



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

AERODYNAMICKÁ INTERAKCE DVOU VOZIDEL

AERODYNAMIC INTERACTION OF TWO VEHICLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. GÁBOR TÁRNOK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN VANČURA

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Gábor Tárnok

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

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

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

Aerodynamická interakce dvou vozidel

v anglickém jazyce:

Aerodynamic interaction of two vehicles

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pomocí zvoleného CFD systému proveďte analýzu proudění kolem zjednodušeného modelu dvou vozidel při vzájemné jízdě za sebou.

Cíle diplomové práce:

- 1) Výpočet aerodynamických zatížení samotného vozidla
- 2) Analýza vlivu souběžné jízdy dvou totožných vozidel za sebou
- 3) Posouzení výsledků

Seznam odborné literatury:


W. H. Hucho - Aerodynamics of Road Vehicles

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Vančura

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

V Brně, dne 19.11.2010




prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan



ABSTRAKT

Diplomová práce je věnována problematice aerodynamická interakce dvou vozidel, modelování pomocí CFD softwaru, jak se chová vozidlo v úplavu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aerodynamický odpor, aerodynamický tunel, CFD, Fluent, proudění, tlak, křídlo, difuzor

ABSTRACT

The master's thesis deals with the aerodynamic interaction of two vehicles, modelling in CFD software, how the vehicle behaves in leeward.

KEYWORDS

Aerodynamic drag, wind tunnel, CFD, Fluent, convection, pressure, wing, diffuser



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TÁRNOK, G. Aerodynamická interakce dvou vozidel. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 82 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26. května 2011

.....

Jméno a přímení



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto **Ing. Jan Vančura**, za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce, a rodině za to, že mne podporovali při studiích.



OBSAH

Úvod	10
1.1 Aerodynamické síly působící na těleso v proudě vzduchu a jejich popis	12
1.2 Vznik aerodynamických sil.....	13
1.3 Aerodynamika vozidla	16
1.3.1 Aerodynamický odpor vozidla	16
1.3.2 Přítlak vozidla.....	17
1.4 Síly působící na vozidlo.....	18
1.5 Začátky aerodynamiky u automobilů	19
1.6 Přístupy v aerodynamice vozidel	19
2 Aerodynamický tunel	23
2.1 Funkce aerodynamického tunelu	23
2.2 Testování aerodynamiky	23
3 Výpočet aerodynamických vlastností vozidla	27
3.1 Program ANSYS FLUENT pro simulace proudění	27
3.1.1 Síťování, numerika a paralelní zpracování.....	27
3.1.2 Dynamické a pohybující se sítě	27
3.1.3 Zpracování výsledků a export dat.....	28
4 Vlastní postup výpočtu	29
4.1 ICEM	31
4.1.1 Importování modelu	32
4.1.2 Oprava geometrie	32
4.1.3 Tunel.....	36
4.1.4 Tvorba sítě modelu vozidla	37
4.1.5 Výsledná síť.....	43
4.1.6 Vytvoření sítě pro dvě vozidla.....	44
4.1.7 Export sítě do Fluentu	46
4.2 Simulace proudění v programu Fluent.....	47
4.2.1 Nastavení ve Fluentu	47
4.2.2 Výpočet.....	52
4.2.3 Export výpočet do CFD-Post.....	54
4.3 Zobrazení výsledku v programe CFD-Post	54
4.3.1 Výsledky výpočtu varianty A.....	55
5 Prvky které ovlivňují aerodynamiku vozidla.....	68
5.1 Difuzor	68
5.1.1 Sací efekt	68



5.1.2	Dvojitý difuzor	69
5.1.3	Výsledky výpočtu ve FLUENTu.....	70
5.2	Zadní křídlo.....	72
5.2.1	Moderní křídla	73
5.2.2	Vyhodnocení výsledku	74
	Výsledky všech výpočtu.....	75
	Závěr.....	78
	Seznam použitých zkratk a symbolů	81



ÚVOD

U závodních aut hraje aerodynamika mnohem důležitější roli než pneumatiky nebo motor. Rychlost auta je otázkou správného nastavení. Motor je samozřejmě jedním z hlavních faktorů úspěchu, ale při špatném nastavení auta a nesprávné aerodynamice se jeho koňské síly ztrácejí ve větru.

Aerodynamika je velmi důležitá zejména proto, že kvalitní přítlak tlačí auto k trati, a umožňuje tak zkrácení brzdné vzdálenosti a zvyšování rychlosti v zatáčkách. Experti určili, že až 80 % přilnavosti auta generuje přítlak a jen 20 % je dílem pneumatik.

Nejlepším klíčem k úspěchu je totiž správný kompromis. V tomto případě se hledá kompromis mezi co největším přítlakem a co nejnižším odporem vzduchu. Neexistuje totiž žádné ideální nastavení, které by bylo účinné na všech okruzích. Ve skutečnosti neexistuje ani takové nastavení, které by vyhovovalo všem sekcím jedné tratě. Pokud to tedy máme zhodnotit zjednodušeně - tajemství úspěchu se skrývá v maximálním přiblížení se ideálu a lepšímu nastavení, než jaké se podaří soupeřům.

Na hledání ideálního nastavení se používají aerodynamické tunely, protože testovat každý nový element na trati by bylo příliš drahé. Ale ani tunely nejsou laciné, a proto se nejdříve využívá modelů na počítači v CFD programech.



1 AERODYNAMIKA

Aerodynamika je obor fyziky, speciálně mechaniky, který zkoumá silové působení na těleso, které je obtékáno proudem vzduchu. Aerodynamika má největší význam v letectví, automobilismu a architektuře.

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

Při obtékání těles proudem vzduchu se na jeho jednotlivých površích více či méně tento vzduch stlačuje, a tím se vytváří nerovnoměrné tlakové pole, které způsobuje silovou nerovnováhu. Tlak vzduchu lze uvažovat třemi způsoby :(3)

Statický tlak

Statický tlak je tlak vyvozený tekutinou za relativního klidu. Je vyvozen tíhou kapaliny. U kapalin se nazývá hydrostatický tlak, u plynů aerostatický tlak. Je-li h výška sloupce tekutiny, ρ hustota tekutiny a g tíhové zrychlení, tak pro statický tlak tekutiny můžeme napsat rovnici: $p = h \cdot \rho \cdot g$ (1).

Význam má hlavně u kapalin, protože plyny mají malou hustotu, a tak i tlak je při malých výškách celkem malý. U letadel již ale se statickým tlakem musíme počítat, protože výška sloupce je velká. (4)

Dynamický tlak

Dynamickým tlakem rozumíme tlak, kterým působí proudící reálná tekutina na relativně klidné těleso, které obtéká, nebo naopak tlakový odpor, který působí na těleso pohybující se v klidné tekutině. Pro ideální tekutinu by teoreticky platilo, že při průtoku ideální tekutiny kolem libovolného tělesa nebo naopak při pohybu tělesa v klidné ideální tekutině by na těleso nepůsobil ani dynamický vztlak, ani odpor. To je tzv. d'Alembertovo paradoxon. Dynamický tlak proudící reálné tekutiny působí proti pohybu, což nazýváme dynamickým odporem, a za určitých podmínek může způsobovat vztlak. Toho se využívá v letectví. Dynamický tlak je p_d dán vztahem $p_d = 1/2 \cdot \rho \cdot v^2$ (2), kde v je rychlost tekutiny a ρ je její hustota. Při proudící kapalině hovoříme o tlaku hydrodynamickém, u proudící vzdušiny (plynu) o tlaku aerodynamickém. (4)

Celkový tlak – je součet statického a dynamického tlaku.

Součet statického a dynamického tlaku je konstantní. Pokud je těleso v klidu (vůči okolnímu vzduchu se nepohybuje), tak dynamický tlak bude nulový podle rovnice 2 a statický tlak maximální. Když se těleso začíná pohybovat, pak dynamický tlak začíná narůstat a statický tlak o tutéž hodnotu klesá. S rostoucí rychlostí roste i dynamický tlak, podle rovnice 2.

Pokud je obtékané těleso asymetrické, proudění vzduchu kolem něj bude také asymetrické a na jedné straně bude rychlost obtékání větší než na straně druhé. Na straně, kde bude nižší rychlost, bude vyšší statický tlak a nižší dynamický tlak, a na druhé straně naopak. (3)

Proudění vzduchu

Částice vzduchu se spojují do proudnic (dráha vybrané částice vzduchu) a ty se spojují do tzv. proudového svazku. Existují 3 typy proudění:

Laminární (ustálené) – proudnice jsou zhruba rovnoběžné (jejich dráhy se nekříží), částice se posouvají, ale nerotují.

Turbulentní (vířivé) – proudnice se vlivem prostředí roztácejí a následně se začínají křížit.

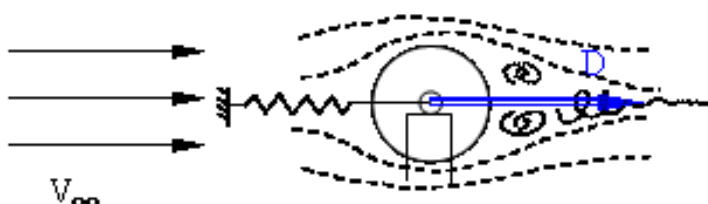


Vírové proudění - krouživý pohyb tekutiny okolo určité křivky, která tvoří jeho osu. Směrem k ose víru dochází zpočátku k růstu rychlosti a poklesu tlaku. V blízkosti osy víru (vírového jádra) dochází vlivem vazkosti (vnitřního tření) k poklesu rychlosti, která je v ose víru nulová. (3)

1.1 AERODYNAMICKÉ SÍLY PŮSOBÍCÍ NA TĚLESO V PROUDU VZDUCHU A JEJICH POPIS

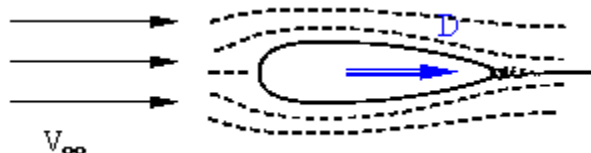
Na těleso, které se pohybuje v tekutině nebo v plynném prostředí, působí aerodynamická síla, kterou můžeme popsat z více hledisek.

Její velikost a směr působení je možno zjistit experimentálními metodami. Symetrické těleso (je symetrické vzhledem proudě vzduchu) vytváří pouze sílu působící ve směru proudě. Tuto sílu budeme nazývat odporovou silou. (2)



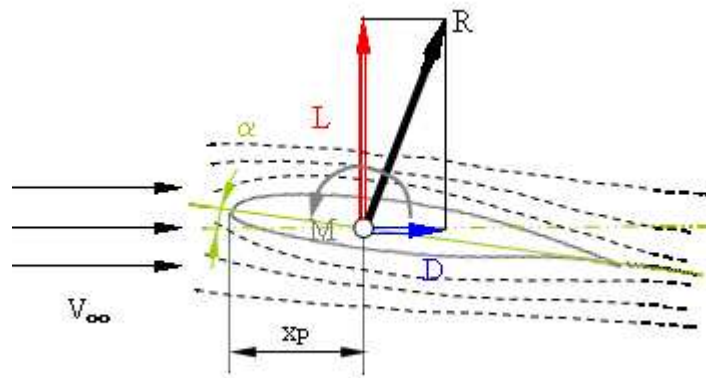
Obr. 1. proudění vzduchu okolo symetrického tělesa (2)

Odporová síla závisí od tvaru obtékaného tělesa. Tvarovými úpravami lze snížit odporovou sílu, což je znázorněno na obrázku 2. (2)



Obr. 2. zlepšený aerodynamický tvar obtékaného tělesa (2)

Na symetrické těleso, které je asymetricky orientované vůči proudění tekutiny nebo plynu, nebo na těleso, které je asymetrické vůči proudění, působí výsledná síla obecná, kterou budeme označovat jako R . Tuto sílu můžeme rozložit do dvou složek, na vztlakovou sílu, která je kolmá na směr proudě a působí směrem nahoru a budeme ji označovat jako L , a na odporovou sílu, kterou označujeme jako D . Ta se promítá do směru rovnoběžného s nabíhající proudem. Při asymetrickém proudění vzniká i křepivý moment M , který musíme vyvážit, jinak by se těleso otočilo ve směru působícího momentu. Síly a moment jsou znázorněny na obrázku 3. (2)



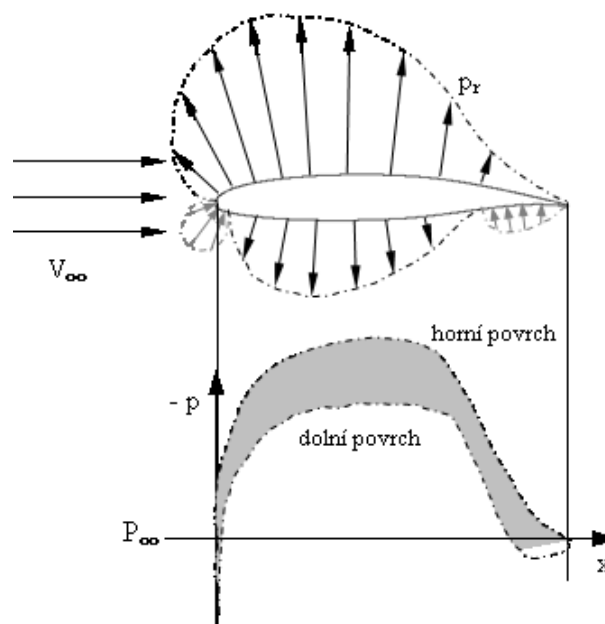
Obr.3. zatížení obtékaného tělesa (2)

Při dalších experimentech bylo zjištěno, že síla závisí od rychlosti proudění a je kvadraticky závislá.

Veličiny, od kterých závisí aerodynamická síla, byly zjištěny po dalších experimentech a jsou to: hustota média, charakteristický rozměr tělesa, rychlost vzduchu v médiu, viskozita média, rychlost proudu. (2)

1.2 VZNIK AERODYNAMICKÝCH SIL

Při dalších experimentech pro zjištění informací o tělese, kolem něhož proudí tekutina, byla zjištěna velikost tlaku na povrchu tělesa. Další experimenty ukázaly, že tlak na povrchu obtékaného tělesa není stálý. Z experimentů tak vyplývá, že je rozdíl mezi spodním a horním povrchem profilu. (2)



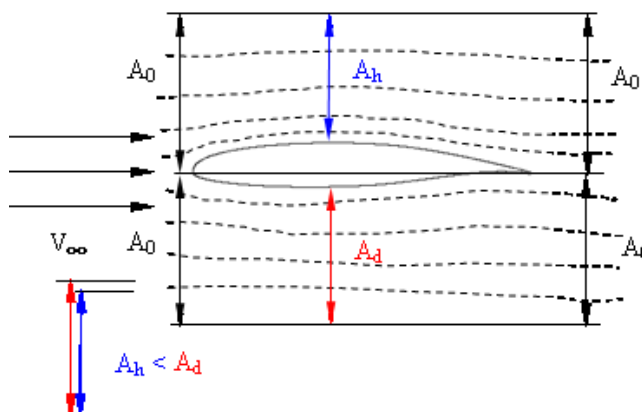
Obr.4. Tlaky na tělese (2)



Na obrázku 4. je znázorněn relativní tlak p_r na povrchu profilu vůči atmosférickému tlaku p_∞ . Složky tlaku jsou vyneseny ve vertikálním směru ve směru y . Výsledná síla je šedá plocha a jde o rozdíl hodnot na horním a dolním povrchu. Její hodnotu můžeme dostat pomocí integrace po hloubce x . (2)

Využijeme Bernoulliho rovnici ($p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{konst.}$) a rovnici kontinuity ($S \cdot v = \text{konst.}$) pro lepší pochopení vzniku sil na tělese. Musíme však poznamenat, že princip vzniku aerodynamických sil je stále dosti obtížný. (2)

Při odvození budeme používat předpoklad, že existuje vzdálenost, od které proudění vzduchu nezávisí na profilu. Dále budeme předpokládat, že proudění je nestlačitelné. (2)



Obr. 5. proudové pole (2)

Můžeme si představit dvě trubice, ve kterých proudí tekutina, a ty jsou ohraničené z jedné strany myšlenou hranicí, kde proudí nerušený proud, a z druhé strany povrchy těles. Vstupní velikost povrchu mají velikost A_0 . Rozdíl je v nejmenším průřezu - A_h , respektive A_d . Tady můžeme aplikovat rovnice kontinuity:

$$A_0 \cdot v_\infty = A_h \cdot v_h \quad (4)$$

$$A_0 \cdot v_\infty = A_d \cdot v_d \quad (5)$$

$$A_h > A_d \quad (6)$$

$$\text{a tedy logicky: } v_h > v_d \quad (7)$$

Následně pro posouzení tlakových poměrů lze aplikovat Bernoulliho rovnici:

$$p_\infty + \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 = \text{konst} \quad (8)$$

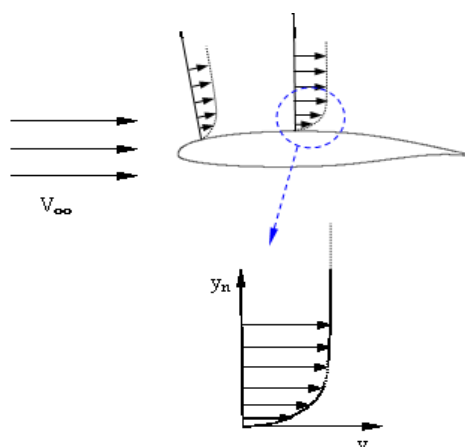
$$p_h + \frac{1}{2} \rho v_h^2 = p_d + \frac{1}{2} \rho v_d^2 \quad (9)$$

$$\text{a odtud opět: } p_h < p_d \quad (10)$$

Na dolním povrchu je větší statický tlak a nižší rychlost a na horním je větší rychlost a menší statický tlak.

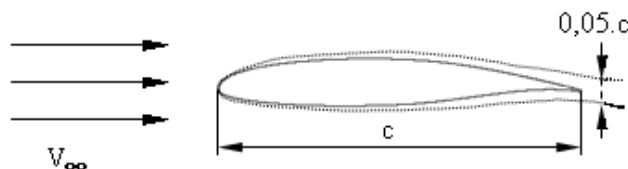
Vztlakovou sílu L dostaneme po integraci tlaku.

Po podrobnějším zkoumání charakteru obtékání těles vzduchem, bychom dostali charakteristické veličiny - viskozity vzduchu, a tak se dostaneme k oblasti mezní vrstvy, která je v těsné blízkosti povrchu profilu. (2)



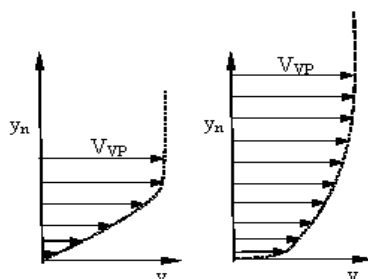
Obr. 6. mezní vrstva (2)

Experimenty ukázaly, že existuje mezní vrstva, také bylo zjištěno, že velikost rychlosti proudu tekutiny na povrchu tělesa je nulová. Na obrázku 6. je znázorněno, jak závisí rychlost proudění na normální vzdálenosti od povrchu tělesa (y_n). Právě třením mezi jednotlivými vrstvami tekutiny s různou rychlostí vzniká odporová síla působící proti pohybu tělesa. (2) Ludwig Prantl, německý aerodynamik, zavedl koncept mezní vrstvy, kde okolo obtékaného tělesa existují ve velmi tenké oblasti viskózní efekty. (2)



Obr. 7. mezní vrstva (2)

Mezní vrstva se vyvíjí ve směru proudu podél tělesa. Roste její tloušťka a rovněž její neuspořádanost, která je charakterizována tzv. turbulencí. Rozeznáváme dva základní druhy mezní vrstvy charakteristické svými vlastnostmi: mezní vrstvu laminární a turbulentní. (2)



Obr. 8. laminární a turbulentní mezní vrstva (2)



U laminární mezní vrstvy se jednotlivé vrstvy tekutiny pohybují uspořádaně po sobě a mezi jednotlivými vrstvami je malá výměna hmoty a energie. U turbulentní mezní vrstvy se již vrstvy nepohybují uspořádaně, ale mají silně náhodný pohyb, také výměna energie a hmoty ve vertikálním směru mezi jednotlivými vrstvami je mnohem větší než u laminární vrstvy. Laminární proudění je tenčí než turbulentní, to znamená, že rychlosti vnějšího proudu v_{VP} dosahuje dříve po směru normální vzdálenosti od povrchu profilu. (2)

Mezní vrstvu ovlivňuje: drsnost a kvalita povrchu, viskozita tekutiny, Reynoldsovo číslo R_e a ještě některé další faktory.

Od Reynoldsova čísla závisí i kinetická energie jednotkového objemu proudící tekutiny, která charakterizuje typ proudění. Reynoldsovo číslo R_e je dáno vztahem $R_e = \frac{v \cdot r}{\nu}$, kde v je velikost rychlosti proudění, r je poloměr trubice, kterou tekutina proudí, a ν je kinematická viskozita. (3)

Reynoldsovo číslo je bezrozměrné, tj. $[R_e] = 1$.

1. $R_e \rightarrow \infty$ - jedná se potenciální proudění
2. R_e je velké číslo - jde o turbulentní proudění
3. R_e je malé číslo - jde o laminární proudění.

1.3 AERODYNAMIKA VOZIDLA

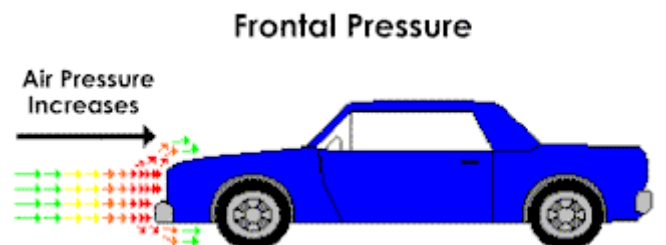
Jednoduchá definice aerodynamiky vozidla je studium proudění vzduchu kolem vozu, hlavně pokud je v pohybu. Pro pochopení tohoto jevu, si můžeme představit vozidlo pohybující se vzduchem.

1.3.1 AERODYNAMICKÝ ODPOR VOZIDLA

Trvá nějakou energii, aby pohyboval vozidlo přes vzduchu, a tato energie se používá k překonání sil, kterou nazýváme odporová síla. Odpor v aerodynamice vozidla se skládá hlavně ze dvou sil, přední přítláčná síla a vakuum vzadu.

1. přední přítláčná síla

Čelní tlak je způsoben vzduchem pokoušejícím se proudit kolem přední části vozu. Jelikož miliony molekul vzduchu přistoupí přední částě vozu, začnou tlačit (kompresovat), a tím zvýšit tlak vzduchu v přední části vozu. Ve stejném okamžiku molekuly vzduchu obtékající strany vozu mají atmosférický tlak. Tento tlak je nižší ve srovnání s molekulami v přední části vozu. Molekuly stlačeného vzduchu přirozeně hledají cestu ven z pásma vysokého tlaku v přední části vozu, a to kolem stran, horní a spodní části vozu. Viz obrázek 9. níže.

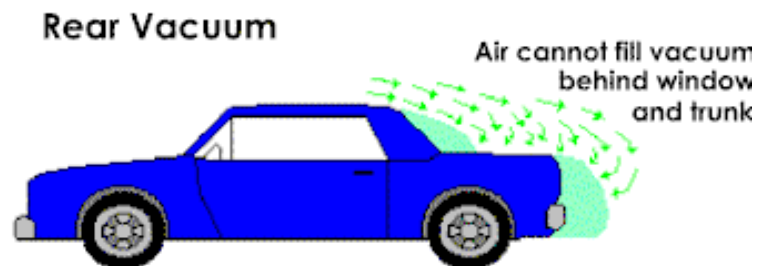


Obr. 9. tlak na přední části vozidla (14)



2. "vakuum" vzadu

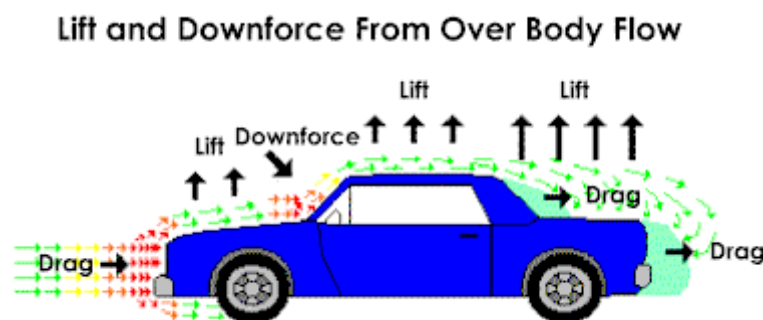
Je způsobeno vznikem „prázdného prostoru“, vzduchové kapsy, vytvořené jedoucím autem. Přímo za autem vznikne prostor, který je "prázdný", molekuly vzduchu ne jsou schopné tak rychle vyplnit tento prostor, díky rychlosti vozu, který jej vytváří. Molekuly vzduchu se snaží vyplnit tento prostor, ale vozidlo je vždy o krok napřed. Tento jev se v technice nazývá odtržení proudu.



Obr. 10. tlak na zadní části vozidla (14)

1.3.2 PŘÍTLAK VOZIDLA

Každý objekt pohybující se vzduchem vytváří buď vztlak, nebo přítlak. U závodních vozů je samozřejmostí používání křídla, které zvyšuje přítlak. Ale i běžný vůz vytváří přítlak díky tvaru karoserie, která vytváří oblast nízkého tlaku. Výsledkem zpomalujícího se vzduchu blížícího se k přední části vozu je, že více molekul vzduchu je tlačeno v menším prostoru. Vzduch se snaží uniknout do oblastí nižšího tlaku jako jsou boky, horní a spodní části vozu. Vzduch proudící přes přední kapotu vozu postupně ztrácí tlak, náraz na překážku v podobě čelního skla pak tlak naopak zvýší. Podtlak oblasti nad kapotu vozu vytváří malou sílu nadzvedávající kapotu vozu. Oblasti vyššího tlaku vzduchu v přední části čelního skla vytváří malý přítlak.

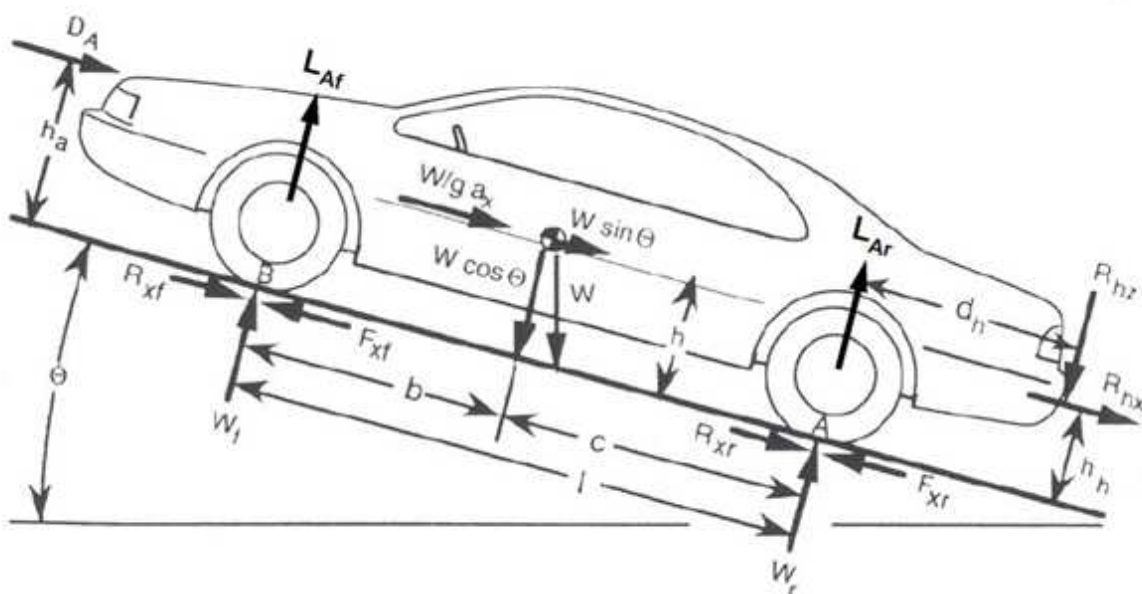


Obr. 11. přítlaková a vztlaková síla vozidla (14)

Nesmíme zapomenout, že spodní strana vozu je také zodpovědná za vytvoření vztlaku nebo přítlaku. Je-li přední část vozu nižší než zadní, pak mezi spodní částí vozu a silnicí se vytváří vakuum či oblast nízkého tlaku, který se rovná přítlaku. Spodní přední část vozu účinně omezuje proudění vzduchu pod vozem.



1.4 SÍLY PŮSOBÍCÍ NA VOZIDLO



Obr. 12. zatížení vozidla (10)

W je tíha vozidla působící v jeho těžišti

$W/g \cdot a_x$ je d'Alembertova síla (setrvačná síla), působící v těžišti opačným směrem jako zrychlení

W_f , resp. W_r je zatížení (dynamické zatížení – síla) přední resp. zadní nápravy

F_{xf} , resp. F_{xr} je hnací síla působící v rovině vozovky

R_{xf} , resp. R_{xr} je valivý odpor (síla) působící v rovině vozovky

D_A je aerodynamický odpor (síla) působící na karosérii ve výšce h_a

L_{Af} , resp. L_{Ar} aerodynamický vztlak působící na vozidlo v místě přední resp. zadní nápravy

R_{hz} , resp. R_{hx} je vertikální, resp. podélná síla působící v tažném zařízení

Θ úhel stoupání (směrem nahoru)

zatížení přední nápravy

$$\Sigma M_A = 0$$

$$W_f \cdot l + L_{Af} \cdot l + D_A \cdot h_a + W/g \cdot a_x \cdot h + R_{hx} \cdot h_h + R_{hz} \cdot d_h + W \cdot h \cdot \sin(\Theta) - W \cdot c \cdot \cos(\Theta) = 0$$

$$W_f = 1/l \cdot (-D_A \cdot h_a - W/g \cdot a_x \cdot h - R_{hx} \cdot h_h - R_{hz} \cdot d_h - W \cdot h \cdot \sin(\Theta) + W \cdot c \cdot \cos(\Theta)) - L_{Af}$$

Dynamické zatížení zadní nápravy

$$\Sigma M_B = 0$$

$$-W_r \cdot l - L_{Ar} \cdot l + D_A \cdot h_a + W/g \cdot a_x \cdot h + R_{hx} \cdot h_h + R_{hz} \cdot (d_h + l) + W \cdot h \cdot \sin(\Theta) + W \cdot b \cdot \cos(\Theta) = 0$$



$$W_r = 1/l * [D_A * h_a + W/g * a_x * h + R_{hx} * h_h + R_{hz} * (d_h + l) + W * h * \sin(\Theta) + W * b * \cos(\Theta) - LAr$$

zatížení přední nápravy

W_f = statické zatížení + vliv zrychlení + vliv stoupání + aerodynamické síly

statické zatížení - $W * c/l$

vliv zrychlení - $W * h/l * a_x/g$

vliv stoupání - $W * h/l * \Theta$

aerodynamické síly - $D_A * h_a/l - LAr$

1.5 ZAČÁTKY AERODYNAMIKY U AUTOMOBILŮ

Na začátku 20. století začali automobiloví konstruktéři uvažovat o využití poznatků z aerodynamiky při navrhování nového automobilu. Z počátku to byly jenom zkoušky a výrobci nedokázali prakticky využít teoretických znalostí. Dostávali se do různých potíží, a proto raději zůstávali u dobře známých tvarů, které sice měly své nevýhody, ale byly po technické stránce praktičtější. Až Edmund Rumpler byl prvním inženýrem, který začal využívat poznatky z aerodynamiky. (5)

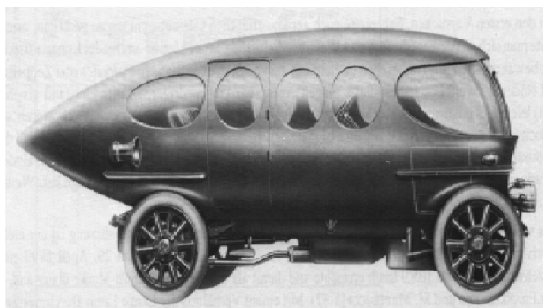
Dr. ing. Edmund Rumpler byl automobilový a letecký konstruktér. Pracoval u berlínské firmy Motorfahrzeug und Motorenfabrik a u výrobce automobilů Adler. Zde vyvíjel nové modely podle vzoru vozů Mercedes.

Zkušenosti, kterých dosáhl v automobilovém odvětví, uplatňoval v právě vznikajícím leteckém průmyslu. V době první světové války postavil slavný jednoplošník Taube. Po skončení války, kdy mělo Německo zákaz konstruovat a vyrábět letadla, se zase vrátil k automobilovému průmyslu a pustil se do stavby automobilů. Svůj první vůz uvedl v roce 1921 na autosalónu v Berlíně, kde vzbudil obrovskou senzaci. Šlo o vozidlo typového označení OA 104, známější pod jménem Tropfenwagen, které patří dodnes ke světovým unikátům. (5)

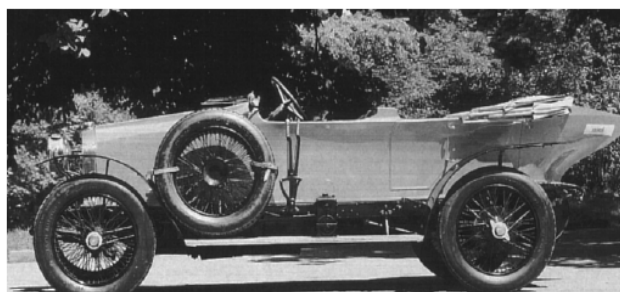
1.6 PŘÍSTUPY V AERODYNAMICE VOZIDEL

1900-1920 Adaptace tvarů z jiných odvětví průmyslu

Na začátku automobilového průmyslu byly tvary vozidel kopírované z jiných odvětví, kde již konstruktéři měli větší zkušenosti. Na obrázcích 13, 14, 15 jsou znázorněna první vozidla a je snadno zřejmé, kterými odvětvími dopravy byly tvary inspirovány.



Obr. 13. adaptované z letectví (11)



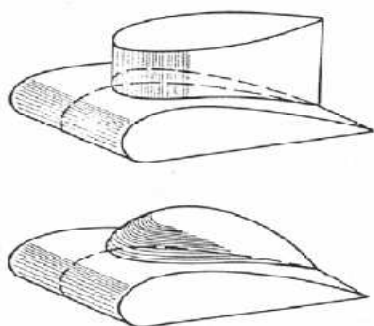
Obr. 14. adaptované z lodního průmyslu (11)



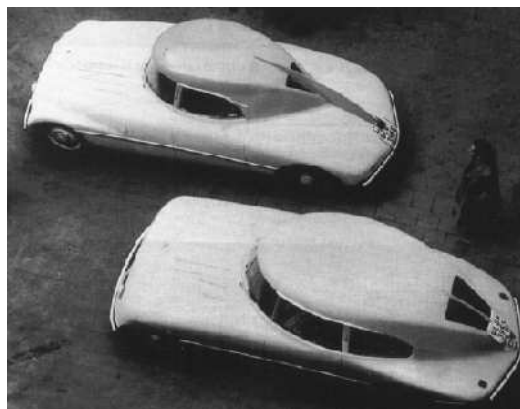
Obr. 15. forma torpédo (11)

1920-1970 Adaptace z letadlového průmyslu

Na počátku vývoje leteckého průmyslu byla snaha o výrobu vozidel kopírujících tvary letadel. Tento trend je dobře znázorněn na obrázcích 16 a 17.



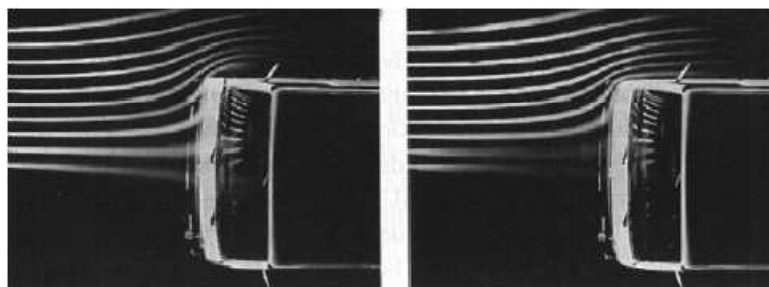
obr. 16. zlepšený tvar (11)



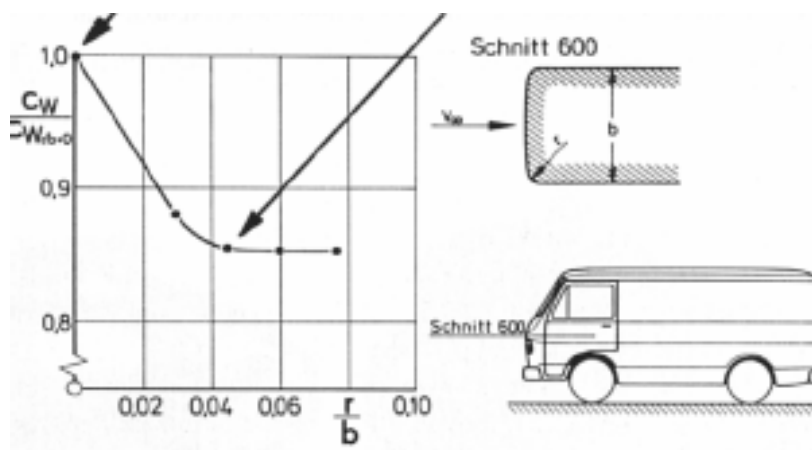
obr. 17. zlepšený tvar (11)

1970-1990 Detail optimalizace

Od roku 1970 již začala převažovat snaha o optimalizaci tvaru vozidla směrem k tvarům aerodynamickým, např. zaokrouhlením rohů vozu.



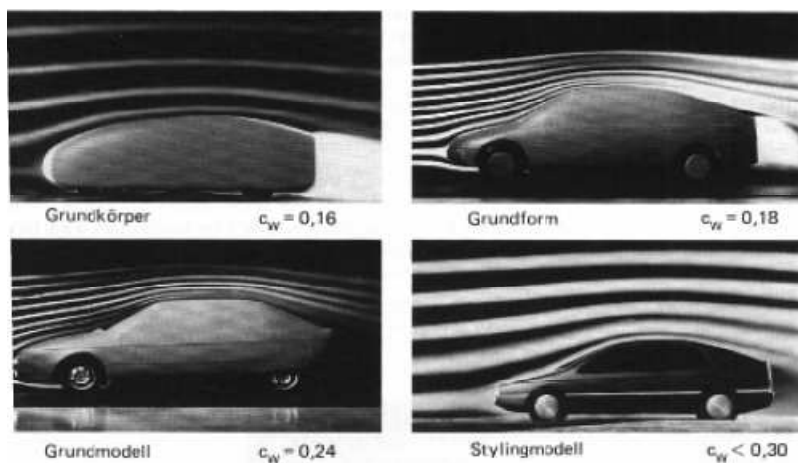
Obr. 18. snížení odporového součinitele (11)



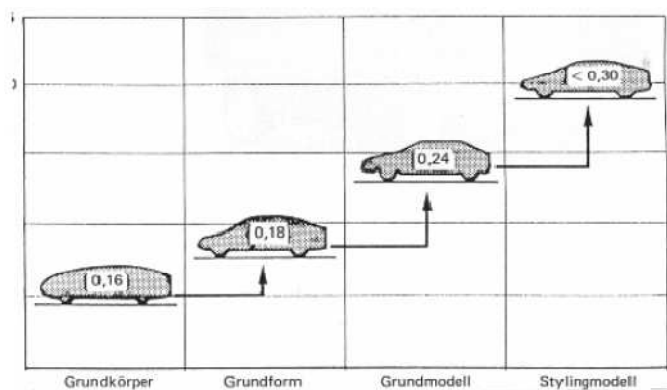
Obr. 19. snížení odporového součinitele (11)

1990- optimalizace formy

Od roku 1990 se již začala konstruovat celá vozidla tak, aby měla menší aerodynamický odpor.

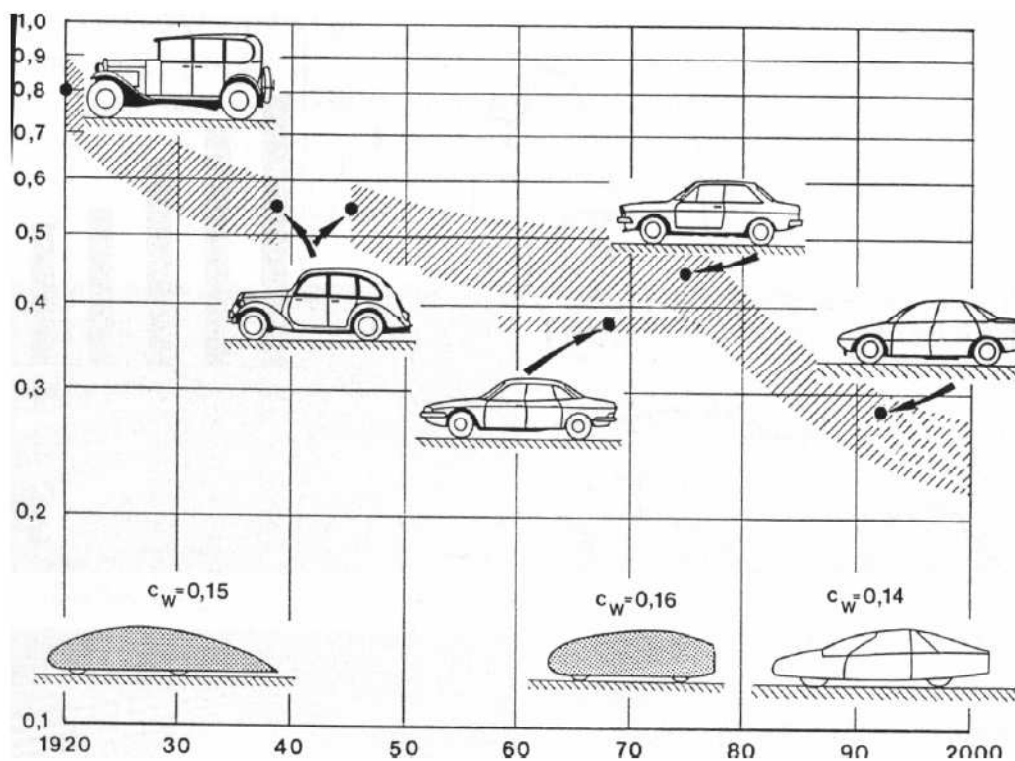


Obr. 20. optimalizace formy (11)



Obr. 21. optimalizace formy (11)

Vývoj změn koeficientu aerodynamického odporu vozidel od roku 1920 do roku 2000 je znázorněn na obr. 21. Na obr. 22. jsou zobrazena výzkumná vozidla



Obr. 22. Historie součinitele odporu vzduchu a porovnání s výzkumnými auty (11)



2 AERODYNAMICKÝ TUNEL

2.1 FUNKCE AERODYNAMICKÉHO TUNELU

Pro přesné a opakovatelné výsledky měření musí proudící vzduch uvnitř tunelu procházet několika řadami procesů. Ty mají za úkol zajistit, aby ve chvíli, kdy vzduch vstupuje do testovací komory, byl jeho tok plynulý a stejnoměrný. (1)

Nejdříve vtéká vzduch do širší části tunelu a pomocí tohoto procesu je vzduch zpomalen. (rovnice kontinuity). Poté prochází chlazením do zklidňující komory, kde síťové přepážky odstraní část nežádoucích turbulencí.

Dále musí vzduch projít mezi lamelami, které tvoří v průřezu tunelu tvar podobný plástvi. Zde se tok vzduchu napřímí a dalšími přepážkami jsou odstraněny zbylé turbulence. (1)

Ze zklidňující komory vzduch pokračuje do zužujícího se prostoru, kde se zvyšuje tlak, a tím se zvětšuje rychlost a odstraňuje případná přechodová vrstva mezi různě rychlými úseky, než vstoupí do testovací části. (1)

2.2 TESTOVÁNÍ AERODYNAMIKY

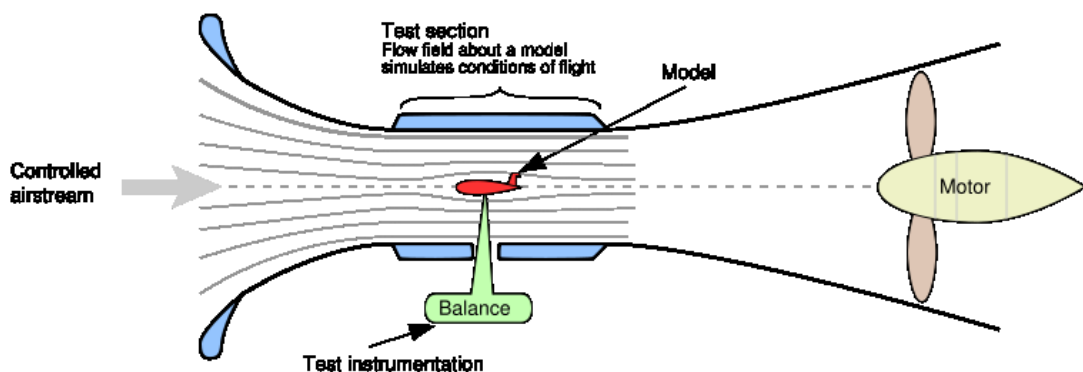
Stejně jako testování nově vyvinutých částí vozu provádí tým také mapování aerodynamiky vozu. Pro rozdílné tratě musí být různě nastavené úhly křídel a dalších aerodynamických prvků. Ty musí být otestovány podle tabulek aerodynamických dat vytvořených týmem pro daný okruh. Dotýkají se nespočtu měnitelných oblastí, např. klapek, křídel, sacích otvorů brzd, chlazení motoru, odtokových hran kapotáže atd. (1)

Model, který se používá v aerodynamickém tunelu, je vyráběn z uhlíkových vláken a má poloviční velikost skutečného monopostu. Testovací model je připevněn ke vzpěrám, přes které je připojen ovládací mechanismus, pomocí kterého se nastavuje světelná výška a náklon modelu s přesností na setinu milimetru. (1)

Předem vytvořené aerodynamické mapy se používají pro nastavení na každý závod. Pomocí nich se dá přesně stanovit rovnováha mezi přítlakem a odporem vzduchu podle toho, na který okruh je vůz připravován. (1)

Stavba aerodynamického tunelu má dva typy:

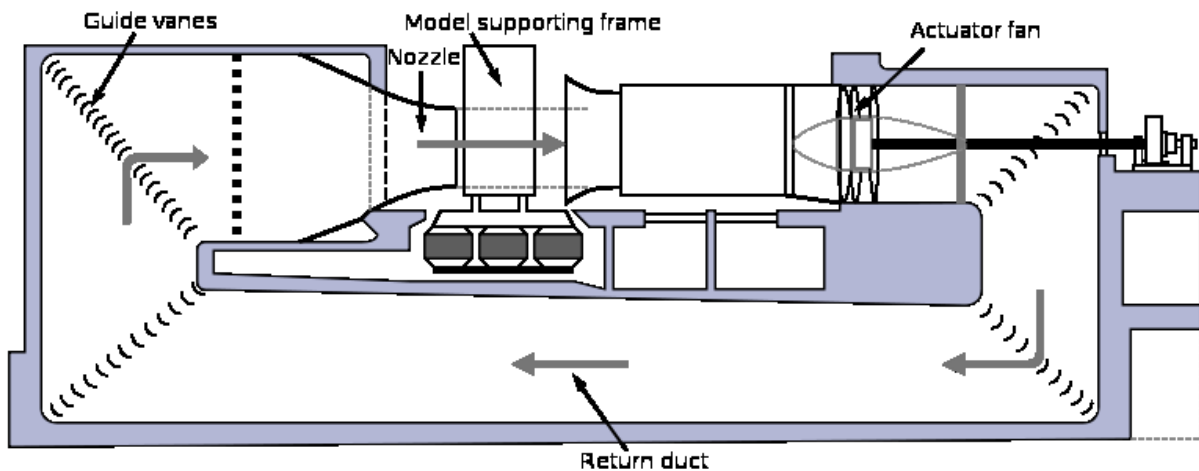
Otevřený okruh - je to takový aerodynamický tunel, kde proud vzdušiny po průchodu tunelem není veden zpět do okruhu.



Obr. 23. aerodynamický tunel s otevřeným okruhem(12)



uzavřený okruh - je to cirkulační aerodynamický tunel, v němž vzdušina proudí v uzavřeném okruhu bez velkých ztrát tlaku a kinetické energie. (6)



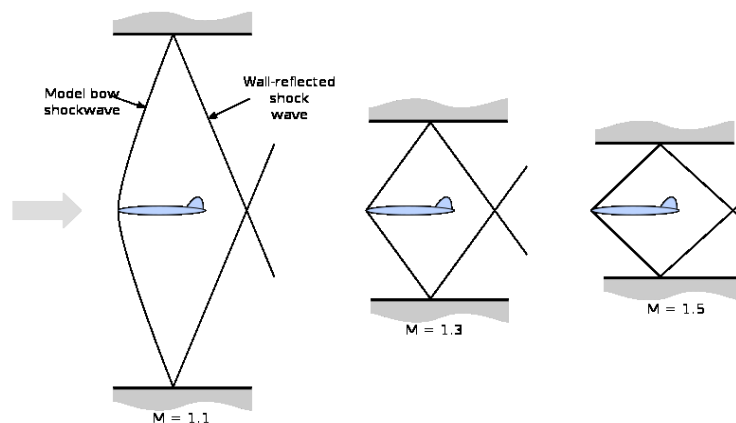
Obr. 24. aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem(12)

Podle rychlosti protékající vzdušiny je aerodynamický tunel:

a) **nízkorychlostní** - rychlost proudění vzduchu v aerodynamickém tunelu je tak nízká, že se ještě neprojevují význačněji vlivy stlačitelnosti (rychlost proudění je okolo $M=0,7$). (6)

b) **vysokorychlostní** - rychlost proudu vzdušiny v měřicím prostoru je dostatečně vysoká, aby bylo možno pozorovat vlivy stlačitelnosti (rychlost proudění je okolo $0,75 < M < 1,2$). (6)

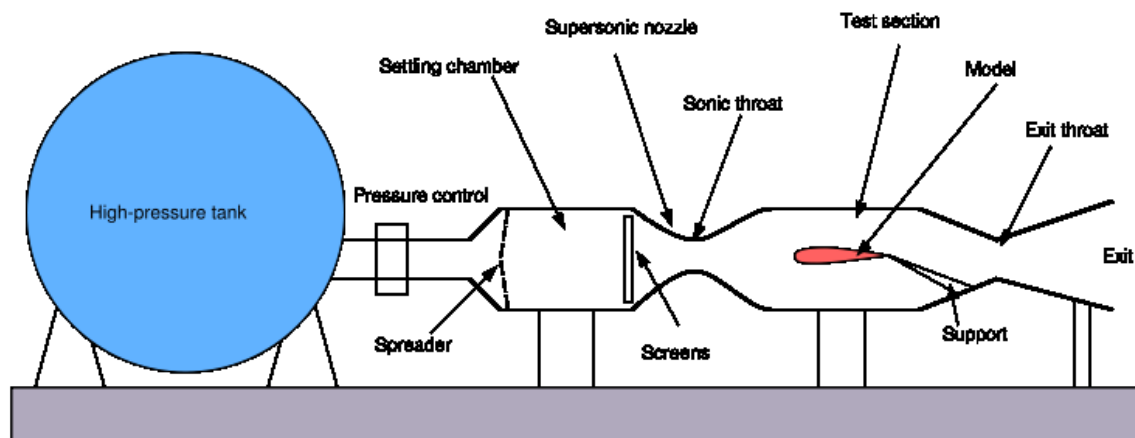
Tunely jsou schopní dosáhnout rychlosti blízké rychlosti zvuku. Nejvyšší rychlost je dosažena v testovací části. Zkoušení s rychlostí blízkí se rychlosti zvuku přináší další problémy, zejména v důsledku odrazu rázové vlny od stěn.



Obr. 25. vysokorychlostní tunel (12)

c) **podzvukový (subsonický)** - rychlost nerušeného proudu vzduchu v měřicím prostoru je už tak vysoká, aby se již mohl projevit vliv stlačitelnosti, ale není větší než rychlost zvuku.(6)

d) **nadzvukový (supersonický)** - je takový takový tunel, kde rychlost nerušeného proudu vzdušiny v měřicím prostoru přesahuje rychlost zvuku ($1.2 < M < 5$, může dosáhnout i $M=15$ -Hypersonic). V tomto případě se mohou vyskytnout problémy jako např. poškození materiálu při vysokých teplotách, vysoké požadavky na provoz tunelu atd. (6)



Obr. 26. nadzvukový tunel (13)

Pro velmi vysoké rychlosti musí být proudění vzduchu přerušováno, proto se používá aerodynamický tunel s přerušovaným chodem, v němž akumulovaná energie pro chod aerodynamického tunelu vystačí jen pro relativně krátkou dobu provozu. Pro speciální účely se staví například aerodynamický tunel nízko turbulentní, vývrtový, námrazový ap.(6)

Hlavními částmi aerodynamického tunelu jsou:

- měřicí prostor - do toho prostoru se umísťují měřená tělesa, proud v této části má obvykle maximální rychlost a je homogenní. Může být otevřený (proud vzdušiny protéká klidným prostředím), nebo uzavřený (s pevnými stěnami)
- dýza - používá se u nízko rychlostního a podzvukového aerodynamického tunelu. Jde o část tunelu před měřicím prostorem, u vysokorychlostního aerodynamického tunelu rozšiřující se část tunelu před měřicím prostorem
- kolektor - konvergentní nálevkovité ústí před dýzou nebo difuzorem tunelu
- ohybové lopatky a usměrňovač - slouží k usměrnění proudu vzdušiny
- tepelný a vzduchový výměník

Aerodynamické síly a momenty se měří aerodynamickými váhami.(6)

Speed Regime	Typical flow (model)	Nozzle/test section	Compression ratio	Drive system
Subsonic ($M \approx 0$ to 0.7)			1.0+	
Transonic ($M \approx 0.7$ to 1.2)			1.1	
Supersonic ($M \approx 1.2$ to 5)			2 ($M = 2$)	
Hypersonic ($M > 5$)			20 ($M = 5$)	

Obr. 27. proudění při různých rychlostech (12)



Aerodynamické tunely se používají také u testování závodních aut.

Mít aerodynamický tunel vyrobený na zakázku je ve Formuli 1 spíše nutností než přepychem. Nároky na aerodynamiku ve Formuli 1 jsou natolik vysoké, že asi 10 % zlepšení ve složitém vztahu mezi přítlakem a odporem vzduchu na křídlech vozu se na trati projeví jako zlepšení přibližně o jednu sekundu na kolo.

Tým Vodafone McLaren Mercedes má aerodynamický tunel integrován uvnitř svého technologického centra, vystavěného výlučně pro tento tým. Budova je akusticky utěsněný blok, jehož dvě stěny jsou připojeny pomocí gumových spojů, které minimalizují přenos hluku a vibrací. (1)



Obr. 28. McLarenův aerodynamický tunel(1)

Ventilátor s maximální rychlostí 600 otáček za minutu tlačí vzduch pro 145 metrů dlouhý tunel. Tunel má tvar obdélníkového okruhu a je umístěn uvnitř budovy.

Při konstrukci tunelu bylo použito 400 tun oceli o tloušťce 8 až 10 milimetrů. Z takového množství materiálu je možné postavit poměrně velké lodě.

Tunel má v nejširším místě průřez 6 metrů čtverečních a je 400 metrů dlouhý.

Ventilátor nasává z vnějšku vzduch rychlostí 15 krychlových metrů za sekundu. Pokud by se sání do budovy utěsnilo, její stěny by se zhroutily dovnitř. (1)



3 VÝPOČET AERODYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ VOZIDLA

Computational Fluid Dynamics (CFD) je jednou z větví mechaniky tekutin, která používá numerické metody a algoritmy k řešení a analyzování problémů, které zahrnují proudění tekutin. Počítače jsou využívány k provádění milionů výpočtů nutných pro simulaci interakce kapaliny a plynu s definovaným povrchem (okrajové podmínky). Probíhající výzkum však může přinést software, který zvyšuje přesnost a rychlost simulace složitých výpočtů, jako je rychlost blízká rychlosti zvuku nebo turbulentní toky. Základem téměř všech problémů CFD jsou Navier-Stokes rovnice, které definují každé jednotlivé fázové proudění tekutin, nebo Eulerovy rovnice, pokud nepočítáme viskozitou. (9)

3.1 PROGRAM ANSYS FLUENT PRO SIMULACE PROUDĚNÍ

ANSYS FLUENT je program obsahující fyzikální modely postihující široké možnosti potřebné k modelování proudění, turbulence, přenosu tepla a reakcí pro průmyslové aplikace. Ty sahají od proudění vzduchu kolem leteckých profilů, spalování v pecích, modelování probublávání po ropné plošiny, od toku krve, výrobu polovodičů, návrhů ventilace místností až po úpravu a čištění vody. Speciální modely, které dávají softwaru možnosti modelovat multifyzikální úlohy, umožňují rozšíření působnosti tohoto programu.

ANSYS FLUENT je využíván jako integrální součást designu a optimalizační fáze vývoje produktu. Rozšířená technologie řešiče poskytuje rychlé a přesné CFD výsledky, flexibilní pohyb a deformace sítě a současně vyšší paralelní škálovatelnost. Uživatelem definované funkce umožňují implementaci nových uživatelských modelů a jejich značnou úpravu dle požadavků uživatele. Interaktivní řešič, nastavení výpočtu a integrované vyhodnocování výsledků umožňuje v programu ANSYS FLUENT kdykoli pozastavit výpočet, prohlédnout si výsledky, upravit nastavení a poté pokračovat ve výpočtu během jednoho spuštění programu. Datové soubory mohou být také načteny do programu ANSYS CFD-Post pro další analýzy s pokročilými nástroji post-procesingu a výsledky detailně porovnávány s rozdílnými simulacemi vedle sebe.(7)

3.1.1 SÍŤOVÁNÍ, NUMERIKA A PARALELNÍ ZPRACOVÁNÍ

Program ANSYS FLUENT využívá technologie nestrukturované sítě. Síť může být vytvořena z elementů ve tvaru čtyřhranů a trojúhelníků v případě 2D simulací, šestistěnnů, čtyřstěnnů, mnohostěnnů, prizmatických a pyramidových buněk pro 3D simulace. Propracovaná numerika programu zajišťuje přesné výsledky na jakékoli kombinaci nestrukturované sítě včetně sítí obsahující visící uzly (hanging nodes). Řešič ANSYS FLUENT běží robustně a efektivně se všemi fyzikálními modely a typy proudění – stacionární i nestacionární, nestlačitelné i hypersonické.(7)

3.1.2 DYNAMICKÉ A POHYBUJÍCÍ SE SÍŤ

Možnost využití dynamických sítí v programu ANSYS FLUENT vyhovuje potřebám náročných aplikací jako je simulace proudění a spalování ve válcích motoru. Lze použít několik různých schémat pro změnu sítě během výpočtu, včetně vrstvení, vyhlazování a přesítování, při simulaci různých pohyblivých částí v jednom výpočtu. Před zahájením výpočtu je potřeba vytvořit pouze počáteční síť a definovat pohyb pohyblivých částí. Pro aplikace s nenuceným pohybem je možné využít zabudovaný řešič se šesti stupni volnosti, který lze využít např. při simulaci vypouštění střel z letadel, dynamiky pohybu lodě na vlnách, pohybu balistické střely nebo naplňování nádrží.(7)



3.1.3 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ A EXPORT DAT

Nástroje pro zpracování výsledků v programu ANSYS FLUENT jsou používány pro tvorbu grafických výstupů, animací a automatických reportů, které umožňují snadný výstup vypočtených výsledků z CFD programu. Stínované a průhledné plochy, proudnice, vektory, kontury, uživatelsky definované proměnné a tvorba scény, to je jen několik výstupů, které jsou k dispozici.(7)



Obr. 29. model v CFD software(7)

Sít' z mnohostěnnů a rozložení tlaků na formuli F1 pro post-procesing s použitím programu ANSYS CFD-Post.(7)



4 VLASTNÍ POSTUP VÝPOČTU

Pracovní postup můžeme rozdělit na 3 etapy:

1. vytvoření sítě - ICEM
2. zadávání okrajových podmínek a výpočet - FLUENT
3. vyhodnocení výsledku - CFD-Post







Pro názornost uvedu 3 varianty výpočtu. První varianta bude „normální vozidlo“ - s difuzorem i zadním křídlem. Druhou variantou bude vozidlo bez difuzoru (přesněji bude zachovaný tvar difuzoru, avšak bez mřížek). Třetí variantou bude vozidlo bez zadního křídla. Poté výsledky porovnáme a můžeme dospět k závěru jak ovlivňují aerodynamické prvky aerodynamiku vozidla a jaký vliv mají na vozidlo, které jezdí za ním v úplavu. Pracovní postup v jednotlivých programech bude znázorněn na normálním vozidle, v ostatních variantách je pracovní postup stejný, pouze na začátku musíme upravit geometrie vozidla.

Smažeme mřížky i zadní křídlo, dále pak postupujeme stejným způsobem jako u „normálního vozidla“. Jednotlivé varianty a jejich označení jsou uvedeny v tabulce 1.

První vozidlo bude označeno jako .../1 a vozidlo v úplavu jako .../2, např. normální vozidlo v úplavu A2/2.



Tab. 1. varianty výpočtu

Varianty výpočtu	varianta	
	1 vozidlo Normal	A1
	2 vozidla Normal	A2
	1 vozidlo bez difuzoru	B1
	2 vozidla bez difuzoru	B2
	1 vozidlo bez křídla	C1
	2 vozidla bez křídla	C2



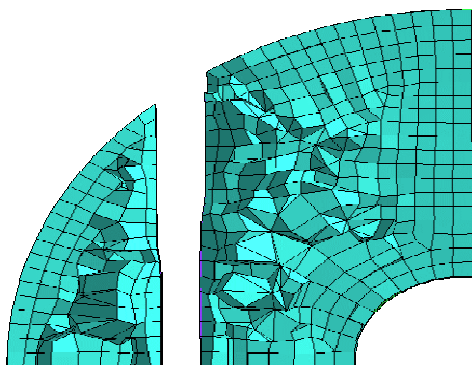
4.1 ICEM

-je univerzální generátor sítě

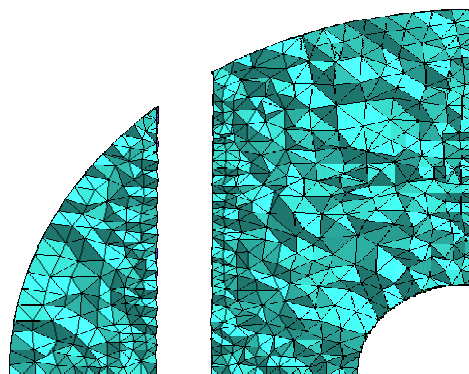
-poskytuje možnost přípravy a úpravy geometrie, pro vytvoření libovolné sítě, s její kontrolou a editací

-nabízí možnost exportu sítě do většiny existujících programů (fluent, cfd-pre...) a zpracování výsledných dat.

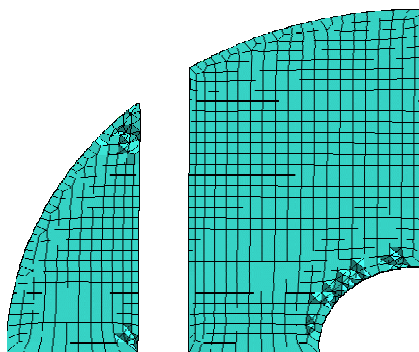
Umožňuje na geometrii parametricky vytvářet mřížku:



Obr. 30. hexahedrální síť



Obr. 31. tetrahedrální síť



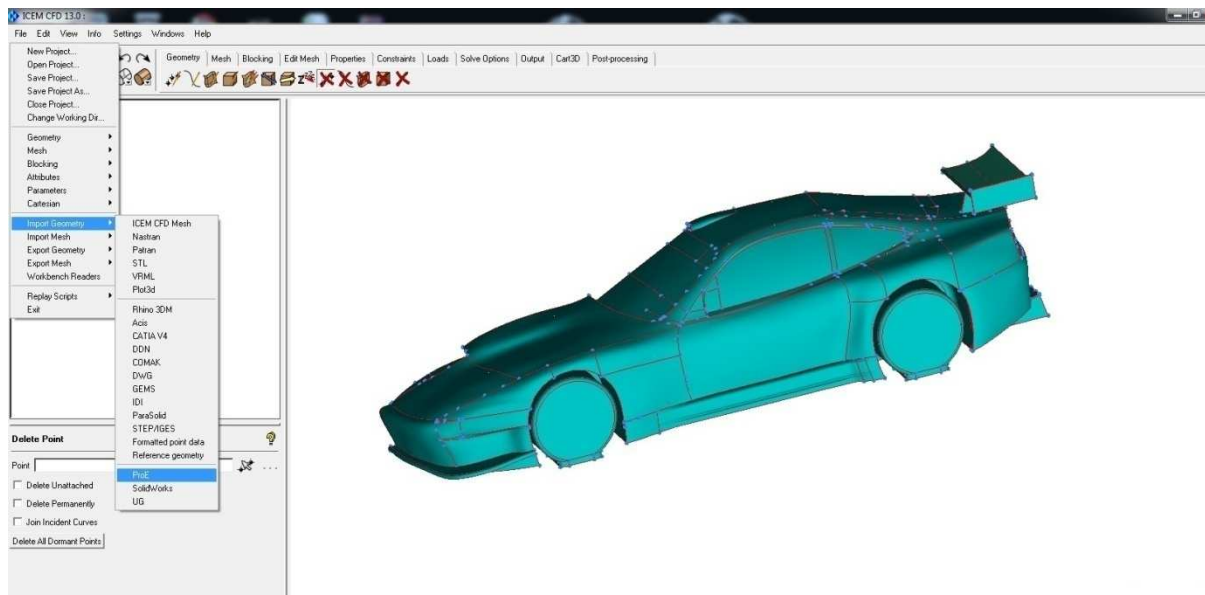
Obr. 32. karteziální síť



4.1.1 IMPORTOVÁNÍ MODELU

Model je importován z programu ProEngineer. Pro zjednodušení budeme používat pouze polovinu vozidla, protože je symetrická, tedy nebude tolik náročná na výpočty.

Pracovní postup bude ukázán nejdříve pro jedno vozidlo, v kapitole 4.1.6 pak postup pro dvě vozidla



Obr. 33. import modelu do ANSYS/ICEM

4.1.2 OPRAVA GEOMETRIE

SMAZÁNÍ NEPOTŘEBNÉ GEOMETRIE

Na modelu je třeba udělat úpravy pro opravu geometrie. Musíme smazat zbytečné čáry a body, a to pomocí funkce *Geometry/Delete Curve* a *Geometry/Delete Point*.

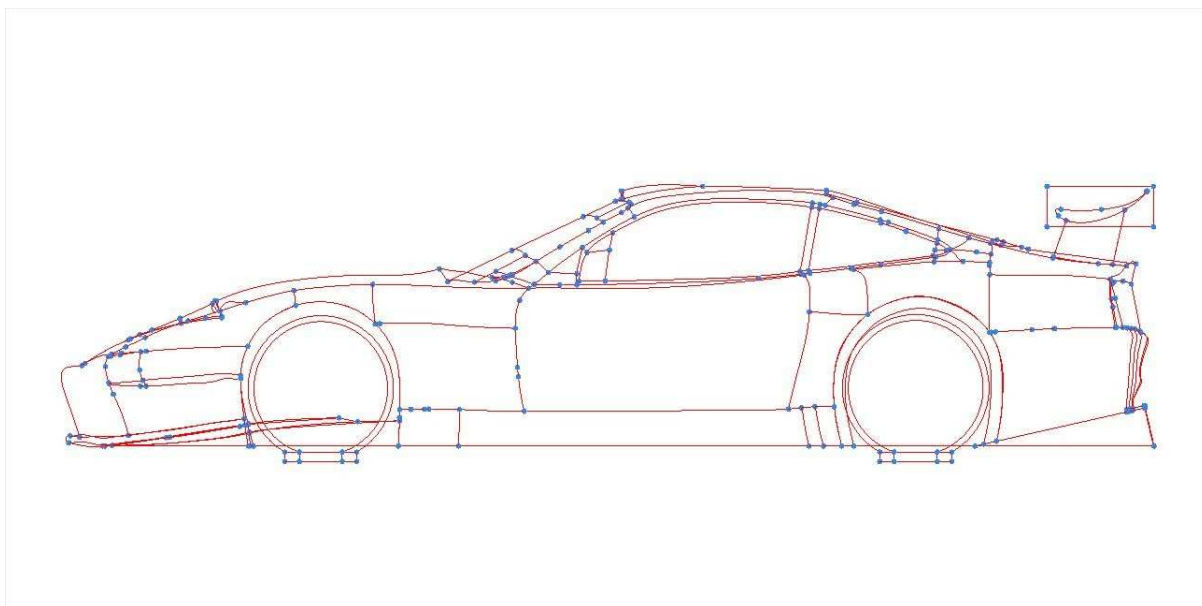
Smažeme ty křivky a body, které by zbytečně ovlivňovaly síť.



Obr. 34. funkce smazání

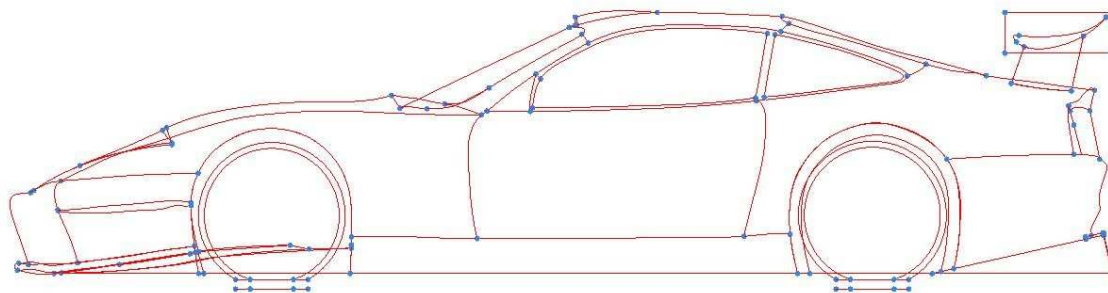


Model před opravou vypadá následovně:



Obr. 35. model před opravou

Model po opravě:



Obr. 36. model po úpravě

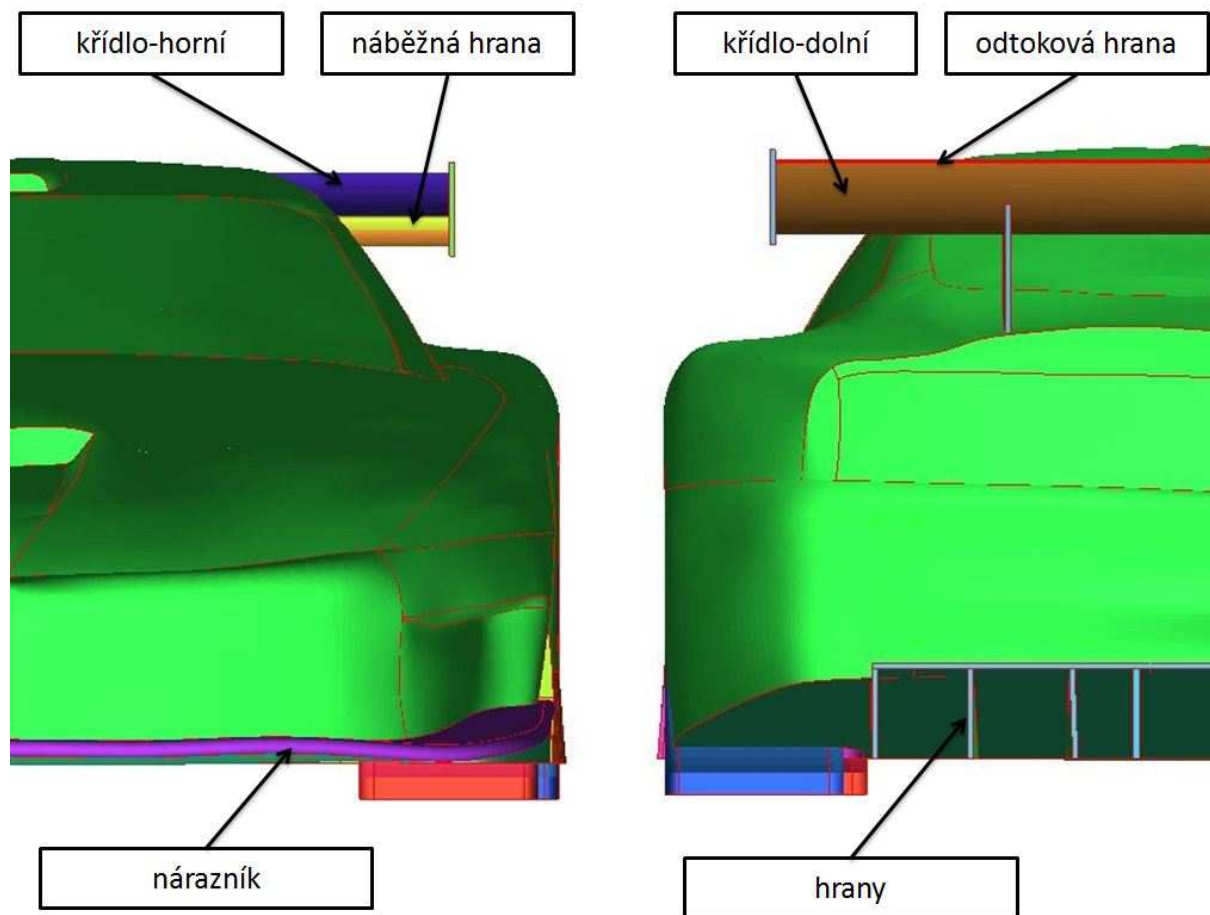
Zůstaly nám tak pouze ostré hrany, které jsou potřebné pro vytvoření sítě, a body u průsečíku tří křivek.



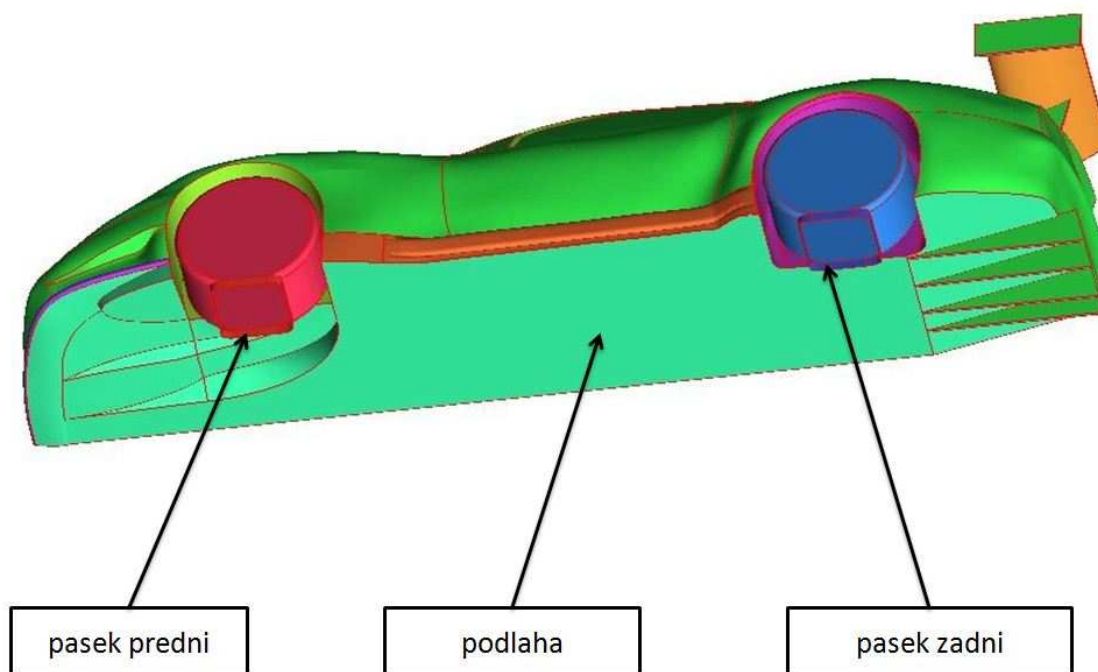
ROZDĚLENÍ PLOCH

Rozdělení ploch je potřebné, abychom mohli nastavit různou síť pro různé části a abychom nemuseli používat nejmenší síť pro celé vozidlo. Učiníme tak pomocí funkce *Parts/Create a new part*. Model rozdělení na jednotlivé plochy je na obr. 37, 38, 39.

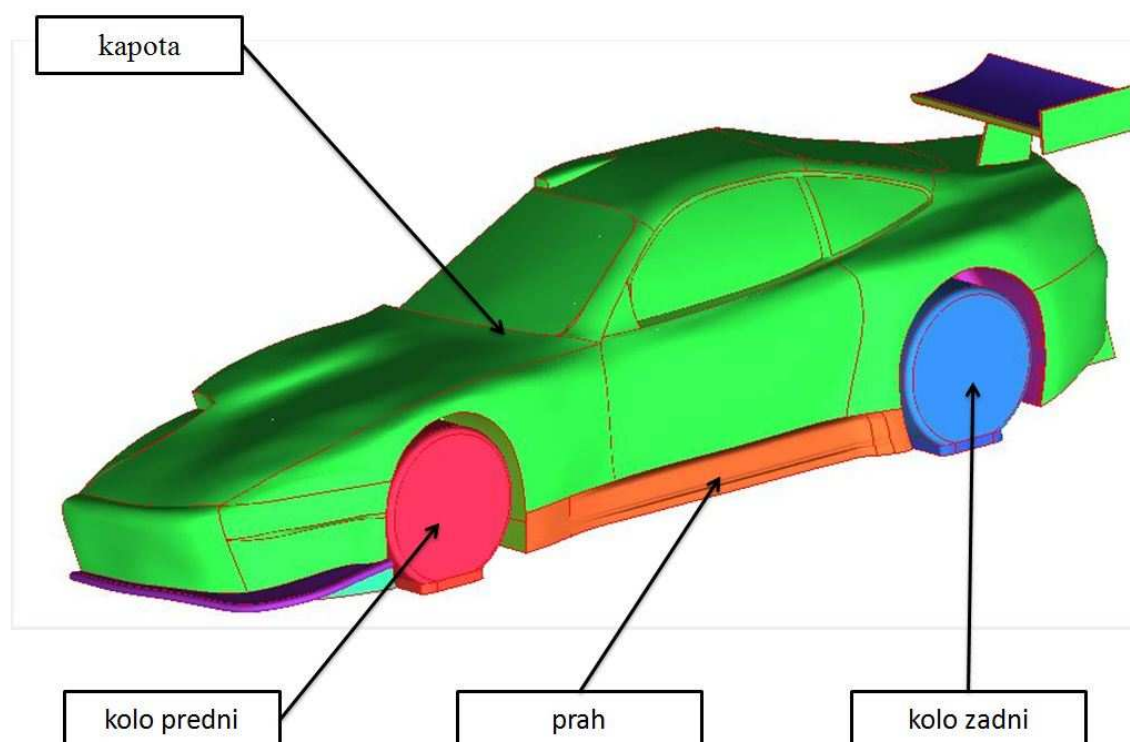
Kdybychom nastavili nejmenší síť pro celé vozidlo, byl by výpočet pro hardware velmi náročný.



Obr. 37. rozdělení na menší plochy



Obr. 38. rozdělení na menší plochy



Obr. 39. rozdělení na menší plochy



4.1.3 TUNEL

Dále je třeba udělat virtuální tunel, který je v našem případě velký kvádr z důvodu dobrého ustálení proudění.

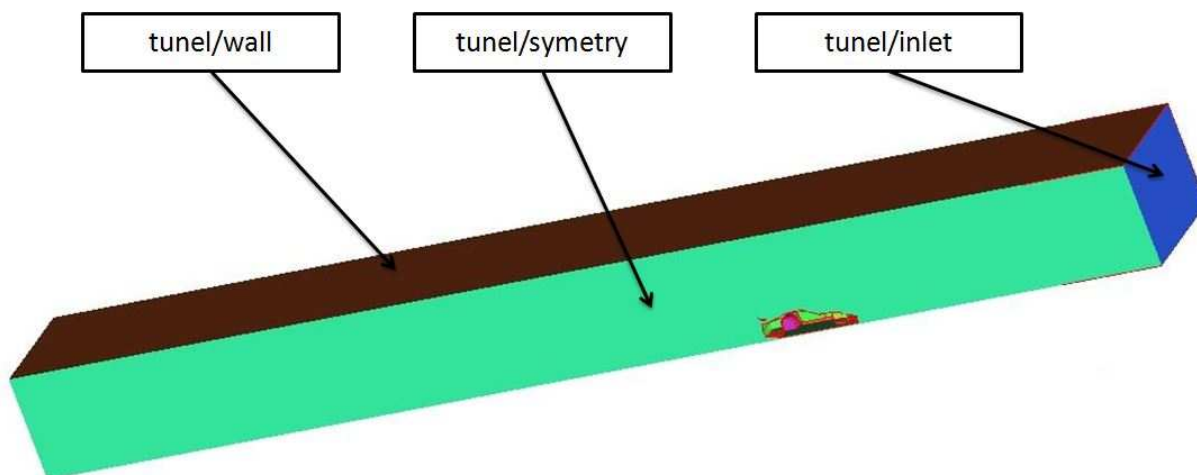
Tunel má rozměry:

šířka: 4000 mm

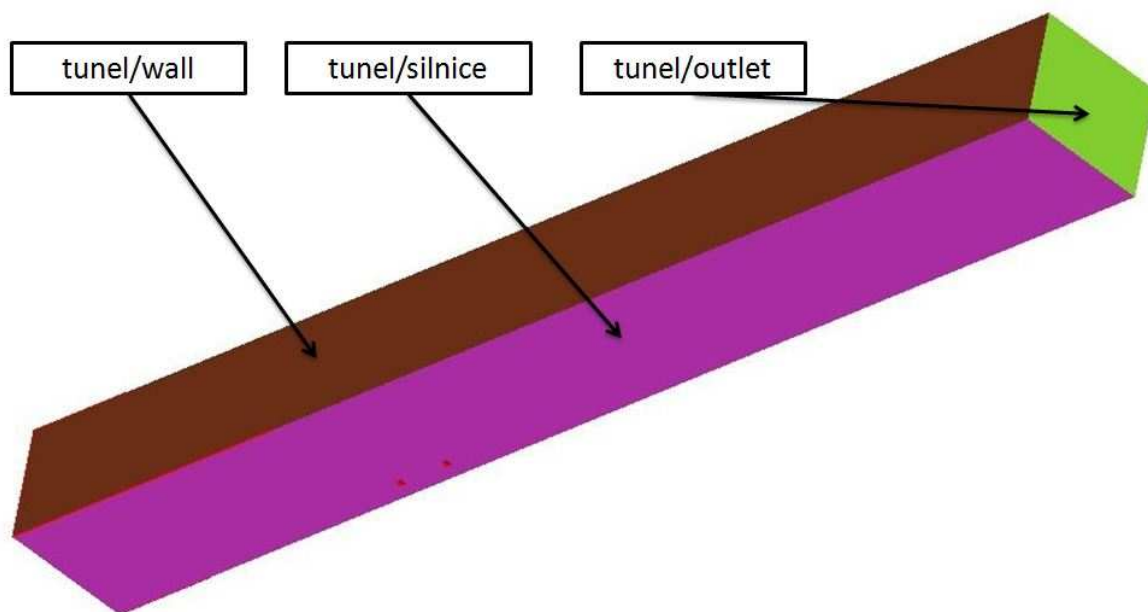
výška: 3700 mm

délka: 55000 mm

Je vytvořen pomocí funkce: *Geometry/create point (surface,curve)*.



Obr. 40. části tunelu



Obr. 41. části tunelu

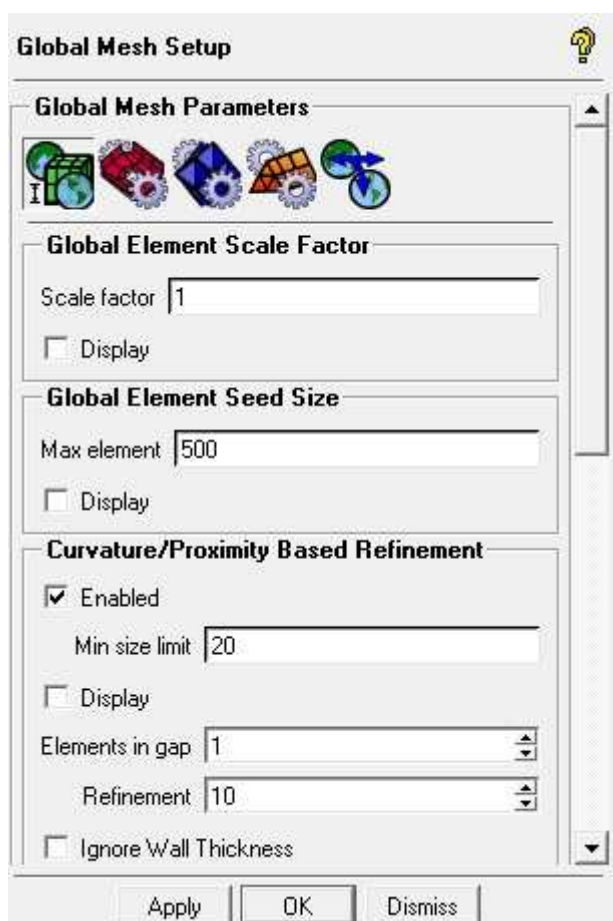


4.1.4 TVORBA SÍTĚ MODELU VOZIDLA

Nejdříve pomocí funkce: *Mesh/Global Mesh setup* určíme globální nastavení sítě.



Obr. 42. nastavení sítě

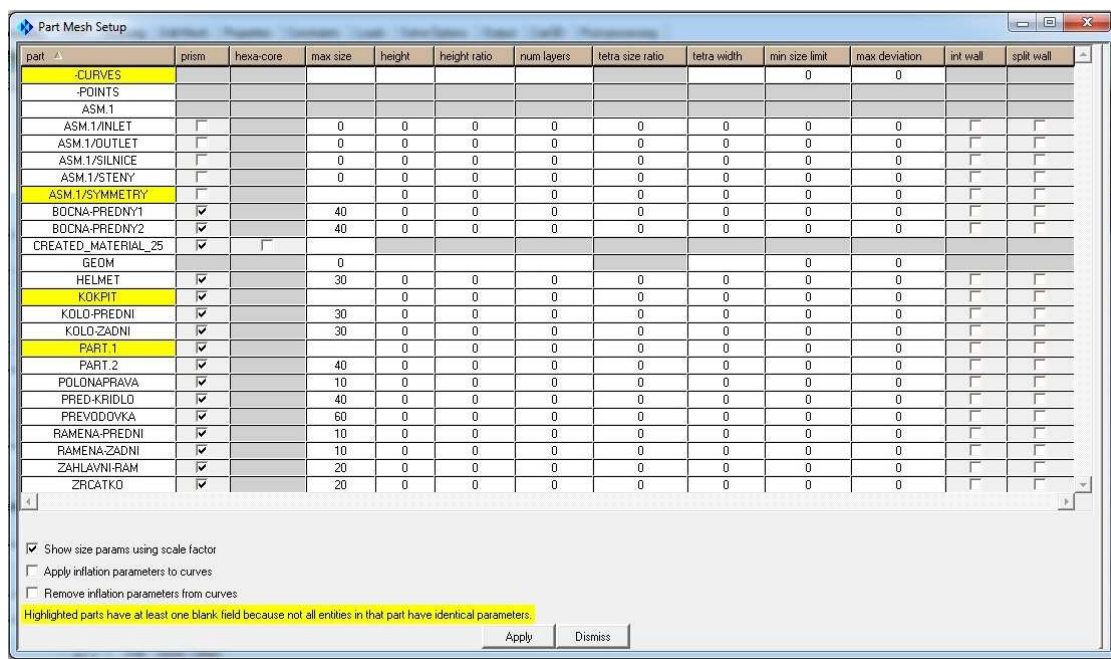


Obr. 43. nastavení sítě

V *Global Mesh Setup* nastavíme největší velikost sítě, Max element: 500. To znamená, že tak velká bude buňka sítě v tunelu u vozidla. Tuto síť ještě musíme zmenšit pro přesnější výpočty a můžeme ji nastavit pro všechny plochy zvlášť. Proto jsme museli na začátku rozdělit vozidlo na menší plochy, jak je ukázáno v kapitole 4.1.2. Zmenšení sítě provedeme pomocí funkce: *Mesh/Part Mesh Setup*. Pro menší části použijeme jemnější síť.



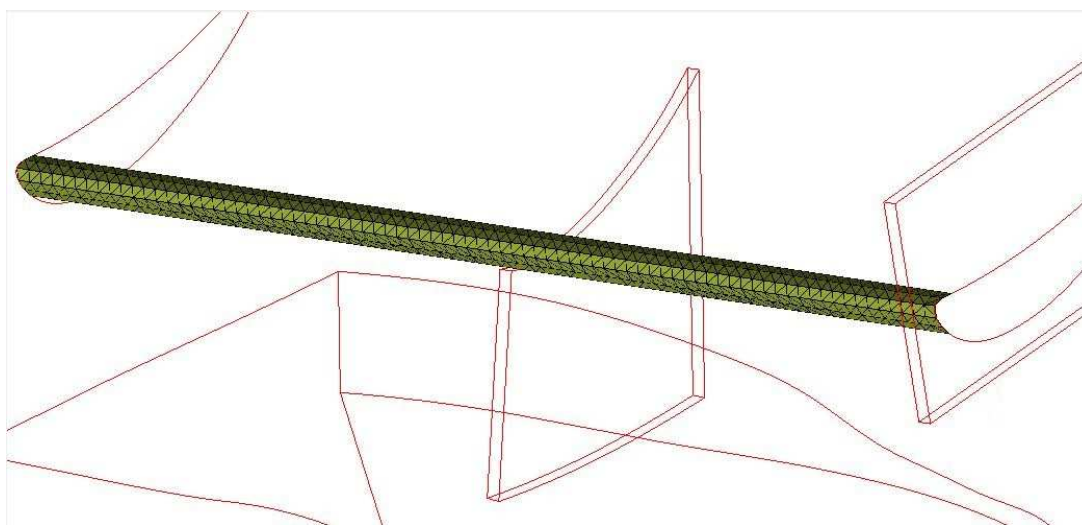
Obr. 44. nastavení části sítě



Obr. 45. nastavení části sítě

POVRCHOVÁ SÍŤ

Na zadním křídle je třeba nastavit nastavit přesnější výpočet povrchové sítě na náběžné hraně, a to pomocí funkce *Compute Mesh/Surface Mesh Only*, kde za input byla zadaná NÁBĚŽNÁ HRANA



Obr. 46. povrchová síť na náběžné hraně



HUSTOTA SÍŤE

Pro blízké okolí auta musíme nastavit jemnější síť i před křídlo, a to pomocí funkce: *Mesh/Create Mesh Density*.

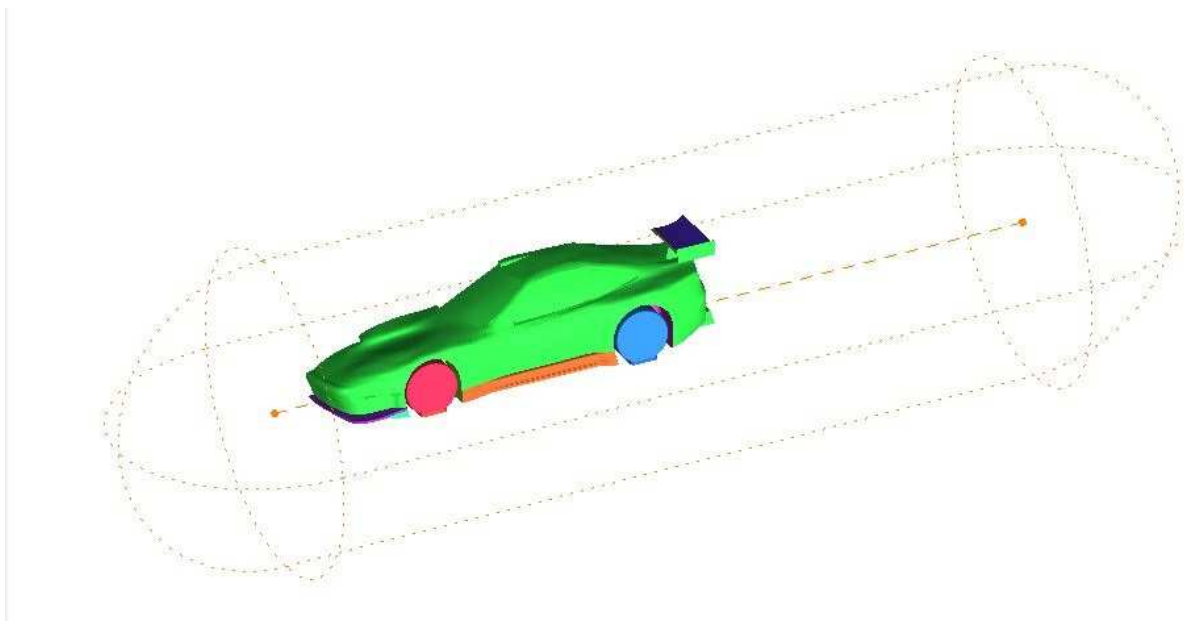


Obr. 47. hustota síťe

Hustota síťe definuje objemovou oblast s volitelnou velikostí síťe, tam kde neexistuje geometrie, např. před křídlem. Můžeme použít i v případě, kdy nemáme aktuální geometrii modelu. Síťové uzly nejsou omezeny na hustotě objektu. Geometrie se mohou vzájemně protínat. Nastavenou hustotu síťe můžeme ještě dále zvyšovat. Hustota síťe se vždy dělí na nejmenší nastavení velikosti.

Nastavení velikosti:

- size - velikost buňky síťe
- ratio - poměr expanze od hustoty objektu
- width: velikost vybrané oblasti



Obr. 48. ukázka nastavení hustoty síťe

VÝBĚR TYPU SÍŤE

Budeme používat Tetra/Mixed objemovou síť a pracujeme metodou Robust(Octree) (ukázka síťe je na obr. 31.).

Vlastnosti zvolené metody jsou:

- zachová tetra objemy
- jde použít, když máme komplexní tvar
- jde použít, když nechceme trávit příliš mnoho času s opravou geometrie.



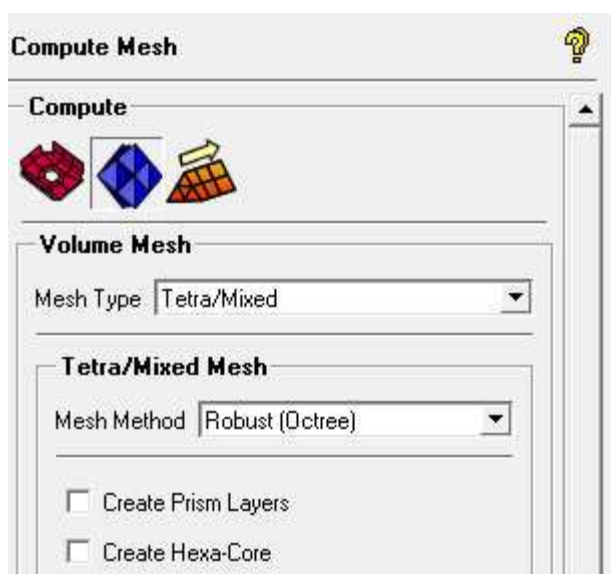
Stačí nastavit odpovídající velikost sítě na geometrii

- části geometrie modelu
- povrchu
- křivek.

VÝPOČET SÍTĚ



Obr. 49. výpočet sítě



Obr. 50. nastavení pro výpočet sítě

Po spuštění *Compute Mesh* můžeme vybírat ze tří možností:

- plošná síť
- objemová síť
- prismsy.

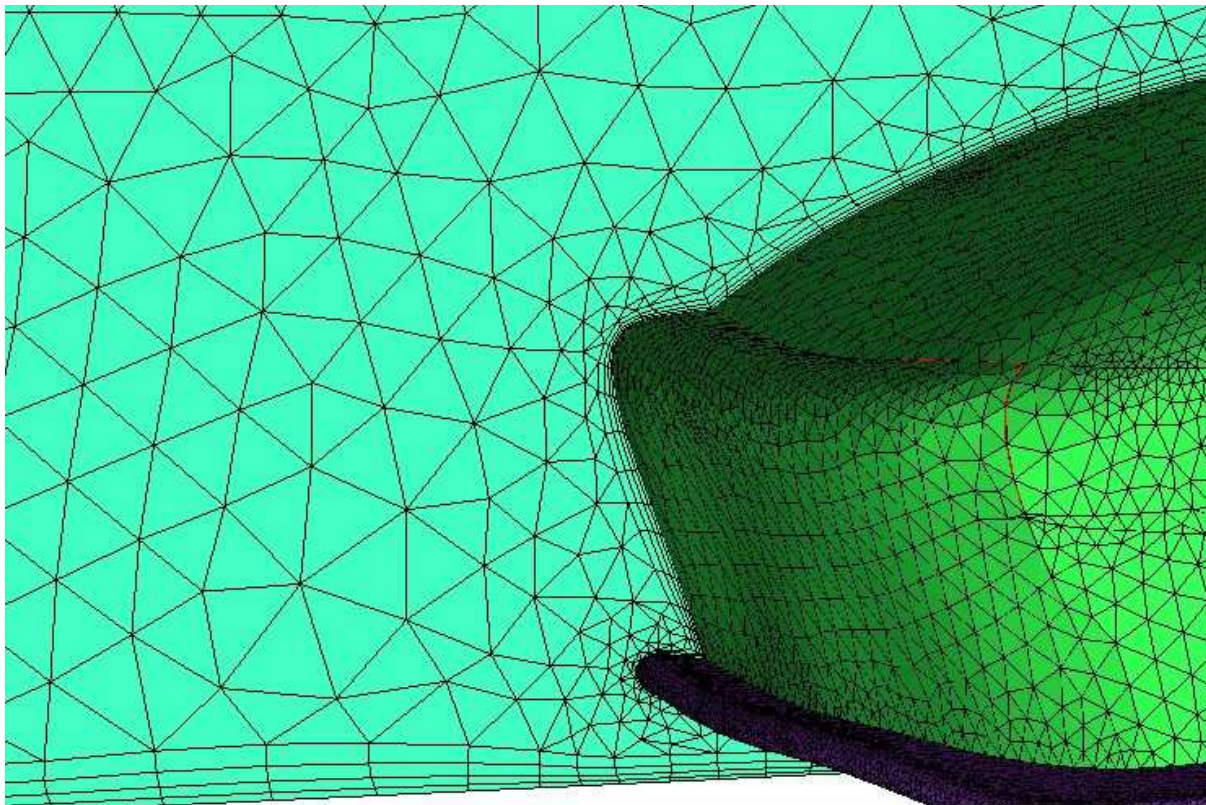
Poté, co zvolíme objemovou síť vybíráme typ sítě, v našem případě tetra/mixed. Dále zvolíme metodu pro síťování (robust). Musíme ještě nastavit, aby počítal i předem nastaveným povrchovým sítím.



PRISMATA

Pro správnou simulaci proudění v mezní vrstvě musíme nastavit prismatické buňky při síťování.

Mesh/Global Mesh Setup

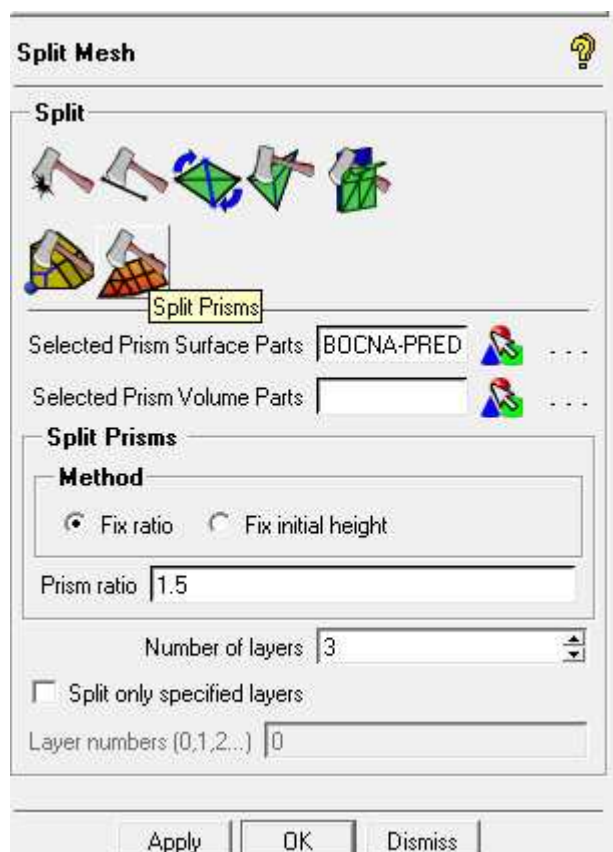


Obr. 51. ukázka prismatic

Prismata jsou dobře viditelná na obrázku, jde o rovnoběžné vrstvy s vozidlem. Prismata ještě musíme opravit: *Edit Mesh/Split Mesh/ Split Prisms*



Obr. 52. rozdělení prismatic



Obr. 53. nastavení pro rozdělení prismat

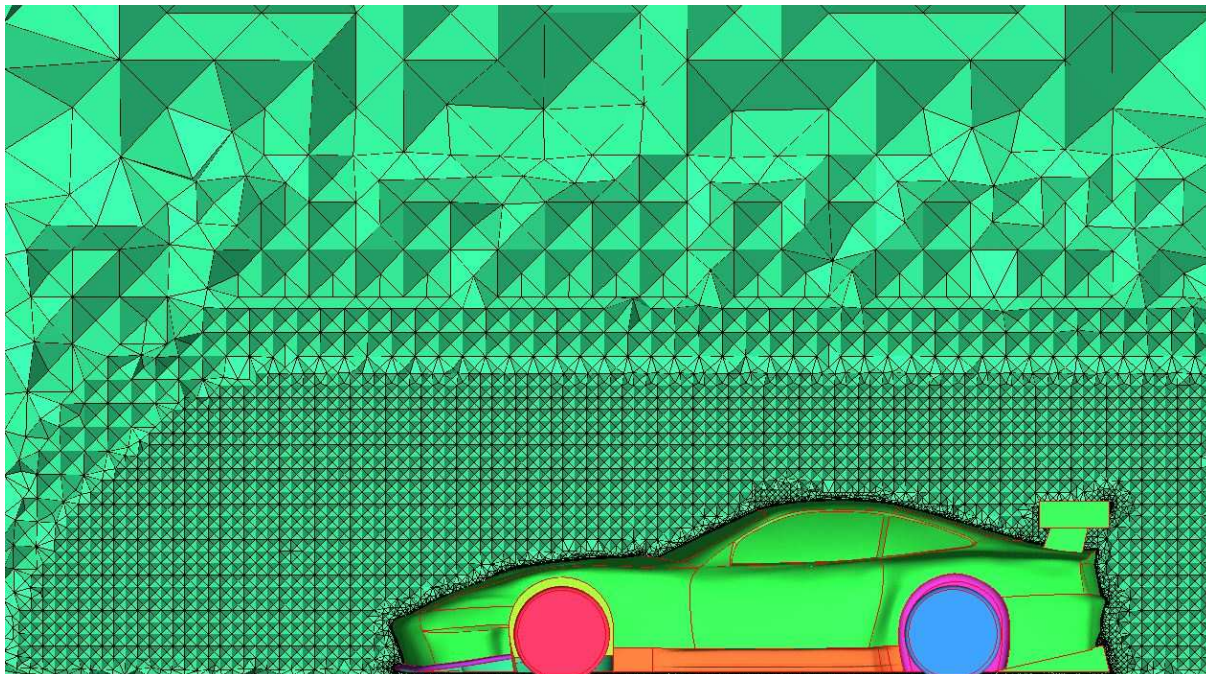
- Pokud je vyžadováno více prismatických vrstev, je rychlejší vytvoření jedné "tlusté" vrstvy, kterou dále rozdělíme pomocí funkce *mesh editing*. Rozdělení pak probíhá následovně:
- Fix ratio (Fix poměr): První vrstva je rozdělena tak, aby její výsledné vrstvy používaly daný poměr růstu.
- Fix initial high (Fix počáteční výška): První vrstva je rozdělena tak, že výška buňky u stěny nové vrstvy vychází z dané výšky.



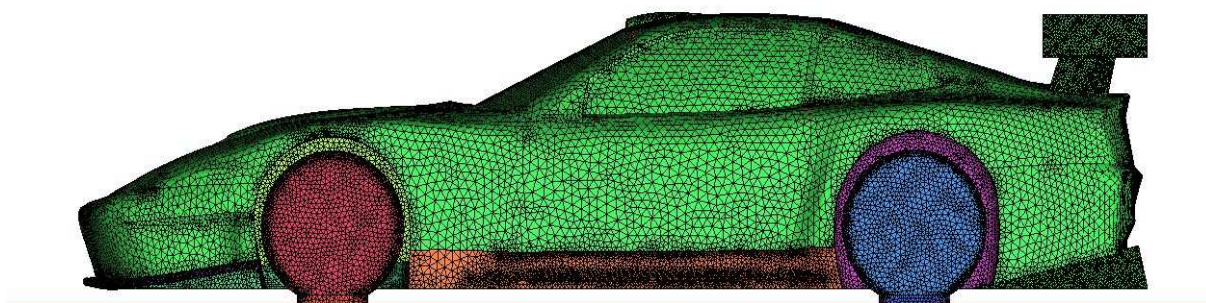
4.1.5 VÝSLEDNÁ SÍŤ

Na obrázku 54. je výsledná objemová síť. Je dobře patrné, jak se vzdáleností zvětšují buňky sítě.

Na obrázku 55. je znázorněna povrchová síť vozidla.



Obr. 54. objemová síť



Obr. 55. povrchová síť



4.1.6 VYTVOŘENÍ SÍŤE PRO DVĚ VOZIDLA

Síť pro dvě vozidla vytvoříme tak, že za základ vezmeme síť vytvořenou pro jedno vozidlo a pak tunel rozdělíme na tunely menší (obr. 56, 57, 58). Tím nám vzniknou T1, T2, T5.

T1 - první část tunelu, tunel před vozidlem

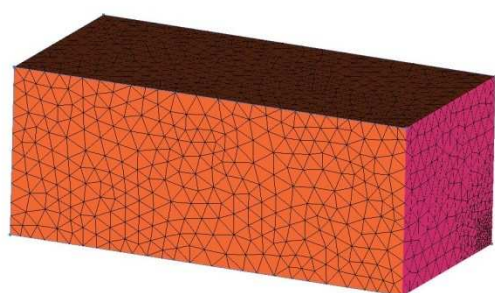
T2 - část tunelu s vozidlem

T3 - část tunelu s posunutým vozidlem (tím bude druhé vozidlo)

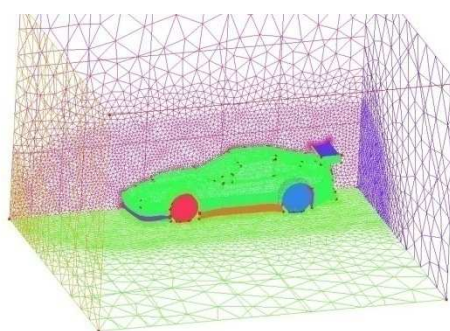
T4 - zadní část tunelu, která je za dvěma vozidly (v případě když spočítáme s dvěma vozidly)

T5 - zadní část tunelu, která je za jedním vozidlem (v případě když počítáme s jedním vozidlem)

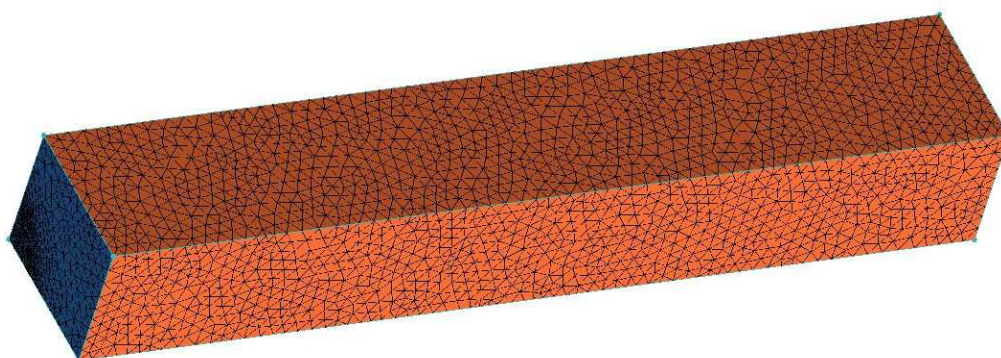
T4 vytvoříme tak, že od zadní části tunelu T5 odečteme velikost tunelu T3. ($T5 - T3 = T4$).



Obr. 56. T1



Obr. 57. T2

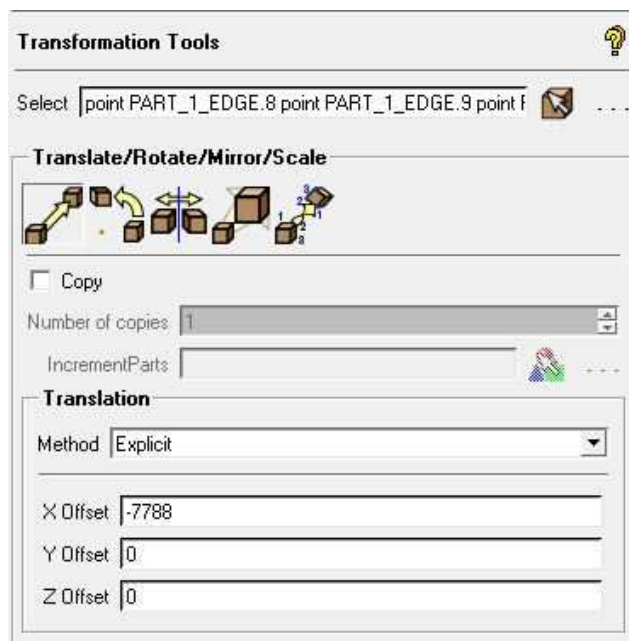


Obr. 58. T2

T3 vytvoříme tak, že pomocí funkce *Geometry/transform* posunujeme T2 o -7788 mm, ve směru x, což je velikost délky tunelu T2. To uděláme proto, abychom to mohli vložit za T2 a potom to ukládáme jako T3.



Obr. 59. transform geometry



Obr. 60. nastavení posunutí

Před spojením částí tunelu musíme jednotlivé části zkontrolovat (upravit) síť a to pomocí funkce: *Edit Mesh/Check Mesh*.



Obr.61. kontrola sítě

Dále kontrolujeme kvalitu sítě, pomocí příkazu *Edit Mesh/Smooth Mesh*



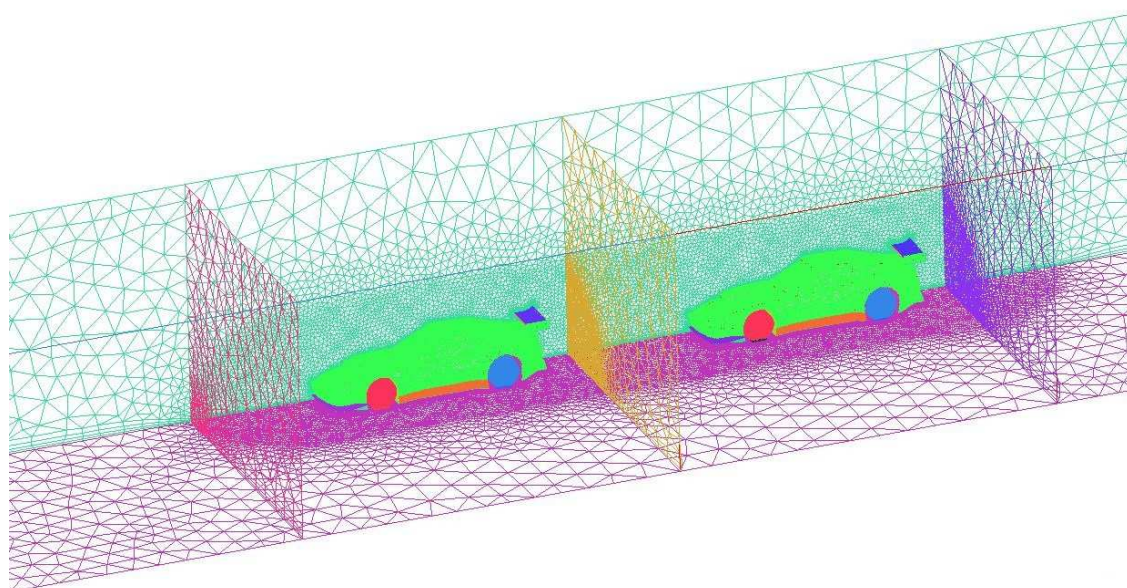
Obr. 62. kontrola kvalitu sítě



Nyní otevřeme nový projekt v ICEM-u a označíme všechny geometrie, které chceme spojit, a společně otevřeme. Potom otevřeme zvlášť síť, a zvolíme merge, aby nám zůstali otevřené síť, a nenahradila je nová otevřená síť. Pomocí funkce *Edit Mesh/Merge Nodes* spojíme ti části (T1-T2-T5, T1-T2-T3-T4). Musíme spojit plochy (rozhraní) které vznikly.



Obr. 63. funkce pro spojení části



Obr. 64. síť dvou vozidel

Na obr. 54. je dobře znázorněno, jak funguje hustota sítě (Mesh density) a jak se zjemňuje: v blízkosti vozidel je nejhustší.

4.1.7 EXPORT SÍTĚ DO FLUENTU

Nejdříve musíme nastavit program, v kterém chceme používat naši síť. V tomto případě jde o program Fluent. Vybereme jej v menu: *Geometry/Select Solver*.



Obr.65. export sítě

Pokračujeme na *Output Solver* a dále vybereme *Fluent_V6*.

Potom v menu vybíráme: *Geometry/Write input* a zde nastavíme, kam chceme ukládat.



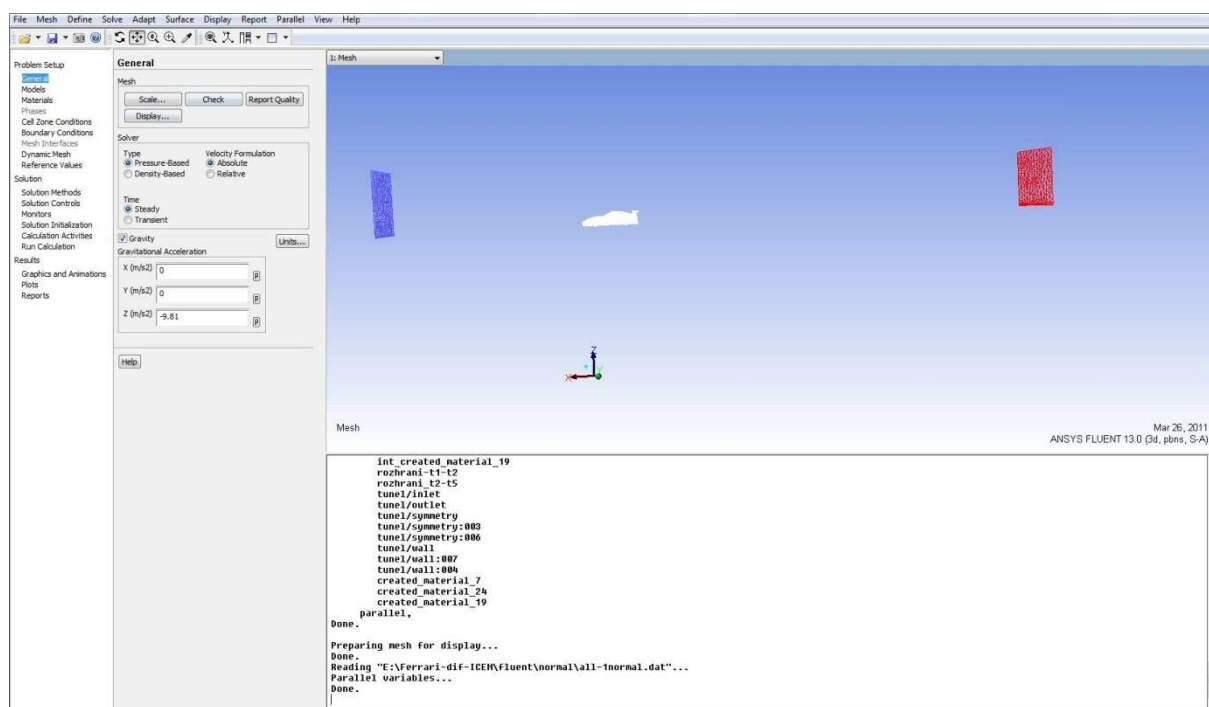
4.2 SIMULACE PROUDĚNÍ V PROGRAMU FLUENT

Výslednou síť importujeme do programu FLUENT, pomocí funkce *File/read/mesh*.

Pomocí FLUENT-u budeme simulovat proudění vzduchu kolem vozidla. Pomocí programu můžeme simulovat i velice náročné výpočty. Pracovní plocha FLUENT-u je znázorněna na obrázku 66.

Poté musíme nastavit v jakém měřítku budeme počítat a v jakých jednotkách byla síť vytvořena. Příkazem *General/Mesh/Scale* nastavíme síť, aby byla v měřítku 1:1.

Pak musíme nastavit typ proudění, okrajové podmínky (materiál vozidla, materiál proudícího látku, rychlost, teplotu, tlak, atd.) a monitorování. Vše bude podrobněji popsáno v dalších kapitolách.



Obr. 66. pracovní plocha fluentu

4.2.1 NASTAVENÍ VE FLUENTU

Problem Setup/

-*Models/Viscous* - zde je možné nastavit, jaké bude proudění.

Model/k-epsilon - znamená, že budeme počítat model s turbulentním prouděním.

Realizable - model obsahuje novou formulaci pro turbulentní viskozitu.

-*Materials/Fluid-air*

/Solid - aluminium

Tady nastavíme, že materiál karoserie bude hliník a proudící tekutina bude vzduch.

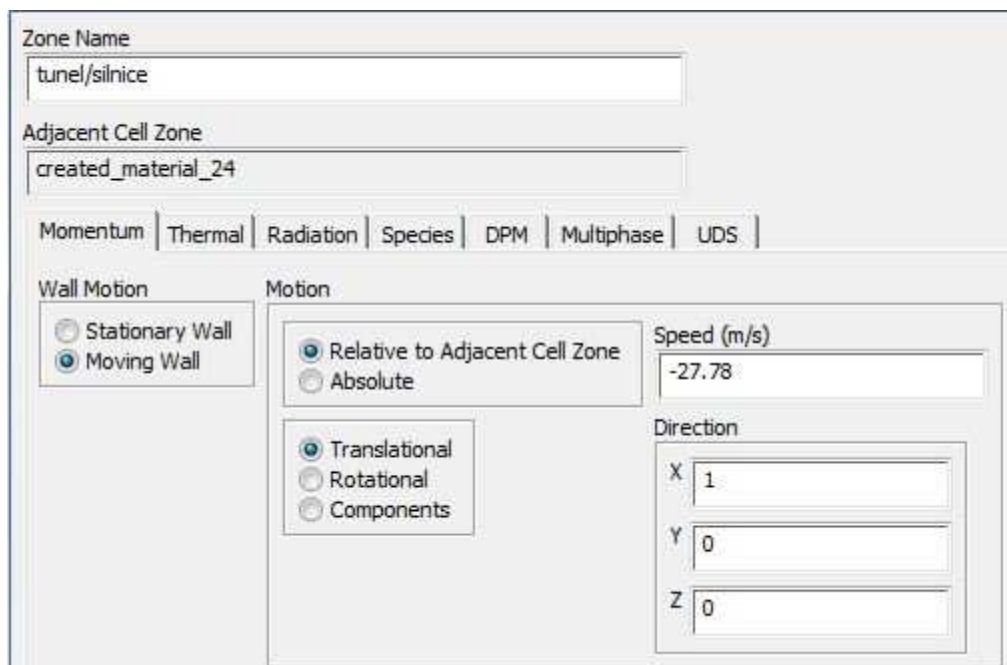
-*Boundary Conditions* - slouží pro nastavení okrajových podmínek.

inlet: *Type/velocity inlet* - z této stěny bude proudit vzduch a nastavíme jeho rychlost $v = 27,78 \text{ ms}^{-1}$

outlet: *Type/pressure-outlet* - Gauge pressure = 0 Pa



stěny: *Type/symmetry*
symmetry: *Type/symmetry*
ostatní jsou nastavené jako stěna (wall)
silnice: *Type/wall* - bude to nastaveno, jako pohybující stěna (Moving Wall) a nastavíme ji na translační pohyb.



Obr. 67. nastavení silnice

Kola nastavujeme jako rotující se kolo. Kola nastavíme na Wall, avšak ne jako translační, ale jako rotující. Nastavili jsme rychlost pohybu $27,78 \text{ ms}^{-1}$. U kola musíme zadávat úhlovou rychlost, kterou vypočteme pomocí rovnice $\omega = v/r$, kde v je rychlost vozidla a r je poloměr kola. Poloměr kola zjistíme v programu ICEM, dále zadáme polohu osy rotace a směr rotace.



Zone Name
kolo-predni

Adjacent Cell Zone
created_material_24

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS

Wall Motion
 Stationary Wall
 Moving Wall

Motion
 Relative to Adjacent Cell Zone
 Absolute

Speed (rad/s)
90.34

Rotation-Axis Origin
 X (m) 0
 Y (m) 0
 Z (m) 0.3075

Rotation-Axis Direction
 X 0
 Y 1
 Z 0

Obr. 68. nastaveni rotace předního kola

Zone Name
kolo-zadni

Adjacent Cell Zone
created_material_24

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS

Wall Motion
 Stationary Wall
 Moving Wall

Motion
 Relative to Adjacent Cell Zone
 Absolute

Speed (rad/s)
89.61

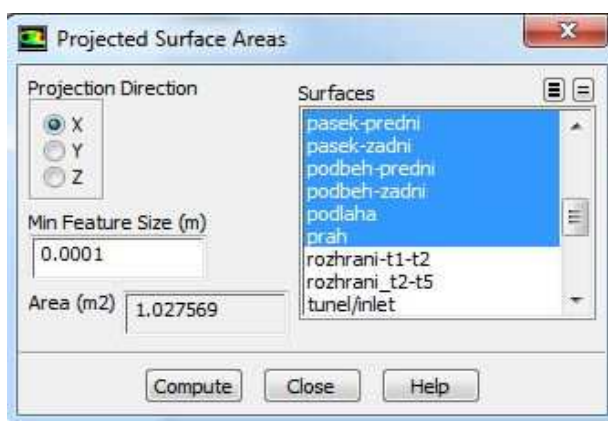
Rotation-Axis Origin
 X (m) -2.515
 Y (m) 0
 Z (m) 0.31

Rotation-Axis Direction
 X 0
 Y 1
 Z 0

Obr. 69. nastaveni rotace zadního kola

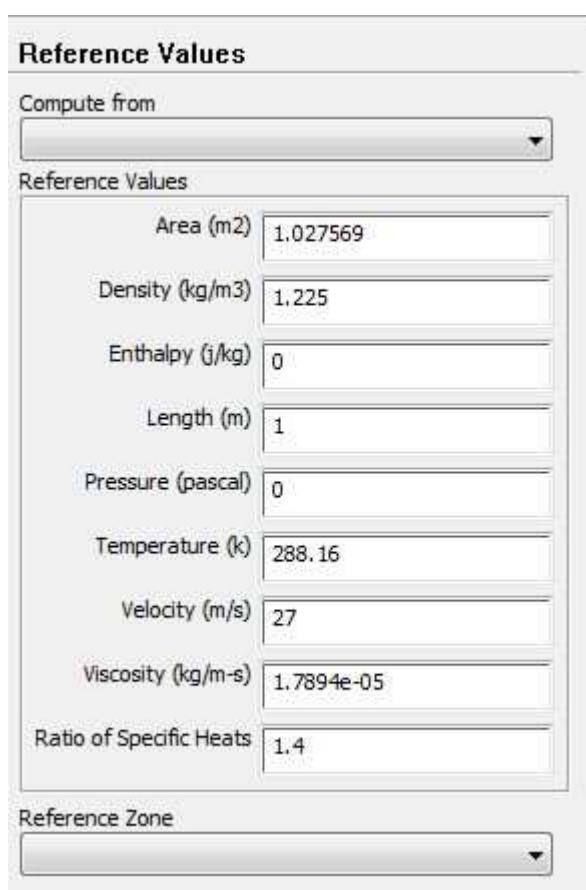
-Reference Values - tady zadáváme referenční hodnoty

Are: tady se zadává velikost plochy vozidla, kterou můžeme vypočítat pomocí funkce *Result/ Reports/Projected Areas*



Obr. 70. výpočet plochu

Zde nastavujeme, že nejmenší element bude mít hodnotu deset tisícín. Označujeme plochy vozidla a směr, ve kterém chceme čelní plochu. Pak tento výsledek píšeme do Reference Values.



Obr. 71. nastavení

Solution/

Monitors - zde nastavíme požadavek na konvergenci s přesností 10^{-5} , ukládání konvergence koeficientu odporu a koeficientu přítlaku a vykreslování výsledku konvergence.



drag - součinitel odporu (C_d)

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho v^2 A}$$

F_d - síla odporu

ρ - hustota vzduchu

v - rychlost objektu

A - čelní plocha

lift - součinitel přítlaku (C_l)

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2}\rho v^2 A}$$

F_l - síla přítlaku

Solution Initialization/

$$X \text{ Velocity} = -27,78 \text{ms}^{-1}$$

Calculation Activites/ - nastavíme, po kolika iteracích chceme, aby automaticky ukládal změny výpočtu.

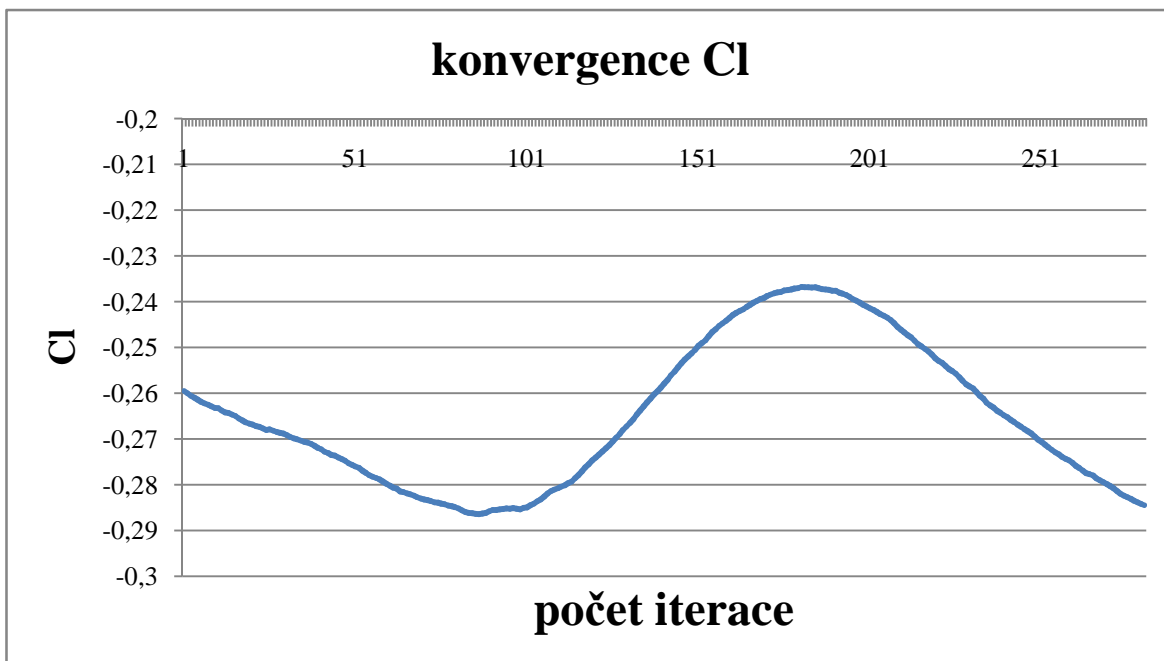
Solution/

Run Calculation - s jeho pomocí je spuštěn výpočet, a dále ještě nastaví počet iterací.

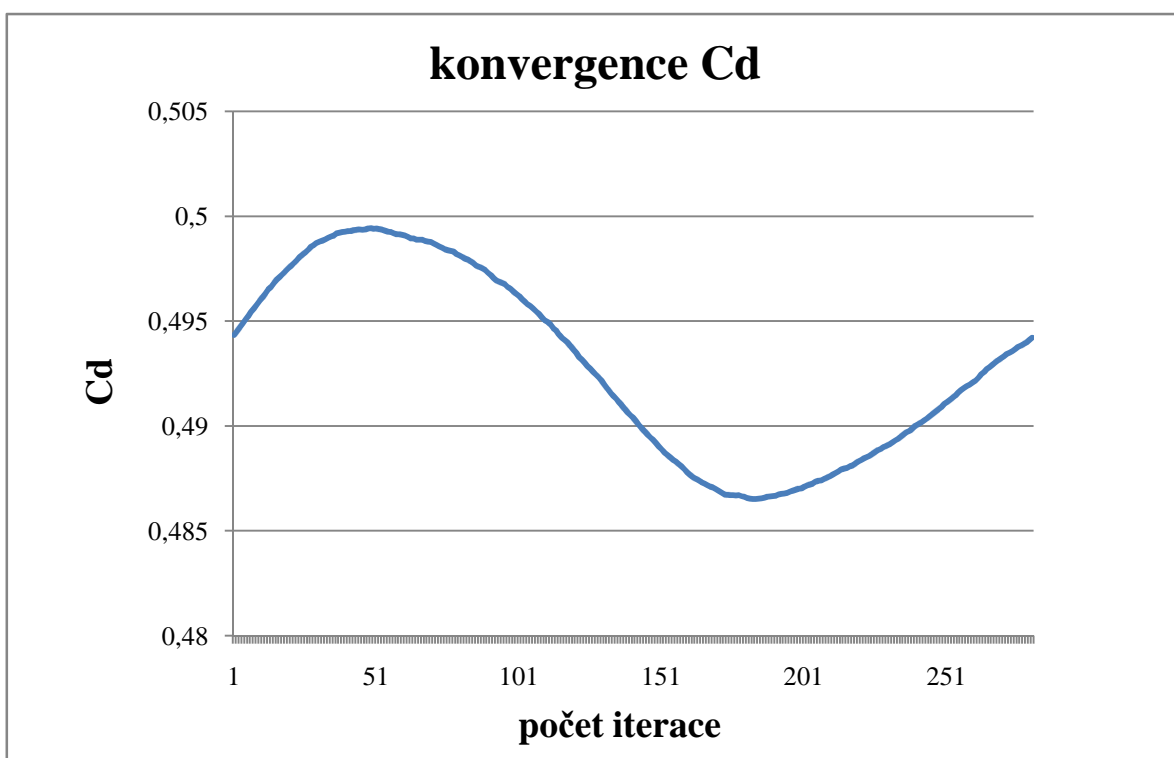
V našem případě budeme počítat 5000 iteraci, pro přesnější výpočet, přibližně tady začne konvergovat výsledek. Za výsledek budeme brát výsledky z txt souborů, které jsme nastavili u monitoru aby ukládal každou iterace. Za výsledek budeme považovat průměr posledních 1000 iteraci konvergence.



4.2.2 VÝPOČET









Graf. 1. konvergence součinitele



Graf. 2. konvergence součinitele



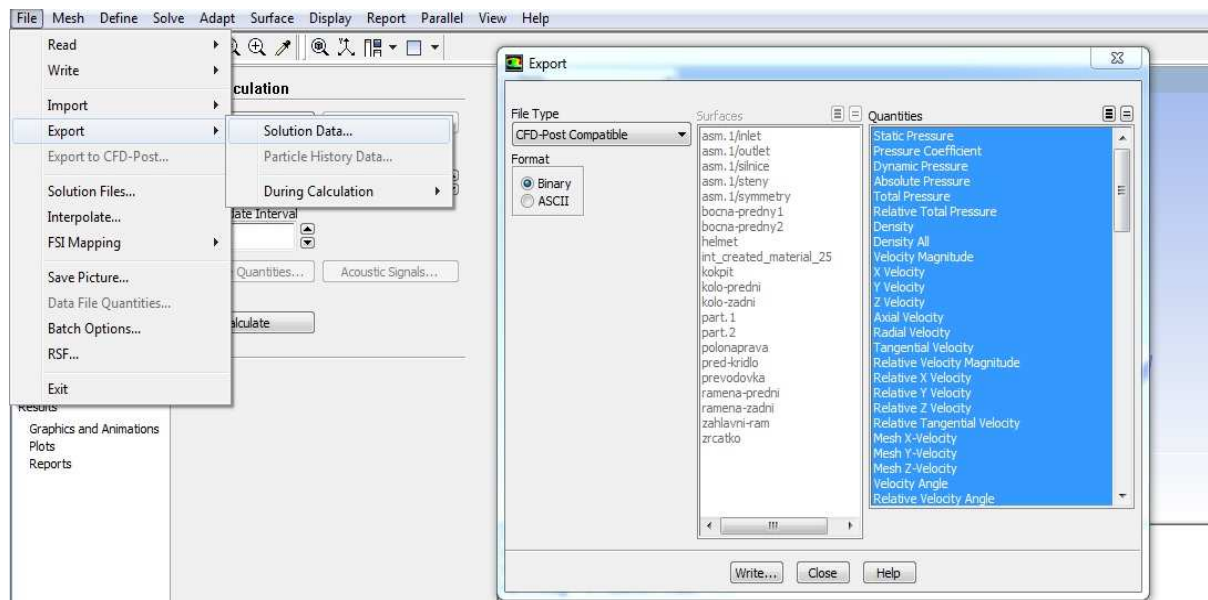
Tab. 2. výsledný koeficienty výpočtu

Varianty výpočtu		varianta	Cl-1.	Cd-1.	Cl-2.	Cd-2.
	1 vozidlo normal	A1	-0,54	0,50		
	2 vozidla normal	A2	-0,54	0,48	-0,26	0,48
	1 vozidlo bez difuzoru	B1	-0,49	0,49		
	2 vozidla bez difuzoru	B2	-0,46	0,47	-0,2	0,47
	1 vozidlo bez křídla	C1	-0,06	0,33		
	2 vozidla bez křídla	C2	-0,08	0,31	-0,01	0,24



4.2.3 EXPORT VÝPOČET DO CFD-POST

Výsledek co jsme dostali ve FLUENT-u teď exportujeme do programu CFD-POST, kde můžeme znázornit výsledky výpočtu na obrázcích.



Obr. 72. export výsledku

4.3 ZOBRAZENÍ VÝSLEDKU V PROGRAME CFD-POST

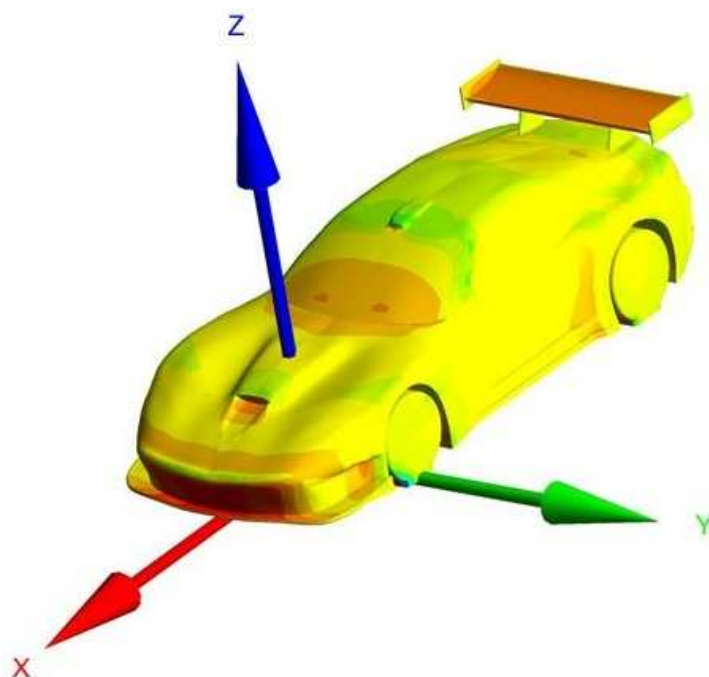
ANSYS CFD-Post je společný post-processor pro všechny produkty ANSYS-u a zabývá se dynamikou proudění. Poskytuje uživatelům vizualizaci a analýzu výsledků.

Dále vytváří obrazy na vysoké úrovni. Nabízí všechny nástroje, které jsou potřeba k výrobě zasvěceného řešení vizualizace, včetně 3D obrázků, které může sledovat kdokoli s volně šiřitelným prohlížečem 3D. Tyto vysoce kvalitní obrazy jsou neocenitelné při komunikaci o výsledcích s kolegy i zákazníky. Celý program tak pomáhá vysvětlit a pochopit složité jevy proudění.

S funkcí ANSYS CFD-Post mohou uživatelé rychle získat veškeré údaje, které potřebují z jejich výpočtu: vážený průměr, hmotnost toků, síly, maximální/minimální hodnoty a mnoho dalších funkcí. Umožňuje přesnější analýzu výsledků CFD, přidávání tabulek, prezentace výsledků a vykreslování grafů.



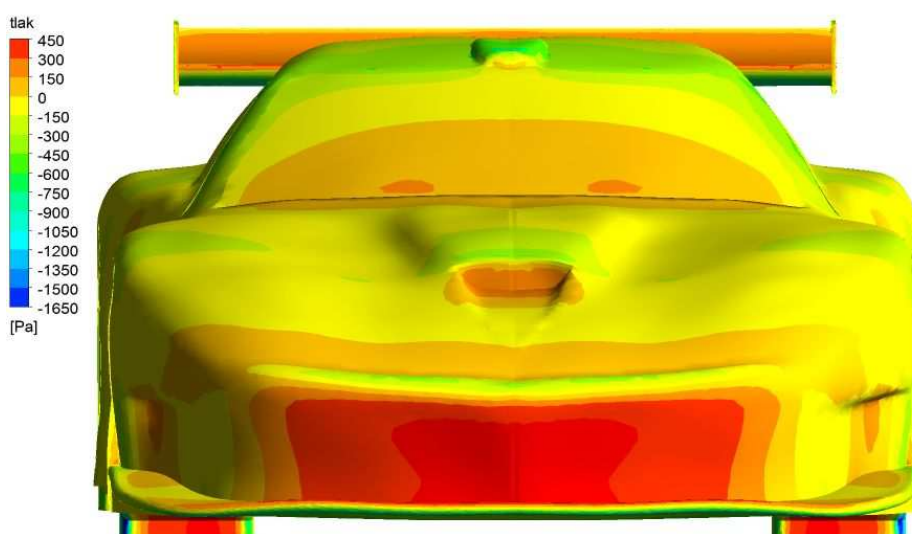
4.3.1 VÝSLEDKY VÝPOČTU VARIANTY A



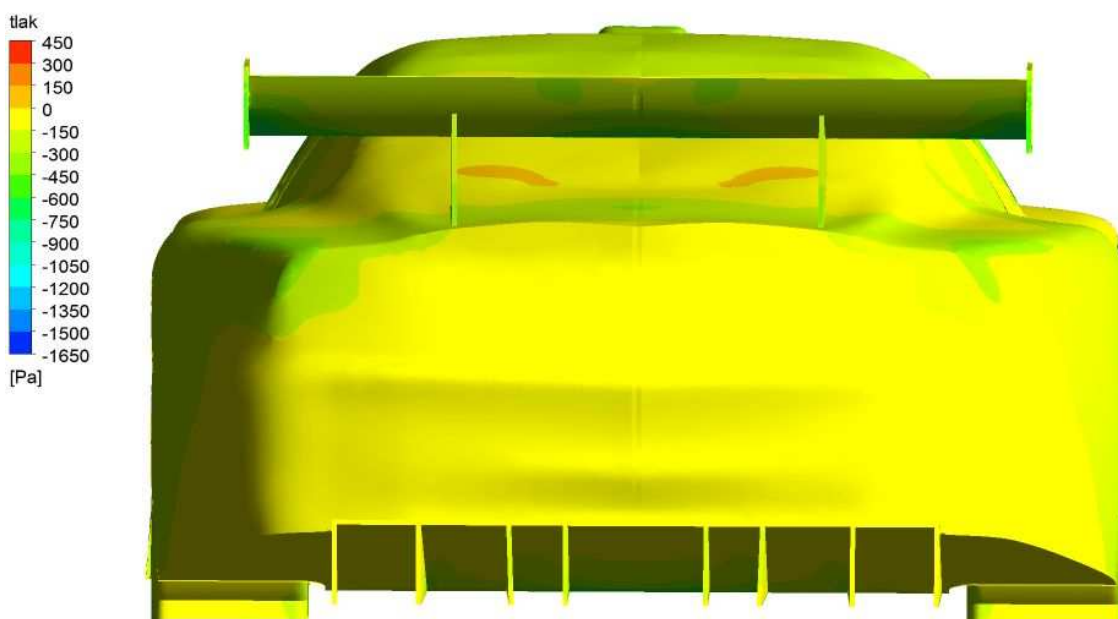
Obr.73. souřadný systém

Na obr. 73. je používán souřadný systém, a podle toho je koeficient přtlaku záporný. Výsledná pozitivní hodnota by znamenala vztlak, nikoliv přtlak. U koeficientu odporu jsme ve Fluentu nastavili -x, nebo směruje proti pohybu.

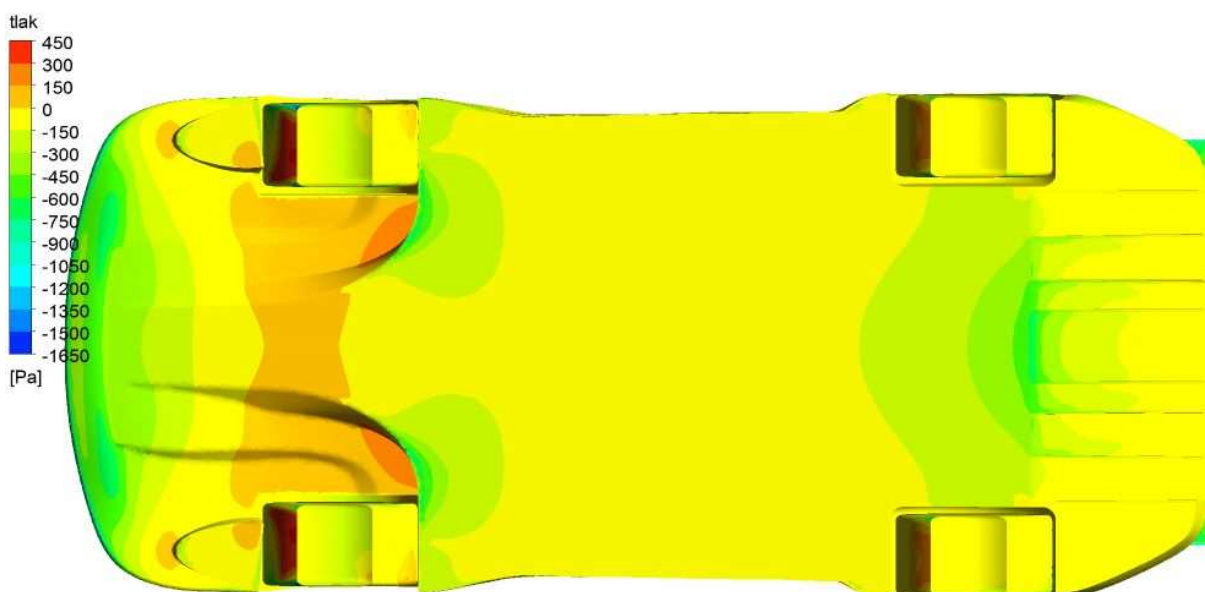
VÝSLEDKY VÝPOČTU PRO JEDNO VOZIDLO



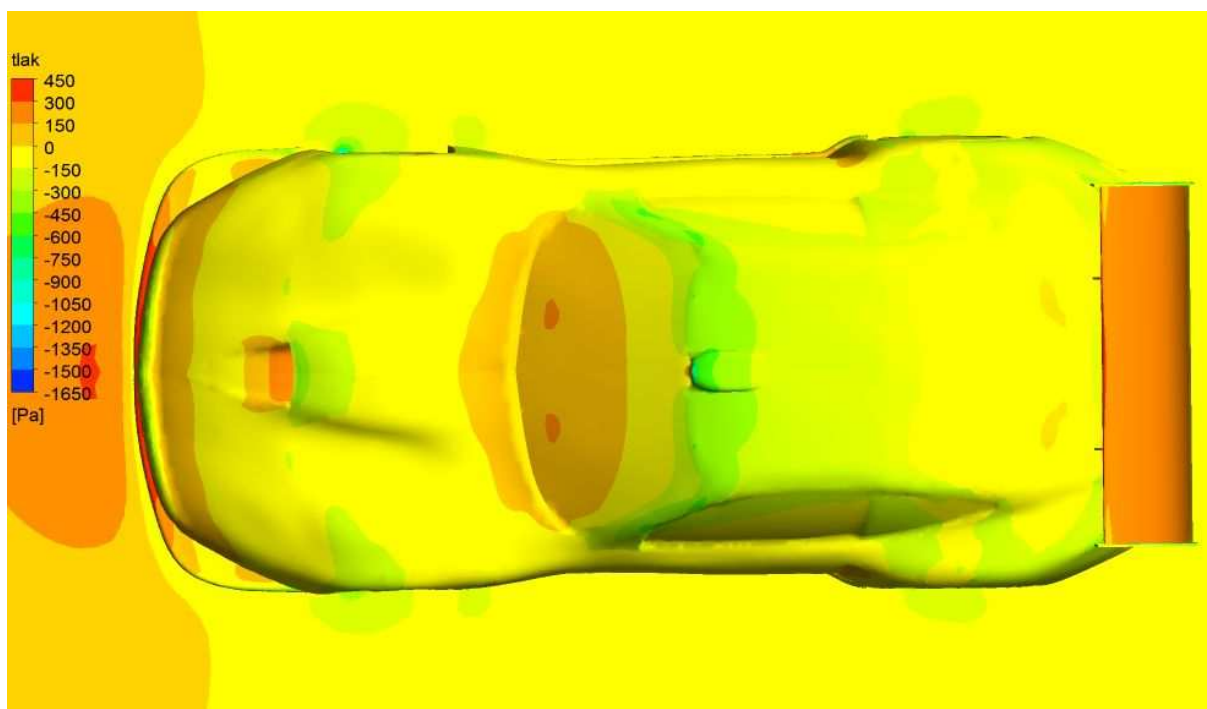
Obr. 74. varianta A1 - tlak na povrchu vozidla



Obr. 75. varianta A1 - tlak na povrchu vozidla



Obr. 76. varianta A1 - tlak na povrchu vozidla



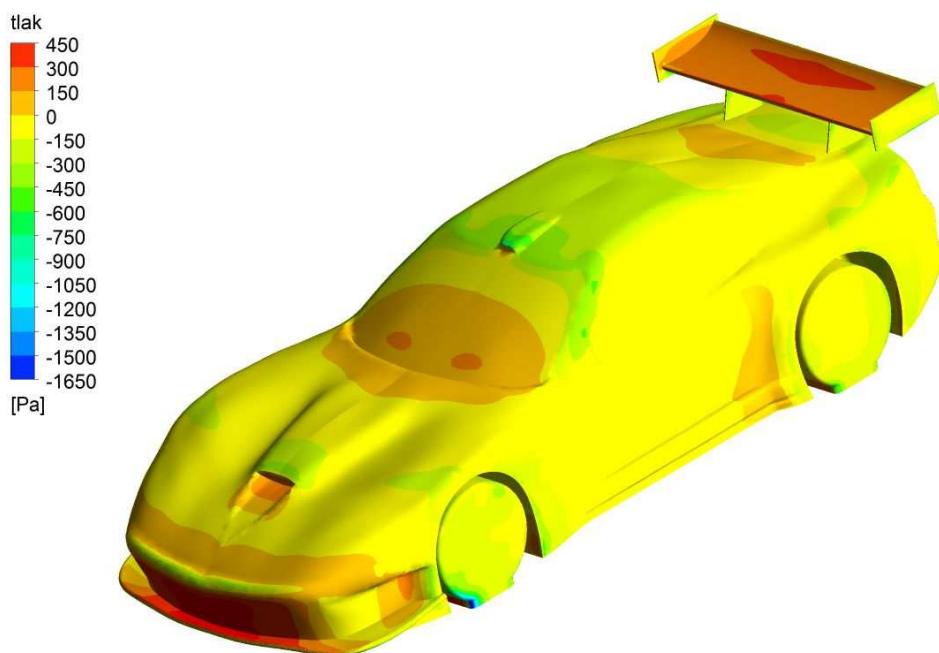
Obr. 77. varianta A1 - tlak na povrchu vozidla



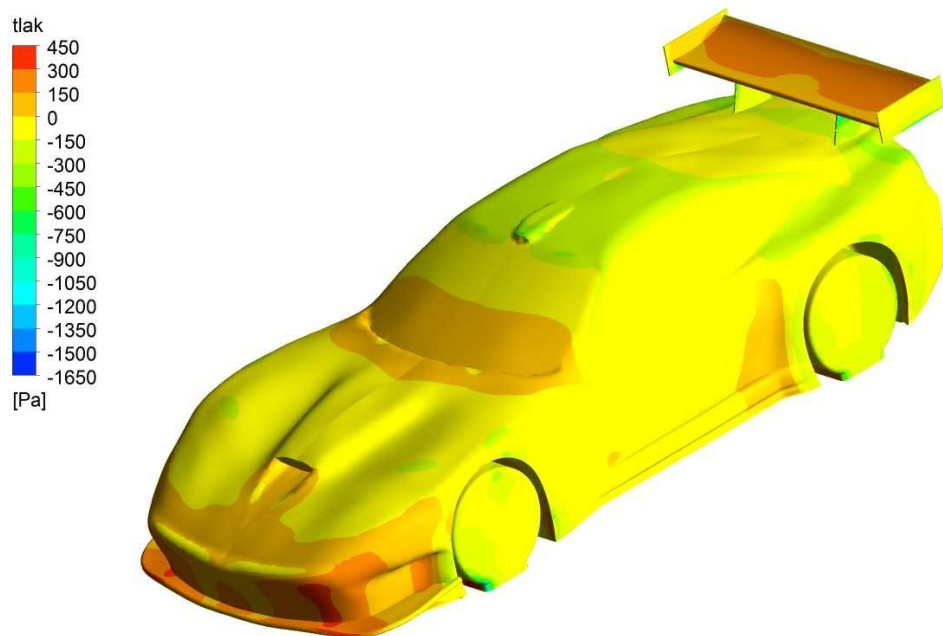
Obr. 78. varianta A1 - tlak na povrchu vozidla



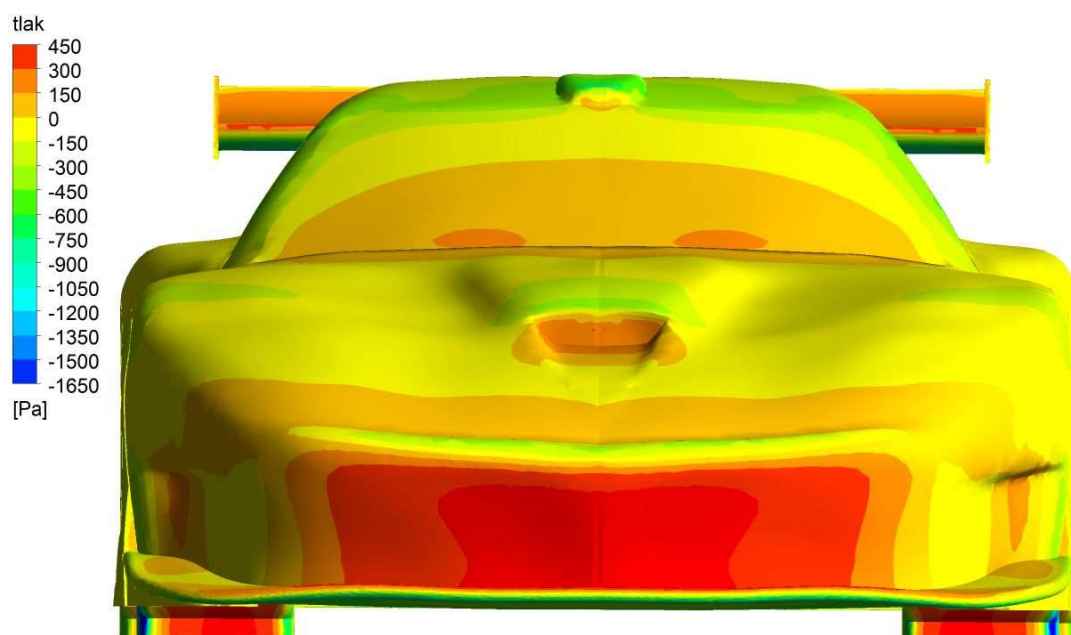
VÝSLEDKY VÝPOČTU PRO DVĚ VOZIDLA



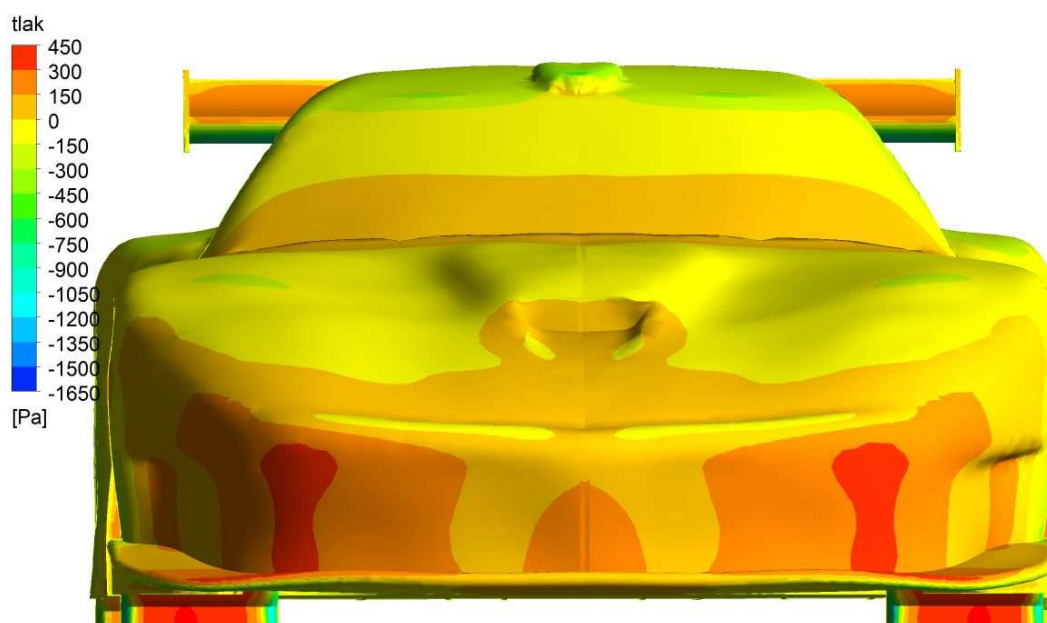
Obr. 79. varianta A2/1 - tlak na povrchu prvního vozidla



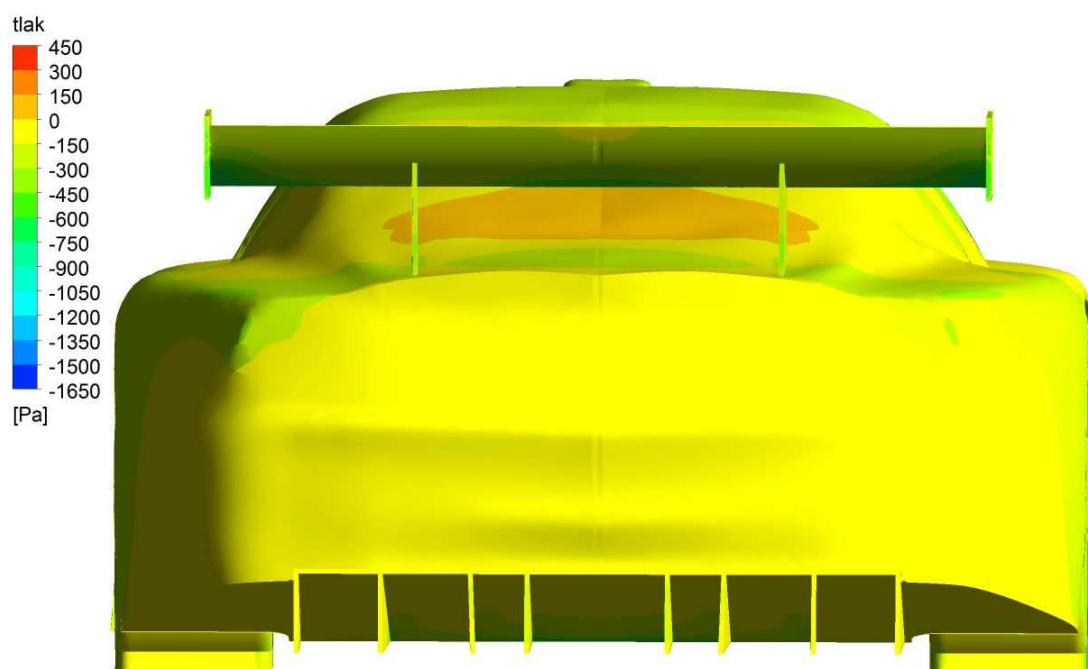
Obr. 80. varianta A2/2 - tlak na povrchu vozidla nacházejícího se v úplavu



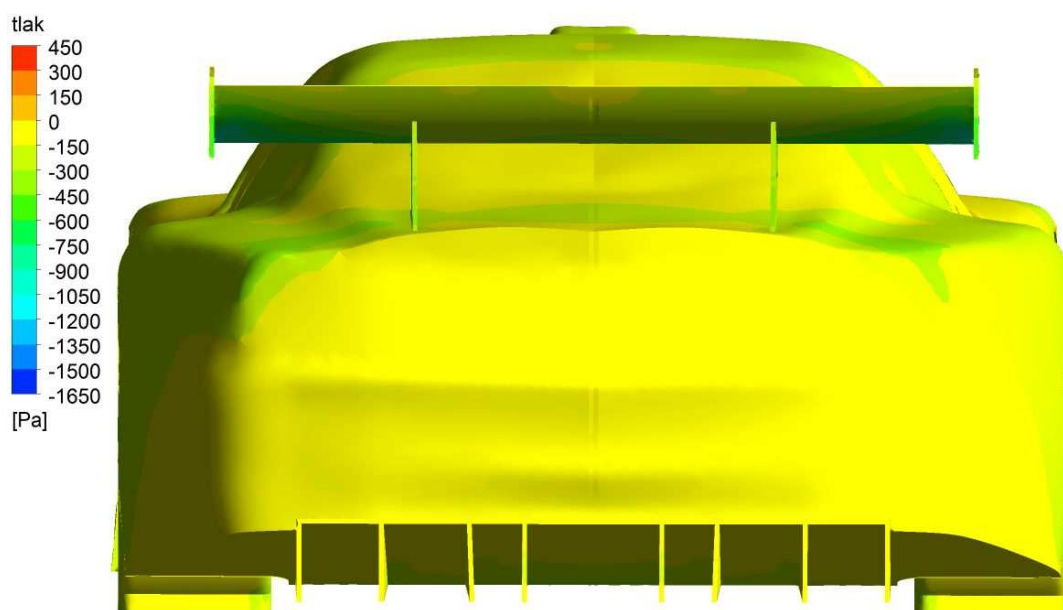
Obr. 81. varianta A2/1 - tlak na povrchu prvního vozidla



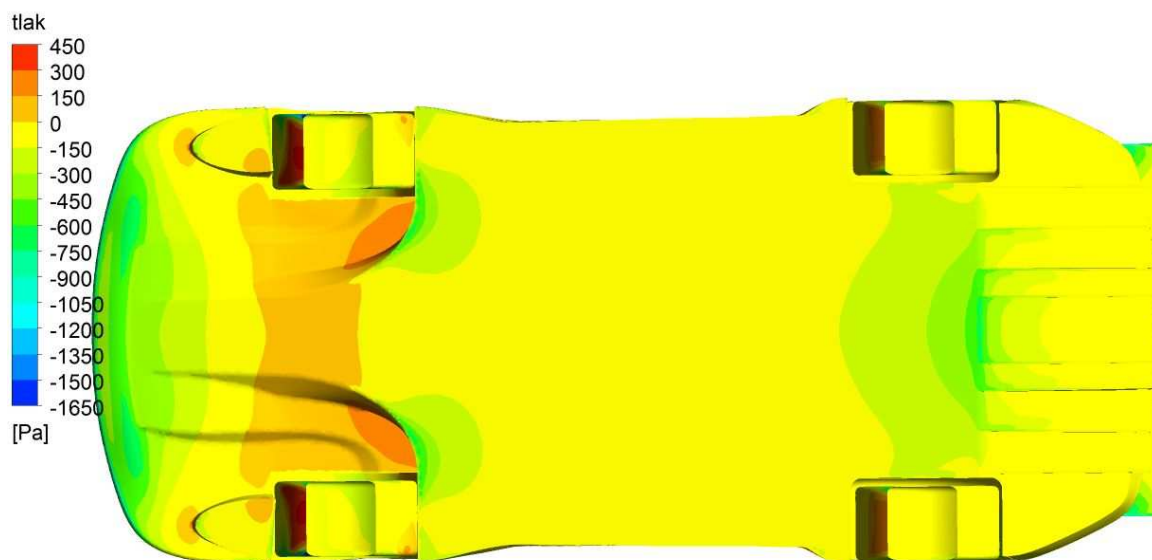
Obr. 82. varianta A2/2 - tlak na povrchu vozidla nacházejícího se v úplavu



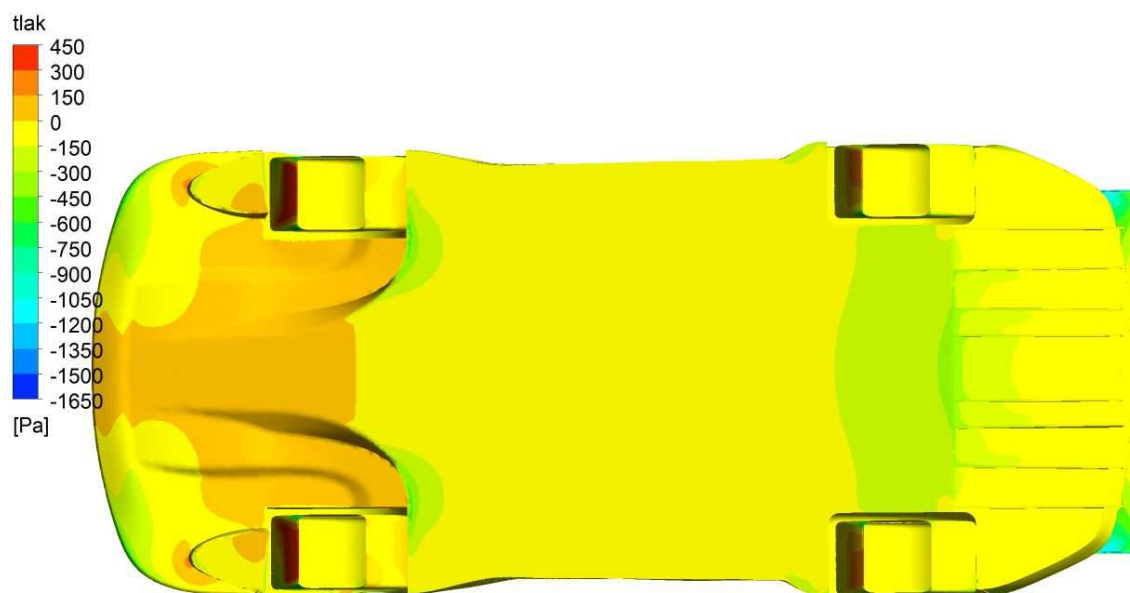
Obr. 83. varianta A2/1 - tlak na povrchu prvního vozidla



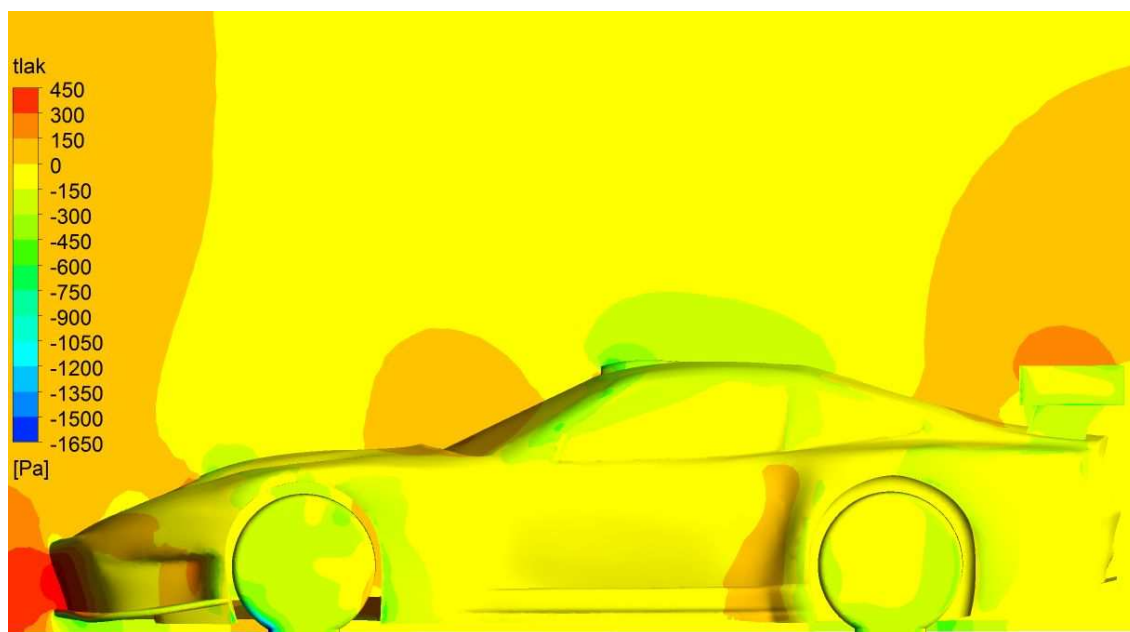
Obr. 84. varianta A2/2 - tlak na povrchu vozidla nacházejícího se v úplavu



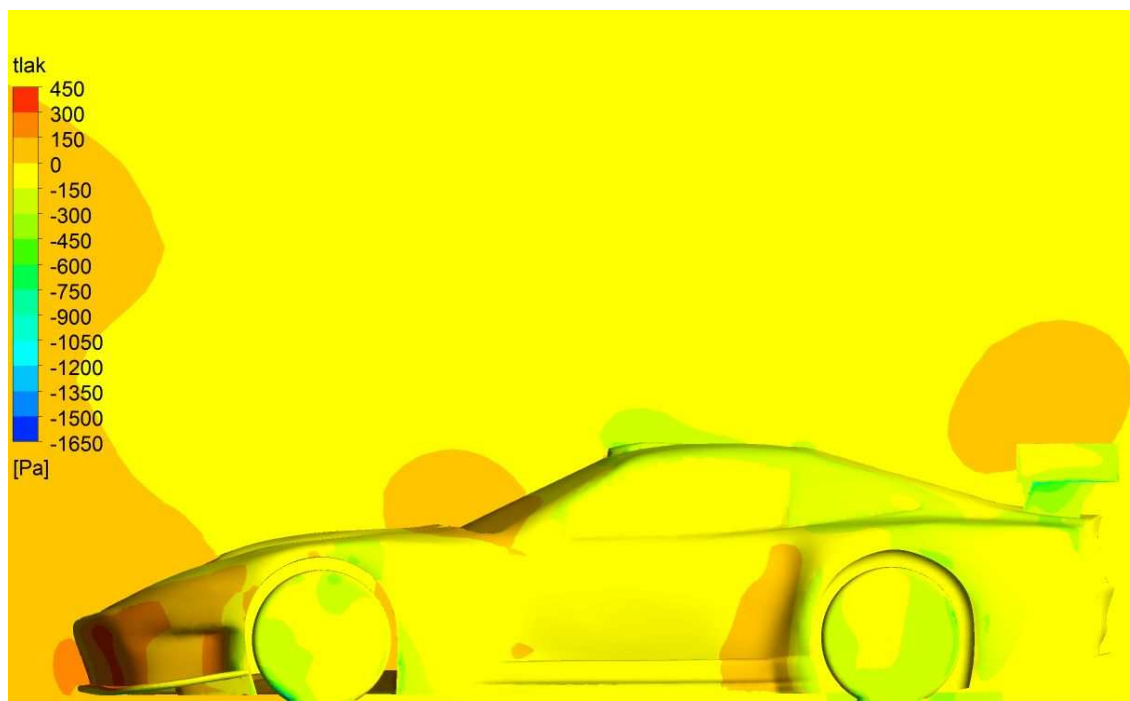
Obr. 85. varianta A2/1 - tlak na povrchu prvního vozidla



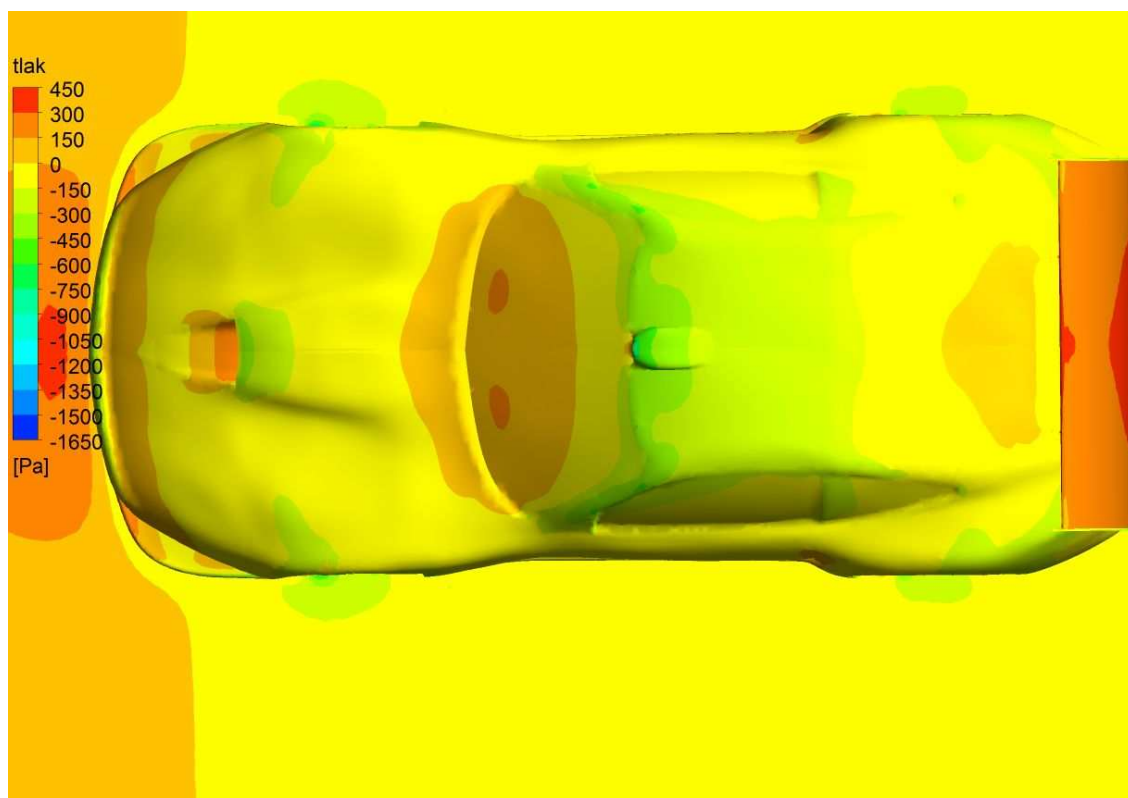
Obr. 86. varianta A2/2 - tlak na povrchu vozidla nacházejícího se v úplavu



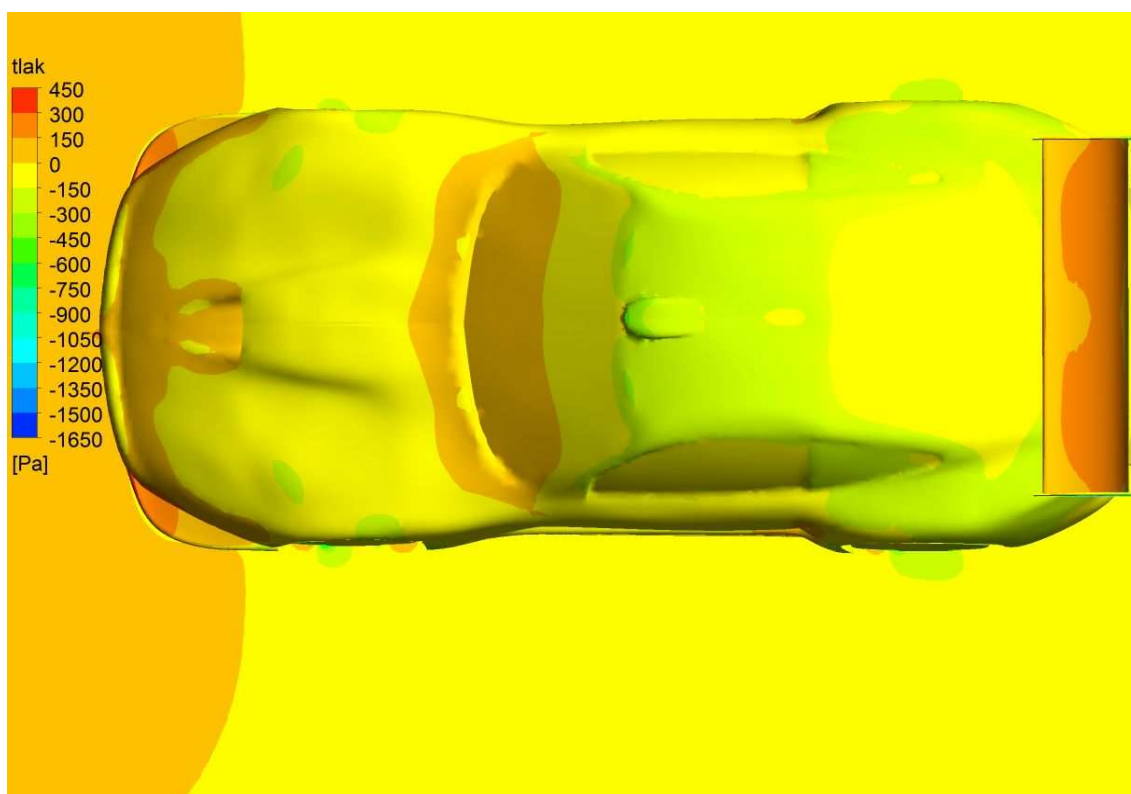
Obr. 87. varianta A2/1 - tlak na povrchu prvního vozidla



Obr. 88. varianta A2/2 - tlak na povrchu vozidla nacházejícího se v úplavu



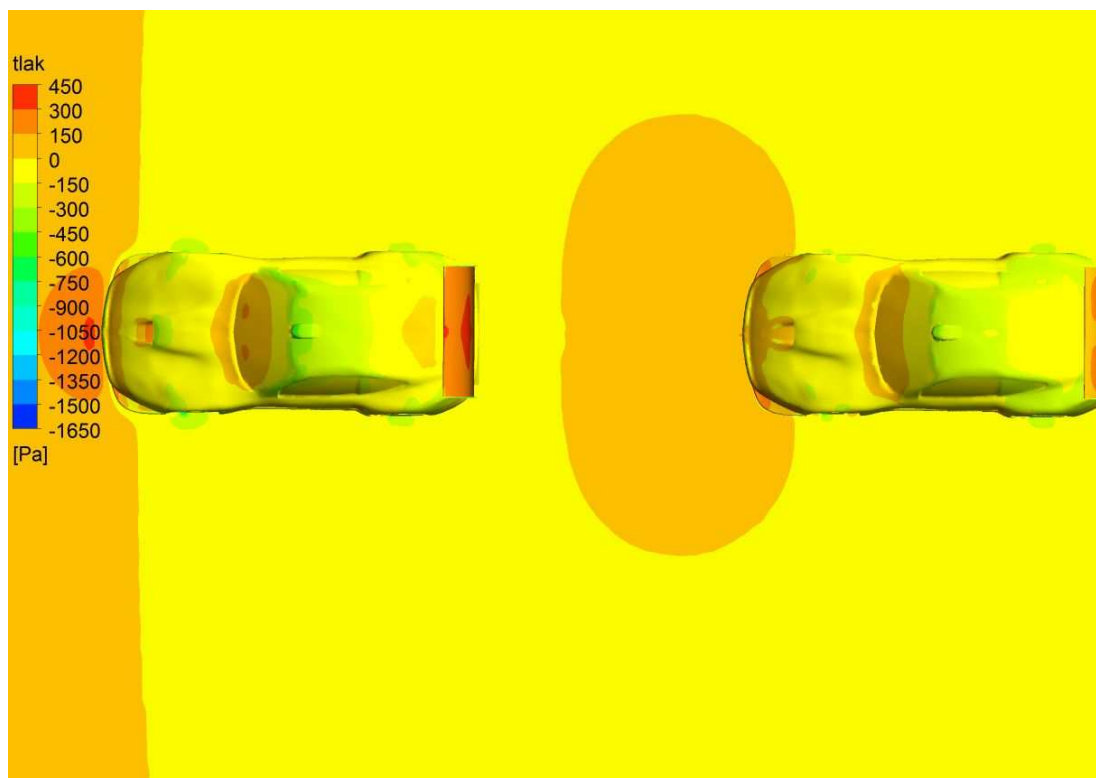
Obr. 89. varianta A2/1 - tlak na povrchu prvního vozidla



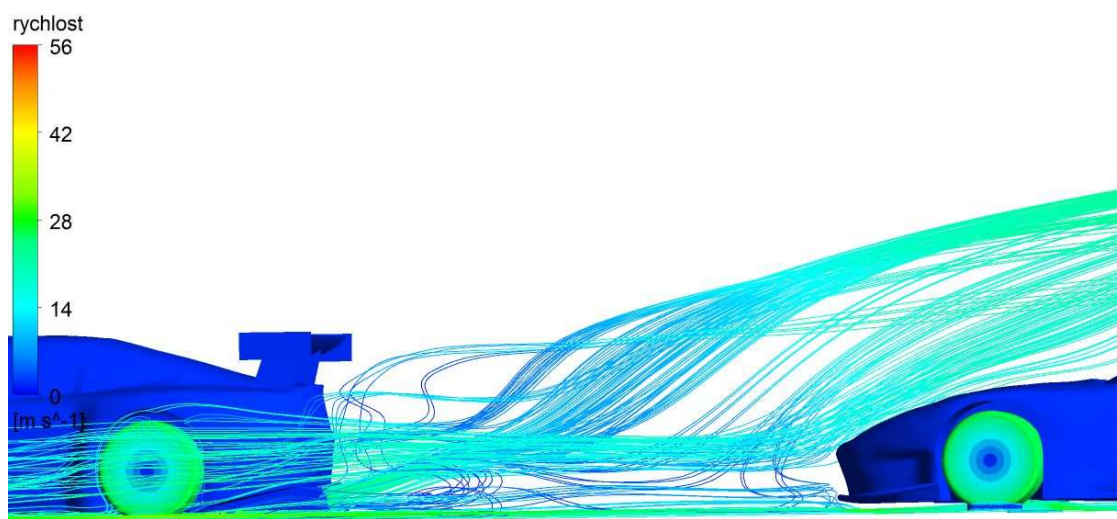
Obr. 90. varianta A2/2 - tlak na povrchu vozidla nacházejícího se v úplavu



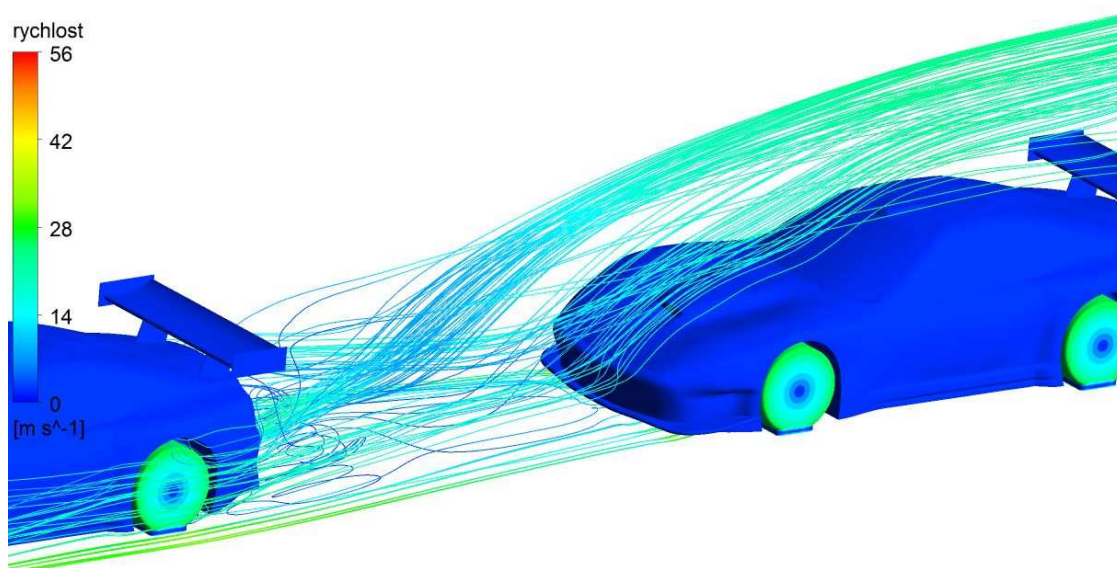
Obr. 91. varianta A2 - tlak na povrchu vozidla



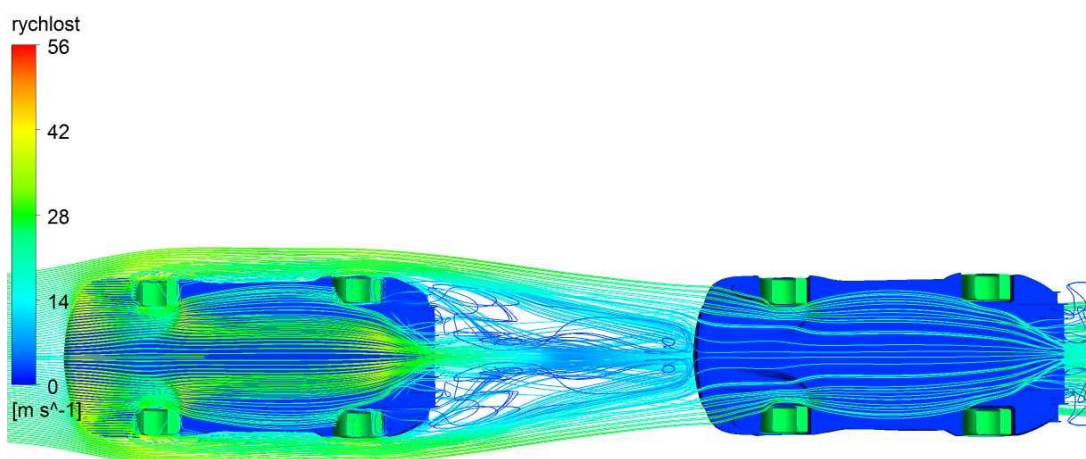
Obr. 92. varianta A2 - tlak na povrchu vozidla



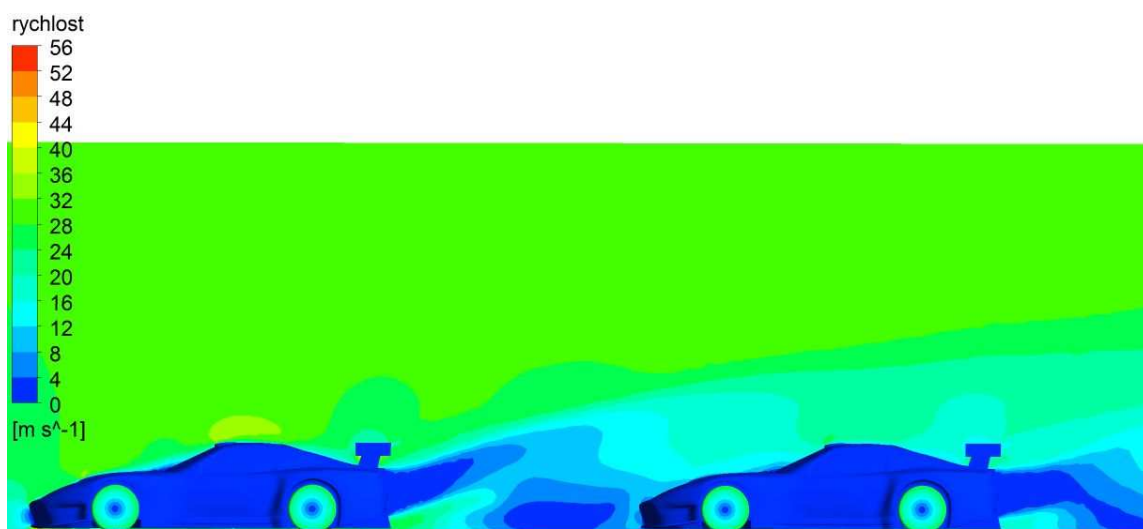
Obr. 93. varianta A2 - proudnice rychlosti



Obr. 94. varianta A2 - proudnice rychlosti



Obr. 95. varianta A2 - proudnice rychlosti



Obr. 96. varianta A2 - kontury rychlosti v rovině symetrie



Na obrázku 79. je dobře vidět, že výpočty, splnily předpoklady teorie aerodynamiky vozidla, což je uvedeno v kapitole 1.3. Je dobře patrné jak velký je tlak na přední část vozidla, což se manifestuje jako aerodynamický odpor vozidla, dále pak podtlak na kapotě a přítlak u čelního skla.

Z obrázku 96. je možné zjistit i tzv. vakuum, což znamená, že rychlost proudění vzduchu za vozem je téměř nulová. Molekuly vzduchu nestačí tento prostor tak rychle zaplnit, jak je uvedeno v teoretické části.

Z výsledku je zřejmé, že odpor vozidla se v úplavu téměř nezměnil, což se dá odvodit i z tlakového rozložení na vozidlech. Důvodem je, že vozidlo je již v takové vzdálenosti, kdy vzduch již vyplnil prostor mezi vozidly. Při porovnání obrázku 81. s obrázkem 82. zjistíme, že vozidlo v úplavu má menší statický tlak na přední části vozidla. V této části, která je kolmá na proud vzduchu - nárazník, vzniká u prvního vozidla i podtlak, který u vozidla v úplavu není. To je patrné i na obrázku 93. znázorňujícího v této části proudění jen malého množství vzduchu. Z ostatních obrázků porovnáním tlaků zjistíme, že na ostatních částech vozidla v úplavu se zvýšil tlak, kromě zadní části vozu a křídla. Zmenšení tlaku na křídle se projeví zejména na přítlaku vozidla, a to můžeme odvodit z výpočtu varianty vozidla bez křídla, uvedeného v kapitole 5.2.

Přítlak se zmenšil u křídla zmenšil tlak, které přitlačí vozidlo, aj pod vozem změnil tlak. Vozidlo které je v úplavu na předně části má přítlak než u prvního vozidla tam byl podtlak, nebo u vozidla v úplavu pod vozem skoro neproudí vzduch, to se dá vidět na obrázku 85. a 86.

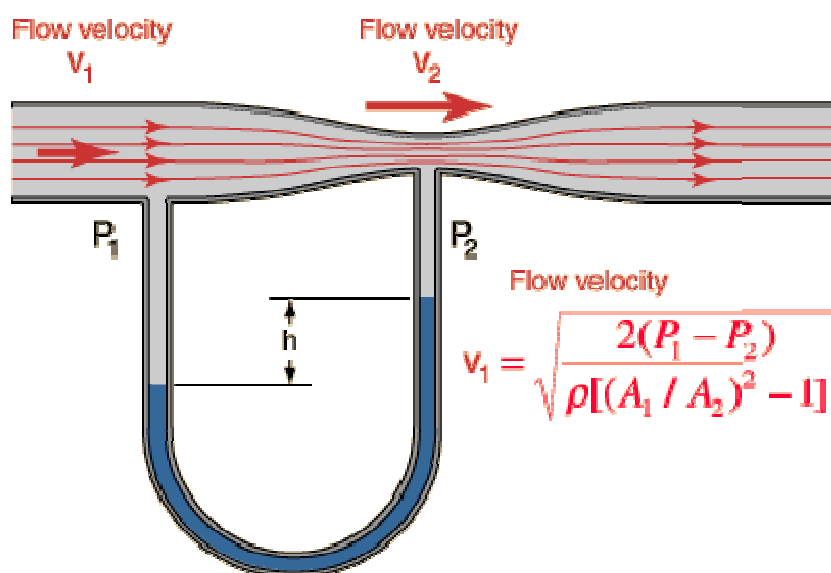


5 PRVKY KTERÉ OVLIVŇUJÍ AERODYNAMIKU VOZIDLA

5.1 DIFUZOR

Difuzor znamená "trubice, kanál s plynule se zvětšujícím průřezem ve směru toku tekutiny". Pro pochopení funkce difuzoru je třeba znát fyzický jev - Venturiho efekt.

Venturiho efekt (nebo hydrodynamický či aerodynamický paradox) je pojmenován po Giovannim Battistovi Venturim (1746-1822), italském fyzikovi. Znamená, že rychlost proudění kapaliny je nepřímo úměrná k tlaku v proudící kapalině – neboli, že v užší části trubice, má kapalina menší tlak, protože kapalina proudí rychleji. Tekutina musí zvýšit rychlost přes zúžení, aby uspokojila rovnici kontinuity, zatímco jí poklesne tlak (musí kvůli zachování energie) získaná kinetická energie je vyvážená poklesem tlaku. Rovnici pro pokles tlaku díky Venturiho efektu je odvozena z Bernoulliho rovnice a rovnice kontinuity.



Obr. 97. Venturiho trubice (15)

5.1.1 SACÍ EFEKT

Venturiho efektu využívají i v celkové konstrukci automobilu. Přisávaný vzduch pod podlahu vozu, se urychluje. Podle Bernoulliho rovnice vzduch pod monopostem při zúžení prostoru mezi podvozkem a asfaltem zvyšuje svou rychlost průtoku a za monopostem je „vytahován“ rozšířením, které známe jako difuzor. Čím menší je světlá výška vozidla (vzdálenost mezi asfaltem a podvozkem), tím je větší rychlost proudícího vzduchu a tím je výraznější Venturiho efekt, což tedy není nic jiného, než pasivní přítlačná, respektive přísavná síla, která je při konstrukci monopostu vedle aerodynamických křídel a prvků velmi důležitá.



Obr. 98. difuzor vozidla Ferrari 599 GTO (17)

Tohoto efektu využívají i závodní vozy. Ty se navíc snaží jeho vliv maximalizovat. Důležitým prvkem, který k vytváření přítlaku přispívá, je právě difuzor. Je to speciálně tvarovaná část naspodu zádi vozu. Difuzor je tedy vlastně směrem k zádi vozu se rozšiřující kanál. Přitom nemusí být zespodu uzavřený, jeho spodní část tvoří samotná vozovka.

Vzduch se v rozšiřujícím difuzoru postupně zpomaluje, čímž opět narůstá jeho statický tlak. Může se tak zdát, že difuzor vlastně k celkové tvorbě přítlaku na automobil nijak nepřispívá. Naopak, že má spíše negativní účinek.

Jenže je to naopak. Difuzor má totiž za úkol zpomalit urychlený vzduch pod vozem zpět na rychlosti blízké okolnímu proudění. Díky tomu se pak vzduch přicházející zpod podvozku snáze míchá se vzduchem v úplavu (rozvřeném vzduchu) za autem. Hranice, na které se oba proudy mísí, je méně turbulentní.

To má dva praktické důsledky: difuzor tak usnadňuje proudění vzduchu pod vozem, a i když je umístěn až v zadní části vozu, usměrňuje proud vzduchu pod vozem prakticky v celé délce. Bez difuzoru by se urychlený vzduch z pod vozem snažil díky své vlastní rychlosti neřízeně "cpát ven". To by negativně ovlivnilo odpor vzduchu celého vozu a snížilo přítlak. Difuzor odpor vzduchu snižuje a napomáhá rychlému a usměrněnému proudění vzduchu pod vozem, což přítlak právě zvyšuje. (16)

5.1.2 DVOJITÝ DIFUZOR

Konstruktéři ve Formule 1 začali tvarovat difuzor tak, že vlastně vzniklo jakési jeho druhé patro, tak zvaný dvojitý difuzor. Tím je možné dodatečně regulovat proudění vzduchu a to přináší výhody. Jedna varianta konstrukce dvojitého difuzoru je na obrázku 99.

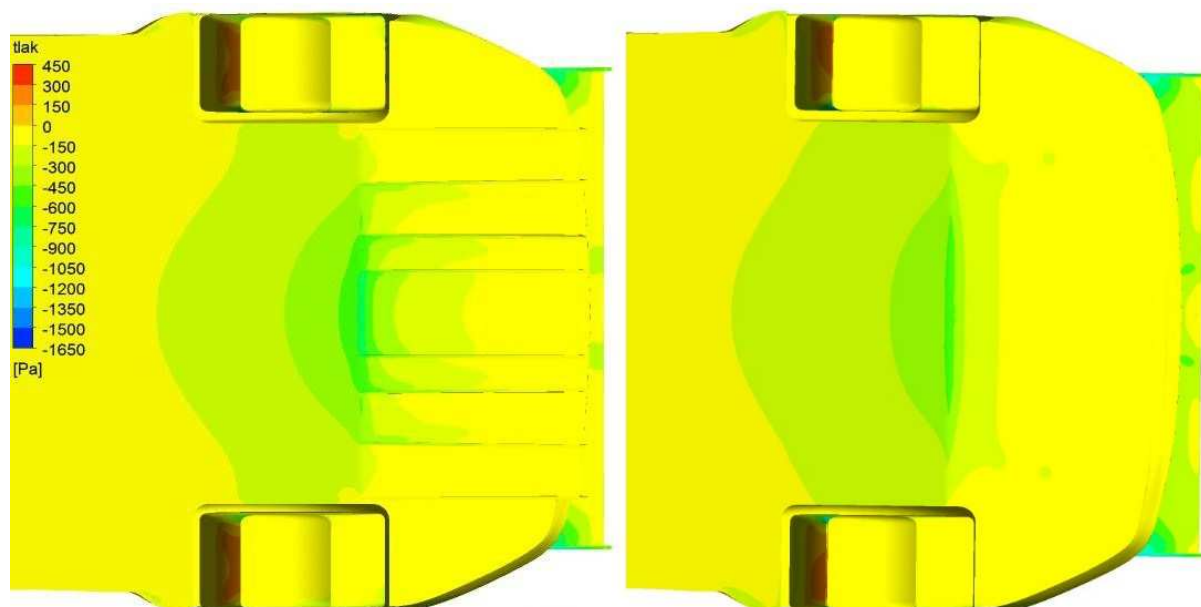
Je možné tak získat menší výsledný odpor vzduchu, větší přítlak díky přísavnému efektu podvozku a co je ještě velmi důležité, že tak lépe můžeme optimalizovat proudění vzduchu přes zadní křídlo. Navíc vznikají větší turbulence za vozem, což znesnadňuje jízdu v závěsu za vozem a tím pádem znesnadňuje předjíždění.



Obr. 99. dvojité difuzor (16)

5.1.3 VÝSLEDKY VÝPOČTU VE FLUENTU

V této kapitole porovnáváme výsledky simulace proudění vzduchu, variantu když je na vozidle difuzor s variantem, když není na vozidle difuzor. Obrázky budu jenom ty, u kterých je rozdíl s variantou normálním.



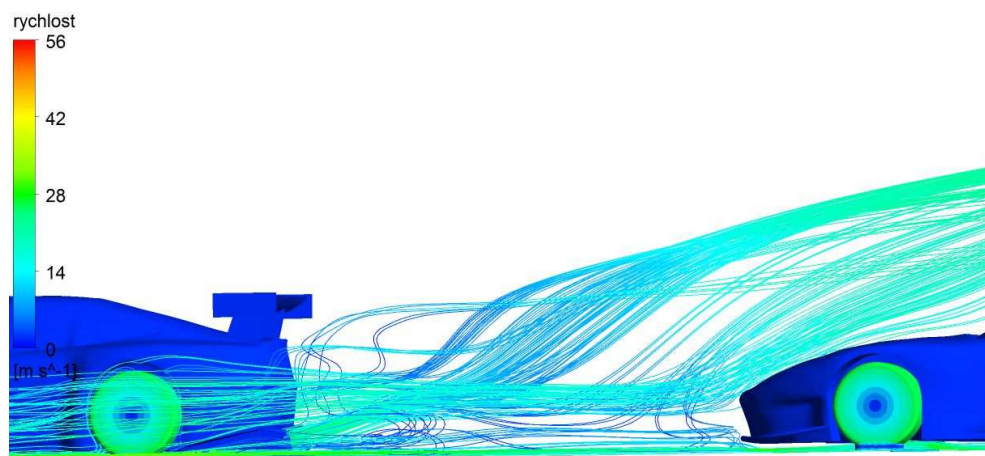
Obr. 100. zadní část podlahy varianta A/1 a B/1

Na pravé straně obrázku 100. je vozidlo bez difuzoru a na levé straně je vozidlo s difuzorem. Je pěkně vidět jaký je rozdíl, když je tam difuzor nebo se tam nenachází. Když je tam difuzor tak vznikne větší podtlak než u vozidla bez difuzoru. Je to proto že mřížky usměrní proudění vzduchu a tak tam bude rychleji proudit vzduch, nebudou tak velké víry jaké by byly bez mřížek. Podtlak nasává vozidlo k silnici, čili se zvýší celkový přitlak vozidla. Bez difuzoru je tlak okolo -450 Pa a s difuzorem okolo -800, -1000 Pa. A tak aj koeficient přitlaku u vozidla bez difuzoru je menší, než u vozidla s difuzorem. U vozidla s difuzorem koeficient

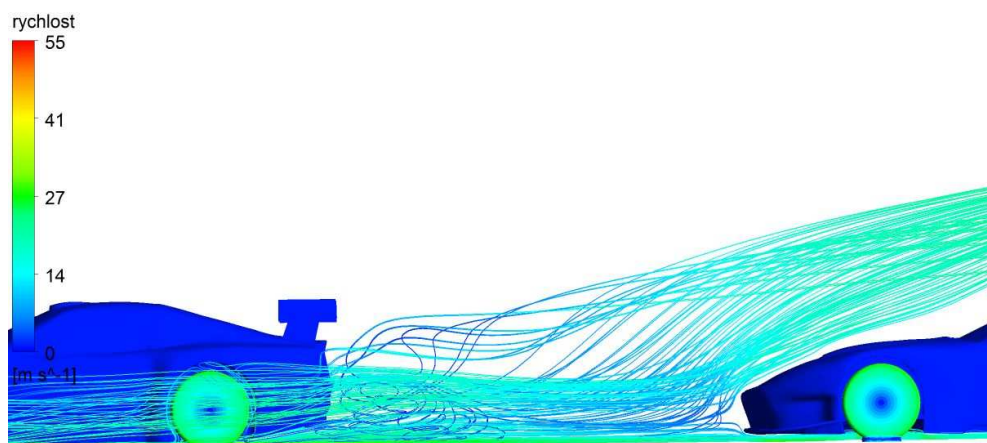


přítlaku je $-0,54$ a u vozidla bez difuzoru je $-0,49$. To není velký rozdíl, ale je to proto že jak už bylo napsáno není to úplně bez difuzoru, jenom bez mřížky, ale aj to ovlivňuje aerodynamiku vozidla, jak je vidět z výsledku.

Pro vozidlo v úplavu platí skoro stejné podmínky to co u normálního variantu.



Obr. 101. proudnice u variante normal



Obr. 102. proudnice u variante bez difuzoru



U variantu A2 vzduch jde nahoru hned, když vystoupí spod vozidla a u variantu B2 většina vzduchu nejde hned nahoru, ale jen po určité vzdálenosti. Výsledek je ale skoro stejný. Kdyby druhé vozidlo bylo blíž, tak by jsme dostali jiné výsledky, jak je to aj na obrázkách 101. a 102, v blízkosti zadního části vozidla je turbulentní proudění, u variante B2 jsou větší víry.

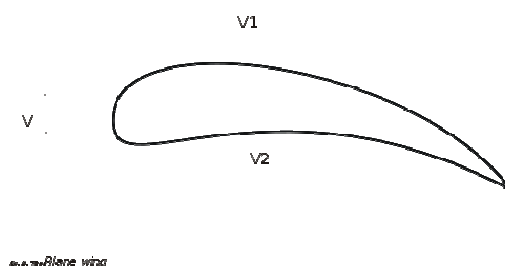
Ve Formule 1 dají velký důraz aj na turbulentní proudění za vozidlem, aby víc znemožnili jízdu vozidla v úplavu, a to pomoci difuzoru.

5.2 ZADNÍ KŘÍDLO

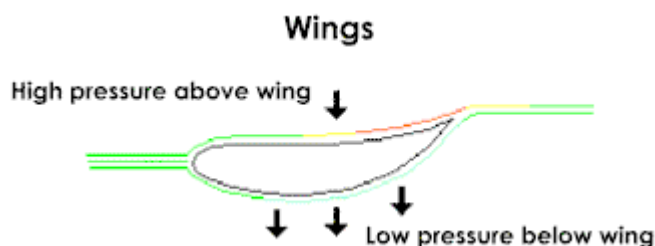


Obr. 103. zadní křídlo vozidla Ferrari (18)

Zadní křídlo u vozidla má za úkol zvětšit stabilitu vozidla hlavně v zatáčkách, a to pomoci zvýšeného přítlaku vozidla. Má to aj negativní vliv na aerodynamiku, tím že zvětšuje přítlak zvětšuje aj aerodynamický odpor vozidla. Zadní křídlo vozidla se podobá na křídlo letadla, ale má právě opačnou úlohu. U letadla se požaduje, aby byla co největší vztlačková síla a u vozidla přítláčková síla.



Obr. 104. průřez křídla letadla (20)



Obr. 105. průřez zadního křídla vozidla (14)

Z obrázků je dobře vidět, že co byla dolní strana u letadla to je horní strana u vozidla, a co byla horní u letadla to je dolní u vozidla.

Křídlo u vozidla je uděláno tak aby u dolní části byla rychlost proudění vzduchu menší než na horní straně, a tím bude menší tlak na dolní části, než na horní části a z toho tlakového rozdílu dostaneme se k výsledku, že nám vznikne přítlačná síla.

5.2.1 MODERNÍ KŘÍDLA

Největší vývoj křídla je ve Formula 1. Od roku 2011 pravidla dovoluji aj to, aby pilot mohl nastavit uhel zadního křídla a když chce předjíždět může si nastavit menší přítlak.



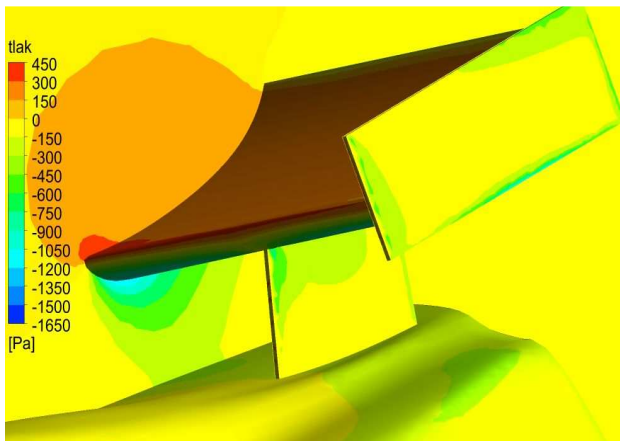
Obr. 106. stavitelné zadní křídlo ve F1(19)

Na levém obrázku je dobře vidět, jak zadní křídlo vypadá ve své výchozí pozici, zatímco na tom pravém je pomůcka pro předjíždění aktivovaná. Toto řešení funguje tak, že jezdec stiskne tlačítko na volantě a horní díl zadního křídla se sklopí směrem dozadu, čímž se otevře prostor mezi ním a spodním dílem. Výsledný efekt je že, sníží se odpor vzduchu zadního křídla a vůz je schopný dosáhnout vyšší maximální rychlosti.

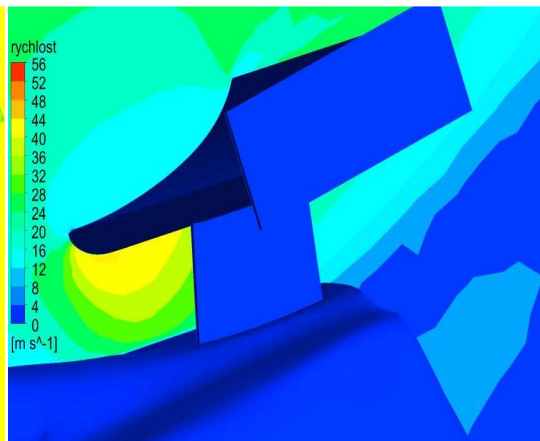


5.2.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKU

Po skončení výpočtu je dobře vidět, že splnili teoretické předpoklady proudění vzduchu okolo křídla.



Obr. 107. tlak na zadním křídle

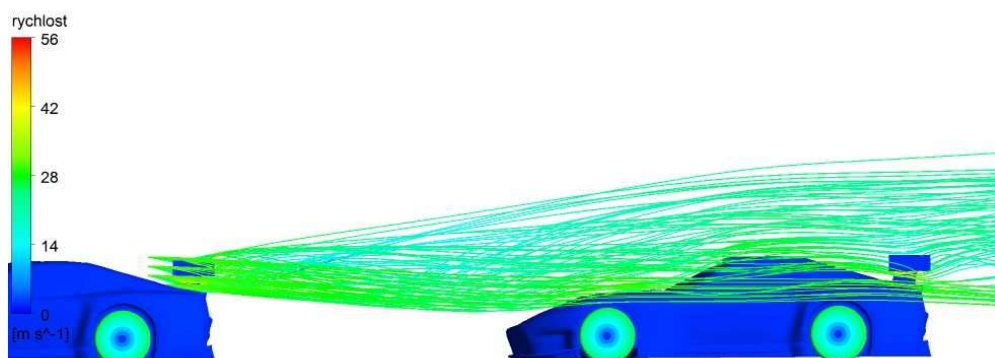


Obr. 108. rychlost na zadním křídle

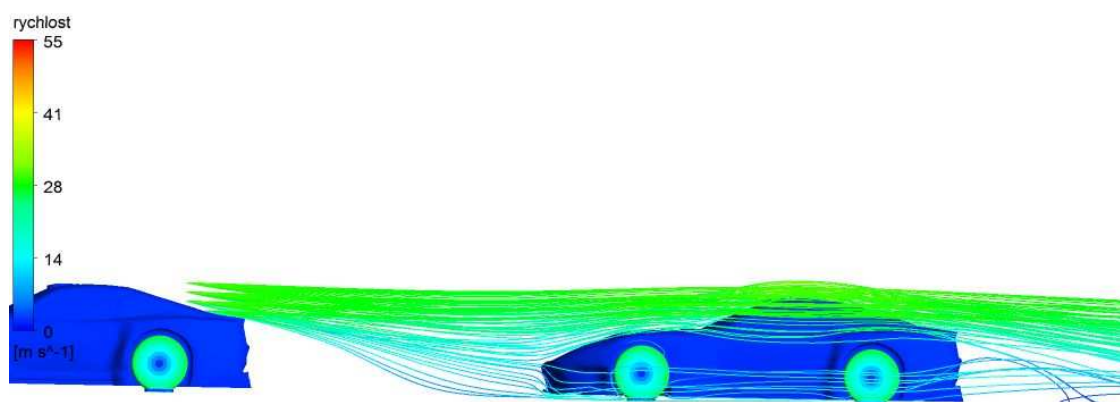
Na obrázku 108. je dobře vidět jak vypadá rychlost vzduchu pod křídlem a nad křídlem. Na dolní části, dosahuje rychlost vzduchu aj 44 ms^{-1} a nad křídlem poklesne na 12 ms^{-1} .

Na obrázku 109. je vidět, že tlak je opačně jako rychlost, na horní straně je větší a vzniká tam přítlak, který má hodnotu okolo 450 Pa a na dolní straně vzniká podtlak hodnotou okolo -1000 Pa , který výrazně zvyšuje celkový přítlak vozidla, ale má aj negativní vlastnosti, což zvyšuje aj odpor vozidla. Aerodynamický odporový součinitel vozidla bez křídla se zmenšoval na hodnotu $0,33$, ale největší změna je u součinitelů přítlaku vozidla, který se skoro zmenšil na 0 , $C_f=0,06$. Nebo přítlak co vzniká na podvozku se skoro vyrovná s podtlakem nad kapotou. Podtlak na kapote nasává kapotu nahoru a přítlak na podvozku přisává vozidlo na dole.

Pro porovnání pro vozidlo které je v úplavu je skoro stejné než u variantu A, ale tady odpor vozidla se víc zmenšoval.



Obr. 109. proudnice variantu normal



Obr. 110. proudnice variantu bez křídla

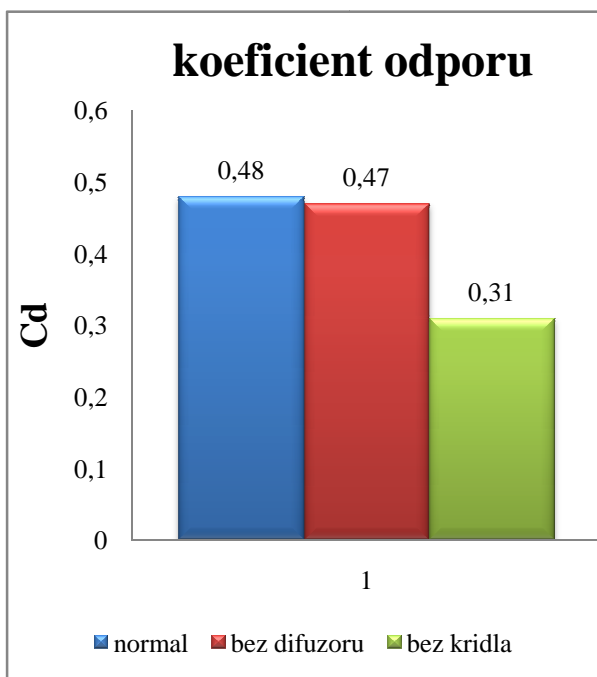
U variantu bez křídla se víc snížil odporový součinitel vozidla, protože křídlo na vozidle usměrňuje vzduch dolu, což bude odpor pro vozidla v úplavu a když tam není křídlo, tak nebude tolik vzduchu usměrňovat ke kapote vozidla, a tím bude menší odpor vzduchu. Tento jev je zobrazen na obrázcích 109. a 110, kde jsou proudnice vzduchu.

VÝSLEDKY VŠECH VÝPOČTU

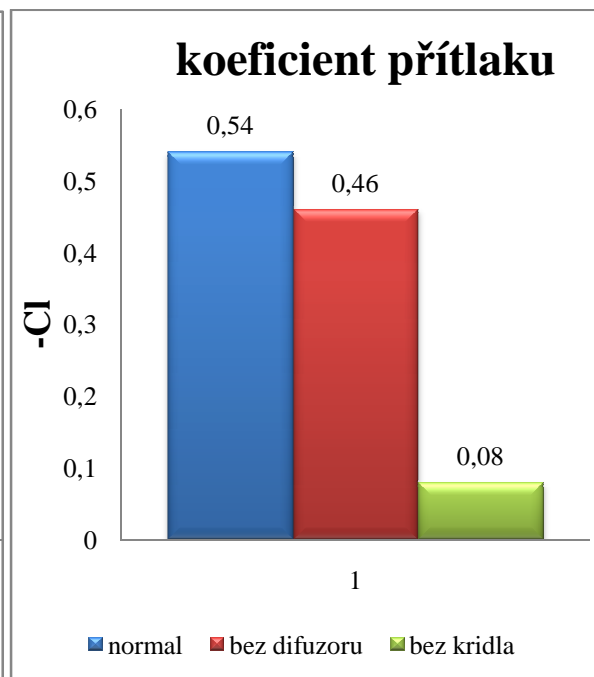
Tab 3. procentuální vyjádření snížení koeficientu

	odpor	přítlak
A/2	102,1	48,1
B/2	100,0	43,5
C/2	77,4	12,5

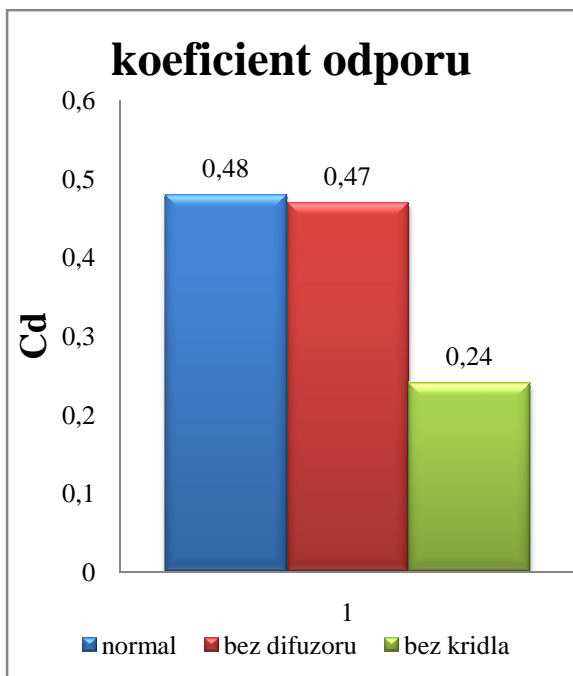
V tabulce 3. je vyjádřeno v procentech, jak se změnil koeficient odporu a přítlaku druhého vozidla k prvnímu vozidlu v jednotlivých variantech.



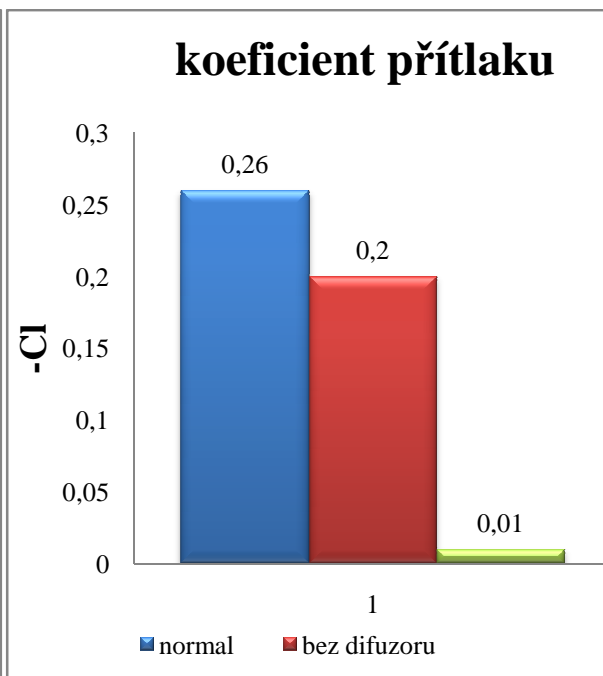
Graf. 3. porovnání koeficientu odporu jednotlivých variantu prvního vozidla



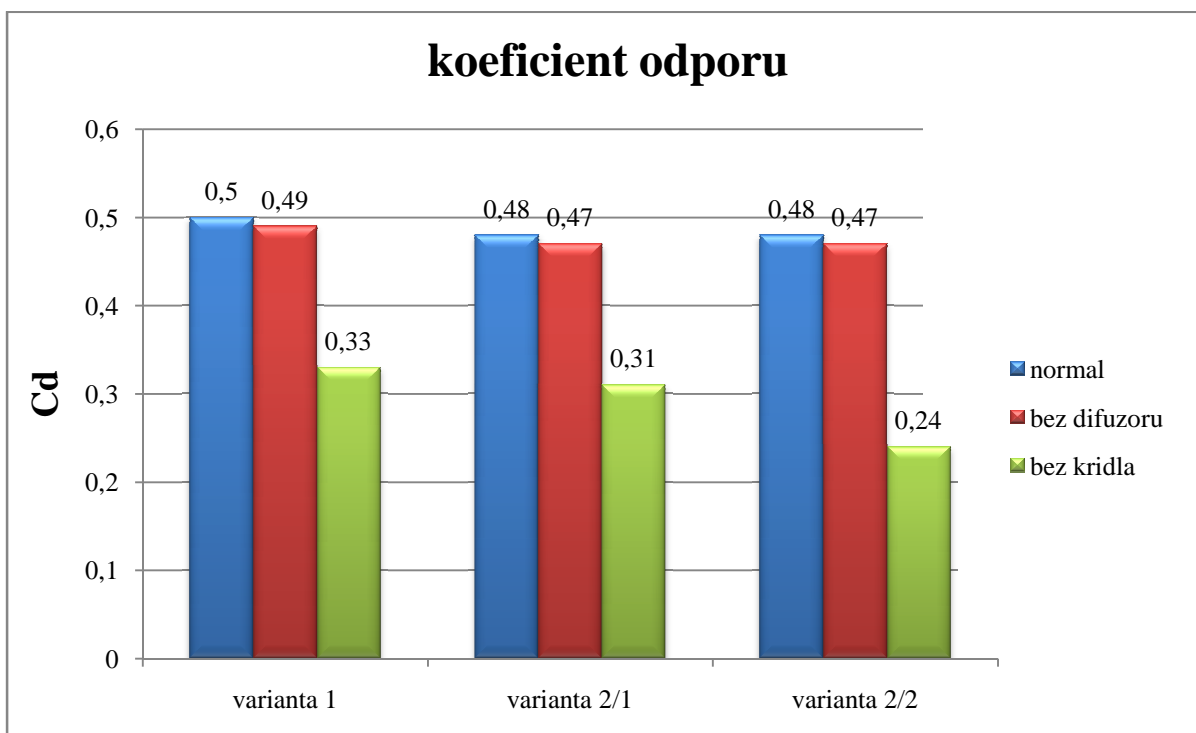
Graf. 4. porovnání koeficientu odporu jednotlivých variantu druhého vozidla



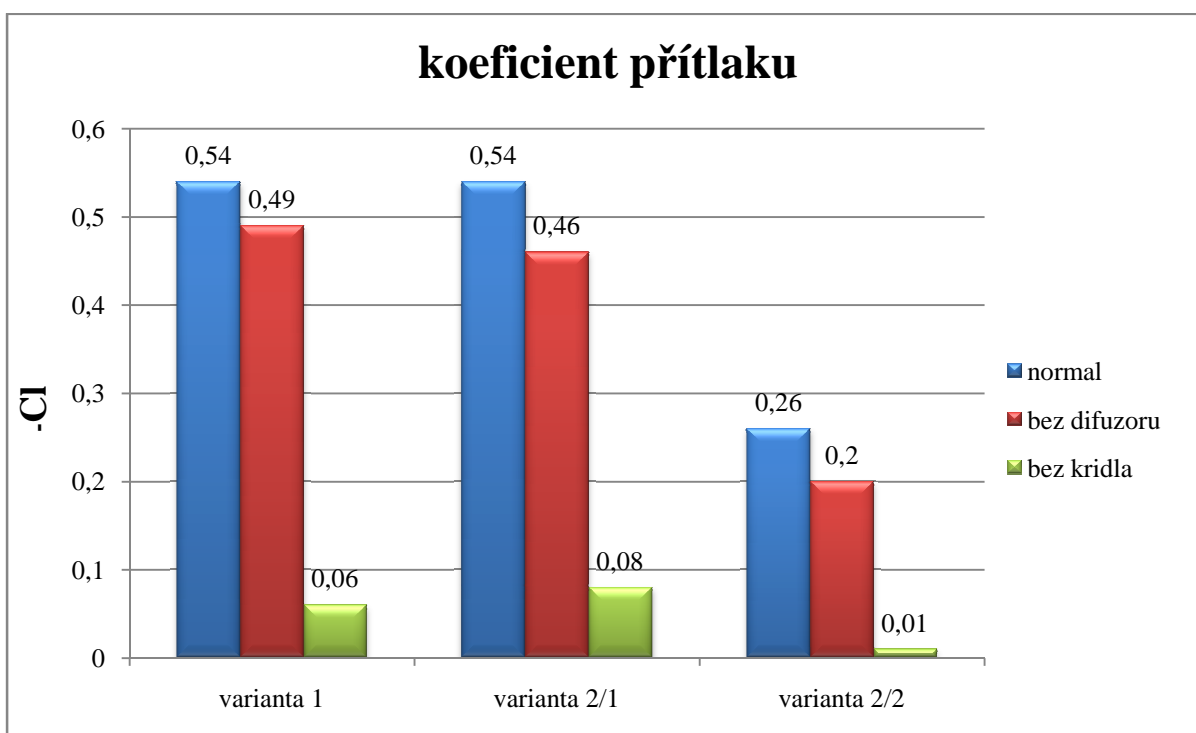
Graf. 5. porovnání koeficientu přítlaku jednotlivých variant prvního vozidla



Graf. 6. porovnání koeficientu přítlaku jednotlivých variant druhého vozidla



Graf. 7. porovnání koeficientu odporu samotného vozidla a u prvního a druhého vozidla



Graf. 8. porovnání koeficientu přítlaku u samotného vozidla a u prvního a druhého vozidla

varianta 1 - samotné vozidlo (varianty A1,B1,C1)

varianta 2/1 - první vozidlo ze dvou vozidel (varianty A2/1,B2/1,C2/1)

varianta 2/2 - druhé vozidlo ze dvou vozidel (varianty A2/2,B2/2,C2/2)



ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byla analýza proudění kolem zjednodušeného modelu dvou vozidel při vzájemné jízdě za sebou pomocí CFD systému. Pro tuto úlohu byl sestaven CFD model a byly vypočteny aerodynamické charakteristiky pro šest variantu modelu. V zadání byly jenom dvě varianty a to samotné vozidlo a dvě za sebou jdoucí vozidla a pro zajímavost jsem udělal ještě varianty bez křídla a bez difuzoru aby jsme mohli lépe porovnat jak ovlivňují jednotlivé aerodynamické prvky charakteristiku vozidla a jaký vliv mají na vozidlo, který jde v úplavu. Samotné vozidlo splnil předpoklady o teorii aerodynamiky vozidla, tlakové rozložení na aute je stejné jak je napsáno v teorii.

Pro dvě vozidla vznikly na prvý pohled překvapivé výsledky. Předpokládali bychom, že se bude více zmenšovat koeficient odporu vozidla v úplavu, ale když se podíváme na výsledky vidíme, že není tak to proto, že to druhé vozidlo je už příliš daleko od prvního. Mezera mezi vozidly je 3,2 m, a u takové rychlosti a u takové aerodynamice se tato vzdálenost zdá příliš velká, aby mírně ovlivnila odporový součinitel vozidla v úplavu. Na obrázcích 101. a 102. je vidět jaké vířivé proudění je za vozem ve vzdálenosti do 1 metra, co tam by určitě víc ovlivnilo koeficient odporu v úplavu, ale v takové krátké vzdálenosti nebudeme jezdit za vozem, ještě aj 3,2 metra je dost krátká vzdálenost v normálních okolnostech.

Přítlak vozidla v úplavu se zmenšil víc než na polovinu a u vozidla bez křídla skoro není přítlak, nebo síly, které vznikají prouděním vzduchu okolo vozidla, nad vozem se usměřují nahoru a síly pod vozem se usměřují dolů a skoro vyrovnávají, z toho vyplývá jak velký vliv má křídlo na přítlak vozidla. Když se podíváme na tabulku 2. je zřejmé že největší vliv na aerodynamiku vozidla má křídlo. Dále bylo by zajímavé nastavení uhlu zadního křídla, jak ovlivňuje aerodynamiku vozidla v úplavu.

Z těchto výsledků je zřejmé, že když jezdíme za vozidlem v úplavu v takové vzdálenosti nám aerodynamický odpor skoro nebude zmenšovat, jenom přítlak, co negativně ovlivňuje jízdu vozidla především v zatáčkách. Ale když porovnáme variantu když je samotné vozidlo s variantou když jsou dvě vozidla vidíme, že u varianty dvě vozidla se zmenšil koeficient odporu prvního vozidla okolo 0,02, co je způsobeno tím že vozidlo v úplavu tlačí vzduch dopředu a s tím tlačí aj první vozidlo.

V dnešní době existuje stále větší potřeba počítačového modelování vozidla, pomocí kterého můžeme "lehce" měnit tvar pro lepší aerodynamiku. Díky softwaru CFD můžeme modelovat proudění vzduchu a následně změnit tvar vozidla. Bez tohoto programu bychom vždy po každé drobné změně museli vytvořit nový reálný model a ten zkoumat v aerodynamickém tunelu. Tento postup by byl samozřejmě velmi náročný, hlavně časově i finančně.

Softwarové modelování má ale i své nevýhody: není tak přesné a čím přesnější výpočet potřebujeme, tím jemnější síť musíme udělat. Výpočet je pak mnohem náročnější na PC hardware.

Důležitost a přesnost CFD softwaru dobře ukazuje i stáj Virgin ve Formuli 1. Její inženýři neužívali v soutěži žádný aerodynamický tunel, ani netestovali reálná vozidla, pouze využívali CFD program.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1.] *Motorelax* [online]. 2008 [cit. 2011-05-15]. Aerodynamický tunel. Dostupné z WWW: <http://www.motorelax.cz/clanky-q-Podle_tiskove_chyby_Guardianu_je_Nick_Fry_sefem_McLarenu_Aerodynamicky_tunel_nez_bytna_soucast_Formule_1-id-4-kat--pl-16523.htm>
- [2.] *Aerodynamika* [online]. 2004 [cit. 2011-05-15]. Aerodynamika. Dostupné z WWW: <<http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/aerodynamics.php>>.
- [3.] Aerodynamika. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-05-15]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Aerodynamika>>.
- [4.] *E-automatizace* [online]. 2009 [cit. 2011-05-15]. E-automatizace. Dostupné z WWW: <<http://www.e-automatizace.cz/encyklopedie.asp?Hledat=t>>
- [5.] *Aerodynamické automobily* [online]. 2009 [cit. 2011-05-15]. Aerodynamické automobily. Dostupné z WWW: <<http://www.aerotatra.czweb.org/zacatky.htm>>.
- [6.] <http://www.cojeco.cz>
- [7.] *Techsoft* [online]. 2007 [cit. 2011-05-14]. Techsoft. Dostupné z WWW: <http://www.techsoft-eng.cz/sluzby/ansys_cfd/fluent/>
- [9.] Computational Fluid Dynamics. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_Fluid_Dynamics>.
- [10.] Gillespie, T.D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1992. ISBN 1-56091-199-9.
- [11.] Prof. Tamás Lajos, *Basics of vehicle aerodynamics*
- [12.] Subsonic and transonic wind tunnel. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Subsonic_and_transonic_wind_tunnel>.
- [13.] Supersonic wind tunnel. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-05-14]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Supersonic_wind_tunnel>.
- [14.] *Gmecca* [online]. 1999 [cit. 2011-05-15]. Aerodynamics. Dostupné z WWW: <<http://www.gmecca.com/byorc/dtipsaerodynamics.html>>
- [15.] *Venturiho efekt* [online]. 2009 [cit. 2011-05-18]. Venturiho efekt. Dostupné z WWW: <http://wiki.f1-info.cz/Venturiho_efekt>



- [16] VOKÁČ, Luděk. *Idnes* [online]. 2009 [cit. 2011-05-18]. Auto.idnes. Dostupné z WWW: <http://auto.idnes.cz/difuzor-dnes-rozhoduje-zavody-f1-mela-ho-ale-uz-skoda-120-pp5-automoto.aspx?c=A090418_174304_automoto_vok>.
- [17.] *Blogsport* [online]. 2009 [cit. 2011-05-18]. Blogsport. Dostupné z WWW: <http://3.bp.blogspot.com/_FoXyvaPSnVk/S73ue2Ec4fI/AAAAAAACue8/Zaw7SVm8Cho/s1600/Ferrari-599-GTO-2.jpg>
- [18.] *My car ferrari* [online]. 2010 [cit. 2011-05-18]. My car ferrari. Dostupné z WWW: <<http://mycar-ferrari.blogspot.com/2010/08/ferrarri-575-maranello-novitec.html>>
- [19] PASTOREK, Jan. *Autorevue* [online]. 2011 [cit. 2011-05-18]. F1sport. Dostupné z WWW: <<http://f1sport.autorevue.cz/takhle-funguje-zadni-nastavitelne-kridlo-v-praxi-25828>>
- [20] Křídlo. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 2011 [cit. 2011-05-24]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Křídlo>>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A_0	[m ²]	celková/vstupna plocha
A_h	[m ²]	plocha horně části
A_d	[m ²]	plocha dolně části
C_d	[-]	součinitel odporu
C_l	[-]	součinitel přítlaku
D_A	[N]	aerodynamický odpor (síla)
F_d	[N]	síla odporu
F_l	[N]	síla přítlaku
F_{xf}	[N]	hnací síla přední nápravy
F_{xr}	[N]	hnací síla zadní nápravy
L_{Af}	[N]	vztlaková síla přední nápravy
L_{Ar}	[N]	vztlaková síla zadní nápravy
R_{hx}	[N]	podélná síla působící v tažném zařízení ve směru x
R_{hz}	[N]	podélná síla působící v tažném zařízení ve směru z
R_e	[-]	Reynoldsovo číslo
R_{xf}	[N]	valivý odpor (síla) přední nápravy
R_{xr}	[N]	valivý odpor (síla) zadní nápravy
W_f	[N]	zatížení přední nápravy
W_r	[N]	zatížení zadní nápravy
a_x	[m · s ⁻²]	zrychlení
p_∞	[Pa]	atmosferický tlak
p_d	[Pa]	dynamický tlak
p_r	[Pa]	relativní tlak
v_∞	[m · s ⁻¹]	vstupní rychlost
v_h	[m · s ⁻¹]	rychlost v horně části
v_d	[m · s ⁻¹]	rychlost dolně části
b	[m]	vzdálenost mezi přední nápravou a těžištěm
c	[m]	vzdálenost mezi zadní nápravou a těžištěm
D	[N]	odporová síla
g	[m · s ⁻²]	tíhové zrychlení
h	[m]	výška
l	[m]	vzdálenost mezi zadní nápravou a přední nápravou



M	[Nm]	moment
např.	[-]	například
p	[Pa]	tlak
R	[N]	výsledná síla
S	[m ²]	plocha
v	[m. s ⁻¹]	rychlost
W	[N]	tíha vozidla
Θ	[°]	úhel stoupání
ν	[m ² s ⁻¹]	kinematická viskozita
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota