

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VÝPOČET AERODYNAMIKY ZÁVODNÍHO AUTOMOBILU

COMPUTATION OF RACE CAR AERODYNAMICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN VANČURA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PETR PORTEŠ, DR.

BRNO 2008

Anotace

Diplomové práce je zaměřena na výpočty aerodynamických charakteristik závodního automobilu. Popisuje metodu sestavení CFD modelu s využitím 3D scanneru ATOS a prostředí softwaru Pro Engineer. V průběhu vytváření této práce byly zjištěny vlivy přidavných aerodynamických prvků závodního automobilu na výsledné zatížení náprav.

Klíčová slova

Aerodynamika, formule, 3D scanner ATOS, aerodynamické prvky

Annotation

The main subject of this diploma thesis is computation of race car aerodynamics. It describes composition method of CFD model with utilization of 3D scanner ATOS and CAD software Pro Engineer. During creating this diploma thesis were found influences of additional aerodynamics components of racing car on globally axle loads.

Key words

Aerodynamics, formula, 3D scanner ATOS, aerodynamics components

Bibliografická citace

VANČURA, J. *Výpočet aerodynamiky závodního automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš, Dr.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem napsal sám za pomoci mého vedoucího diplomové práce Ing. Petra Porteše, Dr. a za pomoci literatury uvedené v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 19. května 2008

Jan Vančura

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Portešovi, Dr. za jeho odborné vedení a cenné rady, které mi byly během tvorby diplomové práce prospěšné. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Matěji Formanovi a Ing. Jaroslavu Katolickému, PhD. za odborné rady v oblasti CFD a všem, kteří mi byli při tvorbě diplomové práce oporou.

1.	Úvod	9
2.	Teorie aerodynamiky vozidel	10
2.1	Trajektorie proudu, přilnuté a odtržené proudění	10
2.2	Vlastnosti tekutin	11
2.3	Mezní vrstva	12
2.4	Laminární a turbulentní proudění	13
2.5	Bernoulliho rovnice	14
2.6	Obtékání kol automobilu, Magnusův jev	15
2.7	Soustava aerodynamických sil a momentů	17
2.8	Aerodynamika osobních a závodních vozidel	20
3.	Modelované vozidlo	22
3.1	3D scanner ATOS	22
3.2	Příprava kapotáže pro scanner ATOS I	23
3.3	Snímání povrchů	23
4.	Tvorba modelu v prostředí softwaru Pro Engineer WF3	25
4.1	Import řezů z formátu STL	25
4.2	Tvorba ploch jednotlivých dílů	26
4.3	Sestavení objemového modelu	27
5.	Vytvoření CFD modelu	29
5.1	Přehled současných CFD softwarů	29
5.2	Import ploch z objemového modelu	30
5.3	Vytvoření hraničních křivek, nastavení povrchové sítě	31
5.4	Objemová síť	32
5.5	Rozměry tunelu, ředění objemové sítě	32
5.6	Nastavení fyzikálního modelu, vytvoření výpočetních senzorů	34
6.	Výpočet a zhodnocení výsledků všech variant modelu vozidla bez přídavných aerodynamických prvků	36
6.1	Výpočet reakcí od aerodynamických účinků na nápravách modelů vozidla bez přídavných aerodynamických prvků	43
6.2	Porovnání výsledků modelu vozidla bez přídavných aerodynamických prvků s měřenými hodnotami vozidla stejné kategorie	46
7.	Návrh tvarových úprav	47
7.1	Vytvoření předního křídla	47
7.2	Vytvoření zadního křídla	53
7.3	Přesunutí tlumiče výfuku do oblasti převodovky	59
8.	Vytvoření CFD modelu vozidla s přídavnými aerodynamickými prvky	60
9.	Výpočet a zhodnocení výsledků modelu s přídavnými aerodynamickými plochami	61

9.1 Výpočet reakcí od aerodynamických účinků na nápravách modelu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky	67
9.2 Porovnání výsledků modelu s přidavnými aerodynamickými plochami s měřenými hodnotami vozu stejné kategorie	69
10. Porovnání výsledků modelu původního vozidla s modelem s přidavnými aerodynamickými plochami	70
11. Ovlivnění rozložení tlaku na površích křídel přítomností karoserie vozidla.....	73
12. Závěr.....	75
Seznam použitých zdrojů.....	76
Seznam použitých jednotek a veličin	77

1. Úvod

Současné závody automobilů formulového typu jsou velice náročné odvětví motorsportu, kde o vítězích a poražených rozhodují zlomky sekund. Proto velmi záleží na tom, jak jednotlivé týmy dokážou připravit svůj vůz na nadcházející závod. Právě aerodynamika zde hraje klíčovou roli.

Tradiční způsob řešení aerodynamiky nejen závodních vozidel, ale i letadel, ponorek apod. představují aerodynamické tunely. Se současnými pokroky v matematických modelech aplikací počítačové dynamiky tekutin (CFD) a markantního nárůstu výkonu výpočetních stanic je stále větší množství součástí vozu vyvíjeno přímo v CFD softwaru. Tato varianta je výhodná jak z hlediska menší časové náročnosti, tak i z hlediska ekonomického, jelikož nejsou potřeba investice na výstavbu a provoz aerodynamických tunelů. V současné době výrobci osobních vozidel používají obě metody, a to pro srovnání a posouzení kvality výsledků získaných CFD simulacemi.

Cílem této diplomové práce je sestavení CFD modelu reálného závodního automobilu za účelem získání dat popisující zatížení aerodynamickými silami. Tato práce vznikla ve spolupráci s Energetickým ústavem, odbor termomechaniky a techniky prostředí, jelikož disponuje dostatečně výkonným hardwarem pro náročné výpočty a hlavně má v oblasti CFD dlouholeté zkušenosti.

2. Teorie aerodynamiky vozidel

Aerodynamika je část fyziky, konkrétně mechaniky, která se zabývá silovým působením na těleso obtékané proudem vzduchu. Aerodynamika se uplatňuje především v letectví, automobilismu a architektuře.

Proudění vzduchu je relativní. To znamená, že na těleso působí stále stejné síly, pokud je těleso vůči okolí v klidu a vzduch kolem něj obtéká nebo naopak.

Při obtékání těles proudem vzduchu se na jeho jednotlivých površích více či méně tento vzduch stlačuje a tím se vytváří nerovnoměrné tlakové pole, které způsobuje silovou nerovnováhu. Tlak vzduchu lze uvažovat třemi způsoby:

Statický tlak – lze naměřit u stěny tělesa, kde je nulová rychlost.

Dynamický tlak – lze naměřit za pohybu vzduchu, souvisí s rychlostí proudění.

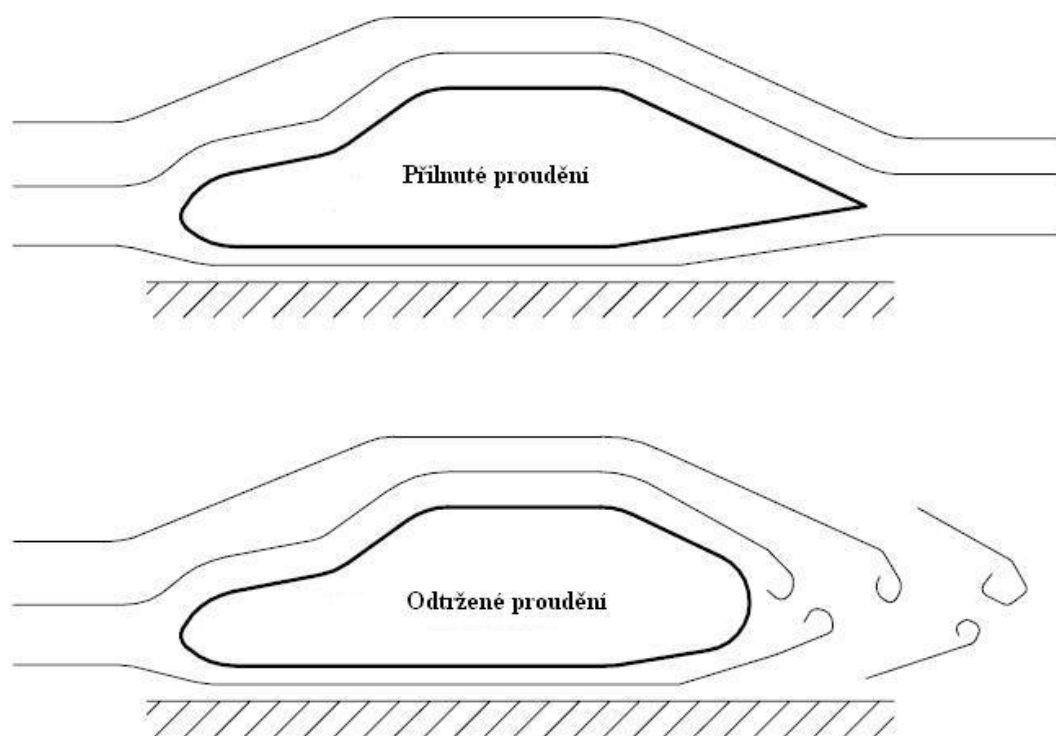
Celkový tlak – za předpokladu že neuvažujeme ztráty jej lze považovat za součet statického a dynamického tlaku.

S rostoucí rychlostí proudění roste hodnota dynamického tlaku. Pokud je ofukované těleso asymetrické, proudění vzduchu kolem něj bude také asymetrické a na jedné straně bude rychlost obtékání větší než na straně druhé. Na straně s vyšší rychlostí bude vyšší dynamický a nižší statický tlak. Nerovnováha statického tlaku způsobí vznik aerodynamické síly. Aerodynamická síla značně ovlivňuje jízdní vlastnosti vozidla. V následujících kapitolách 2.1 – 2.6 jsou shrnuty základní poznatky z publikace *Race car aerodynamics: Designing for speed*, autor Joseph Katz [1].

2.1 Trajektorie proudu, přilnuté a odtržené proudění

Trajektorie proudu jsou křivky spojené s ilustrativním popisem pohybu tekutiny. Vizualizace trajektorií nehmotných částic proudu může být získána v aerodynamických tunelech vstřikováním částic kouře do proudícího vzduchu. Nicméně pokud vstřikované médium nemá stejnou hustotu jako proudící tekutina, potom se nemusí pohybovat přesně po proudnici, ale může docházet k drobným odchylkám trajektorie vstřikovaného kouře od skutečných trajektorií. Proto se v aerodynamických tunelech používá obarvený kouř s fyzikálními vlastnostmi co nejvíce blízkými vlastnostem vzduchu.

Pokud trajektorie proudu, která se nachází v blízkosti pevného povrchu (například karoserie automobilu), opisuje přesně tvar povrchu, pak se takovéto proudění nazývá přilnuté. Pokud trajektorie proudu tento tvar neopisuje, pak se jedná o proudění odtržené. K odtrženému proudění dochází většinou na zadní části vozidla, v místě, kde se odtrhává mezní vrstva. Jak uvidíme později, přilnuté proudění a bod odtržení má vliv na aerodynamické charakteristiky vozidla, nebo jeho částí.

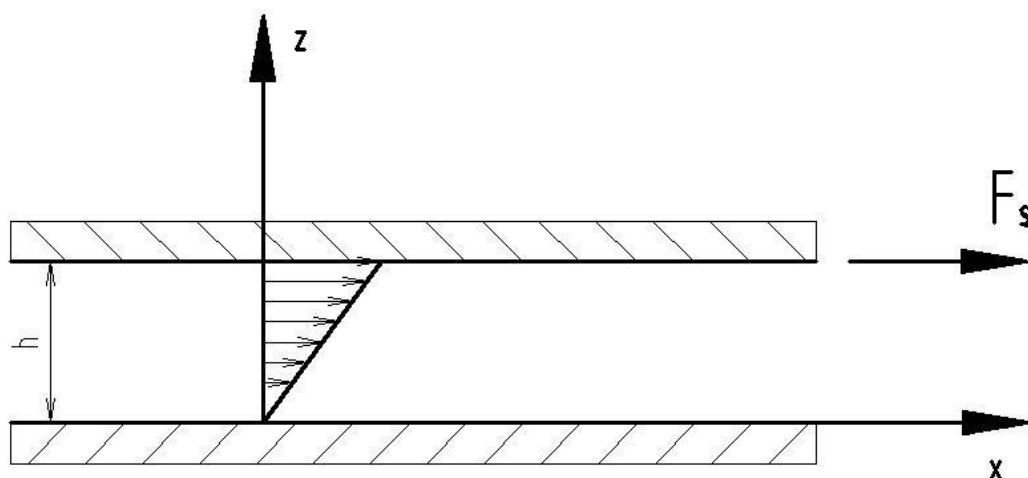


Obr. 1. Ilustrativní popis přilnutého a odtřženého proudění

2.2 Vlastnosti tekutin

Síla potřebná k pohybu vozidla skrze vzduch, popřípadě zmenšeného modelu vozidla ve vodním tunelu, závisí na fyzikálních vlastnostech okolní tekutiny, především na teplotě, hustotě, tlaku a viskozitě.

Viskozitu okolní tekutiny lze zjednodušeně definovat jako míru odolnosti proti pohybu (podobně jako tření). Vliv viskozity může být znázorněn na jednoduchém pokusu se dvěma deskami umístěnými ve viskózní tekutině, které se navzájem vůči sobě pohybují. Spodní deska je vzhledem k souřadnému systému v klidu, zatímco horní deska se pohybuje směrem doprava konstantní rychlostí. Částice tekutiny v bezprostřední blízkosti desek inklinují k ulpívání na površích obou desek a mají relativní nulovou rychlost vzhledem k jednotlivým deskám. Vlivem pohybu horní desky vůči spodní a ulpívání částic tekutiny na površích, dochází ke smyku, a molekuly tekutiny jsou vzájemně nuceny k relativnímu pohybu. Pozorovateli stojícímu na spodní desce se zdá rychlost proudění na nepohybujícím se povrchu nulová a na pohybujícím se rovna rychlosti tělesa.



Obr. 2. Znázornění pokusu s viskózní tekutinou mezi dvěma deskami

Odolnost tekutiny vůči smyku se projevuje jako smykové napětí, které je potřeba překonat, aby došlo k pohybu tělesa umístěného v dané tekutině. Velikost smykové síly F_s je dána rovnicí 1,

$$\frac{F_s}{A} = \mu \frac{V_\infty}{h} \quad (1)$$

kde A je povrch horní desky, μ dynamická viskozita, V_∞ rychlost volného proudu a h je vzdálenost desek.

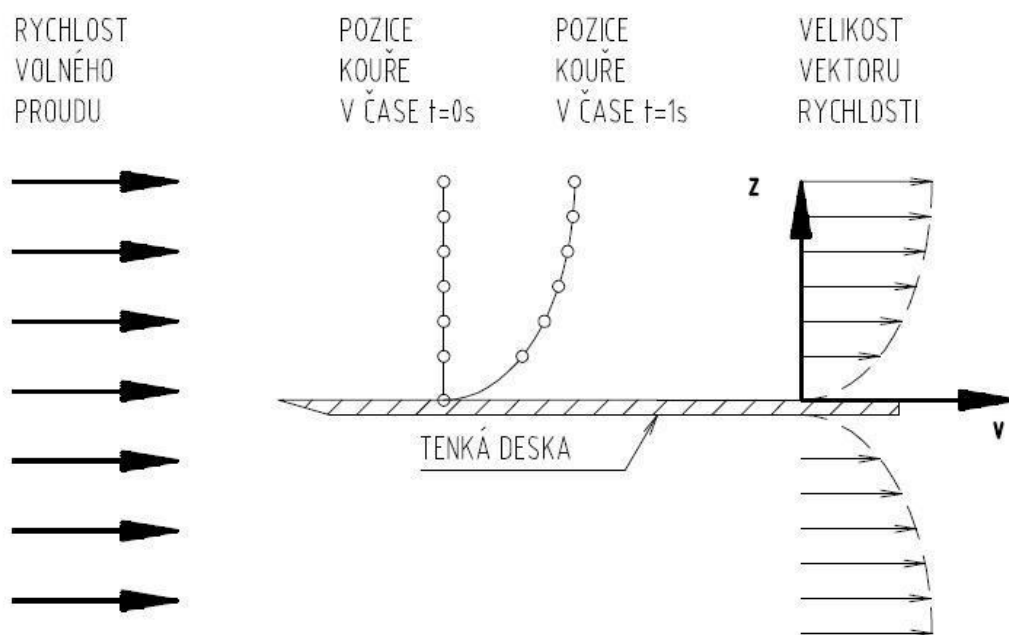
Hodnoty hustoty a viskozity tří nejběžnějších tekutin při teplotě 20 °C a tlaku 101 325 Pa jsou uvedeny v tabulce číslo 1. Z hlediska aerodynamiky vozidel nás samozřejmě zajímají především fyzikální vlastnosti vzduchu.

Tekutina	Hustota ρ [kg/m ³]	Viskozita μ [N·s/m ²]
Vzduch	1,22	$1,8 \cdot 10^{-5}$
Voda	998	$1 \cdot 10^{-5}$
Motorový olej SAE 30	919	$4 \cdot 10^{-5}$

Tab. 1. Hodnoty hustoty a viskozity pro tři různé tekutiny

2.3 Mezní vrstva

Pokud se vozidlo pohybuje vzduchem, potom jeho tvar ovlivňuje pohyb jednotlivých částic vzduchu tak, že jejich rychlosti jsou různé. Na jednoduchém příkladě lze znázornit rozložení rychlosti. Tenkou desku vložíme do proudu vzduchu paralelně s proudnicemi. V různých vzdálenostech od desky současně vstříkneme bodově kouř. Po krátké chvíli (1 sec) můžeme sledovat změnu polohy jednotlivých bodů.



Obr. 3. Rychlostní profil v mezní vrstvě

Pokus jasně dokazuje nulovou rychlost proudění na povrchu tělesa. S rostoucí vzdáleností od povrchu se velikost rychlosti zvyšuje, až se nakonec ustálí na hodnotě rychlosti volného proudu (rychlost, která již není ovlivněna viskozitou vzduchu). Tato tenká vrstva se nazývá mezní vrstva. Pro vozidlo pohybující se rychlostí 100 km/h je tloušťka mezní vrstvy několik milimetrů v blízkosti přední části vozu, několik centimetrů na střeše vozu.

Rychlostní spád v mezní vrstvě se může měnit dvěma způsoby, podle toho rozlišujeme laminární a turbulentní mezní vrstvu.

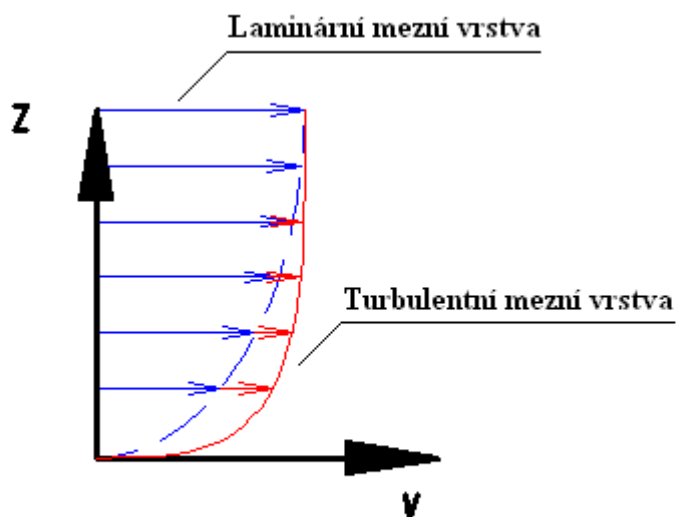
2.4 Laminární a turbulentní proudění

Laminární proudění je proudění viskózní tekutiny, jehož proudnice jsou rovnoběžné a neprotínají se. Jednotlivé částice tekutiny se pohybují ve vrstvách, které se vzájemně neprostupují. Mezi jednotlivými vrstvami laminárního proudění se předpokládá existence vnitřního tření.

Turbulentní proudění je proudění viskózní tekutiny, jehož proudnice se navzájem promíchávají. Jednotlivé částice tekutiny vykonávají kromě posuvného pohybu i vlastní obecný pohyb, který způsobuje vznik vírů. Rychlost částic v jednotlivých místech turbulentního proudění je různá, tzn., že turbulentní proudění je nestacionární. K turbulentnímu proudění dochází při dosažení určité hodnoty Reynoldsova čísla. To je definováno rovnicí 2, kde V je rychlost proudění, ν je kinematická viskozita a d je charakteristický rozměr.

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (2)$$

Vzhledem k rozměrům dochází při obtékání vozidla vždy k turbulentnímu proudění. Rychlostní profil v mezní vrstvě laminárního a turbulentního proudění je na obrázku 4.



Obr. 4. Rychlostní profil v mezní vrstvě laminárního a turbulentního proudění

2.5 Bernoulliho rovnice

Tvar pohybujícího se vozidla způsobuje změnu směru a velikosti rychlosti proudění, což má za následek vznik aerodynamického zatížení. Tlaková síla působí kolmo na povrch tělesa a přispívá jak k aerodynamické odporové síle, tak i k aerodynamickému vztlaku. V případě že uvažujeme obtékaným tělesem vozidlo, hovoříme o přitlaku. Nutno poznamenat, že tlaková síla vzniká vně mezní vrstvy (rychlost v mezní vrstvě na povrchu vozidla je nulová).

Aerodynamického zatížení je závislé na rychlosti proudění v blízkosti povrchu obtékaného tělesa, která souvisí s velikostí tlaku na povrchu. Vztah mezi rychlostí proudění a tlakem pro ustálené proudění a ideální případ beze ztrát popisuje Bernoulliho rovnice:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \text{const} \quad (3)$$

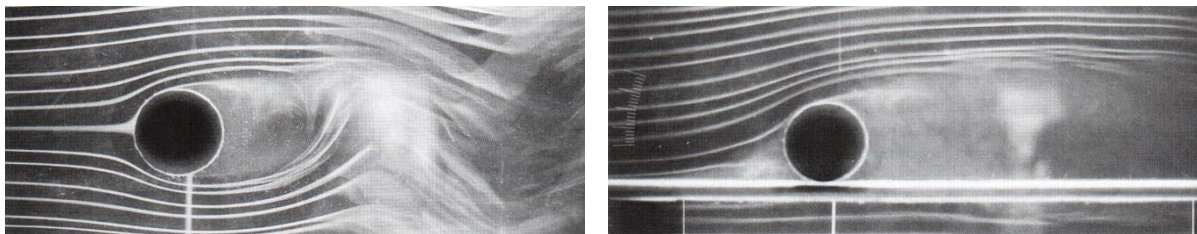
Bernoulliho rovnice slouží k porovnání rychlostí a tlaků ve dvou různých bodech jednodimenzionálního proudění. Pokud se jedná o spojitě proudění s konstantní hustotou proudící tekutiny, lze Bernoulliho rovnici použít v kterémkoliv bodě proudění.

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{V_A^2}{2} = \frac{p_B}{\rho} + \frac{V_B^2}{2} \quad (4)$$

2.6 Obtékání kol automobilu, Magnusův jev

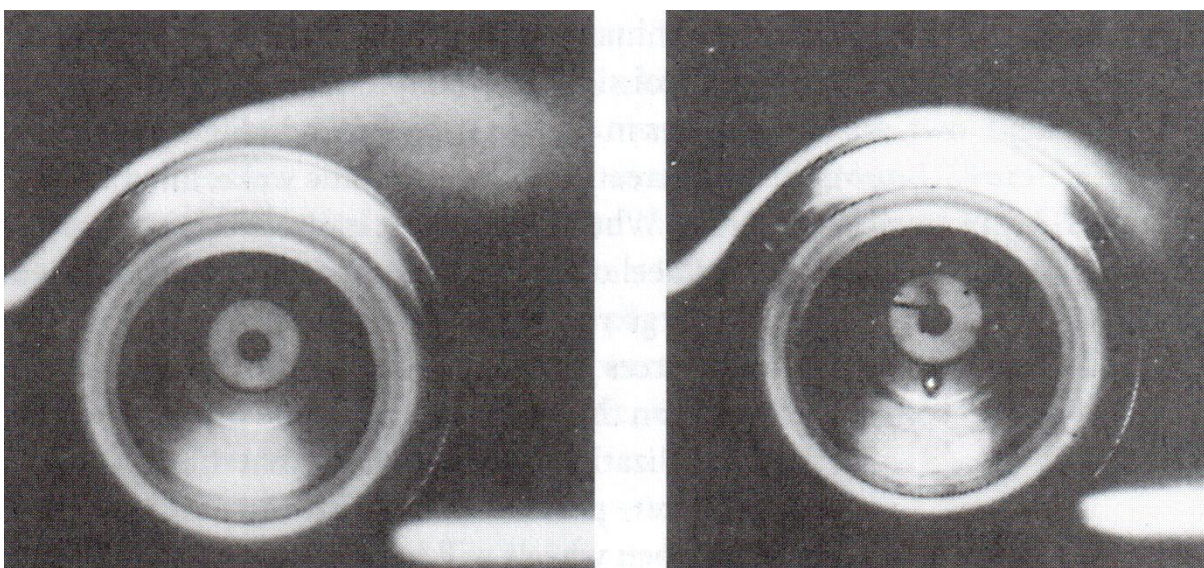
Kola automobilu jsou jeden z důležitých prvků ovlivňující celkovou aerodynamiku vozidla, obzvláště pak u závodního automobilu formulového typu s nekrytými koly. Je potřeba rozlišovat obtékání rotujících kol a kol stacionárních. Podle tohoto parametru lze rozlišovat i aerodynamické tunely, kde se povětšinou rotující kola zanedbávají. Takováto měření jsou pak zatížena určitou chybou. Moderní aerodynamické tunely jsou však schopny měření aerodynamických zatížení automobilů s rotujícími koly. Roztočení kol zajišťují válce buď se zámky proti vyskočení pneumatiky (obdobný systém jako válcová zkušebna brzd), nebo pomocí rotujícího pásu, který nahrazuje vozovku. Pás je vyroben ze speciálního materiálu a je odolný proti nabíjení statickou elektřinou.

Obtékání kol automobilu lze dobře popsat obtékáním válce. Největší vliv na rozložení tlaku na povrchu pneumatiky oproti dobře popsanému válci je přítomnost vozovky. Rozdíl mezi obtékáním válce ve volném prostoru a v blízkosti vozovky je znázorněn na obrázku 5.



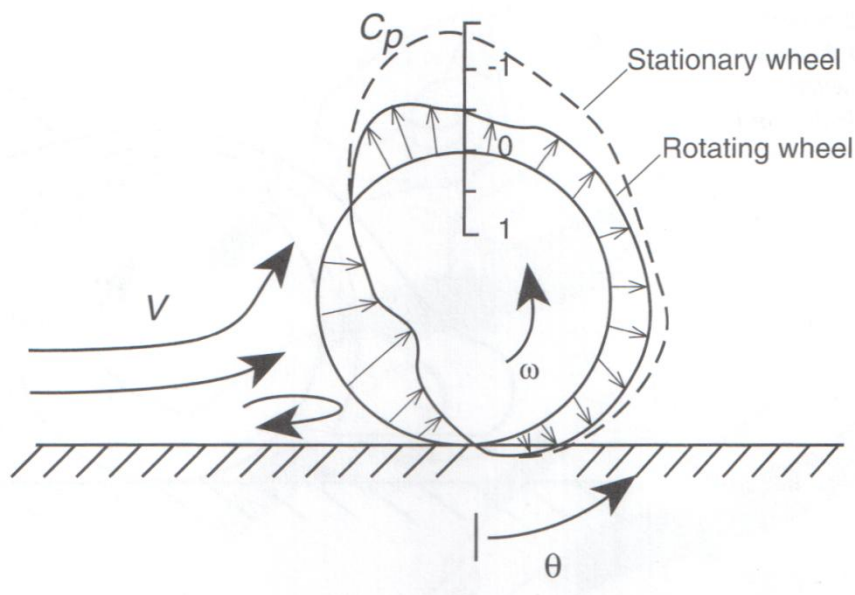
Obr. 5. Obtékání válce ve volném prostoru (vlevo) a v přítomnosti vozovky (vpravo) [1]

Rozhodujícím parametrem ovlivňující koeficient tlaku na povrchu kola, a tedy i koeficient vztlaku a odporu, je místo odtržení přilnutého proudění. Zatímco u stojícího kola dochází k odtržení volného proudu v místě úhlu $\theta \sim 160^\circ$ (znázorněno na obr. 7), u rotujícího kola se proud odtrhává dříve, tedy úhel θ je vyšší. Odtržení přilnutého proudění u stojícího a rotujícího kola s vozovkou je znázorněn na obrázku 6. Bod odtržení má vliv na celkové rozložení tlaku na povrchu kola, které je popsáno obrázkem 7.

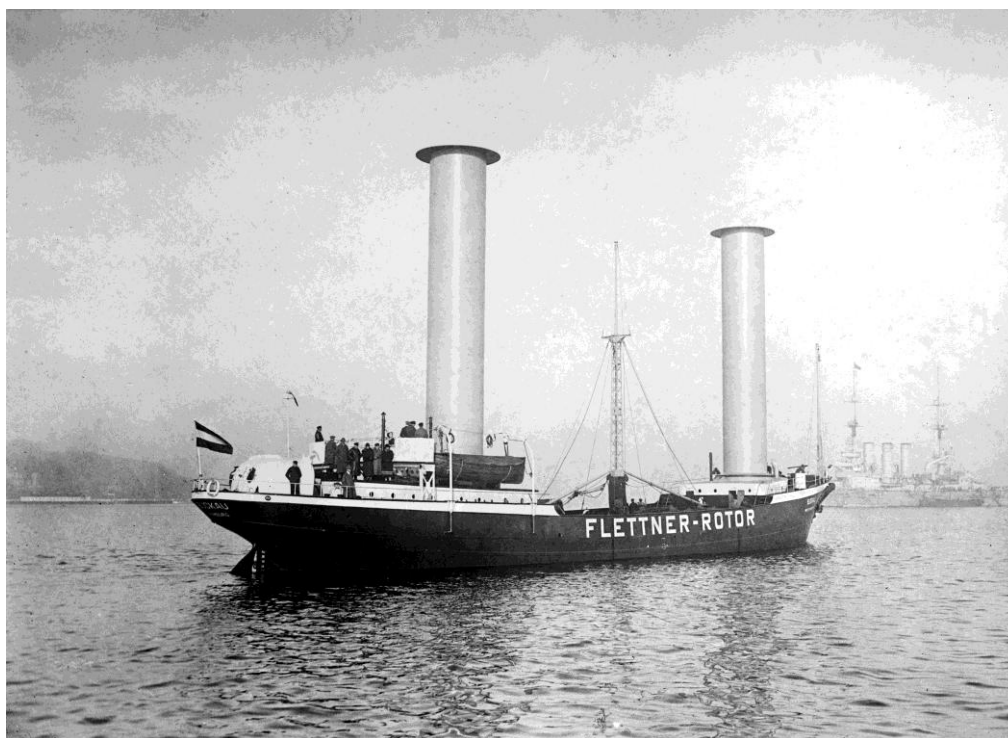


Obr. 6. Odtržení přilnutého proudění rotujícího (vlevo) a stojícího kola (vpravo) [1]

Záporná hodnota koeficientu tlaku stojícího kola na jeho horní straně způsobuje vztlak a na zadní straně zvyšuje odpor. U rotujícího kola dosahuje koeficient tlaku menších hodnot, na horní straně je dokonce kladný. Jev, kdy rotující válec způsobuje vztlak, v tomto případě přítlak, se nazývá Magnusův jev. Tento jev se využívá například k pohonu lodí (obr. 8), anebo napomáhá zakřiveným trajektoriím baseballových a golfových míčků.



Obr. 7. Rozložení tlaku na povrchu rotujícího a stojícího kola [1]

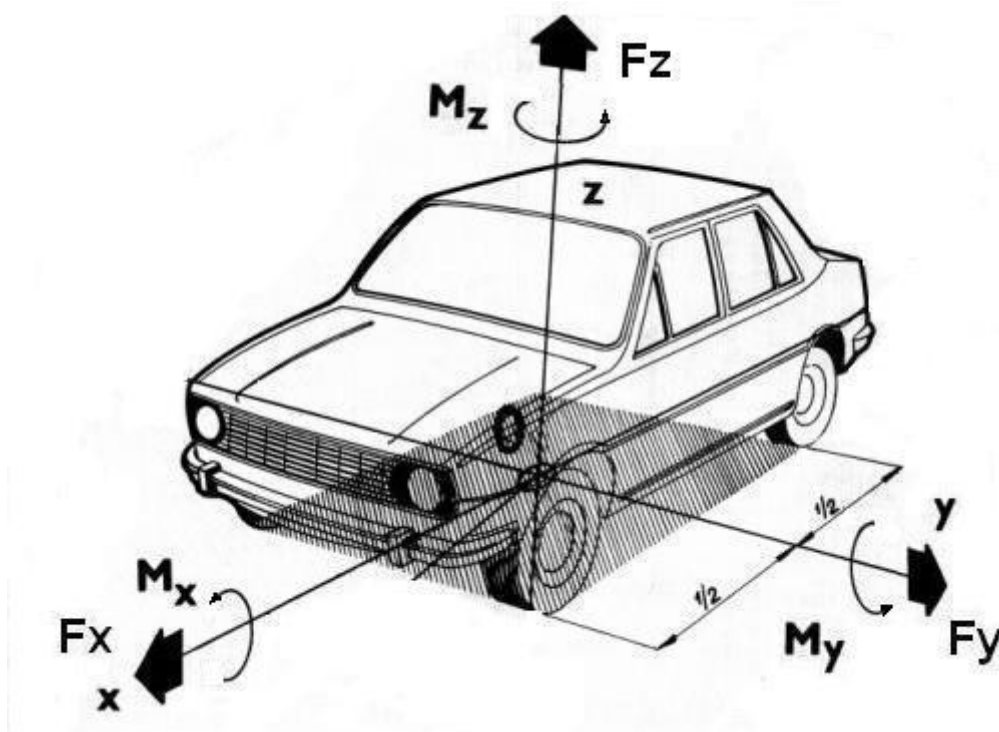


Obr. 8. Flettnerova pokusná loď – poháněna Flettnerovým rotorem využívající Magnusův jev, výška válců je 18 metrů [13]

2.7 Soustava aerodynamických sil a momentů

V předchozí kapitole byly popsány jednotlivé složky aerodynamického zatížení. Jednalo se o tlakovou a smykovou sílu. Celková aerodynamická síla má obecný směr a velikost. Pro posouzení jejího vlivu na zatížení vozidla je potřeba ji vhodně rozložit. Nejčastěji ji rozkládáme do směrů os souřadného systému vozidla, jehož střed leží v rovině symetrie vozu, v polovině rozvoru a v rovině na které stojí kola (viz. obr. 9). Jelikož nás zajímají velikosti aerodynamických sil vzhledem k těžišti, je nutné tyto síly přepočítat.

Na základě výše popsaného vztažného aerodynamického souřadného systému lze celkové aerodynamické účinky rozdělit do šesti složek, a to do tří silových a tří momentových. Silové složky jsou aerodynamický odpor působící proti ose X, aerodynamický vztlak působící v ose Z a aerodynamická boční síla působící v ose Y. Momentové složky se dělí na klopný, stáčivý a klonivý moment.



Obr. 9. Soustava aerodynamických sil a momentů [3]

Velikost aerodynamické síly je obecně úměrná druhé mocnině rychlosti relativního proudění, čelní ploše tělesa a bezrozměrnému součiniteli závislém na tvaru tělesa. Jednotlivé složky aerodynamické síly jsou dány vztahy, kde A představuje největší průřez čelní plochy vozidla:

$$\text{Aerodynamický odpor:} \quad F_x = -\frac{1}{2} \cdot c_x \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A \quad (5)$$

$$\text{Aerodynamický vztlak:} \quad F_z = \frac{1}{2} \cdot c_y \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A \quad (6)$$

$$\text{Aerodynamická boční síla:} \quad F_y = \frac{1}{2} \cdot c_z \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A \quad (7)$$

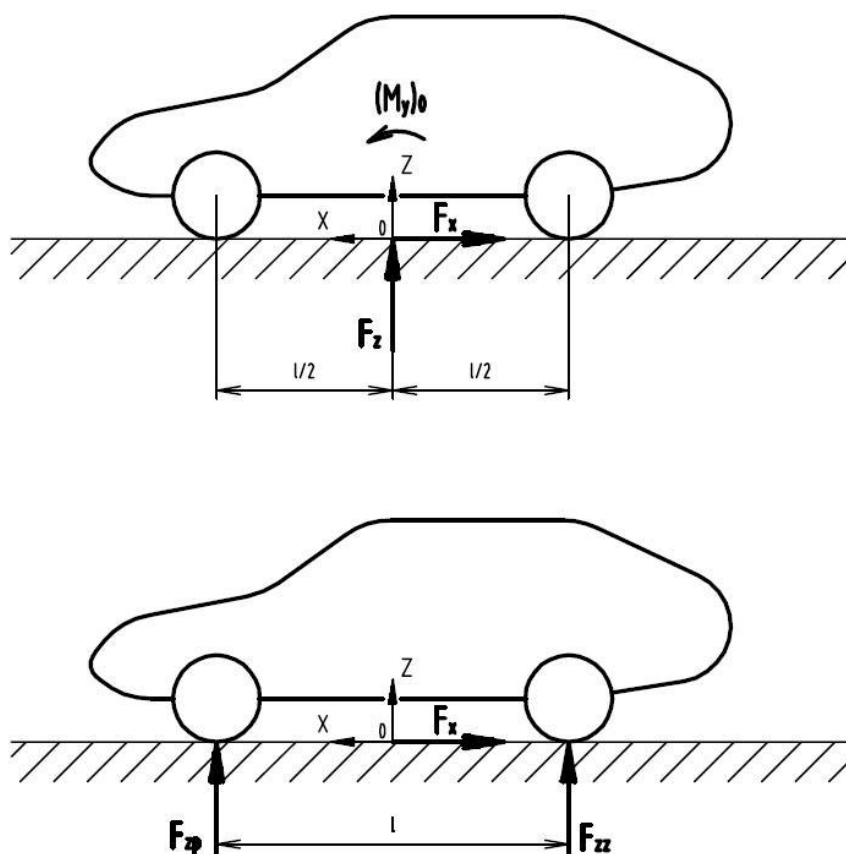
Jednotlivé složky aerodynamických momentů jsou dány vztahy, kde r je rozchod kol:

$$\text{Moment klonění:} \quad M_Y = \frac{1}{2} \cdot c_{MY} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A \cdot l \quad (8)$$

$$\text{Moment stáčení:} \quad M_Z = \frac{1}{2} \cdot c_{MZ} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A \cdot l \quad (9)$$

$$\text{Moment klopení:} \quad M_X = \frac{1}{2} \cdot c_{MX} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A \cdot r \quad (10)$$

Místo dvou aerodynamických sil a jednoho momentu můžeme zavést reakce na kolech, která přenášejí aerodynamické zatížení na vozovku. Na obrázku číslo 10 je znázorněno silové nahrazení vztlaku a momentu klonění.



Obr. 10. Silová náhrada vztlakové síly a momentu klonění reakcemi v místech styku kol s vozovkou

Pro jednotlivé složky reakcí aerodynamického zatížení vztlaku a momentu klonění v kolech platí:

Vztlaková síla na přední nápravě:
$$F_{zp} = \frac{F_z}{2} - \frac{(M_y)_0}{l} \quad (11)$$

Vztlaková síla na zadní nápravě:
$$F_{zz} = \frac{F_z}{2} + \frac{(M_y)_0}{l} \quad (12)$$

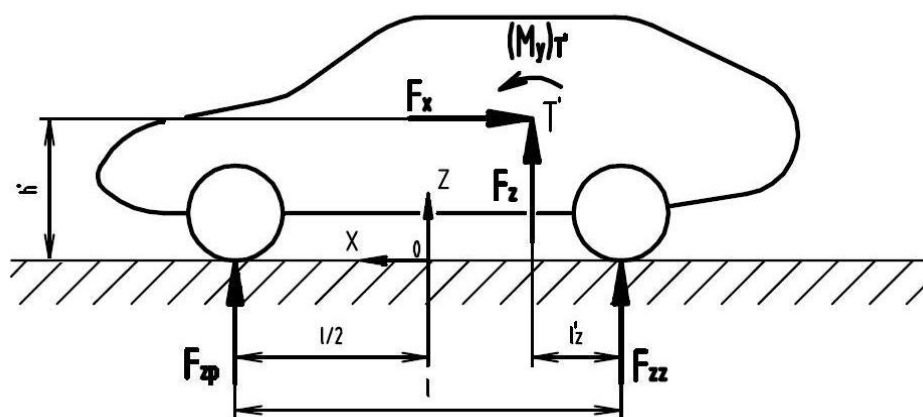
Pro celkovou velikost reakcí v kolech od aerodynamického zatížení je potřeba do rovnic dosadit moment klonění vzhledem k souřadnému systému polohy těžiště. Podle obrázku číslo 11 platí:

Moment klonění v těžišti:
$$(M_y)_{T'} = M_y + F_x \cdot h' - F_z \left(\frac{l}{2} - l'_z \right) \quad (13)$$

Pro celkovou velikost vztlakových sil pak platí:

Celková vztlaková síla na přední nápravě:
$$F_{zp} = F_z \frac{l'_z}{l} + F_x \frac{h'}{l} - \frac{(M_y)_{T'}}{l} \quad (14)$$

Celková vztlaková síla na zadní nápravě:
$$F_{zz} = F_z \frac{l - l'_z}{l} + F_x \frac{h'}{l} + \frac{(M_y)_{T'}}{l} \quad (15)$$



Obr. 11. Celkové zatížení vozidla aerodynamickými silami

V rámci zjednodušení budeme dále uvažovat pouze aerodynamickou odporovou sílu působící proti ose X a přítlak působící proti ose Z, jejichž působíště leží v těžišti, a jim příslušný moment klonění.

Jednotlivým složkám aerodynamické síly lze přiřadit jejich koeficienty, které jsou definovány jako:

$$c_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho \cdot V_\infty^2 A} \quad c_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho \cdot V_\infty^2 A} \quad (16)$$

2.8 Aerodynamika osobních a závodních vozidel

Základním rozdílem mezi aerodynamikou osobních a závodních vozidel jsou jejich hodnoty aerodynamické odporové síly a přítlaku. Zatímco u osobních vozidel se snažíme dosáhnout co nejmenších hodnot aerodynamické odporové síly z důvodu maximálního využití výkonu motoru a tudíž i menší spotřeby paliva, u závodních vozidel se snažíme dosáhnout co nejrychlejších časů na kolo, což úzce souvisí s jízdními vlastnostmi vozu, především průjezdem zatáčky. Pokud vozidlo projíždí zatáčkou, působí na něj v místě styku pneumatiky s vozovkou třecí síla, která je reakcí síly odstředivé působící v těžišti a je úměrná velikosti normálové síly. Abychom mohli projet zatáčkou rychleji, potřebujeme přitížit nápravy vozidla. Zvyšování hmotnosti vozidla je samozřejmě nežádoucí, jelikož nám narůstají setrvačné síly. Použití aerodynamických prvků zvyšuje přítlak, a tedy přitěžuje nápravy bez navýšení hmotnosti vozu, obvykle za cenu navýšení aerodynamické odporové síly.

U prvních závodních vozidel, které již byly konstruovány s ohledem vlivu aerodynamiky v jízdních vlastnostech, se konstruktéři snažili pouze snížit aerodynamickou odporovou sílu, což lze názorně vidět na voze Ferrari 500 F2 obr. 12 se kterým Alberto Ascari získal titul mistra světa v letech 1952 a 1953.



Obr. 12. Ferrari 500 F2, vlevo Alberto Ascari, mistr světa v letech 1952 a 1953

K největšímu rozmachu využití poznatků z oboru aerodynamiky v oblasti závodních vozidel dochází v 70. letech minulého století, kdy přítomnost přídatných aerodynamických prvků v podobě křidel byla již samozřejmostí. V roce 1977 byl poprvé použit obrácený profil předního křídla ve spojitosti s blízkostí vozovky (ground effect) a boční lišty urychlující proudění pod vozidlem, což mělo za následek razantní zvýšení přítlaku. Jednalo se o vozidlo Lotus Type 78 F1, s jehož modifikací Lotus Type 79 F1 o rok později vyhrál Mario Andretti světový šampionát vozů F1.



Obr. 13. Lotus Type 78 F1 s postraními pohyblivými lištami [14]

Mezi další zajímavost ve vývoji aerodynamiky F1 patří bezpochyby použití silného ventilátoru, který způsoboval podtlak pod vozem. Do závodu F1 však tento vůz nikdy nenastoupil, a to z důvodu zákazu použití pohyblivých aerodynamických prvků. Ze stejného důvodu se přestaly používat pohyblivé boční lišty.



Obr. 14. Brabham – Alfa Romeo BT46B [14]

3. Modelované vozidlo

Pro tuto diplomovou práci byla zvolena formule Ford 1600, kterou má k dispozici Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Jedná se o vozidlo z 80. let bez přidavných aerodynamických prvků s motorem z vozidla Ford Escort o obsahu 1600 cm³ a čtyřstupňovou bezsynchronní převodovkou značky Hewland.



Obr. 15. Modelované vozidlo Formule Ford 1600

3.1 3D scanner ATOS

3D skenery jsou zařízení sloužící k digitalizaci reálných objektů, měření a reverznímu inženýrství. Technologie různých skenerů se velmi liší, jejich možnosti mají různé technické i ekonomické limity. Mezi nejjednodušší a nejlevnější se řadí skenery dotykové, které jsou značně omezené rozměry reálného objektu, a to jak jeho případnou mohutností, nebo naopak drobnými detaily. Další skupinu tvoří skenery bezdotykové, které se dále dělí na aktivní a pasivní. Aktivní, ekonomicky náročnější jak pořizovací cenou, tak i náklady na provoz, pracují na principu triangulace. Naopak pasivní skenery pracující na principu stereoskopie jsou podstatně levnější. Jejich hlavní nevýhodou je především citlivost na intenzitu okolního světla, odlesky povrchu a u starších modelů také na barvu povrchu.

ATOS I je mobilní bezdotykový aktivní optický 3D skener firmy GOM. Základním principem tohoto bezdotykového skeneru je využití triangulace. Aktivní 3D skenery vyžadují dvě kamery snímající tutéž scénu. Vzdálenosti jednotlivých bodů jsou získávány porovnáváním rozdílů mezi obrazy jednotlivých kamer.

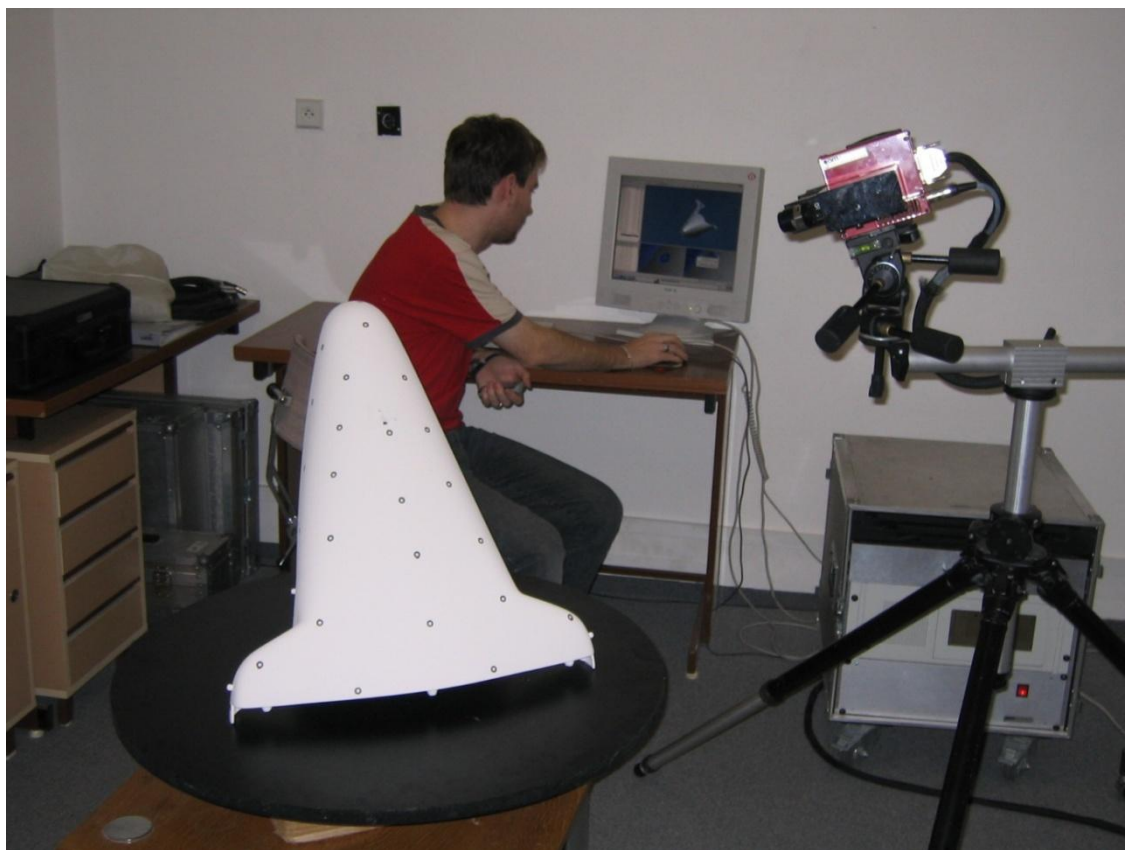
3.2 Příprava kapotáže pro scanner ATOS I

Jelikož skener ATOS I, který byl použit pro snímání povrchů reálného vozu, dokáže skenovat jen bílé plochy, je nejdříve potřeba povrch kapotáže nastříkat bílou barvou. K tomuto účelu lze použít speciální sprej, který je však pro velké plochy ekonomicky nevýhodný. Jako vhodné řešení se ukázalo použití směsi plavené křídý s denaturovaným lihem nanášeným lakýrnickou pistolí. Poměr plavené křídý a lihu je pro tento typ nanášení barvy 1:1. Před stříkáním je nutné povrchy karoserie kvalitně odmastit, povrchové pukliny nasáklé mastnotami je vhodné přelepit lakýrnickou páskou. Výhoda směsi lihu s plavenou křídou je především její cena a také snadná omyvatelnost.

Dalším krokem nutným pro použití skeneru ATOS je nalepení referenčních bodů. Jedná se o samolepící černobílé kruhové štítky. Místo, kam chceme bod nalepit, musíme nejdříve očistit od křídý. Vzdálenosti mezi jednotlivými body by měla být 15 – 20 cm pro použitý největší objektiv.

3.3 Snímání povrchů

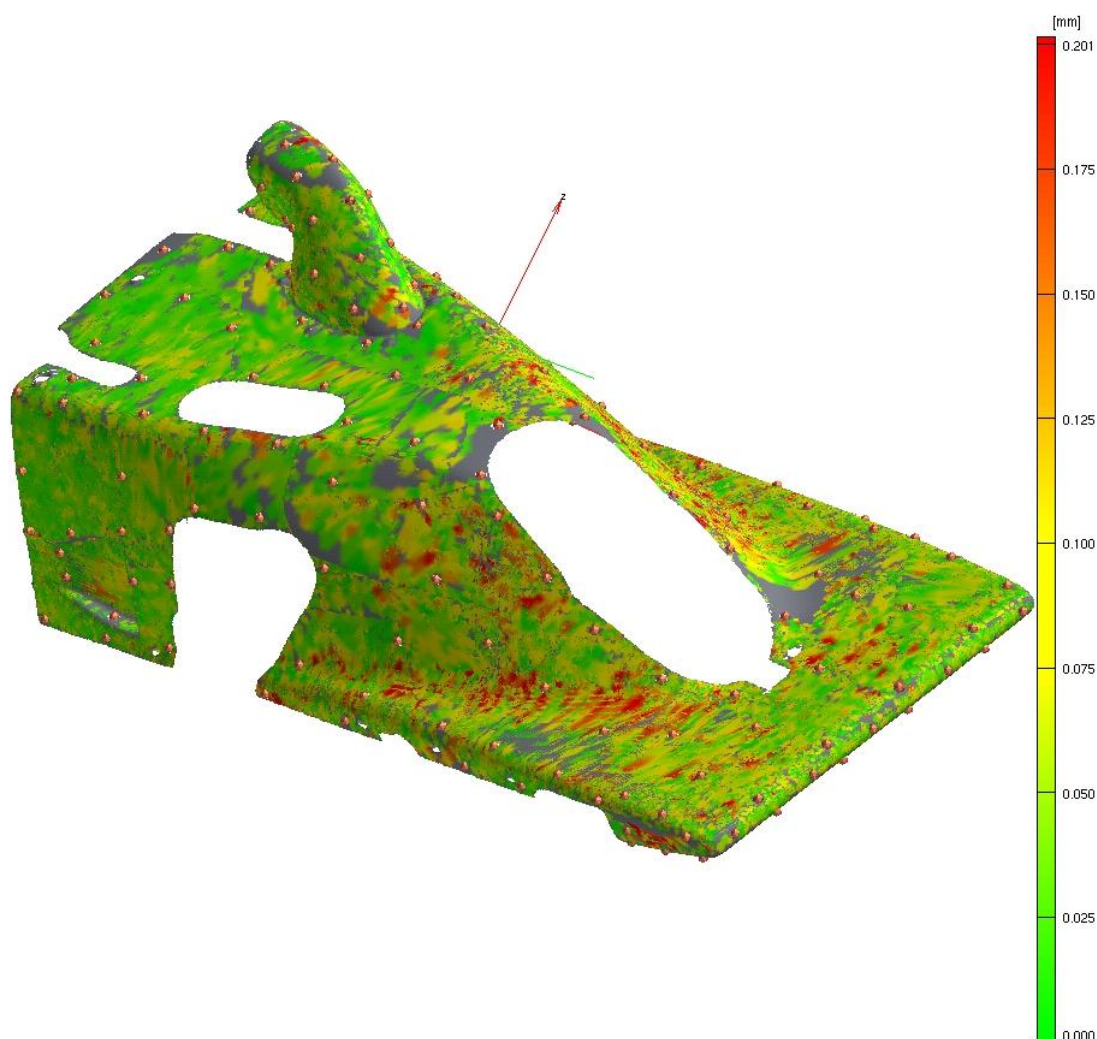
Vlastní snímání povrchů má několik pravidel. Před prvním použitím skeneru je nejdříve potřeba celé zařízení kalibrovat. K tomu slouží kalibrační desky pro jednotlivé kombinace objektivů a kamer. Pro snímání všech ploch byly použity kamery s ohniskovou vzdáleností 17mm a projektor s ohniskovou vzdáleností 35mm. Úhel kamer skeneru ATOS I je 30° a snímací vzdálenost 75cm. Před kalibrací je vhodné zaostřit obě kamery a nastavit světelnou citlivost na podmínky v místnosti kde se bude skenovat. První scan by měl obsahovat co nejvíce bodů, každý další následující minimálně 4, z toho 3 z předešlých měření.



Obr. 16. 3D skener ATOS s výpočetní stanicí v pozadí, skenovaná špice Formule Ford

Celý proces skenování spočívá v promítání a současného snímání černobílého rastru na povrch snímaného tělesa. Poté připojená stanice vyhodnotí získaný záznam, a provede výpočet polohy bodů a tvaru povrchu. U každého měření se zobrazuje jeho chyba. Obecně platí, čím více bodů se nám podaří sejmout, tím je scan kvalitnější. Pokud stanice nerozpozná dostatečné množství bodů, je možné je přiřadit manuálně, avšak pouze pokud nejsou tyto body již příliš eliptické.

Po oskenování celého tělesa stanice přiřadí plochám návaznost a vyhodnotí celkovou přesnost součásti, kterou lze zobrazit v barevném spektru. Výsledná data lze exportovat ve formátu stl, nebo lze provést řezy geometrií, a ty poté exportovat ve formátu iges.



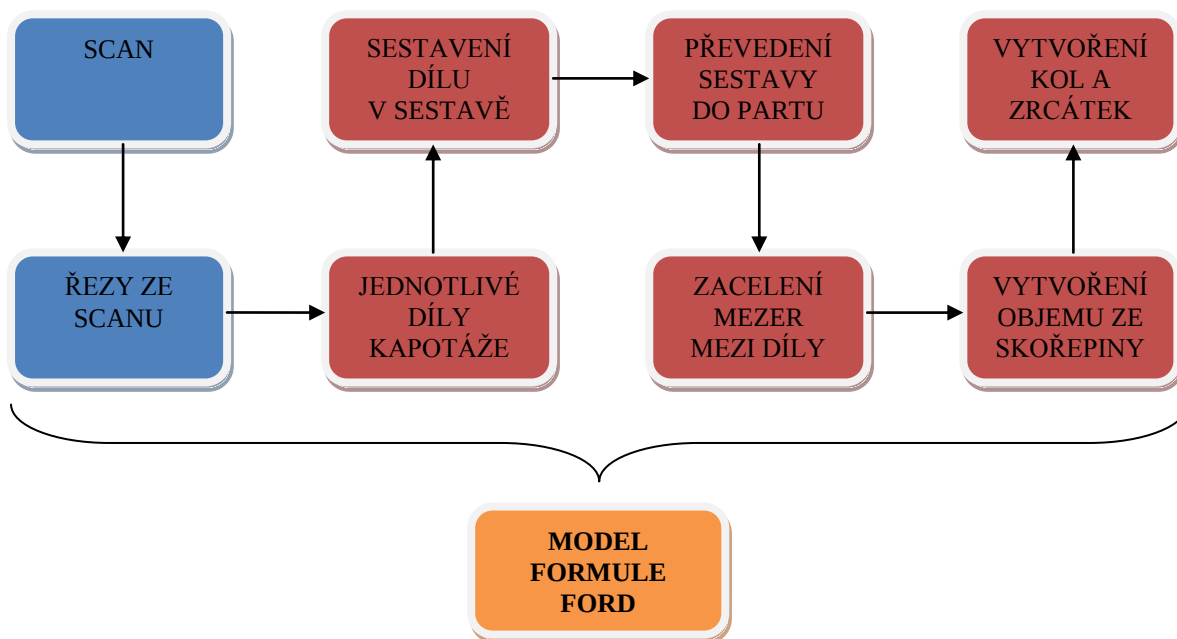
Obr. 17. Znáznornění přesnosti a návaznosti jednotlivých scanů, červená barva udává největší odchylky

4. Tvorba modelu v prostředí softwaru Pro Engineer WF3

Pro vytvoření celkového modelu karoserie z jednotlivých částí bylo využito částečné podélné symetrie vozidla, to znamená, že stačilo vytvořit pouze polovinu vozidla a ta byla následně zrcadlena.

Jednotlivé díly byly vkládány jako součásti do sestavy tak, jak to umožňuje program Pro Engineer WF 3. Důležitým prvkem je vytvoření orientovaného souřadného systému, který definuje směry posuvu a otáčení součástí při vkládání a skládání k sobě navzájem. Tento souřadný systém by měl být volen jako hlavní souřadný systém, který bude exportován do softwaru pro výpočet proudění

Zde se ukázalo jako méně vhodná metoda skenování jednotlivých dílů karoserie a jejich následné skládání až v modelovacím programu. Díly, které jsou na vozidle namontovány, jsou následně deformovány rámem vozu a různými systémy uchycení na rám vozidla. Tyto nepřesnosti byly následně odstraněny drobnými úpravami dílů v programu Pro Engineer s přihlédnutím ke skutečným rozměrům a tvarům sestavené karoserie.



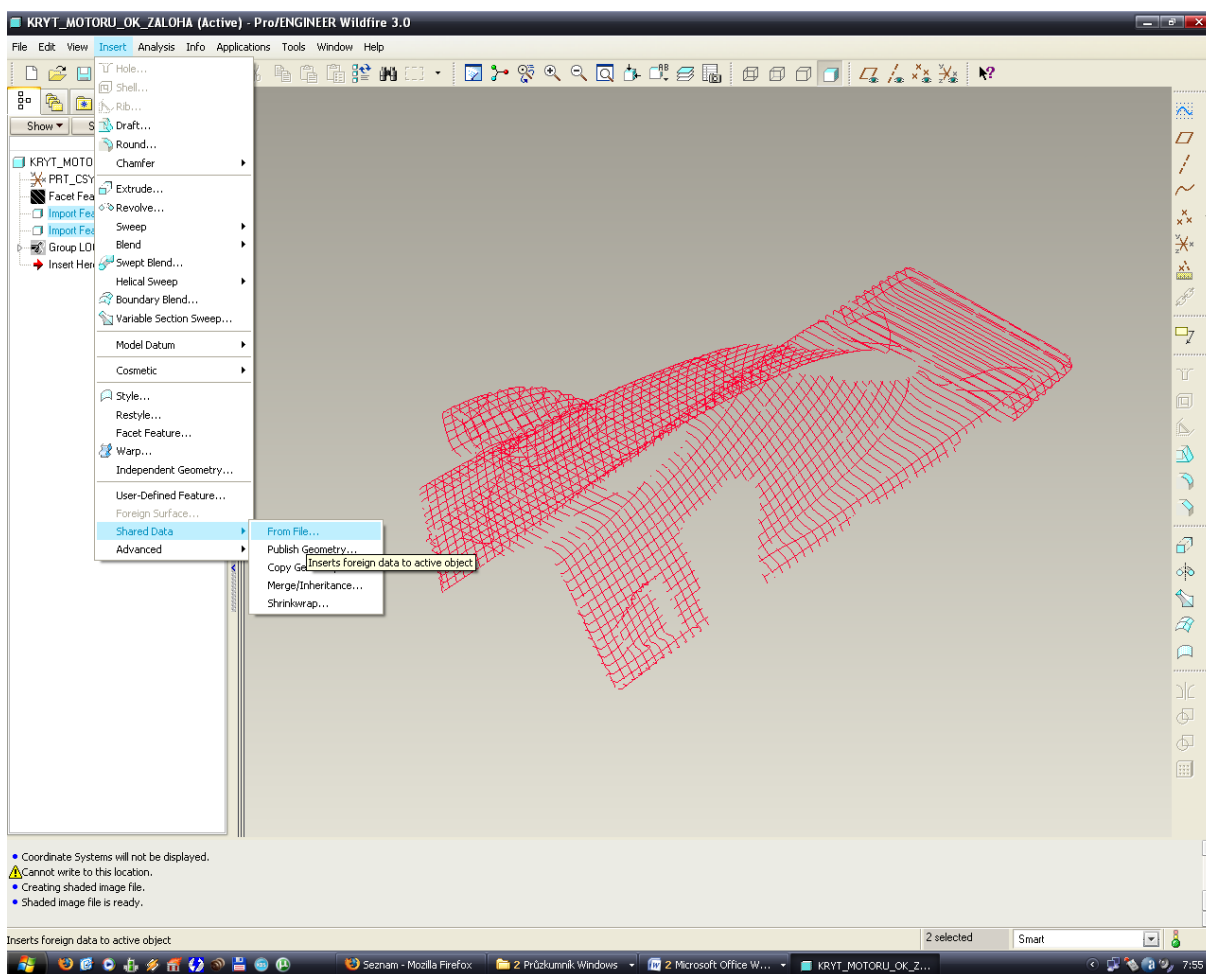
Obr. 18. Schematický postup tvorby CAD modelu z reálného vozu

4.1 Import řezů z formátu STL

Pro vytvoření modelu byla použita metoda sestavení ploch pomocí řezů získaných z naskenované geometrie. Řezy se vytvářejí pomocí příkazu *Plane parallel section* v příkazovém panelu *Section*, a lze je exportovat ve formátu iges, čehož bylo využito. Při exportu je vhodné zvolit si souřadný systém, se kterým se bude následně dobře pracovat v prostředí programu Pro Engineer. Řezy jednotlivými rovinami exportujeme zvlášť z důvodu lepší přehlednosti.

Vlastní import řezů je základním stavebním kamenem každého dílu modelovaného vozidla. Provádí se založením nového úlohy typu *Part* a následným použitím funkce *Insert -> Shared*

data -> From file. V zobrazeném okně zvolíme typ souboru iges a zadáme cestu k požadovanému souboru. Tento postup je třeba provést pro všechny řezy.



Obr. 19. Importované řezy z formátu igs v prostředí softwaru Pro Engineer

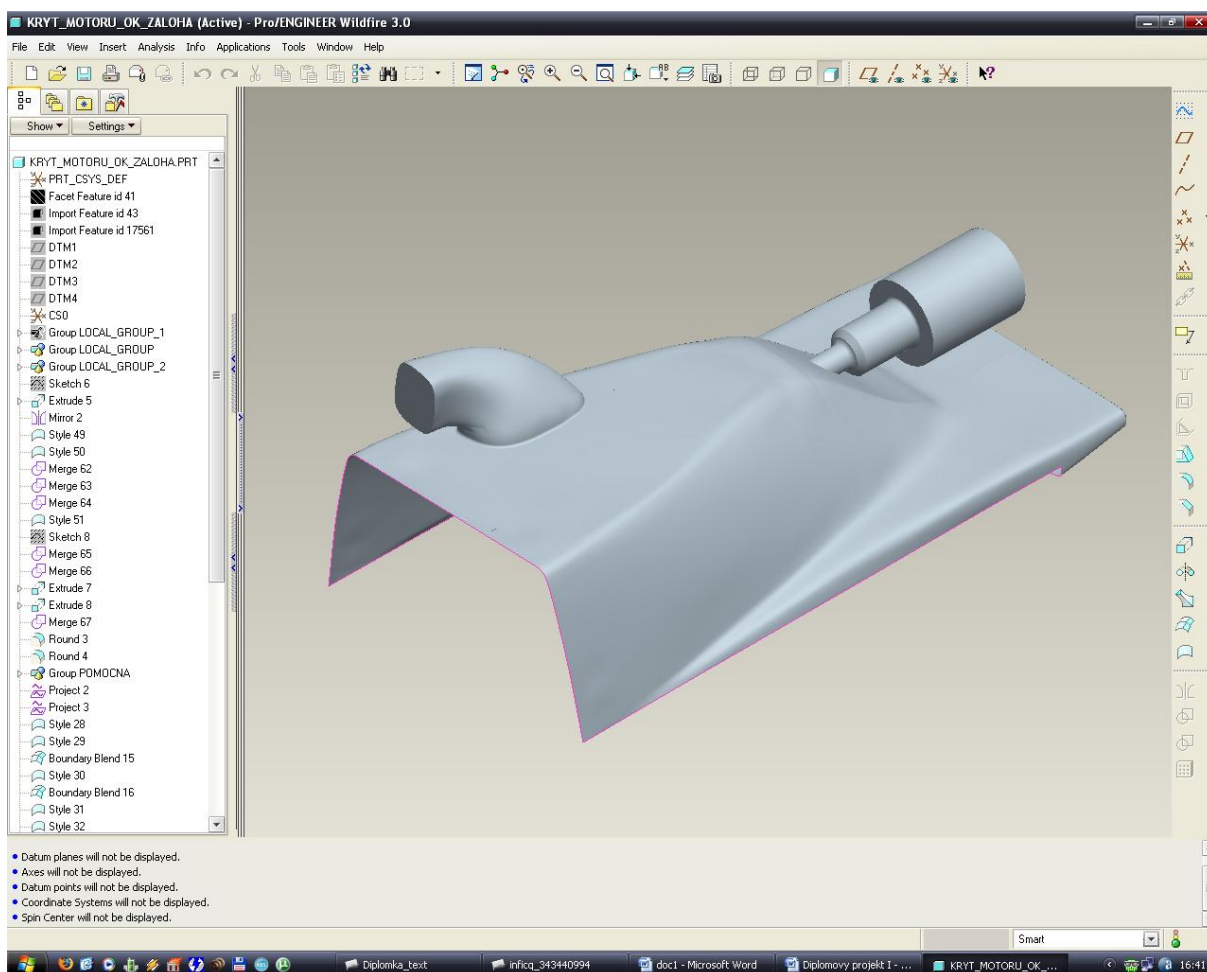
4.2 Tvorba ploch jednotlivých dílů

Jednotlivé díly kapotáže vozidla jsou tvořeny plochami, které vycházejí z importovaných řezů. Výhodou softwaru Pro Engineer je právě modul umožňující vytváření ploch pomocí křivek jiných formátů. Tento modul je zastoupen ikonou plochy v pravém panelu.

Pro vytvoření plochy je nejdříve nutné nadefinovat její hranice a pomocné křivky, což se provádí příkazem *Create curves*. Přidržením klávesy shift se pak kurzor při výběru drží importovaných křivek. Vytvořené křivky lze později editovat funkcí *Edit curves*. Hranice ploch musí být tvořena vždy čtyřmi křivkami, přičemž musí tvořit uzavřený obrazec. Pomocné křivky je vhodné přidávat v blízkosti rádiusů, v místě sblížování hraničních křivek a na místech vzniku velkých ploch.

Vlastní plochu lze vytvořit dvěma způsoby, mezi nimiž jsem neshledal mnoho rozdílů. První z nich je *Create surface from boundary curves*, která je součástí příkazů modulu *Style*. Nejdříve je nutné vybrat hraniční křivky, a potom řídicí křivky. Druhá možnost je *Boundary blent tool*, která je mnohem méně náročná na operační paměť a dokáže vytvořit plochy

z hranice se třemi křivkami. Plochy vytvořené oběma nástroji jsou zcela kompatibilní a lze je dále navzájem upravovat, ořezávat a slučovat.



Obr. 20. Výsledná plocha části kapotáže se sáním a výfukem formule Ford

4.3 Sestavení objemového modelu

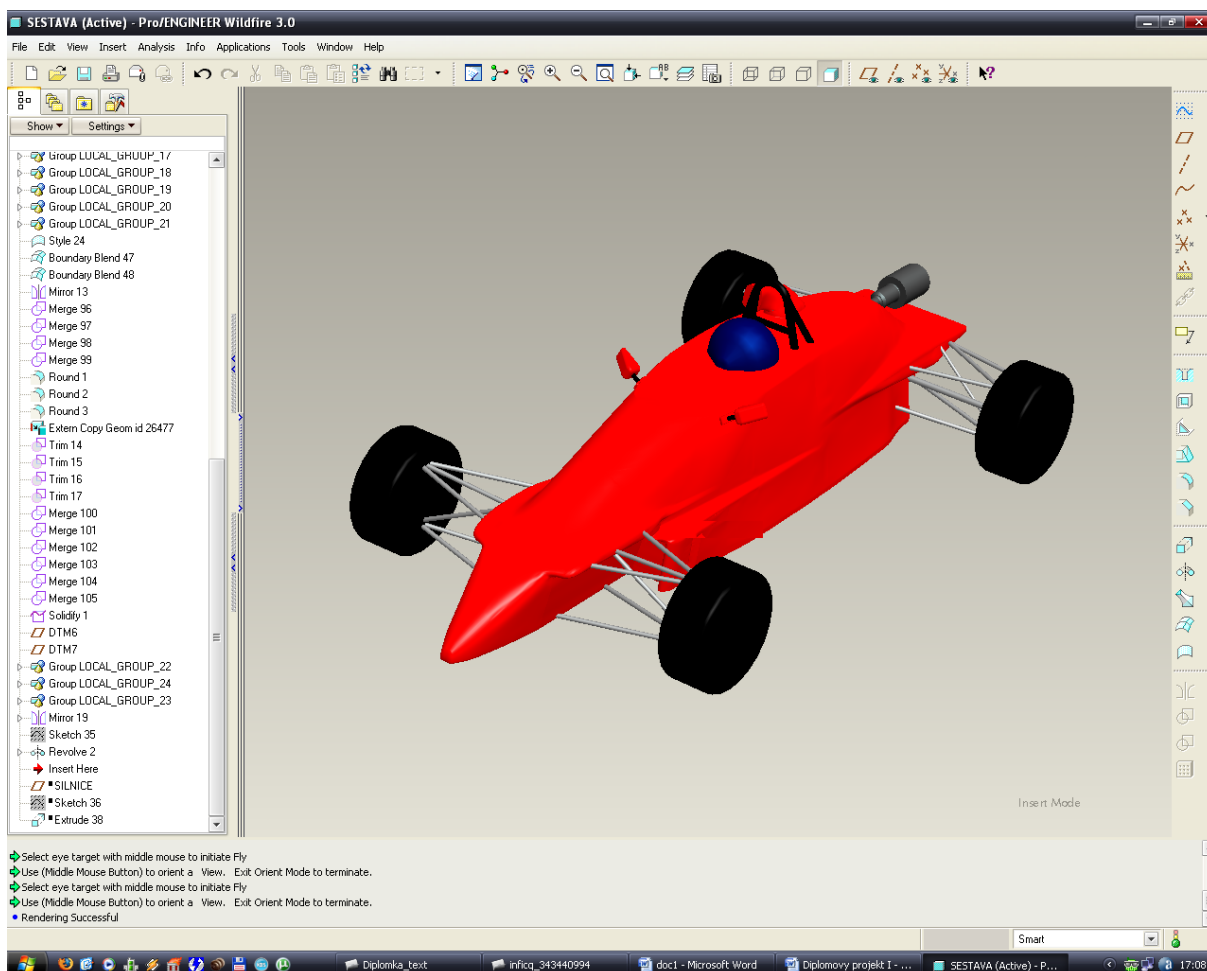
Sestavení celkového modelu lze rozdělit do dvou částí. První zahrnuje vytvoření sestavy z jednotlivých dílů, druhá pak zacelení mezer a modelování kol, náprav a dalších objemových prvků.

Založení sestavy se provádí obdobně jako založení nového dílu, tedy *File* → *New* → *Assembly*. První vložený díl karosérie by měl mít vhodně definovaný souřadný systém. V této práci byl jako základní díl použil kryt motoru, jehož souřadný systém se stal celkovým souřadným systémem celého modelu. Vložení jednotlivých prvků karosérie se provádí funkcí *Insert* → *Component*. Aby bylo možné zajistit následné úpravy modelu, především vytvoření dalších objemových dílů, je nutné celou sestavu modelu převést do prostředí *Part*. K tomu slouží nástroj *Copy Geometry* v nabídce panelu *Insert* → *Shared data*. Je vhodné zrušit zatržení *Publish geometry only*, čímž se zbavíme nežádoucí vazby mezi modelem v sestavě a novým modelem vozu v prostředí dílu.

Pro export modelu vozidla do programu pro výpočet proudění a pro vytvoření dalších částí vozu, jejichž geometrie nebyla získána pomocí 3D skeneru, je vhodný objemový model. Aby

bylo možné takový model vytvořit, je nutné veškeré plochy nejdříve spojit funkcí *Merge*. Důležité je mít zvolenou podmínku *Intersect*, podmínka *Joint* neořízne přesahující plochy a mohou vzniknout štěrbiny, které zabrání vytvoření objemu. Jako vhodným nástrojem se ukázalo použití vykreslení volných hran *View* → *Display Settings* → *Model Display* → *Shade* → *With Edges*. Správně uzavřený model by neměl mít žádné volné hrany. Poté stačí funkcí *Solidify* v záložce *Edit* vytvořit vlastní objem.

Pro vytvoření kol a ramen náprav bylo použito základních funkcí objemového modelování. Jako problematické se ukázalo protnutí více ramen v jednom bodě, který náležel povrchu modelu vytvořeného z ploch. Z tohoto důvodu se ramena modelu neprotínají v jednom bodě, ale jejich osy jsou posunuty o více, než je průměr ramen. Převodovka vozidla byla nahrazena kvádrem se zaoblenými hranami, podobně jako zpětná zrcátka složená z ořezaného a zaobleného kvádrů, připojená válcem. Záhlavní rám byl použit z modelu rámu, který byl vypracován samostatně v rámci jiné práce.



Obr. 21. Finální podoba CAD modelu bez přidavných aerodynamických prvků

Export modelu se provádí do pracovního adresáře pomocí volby *File* → *Save a Copy*, v záložce *Type* vybereme požadovaný formát. Při exportu do formátu IGES vybereme vždy položku *Solids*. Tak zbavíme model případných pomocných ploch, které vznikly při plošném modelování a nijak se nepodílí na objemu modelu.

5. Vytvoření CFD modelu

V této práci jsou řešeny čtyři různé varianty modelu, jedna z nich s tvarovými úpravami. V následující části jsou však řešeny modely bez přídavných aerodynamických prvků s různým nastavením okrajových podmínek, konkrétně kombinace rotujících a stojících kol s průchozím a neprůchozím sáním a chlazením. Pro lepší přehlednost jsou názvy modelu s jejich okrajovými podmínkami uvedeny v tabulce 2.

Název modelu	Rotující kola	Průchodné chlazení a sání
Formule Ford All ON	ANO	ANO
Formule Ford Kola ON	ANO	NE
Formule Ford Sání, chlazení ON	NE	ANO
Formule Ford s přídavnými aerodynamickými prvky	ANO	ANO

Tab. 2. Názvy CFD modelů s jejich nastavením okrajových podmínek

5.1 Přehled současných CFD softwarů

Současné CFD softwary lze rozdělit do dvou skupin. První z nich jsou softwary komerční. Jedná se o produkty renomovaných firem, které nabízejí komplexní řešení s možností dokoupení modulů pro specifické úlohy. Do této oblasti patří:

- Fluent – nejrozšířenější a nejznámější CFD software
- CFX – produkt z balíku Ansys
- Star CD / CCM+ – produkty společnosti Adapco
- CFDDesign – jednoduchý intuitivní CFD software

Druhou skupinu software tvoří free produkty pod licencí GNU. Jsou to plnohodnotné programy, které mohou bez problémů konkurovat komerčním produktům. Jejich největší výhodou je ekonomické hledisko v podobě nulových pořizovacích nákladů. Nevýhodou pak složitější instalace a vyšší nároky na uživatele. Do této skupiny patří:

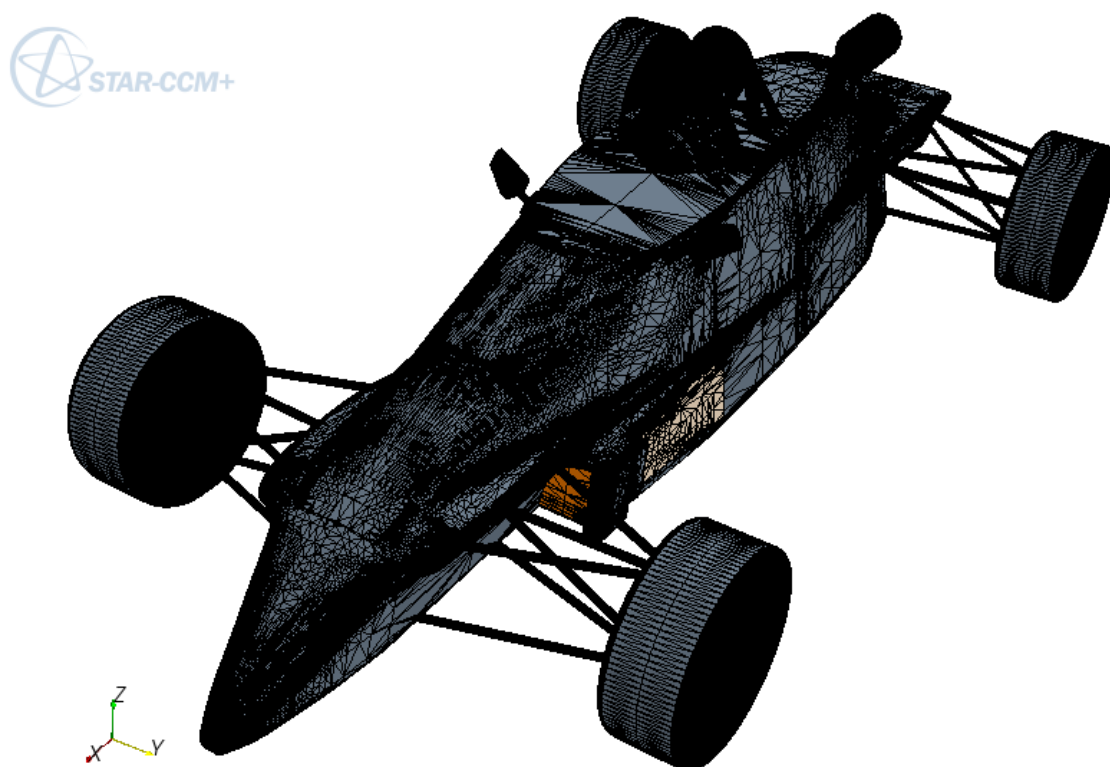
- Open Foam
- PAB3D Software
- Mouser
- Overture

Pro vytvoření CFD modelu byl použit software Adapco STAR CCM+, který své úlohy ukládá do souboru *.sim. Umožňuje taktéž export úloh do souboru *.ccm, který používá software stejného výrobce STAR CD. Export do formátu *.ccm je možný až po vytvoření objemové sítě. Je potřeba si uvědomit, že Adapco STAR CCM+ není vybaven téměř žádným modelářským nástrojem, proto importovaný model musí být konečným modelem pro požadovaný výpočet. Program umí importovat širokou škálu datových formátů. V úvahu připadali především formáty *.stl a *.igs. Jako výhodným se nakonec ukázal formát IGES, STL lze sice bez problému importovat, ale následná úprava sítě vždy vedla k neočekávanému konci programu z důvodu nedostatku operační paměti.

5.2 Import ploch z objemového modelu

Import modelu se provádí buď jednoduchou volbou z menu *File -> Import Surface*, nebo pomocí ikony trojúhelníku v panelu nástrojů. Z nabídky možností importu je vhodné vybrat záložku *One boundary for all faces*.

Síť načteného modelu lze zobrazit z nabídky *Outline* zatržením položky *Mesh*. V záložce *Representation* lze přepínat mezi zobrazením načtené sítě (volba *Import*) a sítě vygenerované (volba *Remeshed Surface/Volume Surface*).

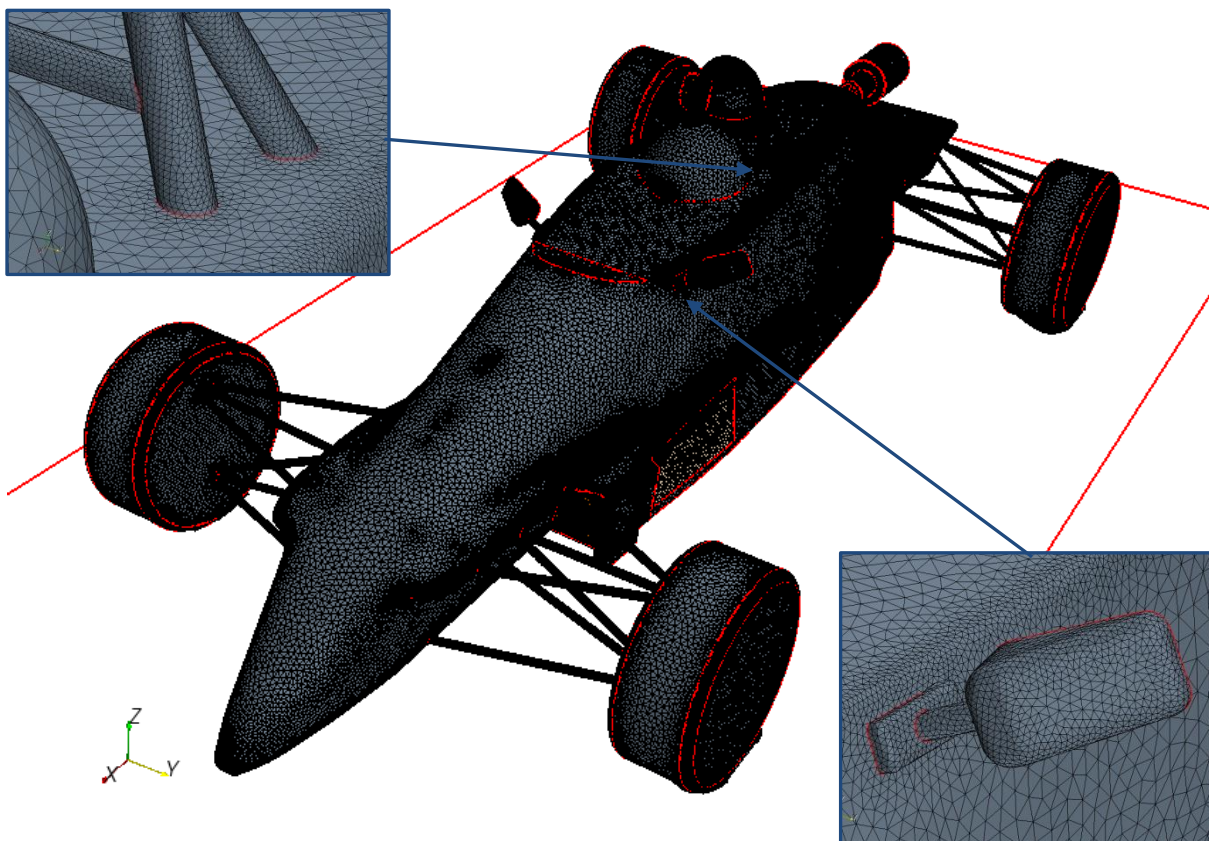


Obr. 22. Importovaná síť CFD modelu

5.3 Vytvoření hraničních křivek, nastavení povrchové sítě

Povrchová síť modelu se vytváří výběrem nástroje *Surface Remesher* z nabídky příkazového stromu *Continua* → *Mesh* → *Models*. Aby mohly být kvalitně vysítované ostré přechody z velkých ploch na mnohonásobně menší (např. přechod z kapotáže na rameno nápravy, z převodovky na poloosu apod.), musí být vytvořeny hraniční křivky. Ty se tvoří příkazem *Mark Edges* z nabídky *Regions* → *Body* → *Feature Curve* → *New Feature Curve*.

Tyto hranice se musí dále editovat a vybrat jen ty, které jsou potřeba. Pomocí nově vytvořených hranic se model rozdělí na jednotlivé plochy, pro které je třeba nadefinovat velikost elementů. Poté stačí spustit vlastní remesher.

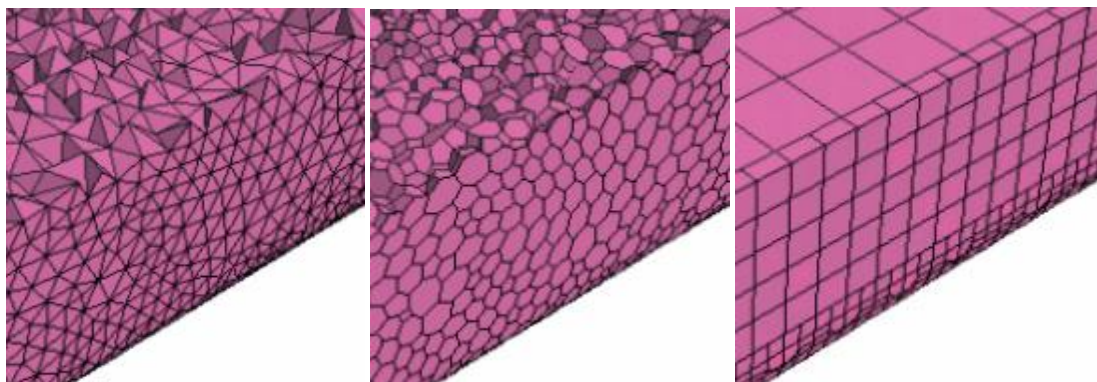


Obr. 23. Vytvořená povrchová síť CFD modelu formule Ford s hraničními křivkami a příslušnými detaily přechodu hustoty sítě

Velikost elementu se definuje pomocí hodnot základní velikosti *Base size* a minimální hodnoty *Minimum size*. Pro definování jemnější nebo hrubší sítě na menších plochách se vychází z procentuálních nebo absolutních hodnot *Base size* a *Minimum size*. Hodnota *Base size* je pro výpočet proudění modelu daných rozměrů 20 mm, *Minimum size* 5 mm. Na menších plochách (radiusy kol, výfuk, zrcátka, ramena ...) byla nastavena velikost prvku 25% *Base size* a 10 – 20% *Minimum size*.

5.4 Objemová síť

Objemová síť vychází ze sítě povrchové. Na výběr jsou *Tetrahedral mesher* tvořící tetrahedrální síť, *Polyhedral mesher*, který tvoří síť podobnou “kopacím míčům” a *Trimmed mesher*, tvořící hexahedrální síť. Výběr mesheru se provádí obdobně jako u mesheru plošné sítě, tedy z nabídky příkazového stromu.



Obr. 24. Jednotlivé objemové sítě softwaru Adapco Star CCM+

Z hlediska vybavení hardwarem je nejvhodnější polyhedrální síť. Tato síť vzniká stejně jako ostatní sítě ze sítě povrchové. Nejdříve je však vytvořena tetrahedrální síť a následným slučováním její buněk vzniká síť polyhedrální, čímž lze snížit výsledný počet buněk až o 80%. Tento typ sítě je lepší i z numerického hlediska, výpočty s touto sítí jsou stabilnější. V současné době je však polyhedrální síť mladá, proto ji některé výpočetní softwary nepodporují. Pro dosažení lepších výsledků výpočtu je vhodné rozdělit buňky objemové sítě v blízkosti povrchu formule do více vrstev. K tomu slouží nástroj *Prismatic Layer Mesher* v nabídce *Continua* → *Mesh* → *Models*. Dosáhne se tím lepších výsledků.

5.5 Rozměry tunelu, ředění objemové sítě

Základní rozměry tunely byly voleny s ohledem na celkový počet vzniklých buněk. Jako optimální varianta se ukázal tunel s rozměry:

Šířka: 15 m

Výška: 5,5 m

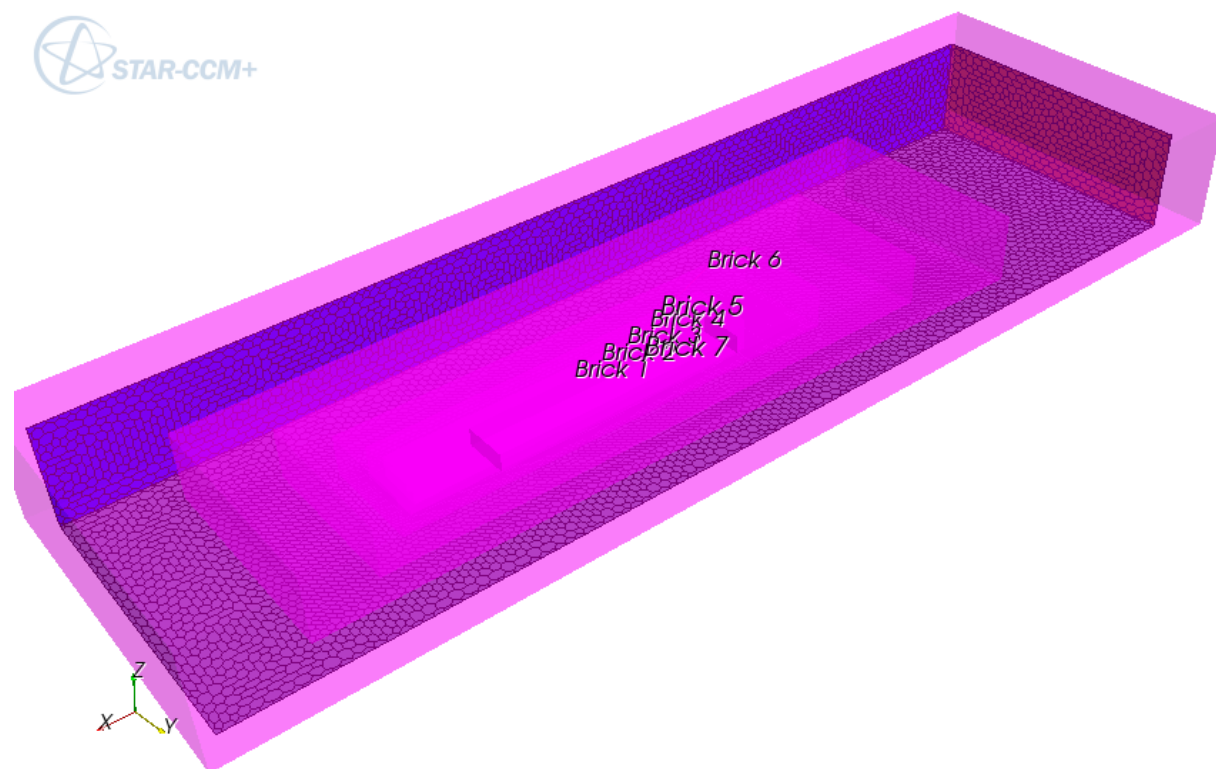
Délka: 55 m

Z celkové délky 55 m je 15 m před vozidlem a 40 metrů za vozidlem, myšleno od počátku souřadného systému importovaného modelu.

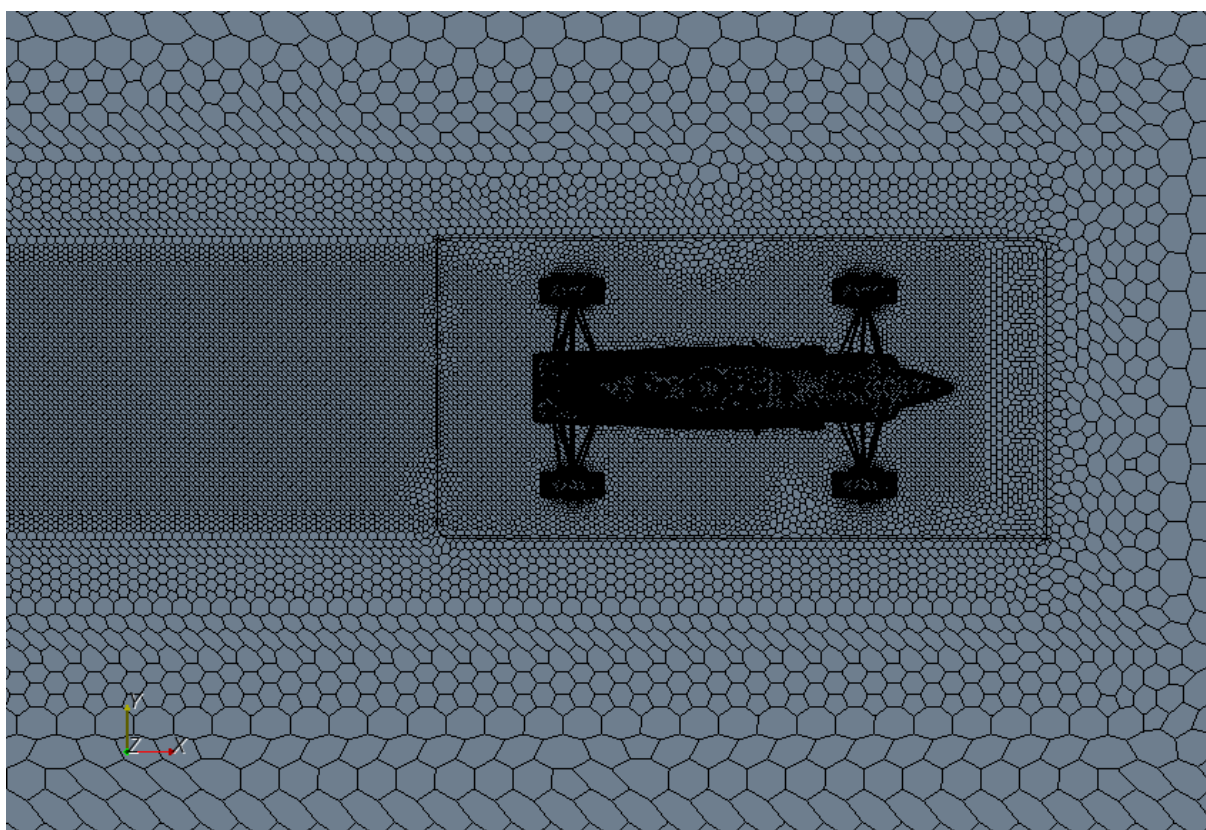
Z důvodu velkého množství buněk (cca 80 mil.) při těchto rozměrech tunelu bylo nutné provést ředění sítě. K tomu slouží nástroj pro vytváření oblastí, ve kterých lze měnit parametry sítě. Vzhledem ke tvaru tunelu byla použita série těles *Brick* z položky *Tools* → *Volume Shapes*. Vlastní nastavení parametrů sítě v nově vytvořených oblastech se provádí v menu *Continua* → *Mesh* → *Volume Sources*. Rozměry jednotlivých oblastí vzhledem k počátku souřadného systému a jim příslušné hodnoty velikosti elementu sítě jsou uvedeny v tabulce 3. Celkový počet buněk polyhedrální ředěné sítě klesl na cca 2 480 000.

Oblast	Souřadnice bodu 1 [m]			Souřadnice bodu 2 [m]			Velikost elementu [m]
	X	Y	Z	X	Y	Z	
Brick 1	-12,5	-1,2	-0,42	2,5	1,2	0,8	0,05
Brick 2	-16	-1,7	-0,42	3	1,7	1,3	0,1
Brick 3	-20	-2,7	-0,42	4	2,7	1,8	0,2
Brick 4	-25	-4,2	-0,42	6	4,2	2,3	0,4
Brick 5	-30	-5,7	-0,42	10	5,7	3,3	0,45
Brick 6	-42	-9	-0,42	16	9	6	0,5
Brick 7	-16	-1,25	-1	-2	1,25	0	0,08

Tab. 3. Rozměry a velikosti základního elementu oblastí pro ředění objemové sítě



Obr. 25. Oblasti pro ředění objemové sítě



Obr. 26. Nařaděná objemová síť v rovině vozovky

5.6 Nastavení fyzikálního modelu, vytvoření výpočetních senzorů

Nastavení fyzikálního modelu, v tomto případě proudícího vzduchu, se provádí přidáním položky *Physics continuum* z položky *Continua*. Vlastní nastavení je v položce *Physics* → *Models*. Jednotlivá nastavení fyzikálního modelu jsou uvedena v tabulce 4.

Space	Three Dimensional
Material	Gas
Optional Physics Models	Cell Quality Remediation
Flow	Coupled Flow
Motion	Stationary
Equation of State	Constant density
Time	Steady
Viscous Regime	Turbulent
Turbulence	Reynolds - Averaged Navier - Stokes
Reynolds - Averaged Turbulence	K-Omega Turbulence
K-Omega Turbulence	SST (Menter) K-Omega
K-Omega Wall Treatment	All y+ Wall Treatment

Tab. 4. Nastavení fyzikálního modelu

Nastavení okrajových podmínek se provádí ve stejném menu jako nastavení sítě jednotlivých ploch, tedy *Regions* → *Body 1* → *Boundaries*. Jednotlivé okrajové podmínky jsou uvedeny v tabulce 5.

	Okrajová podmínka	Hodnota okrajové podmínky
Tunel vstup	Velocity inlet	50 m/s
Tunel výstup	Pressure outlet	0 Pa
Silnice	Tangential velocity specification	Vector -50 m/s
Boky	Symetry plane	-
Kola	Wall rotation	200 rad/s
Sani	Pressure outlet	0 Pa
Výfuk	Mass flow inlet	0,14 kg/s
Chladiče	Mass flow inlet	2,56 kg/s
Vstup chlazení	Pressure outlet	0 Pa
Výstup chlazení	Mass flow inlet	0,64 kg/s

Tab. 5. Nastavení okrajových podmínek na jednotlivých plochách CFD modelu

Výpočetní senzory je potřeba nastavit z důvodu sledování ustálení výpočtu, respektive rychlosti proudění. Rychlost proudění je vhodné kontrolovat v malém objemu s co nejmenším počtem objemových buněk. Nejvhodnějším místem pro posouzení kvality výpočtu z hlediska ustálení proudění je přibližně 0,5 m za vozidlem. V této oblasti lze předpokládat turbulentní proudění a největší změny rychlosti. Pokud změna rychlosti mezi jednotlivými iteracemi v této oblasti je již dostatečně malá, lze usoudit, že se rychlost ustálila i v ostatních místech modelu. Dále je nutné sledovat ustálení vztlakové a odporové síly a velikost residuí. Ustálení rychlosti proudu s odporovou a vztlakovou silou je nutnou podmínkou pro získání kvalitních výsledků. Podmínky pro posouzení dostatečné kvality výpočtu pro tuto diplomovou práci byly stanoveny na základě zkušeností zaměstnanců Energetického ústavu a jsou znázorněny v tabulce 6.

Sledovaná veličina	Mezní hodnota
Residua	$< 10^{-4}$
Rozptyl rychlost proudění	0,1 m/s
Rozptyl velikost odporové síly	1 N
Rozptyl velikost vztlakové síly	1 N

Tab. 6. Podmínky pro posouzení dostatečné kvality výpočtu CFD modelu

Vlastní vytvoření senzoru probíhá v několika krocích. Nejdříve je potřeba vytvořit kontrolní objem, což se provádí funkcí *Sphere section* v menu *Derived parts*. Poté je nutné v menu *Reports* vybrat položku *Velocity* a v položce *Parts* vybrat vytvořený *Sphere section*. Poté stačí z nově vytvořeného reportu vytvořit grafické znázornění průběhu rychlosti v jednotlivých iteracích funkcí *Create Plot from Report*.

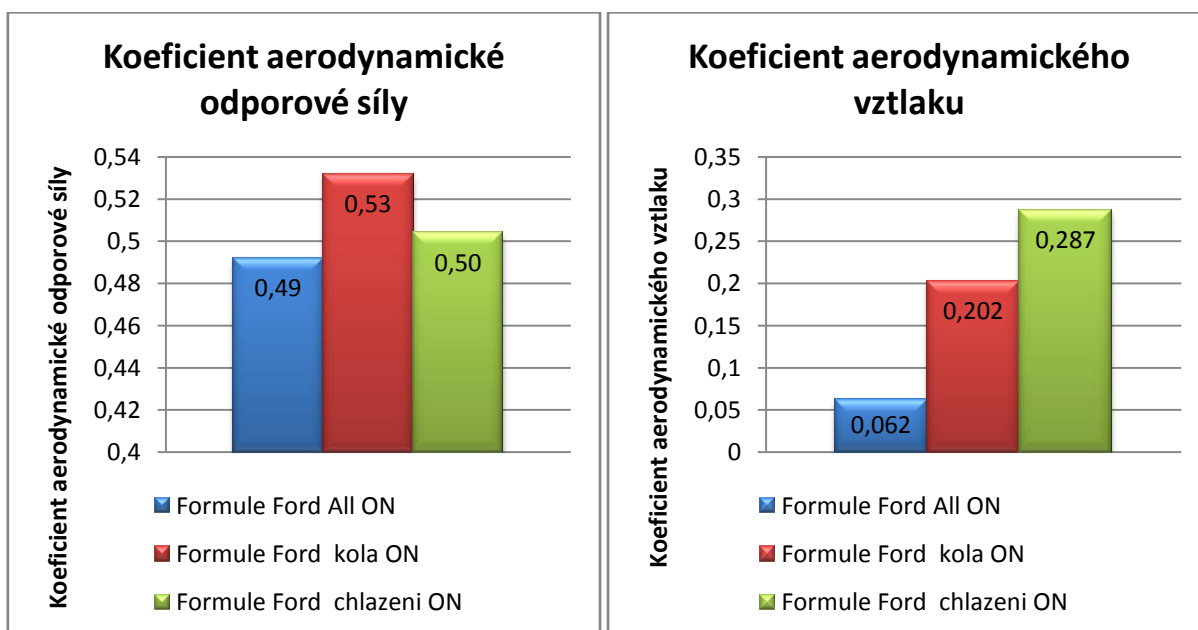
6. Výpočet a zhodnocení výsledků všech variant modelu vozidla bez přídatných aerodynamických prvků

Výsledky získané simulací proudění v softwaru Star CCM+ jsou uvedeny v tabulce 7, hodnoty koeficientu aerodynamického odporu a vztlaku jsou pro porovnání v grafech 1.a a 1.b. Moment klonění je vztažen k počátku souřadného systému popsaného v kapitole 2.7. (v rovině vozovky, polovině rozvoru vozidla a v rovině symetrie). Z výsledků je patrné, že nejmenších hodnot aerodynamického odporu a vztlaku dosáhl model s rotujícími koly a průchozím chlazením i sáním. Model s rotujícími koly a neprůchozími chladiči a sáním dosáhl nejvyššího aerodynamického odporu, zatímco model se stojícími koly a průchozími chladiči se sáním dosáhl největších vztlaku. Z hlediska výpočtu nejlépe konvergoval model s rotujícími koly a průchozími chladiči se sáním, nejhůře pak model s rotujícími koly a uzavřenými chladiči i sáním, což je patrné z obrázku 36 na rozložení tlaku v oblasti vstupu vzduchu do chladičů. Rozdíl mezi pravým a levým vstupem lze přisuzovat právě nedostatečné konvergenci úlohy, která přes 15000 iterací stále nepřesáhla hranici residuí 10^{-4} . Rychlost v kontrolním bodě se měnila o 0,5 m/s, síla o 5 N, viz tab. 6.

Rozložení statického tlaku na povrchu karoserie a vizualizace proudnic jsou patrné z obrázku 27-36. Pro další výpočty zatížení náprav byly použity střední hodnoty výsledků CFD simulací.

Název modelu	F_x [N]	F_z [N]	M_y [Nm]	C_x	C_z	A [m ²]
Formule Ford all ON	-594,1	186,7	-361,7	0,492	0,062	0,816
Formule Ford kola ON	-643,3	243,6	-346,8	0,532	0,202	0,816
Formule Ford chlazení ON	-608,5	347,1	-245,3	0,504	0,287	0,816

Tab. 7. Výsledné hodnoty silového a momentového zatížení s koeficienty aerodynamického odporu a vztlaku variant CFD modelů bez přídatných aerodynamických prvků



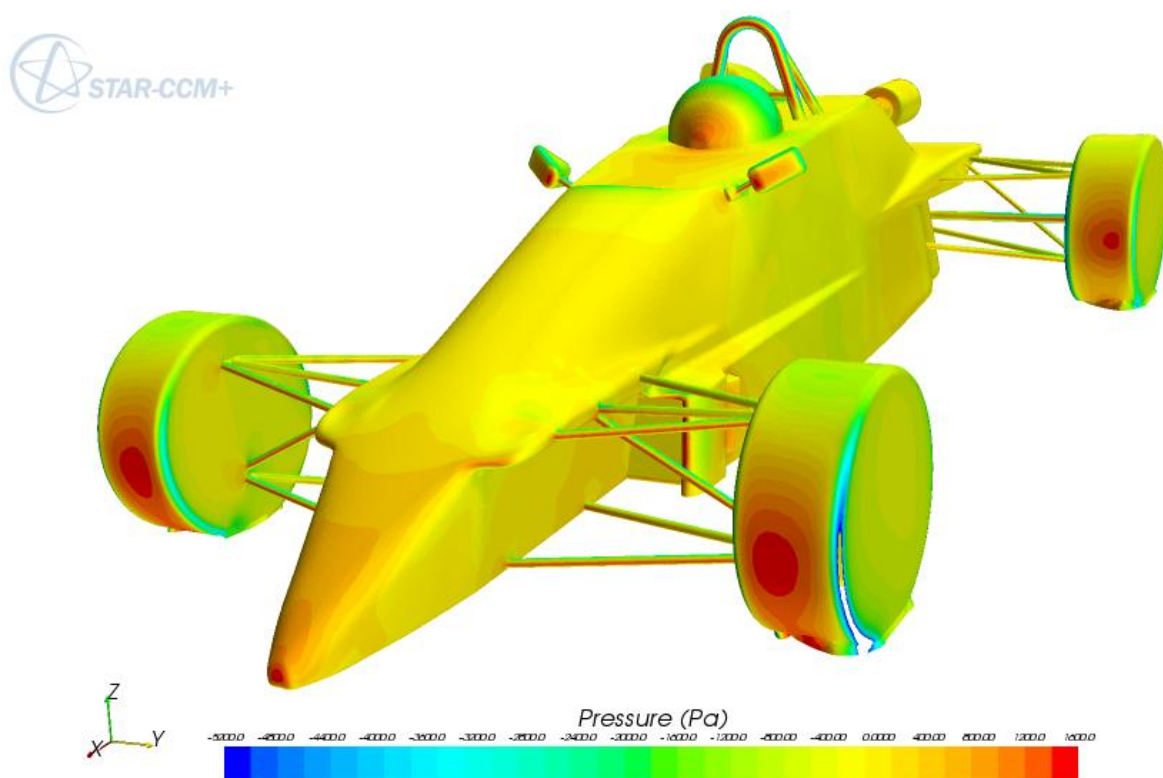
Graf. 1.a a 1.b Velikosti koeficientů aerodynamického odporu a vztlaku pro jednotlivé modely bez přídatných aerodynamických prvků

Na následujících obrázcích je znázorněno rozložení statického tlaku na povrchu vozidla formule Ford. Stupnice spektra barev a jí přiřazené hodnoty odpovídají přetlaku, popř. podtlaku vůči tlaku atmosferickému. Nulová hodnota na stupnici následujících obrázků tedy odpovídá tlaku 101 325 Pa, což odpovídá hodnotě atmosferického tlaku v nulové nadmořské výšce a teplotě 20°C.

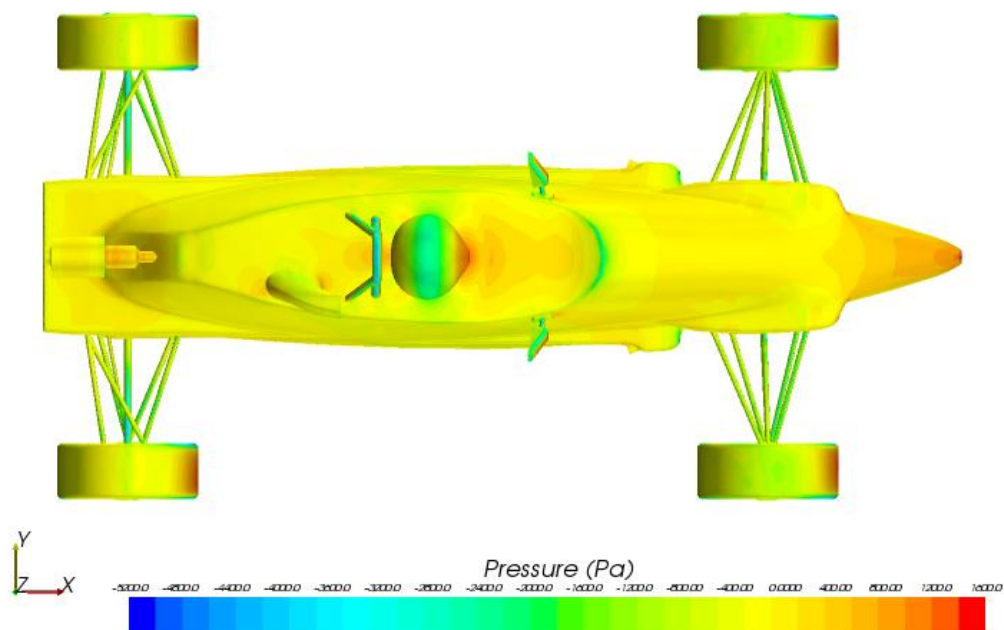
Pro následující obrázky tedy platí fyzikální vlastnosti vzduchu uvedené v tabulce 8.

Fyzikální veličina	Hodnota
Hustota	1,18415 kg/m ³
Teplota	20°C
Tlak	101325 Pa
Rychlost	180 km/h

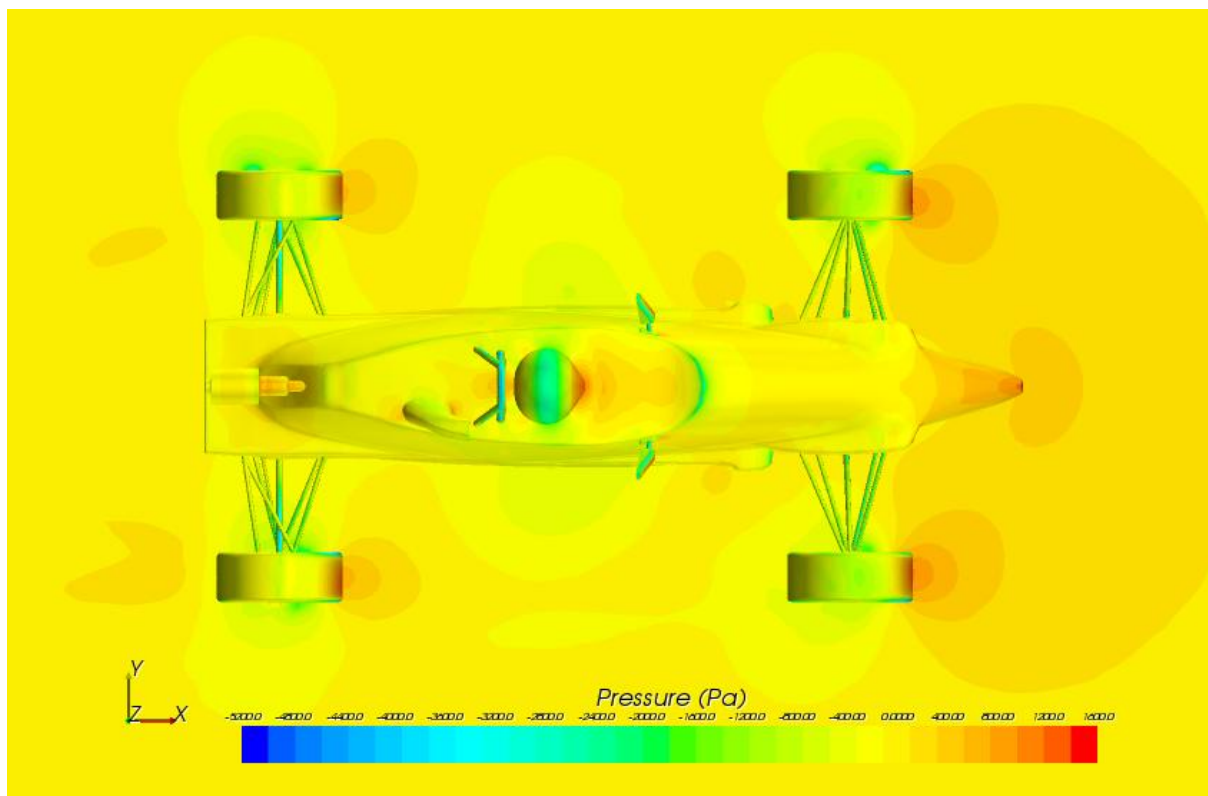
Tab. 8. Fyzikální vlastnosti vzduchu platící pro výsledky znázorněných na následujících obrázcích.



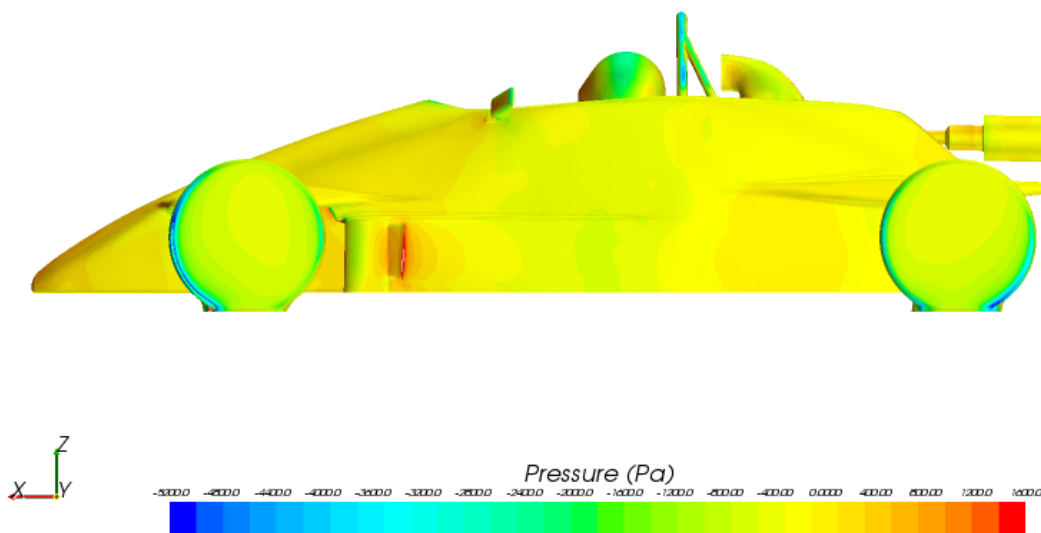
Obr. 27. Rozložení tlaku na povrchu vozidla bez přidavných aerodynamických prvků – šikmý pohled, perspektiva



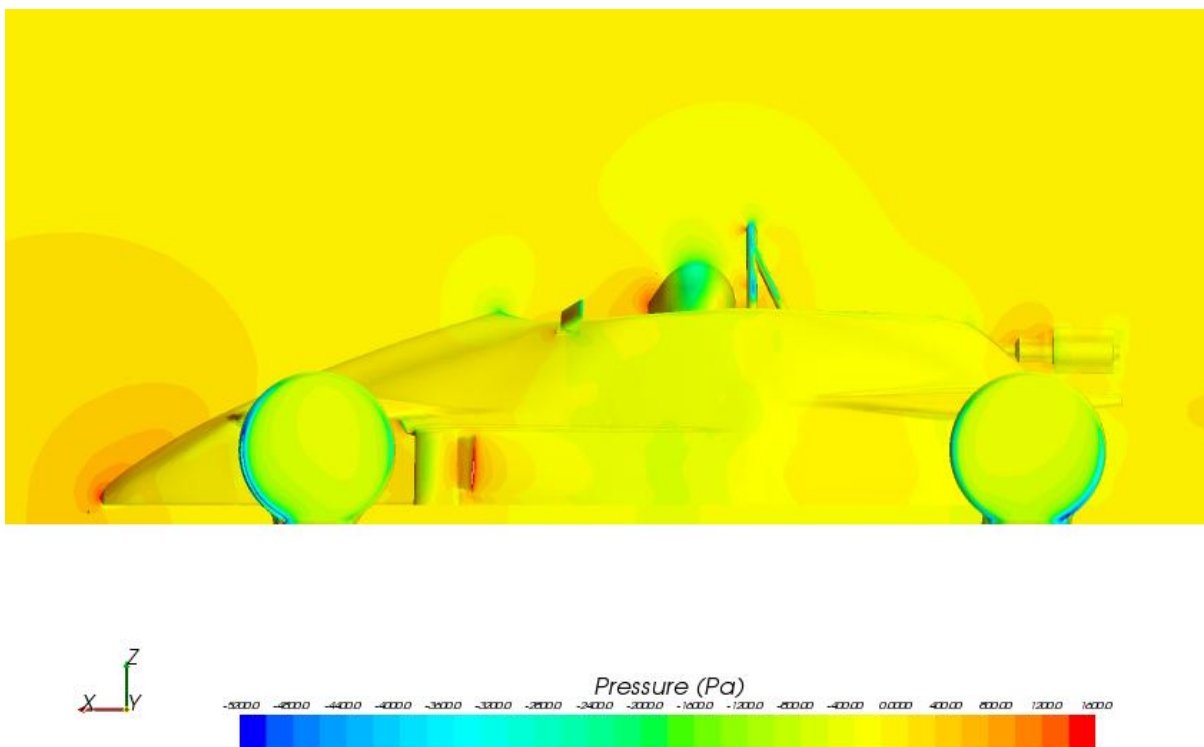
Obr. 28. Rozložení tlaku na povrchu vozidla bez přidavných aerodynamických prvků – pohled seshora



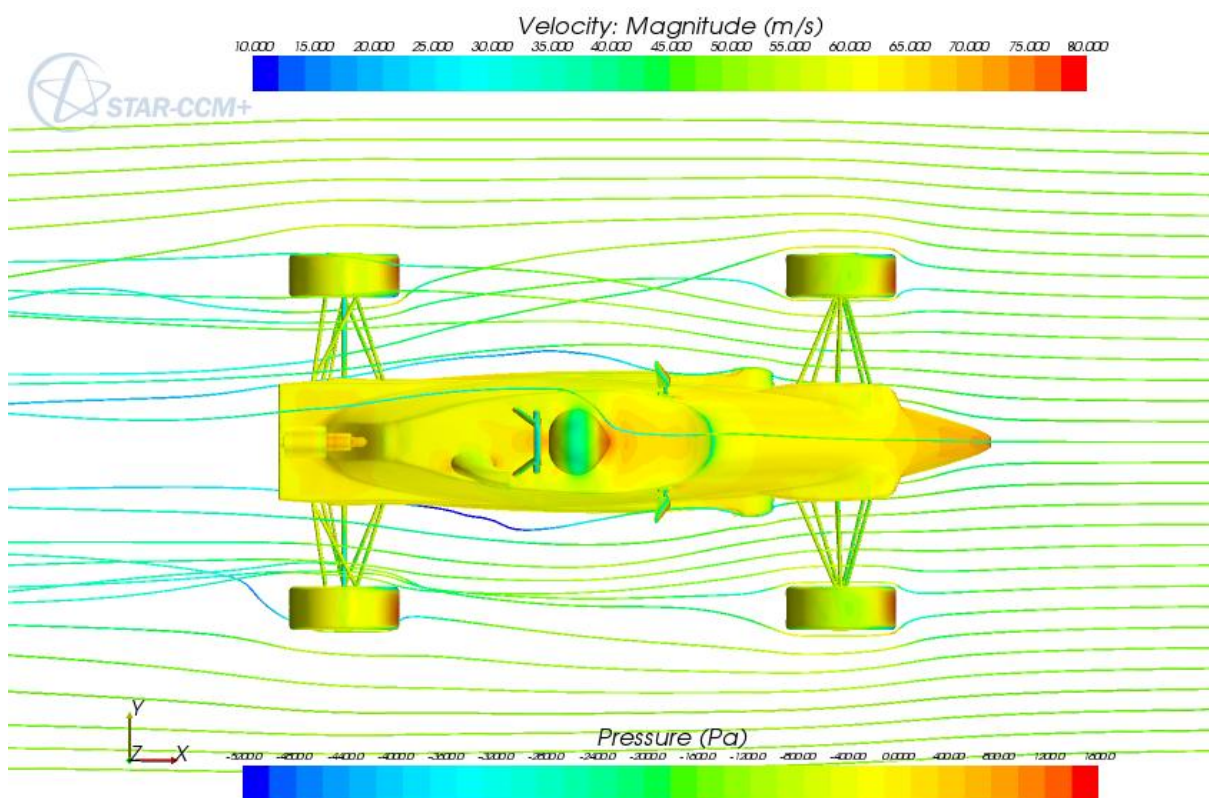
Obr. 29. Rozložení tlaku na povrchu vozidla bez přidavných aerodynamických prvků – pohled seshora, rozložení tlaku v rovině vozovky



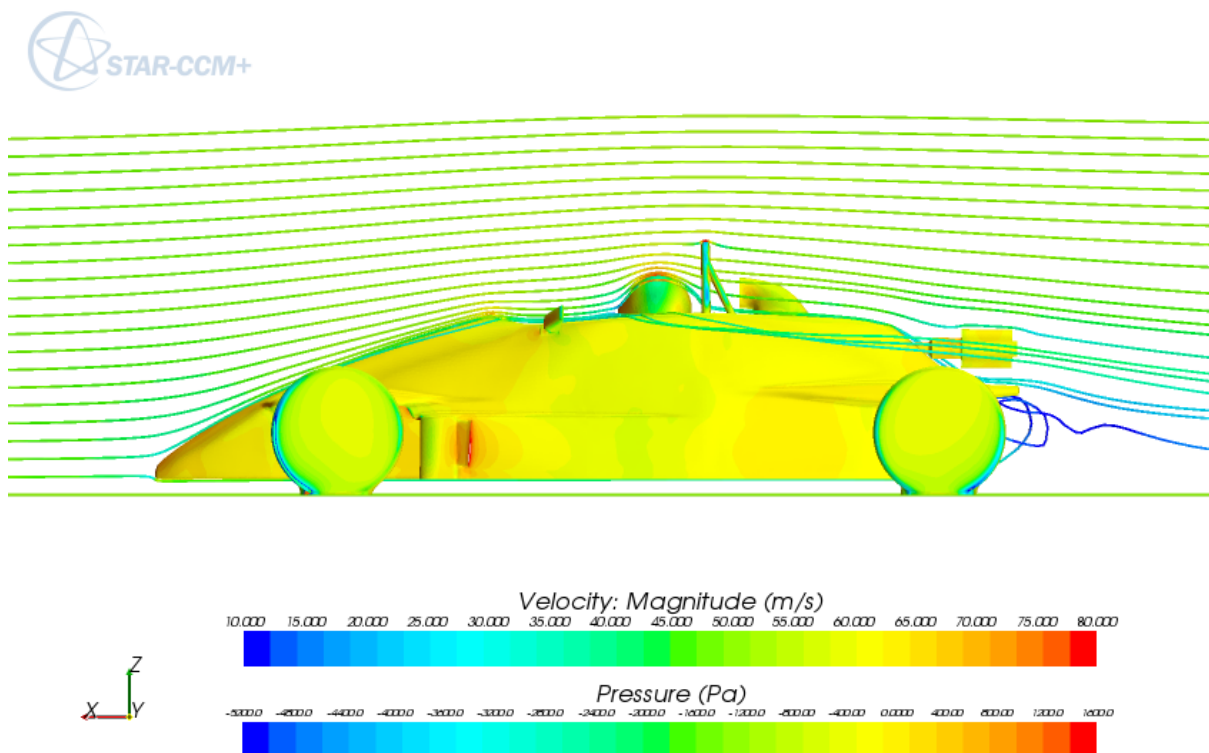
Obr. 30. Rozložení tlaku na povrchu vozidla bez přidavných aerodynamických prvků – pohled zleva



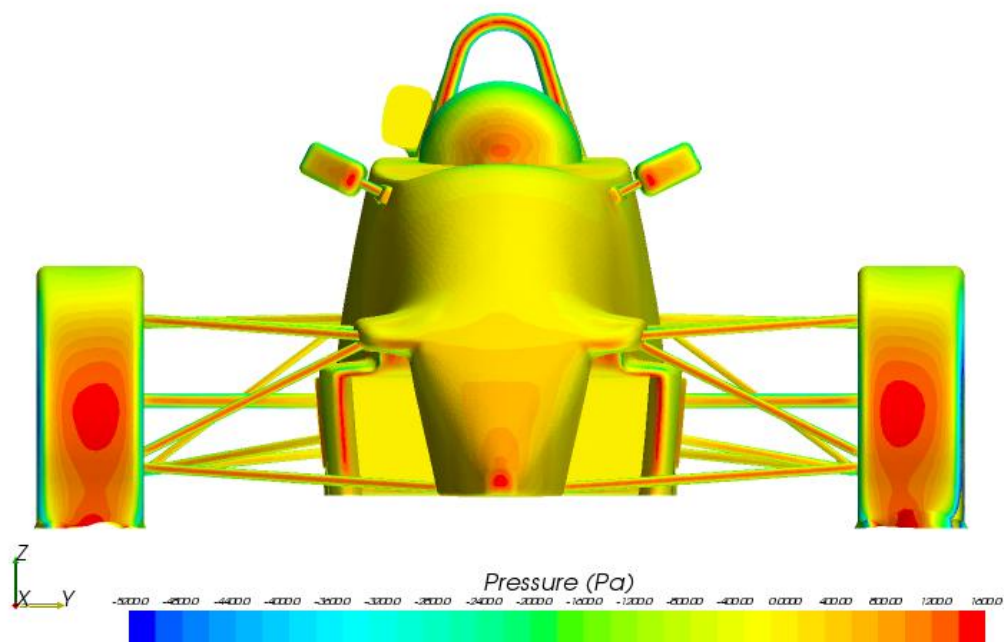
Obr. 31. Rozložení tlaku na povrchu vozidla bez přidavných aerodynamických prvků – pohled zleva, rozložení tlaku v rovině symetrie vozidla



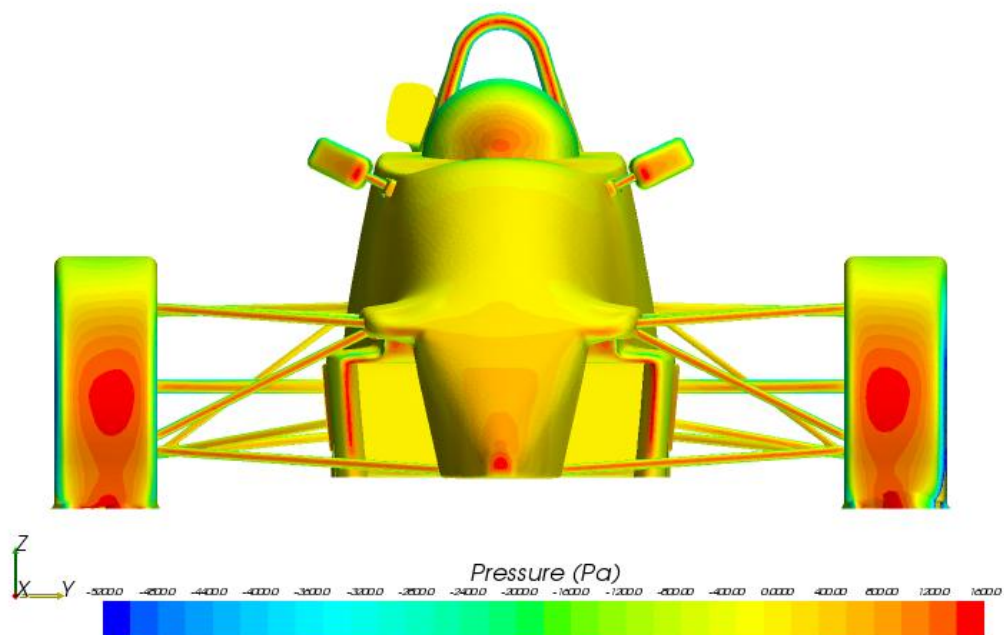
Obr. 32. Rozložení tlaku na povrchu vozidla bez přidavných aerodynamických prvků – pohled seshora, vizualizace trajektorií proudu



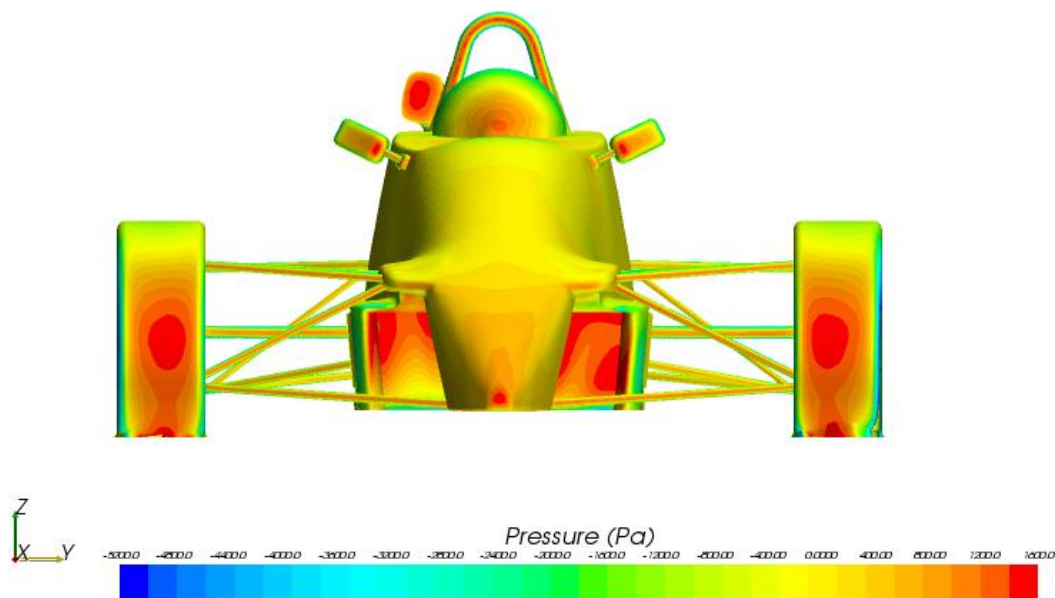
Obr. 33. Rozložení tlaku na povrchu vozidla bez přidavných aerodynamických prvků – pohled zleva, vizualizace trajektorií proudu, jejichž počátek leží v rovině symetrie vozidla



Obr. 34. Rozložení tlaku na povrchu vozidla bez přidavných aerodynamických prvků – čelní pohled, model Formule Ford All ON



Obr. 35. Rozložení tlaku na povrchu vozidla bez přidavných aerodynamických prvků – čelní pohled, model Formule Ford chlazení ON



Obr. 36. Rozložení tlaku na povrchu vozidla bez přidavných aerodynamických prvků – čelní pohled, model Formule Ford kola ON

Z předchozích obrázků jsou jasně patrná místa s největším a nejmenším tlakem. Tlaková maxima leží v místech čelních stran pneumatik, dále pak na čelních stranách zrcátek, záhlavního rámu, špice a hranách na vstupu do chlazení. U modelu s uzavřeným sáním (obr. 36) lze pozorovat také maximum v místě vstupu do chlazení a vstupu do sání. Naopak minima tlaku se nacházejí na bočních hranách kol a přechodové části helmy a záhlavního rámu, tomu odpovídají a maximální hodnoty rychlosti proudění znázorněné proudnicemi v těchto místech.

Z čelního pohledu je jasné vidět, že největší vliv na aerodynamický odpor mají právě kola a přilba.

6.1 Výpočet reakcí od aerodynamických účinků na nápravách modelů vozidla bez přidavných aerodynamických prvků

	Formule Ford All ON	Formule Ford kola ON	Formule Ford chlazení ON
Rozvor vozidla	$l = 2400 \text{ mm}$		
Vzdálenost zadní nápravy od těžiště	$l_z = 919 \text{ mm}$		
Výška těžiště	$h = 250 \text{ mm}$		
Hmotnost vozidla s jezdcem	$m = 513 \text{ kg}$		
Aerodynamická odporová síla	$F_X = 594,1 \text{ N}$	$F_X = 643,3 \text{ N}$	$F_X = 608,5 \text{ N}$
Aerodynamická vztlačková síla	$F_Z = 186,7 \text{ N}$	$F_Z = 243,6 \text{ N}$	$F_Z = 347,1 \text{ N}$
Aerodynamický moment klonění	$M_Y = -361,7 \text{ Nm}$	$M_Y = -346,8 \text{ Nm}$	$M_Y = -245,3 \text{ Nm}$

Tab. 9.a. Vstupní hodnoty pro výpočet zatížení náprav vozidla bez přidavných aerodynamických prvků

Soustava rovnic pro výpočet silových reakcí:

$$M_{yT} = M_y - F_X \cdot h - F_Z \cdot \left(\frac{l}{2} - l_z \right)$$

$$F_{Zp} = -(F_Z - F_G) \cdot \frac{l_z}{l} + F_x \cdot \frac{h}{l} + \frac{M_{yT}}{l}$$

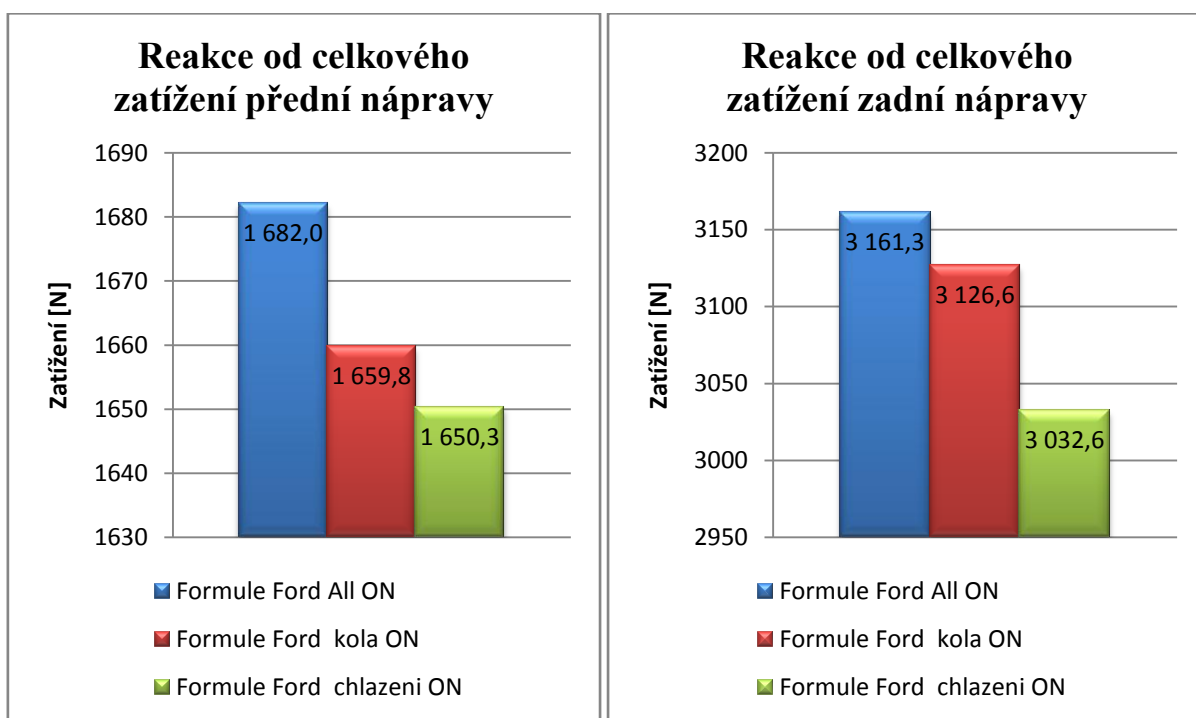
$$F_{Zz} = -(F_Z - F_G) \cdot \frac{l - l_z}{l} - F_x \cdot \frac{h}{l} - \frac{M_{yT}}{l}$$

Výsledné hodnoty reakcí v místě styku kol s vozovkou jsou uvedeny v tabulce 9.b a v grafech 2 a 3.

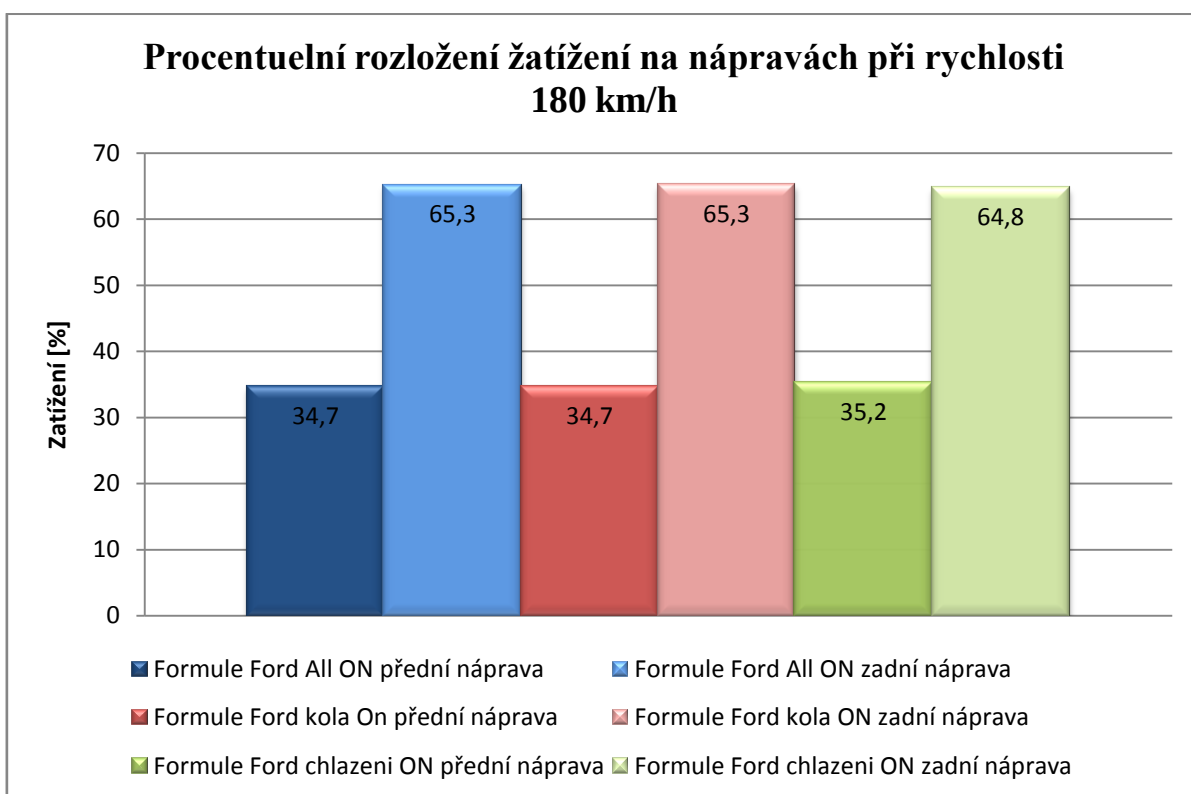
	Formule Ford All On	Formule Ford kola ON	Formule Ford chlazení ON
Výsledná celková reakce vozovky na přední nápravě	$F_{Zp} = 1682,0 \text{ N}$	$F_{Zp} = 1659,8 \text{ N}$	$F_{Zp} = 1650,3 \text{ N}$
Výsledná celková reakce vozovky na zadní nápravě	$F_{Zz} = 3161,3 \text{ N}$	$F_{Zz} = 3126,6 \text{ N}$	$F_{Zz} = 3032,6 \text{ N}$

Procentuální zatížení přední nápravy	$\%F_{Zp} = 34,73\%$	$\%F_{Zp} = 34,68\%$	$\%F_{Zp} = 35,24\%$
Procentuální zatížení zadní nápravy	$\%F_{Zz} = 65,27\%$	$\%F_{Zz} = 65,32\%$	$\%F_{Zz} = 64,76\%$
Reakce vozovky od aerodynamických sil na přední nápravě	$F_{ZpAero} = -244,1 \text{ N}$	$F_{ZpAero} = -266,3 \text{ N}$	$F_{ZpAero} = -275,8 \text{ N}$
Reakce vozovky od aerodynamických sil na zadní nápravě	$F_{ZzAero} = 57,3 \text{ N}$	$F_{ZzAero} = 22,7 \text{ N}$	$F_{ZzAero} = -71,3 \text{ N}$

Tab. 9.b. Vypočtené hodnoty celkového a aerodynamického zatížení modelů formule bez přídatných aerodynamických prvků



Graf. 2. Silové reakce vozovky na jednotlivých nápravách od celkového zatížení

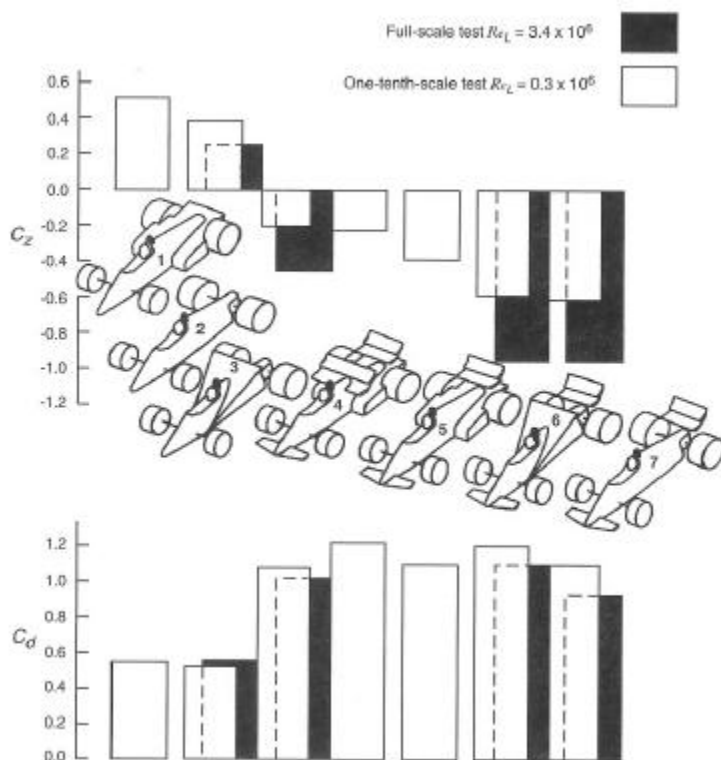


Graf 3. Procentuelní rozložení celkového zatížení na nápravách modelů bez přidavných aerodynamických prvků při rychlosti 180km/h

Statického zatížení je rozloženo v poměru 38,3% na přední nápravu a 61,7% na zadní nápravu, zatímco celkové zatížení je rozloženo v poměru 34,7% na přední nápravu a 65,3% na zadní nápravu u modelu s rotujícími koly a s průchozím chlazením a sáním. Z těchto faktů je zřejmé, že účinky aerodynamického zatížení modelu bez přidavných aerodynamických ploch odlehčují přední nápravu a přitěžují nápravu zadní. Z hlediska velikosti aerodynamické vztlačkové síly a celkového zatížení náprav pak vyplývá, že aerodynamické síly působící na model bez přidavných aerodynamických prvků vozidlo odlehčují, což je samozřejmě nepříznivé.

6.2 Porovnání výsledků modelu vozidla bez přídavných aerodynamických prvků s měřenými hodnotami vozidla stejné kategorie

Data získaná simulací nebylo možno porovnat s žádným měřením z aerodynamického tunelu, popř. z dojezdové zkoušky, jelikož nebylo v současné době na tomto vozidle žádné z těchto měření provedeno. K porovnání tedy posloužila data získaná z měření vozidel stejné kategorie, proto toto srovnání nelze považovat za směrodatné, ale pouze za orientační.

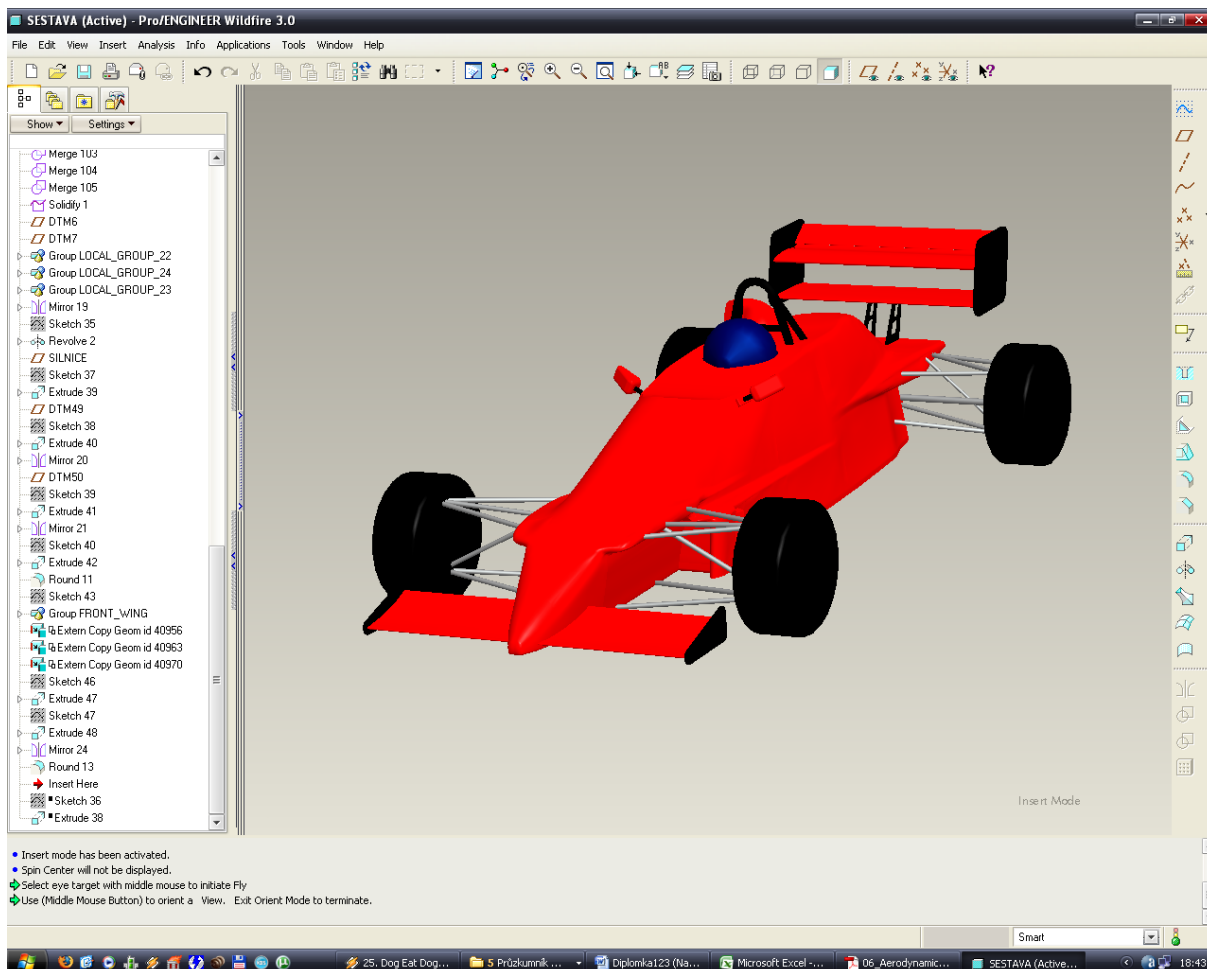


Obr. 37. Velikost koeficientů aerodynamického odporu a vzlaku pro různé druhy závodních vozidel s nekrytými koly z roku 1985 [1]

Z obrázku 37 je zřejmé, že modelovaná formule Ford je nejvíce podobná formuli číslo 2, jejíž hodnota koeficientu aerodynamického odporu je 0,55 a hodnota koeficientu aerodynamického vzlaku je 0,25. Porovnáním těchto hodnot s daty získanými simulací se nejvíce podobají modelu s rotujícími koly a neprůchozím chlazením a sáním. Přestože je toto porovnání velmi hrubé, data získaná simulací jsou velmi podobná hodnotám vozidel stejné kategorie získaných měření.

7. Návrh tvarových úprav

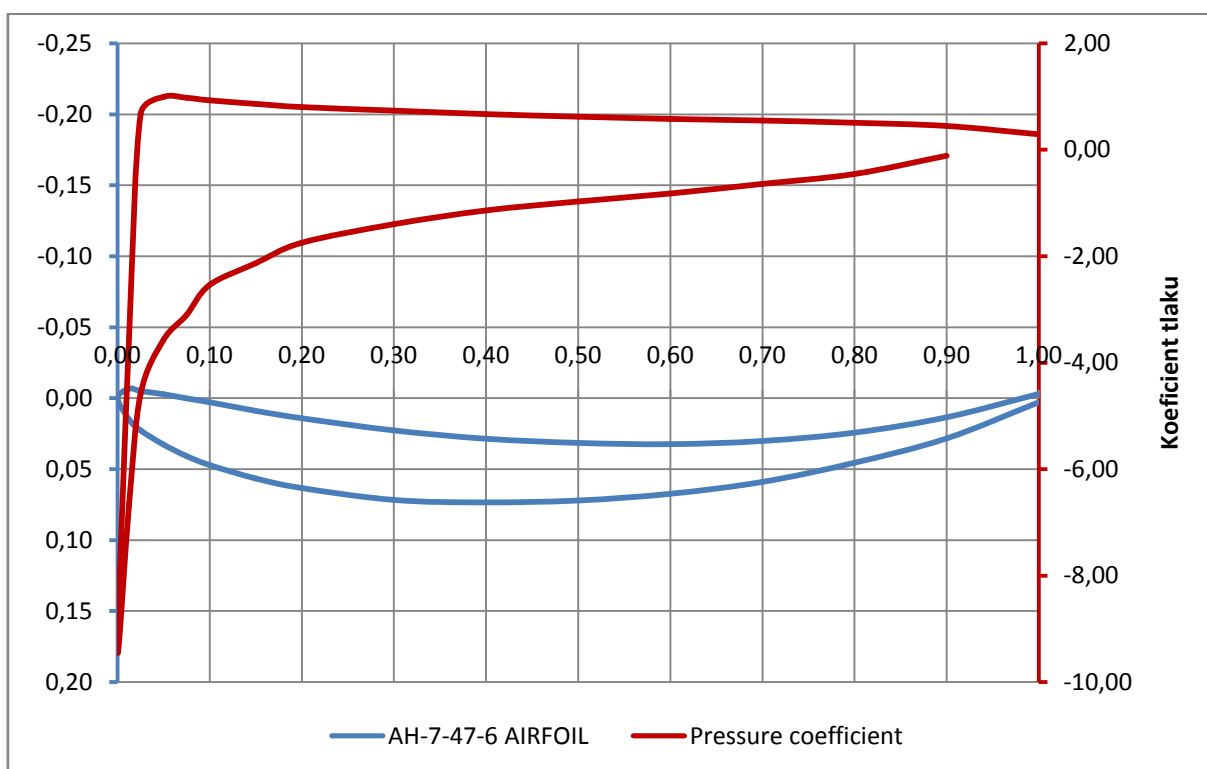
Mezi tvarové úpravy modelovaného vozidla Formule Ford patří především vytvoření přidavných aerodynamických prvků v podobě předního a zadního přitlačného křídla. Nutnou podmínkou pro umístění zadního křídla do dané polohy byla změna polohy výfuku. Veškeré tvarové úpravy byly provedeny v softwaru Pro Engineer modifikací původního modelu. Výsledný CAD model je znázorněn na obrázku 38.



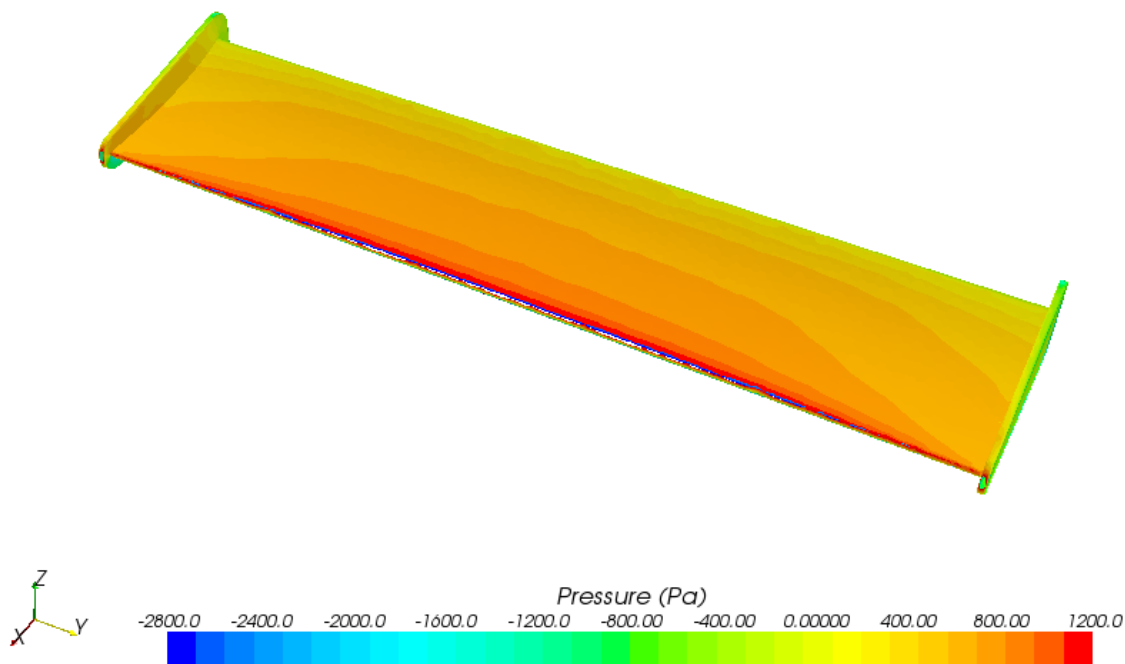
Obr. 38. Výsledný CAD model formule s přidavnými aerodynamickými prvky vytvořený v softwaru Pro Engineer

7.1 Vytvoření předního křídla

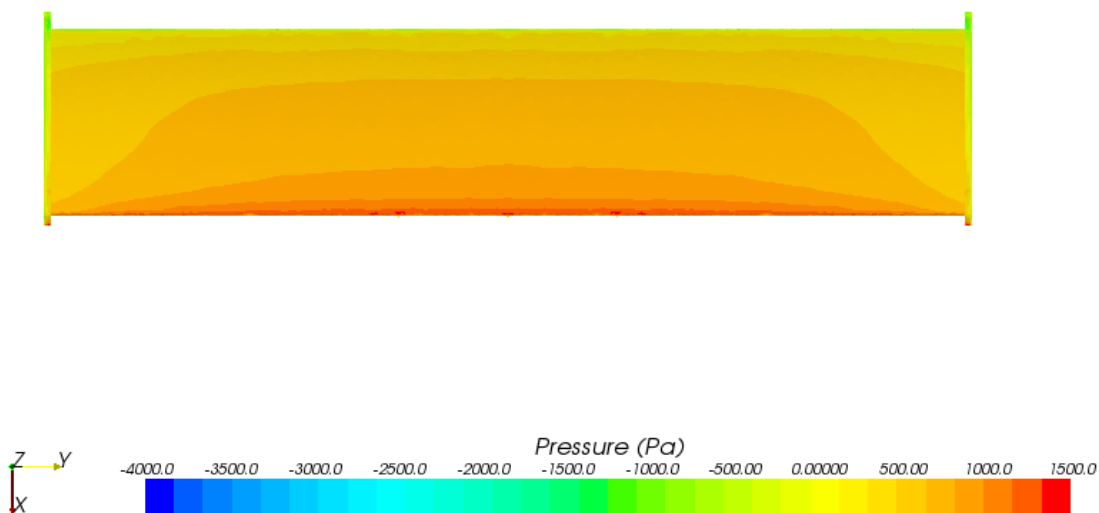
Přední přitlačné křídlo bylo vytvořeno podle existujícího profilu AH 7-47-6. Jeho geometrie a hodnoty aerodynamického vztlaku a odporu byly získány z databáze softwaru Designfoil R6. Konečný návrh byl vytvořen v prostředí softwaru Pro Engineer. Celkem bylo vytvořeno 6 variant výpočetních modelů, z toho jedna s křídlem na vozidle, dalších pět samostatně bez vozidla s různou vzdáleností od vozovky. U všech variant byl proveden výpočet proudění, zároveň byla získána závislost vztlaku, resp. přitlaku samostatného křídla na vzdálenosti od vozovky. Tato závislost je zobrazena v grafu 5.



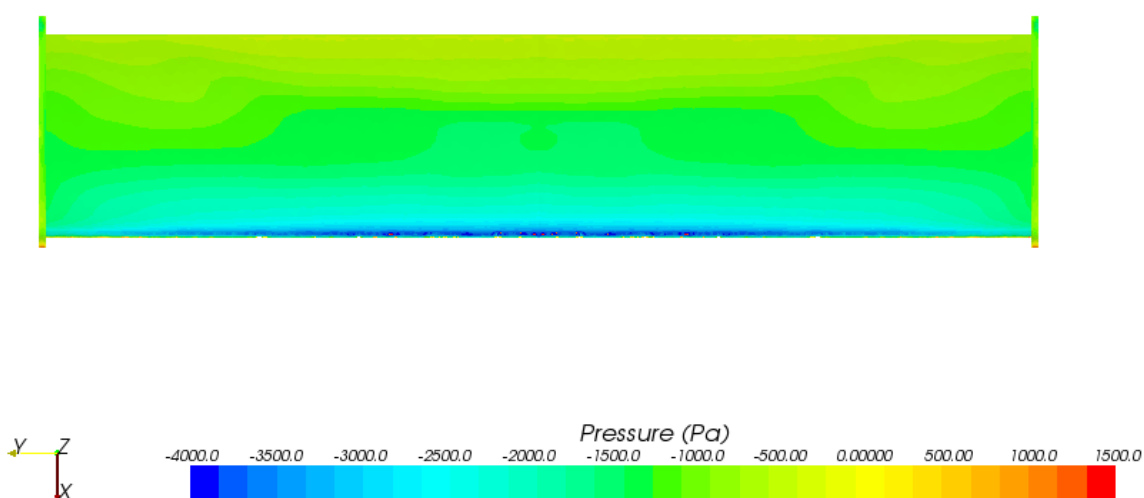
Graf 4. Rozložení koeficientu tlaku na profilu AH-7-47-6 předního křídla



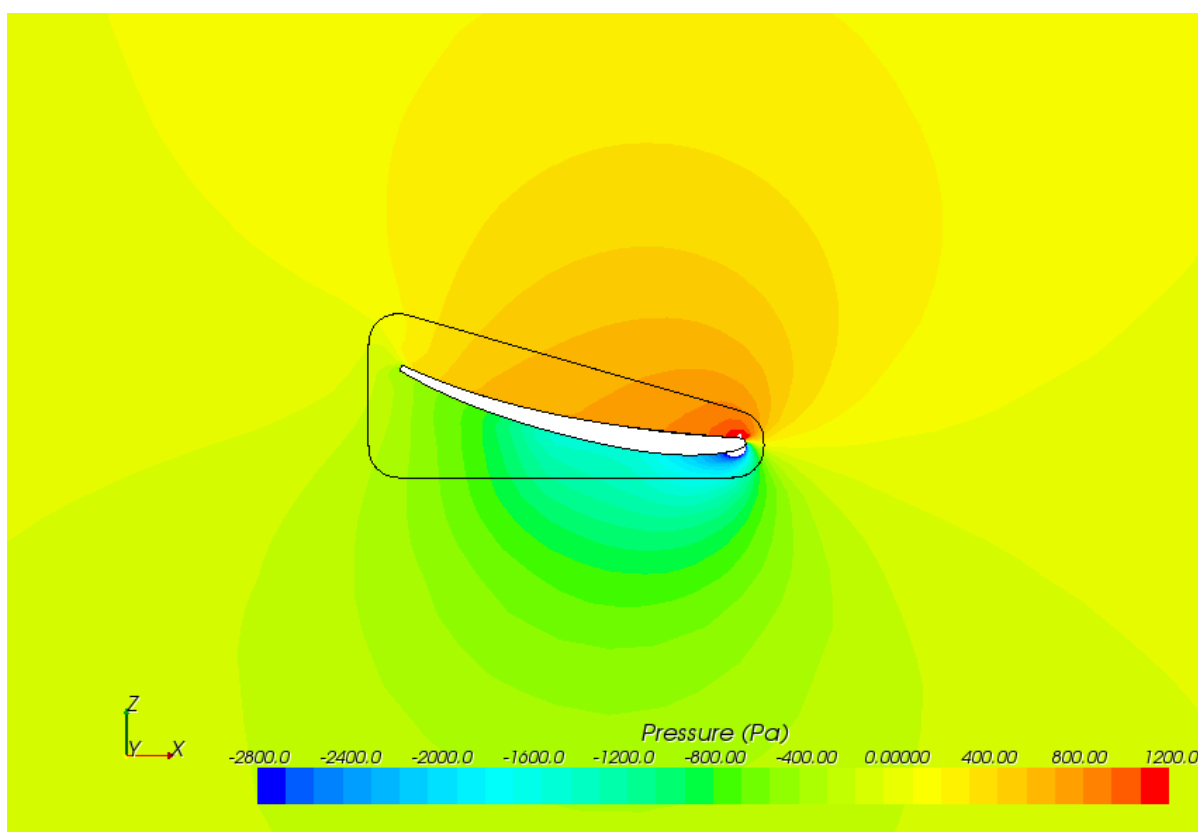
Obr. 39. Rozložení tlaku na povrchu předního křídla, šikmý pohled



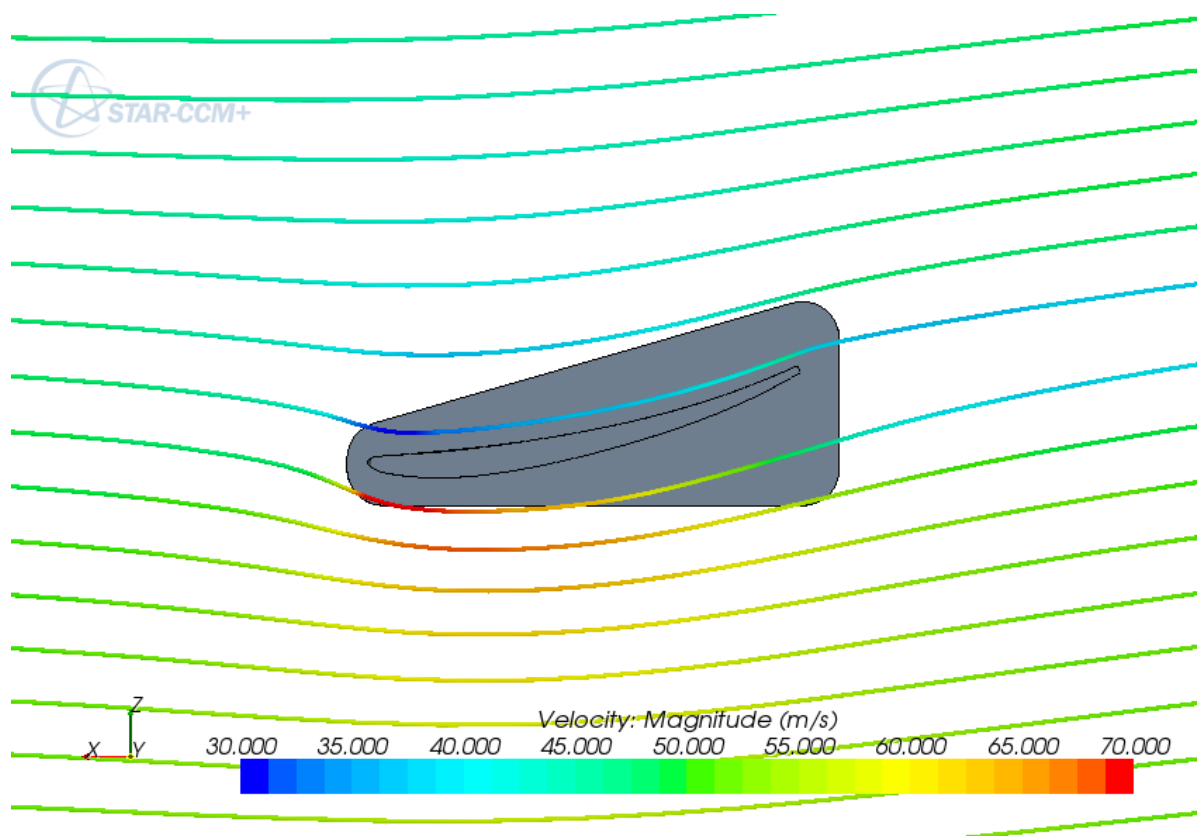
Obr. 40. Rozložení tlaku na horní straně předního křídla



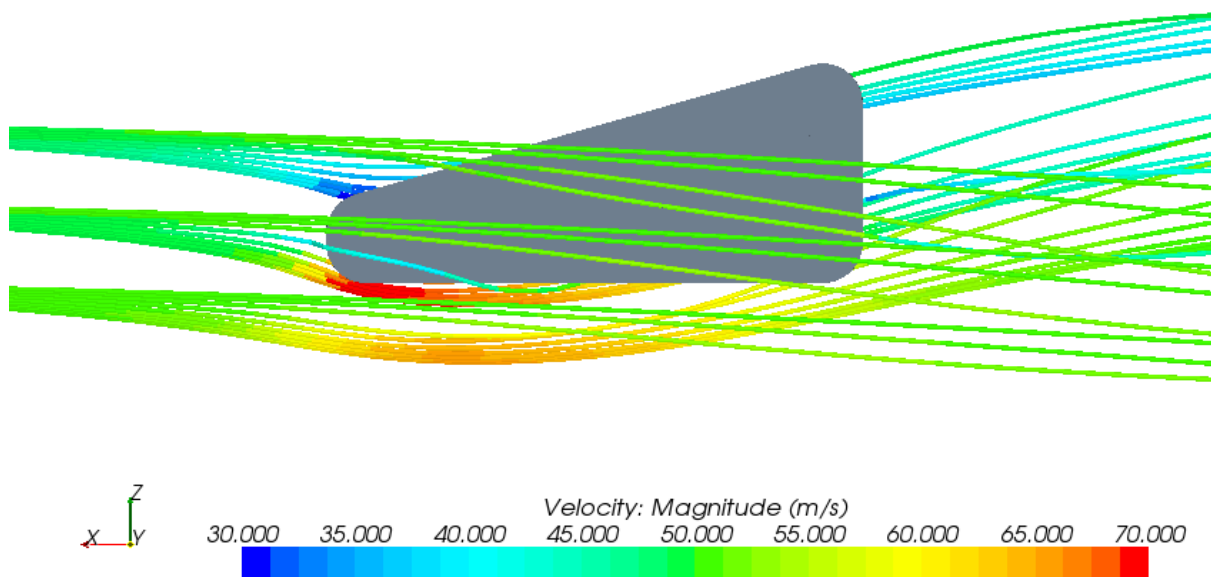
Obr. 41. Rozložení tlaku na spodní straně předního křídla



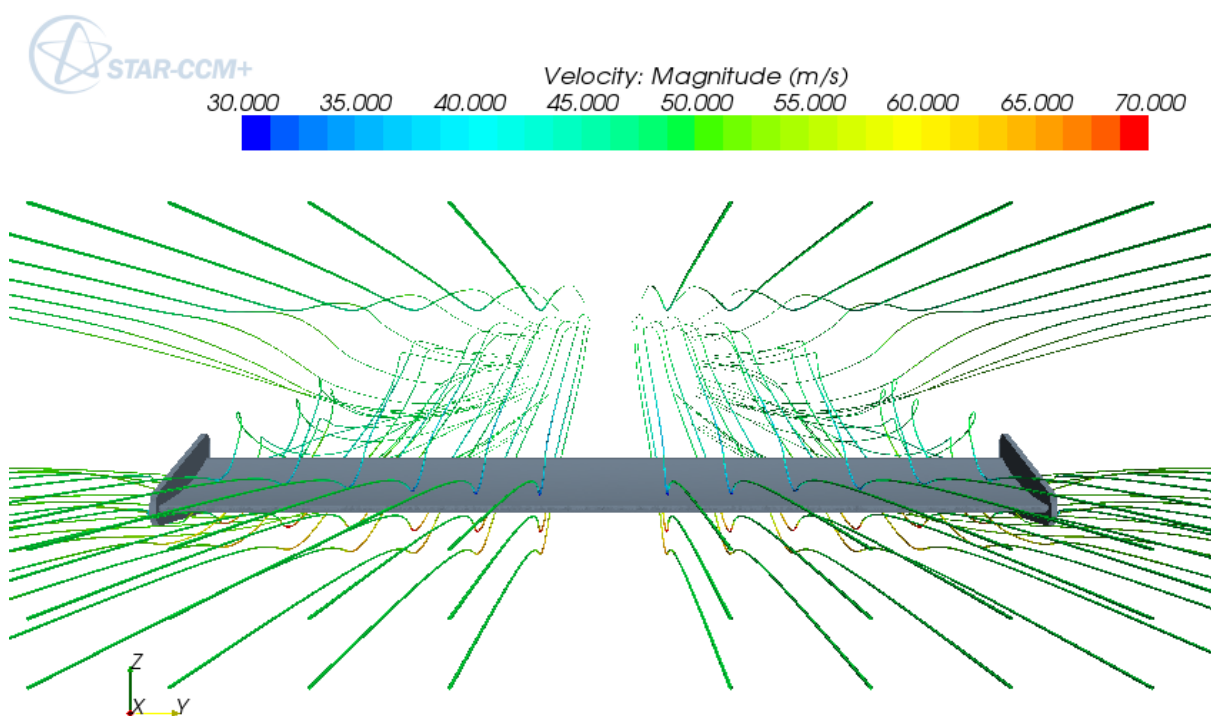
Obr. 42. Rozložení tlaku v rovině symetrie předního křídla



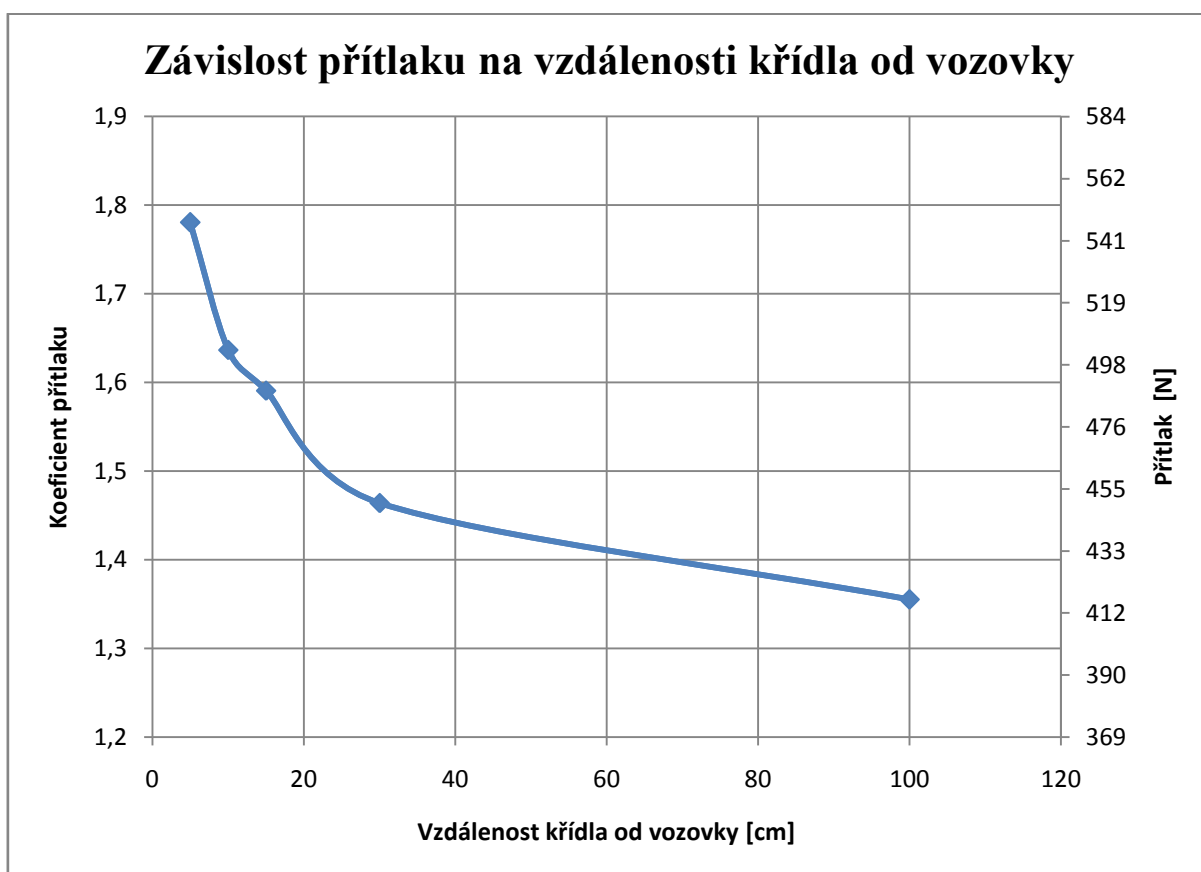
Obr. 43. Proudnice a velikost rychlosti proudění v rovině symetrie předního křídla



Obr. 44. Vizualizace tří vrstev proudnic kolem předního křídla



Obr. 45. Vizualizace proudnic kolem předního křídla v perspektivním promítání



Graf 5. Grafická závislost přítlaču předního křídla na vzdálenosti od vozovky

Z předchozích obrázků je zřejmé rozložení vyššího tlaku na horní straně křídla a podtlaku na straně spodní. Maximum tlaku leží na horní straně náběžné hrany, minimum naopak na spodní straně náběžné hrany, což je patrné z obrázku 42. Bílé místo na tomto obrázku v oblasti minimálního tlaku vzniklo z důvodu mezních hodnot stupnice, konkrétně vyšší meze minima z důvodu lepší přehlednosti rozložení tlaku. Z obrázků 43 a 44 je patrný nárůst rychlosti na spodní straně křídla a její pokles na straně horní.

Ze série simulací s modelem křídla různě vzdáleného od vozovky byla získána závislost zobrazená v grafu 5. Z těchto výsledků vyplývá, že s přibližováním křídla k vozovce narůstá velikost přítlaču. Ve skutečnosti tato závislost platí do určité hodnoty vzdálenosti křídla od vozovky při dané rychlosti. Poté je již šterbina tak malá, že dojde k omezení průtoku mezi spodní stranou křídla a vozovkou. Následkem toho dojde k poklesu přítlaču. Z tohoto důvodu je důležité při nastavení výšky křídla zamezit dosažení této vzdálenosti i při propružení vozidla.

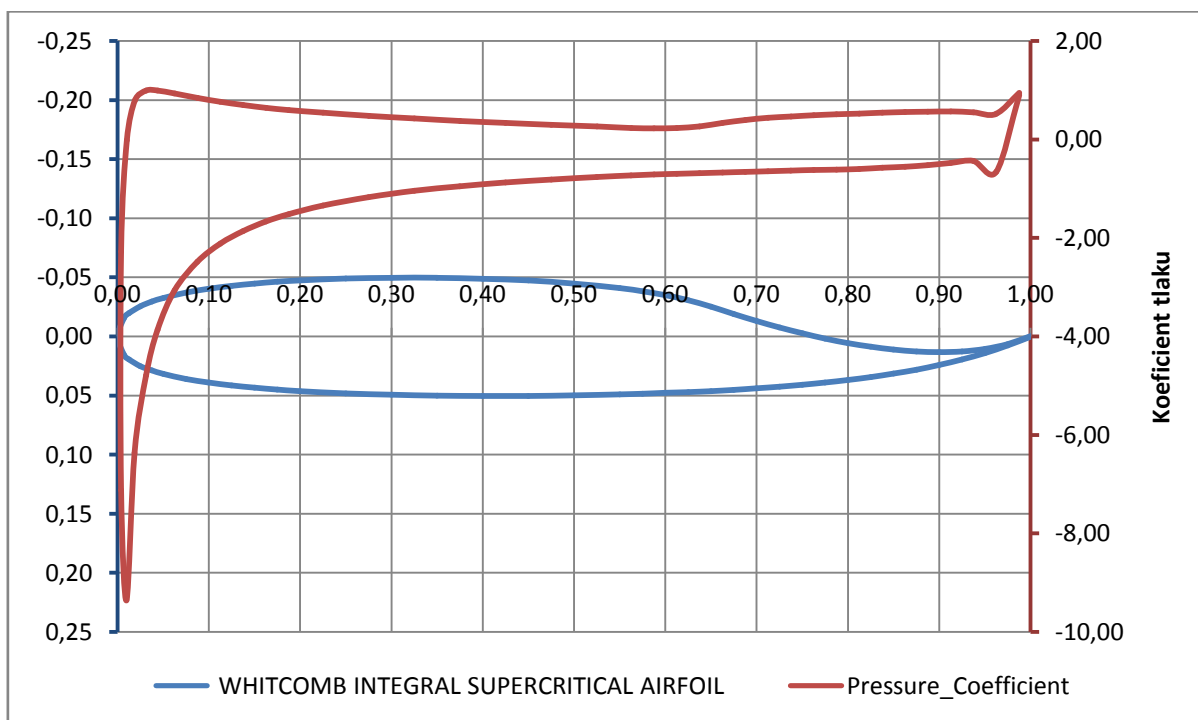
7.2 Vytvoření zadního křídla

K vytvoření zadního křídla byly použity již existující profily křídel. Geometrie v podobě bodů profilu ve formátu igs a hodnoty aerodynamického vztlaku a odporu byly získány z databáze softwaru Designfoil R6. Celkový návrh byl vytvořen samostatně v prostředí softwaru Pro Engineer, následně byl proveden i výpočet proudění kolem samostatného křídla.

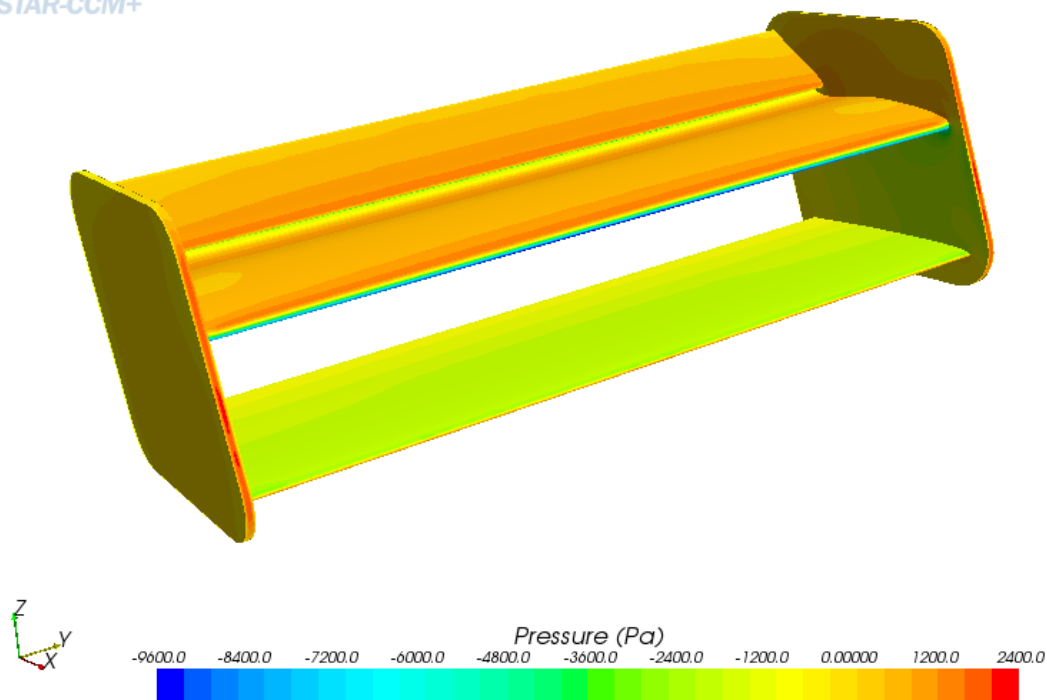
Výsledným návrhem použitým v této práci je dvouprvkové křídlo s přídatným spodním profilem pro vznik Venturiho efektu. Šířka křídla je 1000 mm. Jednotlivé profily křídel jsou popsány v tabulce 10. V grafu 7 je zobrazena geometrie křídla s rozložením tlaku na povrchu při rychlosti volného proudu 50 m/s, zatímco obrázek 47 zobrazuje rozložení tlaku v rovině řezu symetrie křídla. Grafické znázornění proudnic zadním křídlem je na obrázku 52, kde barevné spektrum zobrazuje hodnotu rychlosti. Na tomto obrázku lze pozorovat vznik vířivých proudů za křídlem. Obrázek 53 znázorňuje proudnice v rovině symetrie křídla.

	Název profilu	Úhel náběhu	Štíhlost
Spodní křídlo	RG 14A – 1,4/7,0	3°	3,45
Horní křídlo	Whitcomb integral supercritical	10°	4
Přídavná klapka	WB-135/35	50°	8,33

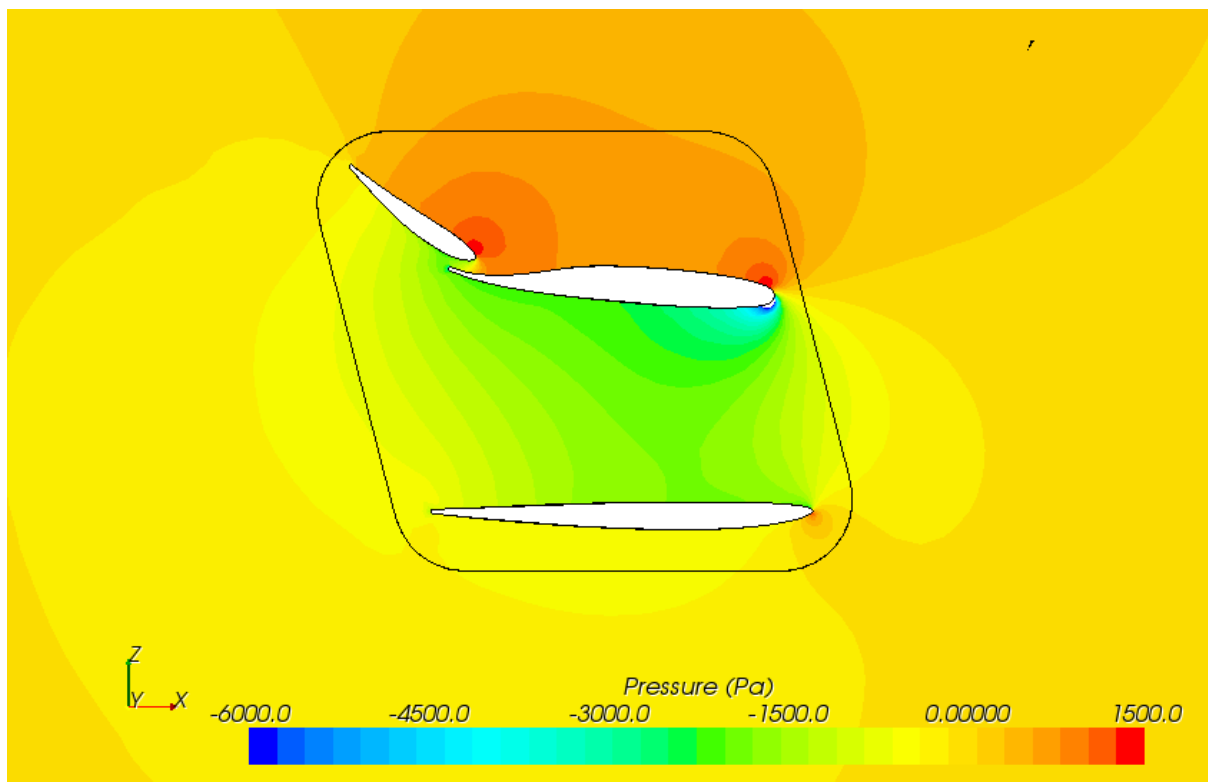
Tab. 10. Profily jednotlivých prvků zadního křídla s jejich úhly náběhu a štíhlostí



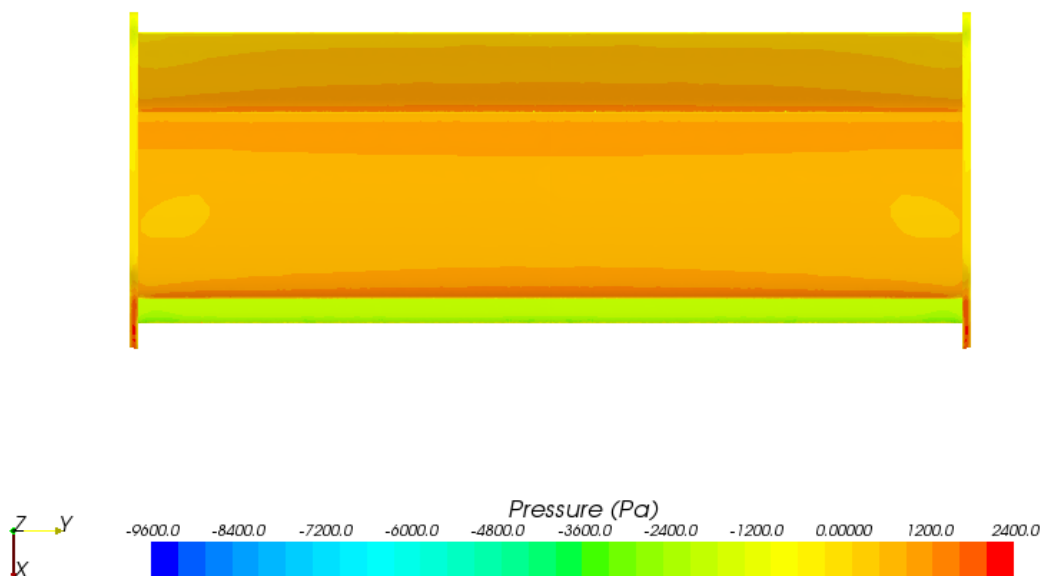
Graf 6. Rozložení koeficientu tlaku na profilu Whitcomb Integral Supercritical předního křídla



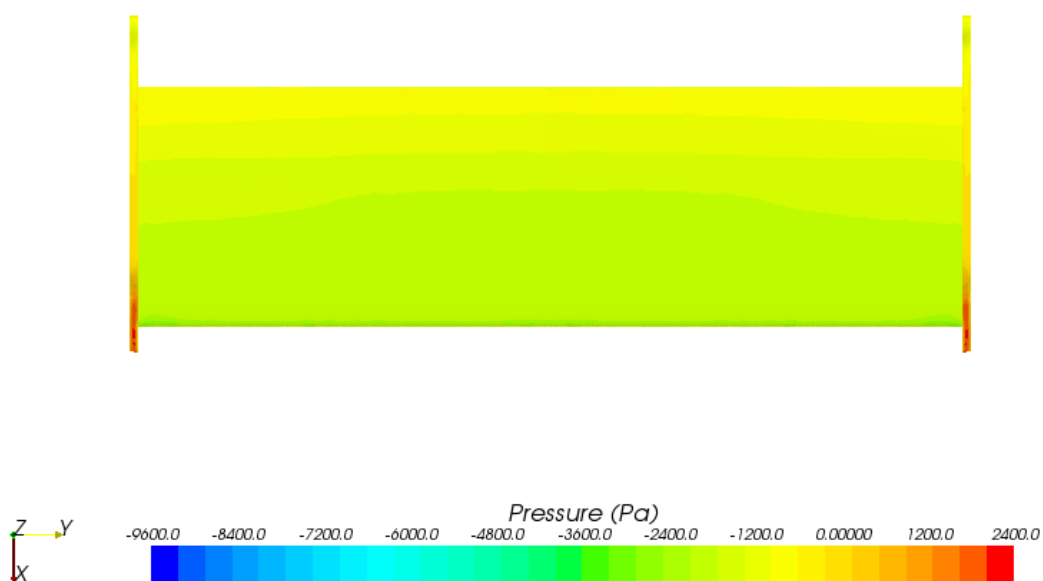
Obr. 46. Rozložení tlaku na povrchu zadního křídla



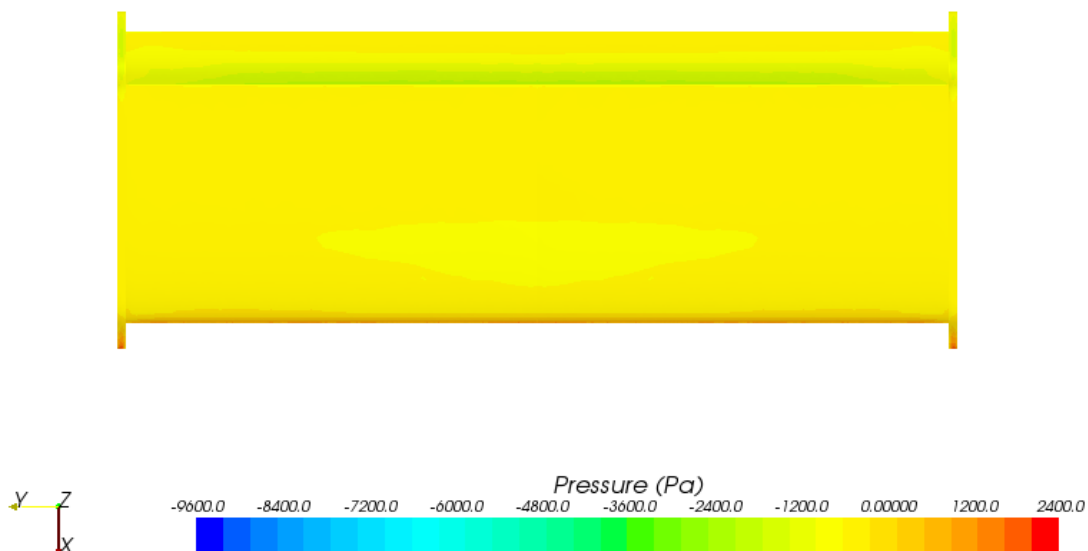
Obr. 47. Rozložení tlaku v rovině symetrie zadního křídla, Venturiho efekt mezi horním a spodním profilem zadního křídla



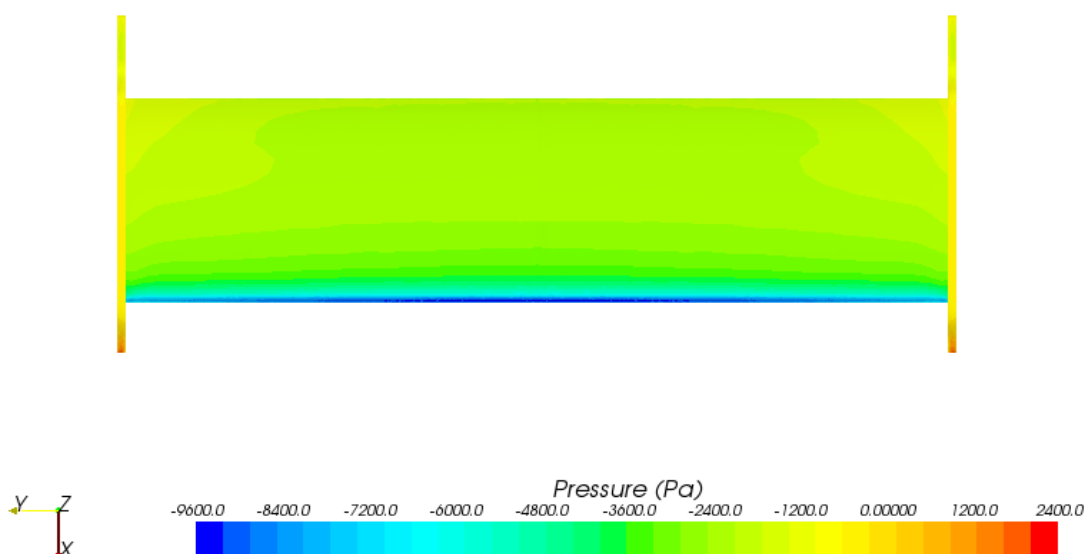
Obr. 48. Rozložení tlaku na povrchu zadního křídla – pohled seshora, profily horního křídla a
přídavné klapky, ve spodní části náběžná hrana spodního profilu



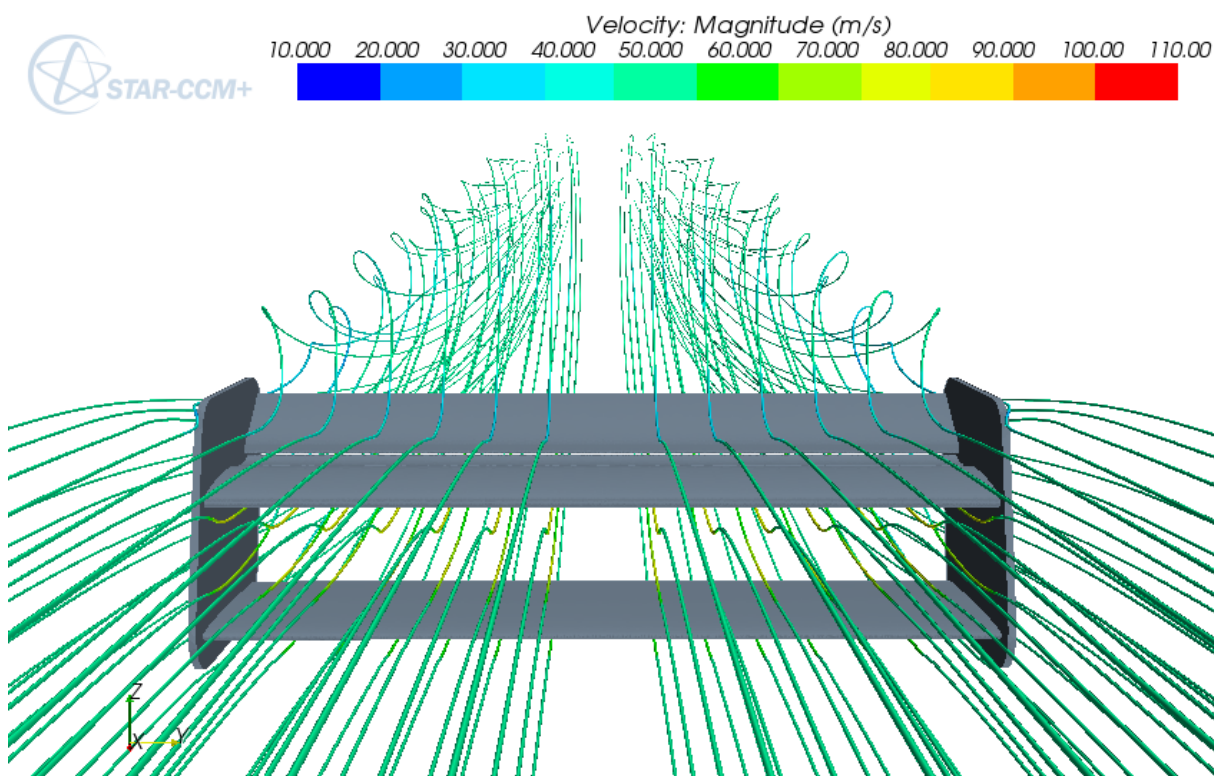
Obr. 49. Rozložení tlaku na povrchu zadního křídla – pohled seshora, profil spodního křídla



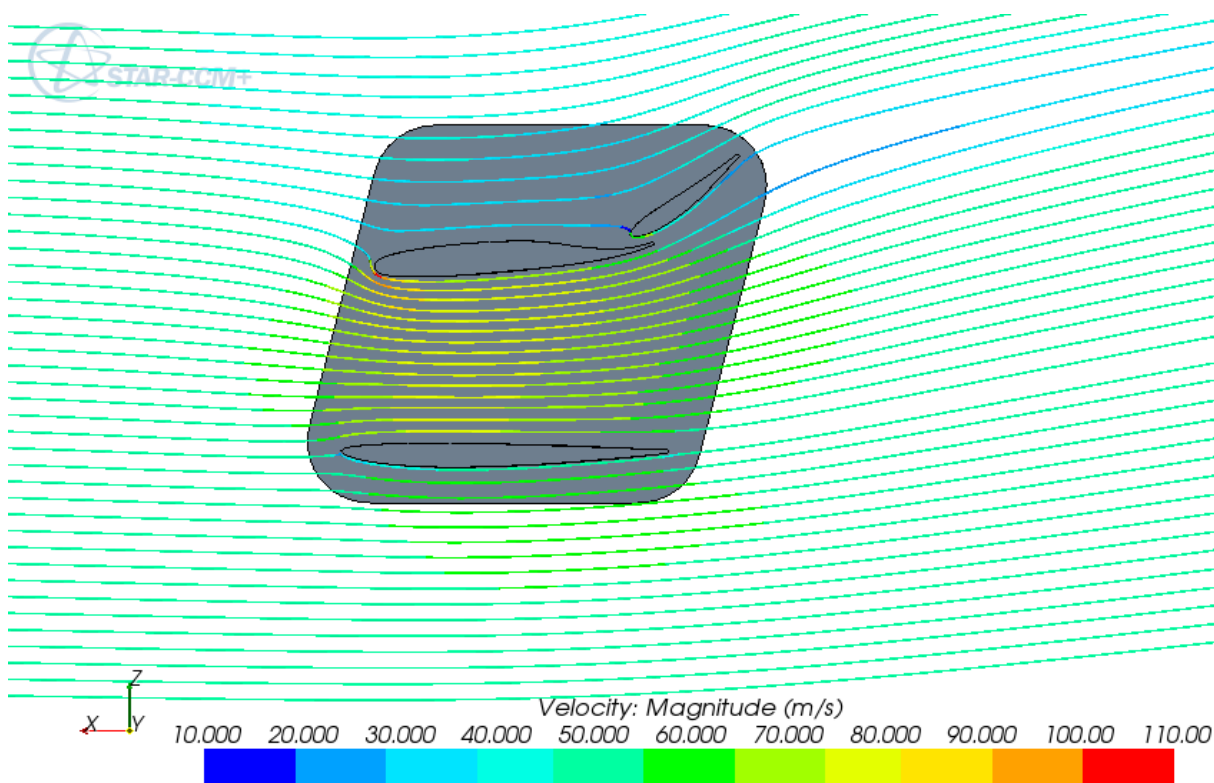
Obr. 50. Rozložení tlaku na povrchu horního křídla – pohled zespoda, profil spodního křídla a část přídatné klapky



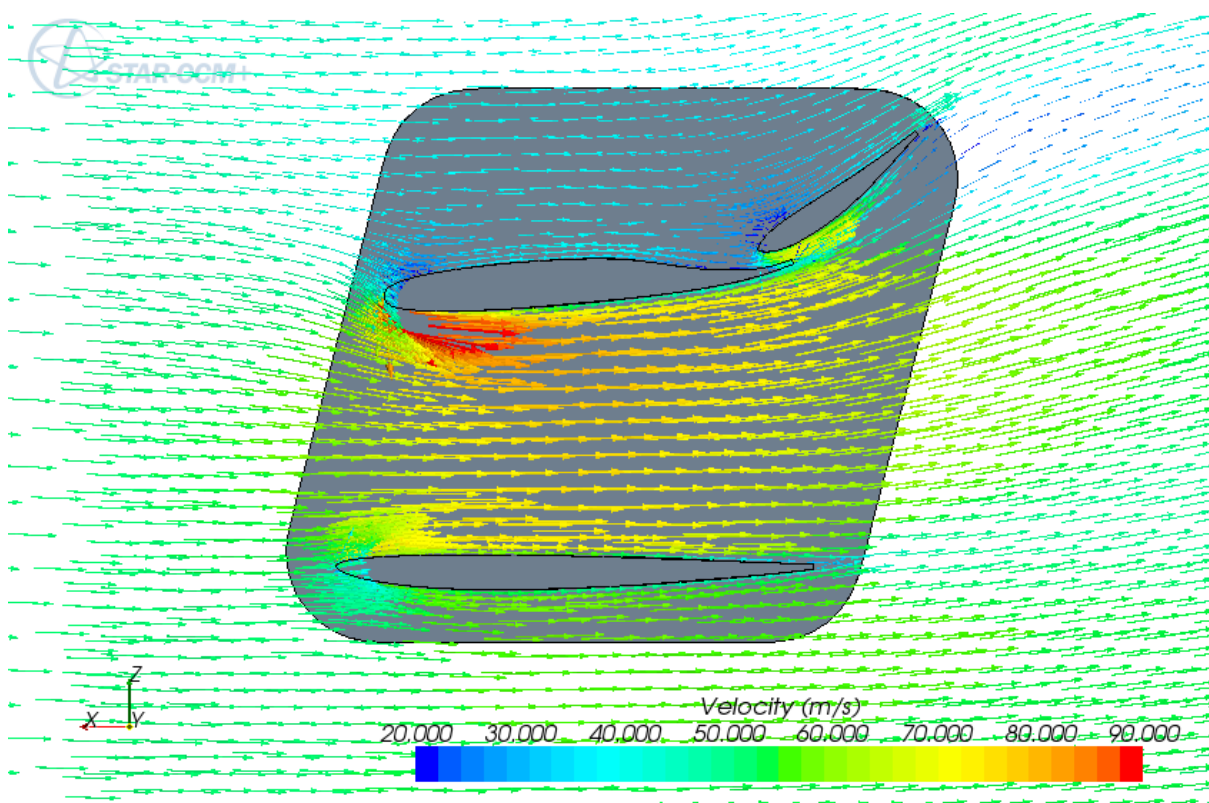
Obr. 51. Rozložení tlaku na povrchu zadního křídla – pohled zespoda, profil horního křídla



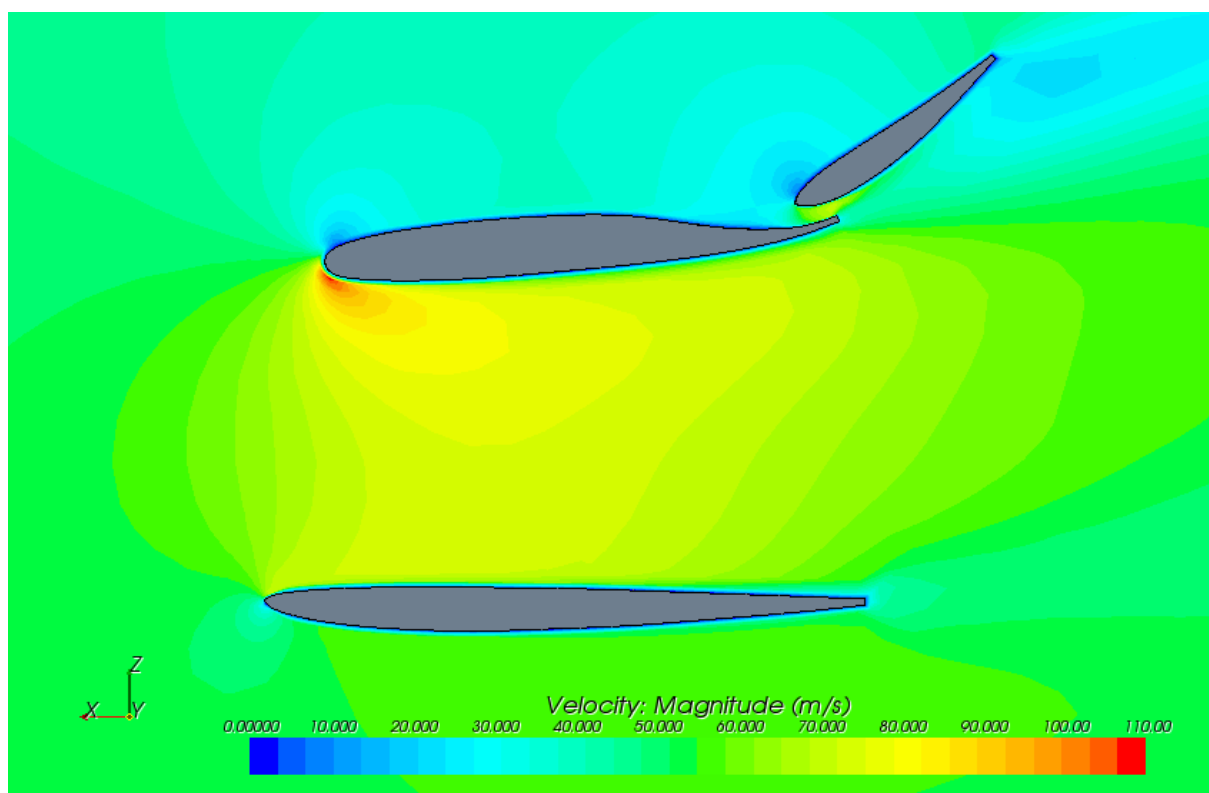
Obr. 52. Vizualizace trajektorií proudu procházejícími zadním křídlem, patrný nárůst rychlosti mezi profily horního a spodního křídla



Obr. 53. Vizualizace trajektorií proudu v rovině symetrie zadního křídla, patrný vznik Venturiho efektu



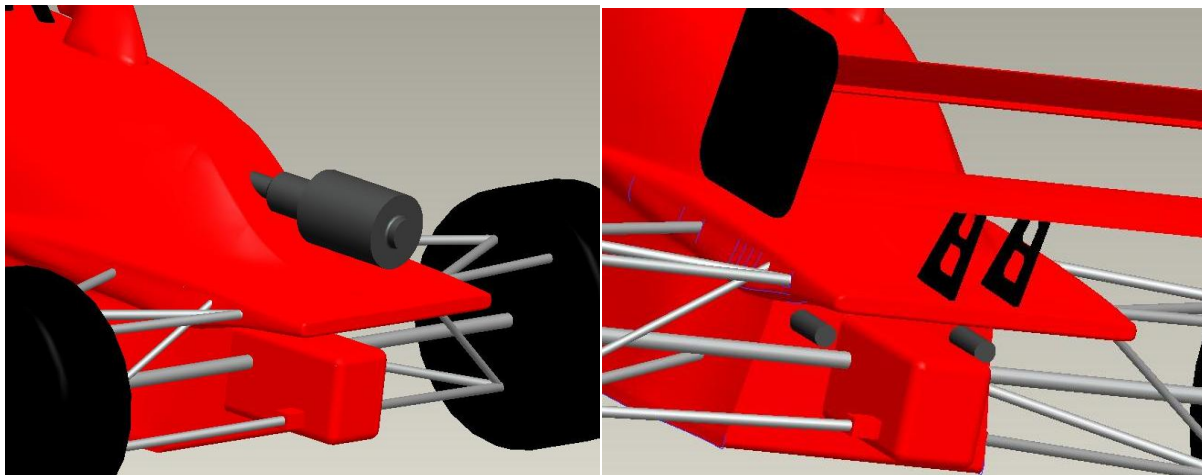
Obr. 54. Vektorové znázornění rychlosti proudu v rovině symetrie zadního křídla, patrné maximum na spodní straně náběžné hrany horního křídla, minimum pak na horní straně náběžné hrany přidavné klapky



Obr. 55. Skalární pole znázorňující velikost rychlosti v rovině symetrie zadního křídla

7.3 Přesunutí tlumiče výfuku do oblasti převodovky

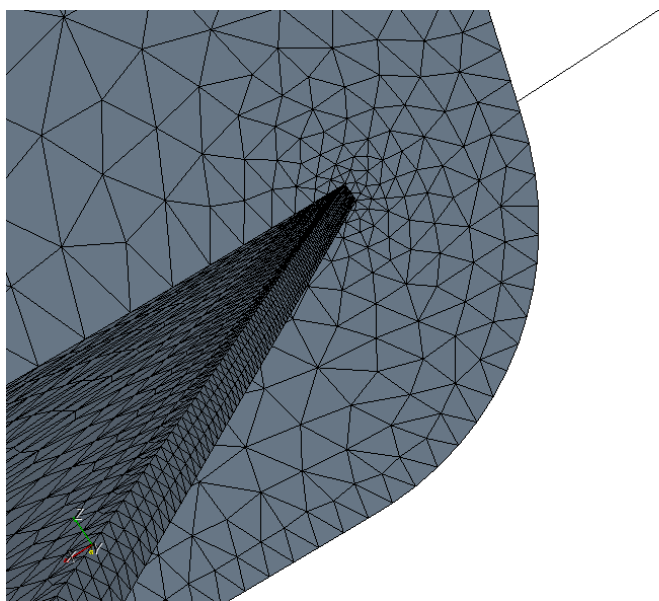
Z důvodu vhodného umístění zadního křídla bylo nutné přesunout tlumič výfuku do nižší polohy, konkrétně do oblasti umístění převodovky. Původní tlumič byl z důvodu zachování symetrie modelu nahrazen dvěma menšími tlumiči. Jednotlivá uspořádání jsou patrná z obrázku 56.



Obr. 56. Nahrazení původního tlumiče výfuku dvěma menšími v oblasti převodovky

8. Vytvoření CFD modelu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky

Postup vytvoření modifikovaného CFD modelu, tedy modelu vozidla s přidavnými aerodynamickými plochami, je shodný s postupem vytvoření základního modelu. Jediným rozdílem je problémové síťování křidel, kdy dochází k přeskočení sítě z horního povrchu na spodní v blízkosti úběžné hrany. Tento defekt způsobuje nástroj na opravu sítě, bez kterého nelze bohužel model vysítovat. Řešením tohoto problému je seříznutí úběžné hrany, tedy vytvoření další plochy a nadefinování velikosti elementu menší než je výška této plochy. Seříznutí hrany s povrchovou sítí je zřejmé z obrázku 57.



Obr. 57. Seříznutá úběžná hrana zadního křídla s povrchovou sítí, výška vzniklé plochy měří 5 mm.

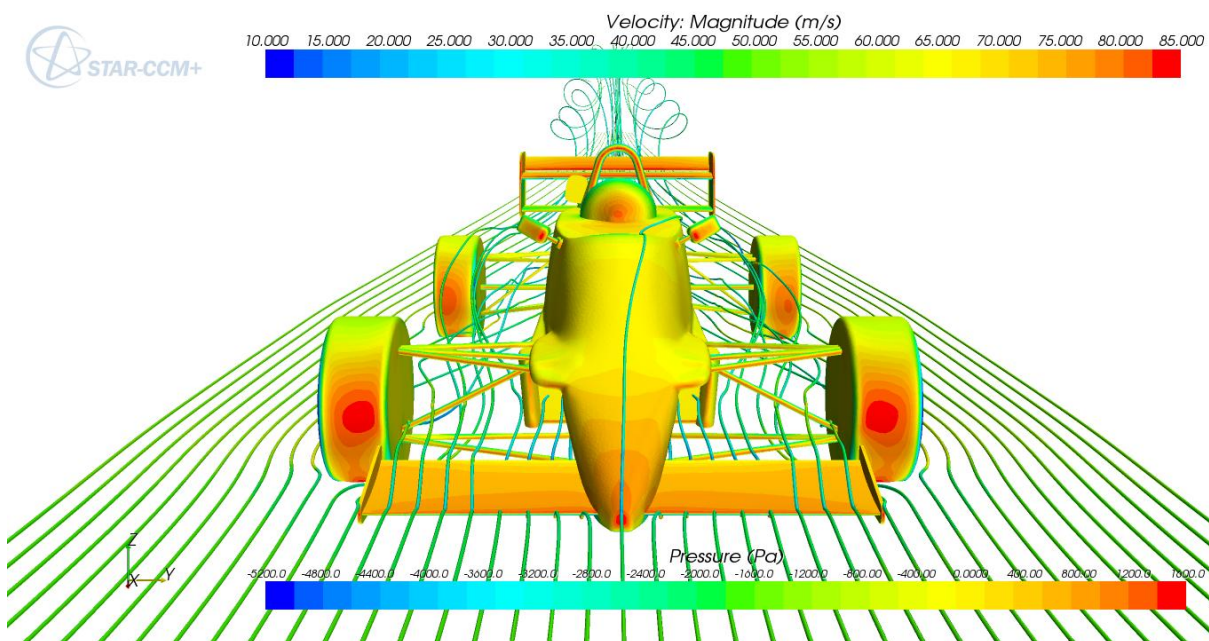
9. Výpočet a zhodnocení výsledků modelu s přidavnými aerodynamickými plochami

Podobně jako u předcházejících modelů bez přidavných aerodynamických prvků, tak i u modelu s přidavnými aerodynamickými prvky byla data získána simulací proudění v softwaru Adapco Star CCM+. Výsledné hodnoty aerodynamických sil a momentu klonění jsou uvedeny v tabulce 11 a vztaheny vůči souřadnému systému popsánému v kapitole 2. Záporná hodnota koeficientu vztlaku c_z znamená, že se jedná o přítlak.

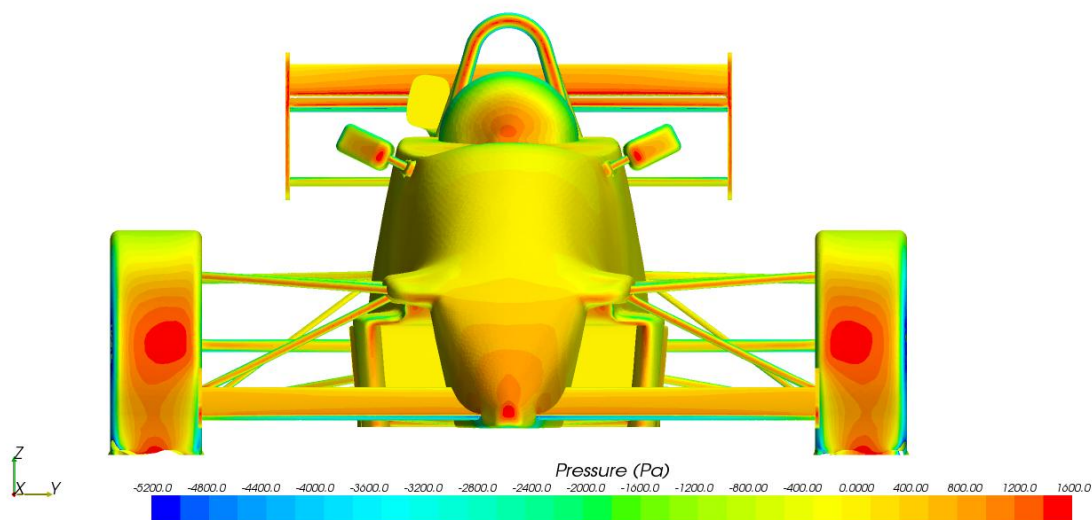
Název modelu	F_x [N]	F_z [N]	M_y [Nm]	C_x	C_z	A [m ²]
Formule Ford modifikovaná	-815,7	-1528,5	-233,3	0,592	-1,11	0,931

Tab. 11. Výsledné hodnoty silového a momentového zatížení s koeficienty aerodynamického odporu a vztlaku CFD modelu s přidavnými aerodynamickými prvky

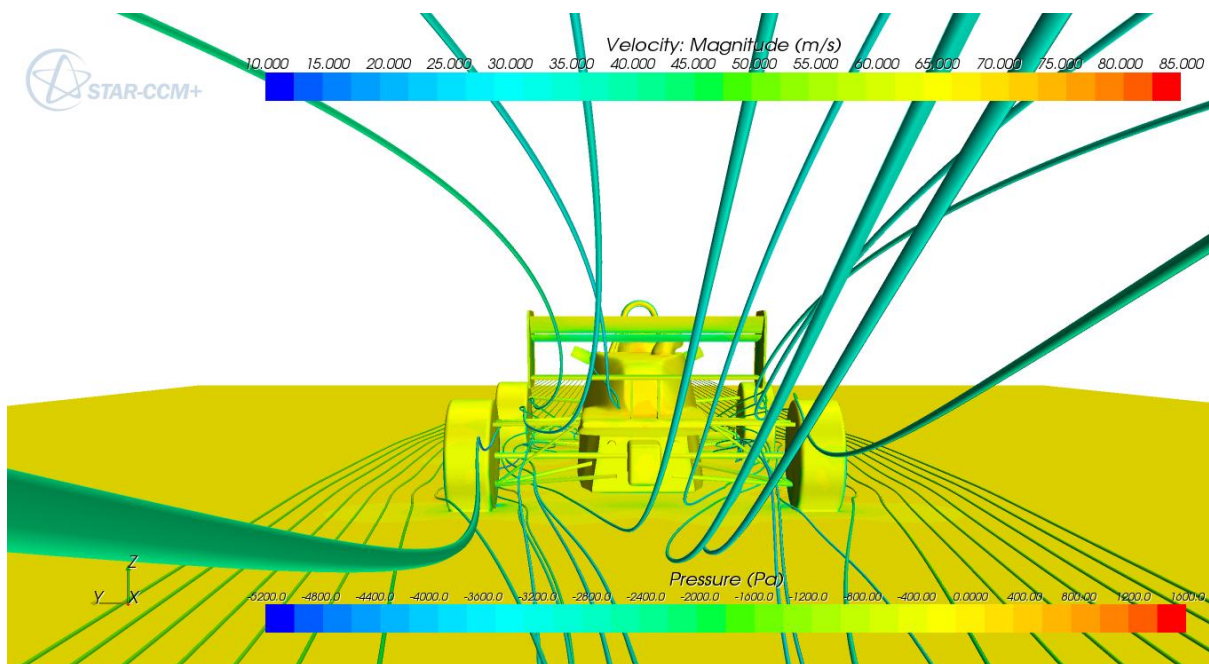
Výsledky rozložení tlaku na povrchu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky a vizualizace proudnic jsou zobrazeny na obrázcích 58 – 68. Pro tyto obrázky platí stejné vlastnosti vzduchu jako pro vozidlo bez přidavných aerodynamických prvků uvedené v tab. 7 v kapitole 6.



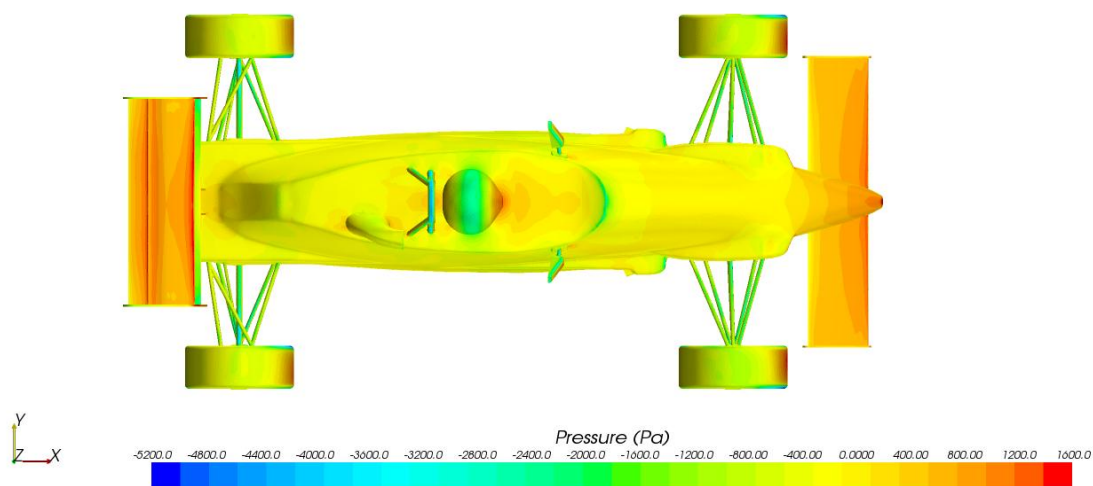
Obr. 58. Rozložení tlaku na povrchu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky – čelní pohled, perspektiva, vizualizace trajektorií proudů, jejichž počátek leží ve výšce náběžné hrany předního křídla, vířivé proudy za vozidlem



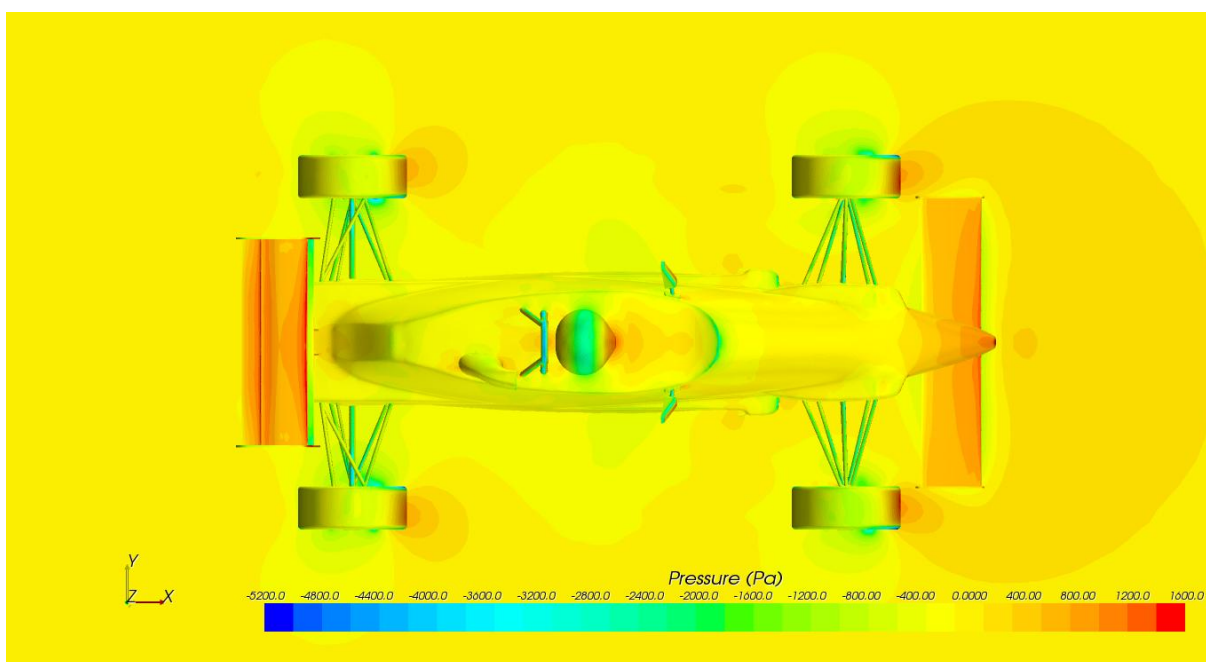
Obr. 59. Rozložení tlaku na povrchu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky – čelní pohled



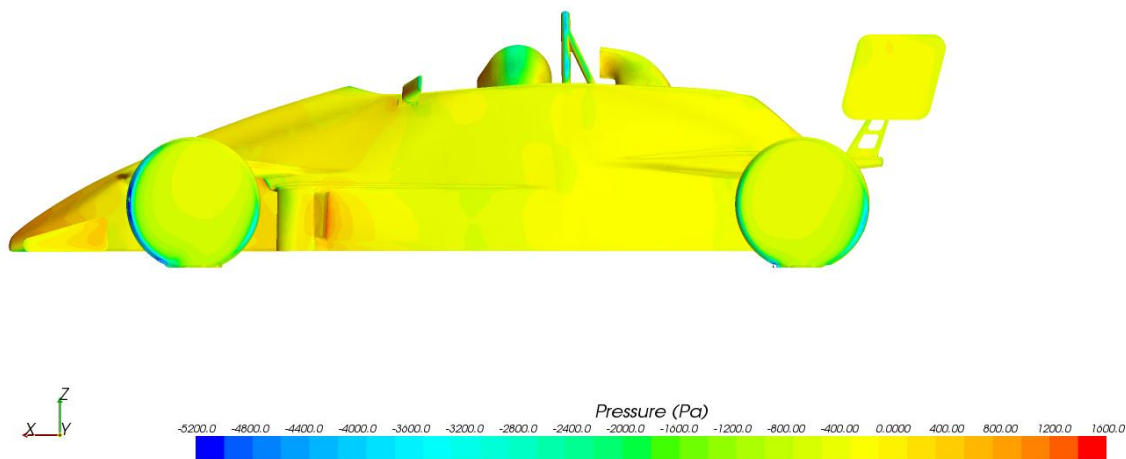
Obr. 60. Rozložení tlaku na povrchu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky – zadní pohled v perspektivě, vizualizace vzniku vírů za vozidlem



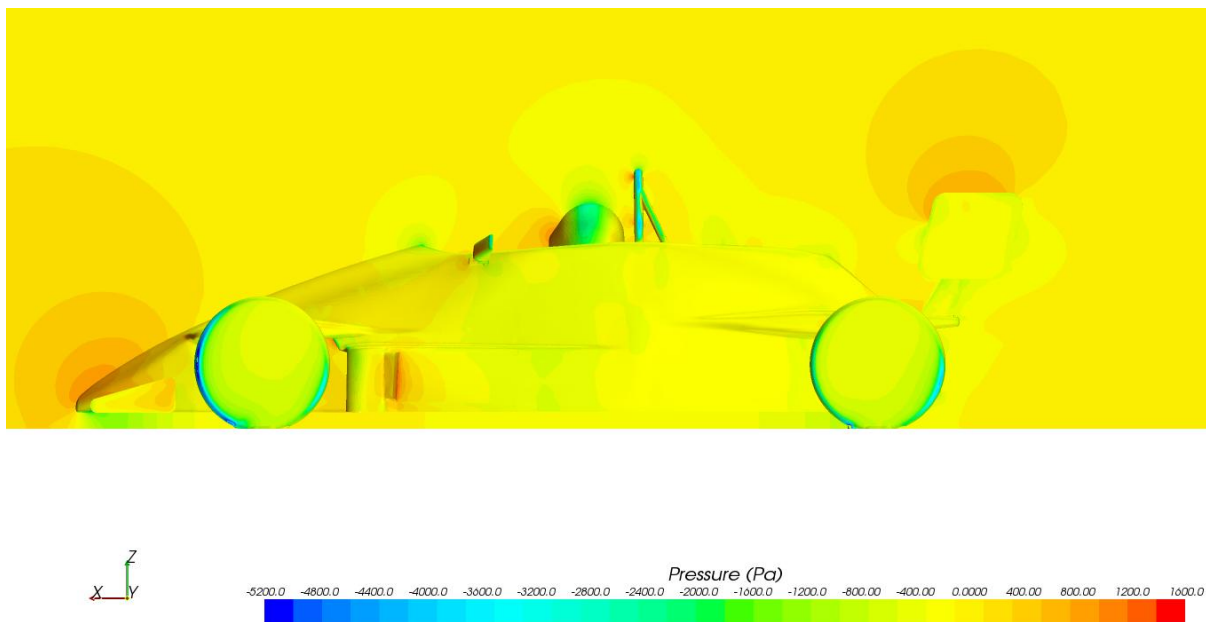
Obr. 61. Rozložení tlaku na povrchu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky – pohled seshora



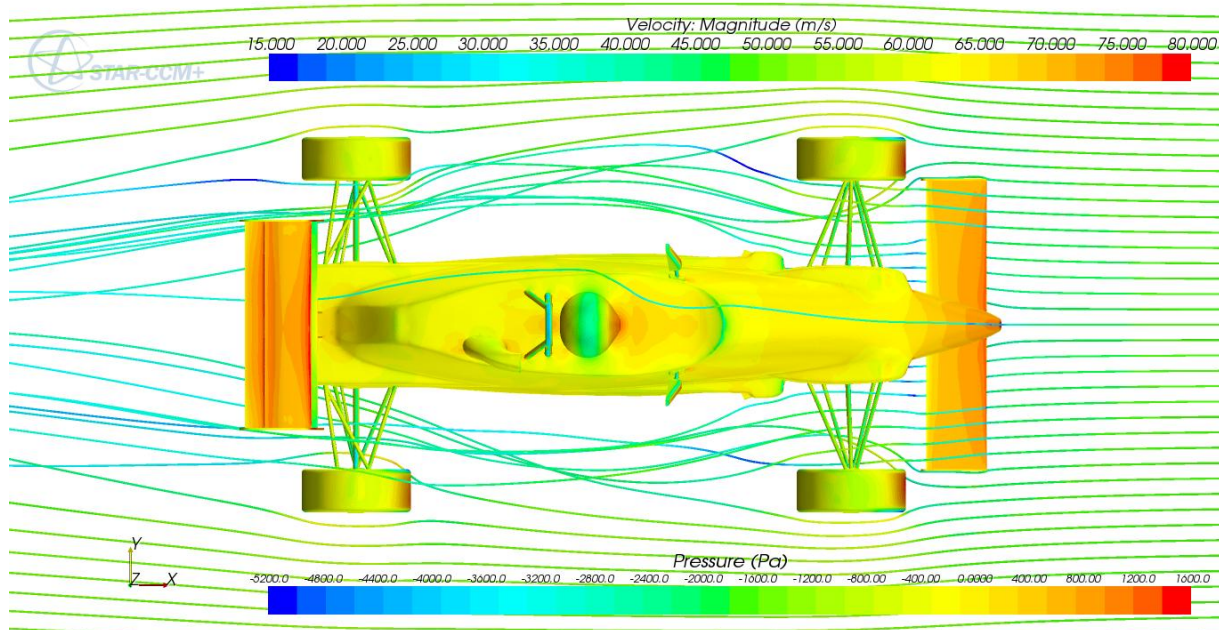
Obr. 62. Rozložení tlaku na povrchu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky – pohled seshora, rozložení tlaku v rovině vozovky



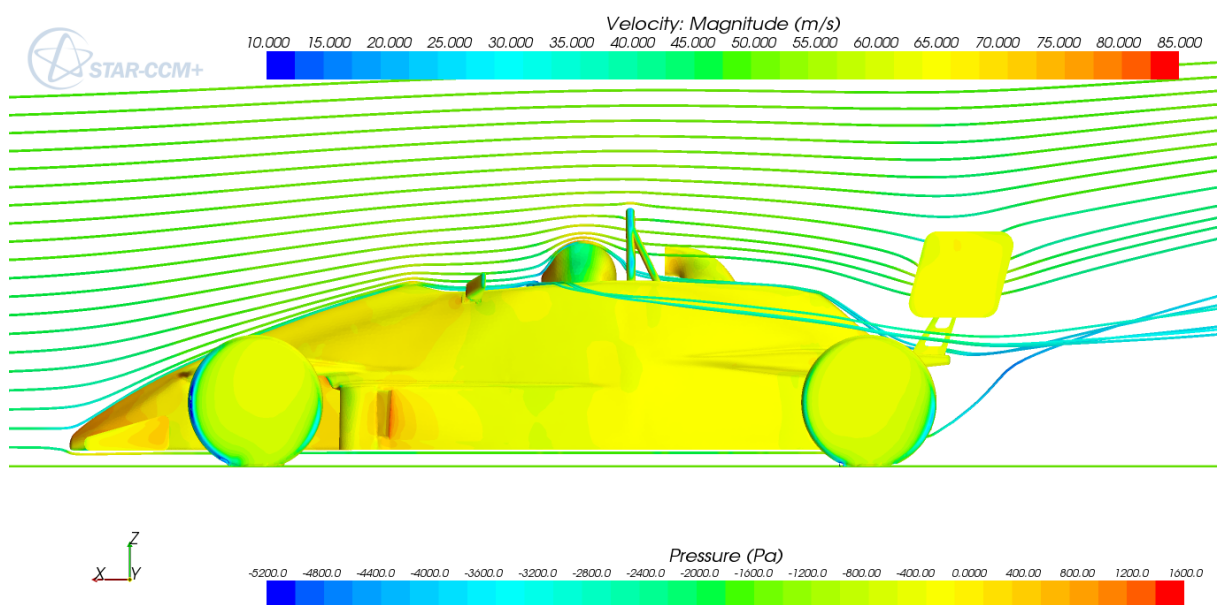
Obr. 63. Rozložení tlaku na povrchu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky – pohled zleva



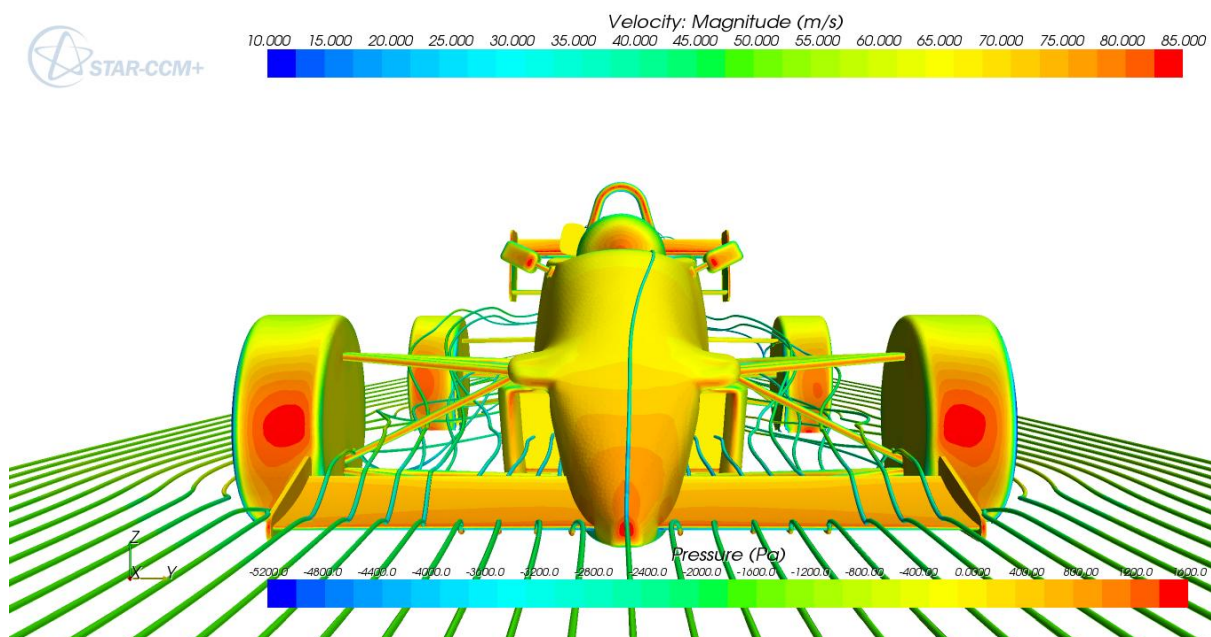
Obr. 64. Rozložení tlaku na povrchu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky – pohled zleva, rozložení tlaku v rovině symetrie



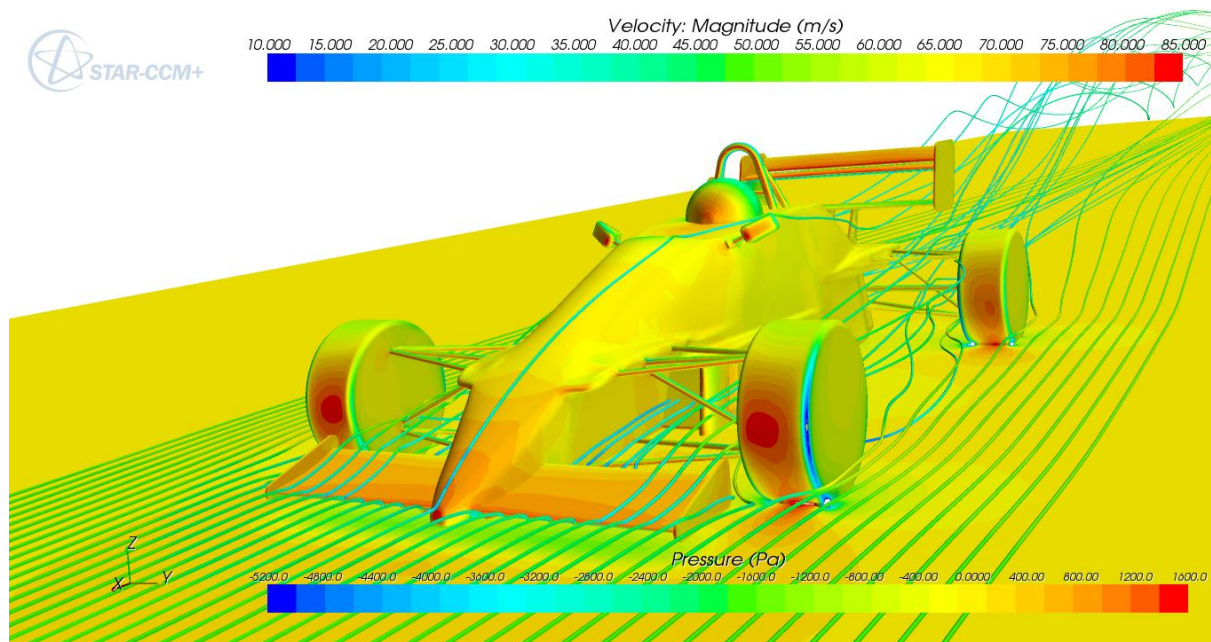
Obr. 65. Rozložení tlaku na povrchu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky – pohled seshora, vizualizace trajektorií proudu, jejichž počátek leží ve výšce náběžné hrany předního křídla



Obr. 66. Rozložení tlaku na povrchu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky – pohled zleva, vizualizace trajektorií proudu, jejichž počátek leží v rovině symetrie vozidla



Obr. 67. Rozložení tlaku na povrchu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky – čelní pohled v perspektivě, vizualizace trajektorií proudu, jejichž počátek leží ve výšce náběžné hrany předního křídla



Obr. 68. Rozložení tlaku na povrchu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky – šikmý pohled v perspektivě, rozložení tlaku v rovině vozovky a vizualizace trajektorií proudu, jejichž počátek leží ve výšce náběžné hrany předního křídla

9.1 Výpočet reakcí od aerodynamických účinků na nápravách modelu vozidla s přídatnými aerodynamickými prvky

Rozvor vozidla:	$l = 2400\text{mm}$
Vzdálenost zadní nápravy od těžiště:	$l_z = 919\text{mm}$
Výška těžiště:	$h = 250\text{mm}$
Hmotnost vozidla s jezdcem:	$m = 513\text{kg}$
Aerodynamická odporová síla:	$F_x = 815,71\text{N}$
Aerodynamická vztlaková síla:	$F_z = -1528,5\text{N}$
Aerodynamický moment klonění:	$M_y = -233,3\text{Nm}$

Soustava rovnic pro výpočet silových reakcí:

$$M_{yT} = M_y - F_x \cdot h - F_z \cdot \left(\frac{l}{2} - l_z \right)$$

$$F_{zp} = -(F_z - F_G) \cdot \frac{l_z}{l} + F_x \cdot \frac{h}{l} + \frac{M_{yT}}{l}$$

$$F_{zz} = -(F_z - F_G) \cdot \frac{l - l_z}{l} - F_x \cdot \frac{h}{l} - \frac{M_{yT}}{l}$$

Výsledná celková reakce vozovky na přední nápravě: $F_{zp} = 2593,1\text{N}$

Výsledná celková reakce vozovky na zadní nápravě: $F_{zz} = 3965,4\text{N}$

Procentuální zatížení přední nápravy: $\%F_{zp} = 39,54\%$

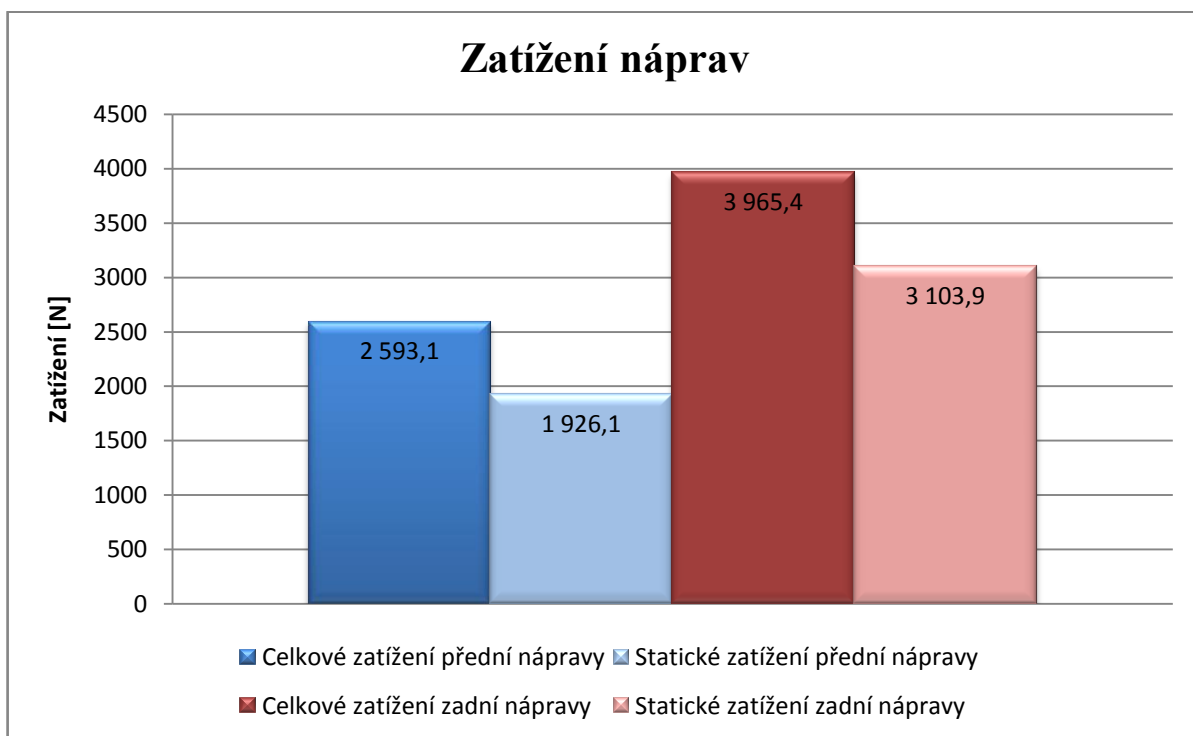
Procentuální zatížení zadní nápravy: $\%F_{zz} = 60,46\%$

Reakce vozovky od aerodynamických sil na přední nápravě: $F_{zpAero} = 667,1\text{N}$

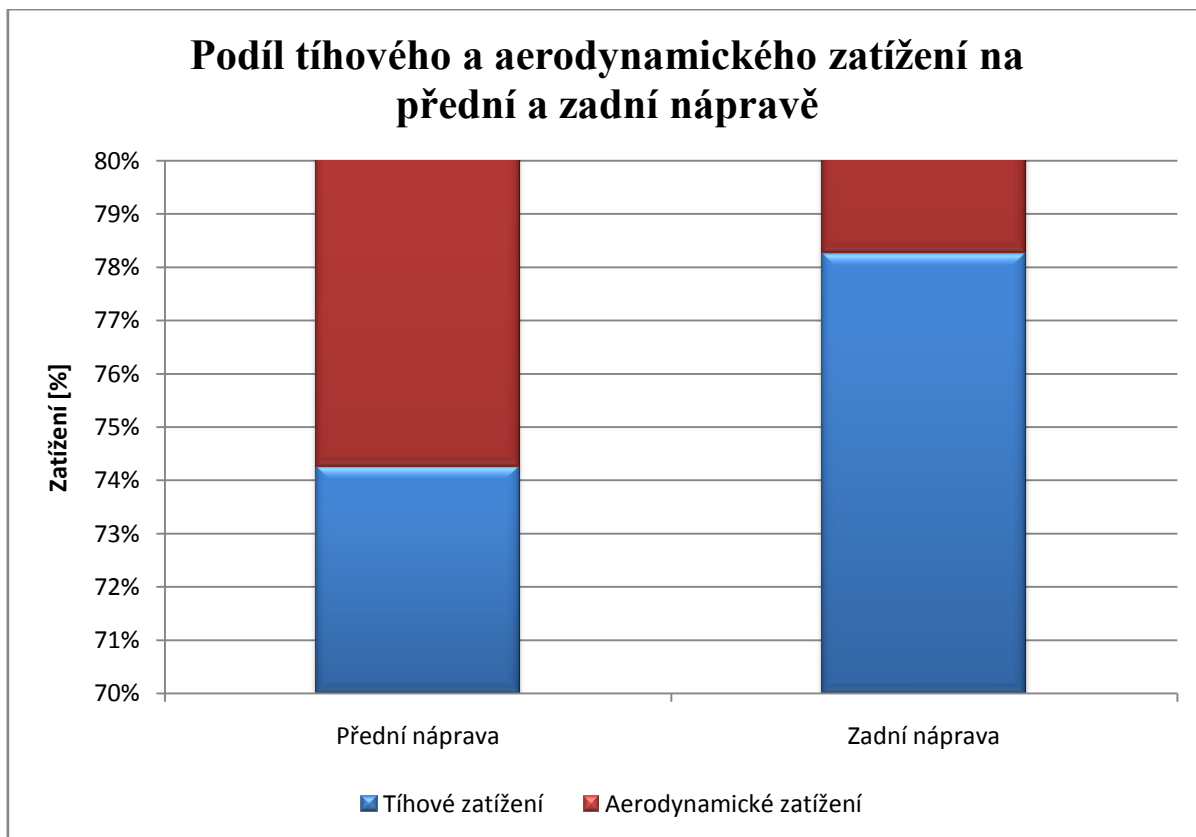
Reakce vozovky od aerodynamických sil na zadní nápravě: $F_{zzAero} = 861,5\text{N}$

Název modelu	F_{zp} [N]	F_{zz} [N]	$\%F_{zp}$	$\%F_{zz}$	F_{zpAero} [N]	F_{zzAero} [N]
Formule Ford modifikovaná	2593,1	3965,4	39,54	60,46	667,1	861,5

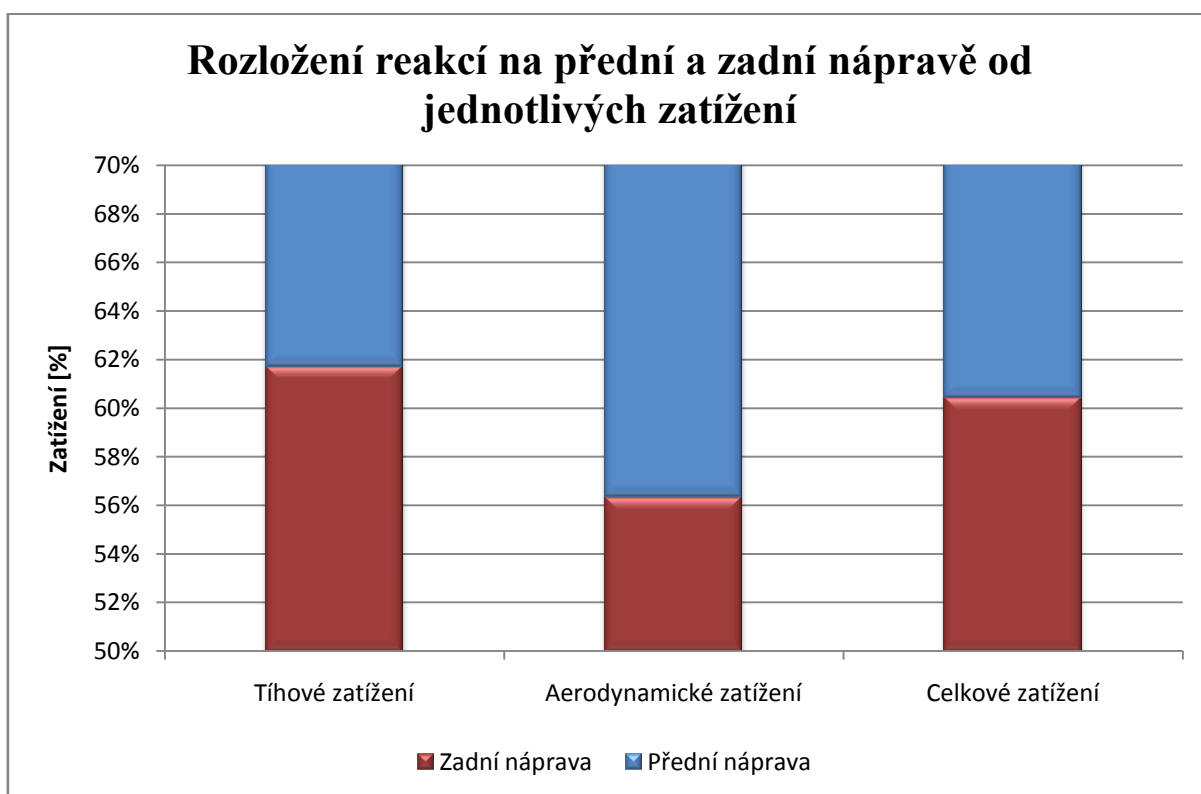
Tab. 12. Vypočtené hodnoty celkového a aerodynamického zatížení modelu formule s přídatnými aerodynamickými prvky



Graf 7. Porovnání výsledků statického a celkového zatížení na přední a zadní nápravě



Graf 8. Porovnání podílu aerodynamické a tíhové síly zatěžující přední a zadní nápravu



Graf 9. Rozložení reakcí na přední a zadní nápravě od jednotlivých složek a od celkového zatížení

Z výsledků získaných simulací výpočtů proudění a přepočtem reakcí vozovky v místě styku s pneumatikami vyplývá, že více je zatížena zadní náprava, a to jak při nulové rychlosti, tak i při rychlosti 180 km/h. Z celkového zatížení přední nápravy činí statické zatížení (zatížení tíhovou silou) 74,2% a aerodynamické zatížení 25,8%. Na zadní nápravě je výsledek podobný, a to tak že statické zatížení činí 78,2% a zatížení aerodynamickými silami pak 21,8%. Rozložení celkového zatížení odpovídá 39,5% na přední a 60,5% na zadní nápravě.

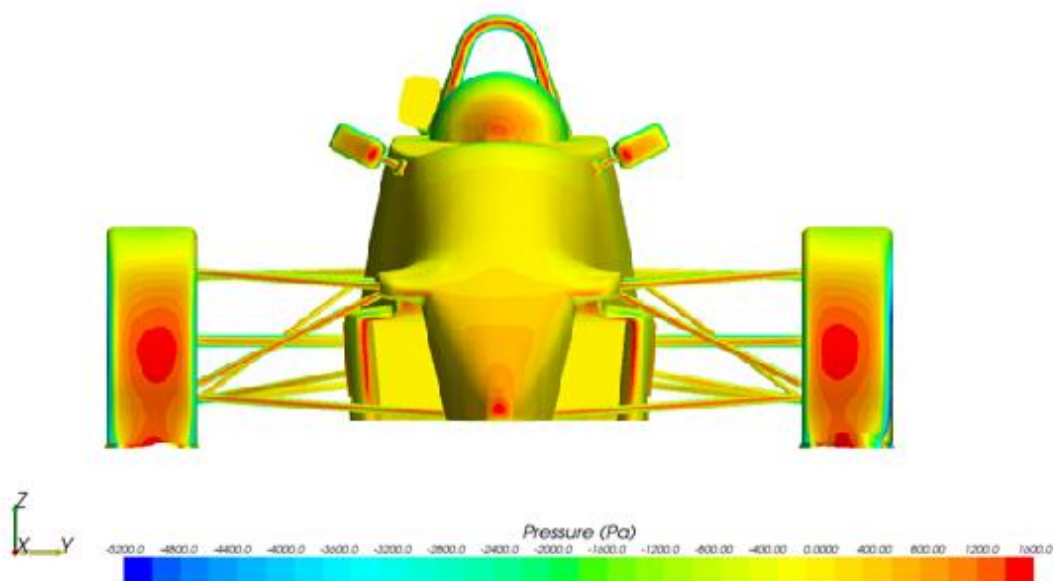
9.2 Porovnání výsledků modelu s přidavnými aerodynamickými plochami s měřenými hodnotami vozu stejné kategorie

Data získaná simulací proudění vzduchu okolo formule s přidavnými aerodynamickými prvky nebylo možno porovnat s žádným měřením z aerodynamického tunelu, popř. z dojezdové zkoušky, protože toto vozidlo reálně neexistuje a není k dispozici ani jeho reálný model. K porovnání tedy posloužila data získaná z měření vozidel stejné kategorie, proto toto srovnání, stejně jako u předchozích modelů, nelze považovat za směrodatné, ale pouze za orientační.

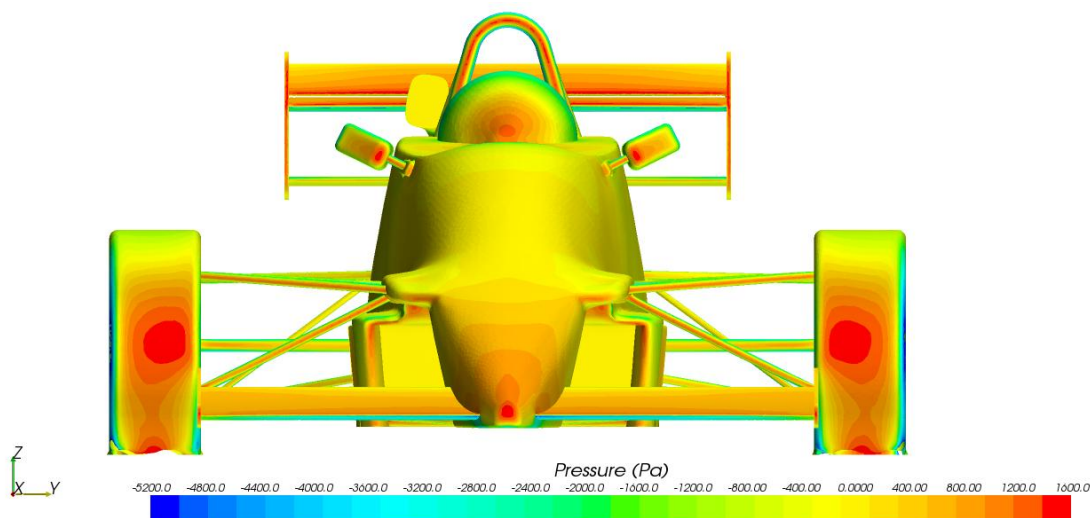
Z obrázku 33 v kapitole 6.2 je zřejmé, že modelovaná formule Ford s přidavnými aerodynamickými prvky je nejvíce podobná formuli číslo 7, jejíž hodnota koeficientu aerodynamického odporu je 1,1 a hodnota koeficientu aerodynamického vztlaku je -0,95. Porovnáním těchto hodnot s daty získanými simulací se nejvíce podobají hodnoty koeficientu aerodynamického vztlaku. Hodnota koeficientu aerodynamického odporu získaná měřením je přibližně dvakrát vyšší než hodnota získaná simulací. Jelikož je toto srovnání velmi hrubé, nelze zcela jasně posoudit kvalitu výsledků získaných simulací.

10. Porovnání výsledků modelu původního vozidla s modelem s přidavnými aerodynamickými plochami

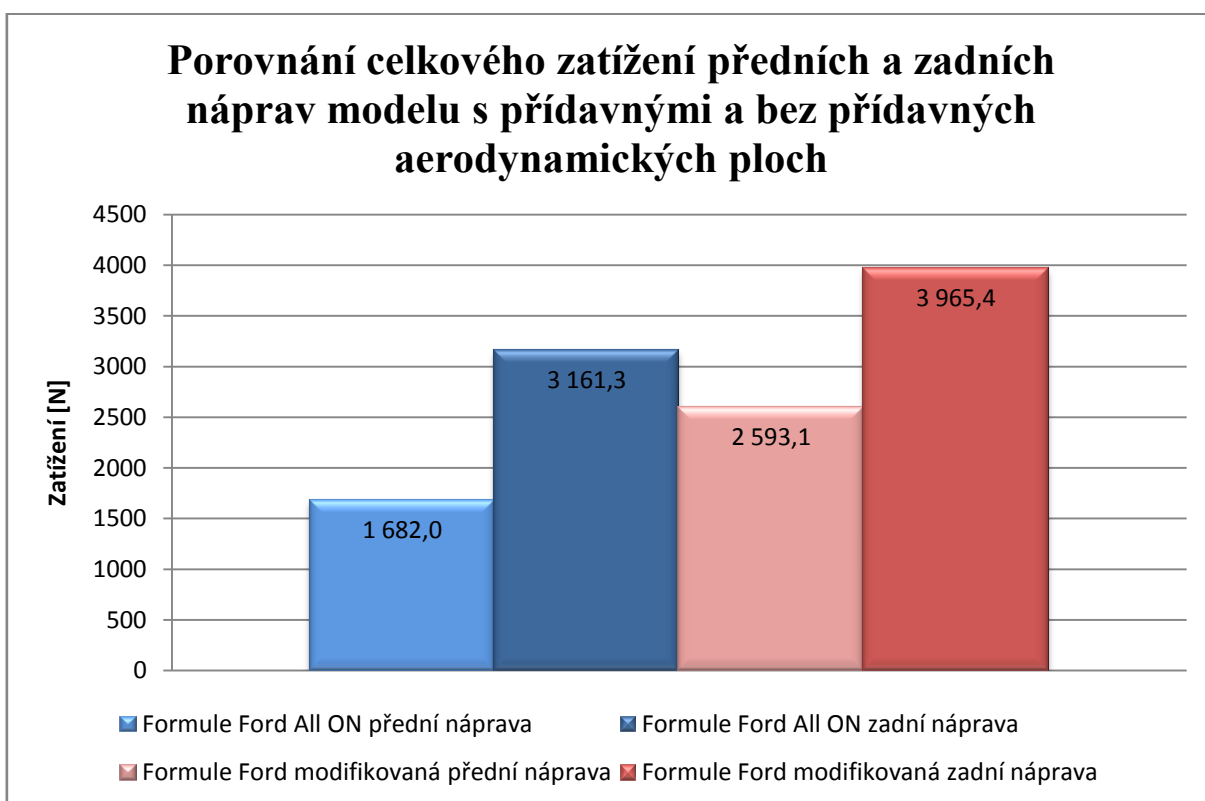
K porovnání výsledků modelů původního vozidla s vozidlem s přidavnými aerodynamickými prvky posloužil model se stejnými okrajovými podmínkami, tedy formule Ford s rotujícími koly a průchozím chlazením a sáním. Obě varianty modelů jsou porovnány jak rozložením tlaku na následujících obrázcích, tak i vypočtenými hodnotami zatížení náprav zobrazených v grafech 10 – 12.



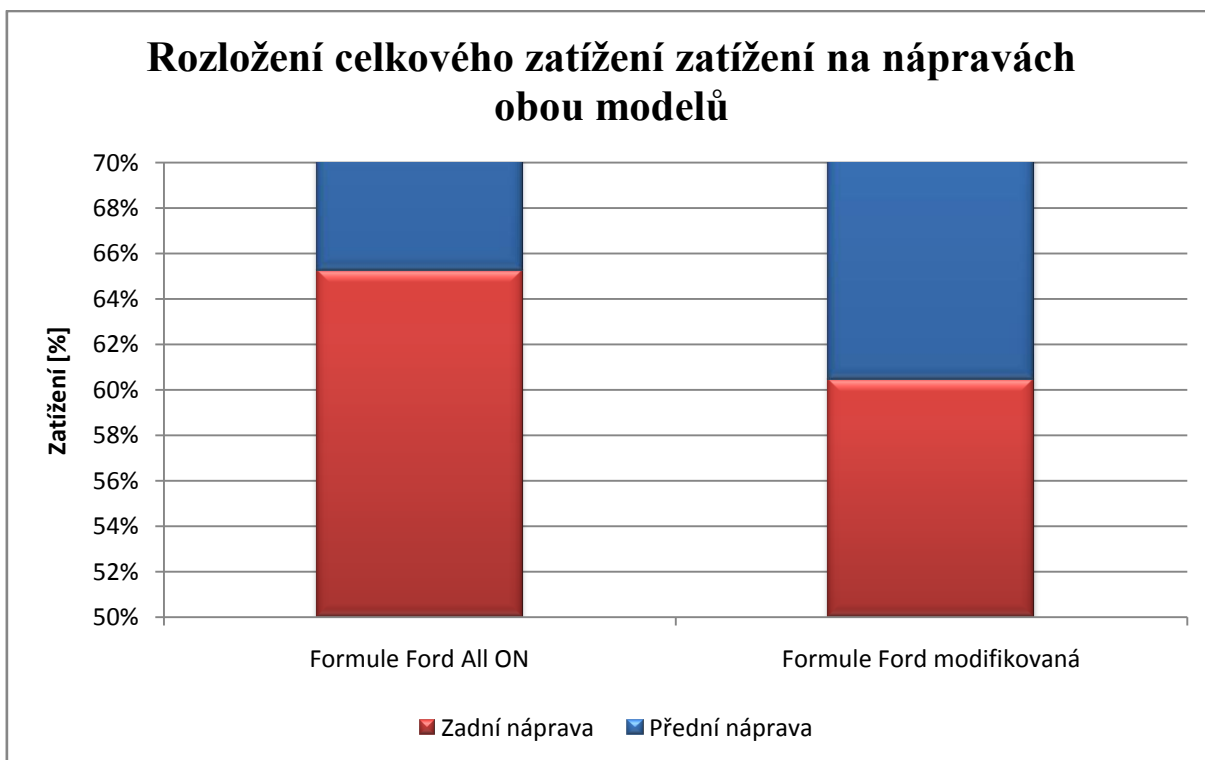
Obr. 69. Rozložení tlaku na povrchu vozidla bez přidavných aerodynamických prvků



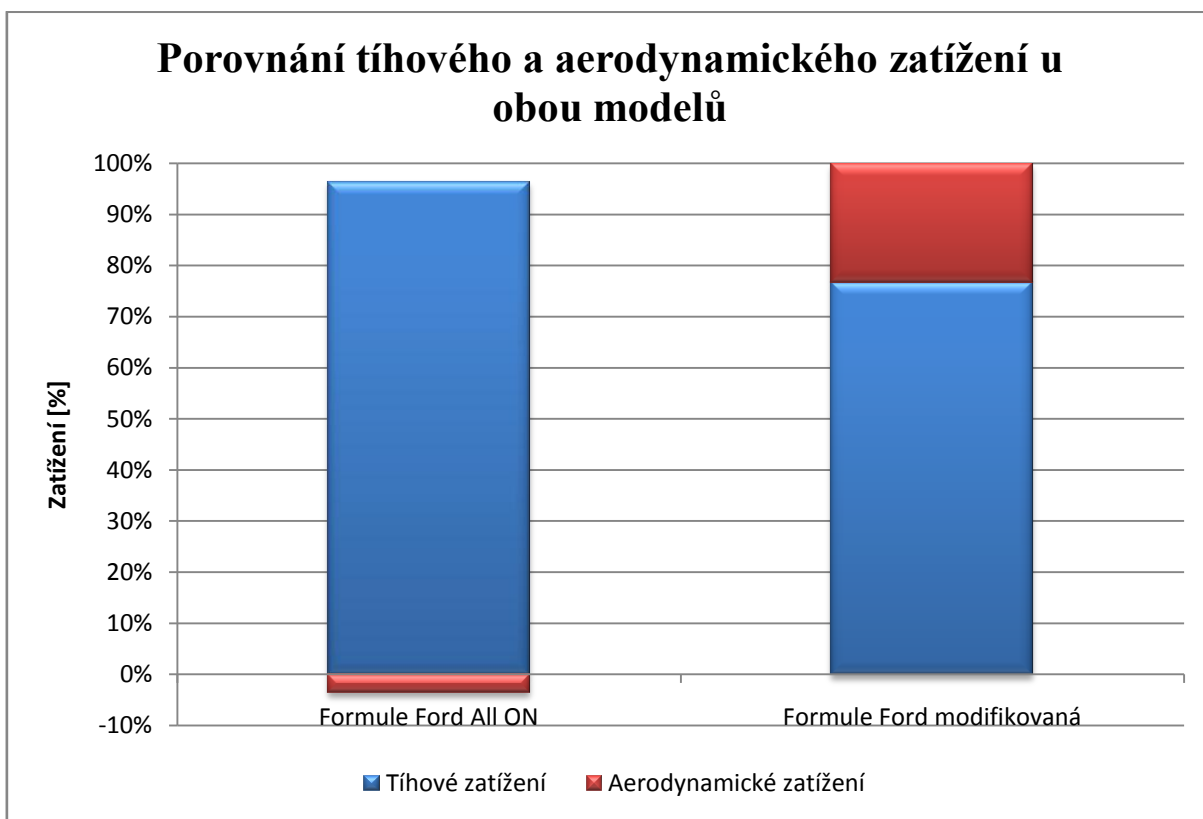
Obr. 70. Rozložení tlaku na povrchu vozidla s přidavnými aerodynamickými prvky



Graf 10. Zatížení předních a zadních náprav modelu bez a s přídatnými aerodynamickými prvky



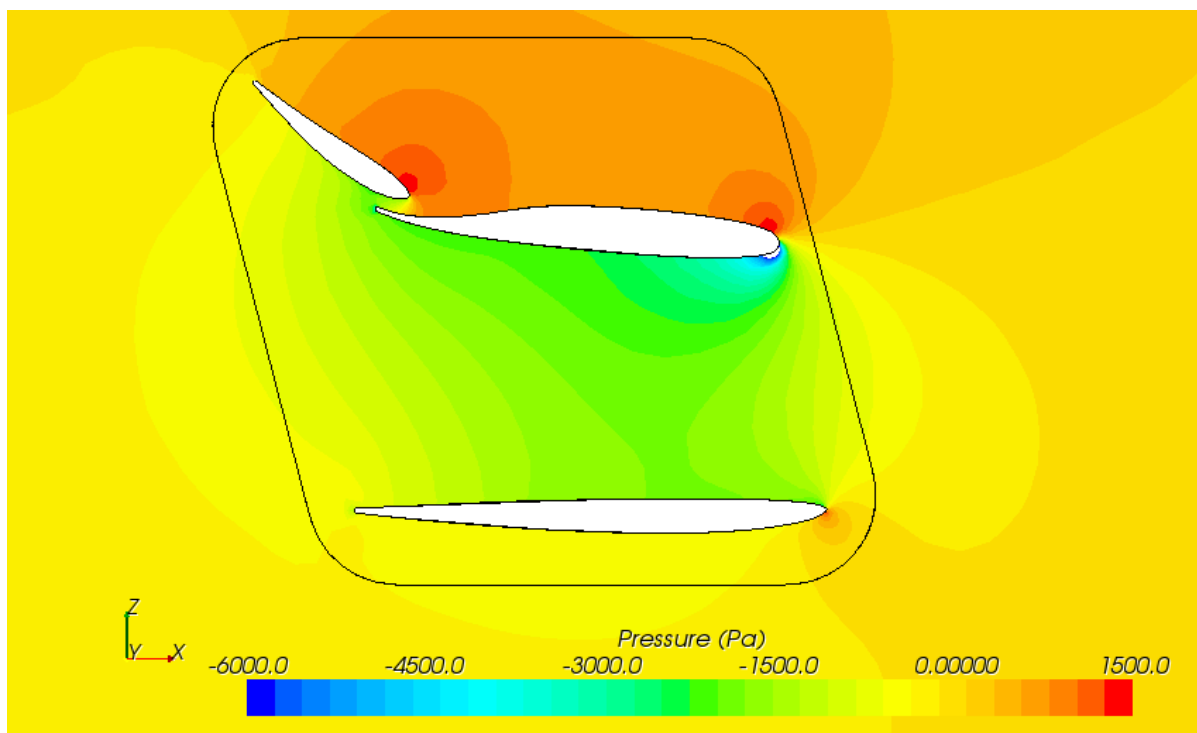
Graf 11. Rozložení celkového zatížení na nápravách modelu bez a s přídatnými aerodynamickými prvky



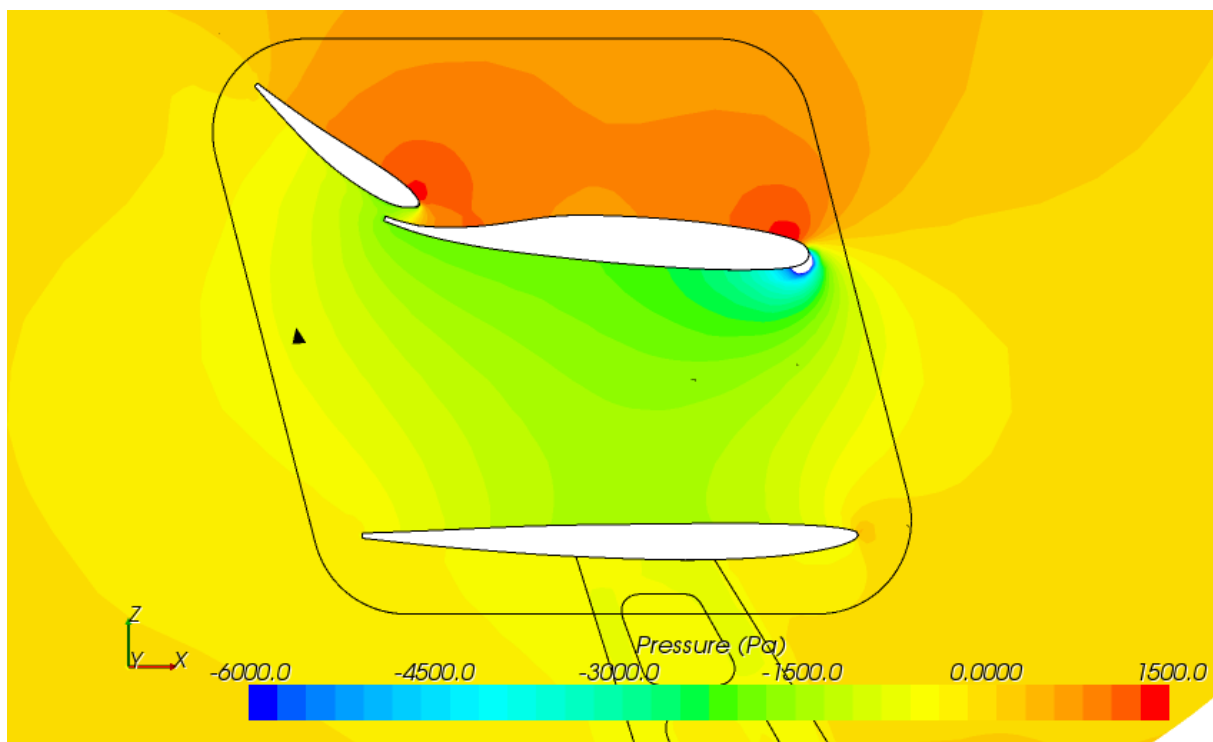
Graf 12. Porovnání tíhového a aerodynamického zatížení modelu bez a s přidavnými aerodynamickými prvky

Ze získaných výpočtů plyne navýšení celkového zatížení náprav vlivem přidavných aerodynamických prvků o 35,4% oproti původnímu modelu. Původním vozidlo bylo aerodynamickými silami nadlehčováno, zatímco vozidlo s přidavnými aerodynamickými prvky je těmito silami značně přitěžováno. Podíl aerodynamického zatížení na celkovém zatížení modifikovaného vozidla je 23,3%, což je patrné z grafu 12.

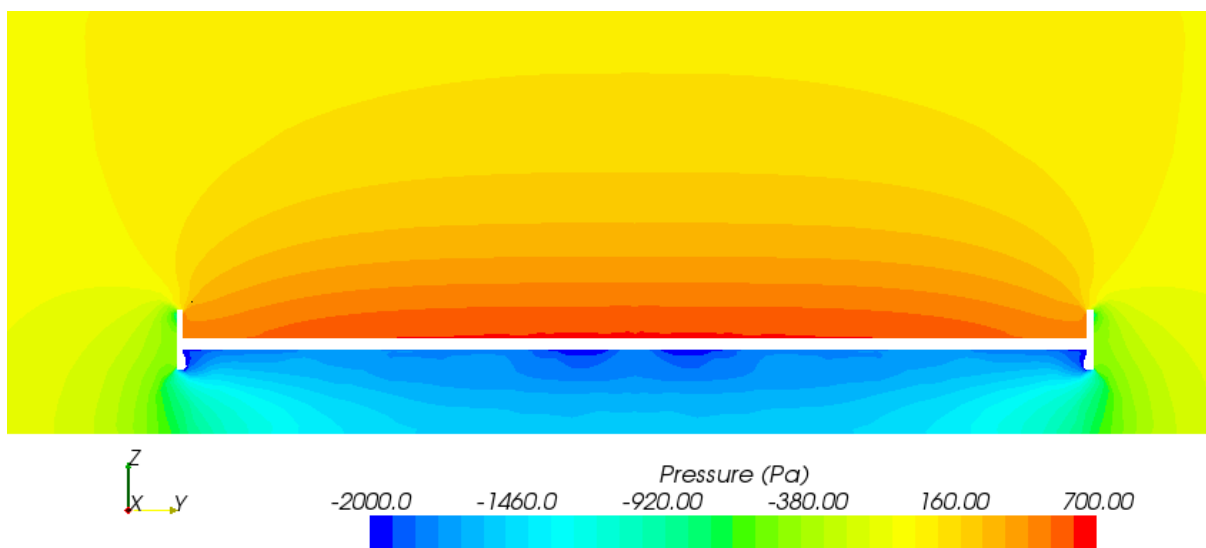
11. Ovlivnění rozložení tlaku na površích křídel přítomností karoserie vozidla



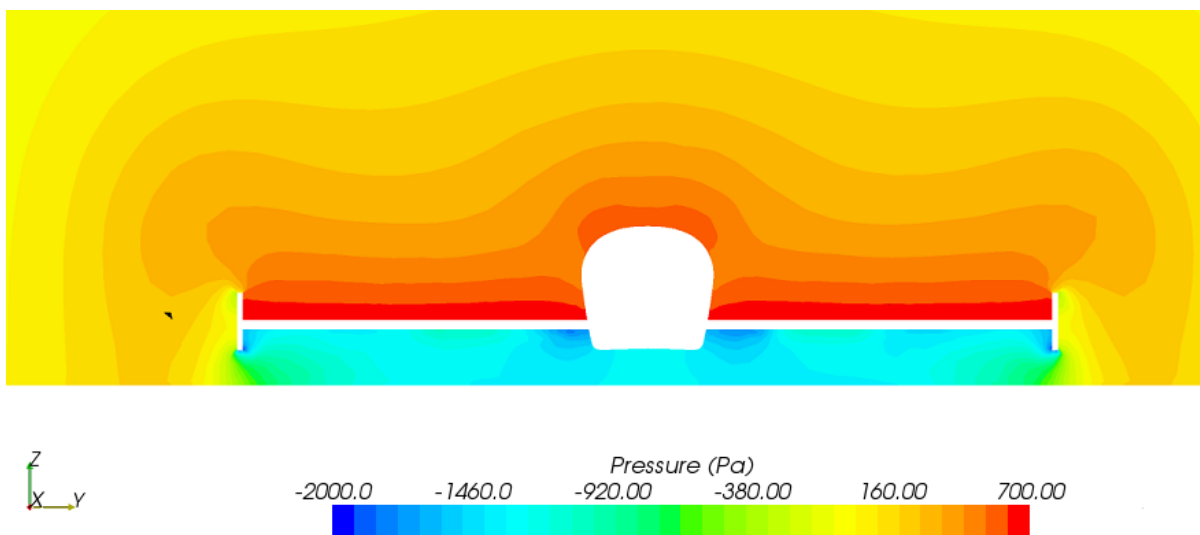
Obr. 71. Rozložení tlaku v rovině symetrie zadního křídla, model bez přítomnosti karoserie vozidla



Obr. 72. Rozložení tlaku v rovině symetrie zadního křídla, model s karoserií vozidla



Obr. 73. Rozložení tlaku v rovině řezu předním křídlem, model bez karoserie vozidla



Obr. 74. Rozložení tlaku v rovině řezu předním křídlem, model s karoserií vozidla

Z předcházejících obrázků je patrné, že karoserie vozidla ovlivňuje rozložení tlaku na povrchu přitlačných křídel, a má tedy vliv na využití přitlaku jednotlivých přídavných aerodynamických prvků. U zadního křídla ovlivnila karoserie rozložení tlaku nepatrně, zatímco u předního lze hovořit o razantní změně. Samostatné křídlo má na spodní straně mnohem vyšší podtlak, přesunuly se i místa přechodu z podtlaku do přetlaku v oblasti koncových desek. Přítomnost špičky automobilu má pak za následek charakteristický tvar rozložení tlaku v rovině řezu předním křídlem.

12. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření postupu pro sestavení CFD modelu závodního automobilu pomocí dat získaných měření optickým 3D scannerem reálného vozu za účelem získání aerodynamických charakteristik závodního automobilu s nekrytými koly. Těžištěm prací vykonaných v rámci této diplomové práce byly studie vlivu aerodynamických prvků a nastavení okrajových podmínek na celkové zatížení vozidla. Ze získaných dat zatížení vozidla aerodynamickými silami byla následně provedena optimalizace tvaru karoserie s cílem navýšení zatížení v místě styku pneumatiky s vozovkou.

Z hlediska získání dat 3D scannerem se ukázalo jako nevhodné skenování jednotlivých dílů karoserie v rozebraném stavu, a to z důvodu deformace tvaru pružných částí, což mělo za následek problematické sestavení dílů CAD modelu. Výsledná kvalita tvaru karoserie CAD modelu byla pro daný úkol dostatečně vysoká, což bylo ověřeno přeměření základních rozměrů reálného automobilu v sestaveném stavu.

Pro výpočet CFD modelu závodního automobilu s původní neoptimalizovanou karoserií byly vytvořeny tři varianty modelu s různými nastaveními okrajových podmínek. Díky těmto simulacím byl zjištěn vliv rotujících kol a průchozího chlazení na celkové zatížení závodního automobilu aerodynamickými silami.

Dále bylo provedeno několik simulací proudění vzduchu kolem pěti variant předních přítláčných křídel s cílem získání závislosti koeficientu přítlaku na vzdálenosti křídla od vozovky. Výpočet proudění kolem zadního křídla byl proveden pouze jeden z důvodu dostatečného zatížení zadní nápravy.

Tato úvodní studie splnila veškeré požadavky kladené vedoucím diplomové práce v zadání. Navíc bylo provedeno několik simulací pro ověření vlivu přítomnosti karoserie na aerodynamické charakteristiky přítláčných křídel.

Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že byla vytvořena metoda pro získání dat zatížení aerodynamickými silami, kterou lze opakovaně aplikovat na různých vozidlech.

V této práci lze pokračovat více směry. Základním tématem pro rozvíjení znalostí z oboru aerodynamiky na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství a pokračování této úvodní studie, by mělo být zajištění verifikace výsledků získaných simulací pomocí měření, a to buď v aerodynamickém tunelu na reálném vozidle nebo jeho zmenšeném modelu, nebo alespoň pomocí dojezdové zkoušky. Další možností pro pokračování jsou simulace proudění kolem automobilu s různým nastavením podvozku, konkrétně výšky podlahy od vozovky a úhlu náběhu. Konečným cílem by mělo být propojení CFD výpočtů a MBS simulací za účelem zvýšení kvality klasifikace jízdní stability automobilu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] KATZ, J. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Bentley Publishers 2006, ISBN 0-8376-0142-8
- [2] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. Nakladatelství VLK, Brno 2000, ISBN 80-238-5273-6
- [3] KOVANDA, B., KOVANDA J. *Aerodynamika vozidel*. Vydavatelství ČVUT, Praha 1999, ISBN 80-01-01942
- [4] BASARA, B., PRZULJ, V., TIBAUT, P. *On the Calculation of External Aerodynamics: Industrial Benchmarks*. SAE technical paper series, 2001-01-0701
- [5] JAWAD, B., LONGNECKER, M., TIMMER, J. *The Impact of Aerodynamics on Vehicle Performance in a Formula SAE Racing Style Vehicle*. SAE technical paper series, 2001-01-2744
- [6] AGATHENGELOU, B., GASCOYNE, M. *Aerodynamics Design Consideration of a Formula 1 Racing Car*. SAE technical paper series, 980399
- [7] KATZ, J. *Aerodynamic Model for Wing-Generated Down Force on Open-Wheel-Racing-Car Configurations*. SAE technical paper series, 860218
- [8] KATZ, J. *Study of an Open-Wheel Racing-Car's Rear Wing Aerodynamics*. SAE technical paper series, 890600
- [9] KLUG, H. APPEL U., *GOM Manual ATOS v 5.3.0. 2004*
- [10] CD – ADAPCO, STAR CCM+, *User guide Star-CCM+ version 2.10.017. 2007*
- [11] CFD ONLINE. Poslední revize 12.5.2008. Dostupné z: <<http://www.cfd-online.com/Links/soft.html#cfid>>
- [12] GOM. *GOM – Measuring Systems – ATOS* [online]. Poslední revize 10.5.2008. Dostupné z: <<http://www.gom.com/EN/measuring.systems/atos/system/system.html>>
- [13] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [online]. Poslední revize 15.5.2008. Dostupné z: <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Buckau_Flettner_Rotor_Ship_LOC_37764u.jpg>
- [14] SYMSCAPE. *Computer-Aided Engineering for All* [online]. Poslední revize 15.5.2008. Dostupné z: <<http://www.symscape.com/node/494>>

Seznam použitých jednotek a veličin

θ	[°]	úhel odtržení přilnutého proudění na kolech automobilu
μ	[Ns/m ²]	dynamická viskozita
ρ	[Kg/m ³]	hustota
c_x	[-]	koeficient odporu
c_z	[-]	koeficient vztlaku
F_x	[N]	aerodynamický odpor
F_s	[N]	smyková síla
F_y	[N]	aerodynamická boční síla
F_z	[N]	aerodynamický vztlak
F_{zp}	[N]	vztlaková síla na přední nápravě
F_{zz}	[N]	vztlaková síla na zadní nápravě
F_{zp}	[N]	výsledná reakce vozovky na přední nápravě
F_{zz}	[N]	výsledná reakce vozovky na zadní nápravě
F_{ZpAero}	[N]	výsledné zatížení přední nápravy aerodynamickými silami
F_{ZzAero}	[N]	výsledné zatížení zadní nápravy aerodynamickými silami
h	[mm]	výška těžiště
l	[mm]	rozvor vozidla
l_z	[mm]	vzdálenost zadní nápravy od těžiště
m	[kg]	hmotnost vozidla s jezdcem
M_x	[Nm]	moment klopení
M_y	[Nm]	moment klonění
M_z	[Nm]	moment stáčení
M_{yT}	[Nm]	moment klonění v těžišti
p	[Pa]	tlak
r	[mm]	rozchod kol
t	[°C]	teplota
V	[m/s]	rychlost
V_∞	[m/s]	rychlost volného proudu