

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2013

Bc. Milan Kubíček

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh aerodynamicky optimálního tvaru vozidla pro
Shell Eco-marathon

Bc. Milan Kubíček

Diplomová práce

2013

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Milan Kubíček**
Osobní číslo: **D11896**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Název tématu: **Návrh aerodynamicky optimálního tvaru vozidla pro Shell Eco-marathon**
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní pojmy aerodynamiky
Aerodynamika vozidel
Aerodynamický odpor
Možnosti vizualizace obtékání
Návrh optimálního tvaru karoserie vozidla

Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího diplomové práce**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran textu a přílohy**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:

KOVANDA, B., KOVANDA J., Aerodynamika vozidel. Vydavatelství ČVUT, Praha 1999, ISBN 80-01-01942
JANALÍK JAROSLAV, Obtékání a odpor těles. VŠB-TU Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1911-2
KATZ, J., Race car aerodynamics: designing for speed. Bentley Publishers 2006, ISBN 0-8376-0142-8
HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamic of Road Vehicles. 4 ed. Warrendale, Pa: SAE International, Inc., 1998. ISBN 0-7680-0029-7.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Zikmund, Ph.D.**
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jaroslav Maloch, CSc.**
Univerzita Tomáše Bati
Datum zadání diplomové práce: **15. února 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **23. května 2013**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. února 2013

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Králíkách dne 19. 5. 2013

Milan Kubíček

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji všem, kteří mi s touto prací pomohli. Mé velké díky patří vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Tomášovi Zikmundovi, Ph.D, za jeho odborné vedení, rady a nemalou podporu. Dále děkuji mému odbornému konzultantovi panu Ing. Jaroslavu Malochovi CSc., z Univerzity Tomáše Bati, Fakulty technologické, který mi věnoval mnoho času a ochotně mi poskytl konzultace a odborné rady, týkající se 3D rýsování v programu SolidWorks a ovládání modulu Flow Simulation 2012. Dále děkuji panu Ing. Tomášovi Hájkovi ze společnosti Idiada CZ a.s., za jeho potřebné rady do začátku a nabízenou pomoc při psaní této práce. Na závěr bych chtěl poděkovat rodičům, mé přítelkyni a svým kamarádům ze školy, za jejich oporu a pomoc ve studiu.

ANOTACE

Tato práce je soustředěována na návrh optimálního aerodynamického tvaru závodního vozidla pro Shell Eco-marathon. Model vozidla je narýsován v softwaru SolidWorks 2012 - Vzdělávací edice a simulován v jeho doplňkovém modulu Flow Simulation 2012. Výsledky ze simulací byly analyzovány a na jejich základě, byly provedeny úpravy karoserie. V práci jsou dále popsány možnosti použití CFD softwaru v automobilovém průmyslu a postup základního nastavení Flow Simulation 2012.

KLÍČOVÁ SLOVA

aerodynamika, aerodynamický koeficient C_x , CFD, Flow Simulation

TITLE

Design of optimal aerodynamic shape of the vehicle for the Shell Eco-marathon

ANNOTATION

This thesis is focused on the design of optimal aerodynamic shape of a racing car for the Shell Eco-marathon. Vehicle model has drawn in software Solid Works 2012 - Educational edition and simulated in its supplementary Flow Simulation module 2012. The results of the simulations were analyzed and on this basis, were made body modification. The thesis describes the possibility of using CFD software in the automotive industry and the basic setup procedure Flow Simulation 2012.

KEYWORDS

aerodynamics, aerodynamic coefficient C_x , CFD, Flow Simulation

Obsah

Úvod	10
1 Základní pojmy aerodynamiky	11
1.1 Aerodynamika	11
1.2 Hustota a vazkost tekutin	11
1.2.1 Hustota tekutiny	11
1.2.2 Vazkost tekutiny	12
1.3 Bernoulliho rovnice	12
1.4 Reynoldsovo číslo	13
2 Základní pojmy aerodynamiky působící na vozidlo	13
2.1 Tlakové pole	13
2.2 Proudnice	14
2.3 Mezní vrstva	14
2.4 Odtržení proudu [6]	16
2.5 Úplav	16
2.6 Koeficient aerodynamického odporu C_x	17
2.7 Odpor rotujících kol	18
3 Aerodynamika vozidel	20
3.1 Vývoj aerodynamiky vozidel	20
3.2 Moderní aerodynamické prvky automobilů	22
3.2.1 Před automobilu	22
3.2.2 Oblast předních kol	23
3.2.3 Střední oblast automobilu	24
3.2.4 Zád automobilu	25
4 Aerodynamický odpor	27
4.1 Složky aerodynamického odporu [1]	27
4.1.1 Tvarový odpor	27
4.1.2 Indukovaný aerodynamický odpor	27
4.1.3 Odpor způsobený různými rušivými detaily	27
4.1.4 Odpor rotujících kol	27
4.1.5 Odpor vzniklý průchodem vzduchu do automobilu	28
4.2 Soustava aerodynamických sil	28
5 Možnosti vizualizace obtékání	29
5.1 Vizualizace v aerodynamickém tunelu	29
5.2 CFD	30
5.2.1 Použití CFD	30
5.2.2 Použití CFD v automobilovém průmyslu z hlediska aerodynamiky	31

5.3	Flow Simulation	34
5.3.1	Funkce Flow Simulation [21]	34
5.3.2	Validace Flow Simulation.....	35
5.3.3	Práce v Softwaru Flow Simulation 2012.....	37
5.3.3.1	Základní nastavení simulace	37
5.3.3.2	Načtení výsledků.....	41
6	Návrh optimálního tvaru karoserie vozidla	42
6.1	Pravidla Shell Eco-marathon [22]	42
6.1.1	Článek 25 - Požadavky na návrh vozidla	42
6.1.2	Článek 39 - Požadavky na rozměry vozidla.....	42
6.1.3	Další pravidla týkající se tvaru karoserie	43
6.2	Návrh vozidla	43
6.2.1	Rám vozidla	44
6.2.2	Modelování karoserie vozidla na rám, pomocí SolidWorks 2012	44
6.3	Simulace a analýzy koncepcí vozidla	47
6.3.1	Koncepce vozidla s předními koly umístěnými vně trupu karoserie.....	48
6.3.1.1	Model	48
6.3.1.2	Analýza modelu	50
6.3.1.3	Výsledné parametry modelu.....	52
6.3.1.4	Závěr	52
6.3.2	Ověření zlepšujících aerodynamických prvků	52
6.3.2.1	Zúžená zád'	52
6.3.2.2	Aerodynamické kryty předních kol a zavěšení	53
6.3.2.3	Kryt zadního kola	54
6.3.2.4	Zpětná zrcátka	57
6.3.3	Vylepšený model koncepce se zúženou zádí, s kryty zavěšení a předních kol	58
6.3.3.1	Model	58
6.3.3.2	Analýza koncepce	59
6.3.3.3	Výsledné parametry koncepce.....	63
6.3.3.4	Závěr koncepce	63
6.3.4	Koncepce vozidla s předními koly umístěnými uvnitř karoserie	64
6.3.4.1	Modelování koncepce	64
6.3.4.2	Model	64
6.3.4.3	Analýza modelu	65
6.3.4.4	Výsledné parametry modelu.....	67
6.3.4.5	Závěr	67
6.3.5	Ověření zlepšujících aerodynamických prvků	67
6.3.5.1	Zúžená a prodloužená zád'	67
6.3.5.2	Přední kryty kol.....	67
6.3.5.3	Kryt zadního kola.....	68

6.3.5.4	Zpětná zrcátka	68
6.3.6	Vylepšený model koncepce s koly uloženými uvnitř karoserie	69
6.3.6.1	Model	69
6.3.6.2	Analýza koncepce	70
6.3.6.3	Výsledné parametry koncepce.....	73
6.3.6.4	Závěr koncepce	73
Závěr		75
Seznam použitých zdrojů		77
Seznam obrázků.....		79
Seznam tabulek		82

Úvod

V dnešní době, kdy ekonomiku postihuje krize za krizí, je co nejnižší spotřeba velmi žádaným faktorem při koupi nového vozu. Konkurenční boj automobilových výrobců žene neustále vývoj automobilů z hlediska spotřeby paliva, tedy i emisí, mílovými kroky kupředu.

Vývoj automobilů, který do budoucna povede ke snižování spotřeby pohonných hmot, může být urychlen a zdokonalen tím, že se do vývoje zapojí noví, šikovní a kreativní lidé, kteří mají ze studia požadovanou praxi a znalosti o vývoji vozidla, v některém z odvětví konstrukce.

Společnost Shell pořádá Eco závody na uzavřených tratích po celém světě. Cílem závodu je postavit vozidlo, které ujede maximální vzdálenost při spotřebování co nejmenšího množství paliva a při vyprodukování co nejmenšího množství emisí. Tento závod je určen právě pro studenty vysokých škol, aby nabyli alespoň nějakou praxi, či rozhled do problematiky konstruování vozidel. Mohou zde uplatnit i svá řešení, které týmu pomohou na závodech v celosvětové konkurenci obstát.

Již z názvu mé diplomové práce - „Návrh aerodynamicky optimálního tvaru vozidla pro Shell Eco-marathon“ je zřejmé, že se budu v této práci zabývat 3D modelováním závodního eco vozidla, jeho simulacemi pomocí CFD a analýzami výsledků.

1 Základní pojmy aerodynamiky

1.1 Aerodynamika

Aerodynamika je specializovaný obor fyziky, který zkoumá silové působení na obtékané těleso. Tento obor má veliký význam v letectví i automobilismu a zabývá se obtékáním (prouděním) tekutiny kolem těchto těles. Obecně platí, že čím nižší je aerodynamický odpor vzduchu vozidla, tím hospodárnější je jeho provoz. Velikost aerodynamického odporu je charakterizována pomocí součinitele aerodynamického odporu vzduchu C_x a velikostí čelní plochy vozidla S_ε . Hodnota součinitele aerodynamického odporu je měřítkem kvality tvarů vozu, z hlediska obtékání jeho karoserie vzduchem. Aerodynamika úzce souvisí s designem, protože veškeré aerodynamické prvky budí estetický dojem.

Výstupem z aerodynamické analýzy bývá rozložení tlakových polí, tvar proudnic, odpor vzduchu a hodnota koeficientu aerodynamického odporu C_x .

1.2 Hustota a vazkost tekutin

1.2.1 Hustota tekutiny

Hustota tekutiny (hmotnost/jednotka objemu), označovaná obvykle symbolem ρ , má při standardních atmosférických podmínkách a při nulové nadmořské výšce hodnotu hustoty vzduchu $\rho = 1,226 \text{ kg/m}^3$. Většinou se neuvažuje o velkých změnách této hodnoty, ale při velkých teplotních rozdílech např. od -60°C v arktických oblastech, až po $+50^\circ\text{C}$ na rovníku je však potřeba už s jinou hustotou počítat. Hustota se také mění s nadmořskou výškou, při nadmořské výšce 3000 m dosahuje hustota vzduchu 75% hodnoty, než při nulové nadmořské výšce. Protože jsou aerodynamické odpory závislé i na hustotě, mají změny hodnot hustoty vliv na charakteristiky vozidla [1]. Pro výpočet hustoty ρ za jiné nadmořské výšky a teploty nám slouží vztahy (1) a (2). Kde u vzorce (1) dt/dh je pokles teploty s výškou, který se považuje do výše 11 km za stálý, $dt/dh = -0,0665 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$ [2].

$$p = p_0 \cdot \left(1 + \frac{dt}{dh} \cdot \frac{h}{T_0 + t} \right)^{5,225} \quad [\text{Pa}] \quad (1), \quad \rho = \frac{\rho_0 \cdot p}{(1 + (\Delta t / T_0)) \cdot p_0} \quad [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (2),$$

p - atmosférický tlak,
 dt/dh - pokles teploty s výškou,

p_0 - atmosférický tlak na hladině moře,
 T_0 - teplota měřená [K],

t - teplota ve $^{\circ}\text{C}$,

ρ - hustota,

h - nadmořská výška,

ρ_0 - hustota na hladině moře.

1.2.2 Vazkost tekutiny

Na rozdíl od ideální tekutiny nejsou reálné tekutiny dokonale tekuté. Při laminárním proudění reálné tekutiny trubicí se zvyšuje její rychlost směrem ke středu trubice. Vrstva tekutiny mající vyšší rychlost se snaží zrychlovat vrstvu pomalejší, a naopak pomalejší vrstva brzdí rychlejší. Mezi vrstvami tekutiny, jež se pohybují různou rychlostí, vzniká tečné napětí τ a dochází tak k jevu nazývanému vnitřní tření v reálné tekutině. Veličinou, jež charakterizuje míru tohoto tření, je součinitel dynamické viskozity μ . Je vlastně konstantou úměrnosti ve vztahu vyjadřující přímou úměrnost mezi velikostí tečného napětí τ , a rychlostním spádem (neboli gradientem rychlosti) dv/dy (3). Tento rychlostní spád je přitom dán poměrem přírůstku velikosti rychlosti dv ve vrstvách vzdálených od sebe o dy . Podíl dynamické viskozity μ a hustoty ρ dané kapaliny pak definuje další charakteristickou veličinu reálných kapalin, kinematickou viskozitu (4). [3]

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3),$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4),$$

τ - tečné napětí,

ν - kinematická viskozita,

μ - dynamická viskozita,

ρ - hustota,

dv/dy - gradient rychlosti.

1.3 Bernoulliho rovnice

Je to základní rovnice mechaniky tekutin, která vychází ze zákona zachování energie. Slouží k porovnání rychlostí, tlaků a výšek ve dvou různých bodech jednoho proudění. Z rovnice (5) vyplývá, že proudí-li vzduch z oblasti vyššího statického tlaku do oblasti nižšího statického tlaku, vzduch akceleruje. Když vezmeme předchozí větu v úvahu, logicky dojdeme k faktu, že čím se tlak zmenšuje, tím větší je pak rychlost obtékání. Pokud se jedná o spojitě proudění s konstantní hustotou proudící tekutiny, lze Bernoulliho rovnici použít v kterémkoliv bodě proudění.

$$h_A \cdot g + \frac{p_A}{\rho} + \frac{v_A^2}{2} = h_B \cdot g + \frac{p_B}{\rho} + \frac{v_B^2}{2}, \quad (5)$$

p - tlak,

v - rychlost proudění,

ρ - hustota média,

h - výška,

g - tíhové zrychlení.

1.4 Reynoldsovo číslo

Je to číslo, které dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu, tedy odpor prostředí v důsledku vnitřního tření. Pomocí Reynoldsova čísla (6) se zjišťuje, je-li proudění laminární, či turbulentní. Přechodný bod, nebo tzv. bod zvrtný, je bod, kde se mění laminární mezní vrstva proudění na turbulentní mezní vrstvu. Dochází k němu v určitém bodě, kdy je hodnota Re u daného tvaru obtékaného předmětu rovna kritické hodnotě Re_{krit} . Kritické hodnoty Re čísla jsou pro jakýkoliv materiál i podmínky různé. U složitých tvarů se hodnota vzdálenosti zvrtného bodu určuje experimentálně. [4]

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu}, \quad (6)$$

v - rychlost proudění,

l - charakteristický rozměr průtočného profilu,

ν - kinematická viskozita proudící kapaliny.

2 Základní pojmy aerodynamiky působící na vozidlo

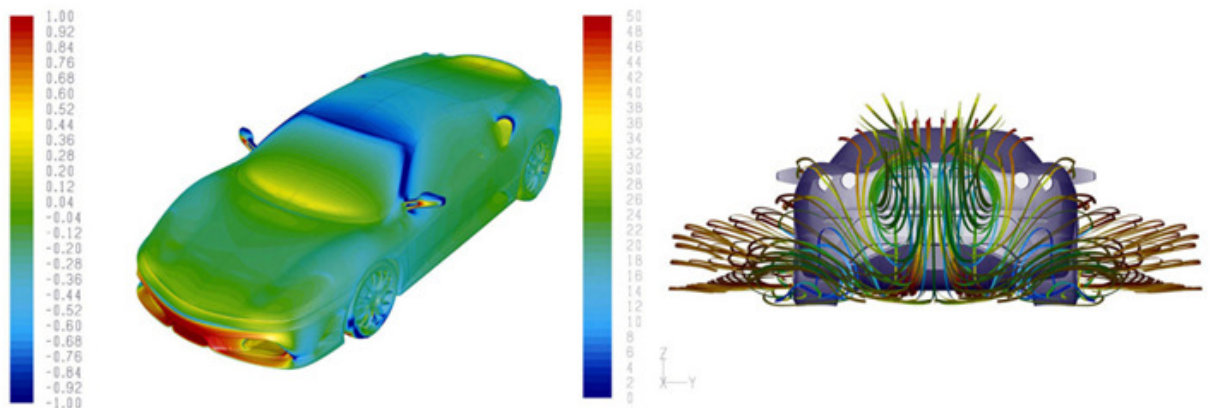
2.1 Tlakové pole

Tlakové pole ukazuje, v jakých místech působí zvýšený tlak na karoserii (Obr. 1). Průběh a velikost působícího tlaku se mění společně s rychlostí obtékání.

Aerodynamický tlak rozlišujeme:

- statický - lze naměřit u stěny tělesa, kde je nulová rychlost,
- dynamický - lze naměřit při pohybu vzduchu, souvisí s rychlostí proudění,

- celkový - je to součet statického a dynamického tlaku.



Obr. 1 - Tlaková pole a tvar proudnic automobilu Ferrari F430 Scuderia [5]

2.2 Proudnice

Proudnice je dráha vybrané částice obtékající tekutiny, např. vzduchu. Proudnice se spojují do tzv. proudového svazku. Podle tvaru proudnic můžeme proudění rozdělit na laminární proudění, turbulentní proudění a mezní vrstvu.

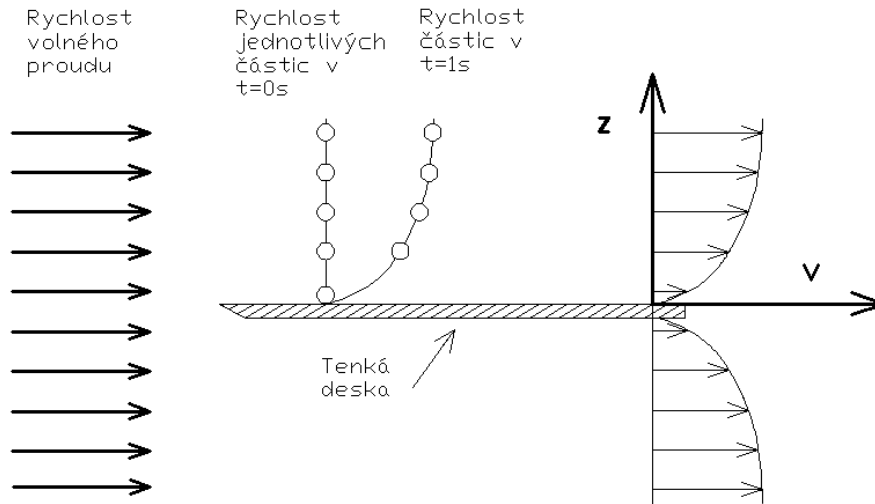
Laminární proudění (ustálené) – Proudnice jednotlivých částic tekutiny se pohybují navzájem přibližně rovnoběžně, jejich dráhy se vzájemně nekříží.

Turbulentní proudění (vířivé) – Turbulentní proudění je proudění jednotlivých částic tekutiny, jejíž proudnice se navzájem promíchávají. Jednotlivé částice tekutiny vykonávají kromě posuvného pohybu i vlastní obecný pohyb, který způsobuje vznik vířů. Rychlost částic v jednotlivých místech turbulentního proudění je různá, tzn., že turbulentní proudění je nestacionární. K turbulentnímu proudění dochází při dosažení určité hodnoty Reynoldsova kritického čísla.

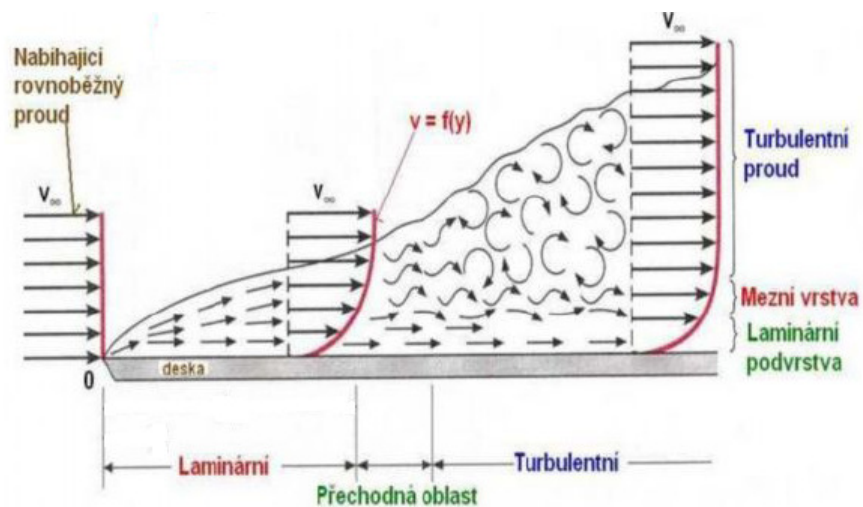
2.3 Mezní vrstva

Mezní vrstva vzniká v reálném prostředí na povrchu každé obtékané součásti. Tloušťka mezní vrstvy roste se vzdáleností od počátku obtékaného tělesa. Při obtékání těles dochází k ulpívání tekutiny na povrchu obtékaného tělesa. Rychlost uvnitř mezní vrstvy se mění od nulové hodnoty na povrchu tělesa, k rychlosti na vnějším okraji mezní vrstvy, kde není ovlivněna vazkostí. Vlivem ulpívání na povrchu obtékaného tělesa mají částice tekutiny nulovou rychlost. Rychlostní profil se tedy parabolicky zvětšuje úměrně s rostoucí vzdáleností od povrchu tělesa (Obr. 2).

Změna rychlostního průběhu uvnitř vrstvy určuje, jde-li o laminární nebo turbulentní mezní vrstvu, jak je znázorněno na (Obr. 3). Obvyčně na obtékaném tělese začíná mezní vrstva vždy jako laminární, ale s narůstající délkou součásti se proudění mění na turbulentní.



Obr. 2 - Parabolicky se zvyšující rychlost



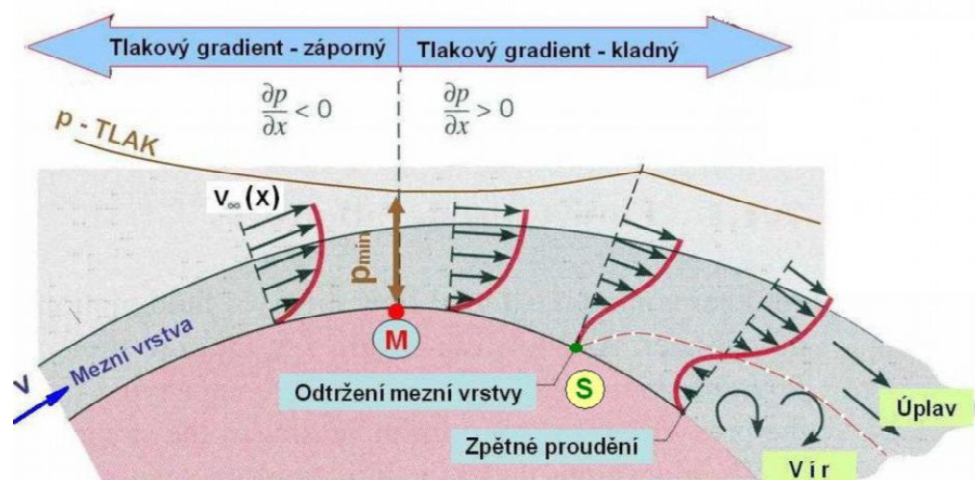
Obr. 3 - Vývoj mezní vrstvy při obtékání rovinné desky [6]

Na (Obr. 3), s počátečním prouděním V_∞ , je názorně vidět, jak se počáteční laminární mezní vrstva přetváří v přechodné oblasti na mezní vrstvu s turbulentním prouděním, která se rozšíří, jak do volného proudu, tak i směrem k desce. V její těsné blízkosti však stále zůstává laminární podvrstvi. Ke zvratu laminární mezní vrstvy na turbulentní mezní vrstvu dochází v místě, kde Reynoldsovo číslo dosáhne kritické hodnoty, která je závislá na drsnosti a tvaru tělesa, i na míře turbulence a viskozitě v přicházejícím proudu tekutiny.

2.4 Odtržení proudu [6]

Při obtékání rovinné desky se statický tlak podél desky nemění. Jiná situace nastává při obtékání těles zaoblených (např. válec, koule, letecký profil apod.), kde dochází ke změně rychlosti na povrchu tělesa. Protože platí Bernoulliho rovnice, mění se i tlak.

V oblasti rostoucího tlaku (Obr. 4), jsou částice tekutiny mezi bodem M a S přibrzdovány vnitřním třením a právě i větším tlakem, který na ně působí. Rychlost v mezní vrstvě klesá až do hodnoty, kdy je rychlostní profil roven nule. V tomto okamžiku se částice tekutiny zastaví (bod S). V dalším průběhu dochází k odtržení mezní vrstvy. Je to dáno tím, že účinkem kladného tlaku, který směřuje proud u stěny proti smyslu proudění, se při styku se základním proudem promíchává a tím vzdaluje pohybuující se částice od stěny. Od bodu S se tedy mezní vrstva odděluje od tělesa a vzniká úplav. O tom, zda se mezní vrstva odtrhne a ve kterém místě, rozhoduje tlakový gradient podél povrchu tělesa a rovněž skutečnost, jestli je v mezní vrstvě proudění laminární či turbulentní. V žádném případě však nemůže nastat odtržení mezní vrstvy při obtékání zakřivené stěny v její první části, tzn. na náběžné ploše.



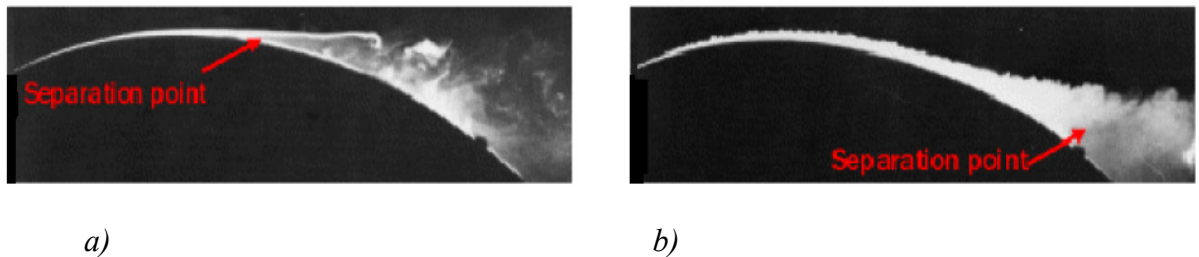
Obr. 4 - Rychlostní profily v jednotlivých fázích obtékání válce [6]

2.5 Úplav

Úplav je oblast zvířeného proudění za obtékaným tělesem, vytvořená z částic mezních vrstev unášených proudem z povrchu tělesa, popřípadě z částic odtrženého proudu.

Je-li mezní vrstva turbulentní, vzniká intenzivní výměna hybnosti mezi částicemi tekutiny, protože se turbulencí přivádí do mezní vrstvy více energie. Proto i při zvýšeném tření částice tekutiny ztrácejí kinetickou energii pomaleji. Z tohoto důvodu se turbulentní

mezní vrstva odtrhne později než laminární. Turbulentní mezní vrstva má tedy větší odolnost proti odtržení, proto se bod odtržení na obrázku (Obr. 5), přemísťuje ve směru proudu, současně tak zmenšuje velikost úplavu, a tím se součinitel odporu C_x snižuje. [7]



Obr. 5 - a) - Laminární mezní vrstva s širokým turbulentním úplavem
b) - Turbulentní mezní vrstva s úzkým turbulentním úplavem [7]

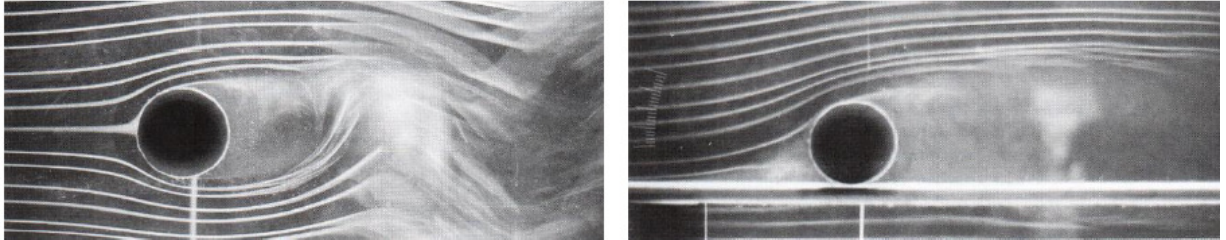
2.6 Koeficient aerodynamického odporu C_x

Tvarový koeficient C_x [-], nebo-li také součinitel aerodynamického odporu je bezrozměrná veličina, která určuje kvalitu tvaru aerodynamického řešení vozidla. Na základě znalosti této hodnoty a čelní plochy vozidla lze stanovit po dosažení do jednoduchého vzorce i jeho celkový aerodynamický odpor při dané rychlosti, (více ve stati 4 - Aerodynamický odpor). Hodnota tvarového součinitele je zjišťována buď v aerodynamických tunelech, nebo pomocí numerických virtuálních simulací proudění CFD.

Z hlediska dosažení dobrých aerodynamických vlastností a nízké spotřeby paliva je kladen požadavek na snižování hodnoty aerodynamického odporu, které lze dosáhnout zlepšením aerodynamických vlastností vozu a malou čelní plochou vozidla. Ta je ovšem limitována požadavkem na pohodlnou přepravu cestujících a nákladů ve vozidle. U současných vozidel se hodnota C_x pohybuje v rozmezí 0,26 - 0,35.

2.7 Odpor rotujících kol

Kola automobilu vystavená proudu vzduchu produkují aerodynamický odpor v důsledku vzniku vírů a turbulentního úplavu. Rozdíl obtékání rotujícího válce ve volném prostoru a obtékáním válce s přítomností vozovky je znázorněn na (Obr. 6), na kterém je zachycen otáčející válec ve směru otáčení hodinových ručiček.

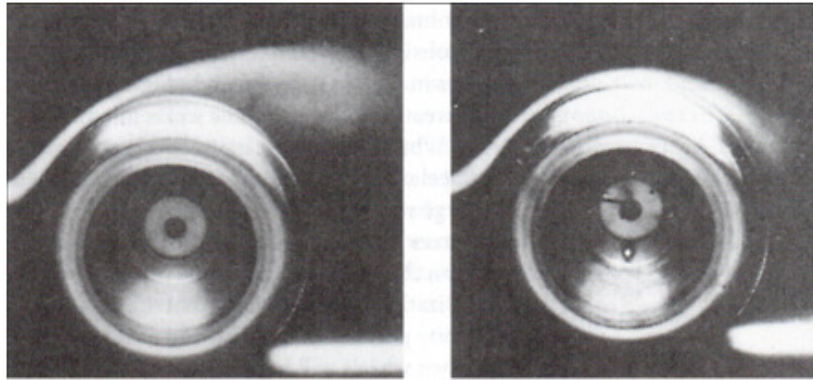


Obr. 6 - a) V prostoru

b) Na vozovce [8]

Z obrázku (Obr.6 - a)) vyplývá, že úhlová rychlost válce strhává jednotlivé proudnice vzduchu více ve směru jeho rotace. Z toho je zřejmé, že proudnice mají větší rychlost, tudíž i podle Bernoulliho rovnice na válec ve vrchním bodě působí menší tlak. Na spodní polovině proudí vzduch pomaleji, tlak je tedy vyšší. Z rozdílů tlaků je dané, že vztlaková síla bude působit směrem nahoru. Vznik vztlakové síly vlivem rotujícího tělesa je nazýván Magnusův jev. Tohoto jevu se v praxi využívalo v různých experimentech. Nejznámější je Flettnerova pokusná loď, která měla místo plachet dva rotující válce. Rozdíl mezi rotujícím válcem ve volném prostoru a rotujícím válcem s vozovkou pak můžeme vidět na (Obr. 6 - b)), protože se válec odvaluje po vozovce, je vzduchu bráněno obtékání v obou směrech.

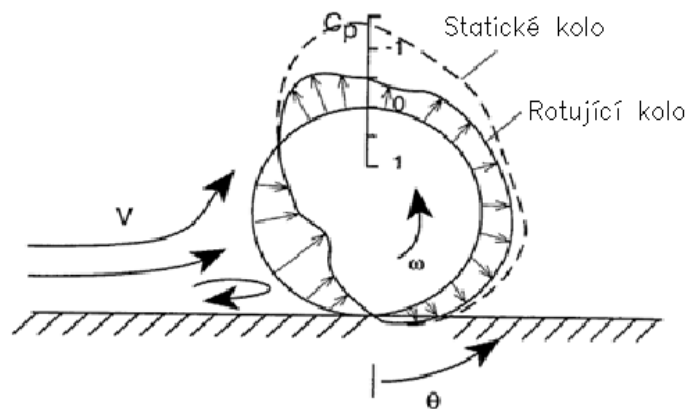
Otáčivý pohyb kola způsobuje ventilační ztráty a velikost čelní plochy pneumatiky také není zanedbatelná. Navíc musí být bráno na zřetel, že kola svou rotací značně ovlivňují proudění v podbězích a pod automobilem. Na obrázku (Obr. 7) jsou znázorněna kola s vozovkou. U statického kola (Obr. 7 - b)) je vidět pozdější odtržení přilnutého proudu vzduchu. U rotujícího kola (Obr. 7 - a)) se proud vzduchu odtrhává dříve, zpravidla ještě před vrcholem kola. Dřívějšímu odtržení proudu pak odpovídá velký úplav a větší aerodynamický odpor. Boční obtékání je velice komplikované, poněvadž obsahuje množství vírů, které způsobují další složky aerodynamického odporu.



Obr. 7 - a) - Rotující kolo

b) - Statické kolo [8]

Obtíkaná kola také způsobují aerodynamický vztlak, což může lépe objasnit na obrázku (Obr. 8). U stojícího kola je hodnota koeficientu tlaku C_p záporná a u vozovky na náběžné straně je hodnota C_p kladná, což způsobuje na jeho horní straně vztlak. U rotujícího kola dosahuje C_p výrazně nižších hodnot.



Obr. 8 - Rozložení tlaků u rotujícího a statického kola [8]

3 Aerodynamika vozidel

Aktuální snaha o snižování spotřeby paliva a zároveň také emisí se alespoň navenek odehrává z velké části v oblasti vylepšení účinnosti hnacího agregátu. Inženýři však pracují mimořádně intenzivně také na snížení velikosti čelní plochy vozidla S_{ξ} a na velikosti součinitele aerodynamického odporu C_x . Tato kritéria přispívají ke snižování spotřeby paliva a mohou také ovlivňovat prodejnost automobilů.

Z mechaniky pohybu vozidel vyplývá, že odpor valení zůstává se zvyšující rychlostí stejný, zatímco aerodynamický odpor roste s její druhou mocninou. Znamená to, že s narůstající rychlostí vozidla se stále více projevuje odpor vzduchu.

3.1 Vývoj aerodynamiky vozidel

Již ve dvacátých letech minulého století uvažovali automobiloví konstruktéři s využitím poznatků z experimentální aerodynamiky v automobilovém průmyslu. Byly to ale pouze opatrné zkoušky, u kterých se výrobci většinou potýkali s nepřekonatelnými problémy. Zůstávali tak u osvědčených tvarů, které měly sice své nevýhody, ale po technické stránce byly praktičtější. Základní kámen v sériové výrobě aerodynamických automobilů položil muž jménem Edmund Rumpler. V roce 1921 představil na berlínském autosalonu svůj první vůz typového označení OA 104, známější pod názvem Tropfenwagen. Na konci osmdesátých let byl u něj změřen součinitel odporu vzduchu C_x , výsledná hodnota činila $C_x = 0,28$. [9]

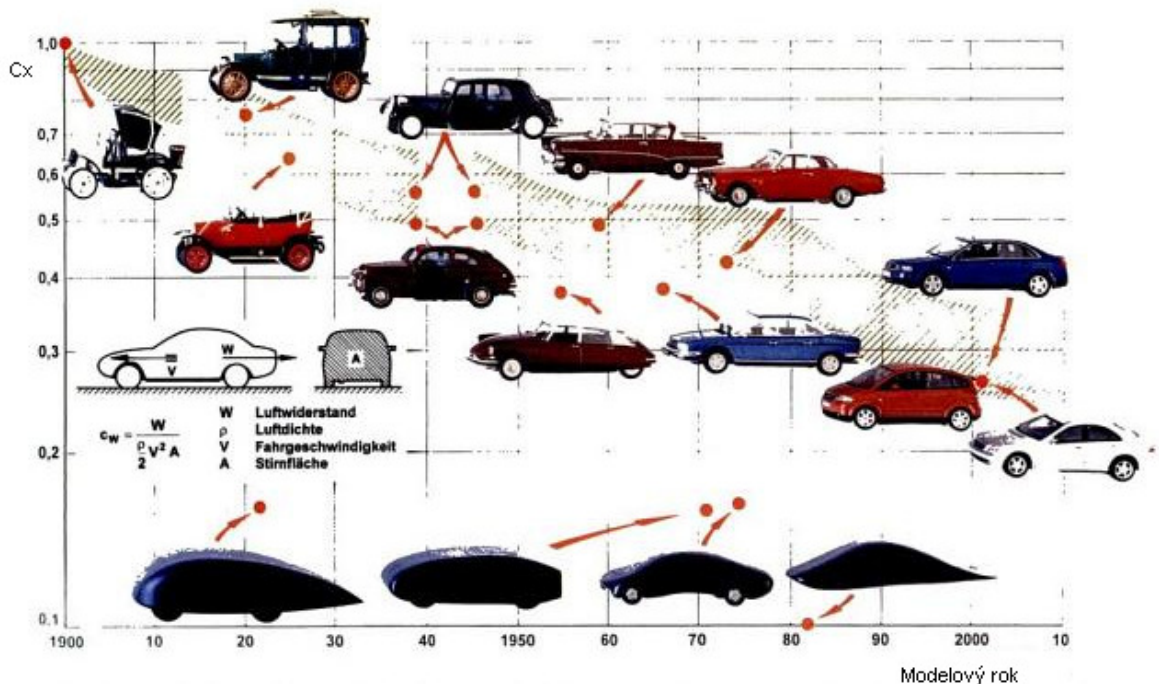
Bývaly doby, že pokud bylo třeba získat vyšší jízdní výkony, vyměnil se motor za výkonnější. Aerodynamika vozu byla většinou pouze záležitostí okrajovou. Této benevolenci udělala přítrž až ropná krize v sedmdesátých letech minulého století, kdy automobilky povolaly na pomoc specialisty na aerodynamiku, kteří měli kvalitnějším proudovým řešením vozů zabránit plýtvání drahocennou energetickou surovinou.

Tato krize přinesla do aerodynamického zpracování automobilů mnoho vylepšení, jako jsou např.:

- plastové kryty kol,
- zadní odtrhová hrana vozidla, udržující proud vzduchu bez víření až za vozidlo,
- čelní spoilery, omezující proudění vzduchu pod členitou oblast podlahy,

- snížení čela vozidla, díky němuž se objevily problémy se světlomety, jejichž klasické provedení se do čela nevešlo, řešení přinesla projekční světla s malými výstupy,
- pozvolné přechody mezi kapotou motoru a čelním sklem, které v tomto místě do jisté míry eliminovaly charakteristickou silnou přetlakovou zónu,
- stěrače se skryly za zvýšený plechový lem,
- u čelního skla se zmenšilo objemné pryžové těsnění,
- boční skla se srovnala do jedné roviny s plechem karoserie,
- zpětná zrcátka a dveřní kliky přestaly vytvářet vyšší turbulence,
- plechové díly karoserie se spojovaly s minimálními mezerami.

Postupný vývoj karoserií znázorňuje obrázek (Obr. 9).



Obr. 9 - Snižující se hodnoty součinitele odporu C_x na vozidlech [9]

3.2 Moderní aerodynamické prvky automobilů

Jak již bylo zmíněno výše, konkurenční boj automobilových výrobců žene vývoj automobilů neustále mílovými kroky dopředu. Jednotlivé značky představují stále nové aerodynamické prvky, které snižují koeficient C_x , tudíž pak i spotřebu pohonných hmot. V této době, ve které ekonomiku postihuje krize za krizí, je co nejnižší spotřeba stále více žádanějším faktorem při koupi nového vozu.

3.2.1 Před' automobilu

Optimalizované proudění obtékajícího vzduchu se začíná odvíjet na přídi vozu. Tato část pak velice ovlivňuje aerodynamiku vozidla, tedy i jeho celkový aerodynamický odpor. Tímto zlepšujícím prvkem se prosadila mezi prvními značka Chevrolet s hybridním modelem Volt. Přední maska tohoto modelu patří mezi aerodynamické (*Obr. 10*), díky uzavřené mřížce chladiče a aerodynamicky optimalizovanému spodnímu nasávacímu otvoru. Tyto oba aerodynamické prvky přispívají ke snížení spotřeby. Výsledkem intenzivní péče věnované aerodynamice je delší dojezdová vzdálenost na čistě elektrický pohon Chevroletu Volt.



Obr. 10 - Přední mřížka Chevroletu Volt [10]

U automobilů se spalovacím motorem, u kterého je zapotřebí vyšší chlazení, se využívá aktivních aerodynamických prvků, tj. buď automatické uzavírání přívodu vzduchu ke chladiči (*Obr. 11*), nebo uzavírání čelní mřížky masky automobilu, jako má např. Honda Civic 9G u dieselových motorů. Automatické ovládání těchto aktivních aerodynamických prvků má na starosti řídicí jednotka, která vyhodnocuje potřebné údaje, kterými jsou např. výkon motoru, okolní teplota, teplota motoru, rychlost automobilu. V případě příznivých hodnot se přívod vzduchu ke chladiči uzavře, tím se dosáhne lepšího obtékání a menšího aerodynamického odporu.



Obr. 11 - Automatické clonění chladiče u vozu E-Class Coupe značky Mercedes [11]

Novinkou a možná i nasměrování do vize budoucnosti je řešení přídě konceptu vozu značky BMW EfficientDynamics, který má v kapotě volný průduch (Obr. 12), tím vznikne dokonalejší obtékání karoserie. Toto konstrukční řešení pomohlo spolu s nízkou přídělí k velmi nízkému aerodynamickému koeficientu $C_x = 0,22$.



Obr. 12 - Obtékaná přídělí konceptu BMW EfficientDynamics [12]

3.2.2 Oblast předních kol

U kola dochází vlivem jeho rotace a stykem s vozovkou ke značným turbulencím vzduchu. Tyto turbulence je zapotřebí co nejvíce potlačit, poněvadž ovlivňují obtékání podél karoserie.

Tato problematika se řeší různými aerodynamickými prvky, které usměřňují proud vzduchu a zabraňují mu tak z části proudit do oblasti podběhu kola, kde pak vznikají velké nežádoucí turbulence. Jiné aerodynamické prvky naopak pomáhají vzduchu opustit prostor

podběhu, pokud možno do vhodného místa podél karoserie, aby vznikalo lepší obtékání s menším odporem vzduchu.

Přední clonka figuruje u většiny nových typů automobilů, brání přímému proudění do podběhu. Někdy ještě bývá vylepšena průduchy, které usměrňují proud vzduchu, kvůli chlazení, k brzdovému kotouči. Na obrázku (*Obr.13 - a*) si u Volvo V30 můžeme povšimnout i aerodynamicky optimalizovaných kol, které při jízdě turbulence omezují.

Velmi účinný prvek, který snižuje aerodynamický odpor vznikající v oblasti předních kol je tzv. vzduchová záclona (*Obr.13 - b*). Jedná se o speciální svíslé průduchy na vnějších okrajích předního nárazníku, které urychlují proudící vzduch a směřují jej kolem předních kol. Tím se snižují turbulence vznikající v oblasti předních kol.



Obr. 13 - a) - Řešení podběhu kol Volvo V 30

b) - Vzduchová záclona BMW [11]

3.2.3 Střední oblast automobilu

Podél automobilu se designéři zabývají tvarováním karoserie různými liniemi, kterými si v podstatě připravují potřebné proudění pro zadní část vozidla. Opět tu je kladen důraz na obtékání, pokud možno s co nejmenšími ztrátami. Usměrněné proudění však narušují kliky dveří, či zpětná zrcátka svými turbulencemi. V poslední době se na těchto komponentech pracuje a navrhují se způsoby řešení, které by tyto nežádoucí vlastnosti odstranily. V úvahu připadají místo klik dveří světelné senzory, které při zakrytí rukou dveře otevřou nebo nahrazení zpětných zrcátek malými kamerami snímajícími prostor okolo vozidla.

U moderních automobilů je také nutností krytování spodních partií podvozku. Kryty brání vzduchu pronikat do podvozkových částí, kde by se vířil a způsobil tím nemalé ztráty.

Se zajímavým řešením přišli inženýři značky Ferrari u modelu F12 Berlinetta. Novou specialitou je tzv. vzduchový most (*Aero Bridge*), který využívá kapotu ke generování přitlaku tím, že tok vzduchu odklání ke stranám. Při rychlosti 200 km/h generuje

aerodynamický přítlak 123 kg . Přes to má vůz i vynikající aerodynamiku s $C_x = 0,299$. Dalším zlepšením je aktivní systém chlazení brzd, který otevírá průduchy chlazení karbokeramických kotoučů, kdy je potřeba (Obr. 14). [13]

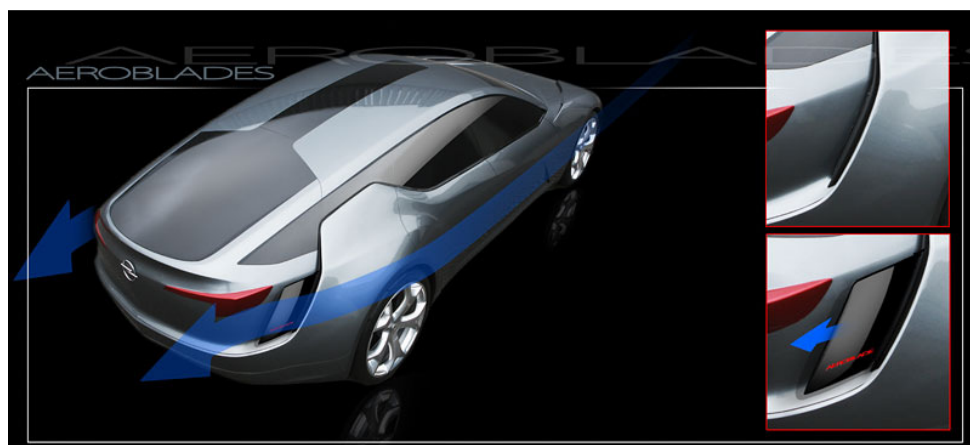


Obr. 14 - Vizualizace proudění vzduchového mostu u modelu Ferrari F12 Berlinetta [13]

3.2.4 Zád' automobilu

Obtékání zádě je velmi důležité, protože ovlivňuje velikost celkového odporu vzduchu, který je závislý na velikosti úplavu či velikosti turbulencí, které se vytváří při jízdě za vozidlem. Tvarování zádě, či úhel odtrhové hrany je také významný z hlediska přivedeného přítlaku na zadní nápravu, který zlepšuje stabilitu vozidla při vyšších rychlostech. Konstrukteři hledají ideální naladění tvaru zádě automobilu, tedy kompromis, mezi jízdními vlastnostmi a aerodynamickým odporem. Tento kompromis se začíná řešit aktivními aerodynamickými prvky

V roce 2010 byl představen na autosalonu v Ženevě koncept modelu značky Opel Flextreme GT/E. Tento pětidvéřový sedan, se pyšní prvním variabilním obtékáním zádě Aeroblades (Obr. 15), což velkým podílem přispívá k malému součiniteli odporu vzduchu $C_x = 0,22$. Po překročení rychlosti 50 km/h se ze zadních boků automobilu vysunou 350 mm vysoké boční panely, které redukují vznik turbulentního proudění. [14]



Obr. 15 - Proměnné obtékání zádě s výsuvnými panely Aeroblades [14]

Aktivní aerodynamické prvky zádě vozidla jsou v této době spíše ve fázi výzkumu a ladění. Díky konkurenci výrobců automobilů na tomto problému musí pracovat ty značky, které nechtějí na trhu s inovacemi zaostávat.



Obr. 16 - Aktivní aerodynamický prvek zádě Peugeotu HX1 koncept [15]

U sportovních výkonných automobilů je aktivní variabilní nastavení úhlu přitlačného křídla obvyklé, u těchto vozidel se však neřeší otázka ekonomiky jízdy. Jako hlavního průkopníka si můžeme představit Bugatti Veyron. Jeho přitlačné křídlo mění v závislosti na situaci jízdy úhel naklonění a dodává tak zadní nápravě dostatečný přitlak. V případě brzdění z vysokých rychlostí (*nad 200 km/h*) je křídlo během *0,4* sekundy nakloněno do úhlu 70° , zvýšený aerodynamický odpor brzdí automobil zpomalením $5,8\text{ms}^{-2}$ a současně vyvažuje rozdělení brzdných sil zvýšením přitlaku na zadní nápravě. [16]

4 Aerodynamický odpor

Celkový aerodynamický odpor se skládá ze složek, které působí rozdílnými účinky na vozidlo.

4.1 Složky aerodynamického odporu [1]

4.1.1 Tvarový odpor

Při obtékání vozidla proudí větší část vzduchu kolem horní části karosérie a část se musí protlačit prostorem mezi spodní částí vozidla a povrchem vozovky. Proudnice se za vozidlem neuzavírají, nastává tedy víření. Tím vznikají složky aerodynamického odporu, které jsou brány jako výslednice normálových tlaků vzduchu působících na povrch karosérie o hodnotě 50-80% a třecích sil 5-10%, které v tečném směru proudění vzduchu působí na karosérii.

Jelikož je pohyb relativní, odpor prostředí je stejný, ať už se vozidlo pohybuje v nehybném vzduchu nebo je vozidlo v klidu a je obtékáno proudícím vzduchem. V součtu záleží pouze na relativní rychlosti mezi vozidlem a vzduchem.

4.1.2 Indukovaný aerodynamický odpor

Nestejným tlakem pod vozidlem a nad vozidlem, (nad vozidlem nižší tlak, pod vozidlem vyšší tlak), má vzduch tendenci se přemísťovat z míst s vysokým tlakem do míst s nižším tlakem. Proto má vzduch proudící pod vozidlem snahu přejít a spojit se, se vzduchem obtékající boční povrch karosérie. Dochází tak k víření vzduchu v příčné rovině vozidla, které je další složkou celkového aerodynamického odporu o hodnotě 3-10%.

4.1.3 Odpor způsobený různými rušivými detaily

Je to ovlivnění proudění vzduchu po povrchu dalším členem, který rozrušuje aerodynamický tok. Patří sem např. zpětné zrcátko nebo kliky dveří na povrchu karosérie automobilu. Velikost této složky odporu je 10-20%.

4.1.4 Odpor rotujících kol

Tato problematika je podrobněji popsána již výše v (stať 2.7) a k celkovému aerodynamickému odporu vozidla přispívá měrou 3-5%.

4.1.5 Odpor vzniklý průchodem vzduchu do automobilu

Tento odpor s hodnotami 10-20% vzniká průchodem vzduchu do systému sání, chlazení, topení a větrání. Dále pak do karoserie, do motorového prostoru a brzd.

4.2 Soustava aerodynamických sil

Celkový aerodynamický odpor je síla, která má obecný směr a velikost. Pro posouzení jejího vlivu na zatížení vozidla je potřeba ji vhodně rozložit. Nejčastěji je rozkládána do směrů os souřadného systému vozidla (Obr. 17). Jelikož nás zajímají velikosti aerodynamických sil vzhledem k těžišti, je nutné tyto síly přepočítat. Celkové aerodynamické účinky lze tedy rozdělit do šesti složek, a to do tří silových a tří momentových. Silové složky jsou aerodynamický odpor působící proti ose X (7), aerodynamický vztlak působící v ose Z a aerodynamická boční síla působící v ose Y . Momentové složky se dělí na klopný, stáčivý a klonivý moment.

$$F_{vz} = \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot S_{\varepsilon} \cdot v^2, \quad (7)$$

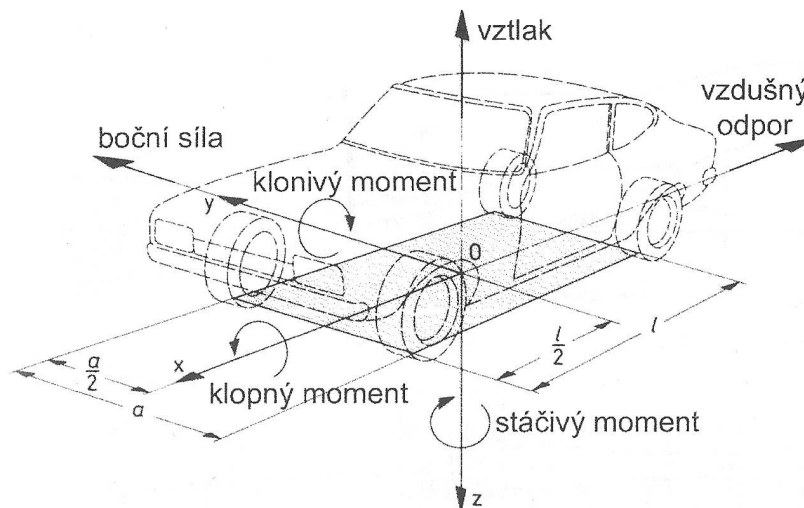
F_{vz} - aerodynamický odpor,

S_{ε} - čelní plocha vozidla,

ρ - hustota vzduchu,

v - rychlost,

C_x - koeficient aerodynamického odporu.



Obr. 17 - Souřadný systém pro aerodynamická měření sil a momentů [17]

U osobních vozidel se čelní plocha S_{ε} pohybuje okolo 2 m^2 . K určení čelní plochy se v současnosti používají metody snímání obrysu laserem.

5 Možnosti vizualizace obtékání

Vizualizace obtékání znázorňuje proudy vzduchu, které obtékají kolem zkoumaného tělesa a pomáhá tak analyzovat jeho aerodynamické vlastnosti. Vizualizaci lze provést prakticky v aerodynamickém tunelu nebo virtuálně výpočtovými CFD softwary.

5.1 Vizualizace v aerodynamickém tunelu

Aerodynamický tunel je výzkumné zařízení, jenž umožňuje vytvářet ovladatelný proud vzduchu, který slouží ke zkoumání aerodynamických vlastností těles.

V aerodynamickém tunelu se používá vizualizace proudění pomocí kouřové sondy, kterou se zavede kouř před těleso (*Obr. 18*). Proudící vzduch unáší kouř a znázorňuje tak průběhy proudění okolo tělesa. Dále je možné sledovat, zda dochází k odtržení proudu nebo k vírové oblasti, kde vznikají energetické ztráty. Zjišťuje se tak kvalita obtékání jako celku, nebo jen lokální konstrukční oblasti. Místa lze pak individuálně kouřovou sondou pečlivě prověřit. Dříve se v aerodynamických tunelech místo kouřových sond používaly na tělesu přilepené provázky, které obtékající vzduch usměrnil.

V aerodynamickém tunelu se neřeší jen kvalita proudění, ale mimo jiné také problém se vztlakovými silami, které při vyšších rychlostech způsobují odlehčení kol, jemuž je třeba vhodnými aerodynamickými opatřeními zabránit. Mezi další důležité úlohy patří teplotní zkoušky vozidlových agregátů, brzd, výfukového systému a klimatizace. Dále pak zkoušky větrání vnitřního prostoru, aerodynamického hluku, proudění spalín, znečištění karoserie, funkce stěračů apod. Mezi výhody aerodynamického tunelu zejména patří vhodné laboratorní podmínky, vysoce přesné měřící zařízení a zpracování dat.



Obr. 18 - Vizualizace pomocí kouřové sondy v aerodynamickém tunelu [18]

5.2 CFD

CFD je zkratka anglického výrazu (*Computational Fluid Dynamics*), což znamená počítačová dynamika tekutin. Jedná se o počítačové simulace proudění média a přenosů tepla s využitím softwaru, který umožňuje konstruktérům simulovat a analyzovat aerodynamické vlastnosti konstrukce. Výhodou tohoto typu konstruování je významná redukce času potřebná pro výzkum a vývoj. Je totiž možné ověřit si návrh a případné změny ve fázi projektu, kdy je součástí ještě jako model v CAD softwaru. Pomocí této numerické výpočetní metody je možné dosáhnout jako výsledků informace o velikosti vyšetřovaných veličin, tlakových polí i vizualizace tvarů proudnic obtékání. Tyto informace ze simulací podstatným způsobem pomáhají vyladit vyšetřovanou konstrukci. Následně je vybrána ta konstrukce, která nejlépe odpovídá požadovaným aerodynamickým charakteristikám. Výsledný návrh jde pak z většiny případů do výroby, kde se buď zhotoví fyzická maketa ve zmenšeném měřítku nebo model v reálné velikosti 1:1. Na těchto modelech se pak v aerodynamickém tunelu ověřují jejich aerodynamické vlastnosti. Metoda CFD tedy šetří výrobci mnoho času a finančních prostředků.

5.2.1 Použití CFD

Jedny z nejznámějších komerčních CFD softwarů jsou např. FLUENT, CFX, Flow Simulation, Abaqus, či OpenFOAM.

V praxi se CFD používá v těchto odvětvích:

- automobilový průmysl,
 - aerodynamika - vnitřní a vnější proudění (*více ve stati 5.2.2*),
 - činnosti spalování motoru - od sání, výfuku až po vstřikování paliva,
 - převodovky - mazání, chlazení apod. ,
- letecký průmysl - aerodynamika,
- stavební průmysl - vytápění a klimatizace,
- bio-medicínské aplikace - krevní oběh, dýchací soustava,
- chemický průmysl - zpracování odpadních produktů,
- elektronika a elektrotechnika - chlazení elektrických zařízení,
- námořní doprava - tvar lodí,
- životní prostředí - znečištění ovzduší.

5.2.2 Použití CFD v automobilovém průmyslu z hlediska aerodynamiky

CFD softwary poskytují aerodynamickým specialistům širokou škálu možností, jak zviditelnit proudění kolem a uvnitř vozu v libovolných detailech a pohledech. Inženýři se dnes ovšem nezabývají zdaleka jen prouděním vzduchu kolem karoserie, ale musí se věnovat i dalším partiím vozu. Spousta práce rovněž čeká vývojáře při usměrnění proudění vzduchu pod kapotou vozu, protože současné motory je nutné efektivně chladit, a aby mohly motory fungovat na maximální výkon, potřebují nasát dostatečné množství vzduchu do sacího traktu. Stejně tak brzdy potřebují dostatek vzduchu k chlazení, aby správně fungovaly a neohrozily posádku z důvodu svého přehřátí. V poslední době se klade velký důraz také na oblast špinění vozu.

5.2.2.1 Vnější aerodynamika vozu [19]

Dle vnějších CFD simulací se stanovují vlastnosti v oblastech:

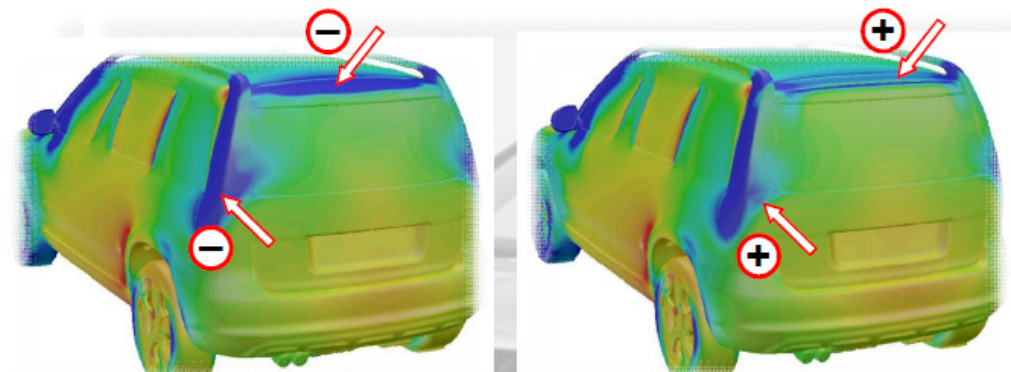
- bezpečnosti - aerodynamická stabilita, špinění,
- ekonomiky - aerodynamický odpor,
- funkčnosti - chlazení, sání, technické detaily,
- komfortu - špinění vozidla.

Základní sledované oblasti:

- koeficienty aerodynamického odporu a vztlaku na nápravách,
- koncepční návrhy, optimalizace základních tvarů karoserie,
- dimenzování vstupních mřížek a proudění motorovým prostorem,
- proudění pod vozem, chlazení brzd,
- optimalizace dílů (světlomety, stěrače, spoilery, střešní nosiče, apod.),
- simulace špinění, tlakové zatížení dílů.

Praktický proces CFD v průběhu vývoje vozidla probíhá tak, že designer navrhne n základních tvarů karoserie dle požadovaných cílů, poté inženýři připraví 3D modely jednotlivých vozidel. Na CAD modelu se vytvoří pomocí softwaru povrchová síť a ve zkoumaném prostoru okolo vozidla (ve virtuálním aerodynamickém tunelu) objemová síť. Simulace proudění na 3D modelu se provede ve výpočtovém CFD softwaru, do nějž se zadají počáteční podmínky simulace a nastaví se parametry proudění. Vlastní výpočet se sleduje konvergencí výsledků iterací. Po dokončení výpočtu se načtou výsledná data, která aerodynamičtí specialisté pomocí vizualizace výsledků vyhodnocují, např. (Obr. 19 - vlevo). Na tomto obrázku lze vidět v zadní části vozidla rozsáhlé pole s nižším tlakem, které by

v provozu způsobilo špinění vozila a vyšší aerodynamický odpor. Po analýze výsledku inženýři zpracují zprávu o vlastnostech aerodynamiky vozidla, spolu s návrhy a opatřeními. Tato výsledná zpráva putuje zpět k designérům, kde se problémy tvarů řeší.



Obr. 19 - Vizualizace tlaků mezi původním stavem (vlevo) a vylepšeným (vpravo) [19]



Obr. 20 - Ověření výsledku optimalizace při měření v aerodynamickém tunelu v měřítku 1:4 (vlevo) a 1:1 [19]



Obr. 21 - Sériový stav odtrhové hrany vozidla [19]

5.2.2.2 Vnitřní aerodynamika vozu [19]

U vnitřních CFD simulací se stanovují vlastnosti v oblastech:

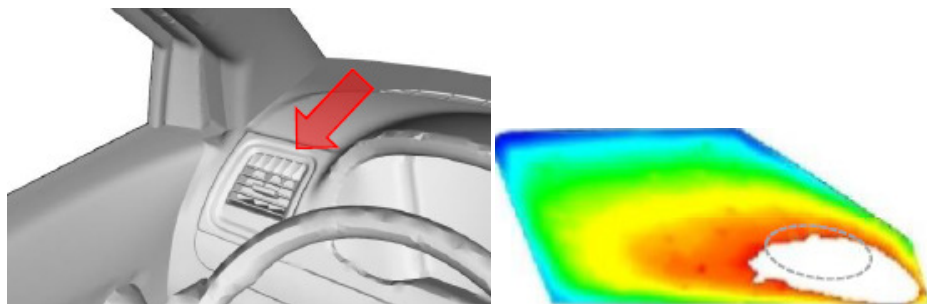
- bezpečnosti - kvality a homologace,
- klima - komfort pasažérů.

Základní sledované oblasti:

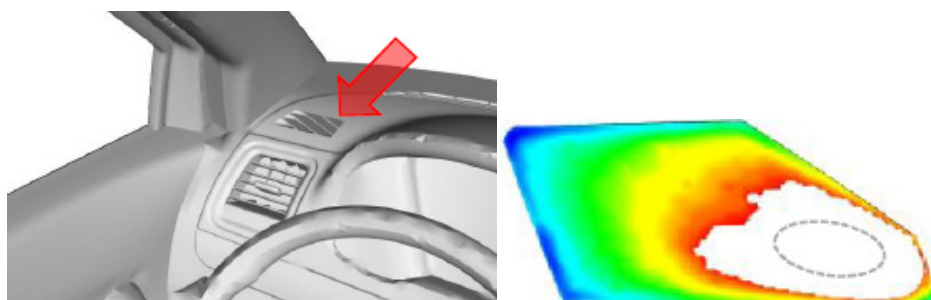
- odmrazení (defrost),
- odmlžení, vyhřívání (defog),
- klimatizování (ofukování, zchlazování),
- solární zatížení,
- vyplachování, odvětrávání.

Jako příklad k této kapitole je uvedena vnitřní CFD simulace bočního a čelního odmrazení skel vozidla Škoda Yeti.

Boční odmrazení - Jde o posouzení koncepčních změn umístění u tzv. defrostů. Cílem simulací bylo analyzovat zajištění viditelnosti přes výhledovou plochu zrcátka pro všechna nastavení ofukovačů. Ve variantě č. 1 (*Obr. 22*) je boční defrost integrován do ofukovačů. Výsledek simulace je znázorněn v podobě kontur tajícího ledu na bočním skle. Tím, že se proudy vzduchu vzájemně mísí, vzniká menší odmrazovací efekt. Pro zlepšení výhledu na zrcátka byla navržena varianta č. 2, ve které se defrost umístil na přístrojové desce (*Obr. 23*), z výsledku je vidět jasné zlepšení odmrazení.

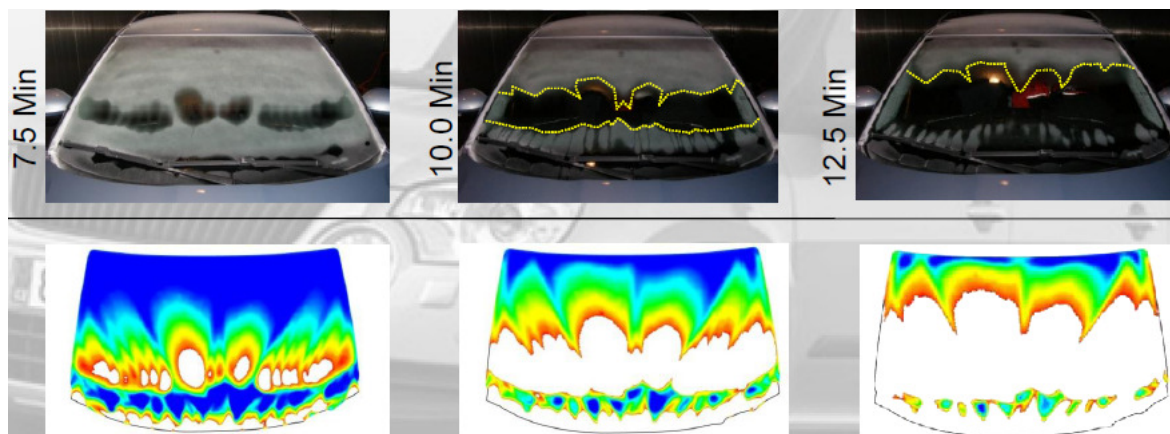


Obr. 22 - Varianta č. 1 [19]



Obr. 23 - Varianta č. 2 [19]

Validace čelního odmrazení - Po CFD simulacích je nutné ověřit jejich výsledky na již zkonstruovaném předsériovém vozidle. Na následujících obrázcích je vidět porovnání CFD simulace pomocí vizualizace kontur tajícího ledu na čelním skle a odtávání ledu na reálném vozidle při testech v aerodynamickém tunelu.



Obr. 24 - Validace čelního odmrazení u vozu Škoda Yeti [19]

5.3 Flow Simulation

Tento výpočetní software od společnosti SolidWorks® Flow Simulation 2012 vzdělávací edice byl použit pro simulace a analýzy vozidla, u kterého jsem navrhoval optimální tvar pro závod Shell Eco - marathon. Je to první a nejjednodušší program pro simulaci proudění kapalin a teplotní analýzy, plně integrovaný do systému SolidWorks. S jeho CFD funkcemi můžeme simulovat proudění kapalin a plynů v podmínkách skutečného světa, zkoumat scénáře „co kdyby“ a rychle analyzovat účinky proudění kapalin, přenosu tepla a souvisejících sil na ponořené nebo okolní komponenty. [20]

5.3.1 Funkce Flow Simulation [21]

Ve Flow Simulation je možné simulovat širokou škálu proudění a jevů přenosu tepla. Výpočet simulace se řeší dle Navier-Stokesových rovnic, které jsou formulacemi zákonů zachování hmoty, hybnosti a zachování energie, pro proudění tekutiny. Rovnice jsou doplněny empirickými vztahy tekutiny, které ji podrobněji definují. Flow Simulation je schopen předpovídat laminární i turbulentní proudění. Laminární proudění je při nízkých Reynoldsových číslech a turbulentní proudění se začíná vyskytovat od kritického Reynoldsova čísla. Z větší části případů proudění tekutiny, se kterými se setkáváme v technické praxi, je proudění turbulentní, proto byl Flow Simulation vyvinut především pro simulace turbulentního proudění.

Technika numerického řešení používaná ve Flow Simulation je spolehlivá, nevyžaduje žádné vyšší uživatelské znalosti o výpočetní síti a numericky použitých metod. V případě, že je ale řešený model příliš komplikovaný, Flow Simulation vyžaduje vysoké hardwarové požadavky na velikost operační paměti a rychlost CPU. Flow Simulation řeší rovnice metodou konečného objemu. Metoda je založena na prostorově obdélníkové výpočetní síti určené v kartézském souřadnicovém systému s rovinami kolmými k jeho osám. Výpočetní síť je generována automaticky všude v oblasti výpočetní domény, přesnost sítě může uživatel ručně měnit v menu generování sítě.

Typy analýz ve Flow Simulation 2012:

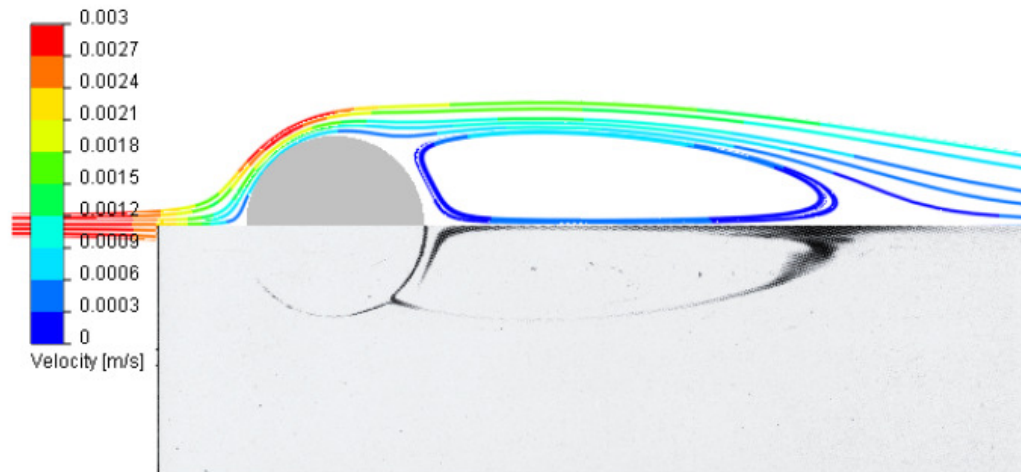
- Analýza vnějšího proudění kapalin a plynů kolem objemových těles,
- analýza vnitřního proudění (proudění ventily, výfuky, tryskami apod.),
- analýza přenosu tepla zářením (vyzařování tepla, sluneční záření apod.),
- analýza přenosu tepla vedením (vedení tepla objektem),
- analýza rotace referenčního rámce (čerpadla, turbíny apod.),
- analýza přechodového proudění závislého na čase,
- analýza poklesu tlaku v trubkách pomocí hodnot nerovnosti povrchu,
- analýza stlačitelného proudění pro proudění plynu v podzvukových, transsonických a nadzvukových rychlostech,
- analýza kavitace a identifikaci oblastí, kde k ní dochází,
- analýza turbulentního proudění pomocí modelů K-E pro ilustraci turbulentního proudění,
- analýza vlhkosti pro výpočet relativní vlhkosti uvnitř uzavřených prostor pro aplikace kontroly klimatu,
- stlačitelné plyny a nestlačitelné proudění kapalin.

Mezi tekutiny, které se mohou simulovat, patří např. vzduch, voda, tekuté chemikálie a plyny, džus, zmrzlina, med, roztavený plast, zubní pasta, krev apod.

5.3.2 Validace Flow Simulation

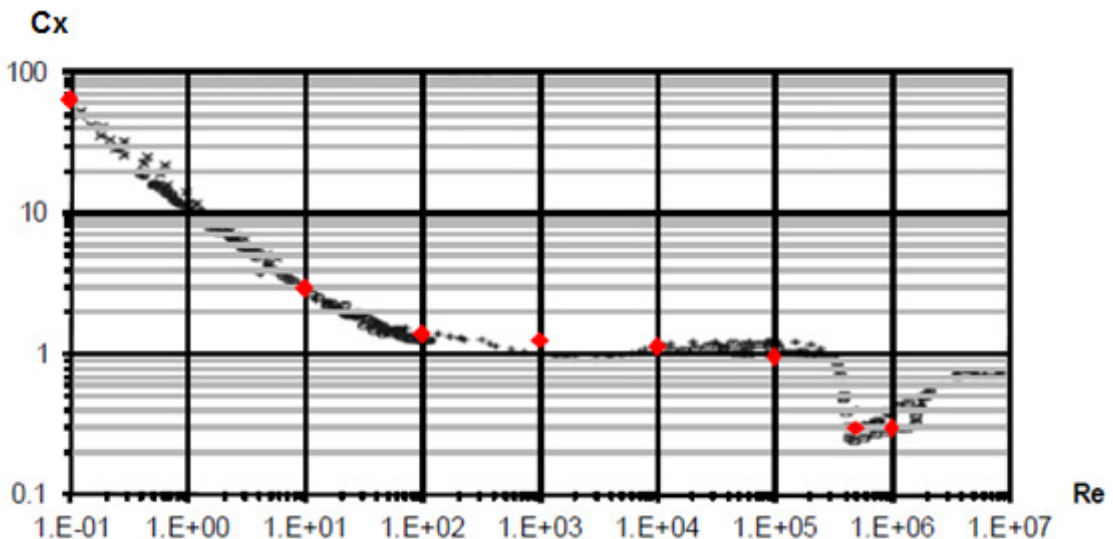
V technickém manuálu Flow Simulation je uvedena celá řada validních příkladů, které v porovnání ukazují výsledky z praktických experimentů a ze simulací ve Flow Simulation. Pro názornost jsem vybral příklad externího proudění tekutiny okolo válce. Tento příklad simulace je podobný s mou úlohou a je svým způsobem dobře prakticky prozkoumán.

Byl zde simulován příklad externího proudění vody okolo válce o průměru $1m$. Na obrázku (Obr. 25) je výsledek výpočtu v podobě vizualizace proudnic porovnáván s výsledkem praktického experimentu pomocí vizualizace kouřové sondy.



Obr. 25 - Výsledek validace proudění [20]

Dále jsou zde uvedeny výpočty při různých rychlostech proudění (Graf 1) kde C_x je koeficient aerodynamického odporu v závislosti na Reynoldsově čísle. Výsledky z CFD simulací jsou zobrazeny červenými body, výsledky z experimentů v aerodynamickém tunelu, body černými.



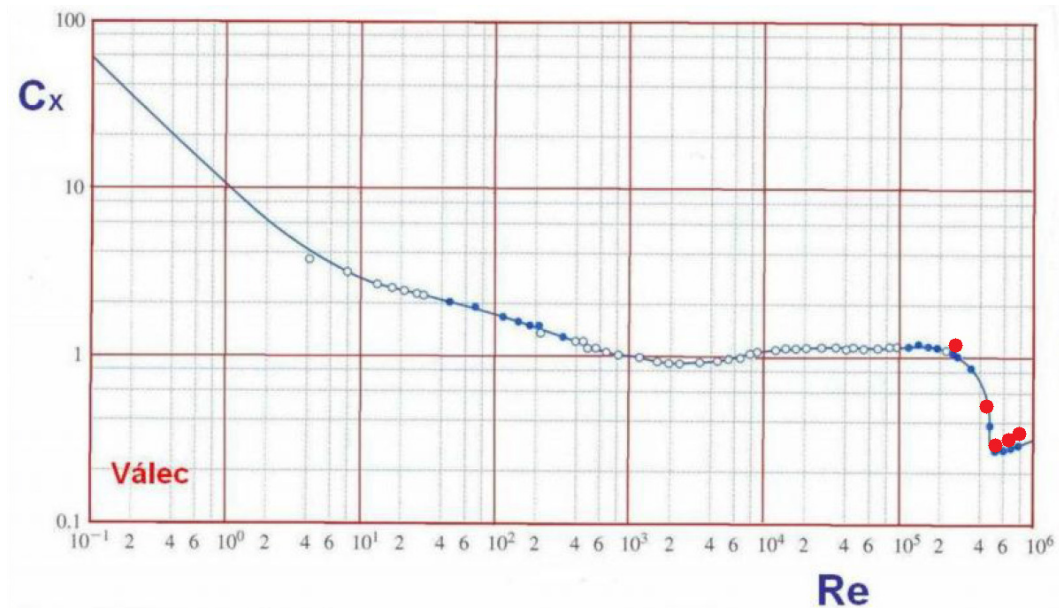
Graf 1 - Závislost koeficientu aerodynamického odporu na Reynoldsově čísle [20]

Pro vlastní ověření správnosti nastavení mých výpočtů jsem simuloval příklad obtékaného válce vzduchem o hustotě $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$, dynamické viskozitě $\mu = 1,81 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, průměru $d = 0,8 \text{ m}$, délce $l = 1 \text{ m}$, rychlostmi $v = 5, 8, 10, 12, 15 \text{ m/s}$. Výsledky simulací jsou uvedeny v tabulce (Tab. 1), poté jsem výsledky zobrazil ve formě červených bodů do grafu, který byl pro válec sestaven hodnotami z měření v aerodynamickém

tunelu (Graf 2). Z výsledku je patrné, že mé hodnoty odpovídají výsledkům z reálných experimentů.

Rychlost [m/s]	Odporová síla [N]	$Re \cdot 10^5$	C_x
5	16,10	2,65	1,34
8	17,69	4,24	0,58
10	16,24	5,30	0,34
12	24,88	6,37	0,36
15	40,41	7,96	0,37

Tab. 1 - Mé výsledky ze simulace válce



Graf 2 - Závislost koeficientu aerodynamického odporu na Reynoldsově čísle [22]

5.3.3 Práce v Softwaru Flow Simulation 2012

5.3.3.1 Základní nastavení simulace

Je-li model pro simulaci připravený, spustíme modul Flow Simulation dále jen FS, tlačítkem **Flow Simulation** na záložce příkazů v pracovním prostředí SolidWorks. Poté se objeví pracovní prostředí FS s jeho hlavním panelem příkazů (Obr. 26).

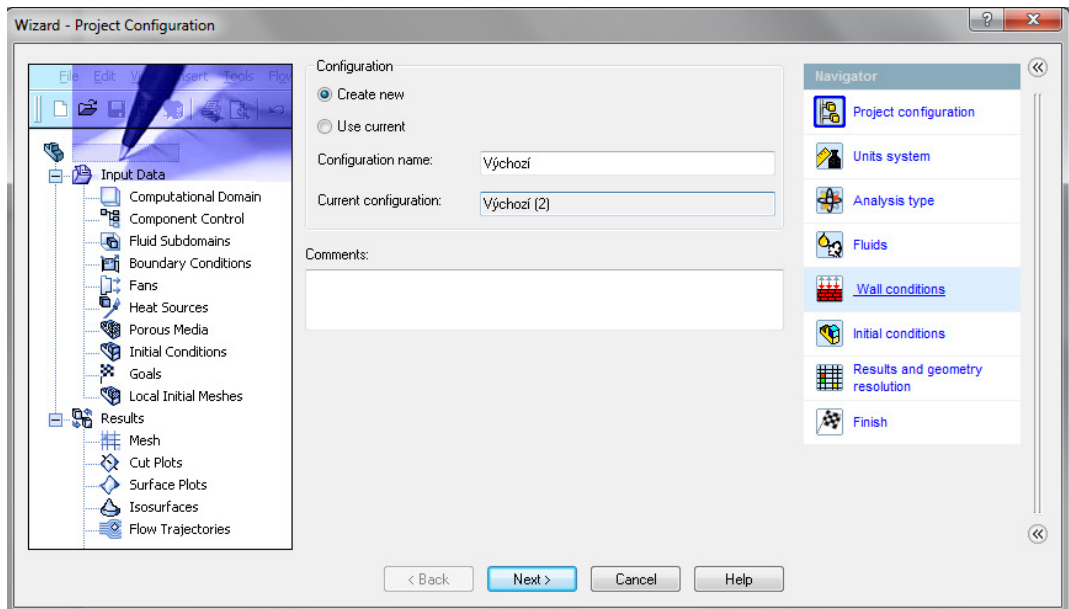


Obr. 26 - Hlavní panel příkazů FS

5.3.3.1.1 Průvodce nastavením

Pro úplný začátek práce s FS slouží v programu průvodce nastavením, *Wizard* **Wizard**, po kliknutí na ikonu se zobrazí okno (Obr. 27), pomocí kterého se nastaví jméno

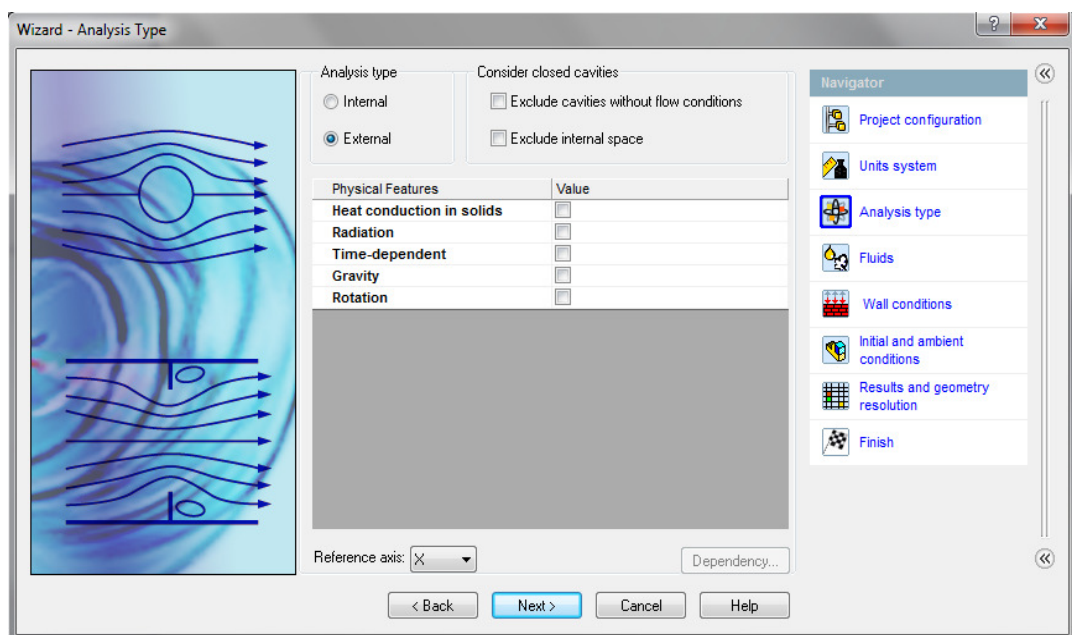
projektu. V pravé části okna jsou zobrazeny příkazy, kterými se dále nastavují počáteční podmínky simulace. V menu *Wizard - Project Configuration* se pokračuje dále tlačítkem *Next>* do okna *Units system*, kde se jednoduše nastaví jednotky, se kterými chceme pracovat, nejčastěji to jsou jednotky *Si*.



Obr. 27 - Okno průvodce nastavením - Konfigurace projektu

5.3.3.1.2 Definování typu simulace

Dalším bodem nastavení je okno *Analysis type* (Obr. 28), kde se nastaví typ simulace, se kterým budeme pracovat, tedy interní či externí proudění a další vlastnosti simulace, jako jsou např. globální či lokální rotace, gravitace, radiace apod.



Obr. 28 - Okno pro definování typu simulace

5.3.3.1.3 Definování proudící tekutiny

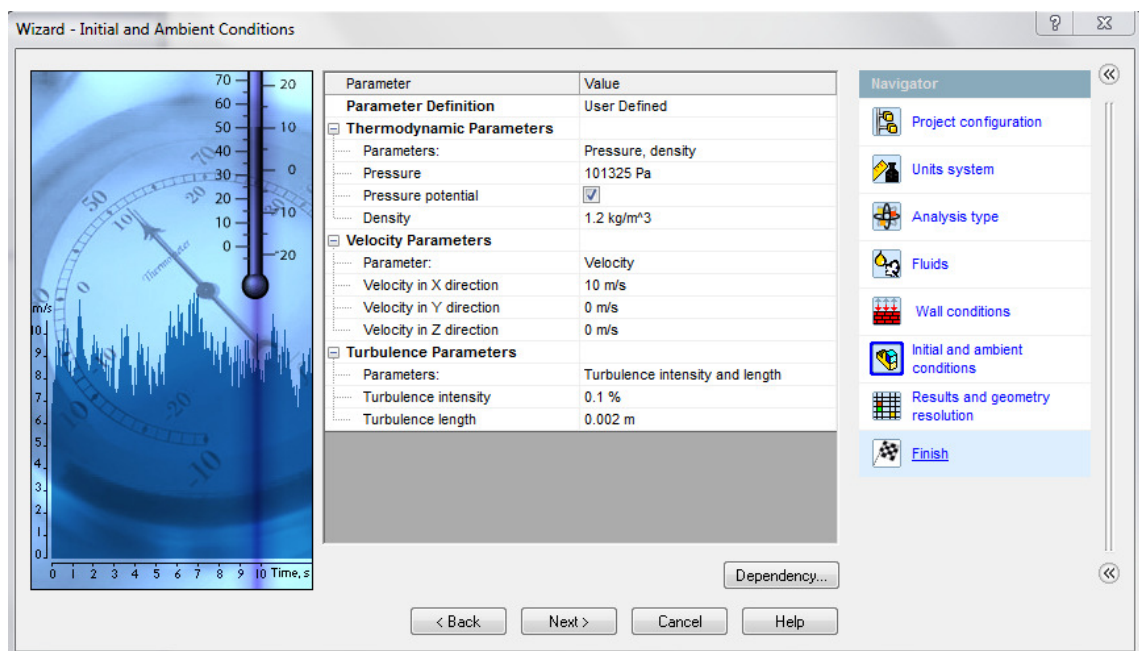
Dalším bodem je definování tekutiny v okně *Fluids*, kde se přidáním média vybere vzduch z rozsáhlé databáze tekutin (*Air - Gases*), které je možno v simulacích použít. Dále se pak upraví příkaz, jakým prouděním bude tekutina proudit, z nabídky se vybere laminární společně s turbulentním prouděním.

5.3.3.1.4 Definování vnějších podmínek

Pro definování vnějších podmínek slouží okno *Wall Conditions*. To necháme v základním nastavení, poněvadž je stěna modelu bez sdílení tepla s okolím a drsnost modelu neuvažujeme.

5.3.3.1.5 Definování počátečních podmínek proudění

Pro definování počátečních podmínek proudění je ve sloupci příkazů okno *Initial and ambient conditions* (Obr. 29), zde se nastaví požadované rychlosti proudění v libovolných souřadných osách a další počáteční parametry simulace, kterými jsou hustota, tlak a teplota. Parametr turbulencí se dle návodu Flow Simulation doporučuje neměnit. Pro vybrané simulace si program sám nastaví jeho naprogramovanou hodnotu.

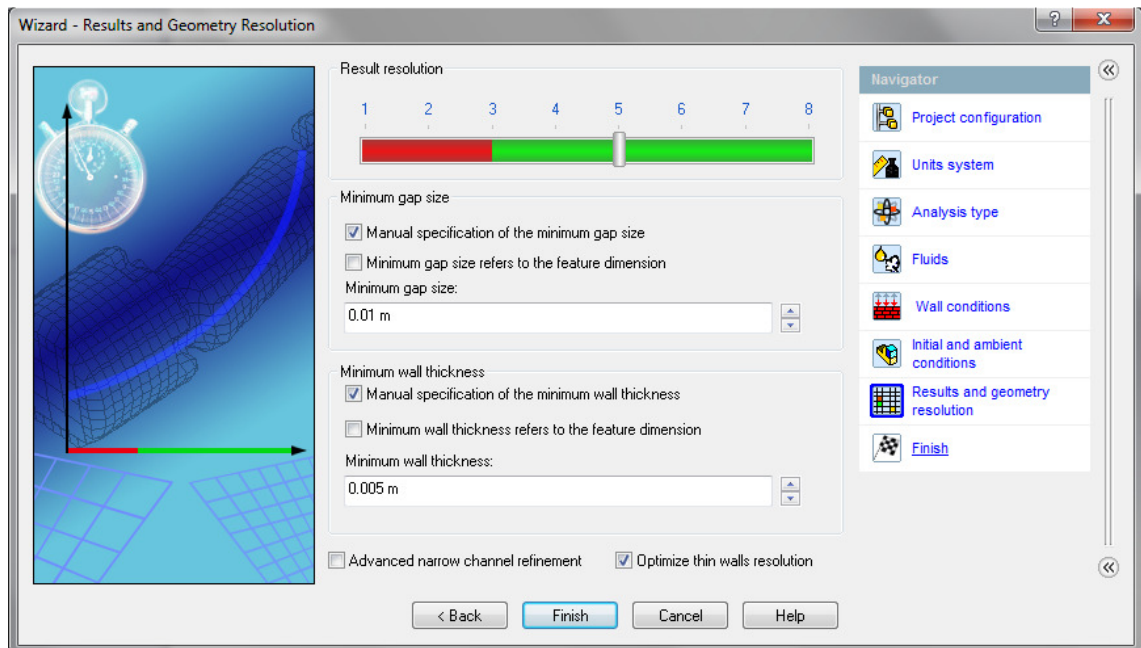


Obr. 29 - Okno pro definování počátečních podmínek proudění

5.3.3.1.6 Definování výpočetní sítě



V dalším kroku v průvodci nastavením je definování přesnosti objemové sítě *Results and geometry resolution* (Obr. 30). Zde je možné manuálně nastavit požadovanou přesnost



sítě v celém zkoušeném tunelu v rozmezí 1-8, kde číslice 8 je nejjemnější automaticky generovaná síť. Výpočet s touto přesností však může trvat velmi dlouho, např. několik desítek hodin. Je tedy vhodné zvolit si nějaký kompromis, mezi časem a přesností výpočtu. V okně nastavení sítě je možné manuálně zadat hodnoty *Minimum Gap size*, což je hodnota, která definuje minimální velikost mezery. *Minimum wall thicknees* je hodnota, která definuje minimální tloušťku stěny. Poté průvodce nastavením ukončíme příkazem *Finish*.




Obr. 30 - Okno pro definování výpočetní objemové sítě


5.3.3.1.7 Dodefinování počátečních parametrů na hlavním panelu FS


Síť tunelu je možné také upravit přímo na panelu v pracovním prostředí FS pomocí příkazové ikony *Initial Mesh* . Na libovolné části modelu lze nadefinovat jemnější síť pomocí příkazu *Local Initial Mesh* , kde se jednotlivým vybraným částem přiřadí požadovaná přesnost sítě.


Na záložce *Flow Simulation analysis tree*  je umístěno definování velikosti výpočetní domény (tunelu) *Computational Domain* , kde se po vyvolání místní nabídky (kliknutím pravým tlačítkem myši), zobrazí sloupec možností s nastavením velikosti tunelu.

K definování rotací a pohybů jednotlivých dílů modelu slouží funkce *Boundary Condition* . Pomocí této funkce je možné upravit požadované vlastnosti dílu, např. rotaci kol, či pohyb vozovky. U rotace se použije nastavení *Real Wall*, dále pak *Wall Motion*, ve kterém je potřeba zadat souřadný systém rotujícího dílu, osu a rychlost jeho







otáčení. Při nastavení pohybu dílu se postupuje stejným způsobem, jen s rozdílem, že se nenastavuje rychlost otáčení, ale směr a rychlost pohybu dílu.

Po nastavení těchto základních počátečních podmínek simulace je možné si model společně s tunelem zkontrolovat pomocí tlačítka *Check Geometry* , tato funkce prohlédne model, jestli je vše pro simulaci v pořádku. V případě že ano, vypíše hlášku *No invalid contacts detected*, v případě nalezení problému chybu názorně zobrazí.

Pro nastavení výsledků, které chceme ze simulace získat, slouží příkaz *Surface Goals* , který se nachází na hlavním ovládacím panelu FS. Zde si je možné zvolit ze široké nabídky, jaký typ výsledků, či s jakou přesností chceme výsledky pro daný model vypočítat.

Spuštění simulace se provádí tlačítkem *Run* , po spuštění se objeví dialogové okno s nabídkou výpočtu, buď jednotlivé generování sítě, kterou si uživatel může zkontrolovat, nebo celkový výpočet bez kontroly sítě. Dále je zde možné nastavení výpočtového výkonu počítače. Po celý čas simulace je pak možné sledovat aktuální vypočtené výsledky zadané v *Surface Goals*, potřebný čas k dokončení simulace, výsledky iterací v grafické podobě, či aktuální výsledky simulace v rovinných řezech.

5.3.3.2 Načtení výsledků

Načtení výsledků pro analýzy se provede pomocí tlačítka *Load Results* , které je umístěno na hlavním panelu FS. Z přiřazeného souboru načteme vypočtená data ze simulace. Poté se rozsvítí na hlavním panelu tlačítko pro vizualizaci výsledků *Flow Simulation Results Features* , kde si je možné vybrat z nabídky rovinných , povrchových , proudových , nebo prostorových  analýz, u kterých se přiřadí sledované parametry. Jako další zpracování je možné výsledky převést do programů Excel, Word, nebo do jiných pevnostních simulací. Schopnosti výsledkových analýz jsou ve Flow Simulation velmi rozsáhlé, s možností různých kombinací, animací, vytváření grafů, či dynamického snímání výsledků apod.

Praktická část

6 Návrh optimálního tvaru karoserie vozidla

V této praktické části jsem se zabýval:

- přípravou modelu vozidla pro závod Shell Eco-marathon v softwaru SolidWorks 2012,
- externími simulacemi karoserie vozidla ve výpočtovém CFD softwaru Flow Simulation 2012,
- analýzami výsledků a návrhy vylepšených aerodynamických tvarů.

6.1 Pravidla Shell Eco-marathon [22]

Pro návrh optimálního tvaru karoserie vozidla mne zajímala ta pravidla závodu, která se týkala tvaru a velikosti karoserie a jejich doplňků.

6.1.1 Článek 25 - Požadavky na návrh vozidla

- Během návrhu vozidla, jeho výroby a plánování a samotné účasti musí týmy brát ohled na všechny aspekty týkající se bezpečnosti. Tzn. bezpečnosti řidiče, bezpečnosti ostatních členů týmu a bezpečnosti diváků.
- Vozidlo musí mít tři nebo čtyři kola, která musí být při provozu ve stálém styku s vozovkou.
- Aerodynamické prvky, které se dají nastavovat nebo mají tendenci měnit tvar působením větru, když je vozidlo v pohybu, jsou zakázané.
- Karoserie vozidel nesmí obsahovat žádné vnější prvky, které by mohly být nebezpečné pro ostatní členy týmu, tzn. změny tvaru karoserie by měly mít minimální poloměr 5 cm. Pokud tohoto není možné docílit, měly by tyto součásti karoserie být vyrobeny z pěny nebo z materiálu s podobnými vlastnostmi.

6.1.2 Článek 39 - Požadavky na rozměry vozidla

- Výška vozidla nesmí přesáhnout 100 cm.
- Celková délka vozidla nesmí přesáhnout 350 cm.
- Celková šířka vozidla nesmí být větší než 130 cm.

- Výška vozidla, měřená v nejvyšším místě pro posádku, musí být menší, než 1,25 násobek většího z rozchodů.
- Rozchod vozidla musí být minimálně 50 cm.

6.1.3 Další pravidla týkající se tvaru karoserie

- Požadavek minimálního poloměru zatažení, kterého vozidlo musí dosáhnout. Jedná se o hodnotu $R = 10\text{ m}$.
- Vozidlo musí být vybaveno zpětným zrcátkem na každé straně vozidla s minimální odrazovou plochou 25 cm^2 . Elektronické zařízení nesmí nahradit zpětná zrcátka.
- Všechny typy kol jsou povoleny, musí však být splněny bezpečnostní standardy.

6.2 Návrh vozidla

Prvotní návrh koncepce vozidla byl zpracován v diplomové práci pana Ing. Bačkovského pod názvem - „Ideový návrh koncepce vozidla pro ecorally“. Po srovnání a zhodnocení různých parametrů byla vybrána z hlediska bezpečnosti a jednoduchosti, koncepce s dvěma řídicími koly vpředu a jedním hnacím kolem vzadu.

Z hlediska aerodynamické koncepce tvaru vozidla se nabízejí dvě řešení umístění předních kol:

- vně trupu karoserie,
- uvnitř karoserie.

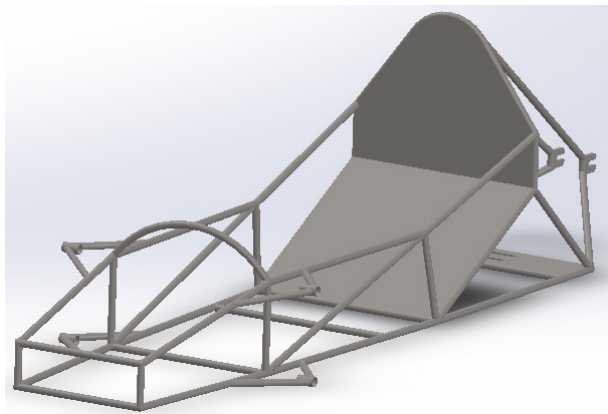
Pro snížení aerodynamického odporu vozidla jsem stanovil základní body, které jsou pro modelování konstrukce aerodynamického vozidla důležité:

- pokud možno co nejvíce snížit čelní plochu S_{ξ} ,
- vybrat takový tvar karoserie, který bude mít optimální obtékání vzduchu, aby co nejvíce klesl koeficient aerodynamického odporu C_x ,
- tvar přídě vozidla je důležitý pro usměrnění a rozdělení proudu vzduchu,
- použít co nejvíce tečný sklon předních ploch se směrem pohybu vozidla,
- tvar karoserie musí být bez překážek, které by obtékanému vzduchu umožnily stav turbulentního proudění, které ubírá jedoucímu vozidlu energii,
- tvar zádě aerodynamického vozidla je důležitý z hlediska odtržení proudu vzduchu bez velkého úplavu,

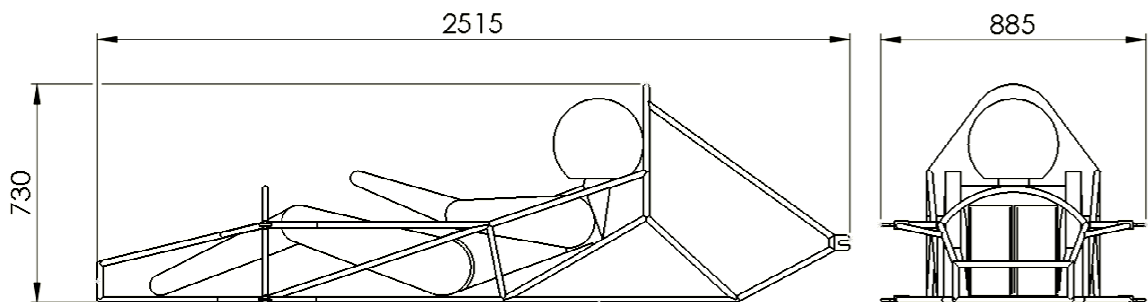
- drátěný výplet kol by byl z aerodynamického hlediska nevhodný,
- otevřená karoserie ve stylu F1, je také z aerodynamického hlediska nevhodná.

6.2.1 Rám vozidla

Rám vozidla navrhuje a analyzuje ve své diplomové práci pan Bc. Štěpán Minařík. Vycházel z ideového návrhu pana Ing. Bačkovského, který měl jako přílohu v diplomové práci výkres rámu vozidla, rýsovaný v Autocadu 2D. Pan Bc. Minařík mi poskytl jeho kompletní rám (*Obr. 31*) společně s figurínou řidiče, rýsovaný v 3D softwaru Creo Elements.



Obr. 31 - Rám vozidla

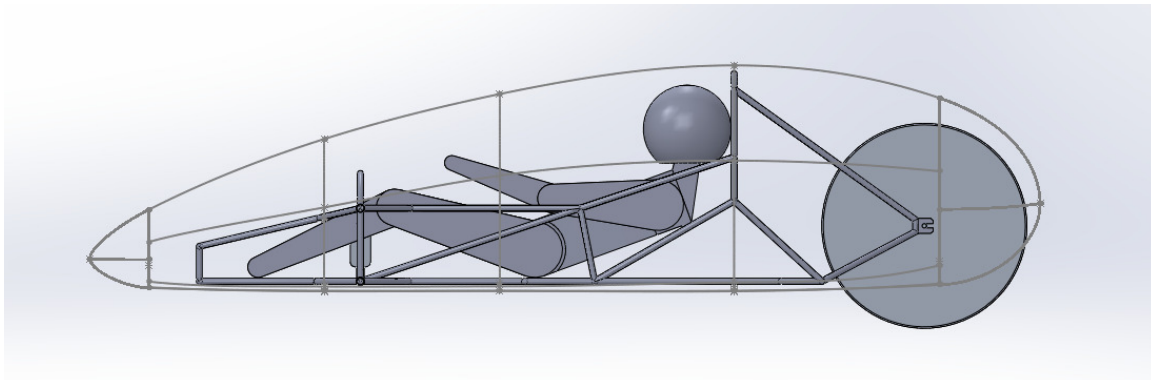


Obr. 32 - Rozměry rámu [mm]

6.2.2 Modelování karoserie vozidla na rám, pomocí SolidWorks 2012

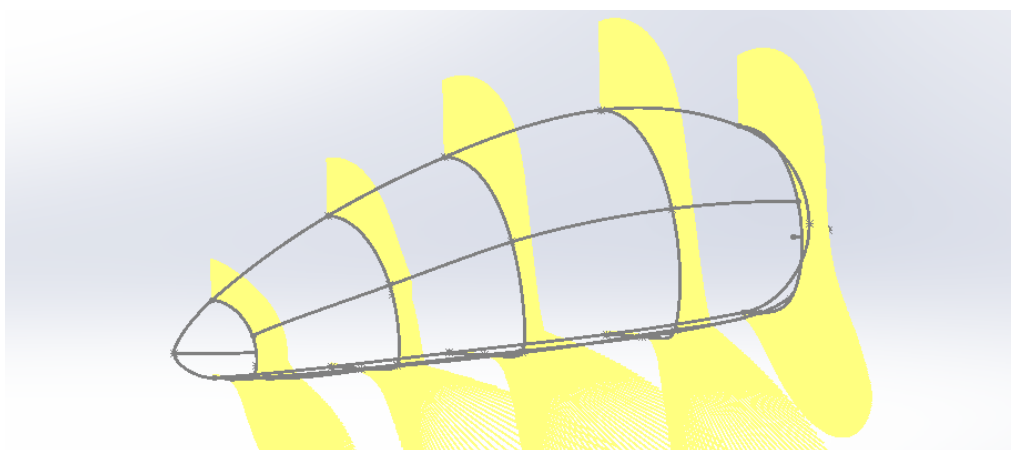
Rám vozidla jsem importoval z Creo Elements .prt souboru do pracovního prostředí SolidWorks 2012 - Vzdělávací edice. Při modelování karoserie jsem vycházel z velikosti rámu a ostatních konstrukčních součástí, které v podobě sestavy vytvořily celkový model vozidla. Do sestavy k rámu vozidla jsem postupně přidal oka pro uložení těhlic, těhlice, řídicí tyč a přední plná kola vozidla o poloměru 270 mm a šířce 30 mm, na zadní kolo byl požadavek, aby mělo kvůli převodovému poměru poloměr 350 mm, šířku jsem zvolil 60 mm. Pneumatiky jsou kvůli zjednodušení modelu bez vzorku dezénu.

Modelování karoserie jsem provedl pro mě nejjednodušším způsobem. V sestavě jsem vytvořil nový díl pod názvem karoserie. Pomocí 2D a 3D skic jsem narýsoval poloviční, základní vzhled karoserie, která je tvořena z příčných a podélných žebér (Obr. 33). Poté jsem uložil soubor samostatně a pracoval s karosérií dle libosti bez sestavy.



Obr. 33 - Ukázka z postupu rýsování příčných a podélných žebér

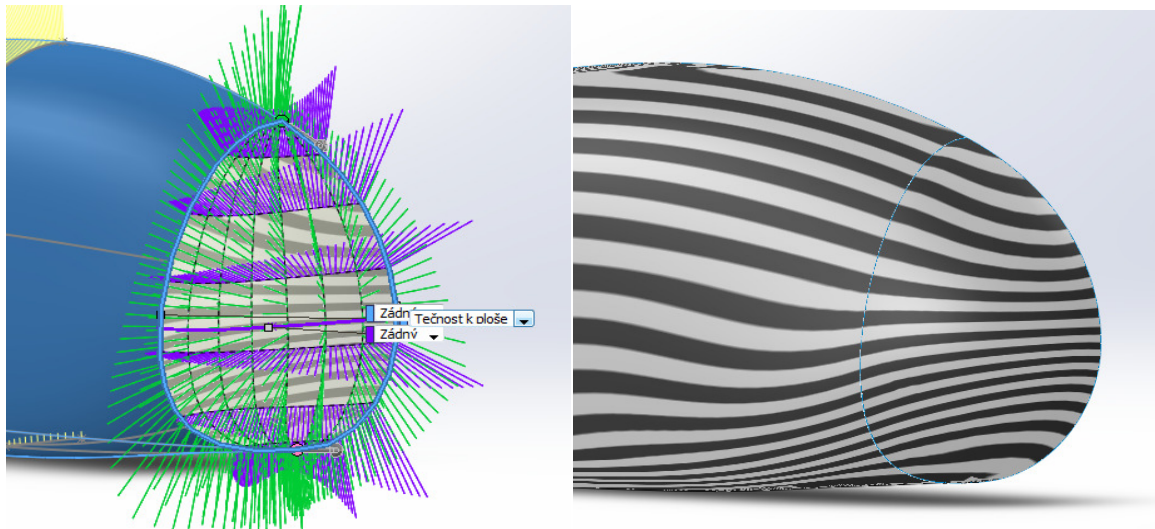
V samostatném souboru jsem ladil skici tečnostmi a jejich kontrolami křivosti (Obr. 34). Cílem bylo vymodelovat pokud možno co nejhladší karoserii, proto byla tato kontrola nezbytností. Dále jsem pomocí skic modeloval skořepinovou plochu karosérie, která je sestavena ze třech povrchů. Prostřední povrch je zhotoven pomocí funkce *Povrch spojený z profilů*, který je umístěn na panelu ploch. Koncové povrchy skořepiny jsem modeloval nástrojem *Hraniční povrch ploch*, který byl vhodný pro hladké spojení s již vytvořeným prostředním dílem (Obr. 35 a). Analýzu hladkého spojení dílů (bez zlomů), jsem provedl pomocí funkce zebřích pruhů (Obr. 35 b). Celkovou skořepinovou součást (Obr. 36) karoserie jsem kontroloval pomocí analýzy křivosti (Obr. 37) a zebřích pruhů.



Obr. 34 - Kontrola křivosti skic

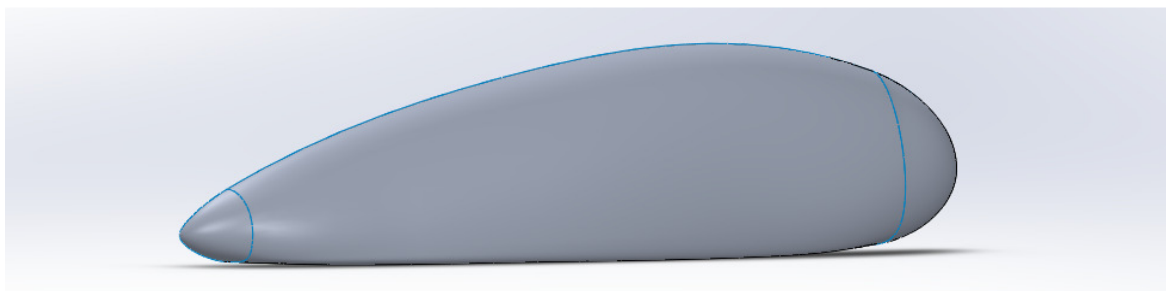
Skořepinu jsem poté uzavřel pomocí *Rovinné záplaty*. Vznikl tedy poloviční díl karoserie, kterému jsem musel kvůli simulacím ve Flow Simulation přidat objem.

Pomocí příkazu *Sloučit povrchy* jsem sloučil jednotlivé skořepiny a přidal jim objem. Vymodelované objemové tělo jsem pak jednoduše přes rovinu zrcadlil. Přidáním vozovky do sestavy byl 3D model hotový pro simulace ve Flow Simulation (*Obr. 38*).

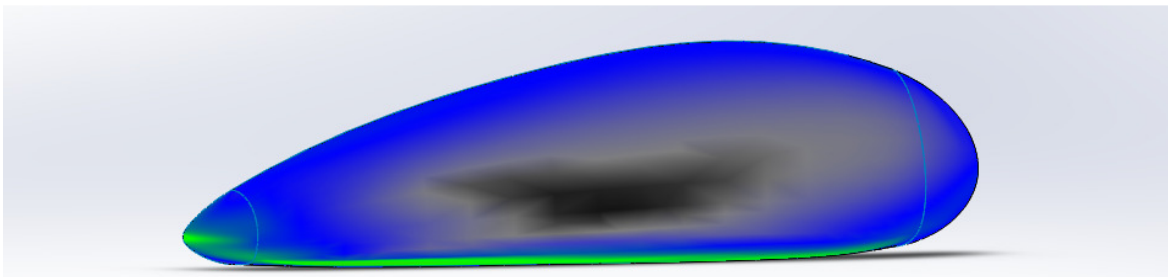


Obr. 35 - a) - Ladění tečností Hraničním povrchem

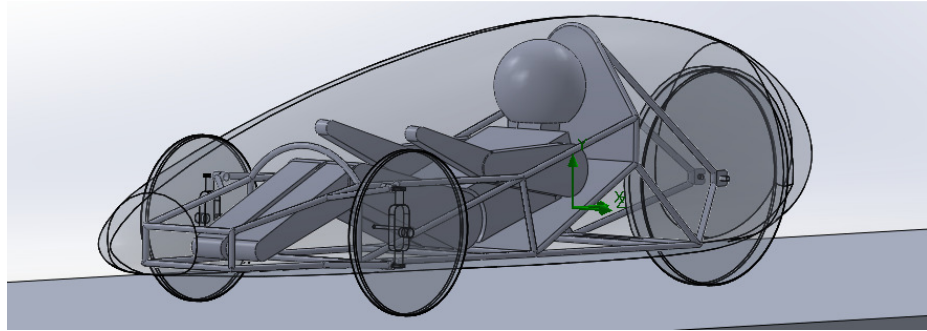
b) - Zebří pruhy



Obr. 36 - Skořepina karoserie



Obr. 37 - Analýza křivosti karoserie



Obr. 38 - Průhledný 3D model vozidla připravený na simulace

6.3 Simulace a analýzy koncepcí vozidla

Simuloval jsem jízdu vozidla rychlostí $v = 10 \text{ m/s}$, která byla doporučena dle ideového návrhu pana Ing. Bačkovského. Po konzultacích s kolegy jsme usoudili, že bude tato rychlost nejvhodnější.

Počáteční podmínky všech simulací byly stejné:

- simulace externího proudění okolo modelu,
- rychlost proudícího vzduchu $v = 10 \text{ m/s}$,
- hustota vzduchu $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$,
- teplota vzduchu $t = 20^\circ\text{C}$,
- úhlová rychlost předních kol $\omega = 37 \text{ rad}^{-1}$,
- úhlová rychlost zadního kola $\omega = 28,6 \text{ rad}^{-1}$,
- pohyb vozovky $v = 10 \text{ m/s}$,
- drsnost sestavy $Ra = 2 \mu\text{m}$,
- drsnost kol $Ra = 50 \mu\text{m}$,
- drsnost vozovky $Ra = 1000 \mu\text{m}$,
- přesnost sítě na stupnici nastavena na 5,
 - minimum gap size $0,01 \text{ m}$,
 - minimum wall thicknees $0,03 \text{ m}$,
- velikost tunelu,
 - podélná osa $X [-6 \text{ m}, 18 \text{ m}]$,
 - výšková osa $Y [2,2 \text{ m}, -0,4 \text{ m}]$,
 - příčná osa $Z [1,1 \text{ m}, -1,1 \text{ m}]$.

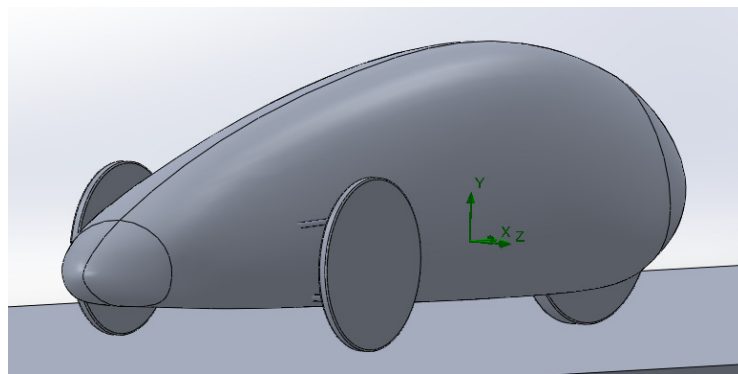
Pro přesnost výpočtu jsem v *Surface Goals* nastavil střední přesnost celkového tlaku a rychlosti v ose x , dále nejpřesnější výpočty aerodynamické síly F_x a vztlakové síly F_y .

Všechny výpočty a analýzy jsem provedl na mém osobním notebooku Asus K73SV, s dvoujádrovým procesorem o rychlosti 2,1GHz a operační paměti 4GB. Čas výpočtu s tímto nastavením počátečních podmínek trval přibližně 75 minut.

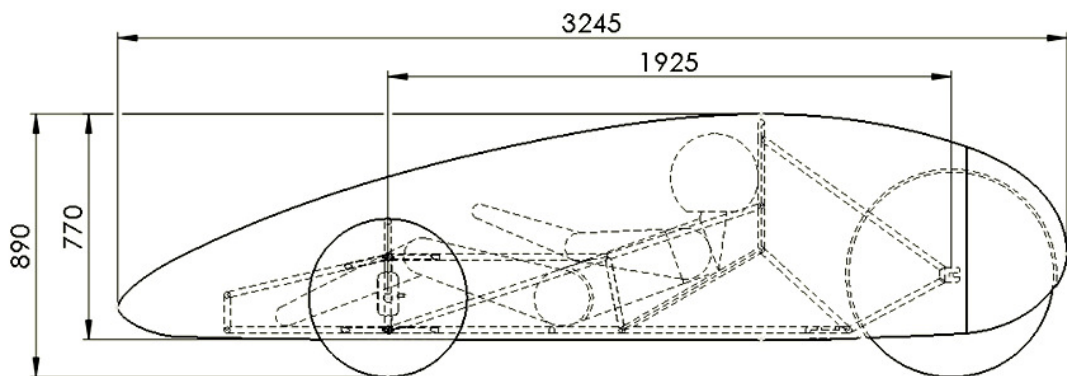
6.3.1 Koncepce vozidla s předními koly umístěnými vně trupu karoserie

6.3.1.1 Model

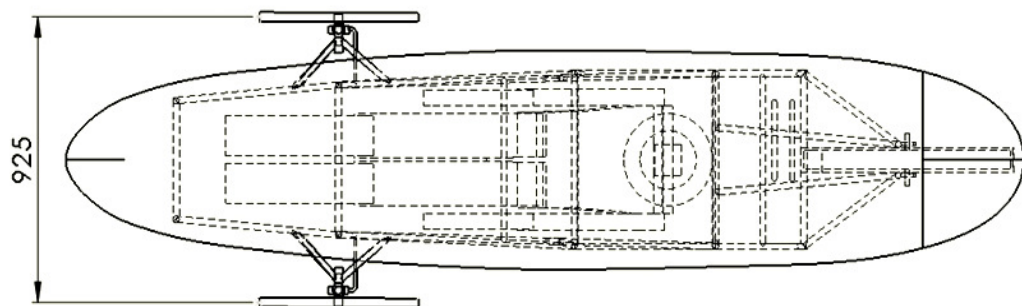
Model karoserie je zobrazen na následujících obrázcích (Obr. 39, 40, 41). Model připravený na simulaci společně se vzduchovým tunelem je zobrazen na obrázku (Obr. 42).



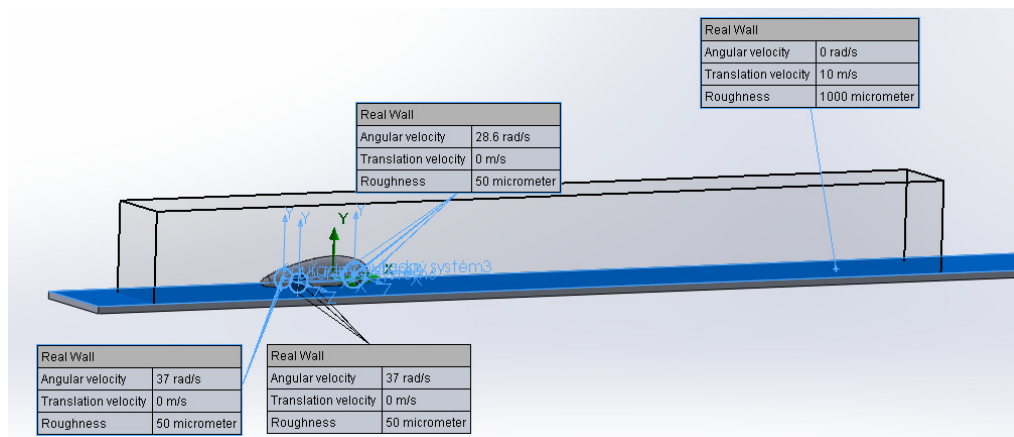
Obr. 39 - Model koncepce s předními koly vně trupu karoserie



Obr. 40 - Rozměry vozidla - Pohled zleva [mm]

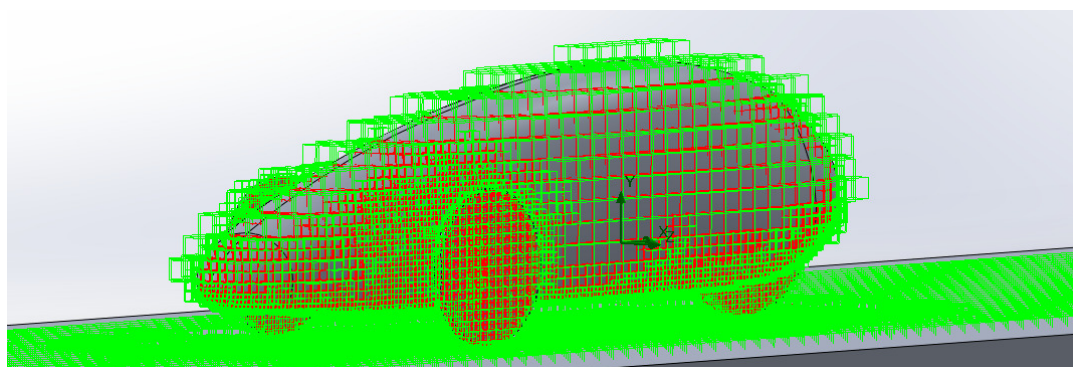


Obr. 41 - Rozměry vozidla - Pohled shora [mm]

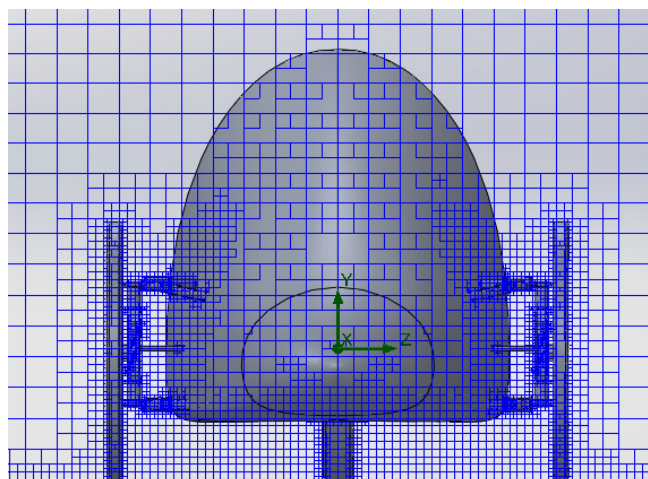


Obr. 42 - Model simulace

Pro názornost uvádím obrázky se vzhledem sítě, kterou je potřeba před spuštěním každé simulace kontrolovat. Na obrázku (Obr. 43) je zobrazena objemová síť modelu. Zeleně jsou zachyceny objemové částečné prvky, červeně prvky tělesa. Na obrázku (Obr. 44) je modře znázorněna objemová prvková síť vzduchu, který proudí v tunelu. Zjemnění sítě je dostatečně určené pomocí počátečních hodnot nastavení sítě tzn. Minimum gap size a Minimum wall thickness.



Obr. 43 - Síť modelu



Obr. 44 - Síť objemových prvků vzduchu v tunelu

6.3.1.2 Analýza modelu

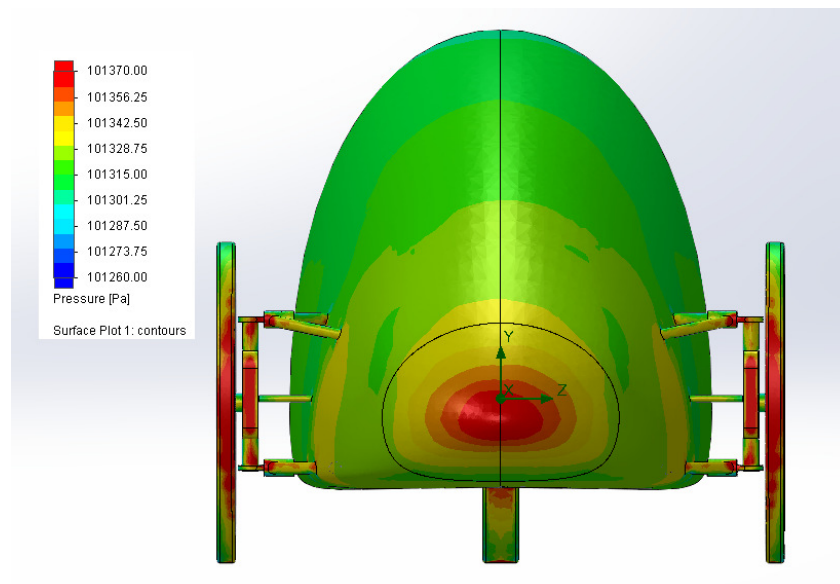
Aerodynamický odpor koncepce vozidla s koly umístěnými vně karoserie program vypočetl na hodnotu $F_x = 6,55 \text{ N}$ (Tab. 2).

Sestava základního modelu s koly vně karoserie

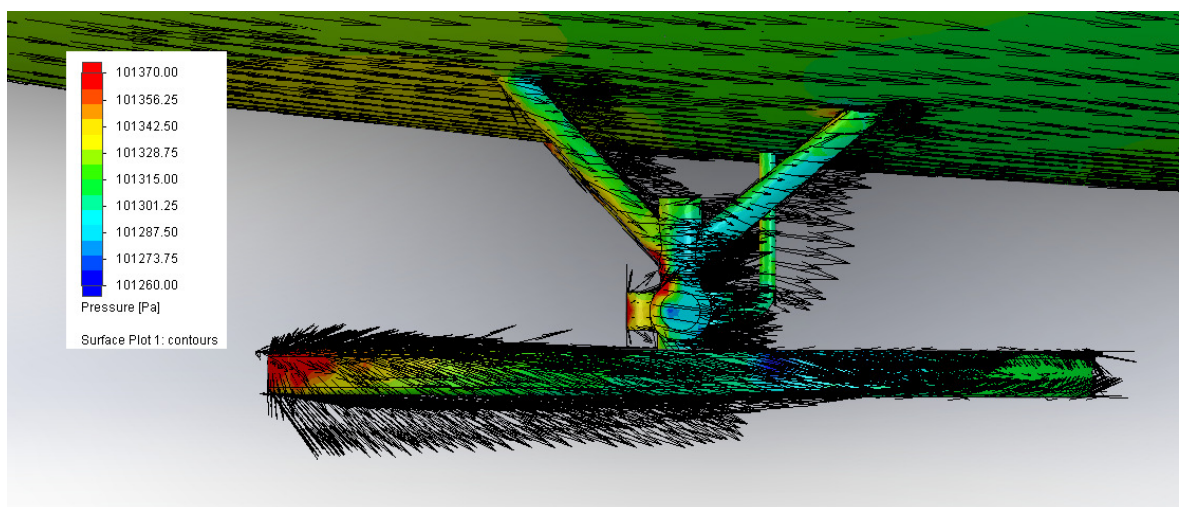
Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Force (X) 1	[N]	6,546776034	6,575237255	6,539921562	6,626268867	100	Yes

Tab. 2 - Tabulka výsledku vypočtené odporové síly v ose x, převedená do MS-Excel

Z obrázku zobrazujícího tlakové rozložení proudícího vzduchu na čelní plochu vozidla (Obr. 45) lze vyčíst, že přední nos vozidla (místo s větším tlakem) dobře rozděljuje proudění okolo karoserie. Dále je zřejmé, že vyšší tlaky působí na přední roviny těhlic a kol. Tyto tlaky způsobují při součtu tlaku aerodynamický odpor.

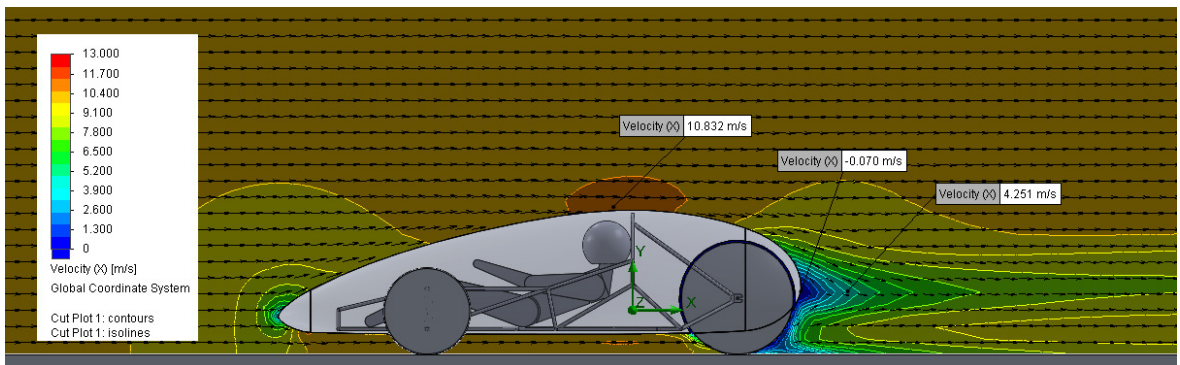


Obr. 45 - Vizualizace rozložení tlaků - Čelní pohled



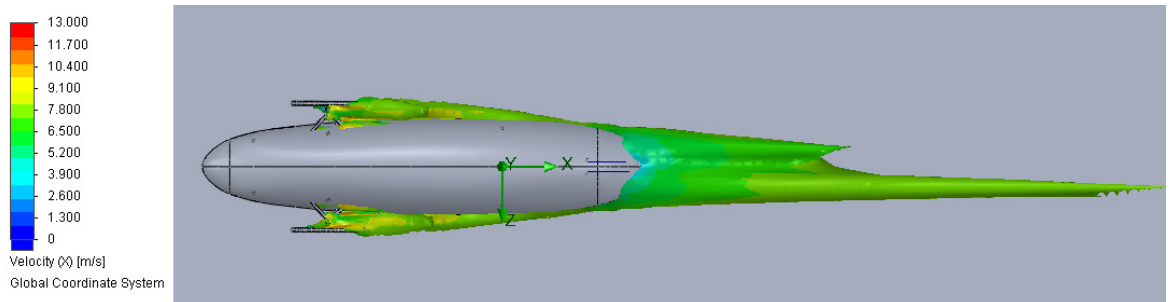
Obr. 46 - Detailní zobrazení tlaků s vektory rychlostí na zavěšení kola

U obrázku (Obr. 47) se zobrazením rychlostí je vidět, jak rychlost vzduchu za automobilem rychle klesá. Je to způsobené především z důvodu strmě ukončené zadní části vozidla, za kterou vznikají turbulence a tzv. úplav. Je nutné si také uvědomit, že při této simulaci, na rozdíl od reálu, proudí vzduch okolo stojícího vozidla. Ideální stav z hlediska odporu vzduchu by tedy byl, kdyby rychlost vzduchu okolo vozidla zůstala na rychlosti volného proudu $v = 10 \text{ m/s}$, poněvadž při snížení rychlosti se ubírá vzduchu kinetická energie, která je předávána na vozidlo. Tento poznatek platí i u intenzitě turbulencí, viz. následující odstavec.

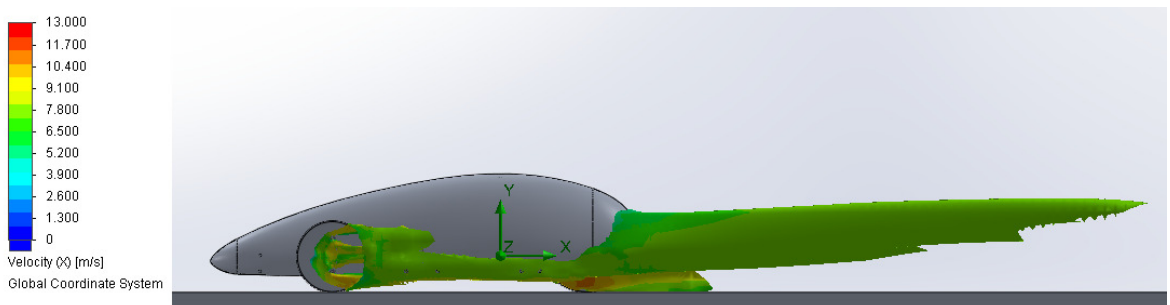


Obr. 47 - Zobrazení rychlosti vozidla na podélné rovině

Na následujících obrázcích je znázorněna 2,5% intenzita turbulencí, která je definována rychlostí vzduchu. Z obrázku (Obr. 48) je vidět, že turbulence mají nízkou rychlost, přibližně $5,5 \text{ m/s}$.

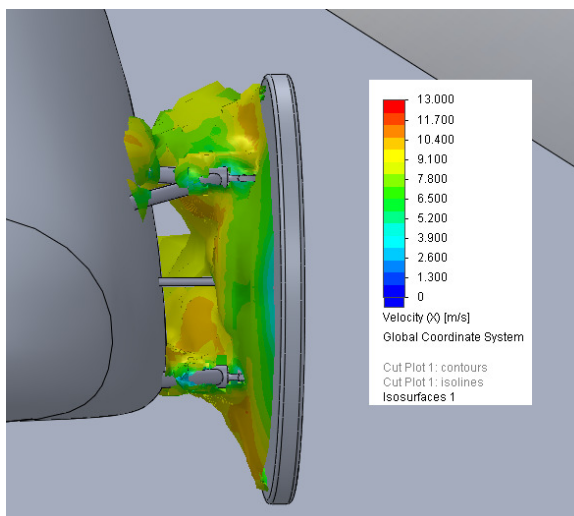


Obr. 48 - Intenzita turbulencí - Pohled shora



Obr. 49 - Intenzita turbulencí - Pohled zleva

Víření v turbulencích ubírá vozidlu energii, vznikají dle obrázku (Obr. 50) ve velké intenzitě v oblasti rotujících kol a u jejich zavěšení.



Obr. 50 - Intenzita turbulencí v oblasti zavěšení kol

6.3.1.3 Výsledné parametry modelu

Celkový aerodynamický odpor	$F_x = 6,55 \text{ N}$
Vztlaková síla	$F_y = 11,42 \text{ N}$
Čelní plocha vozidla	$S_\varepsilon = 0,522 \text{ m}^2$
Součinitel odporu vzduchu	$C_x = 0,209$

6.3.1.4 Závěr

Po analýze výsledků je nutné kvůli vyššímu úbytku rychlosti a turbulencí na zádi vozidla, zúžit a protáhnout zadní část vozidla do takových parametrů, které povolují pravidla závodu. Dále je nutné použít aerodynamické kryty zavěšení a rotujících kol. Zmíněnými návrhy budu tuto koncepci dále vylepšovat.

6.3.2 Ověření zlepšujících aerodynamických prvků

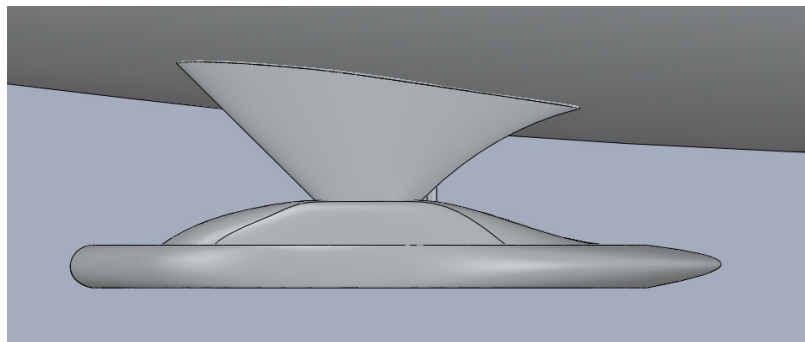
Než začnu popisovat vylepšenou karoserii, musím podotknout, že jsem simuloval jednotlivá vylepšení zvlášť, takže jsem v průběhu modelování aerodynamických doplňků vždy posuzoval, jak daný prvek aerodynamiku ovlivní.

6.3.2.1 Zúžená zád'

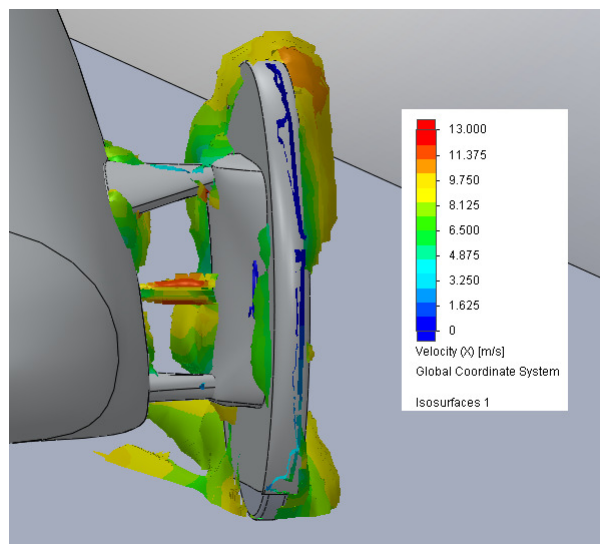
Prvním vylepšením bylo zúžení zádě vozidla. Tato úprava přinesla dle předpokladů dobrý výsledek. Aerodynamický odpor klesl o hodnotu $\Delta F_x = 0,86 \text{ N}$, což je o 13,1%.

6.3.2.2 Aerodynamické kryty předních kol a zavěšení

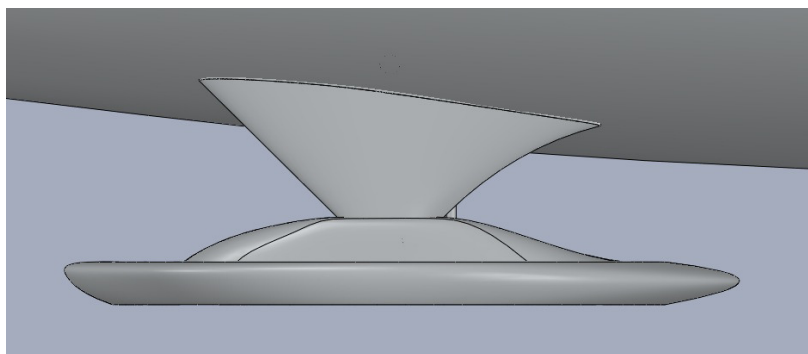
Druhým vylepšením byly přední aerodynamické kryty kol spolu se zakrytovanými rameny zavěšení a aerodynamickými kryty těhlic, pod který by se popřípadě mohl skrýt i mechanismus brzdy. Tyto prvky snížily aerodynamický odpor o hodnotu $\Delta F_x = 1,54 N$. Po analýze intenzity turbulencí těchto doplňků jsem však došel k závěru, že by původní aerodynamický kryt kola (Obr. 51) potřeboval více zkosit, aby proud vzduchu tlačенý od čela vozidla nevytvářel přes hranu krytu nežádoucí turbulence, které se šíří přibližně do poloviny délky vozu (Obr. 52). Na dalších obrázcích je znázorněn vylepšený kryt (Obr. 53, 54), díky kterému se turbulence snížily. Aerodynamické kryty s vylepšeným krytem kola snížily celkový odpor o hodnotu $\Delta F_x = 2,15 N$, což je o 37,8%.



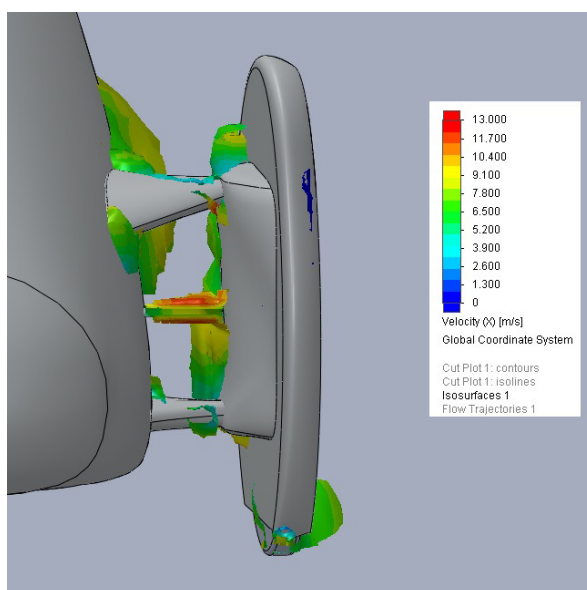
Obr. 51 - Původní aerodynamický kryt kola



Obr. 52 - Zobrazení intenzity turbulencí u původního krytu kola



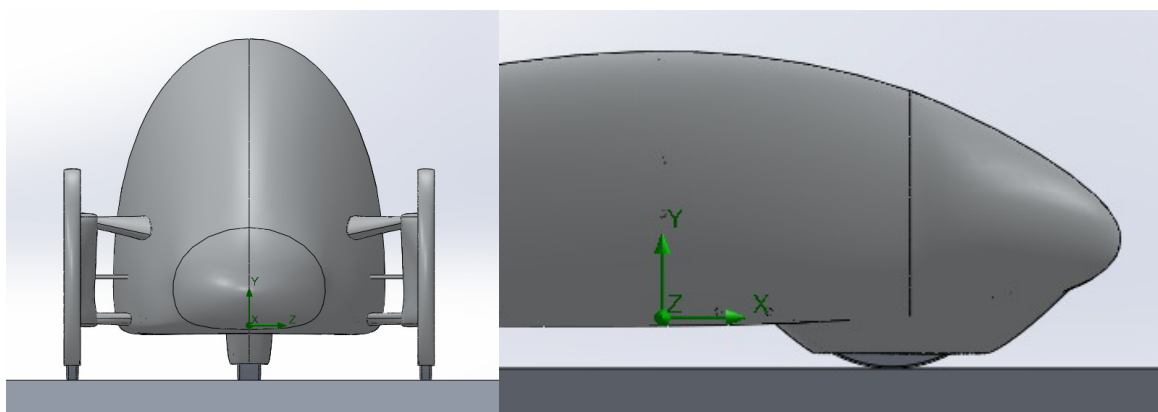
Obr. 53 - Vylepšený aerodynamický kryt kola se zkosenou čelní hranou



Obr. 54 - Zobrazení intenzity turbulencí u vylepšeného krytu kola

6.3.2.3 Kryt zadního kola

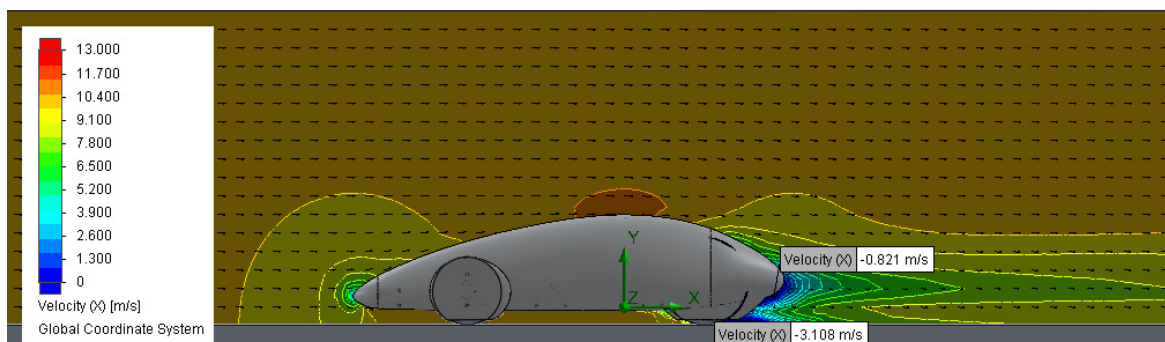
Dalším vylepšením měl být kryt zadního kola. Tento prvek však aerodynamickému odporu nepomohl. Analýzu ze simulací vozidla s prodlouženou zádí a krytem zadního kola, uvedu ve dvou variantách řešení na následujících obrázcích.



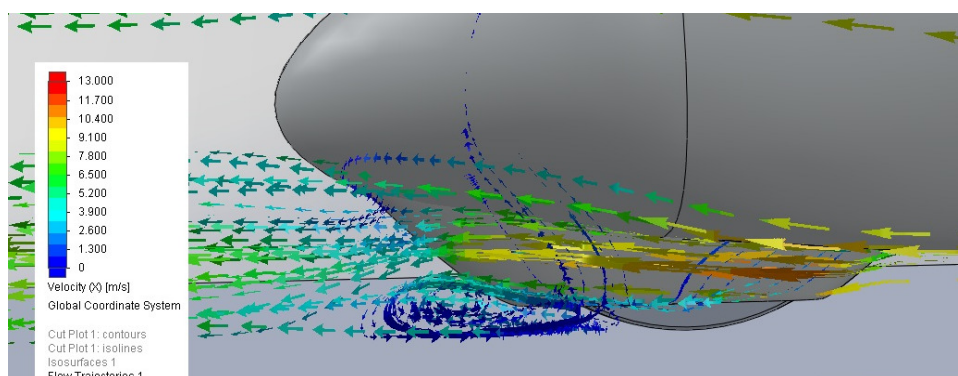
Obr. 55 - a) - Čelní pohled na zadní kryt

b) - Pohled z boku - Varianta č. 1

Aerodynamický odpor s krytem Varianta č. 1 stoupl o hodnotu $\Delta F_x = 0,20 N$. Z výsledku rychlostí (Obr. 56) lze vyčíst, že se v oblasti za vozidlem u krytu zadního kola tvoří velké zpomalení. Ve spodní části krytu má vzduch rychlost okolo $v = -3 m/s$, což je nepřijatelné z důvodu velkého předání kinetické energie. Dále je možné sledovat větší pole pomalejšího vzduchu za vozidlem. Z analýzy proudění (Obr. 57) je zřejmé, že se vzduch odráží, a to od spodní roviny krytu a tvoří tím zpětné proudění a turbulence.

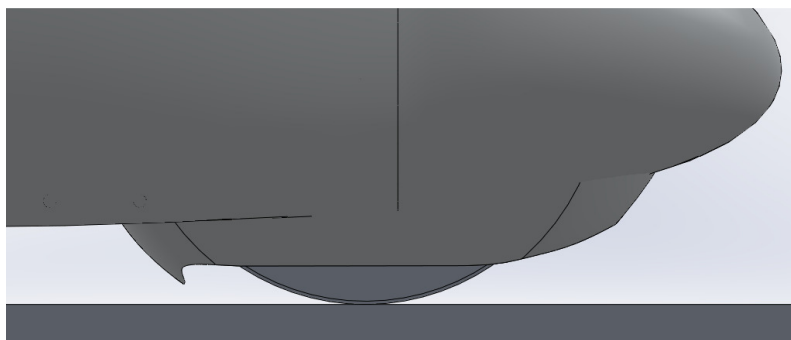


Obr. 56 - Rychlost proudění v podélné rovině vozidla - Varianta č. 1

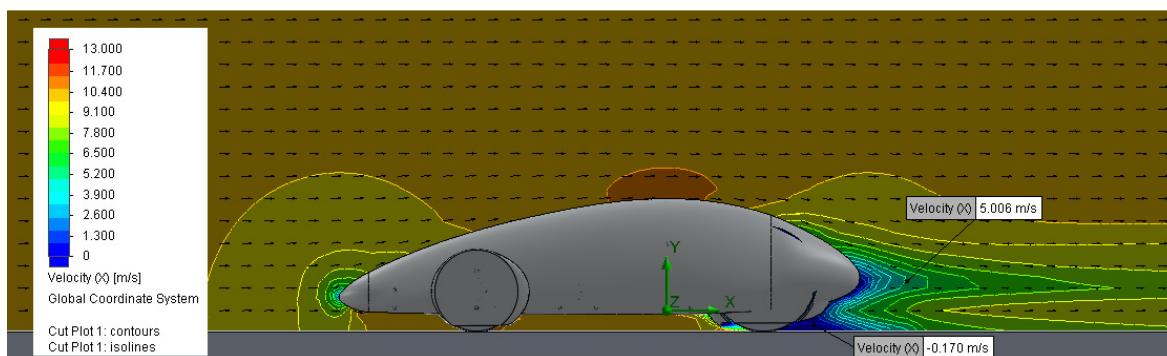


Obr. 57 - Vizualizace proudění u krytu zadního kola - Varianta č. 1

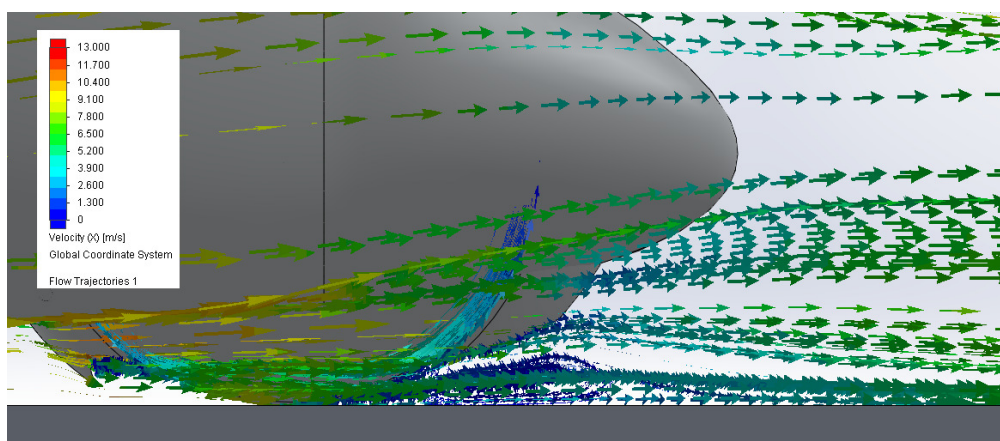
Možností, jak tento problém řešit, bylo zkosit rovinnou plochu krytu, aby mohl vzduch proudit pod vyšším sklonem za záď vozidla (Varianta č. 2) (Obr. 58). Z výsledku rychlostí (Obr. 59) je vidět zlepšení v záporných hodnotách, poněvadž rychlost u krytu varianty č. 2 nedosahuje vyšších záporných hodnot, zde je přibližně $v = -0,2 m/s$. U krytu varianty č. 1 se rychlost pohybuje přibližně okolo $v = -3,1 m/s$. Z výsledků vizualizace proudění plyne (Obr. 60), že se vzduch zvedá rychleji a kopíruje zadní partii krytu kola. Tím více podpoří množství vzduchu za vozidlem, což je z důvodu rozdílů tlaků dobře.



Obr. 58 - Zkosený kryt zadního kola - Varianta č. 2



Obr. 59 - Rychlost proudění v podélné rovině vozidla - Varianta č. 2



Obr. 60 - Vizualizace proudění zkoseného zadního krytu kola - Varianta č. 2

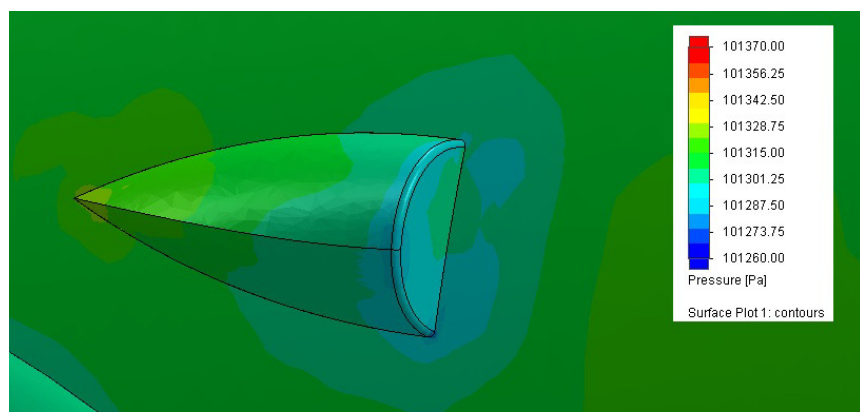
Varianta č. 2 měla lepší výsledky, než výše uvedená varianta č. 1, nicméně celkovému aerodynamickému odporu také nepomohla. Odpor se zvýšil o hodnotu $\Delta F_x = 0,11 N$.

Nutno podotknout, že kryt kola zvýší čelní plochu a to se ve výsledku také projeví. U výsledků se musí brát v potaz, že je simulovaná nízká rychlost a pneumatiky jsou díky zjednodušení modelu bez vzorku.

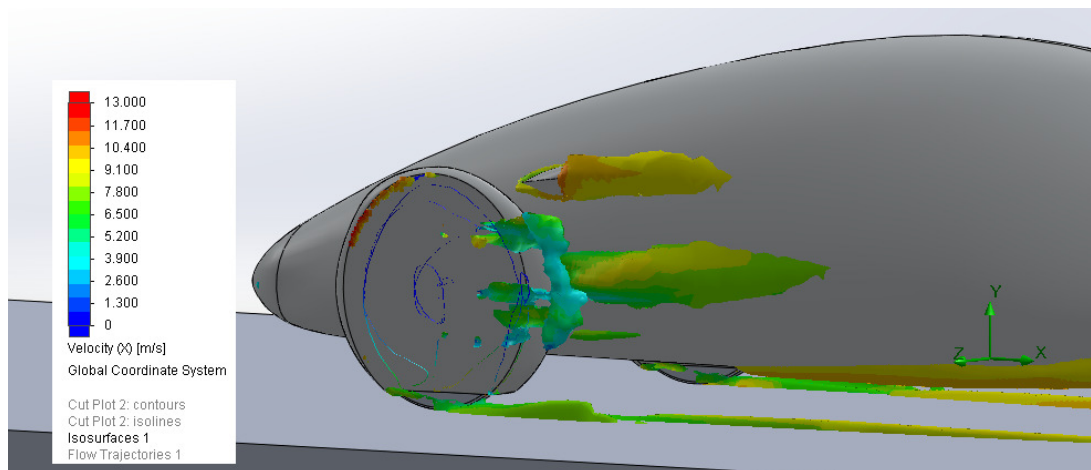
Po zhodnocení dosažených výsledků jsem se rozhodl v rámci nižšího aerodynamického odporu a pracnosti při výrobě zadního krytu kola, upustit od zadního krytu kola v další modelové simulaci.

6.3.2.4 Zpětná zrcátka

Do sestavení celkového vozidla zbývají dle pravidel závodu pouze zpětná zrcátka o minimální velikosti odrazové plochy 25 cm^2 . Na vozidlo jsem namodeloval zpětná zrcátka ve tvaru poloviční kapky, kde je odrazová plocha 27 cm^2 . Výsledky simulací se lišily nejvíce u tlakové a turbulentní analýzy. Z obrázku (Obr. 61) lze vyčíst, že v oblasti odrazové plochy vzniká pole s menším tlakem. Jedná se ale o relativně malou plochu, takže větší aerodynamický odpor nám spíše vytváří turbulence za zrcátkem, která je zobrazena na obrázku (Obr. 62). Aerodynamický odpor se zpětnými zrcátky vzrostl o hodnotu $\Delta F_x = 0,11 \text{ N}$, tedy o 3,1%.



Obr. 61 - Tlaková pole v okolí zpětného zrcátka



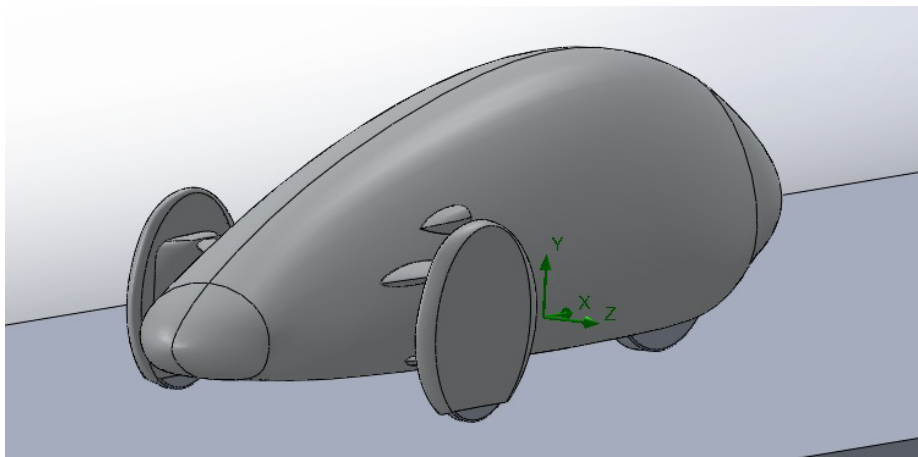
Obr. 62 - Intenzita turbulencí se zpětným zrcátkem

6.3.3 Vylepšený model koncepce se zúženou zádí, s kryty zavěšení a předních kol

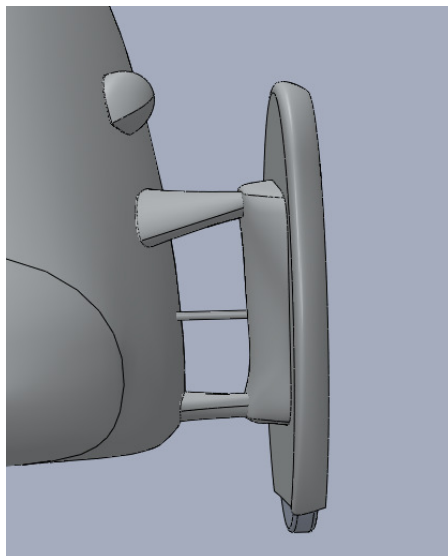
6.3.3.1 Model

Dle návrhů pro vylepšení, které jsem sepsal výše, jsem na vozidlo modeloval aerodynamické prvky (kryty ramen, těhlice a předních kol), pomocí nichž by se měly hodnoty působících tlaků na jejich čelní plochy zmenšit. Zredukovat by se také měly vznikající turbulence u zavěšení kol. Prodlouženou a zúženou zádí karoserie by se měly proudnice vzduchu odtrhávat od povrchu vozidla později, čímž vznikne menší úplav, tím pádem nižší aerodynamický odpor.

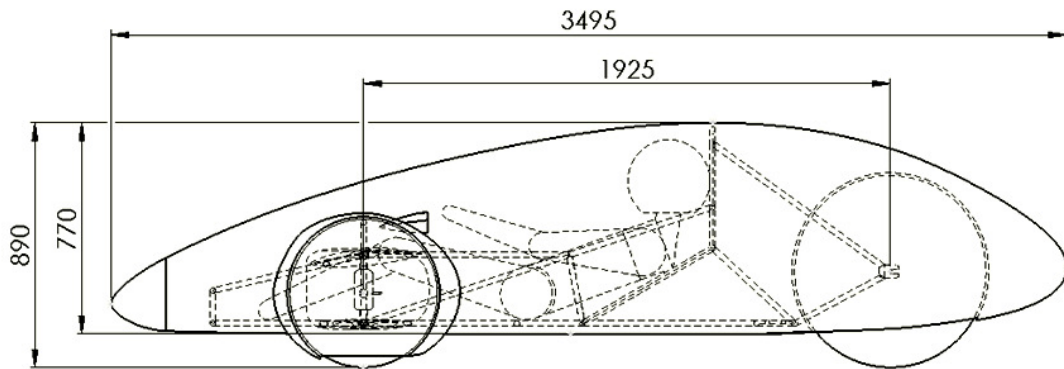
Model vylepšené karoserie je zobrazen na následujících obrázcích (Obr. 53, 63, 64, 65, 66).



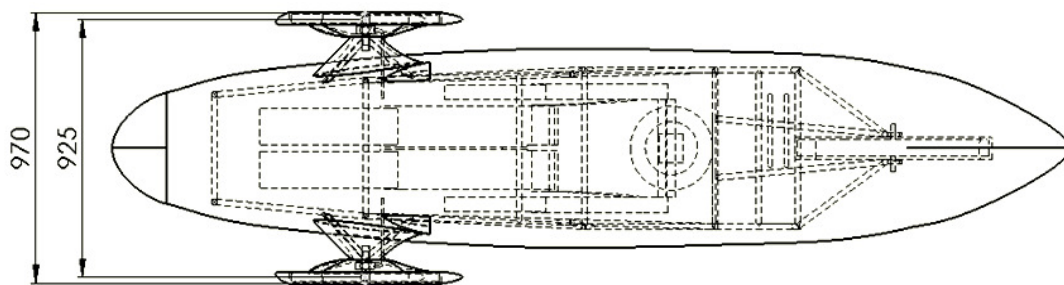
Obr. 63 - Model vozidla se zúženou zádí s kryty předních kol a jejich zavěšení



Obr. 64 - Pohled na kryty ramen, těhlice a předního kola



Obr. 65 - Rozměry vozidla - Pohled zleva [mm]



Obr. 66 - Rozměry vozidla - Pohled shora [mm]

6.3.3.2 Analýza koncepce

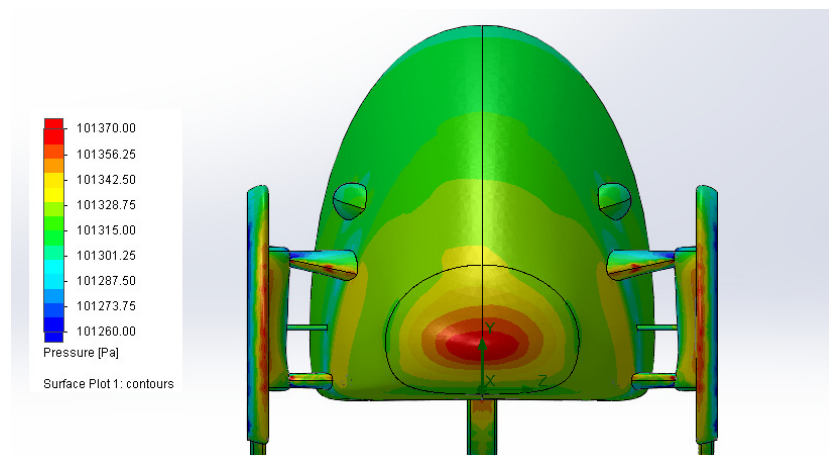
U této koncepce s aerodynamickými doplňky software vypočetl odporovou sílu $F_x = 3,65 \text{ N}$ (Tab. 3)

Sestava koncepce s koly vně karoserie, s kryty zavěšení a kol

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Force (X) 1	[N]	3,648993716	3,654827321	3,63946787	3,673319712	100	Yes

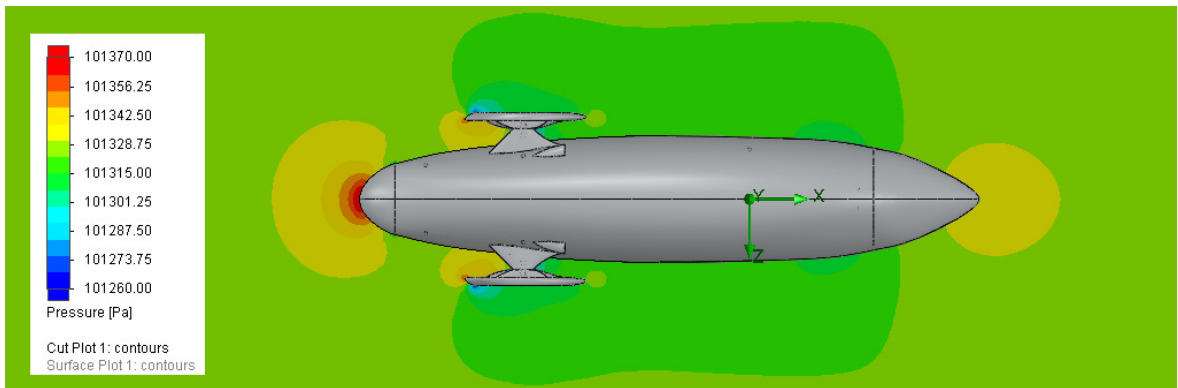
Tab. 3 - Tabulka výsledku vypočtené odporové síly v ose x, převedená do MS-Excel

Z obrázku (Obr. 67) zobrazujícího tlaková pole je zřejmé, jak aerodynamické kryty díky svému zkosenému náběhu zmenšují velikost působení čelních tlaků na vozidlo.

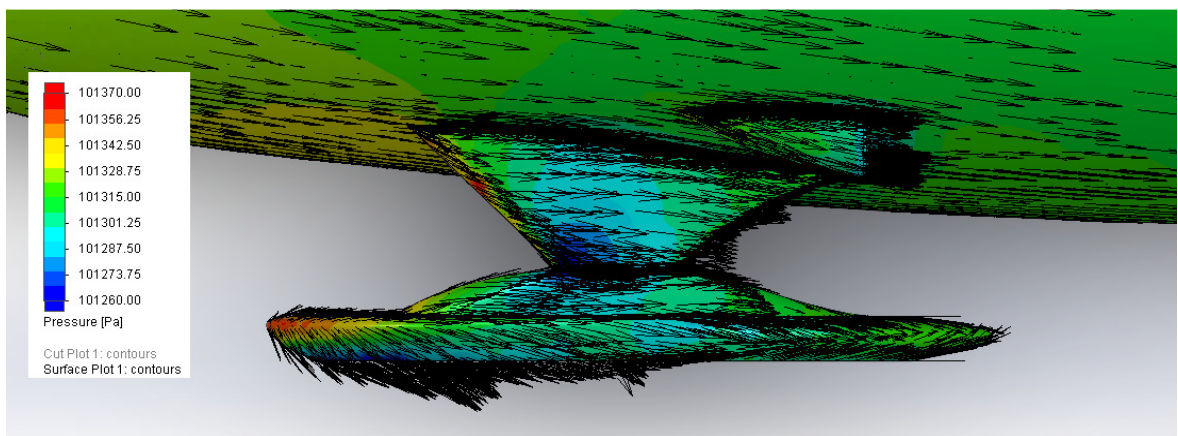


Obr. 67 - Tlaková pole - Čelní pohled

Z následujícího obrázku (*Obr. 68*), který zobrazuje tlaková pole ve vodorovné rovině v úrovni předního nosu karoserie je zřejmé, že v prostoru mezi koly a karoserií vzniká zúžený prostor, kterým se při proudění dostává vzduch do většího tlaku. Tím přenáší síly v podobě aerodynamického odporu na vozidlo. V oblasti předního nosu a zadní části vozidla jsou tlaková pole předvídatelná.



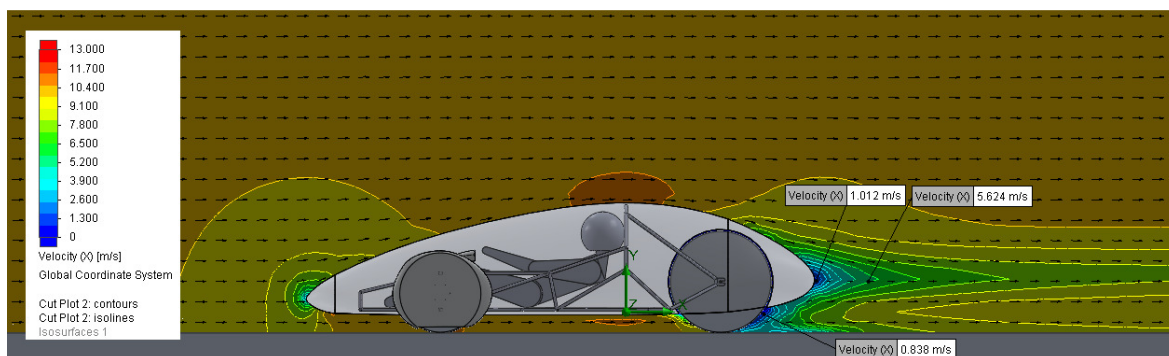
Obr. 68 - Tlaková pole ve vodorovné rovině v úrovni předního nosu - Pohled shora



Obr. 69 - Detail tlaků s vektory rychlostí zakrytovaného zavěšení kola

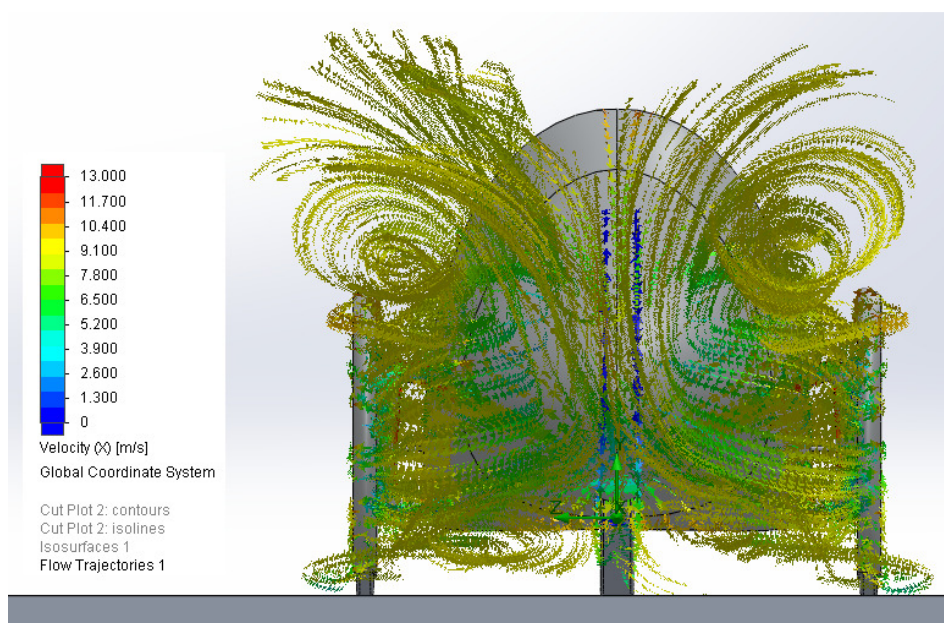
Z obrázku (*Obr. 69*) jde vidět, že ve srovnání s předchozím (nezakrytovaným) zavěšením (*Obr. 46*) jsou vektory směrově ucelenější, což je způsobeno pozvolnými náběhy předních ploch. To, že proudění není rozptýleno do různých směrů, pomáhá velkou měrou ke zmenšení turbulencí.

Ze zobrazeného výsledku průběhu rychlostí na podélné rovině vyplývá (*Obr. 70*), že takto řešená koncepce umožňuje vzduchu kvalitněji obtékat zád' karoserie. Rychlost vzduchu se nepřibližuje hodnotám okolo nulové rychlosti, či rychlosti záporné, jak bylo možné vidět u předchozích případů.

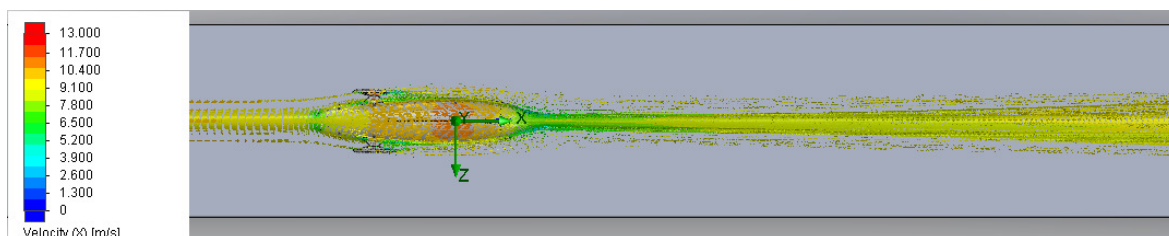


Obr. 70 - Rychlost proudění v podélné rovině vozidla

Výsledky z vizualizace proudění jsou na následujících obrázcích. Na (Obr. 71) můžeme vidět turbulentní proudění vzduchu za vozidlem, které vzniká již v oblasti předních kol a jejich zavěšení. Velké víření proudění je však zobrazené na obrázku 2D v celé délce tunelu, takže může být pro někoho matoucí. Vodítkem může být ukončení proudnic, které končí v tunelu přibližně 17 metrů za vozidlem.



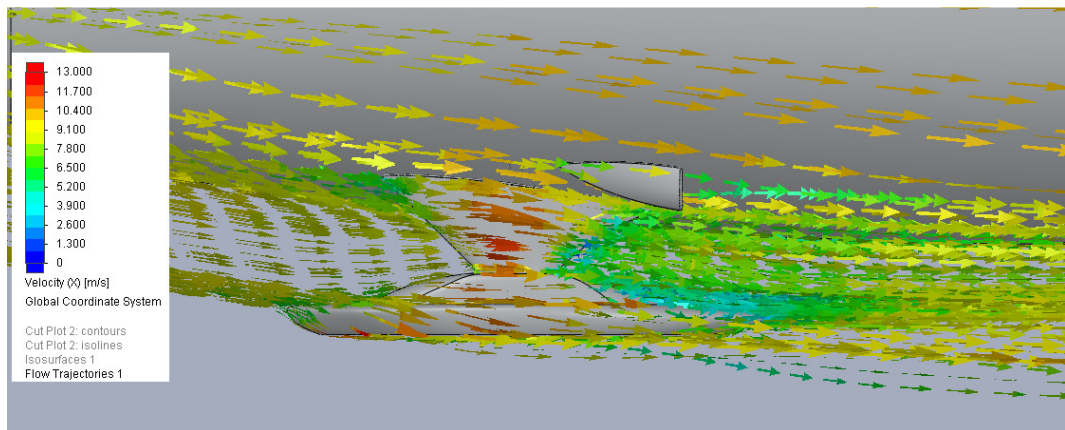
Obr. 71 - Proudění vzduchu za vozidlem



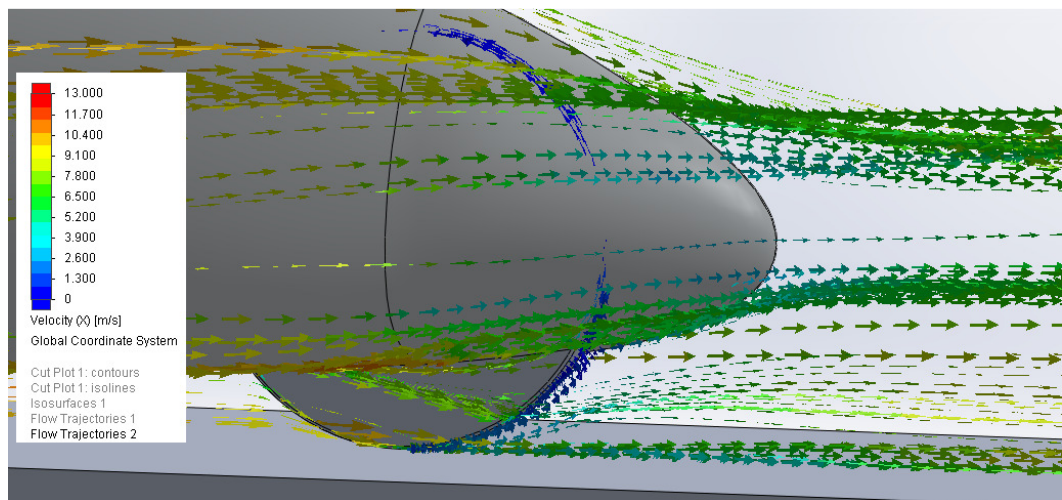
Obr. 72 - Vizualizace proudění - Pohled shora

Na (Obr. 72) je pohled shora na proudění okolo celého vozidla. Z obrázku je možné říci, že se proudnice za vozidlem uzavírají do jednoho většího proudu.

Na (Obr. 73) je detail proudění okolo závěšení předního kola. Zde je viditelný problém, který jsem popisoval výše u tlakových polí (Obr. 68). Jedná se o zúžený prostor mezi kolem a karoserií. Zde se proud vzduchu zpomaluje přibližně z $v = 9,5 \text{ m/s}$ na $v = 6,5 \text{ m/s}$. Na (Obr. 74) je zachyceno proudění okolo zadního kola. Zde je potvrzené, že proudění s absencí zadního krytu kola je při této rychlosti výhodnější, je to dáno jeho kvalitnějším obtékáním a vracením se proudnic do hlavního proudu.

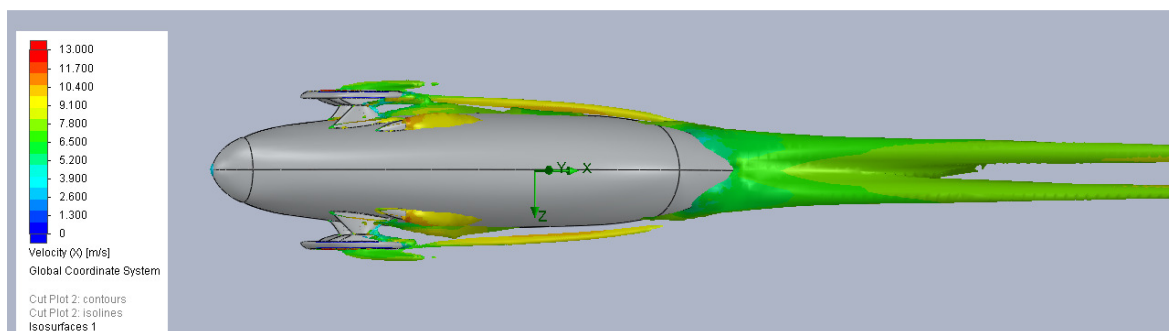


Obr. 73 - Detail proudění okolo předního závěšení kola

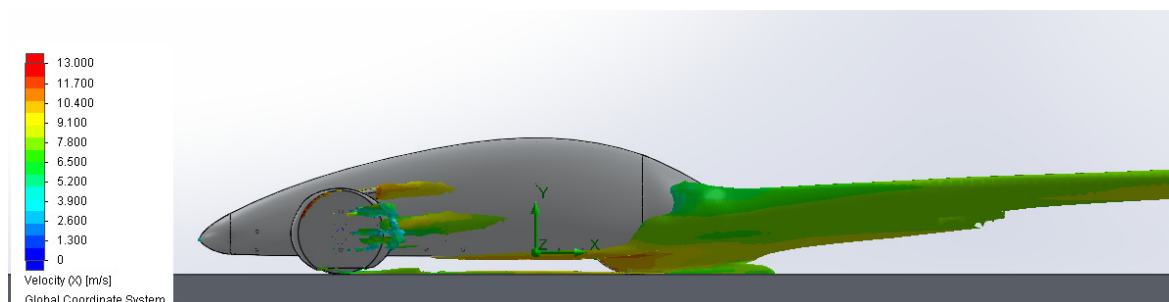


Obr. 74 - Proudění v oblasti zadního kola

V dalším kroku je třeba se podívat detailněji na intenzitu turbulencí zobrazenou na následujících obrázcích. Na (Obr. 75) je pohled shora na 2,5% intenzitu turbulencí, z něhož plyne, že turbulence za vozidlem s nízkou rychlostí končí dříve, než tomu bylo u předchozího modelu na obrázku (Obr. 48). U pohledu zleva (Obr. 76) je vidět oproti předchozímu modelu (Obr. 49) úbytek turbulencí, které způsobovaly nezakrytované komponenty, jako těhlice, ramena závěšení a rotující kolo. Detail zobrazené intenzity turbulencí u krytu předního kola je na obrázku (Obr. 54).



Obr. 75 - Intenzita turbulencí - Pohled shora



Obr. 76 - Intenzita turbulencí - Pohled zleva

6.3.3.3 Výsledné parametry koncepce

Celkový aerodynamický odpor	$F_x = 3,65 \text{ N}$
Vztlaková síla	$F_y = 9,60 \text{ N}$
Čelní plocha vozidla	$S_{\epsilon} = 0,546 \text{ m}^2$
Součinitel odporu vzduchu	$C_x = 0,111$

6.3.3.4 Závěr koncepce

Z uvedených výsledků vyplývá, že tato koncepce už mnoho prostoru k velkému vylepšení nenabízí. Největšími problémy jsou již popsané zúžené prostory mezi předními koly a karoserií, které by se vzhledem k rozšiřujícímu rámu složitě řešily. Dále přední kola vytvářející při jízdě víření vzduchu.

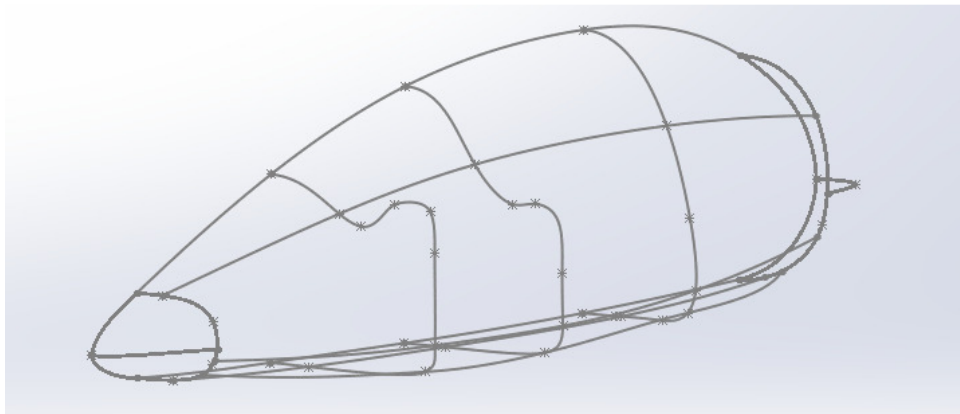
Jako dodatek k výsledkům musím podotknout, že jde o výsledky simulací, bez uvažovaného přívodu sání a chlazení k motoru a odvodu vzduchu a výfukových spalin od motoru. Tyto konstrukční prvky jistě ovlivní celkový aerodynamický odpor vozidla.

Pokud by šlo o odsávání vzduchu, sání bych doporučil řešit vhodně tvarovanými sacími otvory umístěnými u zadě vozidla, kde začínají turbulence, aby velkou měrou nenarušily proudění podél vozidla. Nebo náporovým sáním pod vozidlem, před zadním kolem v podobě náběhového trychtýře.

6.3.4 Koncepce vozidla s předními koly umístěnými uvnitř karoserie

6.3.4.1 Modelování koncepce

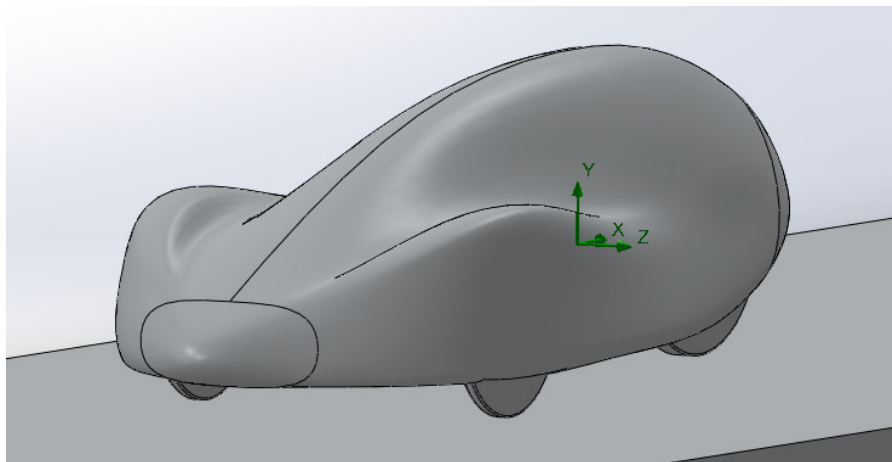
Při rýsování této koncepce vozidla jsem postupoval stejným způsobem, jako již u popsanych karoserií. Tento způsob je popsán výše, (*stat'* 6.2.2). Rozdíl byl pouze v přední části karoserie, která musela být pomocí příčných žebér dostatečně rozšířena (*Obr.* 77), aby zakryla přední kola a umožnila jim dostatek prostoru pro jejich natočení do rejdu při zatáčení vozidla. Šířka podběhu umožňuje kola natočit do úhlu 12° . Dle pravidel závodu tak splňuje minimální poloměr zatáčení.



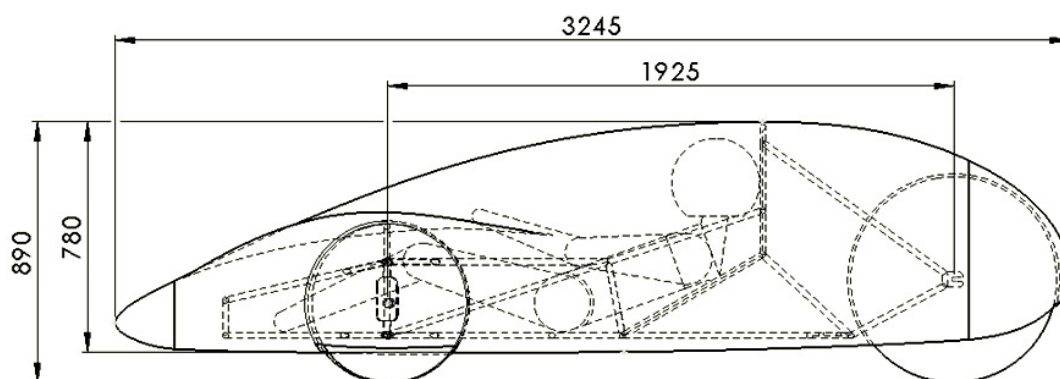
Obr. 77 - Síť žebér modelu celistvé karoserie

6.3.4.2 Model

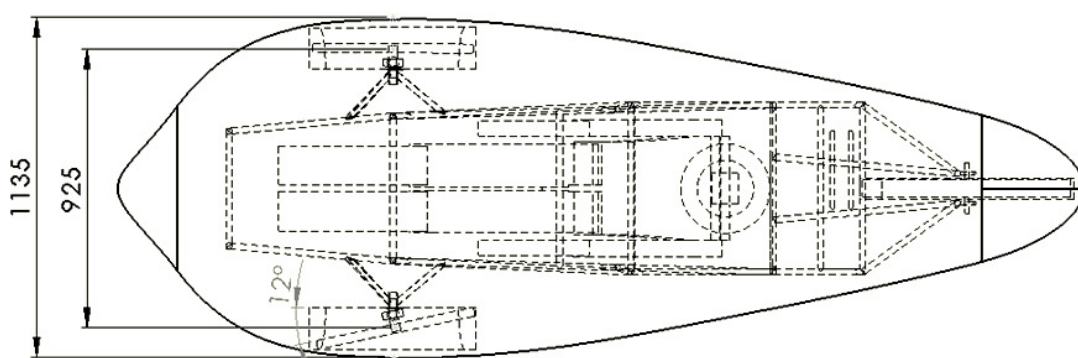
Na obrázcích (*Obr.* 78, 79, 80) je zobrazen model koncepce vozidla. Toto řešení poskytuje předním kolům a jejich zavěšení celistvé krytování.



Obr. 78 - Model vozidla s koly uloženými uvnitř karoserie



Obr. 79 - Rozměry vozidla - Pohled zleva [mm]



Obr. 80 - Rozměry vozidla - Pohled shora [mm]

6.3.4.3 Analýza modelu

U této celistvé koncepce program vypočetl aerodynamický odpor o hodnotě $F_x = 3,45 \text{ N}$ (Tab. 4).

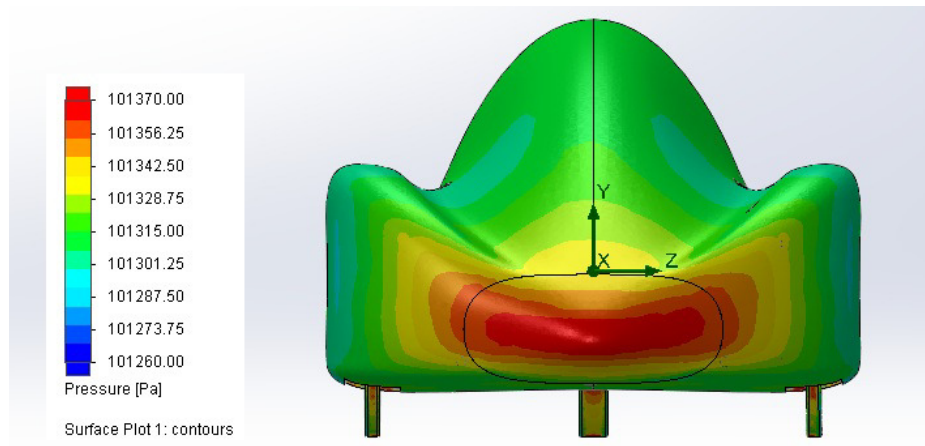
Sestava celozakrytované celistvé koncepce

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Force (X) 1	[N]	3,444518455	3,446125897	3,419418869	3,466515175	100	Yes

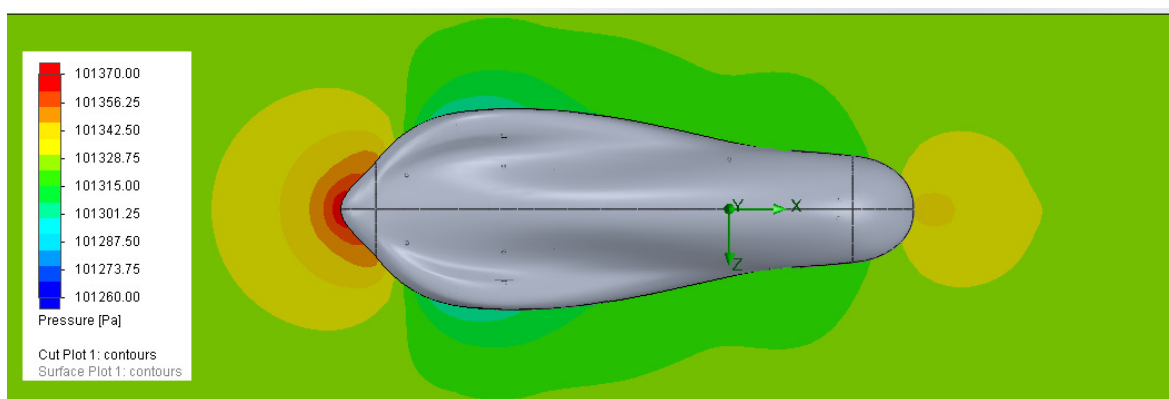
Tab. 4 - Tabulka výsledku vypočtené odporové síly v ose x, převedená do MS-Excel

Z obrázků, které prezentují výsledky tlakových polí je vidět, že rychle se rozšiřující předek karoserie má jedno velké pole s vyšším tlakem (Obr. 81). Na obrázku (Obr. 82) je znázorněna vizualizace tlakových polí na vodorovné rovině v úrovni předního nosu. Z vizualizace je zřejmé, že tlaky nepůsobí jako u předchozí koncepce v oblastech, které byly tvořeny uzavírajícími se prostory mezi koly a karoserií.

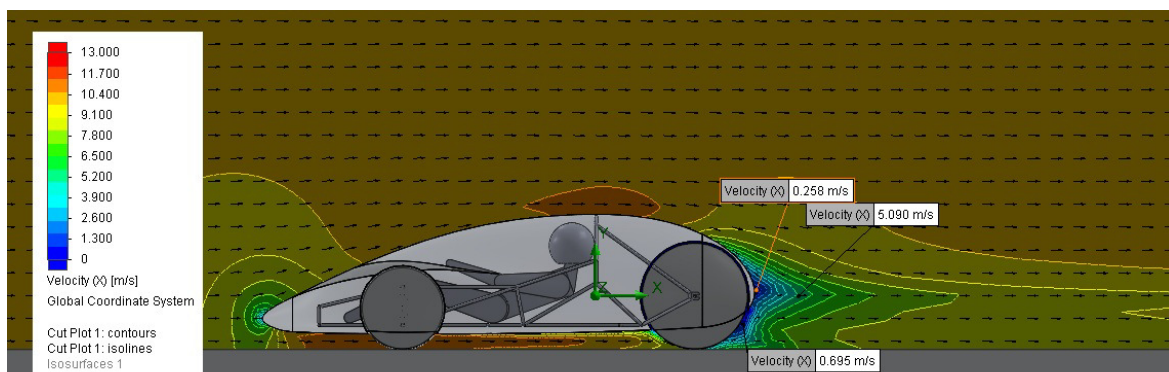
Z výsledku rychlostí (Obr. 83) je vidět, že je opět třeba zúžit a protáhnout zadní část karoserie, aby proudící vzduch opouštěl karoserii s vyšší rychlostí a nepředával tak modelu vyšší kinetickou energii.



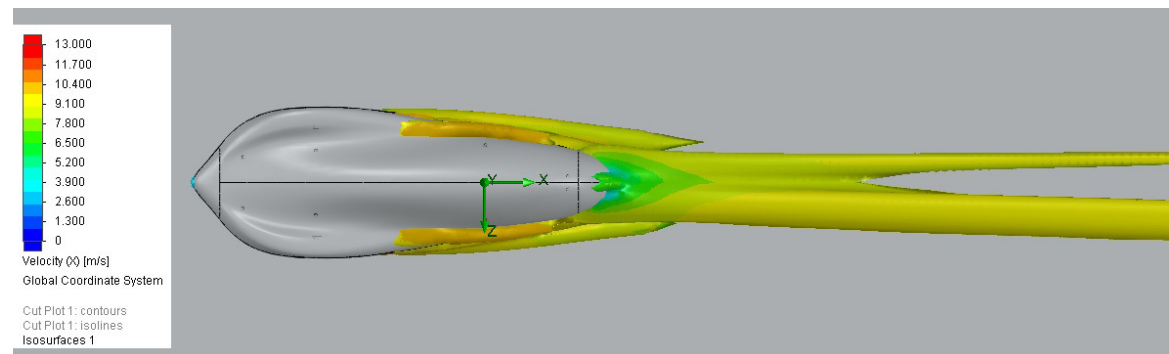
Obr. 81 - Tlakové pole - Čelní pohled



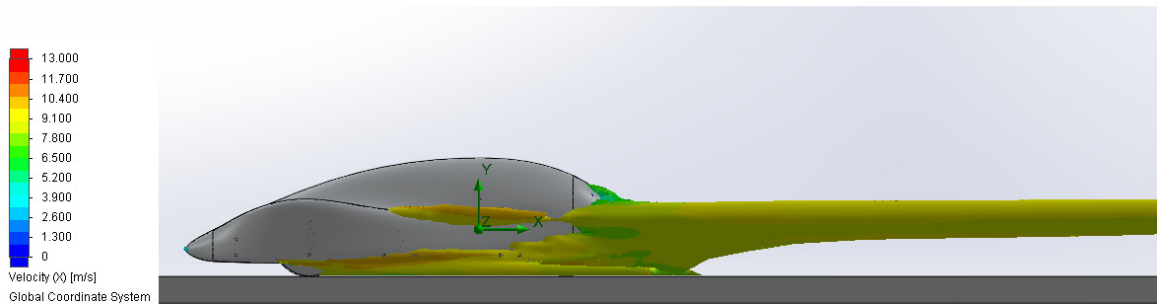
Obr. 82 - Vizualizace tlakových polí na vodorovné rovině v úrovni předního nosu



Obr. 83 - Rychlost proudění v podélné rovině vozidla



Obr. 84 - Intenzita turbulenci 2,5% - Pohled shora



Obr. 85 - Intenzita turbulencí 2,5% - Pohled zleva

6.3.4.4 Výsledné parametry modelu

Celkový aerodynamický odpor	$F_x = 3,45 \text{ N}$
vztlaková síla	$F_y = 12,55 \text{ N}$
čelní plocha vozidla	$S_{\varepsilon} = 0,672 \text{ m}^2$
součinitel odporu vzduchu	$C_x = 0,086$

6.3.4.5 Závěr

Po analýze je vidět, že velkou výhodou této koncepce je její celistvost, díky které vzduch obtéká karoserií s menším odporem vzduchu. Kvůli vyššímu poklesu rychlosti a vyšším turbulencím za vozidlem jako úpravu navrhuji zúžit a protáhnout zadní část vozidla do mezí, které povolují pravidla závodu. Dále je potřeba instalovat kryty kol. Z výsledků předchozí koncepce však není jasné, zda přidáním krytů kol povede k lepším hodnotám aerodynamického odporu.

6.3.5 Ověření zlepšujících aerodynamických prvků

6.3.5.1 Zúžená a prodloužená zád'

U tohoto vylepšení jsem modeloval zúžení a prodloužení zádě vozidla na hranici možností po stránkách předpisových i konstrukčních. Aerodynamický odpor klesl o hodnotu $\Delta F_x = 0,83 \text{ N}$, což je o 24,1%.

6.3.5.2 Přední kryty kol

Problém předních krytů kol u této koncepce pramení z nutnosti natáčení kol do rejdu. Proto je třeba modelovat přední kryty dostatečně široké. Kryty tedy zabírají čelní plochu, na kterou působí tlak proudícího vzduchu, což způsobuje aerodynamický odpor. Nicméně, přední kryty kol pomáhají plynulejšímu obtékání vzduchu bez větších turbulencí.

Po mnoha ladění tento aerodynamický prvek snížil odpor vzduchu o hodnotu $\Delta F_x = 0,12 N$ to je o 4,6%.

6.3.5.3 Kryt zadního kola

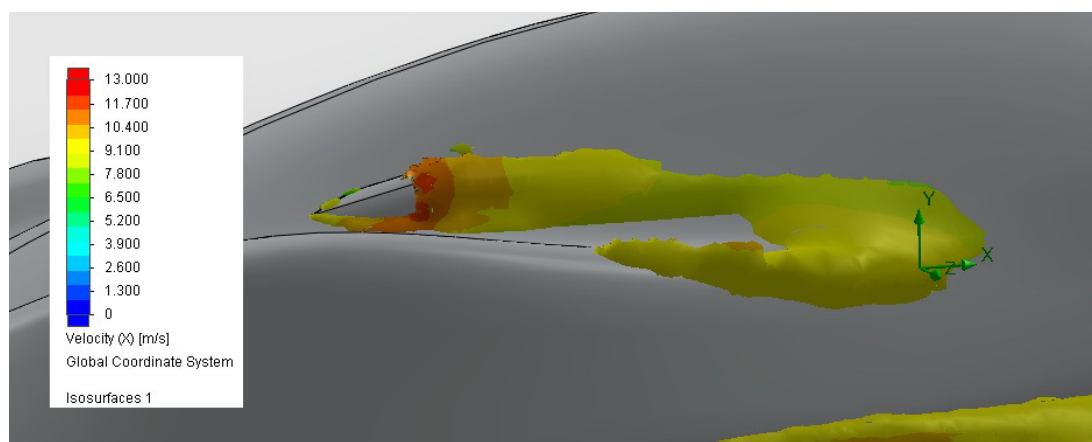
U této koncepce je použití tohoto prvku podobné, jako u koncepce s předními koly uloženými vně karoserie. Model se zadním krytem měl velmi podobný odpor vzduchu, jako model bez zadního krytu. U této koncepce jsem tedy dále neuvažoval s touto úpravou. Znovu však musím podotknout, že kola jsou simulována bez vzorku a při relativně malé rychlosti.

6.3.5.4 Zpětná zrcátka

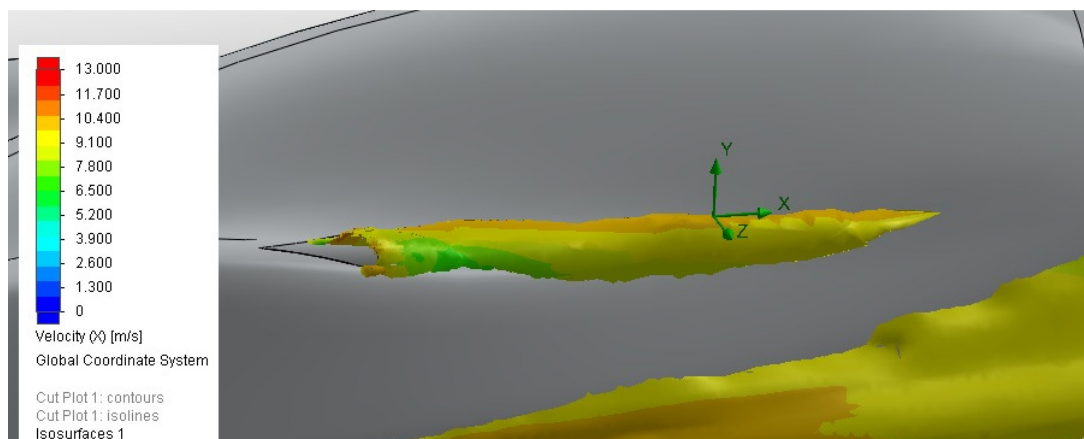
U této celistvé koncepce je možné řešit umístění zrcátek dvěma způsoby. Varianta č. 1 je, že zrcátka jsou umístěná v oblasti mezi kokpitem a blatníkem. Výsledek simulace v podobě intenzity turbulencí je na obrázku (Obr. 86). Zde je vidět, jak se za obtékaným zrcátkem tvoří turbulence. Odpor vzduchu se zrcátka (Varianta č. 1) stoupl o hodnotu $\Delta F_x = 0,34 N$.

Pro variantu č. 2 se nabízí řešení, že zrcátko bude umístěné za blatníkem, který by mu poskytl tzv. mírné závětrí (Obr. 87). Turbulence za zrcátkem bude vznikat v oblasti za horizontem blatníku, kde se turbulence tvoří i bez zrcátka. Odpor vzduchu s umístěnými zpětnými zrcátky za blatníkem stoupl o hodnotu $\Delta F_x = 0,23 N$ což je o 9,2%.

Po zhodnocení těchto dvou variant jsem přistoupil k závěru, že pro koncepci s předními koly uloženými uvnitř karosérie by bylo vhodné použít variantu č. 2. Zpětná zrcátka svou velikostí odrazové plochy splňují pravidla závodu.



Obr. 86 - Intenzita turbulencí - Umístění zpětného zrcátka - Varianta č. 1

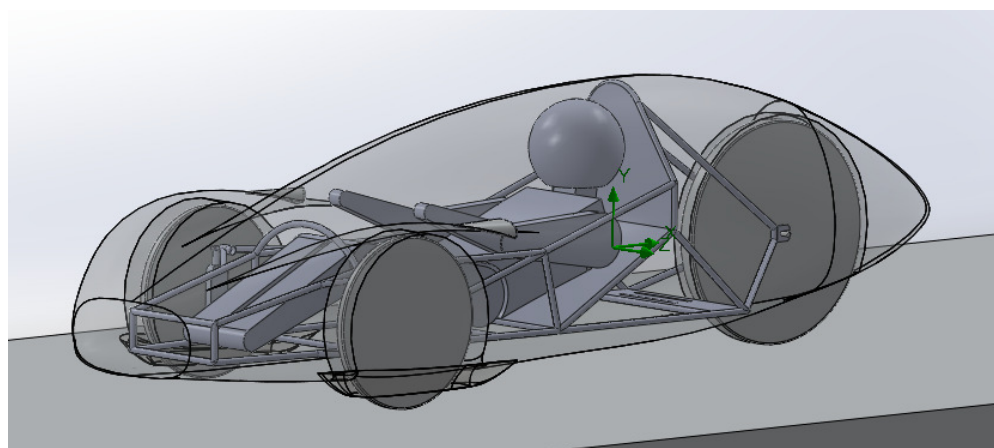


Obr. 87 - Intenzita turbulencí - Umístění zpětného zrcátka - Varianta č. 2

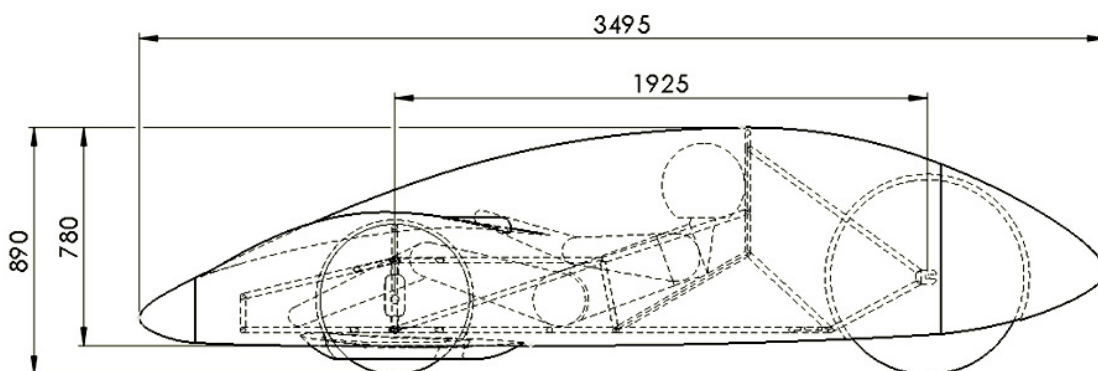
6.3.6 Vylepšený model koncepce s koly uloženými uvnitř karoserie

6.3.6.1 Model

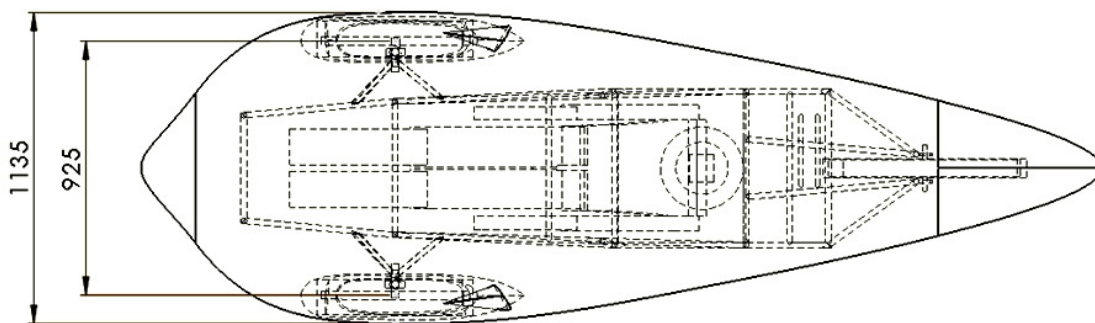
Vylepšený model koncepce s předními koly uloženými uvnitř karoserie, s předními kryty kol a se zpětnými zrcátky, je zobrazen na následujících obrázcích.



Obr. 88 - Průhledný model vylepšené koncepce



Obr. 89 - Rozměry vozidla - Pohled zleva [mm]



Obr. 90 - Rozměry vozidla - Pohled shora [mm]

6.3.6.2 Analýza koncepce

Ze simulace software vypočetl aerodynamický odpor o hodnotě $F_x = 2,72 \text{ N}$ (Tab. 5).

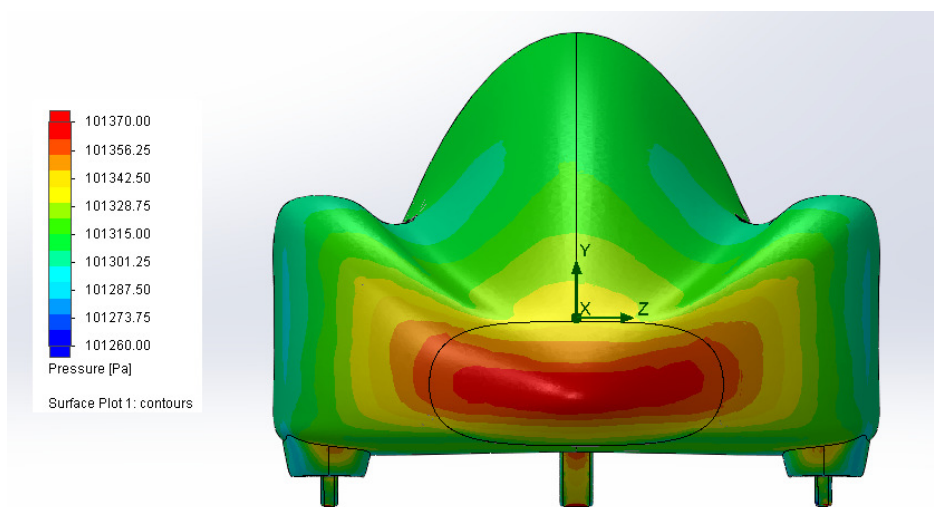
Sestava upravené celistvé karoserie

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
SG Force (X) 1	[N]	2,722331014	2,730895207	2,6995047	2,765748506	100	Yes

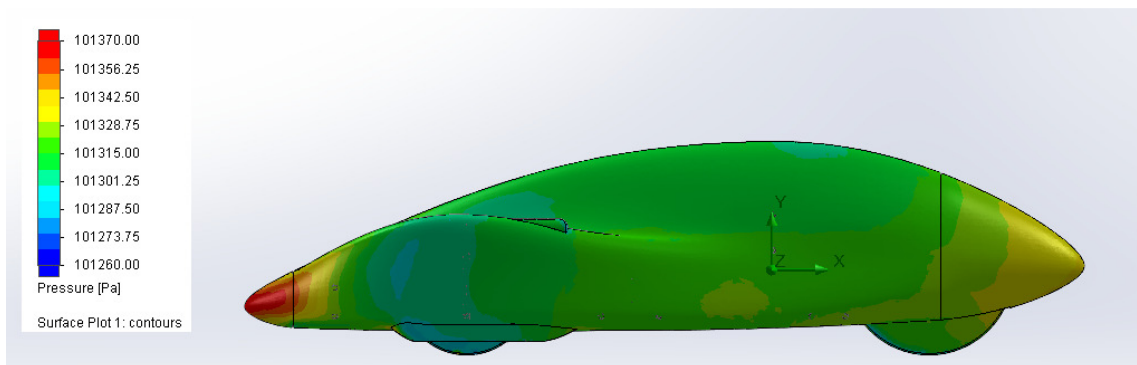
Tab. 5 - Tabulka výsledku vypočtené odporové síly v ose x, převedená do MS-Excel

U výsledků tlakových polí se dle předpokladu u čelního pohledu nic nezměnilo. Přibýly jen kryty předních kol, u kterých jsou čelní plochy zaobleny, aby usměrnily proud vzduchu a tím nevznikl větší tlakový odpor (Obr. 91).

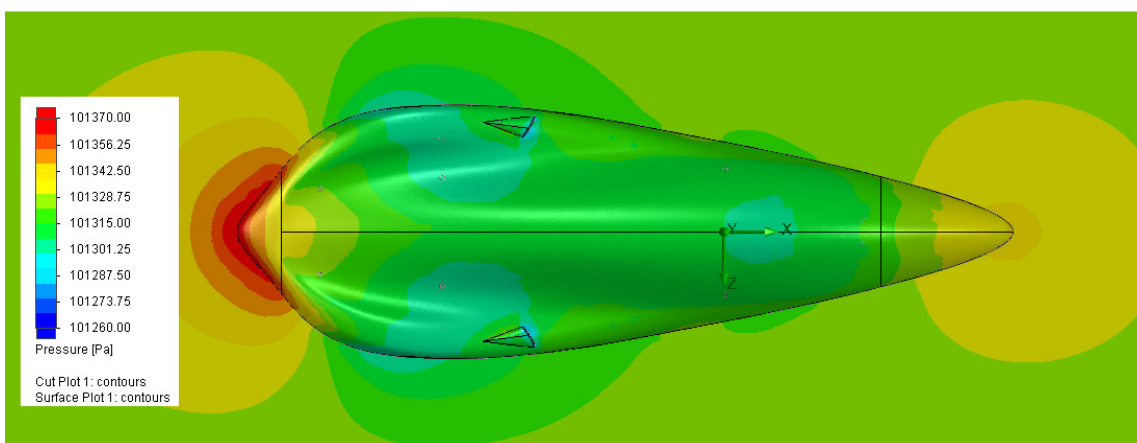
Při součtu tlaků je důležité, aby se proudnice za vozidlem pokud možno co nejvíce uzavíraly. Tím vytvoří na zadní části vozidla větší tlakové pole s vyšším tlakem, což je z hlediska aerodynamického odporu výhodné. Tyto tlakové oblasti jsou zobrazeny na obrázcích (Obr. 92, 93).



Obr. 91 - Tlaková pole - Čelní pohled

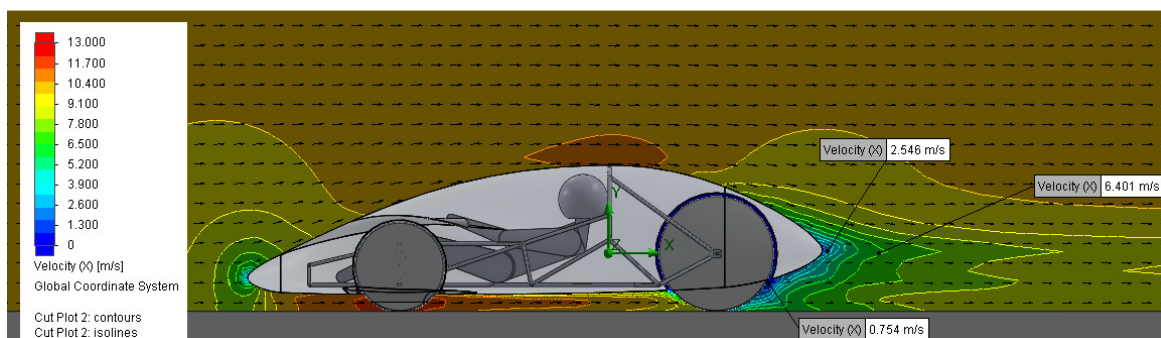


Obr. 92 - Tlaková pole - Pohled zleva



Obr. 93 - Tlaková pole vozidla a vodorovné roviny v úrovni předního nosu

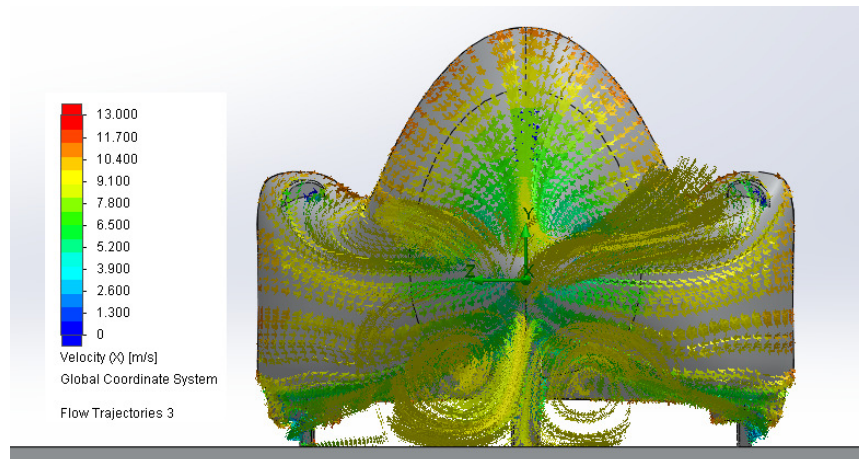
Z výsledků rychlostí (Obr. 94), které jsou zobrazeny na podélné rovině vozidla vyplývá, že zúžení a prodloužení zadní části vozidla má velký vliv na rychlosti proudění okolo vozidla. Proud vzduchu se odpoutává od karoserie s vyšší rychlostí, než tomu bylo v předešlých případech. Rychleji se tedy vyrovná okolním rychlostem, z čehož plyne, že proudící vzduch nepředává vozidlu větší kinetickou energii.



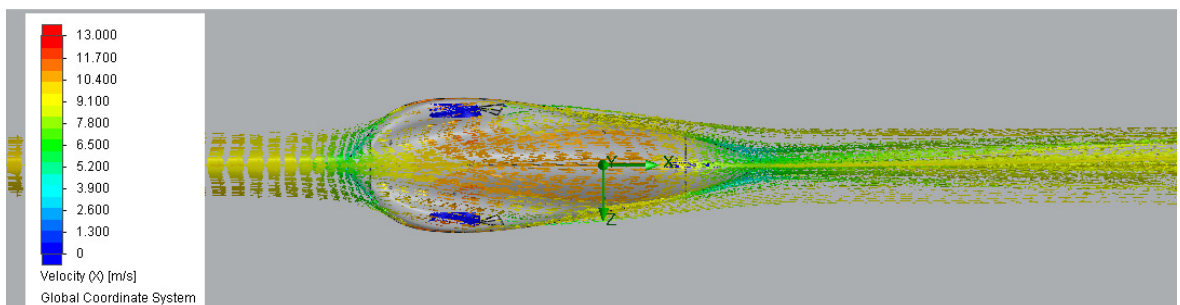
Obr. 94 - Vizualizace rychlostí v podélné rovině vozidla

Výsledky z vizualizace vnějšího proudění jsou zobrazeny na obrázcích (Obr. 95, 96). Zde je vidět ustálenější obtékání, které se bez větších turbulencí, ve srovnání s předchozí koncepcí vozidla s koly uloženými vně karoserie, sjednocuje za vozidlem do většího proudu.

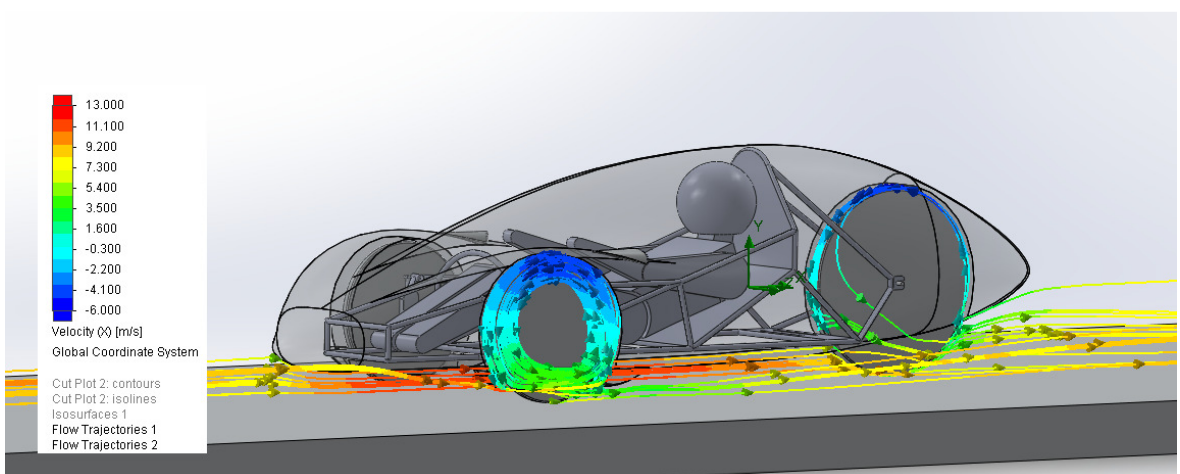
Na obrázku (*Obr. 97*) je zobrazené chování proudění na kolech v podběžích. Z této vizualizace plyne, že se vzduch v předním podběhu díky krytu kola vrací zpět, tím nedochází k rychlejšímu proudění z podběhu a nevzniká tak větší víření v oblasti předního kola. Kryt tomu napomáhá svým zkoseným čelním tvarem, poněvadž ve spodní části tlačí vzduch s větší rychlostí a vytváří tak vzduchovou záclonu.



Obr. 95 - Proudění za vozidlem

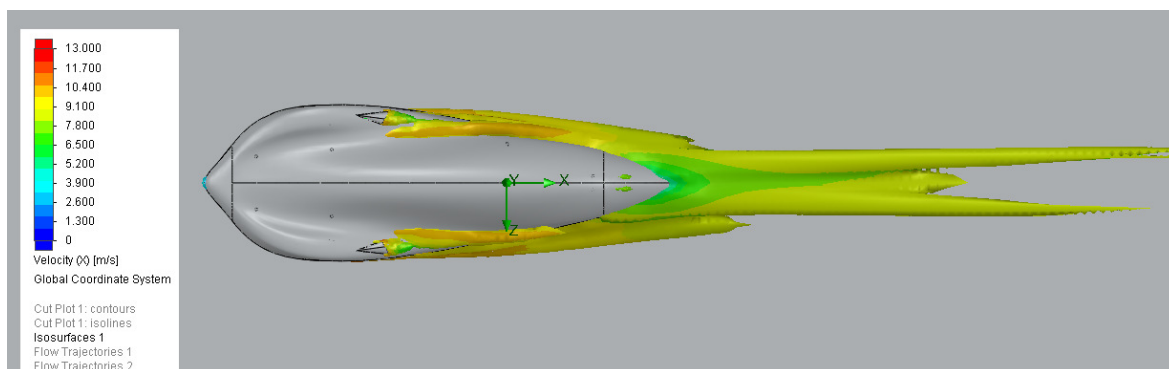


Obr. 96 - Vizualizace proudění okolo vozidla - Pohled shora

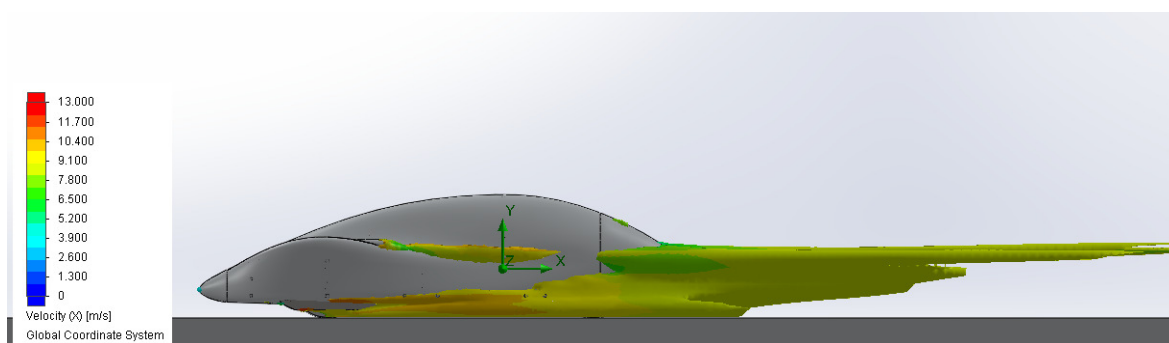


Obr. 97 - Vizualizace proudění v podběžích kol

Z výsledků zobrazujících intenzitu turbulencí (Obr. 98, 99) je ve srovnání se základním modelem této koncepce vidět úbytek turbulencí i přesto, že má přimodelovaná zpětná zrcátka. Oproti koncepci s koly uloženými vně karoserie mají turbulence tohoto modelu, díky vhodným aerodynamickým tvarům a celistvé karoserii, vyšší rychlost. Z toho vyplývá nižší celkový aerodynamický odpor vozidla.



Obr. 98 - Intenzita turbulencí - Pohled shora



Obr. 99 - Intenzita turbulencí - Pohled zleva

6.3.6.3 Výsledné parametry koncepce

Celkový aerodynamický odpor	$F_x = 2,72 \text{ N}$
Vztlaková síla	$F_y = 10,40 \text{ N}$
Čelní plocha vozidla	$S_\varepsilon = 0,684 \text{ m}^2$
Součinitel odporu vzduchu	$C_x = 0,066$

6.3.6.4 Závěr koncepce

Tuto koncepci bych zhodnotil z aerodynamického hlediska jako povedenou. Mnoho prostoru pro velké zlepšení aerodynamického odporu dále nenabízí. Vozidlo je modelováno v konstrukčních mezích, které vytyčují pravidla závodu a velikost rámu vozidla.

Nutné je však podotknout, že simulace byla provedena bez uvažovaného sání, chlazení a výfuku motoru. Tyto úlohy bych doporučil řešit podobně, jako u předchozí koncepcce (*stať 6.3.3.4*).

Závěr

V této diplomové práci jsem navrhoval aerodynamicky optimální tvar karoserie vozidla pro závod Shell Eco-marathon. Pro modelování vozidla jsem použil program SolidWorks 2012 – Vzdělávací edici a pro simulace jeho doplňkový CFD modul Flow Simulation 2012, který je také součástí vzdělávací edice. Simulace jsem řešil jako externí proudění okolo vozidla, tedy bez uvažovaného sání, chlazení a výfuku motoru.

Pro návrh koncepcí vozidla jsem vycházel z diplomové práce pana Ing. Bačkovského - „Ideový návrh koncepce vozidla pro ecorallye“, dále z pravidel závodu Shell Eco-marathon a z navrhovaného rámu pana Bc. Štěpána Minaříka.

Z hlediska konstrukce připadaly v úvahu dvě varianty koncepce vozidla. První variantou (Varianta č. 1) byla koncepce s předními koly uloženými vně karoserie. Druhou variantou (Varianta č. 2) byla celistvá koncepce s předními koly uloženými uvnitř karoserie. U obou koncepcí jsem při modelování, ať už základních modelů, či jejich vylepšení, vycházel z mých znalostí.

Varianta č. 1 (*stať 6.3.3*), byla z hlediska modelování a zkoušení různých aerodynamických prvků časově i konstruktérsky složitější. Z analýzy této koncepce (*stať 6.3.3.2*) plyne, že přední kola s jejich zavěšením vytváří při jízdě turbulence a ve zúženém prostoru mezi kolem a karoserií vznikají další tlaková pole, která tvoří aerodynamický odpor. Nicméně výsledek simulace vozidla má přijatelný aerodynamický odpor o hodnotě $F_x = 3,65 N$ i koeficient aerodynamického odporu $C_x = 0,111$.

Varianta č. 2 (*stať 6.3.6*), byla, co se týče modelování a sestavení sestavy podstatně jednodušší. Důležité u této koncepce bylo karoserii a přední kryty kol modelovat tak, aby kola měla dostatečný prostor pro natočení do rejdu. Z analýzy výsledků (*stať 6.3.6.2*) plyne, že i přes větší čelní plochu má tato koncepce díky své celistvosti a plynulým aerodynamickým tvarům velkou výhodu, poněvadž se netvoří tak velké turbulence a vzduch obtéká vozidlo vyšší rychlostí, než tomu bylo u koncepce s koly uloženými vně karoserie. Výsledek této celistvé koncepce vozidla je uspokojivý. Hodnota aerodynamického odporu při rychlosti $v = 10 m/s$ je $F_x = 2,72 N$ s koeficientem aerodynamického odporu $C_x = 0,066$.

K dosaženým výsledkům je nutné podotknout, že se jedná o simulace externího proudění, ve kterém není uvažováno sání, chlazení a výfuk motoru. Tyto faktory jistě dále ovlivní výsledky a chování proudění okolo vozidla. Výsledky simulace jsou provedeny

v CFD numerickém softwaru, který by bylo třeba validovat v aerodynamickém tunelu na fyzickém modelu vozidla.

Z aerodynamického hlediska bych doporučil variantu č. 2, tedy koncepci tvaru vozidla s koly uloženými uvnitř karoserie (*stat' 6.3.6*). Předpokládám, že se aerodynamický odpor ještě zvýší přidáním interního vedení vzduchu k sání a k chlazení motoru a vývodem vzduchu a spalín od něj. Při dobrém řešení by se však odpor nemusel zvýšit o velkou hodnotu. Sání navrhuji řešit vhodnými tvarovanými otvory umístěnými u zadní části karoserie, kde začínají turbulence, aby se pokud možno co nejméně narušilo proudění vzduchu okolo karoserie. Další možností je umístění náporového sání k motoru pod vozidlem, před zadním kolem, v podobě náběhového trychtýře. Zde se však musí vzít v úvahu, že pod vozidlem vlivem víření bude vzduch znečištěný prachem od vozovky.

Do výroby vozidla jistě zasáhne i cena, postupy a uvážení konstruktéra, který bude laminátovou karoserií vyrábět. U varianty č. 1 by výroba skořepiny a uchycení většího množství krytů bylo složitější, než u varianty č. 2. Ta by se však nejspíše musela vyrobit po jednotlivých částech.

Jako přílohu k této práci přikládám na DVD nosiči finální sestavy obou koncepcí a jejich výstupy ze simulací softwaru Flow Simulation 2012.

Seznam použitých zdrojů

- [1] KOVANDA, B., KOVANDA J., *Aerodynamika vozidel*. Vydavatelství ČVUT, Praha 1999, ISBN 80-01-01942
- [2] VÁCLAV ŠŮLA, FRANTIŠEK ZEMÁNEK, *Tabulky mateatické, fyzikální a chemické*. Prometheus, ISBN 80-85849-84-4
- [3] ZAJÍC JAN, *FYZIKA II pro technické obory DFJP*, UNIVERZITA PARDUBICE, FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ, katedra fyziky, Pardubice 2008
- [4] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [online]. Poslední revize 15.5. 2011. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Reynoldsovo_%C4%8D%C3%ADslo>
- [5] AUTOLEXICON, *Aerodynamika* [online]. Poslední revize 15.5. 2011. Dostupné z:
<<http://cs.autolexicon.net/articles/aerodynamika>>
- [6] JANALÍK JAROSLAV, *Obtékání a odpor těles*. VŠB-TU Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1911-2
- [7] MATOUŠEK VÁCLAV - *Přednáška ČVUT - Obtékání tuhého povrchu a pevné částice v kapalině* [online]. Poslední revize 15.5. 2013. Dostupné z:
<<http://uloz.to/xEMXaHSA/web-hy3v-12-obtekani-a-pevne-castice-v-kapaline-pdf>>
- [8] KATZ, J., *Race car aerodynamics: designing for speed*. Bentley Publishers 2006, ISBN 0-8376-0142-8
- [9] WOLF-HEINRICH HUCHO (HRSG.), *Aerodynamik des automobils*, Springer-verlag Berlin-Heidelberg, Weisbadeb 2008, ISBN 978-3-528-03959-2
- [10] CHEVROLET, *Volt MPV5* [online]. Poslední revize 15.5. 2013. Dostupné z:
<<http://www.chevrolet.cz/vyzkousejte-chevrolet/koncepty-a-budouci-modely/volt-mpv5.html>>
- [11] MARTIN JENÍK, Redakce časopisu Auto motor a sport, redaktor
- [12] BMW, *Efficient dynamics* [online]. Poslední revize 15.5. 2013. Dostupné z:
<http://www.netcarshow.com/bmw/2009-efficientdynamics_concept/>
- [13] FERRARI, *F12 – Berlinetta* [online]. Poslední revize 15.5. 2013. Dostupné z:
<<http://cars.sulekha.com/meet-the-ferrari-f12-berlinetta-the-fastest-and-most-ferrari-f12-berlinetta-news-2718>>
- [14] OPEL FLEXTREME GT/E. *Automobil*. 2010, číslo 7
- [15] PEUGEOT, *HX1 koncept* [online]. Poslední revize 15.5. 2013. Dostupné z:
<http://www.driversweb.cz/clanky/Novinky/Peugeot_HX1_koncept_moderni_francouzsky_luxus>

- [16] BUGATTI-VEYRON, *Aero. brzda* [online]. Poslední revize 15.5. 2013.
Dostupné z:
<<http://www.auto.cz/bugatti-veyron-16-4-ve-frankfurtu-2005-55878>>
- [17] FRANTIŠEK VLK, *Zkoušení a diagnostika motorových vozidel*.
Nakladatelství Vlk, Brno 2001 ISBN80-238-6573-0
- [18] PROUDĚNÍ, *Chevrolet* [Online]. Poslední revize 15.5. 2013. Dostupné z:
<<http://www.bloomberg.com/news/2012-06-22/gm-recalls-413-418-chevrolet-cruzes-in-u-s-on-engine-fires-1-.html>>
- [19] J. OTA, *Škoda Auto TFA* [online]. Poslední revize 15.5. 2013. Dostupné z:
<http://k616.fd.cvut.cz/vyuka/mgr/16PDP/prednasky/03c_Aerodynamika_Ota_120321.pdf>
- [20] SOLIDWORKS, *Flow Simulation* [online]. Poslední revize 15.5. 2013.
Dostupné z:
<<http://www.solidworks.cz/produkty/software-simulation/solidworks-flow-simulation/>>
- [21] SOLIDWORKS, *Flow Simulation 2012 Technical Reference*
- [22] JANALÍK JAROSLAV, *Vybrané kapitoly z mechaniky tekutin*. VŠB-TU Ostrava,
2008, ISBN 978-80-248-1910-5
- [23] PRAVIDLA, *Shell Eco-marathon* [online]. Poslední revize 15.5. 2013.
Dostupné z:
<<http://www.shell.com/global/environment-society/ecomarathon/for-participants/general-information/rules.html>>

Seznam obrázků

OBR. 1 - TLAKOVÁ POLE A TVAR PROUDNIC AUTOMOBILU FERRARI F430 SCUDERIA [5]	14
OBR. 2 - PARABOLICKY SE ZVYŠUJÍCÍ RYCHLOST	15
OBR. 3 - VÝVOJ MEZNÍ VRSTVY PŘI OBTÉKÁNÍ ROVINNÉ DESKY [6]	15
OBR. 4 - RYCHLOSTNÍ PROFILY V JEDNOTLIVÝCH FÁZÍCH OBTÉKÁNÍ VÁLCE [6]	16
OBR. 5 - A) - LAMINÁRNÍ MEZNÍ VRSTVA S ŠIROKÝM TURBULENTNÍM ÚPLAVEM B) - TURBULENTNÍ MEZNÍ VRSTVA S ÚZKÝM TURBULENTNÍM ÚPLAVEM [7].....	17
OBR. 6 - A) V PROSTORU B) NA VOZOVCE [8]	18
OBR. 7 - A) - ROTUJÍCÍ KOLO B) - STATICKÉ KOLO [8]	19
OBR. 8 - ROZLOŽENÍ TLAKŮ U ROTUJÍCÍHO A STATICKÉHO KOLA [8]	19
OBR. 9 - SNIŽUJÍCÍ SE HODNOTY SOUČiniteLE ODPORU C_x NA VOZIDLECH [9]	21
OBR. 10 - PŘEDNÍ MŘÍŽKA CHEVROLETU VOLT [10]	22
OBR. 11 - AUTOMATICKÉ CLONĚNÍ CHLADIČE U VOZU E-CLASS COUPE ZNAČKY MERCEDES [11] ..	23
OBR. 12 - OBTÉKANÁ PŘÍŤ KONCEPTU BMW EFFICIENTDYNAMICS [12]	23
OBR. 13 - A) - ŘEŠENÍ PODBĚHU KOL VOLVO V 30 B) - VZDUCHOVÁ ZÁCLONA BMW [11]	24
OBR. 14 - VIZUALIZACE PROUDĚNÍ VZDUCHOVÉHO MOSTU U FERRARI F12 BARLINETTA [13]	25
OBR. 15 - PROMĚNNÉ OBTÉKÁNÍ ZÁDĚ S VÝSUVNÝMI PANELY AEROBLADES [14]	26
OBR. 16 - AKTIVNÍ AERODYNAMICKÝ PRVEK ZÁDĚ PEUGEOTU HX1 KONCEPT [15]	26
OBR. 17 - SOUŘADNÝ SYSTÉM PRO AERODYNAMICKÁ MĚŘENÍ SIL A MOMENTŮ [17]	28
OBR. 18 - VIZUALIZACE POMOCÍ KOUŘOVÉ SONDY V AERODYNAMICKÉM TUNELU [18]	29
OBR. 19 - VIZUALIZACE TLAKŮ MEZI PŮVODNÍM STAVEM A VYLEPŠENÝM [19]	32
OBR. 20 - OVĚŘENÍ VÝSLEDKU OPTIMALIZACE PŘI MĚŘENÍ V AERODYNAMICKÉM TUNELU V MĚŘÍTKU 1:4 (VLEVO) A 1:1 [19]	32
OBR. 21 - SÉRIOVÝ STAV ODRHOVÉ HRANY VOZIDLA [19]	32
OBR. 22 - VARIANTA Č. 1 [19]	33
OBR. 23 - VARIANTA Č. 2 [19]	33
OBR. 24 - VALIDACE ČELNÍHO ODMRAZENÍ U VOZU ŠKODA YETI [19]	34
OBR. 25 - VÝSLEDEK VALIDACE PROUDĚNÍ [20]	36
OBR. 26 - HLAVNÍ PANEL PŘÍKAZŮ FS	37
OBR. 27 - OKNO PRŮVODCE NASTEVNÍM - KONFIGURACE PROJEKTU	38
OBR. 28 - OKNO PRO DEFINOVÁNÍ TYPU SIMULACE	38
OBR. 29 - OKNO PRO DEFINOVÁNÍ POČÁTEČNÍCH PODMÍNEK PROUDĚNÍ	39
OBR. 30 - OKNO PRO DEFINOVÁNÍ VÝPOČETNÍ OBJEMOVÉ SÍTĚ	40
OBR. 31 - RÁM VOZIDLA	44
OBR. 32 - ROZMĚRY RÁMU [MM]	44
OBR. 33 - UKÁZKA Z POSTUPU RÝSOVÁNÍ PŘÍČNÝCH A PODÉLNÝCH ŽEBER	45

OBR. 34 - KONTROLA KŘIVOSTI SKIC	45
OBR. 35 - A - LADĚNÍ TEČNOSTÍ HRANIČNÍM POVRCHEM B - ZEBŘÍ PRUHY	46
OBR. 36 - SKOŘEPINA KAROSERIE	46
OBR. 37 - ANALÝZA KŘIVOSTI KAROSERIE	46
OBR. 38 - PRŮHLEDNÝ 3D MODEL VOZIDLA PŘIPRAVENÝ NA SIMULACE	47
OBR. 39 - MODEL KONCEPCE S PŘEDNÍMI KOLY VNĚ TRUPU KAROSERIE	48
OBR. 40 - ROZMĚRY VOZIDLA - POHLED ZLEVA [MM]	48
OBR. 41 - ROZMĚRY VOZIDLA - POHLED SHORA [MM]	48
OBR. 42 - MODEL SIMULACE	49
OBR. 43 - SÍŤ MODELU	49
OBR. 44 - SÍŤ OBJEMOVÝCH PRVKŮ VZDUCHU V TUNELU	49
OBR. 45 - VIZUALIZACE ROZLOŽENÍ TLAKŮ - ČELNÍ POHLED	50
OBR. 46 - DETAILNÍ ZOBRAZENÍ TLAKŮ S VEKTORY RYCHLOSTÍ NA ZAVĚŠENÍ KOLA	50
OBR. 47 - ZOBRAZENÍ RYCHLOSTI VOZIDLA NA PODÉLNÉ ROVINĚ	51
OBR. 48 - INTENZITA TURBULENCÍ - POHLED SHORA	51
OBR. 49 - INTENZITA TURBULENCÍ - POHLED ZLEVA	51
OBR. 50 - INTENZITA TURBULENCÍ V OBLASTI ZAVĚŠENÍ KOL	52
OBR. 51 - PŮVODNÍ AERODYNAMICKÝ KRYT KOLA	53
OBR. 52 - ZOBRAZENÍ INTENZITY TURBULENCÍ U PŮVODNÍHO KRYTU KOLA	53
OBR. 53 - VYLEPŠENÝ AERODYNAMICKÝ KRYT KOLA SE ZKOSENOU ČELNÍ HRANOU	54
OBR. 54 - ZOBRAZENÍ INTENZITY TURBULENCÍ U VYLEPŠENÉHO KRYTU KOLA	54
OBR. 55 - A - ČELNÍ POHLED NA ZADNÍ KRYT B - POHLED ZBOKU - VARIANTA Č. 1	54
OBR. 56 - RYCHLOST PROUDĚNÍ V PODÉLNÉ ROVINĚ VOZIDLA - VARIANTA Č. 1	55
OBR. 57 - VIZUALIZACE PROUDĚNÍ U KRYTU ZADNÍHO KOLA - VARIANTA Č. 1	55
OBR. 58 - ZKOSENÝ KRYT ZADNÍHO KOLA - VARIANTA Č. 2	56
OBR. 59 - RYCHLOST PROUDĚNÍ V PODÉLNÉ ROVINĚ VOZIDLA - VARIANTA Č. 2	56
OBR. 60 - VIZUALIZACE PROUDĚNÍ ZKOSENÉHO ZADNÍHO KRYTU KOLA - VARIANTA Č. 2	56
OBR. 61 - TLAKOVÁ POLE V OKOLÍ ZPĚTNÉHO ZRCÁTKA	57
OBR. 62 - INTENZITA TURBULENCÍ SE ZPĚTNÝM ZRCÁTKEM	57
OBR. 63 - MODEL VOZIDLA SE ZÚŽENOU ZÁDÍ S KRYTY PŘEDNÍCH KOL A JEJICH ZAVĚŠENÍ	58
OBR. 64 - POHLED NA KRYTY RAMEN, TĚHLICE A PŘEDNÍHO KOLA	58
OBR. 65 - ROZMĚRY VOZIDLA - POHLED ZLEVA [MM]	59
OBR. 66 - ROZMĚRY VOZIDLA - POHLED SHORA [MM]	59
OBR. 67 - TLAKOVÁ POLE - ČELNÍ POHLED	59
OBR. 68 - TLAKOVÁ POLE VE V ÚROVNI PŘEDNÍHO NOSU - POHLED SHORA	60
OBR. 69 - DETAIL TLAKŮ S VEKTORY RYCHLOSTÍ ZAKRYTOVANÉHO ZAVĚŠENÍ KOLA	60
OBR. 70 - RYCHLOST PROUDĚNÍ V PODÉLNÉ ROVINĚ VOZIDLA	61
OBR. 71 - PROUDĚNÍ VZDUCHU ZA VOZIDLEM	61

OBR. 72 - VIZUALIZACE PROUDĚNÍ - POHLED SHORA	61
OBR. 73 - DETAIL PROUDĚNÍ OKOLO PŘEDNÍHO ZAVĚŠENÍ KOLA.....	62
OBR. 74 - PROUDĚNÍ V OBLASTI ZADNÍHO KOLA	62
OBR. 75 - INTENZITA TURBULENCÍ - POHLED SHORA	63
OBR. 76 - INTENZITA TURBULENCÍ - POHLED ZLEVA	63
OBR. 77 - SÍŤ ŽEBER MODELU CELISTVÉ KAROSERIE.....	64
OBR. 78 - MODEL VOZIDLA S KOLY ULOŽENÝMI UVNITŘ KAROSERIE	64
OBR. 79 - ROZMĚRY VOZIDLA - POHLED ZLEVA [MM].....	65
OBR. 80 - ROZMĚRY VOZIDLA - POHLED SHORA [MM]	65
OBR. 81 - TLAKOVÉ POLE - ČELNÍ POHLED.....	66
OBR. 82 - VIZUALIZACE TLAKOVÝCH POLÍ NA VODOROVNÉ ROVINĚ V ÚROVNI PŘEDNÍHO NOSU ...	66
OBR. 83 - RYCHLOST PROUDĚNÍ V PODÉLNÉ ROVINĚ VOZIDLA	66
OBR. 84 - INTENZITA TURBULENCÍ 2,5% - POHLED SHORA	66
OBR. 85 - INTENZITA TURBULENCÍ 2,5% - POHLED ZLEVA.....	67
OBR. 86 - INTENZITA TURBULENCÍ - UMÍSTĚNÍ ZPĚTNÉHO ZRCÁTKA - VARIANTA Č. 1	68
OBR. 87 - INTENZITA TURBULENCÍ - UMÍSTĚNÍ ZPĚTNÉHO ZRCÁTKA - VARIANTA Č. 2	69
OBR. 88 - PRŮHLEDNÝ MODEL SESTAVY.....	69
OBR. 89 - ROZMĚRY VOZIDLA - POHLED ZLEVA [MM]	69
OBR. 90 - ROZMĚRY VOZIDLA - POHLED SHORA [MM]	70
OBR. 91 - TLAKOVÁ POLE - ČELNÍ POHLED	70
OBR. 92 - TLAKOVÁ POLE - POHLED ZLEVA	71
OBR. 93 - TLAKOVÁ POLE VOZIDLA A VODOROVNÉ ROVINY V ÚROVNI PŘEDNÍHO NOSU.....	71
OBR. 94 - VIZUALIZACE RYCHLOSTÍ V PODÉLNÉ ROVINĚ VOZIDLA	71
OBR. 95 - PROUDĚNÍ ZA VOZIDLEM	72
OBR. 96 - VIZUALIZACE PROUDĚNÍ OKOLO VOZIDLA - POHLED SHORA.....	72
OBR. 97 - VIZUALIZACE PROUDĚNÍ V PODBĚŽÍCH KOL.....	72
OBR. 98 - INTENZITA TURBULENCÍ - POHLED SHORA	73
OBR. 99 - INTENZITA TURBULENCÍ - POHLED ZLEVA	73

Seznam tabulek

<i>TAB. 1 - MÉ VÝSLEDKY ZE SIMULACE VÁLCE</i>	<i>37</i>
<i>TAB. 2 - TABULKA VÝSLEDKU VYPOČTENÉ ODPOROVÉ SÍLY V OSE X, NEUPRAVENÉ KONCEPCE VOZIDLA S PŘEDNÍMI KOLY ULOŽENÝMI VNĚ KAROSERIE.....</i>	<i>50</i>
<i>TAB. 3 - TABULKA VÝSLEDKU VYPOČTENÉ ODPOROVÉ SÍLY V OSE X, UPRAVENÉ KONCEPCE VOZIDLA S PŘEDNÍMI KOLY ULOŽENÝMI VNĚ KAROSERIE.....</i>	<i>59</i>
<i>TAB. 4 - TABULKA VÝSLEDKU VYPOČTENÉ ODPOROVÉ SÍLY V OSE X, NEUPRAVENÉ KONCEPCE VOZIDLA S PŘEDNÍMI KOLY ULOŽENÝMI UVNITŘ KAROSERIE</i>	<i>65</i>
<i>TAB. 5 - TABULKA VÝSLEDKU VYPOČTENÉ ODPOROVÉ SÍLY V OSE X, UPRAVENÉ KONCEPCE VOZIDLA S PŘEDNÍMI KOLY ULOŽENÝMI UVNITŘ KAROSERIE</i>	<i>70</i>