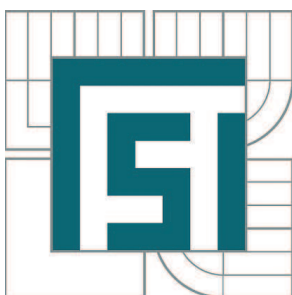


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

KAROSERIE SPORTOVNÍHO AUTOMOBILU

SPORT CAR BODY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. TOMÁŠ JANDA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUBOR ZHÁŇAL

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Tomáš Janda

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

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

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

Karoserie sportovního automobilu

v anglickém jazyce:

Sport car body

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní diplomové práce je návrh karoserie jednosedadlového sportovního automobilu a optimalizace aerodynamických parametrů.

Cíle diplomové práce:

- úvod do problematiky a teoretický rozbor
- návrh karoserie pro specifikovaný rám sportovního automobilu
- zhotovení CAD modelu
- aerodynamické simulace a optimalizace původního návrhu
- zhodnocení finální varianty a návrh případných dalších úprav

Seznam odborné literatury:

- VLK, F. Dynamika motorových vozidel. Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2000, Brno.
- VLK, F. Úlohy z dynamiky motorových vozidel. Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2001, Brno.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Lubor Zháňal

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na konstrukci karoserie jednomístného sportovního automobilu. Taktéž obsahuje aerodynamickou analýzu karoserie a optimalizaci výsledného modelu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aerodynamika, karoserie, CFD, STAR-CCM+

ABSTRACT

The master's thesis is focused on construction of one-man car body of sports car. Work contains aerodynamic analysis of car body too and optimization of the CAD model.

KEYWORDS

Aerodynamics, car body, CFD, STAR-CCM+



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Janda, T. Karoserie sportovního automobilu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lubor Zháňal.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 25. května 2011

.....

Tomáš Janda



PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval především vedoucímu diplomové práce Ing. Luborovi Zháňalovi, dále Ing. Janu Vančurovi a Ing. Evě Novotné, Ph.D., Paed IGIP za poskytnutí cenných rad a připomínek a celé mé rodině za podporu při studiu.



OBSAH

Úvod	11
1 Teoretické pojmy v oblasti aerodynamiky vozidel	12
1.1 Pohybující se vozidlo a pohybující se vzduch	12
1.2 hustota a viskozita vzduchu	12
1.3 Proudnice	12
1.4 Rovnice kontinuity	13
1.5 Bernoulliho rovnice	13
1.6 Mezní vrstva	14
1.6.1 Laminární mezní vrstva	15
1.6.2 Turbulentní mezní vrstva	15
1.7 Úplav	15
1.8 Aerodynamické koeficienty	16
1.8.1 Koeficient aerodynamického odporu	16
1.8.2 Koeficient aerodynamického vztlaku	16
1.8.3 Koeficient boční síly	16
1.8.4 Tlakový koeficient	17
1.9 Profily obtékání	17
2 Aerodynamika vozidel	18
2.1 Odpor otáčejících se kol	18
2.2 Tok vzduchu mezi vozidlem a vozovkou	19
2.3 Aerodynamický tunel	19
2.4 Soustava aerodynamických sil a momentů	21
3 Karoserie automobilů	22
3.1 Koncepce karoserí	22
3.1.1 Nenesoucí (podvozková) karoserie	22
3.1.2 Polonosná karoserie	22
3.1.3 Samonosná karoserie	23
3.2 Požadavky na karoserie	24



3.3	Materiály ve stavbě karoserí	24
3.3.1	Ocel	24
3.3.2	Lehké kovy	24
3.3.3	Plasty	25
4	Sportovní vozidla s podvozkovou karoserí	27
4.1	Jednomístná vozidla	27
4.1.1	BAC Mono	27
4.1.2	Palatov dp1	27
4.2	Dvoumístná vozidla	28
4.2.1	Kaipan 14	28
4.2.2	Ariel Atom	29
4.2.3	Lotus Elise	29
4.2.4	K-1 Attack	30
5	Koncepce sportovního vozidla	31
5.1	Maximální vnější rozměry vozidla	32
5.2	Ergonomie řidiče	32
5.3	Volba motoru	33
5.4	Vnější příslušenství	35
5.4.1	Vnější osvětlení vozidla	35
5.4.2	Registrační značka	36
5.4.3	Zrcátka	36
6	Karoserie sportovního automobilu	37
6.1	První část karoserie	37
6.1.1	Uchycení přitlačného křídla k první části karoserie	38
6.2	Druhá část karoserie	39
6.2.1	Uchycení zadních křídel	40
6.2.2	Pevnostní analýza uchycení zadních křídel ke karoserii	40
7	Aerodynamická analýza	43
7.1	Síťování	43
7.1.1	Hraniční křivky	44



7.1.2	Změna hustoty sítě.....	44
7.2	Počáteční podmínky.....	46
7.3	Podmínky ukončení výpočtu:	48
7.4	Zobrazení výsledků.....	50
8	Výpočty přidružené aerodynamice	53
8.1	Výpočet aerodynamických koeficientů.....	53
8.2	Zatížení náprav vlivem aerodynamických sil	54
9	Aerodynamická optimalizace modelu.....	56
9.1	První varianta optimalizace	56
9.2	Druhá varianta optimalizace	57
9.3	Třetí varianta optimalizace	59
9.4	Vyhodnocení optimalizace	62
	Závěr	65
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	69
	Seznam obrázků.....	71
	Seznam tabulek	73
	Seznam příloh	74



ÚVOD

Aerodynamika je dnes významný vědní obor, používaný při vývoji a konstrukci motorových vozidel. Nezanedbatelnou měrou se podílí na spotřebě paliva a tím pádem i na množství produkovaných emisí, což je v současné době často diskutované téma. Nejen na spotřebu a emise má aerodynamika vozidel vliv. Má významný podíl na velikosti aerodynamického hluku a chování vozidla. Za poslední desetiletí pokročil vývoj v tomto oboru mílovými kroky kupředu, zejména díky výpočetní technice. To umožňuje další snížení nákladů při konstrukci vozidel, kdy není bezpodmínečně nutné vyzkoušet nové konstrukční díly na karoserii v aerodynamickém tunelu.

Karoserie byla v této práci pojata čistě z aerodynamického hlediska jako podvozková (nenesoucí), tzn. veškeré vnější síly, momenty a vibrace absorbuje rám zkonstruovaný v diplomové práci jiného studenta. Tyto typy karoserií se používají nejčastěji u malých sportovních automobilů, např. u vozidel automobilových výrobců Ariel, Lotus, Kaipan, aj.

Obsahem této diplomové práce je provést konstrukci karoserie sportovního automobilu. Práce je rozčleněna na 9 dílčích částí. První čtyři kapitoly se zabývají problematikou v oblasti aerodynamiky a karoserií. Zbývající kapitoly již pojednávají o konstrukci a aerodynamické optimalizaci karoserie. Pro konstrukci karoserií se dnes používají trojrozměrné CAD systémy, nejčastěji CAD systém Catia, popř. Pro Engineer a Solidworks. Samotné řešení aerodynamických analýz je řešeno v CFD softwaru Star-CCM+, který pracuje na bázi metody konečných prvků (MKP).



1 TEORETICKÉ POJMY V OBLASTI AERODYNAMIKY VOZIDEL

V kapitole jsou vysvětleny základní pojmy z oblasti aerodynamiky vozidel, např. úplav, mezní vrstva, typ proudění aj.

1.1 POHYBUJÍCÍ SE VOZIDLO A POHYBUJÍCÍ SE VZDUCH

„Při rozboru aerodynamiky vozidel se většinou preferuje případ, kdy vzduch obtéká stojící automobil oproti skutečné situaci jedoucího automobilu. Pro porozumění silových účinků je první případ všeobecně jednodušší k porozumění i k popsání silových účinků. Naštěstí silové účinky a charakteristika obtékání jsou stejné, ať vzduch proudí kolem stojícího objektu v aerodynamickém tunelu nebo když se objekt pohybuje ve stojícím vzduchu.“¹

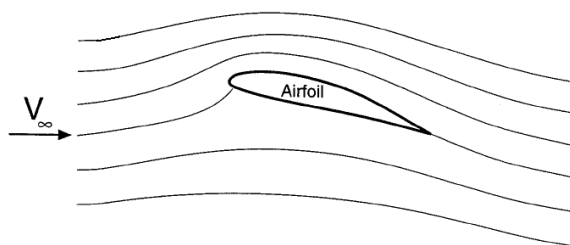
1.2 HUSTOTA A VISKOZITA VZDUCHU

Hustota vzduchu ρ je závislá na teplotě, nadmořské výšce, tlaku. Chladnější vzduch má větší hustotu než vzduch teplejší. Naproti tomu vzduch ve vysokohorských oblastech je řidší než v oblastech přímořských (při nulové nadmořské výšce), což je zapříčiněno menší hodnotou atmosférického tlaku. Hustota vzduchu při hladině moře má hodnotu $1,226 \text{ kg/m}^3$. [1]

Pojmem viskozita je označována míra vnitřního tření mezi jednotlivými vrstvami média. Kdyby médiem obtékající vozidlo byla ideální médium, byla by viskozita nulová. Matematicky lze dynamickou viskozitu vyjádřit jako poměr tečného napětí vůči gradientu rychlosti. Viskozita vzduchu stoupá se zvyšující se teplotou. Dynamická viskozita vzduchu při hladině moře má hodnotu $1,78 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m.s}$.

1.3 PROUDNICE

„Pojmem proudnice je označována trajektorie pohybu částic, obtékající vozidlo. „Soubor takových proudnic tvoří obraz obtékání automobilu.“¹



Obr. 1 Proudnice obtékající profil křídla [3]

¹ KOVANDA, B. – KOVANDA, J.: *Aerodynamika vozidel*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1999. 50 s. ISBN 80-01-01942-X

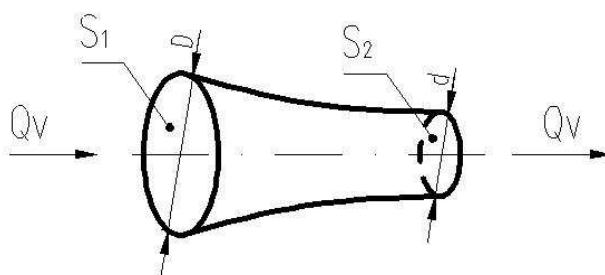


1.4 ROVNICE KONTINUITY

Rovnice kontinuity vyjadřuje obecně zákon zachování hmoty. Pro pochopení rovnice kontinuity si představme válec o průměrech D a d , kterým bude procházet určitý objem látky. Protože plyny jsou stlačitelné, použijeme místo objemového průtoku průtok hmotnostní. Objemový tok plynů vstupujících do válce (průměr D), je stejný jako objemový tok plynů vytékajících z válce (průměr d). Při aerodynamické analýze bude průměr válce D nahrazen modelem aerodynamického tunelu a rozdíl průměrů D a d bude charakterizovat výšku vozidla od vozovky.

Rovnice kontinuity:

$$\rho_1 \cdot S_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_2 = konst \quad (1)$$



Obr. 2 Rovnice kontinuity

1.5 BERNOULLIHO ROVNICE

Tvar pohybujícího vozidla způsobí, že proudění vzduchu v blízkosti vozidla změní směr a rychlost. Dojde zde ke změně tlakových a rychlostních poměrů, což vede k aerodynamickému zatížení vozidla. Tyto vzniklé změny lze zjednodušeně charakterizovat Bernoulliho rovnicí. Základní myšlenka tohoto vztahu vychází ze zákona zachování energie při proudění v ideální kapalině. Bernoulliho rovnice je použitelná u plynů pouze pro proudění při konstantní teplotě. Se změnou teploty by došlo ke změně hustoty a viskozity.

Základní vztah Bernoulliho rovnice:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = konst \quad (2)$$

Při proudění vzduchu vzniká jev nazývaný aerodynamické paradoxon, který značí, že při zvyšující se rychlosti obtékání obtékaného předmětu se snižuje tlak na jeho povrchu. Při snaze dosáhnout vyšších hodnot přítláčné síly na vozidle bychom museli dosáhnout rychlejšího proudění vzduchu na spodní ploše vozidla, než na ploše horní.



1.6 MEZNÍ VRSTVA

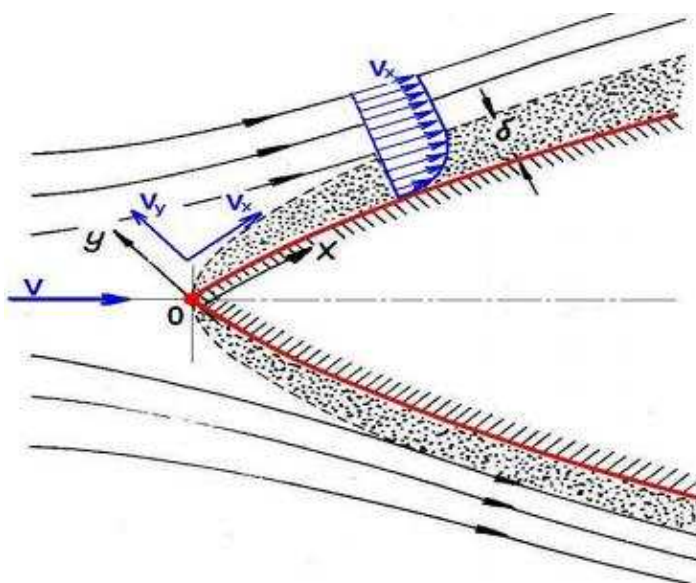
Mezní vrstva je vrstva blízka povrchu obtékaného tělesa, ve které se mění rychlost obtékání tělesa. Na povrchu obtékaného tělesa je rychlost proudění částic látky nulová a na koncovém okraji mezní vrstvy má proudění částic látky obvykle 99% rychlosti v_∞ . Při tření částic látky v jednotlivých vrstvách vzniká odporová síla, která klade odpor proti pohybu tělesa. Rychlost v mezní vrstvě mění se ve vzdálenosti kolmé k povrchu je možno definovat vztahem $\partial v/\partial y$. Podle druhu proudění v mezní vrstvě rozeznáváme mezní vrstvu laminární nebo turbulentní. Tloušťka mezní vrstvy je v rozsahu setin až tisícín podélného rozměru obtékaného tělesa. Faktory, které ovlivňují tloušťku, místo odtržení a typ mezní vrstvy jsou:

- Reynoldsovo číslo Re ,
- viskozita proudící látky,
- kvalita povrchu,
- prvotní rozsah turbulencí v náběžném proudě,
- tlakový gradient $\partial p/\partial x$.

Pro posouzení typu proudění bylo zavedeno Reynoldsovo číslo Re .

$$Re_x = \frac{v_\infty \cdot x}{\nu} \quad (3)$$

kde ν značí kinematickou viskozitu vzduchu, x značí charakteristický rozměr tělesa. Vyjde-li stejné Reynoldsovo číslo 2 tvarově podobných těles, ale každé bude jinak velké, pak bude podobné i jejich obtékání. Reynoldsovo číslo se zvyšuje přímo úměrně s rychlostí vzduchu a charakteristickou délkou x obtékaného tělesa. Hraníční hodnotu mezi laminárním a turbulentním prouděním nelze přímo určit, je závislá na příslušných podmínkách. Pro izotermické proudění nestlačitelné kapaliny v kruhovém potrubí byla zjištěna hodnota $Re = 2320$ [10].

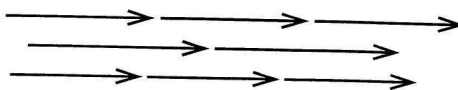


Obr. 3 Schéma mezní vrstvy na obtékaném tělese [6]



1.6.1 LAMINÁRNÍ MEZNÍ VRSTVA

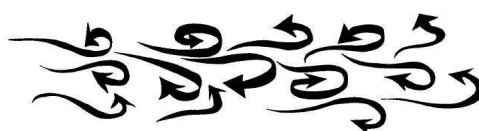
Laminární mezní vrstva je mezní vrstva, ve které jsou proudnice vzduchu rovnoběžné. Dochází zde k malé výměně energií a hmoty mezi jednotlivými vrstvami látky. Vyskytuje se při nízkých rychlostech.



Obr. 4 Laminární proudění [3]

1.6.2 TURBULENTNÍ MEZNÍ VRSTVA

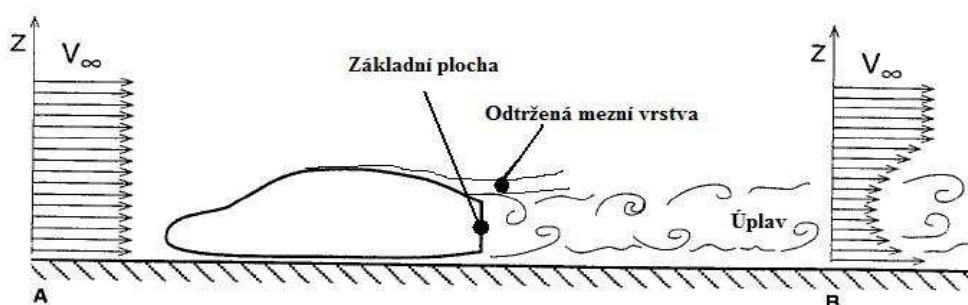
Turbulentní mezní vrstva je mezní vrstva, v níž proudnice vzduchu nejsou rovnoběžné, ale dojde k rozvíření vzduchu a tím k větší výměně energií a hmoty mezi jednotlivými vrstvami látky. Turbulentní mezní vrstva je oproti laminární několikanásobně vyšší. K tvorbě turbulentní vrstvy dochází při vysokých rychlostech.



Obr. 5 Turbulentní proudění [3]

1.7 ÚPLAV

Pojmem úplav se označuje oblast proudu látky (vzduchu), která vznikne za odtokovou hranou obtékaného objektu, tzn. úplav vznikne odtržením mezní vrstvy od povrchu objektu. Pro vznik úplavu je prvořadý tvar zadního úseku karoserie. Hlavní snahou je vytvořit co nejmenší základní plochu, která snižuje velikost negativního tlaku, který působí proti pohybu tělesa a zvyšuje tím aerodynamický odpor. Velikost úplavu ovlivňuje nejen velikost základní plochy, ale také o jaké se jedná proudění. Dojde-li k odtržení mezní vrstvy při laminárním proudění, je vzniklý úplav větší než při odtržení mezní vrstvy při turbulentním proudění. [1]



Obr. 6 Schéma vzniku úplavu a rychlostní profily v místech A a B [3]



1.8 AERODYNAMICKÉ KOEFICIENTY

1.8.1 KOEFICIENT AERODYNAMICKÉHO ODPORU

Koeficient aerodynamického odporu C_D je bezrozměrná hodnota, určující jak velký odpor vozidlo klade během jízdy, čím větší aerodynamický odpor klade vozidlo, tím větší číslo koeficientu C_D . Příklady obtékaných profilů a jejich příslušných koeficientů odporu jsou uvedeny v tab. 1 v kapitole 1.9. Tento koeficient je kromě aerodynamického tunelu možno zjistit experimentálně dojezdovou zkouškou (norma ČSN 30 0554).

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S} \quad (4)$$

kde F_D [N] je odporová síla, S [m²] je příčný průřez tělesem, V_∞ [m/s] je rychlost proudění před tělesem, ρ [kg/m³] je hustota vzduchu (závisí na teplotě a tlaku vzduchu). Průřez S je možno zjistit buďto z konstrukčního softwaru přímo na modelu nebo promítnutím čelní plochy vozidla na stěnu.

1.8.2 KOEFICIENT AERODYNAMICKÉHO VZTLAKU

Koeficient vztlaku C_L je bezrozměrné číslo, jehož kladné hodnoty znamenají aerodynamický vztlak, záporné hodnoty aerodynamický přítlak. Koeficient vztlaku by se měl u vozidel s dobře řešenou aerodynamikou pohybovat pod hranicí 0,1.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S} \quad (5)$$

kde F_L [N] je vztlaková síla, S [m²] je příčný průřez tělesem.

1.8.3 KOEFICIENT BOČNÍ SÍLY

Koeficient boční síly C_Y je ovlivněn tvarem karoserie a úhlem vybočení proudu vzduchu. Velká plocha předě způsobí zvýšení koeficientu boční síly, splývající zád' (combi) má naopak koeficient C_Y nižší. Boční síla, a s ní i koeficient C_Y , je uvažována pouze v případě, pokud vozidlo mění směr své jízdy nebo na vozidlo působí boční vítr.

$$C_Y = \frac{F_Y}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S} \quad (6)$$

kde F_Y [N] je boční síla, S [m²] je příčný průřez tělesem.



1.8.4 TLAKOVÝ KOEFICIENT

Tlakový koeficient C_p je bezrozměrné číslo charakterizující hodnotu místního tlaku působícího na povrch vozidla. V bodě na povrchu vozidla, v jehož místě je nulová rychlost, je hodnota tlakového koeficientu rovna jedné. Se zvyšující se rychlostí do hodnoty rychlosti proudu vzduchu v_∞ se hodnota tlakového koeficientu pohybuje v rozmezí $0 < C_p < 1$, viz aerodynamické paradoxon (kap. 2.3). Dojde-li však v daném místě k urychlení vzduchu nad rychlost v_∞ , hodnota tlakového koeficientu se dostane do záporných čísel. Hodnota tlakového koeficientu C_p není závislá na rychlostech vozidla, tj. měla by být stejná jak pro rychlost 50 km/h, tak pro rychlost 100 km/h. [3]

1.9 PROFILY OBTÉKÁNÍ

Tab. 1 Profily obtékání [3]

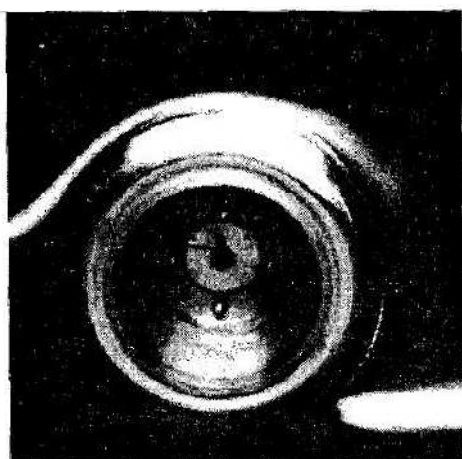
	Profil	Grafické znázornění profilu	C_L	C_D
1	Talířová plocha		0	1,17
2	Válec, $L/D < 1$		0	1,15
3	Válec, $L/D > 2$		0	0,82
4	Kapkový tvar		0	0,04
5	Poloviční kapkový tvar umístěný blízko povrchu		0,18	0,15
6	Osobní automobil		0,32	0,43
7	Závodní prototyp		-3,00	0,75



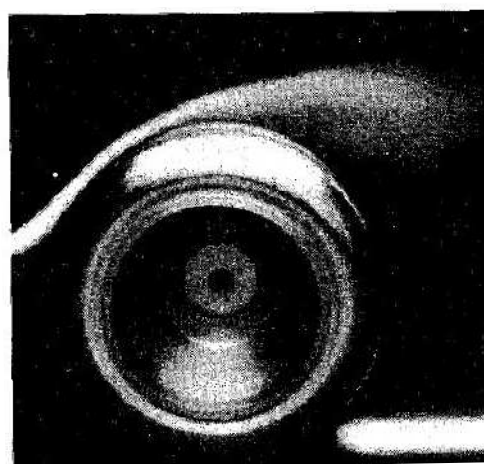
2 AERODYNAMIKA VOZIDEL

2.1 ODPOR OTÁČEJÍCÍCH SE KOL

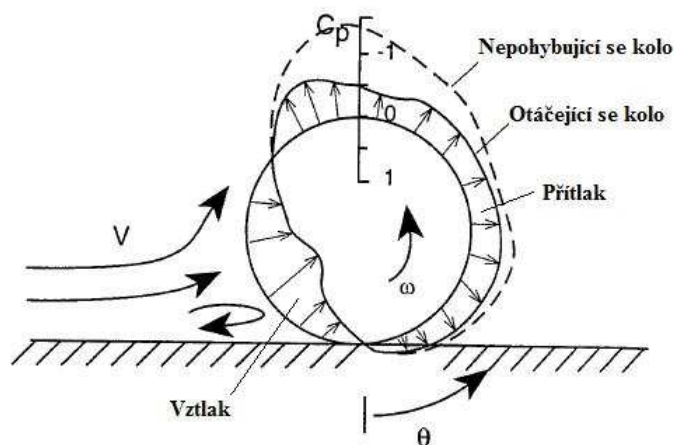
Kola jsou jednou z nevlivnějších oblastí ovlivňující proudění vzduchu kolem vozidla. Nezakrytá rotující kola vytváří nezanedbatelný aerodynamický odpor, jehož hlavní příčinou je odtržení proudu vzduchu, tím i vznik úplavu. Vznik úplavu probíhá ještě před vrcholem kola. Řešením tohoto problému může být zakrytí kol. Výhodou tohoto uspořádání je lepší chlazení brzd. Hodnoty součinitele odporu C_D a součinitele vztlaku C_L jsou závislé na průměru, šířce a typu běhounu obtékaného kola. Hodnoty aerodynamického odporu C_D vlivem rotujících kol při podélném zakrytí kol se u automobilů pohybují okolo hodnoty 0,02, u rotujících nezakrytých kol jsou tyto hodnoty vyšší. [3]



Obr. 7 Proudění vzduchu okolo stojících kol [3]



Obr. 8 Proudění vzduchu okolo rotujících kol [3]



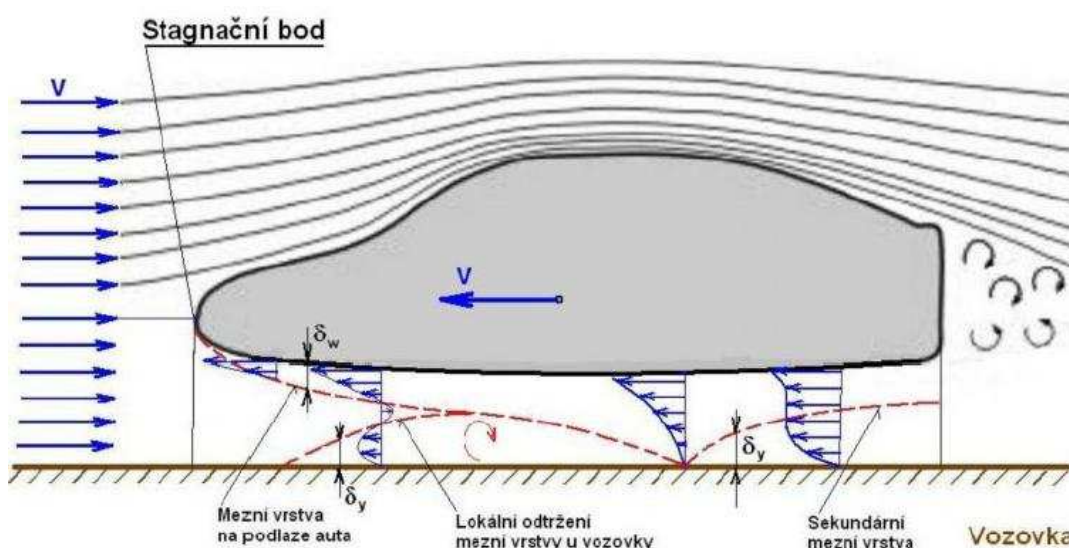
Obr. 9 Tlak působící na stojící a otáčející se kolo [3]



Zajímavým jevem, při kterém vzniká vztlak za rotace kol a protiběžného proudění plynu nebo kapaliny, je Magnusův jev. Při aplikaci na tohoto jevu na výše uvedený obrázek vzniká přítlak. Tento jev se objevuje nejen u vozidel a jejich rotujících kol, ale také v míčových sportech, např. fotbal, golf, kde má vliv na dráhu míče. [6]

2.2 TOK VZDUCHU MEZI VOZIDLEM A VOZOVKOU

Mezi vozovkou a spodní plochou vozidla je při proudění vzduchu vytvářena mezní vrstva. Vlivem viskozity zde dochází ke vztlaku. Vzduch proudící pod vozidlo je zpočátku urychlován zužující se vzdáleností mezi mezní vrstvou na vozovce a na vozidle, pak je vlivem viskozity usměrněn zpět ve směru jízdy vozidla. Mezní vrstva na spodní ploše vozidla postupuje směrem k vozovce a její mezní vrstvě. V určité vzdálenosti od přední části vozidla dojde ke styku mezi mezní vrstvou vozidla a vozovkou. Objem vzduchu, který je ohraničen vozidlem a vozovkou, je usměrňován do úplavu. Tím dojde ke vzniku sekundární mezní vrstvy na vozovce. [1]



Obr. 10 Mezní vrstva mezi vozidlem a vozovkou [6]

2.3 AERODYNAMICKÝ TUNEL

Tvar vozidla a jeho vnějších součástí je nutno před finálním zavedením do výroby otestovat v aerodynamickém tunelu a ověřit si tak správnost výpočtu vyprodukovaný CFD programy. Aerodynamický tunel je zařízení, ve kterém je testovaný prvek (model vozidla, letadla, lokomotivy) ofukován proudem vzduchu (proudění vzduchu je zviditelněno kouřem) a měřen vliv aerodynamických sil. Vzduch je generován ventilátorem a jeho proudnice jsou rovnoběžné.



Rozdělení aerodynamických tunelů podle typu:

- aerodynamický tunel otevřený,
- aerodynamický tunel uzavřený.

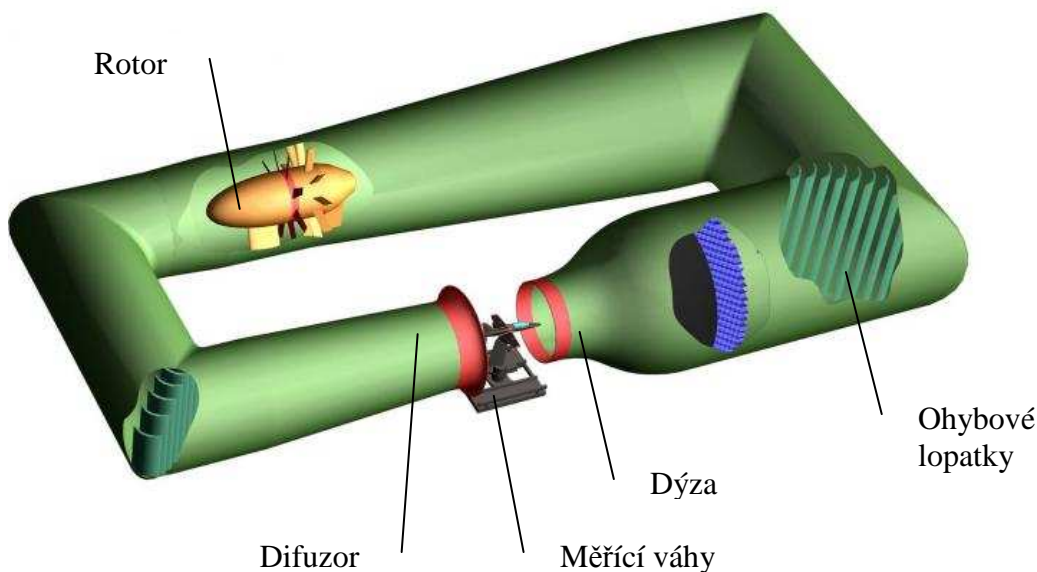
Vzduch v otevřeném tunelu je po nasátí, následném obečení testovaného prvku vyveden mimo aerodynamický tunel. Výhodou této koncepce tunelu je nižší pořizovací cena oproti uzavřené koncepci, nevýhodou je vlhkost nasávaného vzduchu.

Koncepce uzavřeného aerodynamického tunelu je založena na recirkulaci vzduchu uvnitř tunelu. Výhodou tohoto typu je menší energetická náročnost oproti otevřené koncepci, nevýhodou je s přibývajícím časem měření zvyšování teploty vzduchu.

Rozdělení aerodynamických tunelů podle rychlostí:

- nízkorychlostní,
- vysokorychlostní.

Rychlosti vzduchu se v nízkorychlostních tunelech pohybují do hodnoty $Ma < 0,25$, ve vysokorychlostních se rychlost proudění pohybuje mezi 0,25 až 0,8 Machova čísla.



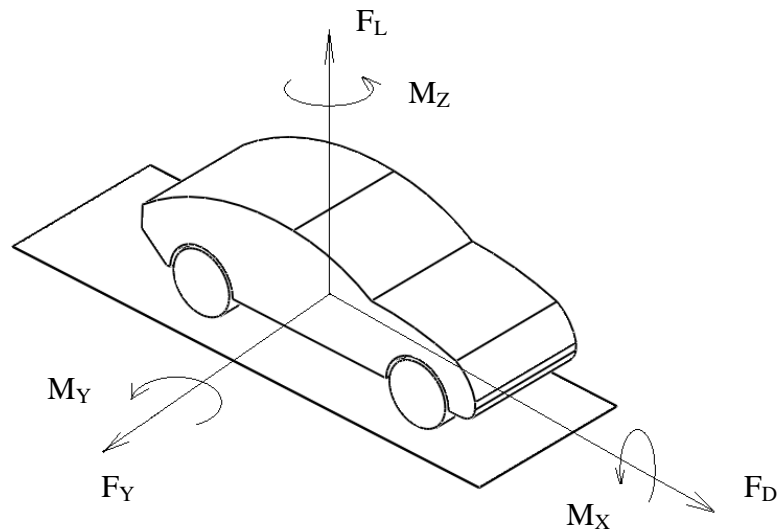
Obr. 11 Uzavřený aerodynamický tunel s otevřeným měřícím prostorem [20]

Měření aerodynamických sil a momentů zajišťují měřicí váhy. Velikost modelu je limitována měřícím prostorem, který může být otevřený nebo uzavřený. V aerodynamických tunelech velkých automobilek je možno simulovat pohyb rotujících kol za pomoci otáčejícího se pásu a jakékoliv jízdní podmínky (sníh, déšť, žhnoucí umělé slunce).



2.4 SOUSTAVA AERODYNAMICKÝCH SIL A MOMENTŮ

Dle níže uvedeného schématu, na vozidlo působí 3 typy aerodynamických sil a momentů. Souřadný systém je umístěn do podélné roviny symetrie vozidla, poloviční délky rozvoru a v rovině vozovky.



Obr. 12 Síly a momenty působící na vozidlo

Aerodynamické síly působící na vozidlo:

$$\text{aerodynamický odpor: } F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V_\infty^2 S \quad (7)$$

$$\text{aerodynamický vztlak: } F_L = \frac{1}{2} C_L \rho V_\infty^2 S \quad (8)$$

$$\text{aerodynamická boční síla: } F_Y = \frac{1}{2} C_Y \rho V_\infty^2 S \quad (9)$$

Aerodynamické momenty působící na vozidlo:

$$\text{klopivý moment: } M_X = \frac{1}{2} C_{MX} \rho V_\infty^2 S c \quad (10)$$

$$\text{zátáčivý moment: } M_Z = \frac{1}{2} C_{MZ} \rho V_\infty^2 S l \quad (11)$$

$$\text{klonivý moment: } M_Y = \frac{1}{2} C_{MY} \rho V_\infty^2 S l \quad (12)$$



3 KAROSERIE AUTOMOBILŮ

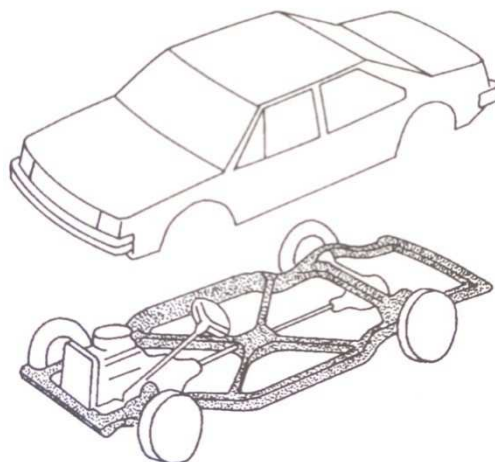
3.1 KONCEPCE KAROSERIÍ

Dle vzájemné konstrukční spojitosti karoserie a podvozku se karoserie rozdělují na tyto druhy:

- nenesoucí (podvozková),
- polonosná,
- samonosná.

3.1.1 NENESOUĆÍ (PODVOZKOVÁ) KAROSERIE

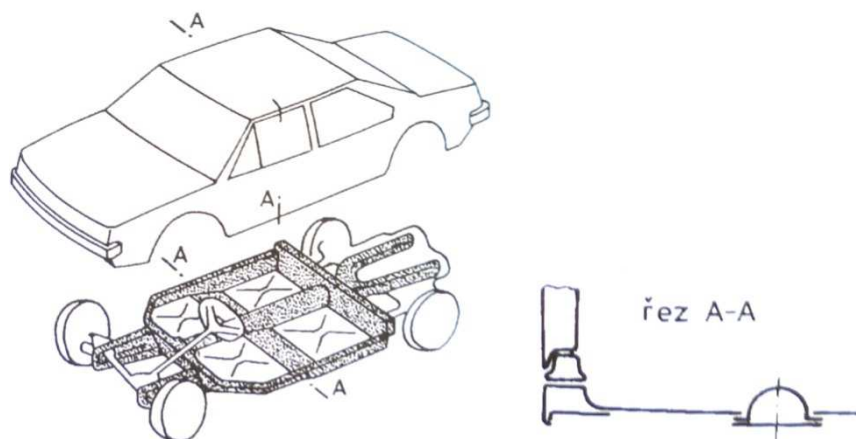
Nenesoucí karoserií je označována karoserie, která je uložena na rámu vozidla. Podstatná zatížení od sil a momentů absorbuje rám vozidla. Spojení rámu a karoserie je realizováno pružným uložením. Karoserie, hnací a řídicí ústrojí je upevněno na rám vozidla. Podvozková karoserie se dnes využívá v závodním motorsportu a u nákladních automobilů. U osobních automobilů je možno ji spatřit na terénních vozidlech. Výhodou této sestavy rámu a podvozku je možnost použití rámu na jiném typu vozidla. Nevýhodou toho provedení je robustnější konstrukce rámu, což přináší větší hmotnost vozidla. [2]



Obr. 13 Schéma nenesoucí karoserie [2]

3.1.2 POLONOSNÁ KAROSERIE

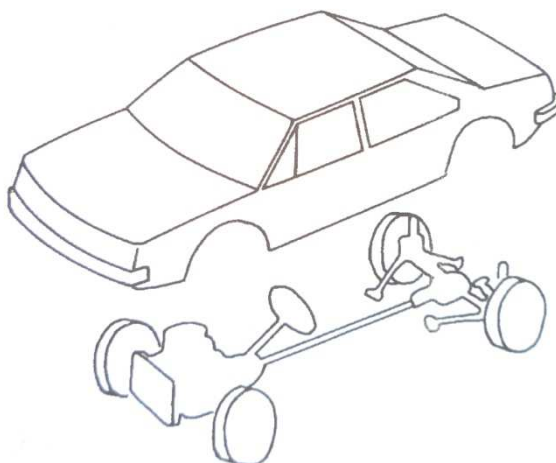
Polonosná karoserie je založena na podobné konstrukční bázi jako podvozková karoserie, tzn. vozidlo má také rám, na kterém je uložena karoserie, hnací a řídicí ústrojí. Avšak karoserie je spojena s rámem vozidla pevně a rozebíratelně, podílí se tedy na pohlcování zatížení od sil a momentů. [2]



Obr. 14 Schéma polonosné karoserie [2]

3.1.3 SAMONOSNÁ KAROSERIE

Samonosnou karoserií je nazýván typ karoserie, kde není použit jako nosný prvek pro karoserii, hnací a řídicí ústrojí rám vozidla. Nosnou, absorbční a ochranou funkci plní již sama karoserie, jak již z názvu vyplývá, samonosná. Toto provedení má výhodu v lehčím typu konstrukce oproti výše uvedeným typům karoserie. Hmotnost samonosné karoserie se pohybuje v rozmezí 50-55% hmotnosti vozidla, vývoj samonosné karoserie tvoří 60-65% z celkového času při vývoji vozidla. „V současné době se při změně modelu vozidla ponechává stejná podlahová skupina, čímž jsou dány variační možnosti jako u podvozkového uspořádání karoserie.“²



Obr. 15 Schéma samonosné karoserie [2]

² VLK, F.: *Karosérie motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000. 243 s. ISBN 80-238-5277-9



3.2 POŽADAVKY NA KAROSERIE

Požadavky na karoserie se netýkají jen její funkčnosti vzhledem k vozidlu, ale týkají se také např. i bezpečnosti provozu. Do kategorie požadavků patří:

- ochrana osob i nákladu před povětrnostními vlivy,
- estetika vnějšího vzhledu a interiéru,
- funkčnost vnějšího tvaru (pro sportovní automobily aerodynamický tvar),
- vysoká pevnost a odolnost proti korozi,
- redukce vibrační a hluku přenášené do interiéru vozidla,
- deformační zóny pro zmenšení následků nehody (zachování prostoru pro přežití posádky),
- snížení následků poranění při srážce s cyklistou či chodcem,
- zachování stálých klimatických podmínek (topení, klimatizace), bezpečný výhled z vozidla (vpřed, vzad).

3.3 MATERIÁLY VE STAVBĚ KAROSERÍÍ

Materiály ve stavbě karoserií je možno rozdělit do dvou kategorií, na materiály kovové a nekovové. Z kovových materiálů se používá nejčastěji ocel, z lehkých kovů hliník. Z nekovových materiálů se používají plasty. Je zakázáno používat jako materiál azbest. Použitý materiál pro výrobu karoserie výrazně ovlivní její hmotnost, případně dle typu použité technologie i cenu.

3.3.1 OCEL

Samonosné karoserie dnešních vozidel jsou z velké části vyráběny z ocelového plechu. Mezi přednosti oceli patří: vysoká pevnost, dobrá absorpce energie při nárazu, lehká tvarovatelnost a svařitelnost, cenová dostupnost oproti ostatním materiálům. Nevýhodou je větší hmotnost a nízká odolnost proti korozi. Tu je možno zvýšit eloxováním.

3.3.2 LEHKÉ KOVY

Důvodem použití lehkých kovů při výrobě karoserií je jejich nižší hmotnost oproti ocelovému plechu. Této výhody je často využíváno u sportovních vozidel, kde se často používají hliníkové karoserie. Další výhodou je vyšší odolnost proti korozi. Nevýhodou použití hliníku je nižší pevnost (použití silnějších plechů) a jeho cena. Ceny hliníku se pohybují v několikanásobně vyšších cenových relacích oproti oceli. Výhodou hliníku oproti oceli je jeho odolnost proti korozi. [2]



3.3.3 PLASTY

Použití plastů v oblasti karoserií je velmi široké. Vývoj v oblasti plastů jde dopředu mílovými kroky dopředu, plasty se dnes vyskytují jako materiál automobilových součástí, kde jejich použití bylo dříve nemyslitelné. Dříve byly z plastů vyráběny díly jako zrcátka, spoilery a nárazníky. Dnes se však z plastů vyrábějí blatníky, kryty motoru, dveře aj. Počet plastových automobilových součástí se bude postupně zvyšovat, hlavním důvodem je nízká hmotnost, s tou klesá i spotřeba. Jejich výhodou je velká pevnost a tuhost, již zmíněná nízká hmotnost oproti oceli a hliníku, odolnost proti korozi. Pro zlepšení těchto vlastností je možno vytvořit kombinaci dvou a více plastů. Nevýhodou je především nedostatečné pohlcování energie při nárazu.

Mezi nejčastěji používané plasty v automobilovém průmyslu patří: Akrylnitril-butadien styrol (ABS), epoxydová pryskyřice (EP), Polyamid (PA), Polykarbonát (PC), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC). [21]

ABS

ABS je pevný, houževnatý materiál, jeho teplotní odolnost je v rozmezí od 30 °C do 85 °C. ABS není doporučeno vystavovat slunečnímu záření kvůli možné ztrátě pevnosti. Možnosti jeho zpracování jsou: vstřikování, vytlačování, tvarování, zpěňování. Obchodními názvy ABS jsou Bayblend, Relac a Magnum.

EP

EP je v kombinaci se skelnými vlákny vysoce pevný materiál, teplotně odolný do 90 °C. Možnosti zpracování EP jsou lisování, odlévání a laminování. EP je možno vyhledat pod obchodním názvem Araldit.

PA

PA je pevný materiál s vysokou tuhostí, teplotně odolný do 80 °C. Jeho nevýhodou je však horší lakovatelnost a galvanická pokovitelnost. Možnosti jeho zpracování jsou vstřikování, vytlačování. PA je možno vyhledat pod obchodními názvy Minlon, Akulon, Zytel, Ultramid.

PC

PC je pevný, houževnatý materiál. Jeho rozměrová stálost je až do 110 °C. Může být zpracován vstřikováním, vytlačováním a tvarováním. Obchodními názvy pro PC jsou Makrolan a Lexan.



PP

PP je pevný, houževnatý materiál, jeho teplotní odolnost je až do 130 °C. PP je možno zpracovat vstřikováním, vytlačováním a tvarováním. Obchodními názvy PP jsou Sabic PP, Purell, Novolen, Hifax, Forprene.

PVC

PVC je vyráběno v širokém rozmezí tvrdostí. PVC může být zpracován vstřikováním, vytlačováním, tvarováním a zpěňováním. PVC je možno vyhledat pod obchodními názvy Solvic, Vestolit. [21]

Tab. 2 Materiálové charakteristiky vybraných plastů [7]

Typ plastu	ρ [kg/dm ³]	R _m [MPa]	R _e [MPa]	E [MPa]
ABS	1,02 ÷ 1,07	30 ÷ 50		1 800 ÷ 2 800
EP	1,17 ÷ 1,25	220		18 000
PA	1,12 ÷ 1,15		55 ÷ 85	1 700 ÷ 3 000
PC	1,22		60 ÷ 65	2 000 ÷ 2 200
PP	0,91		26 ÷ 38	3 500 ÷ 4 000
PVC	1,4	45 ÷ 65		2 900 ÷ 3 400

Pro zlepšení materiálových vlastností je možno využít vyztužení vláknovými kompozity.

Tab. 3 Materiálové charakteristiky vláknových kompozitů [36]

Materiál výztuhy	ρ [kg/dm ³]	R _m [MPa]	E [MPa]
E-Glass	2,55	2 000	80 000
S-Glass	2,49	4 750	89 000
Carbon	2,00	2 900	525 000
Kevlar 29	1,44	2 860	64 000
Kevlar 49	1,44	3 750	136 000



4 SPORTOVNÍ VOZIDLA S PODVOZKOVOU KAROSERÍÍ

Karoserie u těchto vozidel je zde pouze za účelem estetičnosti, zachování aerodynamické stability a co nejnižšího odporu vzduchu. Rám u těchto vozidel je většinou zvolen jako příhradový. Jako materiál karoserie je použit nejčastěji plast nebo kompozit.

4.1 JEDNOMÍSTNÁ VOZIDLA

4.1.1 BAC MONO

Vozidlo BAC Mono je vyráběno od roku 2011 britskou společností BAC (Briggs Automotive Company). Vozidlo je formulového typu, pro užívání na pozemních komunikacích bylo vybaveno světlomety a blatníky.



Obr. 16 Bac Mono [22]

Tab. 4 Technické údaje automobilu Bac Mono [22]

Parametr	Hodnota
Délka	3952 mm
Šířka	1800 mm
Výška	1110 mm
Agregát	Cosworth 2.3 l, 206 kW
Hmotnost	540 kg

4.1.2 PALATOV DP1

Vozidlo Palatov dp1 je vyráběno americkou společností Palatov motorsport. Toto vozidlo je určeno pro jízdu po okruzích. Motor byl umístěn vedle řidiče, čímž se docílilo menších délkových rozměrů.



Obr. 17 Palatov dp1 [23]

Tab. 5 Technické údaje automobilu Palatov dp1 [23]

Parametr	Hodnota
Délka	2870 mm
Šířka	1727 mm
Výška	991 mm
Agregát	Suzuki Hayabusa V8 3.0 l, 320 kW nebo volitelný
Hmotnost	385 kg

4.2 DVOUMÍSTNÁ VOZIDLA

4.2.1 KAIPAN 14

Vozidla Kaipan 14 jsou vyráběna stejnojmennou českou společností Kaipan. Vozidlo Kaipan 14 je dle úředních předpisů hodnocen jako přestavba vozidla, konkrétně vozidla Škoda Favorit. Motor je ve vozidle umístěn vpředu.



Obr. 18 Kaipan 14 [25]

Tab. 6 Technické údaje automobilu Kaipan 14 [24]

Parametr	Hodnota
Délka	3815 mm
Šířka	1640 mm
Výška	1220 mm
Agregát	Škoda Favorit 1.3 l, 50 kW
Hmotnost	659 kg

4.2.2 ARIEL ATOM

Vozidla Ariel Atom jsou vyráběny britskou společností Ariel. Nejvíce zřejmé na první pohled je minimální opláštění automobilu, což je pochopitelné při maximální snaze o co nejmenší hmotnost.



Obr. 19 Ariel Atom [26]

Tab. 7 Technické údaje automobilu Ariel Atom 2 [26]

Parametr	Hodnota
Délka	3410 mm
Šířka	1798 mm
Výška	1195 mm
Agregát	Rover 1.8 l, 92 kW nebo Honda iVTEC 2.0 l, 220 kW
Hmotnost	612 kg
C_D	0,4

4.2.3 LOTUS ELISE

Společnost Lotus z Velké Británie je výrobcem výjimečných sportovních vozidel. Jejich přednosti jsou zejména nízká váha a výborná ovladatelnost. Společnost byla založena roku 1952 konstruktérem Colinem Chapmanem.



Obr. 20 Lotus Elise [27]

Tab. 8 Technické údaje automobilu Lotus Elise [28]

Parametr	Hodnota
délka	3785 mm
šířka	1719 mm
výška	1117 mm
agregát	Toyota VVTL 1.8 l, 141 kW
hmotnost	935 kg

4.2.4 K-1 ATTACK



Obr. 21 K-1 Attack [29]

Tab. 9 Technické údaje automobilu K-1 Attack [29]

Parametr	Hodnota
Délka	4055 mm
Šířka	1900 mm
Výška	1120 mm
Agregát	Honda Accord 2.2 l, 118 kW
Hmotnost	992 kg

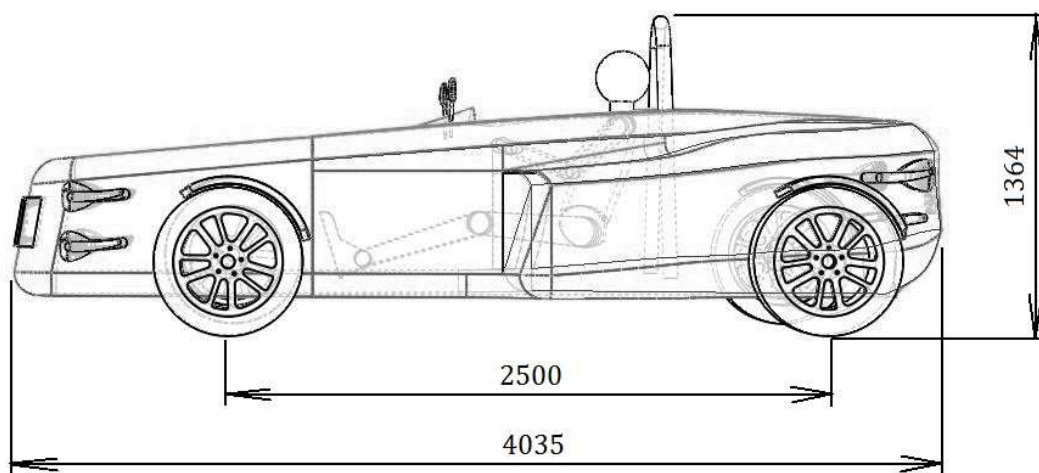


5 KONCEPCE SPORTOVNÍHO VOZIDLA

Pro návrh a započítání prací jednomístného sportovního vozidla bylo nutné vymezit rozměry, jako jsou rozvor a rozchod, rozměr pneumatik. Rozvor kol činí 2500 mm, rozchod kol na přední i zadní nápravě 1605 mm na zadní nápravě. Inspirací pro celkový tvar bylo vozidlo Tramontana. Předběžný návrh automobilu byl navrhnut v programu Autocad. V tomto programu došlo i k návrhu ergonomie řidiče, jeho pracovní poloze a umístění ve voze. Výsledný model karoserie byl navrhnut v programu Solidworks. Hmotnost vozidla by neměla přesáhnout 600 kg. Maximální rychlost by měla dosahovat hodnot až 200 km/h. Pneumatiky použité na vozidle mají rozměr 235/35 R18.



Obr. 22 Tramontana, pohled 1 [37]



Obr. 23 Charakteristické rozměry jednomístného sportovního automobilu



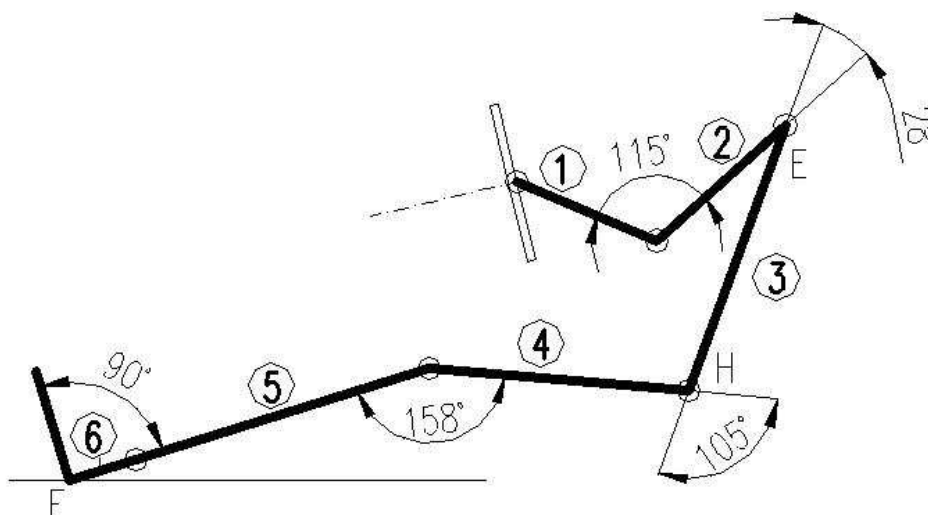
5.1 MAXIMÁLNÍ VNĚJŠÍ ROZMĚRY VOZIDLA

Maximální vnější rozměry vozidla kategorie M1 upravuje vyhláška č. 341/2002 Sb. Tyto rozměry jsou:

- největší povolená šířka vozidla: 2500 mm,
- největší povolená výška vozidla: 4000 mm,
- největší povolená délka vozidla: 12 000 mm,
- největší povolená hmotnost na jednu nápravu: 10 t.

5.2 ERGONOMIE ŘIDIČE

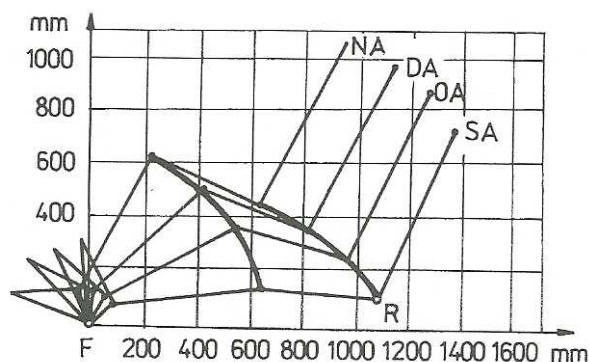
Při návrhu vozidla bylo nutno vyřešit i ergonomie řidiče. Bylo vycházeno z normy SAE J833a. Tato norma popisuje hodnoty velikostí jednotlivých tělesných rozměrů, které se vyskytují u 95 % mužů v USA. Norma počítá s výškou řidiče 1849 mm. Poloha řidiče a tomu také odpovídající úhly mezi jednotlivými končetinami odpovídají nižšímu posedu ve vozidle (viz obr. 24). Tělesné rozměry řidiče jsou zaznamenány v níže uvedené tabulce.



Obr. 24 Tělesné rozměry řidiče dle SAE J833a [2]

Tab. 10 Tělesné rozměry dle SAE J833a [2]

Rozměr [mm]	95 % mužů
1	264
2	301
3	493
4	452
5	535
6	120



Obr. 25 Polohy sedadel pro různé kategorie vozidel [2]

Bodem H je označen kyčelní kloub. Bodem R je označován vztažný bod sedění. Bodem F je charakterizován průsečík roviny tečné na nášlapnou plochu pedálu, roviny procházející pedálem a roviny podlahy.

5.3 VOLBA MOTORU

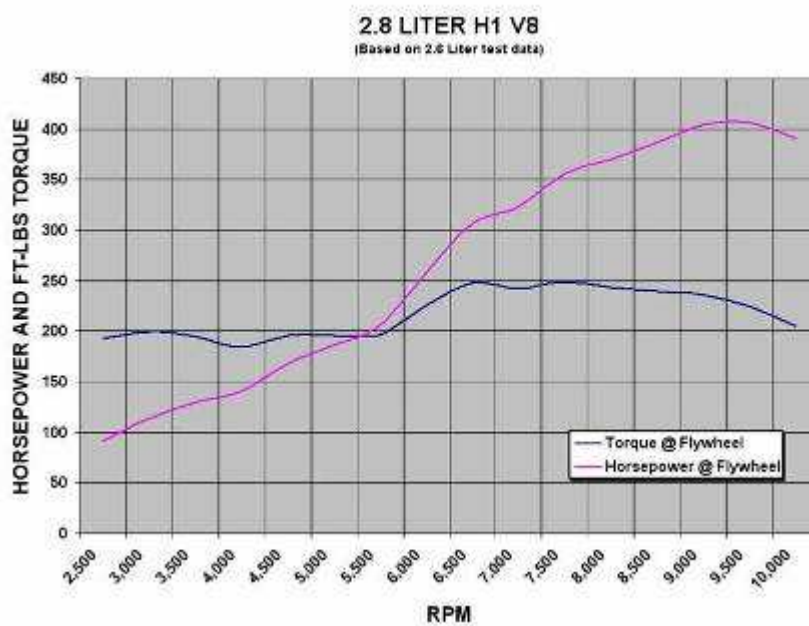
Pro pohon sportovního vozidla bylo třeba lehký, výkonný motor, který dodá vozidlu sportovní vlastnosti. Jako tento motor byla zvolena modifikace motoru Suzuki Hayabusa, motor H1V8 od americké společnosti Hartley Enterprises. Pro stavbu motoru H1V8 jsou použity z motoru Suzuki Hayabusa tyto díly: hlava válců, vačkové hřídele, písty, ventily. Uhel sevření mezi válci je 75° . Společnost Hartley Enterprises nabízí motor ve dvou objemových variantách a to ve variantě 2,0 l a 3,0 l.

Tab. 11 Výkonové a rozměrové parametry motoru H1V8 [31]

Parametr	Hodnota
Max. výkon	298,28 kW
Max. kroutící moment	332,18 Nm
Objem	2,8 l
Počet válců	8
Počet ventilů	32
Hmotnost	90,72 kg
Rozměry (d x š x v)	(485 x 530 x 530) mm



Obr. 26 Motor H1V8 [30]



Obr. 27 Výkonová a momentová charakteristika motoru H1V8 [31]



5.4 VNĚJŠÍ PŘÍSLUŠENSTVÍ

Jelikož má být vozidlo určeno pro veřejné pozemní komunikace, je nutné vozidlo osadit homologovaným příslušenstvím, jako jsou např. vnější osvětlení vozidla a odrazky, označení vozidla registrační značkou, zrcátka, pneumatiky.

5.4.1 VNĚJŠÍ OSVĚTLENÍ VOZIDLA

Při návrhu polohy vnějšího osvětlení vozidla byla dodržena směrnice rady EHS 76/756. Vozidlo pro pozemní komunikace musí být vybaveno těmito typy světel:

- obrysová světla,
- potkávací světla,
- dálková světla,
- brzdová světla,
- směrová světla,
- osvětlení registrační značky,
- odrazky.

Pro osvětlení vozidla byly zvoleny světlomety společnosti Hella. Pro všechna přední osvětlení (obrysová, potkávací, dálková a směrová světla) byly vybrány světlomety o \varnothing 55 mm a délce 87,5 mm. Vzdálenost mezi otvory pro uchycení je 61 mm.



Obr. 28 Světlomet Hella [32]

Pro zadní osvětlení, konkrétně směrová světla a mlhové světlo byly vybrány světlomety o průměru 55 mm. Brzdové a obrysové svítliny mají průměr 98 mm. Světlomety s průměrem 55 mm umožňují kombinaci se světlomety průměru 55 mm.



Obr. 29 Zadní světlo [32]

5.4.2 REGISTRAČNÍ ZNAČKA

Další podmínkou provozu vozidla na pozemních komunikacích je umístění registrační značky na vozidle. Její umístění na vozidle upravuje vyhláška 243/2001 Sb. Ministerstva dopravy a spojů. Pro identifikaci vozidla byla zvolena dvojice registračních tabulek (dopředu a dozadu) o co nejmenších požadovaných rozměrech, které činí 280 mm x 200 mm (šířka x výška).



Obr. 30 Registrační značka (280 x 200) mm [33]

5.4.3 ZRCÁTKA

Vozidla kategorie M1 musí splňovat předepsanou směrnici 2003/97/ES, týkající se zrcátek kategorie III. V této normě je předepsaná velikost odrazové plochy a zorného pole výhledu. Zrcátka byla použita od výrobce Vicma, která tyto požadavky uvedené v normě splňují. Závit na konci zrcátek má velikost M8 o délce 20 mm.



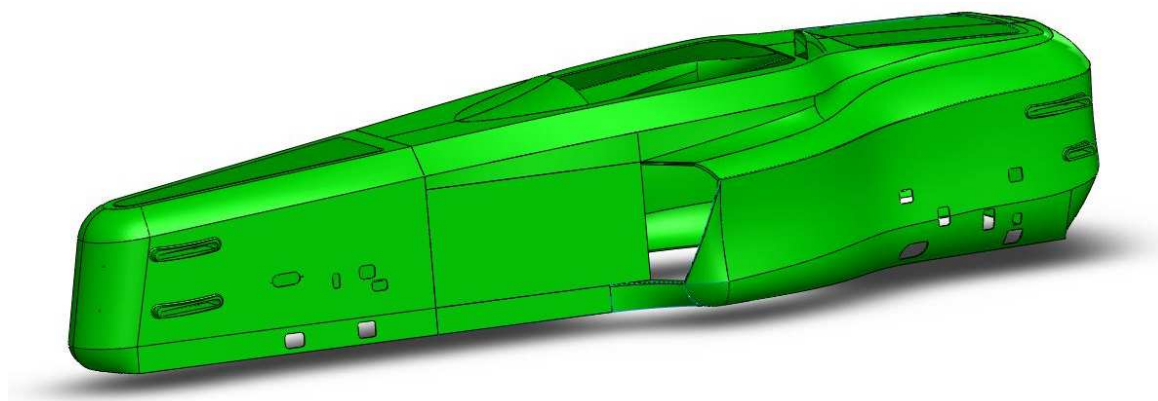
Obr. 31 Zpětné zrcátko Vicma [34]



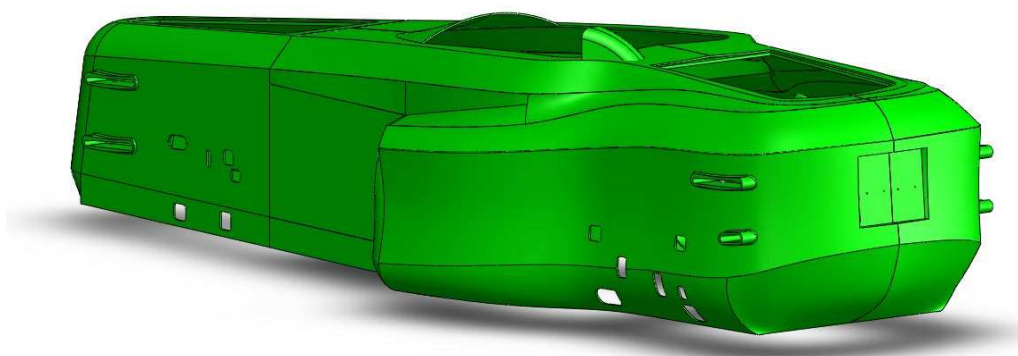
6 KAROSERIE SPORTOVNÍHO AUTOMOBILU

V konstrukčním řešení bylo počítáno se čtyřmi hlavními částmi karoserie. První a druhá část karoserie jsou jejími hlavními částmi. Třetí a čtvrtá část karoserie jsou kapotáže první části, resp. druhé části karoserie.

Z důvodu členitého tvaru a velkých tvarových rozměrů přichází v úvahu jediný možný způsob výroby, a to odlévání do formy. Jediný materiál vhodný pro tento způsob výroby je EP.



Obr. 32 Karoserie sportovního automobilu, pohled 1



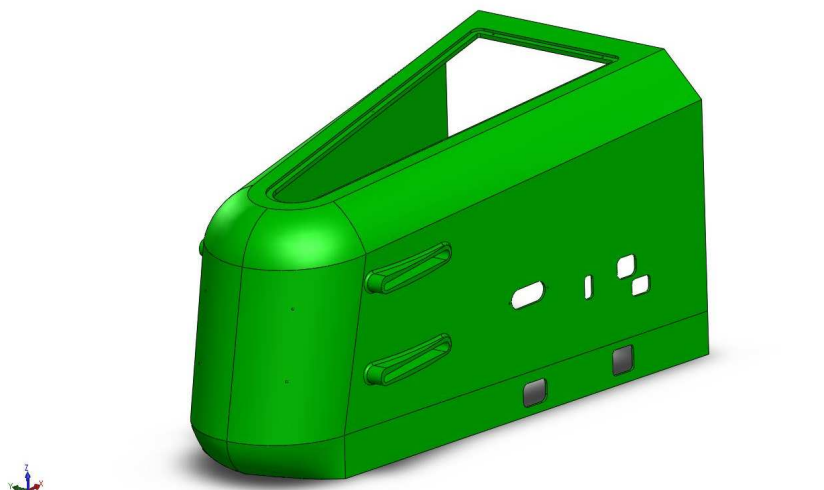
Obr. 33 Karoserie sportovního automobilu, pohled 2

6.1 PRVNÍ ČÁST KAROSERIE

První část karoserie plní úlohu nejen z hlediska vizualizace a aerodynamických vlastností, ale zároveň plní funkci podpory pro přední přítláčná křídla s předními světlomety, pro třetí část karoserie a pro odnímatelnou podporu. V návrhu vozidla bylo počítáno s první částí karoserie a nosnými křídly jako samostatnými komponenty. Průchozí otvor v horní části slouží pro snadnější montáž uchycení křídel a zavěšení vozidla.



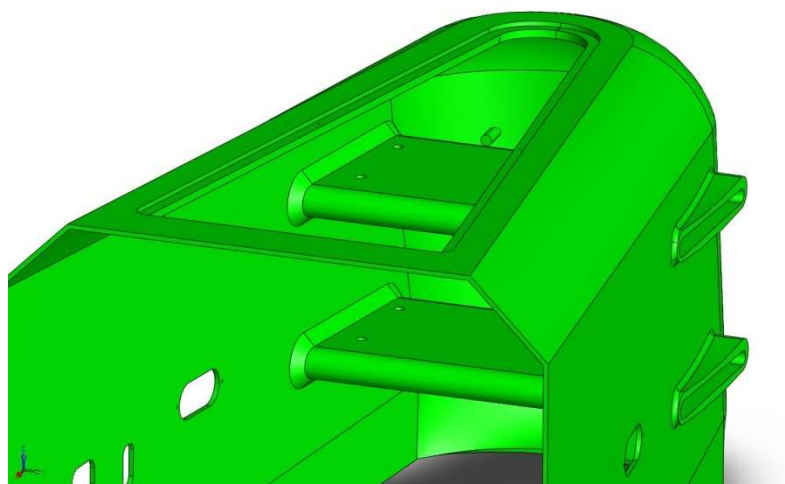
Po stranách karoserie byly vytvořeny otvory pro ramena lichoběžníkové nápravy, řídicí tyč a odpružení typu push rod. Otvory pro uchycení křídel byly vytvořeny podle již zmíněné normy EHS 76/756. Do horního křídla byly uloženy směrové a potkávací světlomety. Ve spodním křídle jsou usazeny obrysová a dálková světla.



Obr. 34 První díl karoserie

6.1.1 UCHYCENÍ PŘÍTLAČNÉHO KŘÍDLA K PRVNÍ ČÁSTI KAROSERIE

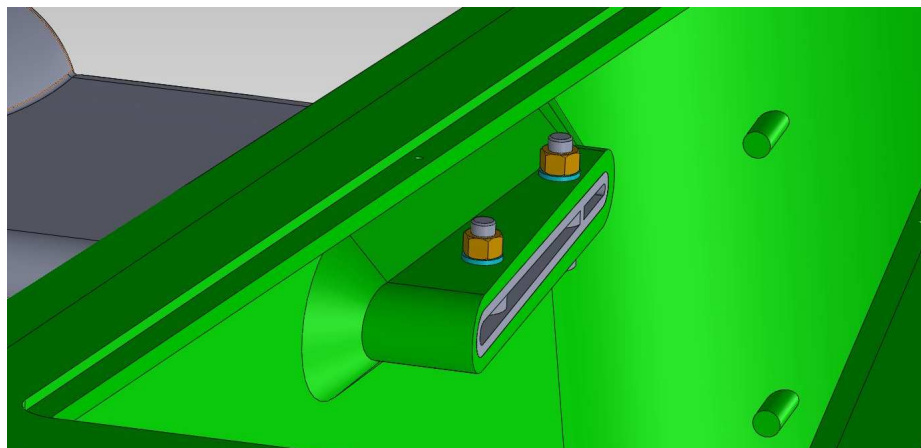
Křídla na vozidle slouží jako podpora pro světlomety, v případě malého zadního křídla pro odrazky. Konstrukčně je možno křídlo upevnit pomocí tří variant. První variantou byla delší opěrná hrana křídla, která by se opírala o náběžnou hranu procházející napříč celou přední částí karoserie. Při použití této varianty by došlo ke zmenšení prostoru pro případnou montáž deformačního členu.



Obr. 35 První varianta uchycení předních křídel



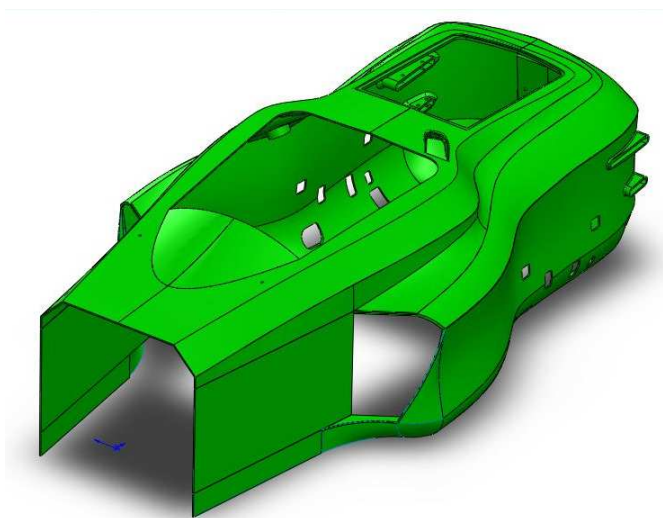
Druhou variantou je myšlena zkrácená opěrná hrana křídla a výrazně zkrácená náběžná hrana karoserie s výztuhami vyskytujícími se po celém obvodu náběžné hrany pro zachycení křídla. Tato varianta by byla doporučena pouze za předpokladu použití kompozitového materiálu. Třetí variantou je uchycení přitlačných křídel k rámu vozidla.



Obr. 36 Druhá varianta uchycení předních křídel

6.2 DRUHÁ ČÁST KAROSERIE

Druhou částí karoserie je myšlena hlavní část karoserie, která zakrývá řidiče a motorovou část. Při návrhu tohoto prvku bylo počítáno s ergonomií řidiče a zástavbou pohonné jednotky. Velikost maximální možné chladicí plochy při řezu bočnicí karoserie vedeným kolmo k vozovce je $0,1 \text{ m}^2$. V zadní části byl vytvořen prostor o rozměrech $320 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$ pro uchycení podložky s registrační značkou a její osvětlení. Po stranách karoserie byly vytvořeny otvory pro ramena lichoběžníkové nápravy, řídicí ramena, odpružení typu push rod a zadní poloosy.

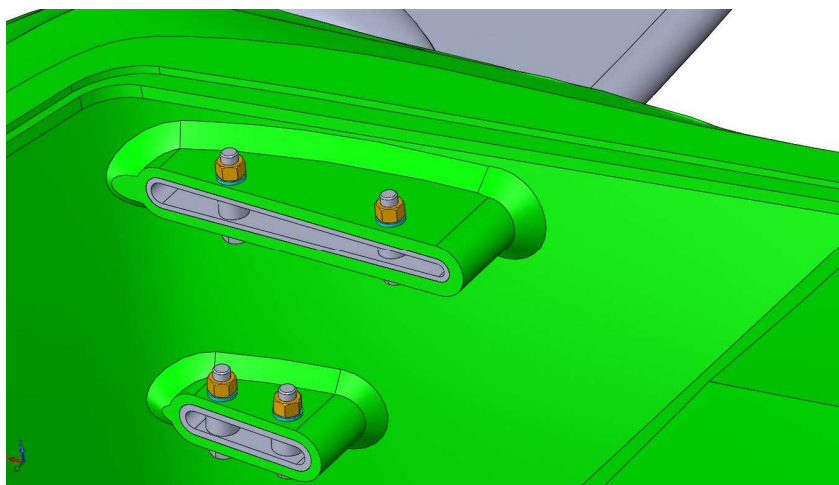


Obr. 37 Druhá část karoserie



6.2.1 UCHYCENÍ ZADNÍCH KŘÍDEL

Zadní křídla mohou být plně opřena o náběhy na karoserii nebo uchycena k rámu. V této práci je počítáno s uchycením na karoserii, ale stejně jako u uchycení předních křidel, i tady platí podmínka použití kompozitového materiálu (např. EP prokládaná sklolaminátem).



Obr. 38 Uchycení zadních křidel

Nenesoucí karoserie automobilů jsou vyráběny z EP prokládané skelnými, případně uhlíkovými vlákny. EP prokládaná vlákny však není standardizovaný materiál, pro který by bylo možno vyhledat hodnoty materiálových charakteristik.

Po konzultaci s firmou Plastic bylo zjištěno, že materiál a jeho tloušťka v daném místě nenesoucí karoserie jsou aplikovány na základě zkušeností výrobních pracovníků. Dále bylo zjištěno, že karoserie automobilu Kaipan je vyráběna z kompozitových materiálů a její tloušťka je 3 mm.

6.2.2 PEVNOSTNÍ ANALÝZA UCHYCENÍ ZADNÍCH KŘÍDEL KE KAROSERII

Výpočet byl proveden pro samotnou EP (Araldite® LY 5052 [35]), bez podpůrných vláken, s hodnotami materiálových charakteristik získaných po 8 h vytvrzování při teplotě 80 °C. Hodnoty jsou uvedené v Tab 4.

Tab. 12 Materiálové charakteristiky materiálu Araldite® LY 5052 pro tah [35]

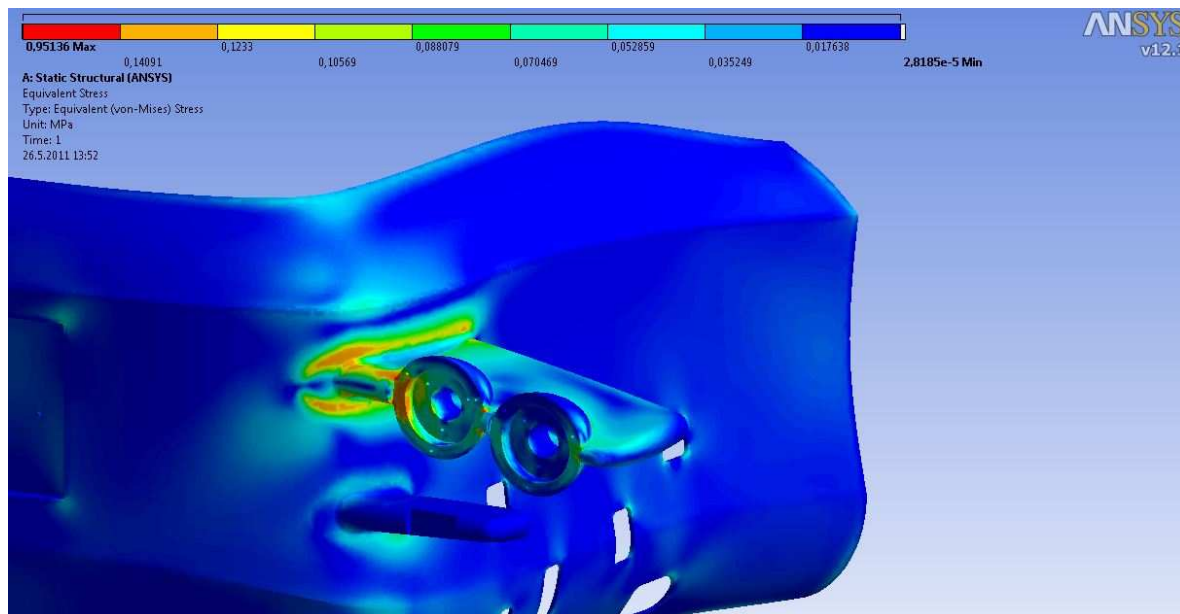
Materiál	ρ [kg/dm ³]	Rm [MPa]	E [MPa]
Araldite_LY5052	1,12	80	3000

Tab. 13 Materiálové charakteristiky materiálu Araldite® LY 5052 pro ohyb [35]

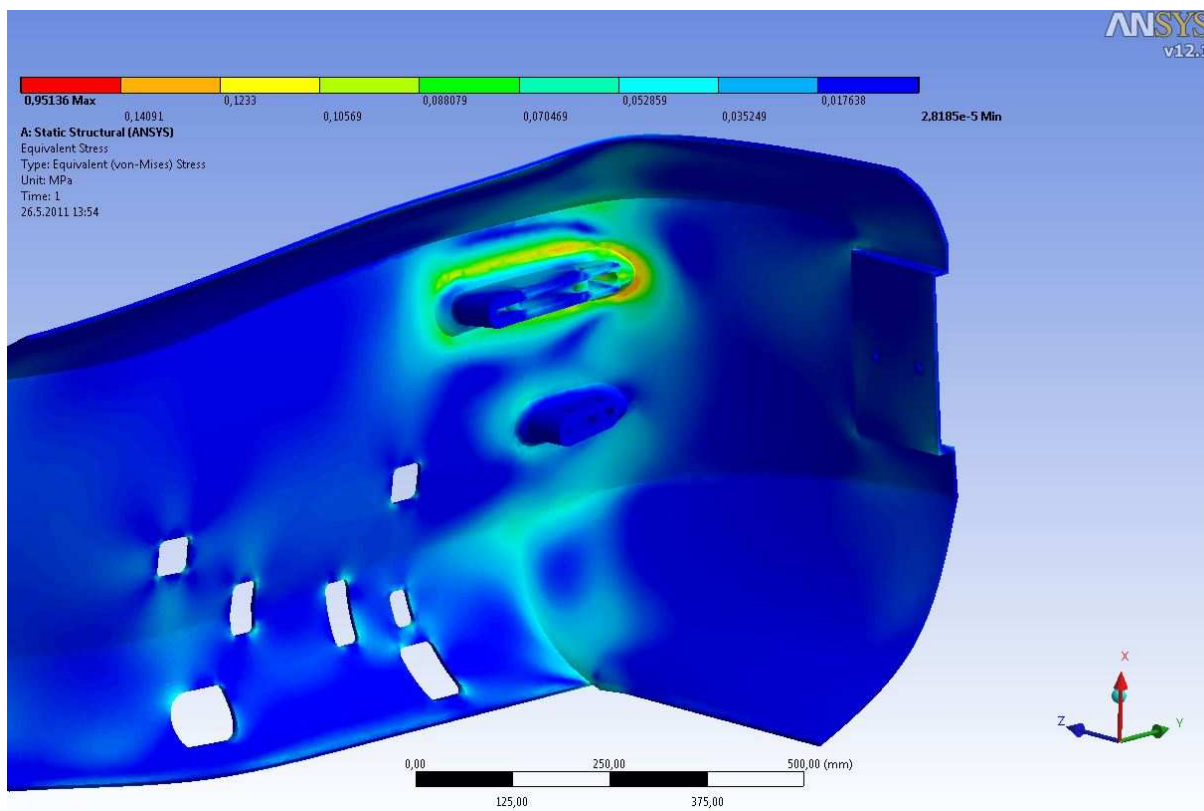
Materiál	ρ [kg/dm ³]	Rm [MPa]	E [MPa]
Araldite_LY5052	1,12	87	2700



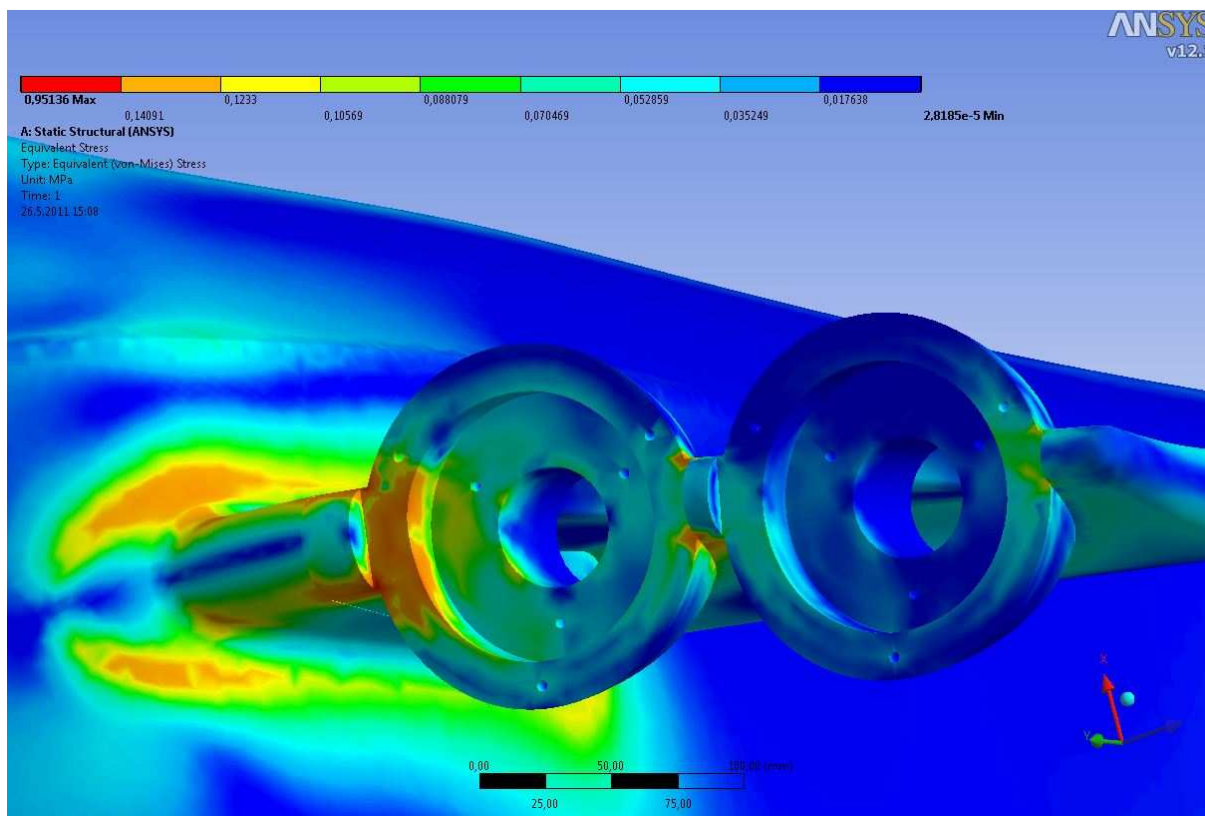
Jako model pro zatížení byl použit úsek druhé části karoserie v oblasti křidel a zadní křídla bez světel a jejich krytů. Na model bylo aplikováno zatížení vlivem gravitace, tzn. jak jsou vůči sobě namáhány křídla a karoserie vlivem gravitačních sil. Výpočet byl proveden pro tloušťku karoserie v 5 mm.



Obr. 39 Statické namáhání druhé části karoserie, pohled 1



Obr. 40 Statické namáhání druhé části karoserie, pohled 2



Obr. 41 Obr. 42 Statické namáhání zadního horního křídla a druhé části karoserie

Největší napětí 0,951 MPa se vyskytovalo na horním křídle v místě přechodu z části křídla, která slouží pro upevnění světel na samotné křídlo. V oblasti uchycení křídel ke karoserii se napětí pohybovalo v mezích od 0,018 do 0,141 MPa. Pokud by bylo vycházeno z materiálových charakteristik materiálu Araldite® LY 5052, EP o tloušťce 5 mm by více než dostatečně vyhovovala dovoleným napětím na ohyb.

Celková váha karoserie při použití materiálu EP a tloušťce 5 mm by se pohybovala okolo hranice 55,5 kg. Pokud by bylo jako materiálu pro karoserii použito kompozitového materiálu, tloušťka karoserie by mohla být menší a mohlo by dojít k úspoře hmotnosti karoserie.



7 AERODYNAMICKÁ ANALÝZA

Model vozidla byl analyzován v softwaru STAR-CCM+. Před jeho importem byly provedeny určité úpravy modelu vozidla v těchto oblastech: na modelu nebyla použita zrcátka a sání, odnímatelná podpora, hlava řidiče byla nahrazena koulí s krčným náběhem, otvor pro pracovní prostor řidiče byl zakryt, tvarování blatníků bylo zjednodušeno. Navíc z důvodu výskytu ostré plochy v místě styku pneumatiky s vozovkou byl vytvořen náběh tažený po plochu pneumatiky. Pro urychlení výpočtu byl vytvořen poloviční model vozidla.

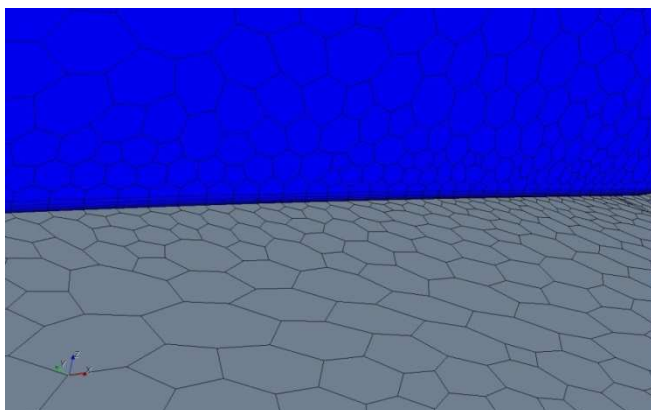
Takto upravený model byl uložen v programu Solidworks jako Part (celé vozidlo musí být samostatná součást). Pokud nedošlo ke sloučení jednotlivých částí na vozidle, je nutno provést v téže programu boolean operace sjednocení (příkaz Kombinovat).

Dále byl vytvořen model tunelu o rozměrech 90 m x 7 m x 6 m (délka x šířka x výška). Nakonec byl vytvořen Part, ve kterém došlo k odečtení objemu vozidla od objemu tunelu (tzn. tunel a vozidlo musí tvořit jednotný celek Body, v mém případě Body 6). Vzdálenost nejbližší přední hrany vozidla od vtokové hrany tunelu byla 12,7 m.

Pro úspěšný import do programu STAR-CCM+ bylo nutné převést model na univerzální formát. Tímto univerzálním formátem může být IGES (přípona .igs), Parasolid (přípona .x_t), Step (přípona .step) a další. Nejlépe byl zobrazen a převeden model ve formátu Parasolid, při převodu na formát IGES nastaly chyby v zobrazené geometrii modelu.

7.1 SÍŤOVÁNÍ

Pro vlastní vysíťování byly zvoleny z nabídky *Meshing models* tyto možnosti: Polyhedral Mesher, Surface Remesher a Prism Layer Mesher. Polyhedral Mesher charakterizuje, že pro síťování byl zvolen typ prvku Polyhedral (tvar včelí plástve), který oproti prvkům tetrahedral (tvar trojbokého jehlanu) urychluje výpočet nižším počtem buněk vyplňující prostor modelu. Volba Prism Layer Mesher slouží pro simulaci mezní vrstvy na vozidle. Pro simulaci mezní vrstvy bylo zvoleno 5 těchto vrstev.



Obr. 42 Polyhedrální síť a Prism Layer Mesher



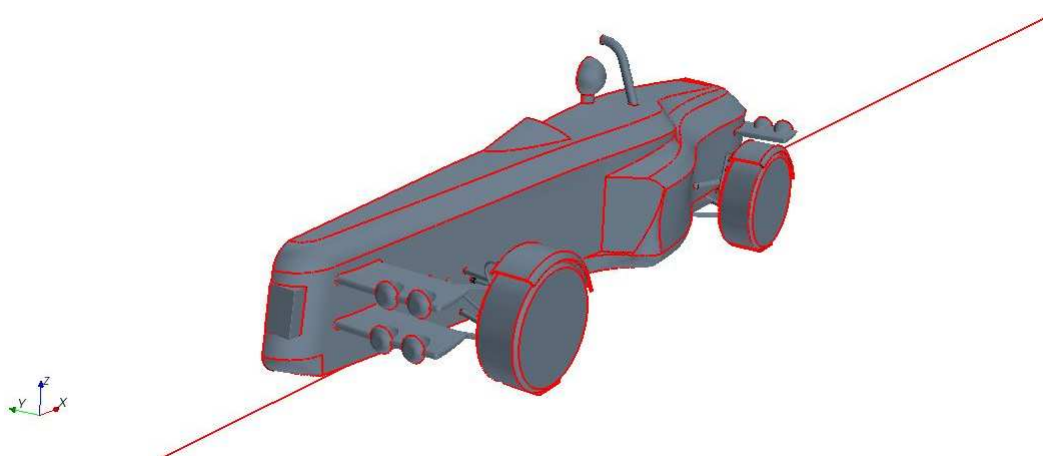
Tab. 14 Velikost elementů pro vysítování modelu

Oblast	Velikost elementu	
	Absolute Minimum Size [mm]	Absolute Target Size [mm]
Vozidlo	6,25	25
Inlet (vstup do tunelu)	450	500
Outlet (výstup z tunelu)	450	500
Boční stěny	450	500
Strop	450	500
Vozovka	50	500

Aby došlo k vysítování stěn tunelu o výše uvedených velikostech elementů, musí být na všech jeho plochách potvrzena volba *Mesh Conditions* → *Custom surface size*.

7.1.1 HRANIČNÍ KŘIVKY

Pro zpřesnění výpočtu je nutno v kritických místech zjemnit síť hraničními křivkami (Feature curves). Těmito místy mohou být např. ostré přechody, místa kde dochází ke změně tvaru. K definování umístění hraničních křivek slouží příkaz *Mark Edges* z nabídky *Regions* → *Body* → *Feature curves* → *New feature curve* → *Mark edges*.



Obr. 43 Hraniční křivky na modelu vozidla

7.1.2 ZMĚNA HUSTOTY SÍŤE

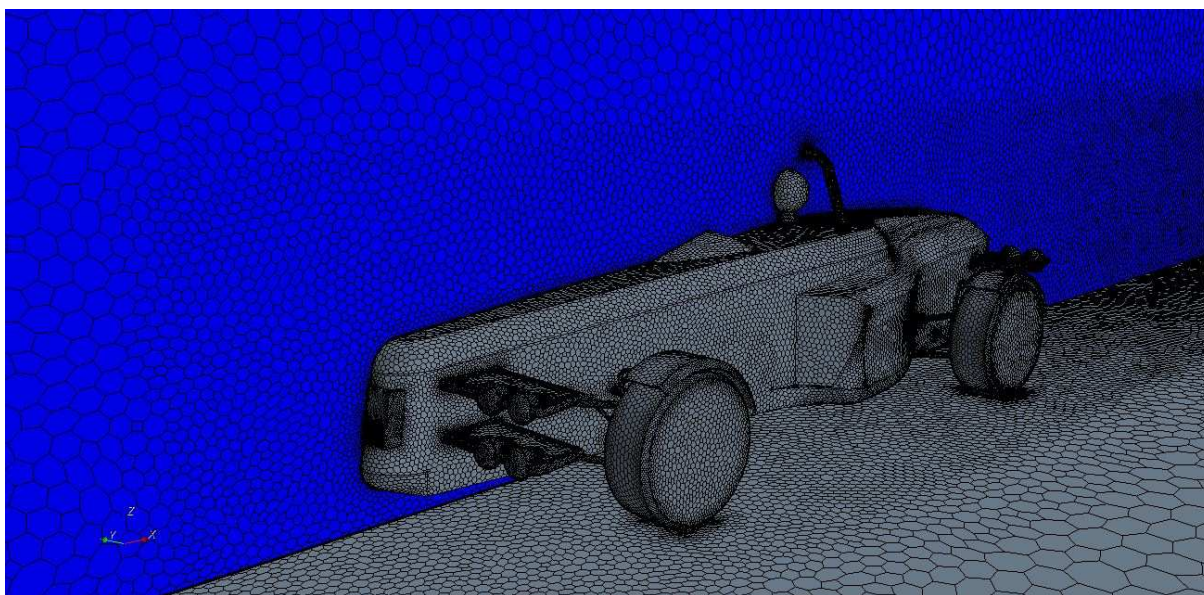
Pro urychlení výpočtu je možné změnit hustotu sítě tunelu. Změna hustoty je provedena vložením kvádrů, které vymezují hranice mezi oblastmi s různými velikostmi síťových elementů. Vložení kvádrů probíhá ze stromových příkazů volbou *Tools* → *Volume Shapes* → *New Shape* → *Block*. Kvádr je definován dvěma protilehlými vrcholy. Souřadnice těchto vrcholů se vztahují k souřadnému systému vozidla, který je umístěn v místě dotyku první a druhé části karoserie v místě podélného řezu středem vozidla a 150,35 mm nad rovinou vozovky. Souřadné body jsou zaznamenány v níže uvedené tabulce.



Pro správné vysítování modelu se změnou hustoty sítě je nutno striktně dodržet rozměry vložených kvádrů. Pokud by kvádry přesahovaly hranice modelu, mohlo by dojít k nenavazujícímu spojení sítovaných prvků.

Tab. 15 Souřadnice bodů, tvořících kvádry pro změnu hustoty sítě

Block č.	Velikost elementu [mm]	Bod 1 [mm]			Bod 2 [mm]		
		X	Y	Z	X	Y	Z
1	50	-2 000	-1 300	-150,35	13 000	0	1 300,00
2	100	-2 500	-1 700	-150,35	17 000	0	1 800,00
3	200	-4 000	-2 700	-150,35	22 000	0	2 300,00
4	300	-5 000	-4 000	-150,35	27 000	0	3 200,00
5	400	-6 000	-5 000	-150,35	28 000	0	4 200,00
6	450	-8 000	-6 000	-150,35	33 000	0	5 200,00
7	500	-14 700	-8 000	-150,35	75 300	0	5 849,64



Obr. 44 Zředěná síť v okolí modelu a zjemněná síť v oblasti hraničních křivek modelu

Před spuštěním vlastního vysítování modelu je dobré povolit automatickou opravu sítě příkazem *Mesh* → *Models* → *Surface Remesher* → *Enable automatic surface repair*.

Při vlastním sítování proběhla redukce z 9 100 000 buněk tetrahedrální sítě na 1 240 901 buněk sítě polyhedrální. Pro zajímavost, modely monopostů formule 1 mají při výpočetní analýze proudění 100 milionů buněk.



7.2 POČÁTEČNÍ PODMÍNKY

Počáteční podmínky pro proudění zvolené v záložce *Continua* → *Physics* jsou zaznamenány v Tab. 16.

Tab. 16 Podmínky charakterizující proudění v tunelu

Kritérium	Volba
Space	three dimensional
Time	steady
Material	gas
Motion	stationary
Flow	coupled flow
Equation of state	constant density
Viscous regime	turbulent
Turbulence	Reynolds - averaged Navier - Stokes
Reynolds-averaged turbulence	K-Omega turbulence
K-Omega turbulence	SST (Menter) K-Omega
K-Omega treatment	All y+ wall treatment
Optional physics models	cell quality remediation

Kde: *three dimensional* znamená trojrozměrné proudění, *gas* určuje jako látku pro proudění vzduch, *stationary* charakterizuje ustálené proudění. *Coupled flow* je model, který řeší rovnice pro proudění současně. *Constant density* znamená konstantní hustotu, *Viscous regime - turbulent* charakterizuje turbulentní proudění, *Reynolds - averaged Navier - Stokes* charakterizuje proudění pomocí Navier – Stokesových rovnic a rovnice kontinuity, typ turbulentního proudění je řešen metodou *K-Omega turbulence*.

Tab. 17 Fyzikální vlastnosti vzduchu při teplotě 300 K

Fyzikální veličina	Hodnota
Teplota	26,85 °C (300 K)
Hustota	1,18415 kg/m ³
Tlak	101 325 Pa
Rychlost	28 m/s

Rychlost proudícího vzduchu byla definována ve 2 nabídkách. První nabídku lze najít touto cestou: *Continuum* → *Physics* → *Initial Conditions* → *Velocity*. Směr a rychlost proudění ve směru x-ové osy byly nastaveny souřadnicemi [28.0, 0.0, 0.0] m/s. Druhá definice rychlosti byla provedena v nabídce *Boundaries* → *Inlet* (označení počátku vstupu vzduchu do tunelu).



Tab. 18 Vlastnosti jednotlivých oblastí na modelu

Oblast	Typ hranice	Fyzikální vlastnost	Hodnota
Vozidlo	Wall		
Inlet	Velocity inlet	Velocity	28 m/s
Outlet	Pressure outlet	Pressure	0 Pa
Strop	Symmetry plane		
Boční stěny tunelu	Symmetry plane		
Vozovka	Wall	Tangential velocity specification	28 m/s
Kola	Wall	Tangential velocity specification	- 90,032 rad/s

Hranice typu *Wall* představuje nepropustný povrch (vozidlo), okolo kterého bude látka (vzduch) obtékat. Hranice typu *Velocity inlet* představuje vstup látky do tunelu, *Pressure outlet* představuje výstup z tunelu. Typ hranice *Symmetry plane* představuje plochu bez tření. Jak již název napovídá, je možno ji použít pro rovinu půlící model vozidla. Simulace pohybu vozovky je realizována funkcí *Tangential velocity specification* a její metodou *Vector* se shodným směrem pohybu jako je proud vzduchu do tunelu. Kola jsou definována hranicí typu *Wall*, je nutno však definovat směr a osy otáčení. Souřadnice osy otáčení vůči lokálnímu souřadnému systému jsou definovány v Tab. 19.

Tab. 19 Souřadnice kol vůči lokálnímu souř. systému

Přední kolo			Zadní kolo		
x	y	z	x	y	z
-355 mm	0 mm	160,5 mm	2144,5 mm	0 mm	160,5 mm

Rychlost otáčení kol byla zjištěna ze vztahu pro výpočet rychlosti rovnoměrného pohybu po kružnici:

$$v = r_{\text{dynam}} \cdot \omega \quad (13)$$

kde: v [m/s] je rychlost rovnoměrného pohybu po kružnici (obvodová rychlost kol je stejná jako rychlost vozidla), r [m] je dynamický poloměr kola, ω [rad/s] je úhlová rychlost kola.

Statický poloměr kola r_{stat} má hodnotu 310,85 mm. Pro výpočet úhlové rychlosti je vhodný dynamický poloměr kola r_{dynam} . Z důvodu působení odstředivých sil na pneumatiku bylo při výpočtu počítáno, že hodnota dynamického poloměru kola je větší než poloměr statický. Dynamický poloměr byl zvolen na hodnotu 311 mm.

Úpravou vzorce 13 je vypočítána úhlová rychlost kola:

$$\omega = \frac{v}{r_{\text{dynam}}} = \frac{28 \text{ m/s}}{0,311 \text{ m}} = 90,032 \text{ rad/s}$$

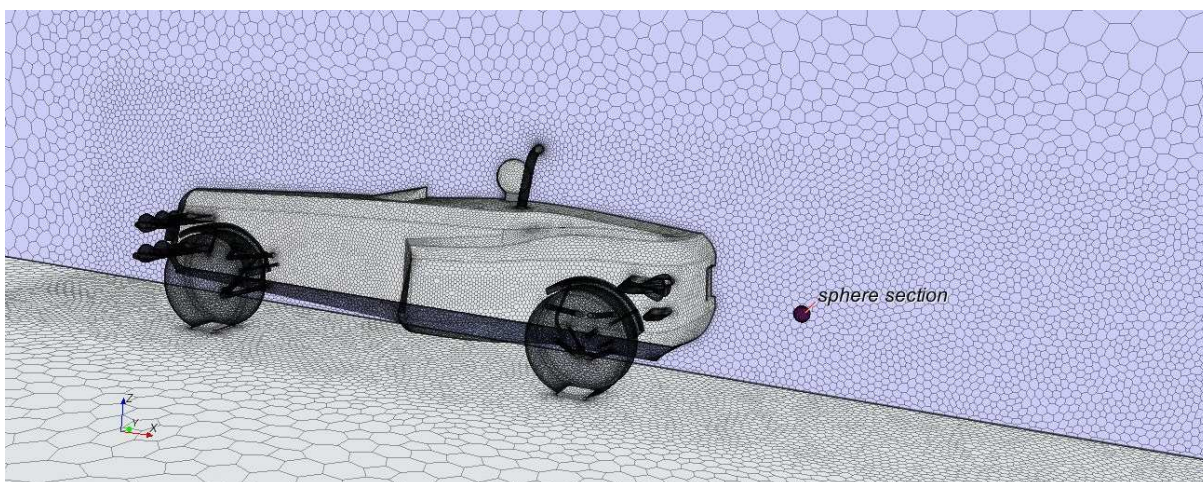


7.3 PODMÍNKY UKONČENÍ VÝPOČTU:

Pro úspěšné ukončení výpočtu musí být splněny následující podmínky:

- hodnoty Residual (míry konvergence) musí klesat a zároveň mít malý rozptyl hodnot Residual (ustálený průběh),
- rychlost vzduchu v místě největších rychlostních změn, tj. v prostoru za vozidlem, musí být ustálená (tzn. v rozptylu 0,1 m/s),
- hodnoty klonivého momentu, odporové a vztlakové síly musí být ustálené.

Jak již bylo popsáno výše, jednou z podmínek ukončení výpočtu je ustálení rychlosti za vozidlem. Ke snímání rychlosti vzduchu je nutno vložit do modelu kouli z příkazového stromu *Derived parts* → *New Part* → *Section* → *Sphere*. Koule o \varnothing 100 mm byla vložena ve vzdálenosti přibližně 0,5 m za vozidlem a 0,5 nad vozovkou. Aby koule snímala rychlost, je nutno tuto fyzikální vlastnost ke kouli přiřadit příkazem *Reports* → *New Report* → *Area Averaged*.

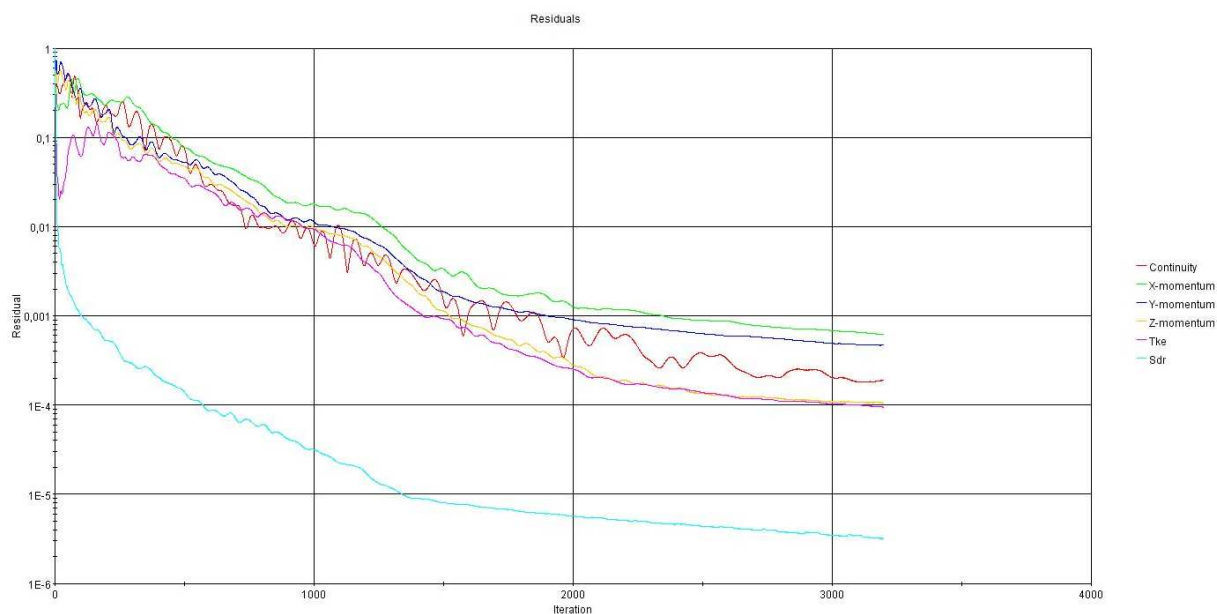


Obr. 45 Koule pro snímání rychlosti umístěná za vozidlem

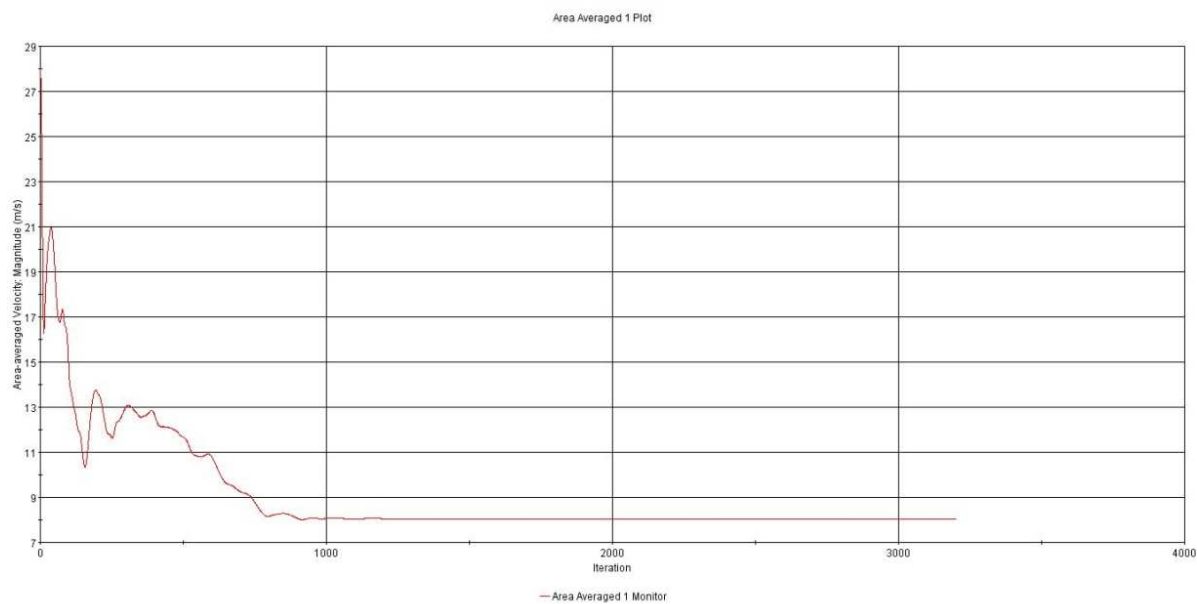
Před samotným spuštěním výpočtu je dobré zapnout funkci automatického ukládání příkazem *Auto Save* z nabídky *File* → *Auto Save*. Je zde možno nastavit frekvenci ukládání po uplynutí časového intervalu či určitého počtu iterací.



Výpočet byl ukončen po 3200 iteracích. Hodnota residuů klesla pod hranici 10^{-3} , rychlost snímaná za vozidlem byla ustálená, stejně jako průběh M_Y , F_D a F_L .



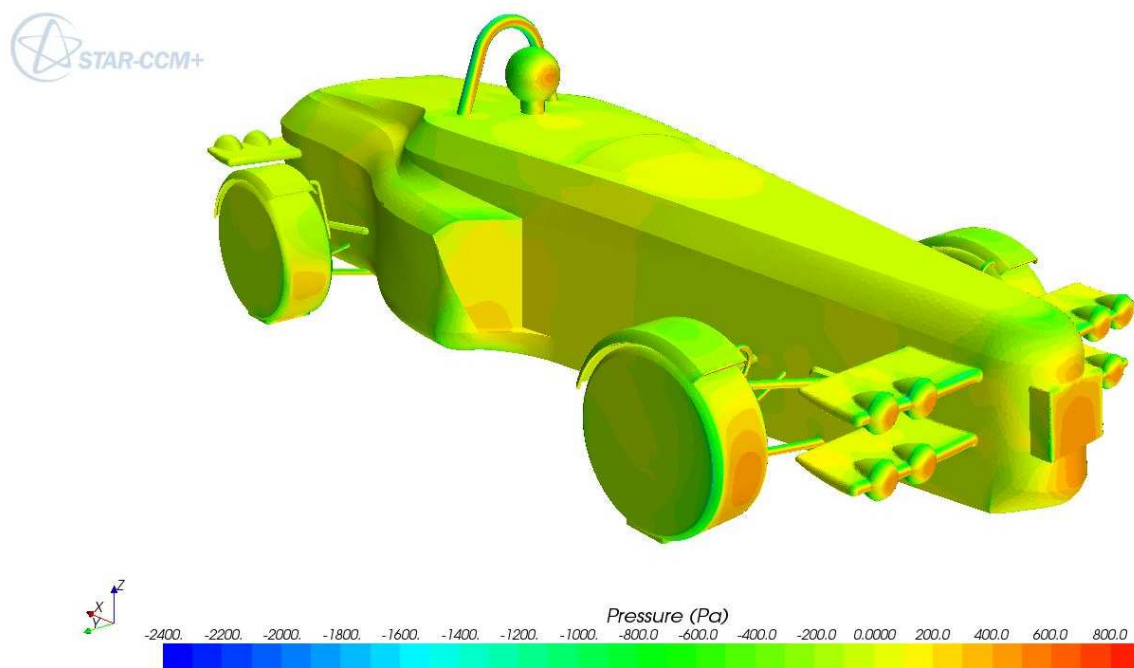
Obr. 46 Průběh Residual hodnot



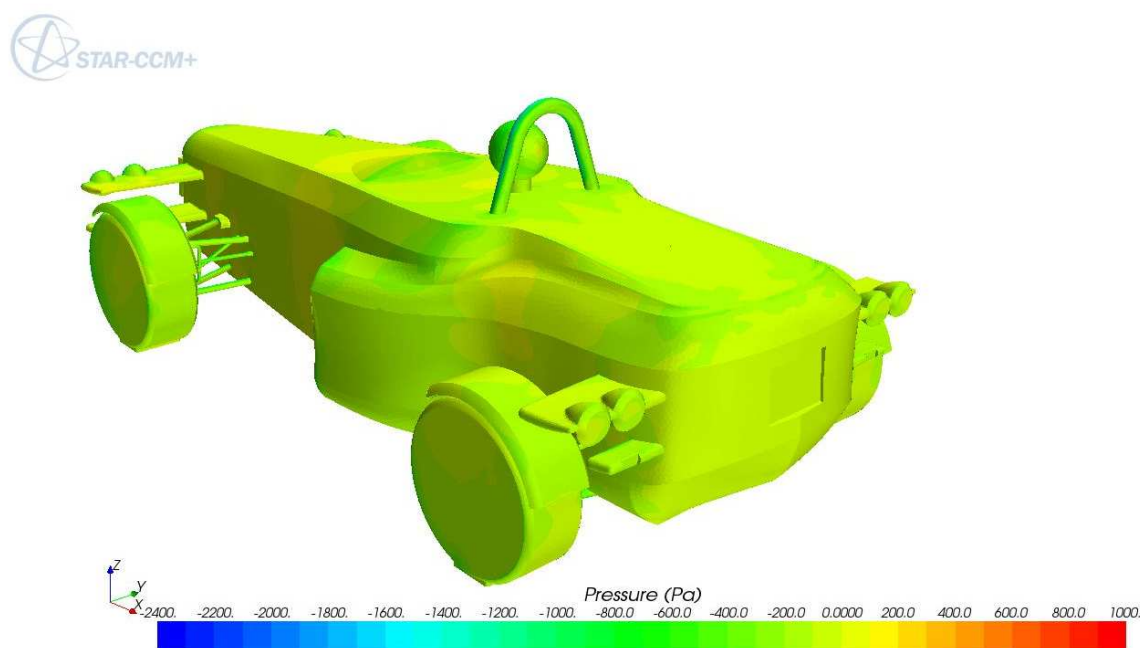
Obr. 47 Průběh ustálení rychlosti snímané koulí za vozidlem



7.4 ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ

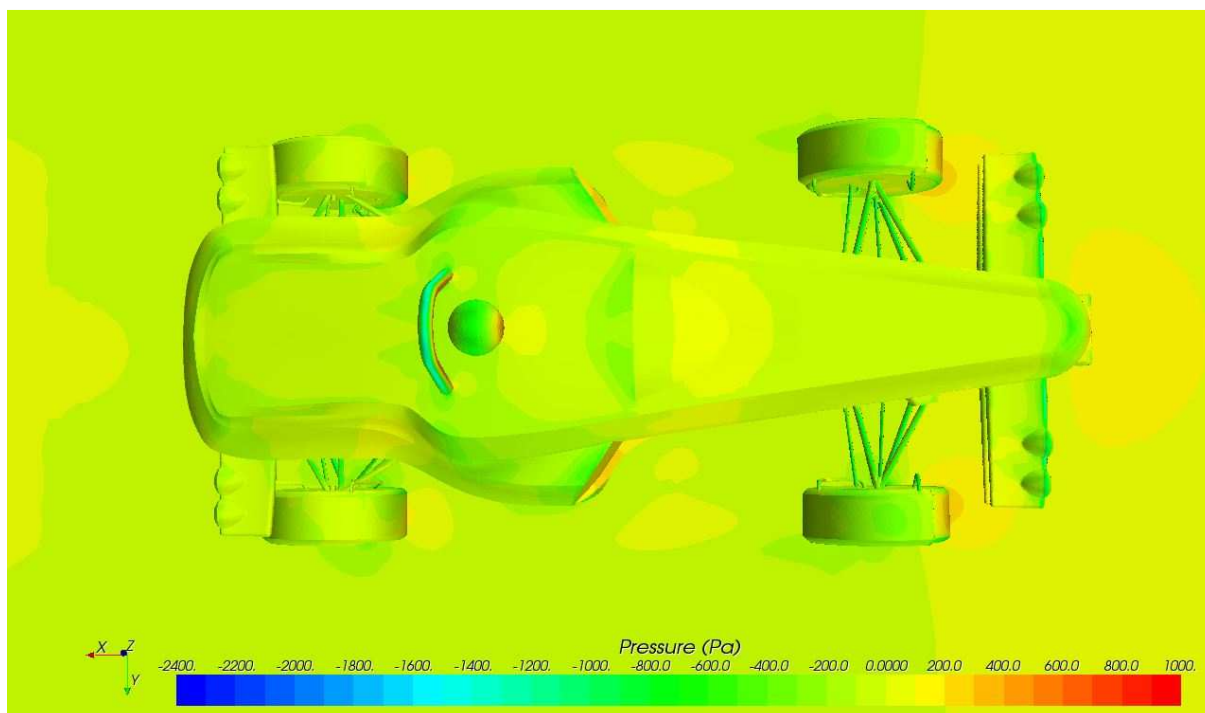


Obr. 48 Tlakové zatížení vozidla při rychlosti 28 m/s, pohled 1

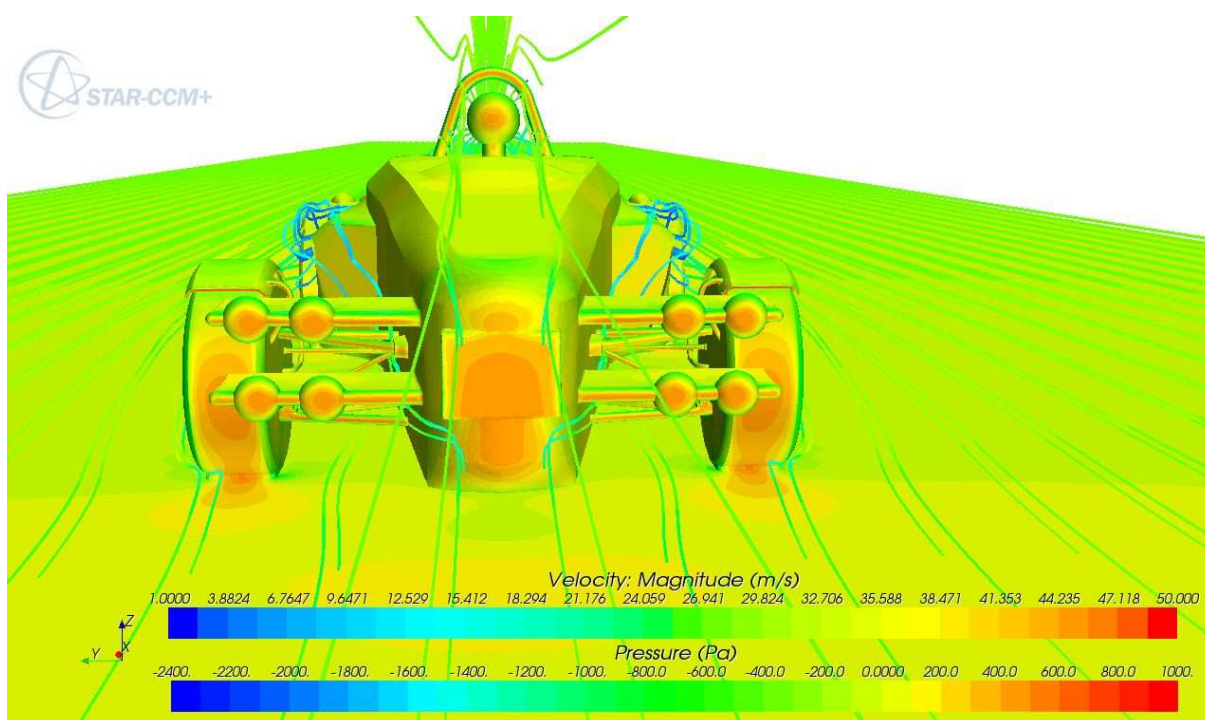


Obr. 49 Tlakové zatížení vozidla při rychlosti 28 m/s, pohled 2

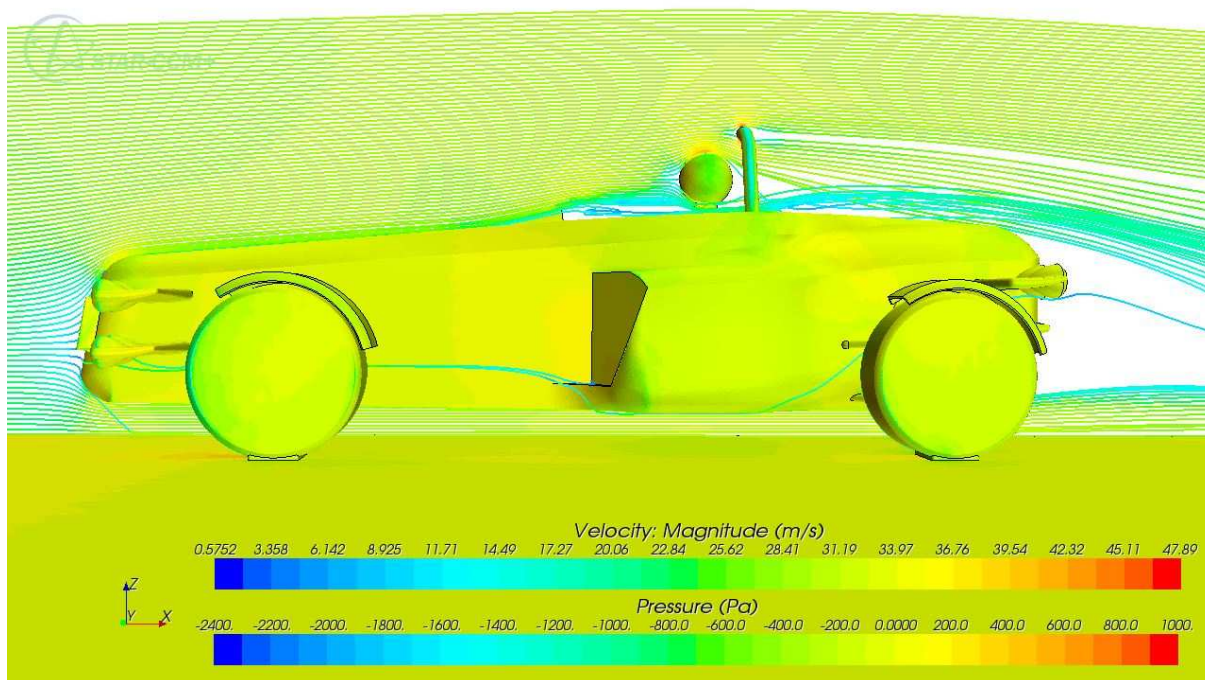
Nejvíce tlakově zatíženým místem je čelní plocha blatníku. Zde tlak dosahuje hodnot 882,79 Pa. Dalšími více tlakově namáhanými místy jsou kola, přilba řidiče, čelní plocha světlometů a čelní plocha přední části karoserie.



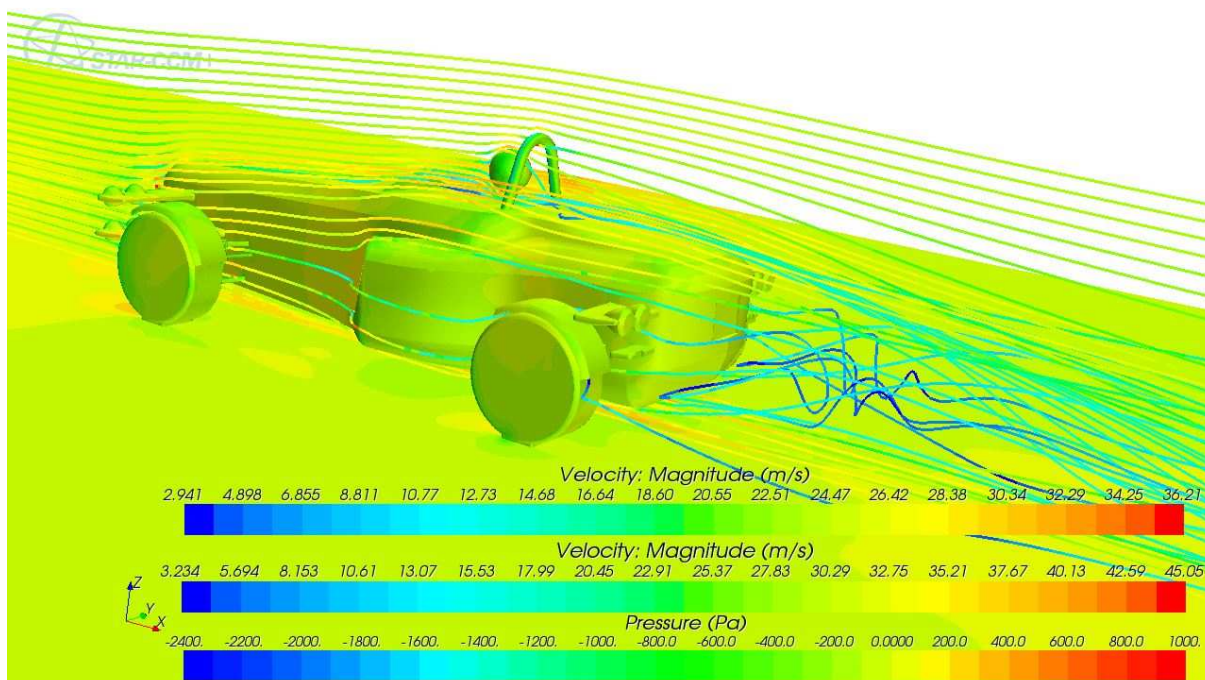
Obr. 50 Tlaky působící na vozidlo a okolní vozovku



Obr. 51 Proudnice obtékající vozidlo, čelní pohled



Obr. 52 Proudnice obtékající vozidlo, boční pohled



Obr. 53 Turbulentní proudění za vozidlem



8 VÝPOČTY PŘIDRUŽENÉ AERODYNAMICE

Protože bylo počítáno s polovičním modelem vozidla, je nutné výsledná zatížení a klonivý moment z výpočtového programu vynásobit dvěma.

8.1 VÝPOČET AERODYNAMICKÝCH KOEFICIENTŮ

Vztah vyjadřující výpočet aerodynamického odporu:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot S_x \cdot v^2 \quad (14)$$

Kde: F_D je aerodynamický odpor, ρ je hustota vzduchu, C_D je koeficient aerodynamického odporu, S_x je čelní plocha vozidla a v je rychlost vzduchu (rychlost vozidla).

Hodnoty zjištěné z výpočtového programu:

F_D	391,412 N
F_L	84,496 N
M_Y	269,49 Nm
S_x	1,475932 m ²
ρ	1,18415 kg/m ³
v	28 m/s

Tento vztah je možno použít i pro výpočet aerodynamického vztlaku. Na vozidlo nepůsobí boční vítr, proto bude hodnota boční síly nulová. Výpočet aerodynamických koeficientů C_D a C_L je možný úpravou výše uvedeného vzorce pro aerodynamický odpor.

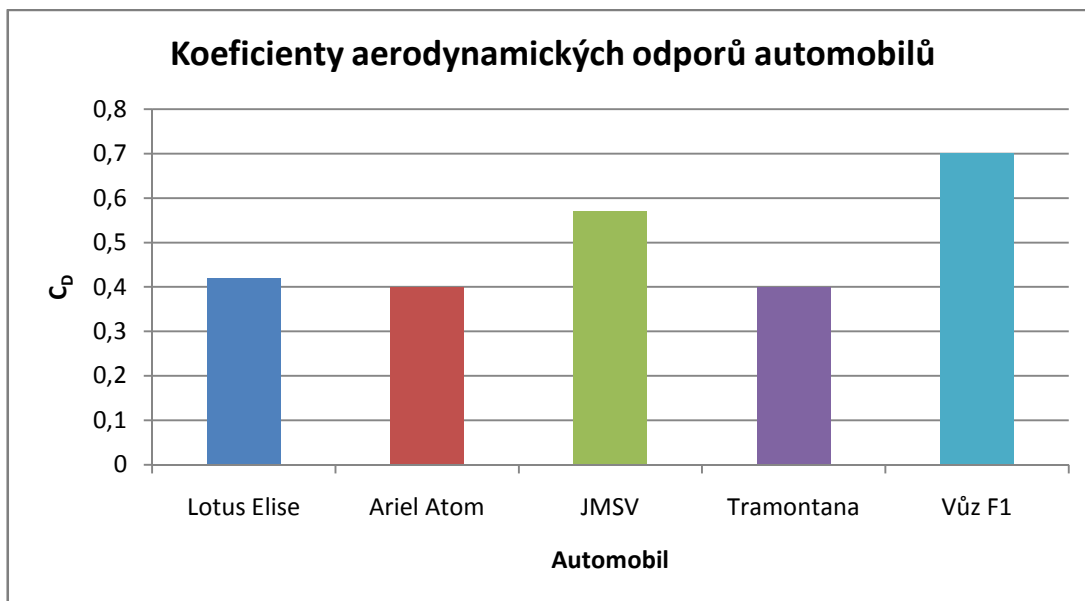
$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot S_x \cdot v^2} \quad (15)$$

Výpočet hodnot C_D a C_L dle vzorce č. 16:

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot S_x \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 391,412}{1,18415 \cdot 1,475932 \cdot 28^2} = 0,571$$

$$C_L = \frac{2 \cdot F_L}{\rho \cdot S_x \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 84,496}{1,18415 \cdot 1,475932 \cdot 28^2} = 0,123$$

Aerodynamický koeficient odporu odpovídá vozidlům s nekrytými koly, jak je patrné z níže uvedeného grafu. Koeficient aerodynamického odporu dosahuje vyšších hodnot kvůli nekrytým kolům a otevřenému kokpitu řidiče. Koeficient aerodynamického vztlaku je kladný, na vozidlo působí vztlak.



Graf 1. Srovnání koeficientů aerodynamických odporů vozidel zmíněných v této práci

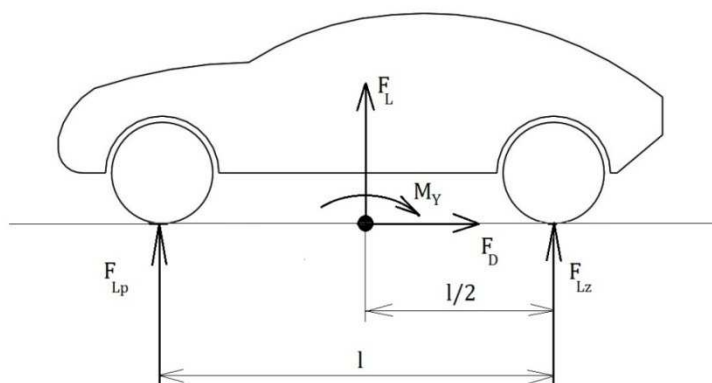
Kde: JMSV značí jednomístné sportovní vozidlo, jež bylo vytvořeno v této diplomové práci.

U automobilu Tramontana je uvedena hodnota C_D pro specifikaci vozidla s uzavřeným kokpitem. U vozidel formule 1 se C_D pohybuje v rozmezí $0,7 \div 1,1$ v závislosti na nastavení přitlaku na vozidle.

Zdroje koeficientů aerodynamického odporu: [38], [39], [40], [3].

8.2 ZATÍŽENÍ NÁPRAV VLIVEM AERODYNAMICKÝCH SIL

Aerodynamické síly působící na vozidlo byly vztahovány k souřadnému systému umístěnému do podélné roviny symetrie vozidla, poloviční délky rozvoru a v rovině vozovky. Z výpočetního programu je možno odečíst hodnoty sil F_D , F_L a klonivého momentu M_Y . Pro zjištění zatížení jednotlivých náprav je vztlaková síla F_L a moment M_Y nahrazena vztlakovými silami F_{Lp} , F_{Lz} působícími na nápravy vozidla.



Obr. 54 Zatížení vozidla aerodynamickými silami



Pro výpočet platí, že součet vztlakových sil na obou nápravách dá celkovou vztlakovou sílu:

$$F_L = F_{LP} + F_{LZ} \quad (16)$$

Momentová rovnováha k souřadnému systému v polovině rozvoru:

$$-M_Y = -F_{LP} \cdot \frac{l}{2} + F_{LZ} \cdot \frac{l}{2} \quad (17)$$

Vyjádření hledaných neznámých F_{LP} a F_{LZ} z rovnice č. 17:

$$F_{LP} = F_L - F_{LZ} \quad (18)$$

$$F_{LZ} = F_L - F_{LP} \quad (19)$$

F_{LP} vyjádřený rovnicí č. 19 byl dosazen do rovnice č. 18 pro vyjádření F_{LZ} . Konečná úprava vztahu:

$$F_{LZ} = -\frac{M_Y}{l} + \frac{F_L}{2} \quad (20)$$

$$F_{LZ} = -\frac{269,49}{2,5} + \frac{84,496}{2} = -65,548 \text{ N}$$

Stejným způsobem byl vyjádřen vztah pro F_{LP} , tj. dosazením F_{LZ} (vztah č. 20) do rovnice č.18. Konečná úprava vztahu:

$$F_{LP} = \frac{M_Y}{l} + \frac{F_L}{2} \quad (21)$$

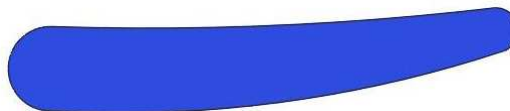
$$F_{LP} = \frac{269,49}{2,5} + \frac{84,496}{2} = 150,044 \text{ N}$$

Dle vypočtených výsledků je zřejmé, že na zadní nápravu působí přítlak, což je výhodné pro lepší přenos hnacího momentu na vozovku. Na přední nápravu působí vztlak, který by mohl negativně ovlivňovat jízdní vlastnosti vozidla.



9 AERODYNAMICKÁ OPTIMALIZACE MODELU

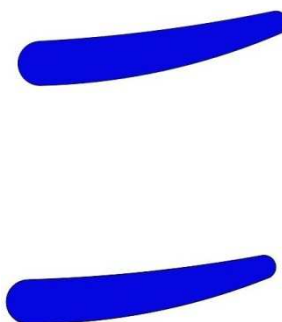
Cílem aerodynamické optimalizace bylo zmenšit široké rozpětí mezi vztlakem na přední nápravě a přítlakem na zadní nápravě. Hlavní konstrukčním komponentem, na který bylo v této práci zaměřeno, byla přední přítláčná křídla vozidla. Na předních přítláčných křídlech byly provedeny 3 úpravy.



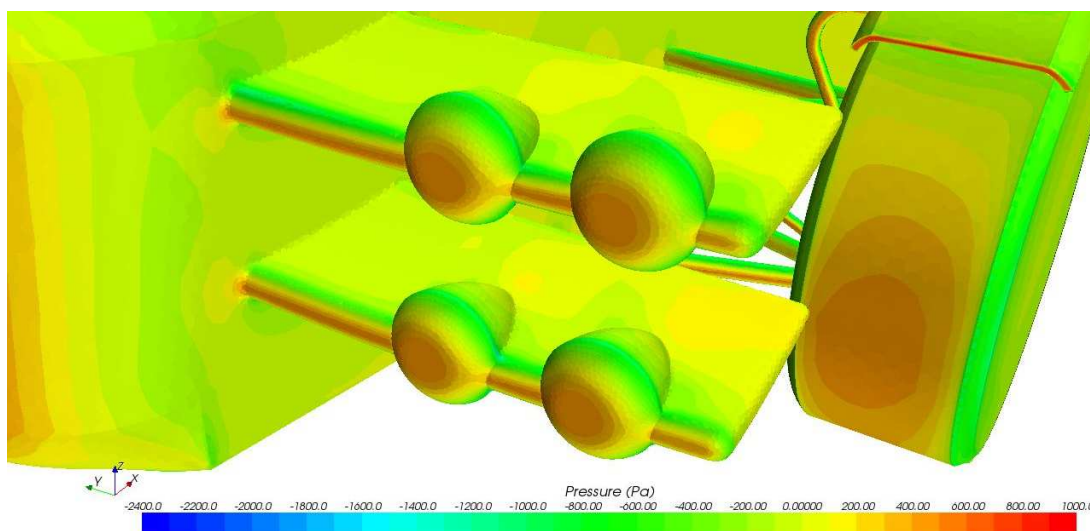
Obr. 55 Profil křídla, původní varianta

9.1 PRVNÍ VARIANTA OPTIMALIZACE

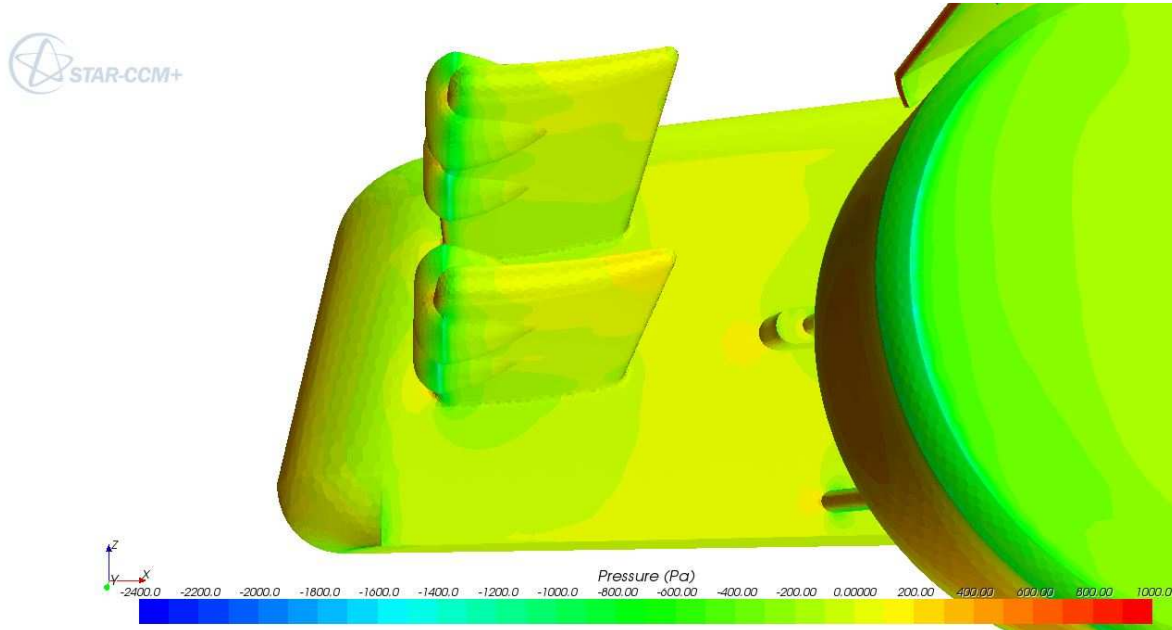
První úpravou byla změna sklonu natočení předních křídel vůči vozovce. Vztlaková síla na přední nápravě poklesla o přibližně 30 N, avšak přítláčná síla na zadní nápravě stoupla, stejně jako aerodynamický odpor.



Obr. 56 Profily křídel a jejich změna natočení vůči vozovce, varianta 1



Obr. 57 Tlakové zatížení předních křídel první varianty modelu , pohled 1



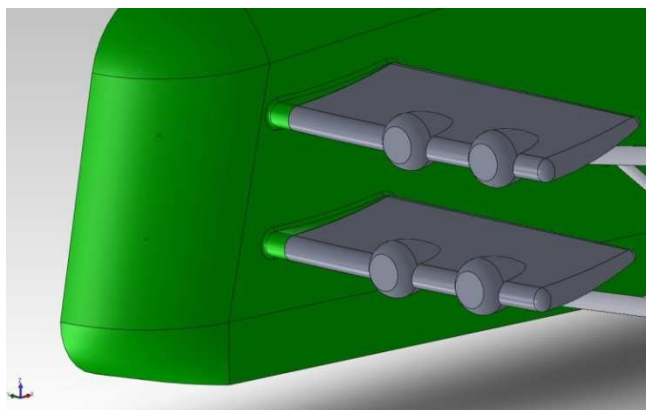
Obr. 58 Tlakové zatížení předních křídel první varianty modelu , pohled 2

Tab. 20 Vztlakové (přítlačné) síly působící na křídla vozidla, první varianta

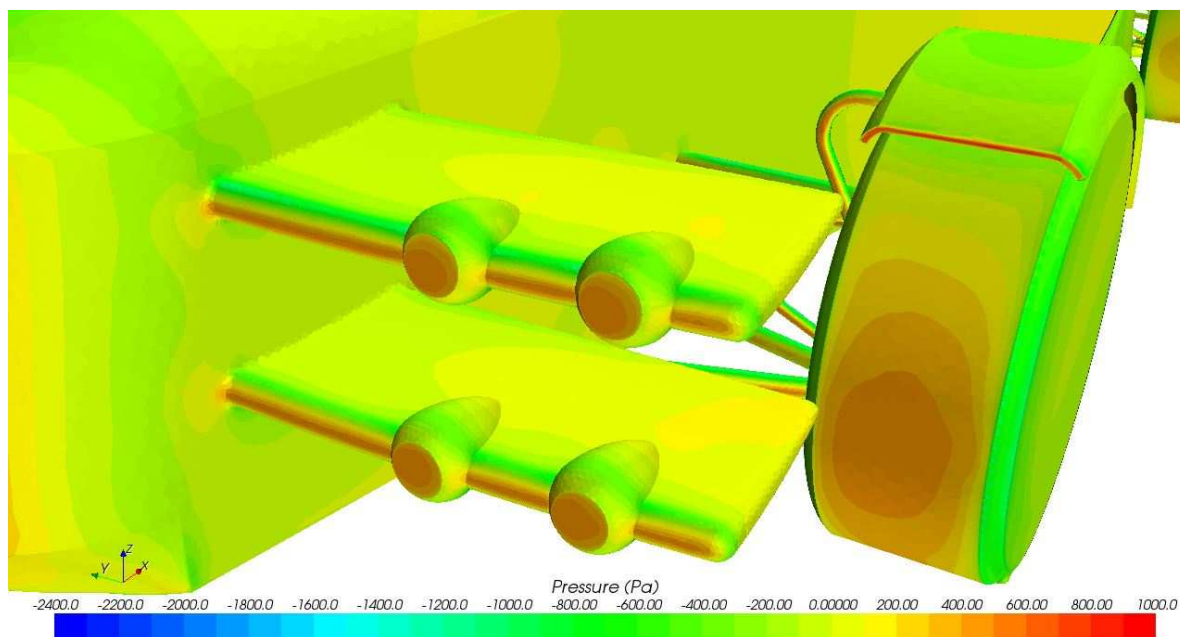
Křídlo	F_L [N]
Přední horní	0,16
Přední spodní	-2,37
Zadní horní	-0,91
Zadní spodní	-0,12

9.2 DRUHÁ VARIANTA OPTIMALIZACE

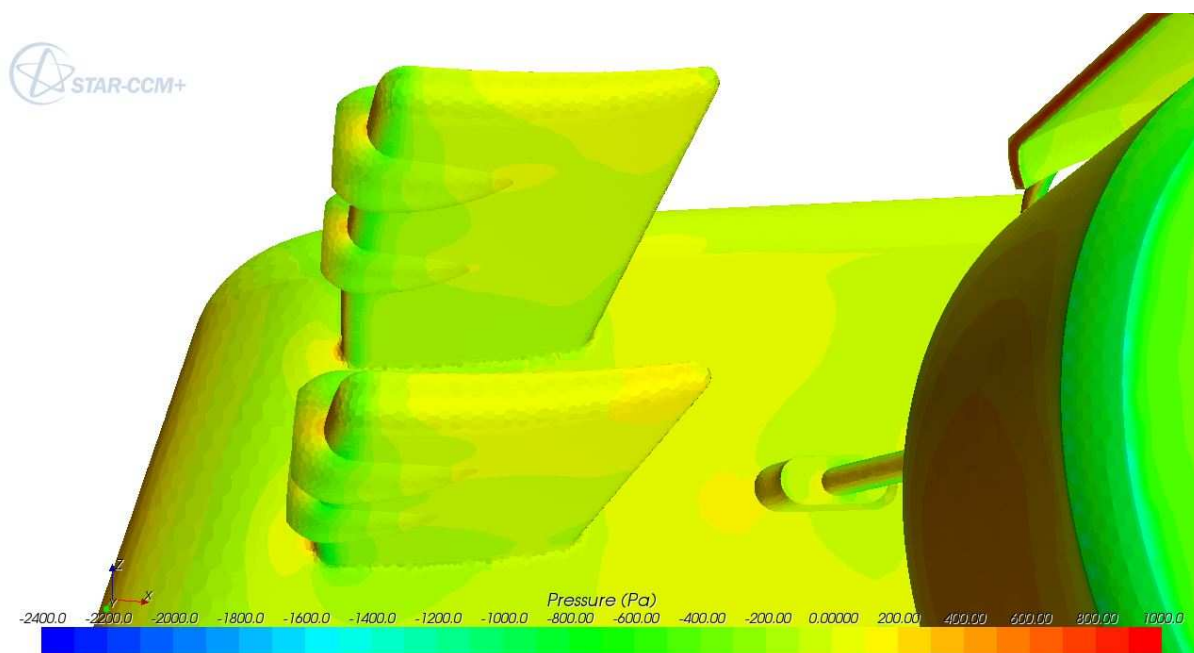
Druhá úprava vzala v potaz, že zdrojem rozdílných hodnot by mohla být velikost tvarování křídel v oblasti uchycení světlometů. Došlo ke zmenšení tvaru křídel v oblasti světlometů, jejichž rozměry však zůstaly zachovány. Poloha křídel vůči sobě byla také zachována. Tato varianta přinesla snížení vztlaku na přední nápravě o 16,7 N. Přítlak na zadní nápravě se změnil nepatrně.



Obr. 59 Druhá varianta



Obr. 60 Tlakové zatížení předních křidel druhé varianty modelu , pohled 1



Obr. 61 Tlakové zatížení předních křidel druhé varianty modelu , pohled 2

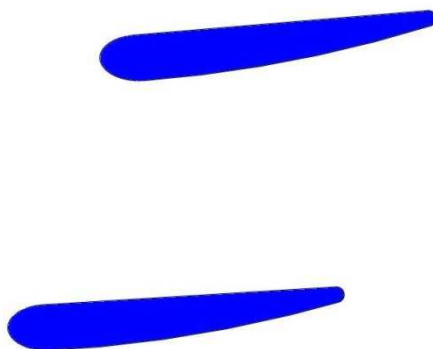
Tab. 21 Vztlakové (přítlačné) síly působící na křídla vozidla, druhá varianta

Křídlo	F_L [N]
Přední horní	-3,72
Přední spodní	-4,59
Zadní horní	-0,18
Zadní spodní	-0,54



9.3 TŘETÍ VARIANTA OPTIMALIZACE

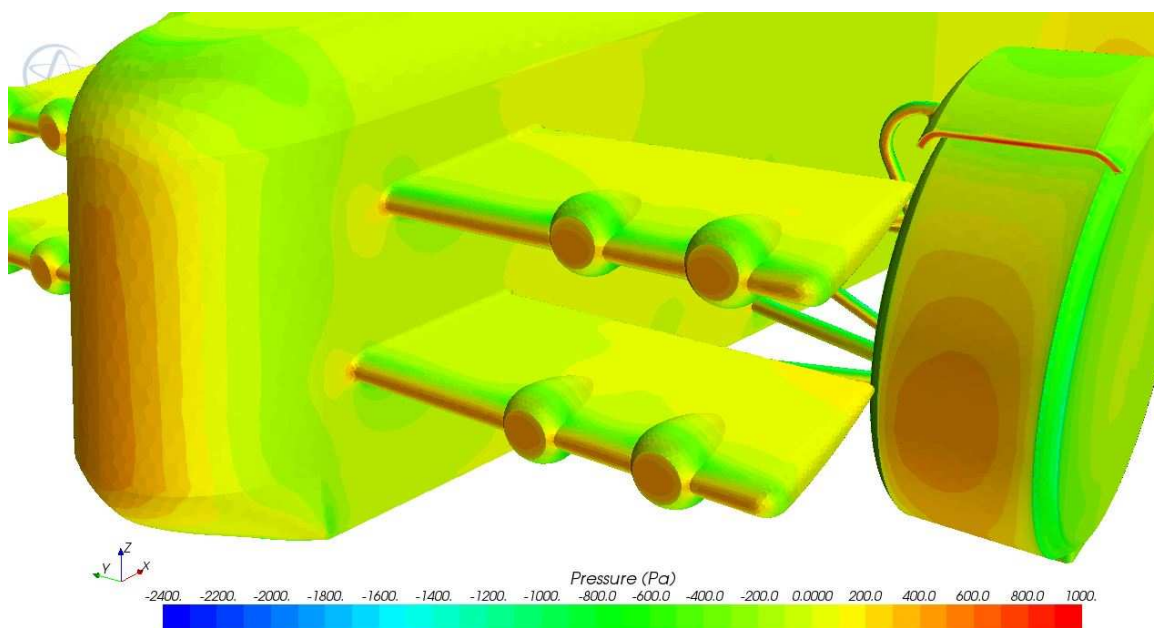
Ve třetí variantě byl přepracován tvar křídel a zároveň změněn sklon předního horního přítláčného křídla vůči spodnímu přítláčnému křídlu. Horní křídlo má vůči vozovce sklon $6,67^\circ$ a dolní $2,84^\circ$. Touto variantou došlo ke generování přítlaku na všech křídlech, kromě zadního spodního křídla, a zároveň ke zmenšení vztlaku na přední nápravě o $10,9\text{ N}$ oproti předchozí variantě.



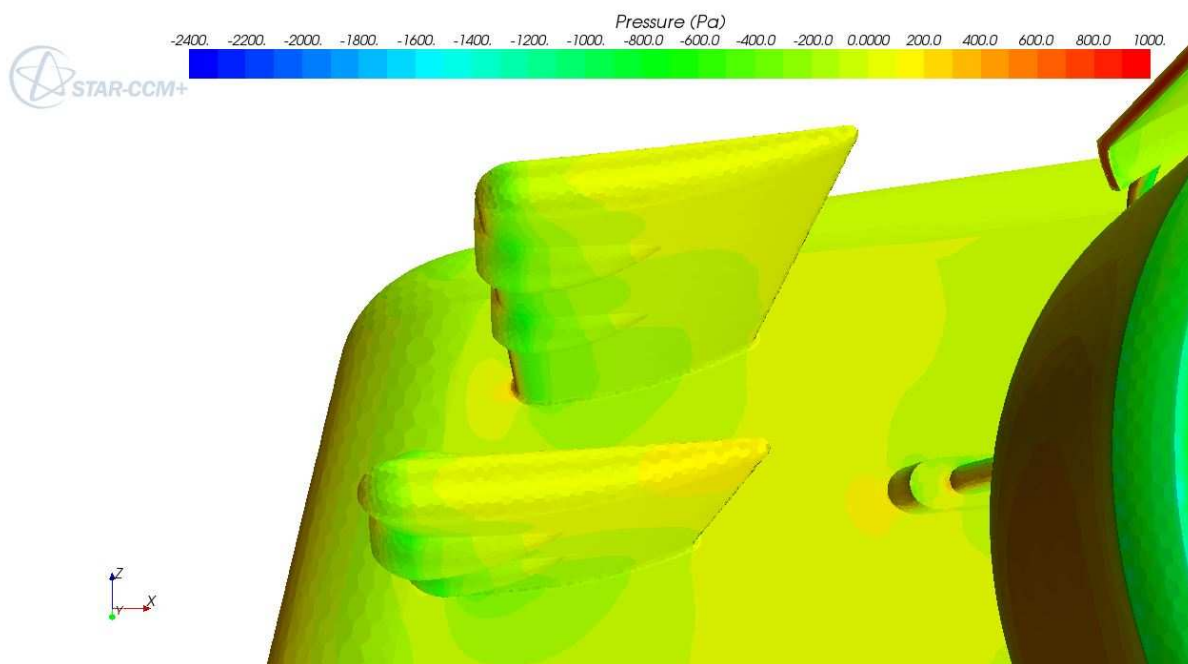
Obr. 62 Profily křídel a jejich vzájemné umístění, třetí varianta

Tab. 22 Vztlakové (přítláčné) síly působící na křídla vozidla, třetí varianta

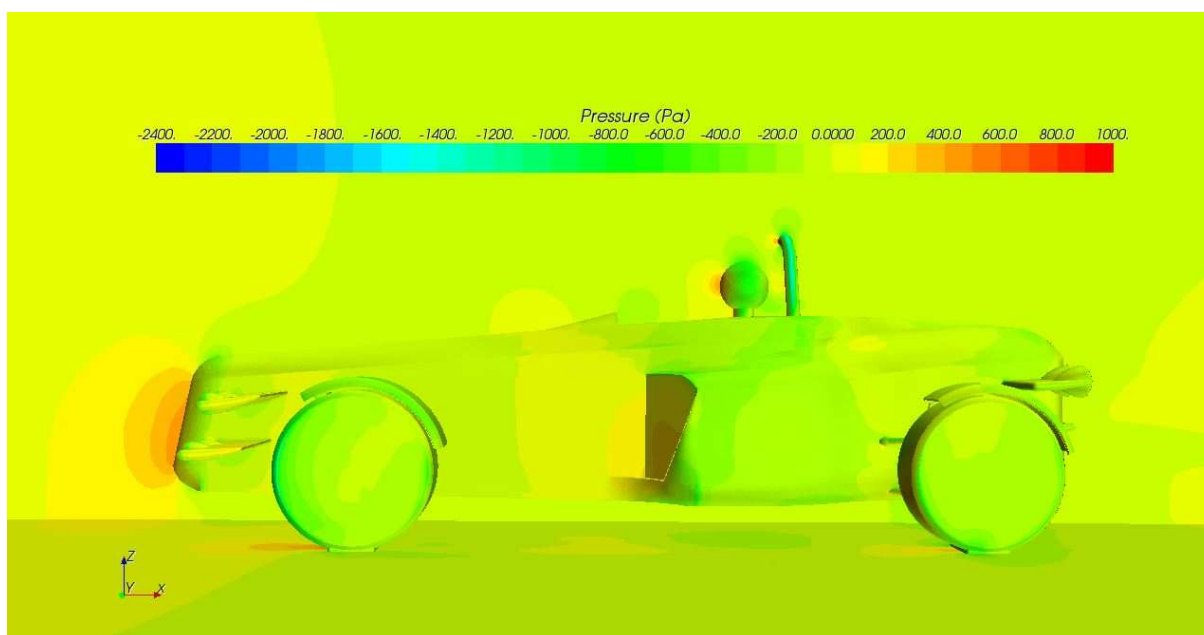
Křídlo	F_L [N]
Přední horní	-9,26
Přední spodní	-12,10
Zadní horní	-2,40
Zadní spodní	0,38



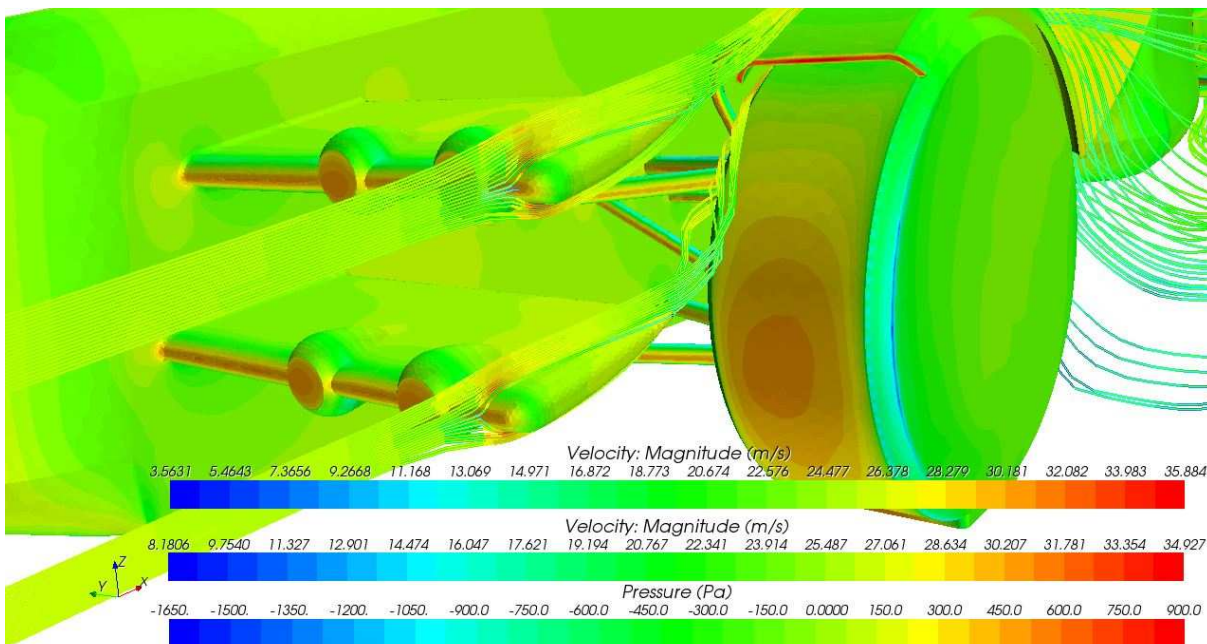
Obr. 63 Tlakové zatížení předních křídel třetí varianty modelu, pohled 1



Obr. 64 Tlakové zatížení předních křídel třetí varianty modelu , pohled 2

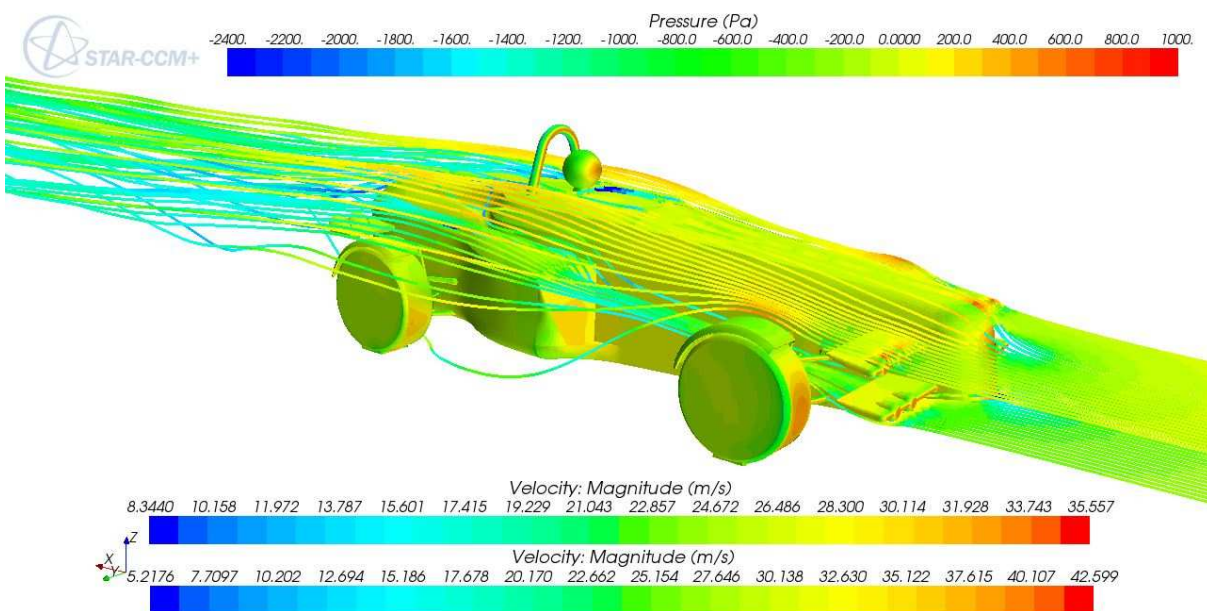


Obr. 65 Tlakové zatížení vozidla a jeho okolí v rovině symetrie vozidla, třetí varianta



Obr. 66 Proudnice vzduchu obtékající křídla, třetí varianta

Z výše uvedeného obrázku je patrný únik proudnic vzduchu, který způsobuje pokles rychlosti vzduchu na boční hraně křídla a tím i poklesu přitlaku (viz Obr. 63, Obr. 64). Řešením by mohlo být vytvoření bočnic po stranách křídel, které by usměrňovaly proudění vzduchu podél boku křídla.



Obr. 67 Proudnice obtékající automobil, třetí varianta

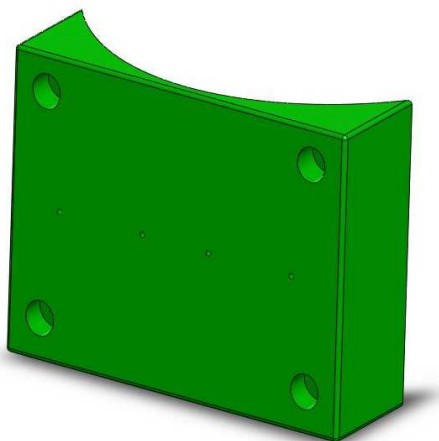


9.4 VYHODNOCENÍ OPTIMALIZACE

Tab. 23 Vyhodnocení aerodynamických veličin jednotlivých variant

Varianta	F_D [N]	F_L [N]	M_Y [Nm]	C_D	C_L	F_{LP} [N]	F_{LZ} [N]
Počáteční stav	391,412	84,496	269,490	0,571	0,123	150,044	-65,548
Varianta 1	408,680	16,758	279,640	0,596	0,024	120,238	-103,484
Varianta 2	413,001	0,536	258,260	0,603	0,001	103,572	-103,036
Varianta 3	404,436	4,316	226,296	0,590	0,006	92,676	-88,360

Pro konečnou variantu byl proveden výpočet aerodynamického vlivu odnímatelné podpory, jež je umístěna na čelní ploše první části karoserie a slouží pro upevnění podložky s registrační značkou.



Obr. 68 Odnímatelná podpora

Tab. 24 Porovnání vlivu odnímatelné podpory na aerodynamické vlastnosti vozidla

Model vozidla	F_D [N]	F_L [N]	M_Y [Nm]	C_D	C_L	F_{LP} [N]	F_{LZ} [N]
Bez odnímatelné podpory	404,436	4,316	226,296	0,590	0,006	92,676	-88,360
S odnímatelnou podporou	405,008	38,604	177,948	0,591	0,056	90,482	-51,878

Dle předpokladu aerodynamický odpor u vozidla s odnímatelnou podporou stoupl. Avšak snížila se vztlaková síla na přední nápravě, přítláčná podpora generovala přítlak 3 N. Přítlak na zadní nápravě se snížil přibližně o 36,48 N.

Z výpočetního hlediska nejlépe konvergovala Residua u počáteční a první varianty modelu. U varianty modelu s odnímatelnou podporou začal průběh veličin F_D , F_L a M_Y oscilovat od uběhnutí 1100 iterací a zůstal nezměněn i při 2400 iteracích. Hodnoty jsou proto pouze orientační. Hlavním důvodem nedostatečné konvergence by mohla být nedostačující hustota sítě v okolí vozidla.



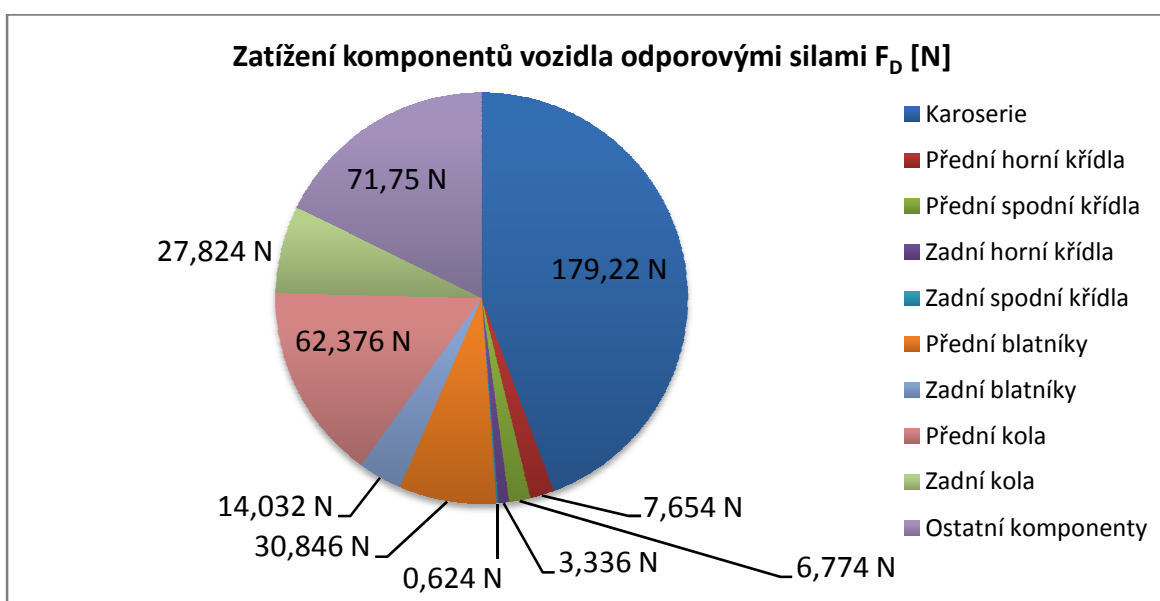
Tab. 25 Aerodynamické veličiny působící na jednotlivé části vozidla u počáteční varianty

Počáteční varianta	F_D [N]	F_L [N]	M_Y [Nm]
Karoserie	171,820	-8,158	172,160
Přední horní křídlo	4,767	0,510	0,392
Přední spodní křídlo	4,239	-1,420	-4,051
Zadní horní křídlo	1,057	-1,156	6,312
Zadní spodní křídlo	0,693	-0,165	-0,580
Přední blatník	13,928	25,416	37,204
Zadní blatník	4,740	5,595	-5,278
Přední kolo	30,826	10,930	23,995
Zadní kolo	11,386	5,370	-2,600

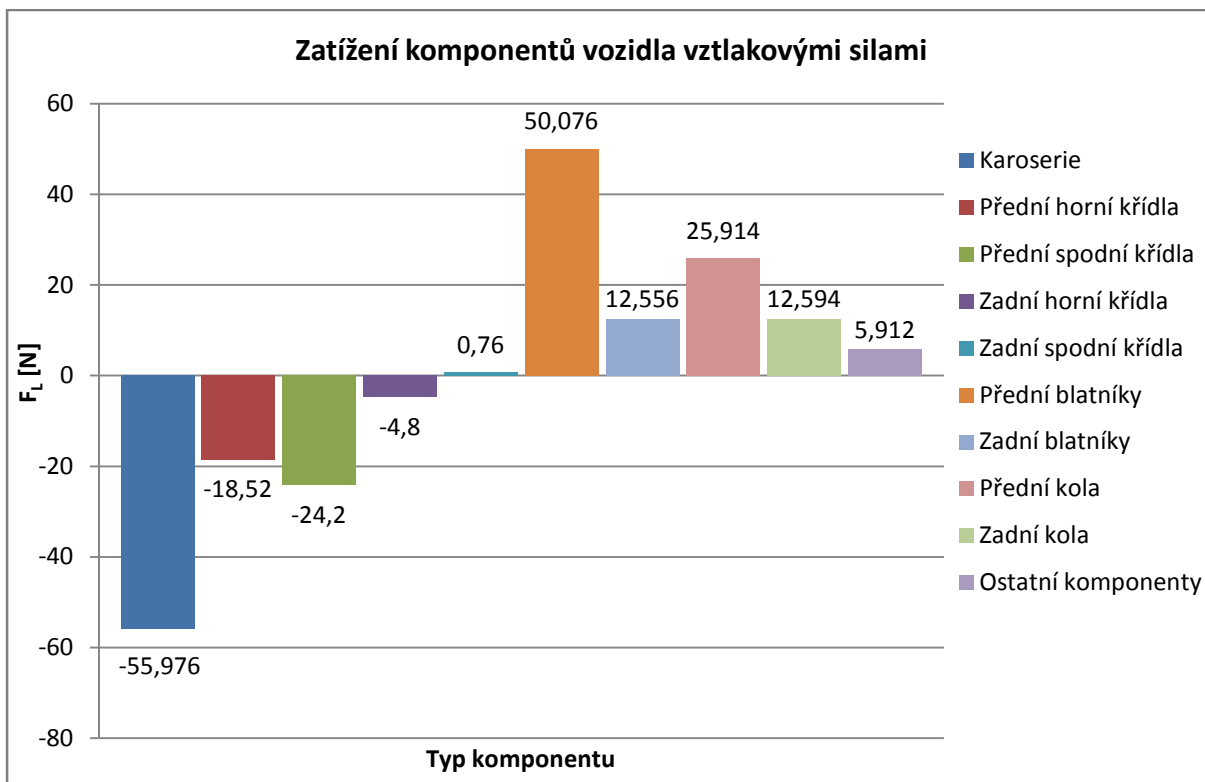
Tab. 26 Aerodynamické veličiny působící na jednotlivé části vozidla u třetí varianty

Varianta 3	F_D [N]	F_L [N]	M_Y [Nm]
Karoserie	179,220	-55,976	154,720
Přední horní křídlo	3,827	-9,260	-14,080
Přední spodní křídlo	3,387	-12,100	-21,365
Zadní horní křídlo	1,668	-2,400	7,053
Zadní spodní křídlo	0,312	0,380	-0,295
Přední blatník	15,423	25,038	37,448
Zadní blatník	7,016	6,278	-4,419
Přední kolo	31,188	12,957	26,613
Zadní kolo	13,912	6,297	-2,949

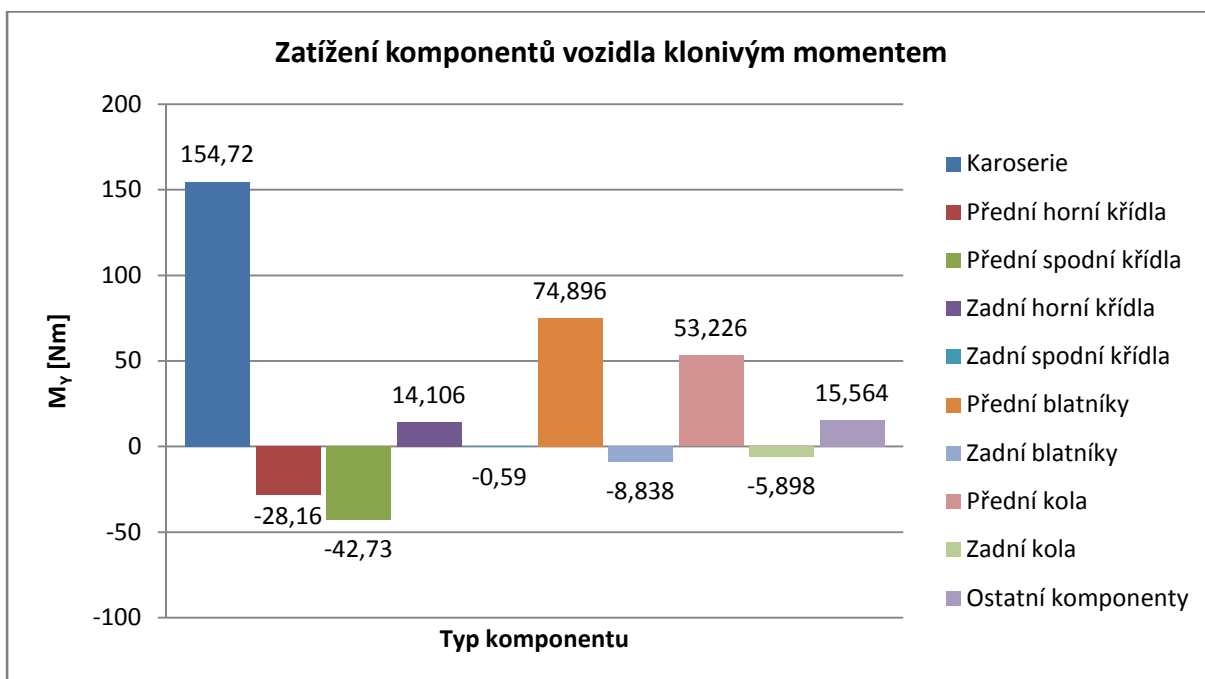
Z uvedených výsledků vyplývá, že proudění kolem vozidla bylo negativně ovlivňováno tvarem křídel a velikostí uložení světlometů. Rozdíly jsou patrné při porovnání přítláčných sil působících na karoserii u počáteční a třetí varianty modelu.



Graf 2. Porovnání zatížení jednotlivých komponentů vozidla odporovými silami, třetí varianta



Graf 3. Porovnání zatížení jednotlivých komponentů vozidla vztlakovými silami, třetí varianta



Graf 4. Porovnání zatížení komponentů vozidla klonivým momentem, třetí varianta

Z vypočtených výsledků vyplývá, že velký podíl na odlehčování vozidla mají blatníky a kola. Velký klonivý moment vyskytující se u karoserie vozidla by mohl být způsoben dostatkem přítláčných sil působících na zadní plochy karoserie. Ostatními komponenty jsou myšlena ramena lichoběžníkového zavěšení vozidla, řídicí tyč, záhlavová trubka rámu a hlava řidiče.



ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout karoserii jednomístného sportovního vozidla určeného pro provoz na pozemních komunikacích a k ní příslušný model pro aerodynamickou optimalizaci. Rám vozidla a zavěšení kol použité v modelu pro analýzu proudění byly vypracovány v diplomových pracích Jana Hubáčka a Tomáše Martínka.

Konstrukční návrh vozidla byl proveden dle předepsaných norem pro vozidla určená pro provoz na pozemních komunikacích. V oblasti ergonomie posloužila jako model řidiče postava vymodelovaná dle americké normy SAE J833a. Pro pohon vozidla byla použita modifikace motocyklového motoru Suzuki Hayabusa, osmiválcový motor H1V8.

Karoserie sportovních automobilů se vyrábějí jako nenesoucí. Jako materiál pro výrobu karoserií se používá EP, kterou je možno prokládat zpevňujícími vlákny, např. skelnými či uhlíkovými. Výpočty namáhání v této práci byly provedeny pro uchycení zadních křídel. Výchozím materiálem byla samotná EP, protože EP se zpevňujícími vlákny není normalizovaný materiál. Pro získání materiálových charakteristik by bylo nutné vyrobít zkušební vzorek. Tloušťka karoserie byla 5 mm. Maximální napětí vyskytující se na sestavě karoserie a křídel bylo 0,951 MPa. Mez pevnosti v ohybu pro EP je 87 MPa. Tloušťka karoserie je tedy více než dostatečná. Při použití kompozitních materiálů by bylo možno tloušťku karoserie zmenšit a tím dosáhnout úspory hmotnosti karoserie.

Model vozidla byl následně analyzován při rychlosti vzduchu 28 m/s. Aerodynamický součinitel odporu odpovídá vozidlům formulového typu. Jeho výši ovlivňují rotující kola, blatníky a otevřený kokpit řidiče. Při výpočtu zatížení náprav byl na přední nápravě zjištěn aerodynamický vztlak o velikosti 150,044 N, který by mohl negativně ovlivňovat jízdní vlastnosti vozidla.

Za účelem snížení aerodynamického vztlaku na přední nápravě byly provedeny tři optimalizace tvaru a umístění křídel vůči vozovce, jež přinesli snížení vztlaku na přední nápravě o 57,4 N oproti počáteční variantě.

Veškeré cíle diplomové práce byly splněny. Tato práce by mohla být dále rozvíjena např. sledováním vztlakových (přítlačných) sil působících na vozidlo a jeho jednotlivé části v závislosti na rychlosti vozidla, popřípadě provedením více měření pro výpočet vztlakových (přítlačných) sil působících na nápravy vozidla v závislosti na natočení křídel vůči sobě nebo vozovce.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] KOVANDA, B. – KOVANDA, J.: Aerodynamika vozidel. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1999. 50 s. ISBN 80-01-01942-X.
- [2] VLK, F.: Karosérie motorových vozidel. 1. vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000. 243 s. ISBN 80-238-5277-9.
- [3] KATZ, J.: Race car aerodynamics: designing for speed. 2. vyd. Cambridge: Bentley Publishers, 2006. 316 s. ISBN 0-8376-0142-8.
- [4] DAVIES, G.: Materials for automobile bodies. 2. vyd. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. 277 s. ISBN 0-7506-5692-1.
- [5] APETAUR, M. – HANKE, M. – ROST, M. – KEJVAL, Z.: Karosérie. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1993. 149 s. ISBN 80-01-00995-6.
- [6] JANALÍK, J.: Obtékání a odpor těles. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická Univerzita Ostrava, 2008. 108 s. ISBN 978-80-248-1911-2. Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Obtekani.pdf>>
- [7] LEINVEBER, J. – VÁVRA, P.: Strojnické tabulky. 2. vyd. Úvaly: Albra, 2005. 907 s. ISBN 80-7361-011-6.
- [8] VANČURA, J.: Výpočet aerodynamiky závodního automobilu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš, Dr.
- [9] VLK, F.: Dynamika motorových vozidel. 2. vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2003. 243 s. ISBN 80-239-0024-2.
- [10] BLEJCHAŘ, T.: Turbulence, modelování proudění – CFX. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická Univerzita Ostrava, 2010. 263 s. Dostupné z WWW: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence_ESF_v4.pdf>
- [11] Česko. Ministerstvo dopravy a spojů. Vyhláška č. 341 ze dne 11. července 2002 o schvalování technické způsobilosti a o technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích. Dostupné z WWW: <http://www.mdcz.cz/NR/ronlyres/39735AA2-912B-45E4-A6B0-6B4EBE21BE74/0/341_posl.pdf>
- [12] Česko. Ministerstvo dopravy a spojů. Vyhláška č. 243 ze dne 29. června 2001 o registraci vozidel.
- [13] EU. Směrnice Rady 76/756/EHS ze dne 27. července 1976 o sblížení právních předpisů členských států týkajících se montáže zařízení pro osvětlení a světelnou signalizaci motorových vozidel a jejich přípojných vozidel.
- [14] EU. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2003/97/ES ze dne 10. listopadu 2003 o sblížení právních předpisů členských států týkajících se schvalování typu zařízení pro nepřímý výhled a vozidel vybavených těmito zařízeními.



- [15] MARTÍNEK, T. Zavěšení kol sportovního automobilu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lubor Zháňal.
- [16] HUBÁČEK, J. Rám malosériového sportovního automobilu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lubor Zháňal.
- [17] Aerodynamika [online]. [citováno 2011-01-21]. Dostupné z WWW: <<http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/aerodynamics.php>>
- [18] Hydrodynamika [online]. [citováno 2011-02-06]. Dostupné z WWW: <<http://radek.jandora.sweb.cz/f06.htm>>
- [19] Techmania [online]. c2008. [citováno 2011-01-31]. Dostupné z WWW: <http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d656368616e696b61h&key=276>
- [20] Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. [online]. c2009. [citováno 2011-02-01]. Dostupné z WWW: <<http://www.vzlu.cz/cz/aktivity/aerodynamika-mereni-v-aerodynamickych-tunelech/nizkorychlostni-tunely>>
- [21] Servind s.r.o. [online]. [citováno 2011-03-30]. Dostupné z WWW: <http://www.servind.cz/downloads/1222959419_plasty-a-jejich-lakovani.pdf>
- [22] Bac Mono [online]. [citováno 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <http://www.bac-mono.com/gallery_lightroom.php>
- [23] Palatov Motorsport [online]. [citováno 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.palatov.com/cars/dp1gallery.html>>
- [24] Kaipan [online]. [citováno 2011-04-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.kaipan.cz>>
- [25] Česká hlava [online]. [citováno 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.ceskahlava.cz/index.php?mainpager=page&id=209&csum=cfb13a8>>
- [26] Ariel Motor Company [online]. [citováno 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.arielmotor.co.uk/>>
- [27] Carguide blog [online]. [citováno 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://carguideblog.com/4942/2011-lotus-elise-fuel-efficient-rated-47-mpg>>
- [28] Katalog automobilů [online]. [citováno 2011-04-16]. Dostupné z WWW: <<http://lotus.katalog-automobilu.cz/automobil/lotus-elise-r-1-8-16v-141kw/>>
- [29] K-1 Engineering [online]. [citováno 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <www.k-1attack.com>



- [30] Swedespeed forums [online]. [citováno 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://forums.swedespeed.com/showthread.php?145000-S40-v8/page2>>
- [31] Hartley Enterprises [online]. [citováno 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.h1v8.com>>
- [32] Hella KGaA Hueck & Co. [online]. [citováno 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <http://b2c.hella.com/b2c_hella/b2c/init.do?language=en&country=en&shop=de_com&scenario.xcm=hella_com&areaID=FD7E024BD166265BE10000000A089C70>
- [33] Ministerstvo dopravy [online]. c2006. [citováno 2011-04-13] <<http://www.mdcz.cz/NR/rdonlyres/D59EB03B-3985-4C7F-BB09-1D36FBBEBA7C/0/regtab.pdf>>
- [34] Motoservis Trávníček [online]. [citováno 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://eshop.motoservis-travnicek.cz/zrcatka-269/univerzalni-280/vicma-zrcatko-e-91d-ri-16079.html>>
- [35] Mouldlife [online]. [citováno 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <http://mouldlife.co.uk/documents/5/Araldite_LY5052_Aradur_5052_eur_e.pdf>
- [36] AZoM [online]. c2000-2011 [citováno 2011-04-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=764>>
- [37] Tramontana [online]. c2008 [citováno 2011-05-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.tramontanagroup.com>>
- [38] South West Lotus Centre [online]. c2010 [citováno 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.thelotuscentre.com/Lotus.asp>>
- [39] Get car specs [online]. c2010 [citováno 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.getcarspecs.com/ariel/2002-ariel-atom>>
- [40] Serious wheels [online]. c2010 [citováno 2011-05-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.seriouswheels.com/cars/top-2007-Tramontana.htm>>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ABS	[-]	akrylnitril-butadien styrol
c	[m]	rozchod kol
C_D	[-]	koeficient aerodynamického odporu
C_L	[-]	koeficient aerodynamického vztlaku
C_P	[-]	tlakový koeficient
C_Y	[-]	koeficient boční síly
DA	[-]	dodávkové vozidlo
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
EP	[-]	epoxydová pryskyřice
F_D	[N]	aerodynamický odpor
F_L	[N]	aerodynamický vztlak (přítlak)
F_{LP}	[N]	aerodynamický vztlak působící na přední nápravu
F_{LZ}	[N]	aerodynamický vztlak působící na zadní nápravu
F_Y	[N]	aerodynamická boční síla
l	[m]	rozvor náprav
Ma	[-]	Machovo číslo
M_X	[Nm]	klopivý moment
M_Y	[Nm]	klonivý moment
M_Z	[Nm]	zatáčivý moment
NA	[-]	nákladní automobil
OA	[-]	osobní automobil
p	[Pa]	tlak
PA	[-]	polyamid
PC	[-]	polykarbonát
PP	[-]	polypropylen
PVC	[-]	polyvinylchlorid
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
R_e	[MPa]	mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
S	[m ²]	čelní plocha vozidla
S_1	[m ²]	obsah plochy na vstupu do válce



S_2	[m ²]	obsah plochy na výstupu z válce
SA	[-]	sportovní automobil
v_1	[m/s]	rychlost na vstupu do válce
v_2	[m/s]	rychlost na výstupu z válce
v_∞	[m/s]	rychlost volného vzduchu
ρ_1	[kg/m ³]	hustota látky vstupující do válce
ρ_2	[kg/m ³]	hustota látky vystupující z válce



SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Proudnice obtékající profil křídla [3]	12
Obr. 2 Rovnice kontinuity	13
Obr. 3 Schéma mezní vrstvy na obtékaném tělese [6]	14
Obr. 4 Laminární proudění [3]	15
Obr. 5 Turbulentní proudění [3]	15
Obr. 6 Schéma vzniku úplavu a rychlostní profily v místech A a B [3]	15
Obr. 9 Tlak působící na stojící a otáčející se kolo [3]	18
Obr. 7 Proudění vzduchu okolo stojících kol [3].....	18
Obr. 8 Proudění vzduchu okolo rotujících kol [3].....	18
Obr. 10 Mezní vrstva mezi vozidlem a vozovkou [6]	19
Obr. 11 Uzavřený aerodynamický tunel s otevřeným měřicím prostorem [20].....	20
Obr. 12 Síly a momenty působící na vozidlo	21
Obr. 13 Schéma nenesoucí karoserie [2]	22
Obr. 14 Schéma polonosné karoserie [2].....	23
Obr. 15 Schéma samonosné karoserie [2]	23
Obr. 16 Bac Mono [22]	27
Obr. 17 Palatov dp1 [23]	28
Obr. 18 Kaipan 14 [25].....	28
Obr. 19 Ariel Atom [26].....	29
Obr. 20 Lotus Elise [27]	30
Obr. 21 K-1 Attack [29]	30
Obr. 22 Tramontana, pohled 1 [37]	31
Obr. 23 Charakteristické rozměry jednomístného sportovního automobilu.....	31
Obr. 24 Tělesné rozměry řidiče dle SAE J833a [2].....	32
Obr. 25 Polohy sedadel pro různé kategorie vozidel [2]	33
Obr. 26 Motor H1V8 [30].....	34
Obr. 27 Výkonová a momentová charakteristika motoru H1V8 [31]	34
Obr. 28 Světlomet Hella [32]	35
Obr. 29 Zadní světlo [32]	36
Obr. 30 Registrační značka (280 x 200) mm [33]	36
Obr. 31 Zpětné zrcátko Vicma [34].....	36
Obr. 32 Karoserie sportovního automobilu, pohled 1	37
Obr. 33 Karoserie sportovního automobilu, pohled 2	37
Obr. 34 První díl karoserie	38
Obr. 35 První varianta uchycení předních křídel.....	38
Obr. 37 Druhá část karoserie	39
Obr. 36 Druhá varianta uchycení předních křídel	39
Obr. 38 Uchycení zadních křídel.....	40
Obr. 39 Statické namáhání druhé části karoserie, pohled 1.....	41
Obr. 40 Statické namáhání druhé části karoserie, pohled 2.....	41
Obr. 41 Obr. 42 Statické namáhání zadního horního křídla a druhé části karoserie	42
Obr. 42 Polyhedrální síť a Prism Layer Mesh.....	43
Obr. 43 Hraniční křivky na modelu vozidla.....	44
Obr. 44 Zředěná síť v okolí modelu a zjemněná síť v oblasti hraničních křivek modelu.....	45
Obr. 45 Koule pro snímání rychlosti umístěná za vozidlem	48
Obr. 46 Průběh Residual hodnot	49
Obr. 47 Průběh ustálení rychlosti snímané koulí za vozidlem	49



Obr. 48 Tlakové zatížení vozidla při rychlosti 28 m/s, pohled 1.....	50
Obr. 49 Tlakové zatížení vozidla při rychlosti 28 m/s, pohled 2.....	50
Obr. 50 Tlaky působící na vozidlo a okolní vozovku	51
Obr. 51 Proudnice obtékající vozidlo, čelní pohled	51
Obr. 52 Proudnice obtékající vozidlo, boční pohled	52
Obr. 53 Turbulentní proudění za vozidlem	52
Obr. 54 Zatížení vozidla aerodynamickými silami	54
Obr. 57 Tlakové zatížení předních křídel první varianty modelu , pohled 1.....	56
Obr. 55 Profil křídla, původní varianta	56
Obr. 56 Profily křídel a jejich změna natočení vůči vozovce, varianta 1.....	56
Obr. 58 Tlakové zatížení předních křídel první varianty modelu , pohled 2.....	57
Obr. 59 Druhá varianta	57
Obr. 60 Tlakové zatížení předních křídel druhé varianty modelu , pohled 1	58
Obr. 61 Tlakové zatížení předních křídel druhé varianty modelu , pohled 2.....	58
Obr. 62 Profily křídel a jejich vzájemné umístění, třetí varianta	59
Obr. 63 Tlakové zatížení předních křídel třetí varianty modelu , pohled 1.....	59
Obr. 64 Tlakové zatížení předních křídel třetí varianty modelu , pohled 2.....	60
Obr. 65 Tlakové zatížení vozidla a jeho okolí v rovině symetrie vozidla, třetí varianta.....	60
Obr. 66 Proudnice vzduchu obtékající křídla, třetí varianta.....	61
Obr. 67 Proudnice obtékající automobil, třetí varianta	61
Obr. 68 Odnímatelná podpora	62



SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Profily obtékání [3]	17
Tab. 2 Materiálové charakteristiky vybraných plastů [7].....	26
Tab. 3 Materiálové charakteristiky vláknových kompozitů [36]	26
Tab. 4 Technické údaje automobilu Bac Mono [22].....	27
Tab. 5 Technické údaje automobilu Palatov dp1 [23].....	28
Tab. 6 Technické údaje automobilu Kaipan 14 [24]	29
Tab. 7 Technické údaje automobilu Ariel Atom 2 [26]	29
Tab. 8 Technické údaje automobilu Lotus Elise [28].....	30
Tab. 9 Technické údaje automobilu K-1 Attack [29].....	30
Tab. 10 Tělesné rozměry dle SAE J833a [2].....	32
Tab. 11 Výkonové a rozměrové parametry motoru H1V8 [31]	33
Tab. 12 Materiálové charakteristiky materiálu Araldite® LY 5052 pro tah [35]	40
Tab. 13 Materiálové charakteristiky materiálu Araldite® LY 5052 pro ohyb [35]	40
Tab. 14 Velikost elementů pro vysítování modelu	44
Tab. 15 Souřadnice bodů, tvořících kvádry pro změnu hustoty sítě	45
Tab. 16 Podmínky charakterizující proudění v tunelu	46
Tab. 17 Fyzikální vlastnosti vzduchu při teplotě 300 K.....	46
Tab. 18 Vlastnosti jednotlivých oblastí na modelu	47
Tab. 19 Souřadnice kol vůči lokálnímu souř. systému.....	47
Tab. 20 Vztahové (přítlačné) síly působící na křídla vozidla, první varianta	57
Tab. 21 Vztahové (přítlačné) síly působící na křídla vozidla, druhá varianta.....	58
Tab. 22 Vztahové (přítlačné) síly působící na křídla vozidla, třetí varianta	59
Tab. 23 Vyhodnocení aerodynamických veličin jednotlivých variant	62
Tab. 24 Porovnání vlivu odnímatelné podpory na aerodynamické vlastnosti vozidla.....	62
Tab. 25 Aerodynamické veličiny působící na jednotlivé části vozidla u počáteční varianty..	63
Tab. 26 Aerodynamické veličiny působící na jednotlivé části vozidla u třetí varianty.....	63



SEZNAM PŘÍLOH

P 1 Vizualizace sportovního vozidla



P 1 Vizualizace sportovního vozidla

