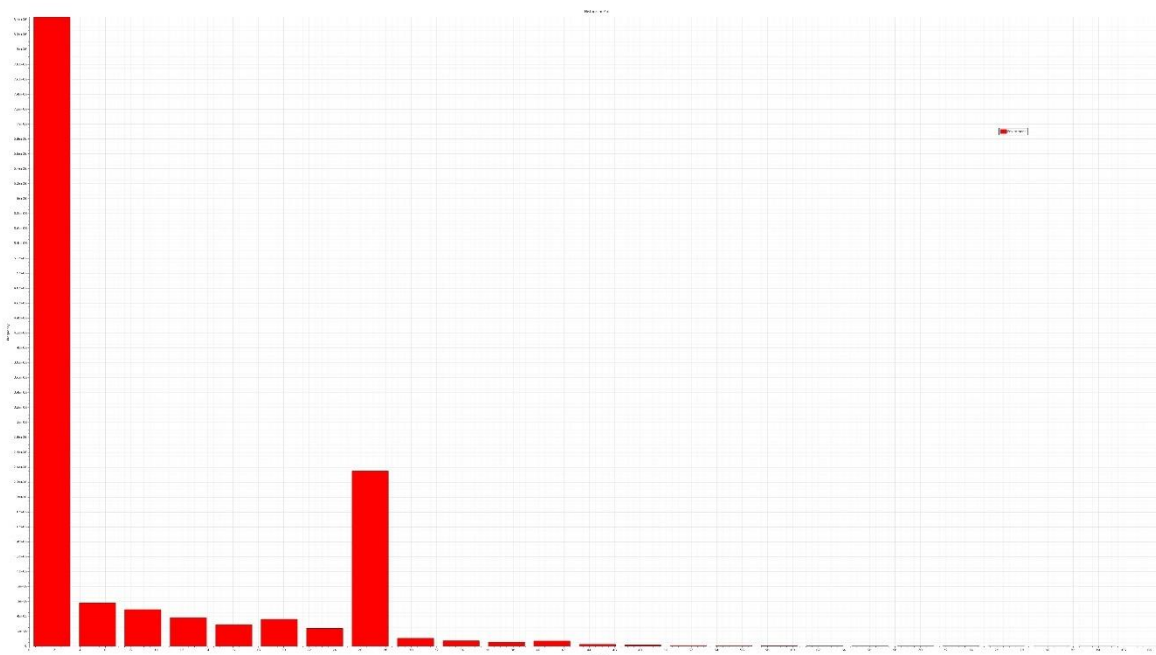
Obr. 87 Umístění rovin

Po provedení přípravných prací následuje spuštění objemového síťování a poté spuštění řešiče. Po jeho dokončení dojde k uložení výpočtu do samostatného souboru. Následně začíná postprocessing. Jeho prvním krokem je vytvoření .csv souboru s tabulovanými integrálními hodnotami. To zahrnuje koeficienty vztlaku a odporu jak pro celý vůz, tak pro



jednotlivé sestavy, rozložení přtlaku mezi jednotlivé nápravy ve formě koeficientů a procentuálního zatížení přední nápravy, aerodynamickou efektivitu, odpor a vztlak celého vozu ( [N] ) a průtok vzduchu jdoucí do chladiče. Tyto hodnoty jsou výsledkem průměrů z posledních 300 iterací.

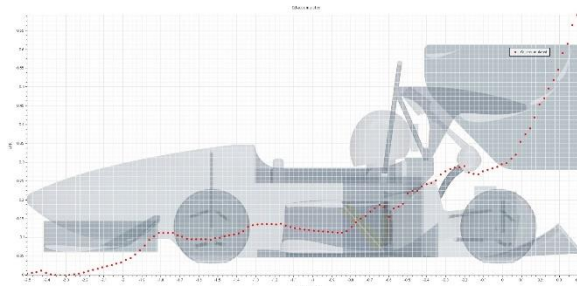
Aby v případě problémů s konvergencí výpočtu či podezřelých výsledků mohla být provedena rychlá kontrola kvality sítě bez nutnosti otevírat spočtenou úlohu na výpočetním serveru, byly do automatického postprocessingu zařazeny i funkce kvality sítě představené v kapitole 6.5. Ty jsou exportovány ve dvou formách - .csv souboru a histogramu ve formátu .png. Jeho příklad pro úhel šikmosti je na Grafu 22.



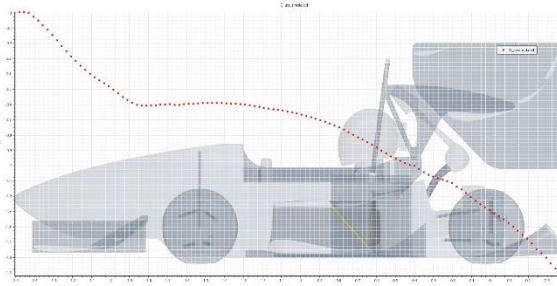
Graf 22 Histogram úhlu šikmosti buněk

První sadou obrázků jsou základní pohledy na geometrii vozu. Ač se to může zdát zbytečné, protože pohled na samotnou geometrii vozu o jeho aerodynamických vlastnostech nic nevyovídá, tak jsou velmi důležité. Díky nim si je možné prohlédnout změny v geometrii bez nutnosti otevírání CAD modelu, nebo simulačního souboru.

Následuje vytvoření grafů akumulovaných koeficientů vztlaku a odporu (Obr. 88 a Obr. 89). Ty představují vývoj koeficientů s rostoucí X souřadnicí a slouží pro identifikaci míst, kde dochází ke změnám a vyhledání míst na voze, které na ně mají největší vliv. Pro jasnou představu o tom, kde se souřadnice na voze nachází je přidán do pozadí grafu boční pohled na geometrii vozu.

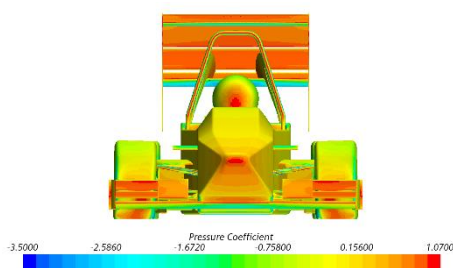


Obr. 88 Graf akumulovaného Cd

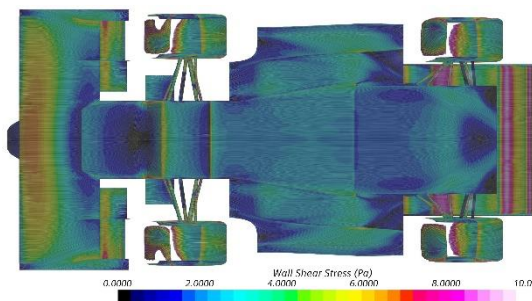


Obr. 89 Graf akumulovaného Cl

Jak bylo zmíněno dříve, tak tlak a tečné napětí na povrchu vozu jsou hlavními zdroji působících sil a jsou tedy i základními zobrazeními v postprocessingu. Díky rozložení koeficientu statického tlaku (Obr. 90) je možné sledovat místa, kde dochází k přetlaku nebo naopak podtlaku a tedy generování sil, nebo místa vhodná k umístění chladičů. Tečné napětí (Obr. 91) ukazuje chování proudění v blízkosti povrchu. V místech s vyšší rychlostí bude i vyšší tečné napětí a naopak v místech s rychlostí nízkou bude nižší. Díky tomu lze například v místech s náhlou změnou napětí sledovat místa odtržení. Toto zobrazení bylo doplněno o povrchové proudnice pomocí metody LIC neboli line integral convolution, které mohou sloužit pro sledování směru proudění po povrchu nebo pro porovnání s vizualizačními technikami používanými přímo experimentálně na trati.



Obr. 90 Rozložení Cp na povrchu



Obr. 91 Rozložení tečného napětí na povrchu

Pro vizualizaci a lepší pochopení míst, kde dochází ke generování vztlaku či odporu se využívá upravené formy koeficientu tlaku. V ní se lokální statický tlak v čitateli násobí složkou vektoru plochy pro daný směr a dojde tak k rozdělení tlakového koeficientu Cp na jeho složky ve směru x pro zobrazení ploch generujících odpor a směru z pro vztlak.

$$c_{px} = \frac{p(-AreaX)}{\frac{1}{2}\rho V_{ref}^2 A_{ref}} \quad (67)$$

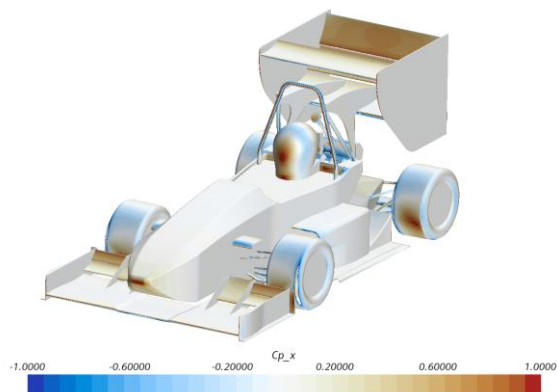
$$c_{pz} = \frac{p(-AreaZ)}{\frac{1}{2}\rho V_{ref}^2 A_{ref}} \quad (68)$$

Z rozložení tlakového koeficientu ve směru osy x (CpX) na Obr. 92 je patrný vliv odkrytých kol, helmy pilota, či klapek křidel s vysokým úhlem náběhu na odpor vozu. Negativní

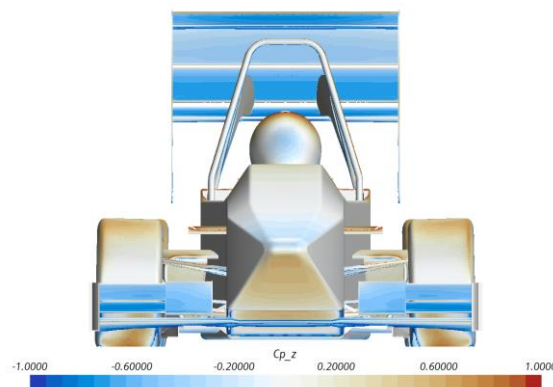




hodnoty tlakového koeficientu ve směru osy z ukazují na generování záporného vztlaku (přítlačku) přítlačnými křídly (Obr. 93).

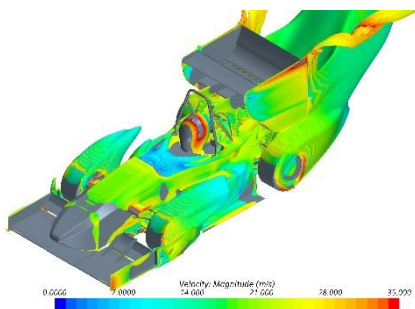


Obr. 92 Rozložení  $Cp_x$

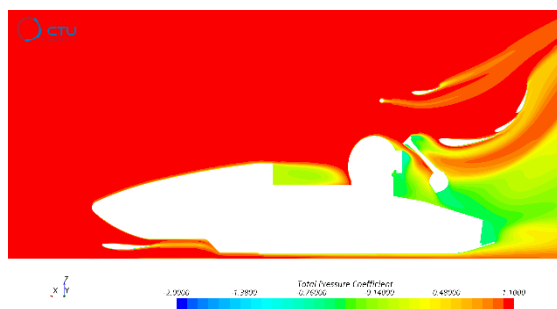


Obr. 93 Rozložení  $Cp_z$

Dále následují zobrazení koeficientu celkového tlaku  $Cp_T$ , který určuje kolik energie v proudění ještě zůstává oproti nenarušenému proudění. Díky tomu je možné zobrazit úplav vozu nebo určit umístění aerodynamických prvků. Prvním z nich je iso plocha neboli plocha s konstantní hodnotou dané veličiny ve 3D (obdoba iso čáry ve 2D). Hodnota koeficientu celkového tlaku byla pro tuto plochu nastavena na 0 – tedy místo, kde podtlak vyrovnává dynamický tlak a dochází ke ztrátě energie v proudění (Obr. 94). Druhým jsou řezy rovinami této veličiny ve všech třech směrech (Obr. 95)

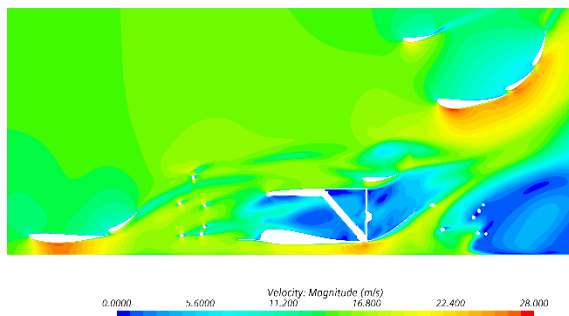


Obr. 94 Iso plocha  $Cp_T$

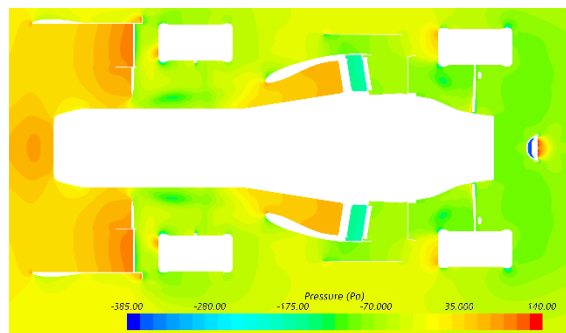


Obr. 95 Řez rovinou  $Cp_T$

Závěrem jsou vytvořeny řezy rovinami s rozložením rychlosti (Obr. 96) a tlaku (Obr. 97), které umožňují detailnější zkoumání proudového pole v různých místech na voze.



Obr. 96 Rozložení rychlosti v řezu



Obr. 97 Rozložení tlaku v řezu

### 10.3 Protokol a sdílená vývojová tabulka

Pro základní zaznamenávání změn a výsledků mezi úlohami byl připraven jednoduchý protokol (Obr. 98). Opět nese název dané simulace, který je uveden i v horní části protokolu společně se stručným popisem změny a očekávanými výsledky, jménem aerodynamika, který simulaci provedl, datem výpočtu a verzí CFD metodiky. V hlavní části je umístěno grafické zobrazení před a po změně geometrie z CAD dat. V levé části se nachází výsledky referenčního konstrukčního stavu vůči kterému je změna provedena a výsledky z výpočtu. Hlavním smyslem protokolu je jasné, stručné a jednotné zaznamenání provedené úpravy, její důvod a výsledky. Detailnější analýza je pak již individuální a probíhá v interním systému ETIS.

FS13_03_01_01_01			Description	Added main hoop padding. It is quite big, so i expect negative impact on rear wing downforce.				
Sim	K3	Run	Name	Martin Ševčík	Date	17.02.2021	CFD Version	V2_a_2021
g00	ae	-2,740	-2,652	Before				
	Cd	0,667	0,670					
	Cl	-1,828	-1,776					
	Clf	0,841	0,790					
	Clr	0,975	0,979					
	d	-92,051	-92,344					
	l	-252,173	-244,909					
	%f	46,025	44,491					
g0_chassi	Cd	0,112	0,116					
Cl	-0,112	-0,105						
g1_frame	Cd	0,007	0,011					
Cl	0,002	-0,001						
g10_diff	Cd	-0,014	-0,017					
Cl	-0,229	-0,194						
g11_r_wing	Cd	0,302	0,291					
Cl	-0,626	-0,612						
g2_intake	Cd	0,010	0,010	After				
Cl	0,004	0,003						
g3_front_suspensio	Cd	0,012						0,012
Cl	0,004	0,004						
g4_rear_suspensio	Cd	0,004						0,005
Cl	0,003	0,003						
g5_nose	Cd	0,021						0,021
Cl	0,012	0,012						
g6_front_tire	Cd	0,015						0,015
Cl	0,025	0,025						
g7_rear_tire	Cd	0,032	0,033					
Cl	0,030	0,031						
g8_f_wing	Cd	0,095	0,095					
Cl	-0,669	-0,672						
g9_sidepods	Cd	0,027	0,028					
Cl	-0,344	-0,348						
Mass flow [kg/s]	m	0,127	0,127					

Obr. 98 Protokol o provedené simulaci



V protokolu je srovnána vždy pouze jedna simulace se simulací referenční a není možné tedy sledovat vývoj sledovaných parametrů v delším časovém horizontu nebo porovnávat více simulací mezi sebou. Z toho důvodu byla založena sdílená tabulka v MS Excel (Obr. 99) uložená na týmovém OneDrive úložišti, do kterého se zaznamenávají všechny výsledky a mají k němu všichni členové týmu přístup.

CTU CARTECH		FS13_00_10_00_05	FS13_00_10_00_06	FS13_00_09_01_02	FS13_00_09_01_03	FS13_00_09_01_04	FS13_00_09_00_01	FS13_00_09_00_03	FS13_00_09_00_04	FS13_00_09_00_05	K1	FS13_01_09_01_05	FS13_01_09_01_06	FS13_01_11_01_01
CFD version	-													
g00	ae	-2,237	-2,224	-2,363	-2,407	-2,434	-2,246	-2,179	-2,205	-2,147	-2,498	-2,511	-2,492	-3,047
	Cd	0,733	0,721	0,716	0,711	0,708	0,739	0,737	0,733	0,731	0,700	0,699	0,704	0,489
	Cl	-1,64	-1,615	-1,693	-1,712	-1,722	-1,659	-1,606	-1,617	-1,570	-1,749	-1,755	-1,754	-1,489
	Clf	0,855	0,832	0,846	0,848	0,849	0,886	0,841	0,859	0,840	0,869	0,874	0,867	0,569
	Clr	0,758	0,756	0,808	0,827	0,826	0,749	0,735	0,735	0,706	0,871	0,864	0,863	0,924
	d	-101,1	-99,4	-98,787	-98,083	-97,595	-101,899	-101,640	-101,113	-100,868	-96,541	-96,396	-97,073	-67,404
	l	-226,1	-222,7	-233,464	-236,072	-237,522	-228,856	-221,491	-222,951	-216,514	-241,156	-242,029	-241,861	-205,375
%f	52,1	52,5	49,955	49,547	49,29	53,424	52,374	53,155	53,487	49,723	49,817	49,473	38,269	
g0_chassi	Cd	0,104	0,102	0,108	0,109	0,109	0,107	0,109	0,107	0,107	0,108	0,107	0,098	0,086
	Cl	-0,049	-0,051	-0,054	-0,057	-0,057	-0,048	-0,041	-0,042	-0,029	-0,103	-0,102	-0,103	-0,089
g1_frame	Cd	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,007	0,007	0,007	0,007
	Cl	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002
g10_diff	Cd	0,022	0,018	0,022	0,023	0,022	0,023	0,021	0,021	0,021	-0,017	-0,018	-0,018	-0,018
	Cl	-0,166	-0,141	-0,162	-0,169	-0,167	-0,177	-0,145	-0,162	-0,163	-0,194	-0,193	-0,193	-0,17
g11_r_wing	Cd	0,341	0,341	0,344	0,342	0,345	0,343	0,346	0,343	0,343	0,342	0,345	0,344	0,177
	Cl	-0,717	-0,715	-0,726	-0,721	-0,724	-0,721	-0,735	-0,720	-0,723	-0,665	-0,67	-0,671	-0,478
g2_intake	Cd	0,026	0,023	0,024	0,024	0,023	0,021	0,022	0,020	0,020	0,016	0,016	0,016	0,011
	Cl	0,016	0,017	0,02	0,02	0,018	0,014	0,014	0,014	0,013	0,009	0,009	0,009	0,006
g3_front_suspension	Cd	0,016	0,016	0,013	0,014	0,014	0,015	0,015	0,015	0,016	0,012	0,012	0,012	0,012
	Cl	0,002	0,002	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,004	0,003	0,004	0,003
g4_rear_suspension	Cd	0,007	0,007	0,005	0,005	0,005	0,007	0,007	0,008	0,008	0,005	0,005	0,005	0,004
	Cl	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,004	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,002
g5_nose	Cd	0,022	0,022	0,021	0,021	0,021	0,022	0,022	0,022	0,022	0,021	0,021	0,021	0,02
	Cl	0,013	0,013	0,012	0,012	0,012	0,013	0,013	0,013	0,013	0,012	0,012	0,012	0,013
g6_front_tire	Cd	0,031	0,031	0,021	0,018	0,018	0,034	0,031	0,034	0,034	0,015	0,015	0,015	0,015
	Cl	0,03	0,03	0,025	0,025	0,025	0,033	0,030	0,034	0,035	0,023	0,023	0,023	0,023
g7_rear_tire	Cd	0,06	0,053	0,044	0,043	0,043	0,055	0,058	0,056	0,060	0,045	0,045	0,045	0,038
	Cl	0,047	0,045	0,036	0,036	0,035	0,044	0,048	0,048	0,049	0,034	0,034	0,035	0,029
g8_f_wing	Cd	0,082	0,088	0,09	0,091	0,091	0,081	0,082	0,081	0,081	0,091	0,09	0,09	0,09
	Cl	-0,59	-0,588	-0,624	-0,627	-0,628	-0,583	-0,590	-0,581	-0,581	-0,619	-0,617	-0,619	-0,618
g9_sidepods	Cd	0,011	0,013	0,013	0,009	0,004	0,019	0,011	0,015	0,010	0,001	0,008	0,035	-0,006
	Cl	-0,232	-0,233	-0,23	-0,241	-0,246	-0,245	-0,208	-0,230	-0,193	-0,334	-0,334	-0,322	-0,291
Mass flow [kg/s]	m	0,065	0,066	0,074	0,08	0,081	0,064	0,066	0,064	0,066	0,133	0,129	0,111	0,13

Obr. 99 Sdílený vývojový excel

## 10.4 Porovnávání výsledků

Většina práce aerodynamiků při vyhodnocování výsledků simulací spočívá v porovnání s konstrukčním stavem či jinými verzemi geometrie a vzhledem k velkému množství dat z jednotlivých výpočtů je nutné pro tento proces použít vhodný nástroj. Požadavky na funkce takového nástroje jsou značně specifické a proto bylo rozhodnuto, že vytvoříme vlastní. Programování aplikace dle mého návrhu se ujal kolega Bc. Jakub Fajnor. Aplikace umožňuje načtení dvou adresářových struktur s výsledky ze simulací a jejich přímé srovnání. Ve střední části okna se zobrazí dva sobě odpovídající pohledy na vůz či řezy rovinou. Tlačítka nad nimi umožňují výběr zobrazované veličiny, roviny řezu a současné přepínání mezi obrázky. Po stranách jsou zobrazeny tabulky s kompletními integrálními veličinami příslušejících výpočtů. Výsledná podoba aplikace je na obrázku 100.



CFD Post Analysis

File

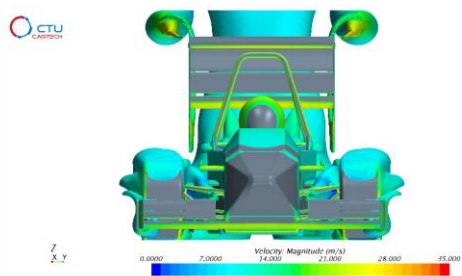
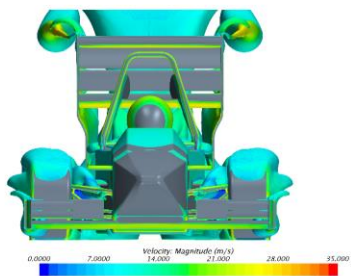
cd	0.693
prc	53.873
df	0.767
cl	-1.451
cr	0.684
cd	0.112
cl	-0.013
cd	0.008
cl	0.002
cl	0.004
cd	0.009
cd	0.001
cd	0.010
cl	0.003
cd	0.007
cl	0.013
cd	0.021
cl	0.032
cd	0.036
cd	0.042
cd	0.057
cl	-0.557
cd	0.079
cl	-0.191
HE	0.049
cd	-0.001
cl	-0.091
cd	0.007
cl	-0.696
g11	0.348

FS12\_00\_11\_01\_01

CpTotal\_ISO\_car

Previous Next

FS12\_00\_11\_02\_01



0.696	cd
53.543	prc
0.807	df
-1.508	cl
0.701	cr
0.114	cd
-0.018	cl
0.009	cd
0.002	cl
0.004	cl
0.008	cd
0.001	cl
0.010	cd
0.004	cl
0.008	cd
0.013	cl
0.021	cd
0.031	cl
0.037	cd
0.050	cl
0.062	cd
-0.561	cl
0.079	cd
-0.199	cl
0.049	HE
0.001	cd
-0.100	cl
0.007	cd
-0.735	cl
0.339	cd

Obr. 100 Okno aplikace na srovnávání výsledků



## 11 Závěr

V úvodu práce byly v programu STAR-CCM+ připraveny 4 varianty výpočetních modelů vozu FS.11, které se lišily v použitých typech buněk výpočetní sítě, přístupu k modelování mezní vrstvy a turbulentním modelu. CFD analýzy nabízejí velké množství různých nastavení a modelů a je tedy nezbytné je experimentálně validovat.

Pro experimentální validaci výsledků ze simulací bylo vybráno měření statických tlaků na povrchu vozu pomocí tlakových pásků. Hlavním zjištěním z měření bylo odtržení proudění na klapkách zadního přitlačného křídla, které CFD v žádné z výpočetních modelů nevykazuje. Nakonec byl tedy pro běžné výpočty zvolen turbulentní model  $k - \varepsilon$ , mezní vrstva modelovaná pomocí stěnových funkcí a šestistěnné elementy sítě. Ten poskytuje v případě přilnutého proudění dostatečně přesné výsledky a spolu se stěnovými funkcemi je i časově přijatelný. Detailní modelování proudění u stěny sice vykazuje přiblížení k naměřeným datům v místech odtržení, ale stále není schopné ho přesně odhalit a spolu s vyšší náročností na síť a tedy vyšším potřebným časem na výpočet je vhodnější spíše pro ověřovací výpočty v případě návrhu agresivní geometrie, kde lze odtržení očekávat.

Dále byly vytvořeny aerodynamické mapy a výpočty simulující jízdu v zatáčce a boční vítr. Již z validačního měření byla zřejmá vysoká aerodynamická závislost na stavu vozu vůči vozovce a je tedy důležité věnovat různým jízdním režimům náležitou pozornost. Ideální by tedy bylo prověřit chování vozu ve všech stavech při každé větší konstrukční změně, ale to je z hlediska časové náročnosti a současným výpočetním možnostem týmu nemožné. Doporučuji tedy provádět výpočty kompletní aerodynamické mapy vozu minimálně před uzavřením konstrukce vozu a započítáním jeho výroby aby bylo možné včas odhalit jeho nedostatky a provést potřebné úpravy.

Nakonec byl navržen automatizační skript, který provádí běh výpočtu včetně postprocessingu. Díky němu je ušetřena aerodynamikům spousta rutinní práce se spouštěním výpočtů a následným zpracováním výsledků a mohou tak věnovat více času samotnému návrhu vozu a analýze výsledků. Skript byl upraven pro fungování se všemi typy používaných výpočtů.

Závěrem lze tedy říci, že návrhová metodika aerodynamiky vozů Formula Student je velice komplexní a její vývoj nebude nikdy ukončen a s rozvíjejícími se znalostmi a zkušenostmi členů týmu, případnými novými výpočetními či experimentálními možnostmi bude nadále vylepšována. Tato práce tedy bude sloužit jako základ tohoto vývoje budoucím členům aerodynamické části týmu. Jako první návaznost na ní bych doporučoval detailnější pochopení a modelování pneumatik včetně kolové skupiny a ráfku a modelování větráků, které po posledních úpravách technických pravidel nabývají na větší důležitosti, a proto je jejich správné modelování v CFD velice důležité.



## 12 Použitá literatura

- [1] Vůz Alfa Romeo F1 týmu v CFD [online: 18.3.2020]. Dostupné z: <https://www.sauber-group.com/aerodynamics/services/virtual-wind-tunnel-cfd/>
- [2] JEŽEK, Jan, Blanka VÁRADIOVÁ a Josef ADAMEC. Mechanika tekutin. Vyd. 3., přeprac. Praha: ČVUT, 1997. ISBN 9788001016152.
- [3] KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 0837601428
- [4] VERSTEEG, H. K. a W. MALALASEKERA. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. 2nd ed. New York: Pearson Education, 2007. ISBN 978-0-13-127498-3.
- [5] BROŽ, Václav. Aerodynamika nízkých rychlostí. Vyd. 5. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02347-8.
- [6] Simcenter STAR-CCM+ Documentation [online: 5.3.2021]. Dostupné z: <https://docs.sw.siemens.com/documentation/external/PL20200805113346338/en/US/userManual/userguide/html/index.html?param=JedSV&authLoc=https://thesteveportal.plm.automation.siemens.com/AuthoriseRedirect#page/connect%2Fsplash.html>
- [7] HUCHO, Wolf – Heinrich, SOVRAN, Gino. Aerodynamics of road vehicles
- [8] ANDERSON, John D. Fundamentals of Aerodynamics. Third Edition. New York: McGraw-Hill Education, 2001. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering. ISBN 0-07-237335-0
- [9] Endplate Alfa Romeo Racing F1 [online: 5.3.2021]. Dostupné z: <https://www.motorsport.com/f1/photo/main-gallery/alfa-romeo-f1-c39-rear-wing-detail-12897565/>
- [10] KOZUBKOVÁ, Milada a Sylva DRÁBKOVÁ. Numerické modelování proudění FLUENT I. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2003, 115 s. ISBN 80-248-0525-1.
- [11] Joshi J.B., Nere N.K., Rane Ch.V., Murthy B.N, Mathpati Ch.S., Patwardham A.W. and Ranade V.V., 2011. "CFD simulation of stirred tank: Comparison of turbulent models. Part II: Axial flow impellers, multiple impellers and multiphase dispersion", Can. J. Chem. Eng., 89, 754-816.
- [12] Tlakový převodník Evoscann P16-A [online: 7.3.2021]. Dostupné z: <https://www.evolutionmeasurement.com/product/p16-a-miniature-pressure-scanner/>
- [13] Tlakové snímače na povrchu vozu [online: 7.3.2021]. Dostupné z: <https://www.evolutionmeasurement.com/pressure-patches-eliminate-drilling-in-aerodynamic-testing/>
- [14] Tlakový pásek 4Jtech [online: 7.3.2021]. Dostupné z: <http://4jtech.cz/files/uploads/4Jtech-20151202-pressure-strips-datasheet-R01.pdf>



- [15] Model vozu Sauber F1 v aerodynamickém tunelu [online: 7.3.2021]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=k7hTnkbmodl>
- [16] Experimentální metody a zkoušení strojů, přednáška 4 [online: 7.4.2020]
- [17] Detail kielovy trubice [online: 7.3.2021]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Kiel\\_probe#/media/File:X-31\\_Kiel\\_Probe\\_Close-up\\_Showing\\_Inside.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Kiel_probe#/media/File:X-31_Kiel_Probe_Close-up_Showing_Inside.jpg)
- [18] Vůz Mercedes AMG F1 W10 osazený mříží s Kielovými trubicemi [online: 7.3.2021]. Dostupné z: [https://www.f1technical.net/features/21963?utm\\_source=twitterfeed&utm\\_medium=facebook&fbclid=IwAR16v3mGF-mJ7zm610IBTtoKYc38kstvTwtBm8ihyUVro\\_7Ts-0BtLZaW3I](https://www.f1technical.net/features/21963?utm_source=twitterfeed&utm_medium=facebook&fbclid=IwAR16v3mGF-mJ7zm610IBTtoKYc38kstvTwtBm8ihyUVro_7Ts-0BtLZaW3I)
- [19] Kontrastní barva na voze Red Bull [online: 7.3.2021]. Dostupné z: [https://www.f1technical.net/features/21963?utm\\_source=twitterfeed&utm\\_medium=facebook&fbclid=IwAR16v3mGF-mJ7zm610IBTtoKYc38kstvTwtBm8ihyUVro\\_7Ts-0BtLZaW3I](https://www.f1technical.net/features/21963?utm_source=twitterfeed&utm_medium=facebook&fbclid=IwAR16v3mGF-mJ7zm610IBTtoKYc38kstvTwtBm8ihyUVro_7Ts-0BtLZaW3I)
- [20] Bavlnky na voze ŠKODA [online: 7.3.2021]. Dostupné z: [https://www.skoda-storyboard.com/cs/inovace-cs/perfektne-aerodynamicka-skoda-octavia/?fbclid=IwAR0VdaRXADHGOTCOqLUzfVvzhk5Hn\\_MdpSTSMpZDjnKehu8Ac3\\_VQU-OGQw](https://www.skoda-storyboard.com/cs/inovace-cs/perfektne-aerodynamicka-skoda-octavia/?fbclid=IwAR0VdaRXADHGOTCOqLUzfVvzhk5Hn_MdpSTSMpZDjnKehu8Ac3_VQU-OGQw)
- [21] Raffel, M., Willert, C.E., Scarano, F., Kähler, C., Wereley, S.T., Kompenhans, J., Particle Image Velocimetry – A Practical Guide, 2007, ISBN 978-3-319-68852-7
- [22] Schéma měření PIV [online 7.3.2021]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/particle-image-velocimetry-piv/measurement-principles-of-piv/>
- [23] PIV v aerodynamickém tunelu [online 7.3.2021]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/centers/ames/orgs/aeronautics/windtunnels/multimedia/common-research-green-laser-1600-1200.html>
- [24] KEOGH, James. The aerodynamic effects of the cornering flow conditions.



## 13 Seznam obrázků

Obr. 1 Vůz týmu Alfa Romeo v CFD [1] .....	10
Obr. 2 Vůz FS.11 týmu CTU CarTech na okruhu v Mostě.....	12
Obr. 3 Typický průběh rychlosti u turbulentního proudění [4] .....	15
Obr. 4 Přejít laminární mezní vrstvy na turbulentní [3] .....	15
Obr. 5 Odtržení mezní vrstvy [5].....	16
Obr. 6 Aerodynamické síly a momenty působící na vozidlo [7].....	17
Obr. 7 Jízdní odpory působící na vozidlo [3] .....	18
Obr. 8 Rozložení tlaku na stojící a rotující pneumatice [3] .....	20
Obr. 9 Geometrické charakteristiky profilu [8].....	20
Obr. 10 Závislost součinitele vztlaku $C_L$ na úhlu náběhu a odtržení proudění [3].....	21
Obr. 11 Geometrie více prvkového křídla [3] .....	22
Obr. 12 Koncové víry křídla [3] .....	22
Obr. 13 Endplate na zadním křídle vozu F1 [9].....	22
Obr. 14 Možnosti modelování turbulence [10] .....	25
Obr. 15 Energetické vírové spektrum [11].....	25
Obr. 16 Rozdělení mezní vrstvy [10].....	29
Obr. 17 Možnosti modelování proudění u stěny [10] .....	30
Obr. 18 1-D výpočetní síť [4].....	31
Obr. 19 Schéma SIMPLE algoritmu [4].....	33
Obr. 20 Umístění tlakových odběrů [3] .....	34
Obr. 21 P16-A [12] .....	34
Obr. 22 Tlakové snímače na povrchu vozu [13].....	34
Obr. 23 Tlakový pásek 4Jtech [14] .....	34
Obr. 24 Otevřený tunel [3] .....	35
Obr. 25 Uzavřený tunel [3] .....	35
Obr. 26 Model vozu F1 v aerodynamickém tunelu [15] .....	36
Obr. 27 Mezní vrstva v reálném provozu [3] .....	37
Obr. 28 Mezní vrstva v aerodynamickém tunelu [3] .....	37
Obr. 29 Uchycení vozu na rotujícím páse [3].....	38
Obr. 30 Uchycení vozu přes kola [3] .....	38
Obr. 31 Pitot - statická sonda [16].....	38
Obr. 32 Detail Kielovy trubice [17] .....	39
Obr. 33 Vůz Mercedes AMG F1 W10 osazený mříží s Kielovými trubicemi [18] .....	39
Obr. 34 Kontrastní barva na voze Red Bull [19].....	40
Obr. 35 Bavlnky na voze ŠKODA [20].....	40
Obr. 36 Schéma měření PIV [22] .....	40
Obr. 37 PIV v aerodynamickém tunelu [23] .....	40
Obr. 38 CAD model vozu FS.11 .....	41
Obr. 39 CFD model vozu FS.11 .....	41
Obr. 40 Detail nevhodného kontaktu dílů .....	42
Obr. 41 Ošetření kontaktu dílů mezi sebou.....	42
Obr. 42 Ošetření kontaktu pneumatiky s vozovkou .....	42
Obr. 43 Rozdělení vozu na podsestavy .....	43
Obr. 44 Rozměry výpočetní domény .....	43
Obr. 45 Nastavení okrajových podmínek .....	44
Obr. 46 Rozložení rychlosti na ráfku při použití metod 1 a 2 [6] .....	45
Obr. 47 Chladič umístěný v aerodynamickém tunelu.....	46
Obr. 48 Model experimentu v CFD .....	47
Obr. 49 Konfigurace chlazení v CFD modelu.....	49
Obr. 50 Mnohostěnná síť.....	50
Obr. 51 Šestistěnná síť.....	50





Obr. 52 Rozdělení ploch vozu dle nastavení povrchové sítě .....	52
Obr. 53 Povrchová síť trimmer .....	52
Obr. 54 Povrchová síť polyhedral .....	52
Obr. 55 Rozložení velikosti objemových buněk .....	53
Obr. 56 Objemová síť Trimmer .....	53
Obr. 57 Objemová síť Polyhedral .....	53
Obr. 58 2 prismatické vrstvy .....	54
Obr. 59 10 prismatických vrstev .....	54
Obr. 60 Kvalitní a nekvalitní buňka .....	54
Obr. 61 Normály stěn buňky .....	55
Obr. 62 Ukázka změny velikosti objemu buňky .....	55
Obr. 63 Úhel šikmosti buněk .....	56
Obr. 64 Zkřivení buněk .....	56
Obr. 65 Rozmístění kontrolních bodů .....	59
Obr. 66 Rozložení $y+$ u $V1\_a$ .....	61
Obr. 67 Rozložení $y+$ u $V1\_b$ .....	61
Obr. 68 FS.11 bez předního a zadního křídla .....	63
Obr. 69 Kompletně osazená FS.11 .....	63
Obr. 70 Testovací trať na letišti v Plzni .....	63
Obr. 71 Schéma tlakového pásku [] .....	65
Obr. 72 Umístění tlakových pásků na voze FS.11 .....	66
Obr. 73 Instalace tlakového pásku .....	66
Obr. 74 Jednotky pro sběr dat .....	66
Obr. 75 Mapa trati disciplíny Endurance v Barceloně .....	77
Obr. 76 Možnosti modelování zakřiveného proudění [24] .....	79
Obr. 77 Okrajové podmínky u simulace zatáčky .....	79
Obr. 78 Rozložení referenční rychlosti .....	80
Obr. 79 Naklonění vozu a zatočení kol .....	80
Obr. 80 Oblasti zjemnění objemových buněk u zakřivené úlohy .....	81
Obr. 81 Proudnice zakřiveného proudění .....	81
Obr. 82 Proudnice u simulace bočního větru .....	82
Obr. 83 Schéma pojmenování úloh .....	83
Obr. 84 Schéma automatizačního skriptu .....	84
Obr. 85 Adresářová struktura jedné výpočetní úlohy .....	85
Obr. 86 Sada pohledů na vozidlo .....	86
Obr. 87 Umístění rovin .....	86
Obr. 88 Graf akumulovaného $C_d$ .....	88
Obr. 89 Graf akumulovaného $C_l$ .....	88
Obr. 90 Rozložení $C_p$ na povrchu .....	88
Obr. 91 Rozložení tečného napětí na povrchu .....	88
Obr. 92 Rozložení $C_pX$ .....	89
Obr. 93 Rozložení $C_pZ$ .....	89
Obr. 94 Iso plocha $C_pT$ .....	89
Obr. 95 Řez rovinou $C_pT$ .....	89
Obr. 96 Rozložení rychlosti v řezu .....	90
Obr. 97 Rozložení tlaku v řezu .....	90
Obr. 98 Protokol o provedené simulaci .....	90
Obr. 99 Sdílený vývojový excel .....	91
Obr. 100 Okno aplikace na srovnávání výsledků .....	92



## 14 Seznam tabulek

Tab. 1 Chyba CFD modelu vůči měření .....	48
Tab. 2 Nastavení parametrů povrchové sítě.....	51
Tab. 3 Nastavení úvodních výpočtů.....	58
Tab. 4 Výsledky úvodních výpočtů.....	62
Tab. 5 Průměrné rychlosti a jejich rozptyl z jednotlivých měřících jízd .....	67



## 15 Seznam grafů

Graf 1 Validace chladiče .....	48
Graf 2 Výkonová křivka ventilátoru Spal VA 67 .....	49
Graf 3 Residua varianty V2_a .....	60
Graf 4 Ustálení rychlosti v bodě 5 varianty V2_a .....	60
Graf 5 Ustálení odporového koeficientu varianty V2_a .....	61
Graf 6 Plovoucí průměr Cd varianty V2_a .....	62
Graf 7 Porovnání průběhu rychlostí z obou nejrychlejších kol .....	64
Graf 8 Průběh rychlosti při měřících jízdách .....	67
Graf 9 Přední křídlo - hlavní profil .....	69
Graf 10 Přední křídlo - klapka .....	70
Graf 11 Podlaha .....	71
Graf 12 Zadní křídlo - hlavní profil .....	72
Graf 13 Zadní křídlo - první klapka .....	72
Graf 14 Zadní křídlo - druhá klapka .....	73
Graf 15 Zadní křídlo – horní profil .....	73
Graf 16 Boční strana monokoku .....	74
Graf 17 Přední křídlo - hlavní profil .....	75
Graf 18 Zadní křídlo - hlavní profil .....	75
Graf 19 Mapa vztlakového koeficientu .....	78
Graf 20 Mapa odporového koeficientu .....	78
Graf 21 Porovnání výsledků zakřiveného proudění a bočního větru .....	82
Graf 22 Histogram úhlu šikmosti buněk .....	87



## 16 Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Jednotky	Význam
CFD		Computational Fluid Dynamics
SAE		Society of Automotive Engineers
$p$	[Pa]	Tlak
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	Hustota
$v$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
D	[m]	Charakteristický rozměr
$\mu$	[N.s.m <sup>-2</sup> ]	Dynamická viskozita
$C_p$	[-]	Tlakový koeficient
$C_{ptot}$	[-]	Koeficient celkového tlaku
F	[N]	Síla
A	[m <sup>2</sup> ]	Referenční plocha
c	[-]	Aerodynamický koeficient síly
$C_m$	[-]	Aerodynamický koeficient momentu
l	[m]	Charakteristická délka
$A_{ef}$	[-]	Aerodynamická efektivita
$C_{l,d}$	[-]	Aerodynamický koeficient vztlaku, resp. odporu
$A_{bal}$	[%]	Aerodynamické zatížení přední nápravy
$C_{l,r}$	[-]	Aerodynamický koeficient vztlaku působící na přední, resp. zadní nápravu
div		Divergence vektorového pole
t	[s]	Čas
$\varphi$	[-]	Označení obecné veličiny
I		Jednotkový tenzor
T		Tenzor třecích napětí
$f_b$	[N]	Vnější objemové síly



$u, v, w$	$[m \cdot s^{-1}]$	Složky rychlosti ve směrech x, y, z
$E$	[J]	Celková energie na jednotku objemu
$q$	$[W \cdot m^{-2}]$	Tepelný tok
$\sigma$		Tenzor napětí
$S_E$	[J]	Zdroj energie
$r$	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Plynová konstanta
$T$	[K]	Teplota
$i$	[J]	Specifická vnitřní energie
$c_v$	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita při stálém objemu
RANS		Reynolds Averaged Navier Stokes
LES		Large Eddy Simulation
DES		Detached Eddy Simulation
DNS		Direct Numerical Simulation
$k$	$[m^2 \cdot s^{-2}]$	Turbulentní kinetická energie
$\sigma_{\tilde{v}}$	[-]	Konstanta modelu Spalart Allmaras
$P_{\tilde{v}}, P_k, P_\varepsilon, P_\omega$		Členy produkce
$S_{\tilde{v}}, S_k, S_\varepsilon, S_\omega$		Zdrojové členy
$\mu_t$	$[N \cdot s \cdot m^{-2}]$	Turbulentní viskozita
$f_{v1}, f_2, f_u$		Tlumící funkce
$\varepsilon$	$[m^2 \cdot s^{-3}]$	Disipace turbulentní kinetické energie
$S_{ij}$		Tenzor deformace
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon1}, C_{\varepsilon2}$	[-]	Konstanty modelu k- $\varepsilon$
$T$	[s]	Turbulentní časové měřítko
$\omega$	$[s^{-1}]$	Specifická disipace energie
$\sigma_k, \sigma_\omega, C_{\varepsilon1}, C_{\varepsilon2}$	[-]	Konstanty modelu k- $\omega$
$f_\beta$	[-]	Faktor úprav natažení vírů
$f_\beta^*$	[-]	Faktor úprav volné smykové vrstvy
$y^+$	[-]	Bezrozměrná vzdálenost od stěny



$y$	[m]	Vzdálenost od stěny
$\nu$	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Kinematická viskozita
$\tau_w$	[Pa]	Tečné napětí
$\Gamma$	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Koeficient difuze
W,P,E		Označení středů kontrolních objemů
w,e		Označení hranic kontrolních objemů
MRF		Moving Reference Frame
RBM		Rigid Body Motion
P		Tenzor porézního odporu
$v_s$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Povrchová rychlost
$\chi$	[-]	Porozita chladiče
V,V <sub>f</sub>	[m <sup>3</sup> ]	Objem chladiče a objem tekutiny v něm
P <sub>v</sub> ,P <sub>i</sub>		Tenzor viskózního a porézního odporu
$\Delta p$	[Pa]	Tlaková ztráta
L	[m]	Tloušťka chladiče
I	[%]	Turbulentní intenzita
L <sub>f</sub> ,L <sub>r</sub>	[N]	Vztlak na přední, resp. zadní nápravu
M <sub>f</sub> ,M <sub>r</sub>	[N.m]	Momenty kolem přední, resp. zadní nápravu
$\omega$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost
x <sub>s</sub> ,y <sub>s</sub>	[m]	Souřadnice středu zakřivené domény
XY,XZ,YZ		Označení rovin pro řezy doménou
LIC		Line Integral Convolution
C <sub>px</sub> ,C <sub>pz</sub>	[-]	Tlakový koeficient ve směru x, resp. z