



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO a DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**VÝPOČET AERODYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK  
SPORTOVNÍHO VOZU SIGMA**

CALCULATION OF THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE SIGMA SPORTS  
CAR

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Ondřej Brychta

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Jan Vančura, Ph.D.

**BRNO 2023**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Bc. Ondřej Brychta**  
Studijní program: Automobilní a dopravní inženýrství  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Vančura, Ph.D.**  
Akademický rok: 2022/23

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

## Výpočet aerodynamických charakteristik sportovního vozu SIGMA

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na posádku vozidla SIGMA, hlavně na helmu a ramena řidiče, působí rušivé síly od proudění vzduchu. Od rychlosti nad 100 km/h jsou citelné, od 130–160 km/h jsou nekomfortní pro cestování a nad 160 km/h lze vydržet jen krátkodobě na okruhu. Těžiště v práci leží ve výpočtovém návrhu aerodynamického opatření eliminující tento nepříznivý jev skrze aerodynamický štít tak, aby nedošlo ke zhoršení aerodynamického odporu vozidla.

### Cíle diplomové práce:

Rešerše k danému tématu.  
Sestavení CFD modelu výchozího stavu, výpočet aerodynamických charakteristik.  
Návrh opatření pro eliminaci aerodynamických sil působících na přilbu řidiče.  
Výpočtové ověření navrhovaného řešení.

### Seznam doporučené literatury:

HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road Vehicles. 4th edition. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998. 918 s. ISBN 0-7680-0029-7.

MORELLO, Lorenzo, et. al. The Automotive Body. Dordrecht: Springer Verlag, 2011. 668 s. ISBN 978-94-007-0512-8.

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

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou rušivých sil, které působí na posádku vozidla SIGMA zejména v oblasti hlavy a ramen řidiče v důsledku proudění vzduchu. v praktické části je navržen model pro CFD simulace, vytvořena obecná charakteristika aerodynamiky vozu a porovnání výchozí varianty vozu s variantami obsahující aerodynamické štíty, které tento nepříznivý jev eliminují, aniž by došlo ke zhoršení aerodynamického odporu vozidla.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Aerodynamika; CFD simulace; Sigma WR; Simcenter STAR-CCM+; sportovní vozy

## ABSTRACT

This thesis deals with the problem of disturbing forces that act on the crew of the SIGMA vehicle, especially in the area of the driver's head and shoulders due to air flow. In the practical part, a model for CFD simulations is designed, a general characteristic of the car's aerodynamics is created and a comparison of the base variant of the car with variants with aerodynamic shields, which eliminate this uncomfortable phenomenon without worsening the aerodynamic resistance of the vehicle.

## KEYWORDS

Aerodynamics; CFD simulation; Sigma WR; Simcenter STAR-CCM+; sports cars

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BRYCHTA, O. *Výpočet aerodynamických charakteristik sportovního vozu*. Brno, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí diplomové práce Jan Vančura. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149747>.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Jan Vančura a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

.....

Ondřej Brychta



## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce panu Ing. Janu Vančurovi, Ph.D. za jeho trpělivost a cenné rady během zpracování této práce. Dále chci poděkovat svým rodičům za podporu během celého studia.



# OBSAH

Úvod.....	11
<b>1 Teorie aerodynamiky .....</b>	<b>12</b>
1.1 Fyzikální popis proudění .....	12
1.1.1 Vlastnosti proudění vzduchu .....	12
1.1.2 Rovnice kontinuity .....	12
1.1.3 Bernoulliho rovnice .....	12
1.1.4 Navier-Stokesova rovnice.....	13
1.1.5 Charakteristika proudění.....	13
1.1.6 Mezní vrstva .....	14
1.2 Aerodynamika vozidel.....	14
1.2.1 Aerodynamické síly a koeficienty .....	14
1.2.2 Metody určování aerodynamiky vozidel .....	16
1.2.2.1 Aerodynamický tunel.....	16
1.2.2.2 CFD.....	17
1.3 Modelování proudění tekutin.....	17
1.3.1 Direct Numerical Simulation (DNS) .....	18
1.3.2 Large Eddy Simulation (LES) .....	18
1.3.3 Reynolds-Averaged NavierStokes (RANS) .....	19
1.3.3.1 Modely K-Epsilon (standart, RNG, realizable) .....	19
1.3.3.2 Modely K-Omega (standart, SST) .....	20
1.3.3.3 Model Spalart-Allmaras .....	20
1.3.4 Výpočtová síť .....	20
1.4 Možnosti zvýšení přitlačné síly .....	22
1.4.1 Splitter .....	22
1.4.2 Podlaha .....	23
1.4.3 Difuzor.....	23
1.4.4 Přitlačné křídlo .....	23
<b>2 Sigma WR.....</b>	<b>24</b>
2.1 Kategorie vozu .....	24
2.2 Kritické prvky ovlivňující aerodynamiku .....	26
2.2.1 Náběžná hrana kapoty a ochranný štít .....	26
2.2.1.1 Konkureční řešení ochranných štítů .....	27
2.2.1.2 Prostor chladiče.....	28
2.2.2 Odkrytá kola .....	29
<b>3 CAD model .....</b>	<b>31</b>
3.1 Zjednodušování modelu.....	31
3.2 Pomocné tělesa na tvorbu dutin .....	34
3.3 Pozice řidiče za volantem .....	34
3.4 Návrh štítku a náběžné hrany.....	35
<b>4 Model STAR-CCM+.....</b>	<b>37</b>
4.1 Příprava výpočtového modelu .....	37
4.1.1 Úprava importované geometrie .....	37
4.1.2 Souřadnicové systémy .....	37

---

4.1.3	Výpočetní doména .....	38
4.2	Výpočetní síť .....	38
4.2.1	Lokální nastavení sítě.....	40
4.2.2	Výsledné parametry sítě a její Kontrola.....	41
4.3	Okrajové podmínky .....	41
4.3.1	Nastavení fyzikálního modelu .....	41
4.3.2	Nastavení Regionů .....	42
4.3.3	Nastavení vlastností výměníku .....	42
4.4	Počítané varianty .....	43
<b>5</b>	<b>Vyhodnocení výsledků .....</b>	<b>45</b>
5.1	Rozložení tlaku kolem vozidla .....	51
5.2	Dopad aerodynamiky na rozložení zatížení náprav .....	54
5.3	Porovnání proudění kolem řidiče .....	55
5.4	Výpočet varianty s uzavřeným výdechem kapoty.....	58
	<b>Závěr .....</b>	<b>62</b>
	<b>Použité informační zdroje .....</b>	<b>63</b>
	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>65</b>

## ÚVOD

Aerodynamika vozidla představuje neodlučitelnou součást vlastností každého vozidla a má výrazný dopad na jeho charakter v oblastech dynamiky, výkonu, spotřeby paliva, a tak i na ekologii jeho provozu. Výrobci sportovních vozů se zaměřují na dosažení co nejlepšího výkonu a dynamiky, což má přímý vliv na jeho aerodynamický návrh. Hlavní důraz se klade na minimalizaci odporu vzduchu, dostatečný přísun vzduchu ke komponentům pohonu a zároveň maximalizaci přitlaku. Ten totiž nejen zvyšuje stabilitu vozidla, ale také zlepšuje jeho přilnavost k vozovce a tím zkracuje časy závodních kol.

Na trhu se dnes vyskytuje řada sportovních otevřených vozů, jako například Caterham, KTM X-Bow, Ariel Atom. Do této kategorie se řadí právě i Sigma WR. Tyto vozy jsou určeny především pro závodění a maximální zábavu za volantem. Proto jsou navrženy tak, aby byly velmi lehké, dosahovaly vysokých výkonů. To jim zaručuje být konkurenceschopné v různých závodech. Otevřená konstrukce vozu spolu s vysokými rychlosti může být při dlouhodobém řízení nekomfortní, a proto je snaha řidiče a spolujezdce před tímto náporům proudění ochránit.

Začátek diplomové práce se věnuje teorii aerodynamiky vozidel. v této části jsou popsány základní rovnice, které popisují proudění vzduchu kolem vozidla, a vysvětleny aerodynamické síly a momenty, které působí na vozidlo. Dále jsou zde popsány různé komponenty, které se využívají pro zvýšení přitlačné síly. Pro správné sestavení CFD simulace byla taky vytvořena rešerše používaných přístupů a metod tvorby výpočetní sítě.

Praktická část obsahuje popis zpracování výchozího CAD modelu vozidla a vytvoření simulačního modelu. Dále je proveden aerodynamický rozbor vozu a analýza vypočítaných variant.

# 1 TEORIE AERODYNAMIKY

Aerodynamika je vědní obor, který se zabývá prouděním vzduchu kolem těles. Její principy se využívají hlavně v letectví, kosmonautice a automobilovém průmyslu.

U vozidel slouží k navržení tvaru karoserie tak, aby se co nejvíce minimalizoval odpor vzduchu, což má vliv na snížení spotřeby paliva a zvýšení rychlosti jízdy. Dále ke zlepšení ovladatelnosti a stability automobilu při jízdě, ke snížení aerodynamického hluku, zajištění dostatečného množství vzduchu k pohonnému ústrojí či eliminaci zachycení nečistot na částech vozidla. [1]

## 1.1 FYZIKÁLNÍ POPIS PROUDĚNÍ

K pochopení vlivu proudění na vozidla je potřeba znát základní vztahy, které je popisují.

### 1.1.1 VLASTNOSTI PROUDĚNÍ VZDUCHU

Vzhledem k nízké rychlosti proudění (do 0,3násobku rychlosti zvuku v daných podmínkách) lze považovat vzduch proudící kolem vozidla jako nestlačitelnou tekutinu. [1] Díky tomuto předpokladu je umožněn jednodušší výpočet. Nestlačitelné tekutiny mají konstantní objem při jakémkoliv tlaku. Dále, pokud na ně tekutinu působí nějaká síla, rozprostřou se rovnoměrně po celém objemu

### 1.1.2 ROVNICE KONTINUITY

Základními rovnicemi mechaniky tekutin jsou rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice. Rovnice kontinuity matematicky popisuje zákon zachování hmotnosti, což znamená, že množství tekutiny, které vstoupí do uzavřené trubice, z ní také musí vystoupit. Tato rovnice platí pouze pro nestlačitelné tekutiny, protože by se mohla stlačitelná tekutina v určitém případě hromadit v trubici:

$$S \cdot v = konst, \quad (1.1)$$

kde:

S — plocha, kterou prochází tekutina [m<sup>2</sup>],

v — rychlost tekutiny [m·s<sup>-1</sup>].

### 1.1.3 BERNOULLIHO ROVNICE

Bernoulliho rovnice popisuje vztah mezi rychlostí vzduchu a tlakem a matematicky popisuje zákon zachování energie nestlačitelné tekutiny. Říká, že součet statického tlaku a dynamického tlaku je konstantní v každém bodě proudu. To znamená, že pokud proud vzduchu proudí z nižšího statického tlaku do místa s vyšším statickým tlakem, tak se rychlost proudění zmenšuje a naopak. [1] Bernoulliho rovnice je dána vztahem:

$$p = p_s + p_d = p_s + \frac{1}{2} \rho v^2 = konst, \quad (1.2)$$

kde:

p — celkový tlak [Pa],

p<sub>s</sub> — statický tlak [Pa],

p<sub>d</sub> — dynamický tlak [Pa],

$\rho$  — hustota tekutiny [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$v$  — rychlost tekutiny [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

#### 1.1.4 NAVIER-STOKESOVA ROVNICE

Navier-Stokesova rovnice popisuje vztah mezi tlakem, viskozitou a sil v proudění tekutiny. Při popisu proudění se jedná o set rovnic, které vycházejí z Newtonovských zákonů zachování hmotnosti a hybnosti. v případech, ve kterých se uvažuje stlačitelné proudění a je zahrnut přenos tepla, se zahrnují i rovnice zachování energie. Tyto rovnice jsou nelineárně diferenciální rovnice druhého řádu a jejich řešení je možné ve většině případů pouze numerickými metodami. Navier-Stokesova rovnice vypadá takto:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v v^T) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho f, \quad (1.3)$$

kde:

$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}$  — jednotková síla při lokálním zrychlení,

$\nabla \cdot (\rho v v^T)$  — jednotková síla při konvektivním zrychlení,

$\nabla p$  — jednotková síla způsobená tlakovým spádem,

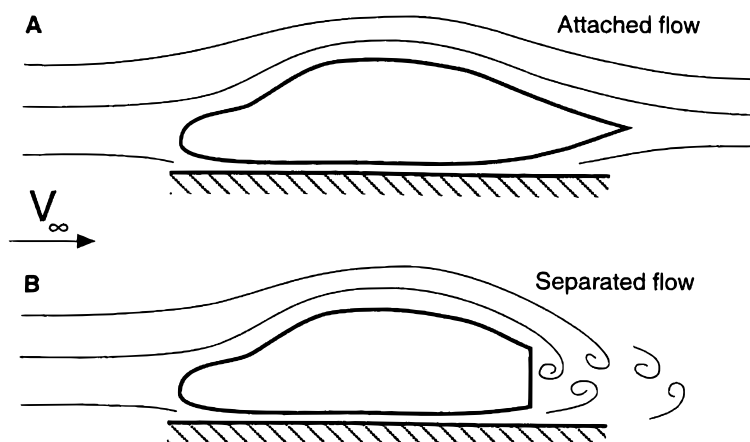
$\nabla \cdot \tau$  — jednotková síla potřebná k překonání třecích sil,

$\rho f$  — jednotková síla potřebná k překonání objemových sil.

#### 1.1.5 CHARAKTERISTIKA PROUDĚNÍ

Pro vizualizaci proudění se používají proudnice, které představují pohyb částic tekutiny v proudění (obrázek 1). Podle charakteru pohybu částic se proudění dělí na laminární a turbulentní. Při laminární proudění se částice pohybují v navzájem rovnoběžných trajektoriích. Pokud se trajektorie navzájem protínají a vznikají v proudění víry, označuje se toto proudění jako turbulentní. Míru turbulentního proudění hodnotí Reynoldsovo číslo.

Pokud pohyb částic kopíruje tvar obtékaného tělesa tak se toto proudění nazývá přilnuté. Jestliže tomu tak není, jedná se o odtržené proudění. To má obvykle za následek vznik většího odporu vozidla.

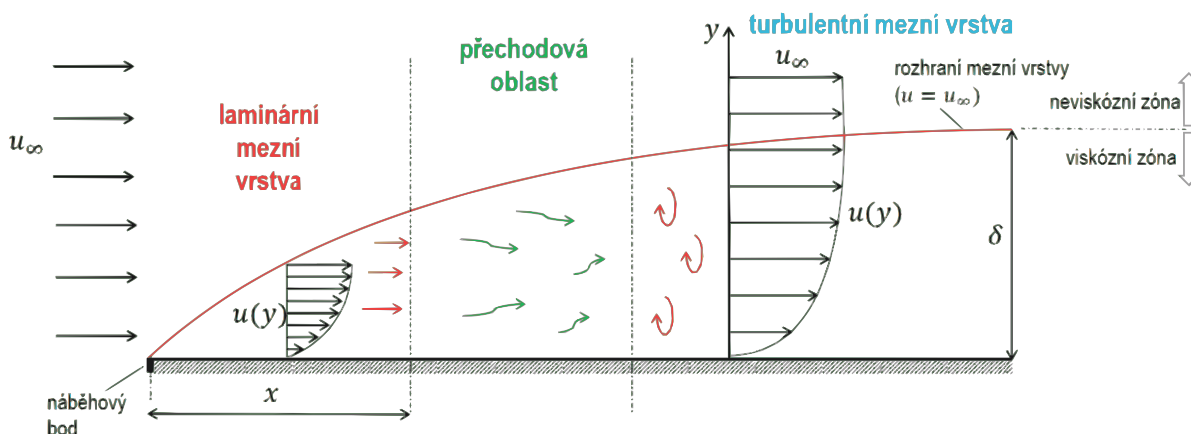


Obr. 1 Přilnuté laminární proudění (nahore) a odtržené turbulentní proudění (dole) [2]

### 1.1.6 MEZNÍ VRSTVA

Je to velmi tenká vrstva proudu, která se nachází v blízkosti stacionární stěny a kde se rychlost proudění mění od nulové na stěně na rychlost volného proudu. Tloušťka a tvar této vrstvy obecně závisí na mnoha vlastnostech proudění jako například Reynoldsovo číslo nebo vzdálenost od náběhového bodu, ale i na tvaru obtékaného tělesa. u auta jedoucí 100 km/h může být tloušťka mezní vrstvy na přední části vozidla několik mm a směrem dozadu může mít několik cm. [2] Chování proudění v mezní vrstvě je dominantně ovlivněno viskozitou tekutiny.

Vrstva je obvykle tvořena laminární oblastí, která postupně přechází do turbulentního chování, viz. obrázek 2. Tlustší vrstva vytváří větší viskózního tření, navíc příliš prudký nárůst tloušťky může vést k oddělení proudu a způsobit další odpor a snížit přítlak. [2] Při navrhování tvaru karoserie a aerodynamických prvků je snaha docílit na povrchu laminární mezní vrstvy pro co nejlepší obtékání vzduchem, a tak snížení odporu. v případech, kde by mohlo dojít k odtržení mezní vrstvy je lepší udržení alespoň turbulentní mezní vrstvy. [2]



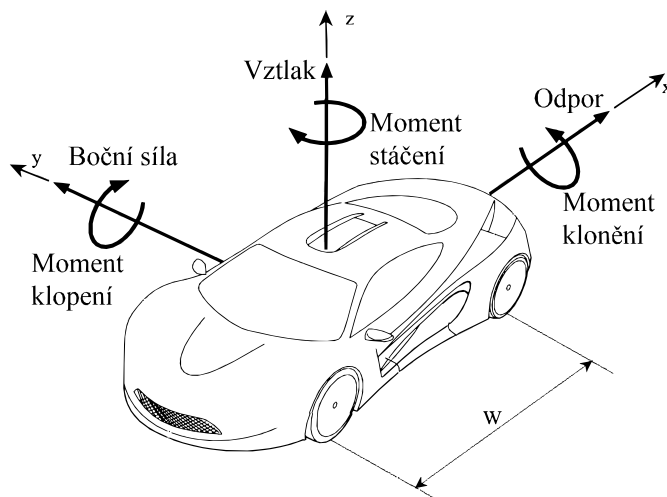
Obr. 2 Oblasti mezní vrstvy u stěny [3]

## 1.2 AERODYNAMIKA VOZIDEL

Pohyb vozidla podléhá proudění, které lze rozdělit do tří kategorií. Proudění kolem vozidla, proudění skrz vozidlo a procesy proudění uvnitř pohonného ústrojí vozidla. [1] První dvě proudění jsou úzce propojena. Například, proudění vzduchu skrz motorový prostor je ovlivněno vnějším prouděním okolo automobilu, a proto je nutné obě pole zohlednit společně. Na druhé straně, proudění uvnitř motoru a převodovky nejsou přímo spojeny s prvními dvěma poli. Proudění kolem vozidla vystavuje vozidlo silám a momentům, které významně ovlivňují jeho výkon a směrovou stabilitu. [1]

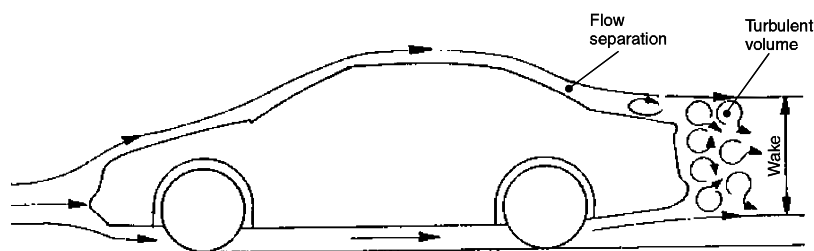
### 1.2.1 AERODYNAMICKÉ SÍLY A KOEFICIENTY

Bez ohledu na tvar vozidla jsou aerodynamické síly a momenty způsobené pouze dvěma základními zdroji. a to je rozložení tlaku kolem vozu a smykového napětí na jeho povrchu. [4] Aerodynamická síla má obecný směr i velikost. Jejím rozdělením do os souřadnicového systému, jehož střed se nachází v rovině vozovky, středu rozvoru kol a rovině symetrie, získáme 3 silové účinky a 3 momentové. Toto rozložení je zobrazeno na obrázku 3.



Obr. 3 Aerodynamické síly a momenty působící na vozidlo [5]

Při proudění viskózního vzduchu kolem vozidla vznikají v zadní části víry (viz. obrázek 4), které způsobují odchylování proudění od hladkého toku. Za těchto podmínek je tlak proudícího vzduchu před vozidlem vyšší než atmosférický, zatímco za vozidlem je tlak nižší než atmosférický. To způsobuje, že vozidlo je táhnuto (nasáváno) směrem proudu vzduchu. Z druhého Newtonova zákona vyplývá, že síla, která působí na obtékaný objekt je závislá na rychlosti proudu a čelní ploše. Z experimentů však vyplývá, že na velikost této síly má vliv i tvar obtékaného tělesa, tento vliv představuje aerodynamický koeficient  $C_D$ . [7]



Obr. 4 Vznik nižšího tlaku za vozidlem [7]

Další sledovanou aerodynamickou silou působící na vozidlo je vztlak. Tato síla působí na vozidlo ve směru kolmo k vozovce. Je vyvolána rozdílnými tlaky nad a pod vozidlem (obrázek 5). Míru tohoto rozdílu představuje aerodynamický koeficient  $C_L$ . [7] Vztlak pozitivní je u vozidel nežádoucí, protože snižuje přilnavost pneumatik k zemi, zatímco síla směřující dolů, označovaná jako přítlak, zvyšuje normálovou sílu působící na pneumatiky a tím i přilnavost k silnici. Třetí síla působící v poslední ose je síla boční. Její velikost se zvýrazní při silném bočním větru. Pro velikosti aerodynamických sil platí:

$$F_{D,L,Y} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{D,L} \cdot v^2 \cdot A, \quad (1.4)$$

kde:

$C_{D,L,Y}$  — aerodynamický koeficient pro danou osu [-],

$\rho$  — hustota vzduchu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$v$  — rychlost vzduchu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

$A$  — kolmý průmět vozidla k dané ose [ $\text{m}^2$ ].

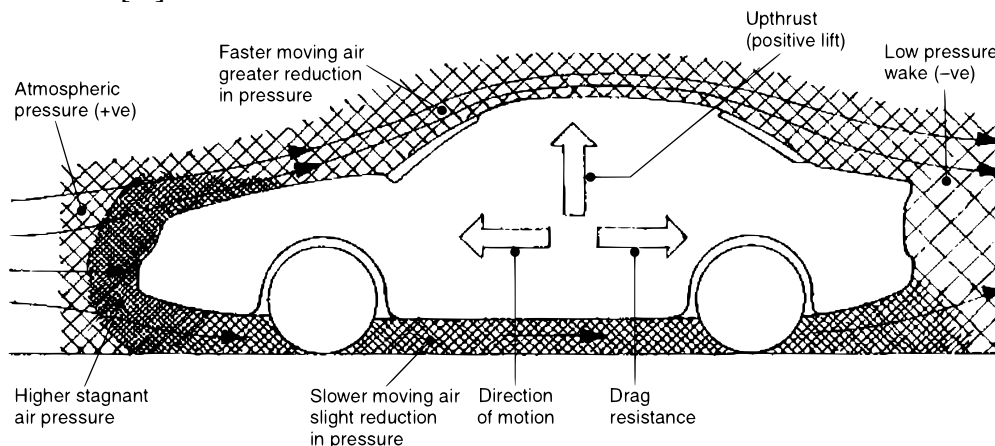
Nejdůležitější z aerodynamických momentů je moment klopení v ose Y, protože má vliv na velikost působících sil na přední a zadní nápravu. v ose X se nazývá moment klonění a v ose Z se jedná o moment stáčení. Jejich velikosti jsou dány vztahem:

$$M_{x,y,z} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{Mx,y,z} \cdot v^2 \cdot A \cdot W, \quad (1.5)$$

kde:

$C_{Mx,y,z}$  — aerodynamický koeficient momentu pro danou osu [-],

$W$  — rozvor kol [m].



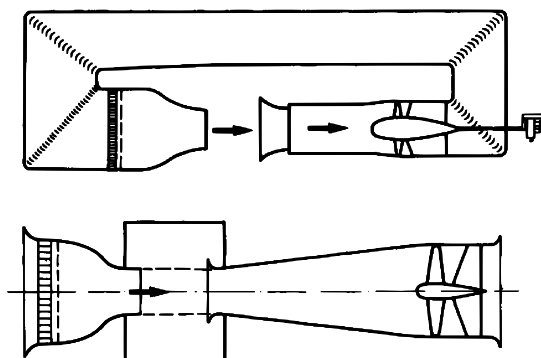
Obr. 5 Vznik vzlaku pod vozidlem [7]

## 1.2.2 METODY URČOVÁNÍ AERODYNAMIKY VOZIDEL

Pro určování aerodynamických vlastností vozidel se dnes využívají v hlavní míře simulace proudění v CFD programech. Tyto výsledky je nutné experimentálně ověřit. Mohou se k tomu využít aerodynamické tunely, kde se simulují různé podmínky. Druhou možností je testování jízdními zkouškami, kde jsou podmínky realistické, avšak těžko opakovatelné.

### 1.2.2.1 AERODYNAMICKÝ TUNEL

Aerodynamické tunely jsou zařízení, která umožňují simulovat pohyb vozidla v proudícím vzduchu. Díky nim je umožněno testovat různé konfigurace karoserie a optimalizovat tak aerodynamické vlastnosti vozidla. Výhodou aerodynamických tunelů je, že umožňují opakovat testy při stejných podmínkách a tím zajistit vysokou přesnost měření oproti jízdním zkouškám. Existují dva druhy aerodynamických tunelů: otevřený (Eiffel type), a uzavřený (Göttingen type), obrázek 6. [1]



Obr. 6 Uzavřený tunel — Göttingen type (nahore), otevřený tunel — Eiffel type [1]



Otevřené tunely jsou většinou velké ventilátory, které vytvářejí proudění vzduchu, když je vozidlo umístěno před nimi. Uzavřené tunely jsou většinou větší a umožňují testování při vysokých rychlostech. Tyto tunely vytváří uzavřený prostor, ve kterém vzduch cirkuluje. Další výhodou tunelu jsou měřicí šestikomponentní váhy, které dokážou zaznamenat působící zatížení (odpor, vztlak, boční sílu). Pro snížení provozních nákladů se používají i menší tunely pro zmenšené modely vozidel. Avšak u těchto měření není zaručena správnost výsledků, protože chování proudění se může lišit od reálné velikosti.

Finanční náklady jsou hlavním problémem tohoto testování, protože je pak dostupné pro úzkou skupinu projektů nebo pouze pro ověření správného nastavení CFD simulací. Z tohoto důvodu Škoda Auto provozuje největší výpočetní centrum v České republice, což umožňuje většinu aerodynamického vývoje simulovat.

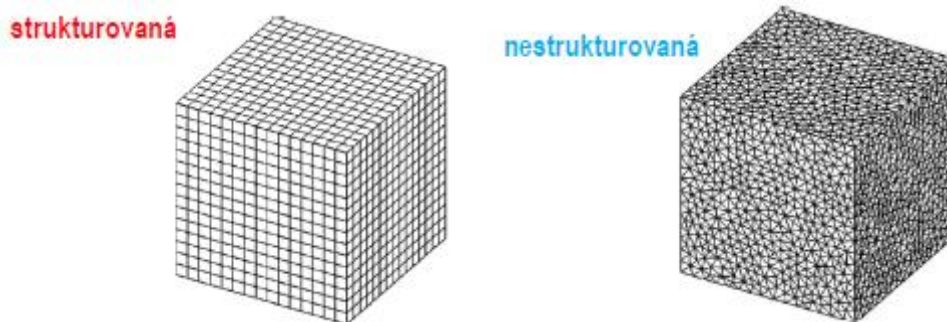
### 1.2.2.2 CFD

Dnes je CFD nepostradatelnou součástí průmyslového vývoje a výzkumu. Používá se v automobilovém a leteckém průmyslu pro optimalizaci aerodynamiky, v energetice pro návrh turbín a v mnoha dalších oblastech. Díky CFD je možné provádět virtuální experimenty a simulovat různé scénáře, což může výrazně snížit náklady a čas potřebný pro vývoj nových produktů. První kroky v oblasti CFD byly učiněny v 50. a 60. letech 20. století, kdy byly používány metody konečných diferencí a metody konečných objemů pro numerické řešení rovnic proudění tekutin. Tyto metody byly však velmi náročné na výpočetní výkon a byly používány pouze pro velmi jednoduché 2D úlohy. Složitější 3D úlohy bylo díky vývoji výpočetní techniky možné řešit od 80. let. v této době se objevili první komerční CFD softwary a od 90. let se rozšířili do široké praxe. CFD výsledky jsou pouze přibližné a je nutné jejich výsledky experimentálně ověřovat. [8]

## 1.3 MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ TEKUTIN

Proudění tekutin je popsáno třemi fyzikálními zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie. Jelikož neexistuje obecné analytické řešení těchto rovnic, tak je nutné je řešit numericky. Simulační proces se skládá z tvorby geometrického modelu, diskretizace geometrie, volby fyzikálního modelu, zadání okrajových podmínek, počítačovém výpočtu a z vyhodnocení finálních výsledků. CFD je zaměřeno na distribuční vlastnosti (tlak, rychlost, hustota, teplota) a ne objemové (hybnost tělesa v mechanice, celková energie v termomechanice). Zvyšuje se tím ale složitost výpočtu rovnic. Rovnice jsou parciální diferenciální, často nelineární.

Po určení charakterizování problému je nutné pro numerické řešení parciální diferenciální rovnice diskretizovat, protože řešení domény jako celku není možné, zatímco řešení dané domény do více malých částí lze. Proces diskretizace má několik metod jako například metoda konečných rozdílů (FDM), metoda konečných prvků nebo u CFD hlavní metoda konečných objemů. Jejich účelem je převzít parciální diferenciální rovnice ve spojitě formě a vytvořit systém algebraických diferenčních rovnic. Proces diskretizace domény generuje sadu diskretních buněk, a tedy bodů nebo uzlů, které pokrývají spojitou doménu problému. Diskretizace tedy znamená rozdělení spojitého objemu, tělesa (FEA) nebo dané domény (CFD), do konečného počtu elementárních objemů (pro 3D). Elementární prvky mohou být tvořeny různými tvary například šestistěny, čtyřstěny atd. Jednotlivé prvky pak spolu tvoří síť (mesh), která může být strukturovaná nebo nestruturovaná podle použitého přístupu generování prvků, viz obrázek 7. [9]



Obr. 7 Možnosti sktruktury sítě [3]

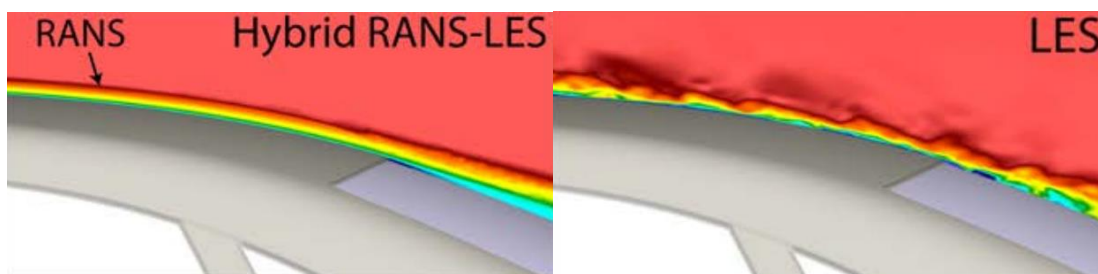
K řešení diskretizovaných rovnic existuje několik základních metod, které se od sebe liší numerickým přístupem. To má za následek rozdíl v přesnosti popisu proudění, ale i v náročnosti výpočtu.

### 1.3.1 DIRECT NUMERICAL SIMULATION (DNS)

DNS je nejpřesnější metoda, která využívá přímé řešení Navier-Stokesových pohybových rovnic bez nutnosti pomocného modelu turbulence. Řeší celé velikostní spektrum vírových struktur, a proto je potřeba velmi detailní síť. Velikost buněk řádově odpovídá velikosti nejmenších vírů (tzv. Kolmogorovo mikroměřítko turbulence). Výpočtové náklady jsou extrémně vysoké, proto je tato metoda nepraktická pro širší průmyslové využití a je spíše vhodná jen pro výzkumné účely. [9] Obvykle se jedná o základní úlohy s jednoduchou geometrií a nízkým Reynoldsovým číslem. Výsledky ze správně provedené DNS jsou rovnocenné výsledkům z experimentů, avšak poskytnou více informací. [8]

### 1.3.2 LARGE EDDY SIMULATION (LES)

Rychlejší a levnějších výpočtů se dosáhne částečným zjednodušením. u metody LES jsou velké víry počítány přímo pomocí N-S rovnic v časově závislé formě. Zatímco malé disipační víry mají předpoklad izotropie. Jsou z přímého výpočtu odfiltrovány a řešeny jako časově nezávislé pomocí pod-síťového modelu. Díky řešení pouze velkých vírů je možné použít hrubší síť a větší časový krok oproti metodě DNS. ve srovnání s metodami RANS je použitá síť podstatně jemnější a řešení je více výpočetně náročné. Proto na široké využití v průmyslu není vhodná. Jednou z významných nevýhod je potřeba velmi jemné sítě u stěn v každém ze tří směrů, protože velká měřítka v turbulentním spektru jsou geometricky velmi malá. Aby se vyřešil tento nedostatek, tak vznikly různé modifikace a hybridní modely RANS/LES. [8]



Obr. 8 Rozdíl v popisu proudění metody RANS, RANS-LES a LES [9]

### 1.3.3 REYNOLDS-AVERAGED NAVIERSTOKES (RANS)

Jedná se o nejrozšířenější výpočtový model v praxi. Jeho výhodou je neekonomičtější výpočet i složitě turbulентního proudění v průmyslových aplikacích při zajištění dostatečné přesnosti. RANS modeluje všechny velikosti turbulентních vírů. Tento model je založen na Reynoldsovém časovém středování veličin transportních rovnic. Řeší se tedy časově zprůměrované hodnoty proudění, což výrazně snižuje výpočetní nároky.

Reynolds vyšel z předpokladu, že okamžité hodnoty veličin popisující turbulентní proudění lze rozložit na část časově středovanou a flukтуаční složku. Středovaná Navier-Stokesova rovnice po úpravách obsahuje člen vyjadřující tenzor napětí, která existují pouze při turbulентním proudění. Vzniká problém s uzavřením systému transportních rovnic, protože Reynoldsova napětí přináší dalších 6 neznámých. Tyto neznámá Reynoldsova napětí je nutné dopočítat vztažené ke známým proměnným středního proudění pomocí dodaného modelu turbulence. [8]

Jednou ze základních metod modelování Reynoldsových napětí je Boussinesquova hypotéza o turbulентní viskozitě. Podle této hypotézy jsou Reynoldsova napětí úměrná středním gradientům rychlosti, stejně jako v případě vazkých napětí (podle Newtonova zákona). Konstantou úměrnosti je turbulентní viskozita. Tato viskozita je vlastnost proudění a nikoli kapaliny, je obecně funkcí polohy a času. Boussinesquova hypotéza se využívá v modelech Spalart-Allmaras,  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  a jejich modifikacích. Výhodou tohoto přístupu je nízká výpočetní náročnost pro určení turbulентní viskozity. Model turbulence Spalart-Allmaras řeší pouze jednu dodatečnou transportní rovnici, která zastupuje turbulентní viskozitu. Zatímco modely  $k-\varepsilon$  a  $k-\omega$  řeší dvě dodatečné transportní rovnice, pro kinetickou energii turbulence  $k$  a disipaci kinetické energie  $\varepsilon$  nebo specifickou disipaci energie  $\omega$ . Turbulентní viskozita je vypočtena jako funkce  $k$  a  $\varepsilon$  nebo  $k$  a  $\omega$ . [8]

Další možnost modelování Reynoldsových napětí je Reynolds Stress Models – RSM. Tento přístup řeší transportní rovnici pro každou složku tenzoru Reynoldsových napětí. Obecně je tento přístup výpočtově nákladnější. Nicméně RSM je jasně lepší tam, kde převažuje anizotropní turbulence. [8]

#### 1.3.3.1 MODEL Y K-EPSILON (STANDART, RNG, REALIZABLE)

##### Model Standart $k-\varepsilon$

Jedná se o nejznámější modelů turbulентního proudění. Jeho použití je výhodné skrz spolehlivé výpočty přenosu hybnosti a tepla v širokém rozsahu typů turbulентního proudění. Výsledky mají dostatečnou přesnost vzhledem k ekonomičnosti výpočtu. Tento model využívá rovnice, které se spoléhají na úvahy a empirii. Při použití tohoto modelu je potřeba uvažovat s prouděním, které je plně turbulентní a efekt viskozity je zanedbatelný. Proto je spolehlivý jen v případech s vysokým Reynoldsovým číslem. v dnešní době se využívají jeho modifikace RNG či Realizable, které se snaží jeho nedostatky eliminovat. [8]

##### Model RNG $k-\varepsilon$

Tento model byl odvozen pomocí statistické metody renormalization group method (RNG). Další člen v rovnici pro  $\varepsilon$ , zvyšuje přesnost ve velkých rychlostech deformace a zahrnuje účinek vírů na turbulenci. [8]

##### Model Realizable $k-\varepsilon$

Realizable je nejnovější varianta modelu  $k-\varepsilon$ . Oproti modelu standart má jinou formulaci turbulентní viskozity a má modifikovanou rovnici  $\varepsilon$ . Tyto změny znamenají

zlepšení výpočtů s velkým zakřiveným proudem, víry a rotací oproti modelu standart. Podle dosavadních studií vychází jako nejlepší model k- $\epsilon$ . Problémem Realizable je vytváření nefyzikálního popisu turbulentní viskozity v případech, kde se využívá zároveň rotační a stacionární oblasti (například simulace otáčení míchadla). [8]

### 1.3.3.2 MODEL K-OMEGA (STANDARD, SST)

Využití rovnice pro disipaci energie  $\omega$  přináší oproti využití rovnice  $\epsilon$  několik výhod. Modely k- $\omega$  obecně lépe určují záporný tlakový spád, mezní vrstvy a odtržení proudění. Tento model turbulence je vhodný pro proudění okolo stěn s nízkým Reynoldsovým číslem. Je vyžadována dostatečně jemná síť v blízkosti stěn pro vyřešení laminární (viskózní) části mezní vrstvy. [8]

#### Model Standart k- $\omega$

Tento model turbulence je nastaven pro řešení proudění s nízkým Reynoldsovým číslem, stlačitelností a smyková proudění. Problémem tohoto modelu je řešení hodnot k a  $\omega$  ve volném proudu mimo smykovou oblast. Je to empirický model založený na řešení transportních rovnic. [8]

#### Model SST k- $\omega$

Model turbulence SST (Shear Stress Transport) vychází z modelu k-omega a má stejnou automatickou úpravu stěn a ve větší vzdálenosti od stěny přepíná na model k-epsilon. Díky tomuto spojení poskytuje přesné předpovědi počátku a velikosti odtržení mezní vrstvy, ale taky přesný popis volného proudění ve velkém spektru aplikací. [8]

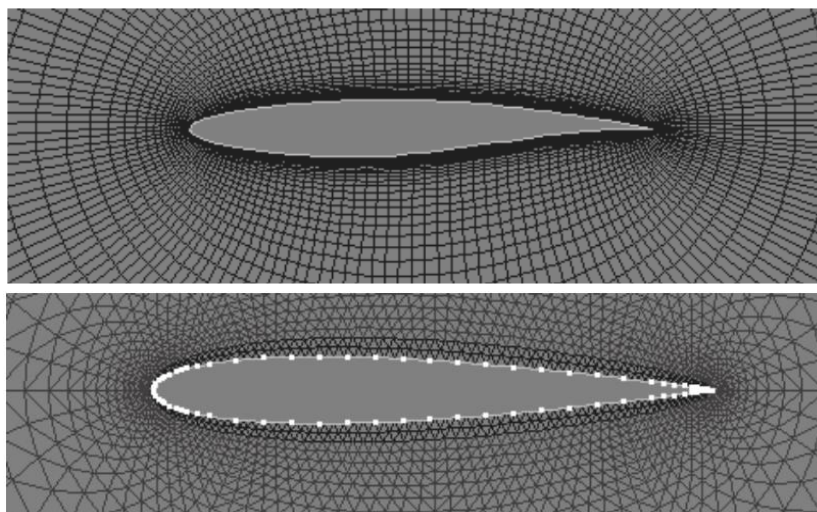
### 1.3.3.3 MODEL SPALART-ALLMARAS

Je to jednoduchý jednorovnicový model, který byl navržen pro letectví k řešení obtékání stěn. Je vhodný pro případy, kdy jsou mezní vrstvy vystavené velkým tlakovým gradientům. Není vhodný pro obecnou průmyslovou aplikaci nebo k výpočtům aerodynamiky vozů, protože neprodukuje dobré výsledky ve volném proudu nebo u velkých odtrhávání proudění. [8]

## 1.3.4 VÝPOČTOVÁ SÍŤ

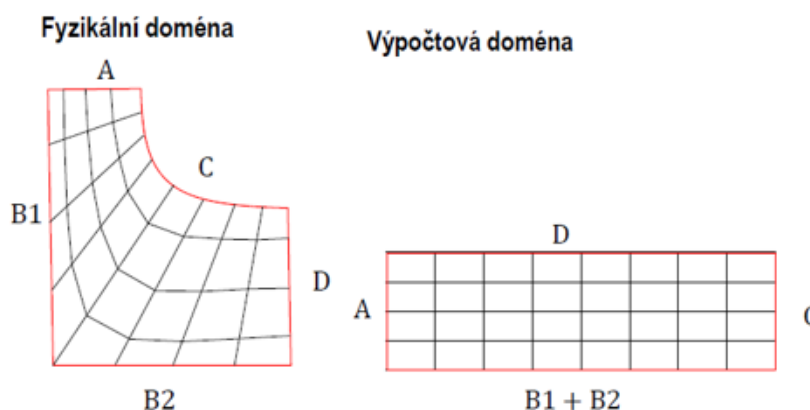
Síťování je proces vytvoření 2D nebo 3D mřížky nad geometrií za účelem její diskretizace a analýzy pomocí simulace. Mřížka jsou definována na základě složitosti analyzované geometrie. Obvykle se zkoumají proudění ve vnitřních útrokách součástek či systémů nebo jejich vnější obtékání.

Obecně se typy sítí dělí na strukturované a nestrukturované, viz. obrázek 9. Strukturované sítě mají pravidelnou konektivitu, což znamená, že každý bod má stejný počet sousedních bodů. u nestrukturovaných sítí tomu tak být nemusí. Přestože je možné automaticky generovat jakýkoli typ nestrukturovaných mřížek, je mnohem obecně je jednodušší generovat čtyřstěnné mřížky. Avšak v blízkosti složité geometrie je pomocí čtyřstěnných buněk složité zachovat její hranice. [10] Hustota sítě musí být říditelná, aby umožnila rovnováhu mezi přesností řešení a výpočetními požadavky. Je nutné volit takovou hustotu sítě, která nám zaručí dostatečně přesné řešení, ale nebude prodlužovat délku simulace.



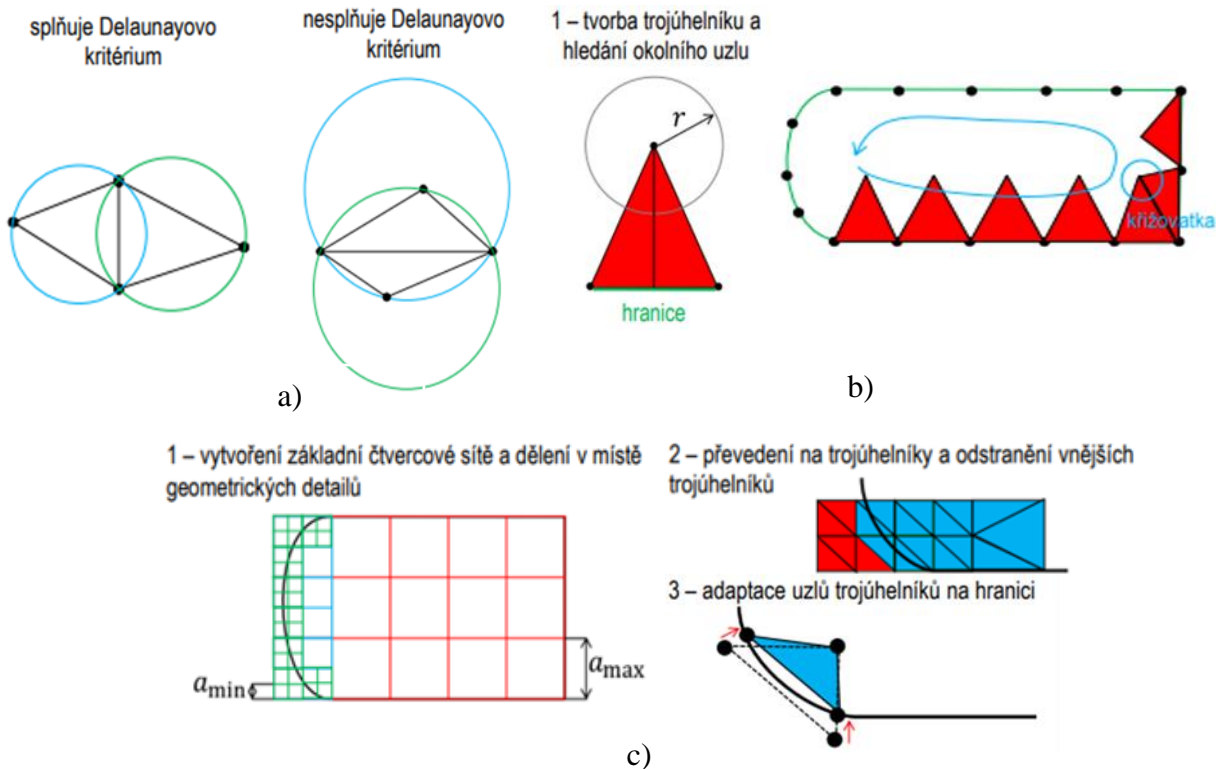
Obr. 9 Strukturovaná (nahore) a nestrukturovaná síť (dole) [10]

Pro generování sítí je dostupných několik metod. u strukturovaných se často využívají nástroje jako vytažení nebo transformace. To se může využít u domén, které mají symetrii nebo jednoduchý tvar. Dále se využívá mapování (obrázek 10), u kterého dochází ke zjednodušení výpočtové domény.



Obr. 10 Mapování sítě 63[3]

Pro generování nestrukturovaných trojúhelníkových sítí se například využívá Delaunay-ova triangulace, Advancing front nebo Octree (obrázek 11). Delaunay-ova triangulace je založena na principu prázdného kruhu, to znamená, že kruh procházející vrcholy sledovaného trojúhelníku nesmí obsahovat uzel z vedlejšího trojúhelníku. u Advancing front jsou trojúhelníky vytvářeny od hraničních ploch dovnitř. Další uzel je vytvořen až po kontrole všech uzlů a je umístěn do nového optimálního místa. u Octree základní síť tvoří čtverce o nadefinované maximální a minimální velikosti. Čtverce, co obsahují hranici jsou rozdělovány do doby, kdy nedosáhnou požadovaného rozlišení (do minimální velikosti). Dále se síť převede na trojúhelníky a odstraní přebytečné trojúhelníky, které se nacházejí mimo plochu. Následuje adaptace uzlů trojúhelníků na hranici plochy. Nepravidelné buňky se tvoří poblíž, kde čtverce protínají hranice povrchu. [10] Kombinací metod pro nestrukturované a strukturované sítě vznikají hybridní sítě.



Obr. 11 a) Delaunayovo kritérium, b) Advancing front, c) Metoda OCTREE [3]

Existují 2 základní druhy sítě: povrchová a objemová. Povrchová síť obvykle využívá rozdělení do plošných tvarů jako trojúhelníky, čtyřúhelníky ale i další mnohoúhelníky. Povrchová síť se tvoří před objemovou, protože lépe popíše hranice geometrie. Díky tomu se docílí kvalitnější sítě okolo kritických míst jako jsou hrany nebo rádiusy. Objemová síť se podle tvaru použitých prvků může označovat jako tetrahedrální, hexagonální nebo polyhedrální.

## 1.4 MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ PŘÍTLAČNÉ SÍLY

U prvních závodních vozů se kladl důraz především maximální rychlost. Toho se docílovalo zvyšováním výkonu a minimalizací odporové síly. ve vysoké rychlosti však vozy bez řízené aerodynamiky vytváří vztlak, který má za následek nestabilitu vozu, způsobenou nízkým normálovým zatížením pneumatik. Přítlačná síla generovaná aerodynamickými prvky dokáže zvýšit přilnavost vozu a zvýšit tak jeho ovladatelnost v zatáčkách, a to bez zvýšení hmotnosti vozu. Proto je při návrhu vozu nutné zohlednit jeho přesné určení a najít vhodnou rovnováhu aerodynamických sil. Nyní se využívají komponenty jako splitter, difuzory, tvarované části podlahy, přítlačná křídla, vírové generátory apod. Vliv mají také obecné parametry vozidla jako světlá výška vozu nebo sklon podlahy. [2][4]

### 1.4.1 SPLITTER

Splitter je díl, který se nachází v přední části vozu nízko nad úrovní vozovky. Je to část vozu, která se jako první dostává do kontaktu s proudícím vzduchem. Jeho smysl spočívá v urychlování proudění pod ním, aby tak vznikl nižší tlak vespod vozu. Je také důležité, jakým způsobem směřuje vzduch nad ním, protože může ovlivnit další komponenty. Může se také využít k usměrnění proudění dále pod podlahu nebo k chlazení brzd. [2][4]

### 1.4.2 PODLAHA

Je to část vozu, která se může podílet na velké části celkové přítlačné síly. To obvykle díky své velké ploše. u produkčních vozů docílení ideálního tvaru podlahy může být ovlivněno vedením výfukových plynů nebo částmi podvozku. S výjimkou závodních okruhových vozů je nejsnazší a nejefektivnější vytvoření rovne podlahy. Spolu se správným náklonem, splitterem a difuzorem je využíváno Venturiho efektu. Díky tomu vzniká pod vozem nižší tlak oproti okolí. Díky rovne podlaze je ideální proudění pod vozidlem laminární. Proto je snaha předejít vzniku vírům a odtrhávání proudění, které by narušovali funkci difuzoru a zvyšovali aerodynamický odpor. [1][7]

### 1.4.3 DIFUZOR

Koncovou část podlahy tvoří difuzor. Jedná se o komponentu, která má postupně zvětšující se prostor mezi vozovkou a vozem. Vzduchu tento prostor postupně doplňuje. Dochází k jeho expanzi a vzniká podtlak, který způsobuje nasávání. Díky tomuto procesu se urychluje proudění pod podlahou a vzniká tak přítlačná síla. Při návrhu je nutné, aby difuzor nasával co nejvíce vzduchu, který proudí pod vozidlem, a nedocházelo k nasávání vzduchu z okolí. [2][4]

### 1.4.4 PŘÍTLAČNÉ KŘÍDLO

Přítlačné křídla využívá stejného principu jako letecká křídla. Proud vzduchu je rozdělen náběžnou hranou na dvě proudění. Jedna strana má takový tvar, aby ji vzduch obtékal větší rychlostí, než tu druhou. Tím vzniká tlakový rozdíl, který vytváří u křidel sílu (vztlak nebo přítlak). Přítlačná síla působící na nápravy vozidla je ovlivňovaná polohou, tvarem a velikostí křídla. [2]



## 2 SIGMA WR

Jde o lehký sportovní dvoumístný vůz s odhalenými koly a příhradovým rámem z tenkostěnných chrom-molybdenových trubek a lehkou karosérií vyrobenou ze sklolaminátu. Motor Peugeot se nachází uprostřed před zadní nápravou s pohonem zadních kol. Jedná se o zážehový kapalinou chlazený řadový čtyřválec (R4) s rozvodem DOHC o objemu 1 598 cm<sup>3</sup>. Vrtání činí 77,0 mm, zdvih 85,6 mm a komprese 10,5. v každém válci se nachází čtyři ventily a vstřikování paliva probíhá přímo do válců s přepřínováním turbodmychadlem. Výkon motoru se je 164 kW/223 hp při 5500 otáčkách za minutu, v závislosti na naladění. Maximální točivý moment dosahuje 300 Nm při 1900 otáčkách za minutu. WR nemá posilovač řízení ani žádné elektronické asistenty jako ABS, ESP a další. Vůz je vybaven mechanickou šestistupňovou převodovkou. Rozvor náprav činí 2300 mm a rozchod kol je 1614/1600 mm. Vnější rozměry vozu jsou následující: délka 3152 mm, šířka 1866 mm a výška 1148 mm (viz. obrázek 13). Provozní hmotnost (s řidičem 75 kg, 90 % paliva) vozu činí 704 kg s rozložením váhy 40:60. Maximální dosažitelná rychlost je 220 km/h. Podvozek je tvořen lichoběžníkovým zavěšení kol se systémem odpružení push-rod. Vozidlo je homologované pro silniční provoz.

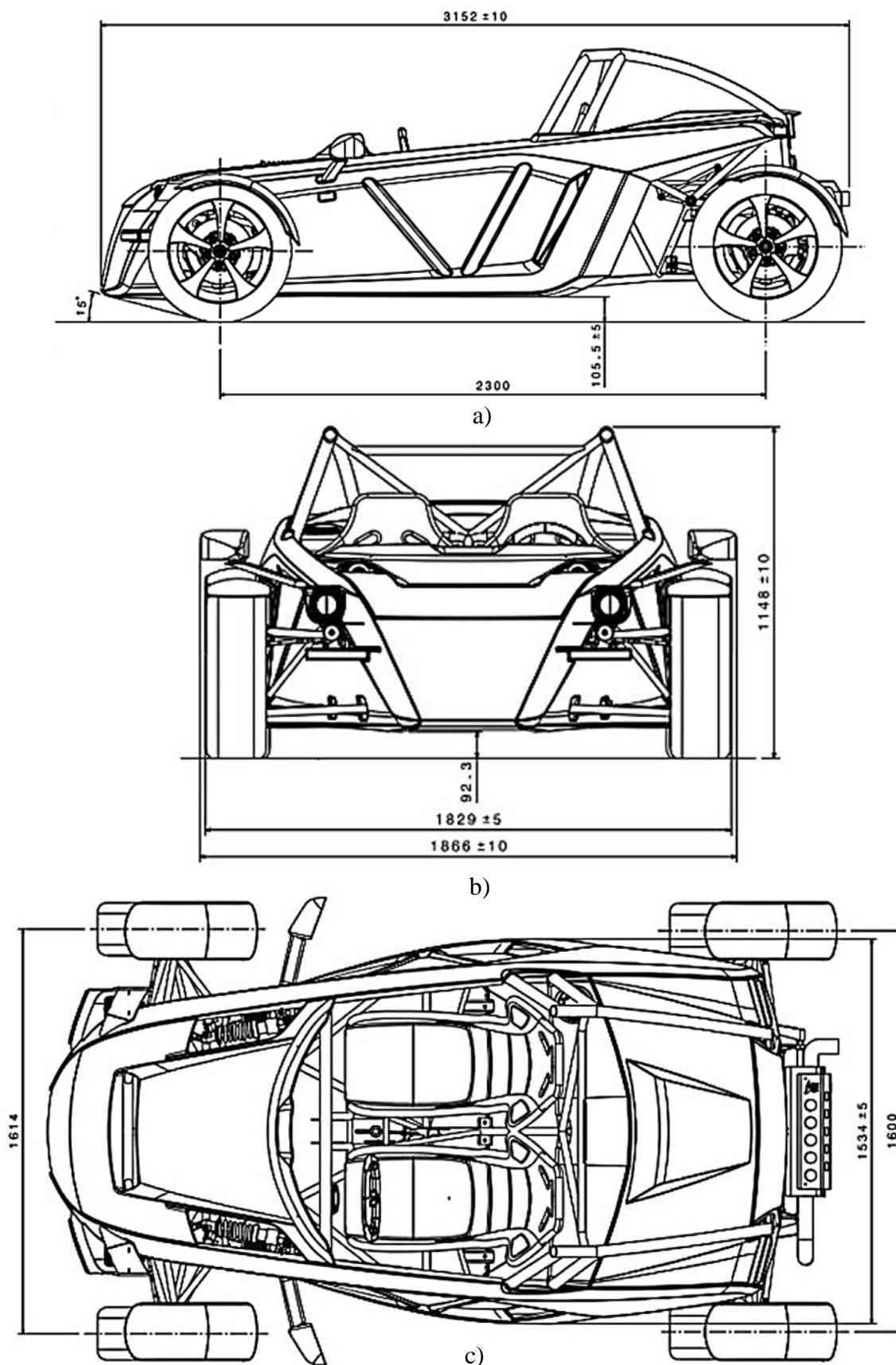


*Obr. 12 Sigma WR*

### 2.1 KATEGORIE VOZU

Vozidlo Sigma WR se řadí do kategorie otevřených sportovních speciálů, které jsou primárně určeny pro použití na okruhu. Tyto vozy jsou obvykle velmi lehké, mají vysoký výkon a sportovní podvozek, což jim umožňuje dosahovat vysokých rychlostí a nabízet vynikající jízdní vlastnosti. Otevřený design těchto vozů zajišťuje maximální kontakt s okolím a poskytuje řidiči výraznější pocit z rychlosti a kontroly. Mezi nejpopulárnější otevřené sportovní okruhové vozy patří Ariel Atom, Caterham 7, BAC Mono, KTM X-Bow, Radical SR3.



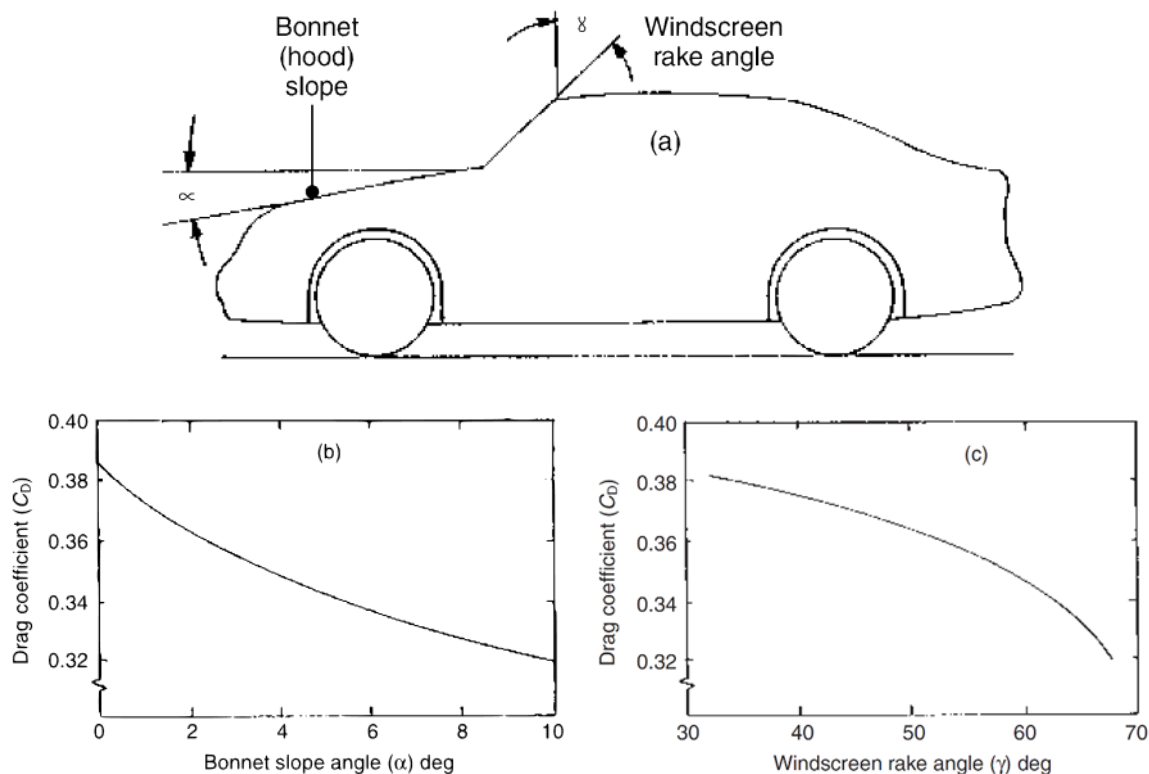


Obr. 13 Vnější rozměry Sigmy WR a) boční pohled, b) čelní pohled, c) horní pohled

## 2.2 KRITICKÉ PRVKY OVLIVŇUJÍCÍ AERODYNAMIKU

### 2.2.1 NÁBĚŽNÁ HRANA KAPOTY A OCHRANNÝ ŠTÍT

Zvyšováním úhlu sklonu kapoty od nuly do  $10^\circ$  snižuje součinitel odporu vzduchu, při dalším zvětšování toho úhlu jsou změny zanedbatelné. Na součinitel odporu má také vliv úhel sklonu předního skla, avšak velký sklon skla se může dostat do kolize s designem vozidla. Tato závislost je ukázána na následujícím obrázku. [7]



Obr. 14 Závislost koeficientu aerodynamického odporu na úhlech karoserie [7]

Hlavním aerodynamickým prvkem karosérie Sigmy WR, který má vliv na tok vzduchu kolem řidiče je tvar zadní hrany kapoty. u Sigmy velikost této hrany nebyla dostatečná, což vedlo k přímému proudění na řidiče. Tuto hranu je možné zvětšit pomocí přidavného štítu z plexiskla viz. obrázek 15. Velikost tohoto štítu je omezená pravidly homologace, protože při charakteristice toho štítu jako předního skla by vznikla nutnost aplikace stěračů či vnitřního ofuku vzduchem.



a)



b)

Obr. 15 Čelní štít Sigma WR

### 2.2.1.1 KONKUREČNÍ ŘEŠENÍ OCHRANNÝCH ŠTÍTŮ

Na následujících obrázcích jsou ukázány řešení u konkurenčních vozů. u KTM X-Bow R je na rozdíl od vozu Caterham horní hrana předsunuta proti směru jízdy.



a)



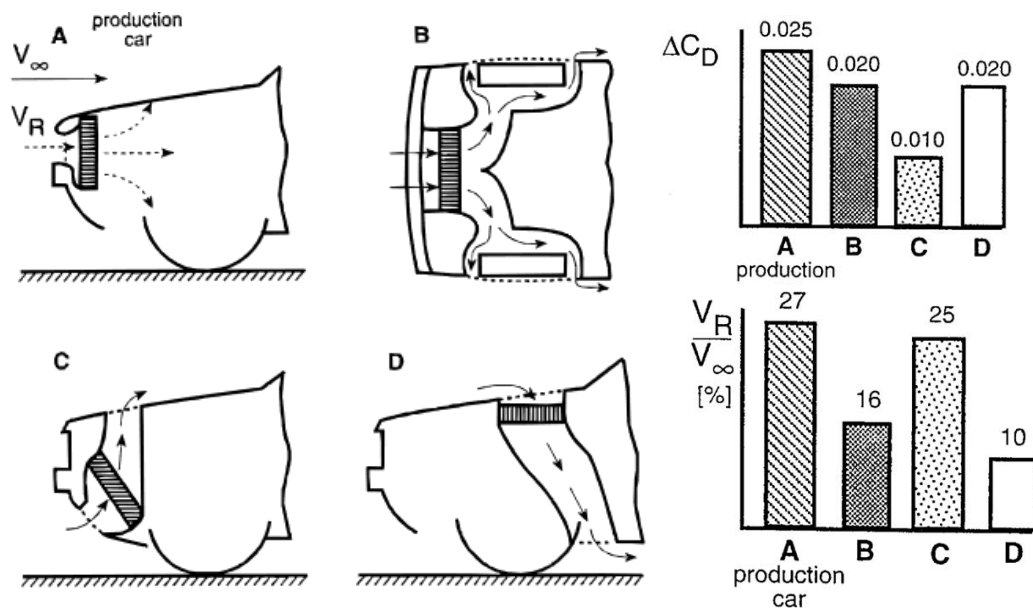
b)

Obr. 16 a) KTM X-Bow R, b) Caterham



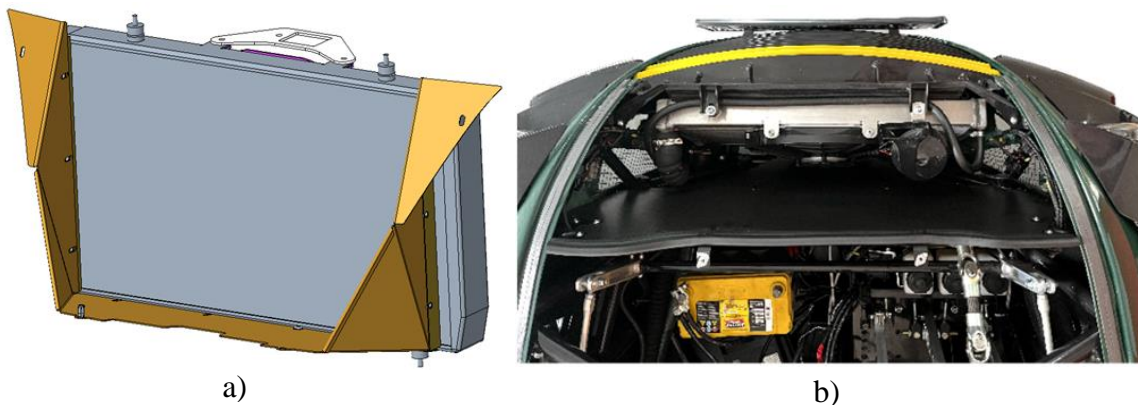
### 2.2.1.2 PROSTOR CHLADIČE

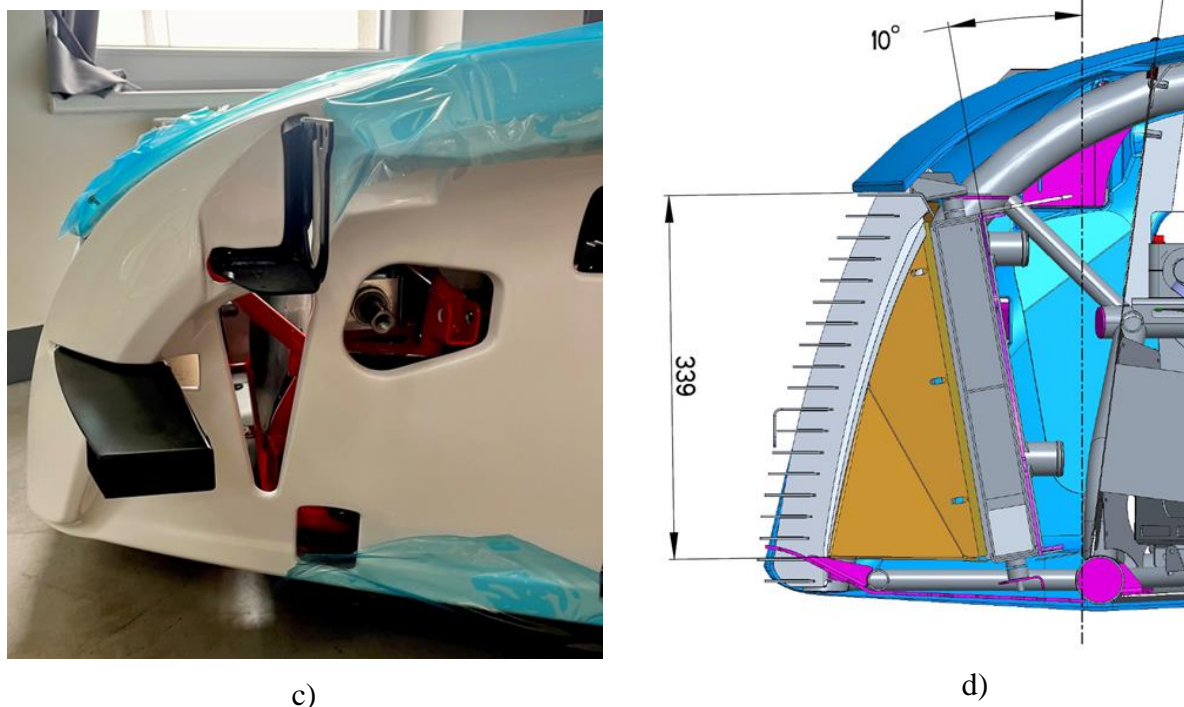
Umístění chladiče je ovlivněno hlavně zástavbovým prostorem daným konstrukcí karoserie či motoru. Dále je nutné uvažovat použití více chladičů, u takové varianty se pak musí řešit dostatečný hmotnostní tok vzduchu. Pro uložení chladiče v motorovém prostoru existuje několik obecných pozic. u produkčních aut převládá varianta s nakloněním chladiče mírně dozadu, protože je pak možné směřovat proud teplého vzduchu pod vozidlo. Poloha chladiče má vliv nejen na jeho efektivitu, ale také na součinitel odporu vzduchu. v knize [2] jsou porovnány některé polohy chladičů, toto porovnání je zobrazeno na obrázku 17. Poloha (C), kterou disponuje Sigma WR je charakterizovaná nejmenším koeficientem odporu vzduchu  $C_D$ . [2]



Obr. 17 Vliv polohy chladiče ve voze [2]

S ohledem na umístění motoru uprostřed je prostor kolem motoru velmi zjednodušen, protože jeho detailní zahrnutí by vzhledem k vlivu na hlavní cíl této práce bylo výpočetně náročné. Avšak proudění skrz chladič se podílí na velkou částí na proudění kolem řidiče a spolujezdce, protože proud vzduchu z chladiče je hnán otvorem skrz kapotu nahoru. Chladič je uchyten v přední části vozidla za plechovou mřížkou. Proudění skrz chladič je vedeno pomocí těsnícího plechu viz. obrázek 18. Chladič je nakloněn vůči svislé rovině o  $10^\circ$ . Za chladičem se nachází plech, který odděluje prostor řidiče a pomáhá odvodu vzduchu nahoru do otvoru v kapotě. Tento plech je natočen od svislé roviny o  $7,5^\circ$ . Odvodu vzduchu z chladiče taky napomáhá otvor v boku karoserie před předním kolem.



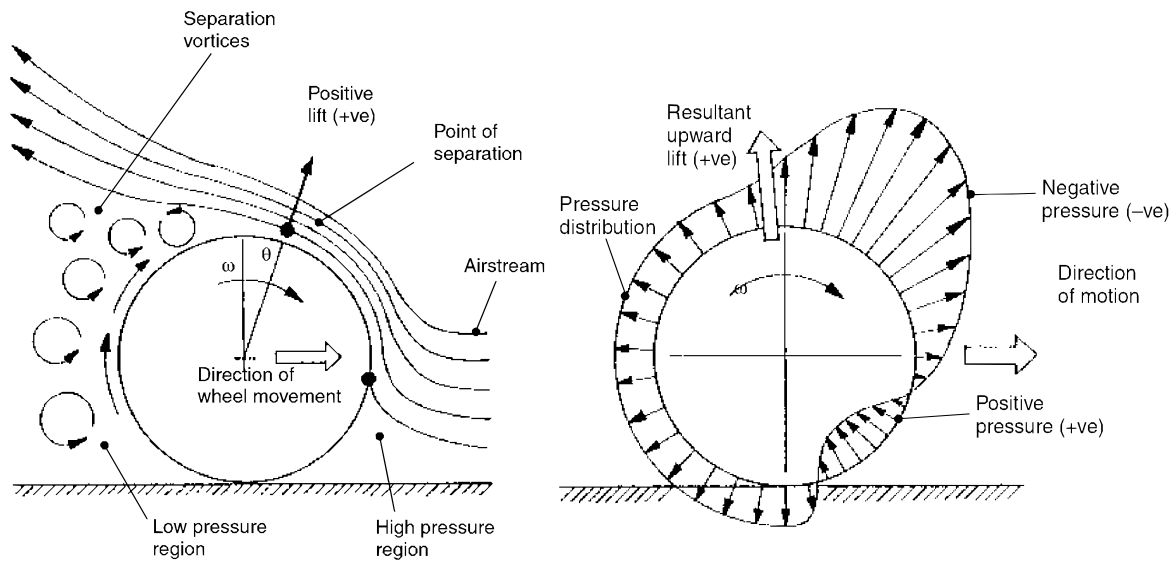


Obr. 18 a) plechové krytí chladiče, b) horní pohled na prostor chladiče, c) boční výdech za chladičem, d) sklon chladiče a těsnícího plechu

## 2.2.2 ODKRYTÁ KOLA

Dalším důležitým prvkem, který ovlivňuje celkovou aerodynamiku vozu jsou kola. u produkčních vozů, kde jsou kola skrytá uvnitř karoserie není vliv kol tak výrazný jako u vozů s nekrytými koly. Proudění vzduchu kolem kol může mít buď pozitivní nebo negativní vliv. Pokud se podaří proudění vzduchu kolem kol zrychlit, může to zlepšit tok vzduchu a snížit tak aerodynamický odpor vozidla. Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících proudění vzduchu kolem kol je design samotného kola. Kola musí být navržena tak, aby minimalizovala turbulenci vzduchu a usměřovala ho co nejplynuleji kolem vozu. Proto se v dnešní době u produkčního vozů vyskytují disky s krytými štěrbinami. u vozů s nekrytými koly je dalším faktorem ovlivňujícím proudění vzduchu je umístění a tvar blatníků, měly by být umístěny co nejbližší kolu, aby bylo proudění co nejplynulejší. Vliv má i rozměr kol samotných.

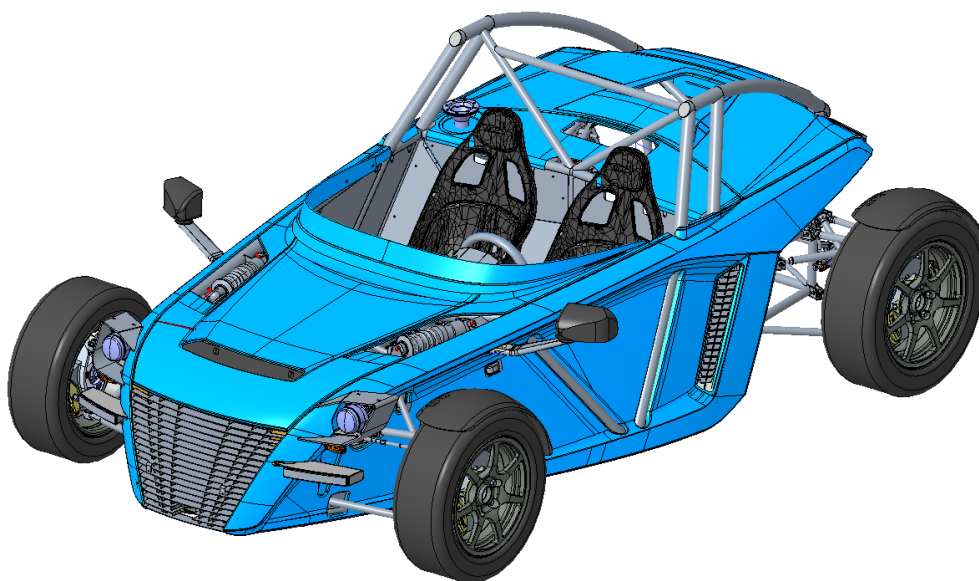
Proud vzduchu, který se setkává se spodní částí kola stagnuje, ale většina proudu vzduchu bude téct proti směru rotace kola a bude kopírovat jeho tvar, dokud nedosáhne vrcholu. Zde se oddělí a pokračuje v proudění dozadu. Pod oddělení zanechává pod a ve stopě kola turbulentní víry. Bod oddělení se posouvá dopředu s rostoucí rychlostí otáčení kola. Rozložení tlaku vzduchu kolem kola vykazuje nárůst přetlaku v přední části kola se stagnujícím prouděním vzduchu. v místě, kde se hlavní proud vzduchu odtrhne od ráfku se rychle změní na vysoký podtlak. Vzadu kolem kola zůstává tlak přibližně konstantní. Výsledkem tohoto rozložení tlaku je pozitivní vztlačková síla, která má negativní vliv na adhezi. Toto rozložení je zobrazeno na obrázku 19. [7]



Obr. 19 Rozložení tlaku kolem rotujícího kola [7]

## 3 CAD MODEL

Výchozí model Sigmy WR je vytvořen firmou Sigma Motor v programu PTC Creo 7.0 viz. obrázek 20. Jedná se o finální konstrukční model, který obsahuje všechny díly i spojovací materiál. Většina dílů je tvořena pomocí funkcí Sheet Metal (plechy) a Sweep (trubkový rám). Dále model obsahuje detailní nakupované díly jako například brzdové kotouče, třmeny, disky atd. Sklolaminátová karoserie byla navržena v programu Rhinoceros a do modelu importována ve formátu Step. Kvůli tomu její úprava je v programu Creo značně omezena.

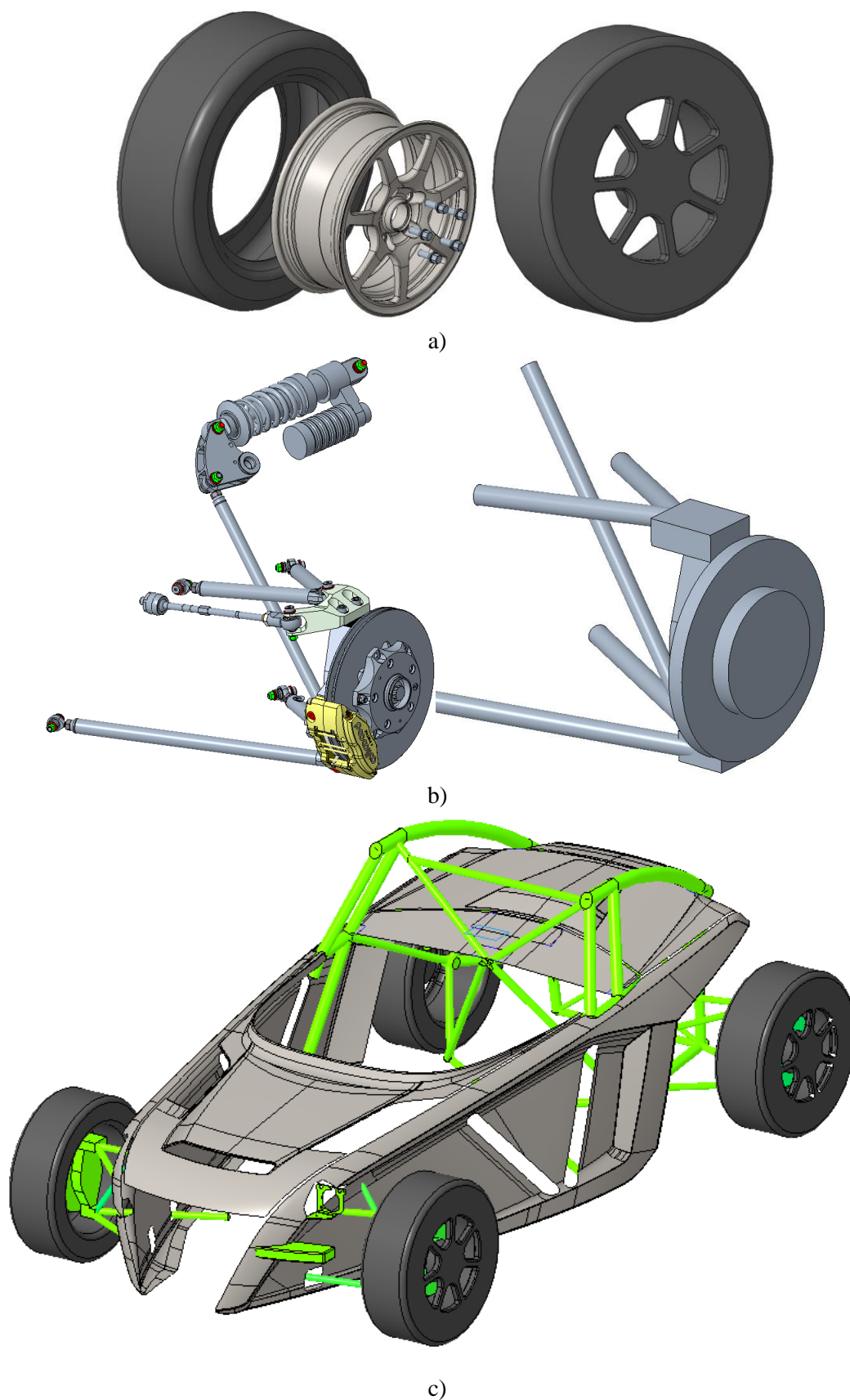


Obr. 20 Výchozí CAD model Sigmy WR

### 3.1 ZJEDNODUŠENÍ MODELU

Pro zajištění funkčnosti výpočtového modelu bylo nutné dodat dostatečně jednoduchou geometrii, která bude tvořena pouze objemovými tělesy. v prvním kroku bylo třeba odstranit všechen spojovací materiál a kloubové spoje, čímž se výrazně zredukoval počet součástí. Další redukce dílů proběhla v místech, kde proudění nemá výrazný vliv na dané cíle analýzy. To jsou oblast podvozku, kde byly odstraněny tlumiče, brzdové třmeny, rod-ends nebo blatníky. Dále byly odstraněny součástky v kokpitu a motorovém prostoru. Zde byl například odstraněn volant, pedály, displej, ochranné plechy atp. Vzhledem k zjednodušování modelu bylo možné uvažovat budoucí využití symetrie, protože nesymetrické díly jsou uvnitř vozu a bylo možné je odstranit. Z tohoto důvodu se v první fázi upravovala pouze strana řidiče.

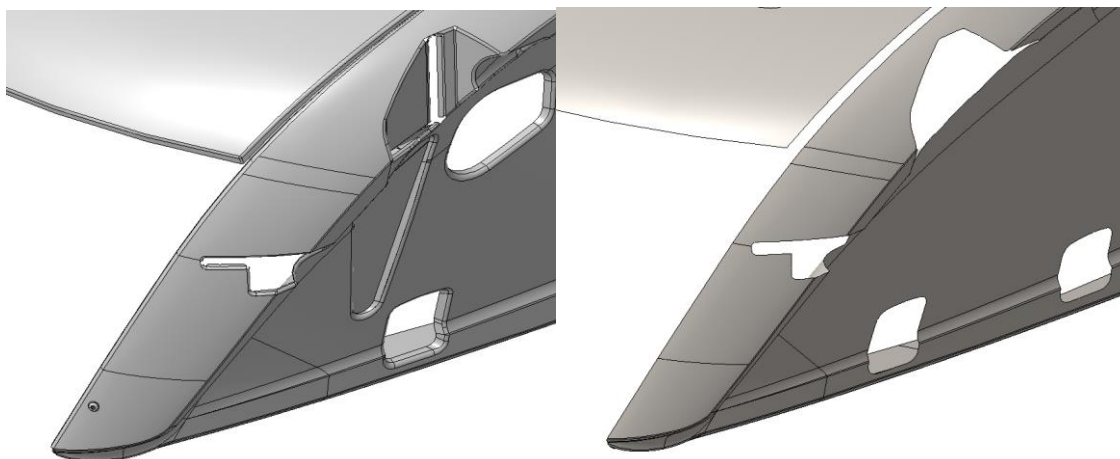
Následně bylo nutné ponechaným dílům zjednodušit tvar, viz. obrázek 21. u pneumatik byl vytvořen nový model tvořen pouze jedním tělesem, protože model disku byl zbytečně detailní. Nový model kola byl vytvořen pomocí funkce *Revolve* a byly využity rozměry od použitých dílů na vozidle. Díry napodobující otvory v reálném disku bylo vytvořeno pomocí funkce *Extrude*. Další částí vozu, kterou bylo nutné zjednodušit byla sestava zavěšení kol. Ta se v reálu skládá z trubek s navařenými koncovkami, těhlice, náboje kola a brzd. Trubky byly nahrazeny tyčemi, které byly prodlouženy tak, aby protínaly navazující díly a mohly být následně *Boolean* operacemi spojeny. u zbytku dílů této sestavy, byly zrušeny všechny odlehčení a otvory pro šrouby.



Obr. 21 a) zjednodušená pneumatika, b) zjednodušené zavěšení, c) zjednodušená karoserie

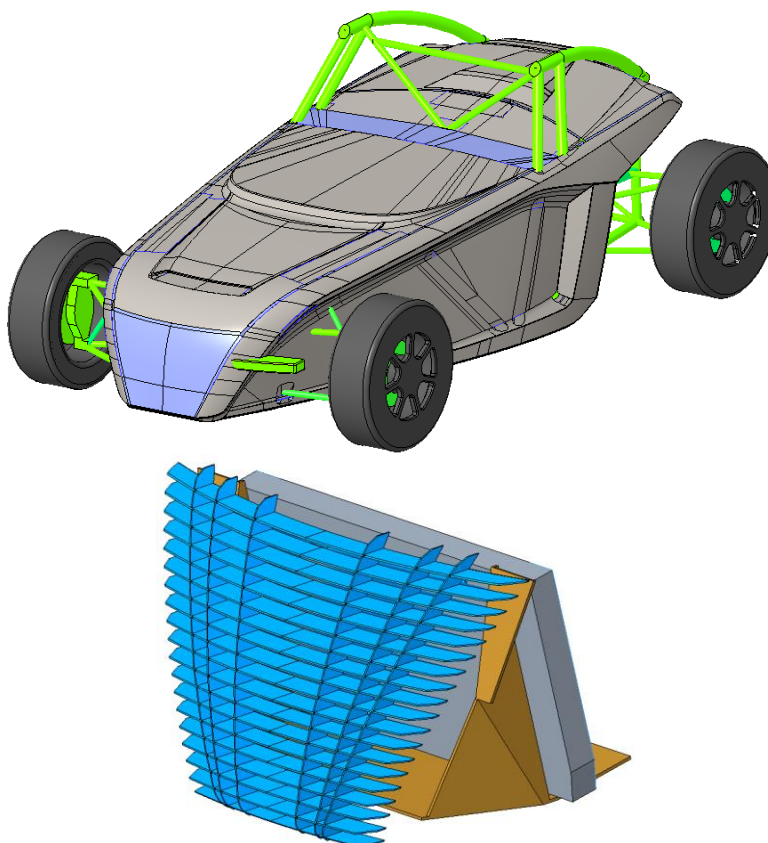


Hlavní částí, která charakterizuje Sigmu je sklolaminátová karoserie. Ta je rozdělena do 6 dílů. Mezi jednotlivými částmi jsou mezery s hranami, které usnadňují jejich lícování při skládání. Pro ucelení karoserie do jednoho kusu, bylo potřeba tyto hrany nejprve tyto hrany odstranit. Vzhledem k tomu, že karoserie v Creo modelu je importovaná bylo nutné pro tento krok provést v modulu *Import DataDoctor*. v tomto modulu byly taky odstraněny zaoblení a hrany u funkčních děr. v tomto modulu byla využita na některých dířích i funkce uzavření děr, které znemožňují vytvoření objemového tělesa.



Obr. 22 Původní geometrie (nalevo) a upravená (napravo)

Pro vytvoření uzavřené skořepiny se následně využily pomocné tangentsní křivky a funkce *Boundary Blend*.

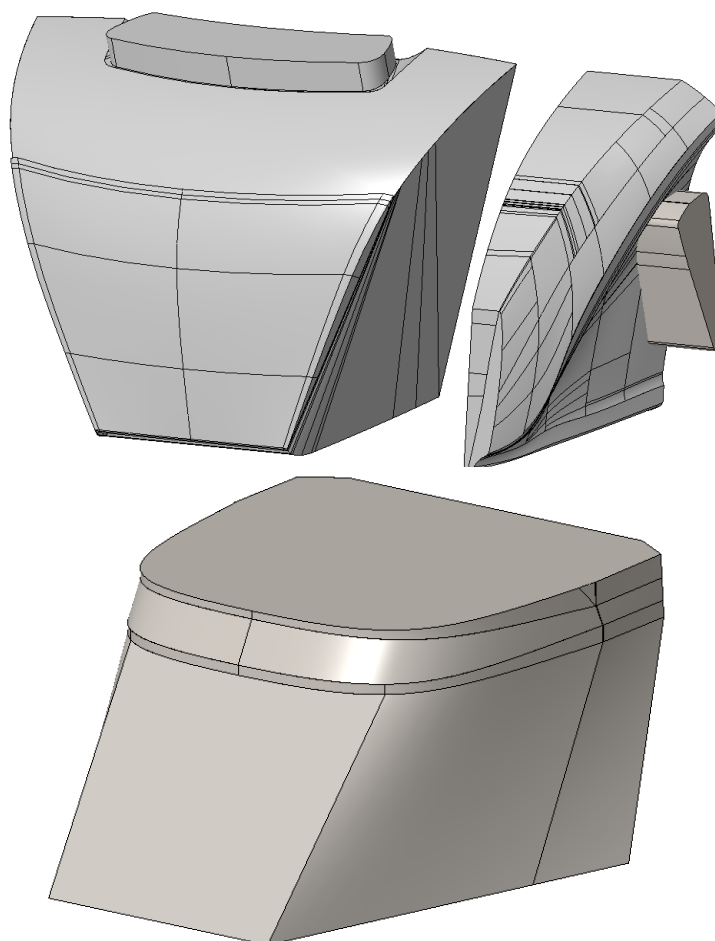


Obr. 23 Uzavřená karoserie a zjednodušené díly prostoru chladiče

Poslední zjednodušenou částí byl chladič a jeho mřížka. Díly těchto sestav byly zjednodušeny, tak aby nebyly tvořeny z mnoha částí, a přitom si zachovali své reálné rozměry. Bylo ponecháno také plechové stínění chladiče, které slouží také jako jeho uchycení.

### 3.2 POMOCNÉ TĚLESA NA TVORBU DUTIN

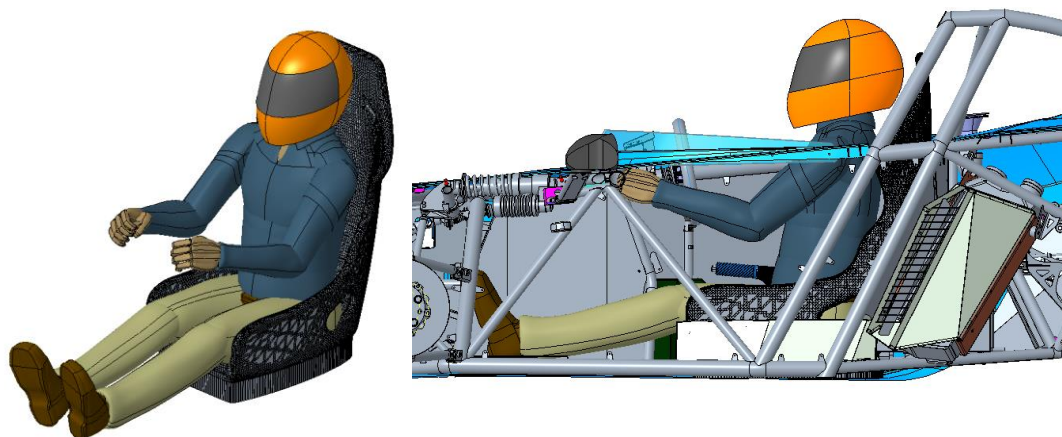
Kvůli vlastnostem modelu karoserie nebylo možné vytvořit objemové těleso v PTC Creo. Proto se zvolil postup, ve kterém se nedokonalé uzavření ploch opravilo pomocí speciálních nástrojů v STAR-CCM+. Pro zjednodušení tohoto postupu se vytvořili další plošná tělesa pro dutinu chladiče a kabiny, která se pak využili pro odečtení až v STAR-CCM+. Modelování těchto prostor bylo značně náročné, protože kvůli komplikovaným tvarům v přední části karoserie nešlo využít funkce *Offset*. Z toho důvodu se muselo přistoupit na kompromis, kvůli kterému tvar neodpovídá přesně realitě, protože na reálném vozidle má karoserie tloušťku pár mm.



Obr. 24 Pomocné objemy pro prostor chladiče (nahore) a kabiny (dole)

### 3.3 POZICE ŘIDIČE ZA VOLANTEM

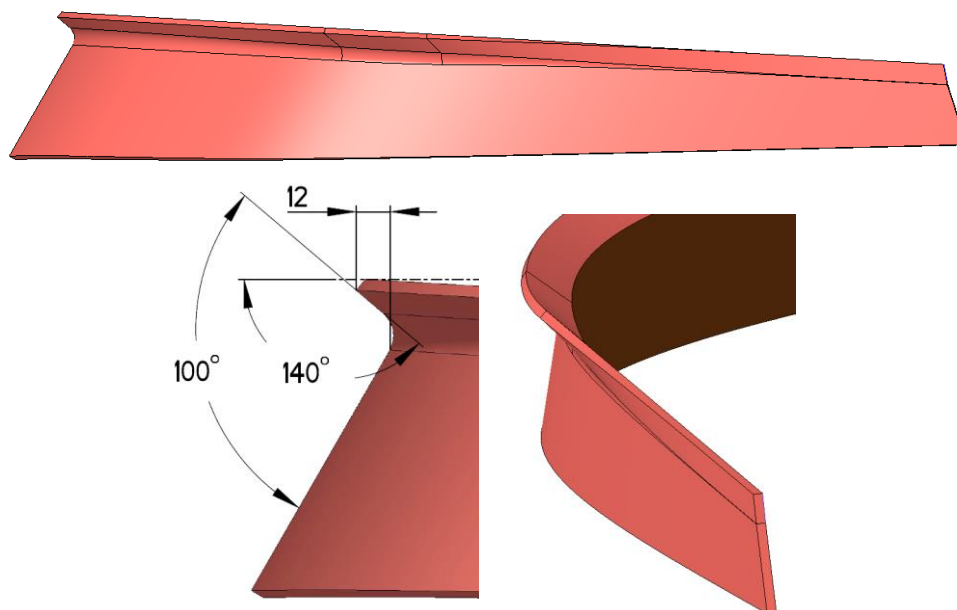
Řidič byl do vozu přidán a ustaven do pozice za volant přes modul *Manikin* v PTC Creo. Dále k němu byl nastaven model helmy tak, aby přibližně odpovídal pozici, při jaké je v reálném provozu. Jeho posed za volantem je zobrazen na obrázku 25.



Obr. 25 Pozice řidiče za volantem

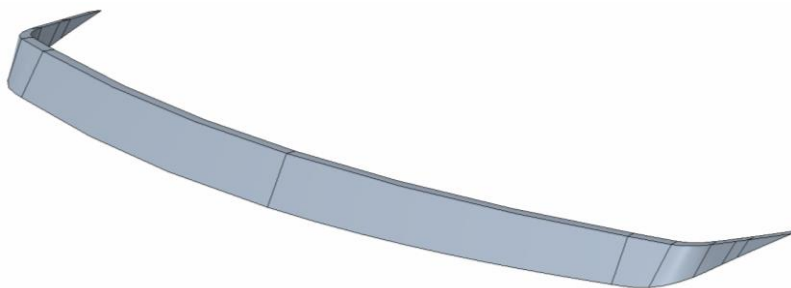
### 3.4 NÁVRH ŠTÍTKU A NÁBĚŽNÉ HRANY

Nový návrh ochranného štítku byl inspirován vozidlem KTM X-Bow R. To využívá štítku s ohnutou horní hranou proti směru jízdy. Tento tvar by měl před řidičem vytvořit z proudícího vzduchu ochranu bariéru. Tato přehnutá hrana je postupně vedena do ztracena, aby se snížil přidaný odpor vzduchu. Pro model Sigmy se využil model přídatného štítku, ke kterému se přidala horní hrana. Přední hrana je předsunuta od 12 mm a s čelní plochou svírá tupý úhel. Štít je vyšší přibližně o 8 mm než původní, jinak jsou jeho základní rozměry stejné.

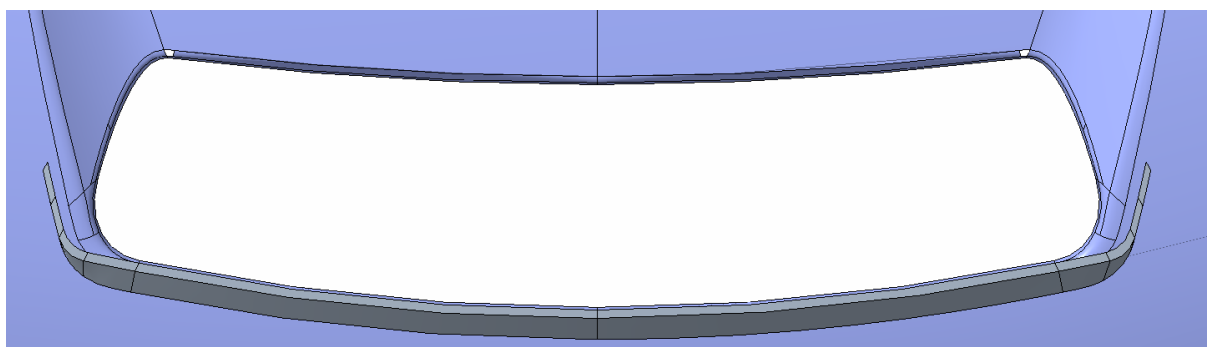


Obr. 26 Nově navrhnutý tvar štítu

Náběžná hrana byla vytvořena, aby proudění přes přední okraj kapoty mělo menší vliv na ohnutí proudění vycházející z výdechu na kapotě. Její tvar kopíruje s určitým odskokem tvar výdechu. Boční hrany jsou vytvořeny do ztracena, aby byl tvar více dynamický. Sklon této hrany byl zvolen přibližně 60° vůči vozovce a výška je 20 mm. Hrana je zobrazena na obrázku 27 a 28.



*Obr. 27 Model náběžné hrany před výdechem chladiče*



*Obr. 28 Umístění náběžné hrany před výdechem chladiče*

## 4 MODEL STAR-CCM+

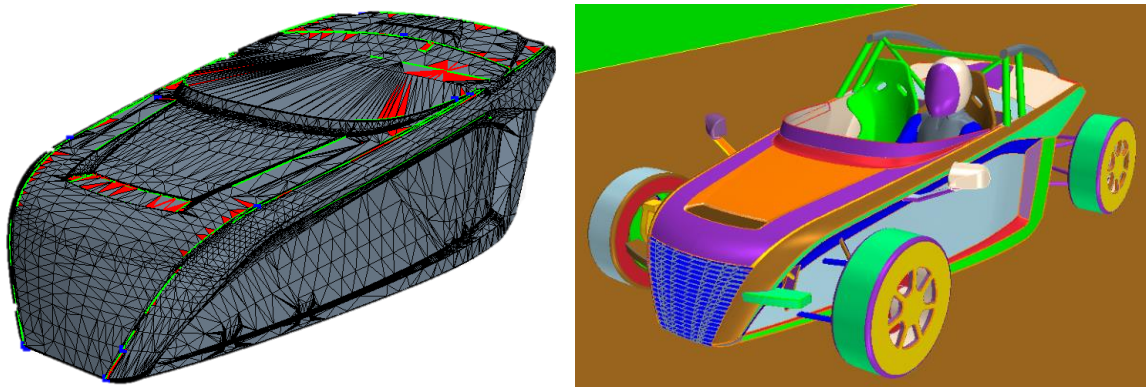
Příprava výpočetního modelu se skládá z mnoha částí. Zahrnuje to úpravu geometrie vozidla, jeho síťování a nastavení fyzikálních vlastností. Správná příprava výpočetního modelu je důležitá pro získání přesných výsledků a umožňuje inženýrům provést simulaci různých podmínek proudění vzduchu a optimalizovat design vozidla pro maximální výkon a efektivitu.

### 4.1 PŘÍPRAVA VÝPOČTOVÉHO MODELU

Vzhledem k nedokonalostem výstupního modelu z PTC Creo následovala řada oprav a dalších příprav pro vytvoření funkční geometrie v STAR-CCM+.

#### 4.1.1 ÚPRAVA IMPORTOVANÉ GEOMETRIE

Po načtení geometrií charakterizující tvary karoserie, které byly tvořeny pouze jako plošná tělesa, bylo nutné neuzavřená místa opravit. Toho se docílilo v modulu *Surface repair*, který obsahuje nástroje pro zaslepení děr nebo odstranění přebytečných ploch.



Obr. 29 Oprava geometrie v *Surface repair* (nalevo) a finální rozdělení ploch vozu (napravo)

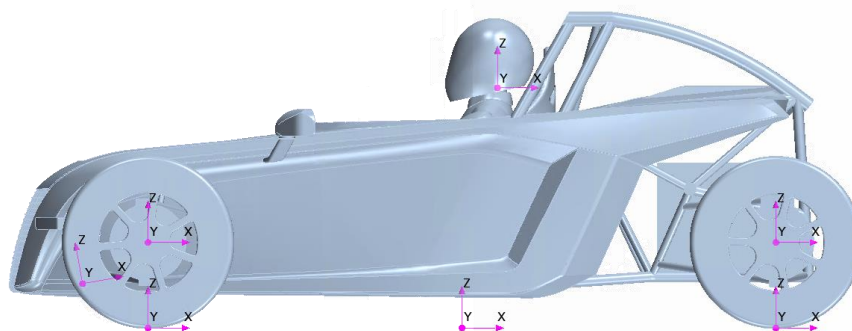
Vzhledem k složitosti některých částí výsledného modelu, tvořilo geometrii mnoho ploch a jejich vzájemných hran. Aby bylo možné ruční nastavení lokální sítě a nastavení okrajových podmínek, bylo potřeba eliminovat volné hrany a následné rozdělení ploch vozidla. k tomu se využila funkce *Split by patch*. Touto funkcí se rozdělily všechny plochy tunelu, vozidla i výměníku. Vznikla tak řada oblastí (viz. obrázek 29), na kterých mohla být následně zvolena rozdílná velikost sítě. To je výhodné kvůli snížení počtu bodů sítě, ale také k přesnějším výsledkům kolem kritických míst jako jsou hrany či rádiusy.

Dalším krok představoval spojení všech sestav dílů do jednoho spojitého tělesa, které bylo možné odečíst od tunelu a tím vznikla výpočetní doména.

#### 4.1.2 SOUŘADNICOVÉ SYSTÉMY

Ke správnému nastavení okrajových podmínek a následných monitorů bylo nutné vytvořit několik nových souřadných systémů (obrázek 30). Hlavní souřadný systém vozidla leží ve středu rozchodu kol a středu rozvoru náprav a současně v rovině vozovky. Kladný směr osy x je ve směru proudění vzduchu, a to z důvodu kladných hodnot počítaných sil na řidiče a vozidlo. Pro nastavení rotace kol bylo nutné v jejich středu vytvořit nové souřadné systémy. Další souřadný systém byl vytvořen v chladiči, kde osa x je normála na jeho povrch. Tento souřadný systém slouží k nastavení orientace buněk jeho sítě. Souřadné systémy byly vytvořeny pomocí *Edit 3D-CAD*.



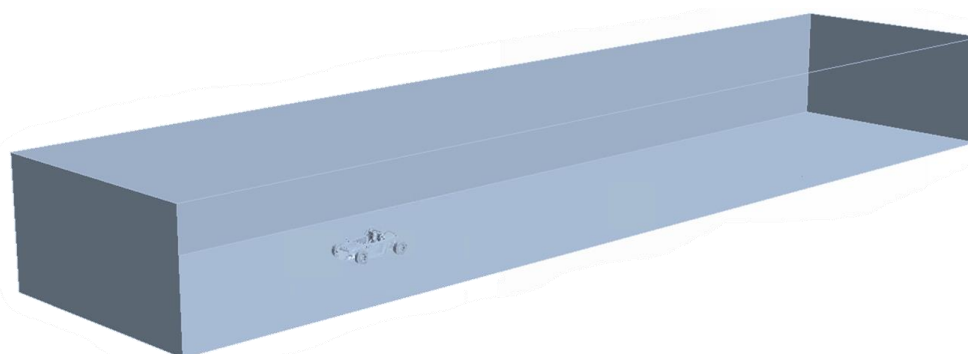


Obr. 30 Použité souřadné systémy

### 4.1.3 VÝPOČETNÍ DOMÉNA

Při tvoření domény, která představuje prostor kde proudí vzduchu kolem vozidla, se musí brát zřetel na její dostatečnou velikost. Pokud by rozměr tunelu nebyl dostatečný, mohly by být výsledky ovlivněny velkými tlakovými gradienty dle normály ke všem hranicím. Doména však nemůže být neomezená, vnější velikost se dle zkušeností volí podle násobku rozměru analyzovaného objektu. u externí aerodynamiky vozidel se šířka domény volí jako 4násobek délky vozidla, její délka se volí jako 8násobek délky vozidla a výška jako 2násobek délky vozidla. Dále je také důležité, v jaké vzdálenosti je objekt postaven od vstupních a výstupních hranic domény. Mělo by být zaručeno, že vstupní proudění bude před vozidlem bude plně rozvinuté a za vozidlem bude ustálené. Proto se doporučuje mít analyzované vozidlo umístěné minimálně 2 jeho délky za vstupem a za vozidlem by měl být prostor odpovídající přibližně 5 délkám vozidla.

Na základě těchto poznatků a zkušeností vedoucího byla doména zvolena o rozměrech 55x12x6 m. Sigma WR byla umístěna přibližně 13 metrů za vstupem do domény. Dále bylo vozidlo posunuto v záporném směru osy Z tak, aby se nasimuloval deformovaný kontakt pneumatiky s vozovkou a zároveň aby bylo možné vytvořit výpočtovou doménu obsahující vozidlo.



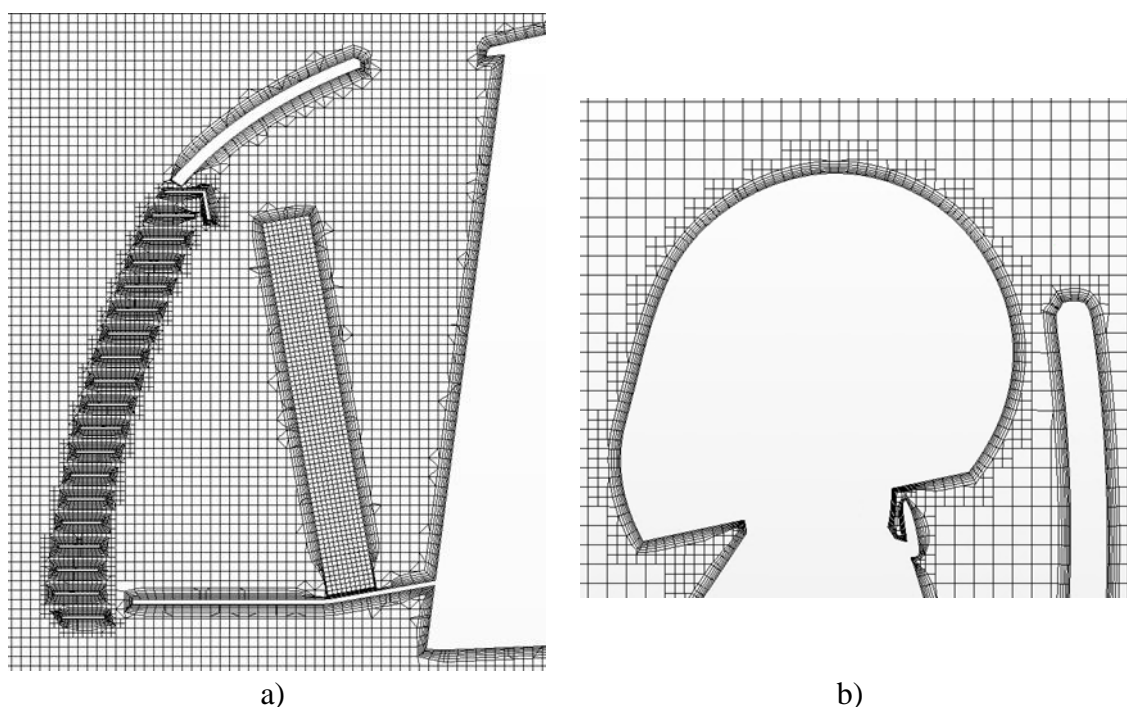
Obr. 31 Výpočetní doména

## 4.2 VÝPOČETNÍ SÍŤ

Aby se docílilo co nejlepší objemové sítě je nutné vytvořit kvalitní povrchovou síť. Kvalita povrchové sítě se odvíjí od kvality povrchu geometrie a následných nastavení. v této práci bylo využito funkce *Automated Mesh*, která využívá řadu variabilních nastavení. První, které se využívá k zlepšení kvality povrchu geometrie a optimalizaci pro následné generování je *Surface Remesher*. Dochází k rozdělení jednotlivých ploch do povrchů tvořeny trojúhelníky. *Surface Remesher* se obvykle využívá k přesítování povrchů, které jsou

výstupem z dat povrchového typu např. STL. Druhým základním nastavením *Core Volume Meshers* se vybírá způsob generování objemové sítě. Byl zvolen model *Trimmed Cell Mesher*, který je vhodný u proudění s jedním převládajícím směrem. Doména je zaplněna šestistěny, které jsou následně ořezány hranicemi geometrie. To zlepšuje nezávislost na kvalitě povrchu geometrie. Pro zvýšení rychlosti konvergence je nutné zarovnat buňky sítě s tokem proudu, což bylo nutné pohlídat u nakloněného výměníku. Poslední základní nastavení *Prism layer Mesher* se týká tvorby prizmatických vrstev.

Charakteristiky předchozích kroků se následně nastavují obecně pro celou síť. Hlavní vlastnosti sítě, které se mohou řídit je velikost buněk. v STAR-CCM+ se zvolí rozměr *Base size*, podle kterého jsou následně další parametry sítě procentuálně přepočítané. Pro snazší přepočet je *Base size* zvolena 100 mm. Díky tomu je zaručené, že v případě změny *Base size* jsou nastavené hodnoty vůči sobě vždy poměrově stejné. *Target surface size* představuje velikost buňky, kterou chceme primárně dosáhnout, její hodnota byla nastavena na velikost 16 mm. Minimální velikost buněk byla nastavena na 2 mm, tato hodnota se projeví především u malých hran, které tuto hodnotu nedosahují. Dochází k jejich zjednodušení. Buňky v mezní vrstvě se řídí nastavením *Prism layer Mesher*. Hlavními parametry jsou počet vrstev, zvoleno 6, a celková tloušťka buněk v mezní vrstvě, zvoleno 10 mm (viz. obrázek 32). Posledním obecným nastavením sítě je maximální velikost buněk, které se nachází ve větších vzdálenostech od stěn vozidla. Vzhledem k rozměrům tunelu a výhodnosti s využitím násobku hodnoty *Target surface size*, je maximální velikost buněk nastavena na 512 mm. Protože není potřeba mít v celém prostoru tunelu stejně jemnou síť, je toto nastavení výhodné pro snížení celkového počtu buněk.

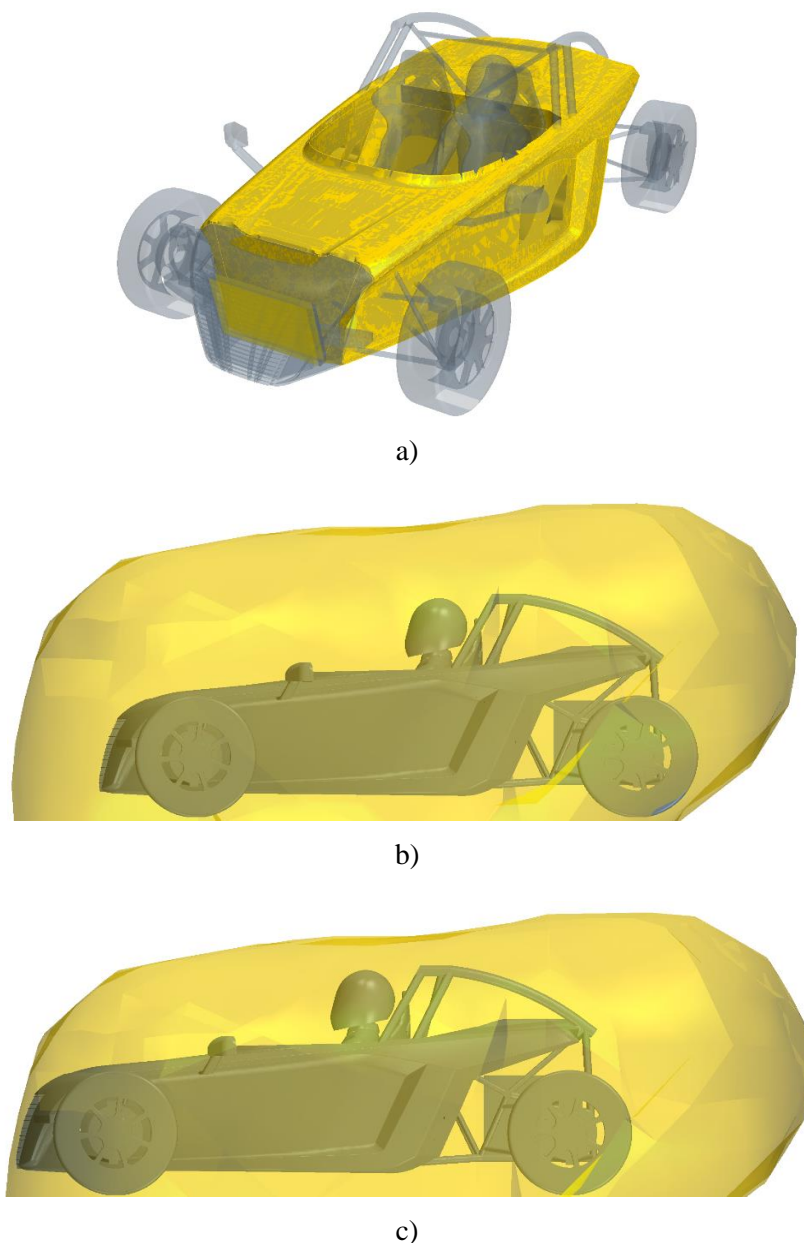


Obr. 32 Buňky mezní vrstvy: a) síť v prostoru chladiče b) síť okolo helmy řidiče

### 4.2.1 LOKÁLNÍ NASTAVENÍ SÍTĚ

K změně parametrů sítě jednotlivých oblastí, které jsou vzhledem k cílům analýzy náchylné na změny proudění, se využilo několik metod. v první řadě se musela zjemnit síť u povrchů chladicího prostoru (mřížka, výdechy), malých rádiusů karoserie, povrchů kol a vozovky. Pro zjemnění sítě na těchto površích se využila funkce *Surface Control* viz. obrázek 32.

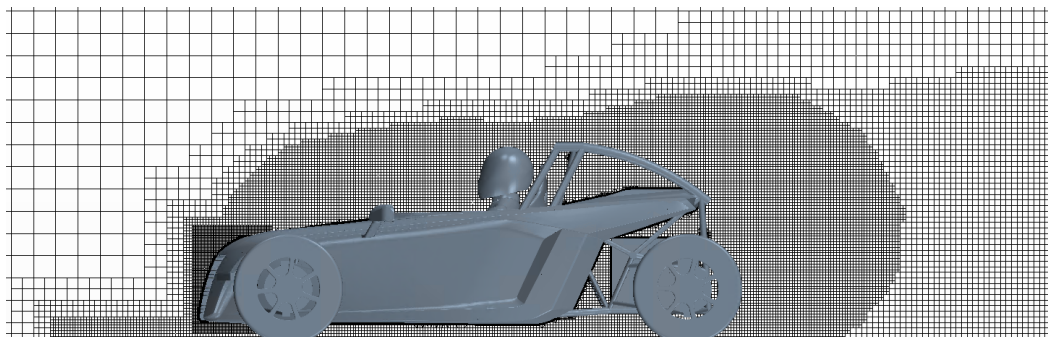
Dále bylo potřeba řídit objemovou síť v blízkém okolí vozidla a pro zachycení vírů i za vozidlem. v metodě viditelné na obrázku 33 a 34, se v prvním kroku vytvořili pomocné objemy s využitím funkcí pro kopírování tvaru karoserie nebo pouze funkce *Volume Shapes*. Funkcí *Surface Wrapper* vznikl objem, který přibližně kopíroval tvar vozu. Toto objemové těleso bylo funkcí *Offset* zvětšeno a následně posunuto funkcí *Transform* dozadu a dolů, aby co ideálně kopírovalo tvar celého vozu. Další dva pomocné objemy byly zvětšovány pouze v kladném směru osy X.



Obr. 33 Zobrazení funkce a) *Surface Wrapper*, b) *Offset*, c) *Transform*



Následně v prvku *Volumetric control* byly v každém pomocném objemu nastaveny hodnoty (celočíslné dělitele maximální velikosti buněk) od nejnižší po nejvyšší podle vzdálenosti od vozidla. To zaručilo plynulou návaznost velikosti sousedních buněk. Výsledná síť okolo vozu je zobrazena na následujícím obrázku.



Obr. 34 Objemová síť v okolí vozidla

#### 4.2.2 VÝSLEDNÉ PARAMETRY SÍTĚ A JEJÍ KONTROLA

Konečná síť domény je tvořena z 18,7 milionu buněk a síť chladiče je tvořena přibližně 118 tisíci buňkami. Síť je kontrolována pomocí funkce *Mesh Diagnostic*. Tento nástroj vytvoří po vysítování vyhodnocení, které popisuje vlastnosti a kvalitu sítě. Hlavní kontrolní kritéria jsou *Face Validity*, *Volume Change* a *Skewness Angle*.

#### 4.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Okrajové podmínky určují chování proudění vzduchu kolem vozidla. Jsou zásadní pro stanovení tlakových rozdílů na povrchu vozidla, které pak ovlivňují vlastnosti vozidla, jako jsou aerodynamický odpor a vztlak.

##### 4.3.1 NASTAVENÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU

Nastavení fyziky proudění proudícího média uvnitř domény se nachází pod prvkem *Continua*. Toto nastavení se skládá z volby rozměru prostoru, závislost na čase, vlastnosti média a modelování proudění. Pro výpočty byl zvolen výpočetní model k-epsilon z důvodu dobré konvergence pro externí proudění kolem vozidel.

Tabulka 1 Nastavení řešiče

Řešič	
Model	Nastavení
Space	Three Dimensional
Time	Steady
Material	Gas
Flow	Coupled Flow
Equation of State	Constant Density
Viscous Regime	Turbulent
Turbulence	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
Reynolds-Averaged Turbulence	K-Epsilon Turbulence
K-Epsilon Turbulence	Realizable K-Epsilon two-layer
Wall Treatment	Two-Layer All y +
Optional Physics Models	Solution Interpolation Gravity

Tabulka 2 Hodnoty použitého média

Médium	
Veličina	Hodnota
Hustota	1,225 kg·m <sup>-3</sup>
Dynamická viskozita	1,8558·10 <sup>-5</sup> Pa·s
Počáteční rychlost	160 km·h <sup>-1</sup>
Referenční tlak	101325 Pa
Počáteční tlak	0 Pa

### 4.3.2 NASTAVENÍ REGIONŮ

Přirazení okrajových podmínek k jednotlivým oblastem se provádí funkcí *Regions*. Aby výpočet mohl být spuštěn je nutné, aby okrajové podmínky byly definované na všech hranicích domény, proto při vytvoření *Region* mají všechny plochy domény výchozí nastavení *Wall*. Mezi hlavní okrajové podmínky patří *Velocity Inlet*, *Pressure Outlet*, *Wall Relative Rotation* nebo *Symetry Plane*. Stabilní nastavení okrajových podmínek je založené na nastavené rychlosti či hmotnostním průtoku na vstupu a statickém tlaku na výstupu (s hodnotou statického tlaku 0 Pa při referenčním tlaku 1 bar). Rychlost otáček kol byla určena ze vztahu rychlosti vozidla a dynamického poloměru kol.

Pro tento výpočet bylo nutné vytvořit druhý region pro výměník, aby bylo možné simulovat proudění skrz něj s danou tlakovou ztrátou. k tomu se využil typ regionu *Porous Region* a okrajová podmínka *Interface*. Ta byla využita na povrch vstupu a výstupu výměníku.

Tabulka 3 Nastavení okrajových podmínek

Část regionu	Okrajová podmínka	Fyzikální podmínka	Definovaná hodnota
Vozidlo plochy	Wall	-	-
Vozidlo kola	Wall Relative Rotation	Tangential Velocity Specification	142 rad·s <sup>-1</sup>
Tunel vstup	Velocity Inlet	Velocity Magnitude	160 km·h <sup>-1</sup>
Tunel výstup	Pressure Outlet	Pressure	0 Pa
Tunel vozovka	Wall	Tangential Velocity Specification	160 km·h <sup>-1</sup>
Tunel stěny a strop	Symetry Plane	-	-
Vozidlo-výměník vstup	Wall	-	Interface 1
Vozidlo-výměník výstup	Wall	-	Interface 2

### 4.3.3 NASTAVENÍ VLASTNOSTÍ VÝMĚNÍKU

Pro simulaci výměníků tepla se využívá v STAR-CCM+ model porézního materiálu charakterizovaný okrajovými podmínkami. Parametry se nastavují ve *Physics Values* pro daný region. Jedná se o parametry *Porous Inertial Resistance* ( $P_i$ ) a *Porous Viscous Resistance* ( $P_v$ ). Koeficienty  $P_i$  a  $P_v$  definují propustnost porézního materiálu pro jednorozměrné proudění. Vychází z polynomu druhého stupně, který vyjadřuje závislost tlakové ztráty na rychlosti proudění:

$$\Delta p = -\rho(P_i|v| + P_v)v,$$

kde:

$\rho$  — hustota tekutiny [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

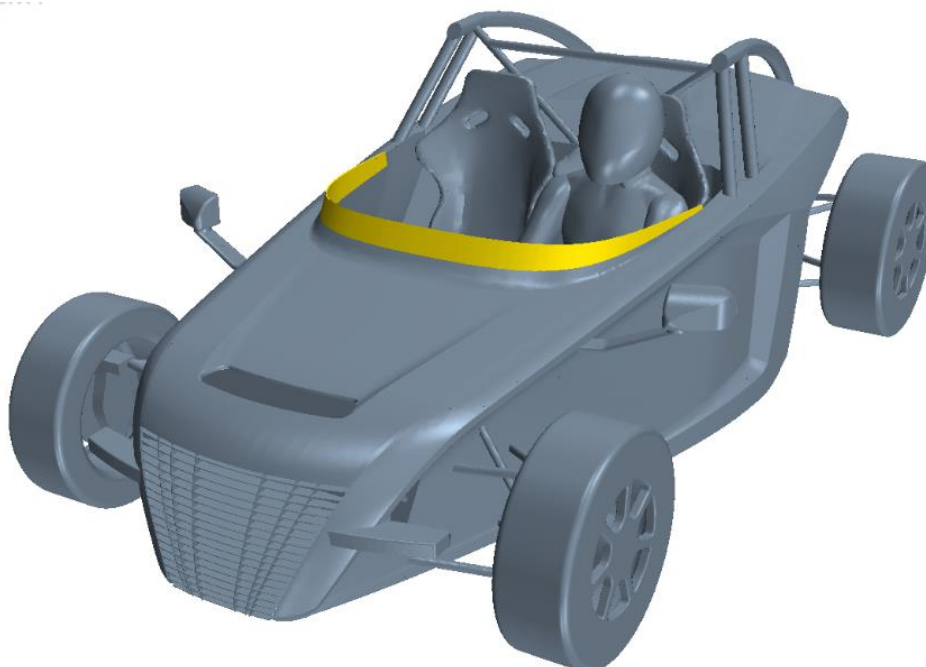
$v$  — rychlost tekutiny v normálovém směru na povrch [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

#### 4.4 POČÍTANÉ VARIANTY

Rozdíly geometrie počítaných variant jsou zobrazeny na následujících obrázcích.

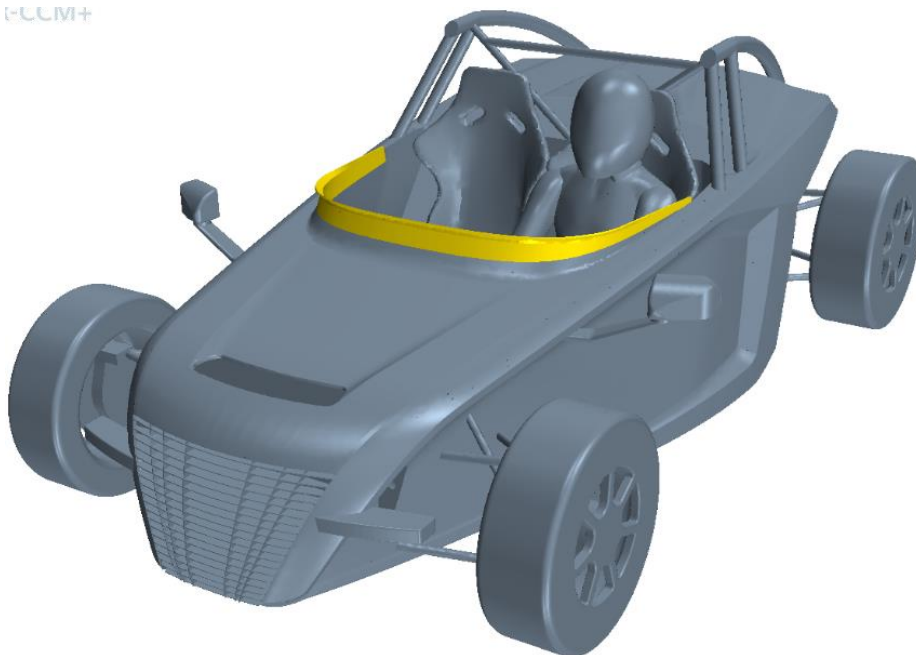


*Obr. 35 Varianta 1 představuje výchozí stav vozidla — bez štítu.*



*Obr. 36 Varianta 2 představuje vozidlo s přidaným ochranným štítem.*

CCM+



*Obr. 37 Varianta 3 vznikla přidáním nově navrhnutého štítu*

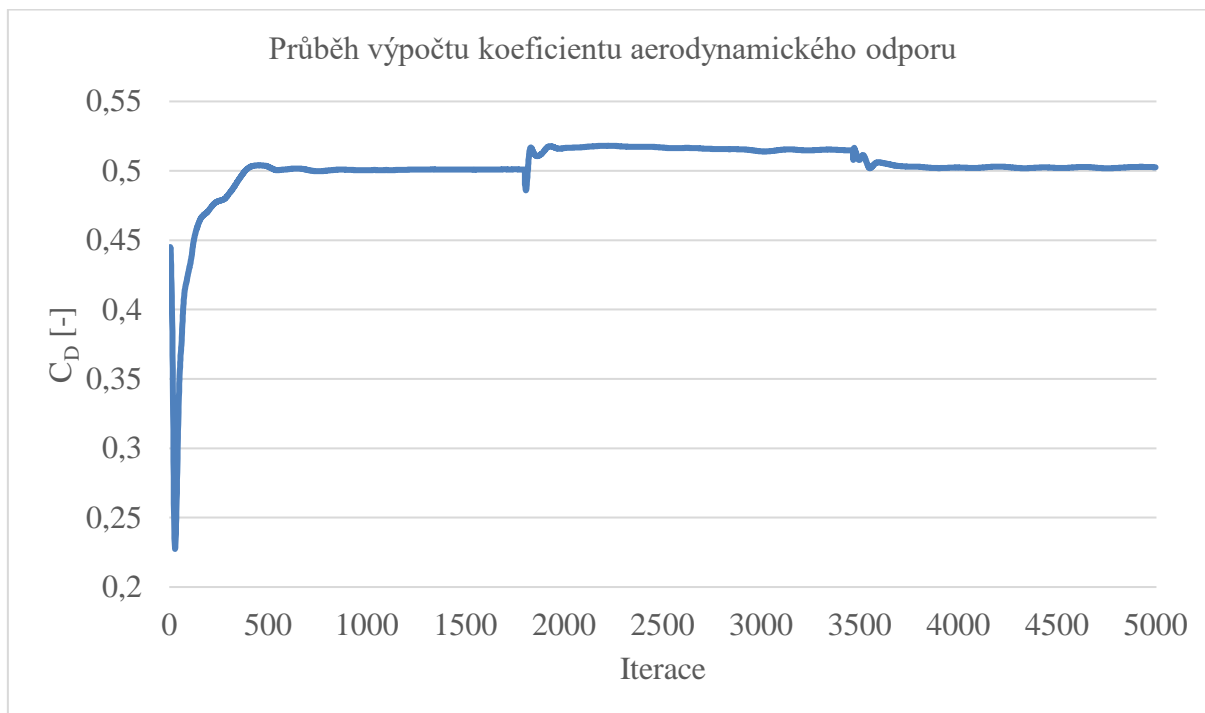
CCM+



*Obr. 38 Varianta 4 vznikla přidáním náběžné hrany k variantě 1.*

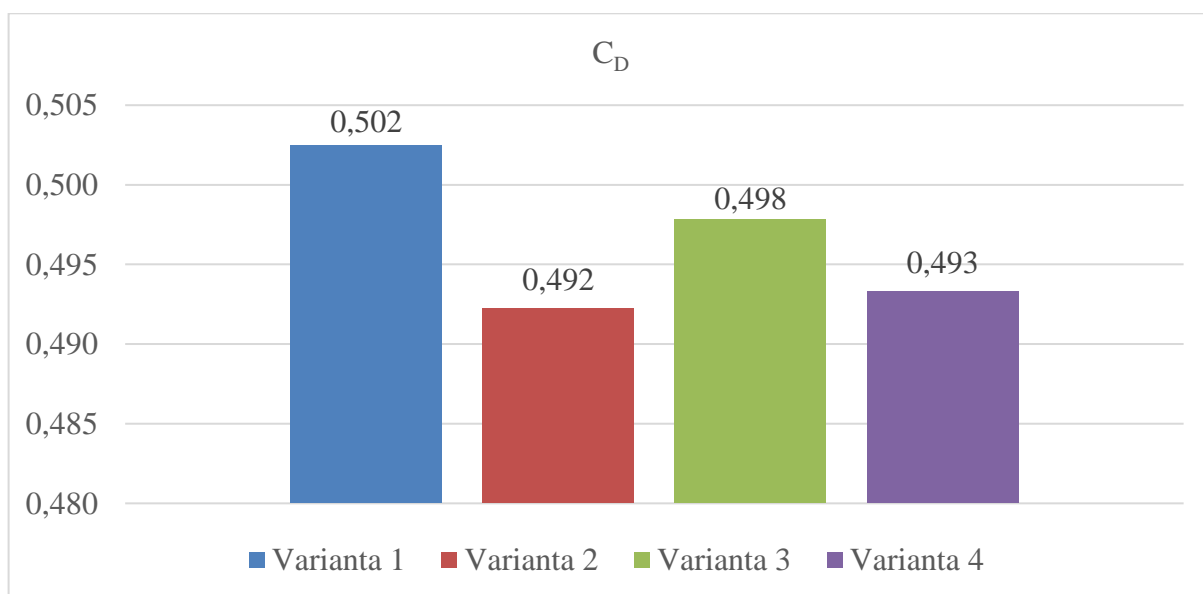
## 5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Po výpočtu 4 variant byly kontrolované hodnoty převedeny do programu Excel. Hodnoty veličin byly zprůměrovány z posledních 500 iterací, kdy jejich kolísání již bylo ustálené (viz. graf 1).

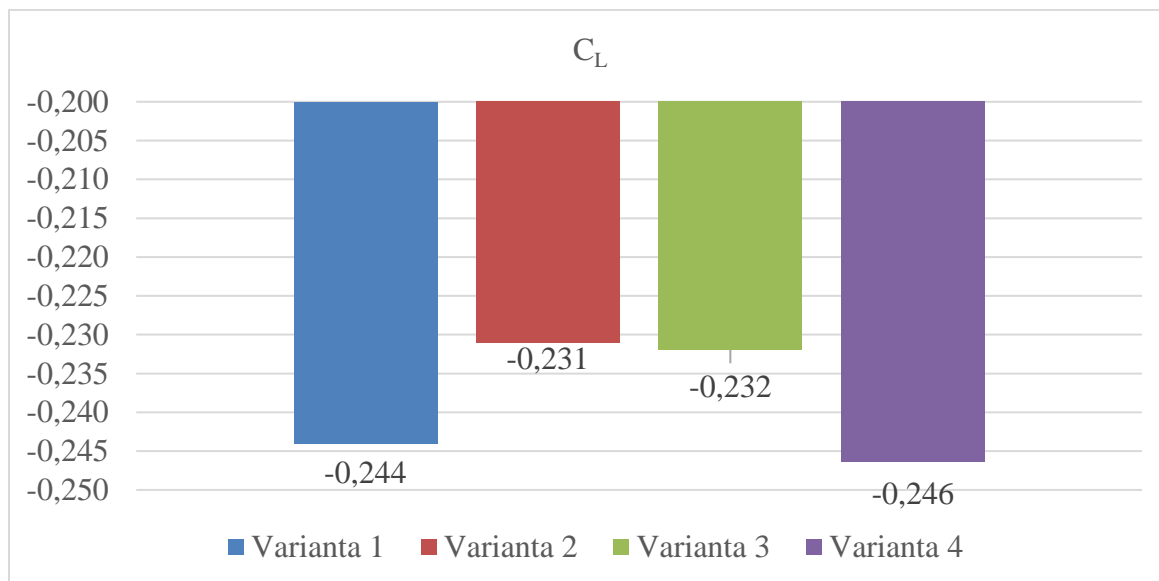


Graf 1 Hodnota  $C_D$  v průběhu iterací výpočtu

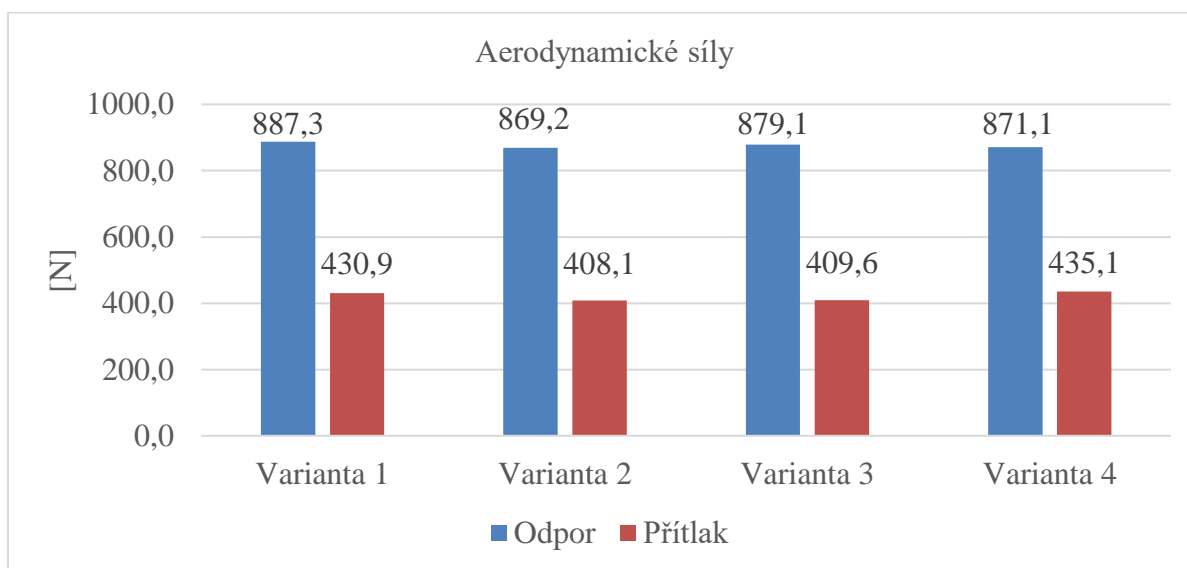
Na následujícím grafech jsou porovnány hodnoty vypočítaných aerodynamických koeficientů.



Graf 2 Porovnání hodnoty  $C_D$

Graf 3 Porovnání hodnot  $C_L$ 

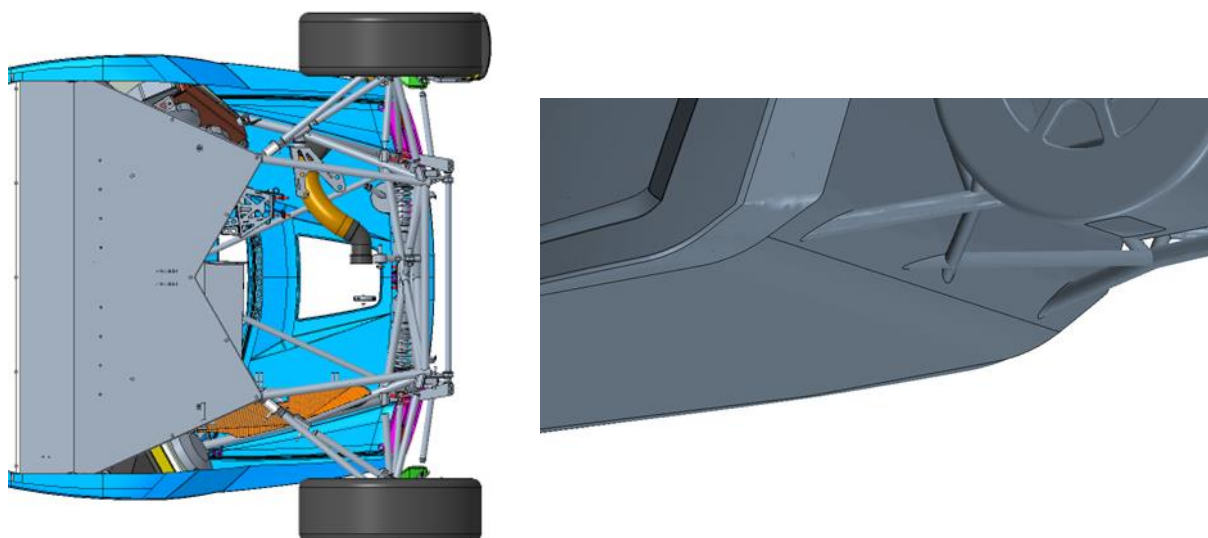
Na grafu 4 je vidět porovnání změn odporové a přítláčné síly jednotlivých variant. Tyto hodnoty jsou spočítány pomocí měřených aerodynamických koeficientů.



Graf 4 Porovnání aerodynamických sil

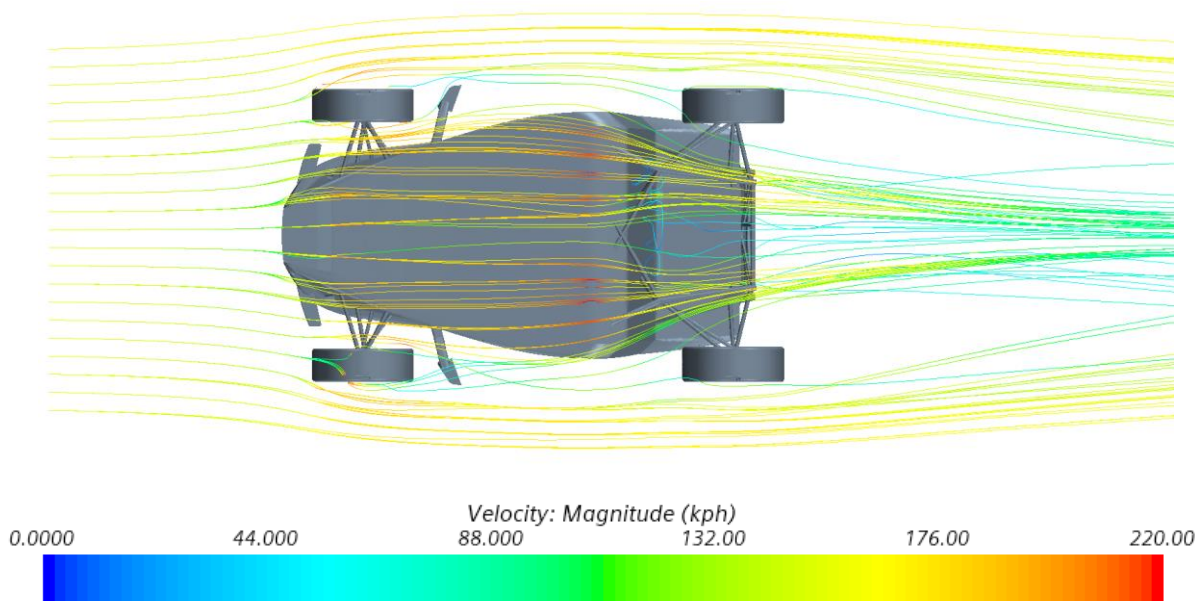
Velikost přítláčné síly vzhledem ke kategorii vozu odpovídá konkurenčnímu vozu KTM X-Bow, který má podle [13] přítláčnou sílu s aerodynamickým paketem přes 400 kilo. Hodnota, která byla spočítána se proti skutečnosti se bude lišit, a to z důvodu zjednodušení tvaru v zadní části vozu. Díky zjednodušení (viz. obrázek 39) vznikl difuzorový efekt, který v takovém měřítku ve skutečnosti nevzniká. Jeho dopad na proudění lze vidět na obrázku 40.





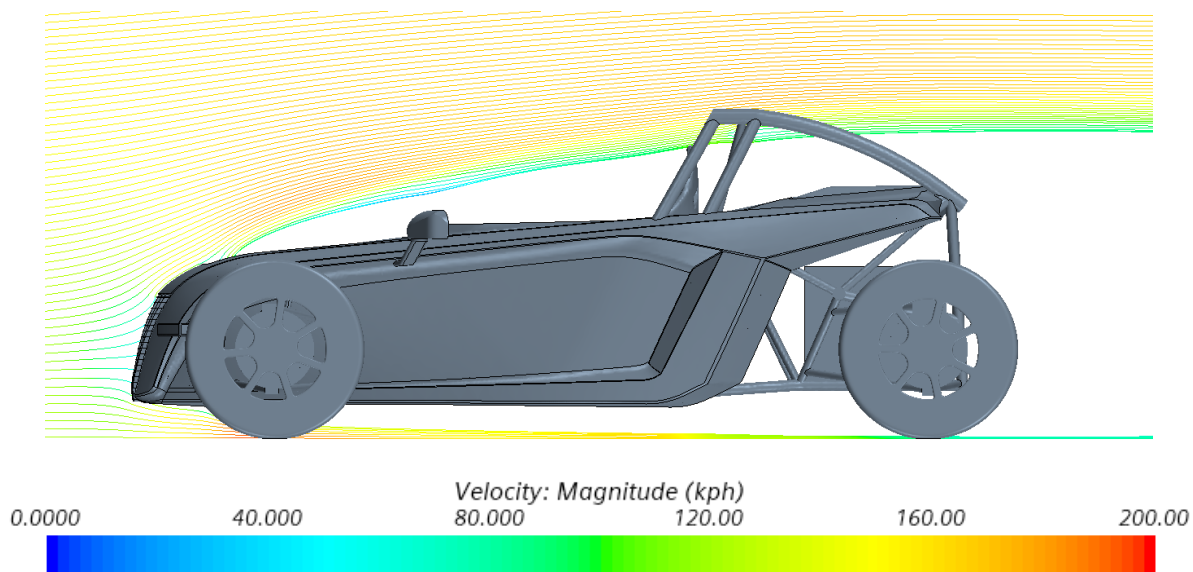
Obr. 39 Rozdíl skutečného modelu a zjednodušeného modelu

Proudění je před koncem podlahy urychleno na jednu z nejvyšších zaznamenaných rychlostí kolem vozu. Na druhou stranu na velikost přitlačné síly má i velikost plochy a jednoduchost tvaru podlahy. Dalším faktorem na ji vhodně zvolená světlá výška vozu.



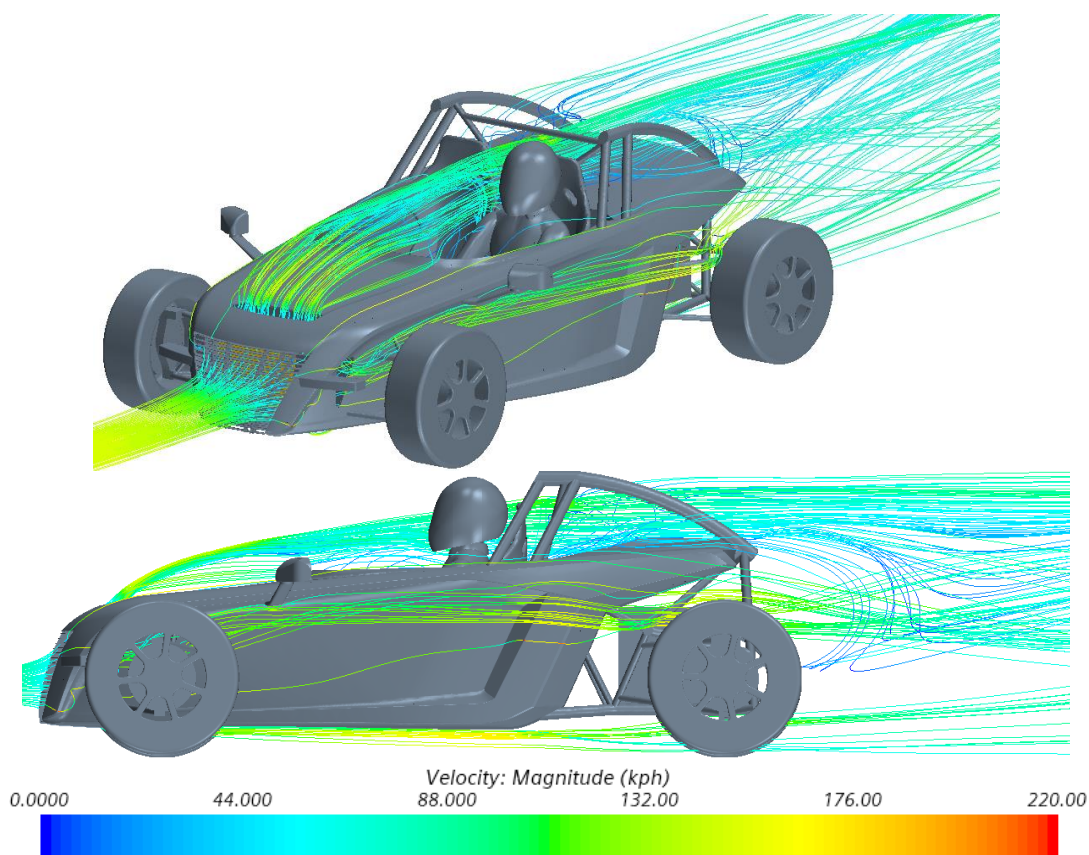
Obr. 40 Zobrazení rychlosti proudění pod vozidlem

Z obrázku 41 a 42 je vyplývá, že na proudění kolem vozu má zásadní vliv proudění, které vychází z výdechu na kapotě. Proudění skrz výdech je usměřováno těsnícím plechem za chladičem a po průchodu skrz kapotu je strháváno okolním proudem vzduchu.



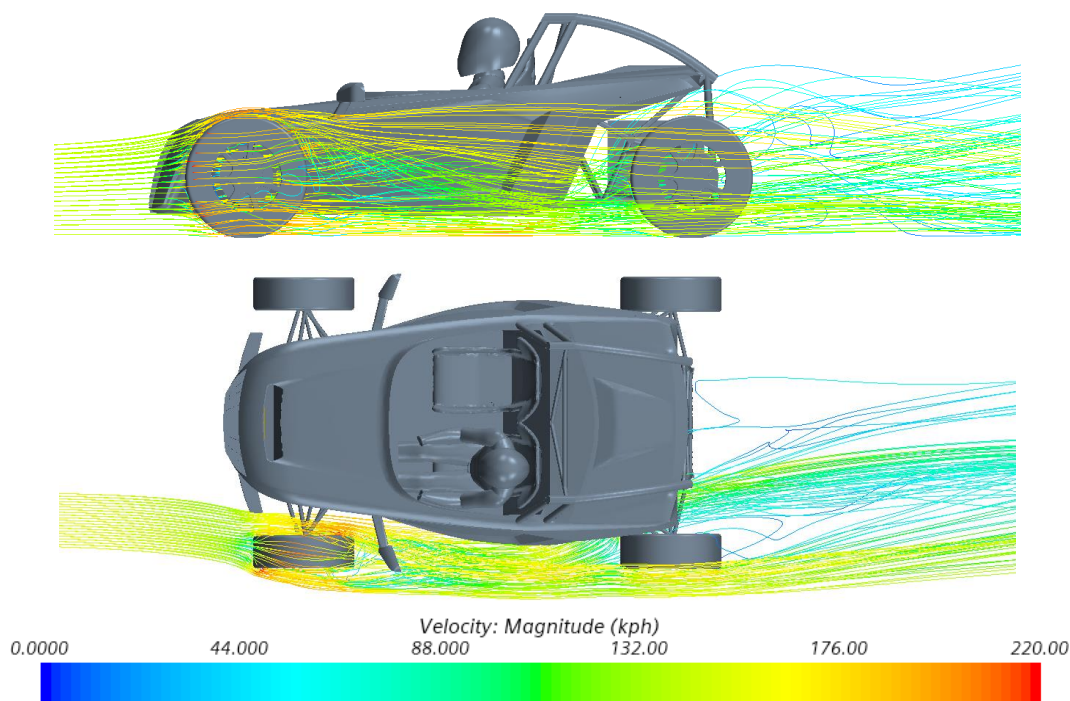
Obr. 41 Proudění středem vozidla

Z obrázku 42 je taky patrné, že výdechy na straně karoserie splňují svoji funkci. Avšak pořád hlavní proud teče přes středový výdech. Proudění kolem vozu je celkově přilnuté a víření vzniká za koly a za vozem, viz. obrázek 43. Skrz vnitřní prostor kola dochází k minimálnímu průtoku a vzduch převážně obtéká kola kolem vnějšku.



Obr. 42 Zobrazení rychlosti proudění skrz chladič

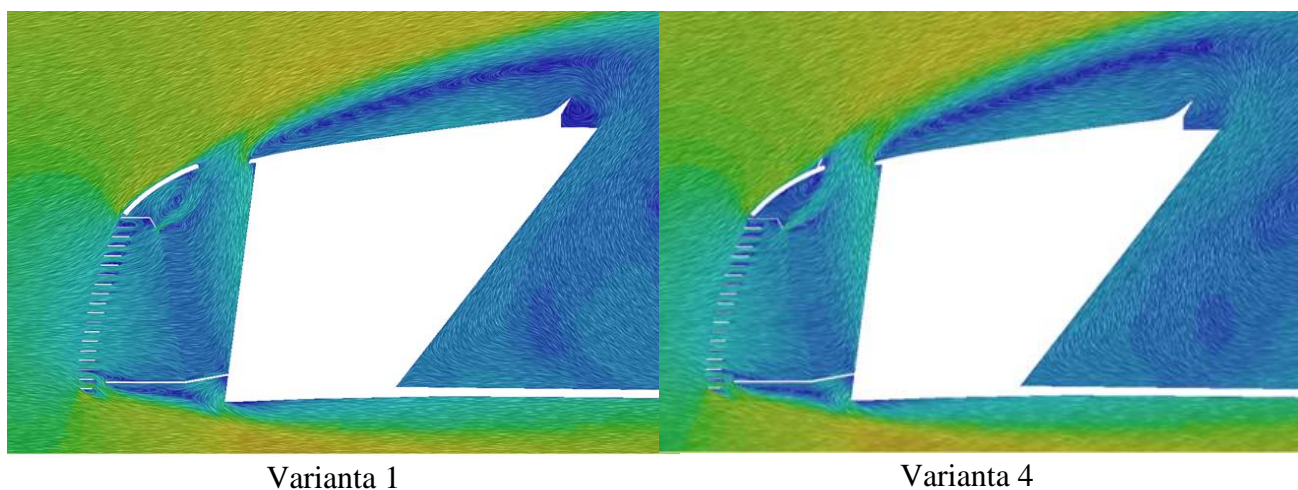


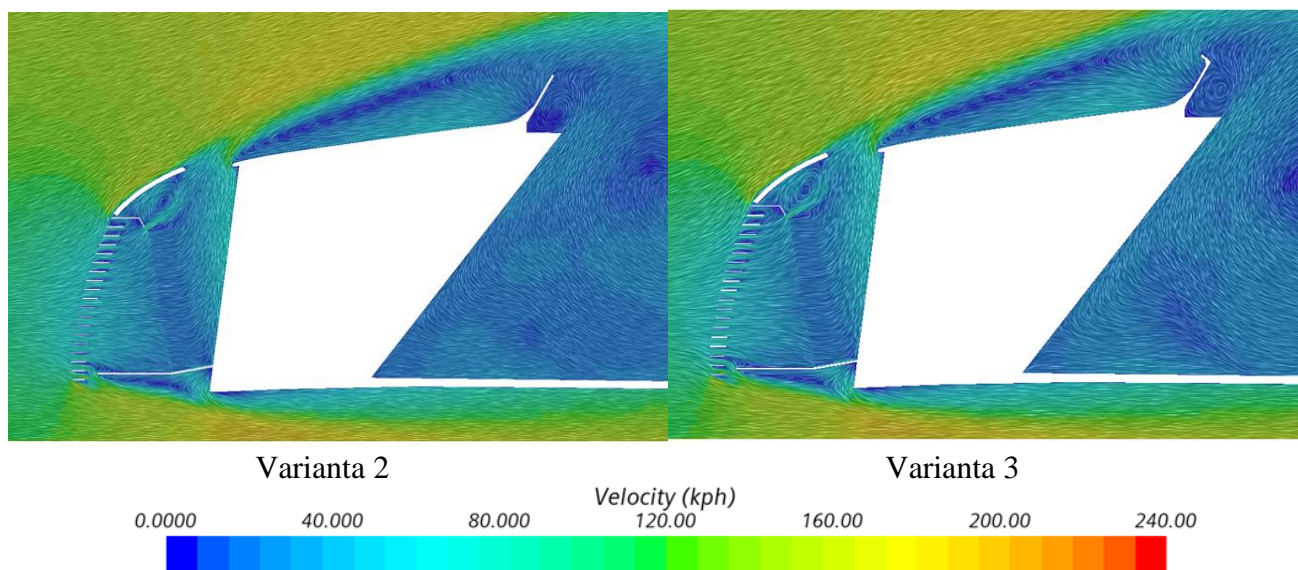


Obr. 43 Zobrazení proudění kolem kol

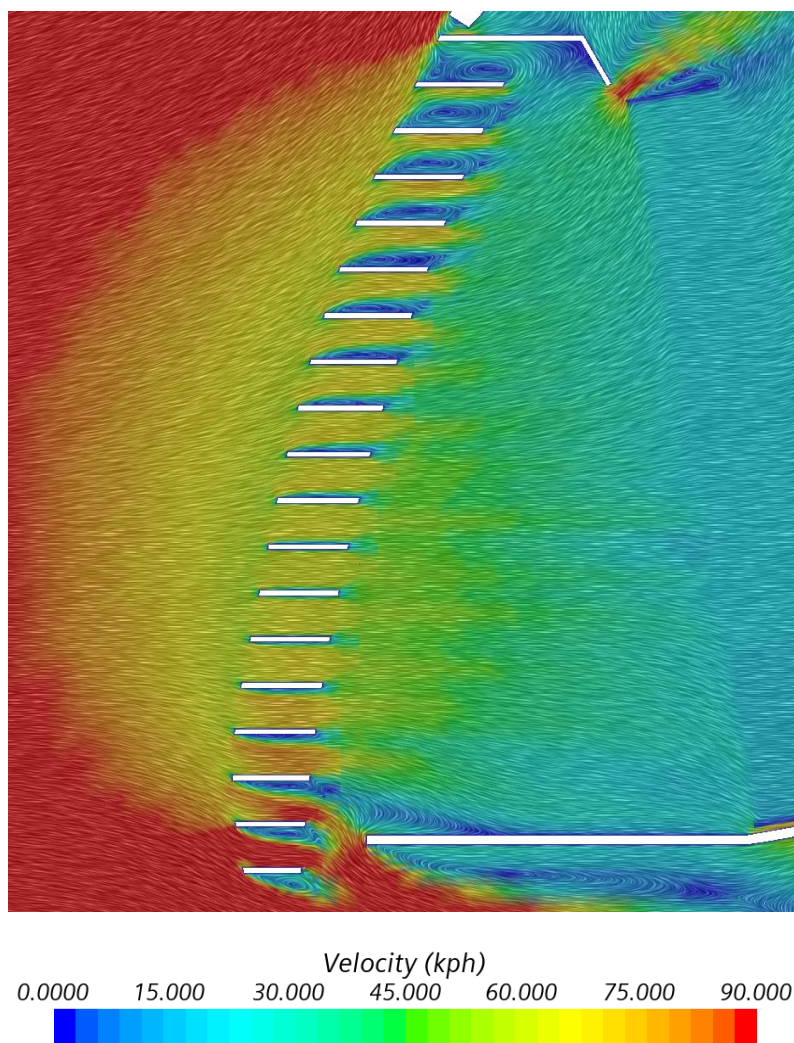
Na obrázku 44 je vykresleno jakým způsobem je proudění z chladiče ohnuto zpět do směru volného proudění v rovině symetrie vozu. u všech variant za výdechem vniká oblast s mírným poklesem tlaku, protože je tato oblast kryta proudem z výdechu a vznikají zde pomalá vířivá proudění. u variant 2 a 3, jde vidět, že účinnost přidaného štítu je omezena právě kvůli této vířivé oblasti, která sahá nad úroveň horních hran. Přidáním náběžné hrany před výdech (varianta 4) dochází k mírnému zvednutí proudění nad kapotou. Avšak toto zvednutí nemá dostatečný vliv na výsledné pozitivní účinky na helmu. Navíc způsobuje snížení rychlosti proudění skrz střed vozu což vede ke vzniku boční síly působící na helmu.

Proudění skrz mřížku není ovlivněno změnou tvaru štítu. Na detailu mřížky varianty 1 (obrázek 45) lze vidět, že prostupnost přes 4 horní žebra mřížky je značně zmenšena oproti zbytku. Je to způsobeno jejich vyšší polohou vůči chladiči a také přilnutím rychlého proudění na vnější obrys přední části vozu. Kvůli směřování směrem dolů má vzduch tendenci se vracet zpět ven přes horní otvor.





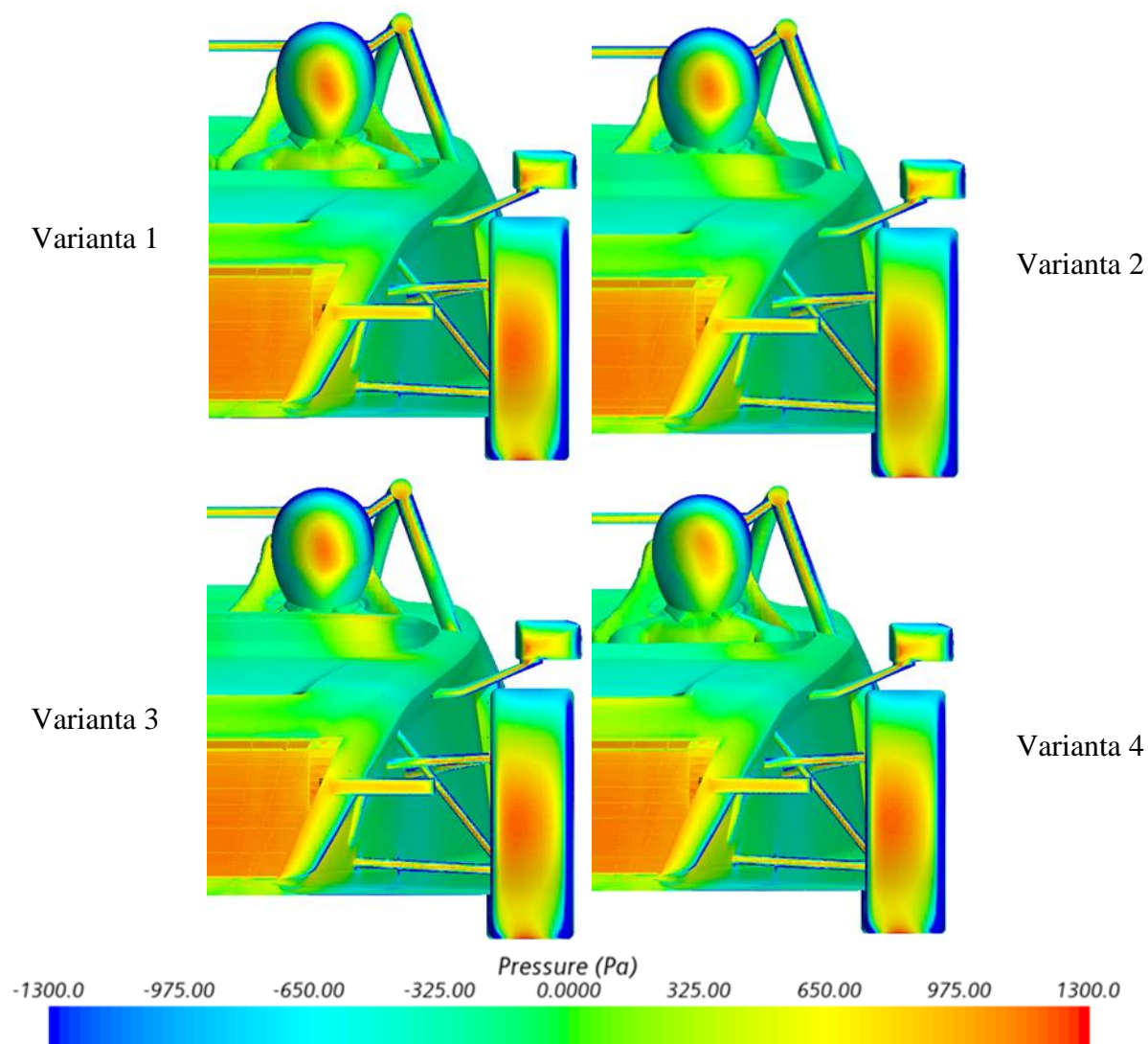
Obr. 44 Vektorové pole rychlosti kolem přední části vozu v rovině symetrie vozu



Obr. 45 Vektorové pole rychlosti mřížky varianty 1



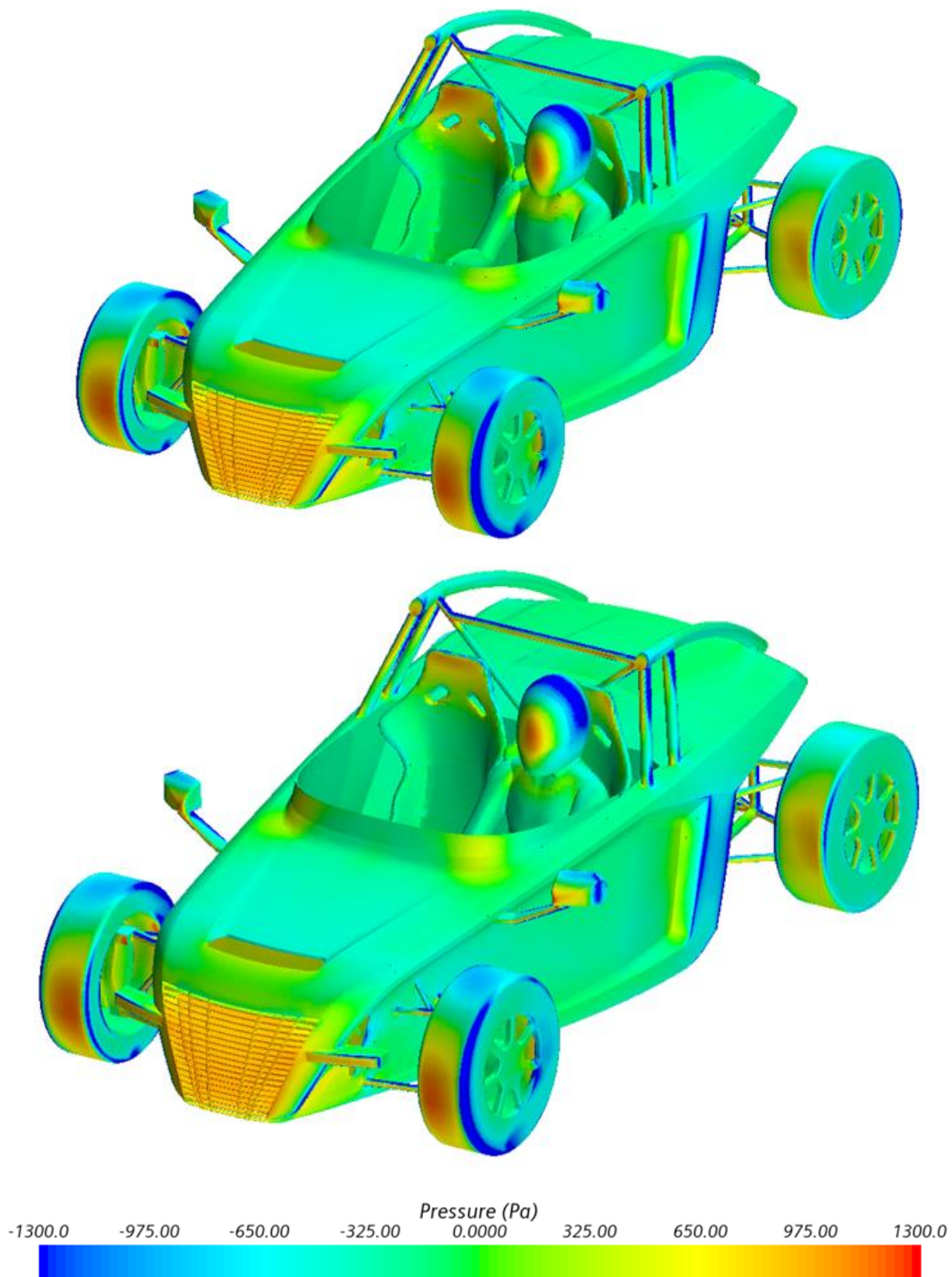
## 5.1 ROZLOŽENÍ TLAKU KOLEM VOZIDLA



Obr. 46 Rozložení tlaku z čelního pohledu

Z čelního pohledu rozložení tlaku, který je obrázku 46 je patrné, že nejvyšší hodnoty tlaku jsou na odkrytých kolech, výměníku, zrcátkách a přilbě řidiče. Na předních kolech je hodnota tlaku zvýšena až o 1240 Pa. Hodnota tlaku na předním výměníku klesá od středu ke krajům.

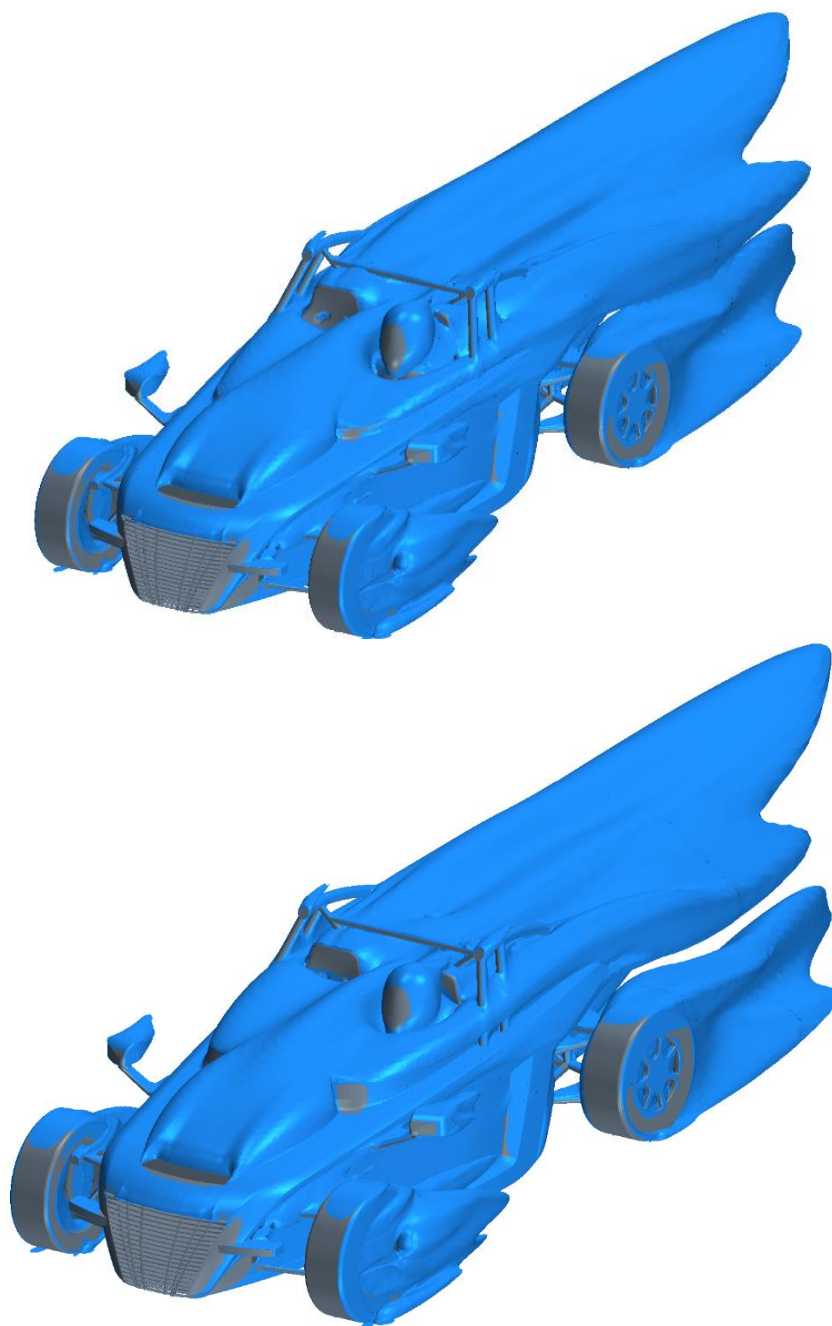
Na obrázku 47 je zobrazeno rozložení tlaku u varianty 1 a 2. Lze si všimnout, že podtlak vniká především v místech ostrých hran, které jsou kolmé na směr volného proudu. Jsou to například hrany na pneumatikách, u otvorů pro nasávání do intercoolerů, na trubkách rámu a zavěšení. Další místa mírného podtlaku jsou rovné plochy karoserie.



Obr. 47 Porovnání rozložení tlaku varianty 1 (nahore) a 2 (dole)

Funkcí *Isosurface* byly vytvořeny isoplochy celkového tlaku, které ukazují oblasti snížení o 200 Pa. Celkový tlak je součtem statického a dynamického tlaku. Díky tomuto zobrazení tak jde vidět, za kterými částmi vozu dochází ke zpomalení proudění oproti volnému proudění. Z tvaru vozu šlo předpokládat, že tato místa budou za koly a za zadní částí, což se i potvrdilo. Další výrazná oblast vznikla za výdechem kapoty a kolem řidiče, kde se vzduch téměř zastavuje.

Při srovnání varianty 1 a varianty 2, které je na následujícím obrázku, si lze všimnout, že tlaková oblast okolo řidiče u varianty 2 je zvýšená o přidání ochranný štít. To se projeví i na rozložení tlaku na řidiči (viz. obrázek 50). Zároveň je zvýšená i středem vozu, což se projeví na velikosti síly na helmě v ose Y.

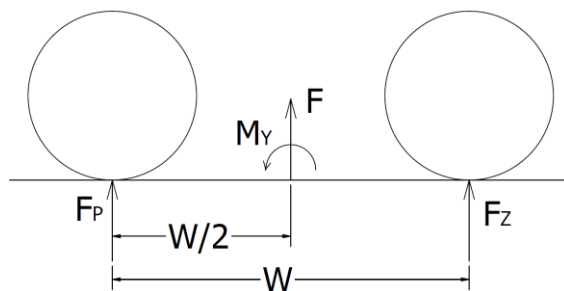


Obr. 48 Zobrazení isoploch zvýšení celkového tlaku o 200 Pa, varianta 1 nahoře, varianta 2 dole

## 5.2 DOPAD AERODYNAMIKY NA ROZLOŽENÍ ZATÍŽENÍ NÁPRAV

Na celkové rozložení na nápravách má vliv především rozmístění hmotnosti vozu. Vzhledem k umístění motoru před zadní nápravou je pravděpodobné, že zadní náprava bude zatížena více. Další složkou tohoto zatížení je vytvářena od aerodynamických sil. Určení momentu klopení je vztaženo ke střed rozvoru náprav.

Díky tomuto umístění souřadného systému se může provést rozbor silové rovnováhy (viz obrázek Obr. 49). v tomto případě známe velikost celkové vztlakové síly  $F$  na vozidlo a moment klopení  $M_Y$ . Neznámé jsou síly od jednotlivých náprav  $F_p$  a  $F_z$ .



Obr. 49 Silový rozbor

Jedna rovnice je tvořena silovou a druhá momentovou rovnováhou:

$$F_p + F_z = F \quad (5.6)$$

$$\frac{W}{2} \cdot (F_z - F_p) = M_Y \quad (5.7)$$

Z této soustavy dvou rovnic o dvou neznámých se odvozením získají rovnice pro jednotlivé síly:

$$F_p = \frac{F}{2} - \frac{M_Y}{W} \quad (5.8)$$

$$F_z = \frac{F}{2} + \frac{M_Y}{W} \quad (5.9)$$

Hodnoty sil a klopného momentu pro jednotlivé varianty jsou uvedeny v následující tabulce:

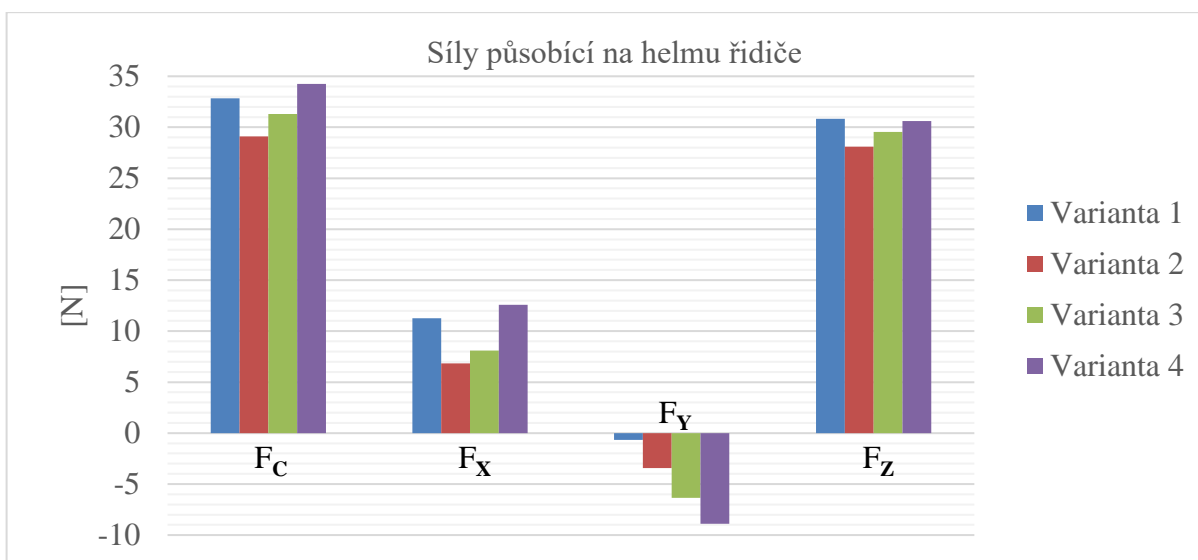
Tabulka 4 Vypočítané hodnoty klopného momentu a sil na nápravách

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
$M_Y$ [Nm]	-95,5	-99,3	-110,0	-83,8
$F_z$ [N]	-256,9	-247,2	-252,7	-254,0
$F_p$ [N]	-173,9	-160,9	-156,9	-181,1

Z výsledku vyplývá, že aerodynamika vozu má vliv na jiné rozložení na nápravách. Na zadní nápravě působí přítláčná síla přibližně o polovinu větší síla než na přední. To vzhledem k náhonu na zadní kola vede k lepšímu přenosu hnacího momentu na vozovku. i přes menší hodnotu přítlaku na přední nápravy, nedochází k nadlehčování a je tak zajištěna manévrovatelnost.

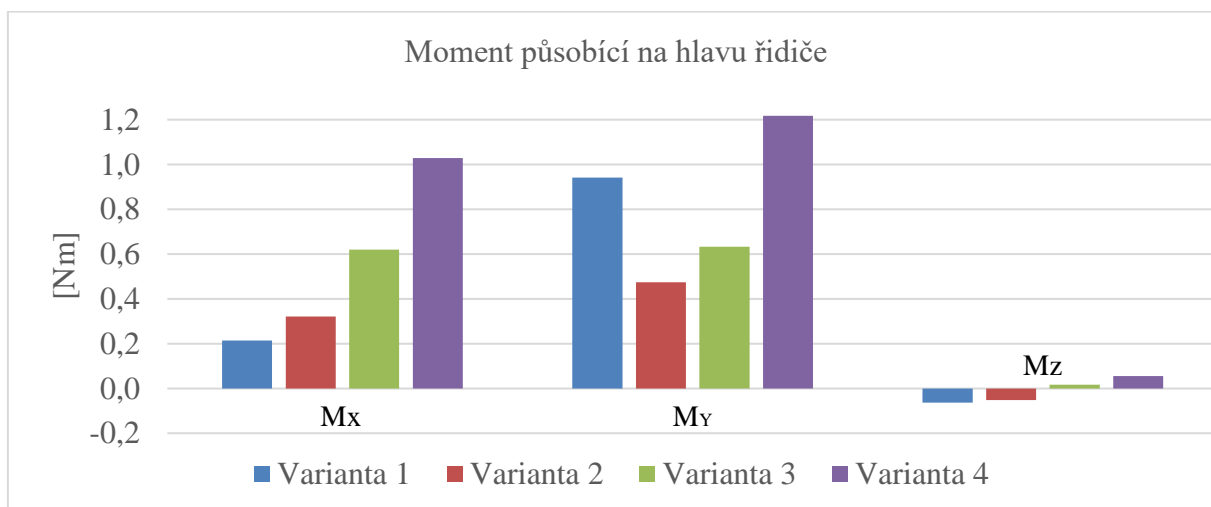
### 5.3 POROVNÁNÍ PROUDĚNÍ KOLEM ŘIDIČE

Na grafu 5 jsou zobrazeny změny sil, které působí na helmu řidiče. Celková síla se výrazněji snížila pouze u varianty 2. Největší složkou celkové síly je v ose Z. Kvůli rychlému proudění v horní části helmy, které je vyobrazeno na obrázku 53, dochází k podtlaku na této části helmy, a tak ke vzniku této síly. v dalších osách jsou složky síly výrazně menší. v ose X dochází ke vzniku síly skrz přední nápor vzduchu. v ose Y se v případě přidání štítu nebo hrany zpomalí proudění uprostřed vozu a dojde tak k nerovnováze rychlosti proudění kolem stran helmy. u varianty 4 to vede k největšímu přírůstku síly směrem ven z vozu. Hodnoty celkové síly se pohybují v rozpětí 29-35 N, rozdíl mezi nejmenší a největší hodnotou je přibližně 15 %.



Graf 5 Síly působící na helmu řidiče

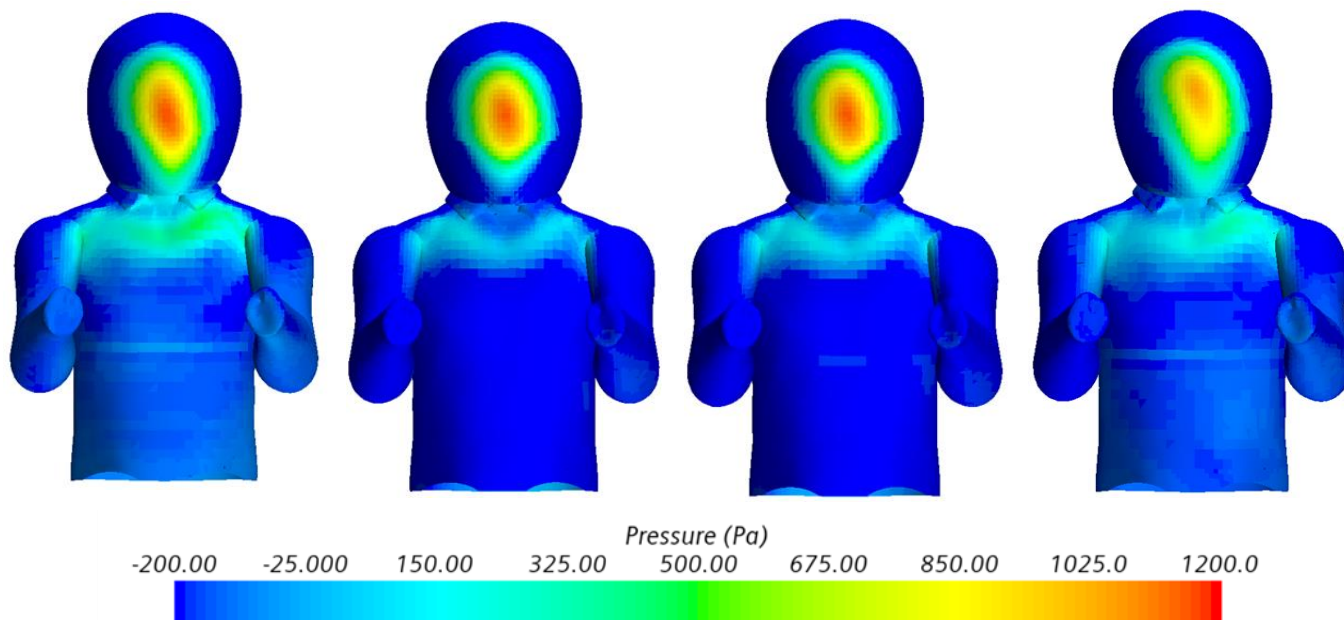
Další sledovaný vliv, který by mohl snižovat dlouhodobým účinkem komfort řidiče jsou momenty. Ty jsou vytvářeny prouděním kolem hlavy řidiče. Jejich hodnoty v jednotlivých jsou porovnané v grafu 6.



Graf 6 Momenty působící na hlavu řidiče

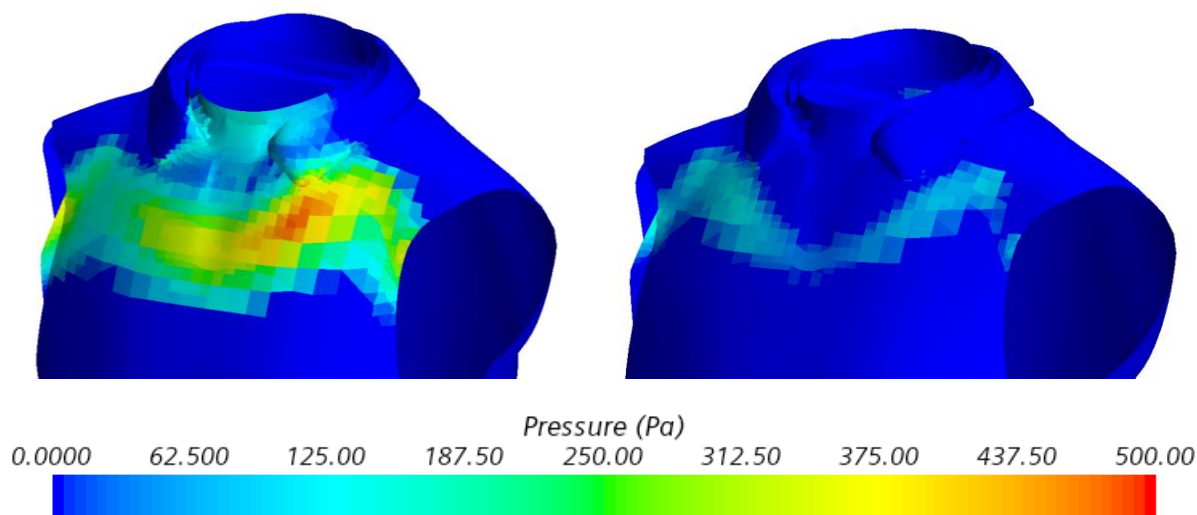


Tyto silové a momentové účinky jsou vyvolány tlakovým rozložením na řidiči. Toto tlakové pole je zobrazeno na následujícím obrázku. Hodnota tlaku v přední části přilby je u varianty 1,2,3 až o 1150 Pa vyšší než atmosférický tlak a u varianty 4 je to až o 1050 Pa. Toto snížení nejvyšší hodnoty u varianty 4 je doprovázeno s mírným vychýlením směrem ven z vozu. I přes tento pokles tlaku není velikost výsledné síly menší oproti variantě 1. Hlavní pozitivní dopad přidání štítů je pokles tlaku na hrudi řidiče.



Obr. 50 Zobrazení tlaku na řidiči (pořadí variant od 1 z leva)

Následující obrázek zobrazuje detailní rozdíl v tlaku na ramenu. u varianty 1 je hodnota přetlaku na těchto partiích až 500 Pa, zatímco u varianty se štítem je to necelých 180 Pa. Jde vidět, že tento tlak je eliminován pomocí štítu, na kterém se tlak zvýšil v místě jeho zakřivení.

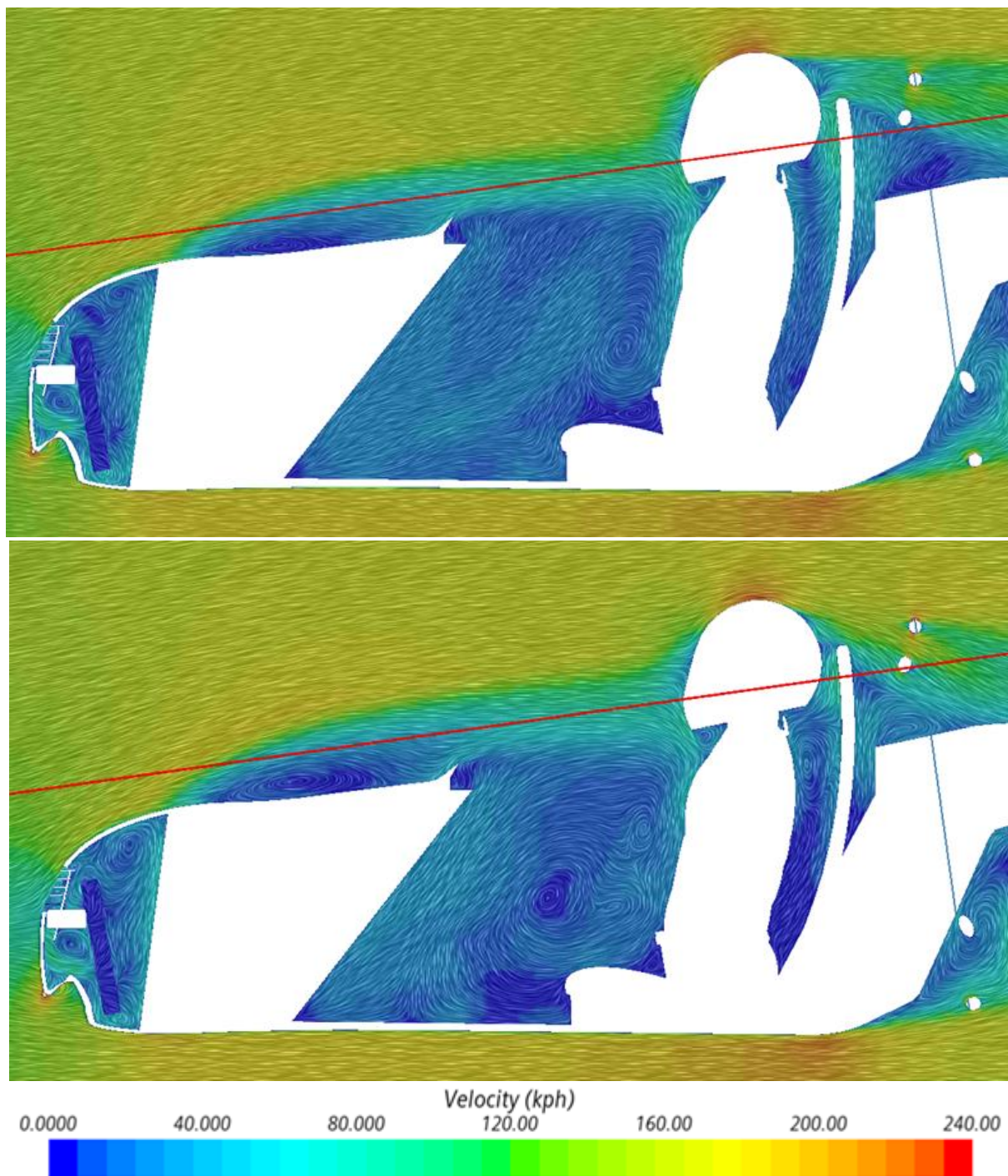


Obr. 51 Rozložení tlaku na hrudi řidiče

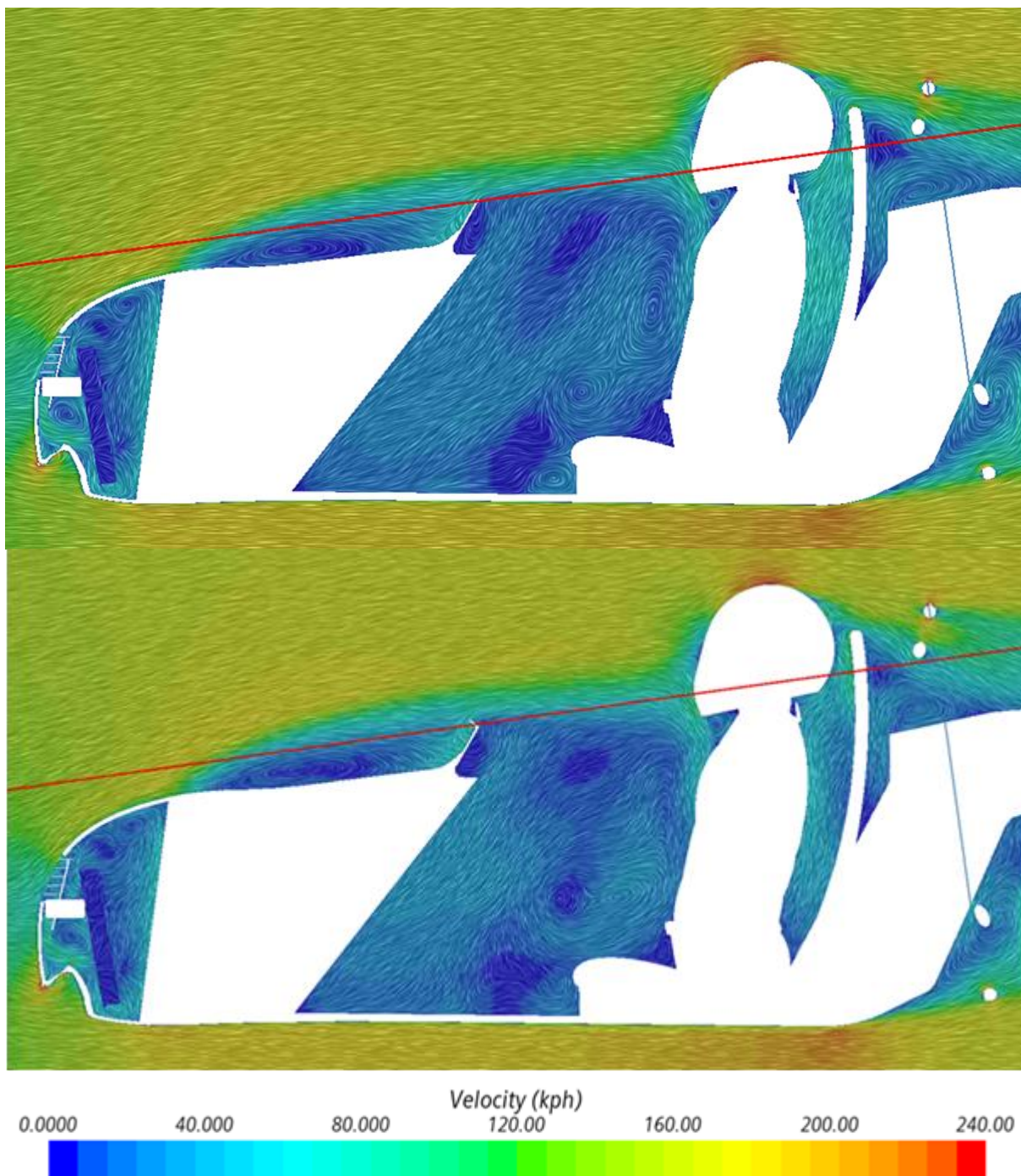
Proudění v rovině symetrie helmy je zobrazeno na obrázku 52 a 53. Pro porovnání variant byla využita přímka rovnoběžná s kapotou, která je v úrovni horní hrany štítu varianty 2.



ve variantě 1 teče ohnutý proud vzduchu téměř ve stejné výšce nad pomyslně prodlouženou kapotou až k helmě. Dochází tak k náporu vzduchu i na ramena a což se projeví zvýšením tlaku na těchto partiích řidiče. Přidání štítu varianty 2 dojde k nadzvednutí proudění nad úroveň ramen a dojde i ke snížení tlaku ve spodní části helmy (viz. obrázek 50). u varianty 3 dochází oproti variantě 1 k menšímu zlepšení než u varianty 2. u tohoto tvaru štítu nedochází ke vzniku zpětného proudění, které by pomohlo nadzvednout proud vzduchu nad řidiče.



Obr. 52 Vektorové pole rychlosti v rovině symetrie helmy varianta 1 (nahore), varianta 4 (dole)

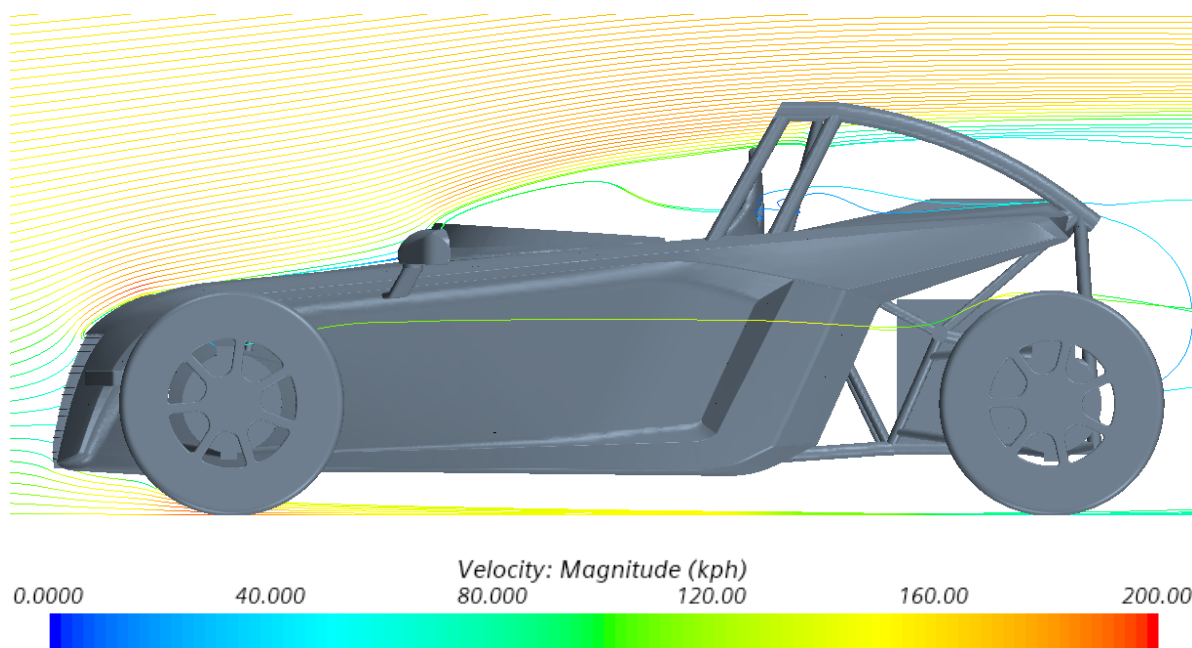


Obr. 53 Vektorové pole rychlosti v rovině symetrie helmy varianta 2 (nahore), varianta 3 (dole)

## 5.4 VÝPOČET VARIANTY S UZAVŘENÝM VÝDECHEM KAPOTY

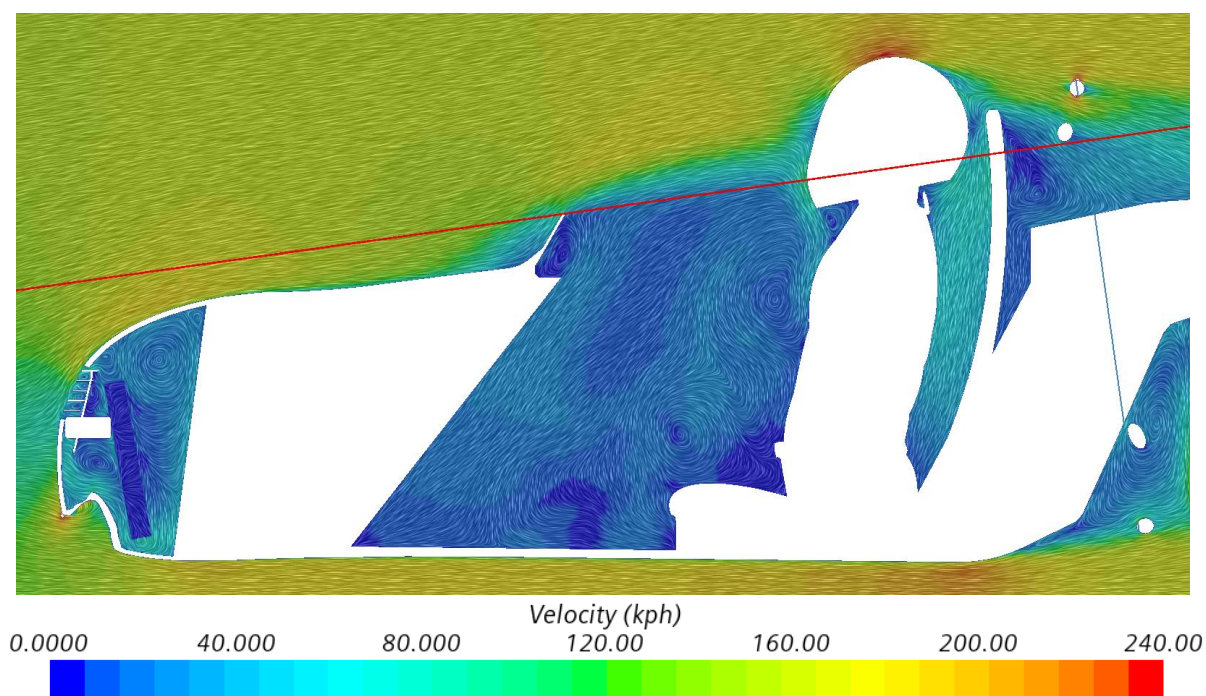
Na základě předešlých výpočtů, které ukazovaly dopad proudění skrz výdech byla spočítána varianta, která toto proudění eliminuje. Jedná se o variantu vozu 2, ve které se zaslepil výdech na kapotě. Tímto zaslepením došlo k přilnutí proudění ke kapotě a k odtržení dochází až na štítě viz. obrázek 54. Tato změna se projevila jednak na koeficientu aerodynamického odporu a vztlaku, hmotnostním průtokem skrz výměník, ale změnilo se i rozložení tlaku na řidiči. Hodnoty této geometrie budou porovnávány s variantou 2 a základní porovnání hodnot je v tabulce 5.





Obr. 54 Zobrazení rychlosti proudění středem vozidla

Na obrázku 55, kde je zobrazeno proudění kolem řidiče, jde vidět, že proud vzduchu je nadzvednut štítem výš než u varianty s otevřeným výdechem. Díky tomu se negativní vlivy působící na řidiče omezily. Na výsledcích uvedených v následující tabulce je vidět, že proudění nad kapotou má velký vliv i na přítlakovou sílu. Je to způsobeno urychlením proudění, které následně snižuje tlak nad vozem.



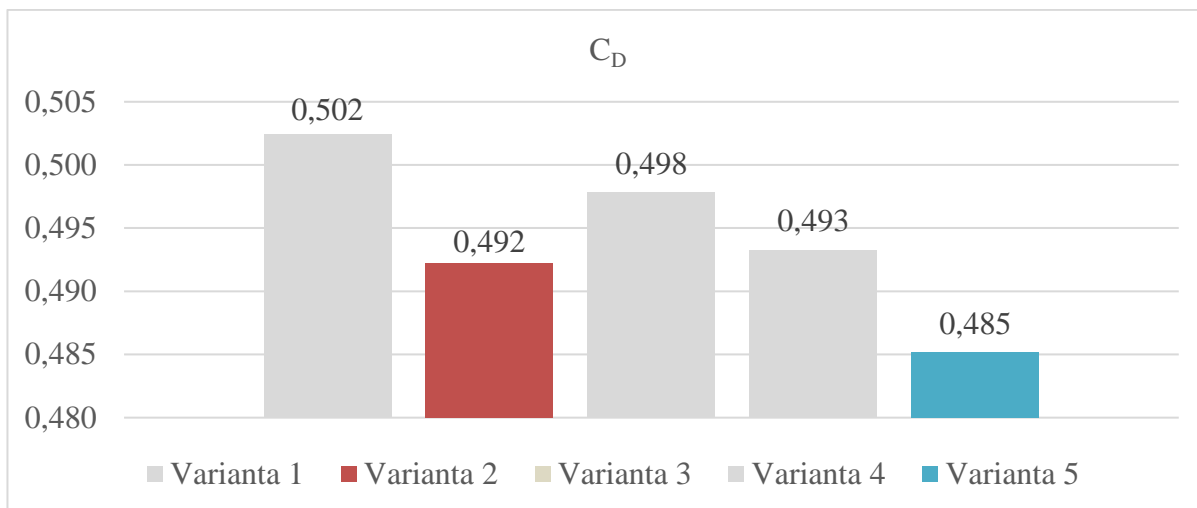
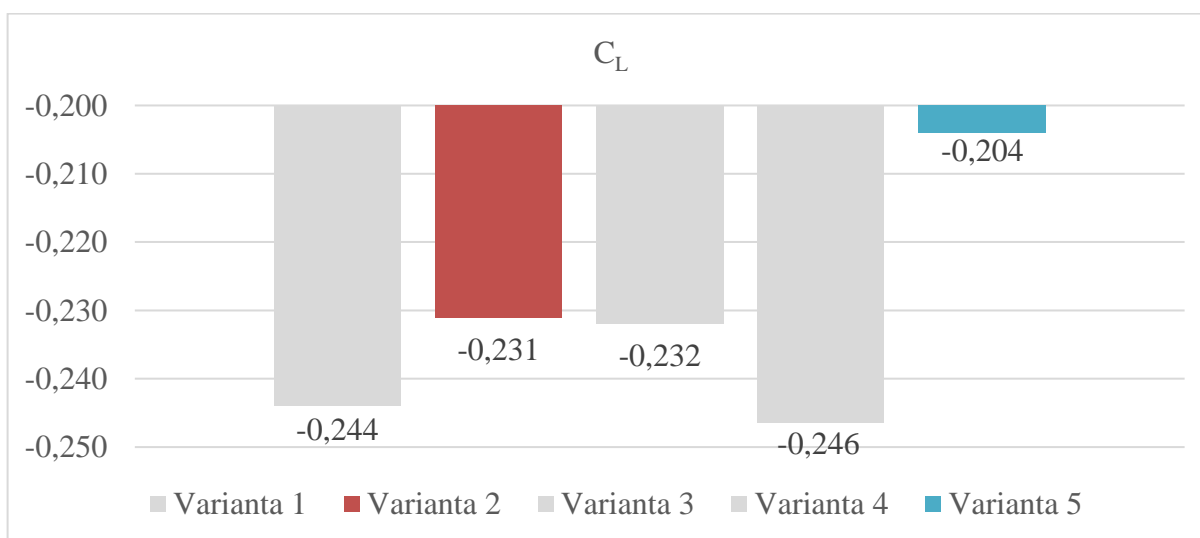
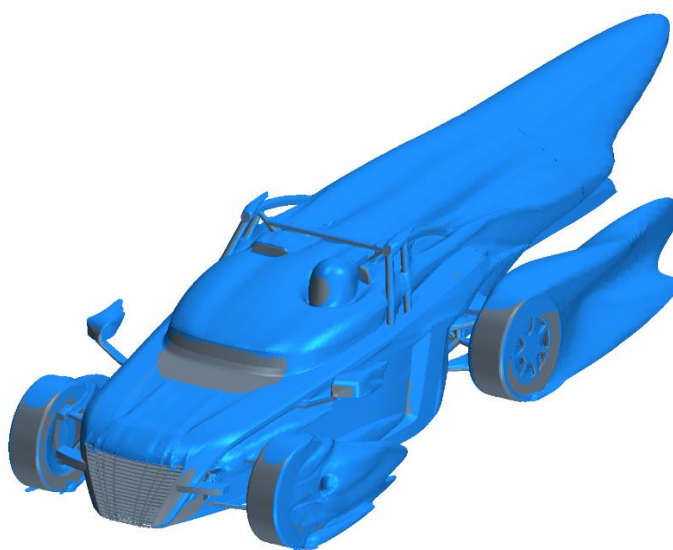
Obr. 55 Vektorové pole rychlosti v rovině symetrie helmy

Tabulka 5 Porovnání vypočítaných hodnot varianty 2 a 5

	Varianta 2	Varianta 5
Odporová síla $F_X$ [N]	869,2	856,7
Přítlačná síla $F_Y$ [N]	408,1	360,2
Celková síla na helmě $F_C$ [N]	29,1	29,7
Síla na helmě v ose x $F_X$ [N]	6,9	3,4
Síla na helmě v ose y $F_Y$ [N]	-3,4	-1,5
Síla na helmě v ose z $F_Z$ [N]	28,1	29,5
Moment na helmě v ose y $M_Y$ [Nm]	0,9	0,4
Hmotnostní průtok skrz chladič $m'$ [kg·s <sup>-1</sup> ]	1,105	0,708
Klopný moment $M_Y$ [Nm]	-99,3	-64,3
Vztlaková síla na zadní nápravě $F_Z$ [N]	-247,2	-208,1
Vztlaková síla na přední nápravě $F_P$ [N]	-160,9	-152,2
Tlak na ramenu řidiče $p_R$ [Pa]	180	0

Snížení přítlačné síly je přibližně o 12 %. S tímto rozložením tlaku v přední části vozu je spojen i klopný moment. Ten se snížil přibližně o 35 %. Koeficient aerodynamického odporu se snížil přibližně o 3 %. Celková síla, která působí na helmu řidiče se změnila pouze nepatrně, avšak složka v ose X se zmenšila o polovinu. Výrazné snížení nastalo i v momentu, který působí na helmu v ose y. Další pozitivní změnou je úplná eliminace tlaku na ramenu řidiče. Hlavní negativní dopad této úpravy je snížení hmotnostního průtoku vzduchu skrz chladič. Tato hodnota se u předešlých variant pohybovala okolo 1,1 kg·s<sup>-1</sup> a u této varianty došlo k poklesu o 36 %. To může vést k nedostatečnému výkonu chlazení motoru. Porovnání hodnot aerodynamických koeficientů i s ostatními variantami je následujících grafech 7 a 8.

V zobrazení isoploch celkového tlaku (obrázek 56) je kromě eliminace tlakové oblasti za výdechem i viditelná příčina poklesu síly působící na helmu v ose x. Výška tlakové oblasti kolem řidiče je ve srovnání s variantou 2 vyšší a díky tomu je řidič více kryt proti náporu vzduchu. Toto zvýšení tlakové oblasti se projevuje i na poklesu momentu působící na helmu řidiče.

Graf 7 Porovnání hodnoty  $C_D$  všech variantGraf 8 Porovnání hodnoty  $C_L$  všech variant

Obr. 56 Zobrazení isoploch zmenšení celkového tlaku o 200 Pa, varianta 5

## ZÁVĚR

V této diplomové práci byly zkoumány aerodynamické vlastnosti sportovního vozu Sigma WR. Cílem práce bylo sestavení a realizace CFD modelu vozidla a následné zkoumání proudění kolem řidiče. Pro potřeby výpočtu byly, na částech vozu, které nesouvisely přímo s cílem práce, provedeny zjednodušující úpravy. Tyto změny tvaru vozu mohou způsobit rozdíly vůči skutečnému proudění kolem vozu. Byly provedeny výpočty pěti různých variant vozidla, tak aby mohly být analyzovány síly a momenty, které vznikají na helmě řidiče při vysokých rychlostech. Zároveň výsledky simulací slouží k popisu proudění kolem vozu.

Výsledky ukazují, že na proudění kolem vozu má zásadní vliv proudění, které vychází z výdechu na kapotě, které je usměřováno vzhůru těsnícím plechem za chladičem a po průchodu skrz kapotu je strháváno okolním proudem vzduchu. Varianty s přidáním ochranného štítu nebo nově navrhnutého štítu vedou ke snížení celkové síly působící na helmu řidiče. Hlavní složkou celkové síly je v ose Z, kde dochází k podtlaku na horní části helmy kvůli rychlému proudění. v ose X dochází ke vzniku síly skrz přední nápor vzduchu. v ose Y se v případě přidání štítu nebo náběžné hrany před výdechem zpomalí proudění uprostřed vozu a dojde tak k tlakové nerovnováze kolem stran helmy.

Celkové hodnoty přítláčné síly se pohybují v rozpětí 360-435 N, negativní pokles této síly je způsobený přidáním štítů nebo ucpáním výdechu kapoty. Je třeba poznamenat, že hodnota přítláčné síly spočítaná výpočetními metodami se bude lišit od skutečnosti, protože byl zjednodušen tvar zadní části podvozku, což vedlo k vzniku difuzorového efektu, který pravděpodobně v takovém měřítku ve skutečnosti neexistuje. Zvýšení přítláčné síly by mohlo zlepšit přidání splitteru a difuzoru.

Z výsledků simulací lze říci, že přidáním jednoduchého štítu z plexiskla má pozitivní vliv na řidičův komfort bez velkých aerodynamických změn. Mnou navrhnutý štít by oproti němu mohl zajistit lepší ochranu, ale pouze za předpokladu, že by se změnil odtok vzduchu z prostoru chladiče. Vývody by například mohly ústít na kraji kapoty v otvorech odpružení push-rod, protože při ucpání výdechu na kapotě se zhorší účinnost chlazení. Zde by se však musela zkontrolovat provozní teplota tlumičů skrz proudění teplého vzduchu z výměníku.

Ze závěru [14] vyplynulo, že s rostoucí světlou výškou se zvyšuje koeficient aerodynamického odporu, a tedy i odporová síla. Náklon karoserie také ovlivňuje čelní plochu, a tudíž i odpor vzduchu. Naopak koeficient aerodynamického vztlaku se snižuje s nakláněním světlé výšky, protože nakloněný tvar vytváří sací efekt pod vozidlem a tím se urychluje pod vozidlem proudění a snižuje se zde tlak. Pro maximální přítlak tvoření podlahou je nutné nalezení optimálního náklonu karoserie. u formule 1 rozdíl v světlé výšce v předu a vzadu může být až 50 mm. Proto by bylo vhodné provést i výpočty, které by se zabývaly tímto nastavením vozu.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road Vehicles. 4th edition. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998. 918 s. [cit. 2023-01-07] ISBN 0-7680-0029-7
- [2] KATZ, J. Race car aerodynamics: designing for speed. Bentley Publishers 2006, [cit. 2023-01-07]. ISBN 0-8376-0142-8.
- [3] NOVOTNÝ, Pavel. Multifyzikální simulace v automobilovém průmyslu. VUT FSI, 2023. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/512258/mod\\_resource/content/1/P05-Num\\_rešení\\_transp\\_rovnic\\_CFD\\_2022.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/512258/mod_resource/content/1/P05-Num_rešení_transp_rovnic_CFD_2022.pdf)
- [4] MCBEATH, Simon. Competition car aerodynamics. Sparkford: Haynes Publishing, 2006. [cit. 2023-04-16]. ISBN 1-84425-230-2.
- [5] Sports car lateral aerodynamics: Concepts for generating lateral aerodynamic forces by means of an asymmetric airflow. AirShaper [online]. 2021 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://airshaper.com/research/sports-car-lateral-aerodynamics>
- [6] HASSAN, Saud. Aerodynamics Simulation of vehicle Body by using CFD Technology, 2014. Teesside University. [cit. 2023-03-09]. Vedoucí práce Sajid Abdullah. DOI: 10.13140/2.1.1274.7844
- [7] HEISLER, Heinz. Advanced Vehicle Technology. Second Edition. 2002. 654 s. [cit. 2023-03-10]. ISBN 978-0-7506-5131-8.
- [8] VLČEK, Petr. Modelování turbulentního proudění [online]. České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky. [cit. 2023-03-15]. Vedoucí práce Doc. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D. Dostupné z: <http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>
- [9] EKMAN, Petter. Important Factors for Accurate Scale-Resolving Simulations of Automotive Aerodynamics. 2020. [cit. 2023-04-11]. ISBN 978-91-7929-863-0
- [10] SAYMA, Abdalnaser. Computational Fluid Dynamics. 2009. [cit. 2023-03-27]. ISBN 97-87-7681-430-4
- [11] KATZ, Joseph. Automotive aerodynamics. Chichester: Wiley, 2016. 611 s. [cit. 2023-03-30]. ISBN 978-1-119-18572-7.
- [12] STAR CCM+ USER GUIDE. VDOCUMENTS [online]. 2017 [cit. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://vdocuments.mx/star-ccm-user-guide.html>
- [13] KTM X-BOW R-RR – Brochure [online]. 2021. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.ktm.com/language-masters/en/folder/KTM%20X-BOW%20Folder%20R-RR%202021%20EN.pdf>
- [14] Daniel, Petr. Analýza vlivu polohy karoserie závodního vozu na aerodynamické charakteristiky [online]. Brno, 2012 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z:



[https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=52472](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52472).  
Díplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jan Vančura.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

A	[m <sup>2</sup> ]	Plocha průmětu vozidla
C <sub>D</sub>	[-]	Aerodynamický koeficient odporu
C <sub>L</sub>	[-]	Aerodynamický koeficient vztlaku
C <sub>Mx</sub>	[-]	Aerodynamický koeficient momentu klopení
C <sub>My</sub>	[-]	Aerodynamický koeficient momentu klonění
C <sub>Mz</sub>	[-]	Aerodynamický koeficient momentu stáčení
F <sub>D</sub>	[N]	Aerodynamický odporová síla
F <sub>L</sub>	[N]	Aerodynamický vztlaková síla
F <sub>Y</sub>	[N]	Aerodynamická bočná síla
F <sub>P</sub>	[N]	Přítlačná síla na přední nápravě
F <sub>Z</sub>	[N]	Přítlačná síla na zadní nápravě
k	[J]	Kinetická energie turbulentního proudění
m'	[kg·s <sup>-1</sup> ]	Hmotnostní tok
M <sub>x</sub>	[Nm]	Moment klopení
M <sub>y</sub>	[Nm]	Moment klonění
M <sub>z</sub>	[Nm]	Moment stáčení
p	[Pa]	Tlak
p <sub>ř</sub>	[Pa]	Tlak na ramenou řidiče
p <sub>d</sub>	[Pa]	Dynamický tlak
P <sub>i</sub>	[kg·m <sup>-4</sup> ]	Porézní odpor setrvačnosti
p <sub>s</sub>	[Pa]	Statický tlak
P <sub>v</sub>	[kg·m <sup>-3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Porézní odpor viskozity
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
T	[°C]	Teplota
v	[m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost proudění tekutiny
v <sub>∞</sub>	[m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost volného proudu
W	[m]	Rozvor kol
y <sup>+</sup>	[-]	Bezrozměrná vzdálenost od stěny
δ	[m]	Tloušťka mezní vrstvy
Δp	[Pa]	Tlaková ztráta
ε	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-3</sup> ]	Rychlost disipace turbulence
α	[°]	Úhel sklonu kapoty
γ	[°]	Úhel sklonu čelního skla

$\mu$	[Pa·s]	Dynamická viskozita
$\mu_T$	[Pa·s]	Vířivá viskozita
$\nu$	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Kinematická viskozita
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota tekutiny
$\tau$	[Pa]	Smykové napětí
$\omega$	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-3</sup> ]	Specifická disipace energie

CFD	Computational Fluid Dynamics
CAD	Computer – Aided Design
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
N-S	Navier – Stokes
SST	Shear Stress Transport
RANS	Reynolds – Averaged Navier – Stokes
RSM	Reynolds Stress Models
URANS	Unsteady Reynolds – Averaged Navier – Stokes