



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ANALÝZA VLIVU POLOHY KAROSERIE ZÁVODNÍHO VOZU NA AERODYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY

TITLE OF THE INFLUENCE OF BODY POSITION ON THE CAR'S AERODYNAMIC
CHARACTERISTIC

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LUKÁŠ JIRÁSEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JAN VANČURA

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lukáš Jirásek

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

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 diplomové práce:

Analýza vlivu polohy karoserie závodního vozu na aerodynamické charakteristiky

v anglickém jazyce:

Analysis of the influence of body position on the car's aerodynamic characteristics

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je provést citlivostní studii vlivu polohy karoserie vozu na jeho aerodynamická zatížení

Cíle diplomové práce:

Sestavte zjednodušený parametrický CAD model závodního vozu

Proveďte CFD analýzu pro následující nastavení parametrů:

- výška vozu od vozovky
- naklonění vozu

Vyjádrejte se k získaným výsledkům

Seznam odborné literatury:

W. H. Hucho, Aerodynamics of Road Vehicles, 1998

J. Katz, Race car aerodynamics, 2006


J. D. Anderson, Fundamentals of aerodynamics

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Vančura

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 17.11.2010





prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan



ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je provést citlivostní studii vlivu polohy karoserie vozu na jeho aerodynamická zatížení. Byl vytvořen model CAD model v softwaru Pro/Engineer, předlohou byly rozměry podvozku a karoserie formule Ford 1600. Následně byl model převeden do prostředí CFD, zde byly nastaveny charakteristiky struktury okolního média. Software FLUENT provedl výpočty a měření aerodynamických charakteristik vozidla v závislosti na nastavení výšky a natočení podvozku vozidla.

KLÍČOVÁ SLOVA

aerodynamické charakteristiky, formule Ford 1600, karoserie vozu, výška a natočení podvozku

ABSTRACT

Aim of this diploma thesis is to make sensitivity research concerning influence of vehicle body position on its aerodynamical loading. CAD model was created in Pro/E software. Formula Ford 1600 chassis and vehicle body dimensions were used as a pattern for CAD model. Then this model was imported into CFD environment where ambient medium characteristic were set up. FLUENT software performed calculations and measurement of aerodynamical characteristics of vehicle dependent on height and angle of chassis.

KEYWORDS

aerodynamical characteristics, formula Ford 1600, vehicle body, height and angle of chassis



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JIRÁSEK, L. *Analýza vlivu polohy karoserie závodního vozu na aerodynamické charakteristiky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Vančury a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2011

.....

Jméno a přímení



PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Vančurovi za jeho odbornou podporu a přístup při odborných konzultacích. Dále pak Ing. Lubomíru Drápalovi za poskytnutí rad při tvorbě CAD modelu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mojí rodině, která mě po celou dobu mého studia podporovala, a které si moc vážím.



OBSAH

Úvod	10
1 Teorie aerodynamiky vozidel	11
1.1 Vlastnosti tekutin	11
1.2 Bernoulliho rovnice	12
1.3 Typy proudění kapalin	12
1.3.1 Stacionární (ustálené) a nestacionární (neustálené) proudění	12
1.3.2 Laminární a turbulentní proudění	12
1.3.3 Přilnuté a odtržené proudění	13
1.4 Mezní vrstva	14
1.4.1 Laminární a turbulentní mezní vrstva	14
1.4.2 Odtržení mezní vrstvy	15
1.5 Obtékání kol	16
1.5.1 Magnusův jev	17
1.6 Soustava aerodynamických sil a momentů, aerodynamické	18
koeficienty	18
2 Zjišťování aerodynamických charakteristik u vozidel	20
2.1 Aerodynamický tunel	20
2.2 Výpočtové programy	21
3 Tvorba modelu v Pro/ENGINEERu	23
3.1 Modelované vozidlo	23
3.2 Karoserie	23
3.3 Kola	25
3.4 Helma	26
3.5 Skládání sestavy	26
4 Tvorba sítě v ICEMu CFD	30
4.1 Úprava geometrie	30
4.2 Povrchová mesh	32
4.3 Objemová mesh	33
4.4 Vytvoření prizmat	34
4.5 Nastavení density	34
5 Nastavení parametrů proudění ve FLUENTu V6	36
5.1 Zadání základních charakteristik	36
5.2 Zadání okrajových podmínek	37
5.3 Nastavení monitorování odporů	38
6 Vizualizace a zhodnocení výsledků V CFD-POST	39



6.1	Vypočtené hodnoty	39
6.2	Vizualizace výsledků	41
6.3	Zhodnocení výsledků	53
	Závěr	54
	Použité informační zdroje	54
	Seznam použitých zkratk a symbolů	56



ÚVOD

Jakmile spatřily světlo světa první automobily, ihned se našli jedinci, kteří s nimi chtěli závodit a zjistit, kdo disponuje nejlepším vozidlem. Od roku 1894, kdy se ve Francii konal první automobilový závod, uběhlo více než 117 let. Soutěživost a rivalita mezi soupeři vedly k vynalezení mnoha technických postupů a řešení výroby automobilů a také k jejich postupnému zdokonalování. Konstrukteři těchto vozů brzy zjistili, že vhodně zvolený tvar karoserie bude mít klíčový vliv na jízdní vlastnosti jejich vozů. A proto jdou pojmy design a aerodynamika ruku v ruce s automobilovým průmyslem téměř od jeho vzniku.

Dnes je na aerodynamiku vozu kladen velký důraz. V automobilním průmyslu má za úkol co nejvíce zefektivnit provoz vozidla. To je dosaženo snižováním aerodynamického odporu, což má za následek lepší využití výkonu motoru, menší měrnou spotřebu paliva a snížení emisí. V závodním odvětví aerodynamika využívána především ke zlepšení jízdních vlastností, zvětšení přítlaku vozidla na vozovce, aby mohlo být dosahováno větších výkonů a rychlostí.

Tato diplomová práce se zabývá měřením aerodynamických charakteristik modelu formule Ford 1600 v aerodynamickém tunelu, který byl vytvořen ve výpočtovém prostředí CFD (Computational Fluid Dynamics). Požadavkem bylo, aby byl podvozek na CAD modelu formule parametrický, tzn., aby bylo možné nastavovat výšku a úhel natočení karoserie vzhledem k vozovce. Úkolem je zanalyzovat a zhodnotit výsledné aerodynamické charakteristiky vozidla pro čtyři různá nastavení podvozku.



1 TEORIE AERODYNAMIKY VOZIDEL

Aerodynamika je obecně vědním oborem, který se zabývá silovým působením na těleso, které je obtékáno proudem vzduchu. Tudíž klíčový význam plní aerodynamika v leteckém, automobilním a stavebním průmyslu.

Proudění vzduchu je relativní. Na tělese obtékaném proudem vzduchu dojde ke změně rychlosti vzduchu a v důsledku toho i ke změně tlaku na jednotlivých plochách tělesa. Po sečtení účinku působení dílčích tlaků dostaneme výslednou hodnotu aerodynamické síly působící na těleso.

Statický tlak – tlak vyvozený tekutinou za relativního klidu, měříme u stěny, kde je nulová rychlost

Dynamický tlak - tlak, kterým působí proudící kapalina na statické těleso nebo tlak pohybujícího se tělesa na klidnou kapalinu

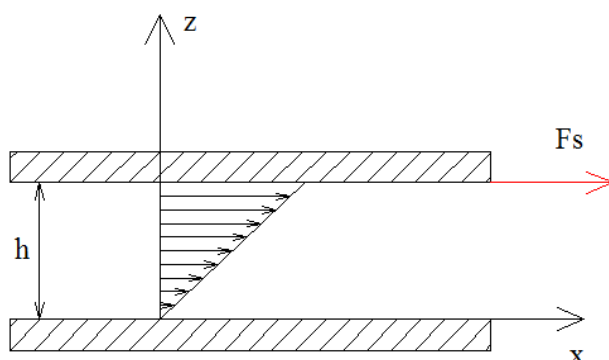
Celkový tlak – součet statického a dynamického tlaku

1.1 VLASTNOSTI TEKUTIN

Pro uplatnění základních principů aerodynamiky musíme pochopit vlastnosti tekutin. Síla potřebná k pohybu vozidla skrze vzduch závisí na fyzikálních vlastnostech okolní tekutiny, zejména na teplotě, tlaku, viskozitě a hustotě. Základním rozdílem mezi tekutinou a tuhým tělesem pohyblivost molekul, mezi kterými neexistují tak pevné vazby. Tato vlastnost se označuje jako tekutost. Kapaliny a plyny tečou v proudu omezeném stěnami, oproti tuhému tělesu, které se pohybuje jako jeden celek hmotných bodů. Obě tekutá skupenství, plynné i kapalné, se od sebe navzájem dost liší. Zásadní rozdíl je v objemové stálosti. Plyny jsou oproti kapalinám snadno stlačitelné, nemají stálý tvar ani objem, netvoří hladinu.

Viskozita – je definována jako odpor vrstev tekutiny vůči pohybu. Příčinou je vznik smykového napětí mezi dvěma okolními vrstvami. Na obrázku 1 jsou znázorněny dvě rovnoběžné desky a mezi nimi viskózní tekutina. Spodní deska je v klidové poloze. Při pohybu vrchní desky nám vzniká smykové napětí, viz obr. 1. Hustší tekutiny mají větší viskozitu, protože jejich pohyb je znesnadněn meziatomovými silami, viskozita nám způsobuje vznik mezní vrstvy. V mezní vrstvě je rychlost pohybu molekul tekutiny nulová.

Při teplotě 20°C a tlaku 101 kPa je hustota vzduchu 1,22 kg/m³ a viskozita 1,8 · 10⁻⁵ Ns/m².



Obr. 1 Vznik smykového napětí mezi dvěma deskami s viskózní tekutinou



1.2 BERNOULLIHO ROVNICE

Při aplikaci této základní rovnice mechaniky tekutin na obtékání automobilu vyplývá, že součet statického a dynamického tlaku v každém bodě povrchu karosérie je konstantní a je rovný součtu statického a dynamického tlaku v nerušeném proudu vzduchu. Členitost karoserie způsobuje změnu směru a rychlosti obtékaného proudu a vzniká nám aerodynamické zatížení. Tyto vztahy mezi rychlostí proudění a tlakem nám pro ustálené proudění bez ztrát popisuje Bernoulliho rovnice ve tvaru:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \text{const}, \quad (1)$$

Bernoulliho rovnice (2) slouží k porovnání rychlostí a tlaků ve dvou libovolných různých bodech pro spojitě proudění s konstantní hustotou proudící tekutiny.

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{V_A^2}{2} = \frac{p_B}{\rho} + \frac{V_B^2}{2} \quad (2)$$

Bernoulliho rovnice (3) složí k popsání celkového tlaku.

$$\frac{1}{2}\rho V^2 + p + pgh = p_{\text{celk,konst}} \quad (3)$$

kde $\frac{1}{2}\rho V^2$ je dynamický tlak způsobený rychlostí proudění, p je statický tlak a pgh je hydrostatický tlak.

1.3 TYPY PROUDĚNÍ KAPALIN

Proudění vzniká, uvažujeme-li pohyb tekutiny v jednom směru. V proudící tekutině má každá částice svou vektorovou rychlost, která se může místně měnit v závislosti na čase.

Proudnice je trajektorií pohybu jednotlivých částic tekutiny, každý bod má jednu proudnici, které se navzájem neprotínají. Rychlost částice v libovolném místě proudu je tečnou k proudnici.

1.3.1 STACIONÁRNÍ (USTÁLENÉ) A NESTACIONÁRNÍ (NEUSTÁLENÉ) PROUDĚNÍ

Stacionární proudění je takové proudění, při němž jsou tlak p a rychlost v v proudící tekutině stálé veličiny, tzn., nejsou závislé na čase.

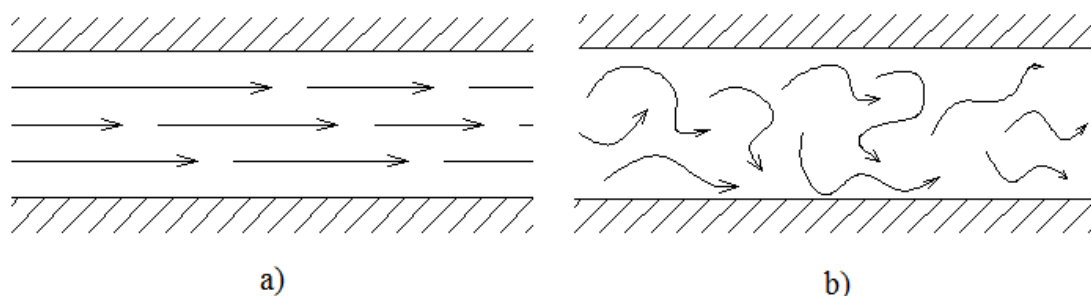
Oproti tomu u nestacionárního proudění jsou tlak p a rychlost v v proudící tekutině závislé na čase.

1.3.2 LAMINÁRNÍ A TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ

Pro laminární proudění je charakteristický rovnoběžný posun jednotlivých vrstev. Proudnice jsou spojitě křivky, které se navzájem nekříží, viz obr. 2a.



U turbulentního proudění se rychlost v daném bodě nepravidelně mění, proudnice se vlivem prostředí roztácejí a následně kříží, vznikají nám turbulence = víry, viz obr. 2b.



Obr. 2 Průběh laminárního a turbulentního proudění

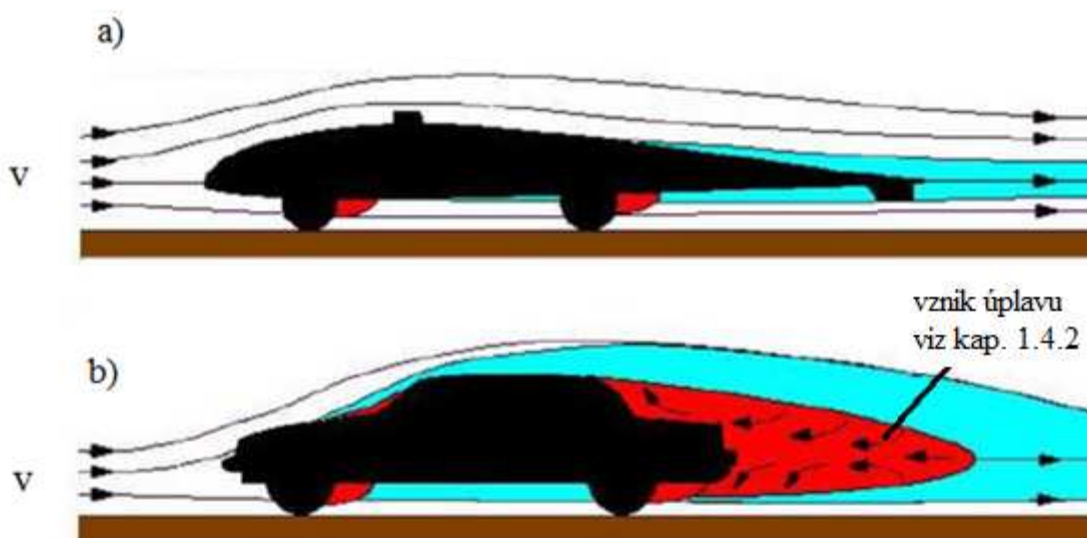
Přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním je dán Reynoldsovým číslem

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (4)$$

kde V je rychlost proudění, d je charakteristický rozměr a ν je kinematická viskozita.

1.3.3 PŘILNUTÉ A ODTRŽENÉ PROUDĚNÍ

Trajektorie proudu, která při průchodu kolem karoserie vozu opisuje její tvar, nazýváme přilnuté proudění, viz obr. 3a. S tímto typem proudění se u automobilů spíše nesetkáváme, jde pouze o ideální stav, cílem je se k němu co nejvíce přiblížit. Vzniká při obtékání kapkovitého profilu. Odtržené proudění nalezneme v zadní části vozu, kde se odtrhává mezní vrstva. Odtržené proudění má velký vliv na aerodynamické charakteristiky vozidla, viz obr. 3b.

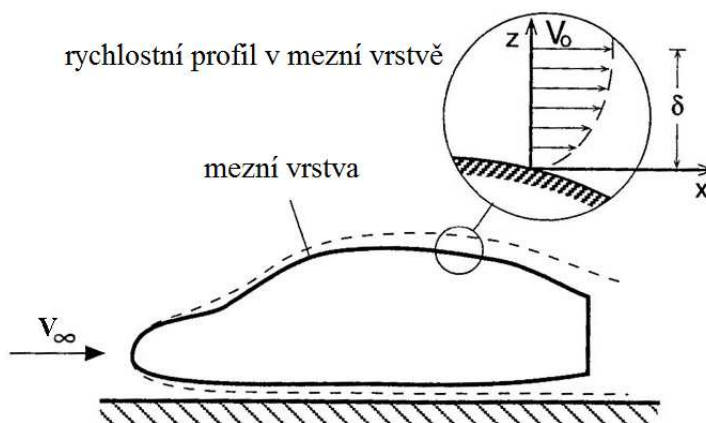


Obr. 3 Přilnuté a odtržené proudění [11]



1.4 MEZNÍ VRSTVA

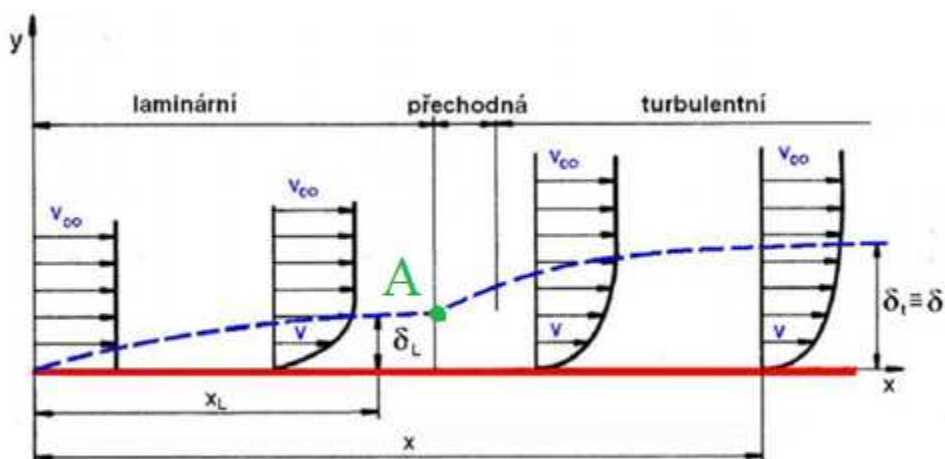
V těsné blízkosti povrchu těles jsou třecí síly stejně velké jako dynamické. Proto při obtékání tělesa dochází k ulpívání částic kapaliny na povrchu obtékaného tělesa. Na povrchu je rychlost částic nulová a se zvětšující se vzdáleností od povrchu rychlost parabolicky roste. Velikost mezní vrstvy na povrchu vozidla je v různých místech rozdílná, v přední části v řádech milimetrů, v zadní části v řádech centimetrů.



Obr. 4 Mezní vrstva na povrchu automobilu [3]

1.4.1 LAMINÁRNÍ A TURBULENTNÍ MEZNÍ VRSTVA

Tvar a velikost mezní vrstvy závisí na profilu obtékaného tělesa. Stanovení přesných charakteristik je složité i pro jednoduché profily typu rovinná deska. Početní řešení u komplikovanějších tvarů je velmi složité, někdy i neřešitelné.



Obr. 5 Laminární a turbulentní mezní vrstva [11]

Na obrázku 5 je znázorněna změna tloušťky laminární mezní vrstvy δ_L při obtékání nekonečně tenké desky proudem tekutiny o rychlosti V_∞ , jejíž směr obtékání je rovnoběžný s touto deskou. Za předpokladu, že se na desce tvoří laminární proudění, platí pro délku x_L vztah:



$$\delta_L = 5 \cdot \sqrt{\frac{v \cdot x_L}{w_\infty}} \quad (5)$$

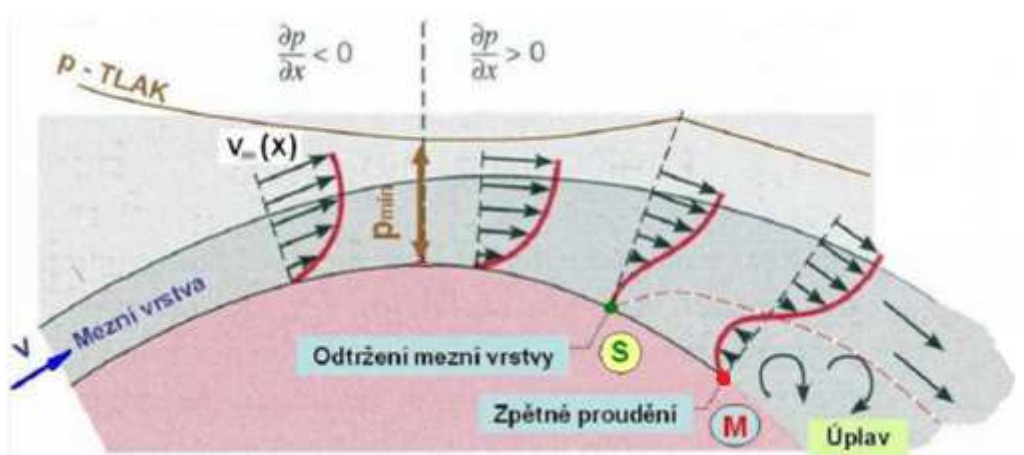
Častěji se však setkáváme s kombinací laminární a turbulentní mezní vrstvy. Od náběžné hrany se tvoří laminární vrstva. V určité vzdálenosti, zobrazené bodem A, dojde ke zvratu a k tvoření turbulentní mezní vrstvy, která se začne šířit směrem k rovinné desce i do volného prostoru. Pod ní však stále zůstává v určité míře laminární mezní vrstva. Ke zvratu dochází v místě, kde Reynoldsovo číslo (4) dosáhne určité hodnoty, které je závislé na tvaru tělesa.

$Re < 2 \cdot 10^5$... laminární mezní vrstva, dochází k odtržení a k úplavu

$Re \geq 2 \cdot 10^5$... přeměna laminární vrstvy na turbulentní, vzniklý úplav je malý, což má za následek menší součinitel odporu vzduchu

1.4.2 ODTRŽENÍ MEZNÍ VRSTVY

Při obtékání tělesa se kinetická energie proudící kapaliny mění na tlakovou energii. Na povrchu v bodě S se proud zastaví ($v = 0$) a v bodě M dochází dokonce ke zpětnému proudění. Od bodu S se mezní vrstva odděluje od tělesa a vzniká úplav. Odtržení nastává vzrůstem tlaku v mezní vrstvě, částice s nízkou kinetickou energií se zastaví a později odtrhnou, viz obr. 6.



Obr. 6 Rychlostní profily při obtékání válce a vznik úplavu [11]

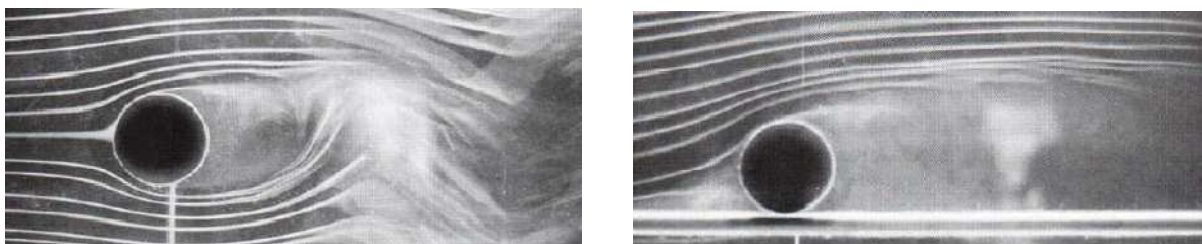
V každém úplavu je neuspořádané proudění, což nám zapříčiňuje vzrůst energetických ztrát, zvýšenou dynamiku zařízení a hluk. Toto je z aerodynamického hlediska nežádoucí, proto se snažíme tento jev odstranit nebo alespoň minimalizovat.



1.5 OBTÉKÁNÍ KOL

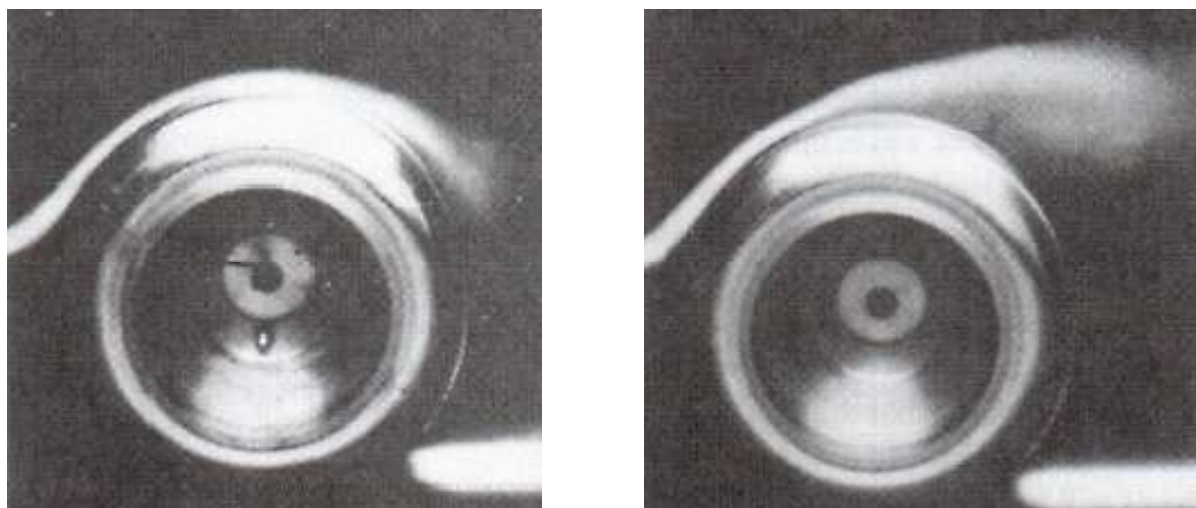
Při zjišťování aerodynamiky vozidla je důležitým prvkem obtékání kol. Jedná-li se o automobil s nekrytými koly, vliv rotujících kol se projeví o to více. Dříve bylo měření v aerodynamickém tunelu omezeno jen na model se stacionárními koly, v současné době moderní aerodynamické tunely umožňují simulovat modely i s rotujícími koly, viz kapitola 2.1.

Obtékání kol se nejvíce blíží obtékání válce. Na obrázku 7 je ukázán rozdíl v proudění kolem válce ve volném prostoru a v přítomnosti vozovky.



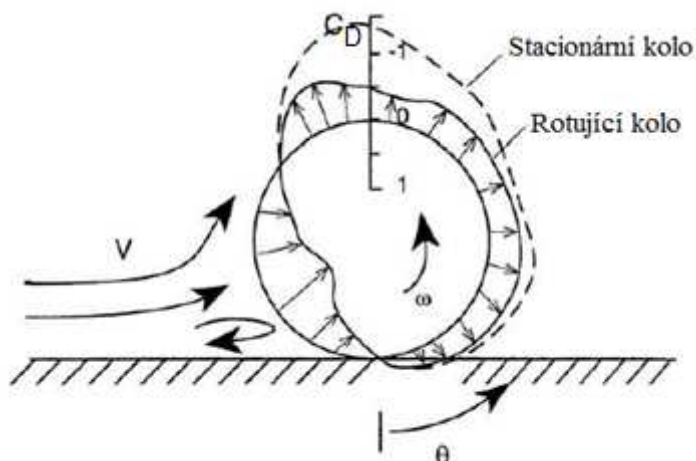
Obr. 7 Obtékání válce ve volném prostoru a v blízkosti rovinné desky [3]

Rozdílné je i obtékání stacionárního a rotujícího kola. Rozhodujícím parametrem ovlivňujícím koeficient vzlaku a odporu je místo odtržení přilnutého proudění. U stacionárního kola dochází k odtržení proudu vzduchu v úhlu $\theta \approx 160^\circ$, u rotujícího kola je úhel větší, protože se proud odtrhává dříve.



Obr. 7 Obtékání stacionárního a rotujícího kola [3]

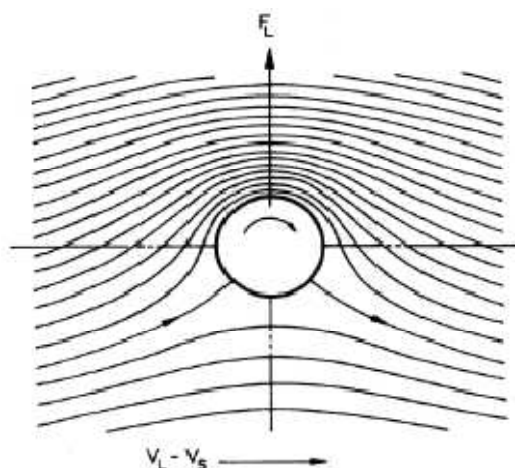
Rozložení tlaku na obtékaném kole je charakterizováno koeficientem tlaku c_D . Kladná hodnota v přední části kola a záporná v zadní části kola nám způsobuje aerodynamický odpor. Na obrázku 8 je zobrazení tlakových polí na kole. U stacionárního kola můžeme pozorovat zápornou hodnotu, vzniká nám vzlak. U rotujícího kola je tato hodnota menší, někdy dokonce kladná, což nám způsobí přítlak. Tento případ označujeme jako Magnusův jev.



Obr. 8 Rozložení tlaku na stacionárním a rotujícím kole [3]

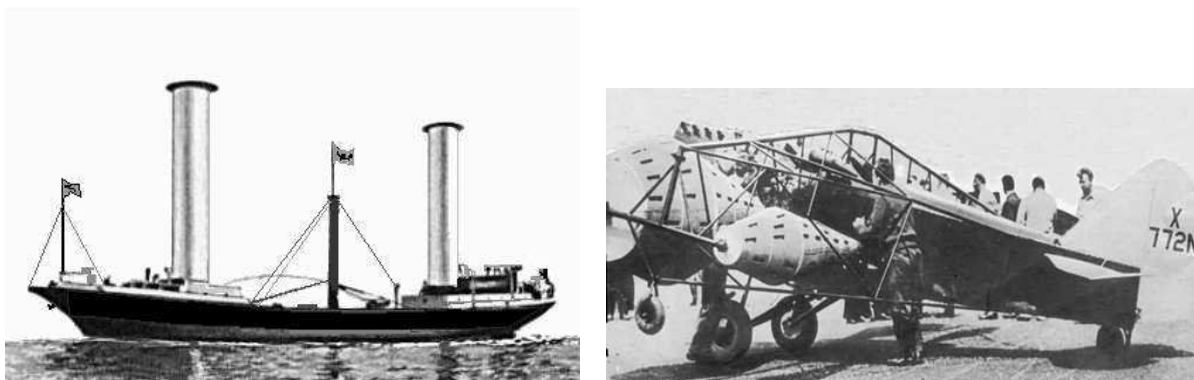
1.5.1 MAGNUSŮV JEV

Označujeme jím vznik boční (v případě horizontálního umístění osy válce vztlakové) síly při obtékání rotujícího tělesa proudícím plynem nebo kapalinou. Poprvé tento jev podrobněji popsal Gustav Heinrich Magnus v roce 1852. První zmínka o tomto jevu pochází už z roku 1672 od Isaaca Newtona. Jev je významný zvláště ve vnější balistice. Jev se projevuje u mnoha sportů, kde ovlivňuje dráhu míče (kopaná, tenis, golf atd.), hraní pomocí kulečnicku pomocí falší. Například golfový míček má pro zesílení jevu na povrchu množství prohlubní.



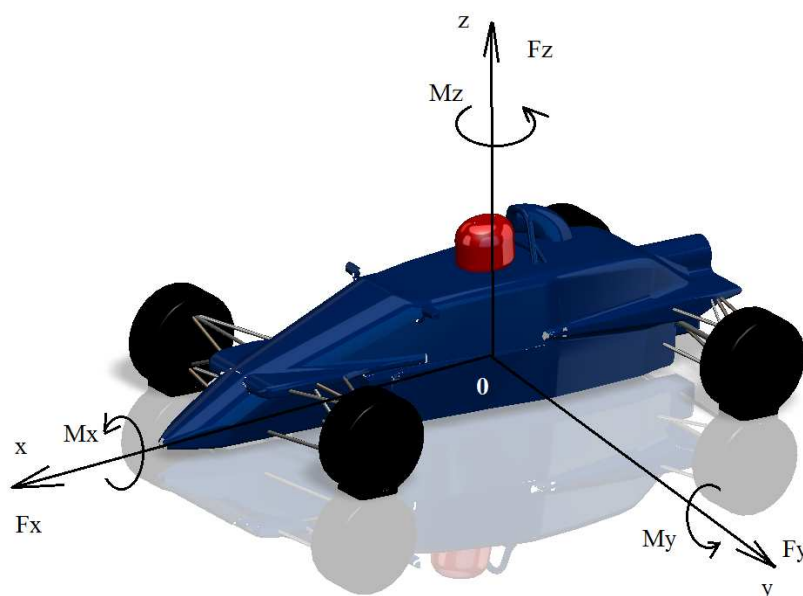
Obr. 8 Vznik boční (vztlakové) síly u Magnusova jevu [12]

Aplikací Magnusova jevu je například Flettnerův rotor. Jedná se o rotor, který byl použit na lodích, jeho funkce byla obdobná jako plachta. Ve dvacátých letech 20. Století se tento princip aplikoval na pohon lodi vynálezce Anton Flettner. S pokusnou lodí, využívající pohon dvou 18 metrů vysokých válců, překonal v roce 1926 Atlantský oceán. S rozporuplnými výsledky byl Magnusův jev uplatněn i pro nahrazení konstrukce křídla rotujícím válcem.



Obr. 9 Ukázky aplikací Magnusova jevu [13]

1.6 SOUSTAVA AERODYNAMICKÝCH SIL A MOMENTŮ, AERODYNAMICKÉ KOEFICIENTY



Obr. 10 Soustava aerodynamických sil a momentů

Celková aerodynamická síla má obecný směr a velikost. Proto ji rozkládáme do os souřadnicového systému se středem v bodě 0. Bod 0 se nachází na průsečíku roviny symetrie vozidla, roviny nacházející se v polovině rozvoru kol a rovinou vozovky. Velikosti aerodynamických sil vzhledem k těžišti je nutno dopočítat.

Celkové aerodynamické účinky na vozidlo můžeme rozložit do šesti složek, třech silových a třech momentových.



$$F_x = -\frac{1}{2} \cdot c_x \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A \quad \dots \text{ Aerodynamický odpor} \quad (6)$$

$$F_y = -\frac{1}{2} \cdot c_y \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A \quad \dots \text{ Aerodynamický vztlak} \quad (7)$$

$$F_z = -\frac{1}{2} \cdot c_z \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A \quad \dots \text{ Aerodynamická boční síla} \quad (8)$$

V je rychlost relativního proudění, c je koeficient aerodynamického odporu, ρ je hustota a A je průmět čelní plochy na rovinu za vozidlem.

$$M_x = \frac{1}{2} \cdot c_{Mx} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A \cdot r \quad \dots \text{ Moment klopení} \quad (9)$$

$$M_y = \frac{1}{2} \cdot c_{My} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A \cdot l \quad \dots \text{ Moment klonění} \quad (10)$$

$$M_z = \frac{1}{2} \cdot c_{Mz} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A \cdot l \quad \dots \text{ Moment stáčení} \quad (11)$$

r je rozchod kol, l je rozvor kol.

$$c_D = c_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A} \quad \dots \text{ Koeficient odporu vzduchu} \quad (12)$$

$$c_L = c_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A} \quad \dots \text{ Koeficient tlaku} \quad (13)$$



2 ZJIŠŤOVÁNÍ AERODYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK U VOZIDEL

Stanovení optimální aerodynamiky je jedno z hlavních hledisek při konstruování vozu. V automobilním průmyslu je snižování odporového součinitele c_x velmi ostře sledovaným kritériem, které dopomáhá k hospodárnějšímu provozu vozidel, nižší měrné spotřebě, nižší produkci škodlivin ve výfukových plynech a může významně ovlivnit i prodejnost automobilu.

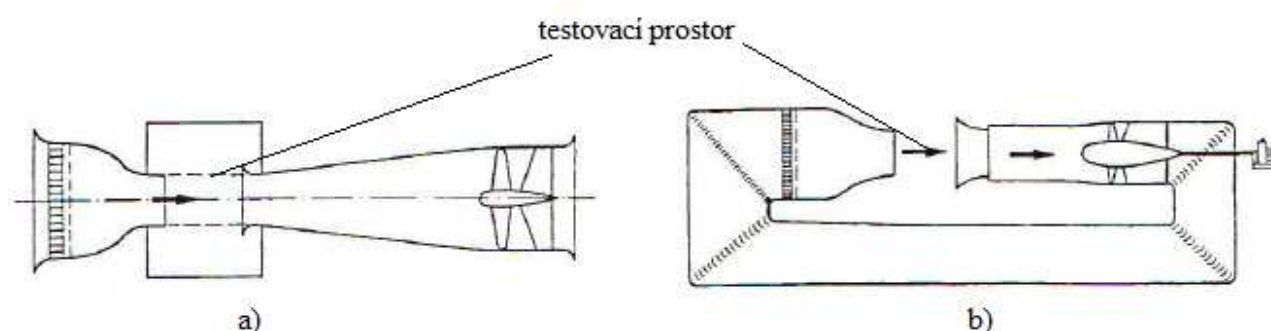
V závodním průmyslu jsou dávno pryč doby, kdy bylo zvýšení výkonu a zlepšení jízdních charakteristik řešeno pouze výměnou pohonné jednotky za větší a výkonnější motor. Dnes patří aerodynamika jízdních speciálů ke chráněnému tajemství jednotlivých týmů.

Stanovení součinitelů aerodynamických odporů se zjišťuje následujícími způsoby:

- Měřením zmenšeného modelu v aerodynamickém tunelu
- Měřením skutečného modelu v aerodynamickém tunelu
- Pomocí numerických výpočtů

2.1 AERODYNAMICKÝ TUNEL

Pro testování aerodynamiky automobilů se používají nízkorychlostní tunely. Průměr měřicího prostoru, kde je umístěn model, se pohybuje kolem pěti metrů, rychlost proudění dosahuje až 100 km/h, příkon ventilátoru je 2,5 MW. Používá se konstrukce s otevřeným nebo uzavřeným okruhem.



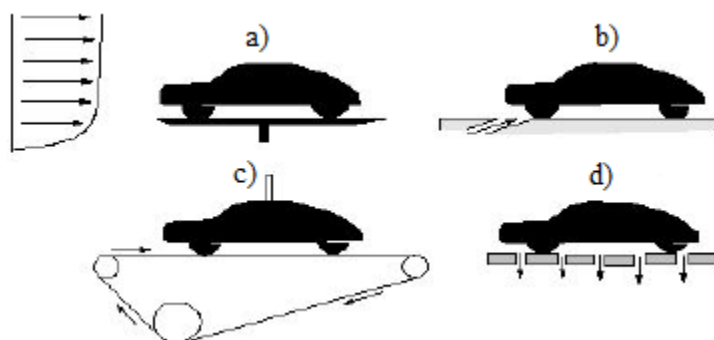
Obr. 12 Konstrukční provedení tunelů [1]

Vzduch, který obíhá uvnitř tunelu, musí mít specifické vlastnosti, jako je teplota, vlhkost apod. Prochází celou řadou procesů, které mají za úkol proud vzduchu uklidnit, aby byl jeho tok plynulý a stejnoměrný, což je hlavním předpokladem pro přesnost a opakovatelnost výsledků. Vzduch je nejprve zpomalen vtokem do široké části tunelu, poté je zchlazen a odveden do zklidňující komory. Zde prochází mezi lamelami, které usměrní tok



vzduchu. Ten se napřímí a síťové přepážky odstraní zbylé turbulence. Ze zklidňující komory pokračuje vzduch do zužující se části, kde se zvýší rychlost na potřebnou hodnotu a vstupuje do testovacího prostoru.

Automobil je v aerodynamickém tunelu speciální případ, je nutno zajistit požadované proudění mezi vozidlem a vozovkou. U měření vozidel se stacionárními koly docházelo k určité chybě při výpočtu. Dnes již u moderních aerodynamických tunelů existují zařízení pro simulaci jízdy modelu po vozovce. Ke skutečnosti se nejvíce přibližuje koncepce zobrazená na obrázku 12 c), kde je pohyb kol zajištěn pásovým dopravníkem, který jízdu po vozovce simuluje nejlépe. Model je na pásu upevněn vzpěrami, konstrukce dopravníku je ošetřena proti vzniku statické elektřiny od pohybujících se kol. Na podobném principu funguje i model umístěný na válcích, konstrukce je obdobná jako při měření na výkonových charakteristik na brzdě. Zde se dají měřit zátěžové charakteristiky pomocí speciálních snímačů pod každým kolem, dá se simulovat i průjezd zatáčkou. Dalšími možnostmi je odsávání vzduchu pod autem d) nebo tangenciální foukání vzduchu pod vůz b).



Obr. 12 Odtržení proudění od stacionárního a rotujícího kola [11]

Dříve se pro vizualizaci průběhu proudění používala bavlněná vlákna nebo proužky papíru, dnes existují kouřové sondy, jejichž vstříkované médium se vlastnostmi hodně blíží proudícímu vzduchu kolem karoserie.

2.2 VÝPOČTOVÉ PROGRAMY

V dnešním světě je díky rychlému nárůstu výkonu výpočtových stanic možno simulovat proudění na počítači s příslušným softwarem. Nyní je nejhodněji používána výpočtová dynamika tekutin CFD (Computational Fluid Dynamics), která umožňuje konstruktérům simulovat a analyzovat aerodynamické vlastnosti jednotlivých dílů ještě před tím, než jsou vyrobeny. Zjednodušeně si CFD můžete představit jako aerodynamický tunel v počítači. Tento postup nám šetří čas potřebný na výzkum a vývoj, nahrazuje finančně náročnější simulaci skutečného modelu v aerodynamickém tunelu a virtuální simulace je



také méně energeticky náročná, i když spotřeba superpočítačů s velkým počtem procesorů je vysoká, přesto je množství energie potřebné na provoz tunelu daleko vyšší.

Nejdříve musí být dostupný CAD model zkoumaného objektu. Ten vznikne navržením geometrie v některém z používaných 3D modelářů, nebo objekt naskenován 3D scannerem a dále doupraven. V této diplomové práci byl pro vytvoření modelu použit software Pro/ENGINEER Wildfire 5.0.

Povrchová a objemová síť byla zpracována v produktu z balíčku ANSYSu 13, ICEMu CFD. Následně byla objemová mesh importována do sofistikovaného CFD řešitele, zde ANSYS FLUENT V6, kde byla provedena simulace proudění kolem karoserie vozu. Tento program má široké využití v mnoha odvětvích průmyslu. Obsahuje fyzikální modely postihující široké možnosti potřebné k modelování proudění, turbulence, přenosu tepla a reakcí pro průmyslové aplikace.

Posledním z použitých programů je ANSYS CFD-Post, kde byla provedena vizualizace a porovnání naměřených dat.



3 TVORBA MODELU V PRO/ENGINEERU

3.1 MODELOVANÉ VOZIDLO

Za modelované vozidlo jsem si zvolil formuli Ford 1600, jelikož Ústav automobilního a dopravního inženýrství na Vysokém učení technickém v Brně jeden exemplář tohoto vozidla vlastní. Jedná se závodní vozidlo z osmdesátých let s motorem z Fordu Escortu s obsahem 1600 cm³.

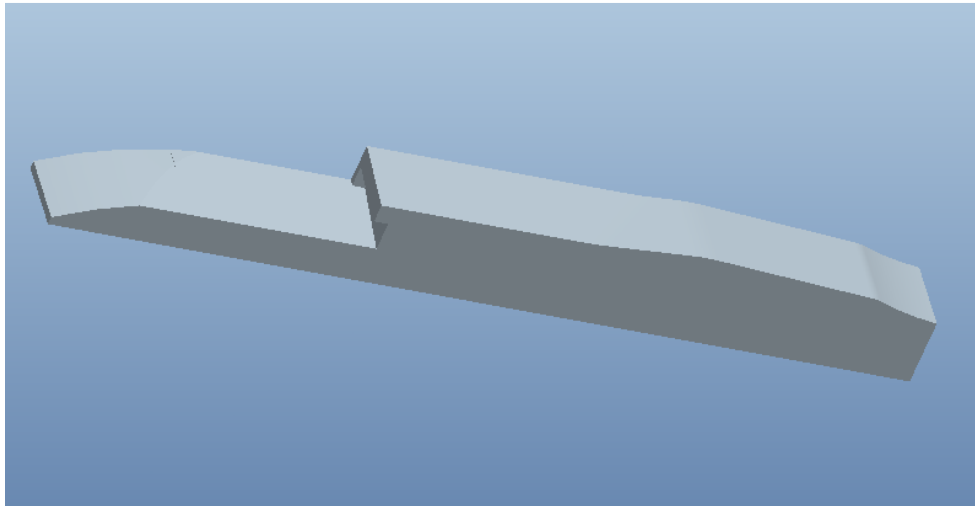


Obr. 13 Formule Ford 1600 se závodníkem Paulem Meijerem [14]

Jak již bylo v úvodu zmíněno, hlavním požadavkem bylo, aby bylo na modelu možné nastavovat výšku a úhel natočení mezi karoserií a vozovkou, nezávisle pro přední a zadní nápravu. Za tímto účelem byl zvolen program Pro/ENGINEER Wildfire 5.0, ve kterém je možné modelovat v 3D prostředí parametricky. Celá formule byla vymodelována jako přibližný model skutečného vozu. Přesné rozměry formule Ford 1600 byly dodány vedoucím diplomové práce Ing. Janem Vančurou, jelikož tento vůz také dříve modeloval. Celý model vozidla byl vytvořen pomocí standardních objemových operací.

3.2 KAROSERIE

Jako první byla navržena karoserii formule. Jednalo se o hlavní a nejsložitější část CAD modelu. Nejprve byl otevřen nový výkres typu *Part*. Dále byla zvolena rovina, ve které model vznikal, a to příkazem *Sketch*. Pomocí příkazu *Extrude* bylo vytvořeno vytážení poloviny půdorysu formule. Poté přišlo na řadu odečítání dalších objemových objektů od základního tělesa, aby bylo dosaženo co nejuvěrnějšího tvaru karoserie.



Obr. 14 Vytažený půdorys karoserie formule

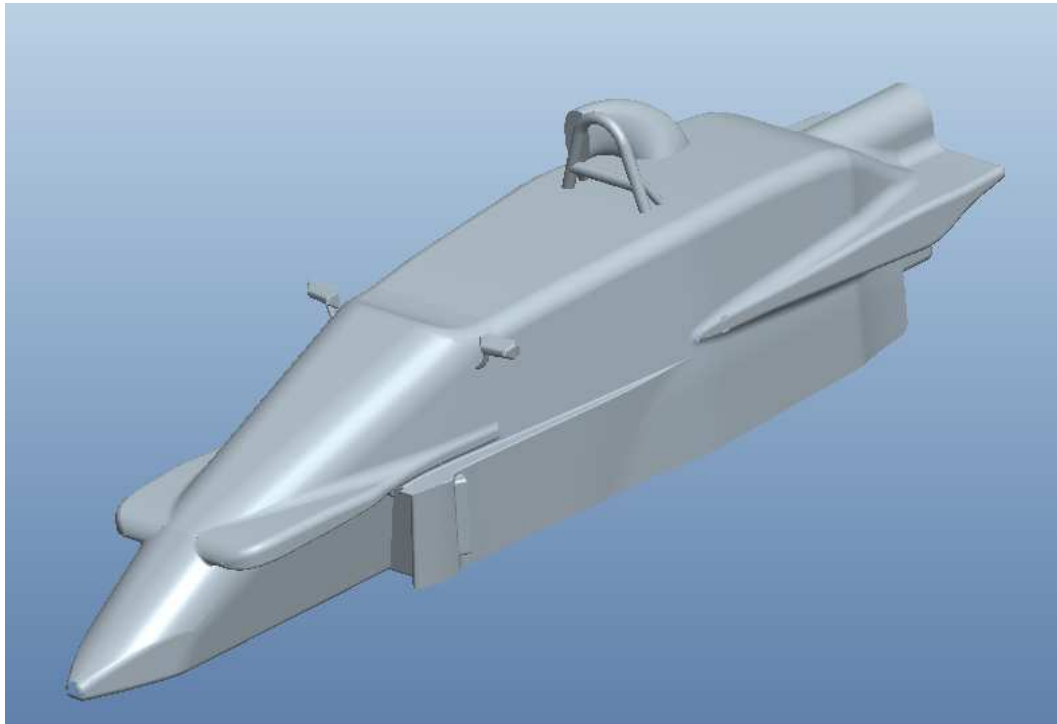
Další kroky spočívaly v úpravách modelu pomocí zaoblování *Round* a zkosení hran *Edge Chamfer*. Na řadu přišlo vytvoření prvku uchycení zavěšení kol, opět bylo použito vytažení a zaoblení hran.

Chránič hlavy byl vytvořen pomocí vytažení profilu po křivce a to příkazem *Sweep > Protrusion*. Konstruování tohoto prvku bylo provedeno pomocí vytvoření *Sketch* v pomocné rovině *Plane*.

Vytvoření tvaru vstupu chlazení formule bylo provedeno opět kombinací vytažení, zkosení a zaoblení těles. Dalším prvkem byl vstup sání motoru za hlavou řidiče. Jednalo se o vytvoření plochy mezi dvěma uzavřenými křivkami, které se nacházejí v na sebe kolmých rovinách. Tato plocha byla vytažená po trajektorii, tvořenou prostorovou křivkou. Na tento konstrukční prvek bylo použito příkazu *Sweep blend*.

Zrcátka byly vytvořeny vytažením uzavřené křivky narýsované v pomocné rovině a následným zaoblením. Spojení s karoserií bylo zajištěno pomocí příkazu *Sweep > Protrusion*.

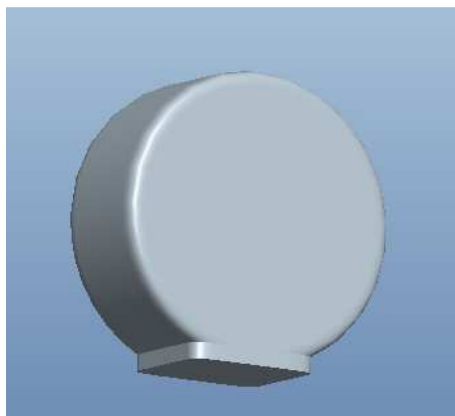
Po odzrcadlení příkazem *Mirror* už začal model připomínat formuli. Následovala modelace zjednodušeného, oproti originálu více aerodynamického, výfuku a připojení rovněž zjednodušené převodovky. V tomto stavu byla součást uložena a na řadu přišlo vytvoření dalších částí.



Obr. 15 Ozrcadlená karoserie formule s dalšími konstrukčními prvky

3.3 KOLA

Kola byla vymodelována také ve zjednodušeném a výpočtu postačujícím provedení. Vznikla poměrně jednoduše, a to vytažením kružnice. Na válci se následně zaoblily obvodové hrany a upravilo se místo styku kol s vozovkou, důvod úpravy bude vysvětlen v kapitole 4.4.



Obr. 16 Zjednodušené kolo s úpravou místa styku s vozovkou



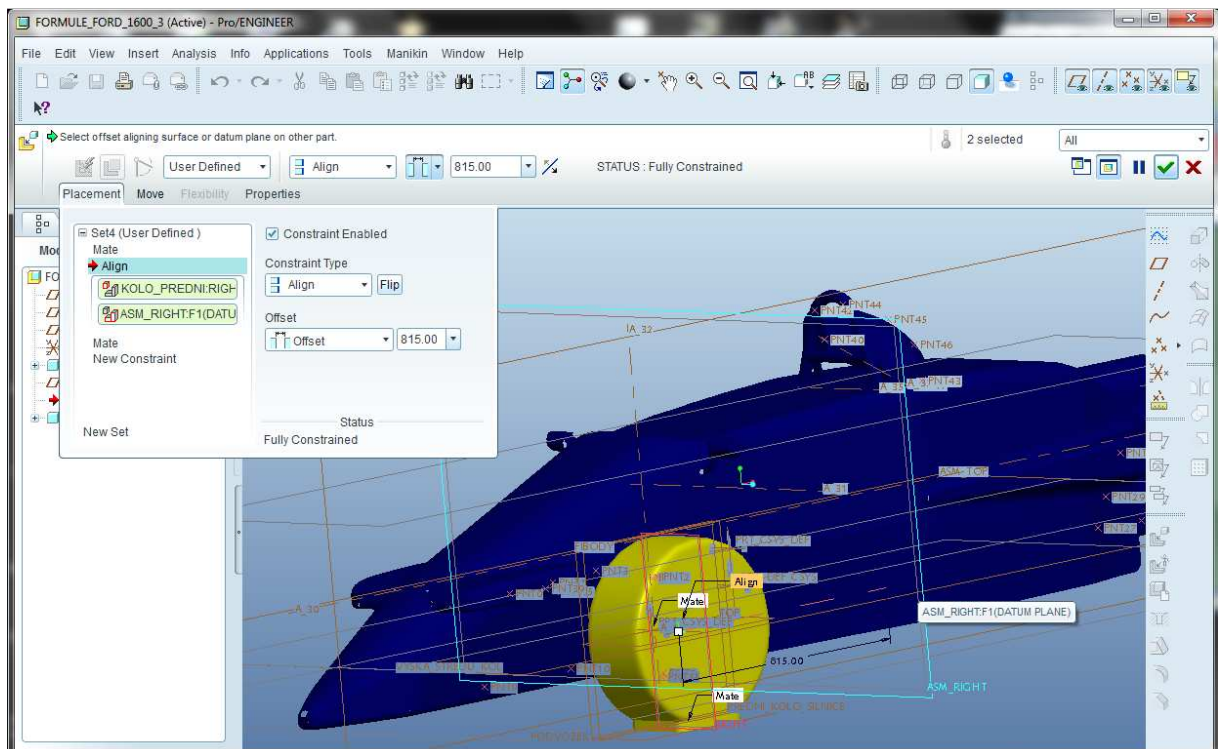
3.4 HELMA

Helma vznikla obdobně jako kola, tedy vytažením základního profilu tvaru elipsy a následným zaoblením hran.

3.5 SKLÁDÁNÍ SESTAVY

V tuto chvíli již byly všechny komponenty sestavy formule vytvořeny a uloženy jako soubory typu *Part*. Následovala kompletace sestavy.

Do nového dokumentu typu *Assembly* byly postupně vloženy všechny části vozidla pomocí příkazu *Assemble*. Dále bylo velice důležité zamyslet se a vhodně zvolit způsob zavazbení jednotlivých prvků vůči sobě, aby byl dodržen hlavní požadavek. Aby bylo možné karoserii výškově nastavovat a natáčet ve směru osy *x*, musely být karoserie a kola na sobě zcela nezávislé.

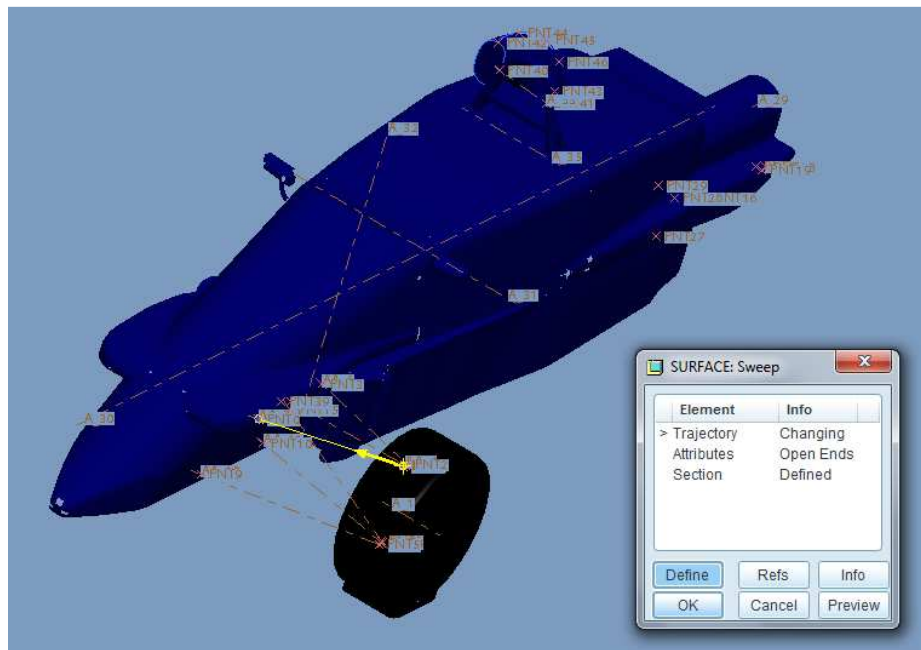


Obr. 17 Nastavení vazeb mezi hlavními rovinami kol a sestavy

Proto byly tyto prvky zavazbeny vůči hlavním rovinám sestavy. Po vložení součásti nám vyskočí nabídka *Placement*, ve které nastavujeme umístění vložených *Partů* v prostoru pomocí vazeb. Tyto vazby byly vytvořeny mezi hlavními rovinami jednotlivých prvků a hlavními rovinami sestavy, viz obr. 17. V nabídce bylo použito příkazů *Mate* a *Align*, které nám určují vlastnosti nastavení jednotlivých typů vazeb. Pro přesné zadání vzdálenosti mezi rovinami bylo použito *Offsetu*, ve kterém se udala v milimetrech referenční vzdálenost mezi zavazbenými rovinami.

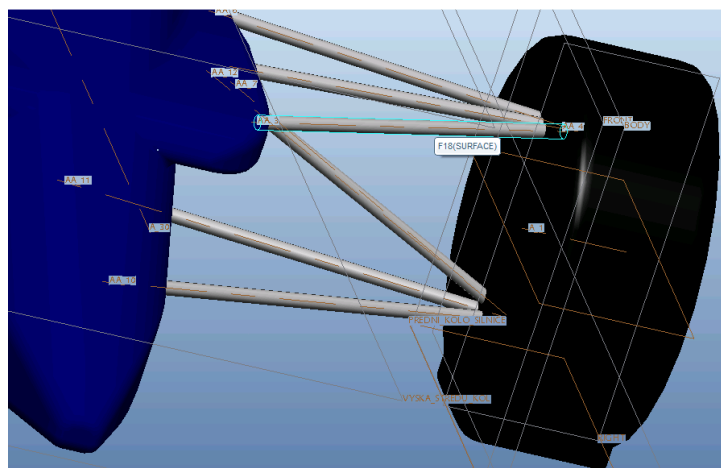


Dále bylo nutné vytvořit zavěšení mezi koly a karoserií. Na karoserii a kolech byly vytvořeny pomocné roviny, na které byly zadány pomocné body o souřadnicích odpovídajících umístění konců ramen zavěšení. Tyto body se propojily pomocnou osou. Příkazem *Sweep > Surface* byl vytažen kruhový profil po přímce, z bodu karoserie k bodu kola. Výhodou tohoto řešení je fakt, že při změně polohy karoserie vůči kolům se zavěšení přizpůsobí. Upraví svoji délku a sklon podle polohy referenčních bodů.

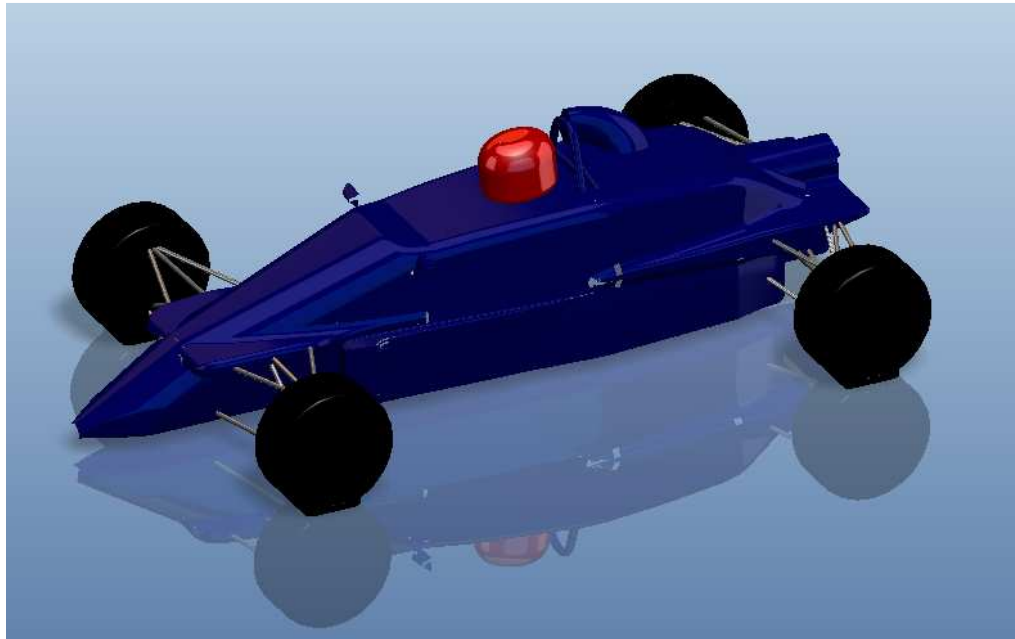


Obr. 18 Vytváření zavěšení kol

Styk jednotlivých ramen zavěšení musel být upraven pro další použití převedeného CAD modelu v CFD prostředí. Jednotlivé části zavěšení se nemohly spojovat v jednom bodě přímo na povrchu kola či karoserie, a to kvůli správnému vytvoření prizmatických buněk, viz kap. 4.4. Proto se vytvořila pomocná rovina hlouběji uvnitř tělesa a jednotlivé prvky byly protaženy až na ni. Na povrchu kola a na karoserii byly již tyto části zavěšení v postačujícím odstupu od sebe, viz obr. 19. Zmiňované protažení do nitra tělesa bylo v pozdější části práce s modelem (tvoření meshu) jednoduše odmazáno.

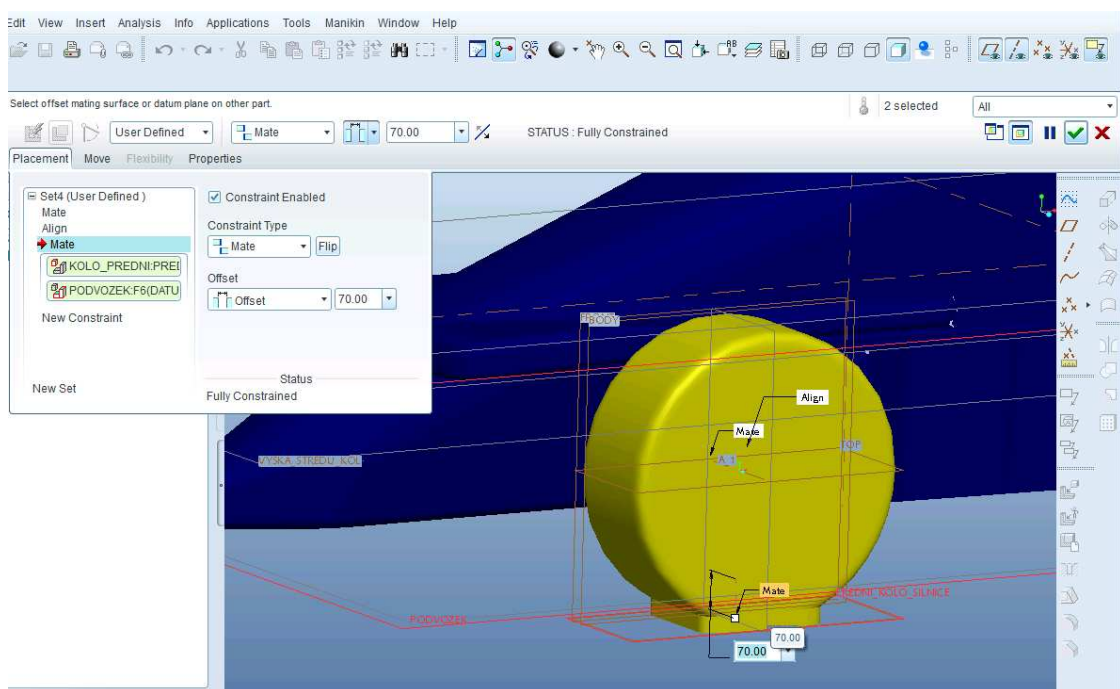


Obr. 19 Vytváření příznivé geometrie pro ulehčení tvoření meshu



Obr. 20 Výsledný pohled na CAD model formule Ford

Cílem diplomové práce je provést citlivostní studii vlivu polohy karoserie závodního vozu na jeho aerodynamické zatížení. Za tímto účelem vznikla čtyři různá nastavení modelu. Nastavovaným parametrem byla výška dna podvozku karoserie a vozovky a úhel natočení karoserie vozu vůči vozovce. Změna polohy karoserie byla možná díky vhodnému zavazbení jednotlivých komponentů. Rozdílná výška byla dosažena zadáním rozdílné hodnoty v nastavení vzdálenosti rovin dosednutí kola na vozovku a dna karoserie. Pro nastavení natočení byla vytvořena v rovině dna podvozku pomocná osa, podél které byla formule natočena.



Obr. 21 Ukázka nastavení podvozku na 70 mm



Tab. 1 jednotlivé úlohy k analýze

Úloha	Nastavení	
	Vzdálenost karoserie od vozovky [mm]	Natočení karoserie vůči vozovce [°]
1.	40	0
2.	70	0
3.	90	2
4.	120	0

Dalším krokem byl import modelu z Pro/ENGINEERu do výpočtového prostředí CFD. Příkazem *File > Save a copy* byla sestava uložena do formátu *STEP*. Při ukládání musela být nastavena položka *Surfaces*, což znamená, že uložený model je tvořen pouze plochami.

Model byl též zjednodušen, aby se zabránilo příliš složitému výpočtu. Formule přišla o zrcátka a zavěšení kol bylo ochuzeno o některé komponenty.



4 TVORBA SÍTĚ V ICEMU CFD

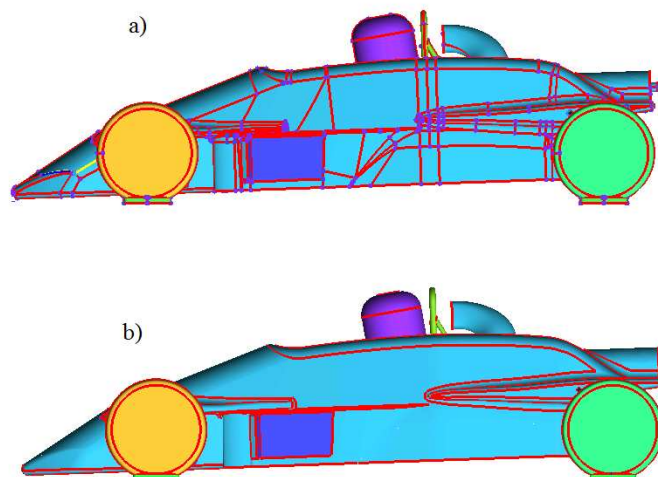
Jak již bylo v kap. 2.2 vzpomenuto, CFD je zkratka anglického výrazu **C**omputational **F**luid **D**ynamics, což znamená počítačová dynamika tekutin. Jedná se o počítačovou simulaci proudění a přenosů tepla s využitím specializovaného softwaru, který umožňuje konstruktérům simulovat a analyzovat aerodynamické vlastnosti u zamýšlené konstrukce dříve než jsou vyrobeny. Hlavními výhodami tohoto postupu konstruování jsou významná redukce času potřebná pro výzkum a vývoj a nahrazení finančně náročnější simulace proudění kolem skutečného modelu v aerodynamickém tunelu.

Dalším krokem v postupu k simulaci proudění kolem karoserie je vytvoření nejprve povrchové a následně objemové meshe a připravit ji na import do programu FLUENT V6. Pod pojmem mesh si můžeme představit síť uzlových bodů o určité struktuře uspořádání, na nichž program při simulaci sbírá a vyhodnocuje jednotlivá data.

4.1 ÚPRAVA GEOMETRIE

Celá formule byla po importování tvořena velkým množstvím různých ploch a křivek, v geometrii byly díry a nepřesnosti způsobené importem a nevhodným konstrukčním řešením návrhu modelu v Pro/ENGINEERu.

Nejprve bylo zapotřebí geometrii zkontrolovat a pokusit se případné chyby v povrchu opravit. Kontrolu je provedena v záložce *Geometry > Repair geometry > Build Topology*, byla nastavena požadovaná tolerance a zapnuto pamatování vymazaných křivek pro možnost jejich probuzení v případě potřeby, *Keep dormant as dormant*.



Obr. 22 Formule a) před úpravou b) po úpravě geometrie

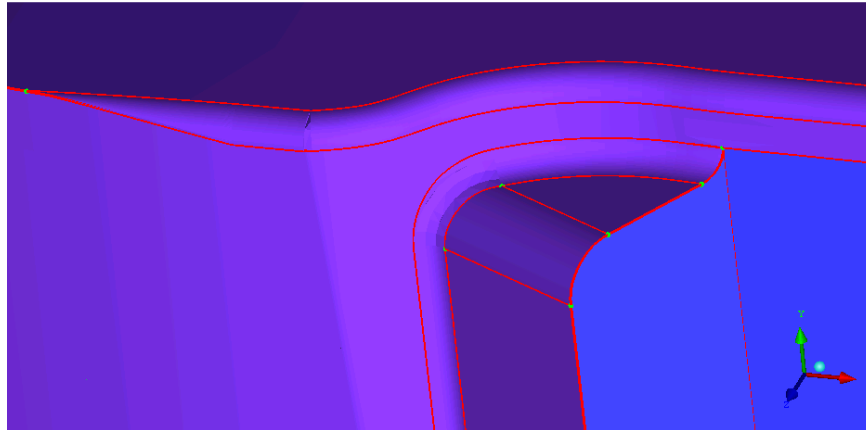
Opravená geometrie modelu by měla být tvořena pouze červenými povrchovými křivkami a to jen na místech výskytu náhlých geometrických přechodů. Důvodem je správný růst meshe. Červená barva nám říká, že jsou křivky tvořeny pouze spojením 2 ploch. Každá odlišná barva značí, že je geometrie modelu v nepořádku.



Zelená barva = křivka není připojena k žádnému povrchu.

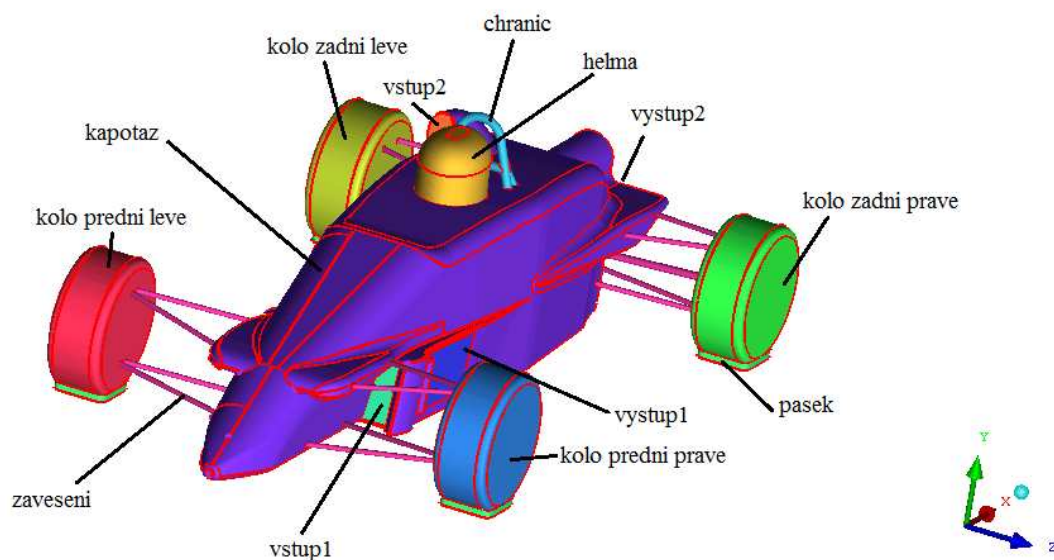
Žlutá barva = křivka náleží jen jednomu povrchu.

Modrá barva = křivka je tvořena průnikem více než dvou povrchů.



Obr. 23 Ponechané uzlové body

Body se na povrchu modelu neodstraňují jen na uzlu spojnic tří povrchových křivek. Vše ostatní musí být smazáno, jelikož se síť při svém růstu těmito elementy řídí, viz obr. 23. Když je geometrie opravená, sloučí se jednotlivé plochy na *Party*, což znamená na jednotlivé části modelu formule, aby na nich bylo možné nastavit rozdílné podmínky tvoření meshe, viz obr. 24.



Obr. 24 Rozčlenění formule na jednotlivé *Party*



Dále se kolem formule vytvořil tunel o rozměrech 43 x 9 x 4,5 m, aby vznikl prostor pro nastavení objemové meshe. Na tunelu zůstaly obrysové křivky a body na vrcholech kvádrů. Tunel byl také rozčleněn na jednotlivé *Party*. Když byl model takto připravený, mohlo se přejít k nastavování meshe.



Obr. 25 Rozčlenění tunelu na jednotlivé *Party*

4.2 POVRCHOVÁ MESH

Nejdříve bylo potřeba zamyslet se nad velikostí elementů, aby bylo možné provést rozumně výpočet. Jelikož je model formule v měřítku 1:1, byla zvolena v nabídce *Mesh > Global Mesh Parametres* velikost největšího globálního elementu na 900 mm a nejmenší na 10 mm. Další volbou byl typ elementů meshe *Guard Dominant* a meshovací metoda *Patch Dependent*.

Důležité je i nastavení maximálních velikostí elementů pro jednotlivé *Party*. V nabídce *Mesh > Part Mesh Setup* bylo možné příslušné velikosti elementů nastavit. Menší elementy měly součásti o malém povrchu, jako například zavěšení a chránič hlavy, naopak větší velikosti buněk měly rozlehlejší plochy, například kapotáž či kola, viz obr. 26.

Po zadání všech parametrů byl spuštěn výpočet povrchové meshe v nabídce *Mesh > Compute Mesh > Surface Mesh > Compute*.



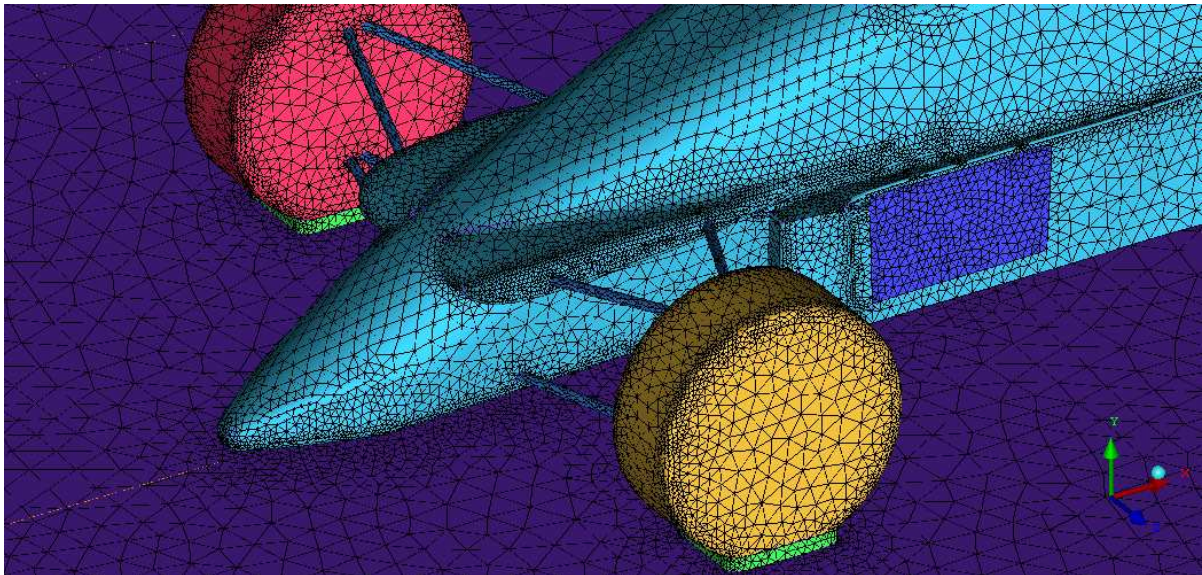
part	prism	hexa-core	max size	height	height ratio	num layers	tetra size ratio	tetra width	min size limit	m
BODY										
CHRANIC	<input type="checkbox"/>		30	0	0	0	0	0	0	
HELMA	<input type="checkbox"/>		40	0	0	0	0	0	0	
KAPOTAŽ	<input checked="" type="checkbox"/>		50	0	0	0	0	0	0	
KOKO_ZADNI_PRAVE	<input checked="" type="checkbox"/>		40	0	0	0	0	0	15	
KOLO_PREDNI_LEVE	<input checked="" type="checkbox"/>		40	0	0	0	0	0	15	
KOLO_PREDNI_PRAVE	<input checked="" type="checkbox"/>		40	0	0	0	0	0	15	
KOLO_ZADNI_LEVE	<input checked="" type="checkbox"/>		40	0	0	0	0	0	15	
KRIVKY	<input type="checkbox"/>		0	0	0	0	0	0	0	
PASEK	<input checked="" type="checkbox"/>		20	0	0	0	0	0	0	
TUNEL										
TUNEL/INLET	<input type="checkbox"/>		0	0	0	0	0	0	0	
TUNEL/OUTLET	<input type="checkbox"/>		0	0	0	0	0	0	0	
TUNEL/SILNICE	<input checked="" type="checkbox"/>		700	0	0	0	0	0	0	
TUNEL/STENY	<input type="checkbox"/>		700	0	0	0	0	0	0	
VSTUP1	<input checked="" type="checkbox"/>		30	0	0	0	0	0	0	
VSTUP2	<input checked="" type="checkbox"/>		30	0	0	0	0	0	0	
VYSTUP1	<input checked="" type="checkbox"/>		30	0	0	0	0	0	0	
VYSTUP2	<input checked="" type="checkbox"/>		30	0	0	0	0	0	0	
ZAVESENI	<input checked="" type="checkbox"/>		30	0	0	0	0	0	12	

Show size params using scale factor
 Apply inflation parameters to curves
 Remove inflation parameters from curves

Highlighted parts have at least one blank field because not all entities in that part have identical parameters.

Apply Dismiss

Obr. 26 Nastavení maximální a minimální velikosti pro jednotlivé Party



Obr. 27 Povrchová mesh

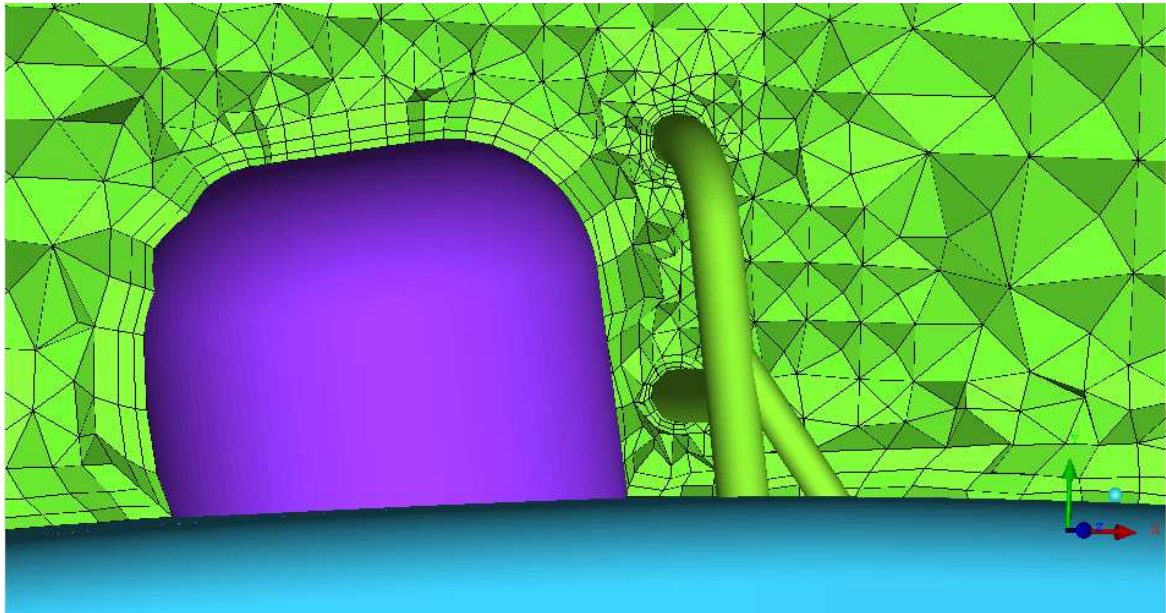
4.3 OBJEMOVÁ MESH

Zde se volí typ elementu meshe *Tetra/Mixed*, meshovací metodu *Robust (Octree)* počet *Smoothovacích* iterací, tzn. počet vyhlazovacích cyklů na minimální kvalitu sítě. Je zvoleno též uzavírání chyb a děr v meshi. Následovalo spuštění výpočtu.



4.4 VYTVOŘENÍ PRIZMAT

Tvorba prizmat nám simuluje existenci mezní vrstvy (viz kap. 1.4), která obklopuje každý obtékáný předmět. V této vrstvě je rozdílný profil proudění oproti zbytku okolního prostředí, způsobeném nižší rychlostí proudění v bezprostředním okolí povrchu. Byl zadán počet vrstev a exponenciální způsob růstu následující vrstvy.



Obr. 28 Objemová mesh s prizmatickými vrstvami

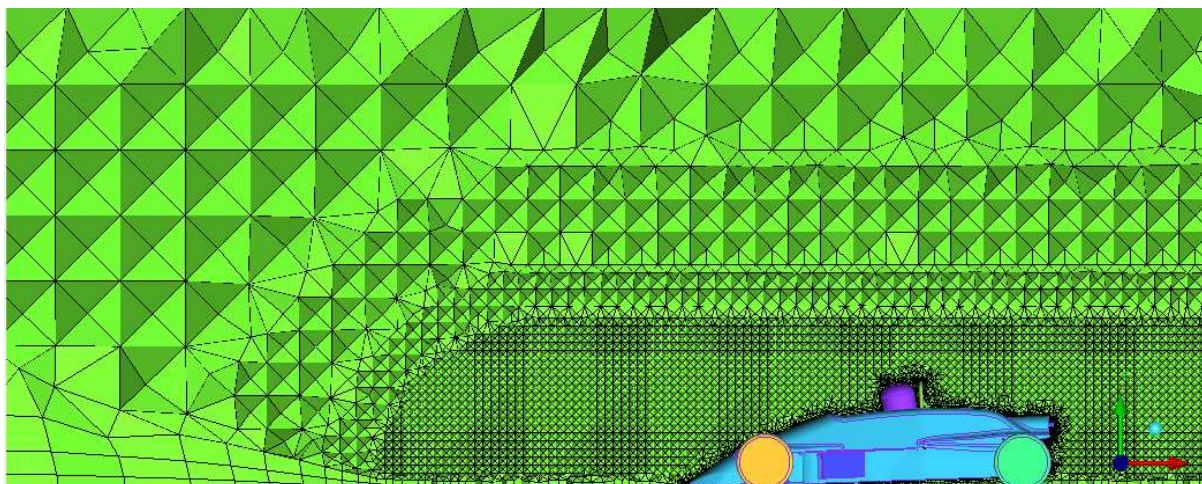
Aby se v meshi vytvořilo co nejméně nekvalitních elementů, mělo by být na modelu minimum, nejlépe však žádné, přechody s ostrým úhlem. Tyto prostory se obtížně plní elementy. Proto byl styk kol s vozovkou nebo upevnění závěsu na kole upraveno tak, aby se tento nepříznivý vliv na mesh odstranil, viz obr. 4, obr. 19.

4.5 NASTAVENÍ DENSITY

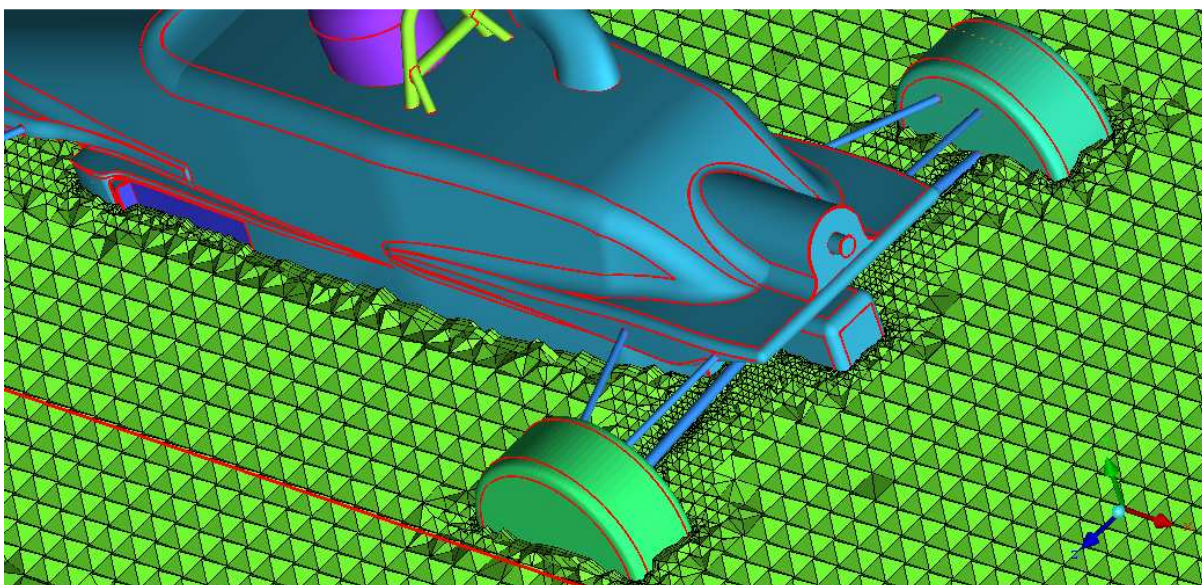
Densitu můžeme chápat jako možnost místního nastavení rozdílných podmínek růstu elementů v povrchové a objemové meshi. Tuto možnost volíme v případě, že chceme přesnější výsledky v požadovaném místě. Zde byla tato možnost využita v okolí formule. Densita se zadá pomocí dvou bodů na přímce. Dále musí být zadána velikost density, počet vrstev a růst density.

V závěru, když je vytvořena objemová mesh s prizmatickými vrstvami a densitou, se provede kontrola kvality meshe a případně se *Smoothováním* upraví na příslušnou minimální hodnotu tak, aby bylo elementů s nízkou kvalitou co nejméně, řádově v tisícinách procent. Hodnota konečného počtu elementů vytvořené objemové sítě se u všech čtyř modelů pohybovala okolo 2 600 000.

Posledním krokem v ICEMu CFD je export objemové meshe ve formátu pro FLUENT V6.



Obr. 29 Ukázka objemové meshe s prizmatickými vrstvami a densitou, boční pohled



Obr. 30 Ukázka objemové meshe s prizmatickými vrstvami a densitou, šikmý pohled

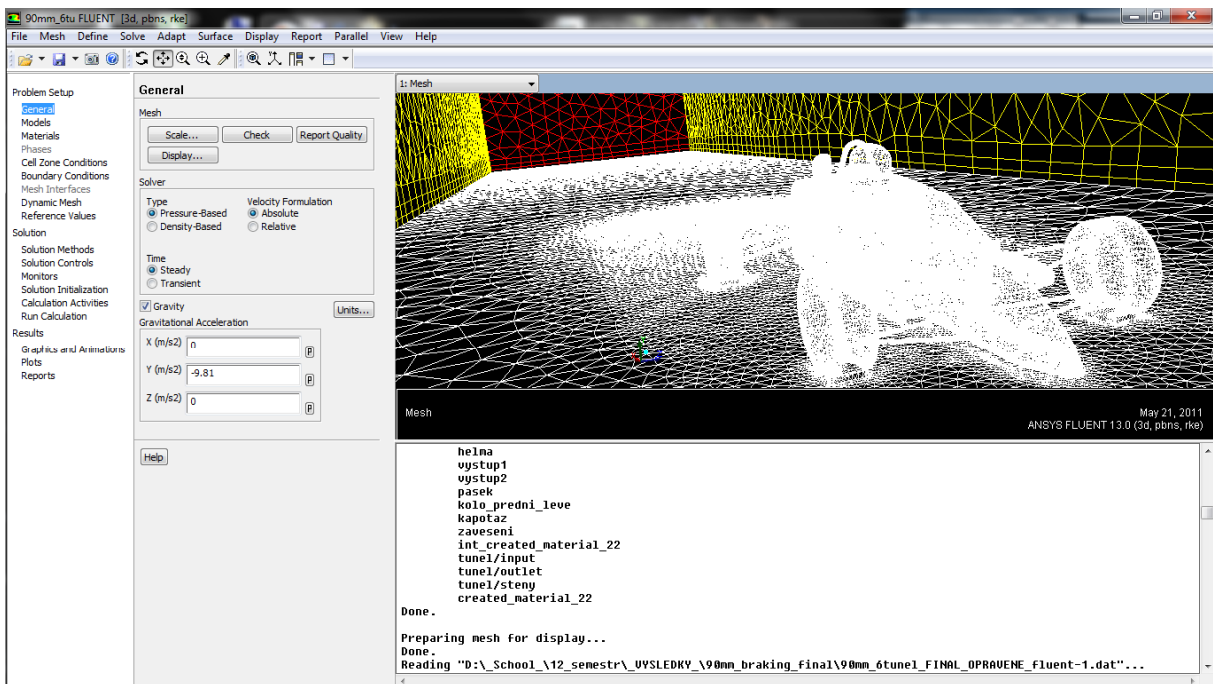


5 NASTAVENÍ PARAMETRŮ PROUDĚNÍ VE FLUENTU V6

V tomto výpočtovém programu se provedlo nastavení parametrů a okrajových podmínek proudění. Model byl převeden na systém parciálních diferenciálních rovnic.

5.1 ZADÁNÍ ZÁKLADNÍCH CHARAKTERISTIK

Příkazem *File > Read > Mesh* byla importována síť. V nabídce *Problem Setup > General > Scale* bylo zkontrolováno a popřípadě upraveno měřítko. Poté následovala kontrola meshe, zadalo se tíhové zatížení v ose *y*. Dále byl pro výpočet zvolen materiál vzduch a model turbulence *k-epsilon*, který nám pro zvolený výpočet nejvíce vyhovuje a je nejpoužívanějším modelem.



Obr. 31 Zadávání parametrů v programu FLUENT

Tab. 2 Zadání hodnot pro základní fyzikální veličiny

Fyzikální veličina	Hodnota
Tlak	101325 Pa
Rychlost	27,78 m/s (100km/h)
Teplota	20°C
Hustota	1,18415 kg/m ³



5.2 ZADÁNÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

V dalším kroku se nastavily parametry pro jednotlivé části modelu. Výchozí hodnota rychlosti formule v tunelu byla 100 km/h. Tato hodnota musela být promítnuta na všechny komponenty, které byly v pohybu.

Pro prvky kapotáž, chránič, helma, vstupy, výstupy, kola, silnice a zavěšení byl zvolen typ prvku *Wall* (stěna).

Pro **tunnel/inlet** byl nastaven typ prvku *velocity-inlet* a nastavena rychlost proudícího média na 27,78 m/s (100 km/h).

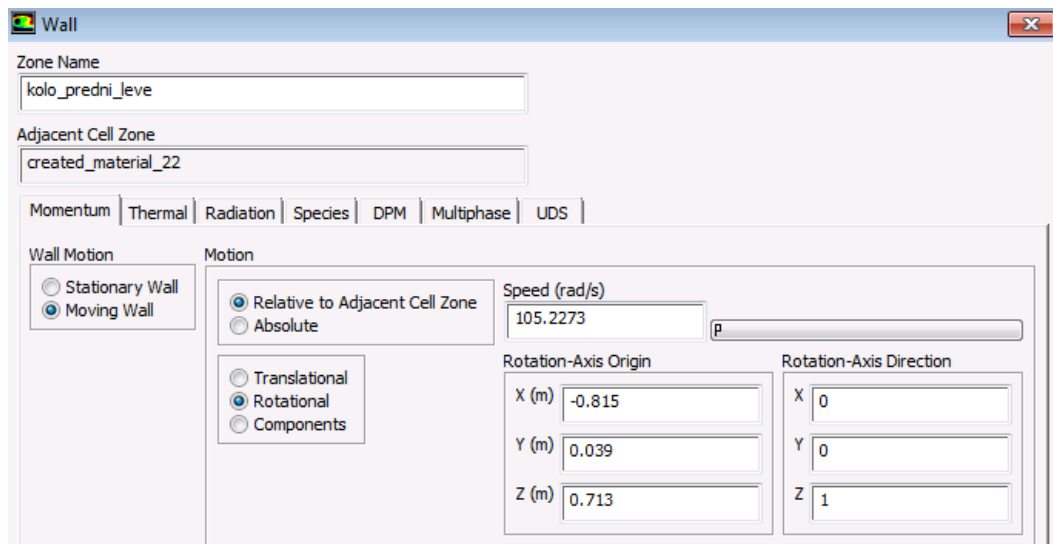
Pro **tunnel/outlet** byl nastaven typ prvku *pressure-outlet* a tlak na vstupu $p = 0 \text{ Pa}$

Pro **silnici** byl nastaven typ prvku *Wall* a byla zadána rychlost translačního pohybu vozovky 27,78 m/s v kladném směru osy x .

Pro **kola**, která byla taky typu *Wall*, se nastavil rotační způsob pohybu a musela se přepočtem určit úhlová rychlost při simulaci jízdy formule rychlostí 100 km/h.

$$\omega = \frac{V}{R} \tag{14}$$

Pro každé kolo se zadala úhlová rychlost $\omega = 105.2273 \text{ rad/s}$. Také musely být zadány souřadnice os rotací pro jednotlivá kola, rotační pohyb probíhal kolem osy z .



Obr. 32 Nastavení okrajových podmínek pro levé přední kolo

Do nabídky *Problem Setup > Reference Values* byla zadána automaticky spočtená čelní plocha formule a zadala se rychlost proudění.



5.3 NASTAVENÍ MONITOROVÁNÍ ODPORŮ

V nabídce *Solution > Monitors* byl nejprve přenastaven residuál na vlastnost, aby výpočet pokračoval až do konečného počtu nastavených iterací a neskončil při určité hodnotě přesnosti konvergence. Dále byly vybrány parametry, které byly stěžejní pro měření. Šlo o koeficient odporu vzduchu *Drag* a koeficient vztlakové síly *Lift*. Nastavilo se automatické ukládání do textového souboru, automatické vykreslování do grafu, měřeny byly všechny povrchy typu *Wall*, kromě silnice.

V nabídce *Solution > Solution Initialization* byla nastavena rychlost média $-27,78$ m/s v kladném směru osy x a zadání se inicializovalo. Před spuštěním výpočtu bylo nastaveno automatické ukládání výsledků po pěti stech iteracích, celkový počet iterací byl 4000.



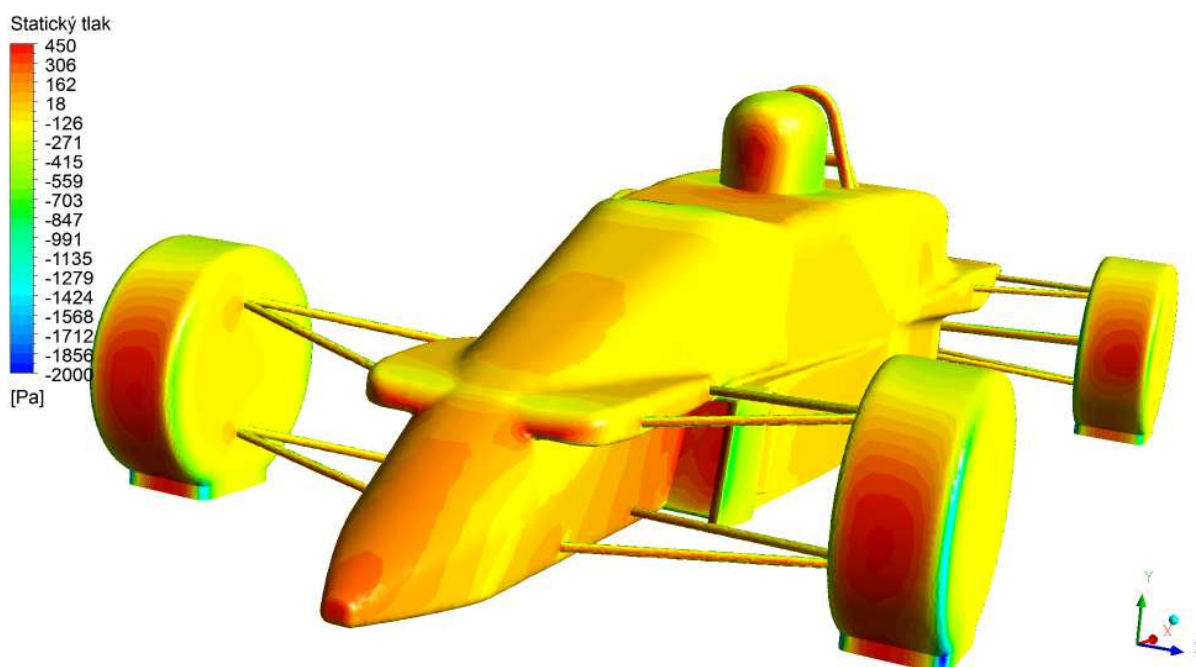
6 VIZUALIZACE A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ V CFD-POST

6.1 VYPOČTENÉ HODNOTY

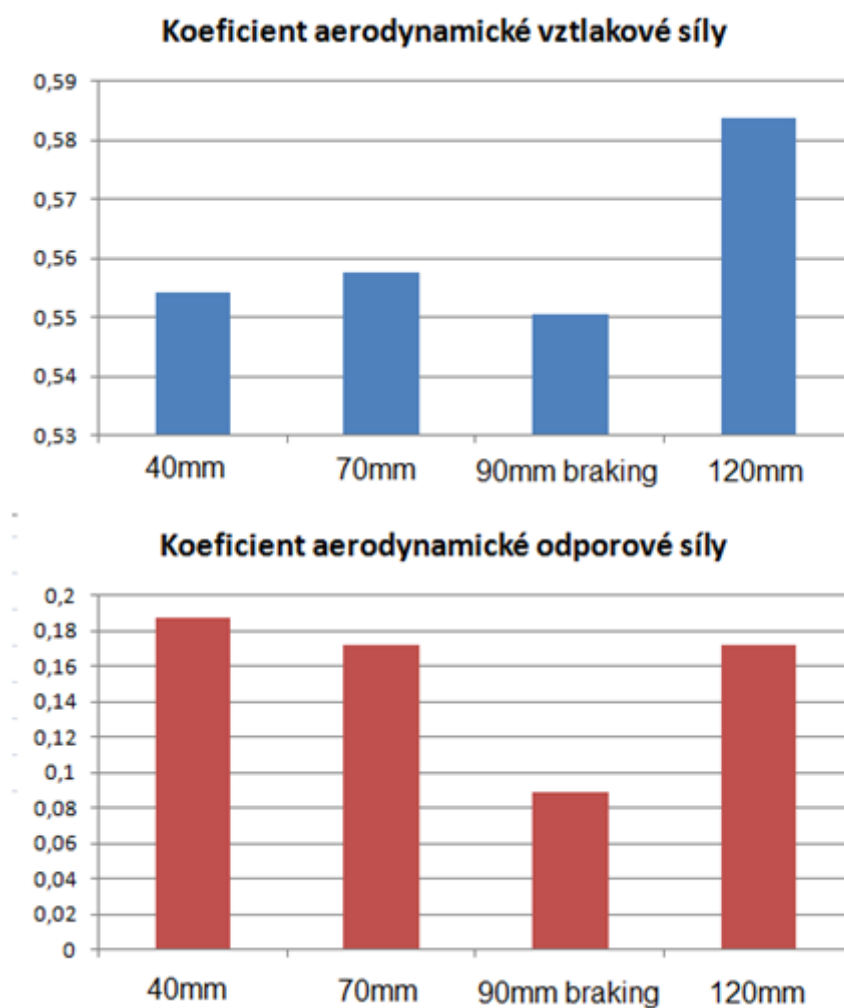
U sledovaných hodnot koeficientu aerodynamického vztlaku a aerodynamické odporové síly bylo posledních 200 iterací zprůměrováno a zapsáno do tabulky a vyneseno do grafů. Naměřené datové soubory se načely do programu CFD-POST a pomocí barevných schémat byla provedena vizualizace průběhu tlakových polí na modelu, na vozovce a na dalších kritických místech modelu a byl též vykreslen průběh rychlosti tvar proudnic kolem karoserie.

Tab.3 Přehled výsledných koeficientů

Nastavení podvozku		Koeficient aerodynamického vztlaku c_L	Koeficient aerodynamické odporové síly c_D
Výška [mm]	Natočení [°]		
40	0	0,5542	0,1873
70	0	0,5575	0,1717
90	2	0,5504	0,0889
120	0	0,5838	0,172



Obr. 33 Rozložení tlaku na vozidle, perspektiva



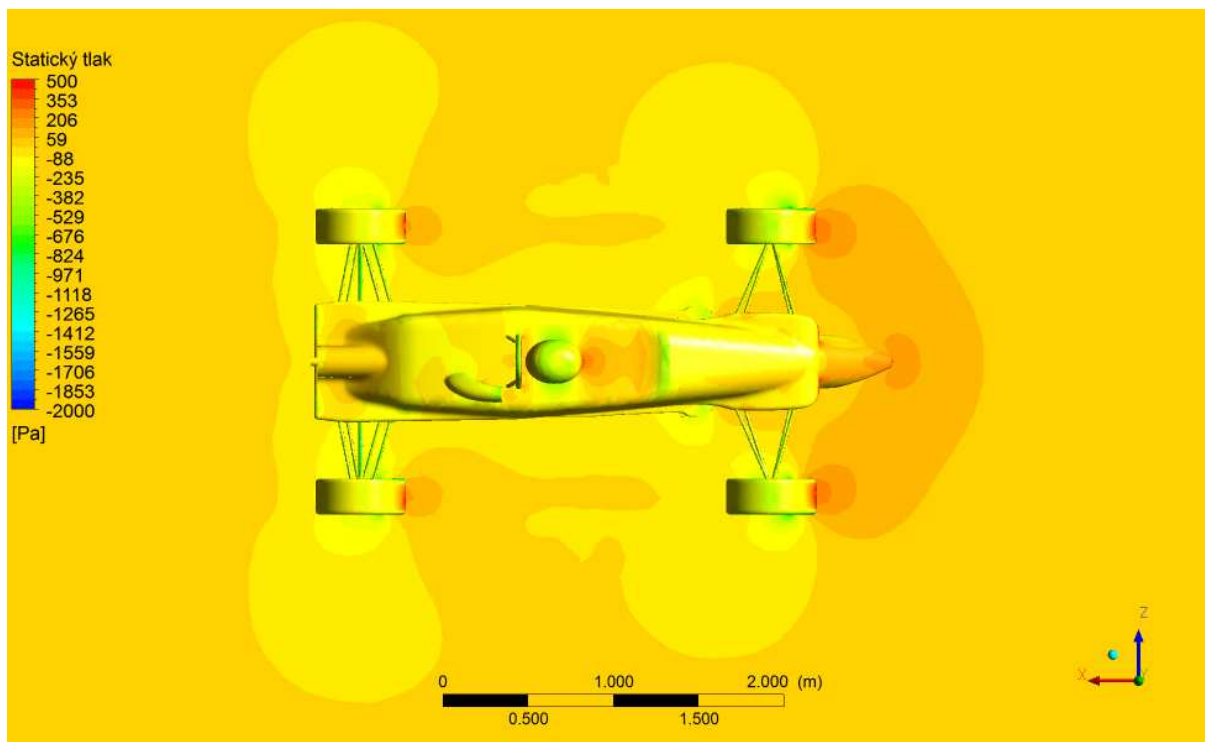
Obr. 34 Hodnoty aerodynamických koeficientů

Tab.4 Přehled výsledných silových účinků

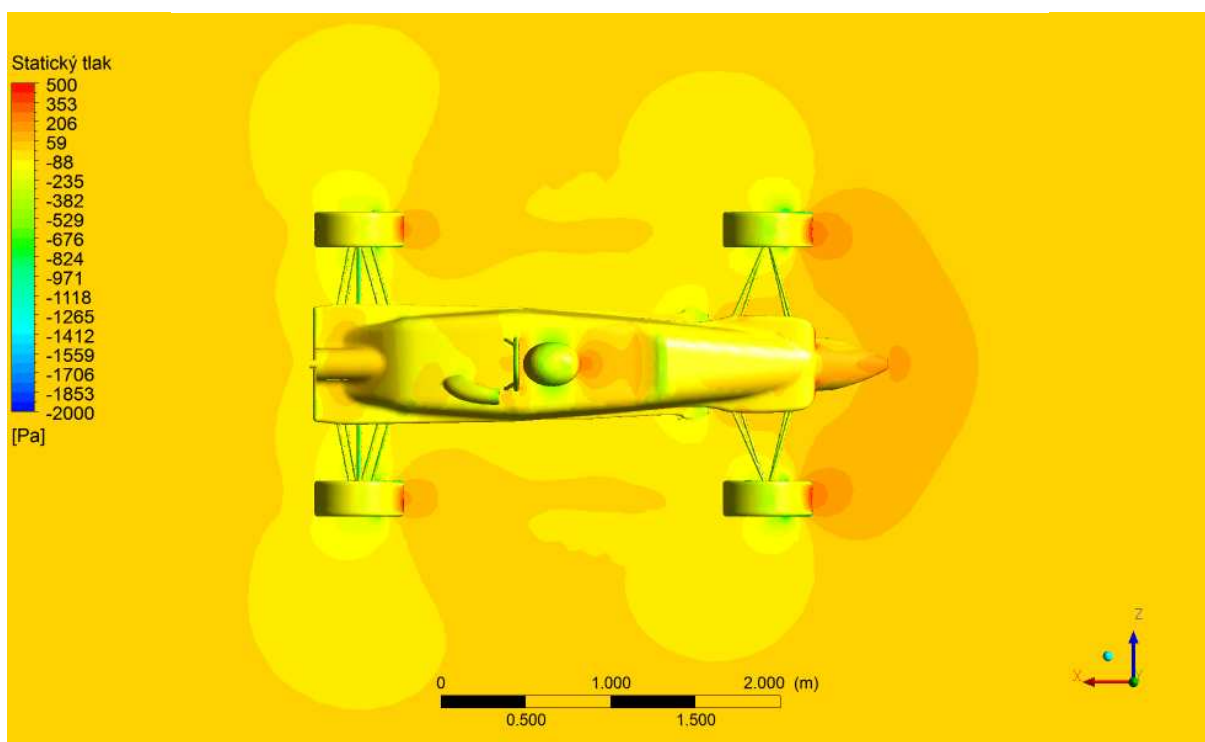
Nastavení podvozku		Aerodynamická vztlaková síla F_x [N]	Aerodynamická odporová síla F_z [N]
Výška [mm]	Natočení [°]		
40	0	-205,7	69,5
70	0	-207,4	63,9
90	2	-207,2	33,1
120	0	-217,7	64,1



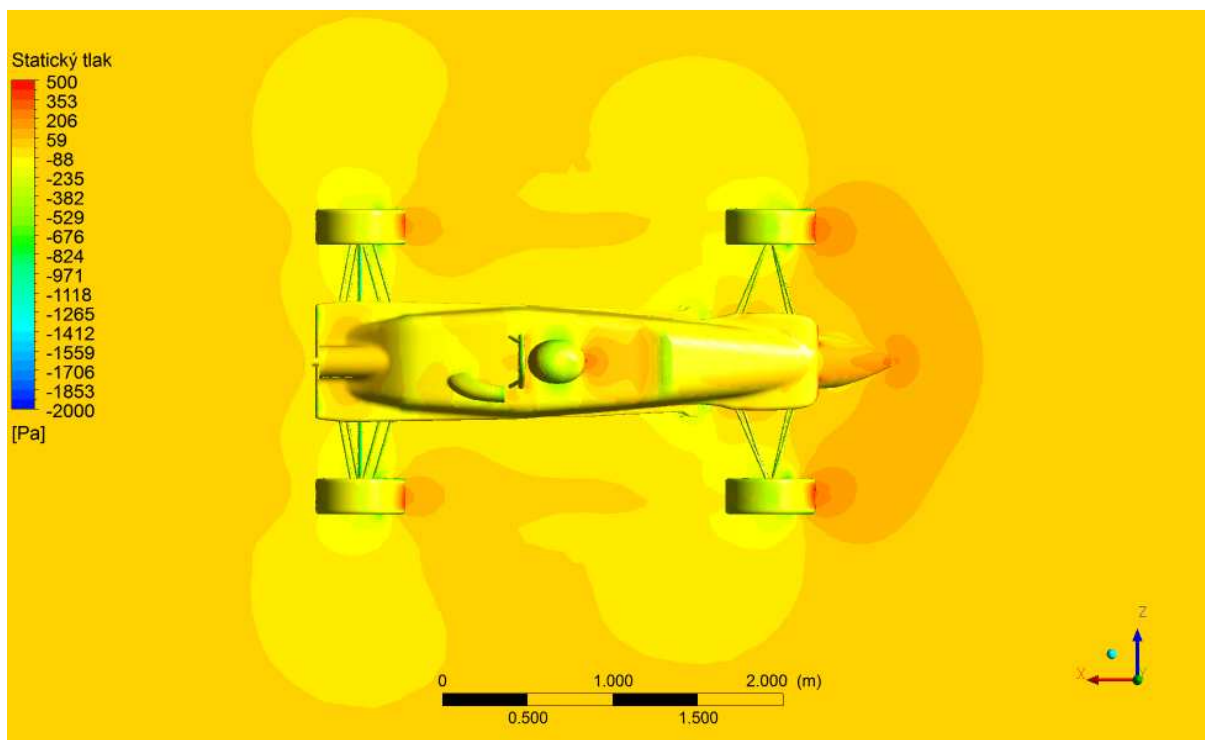
6.2 VIZUALIZACE VÝSLEDKŮ



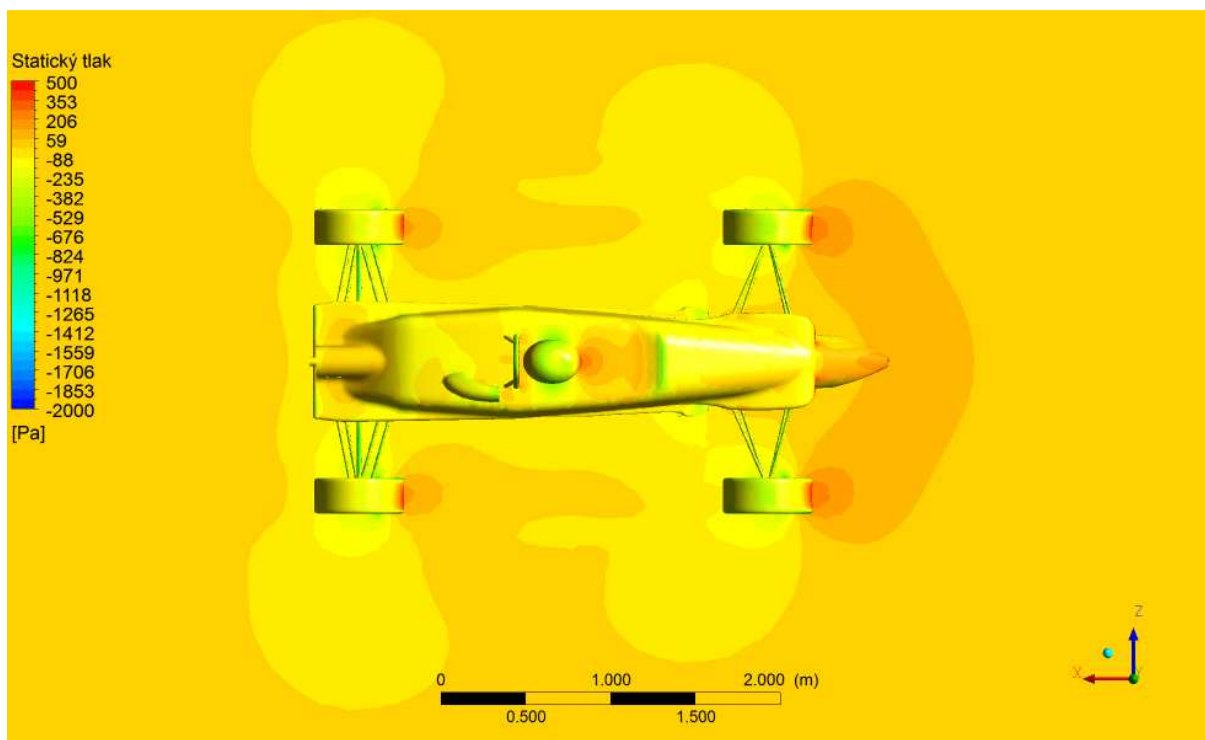
Obr. 35 Zobrazení rozložení tlaku na povrchu vozidla a na vozovce, nastavení výšky podvozku 40 mm, pohled shora



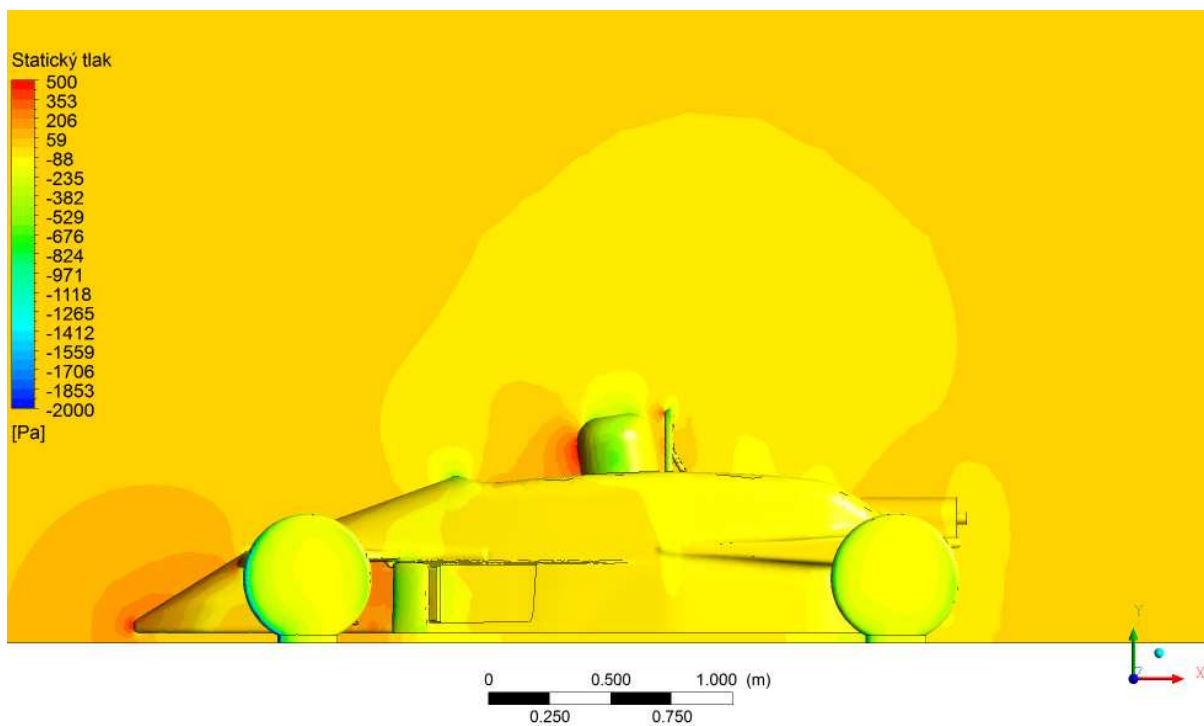
Obr. 36 Zobrazení rozložení tlaku na povrchu vozidla a na vozovce, nastavení výšky podvozku 70 mm, pohled shora



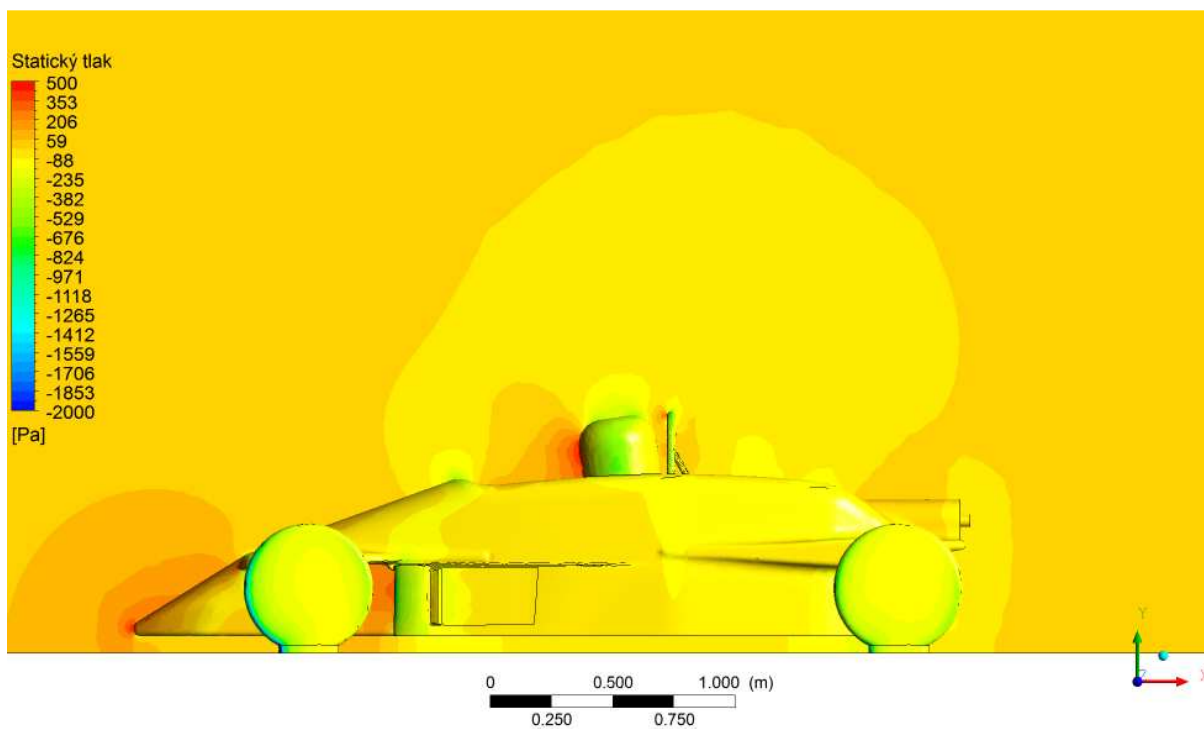
Obr. 37 Zobrazení rozložení tlaku na povrchu vozidla a na vozovce, nastavení výšky podvozku 90 mm, natočení podvozku 2°, pohled shora



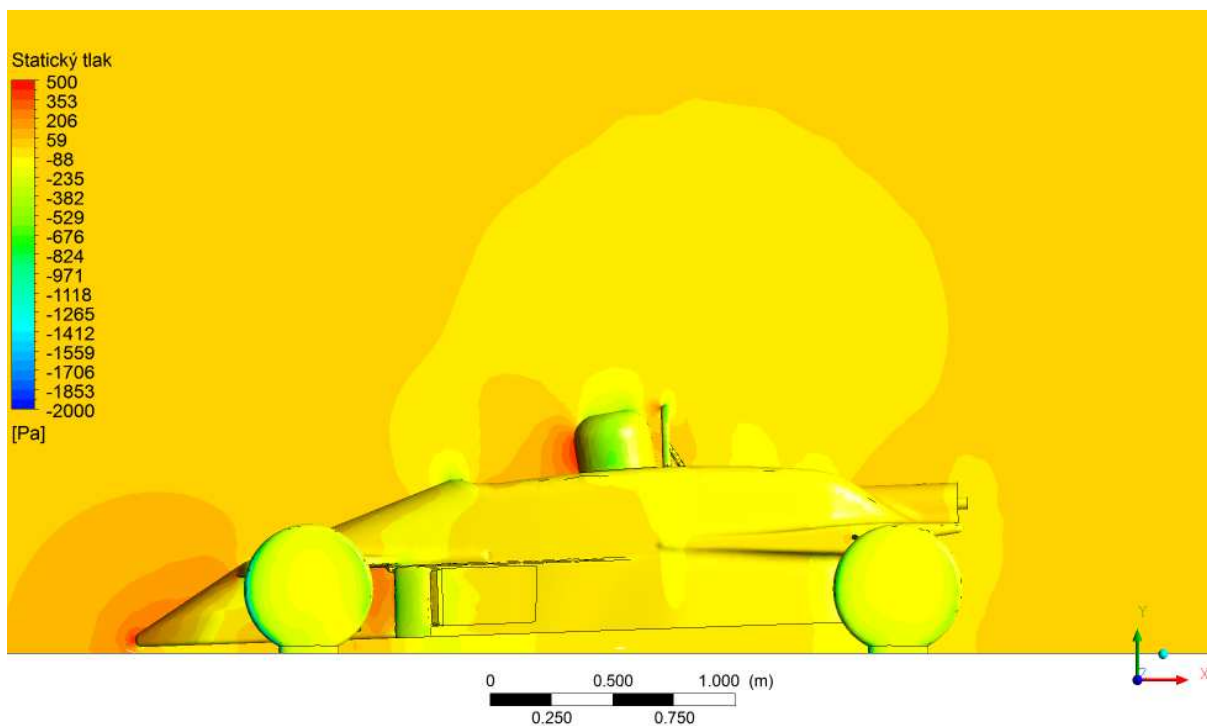
Obr. 38 Zobrazení rozložení tlaku na povrchu vozidla a na vozovce, nastavení výšky podvozku 120 mm, pohled shora



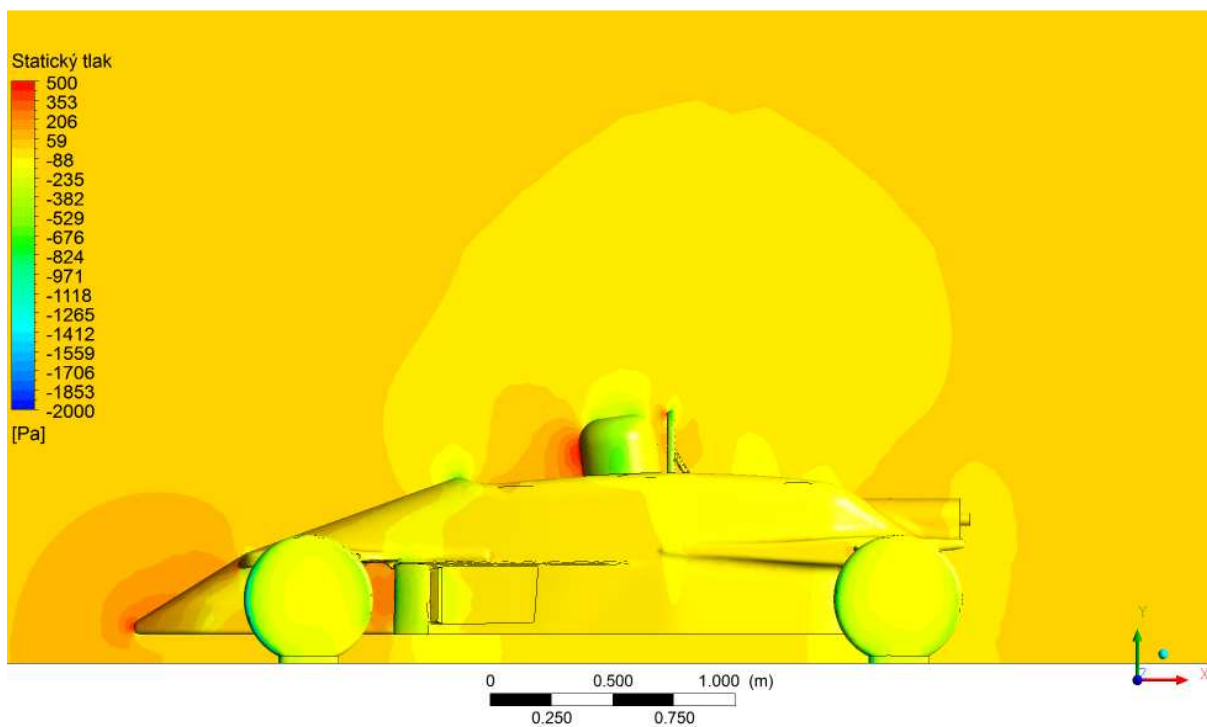
Obr. 39 Zobrazení rozložení tlaku na povrchu vozidla a v rovině symetrie, nastavení výšky podvozku 40 mm, boční pohled



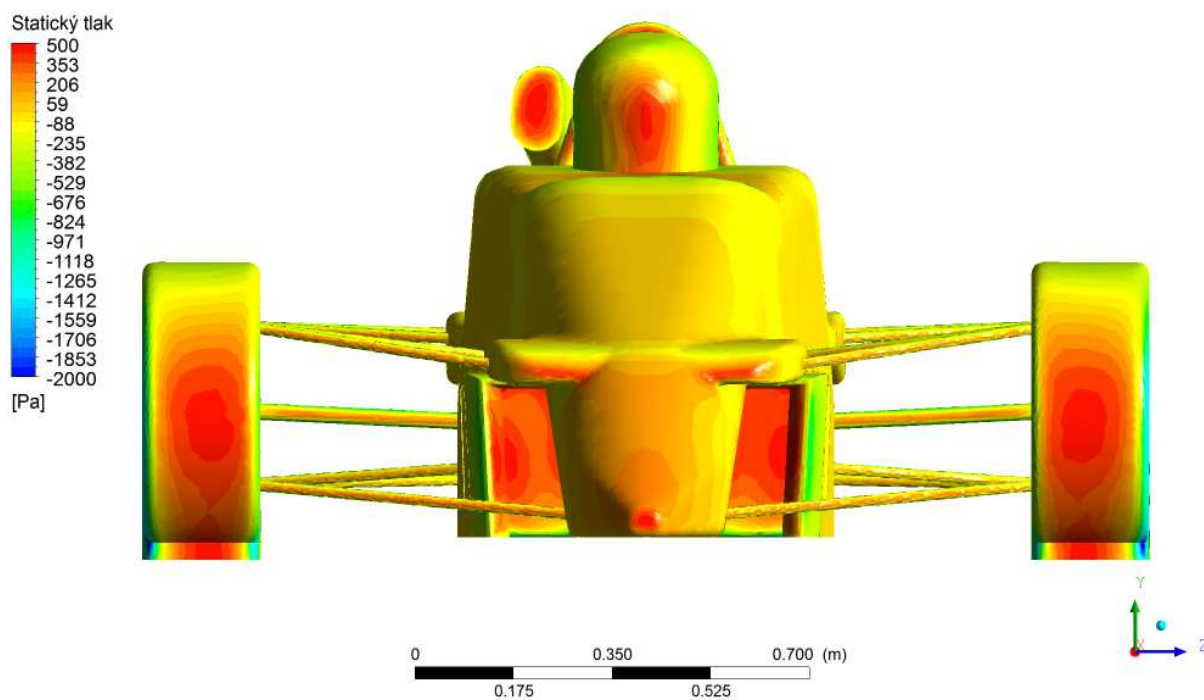
Obr. 40 Zobrazení rozložení tlaku na povrchu vozidla a v rovině symetrie, nastavení výšky podvozku 70 mm, boční pohled



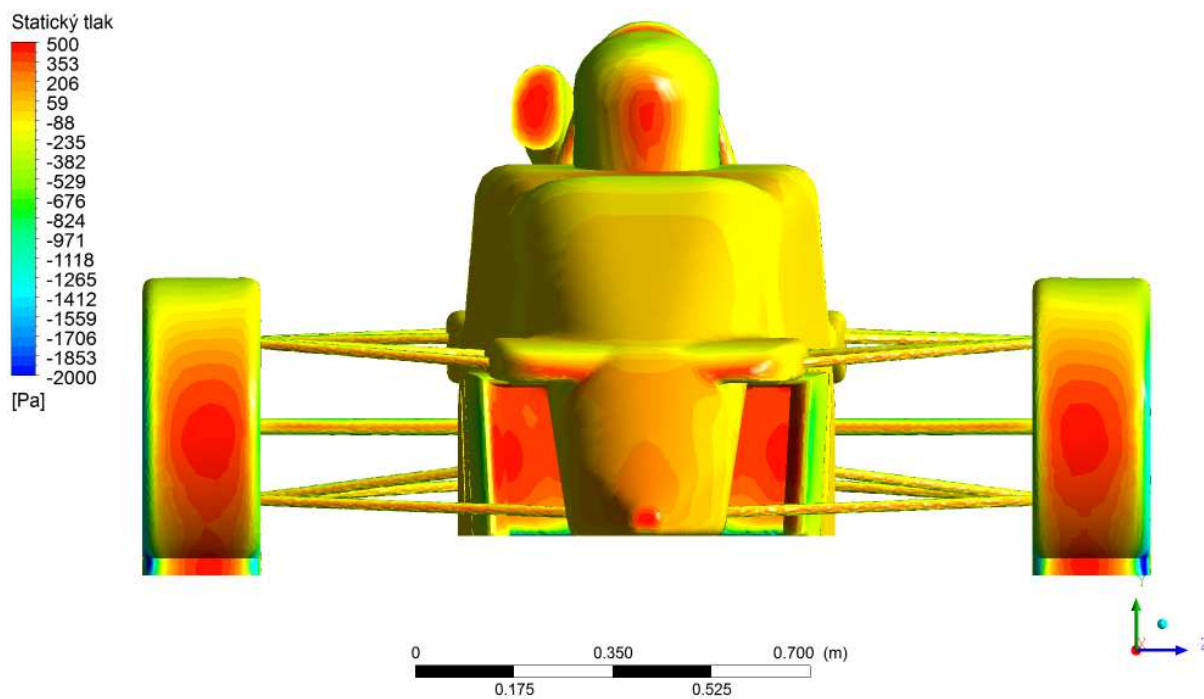
Obr. 41 Zobrazení rozložení tlaku na povrchu vozidla a v rovině symetrie, nastavení výšky podvozku 90 mm, natočení podvozku 2°, boční pohled



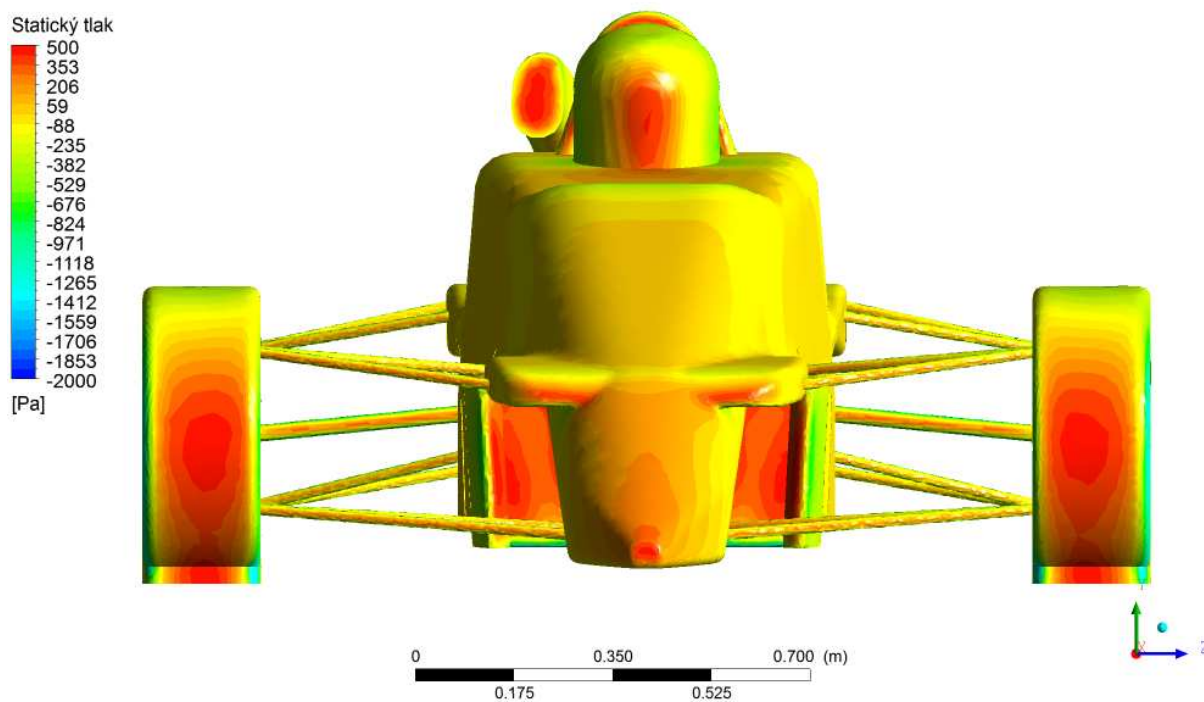
Obr. 42 Zobrazení rozložení tlaku na povrchu vozidla a v rovině symetrie, nastavení výšky podvozku 120 mm, boční pohled



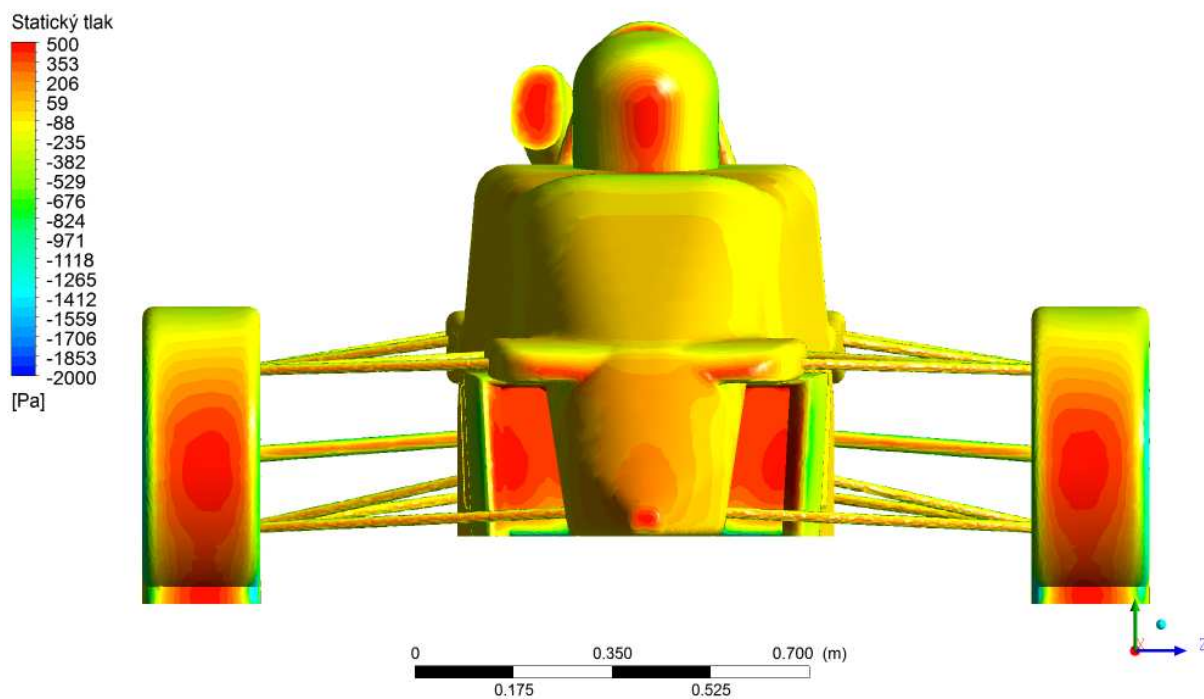
Obr. 43 Zobrazení rozložení tlaku na povrchu vozidla, nastavení výšky podvozku 40mm, pohled zepředu



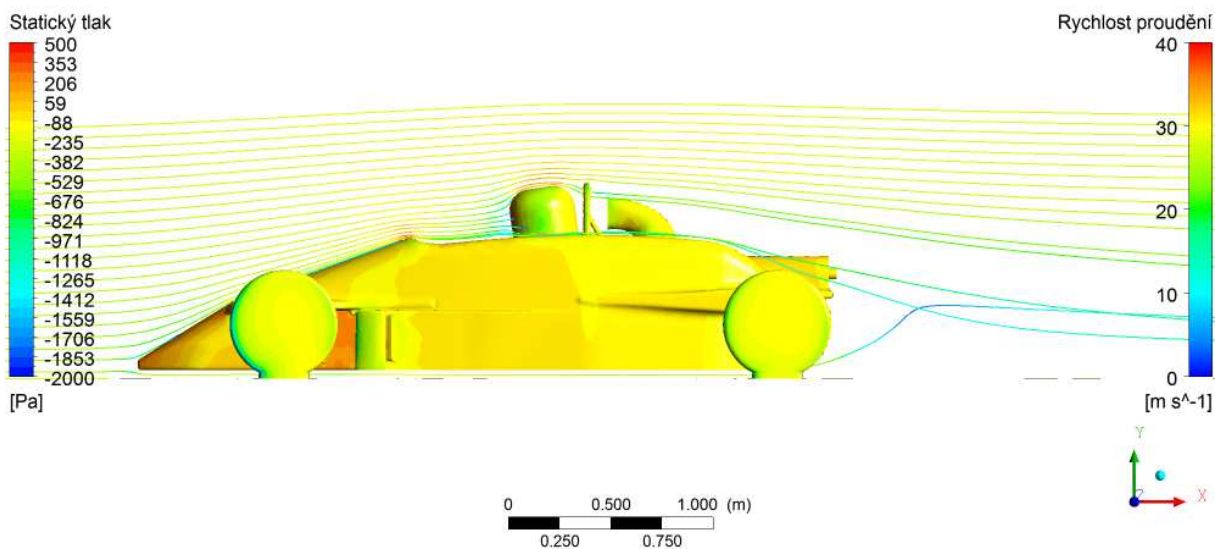
Obr. 44 Zobrazení rozložení tlaku na povrchu vozidla, nastavení výšky podvozku 70 mm, pohled zepředu



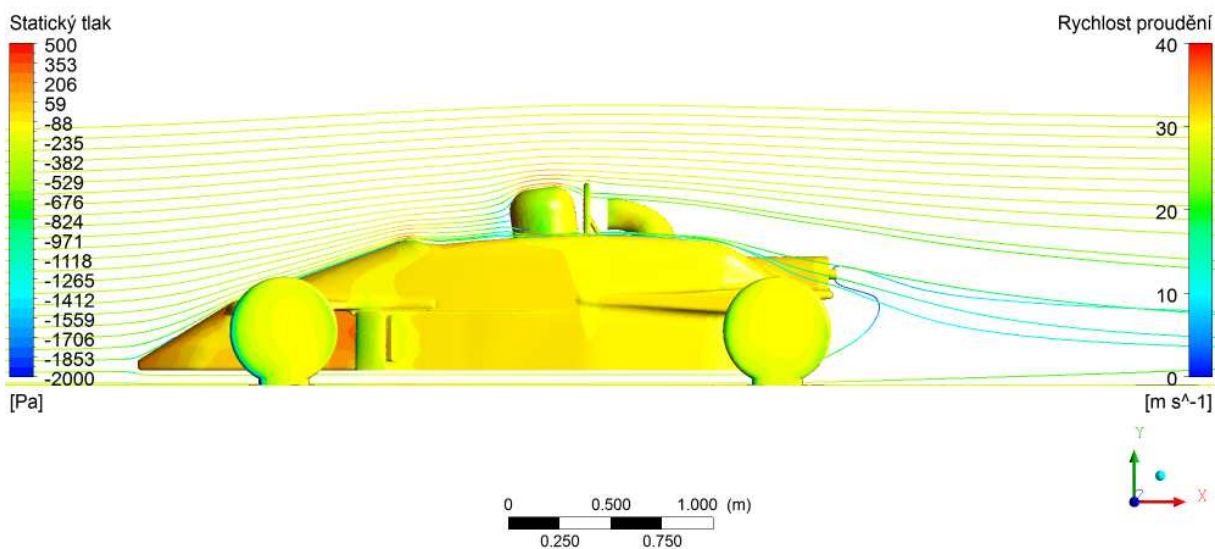
Obr. 45 Zobrazení rozložení tlaku na povrchu vozidla, nastavení výšky podvozku 90 mm, natočení podvozku 2°, pohled zepředu



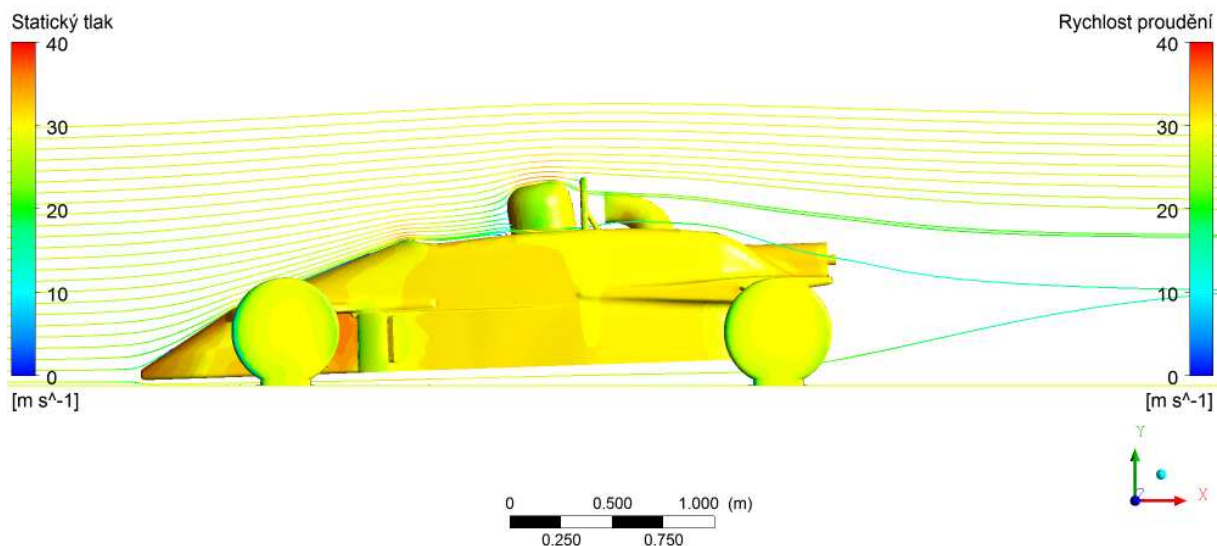
Obr. 46 Zobrazení rozložení tlaku na povrchu vozidla, nastavení výšky podvozku 120 mm, pohled zepředu



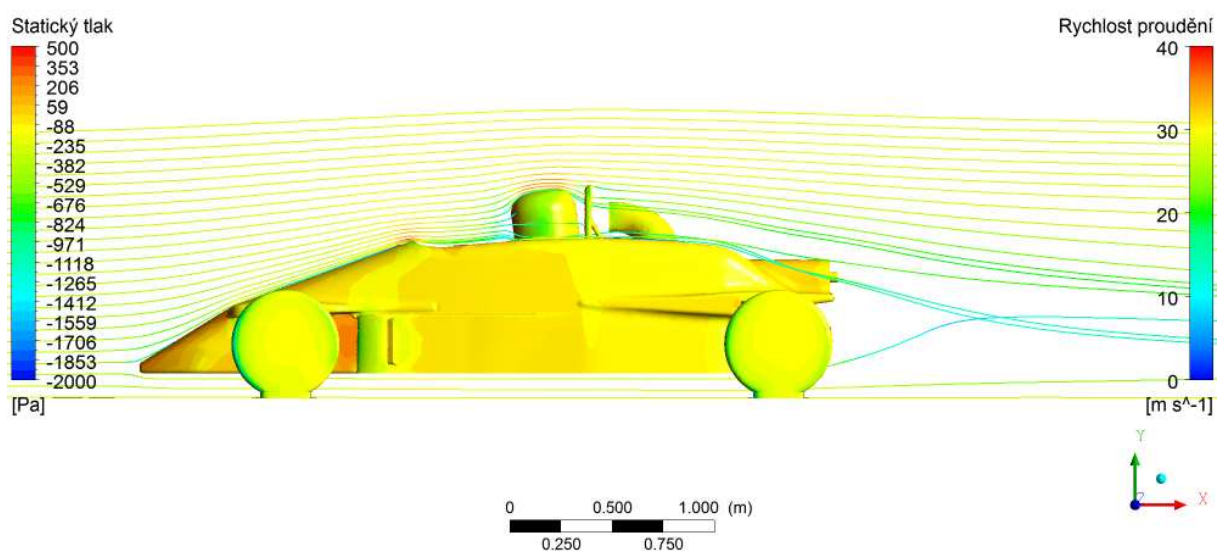
Obr. 47 Zobrazení rychlosti proudění kolem karoserie, nastavení výšky podvozku 40 mm, boční pohled



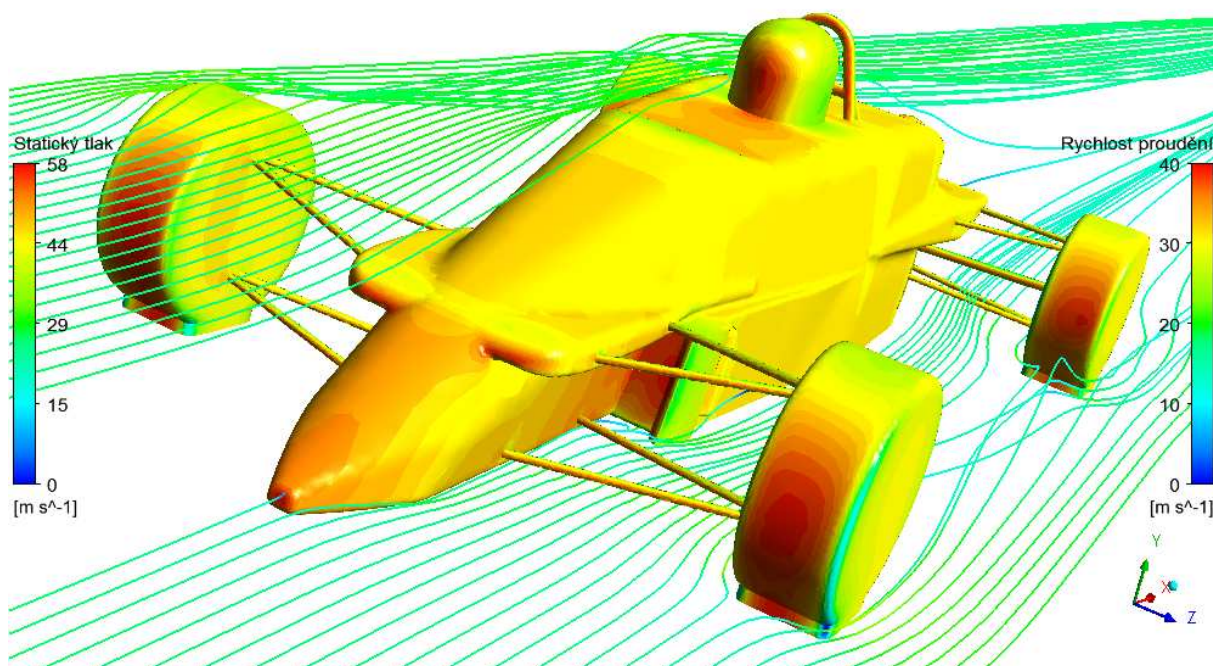
Obr. 48 Zobrazení rychlosti proudění kolem karoserie, nastavení výšky podvozku 70 mm, boční pohled



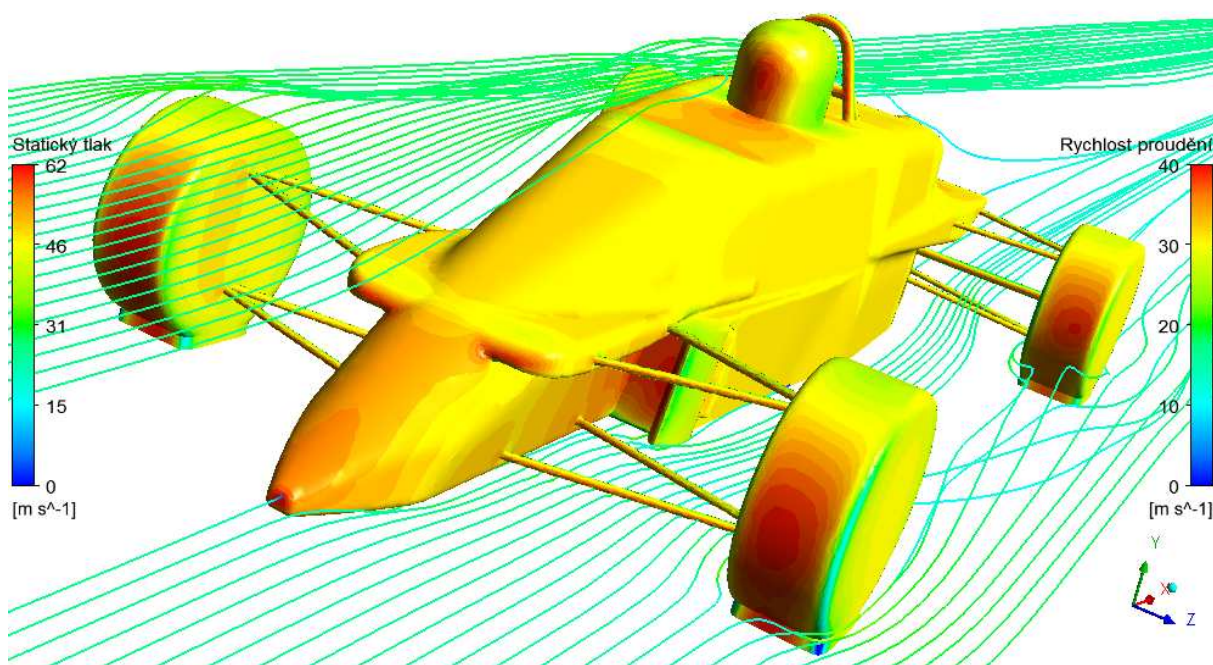
Obr. 49 Zobrazení rychlosti proudění kolem karoserie, nastavení výšky podvozku 90 mm, natočení podvozku 2°, boční pohled



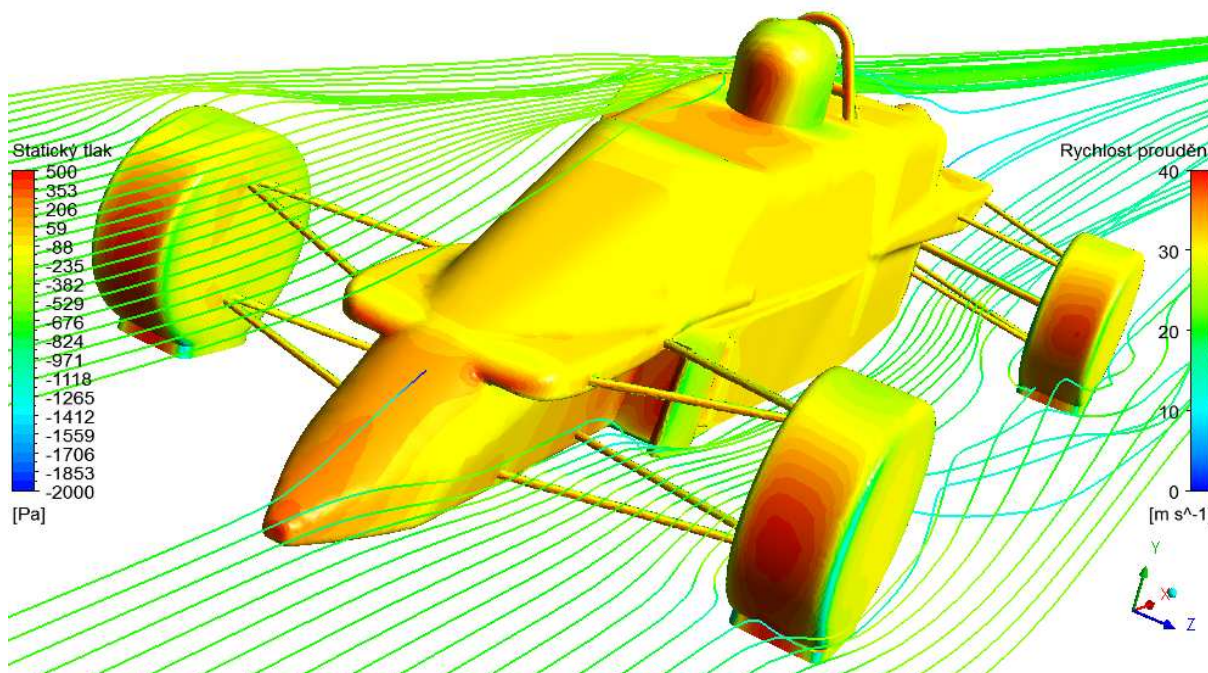
Obr. 50 Zobrazení rychlosti proudění kolem karoserie, nastavení výšky podvozku 120 mm, boční pohled



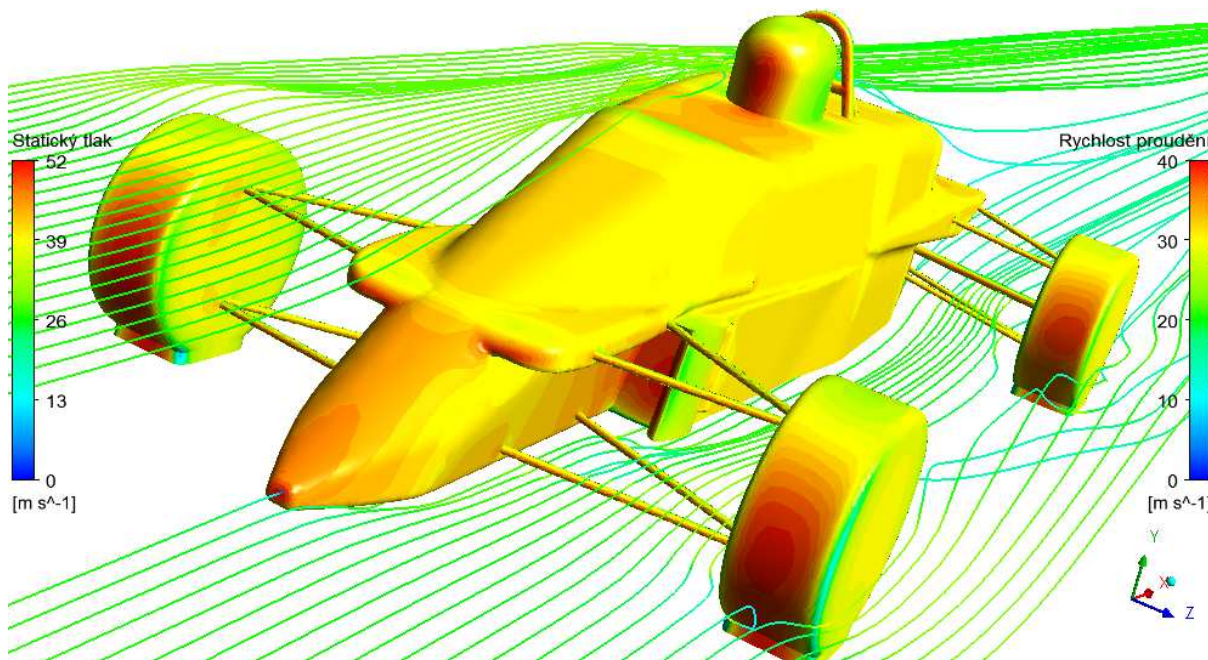
Obr. 51 Zobrazení proudění kolem karoserie, nastavení výšky podvozku 40 mm, perspektiva



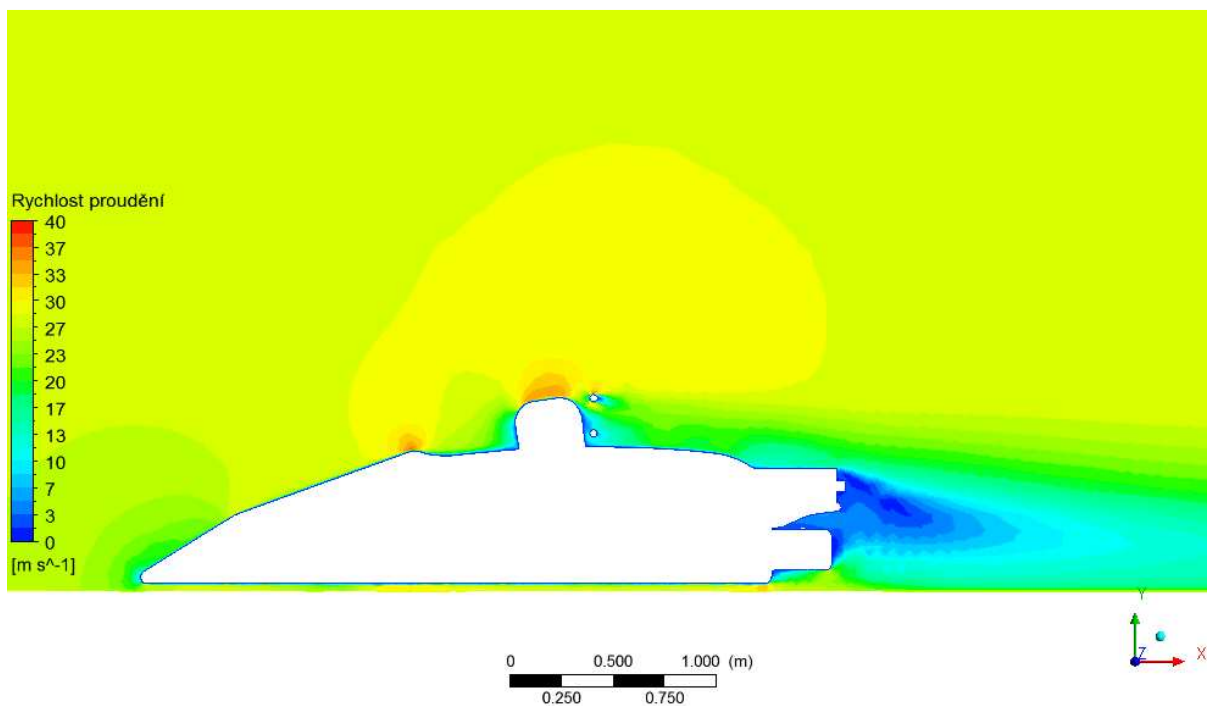
Obr. 52 Zobrazení proudění kolem karoserie, nastavení výšky podvozku 70 mm, perspektiva



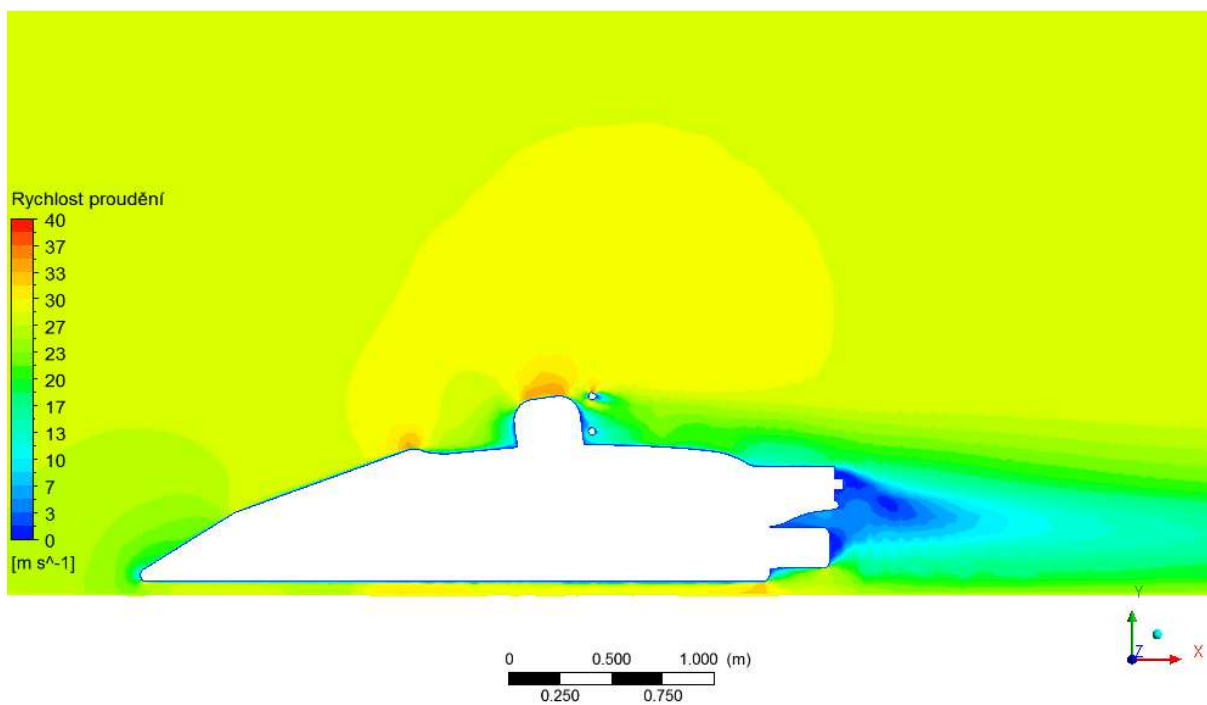
Obr. 53 Zobrazení proudění kolem karoserie, nastavení výšky podvozku 90 mm, natočení podvozku 2°, perspektiva



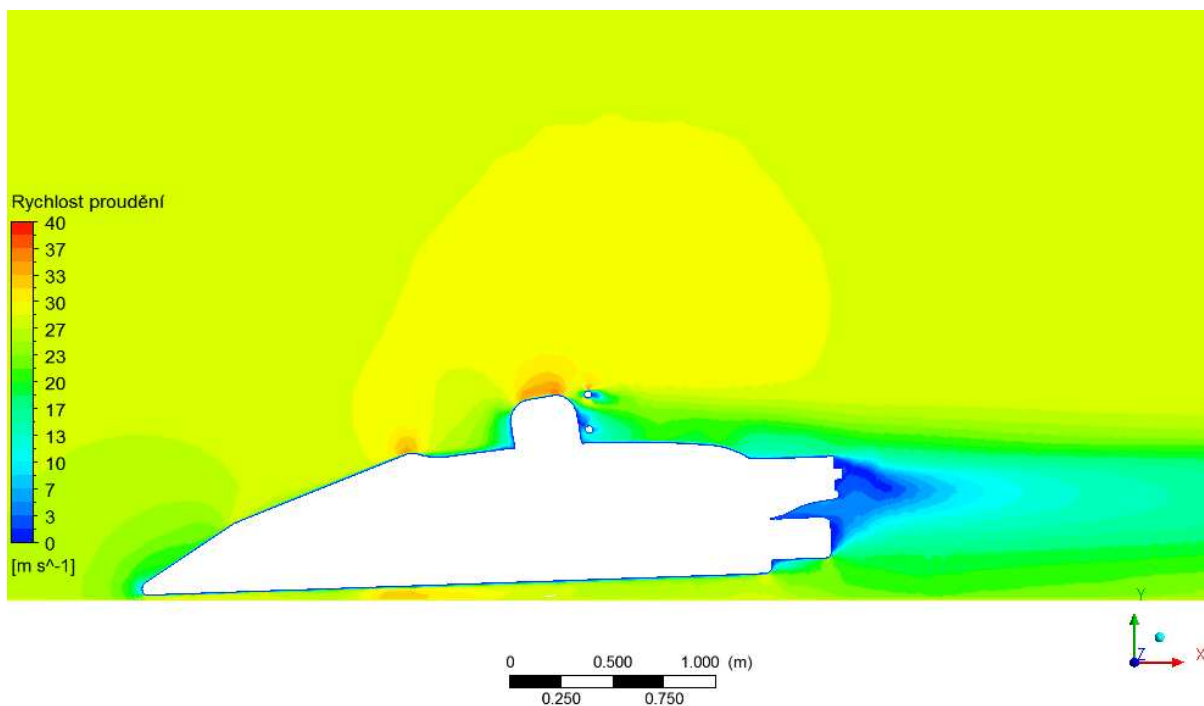
Obr. 54 Zobrazení proudění kolem karoserie, nastavení výšky podvozku 120 mm, perspektiva



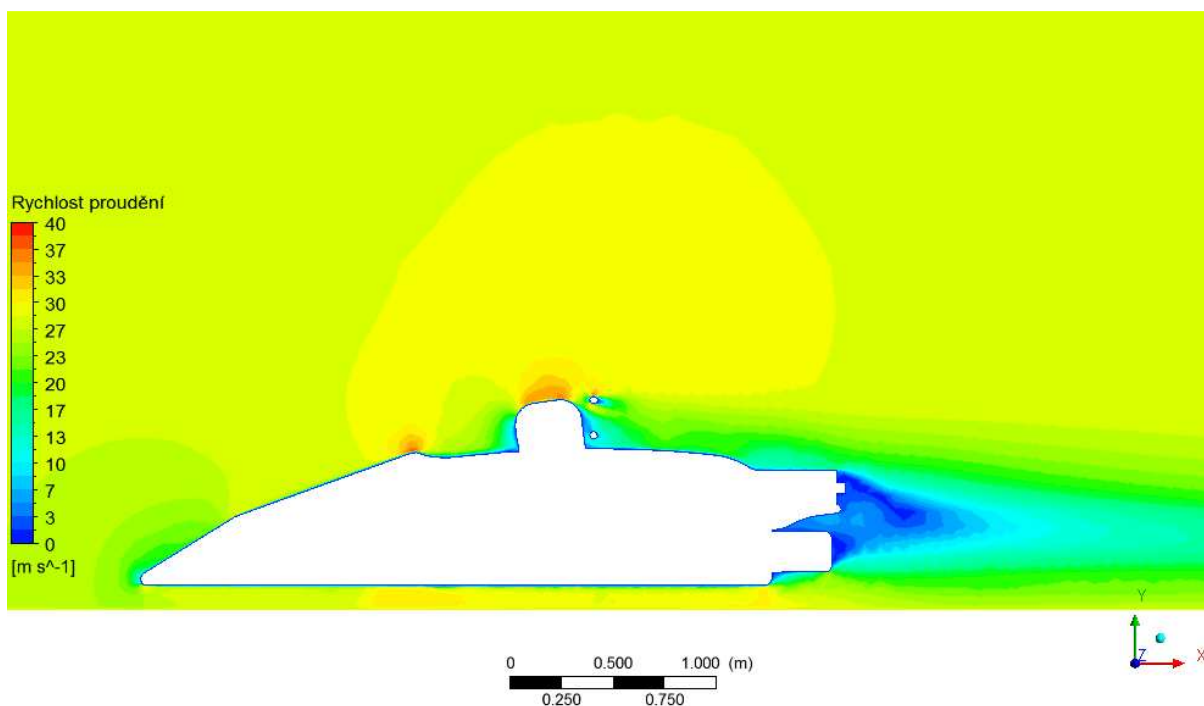
Obr. 55 Zobrazení rychlostního pole v rovině symetrie s vznikem úplavu, nastavení výšky podvozku 40 m, boční pohled



Obr. 56 Zobrazení rychlostního pole v rovině symetrie s vznikem úplavu, nastavení výšky podvozku 70 mm, boční pohled



Obr. 57 Zobrazení rychlostního pole v rovině symetrie s vznikem úplavu, nastavení výšky podvozku 90 mm, natočení podvozku 2°, boční pohled

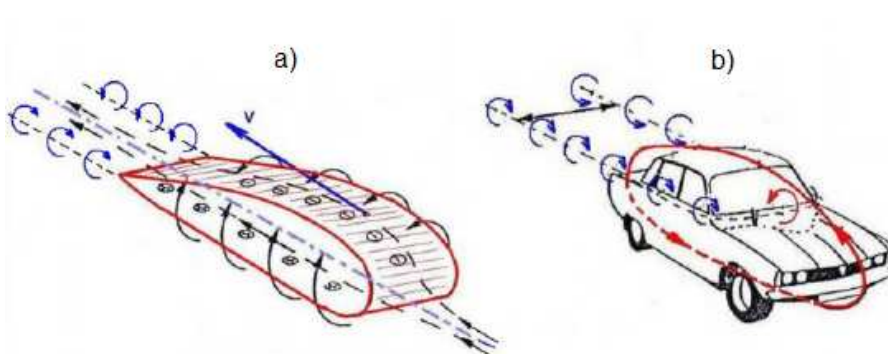


Obr. 58 Zobrazení rychlostního pole v rovině symetrie s vznikem úplavu, nastavení výšky podvozku 120 mm, boční pohled



6.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Při porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro jednotlivá nastavení podvozku formule byly ověřeny již známé fakta závislosti vztlakové a odporové síly na výšce vozidla nad vozovkou.



Obr. 55 Obtékání profilu tvaru křídla a) a automobilu b) [11]

Automobil se podobá leteckému křídlu. Spodní strana je rovná a horní strana zahnutý profil. Tudíž se jedná o profil nesouměrný. Rozdílná délka dráhy proudnic, které putují pod a nad autem nám způsobí, že tyto proudnice mají i rozdílnou rychlost. To nám zapříčiňuje efekt „křídla“, který se vyskytuje u závodních aut bez přídavných aerodynamických prvků. Ve spodní části se nachází přetlak (vztlak) a v horní části podtlak. Výsledná vztlaková síla, která působí na formuli, směřuje od vozovky nahoru, což je nežádoucí jev. Proto se v motorsportu používají přitlačná křídla, která na úkor vzrůstu aerodynamického odporu přemění vztlak na přitlak a tím radikálně zlepší jízdní vlastnosti vozidla.

Z naměřených výsledků vidíme, že nejmenší vztlaková síla působí na model, který je nejbližší vozovce, pod kterým proudí nejméně vzduchu. Čím výše je podvozek nastaven, tím vztlak více roste. Na obrázcích 39-42 vidíme s postupným zvyšováním podvozku nárůst tlakového pole pod přední nápravou, dochází k jejímu nadlehčování.

U hodnot aerodynamické odporové síly nastává přesně opačná situace. Tato síla se vzrůstající výškou vozu klesá, jelikož stále větší množství vzduchu proniká pod modelem a nemusí proudit přes karoserii formule a přitlačet ji k silnici.

Na obrázcích 43-46 vidíme místa, která jsou aerodynamickým odporem nejvíce postižena. Jedná se kola a přilbu řidiče. Vstupy sání, které zůstaly při nastavování podmínek zaslepeny, vykazují také velké tlakové zatížení. Velký aerodynamický odpor kol je částečně vykompenzován drobným přitlakem, způsobeným odtržením přilnutého proudění při rotaci kol.



ZÁVĚR

Úkolem této diplomové práce bylo sestrojít parametrický CAD model formule Ford 1600 a následně zjistit aerodynamické charakteristiky pro různá nastavení výšky a natočení podvozku. Pro tento účel byl model importován do CFD prostředí, kde byly zadány charakteristiky prostředí a okrajové podmínky potřebné pro řešení.

Model byl pro tyto potřeby zjednodušen a byly vytvořeny čtyři různá nastavení polohy karoserie. Následně vznikly čtyři objemové sítě, které měly charakter výplně tunelu kolem modelu formule, na kterých byl proveden výpočet. Koeficienty, získané pomocí simulace, byly přepočteny na aerodynamické charakteristiky a pomocí barevných schémat byly demonstrovány výsledky. Byly ověřeny jízdní vlastnosti závodního vozu s nekrytými koly, které se s určitou chybou blíží skutečnosti.

U konstruování CAD modelu bylo použito zbytečně mnoho detailních úprav, které později znesnadňovaly práci na geometrii v CFD softwaru, od některých částí karoserie bylo upuštěno a byly zjednodušeny. Jedná se však o plně parametrický model s možností dalších nastavení přední a zadní nápravy, nezávisle na sobě.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. Nakladatelství VLK, Brno 2003, ISBN 80-239-0024-2.
- [2] KOVANDA, B., KOVANDA J. *Aerodynamika vozidel*. Vydavatelství ČVUT, Praha 1999, ISBN 80-01-01942.
- [3] KATZ, J. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Bentley Publishers 2006, ISBN 0-8376-0142-8.
- [4] ŠOB, F. *Hydromechanika*. Akademické nakladatelství CERM, Brno 2002, ISBN 80-214-2037-5.
- [5] VANČURA, J. *Výpočet aerodynamiky závodního automobilu*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 77 s.
- [6] HOFÍREK, M. *Mechanika tekutin, hydromechanika a základy aerodynamiky*. Nakladatelství FRAGMENT, Praha 1998, ISBN 80-7200-260-0.
- [7] JANALÍK, J. *Hydrodynamika a hydrodynamické stroje*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2008, 190 s.
- [8] [Http://www.e-automatizace.cz](http://www.e-automatizace.cz) [online]. 2011 [cit. 2011-03-03]. *E-automatizace*. Dostupné z WWW: <<http://www.eautomatizace.cz/encyklopedie.asp?Hledat=trmační%20portál%20z%20oblasti%20automatizace.htm>>.
- [9] HLAWICZKA, P. [Http://f1news.autoroad.cz](http://f1news.autoroad.cz) [online]. 2011. [cit. 2011-04-03]. *F1 News*. Dostupné z WWW: <<http://f1news.autoroad.cz/technika/37815-co-je-to-cfd/>>.
- [10] BRUS, A.; DONOVALOVÁ, M.; NOVOTNÝ, Š. FYS - Katedra fyziky – FJFI - ČVUT [online]. 2009 [cit. 2011-04-03]. *Bernoulliho rovnice a její aplikace*. Dostupné z WWW: <<http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2008-2009/Zima08/proc/bernuli.pdf>>.
- [11] JANALÍK, J. *Obtékání a odpor těles* [online]. 2008. Ostrava: VŠB - technická univerzita Ostrava, 2008 [cit. 2011-05-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Obtekani.pdf>>. ISBN 978-80-248-1911-2.
- [12] WIKIPEDIE. Otevřená encyklopedie [online]. 2002. Poslední revize 12. 4. 2011 [cit. 2011-04-04]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnus%C5%AFv_jev>.
- [13] WIKIPEDIE. Otevřená encyklopedie [online]. 2004. Poslední revize 14. 4. 2011 [cit. 2011-04-01]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Flettner%C5%AFv_rotor>.
- [14] Formula Ford. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2006. Poslední revize 2011 [cit. 2011-05-03]. Dostupné z WWW:<http://en.wikipedia.org/wiki/Formula_Ford>.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

A	[m ²]	čelní plocha vozu
$c_x = c_D$	[-]	koeficient odporu
$c_z = c_L$	[-]	koeficient vztlaku
F_x	[N]	aerodynamický odpor
F_z	[N]	aerodynamický vztlak
p	[Pa]	tlak
t	[°C]	teplota
V	[m/s]	rychlost
V_∞	[m/s]	rychlost volného proudu
δ_x	[m]	tloušťka mezní vrstvy
θ	[°]	úhel odtržení přilnutého proudění od povrchu kola
ρ	[kg/m ³]	hustota
ν	[m ² /s]	kinematická viskozita
ω	[rad/s]	úhlová rychlost kola