



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# CFD ANALÝZA MONOPOSTU FORMULE STUDENT PŘI PRŮJEZDU ZATÁČKOU

CFD ANALYSIS OF FORMULA STUDENT IN TURN MOTION

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Derka

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Robert Popela, Ph.D.

BRNO 2023



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **David Derka**  
Studijní program: Základy strojního inženýrství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Robert Popela, Ph.D.**  
Akademický rok: 2022/23

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

## **CFD analýza monopostu Formule student při průjezdu zatáčkou**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Soutěžní monopost formule student týmu FSI je každoročně vylepšován a to i z hlediska aerodynamických vlastností. Nedílnou součástí soutěžních jízdních úloh je i zatáčení. Tato práce se bude zabývat analýzou manévru a aerodynamickou optimalizací pro daný režim.

### **Cíle bakalářské práce:**

Provedení CFD analýzy monopostu formule student při jízdě ustálenou zatáčkou. Vyhodnocení možností snížení odporu a zvýšení přítláčné síly a návrh úprav vozu.

### **Seznam doporučené literatury:**

Katz, J., Race Car Aerodynamics: Designing for Speed, Bentley Publishers, ISBN 0837601428

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Formule Student je studentská soutěž, kde se každoročně vyvíjejí nové závodní monoposty. Cílem je co nejvíce snížit čas na kolo a k tomu z velké části napomáhá kvalitně navržený aerodynamický paket, ten umožňuje generovat přítláčnou sílu za pomoci které je vozidlo schopno projet zatáčky ve vyšší rychlosti. Tato práce analyzuje průjezd konkrétního monopostu v ustáleném stavu zatáčení za pomoci CFD. Nejdříve je popsán průjezd vozidla zatáčkou a následně je rozebrána samotná CFD analýza. Výsledky odhalují nedostatky aktuálního aerodynamického paketu a je navrženo jejich řešení.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Aerodynamika, Formule Student, Computational Fluid Dynamics (CFD), Průjezd zatáčkou

## ABSTRACT

Formula Student is a student competition, where there are new racing cars developed each year. The goal is to minimize lap time which can be done by well developed aerodynamic packet, which allows to generate downforce and allows the car to go faster through corners. This thesis analyzes steady-state cornering of specific car using CFD. First, the cornering theory is described and then the process of CFD simulation. Results show imperfections of the current aerodynamic packet and possible solutions are proposed.

## KEYWORDS

Aerodynamics, Formula Student, Computational Fluid Dynamics (CFD), Cornering

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DERKA, David. *CFD analýza monopostu Formule student při průjezdu zatáčkou*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149368>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Robert Popela.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Roberta Popely Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

.....

David Derka

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Robertu Popelovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné připomínky během vypracovávání této bakalářské práce a všem, kteří se jakýmkoli způsobem podíleli na vypracování této práce. Také bych chtěl poděkovat projektu MetaCentrum, který poskytl výpočetní zdroje.



# OBSAH

Úvod .....	10
<b>1 Formule student .....</b>	<b>11</b>
1.1 Soutěž Formule Student .....	11
1.2 Aerodynamika ve formuli student .....	11
1.3 Monopost Dragon E3 .....	11
1.3.1 Přední křídlo .....	12
1.3.2 Podlaha .....	12
1.3.3 Zadní křídlo .....	12
<b>2 Průjezd vozidla zatáčkou .....</b>	<b>13</b>
2.1 Dynamika vozidla .....	13
2.2 Aerodynamika .....	13
2.2.1 Vliv aerodynamiky na vozidlo .....	14
2.2.2 Proudění okolo vozidla .....	14
2.2.3 Přízemní efekt .....	16
<b>3 CFD .....</b>	<b>18</b>
3.1 Geometrie .....	18
3.2 Doména .....	18
3.3 Síť .....	19
3.3.1 Povrchová síť .....	20
3.3.2 Prismatické vrstvy .....	21
3.3.3 Objemová síť .....	22
3.4 Modelování turbulence .....	23
3.4.1 Model $k - \epsilon$ .....	24
3.4.2 Model $k - \omega$ .....	24
3.4.3 Model $k - \omega SST$ .....	24
3.5 Okrajové podmínky .....	24
3.6 Prostorová diskretizace .....	25
3.7 Inicializace řešiče .....	25
<b>4 Výpočty .....</b>	<b>26</b>
4.1 Kvalita sítě .....	26
4.2 Vymezení analýzy .....	27
4.3 Vyhodnocení výsledků .....	28
<b>Závěr .....</b>	<b>32</b>
<b>Použité informační zdroje .....</b>	<b>33</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>35</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>36</b>
<b>Seznam grafů .....</b>	<b>37</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>38</b>

## ÚVOD

Aerodynamika je v dnešní době již nedílnou součástí každého vývoje vozidla a Formule Student není výjimkou. Jedná se převážně o snížení aerodynamického odporu v rámci úspory paliva, dále také jde i o chlazení nebo interní aerodynamiku.

U závodních vozidel je ale především důležitý aerodynamický přítlak, který má velký vliv na maximální potenciál vozidla. Touto silou se navyšuje celková normálová síla na pneumatikách a tím i maximální třecí síla, které je vozidlo schopno docílit během akcelerace, brzdění a převážně při zatáčení.

I přes poměrně nízké rychlosti, ve kterých se monoposty Formule Student pohybují, má aerodynamika velký vliv na výsledky závodů. Tým TU Brno Racing je stále čerstvým přírůstkem do kategorie formulí s elektrickým pohonem, nicméně tým ukázal, že má na to se připojit k světové špičce, a proto je zapotřebí posouvat i aerodynamiku monopostu.

Tato práce se bude zabývat přínosem aerodynamiky při zatáčení a tím, jak se změní charakter proudění oproti jízdě po rovině.

# 1 FORMULE STUDENT

## 1.1 SOUTĚŽ FORMULE STUDENT

Cílem soutěže Formule Student (FS) je postavit jednomístné závodní vozidlo formulového typu se kterým mají týmy možnost mezi sebou soupeřit na mezinárodních závodech. Členové studentského týmu tak čelí výzvám nad rámec studia a získávají zkušenosti v návrhu a výrobě komponent, a to i ve spojení s ekonomickou stránkou tohoto procesu. Jednotlivá vozidla nejsou hodnoceny jenom výkonností na trati, ale jsou také hodnoceny vědomosti a zkušenosti jednotlivých členů ve statických disciplínách.

Soutěž se dělí do dvou kategorií, Combustion – pro formule se spalovacím motorem a Electric – pro formule jezdící na elektrický pohon. Do obou těchto kategorií patří podkategorie Driverless, kdy týmy mohou získat body navíc pokud jsou schopni projet některé disciplíny autonomně. [1]

## 1.2 AERODYNAMIKA VE FORMULI STUDENT

První rozmach vývoje aerodynamiky v FS se objevil kolem roku 2013, kdy velká část týmů začala přidávat na své monoposty aerodynamické profily pro zvýšení normálové síly mezi koly a vozovkou. To také vedlo k snižování aerodynamického odporu za cílem zvýšení akcelerace a snížení spotřeby. První aeropaket týmu TU Brno Racing se objevil na monopostu Dragon 4 a od té doby bylo v týmu navrženo celkem osm aeropaketů. Za tu dobu prošel nesčetně iteracemi a velkými koncepčními změnami vlivem vývoje pravidel.



Obrázek 1 Monopost Dragon 4 [2]

## 1.3 MONOPOST DRAGON E3

Dragon E3 (ED3) je v pořadí celkově již třináctý monopost týmu TU Brno Racing a třetí monopost s elektrickým pohonem. První elektrický monopost týmu TU Brno Racing se umístil ve světovém žebříčku na 36. místě a druhý monopost na 30. místě [3]. Cílem návrhu aeropaketu ED3 je optimalizace proudění okolo monopostu pro průjezd zatáčkou. Tím, že tratě FS jsou až z 85 % tvořeny zatáčkami, tak by tento cíl měl mít vysoký přínos pro výkon monopostu.

### 1.3.1 PŘEDNÍ KŘÍDLO

Přední křídlo je první, co přichází do kontaktu se vzduchem, definuje nejen přítlak na přední nápravě, ale také proudění okolo dalších částí monopostu. Tím, že se nachází blízko zemi je možné díky přízemnímu efektu generovat zvýšenou přítlačnou sílu, na druhou stranu, čím vyšší přítlak je generován tím víc dochází k rozrušení proudění za křídlem a tím snížené efektivitě dalších aerodynamických prvků, případně chlazení.

### 1.3.2 PODLAHA

Vlivem sníženého tlaku pod monopostem je generován přítlak, tím, že se jedná o největší část aeropaketu, tak se také jedná o část s největším přínosem k celkovému přítlaku. Zároveň má podlaha malý vliv na rozložení aerodynamických sil mezi přední a zadní nápravou a neovlivňuje ostatní aerodynamické prvky.

### 1.3.3 ZADNÍ KŘÍDLO

Zadní křídlo oproti přednímu zvyšuje přítlačnou sílu převážně na zadní nápravě a tím vyrovnává rozložení přítlaku. Jedná se o aerodynamický prvek, který se nachází za všemi ostatními, a proto proudění okolo křídla je velmi ovlivněno aerodynamikou zbytku vozidla a převážně řidiče.

## 2 PRŮJEZD VOZIDLA ZATÁČKOU

### 2.1 DYNAMIKA VOZIDLA

Pneumatika je jediná část vozidla, která přichází do kontaktu s vozovkou, a tedy i jediná část, na které vzniká síla uvádějící vozidlo do pohybu, případně měnící směr vozidla [4]. Tato síla je závislá na koeficientu tření a normálové síle, z toho plyne, že navýšením normálové síly jsme schopni navýšit sílu mezi pneumatikou a vozovkou a dle druhého Newtonova pohybového zákona i zrychlení kol, respektive celého vozidla. Toto zrychlení může být podélné, příčné, nebo kombinací těchto dvou. V této práci bude brán v potaz pouze stav ustáleného průjezdu zatáčkou, takže nebude bráno v potaz podélné zrychlení vozu a příčné zrychlení bude uvažováno jako konstantní. To, jakou rychlostí je vozidlo schopno projet daný poloměr zatáčky je dáno maximálním bočním zrychlením, které je právě dáno maximální třecí silou na pneumatikách [4]. Rychlost při zatáčení lze dopočítat ze vztahu

$$a = \frac{v^2}{r}, \quad (1)$$

kde  $a$  je příčné zrychlení,  $v$  je rychlost a  $r$  je poloměr zatáčení.

Při konstantním poloměru zatáčení můžeme pohyb vozidla uvažovat jako rotační pohyb okolo okamžité osy otáčení, která má v tomto případě konstantní polohu. Tato osa je kolmá na vozovku a nachází se na průsečíku kolmic k jednotlivým vektorům rychlosti vozu, jinými slovy se jedná o pól pohybu. Pro nalezení této osy lze využít směrové úchytky těžiště (úhel mezi vektorem rychlosti a podélnou osou vozidla) a poloměru zatáčky. Směrová úchytky těžiště je dána parametry vozu a lze ji na vozidle změřit a poloměr zatáčky je dán tratí. [5]

Během zatáčení dochází k přesunu hmoty z vnitřní nápravy na nápravu vnější. To má za následek klopení rámu vozidla. Změna síly mezi vnitřním a vnějším kolem je dána vztahem

$$LT = \frac{W \cdot h \cdot a}{t}, \quad (2)$$

kde  $W$  je hmotnost vozidla,  $h$  je výška těžiště,  $a$  je boční zrychlení a  $t$  je rozchod kol dané nápravy.

### 2.2 AERODYNAMIKA

Při obtékání vzduchu kolem vozidla dochází vlivem vnějšího tvaru k změnám rychlosti a tlaku proudícího vzduchu. Vlivem rozdílných tlaků vzniká síla působící na vozidlo. Tato síla se v praxi rozkládá na tři složky, odporovou sílu působící v podélném směru, vztlakovou působící ve vertikálním směru a boční působící v příčném směru [6]. Tyto silové složky se dále normalizují do koeficientů dle vztahu

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S}, \quad (3)$$

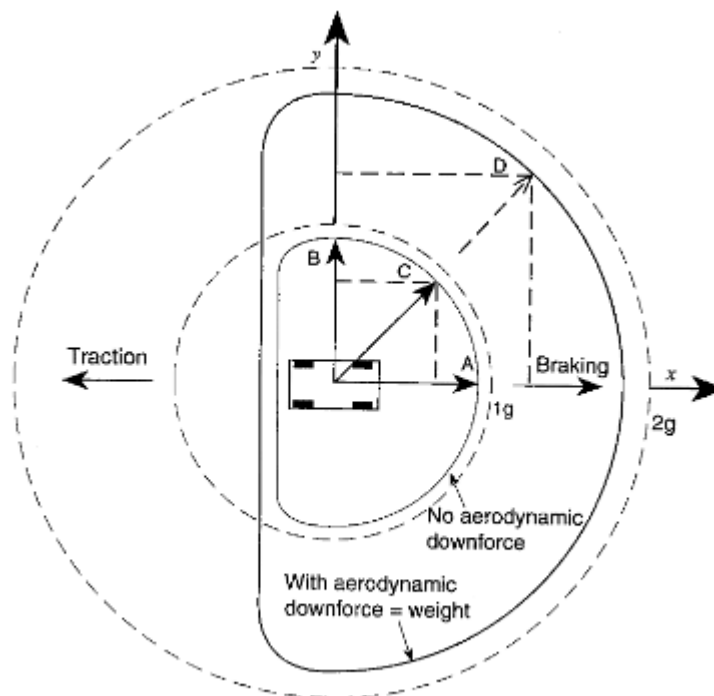
kde  $F$  je daná složka síly,  $\rho$  je hustota,  $v$  je rychlost korespondující síle a  $S$  je referenční plocha.

Jakožto referenční plocha se bere kolmý průmět, u vozidel nejčastěji čelní. Z tohoto vzorce lze také vidět, že aerodynamická síla je závislá na druhé mocnině rychlosti.

### 2.2.1 VLIV AERODYNAMIKY NA VOZIDLO

Odporová síla má záporný vliv na maximální rychlost, zrychlení a energetickou spotřebu, a proto je při návrhu vozidla vždy cílem mít koeficient odporu co nejnižší. [7]

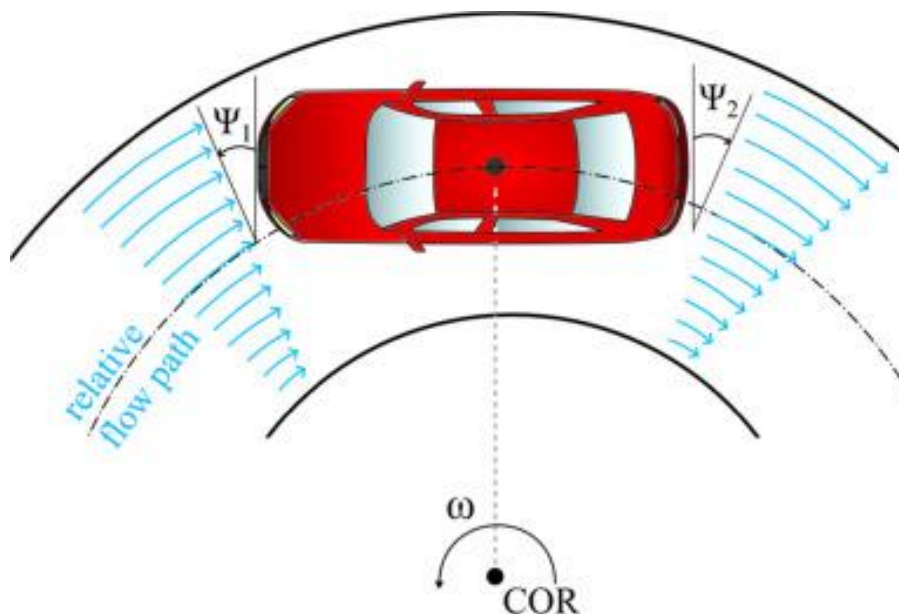
Vztlková síla nadlehčuje vozidlo a tím snižuje normálovou sílu na jednotlivých pneumatikách, to může vést ke snížené stabilitě ve vyšších rychlostech. U závodních vozidel je snaha generovat záporný vztlak, který umožňuje agresivnější brzdění a projetí zatáčky ve vyšší rychlosti [7].



Obrázek 2 Maximální síla přenesená pneumatikou s přitlakem a bez přitlaku [7]

### 2.2.2 PROUDĚNÍ OKOLO VOZIDLA

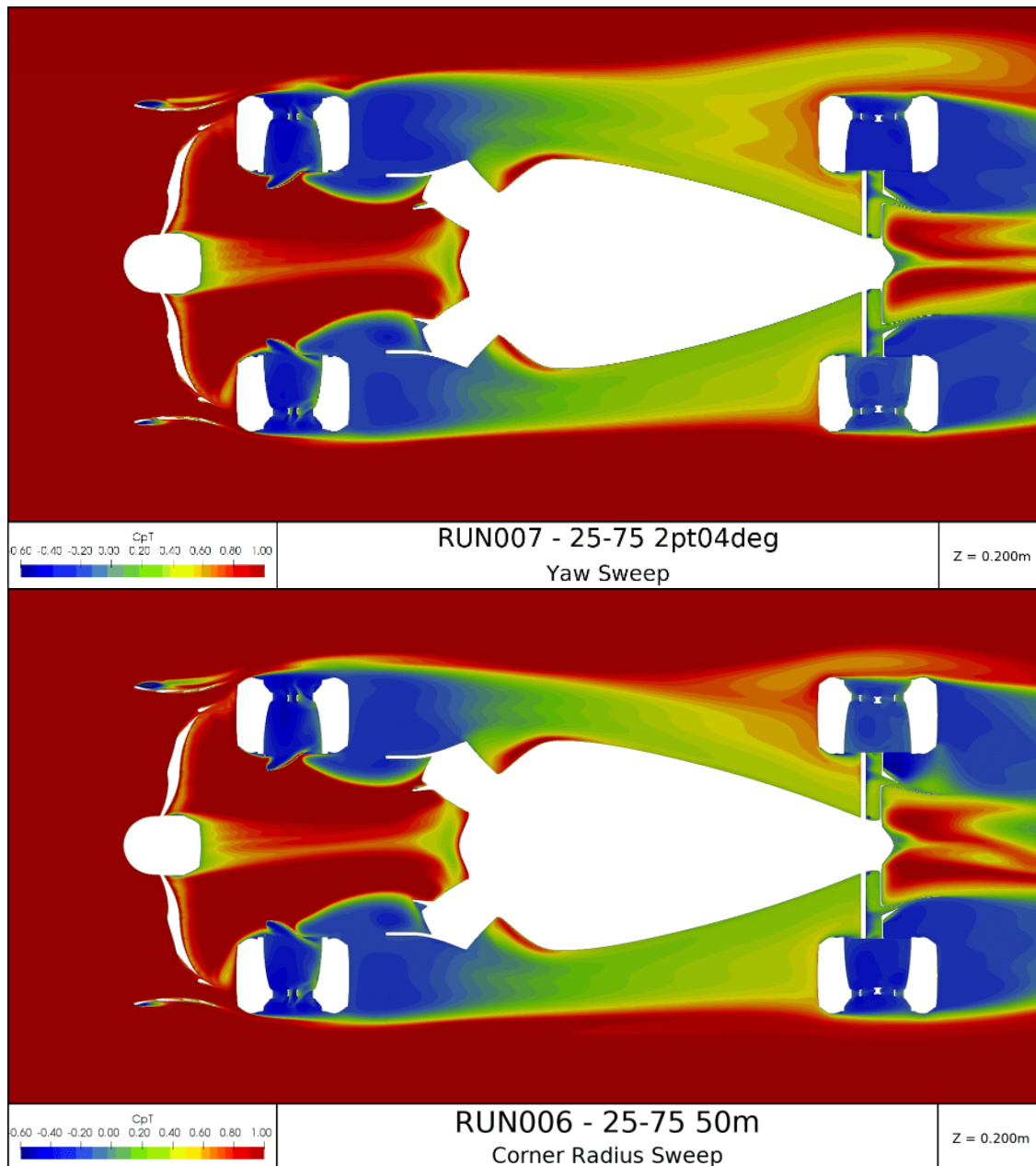
Na obrázku 3 je zobrazena relativní trajektorie proudění vůči vozidlu, je vidět, že na vnitřní straně je nižší rychlost než na straně vnější a také se mění směr vektoru rychlosti. To má za následek rozdíl tlaku mezi vnitřní a vnější stranou vozu a vzniká tak boční síla.



Obrázek 3 Proudění okolo vozidla projíždějící zatáčkou [8]

U vozidel s otevřenými koly dochází k velkému ovlivnění proudění právě rotací kol, vzniká za nimi úplav, který velmi ovlivňuje další aerodynamické prvky. Při průjezdu zatáčkou je tento vliv mnohem výraznější na vnitřní straně vozidla, kdy úplav za předním kolem postupuje ke středu vozidla, kdežto na vnější straně od vozidla. [7]

Ve výpočtech se často v praxi nahrazuje zakřivené proudění natočením vozidla o určitý úhel vůči proudícímu vzduchu. Jak je možno vidět na obrázcích níže, charakter proudění je velmi rozdílný, převážně v zadní části vozidla, a pro získání věrohodných výsledků je toto zjednodušení nevhodné. [9]

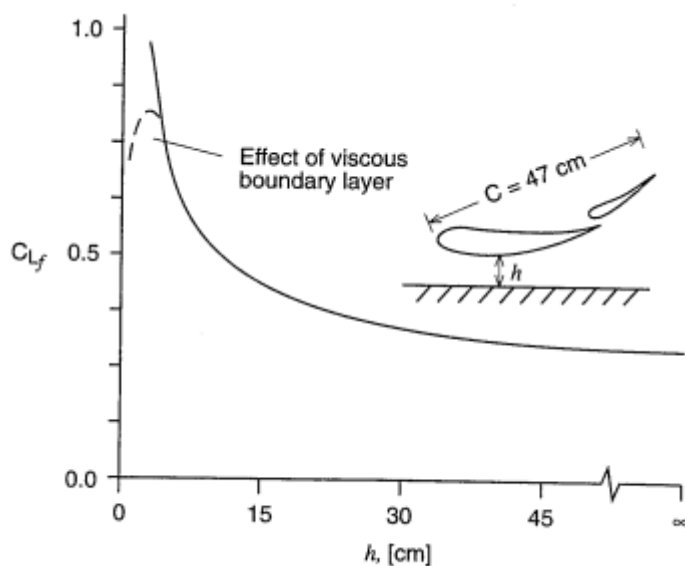


Obrázek 4 Proudění okolo vozu Formule 1 při natočení vozidla (nahore) a při zakřiveném proudění (dole) [10]

### 2.2.3 PŘÍZEMNÍ EFEKT

U křídla s konečnou délkou dochází vlivem rozdílu tlaků mezi horní a spodní částí k vytvoření víry na koncích křídla, které razantně zvyšují odpor křídla. Při přiblížení k zemi jsou tyto víry potlačovány a tím snižován odpor a také zvyšován přítlak.





Obrázek 5 Závislost koeficientu vztlaku na vzdálenosti od země [7]

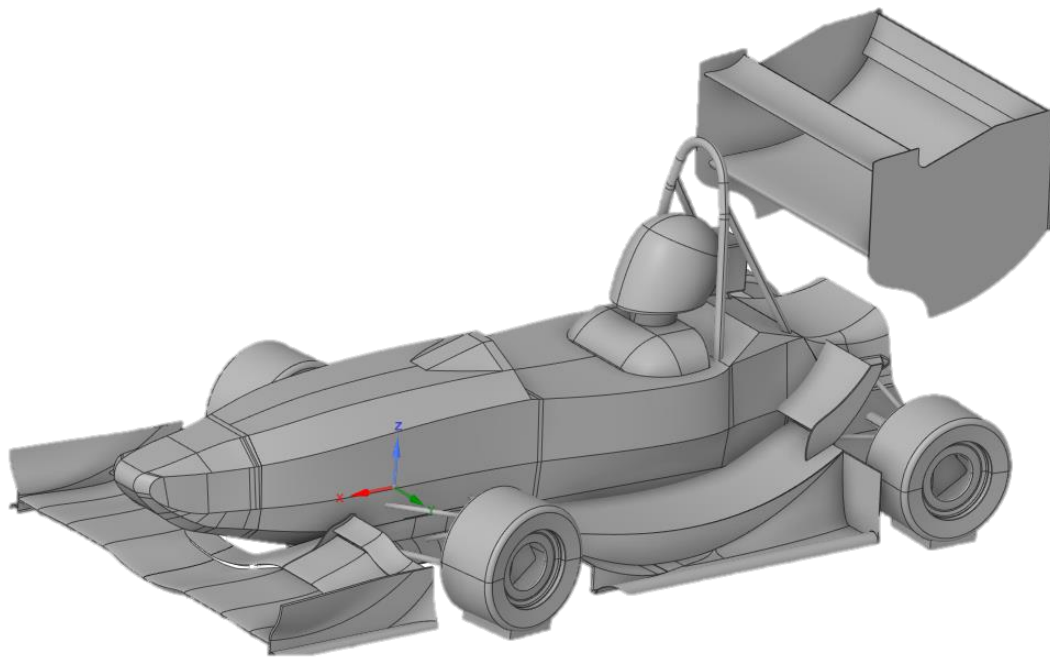
Se snižující se výškou přítlak exponenciálně roste, ale při příliš malé výšce dochází k prudkému poklesu přítlaku (viz. obrázek 5). Z hlediska jízdních vlastností se jedná o velmi nežádoucí jev, pokud například během brzdění dojde k vysokému poklesu přítlaku na přední nápravě, vozidlo se stává nedotáčivým a řidič není schopen projet zatáčkou. [7]

## 3 CFD

### 3.1 GEOMETRIE

Z hlediska urychlení výpočtu se běžně v praxi model zjednodušuje na místech, které na požadovaný výsledek nemají vliv, nebo je zanedbatelný. Pro potřeby této práce byla zjednodušena geometrie těhlic uvnitř kol a byl zanedbán prostor uvnitř šasi, ve kterém během jízdy k proudění nedochází.

V závislosti na poloměru zatáčení bude mít monopost natočené přední kola a naklopenou karoserii. Ze znalosti polohy osy otáčení jsme schopni dopočítat směr vektoru rychlosti předních kol a při úvaze jejich směrové úchyly i úhel jejich natočení.

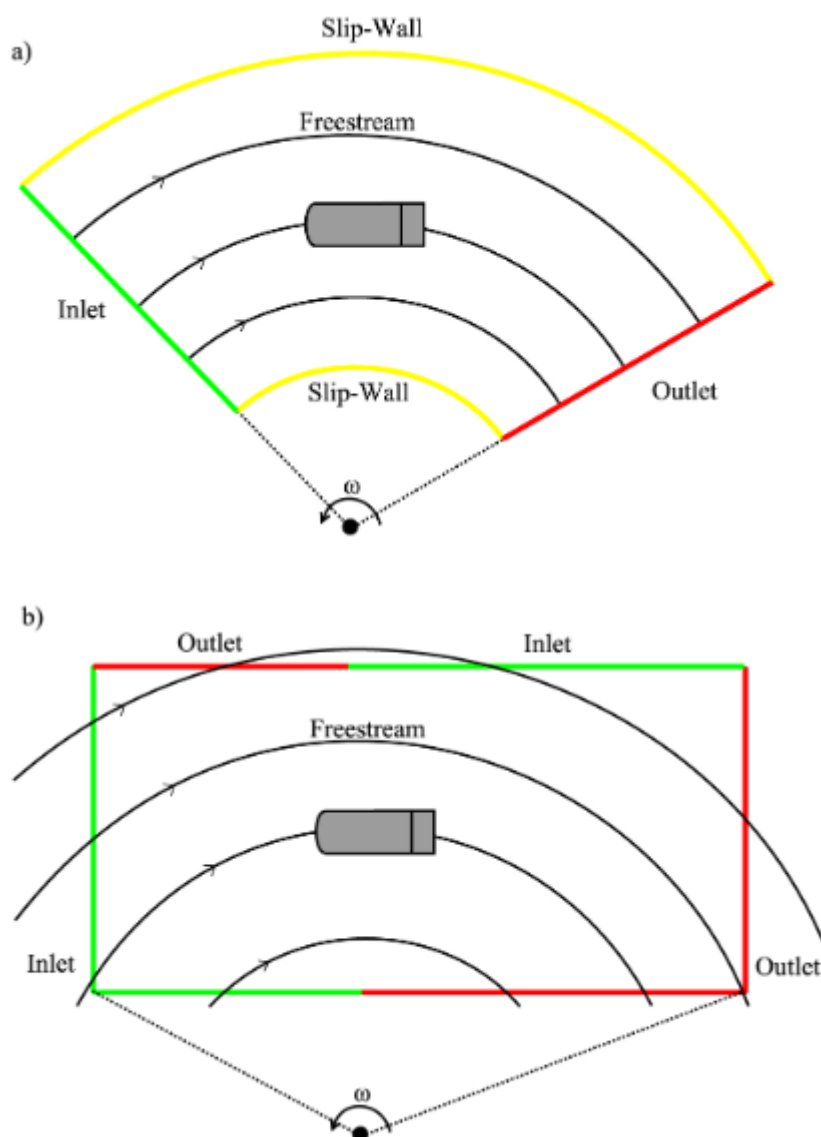


Obrázek 6 Zjednodušená geometrie monopostu

### 3.2 DOMÉNA

Vzhledem k tomu, že pohyb monopostu v zatáčce lze popsat jako rotační pohyb okolo okamžité osy otáčení, tak jako doménu je možno použít kruhovou doménu se středem v této ose. Použitím tohoto tvaru je ale doména limitována pouze na jeden poloměr zatáčení.

Druhou možností je využití obdélníkové domény, kde vhodnou úpravou okrajových podmínek lze dosáhnout požadovaného charakteru proudění. Tímto způsobem je možno změnit poloměr zatáčení pohybem přesunem středu rotace v příslušné okrajové podmínce.



Obrázek 7 Porovnání dvou typů domén pro modelování zatáčení [11]

V obou variantách platí, že doména musí být dostatečně velká, tak aby okrajové podmínky neměli vliv na charakter proudění, v praxi se běžně používá pětikrát délka vozu dopředu a desetkrát délka vozu směrem dozadu. V rámci této práce je využito obdélníkové varianty domény.

### 3.3 Síť

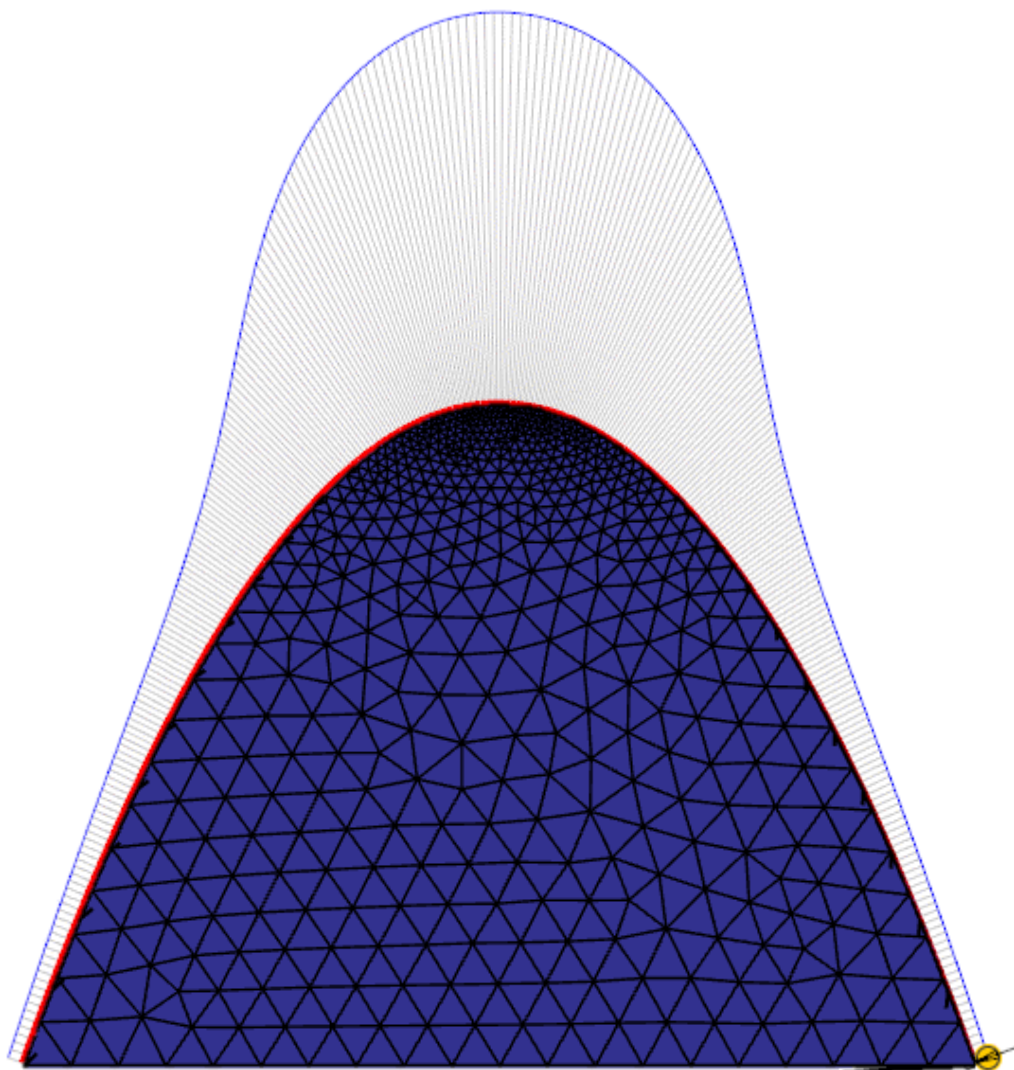
Pro samotný výpočet je potřeba vytvořit výpočtovou síť. Síť se skládá z jednotlivých buněk a pro každou z nich je během výpočtu řešena soustava rovnic popisující proudění tekutin. Pro věrohodné výsledky a robustnost výpočtu je kvalita sítě velmi důležitá. Síť je zapotřebí mít jemnou hlavně v blízkosti simulované geometrie, dál od ní nedochází k velkým změnám v proudění a je možno využít větší buňky pro urychlení výpočtu. [12]

### 3.3.1 POVRCHOVÁ SÍŤ

Pro vytvoření celé sítě je zapotřebí nejprve vytvořit takzvanou „povrchovou síť“, tzn. dvourozměrnou síť na jednotlivých plochách. Povrchová síť má hlavní vliv na velikost buněk ve výsledné síti a také na to, jak kvalitně budou modelovány jednotlivé plochy geometrie.

#### ZJEMNĚNÍ ZAKŘIVENÍ

V mnoha případech má geometrie proměnlivé zakřivení, pokud bychom použili jednotnou velikost buněk, tak by síť byla zbytečně jemná. Pro tento případ lze použít tzv. „curvature sizing“, pro který se definuje minimální a maximální velikost buňky a normálový úhel. Na obrázku níže je povrchová síť a vykresleno zakřivení. Je možno vidět, že čím vyšší zakřivení, tím menší velikost buněk. Tato funkce je vhodná hlavně u aerodynamických profilů, kdy na náběžné hraně jsem schopni mít síť velmi jemnou.



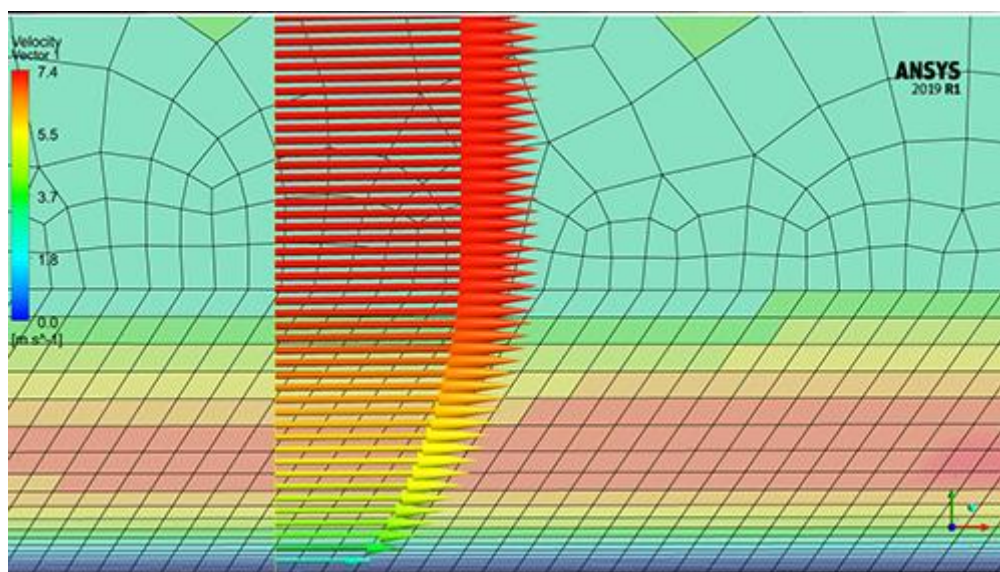
Obrázek 8 Ukázka sítě se zjemněným zakřivením

## ZJEMNĚNÍ HRAN

U geometrií, na kterých se nachází hrany o malých rozměrech je zapotřebí mít dostatečně malé buňky, aby se hrany nedeformovali. Pomocí funkce proximity sizing lze přednastavit minimální počet buněk, kterého bude dosaženo. Je vhodné, aby na každé stěně bylo aspoň tři buněk.

### 3.3.2 PRISMATICKÉ VRSTVY

Při proudění kolem stěn se u povrchu generuje mezní vrstva. Pro detailní popsání rychlostního profilu v blízkosti stěny je třeba mít síť dostatečně jemnou, k tomu se využívají takzvané prismatické vrstvy.



Obrázek 9 Použití prismatických vrstev v mezní vrstvě [13]

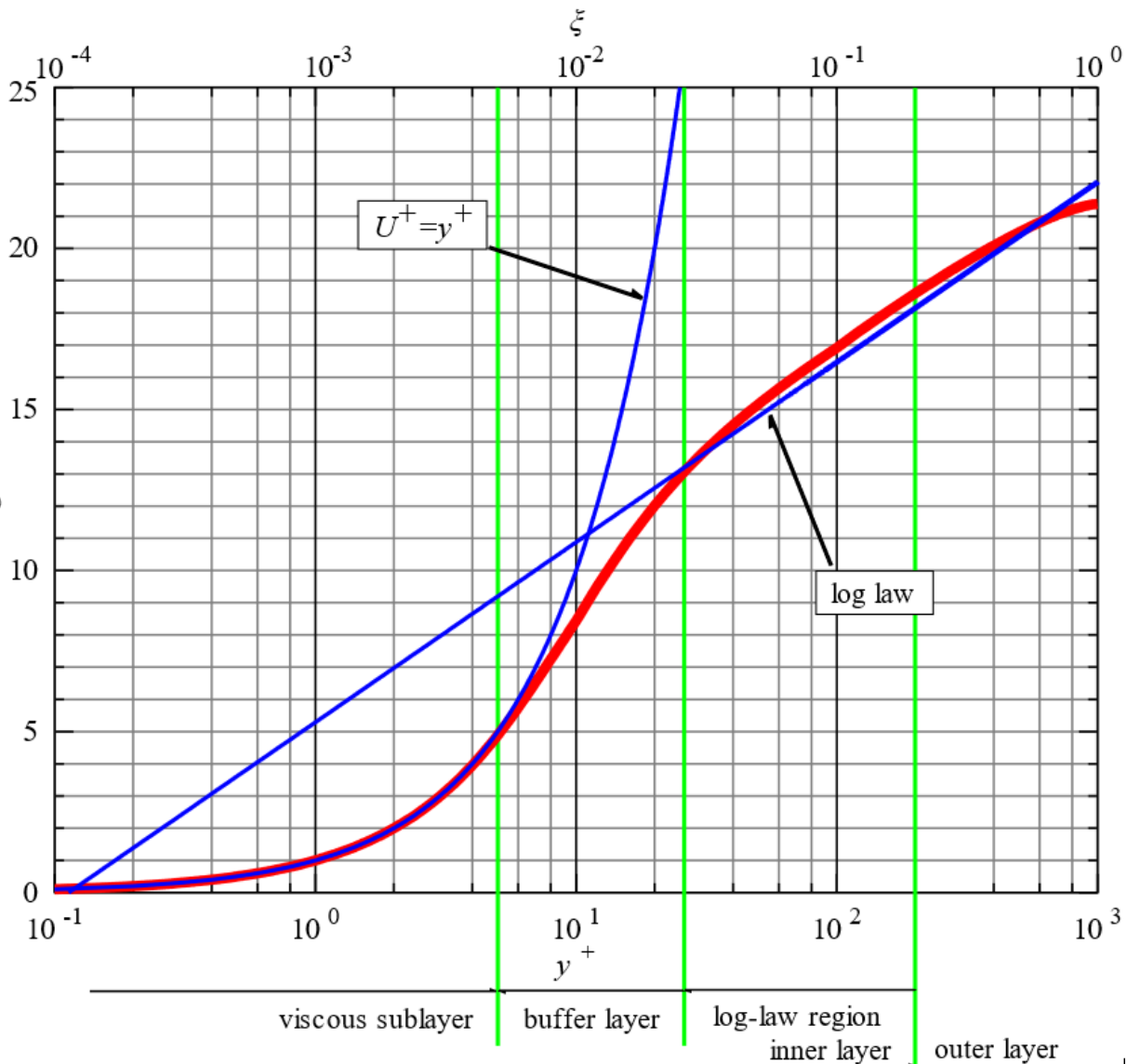
Pro popis sítě v blízkosti stěny se využívá bezrozměrná veličina  $y^+$ , která se vypočítá dle vzorce:

$$y^+ = \frac{\Delta s \cdot U_{fric} \cdot \rho}{\mu}, \quad (4)$$

kde  $\Delta s$  je výška vrstvy,  $U_{fric}$  je smyková rychlost,  $\rho$  je hustota vzduchu a  $\mu$  je dynamická viskozita [14].

Výška první vrstvy je jediná veličina, která se dá upravit nastavením sítě, zbylé parametry jsou pro konkrétní úlohu dány. Z rovnice lze vyjádřit výšku první vrstvy a dosazením požadovaného  $y^+$  ji odhadnout. Jedná se pouze o odhad a pro dosažení požadovaného  $y^+$  je zapotřebí zkontrolovat, že bylo po dokončení výpočtu odhadu dosaženo.

V grafu dole je znázorněna závislost bezrozměrné rychlosti v závislosti na bezrozměrné výšce vrstvy v semilogaritmickém měřítku. V první části roste rychlost tekutiny lineárně se vzdáleností od povrchu, kdežto s rostoucí vzdáleností od stěny přechází v logaritmickou závislost [15]. Oblast mezi hodnotami  $y^+$  5 a 30 se nazývá přechodovou oblastí, rychlostní profil v této oblasti není ani lineární ani logaritmický a obecně se nedoporučuje mít výšku první vrstvy v této oblasti.



Obrázek 10 Závislost normalizované rychlosti  $U^+$  na normalizované vzdálenosti od stěny  $y^+$  [16]

### 3.3.3 OBJEMOVÁ SÍŤ

Na základě povrchové sítě se dále generuje síť objemová, která je tvořena trojrozměrnými buňkami, kde u povrchu se nachází již zmíněné prismatické vrstvy a dále od povrchu lze využít několik tvarů buněk. V této práci je využito tzv. „Poly-Hexcore“ sítě, kdy blíže u povrchu se generují mnohostěny pro hladké pokrytí geometrie a v prostoru se generují krychle pro zjednodušení a urychlení výpočtu. [12]

Všechny výše zmíněné parametry ovlivňují jak robustnost výpočtu, tak i věrohodnost výsledků. Pro kvalitní výpočet je nutné tyto parametry zvolit tak, aby neovlivnili výsledky. Obecně platí, že čím jemnější síť, tím přesnější výsledky, ale to má za následek vyšší výpočetní nároky a čas, proto je vhodné najít optimální počet buněk, tak aby výsledky byly přesné a výpočetní čas nebyl zbytečně dlouhý. [17]

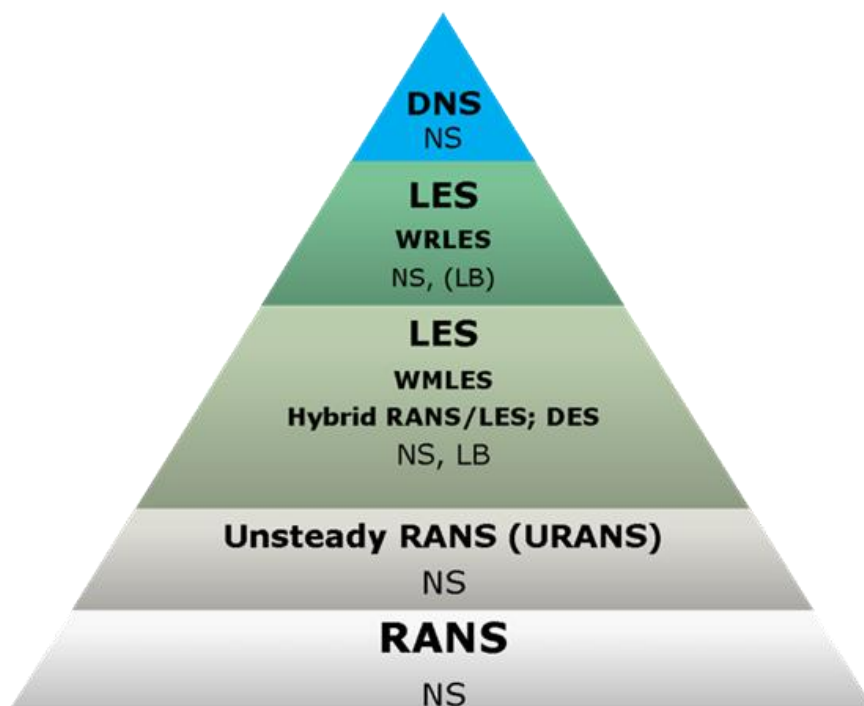
Jakožto základní posouzení kvality je vhodná vizuální kontrola, tzn. vykreslit síť a zkontrolovat, jestli nedošlo k deformaci geometrie vlivem malého počtu buněk. Takhle je sice



možno odhalit jisté nedokonalosti, nicméně se jedná jen o prvotní posouzení a pro přesnější porozumění je nutné provést několik zkušebních simulací pro porovnání číselných hodnot a charakteru proudění. [17]

### 3.4 MODELOVÁNÍ TURBULENCE

Turbulence v CFD lze modelovat několika způsoby zobrazenými na obrázku. Úplně nahoře stojí metoda Přímého numerického výpočtu (DNS, Direct Numerical Solution), kdy jsou přímo řešeny Navier-Stokesovy rovnice. I přesto, že se jedná o nejpřesnější metodu, tak se s ní v praxi nesečkáme z důvodu nutnosti velmi jemné výpočetní sítě a tím pádem příliš vysoké hardwarové náročnosti. Méně náročným přístupem je metoda Large Eddy Simulation (LES), kdy jsou rovnice proudění přímo řešeny pro velké víry a malé víry jsou modelovány, to značně snižuje náročnost na jemnost sítě a tato metoda je v praxi poměrně běžná, protože nabízí dobrou přesnost a mnohem nižší výpočetní nároky než metoda DNS. Nejméně náročnou metodou je metoda Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), kde rovnice proudění jsou řešeny pro v čase zprůměrované hodnoty, to umožňuje simulaci řešit stacionárně, což značně snižuje čas na výpočet. Kvůli tomuto zjednodušení přibývají do rovnic tzv. Reynoldsova napětí, které je potřeba řešit zvlášť v doplňkových rovnicích za pomoci turbulentních modelů. [18]



Obrázek 11 Metody modelování turbulence vzestupně dle výpočetní náročnosti [19]

Vzhledem k tomu, že cílem aktuálního problému je zjištění proudění okolo monopostu při ustáleném stavu zatáčení, tak byl zvolen přístup RANS z důvodu urychlení výpočtu a s ohledem na výpočetní náročnost. Nicméně výsledky simulací řešené touto metodou jsou vysoce ovlivněny volbou turbulentního modelu.

### 3.4.1 MODEL $k - \epsilon$

Jedná se o dvourovnicový model založen na transportních rovnicích pro turbulentní kinetickou energii a míru její disipace. Model je velmi populární převážně díky širokému spektru aplikací, nicméně model selhává v situacích s nepříznivým tlakovým gradientem a v místech separace mezní vrstvy. [20] [21]

### 3.4.2 MODEL $k - \omega$

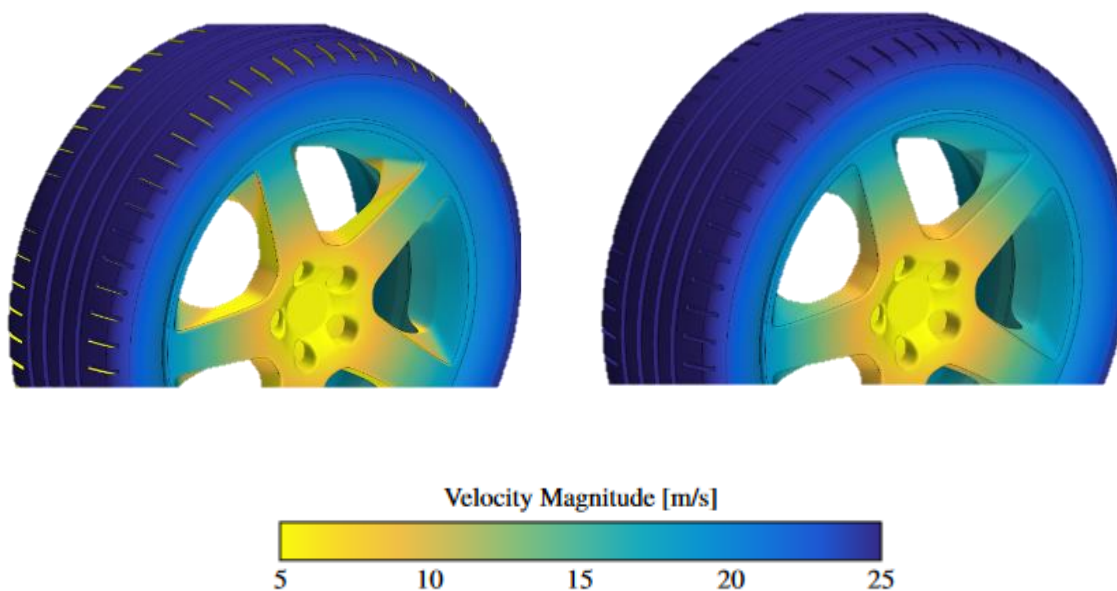
Opět se jedná o dvourovnicový model, který je naopak vhodný u predikování separace mezní vrstvy, ale ve volném proudění je velmi citlivý na hodnotách kinetické energie a specifické míry disipace energie. Z tohoto důvodu není tento model běžně využíván a používají se jeho varianty. [20] [21]

### 3.4.3 MODEL $k - \omega SST$

Tento model kombinuje výhody modelů  $k - \epsilon$  a  $k - \omega$ , kdy v blízkosti stěn jsou Reynoldsova napětí řešena pomocí  $k - \omega$  a dále od stěn jsou řešeny pomocí  $k - \epsilon$ . Jedná se o jeden z nejrozšířenějších modelů pro aerodynamické aplikace. Oproti použití standardního  $k - \epsilon$  je nutné pro kvalitní vykreslení mezní vrstvy dosáhnout  $y^+ < 5$ . [20] [21]

## 3.5 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

U stacionárních simulací existují dva způsoby modelování rotace. První způsob je předepsání rychlosti na stěnu. Tento způsob umožňuje předepsat tečnou rychlost na jednotlivé povrchy stěn, problémem je, že nelze předepsat normálovou složku rychlosti, což v mnoha případech působí problém u povrchů, které nemají normálu kolmou na osu rotace [8]. Druhou je pak metoda pohyblivého referenčního souřadného systému (MRF, Moving Reference Frame).



Obrázek 12 Porovnání předepsání rychlosti na stěnu (vlevo) a metody pohyblivého referenčního souřadného systému (vpravo) [8]

Rozdíl u špatně předepsané okrajové podmínky je především u paprsků kol a u axiálních drážek v pneumatice (viz. obrázek 12). Předepsaná rychlost je v těchto místech aplikovaná



tečně, ale měla by být normálně k ploše. Z tohoto plyne, že obě metody mají srovnatelné výsledky pouze když jsou správně předepsány, s tím, že MRF má mnohem širší využití s cenou komplikací především při tvorbě sítě. [8]

Z výše uvedených důvodů je pro samotný průjezd zatáčkou celého monopostu nutné využít metody MRF, nicméně kola během jízdy rotují okolo své osy a pro jejich geometrii je předepsání rychlosti na jejich stěny dostačující.

### 3.6 PROSTOROVÁ DISKRETIZACE

Během CFD výpočtu se jednotlivé veličiny počítají pro střed buňky, ale v rámci výpočtu jsou důležité i gradienty těchto hodnot, k jejich získání se využívá prostorových diskretizačních schém. Tyto schémy využívají interpolace mezi aktuální buňkou a buňkou následující po směru proudění, proto se jim také říká Upwind discretization schemes. Mezi nejzákladnější patří diskretizace prvního a druhého řádu. [20] [21]

Při diskretizaci prvního řádu je uvažována hodnota na stěně rovna hodnotě ve středu buňky. Jedná se o metodu s prvním stupněm přesnosti, tím je tato metoda velmi rychlá a robustní, ale výsledky běžně bývají nepřesné, v případě, že je proudění zarovnané s buňkami tak je přesnost dostatečná, ale u obecně orientovaných buněk není tuto možnost vhodné využívat. [22]

Diskretizace druhého řádu využívá pro získání hodnoty na stěně lineární interpolace. Tato metoda je druhého stupně přesnosti, což má za následek delší výpočetní čas. V mnoha případech dochází při použití druhého řádu k problémům s konvergencí, proto je vhodné začít simulaci s diskretizací prvního řádu a po určitém počtu iterací přejít na druhý řád. [22]

### 3.7 INICIALIZACE ŘEŠIČE

Pro spuštění simulace je zapotřebí provést inicializaci, jedná se víceméně o prvotní odhad řešení, ze kterého bude numerický výpočet vycházet. Vhodnou inicializací je možné snížit počet iterací potřebných k dosažení konvergence. [23]

Nejjednodušším způsobem je standardní inicializace, kdy je do všech buněk dosazena stejná hodnota. Jedná se o jednoduchý a rychlý způsob vhodný pro jednoduché geometrie.

Další možností je hybridní inicializace, která poskytuje odhad rychlostního a tlakového pole v doméně. Je vhodná pro širokou škálu aplikací a v praxi je hojně rozšířená. Při aplikaci na aktuální úlohu docházelo k problémům s konvergencí a výsledky byly nereálné, proto bylo potřeba využít tzv. „Full Multigrid inicializace“, která je vhodná pro rotující proudění za cenu delšího času inicializace [20].

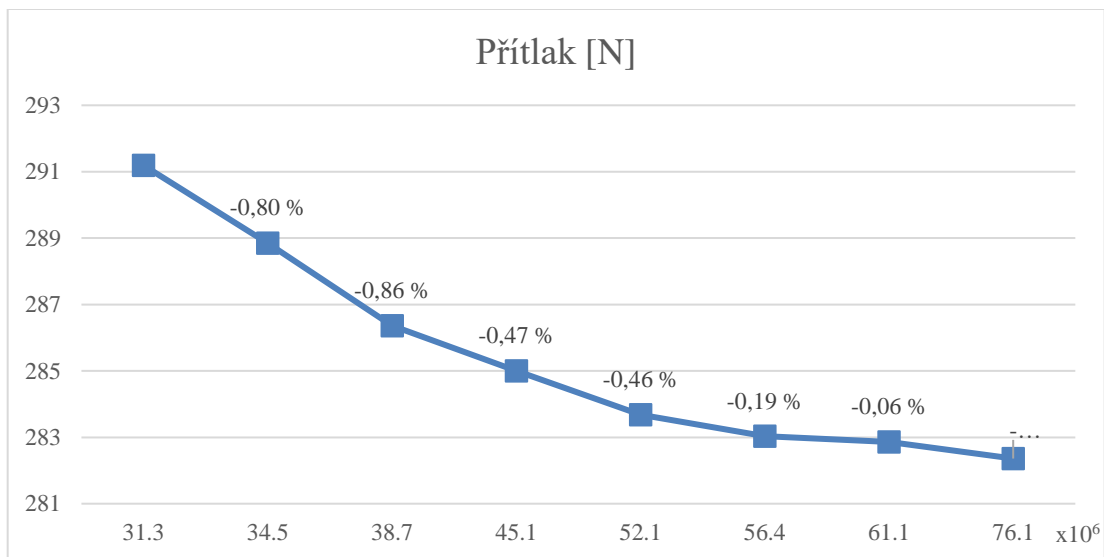
Další úlohy byly poté inicializovány interpolací výsledků z první simulace, což mělo za následek výrazné snížení výpočetního času.

## 4 VÝPOČTY

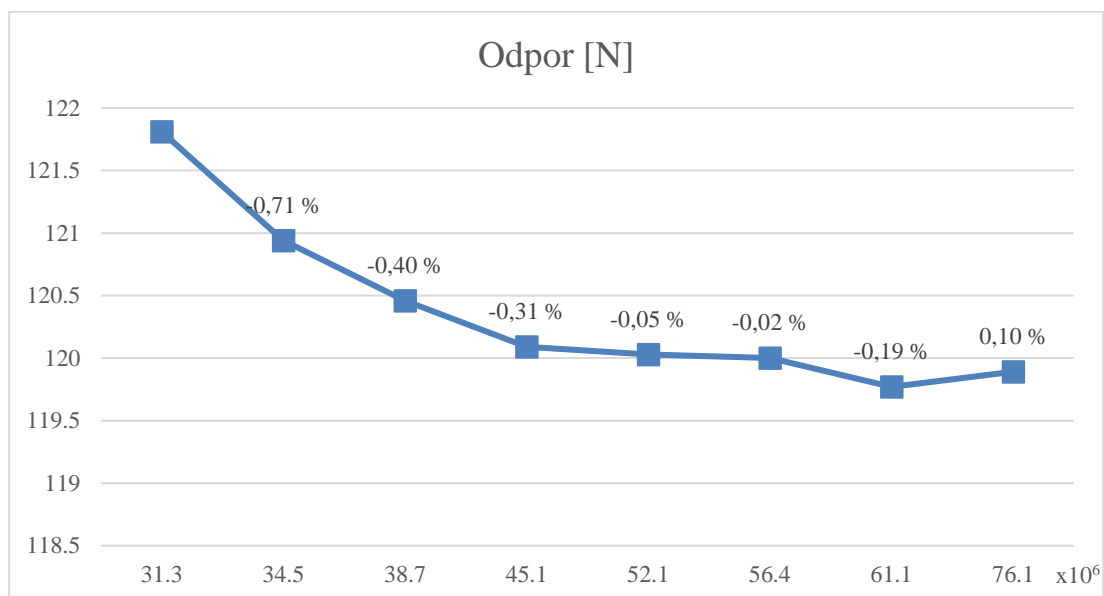
Pro výchozí simulaci byla použita geometrie monopostu při jízdě zatáčkou o poloměru 10 m a bočním zrychlení 1,3g ( $12,75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ).

### 4.1 KVALITA SÍTĚ

Pro získání dostatečné kvality sítě bylo provedeno několik simulací s rozdílnými počty buněk a pro porovnání byli použity číselné hodnoty přítlaku a odporu. Tyto parametry se okolo 55 miliónů buněk ustálili a při dalším navýšení počtu buněk dochází již k malým změnám a k výraznému navýšení výpočetního času.

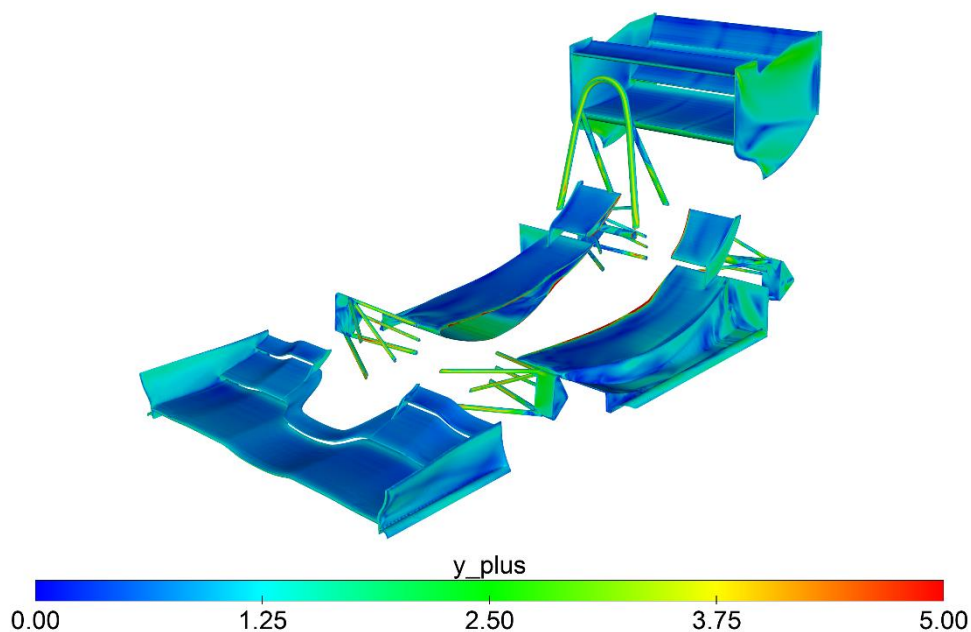


Graf 1 Závislost přítlaku na počtu buněk



Graf 2 Závislost odporu na počtu buněk

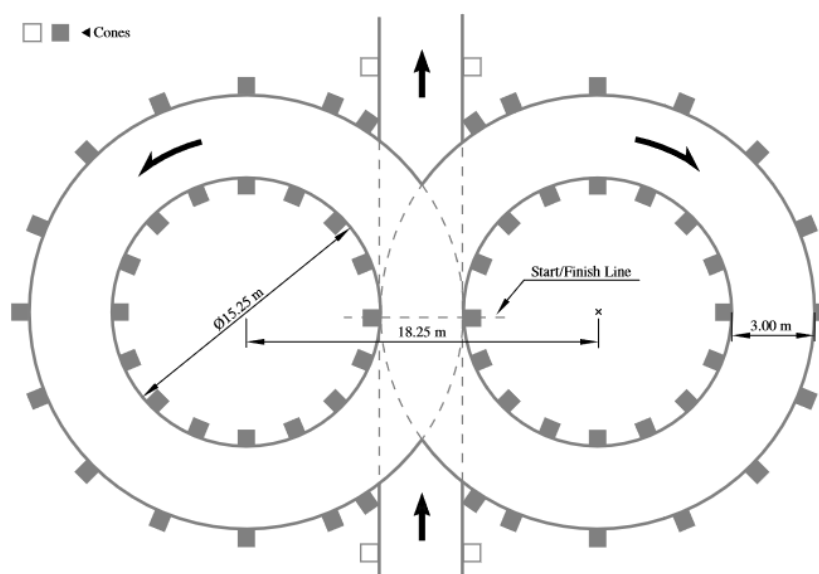
Dále byla také sledována hodnota  $y^+$  na stěnách geometrie, na kritických místech bylo cílem dosáhnout  $y^+ < 5$ , jedná se převážně o aerodynamické profily a další díly na kterých je riziko odtržení mezní vrstvy. Na zbytku monopostu bylo pak  $y^+ > 30$ .



Obrázek 13 Rozložení  $y^+$  na kritických místech

## 4.2 VYMEZENÍ ANALÝZY

V soutěži FS je důležitou disciplínou Skidpad, jedná se o trať ve tvaru osmičky, kdy se testuje stabilita monopostů při ustálené jízdě zatáčkou. Proto bude stav vozu při jízdě na této trati brán jako výchozí stav analýzy.



Obrázek 14 Schéma tratě pro disciplínu Skidpad [24]

Vnitřní poloměr tratě je 7,625 m a při uvážení šířky monopostu 1,4 m dostáváme teoretický poloměr dráhy 8,325 m. Průměrnou úhlovou rychlost lze dopočítat z času na kolo dle vztahu:

$$\omega = \frac{\theta}{t}, \quad (5)$$

kde  $\theta$  je úhlová dráha a  $t$  je čas. Loňský monopost Dragon E2 měl čas na jedno kolo 4,844 s, když za  $\theta$  dosadíme  $2\pi$  tak úhlová rychlost vychází 1,29 rad/s. [25]

Dalším podstatným parametrem je úhel klopení, kterého monopost dosahuje při průjezdu zatáčkou. Se znalostí citlivosti aerodynamických sil na tento parametr je možné správnou změnou tuhosti pružin zvýšit rychlost při zatáčení.

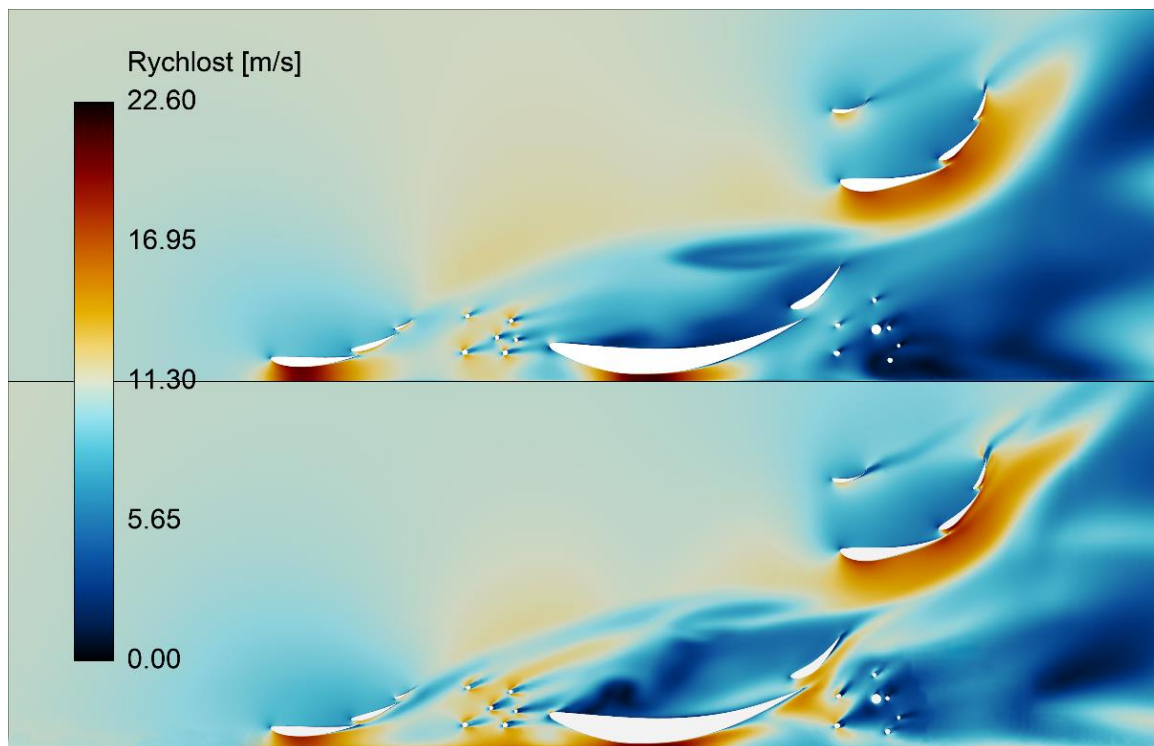
### 4.3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Aktuální aeropaket je navržen pomocí CFD simulací na rovince a z číselných výsledků je na první pohled vidět značný rozdíl od disciplíny skidpad (viz. Tabulka 1). Celkové  $C_L$  pokleslo o 8 %, nicméně  $C_L$  na zadní nápravě zůstalo nezměněno a  $C_L$  na přední nápravě pokleslo razantně, což znamená, že monopost tíhne více k nedotáčivosti, než bylo původně navrhováno.

Jízdní stav	$C_L$	$C_D$	$C_L$ na přední nápravě	$C_L$ na zadní nápravě
Rovinka	4.05	1.54	1.90	2.15
Skidpad	3.73	1.54	1.58	2.15

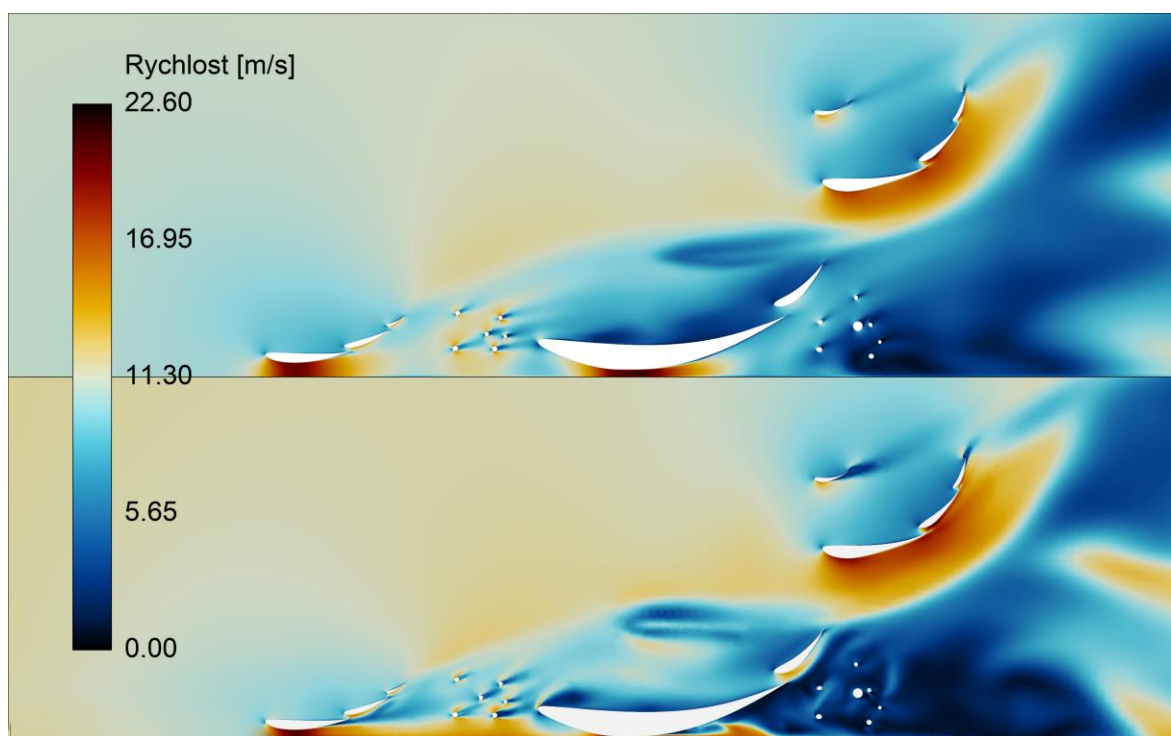
Tabulka 1 Porovnání jízdy po rovince a v zatáčce

Rychlostní pole na vnitřní straně monopostu (Obrázek 15) má obdobný charakter jako rychlostní pole při jízdě po rovince. Na prvním elementu předního křídla dochází k odtržení mezní vrstvy před odtokovou hranou, stejně je tomu tak u třetího a čtvrtého elementu zadního křídla, k separaci proudění dochází až u konce elementů, takže snížením úhlů náběhu je možno tento problém vyřešit. Za zmínku také stojí podlahy, kde u druhého elementu je zvýšený průtok vzduchu, který vede ke zvýšené přítlačné síle.



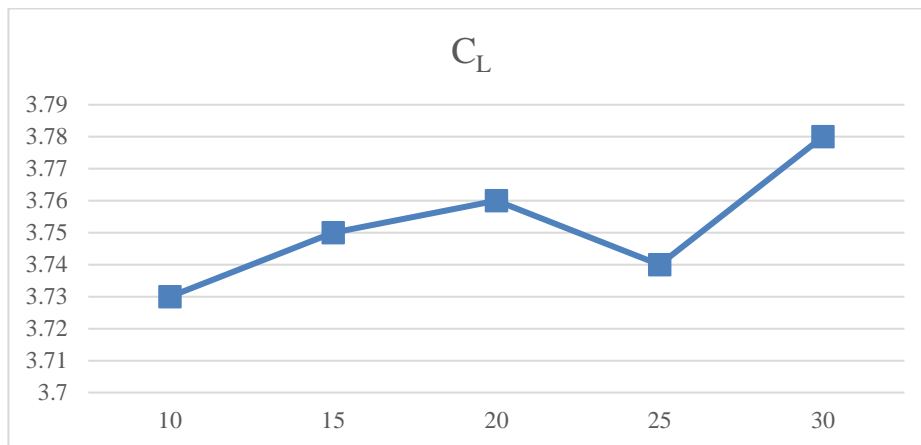
Obrázek 15 Rychlostní pole při jízdě na rovnici (nahore) a rychlostní pole na vnitřní straně monopostu při průjezdu zatáčkou (dole)

Na vnější straně monopostu (Obrázek 16) nastává opět odtržení mezní vrstvy na stejných elementech, ale tentokrát mnohem dříve. Hlavně u čtvrtého elementu zadního křídla dochází již k brzké separaci proudění. U podlahy v těchto místech dochází taktéž k brzkému odtržení mezní vrstvy, a to převážně vlivem malé vzdálenosti od země.

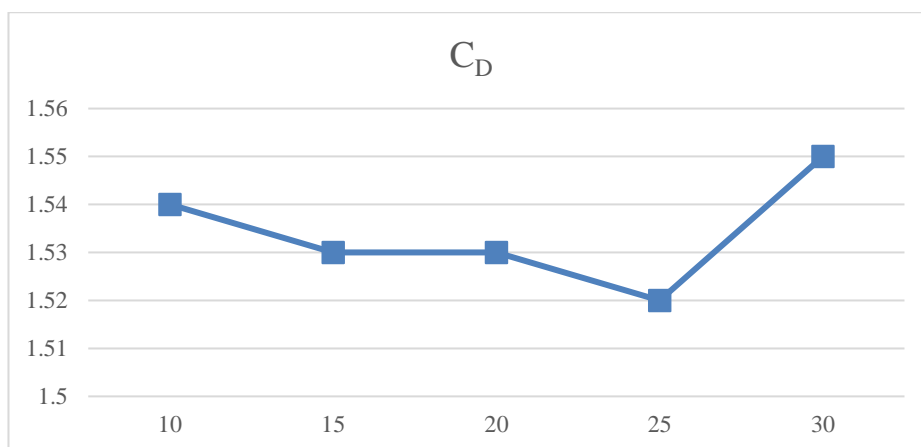


Obrázek 16 Rychlostní pole při jízdě na rovnici (nahore) a rychlostní pole na vnější straně monopostu při průjezdu zatáčkou (dole)

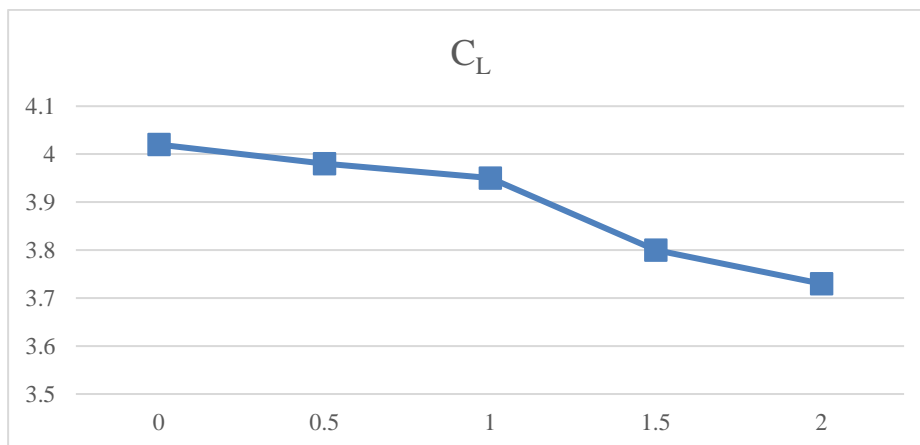
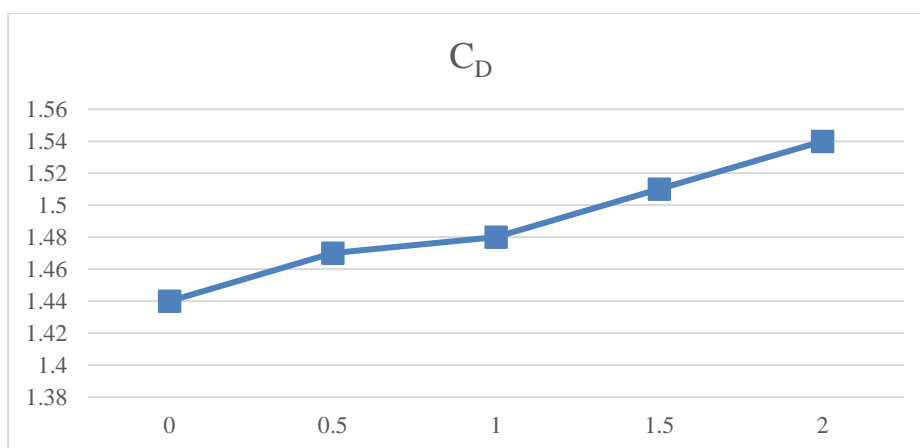
Z grafů níže lze vidět, že při změně poloměru zatáčky dochází ke změnám  $C_L$  a  $C_D$  pouze v setinách, kdežto se zvyšujícím úhlem klopení dochází k poklesu  $C_L$  a k nárůstu  $C_D$ , s tím, že u hodnoty  $1,5^\circ$  dochází k většímu skoku. Při detailnější analýze rychlostního pole je zřejmé, že při tomto úhlu dochází k odtržení proudění na elementu podlah, obdobně jako na obrázku 16.



Graf 3 Závislost  $C_L$  na poloměru zatáčky



Graf 4 Závislost  $C_D$  na poloměru zatáčky

Graf 5 Závislost  $C_L$  na úhlu klopeníGraf 6 Závislost  $C_D$  na úhlu klopení

## ZÁVĚR

Z CFD analýzy monopostu Dragon E3 vyplývá, že se při průjezdu zatáčkou ztrácí na určitých místech přítlak a navyšuje se odpor. Na předním křídle a třetím elementu zadního křídla dochází k separaci těsně před odtokovou hranou, toto lze napravit snížením úhlu náběhu k čemuž jsou jednotlivé prvky uzpůsobeny. Nicméně u čtvrtého elementu zadního křídla dochází k velmi brzkému odtržení mezní vrstvy, hlavně na vnější straně a snížení úhlu náběhu by nebylo dostačující. V tomto případě je vhodné změnit tvar profilu, a to na takový s nižším zakřivením.

Z hlediska podlah existují dvě možnosti, první čistě z aerodynamického pohledu je zvednutí hlavních elementů, tím i při vyšších úhlech klopení zůstane element dostatečně daleko od země a nedojde ke ztrátě přítlaku. Druhou možností je použití pružin s vyšší tuhostí a tím snížení úhlu klopení. Zde už je ale zapotřebí brát v potaz i podvozek, a to, jestli je tato změna v celkovém měřítku přínosná.

Vzhledem k tomu, jak velké je zastoupení zatáček na tratích Formule Student, bych doporučil směřovat budoucí vývoj aeropaketu k optimalizaci právě pro průjezd zatáčkami než pro jízdu na rovině.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Formula Student Germany: International design competition* [online]. Langenhagen [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/>
- [2] *TU Brno Racing - Dragon 4* [online]. Brno, 2014 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/garaz/dragon4/>
- [3] *Formula Student - World Ranking Lists* [online]. 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://fs-world.org/>
- [4] GILLESPIE, Thomas D. *Fundamentals of vehicle dynamics*. První vydání. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc, 1992, xxii, 495 stran : ilustrace. ISBN 1-56091-199-9.
- [5] MILLIKEN, William a Douglas MILLIKEN. *Race car vehicle dynamics*. První vydání. Warrendale: SAE International, 1995, xxviii, 890 s. : ill. ; 26 cm. ISBN 1-56091-526-9.
- [6] ANDERSON, J.D. *Fundamentals of Aerodynamics*. 1 ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1984, 563 s. ISBN 9780070016798.
- [7] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designig for speed*. Revised 2nd edition. Cambridge]: Bentley Publishers.com, 2006, vii, 307 stran : ilustrace, grafy. ISBN 0-8376-0142-8.
- [8] HOBEIKA, Teddy a Simone SEBBEN. CFD investigation on wheel rotation modelling. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018, **174**(241-251), 241-251. ISSN 01676105. Dostupné z: doi:10.1016/j.jweia.2018.01.005
- [9] PATEL, Dipesh, Andrew GARMORY a Martin PASSMORE. The Effect of Cornering on the Aerodynamics of a Multi-Element Wing in Ground Effect. *Aerodynamics and Aeroacoustics of Vehicles* [online]. 2021, 24 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/fluids6010003>
- [10] Time to Rethink Cornering Flow?. In: *Bramble CFD* [online]. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://bramblecf.com/time-to-rethink-cornering-flow/>
- [11] KEOGH, James, Tracie BARBER, Sammy DIASINOS a Graham DOIG. *Techniques for Aerodynamic Analysis of Cornering Vehicles* [online]. 2015, - [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: doi:10.4271/2015-01-0022
- [12] BARBER, Tracie a Azadeh LOTFI. Optimization of CFD Meshing for Stented Vessel Geometries. *Applied Mechanics and Materials* [online]. Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2014, **553**(), 373-378 [cit. 2023-05-25]. ISBN 3038350680. ISSN 1660-9336. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.553.373

- [13] What  $y^+$  should I use? Part 3 - Understanding impact of  $Y^+$  and number of prism layers on flow resolution. In: *LEAP Australia* [online]. Australia: LEAP Australia, 2020 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: [https://www.computationalfluidynamics.com.au/y-plus\\_part3\\_understanding-impact-of-y-and-number-of-prism-layers-on-flow-resolution/](https://www.computationalfluidynamics.com.au/y-plus_part3_understanding-impact-of-y-and-number-of-prism-layers-on-flow-resolution/)
- [14]  $Y^+$  calculator. In: *Omnicalculator* [online]. Kraków [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.omnicalculator.com/physics/yplus>
- [15] SCHLICHTING, Herrmann. *Boundary-Layer Theory*. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1979, xxii, 817 s. : il., grafy. ISBN 0-07-055334-3.
- [16] Law of the wall. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Law\\_of\\_the\\_wall](https://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_the_wall)
- [17] TU, Jiyuan, Guan Heng YEOH a Chaoqun LIU. *Computational Fluid Dynamics - A Practical Approach*. První vydání. London: Elsevier, 2007. ISBN 9780750685634.
- [18] LESCHZINER, Michael. *Statistical turbulence modelling for fluid dynamics - demystified: an introductory text for graduate engineering students*. První vydání. London: Imperial College Press, 2015, xv, 407 stran : ilustrace. ISBN 978-1-78326-661-6.
- [19] *The Road Toward Next-Generation CFD Software Systems* [online]. 2021 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: [https://community.cadence.com/cadence\\_blogs\\_8/b/cfd/posts/the-road-toward-next-generation-cfd-software-systems](https://community.cadence.com/cadence_blogs_8/b/cfd/posts/the-road-toward-next-generation-cfd-software-systems)
- [20] ANSYS, INC. 2022. *ANSYS Fluent Theory Guide*. Canonsburg, PA, 2022.
- [21] ANSYS, INC. 2022. *ANSYS Fluent User's Guide*. Canonsburg, PA, 2022.
- [22] SOSNOWSKI, Marcin. The influence of computational domain discretization on CFD results concerning aerodynamics of a vehicle. *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics* [online]. The Publishing Office of Czestochowa University of Technology, 2018, **17**(1), 79-88 [cit. 2023-05-25]. ISSN 2299-9965. Dostupné z: doi:10.17512/jamcm.2018.1.08
- [23] VERSTEEG, H. K. (Henk Kaarle) a W. (Weeratunge) MALALASEKERA. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. 2nd ed. Harlow: Pearson Prentice Hall, 2007, xii, 503 s. : il. ISBN 978-0-13-127498-3.
- [24] *Rules & Important Documents: Formula Student Germany* [online]. 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [25] *Formula Student EAST* [online]. 2022 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://fseast.eu/category/fs-east-2022/>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$a$	[m·s <sup>-2</sup> ]	Dostředivé zrychlení
$v$	[m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost
$r$	[m]	Poloměr zatáčky
$LT$	[N]	Přesun hmoty
$W$	[kg]	Hmotnost
$h$	[m]	Výška těžiště
$t$	[m]	Rozchod kol
$C_F$	[-]	Koeficient příslušné aerodynamické síly
$F$	[N]	Složka aerodynamické síly
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota vzduchu
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Referenční plocha
$y^+$	[-]	Bezrozměrná výška vrstvy
$\Delta s$	[m]	Výška vrstvy
$U_{fric}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	Smyková rychlost
$\mu$	[P·s]	Dynamická viskozita
$\omega$	[rad·s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost
$t$	[s]	Čas na kolo
$\theta$	[rad]	Úhel

*CFD* Computation Fluid Dynamics

*FS* Formule Student

*ED3* Electric Dragon 3

*Aeropaket* Aerodynamický paket vozu

*DNS* Direct Numerical Solution

*LES* Large Eddy Simulation

$C_L$  Součinitel vztlaku

$C_D$  Součinitel odporu

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Porovnání jízdy po rovince a v zatáčce.....	28
---	----

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Závislost přtlaku na počtu buněk .....	26
Graf 2 Závislost odporu na počtu buněk .....	26
Graf 3 Závislost $C_L$ na poloměru zatáčky.....	30
Graf 4 Závislost $C_D$ na poloměru zatáčky .....	30
Graf 5 Závislost $C_L$ na úhlu klopení .....	31
Graf 6 Závislost $C_D$ na úhlu klopení.....	31

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Monopost Dragon 4 [2] .....	11
Obrázek 2 Maximální síla přenesená pneumatikou s přitlakem a bez přitlaku [7].....	14
Obrázek 3 Proudění okolo vozidla projíždějící zatáčkou [8].....	15
Obrázek 4 Proudění okolo vozu Formule 1 při natočení vozidla (nahore) a při zakřiveném proudění (dole) [10] .....	16
Obrázek 5 Závislost koeficientu vztlaku na vzdálenosti od země [7].....	17
Obrázek 6 Zjednodušená geometrie monopostu .....	18
Obrázek 7 Porovnání dvou typů domén pro modelování zatáčení [11].....	19
Obrázek 8 Ukázka sítě se zjemněným zakřivením .....	20
Obrázek 9 Použití prismatických vrstev v mezní vrstvě [12] .....	21
Obrázek 10 Závislost normalizované rychlosti $U^+$ na normalizované vzdálenosti od stěny $y^+$ [15].....	22
Obrázek 11 Metody modelování turbulence vzestupně dle výpočetní náročnosti [19].....	23
Obrázek 12 Porovnání předepsání rychlosti na stěnu (vlevo) a metody pohyblivého referenčního souřadného systému (vpravo) [8] .....	24
Obrázek 13 Rozložení $y^+$ na kritických místech .....	27
Obrázek 14 Schéma tratě pro disciplínu Skidpad [24] .....	27
Obrázek 15 Rychlostní pole při jízdě na rovnici (nahore) a rychlostní pole na vnitřní straně monopostu při průjezdu zatáčkou (dole).....	29
Obrázek 16 Rychlostní pole při jízdě na rovnici (nahore) a rychlostní pole na vnější straně monopostu při průjezdu zatáčkou (dole).....	30