



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

AERODYNAMICKÁ INTERAKCE AUTONOMNÍCH VOZIDEL

AERODYNAMIC INTERACTION OF AUTONOMOUS VEHICLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Alexandra Opátová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Vančura, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Studentka:	Bc. Alexandra Opátová
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jan Vančura, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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 autonomních vozidel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S ohledem trend poslední doby v podobě vývoje autonomních vozidel, nabízí se možnost úspory energie potřebné pro jízdu skrze optimální jízdu více vozidel v těsném závěsu a tím snížení aerodynamického odporu jednotlivých vozidel. Je zřejmé, že vzájemná vzdálenost mezi jednotlivými vozidly bude jeden z významných parametrů úspory energie jako celku (na všechna vozidla by mělo být nahlíženo jako na jízdní soupravu).

Cíle diplomové práce:

Sestavení CFD modelu vozidel jedoucích v závěsu za sebou v různých vzdálenostech.
Výpočet aerodynamických charakteristik vozidel pro různé konfigurace vzájemných rozestupů.
Nalezení optimálního jízdního režimu pro maximální úsporu vozidel jako celku.

Seznam doporučené literatury:

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

GILLESPIE, Thomas. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 519 s. ISBN 1-56091-199-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá CFD výpočtom aerodynamických charakteristík vozidiel idúcich za sebou, vytvorených v programe Star CCM+. Sleduje hlavne ich aerodynamické odpory v závislosti na rôznych rozstupoch medzi vozidlami a vyhodnocuje, ktoré vzdialenosti sú energeticky najvýhodnejšie pre vozidlá ako celok. Následne popisuje postup, ako z týchto údajov vypočítať spotrebu paliva pre jednotlivé rozstupy.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

CFD, Star CCM+, jazda v zástupe, DrivAer, Notchback, aerodynamický odpor, úspora paliva

ABSTRACT

This thesis deals with CFD simulation of platooning vehicles and their aerodynamic characteristics, created in Star CCM+ software. The main focus is on their aerodynamic drag dependency on different spacing between vehicles which allowed to evaluate the most energy efficient distance for platoon of vehicles. Furthermore, the procedure how to calculate the fuel consumption is described for set of variables.

KEYWORDS

CFD, Star CCM+, platoon, DrivAer, Notchback, drag coefficient, fuel savings

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

OPÁTOVÁ, Alexandra. Aerodynamická interakce autonomních vozidel. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129622>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 70 s. Vedoucí práce Jan Vančura.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracovala som ju samostatne pod vedením Ing. Jana Vančury, Ph.D., a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brně dňa 05. septembra 2020

.....

Alexandra Opátová

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu mojej diplomovej práce Ing. Janu Vančurovi, Ph.D., za pomoc, cenné rady, trpezlivosť a čas, ktorý venoval našim konzultáciám.

OBSAH

Úvod	11
1 História a význam aerodynamiky	12
2 Fyzikálne zákony a vzťahy pre popis aerodynamiky.....	14
2.1 Trecie napätie a viskozita.....	14
2.2 Bernoulliho rovnica- zákon o zachovaní energie.....	15
2.3 Navier Stokesova rovnica	15
2.4 Prúdenie reálnych (skutočných) kvapalín.....	15
2.5 Reynoldsovo číslo.....	16
2.6 Viskózne a neviskózne prúdenie.....	16
2.7 Hraničná vrstva pri prúdení	17
2.8 Podobnosti v prúdení	19
2.9 Aerodynamický odpor	20
2.10 Koeficient odporu.....	21
2.11 Koeficient odporu na vozidle	22
3 Autonómne vozidlá v zástupe	23
3.1 Rozlíšenie stupňov autonómie	23
3.2 Snímače.....	24
3.3 Výhody jazdy vozidiel v zástupe	25
4 Vozidlá v zástupe vo veternom tuneli	27
4.1 Zmenšené modely a Reynoldsovo číslo.....	27
4.2 Model vozidla	27
4.3 Koeficient odporu jedného vozidla.....	27
4.4 Koeficient odporu dvoch vozidiel v zástupe.....	28
4.5 Priemerná energetická úspora vozidiel	29
5 Modely pre výpočtové a experimentálne merania	30
5.1 Model Ahmed	30
5.2 Model Windsor	30
5.3 Vozidlo Mira.....	32
5.4 DrivAer	33
6 Aerodynamické sily pôsobiace na vozidlo	36
7 Simulácia v programe STAR CCM+	37
7.1 All y+ Wall Treatment	37
7.2 Implicit Unsteady- Implicitný nestabilný model	39
7.3 Model turbulencie a RANS.....	39
7.4 K – omega SST model	40
7.5 Gradients Model Reference	40
7.6 Coupled flow- spojené prúdenie	40
7.7 Cell quality remediation.....	41
7.8 Exact wall distance	41
7.9 Konštantná hustota.....	41
7.10 Materiál výpočtového priestoru	41

8	Simulácie vozidiel v zástupe	42
8.1	Tunel.....	42
8.2	Výpočtová sieť	43
8.3	Všeobecné nastavenie siete	44
8.4	Lokálne nastavenia siete.....	44
8.5	Nastavenia výpočtu	47
9	Vyhodnotenie koeficientov odporu	48
9.1	Jedno Vozidlo.....	48
9.2	Vzdialenosť vozidiel 1 m	49
9.3	Vzdialenosť vozidiel 2 m	50
9.4	Vzdialenosť vozidiel 4 m	51
9.5	Vzdialenosť vozidiel 6 m	52
9.6	Vzdialenosť vozidiel 8m	53
9.7	Porovnanie koeficientov odporov	54
9.8	Porovnanie koeficientov pozdĺž vozidla	56
10	Rozloženie tlaku a rýchlosti	58
10.1	Tlakové pole	58
10.2	Rýchlostné pole	60
11	Prepočet na spotrebu paliva.....	61
	Záver	64
	Zoznam použitých skratiek a symbolov.....	69
	Zoznam príloh	70

ÚVOD

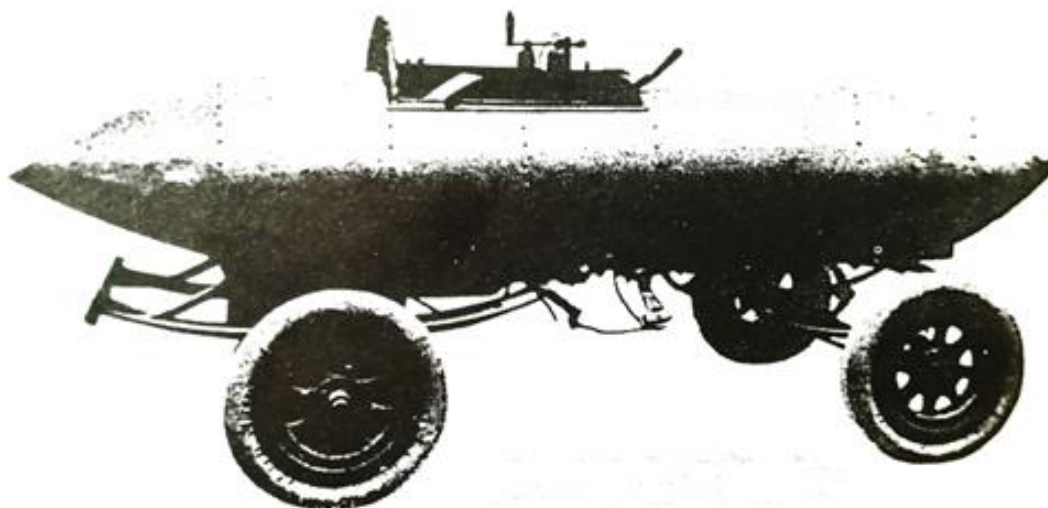
Hlavným cieľom mnohých priemyselných odvetví je snaha o znižovanie svojho podielu na klimatickej zmene. Automobilový priemysel nie je výnimkou a preto môžeme pozorovať postupnú implementáciu krokov, ktoré majú prispieť k znižovaniu uhlíkovej stopy vyrobených vozidiel. Čoraz väčší dôraz sa kladie na systémy, ktoré zabezpečujú ideálne spaľovanie paliva, čo vedie k znižovaniu emisií, alebo môžeme pozorovať trend objemového zmenšovania motorov a ich dopĺňanie príslušenstvom ktoré napomáha dosiahnutiu daného výkonu.

Ďalším krokom k „smart“ mobilite, alebo mobilite budúcnosti, je integrácia systémov s autopilotom, ktoré poskytujú možnosť čiastočnej, alebo úplnej schopnosti prevziať riadenie vozidla. Automobily s touto technológiou musia byť nevyhnutne vybavené množstvom kamier a senzorov, ktoré sú schopné bezpečne rozpoznávať predmety a vzdialenosti. Je len logickým krokom, že takéto autonómne systémy budú v budúcnosti komunikovať aj medzi sebou a budú si predávať informácie o hustote premávky, či o nečakanom brzdení, čím sa zvýši bezpečnosť na vozovke pre všetkých účastníkov premávky. Počiatky takýchto iniciatív môžeme pozorovať už dnes, s príchodom automobilových navigácií, ktoré zbierajú podnety o nebezpečenstve na vozovke, alebo o iných udalostiach priamo od vodičov a tieto informácie sú prístupné pre ostatných vodičov využívajúcich tento systém.

Vyššie spomínané skutočnosti - snaha o zníženie emisií pri spaľovaní a postupný nástup autonómnych systémov slúžia ako predpoklady pre túto prácu, ktorej cieľom je hľadať optimálny jazdný režim vozidiel pri jazde v rade, pričom minimálna spotreba paliva je prioritou. Predpokladá sa, že séria vozidiel v tesnej blízkosti za sebou bude mať menší koeficient odporu, ako jedno vozidlo samotné. V tejto práci sú realizované CFD simulácie jazdy dvoch vozidiel s rôznymi rozostupmi a sledujú sa ich aerodynamické charakteristiky. Následne sa hľadá optimálna vzdialenosť pre najväčšiu úsporu paliva.

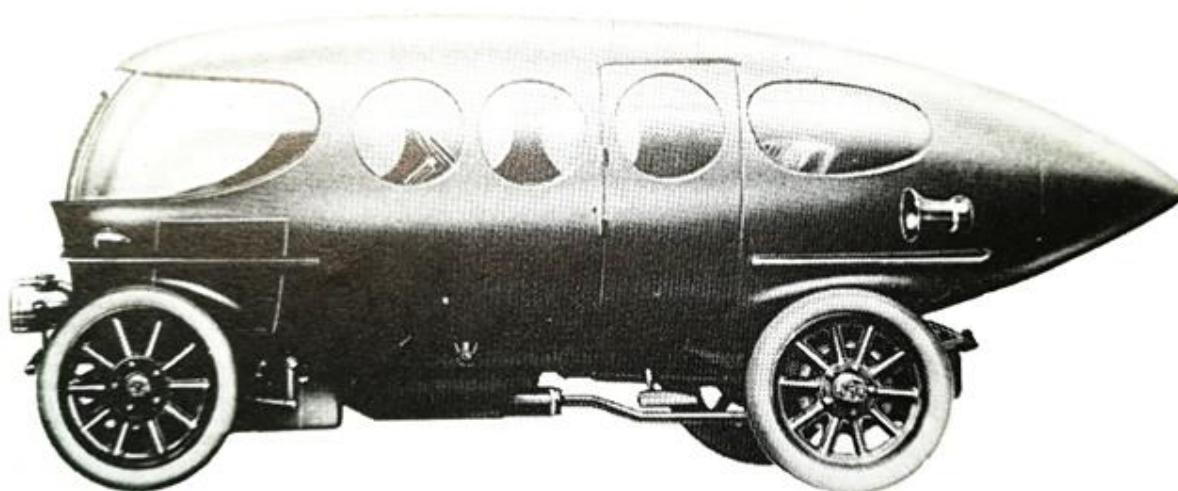
1 HISTÓRIA A VÝZNAM AERODYNAMIKY

Významný vplyv obtekania vzduchu okolo pohybujúcich sa telies si ľudia začali všímať, odkedy ich vynálezy začali prekračovať určité rýchlosti. Preto sa aerodynamika, ako predmet skúmania začala objavovať v počiatkoch letectva a taktiež pri automobiloch, ktoré vedeli prekročiť rýchlosti väčšie než $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Najstaršie dohľadateľné vozidlo, ktoré bolo vyrobené podľa princípov aerodynamiky, je automobil pretekára Camilla Jenazyho na obr. 1, z roku 1899, ktoré dosiahlo rýchlosť $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Tomuto rekordu napomohol aj jeho torpédový tvar. [1]

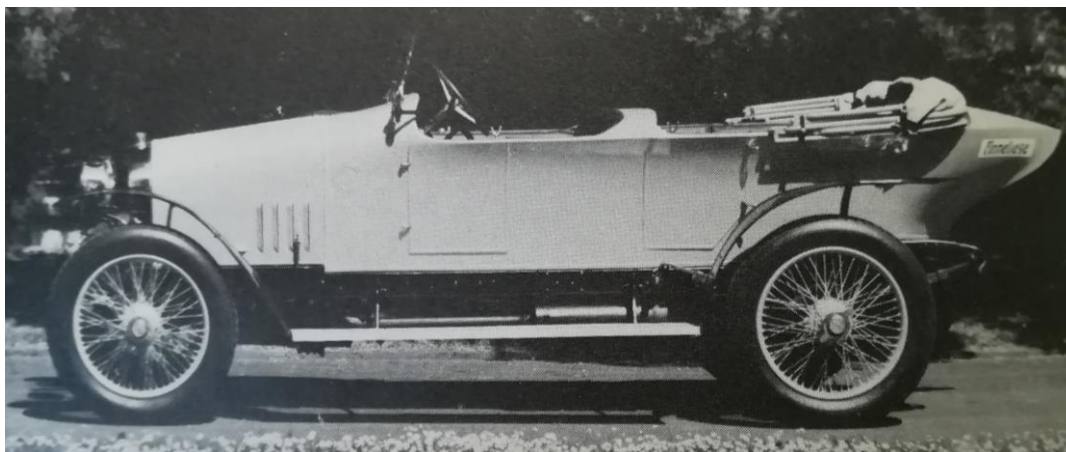


obr. 1 Automobil závodníka Camilla Jenazyho [1]

Ďalšie populárne tvary v tej dobe imitovali tvar lietadiel a vzducholodí, tak ako na obr. 2, alebo zakončenie lode, viditeľné na obr. 3. Posledné zmienené riešenie bolo z hľadiska aerodynamiky úplne neefektívne, avšak pekný vizuálny prvok napomohol masovej produkcii športových automobilov tohto typu. [1]



obr. 2 Tvar automobilu pripomínajúci vzducholod', Alfa Romeo, r. 1913 [1]



obr. 3 Audi – Alpsieger so zakončením pripomínajúcim tvar lode, r. 1913 [1]

O sériovú výrobu aerodynamicky vyladených automobilov sa do veľkej miery zaslúžil Edmund Rumpler. Po jeho úspechu pri vytvorení lietadla „Rumpler – Taube“ prišiel s typom karosérie ktoré sa inšpirovalo tvarom dažďových kvapiek, zobrazenom na obr. 4. [1]



obr. 4 Rumplerovo vozidlo (r.výroby 1924), vo veternom tuneli v roku 1979 [1]

V roku 1979 bol jediný dochovaný model z múzea podrobený skúškam vo veternom tuneli. Pri čelnej ploche $2,57 \text{ m}^2$ bol jeho koeficient odporu vzduchu $c_D = 0,28$. Táto hodnota je veľmi slušná aj pre súčasnosť. Typické osobné automobily súčasnosti dosahujú hodnoty koeficientu odporu medzi 0,23 až 0,3. SUV vozidlá s vyšším položením a hranatejším tvarom sa pohybujú v rozmedzí 0,35 až 0,45. [1] [2]

2 FYZIKÁLNE ZÁKONY A VZŤAHY PRE POPIS AERODYNAMIKY

Pre riešenie úloh z hľadiska aerodynamiky je nutné porozumieť základom prúdenia tekutín a hydrodynamike. Základné fyzikálne veličiny a vzťahy z tejto oblasti sú v krátkosti popísané v nasledujúcej kapitole.

2.1 TRECIE NAPÄTIE A VISKOZITA

Viskozita je vlastnosť, ktorá odoláva pohybu medzi vrstvami kvapaliny, či odoláva zmene pri šmykovom napätí. Uvažujme obecnú silu dF ktorá pôsobí na plochu a má za následok pohyb častíc. Ďalej uvažujme jej tečnú zložku dF_t . Podľa Newtonovho zákona platí pre tečné napätie medzi dvoma vrstvami vzdialené od seba výškou dn : [4] [5]

$$\frac{dF_t}{dS} = \mu \frac{dv}{dn} \quad (1)$$

Kde F_t je tečná zložka sily, S je plocha, μ je dynamická viskozita a dv/dn je rýchlostný gradient. Pomer F_t/S sa tiež značí τ – šmykové napätie. Takže môžeme zapísať aj:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dn} \quad (2)$$

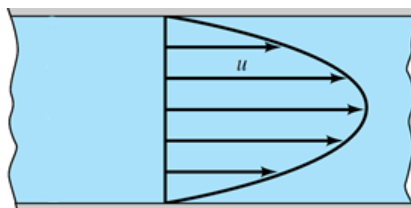
Šmykové napätie je lineárne úmerné rýchlostnému gradientu. To platí pre Newtonské tekutiny. Najbežnejšie tekutiny a plyny majú Newtonovský charakter.

Dynamická viskozita μ je obecné závislá od tlaku a teploty kvapaliny, pričom s rastúcou teplotou ($t \uparrow$) klesá dynamická viskozita ($\mu \downarrow$). Závislosť na tlaku je zväčša zanedbateľná, uvažuje sa až pri extrémnych podmienkach. Jednotka dynamickej viskozity je [Pa·s]. Pretože sa v jednotke vyskytuje jednotka sily, jedná sa o dynamickú veličinu. [3]

Kinematická viskozita ν je umelo zavedená fyzikálna veličina, pretože v mnoho výpočtových vzťahoch sa vyskytoval pomer dynamickej viskozity a hustoty. Jednotka kinematickej viskozity [$m^2 \cdot s^{-1}$] vychádza z toho, že jej rozmerom sú kinematické veličiny dráha a čas. [3] [5]

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

Viskozita (dynamická) sa prejavuje vnútorným trením v reálnych, nedokonalých kvapalinách. Tekutina pri prúdení (napríklad v trubici), neprúdi v celom priereze rovnakou rýchlosťou. Na stenách trubice ostáva vrstva s nulovou rýchlosťou ktorá sa zvyšuje smerom do stredu profilu, ako je zobrazené na obr. 5 [5]



obr. 5 Rýchlostný profil prúdenia

2.2 BERNOULIHO ROVNICA- ZÁKON O ZACHOVANÍ ENERGIE

Zákon o zachovaní energie hovorí, že v izolovanej fyzikálnej sústave je celková energia nemenná- energia nevzniká, nezaniká, len sa premieňa z jednej formy na inú. Bernouliho rovnica je daná na predpoklade, že je prúdenie ustálené, teda že sa v žiadnom mieste tekutiny rýchlosť nemení v čase. Zjednodušená Bernouliho rovnica pre ideálnu kvapalinu ktorá neprekonáva žiaden potenciálový rozdiel má tvar:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (4)$$

Kde p je tlak, ρ je hustota, v je rýchlosť tekutiny. Táto rovnica hovorí že súčet kinetickej energie a jej tlaku je v každom bode rovnaký. [3]

2.3 NAVIER STOKESOVA ROVNICA

Rovnováha síl reálnej (viskózne) kvapaliny prúdiacej laminárne bola vyjadrená Navierem v roku 1927 a nezávisle od neho aj Stokesem v roku 1945. [3]

$$\vec{a} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \vec{v} + \frac{\nu}{3} \text{grad } \text{div } \vec{v} = \vec{v} \text{ grad } \vec{v} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad (5)$$

1. Člen vyjadruje výslednicu vonkajších zrýchlení od hmotnostných síl „ F_m “
2. Člen vyjadruje tlakové zrýchlenia od tlakových síl „ F_p “
3. Člen vyjadruje trecie zrýchlenia od trecích síl „ F_t “
4. Člen vyjadruje zrýchlenie vplyvom viskozity u stlačiteľných kvapalín od trecej sily
5. Člen vyjadruje konvektívnu zložku zrýchlenia od zotrvačnej sily
6. Člen vyjadruje lokálnu zložku zrýchlenia od zotrvačnej sily

2.4 PRÚDENIE REÁLNYCH (SKUTOČNÝCH) KVAPALÍN

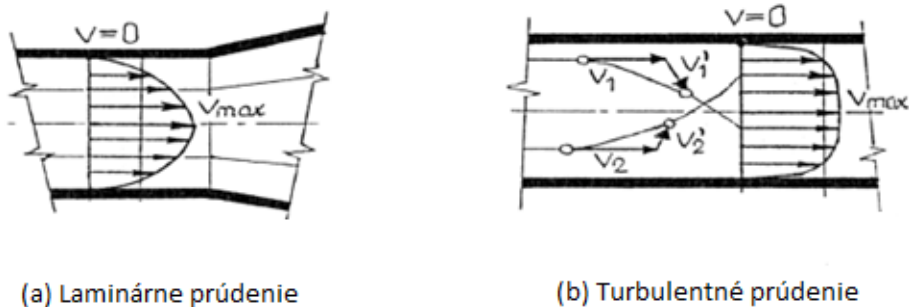
Jedná sa o stlačiteľné kvapaliny ktoré vykazujú vnútorné trenie. Avšak v mnoho praktických aplikáciách sa dá stlačiteľnosť zanedbávať a v takom prípade sa jedná o reálnu nestlačiteľnú kvapalinu, pri ktorých delíme prúdenie na laminárne a turbulentné. [3]

LAMINÁRNE PRÚDENIE

Názov laminárne pochádza z častíc, ktoré sa pohybujú po vrstvách- laminách, pri čom nedochádza k premiestňovaniu častíc naprieč prierezom. Pri prúdení v potrubí ma rýchlostný profil týchto častíc tvar rotačného paraboloidu, ako je zobrazené na obr. 6a. [3]

TURBULENTNÉ PRÚDENIE

Rýchlosť tohoto typu prúdenia má okrem postupnej rýchlosti aj takzvanú flukтуаčnú (turbulentnú) zložku rýchlosti ktorou sa častice premiestňujú v priereze, zobrazenom na obr. 6b. Flukтуаčná rýchlosť mení svoj smer aj veľkosť v závislosti na čase. Rýchlostný profil sa blíži profilu ideálnej kvapaliny dôsledku prítomnosti turbulencie, odhliadnuc od faktu že rýchlosť na stenách potrubia je nulová. [3]



obr. 6 Znáznornenie rýchlostného profilu laminárneho a turbulentného prúdenia [3]

2.5 REYNOLDSOVO ČÍSLO

Reynoldsovo číslo vyjadruje vplyv trenia v dôsledku viskozity danej kvapaliny pri prúdení, definované vzťahom:

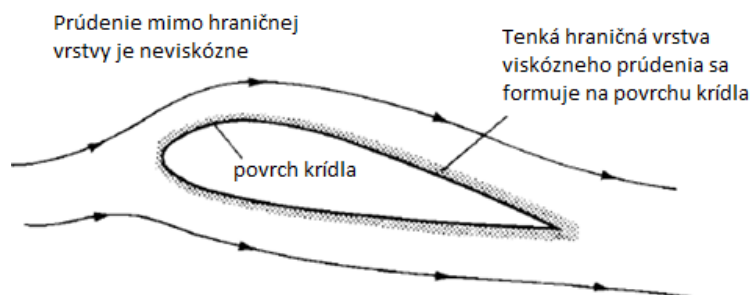
$$Re = \frac{v l}{\nu} \quad (6)$$

Kde v je rýchlosť prúdenia l je charakteristický rozmer (v automobilovom prostredí je to najčastejšie dĺžka vozidla) a ν je kinematická viskozita. Pomocou Reynoldsovho čísla sa dá určiť, či sa jedná o turbulentné alebo laminárne prúdenie. [3]

2.6 VISKÓZNE A NEVISKÓZNE PRÚDENIE

Plyny a tekutiny sa pohybujú pomerne voľne, pričom so sebou nesú hmotnosť, energiu a hybnosť. Tento presun so sebou prináša aj jav difúzie hmoty, viskozitu (trenie) a tepelnú vodivosť. Všetky skutočné prúdenia prejavujú tieto znaky. Naopak, prúdenie ktoré neprejavuje trenie, tepelnú vodivosť alebo difúziu hmoty sa nazýva neviskózne prúdenie. Reálne sa v prírode nevyskytujú, ale slúžia na modelovanie prúdenia, kde je vplyv spomínaných javov tak malý že sa môže zanedbať. [6]

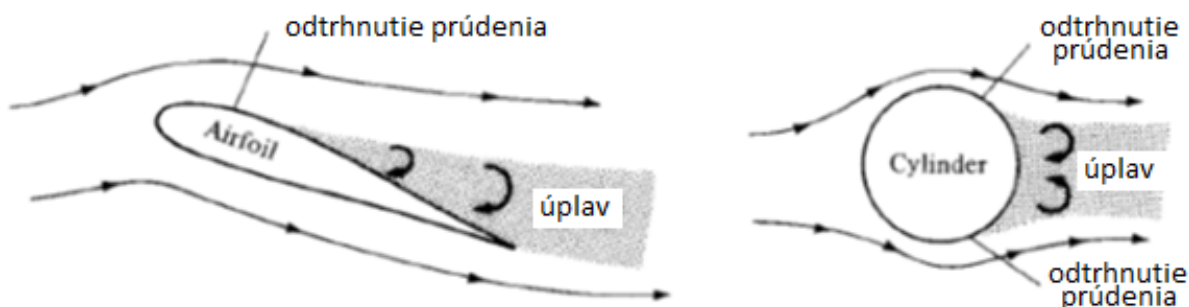
Neviskózne prúdenie pracuje s Reynoldsovým číslom rovným nekonečnu, avšak pre praktické úlohy stačí iba vysoké Re , aby sme médium mohli považovať za neviskózne. Pre takéto prúdenia je trenie, tepelná vodivosť a difúzia limitovaná pre veľmi úzku oblasť v okolí obtekaného objektu, ktorú nazývame hraničná vrstva. Prúdenie mimo spomínanú oblasť môžeme považovať za neviskózne, ako je názorne ukázané na obr. 7. [6]



obr. 7 Viskózna hraničná vrstva a neviskózne prúdenie v okolí [6]

Pre prúdenie v okolí úzkych predmetov, ako je profil krídla nakreslený na obrázku vyššie, je model založený na neviskóznom prúdení postačujúci. Tlaky, tvar prúdnic a tvar prietokového poľa primerane odpovedajú realite.

Keďže však je trenie (šmykové napätie) hlavným zdrojom aerodynamického odporu, samotné posúdenie z neviskózneho hľadiska nemôže adekvátne predpovedať celkovému odporu. Stačí malá zmena uhlu krídla alebo hrubší profil telesa a hraničná vrstva sa oddelí na vrchole krídla a vytvorí sa turbulentná oblasť s úplavom, ako je ukázané na obr. 8. [6]

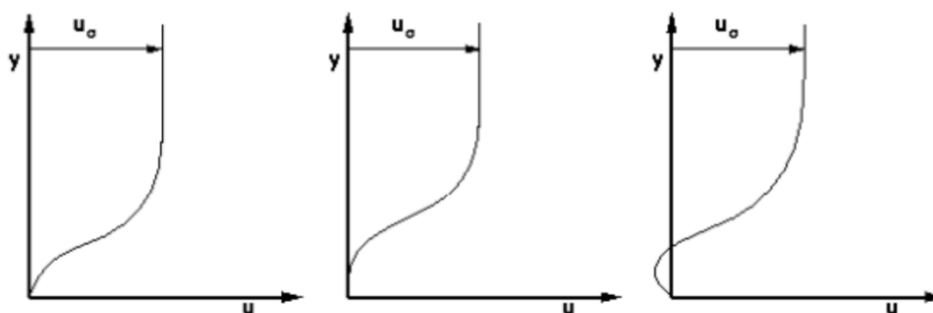


obr. 8 Príklady viskózneho prúdenia s úplavom [6]

2.7 HRANIČNÁ VRSTVA PRI PRÚDENÍ

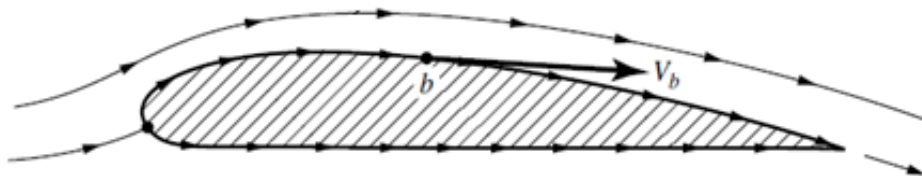
Šmykové napätie vznikne vždy na takom mieste, kde sa vyskytuje naprieč prúdnicami rýchlostný gradient. Jeho vplyv je preto najvýraznejší v tesnej blízkosti popri obtekanom telese a menej výrazný pre okolité prúdenie. Koncept dvoch oblastí v súvislosti s významom smykového napätia ako prvý rozoznal Ludwig Prandtl v roku 1904. [6] [7]

Hraničná vrstva je neporovnateľne malá v porovnaní s rozsiahlym tokom v okolí, ale jeho význam je o to dôležitejší. Odtrhnutie príľahlého prúdenia a vznik turbulencií ukázané na obrázku vyššie súvisí s hraničnou vrstvou, pretože ak sa prúdenie oddelí od povrchu, dramaticky sa zmení pôsobenie tlaku na povrch. To má za následok zvýšenie tlakového odporu. Prúdenie sa odtrhne v takom bode, kde sa zotrvačná sila v blízkosti steny rovná trecej sile. Prúdenie začne obracať svoj smer - označuje sa to ako bod oddelenia. Tento princíp je znázornený na obr. 9, kde vodorovná os značí rýchlosť prúdenia pri stene a zvislá os ukazuje vzdialenosť od povrchu. [6] [7]



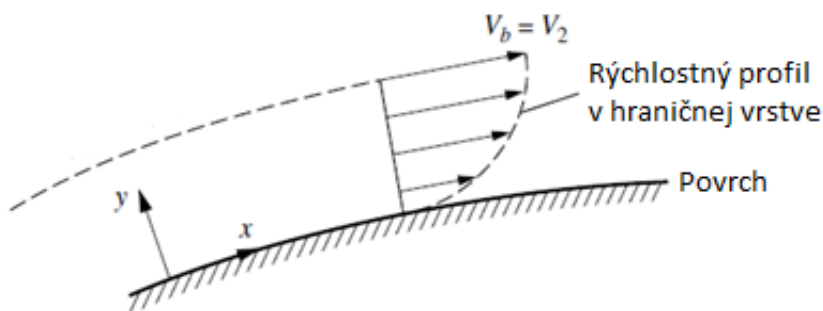
obr. 9 Závislosť rýchlosti a vzdialenosti pri odtrhnutí prúdenia [7]

Pre lepšie pochopenie, ako môže byť rýchlostný gradient vnútri hraničnej vrstvy tak výrazný, môžeme najskôr opísať neviskózne prúdenie okolo predmetu. Na obr. 10 je zobrazený stav, keď nie je prítomné trenie, takže prúdica prechádza priamo po povrchu krídla. Rýchlosť v bode b je rovná rýchlosti v iných bodoch, aj mimo povrchu krídla. [6]



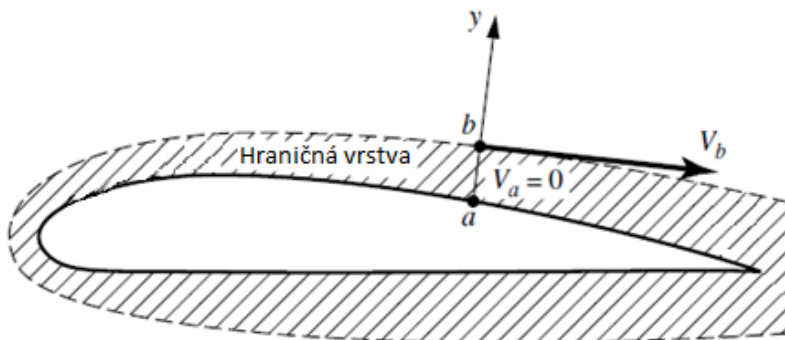
obr. 10 Neviskózne prúdenie na povrchu krídla [6]

V skutočnosti je rýchlosť prúdenia v tomto bode, aj po celom povrchu nulová vzhľadom ku krídlu, pretože prvá vrstva molekúl vzduchu je priľahlá na povrchu. Tento protišmykový stav je príčina veľkých gradientov rýchlostí v medznej vrstve. Rýchlosť sa zvyšuje od povrchu, ako je ukázané na rýchlostnom profile na obr. 11. Rýchlostný profil v každom bode je závislý od súradnice y . [6]



obr. 11 Rýchlostný gradient v medznej vrstve [6]

Na obr. 12 je medzná vrstva nepomerne zväčšená kvôli názornosti. Rýchlosť v bode a je nulová a zvyšuje sa až do bodu b na kraji hraničnej vrstvy, ktorá je veľmi tenká a preto je rýchlostný gradient tak výrazný. Platí predpoklad, že rýchlosť v bodoch b na obr. 10 a obr. 12 majú rovnakú rýchlosť. To znamená že neviskózne prúdenie na povrchu krídla je také isté ako na vonkajšom okraji hraničnej vrstvy pri viskóznom prúdení. [6]



obr. 12 Zväčšená hraničná vrstva [6]

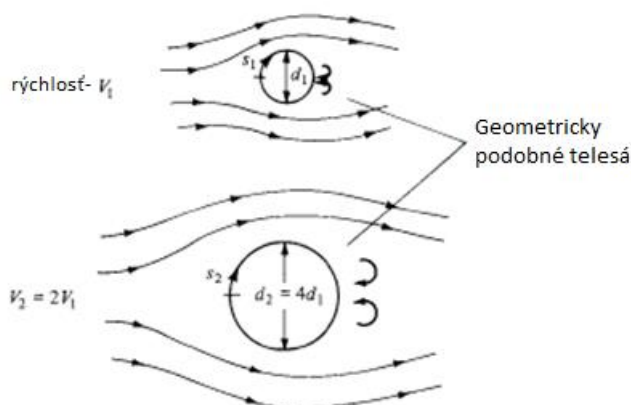
Je dôležité upozorniť na fakt, že v bodoch a a b , teda v bodoch ležiacich na normále k povrchu, je tlak rovnaký. Aj to je dôvod, prečo môžeme model neviskózneho prúdenia aplikovať na reálne problémy a priebeh rozloženia tlaku na povrchu ukazuje uspokojivé výsledky. Je to práve preto, že neviskózne výpočty dajú výsledky tlaku v bode b na vonkajšej hrane vrstvy a tieto tlaky sa použijú pre výpočet na povrchu v bode a . Postup sa dá aplikovať iba na prúdenie bez vzniku turbulencií. [6]

2.8 PODOBNOSTI V PRÚDENÍ

Pri porovnávaní dvoch rozdielnych prúdení v okolí dvoch rozdielnych telies, sa dajú prúdenia považovať za dynamicky zhodné ak: [6]

- Vzory prúdnic sú geometricky rovnaké alebo podobné
- Rozloženie pomeru rýchlostí tlakov a teplôt, skrz pole prúdenia sú zhodné ak sa vykreslia vzhľadom na bezrozmerné súradnice

Pre mnohé aplikácie v leteckom priemysle sú najdôležitejšie faktory Reynoldsovo číslo a Machovo číslo. V zjednodušenom zmysle sa dá konštatovať že ak sa tieto dve hodnoty pre rôzne modely zhodujú, vo výsledkoch budú mať modely dynamicky zhodné prúdenie a rovnaký odpor, zdvih a moment. Toto je kľúčové pre validitu testov vo veternom tuneli. Na obr. 13 sú dva valce, z toho jeden má násobné rozmery druhého, ako je uvedené v rovniach pri obrázku. [6]



obr. 13 Prúdenie okolo geometricky podobných telies [6]

Machovo číslo je pre oba modely zhodné, hoci pre potreby automobilného priemyslu nie je nutné tento parameter vyhodnocovať. Reynoldsovo číslo vieme vyjadriť ako:

$$Re_1 = \frac{\rho_1 v_1 d_1}{\mu_1} \quad (7)$$

$$Re_2 = \frac{\rho_2 v_2 d_2}{\mu_2} = \frac{\left(\frac{\rho_1}{4}\right) (2v_1) (4d_1)}{2\mu_1} = \frac{\rho_1 v_1 d_1}{\mu_1} = Re_1 \quad (8)$$

Z čoho vyplýva že Reynoldsove čísla sa zhodujú pre rôzne veľkosti obtekaných predmetov, pri zmene rýchlosti a hustoty obtekajúceho média. Ďalej vieme o charaktere prúdení povedať že prúdnice budú geometricky podobné a bezrozmerné rozloženia veličín (teplota, hustota,

rýchlosť) budú taktiež podobné až zhodné. Na základe týchto skutočností sa vykonávajú skúšky vo veterných tuneloch s modelmi v zmenšenej mierke, ktoré vykazujú podobný zdvih, odpor a vzor prúdnic. [6] [7]

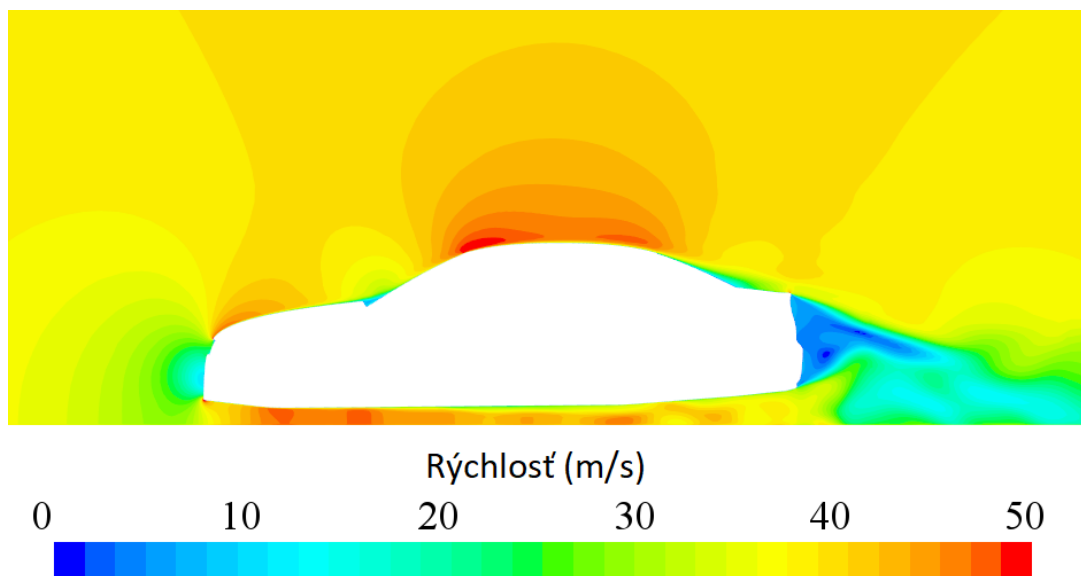
2.9 AERODYNAMICKÝ ODPOR

Vozidlo je pri pohybe obtekané vzduchom. Vzduch je delený prednou maskou, časť vzduchu prúdi medzi podvozkom a vozovkou, časť prechádza ponad karosériu a časť taktiež vstupuje cez sanie a chladienie.

Časť prúdnic narazí na prednú masku auta a tam stagnujú. V tomto bode je rýchlosť vzduchu nulová. Keďže sa celkový tlak vyjadruje ako súčet statickej a dynamickej zložky, a v tomto prípade je dynamická zložka nulová, tak celkový tlak sa bude rovnať statickej zložke. [8]

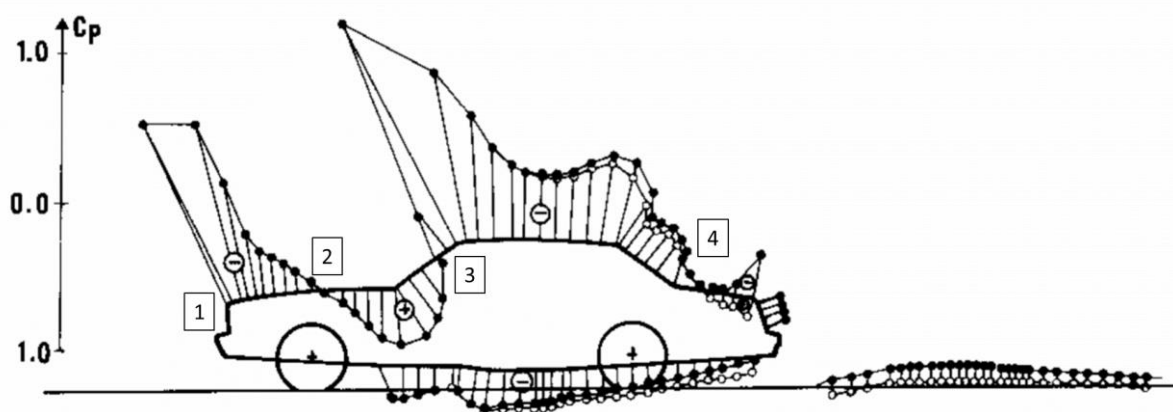
Prúdnice, ktoré putujú v okolí vozidla, ale nie sú zasiahnuté jeho prítomnosťou, majú rovný profil a tlak okolia (atmosférický tlak). Prúdnice ktoré putujú ponad vozidlo a zakrivujú sa musia mať vyšší tlak, ako tlak okolia. Vznikne oblasť vysokého statického tlaku, čo podľa Bernoulliho rovnice znamená oblasť v nižšou rýchlosťou. Naopak v oblasti horného okraja čelného skla, ako sa prúdnica znova ohne aby kopírovala strechu vozidla, musí tlak klesnúť pod úroveň atmosférického tlaku. Vznikne oblasť nízkeho tlaku a vysokej rýchlosti. [8]

Vyššie uvedené princípy sa dajú ukázať na obr. 14, ktorý zobrazuje rozloženie rýchlosti v okolí modelu na ktorom bude založený výpočet v tejto práci.



obr. 14 Rozloženie rýchlosti v okolí vozidla (rez v ose symetrie vozidla)

Obtekaním vzduchu vzniká aerodynamický odpor, ktorý je daný normálovými tlakmi smerujúcimi od povrchu karosérie. Na obr. 15 sú vyjadrené pozitívne a negatívne tlaky v porovnaní s tlakom okolia (atmosférickým tlakom).



obr. 15 Hodnoty tlakov normálových k povrchu [8]

Pozícia 1- na začiatku kapoty vznikne oblasť záporného tlaku, pretože prúdnicie sa snažia zdvihnúť a pokračovať pozdĺž kapoty. Nepriaznivý tlakový gradient v tejto oblasti má potenciál zdržať prúdenie v hraničnej vrstve a vytvoriť navýšenie odporu. Pri vývoji automobilov je kladený veľký dôraz na tvar tejto časti, aby nevzniklo odtrhnutie prúdenia už v tomto bode.

Pozícia 2- na dolnom konci čelného skla musí byť prúdenie zdvihnuté, čo generuje oblasť vysokého tlaku a nízkej rýchlosti. Výhodou tejto oblasti s nízkou rýchlosťou je, že tu umiestnené stierače predného skla nie sú namáhané silnými aerodynamickými silami.

Pozícia 3- opisuje podobné rozloženie síl ako v pozícii 1. Oblasť nízkeho tlaku sa predlžuje cez zadné sklo ak uhol sklonu je prirodzene nadväzujúci.

Pozícia 4- v tomto bode je pravdepodobné, že nastane odtrhnutie prúdenia. Prúdy po stranách vozidla sú taktiež sťahované podtlakom smerom k stredovej ose vozidla v oblasti kufra, čo vytvára víry za vozidlom. [8]

2.10 KOEFICIENT ODPORU

Je to bezrozmerný parameter, ktorý určuje efektívnosť (účinnosť) tvaru, nezávisle na jeho veľkosti alebo rýchlosti. Energeticky najvýhodnejší tvar, a teda najnižší koeficient odporu má tvar padajúcej kvapky- alebo profilu Airfoil. Ide o koeficient 0,045. Tento tvar sa snažia napodobniť aj automobily ktoré sa usilujú o čo najnižší koeficient odporu. Na polovicu prezeraný tvar kvapky uložený zrezanou časťou na podložku by bol ideálny tvar vozidla, ktoré sa bude pohybovať s čo najmenším koeficientom odporu- 0,09. [14] [8]

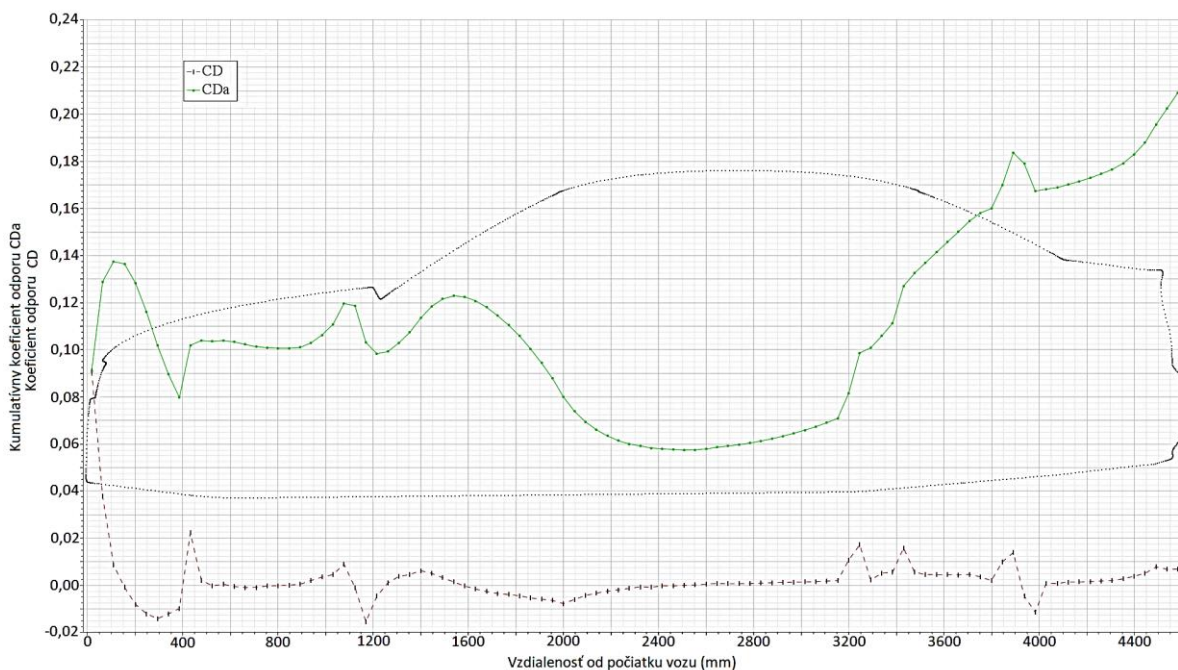
Predmety, ktorých najväčšia strana čelí smeru prúdenia majú najväčší koeficient odporu. Preto tvary ako kocka majú hodnotu 1,05, plochá doska dosahuje hodnotu 1,5 až 2. Na obr. 16 sú znázornené aj iné tvary a ich koeficienty odporu. [14] [7]

TVAR		KOEFICIENT ODPORU	TVAR		KOEFICIENT ODPORU
Koule		0,47	Pootočená kocka		0,80
Polovica koule		0,42	Dlhý kváder		0,82
Ihlan		0,50	Tvar kvapky		0,04
Kocka		1,05	Tvar polovice kvapky		0,09

obr. 16 Koeficienty odporov rôznych telies pri $Re=10^4$ [15] [14] [7]

2.11 KOEFICIENT ODPORU NA VOZIDLE

Na obr. 17 je znázornený rez modelu ktorý bude použitý v tejto práci a priebeh koeficientu odporu naprieč dĺžkou vozidla. Sériá hodnôt C_{Da} ukazuje celkovú (kumulatívnu) hodnotu odporu po dĺžke vozidla, čo znamená je výsledná hodnota koeficientu odporu je posledná hodnota krivky C_{Da} . Rad hodnôt C_D ukazuje aktuálnu hodnotu v danej vzdialenosti. Podľa týchto údajov sa dajú nájsť kritické mesta na karosérii, ktoré majú najväčší vplyv na nárast alebo naopak pokles koeficientu odporu.



obr. 17 Kumulovaný a celkový koeficient odporu

3 AUTONÓMNE VOZIDLÁ V ZÁSTUPE

V súčasnosti je vyvíjaný tlak na výrobcov automobilov kvôli znižovaniu uhlíkovej stopy ich vozidiel. Spoločné kroky k „zelenej mobilite“ musia podnikat' všetky veľké automobilky, za účelom ochrany životného prostredia, ekonomického nakladania s palivom a zvyšovania bezpečnosti na cestách.

Aj preto môžeme na trhu pozorovať hybridné automobily, elektromobily, „downsizing“ (zmenšovanie objemu) motorov, bio palivá a čoraz väčší podiel inteligentných systémov ktoré zasahujú do správania vozidla. Tieto systémy môžu zvyšovať bezpečnosť a komfort, zlepšovať lokalizáciu, riadenie, ale najmä znižovať spotrebu.

Preto nie je prekvapivé že v poslednej dobe mnoho ľudí pracuje na systémoch s autopilotom, ktorý komunikuje aj s ostatnými vozidlami v premávke. Takéto vozidlá sa môžu združovať v riadenom zástupe, z čoho plynú určité výhody: [16]

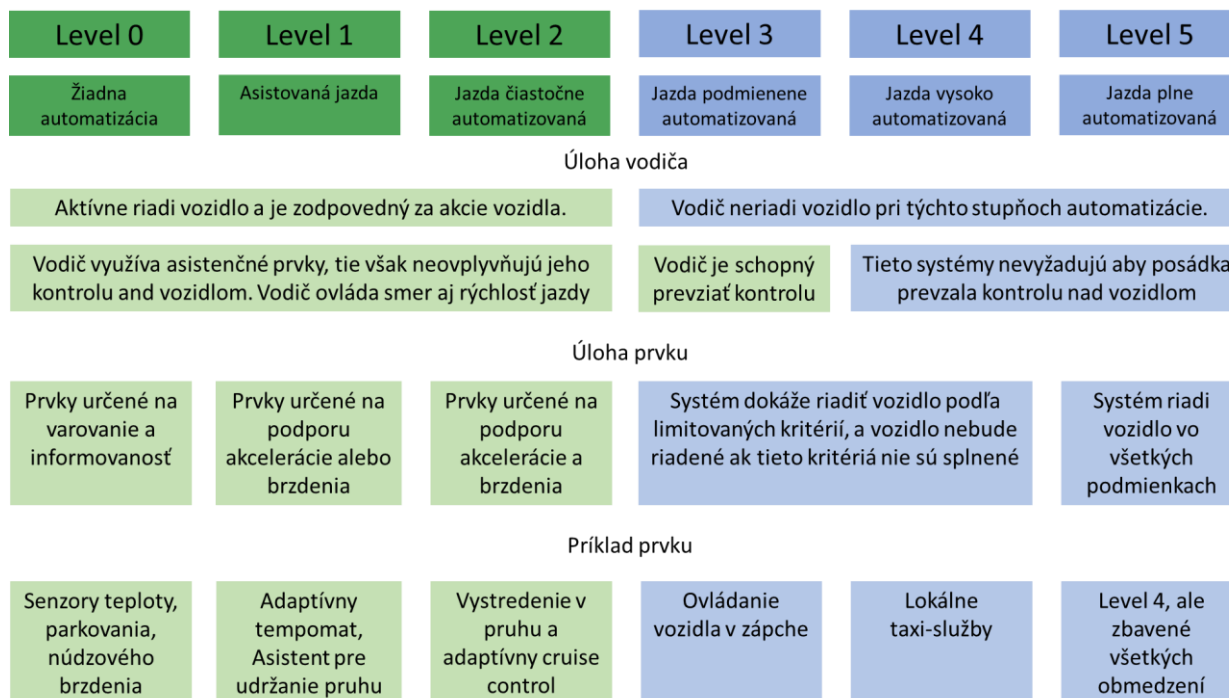
- Bezpečnejšia jazda vďaka vozidlám ktoré si posúvajú informácie, napr. o nečakanom brzdení
- Zvyšuje sa komfort jazdy vďaka plynulosti premávky
- Možnosť prepraviť viac automobilov na jednej komunikácii pomocou skrátenia rozostupov
- Optimalizujú sa aerodynamické vlastnosti vozidiel v zástupe, čo vedie k úsporám energie

3.1 ROZLIŠENIE STUPŇOV AUTONÓMIE

Výbava moderných vozidiel je čoraz viac dopĺňaná asistenčnými službami, ktoré sú schopné preberať viac kontroly nad vozidlom, aj pri komplexných úkonoch. Niektoré vlastnosti autonómnych vozidiel, ako napríklad detekcia a udržiavanie určitých medzier medzi vozidlami, slúžia ako predpoklady pre túto záverečnú prácu. V súčasnosti technológie autopilota stále nie sú neomylné a toto odvetvie čaká ešte dlhý vývoj kým dosiahne úplnú spoľahlivú autonómnosť.

Organizácia SAE International vydala smernicu *J3016: Klasifikácia a definície pojmov týkajúcich sa automatizovaných jazdných systémov cestných motorových vozidiel*, v ktorej popisuje jednotlivé stupne riadenia vozidla, začínajúc žiadnou automatizáciou a končiac pri plnej automatizácii.

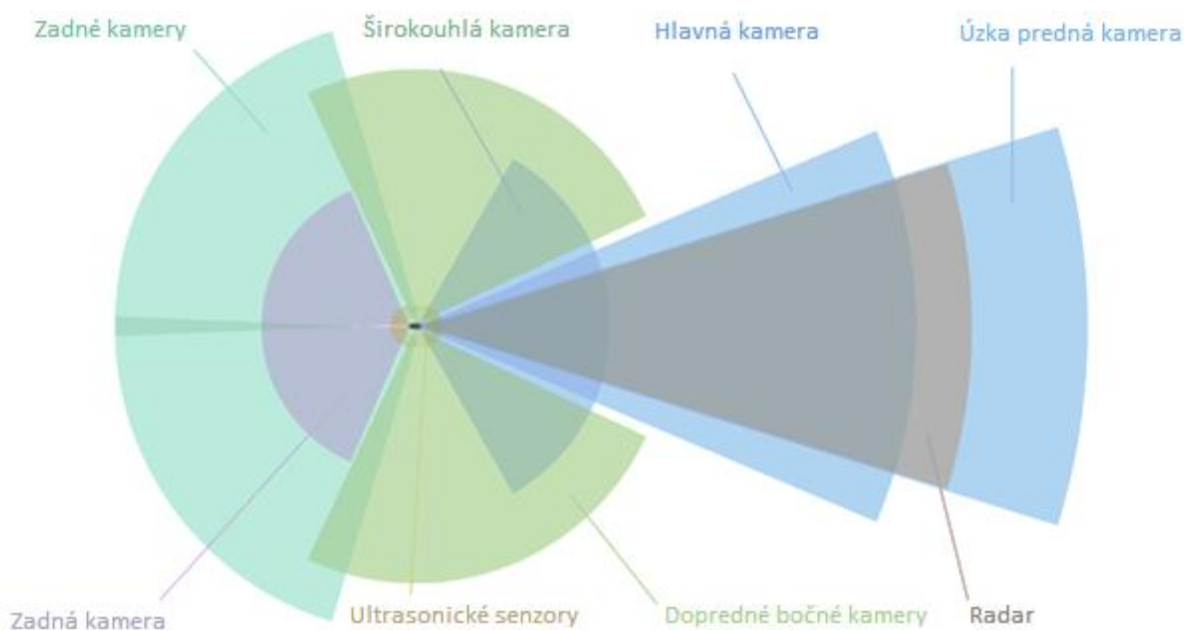
V prvých troch stupňoch automatizácie, ovláda dynamické riadiace nástroje iba vodič, ktorého úlohou je detekovať udalosti v premávke a adekvátne odpovedať. Pri žiadnej automatizácii vodič sleduje mŕtvy uhol, brzdenie. Pri asistovanej jazde musí vodič byť okamžite schopný plne prevziať riadenie. Pri ďalších stupňoch automatizácie môže automobil sám zrýchľovať, spomaľovať aj zatačať, ale vodič musí byť schopný prevziať riadenie vozidla. Príkladom môže byť funkcia automatizovanej jazdy v kolóne alebo jazdy na diaľnici, ak systém má dostatočné mapové a dátové podklady k danej cestnej komunikácii. Finálne stupne automatizovania jazdy spočívajú v eliminovaní zásahu posádky do riadenia vozidla. Tieto stupne sú schematicky rozdelené na obr. 18: [9]



obr. 18 Stupne autonómie vozidiel [10]

3.2 SNÍMAČE

Autonómne vozidlá sú vybavené rôznymi technológiami na snímanie rýchlosti, vzdialenosti, polohy, či technológiami na rozpoznávanie okolia, dopravných značiek a iných objektov na vozovke. Pre problematiku, ktorej sa venuje táto diplomová práca sú podstatné technológie, ktoré vedú detekovať vzdialenosť od ostatných vozidiel. Ako najznámejší zástupca autonómnych technológií bol vybraný výrobca Tesla. Vozidlo je vybavené kamerami, zobrazené na obr. 19, ktoré pokrývajú 360 stupňov v okolí vozidla. Sú to:



obr. 19 umiestnenie kamier automobilu Tesla [11]

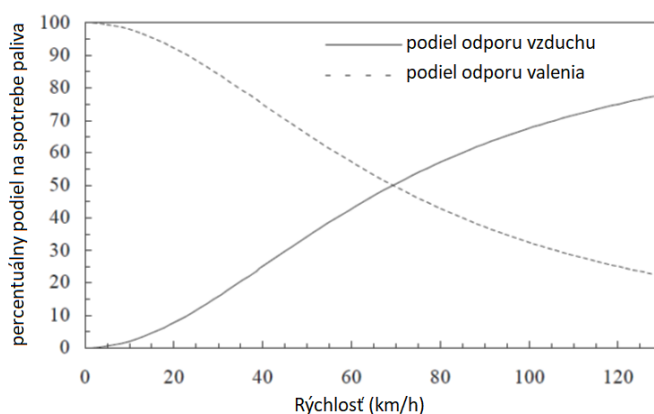
- Úzka predná kamera (dosah 250 m)- na vzdialené objekty, pri vysoko rýchlej jazde, predovšetkým na diaľnici.
- Hlavné kamery (dosah 150 m)- sníma vozidlá a polohu jazdných pruhov.
- Objektív „rybie oko“ (uhol kamery je 120 stupňov)- zachytáva semaforey, prekážky prerušujúce cestu a predmety na krátku vzdialenosť, najväčšie využitie má pri manévrovaní v mestách a pri nízkych rýchlostiach.
- Dopredné bočné kamery (dosah 60 m)- na detekciu vozidiel nečakane vstupujúcich do jazdného pruhu pred automobil, zvýšená bezpečnosť v neprehľadných križovatkách.
- Zadné kamery- umiestnené pri bočných smerovkách, slúžia na sledovanie mŕtveho uhlu, čo je obzvlášť potrebné pri zmene pruhov.
- Zadná kamera- detekcia stavu premávky za vozidlom, a v kombinácii s ostatnými kamerami slúži aj na parkovanie.
- Ultrasonické senzory- využívané najmä pri parkovaní a pri detekcii vozidiel v bezprostrednej blízkosti.

Konkurenčná technológia na komplexnú detekciu objektov sa nazýva LIDAR (Light detection and ranging). Automobilka Tesla túto technológiu odmietala až do roku 2019. Jedná sa o systém, ktorý meria vzdialenosť na základe doby šírenia laserového pulzu odrazeného od snímaného objektu. Lidar využíva na zobrazenie objektov vysielanie laserového lúču. Dokáže rozpoznať aj ne-metalické objekty ako skaly, dážď a oblaky. Táto technológia sa využíva vo všetkých odvetviach navigácie a rozpoznávania objektov- námorníctve, meteorológia alebo pre vojenské účely. [12] [13]

3.3 VÝHODY JAZDY VOZIDIEL V ZÁSTUPE

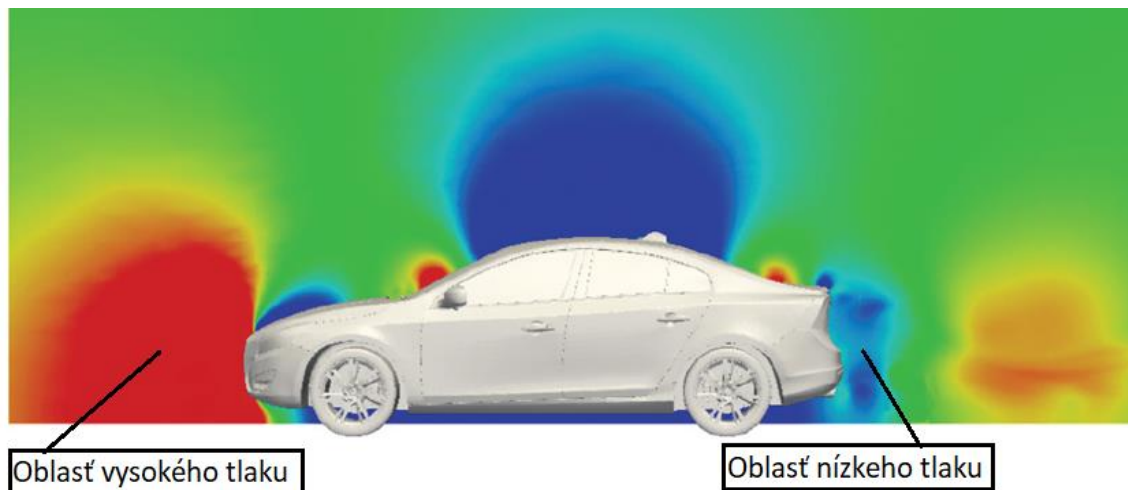
Táto záverečná práca sa venuje práve optimalizácii rozostupov medzi vozidlami pre zníženie aerodynamických odporov vozidiel a tým k zníženiu spotreby paliva. Pre popis situácie, ako môžu správne rozostupy medzi vozidlami viesť k úsporám energie, musíme popísať základné princípy aerodynamiky, ktoré pozorujeme pri pohybujúcom sa vozidle v zástupe vozov.

Každé pohybujúce sa vozidlo musí prekonať dva hlavné odpory: trenie (vnútorné a vonkajšie) a odpor vzduchu. Pri rozbiehaní vozidla je najviac energie vynaloženej na prekonanie trecích síl medzi vozovkou a pneumatikami, takisto ako medzi vnútornými pohyblivými časťami. Pri prekonaní rýchlosti 70-80 km/h sa ako hlavná odporová sila začína prejavovať aerodynamický odpor. Na prekonanie tohto odporu je vyžadovaný čoraz vyšší výkon motoru a čoraz väčšia dávka paliva. Tieto závislosti sú zobrazené na obr. 20.



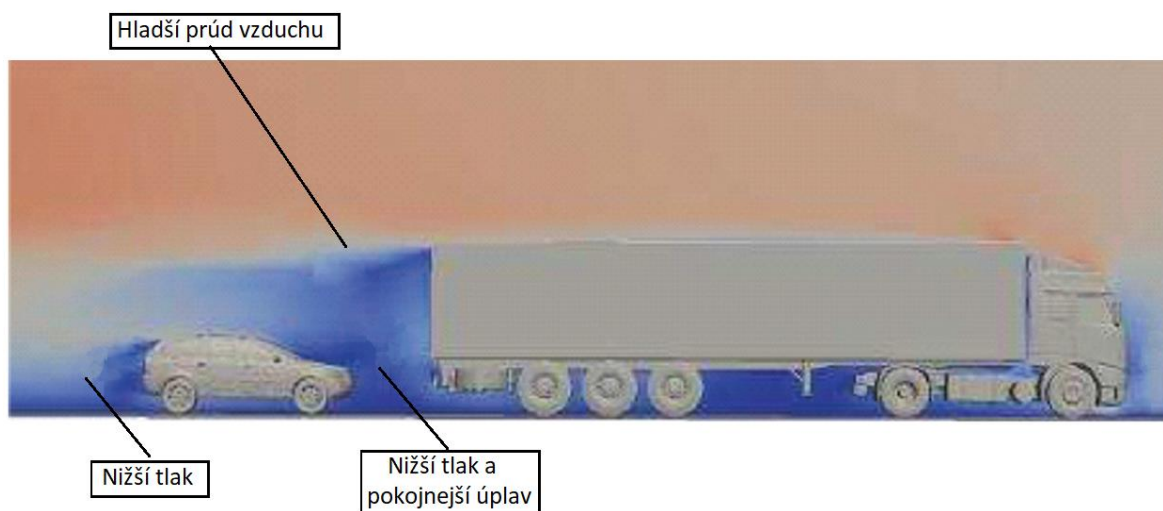
obr. 20 Spotreba paliva kvôli odporom, vyjadrené ako percento z celkovej spotreby paliva [16]

Podľa štúdie [16] sa 90 % aerodynamického odporu generuje v dôsledku rozdielov tlakov pred a za vozidlom. Pred vozidlom vzniká vysoko-tlaková kapsa v dôsledku tlačenia auta do popredia ktoré na okolitý vzduch pôsobí kompresne. Vzduch prúdi okolo vozidla čím znižuje tlak na hornej časti a vytvára sa turbulentné prúdenie v oblasti úplavu za vozidlom, ktoré sa vyznačuje nízkym tlakom, ako je ukázané na obr. 21. [16]



obr. 21 Rozloženie tlaku v okolí vozidla v pohybe [16]

Táto oblasť môže byť využitá ďalším vozidlom, ktoré by pocíťovalo znížený rozdiel tlakov medzi prednou a zadnou časťou, čím by sa znížil jeho aerodynamický odpor. Zo vzniknutej kolóny automobilov by profitovalo aj vedúce vozidlo pretože zmeny prúdenia vzduchu za ním, umožňujú hladšie prúdnice vzduchu okolo neho, čím sa znižuje vysoký tlak na prednej maske, ako aj nižší tlak za ním. Tieto účinky sa zvyšujú, ak je vozidlo vpredu väčšie ako vozidlá v zákryte, typicky sa jedná o kamiónovú dopravu ako je ukázané na obr. 22. [16]



obr. 22 Zmena prúdenia a tlaku v okolí vozidiel v zástupe [16]

4 VOZIDLÁ V ZÁSTUPE VO VETERNOM TUNELI

Mnoho štúdií sa venovalo meraniu odporov vozidiel v zástupe, vo veternom tuneli. Merania boli vykonávané pre zástup dvoch, troch, aj štyroch vozidiel. Účelom testov bolo popísať a vyjadriť odpor na vozidlách v závislosti na vzdialenosti medzi vozidlami. [18]

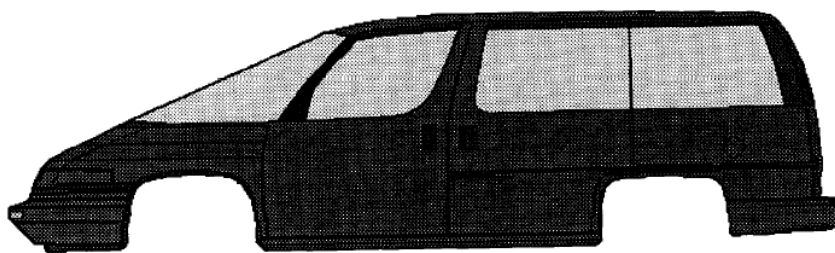
4.1 ZMENŠENÉ MODELY A REYNOLDSOVO ČÍSLO

Pre modely ktoré sú použité v aerodynamickej skúške vo veternom tuneli je potrebné vytvoriť čo najvernejšie podmienky ktoré sa približujú reálnej premávke. Model by mal odrážať dynamické aj geometrické podobnosti. Aj keď sa použije model v reálnej mierke, dokonalý v každom detaile, už samotná prítomnosť stien tunelu degraduje dokonalú podobnosť s realitou ktorá sa nikdy nedosiahne. Testy v aerodynamickom tuneli stále poskytujú cenné informácie o správaní vozidiel za predpokladu, že sa nezabúda na obmedzenia testov, napríklad že pri vytvorení zmenšenej repliky sa musí zachovať pomer medzi dĺžkami a model si zachoval charakteristické tvary. [18]

Najčastejšie sa v meraniach pracuje s koeficientom odporu, viac ako s odporom samotným, pretože koeficient v sebe zahŕňa aj veľkosť vozidla aj jeho relatívnu rýchlosť. Dovoľuje odvodiť podobnosti pre reálne vozidlá, aj pre zmenšené modely. Aby sa udržala konštanta Re , rýchlosť voľného toku v testovacom prípade musela byť 8 krát vyššia, ako v reálnych podmienkach, čo avšak nebolo možné dosiahnuť vo veternom tuneli. Vozidlá ktoré sa pohybujú na diaľnici, dosahujú Reynoldsovo čísla v rádoch 10^6 až 10^7 , ale pre test vo veternom tuneli je možné dosiahnuť Reynoldsovo číslo o rád nižší. [18]

4.2 MODEL VOZIDLA

Na meranie boli použité repliky vozidla Chevroletu Lumina v mierke 1 : 8. Jeho maximálna plocha v priereze je $2,82 \text{ m}^2$. Jeho tvar bol vybraný pre jeho pomaly nabiehajúce zakrivenie ktoré vedie k streche a pre absenciu významných zalomení na prednej maske. Škrupina modelu je zobrazená na obr. 23.



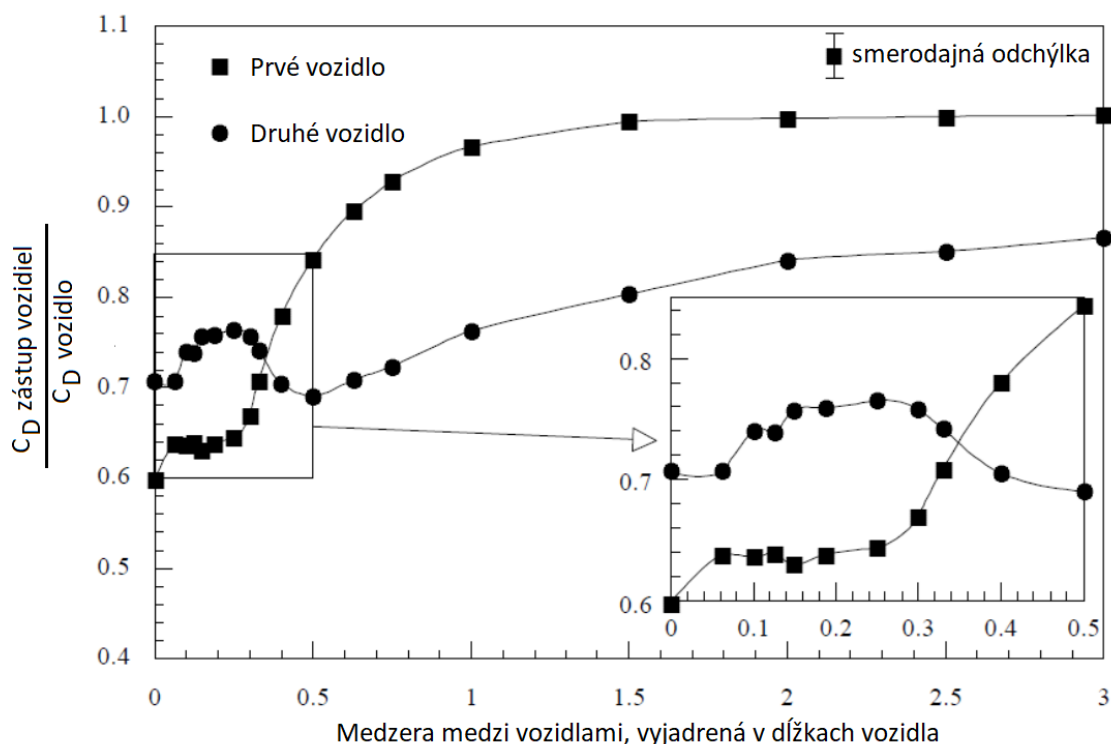
obr. 23 Replika vozidla Chevrolet Lumina [18]

4.3 KOEFICIENT ODPORU JEDNÉHO VOZIDLA

Merania jedného vozidla sa zamerávajú do dvoch skupín, podľa prítomnosti alebo absencie krycej podložky. Pre model na poréznej vozovke bol priemerný koeficient odporu $C_D = 0,328 \pm 0,006$. Pre zakrytý povrch sa koeficient odporu mierne zníži na hodnotu $C_D = 0,288 \pm 0,007$. [18]

4.4 KOEFICIENT ODPORU DVOCH VOZIDIEL V ZÁSTUPE

Pri vyhodnocovaní odporov sa používala pomerová hodnota odporu vozidla ako člena v zástupe, k odporu vozidla samotného. Na obr. 24 sú dané hodnoty odporu namerané na vozidlách ako funkcia medzery medzi vozidlami, vyjadrená v dĺžkach vozidla. Predné vozidlo je reprezentované štvorcami, zadné vozidlo kruhmi. Súradnice v ose y sú vyjadrené ako pomer odporu vozidla v zástupe ($C_{D\text{-zástup}}$) k odporu vozidla samotného, merané v tej istej vzdialenosti v tuneli ($C_{D\infty}$) [18]



obr. 24 Pomerové koeficienty odporu vozidiel v zástupe [18]

Pre medzery väčšie ako jedno vozidlo sa pomer koeficientu odporu správa podľa očakávaní. Predné vozidlo nie je tak ovplyvnené prítomnosťou zadného vozidla. Zadné vozidlo, ktoré je vystavené nižšej nábehovej rýchlosti v oblasti úplavu za hranou predného vozidla vo vzdialenosti 1 vykazuje o 25 % menší koeficient odporu. Táto hodnota klesá na 15% pri vzdialenosti 3. Sklon krivky naznačuje že zadné vozidlo bude vykazovať menší koeficient odporu až do vzdialenosti 10tich vozidiel.

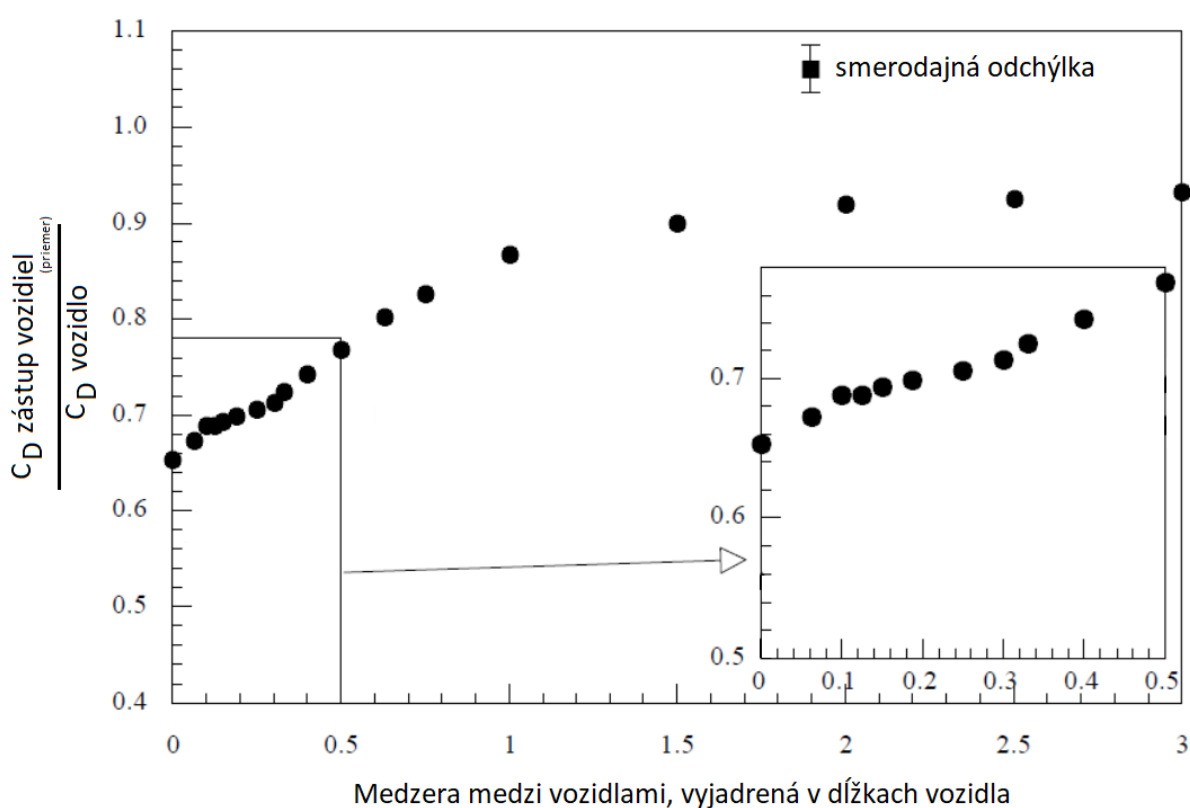
Pri vzdialenosti vozidiel menších ako 1, začne byť predné vozidlo ovplyvňované prítomnosťou druhého vozidla. Koeficient odporu predného vozidla klesá pri znižujúcej sa vzdialenosti. Pri vzdialenosti polovice dĺžky modelu je koeficient odporu predného vozidla rovný približne $0,85 \cdot C_{D\infty}$. Pri rovnakom rozostupe klesne koeficient odporu zadného vozidla na $0,85 \cdot C_{D\infty}$. Pri medzere 1/3 začne byť prúdenie príliš nestabilné a sprevádzané vibráciami, ktoré znehodnocujú výsledky merania. Tieto údaje boli odporúčané používať s uvažovaním, prípadne mohli predstavovať predmet ďalších štúdií.

4.5 PRIEMERNÁ ENERGETICKÁ ÚSPORA VOZIDIEL

Vyššie uvedené merania ukazujú, že zníženie odporu pre automobily jazdiace v zástupe nie je zanedbateľné. Kvantifikované úspory možno najlepšie vyjadriť ako priemerný koeficient odporu pre celý zástup vozidiel. Matematicky sa celkový odpor vozidiel v zástupe dá vyjadriť ako: [18]

$$\frac{(c_D \text{ zástup})_{\text{priemer}}}{c_{D\infty}} = \frac{1}{n} \sum \frac{c_{Di}}{c_{D\infty}} \quad (9)$$

Premenná i reprezentuje poradie vozidla v zástupe a n reprezentuje celkový počet vozidiel v zástupe. Tento vzťah je reprezentovaný v obr. 25 pre dve vozidlá v zástupe. [18]



obr. 25 Priemerný koeficient odporu pre dve vozidlá v zástupe k c_D jedného vozidla [18]

Pri medzere menšej ako polovica vozidla vidíme pokles celkového koeficientu odporu na 2/3. Treba mať na pamäti, že získané dáta pre túto oblasť nemusia odpovedať pravde kvôli prítomnosti vibrácií, ale trend znižovania koeficientu odporu je stále značný.

Všeobecne môžeme tvrdiť že test naznačuje, že usporiadanie vozidiel do zástupu poskytne úsporu energie minimálne 10 % na koeficiente odporu s medzerami väčšími ako dĺžka jedného vozidla. Takýto trend však nemôže pokračovať donekonečna, so zvyšujúcim sa počtom vozidiel a môžeme očakávať že sa hodnota ustáli a nebude sa meniť aj s pribúdajúcimi vozidlami v zástupe.

5 MODELY PRE VÝPOČTOVÉ A EXPERIMENTÁLNE MERANIA

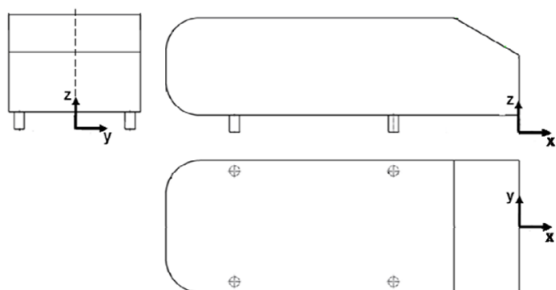
Pre simulácie aerodynamiky či už vo veterných tuneloch, alebo v CFD simuláciách sa okrem reálnych modelov používajú štandardizované telesá pripomínajúce automobily. Tieto tvary sú používané naprieč výskumami. Popis „jednoduchých“ telies je mierne klamlivý pretože referenčné modely v tejto kategórii sa ukázali neuveriteľne poučné pri pochopení základných fenoménov toku súvisiacich s automobilmi. To viedlo k ich ďalšiemu použitiu pri vývoji testovacích techník aerodynamického tunela, pri výskume korekcie blokovania a tiež pri zjednotení a validácii výpočtových metód. [19]

5.1 MODEL AHMED

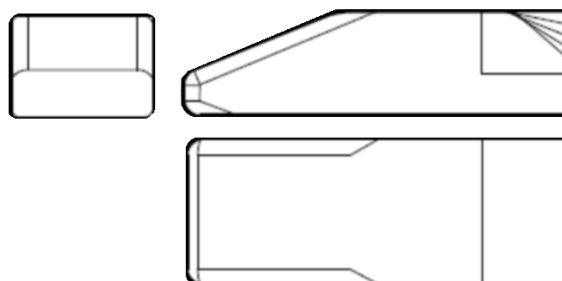
V sedemdesiatych rokoch bol najpoužívanejší práve model Ahmed, pretože jeho zjednodušený tvar zachytáva a predikuje najdôležitejšie charakteristiky prúdenia v okolí vozidla, ale jeho telo je zároveň pomerne jednoduché a ideálne pre výpočtové možnosti spred pár rokov. Tento model, sa ako prvý využíval pre skúmanie aerodynamického odporu v závislosti na zmenách uhlu v zadnej časti vozidla. [20]

5.2 MODEL WINDSOR

Tento model, taktiež známy ako model Rover, bol vytvorený na konci osemdesiatych rokov, s účelom skúmania významu tvaru vozidla. Model obsahoval zrezaný nos a vymeniteľný zad, ktorý mohol meniť svoj uhol od 0 do 40 stupňov. Takýto model s nábehovou plochou na prednej časti vozidla sa viac približuje tvaru stredne veľkých rodinných vozidiel. Jednoduchý tvaru tohto modelu spočíva v tom, že kópie tohto modelu v rôznej mierke sú jednoduché na výrobu a preto praktické pre použitie v každom veternom tuneli. [19]



obr. 26 Model Ahmed [20]

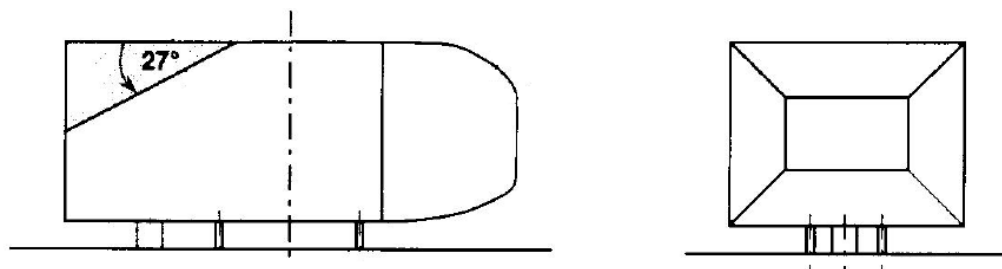


obr. 27 Model Windsor [21]

ĎALŠIE MODELY

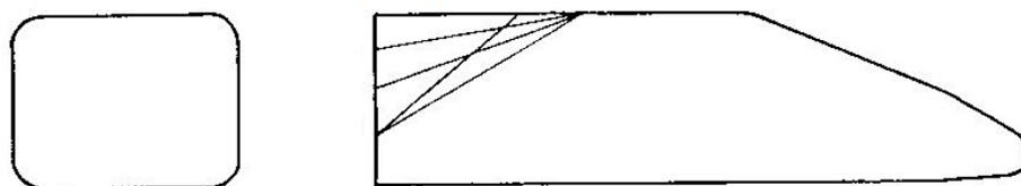
Existuje mnoho iných modelov podobných tvarov, ktoré sa využívali v určitom období tak, aby tvarom pripomínali vozidlá danej doby, alebo aby sa z ich tvaru dali namerať potrebné údaje.

- Model NRCC/SAE
- Model Davis
- Model Chrysler Fastback
- Model GM

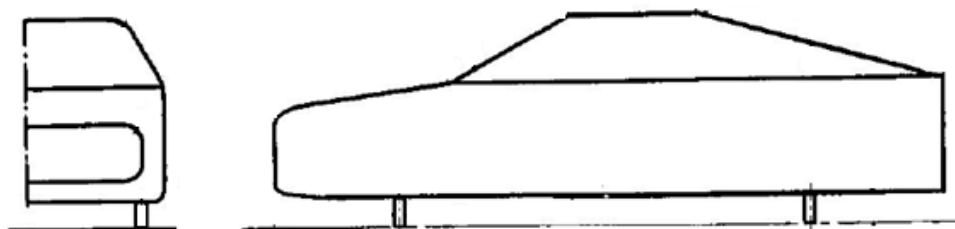


obr. 28 Model NRCC/SAE [19]

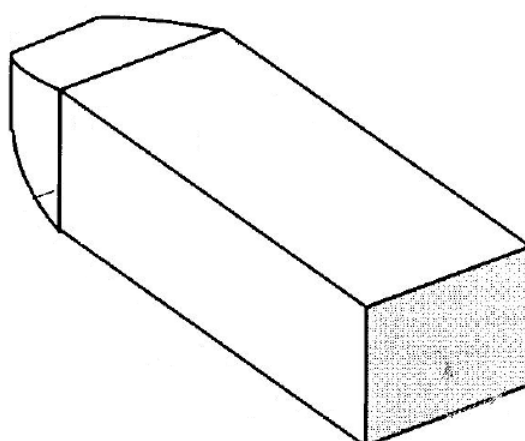
Možnosti zkosenia
zadnej časti



obr. 29 Model Davis [19]



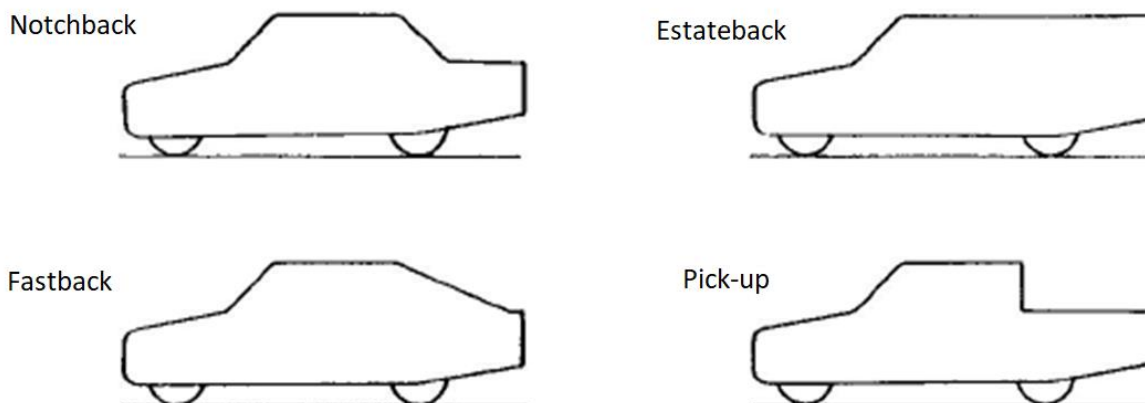
obr. 30 Model Chrysler Fastback [19]



obr. 31 Model GM [19]

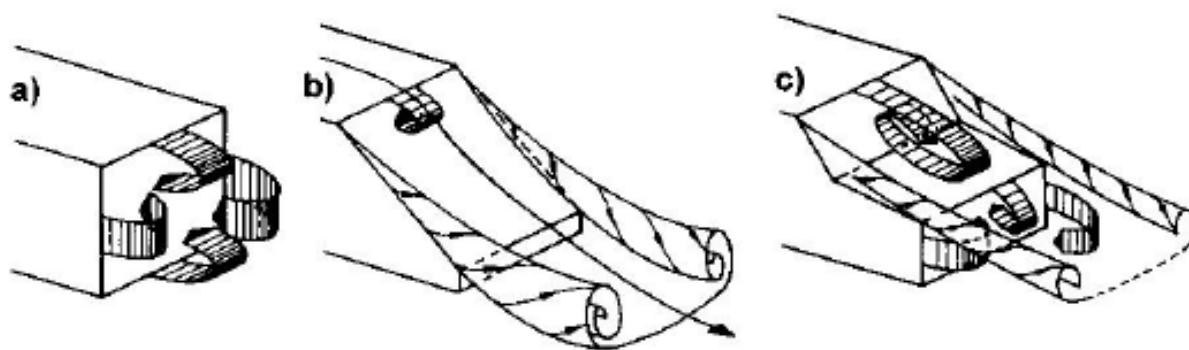
5.3 VOZIDLO MIRA

Jedná sa o najviac používané referenčné vozidlo, ktoré sa objavuje vo viac ako 20tich výskumoch zaoberajúcich sa aerodynamikou. Predlohou pre tvar vozidla boli Volkswagen 1600, Fiat 124 a Fiat Ritmo. Každé z nich malo voliteľné spojery a deflektory. [19]



obr. 32 Model Mira [19]

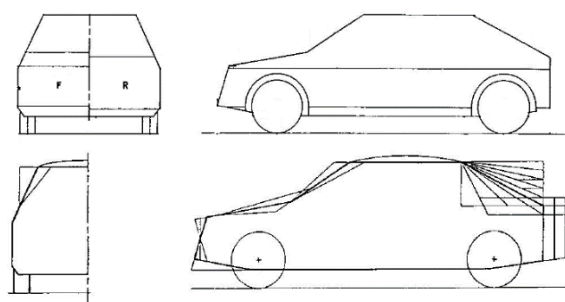
Mira model mal voliteľný tvar zadnej časti karosérie pre simuláciu všetkých druhov vozidiel. Geometrie estateback (a), fastback (b) a notchback (c) majú zásadne iné vírenie vzduchu za vozidlom, ako je ukázané na obr. 33. Štvrtý typ vozidla pick-up, osobné nákladné vozidlo vznikne, ak sa na zadnú časť karosérie nepriloží žiadny vyššie uvedený tvar.



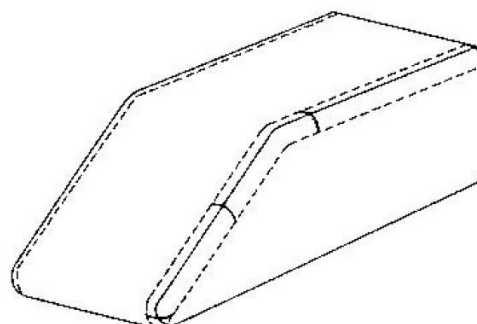
obr. 33 Vírenie vzduchu v oblasti úplavu pri rôznom type karosérie [1]

ĎALŠIE MODELY

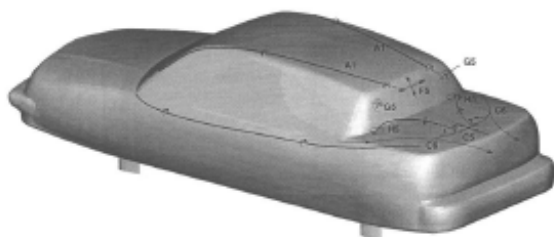
- Ford variabilný model
- SAE referenčný model
- Ford referenčný model
- Model pick-up



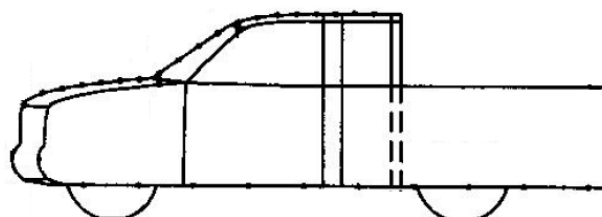
obr. 34 Ford variabilný model [19]



obr. 35 SAE referenčný model [19]



obr. 36 Ford referenčný model [19]

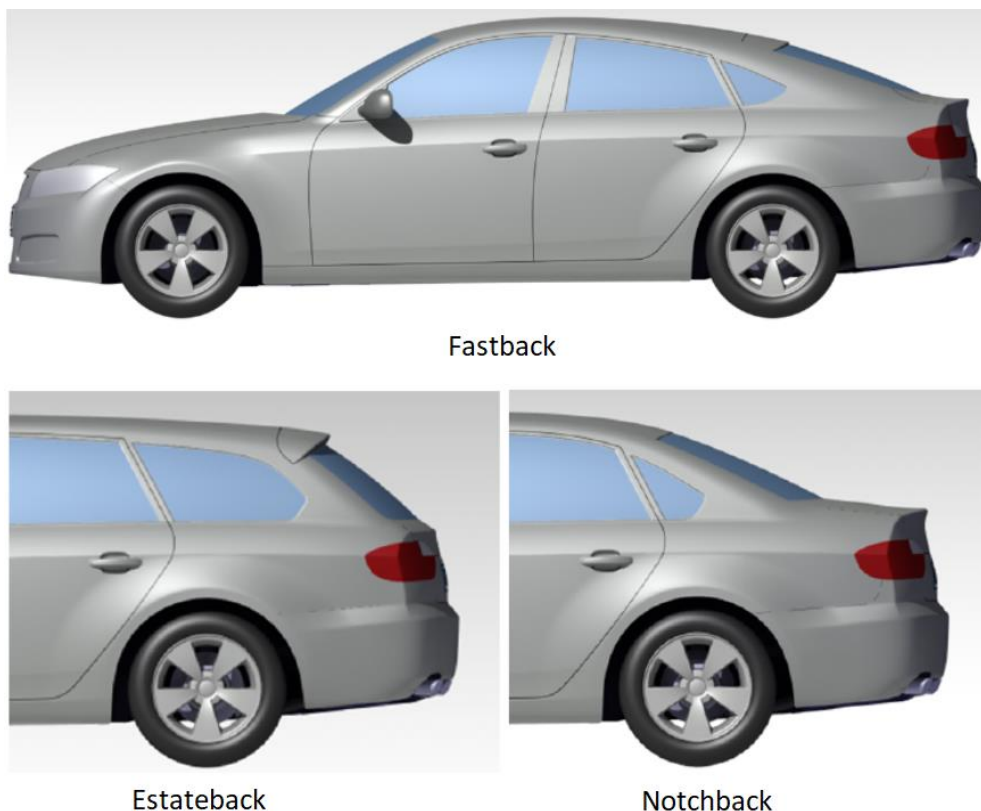


obr. 37 Model pick-up [19]

5.4 DRIVAER

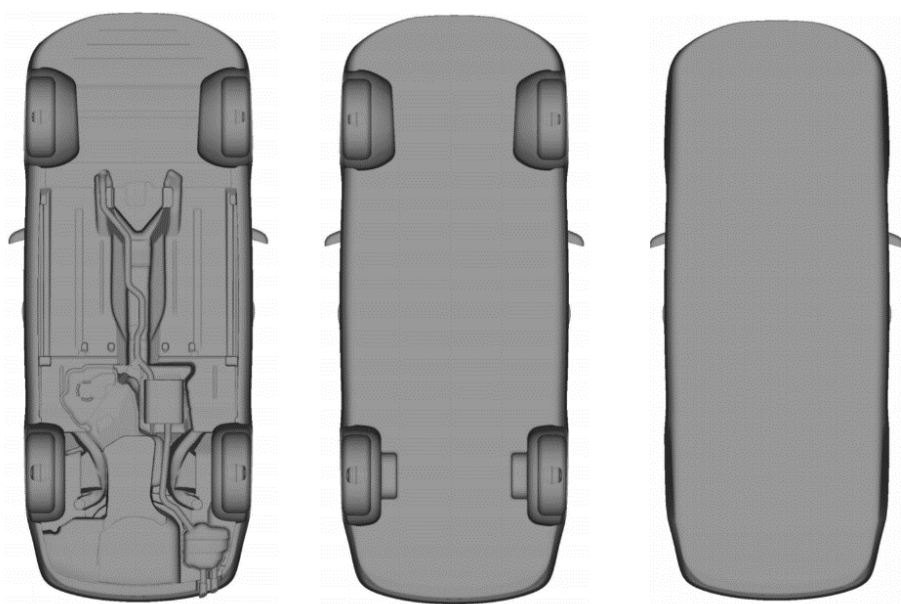
Na simulácie automobilovej aerodynamiky sa často používali vyššie uvedené, extrémne zjednodušené modely vozidiel, ako napríklad model Ahmed a model SAE, ktoré sú vysoko abstraktné. Získané výsledky sa už z povahy skúmaných telies líšili od skutočnosti. [22]

Na rozdiel od týchto modelov je geometria modelu DrivAer založená na geometrii dvoch stredne veľkých vozidiel- Audi A4 a BMW rady 3. Ich spojená geometria, odpovedá realite neporovnateľne viac ako vyššie uvedené modely. Model je voľne dostupný na webe Technickej univerzity Mnichov. K modelu je možné použiť tri konfigurácie zadnej časti karosérie. Jedná sa o typy vozidiel Kombi (Estateback), ktorého strešná línia je predĺžená smerom dozadu, Fastback, ktorého strešná línia plynulo klesá na úroveň zadných svetiel, a verzia Notchback, ktorá by odpovedala sedanu. Tieto modifikácie, zobrazené na obr. 38, dovoľujú skúmať rôzne tvary zakončení a ich vplyvu na aerodynamický odpor. [22] [23]



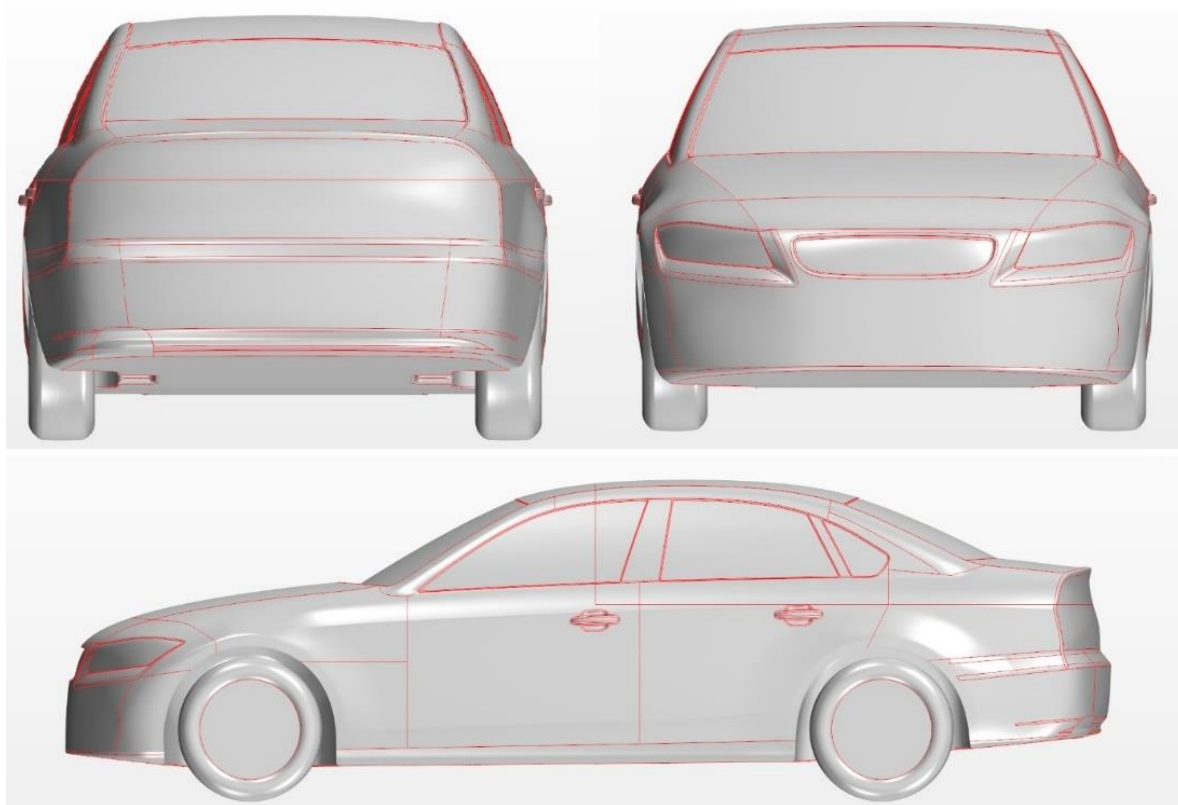
obr. 38 Model DrivAer v troch konfiguráciách [24]

Model ktorý je použitý na výpočty v tejto práci je mierne upravený, aby sa zachovali charakteristické znaky modelu, ale zároveň značne zjednodušený pre nižší výpočtový čas. Z prednej masky sú odstránené komponenty pre sanie, predná maska je vyhladená. Podvozok je dostupný v troch rôznych konfiguráciách. Detailný podvozok, hladký podvozok s kolami a hladký podvozok bez kôl. Tieto konfigurácie sú zobrazené na obr. 39.



obr. 39 Možnosti podvozku modelu DrivAer [25]

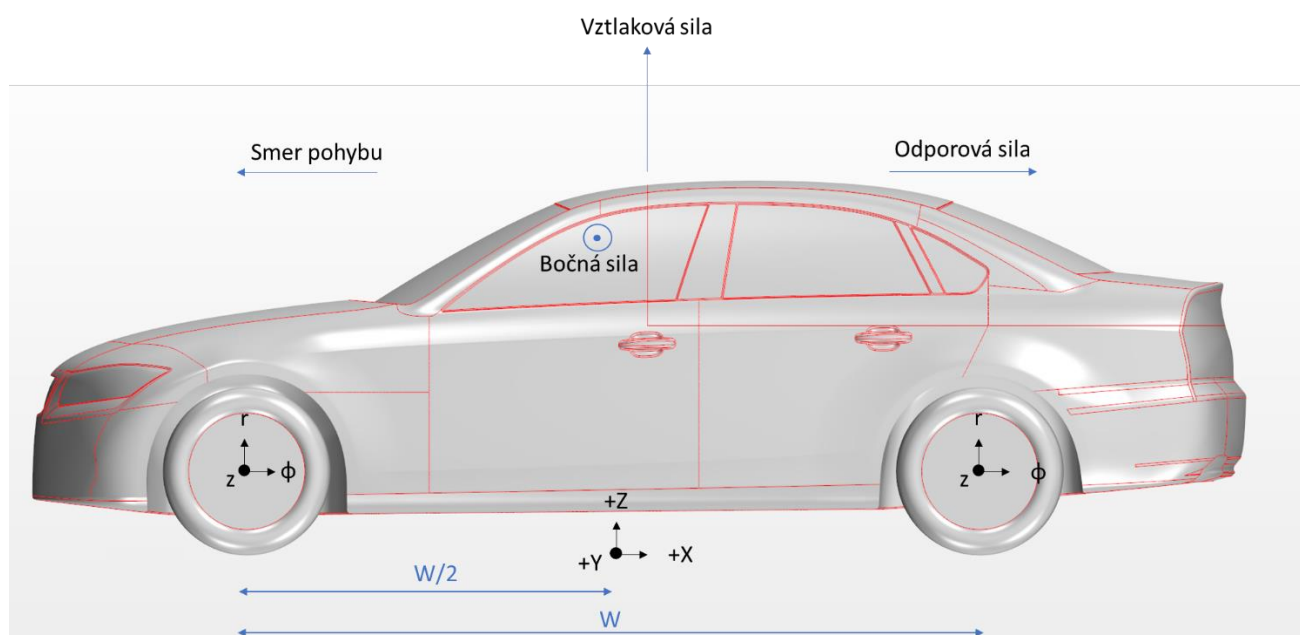
Pre výsledný model bol zvolený prostredný podvozok, ktorý poskytuje primeraný kompromis medzi rýchlosťou a komplexnosťou výpočtu. Pre jednoduchosť boli z modelu odstránené aj spätné zrkadlá a pre model pneumatiky je zvolený jednoduchý tvar bez otvorov. Výsledný model je zobrazený na obr. 40.



obr. 40 Model DrivAer použitý vo výpočte

6 AERODYNAMICKÉ SILY PÔSOBIACE NA VOZIDLO

Aerodynamické sily na vozidle sú spôsobené interakciou vzduchu s povrchom vozidla. Vzduch obteká vozidlo rýchlosťami ktoré na rôznych častiach karosérie nemajú rovnakú hodnotu. Aerodynamické sily majú nízky, až zanedbateľný vplyv na vozidlo v nízkych rýchlostiach. Ak sa vozidlo pohybuje vpred, ako na obr. 41, na vozidlo pôsobí vztlaková sila v smere osy Z, bočná sila v smere osy Y a odporová sila v smere osy X. Na obrázku je taktiež znázornené, že centrum súradnicového systému pre model vozidla leží na úrovni vozovky medzi nápravami vo vzdialenosti $W/2$ a osa X pretína vozidlo stredom, v rovine symetrie. Taktiež boli v modeli pridané súradnicové systémy v centre kolies, ktoré budú slúžiť na popis rotácie.



obr. 41 Sily pôsobiace na vozidlo a pridané súradnicové systémy

Koeficienty odporu, vztlaku a bočnej sily, sa vypočítajú podľa: [17]

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_f} \quad (10)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_f} \quad (11)$$

$$C_S = \frac{S}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_f} \quad (12)$$

Kde C_D , C_L , C_S sú bezrozmerné koeficienty odporu, vztlaku a bočnej sily, v je rýchlosť vozidla, ρ je hustota vzduchu, A_f je priemet plochy vozidla, D , L a S sú sily namerané pri nulovom uhle natočenia vozidla.

7 SIMULÁCIA V PROGRAME STAR CCM+

Výpočet bol realizovaný v programe Star CCM+. Výhodou tohto programu je skutočnosť, že riešič je schopný inicializovať výpočet s prihliadnutím na predchádzajúce výsledky. Táto vlastnosť sa využíva pri drobných zmenách geometrie, siete alebo okrajových podmienok. Riešič v takomto prípade nezačína od začiatku a program ušetrí množstvo času a teda aj finančných prostriedkov.

Nasledujúca kapitola bližšie popisuje niektoré výpočtové riešiče a nastavenia, ktoré boli použité pre daný výpočet, prípadne zdôvodňuje ich výber a porovnáva s alternatívami.

7.1 ALL Y+ WALL TREATMENT

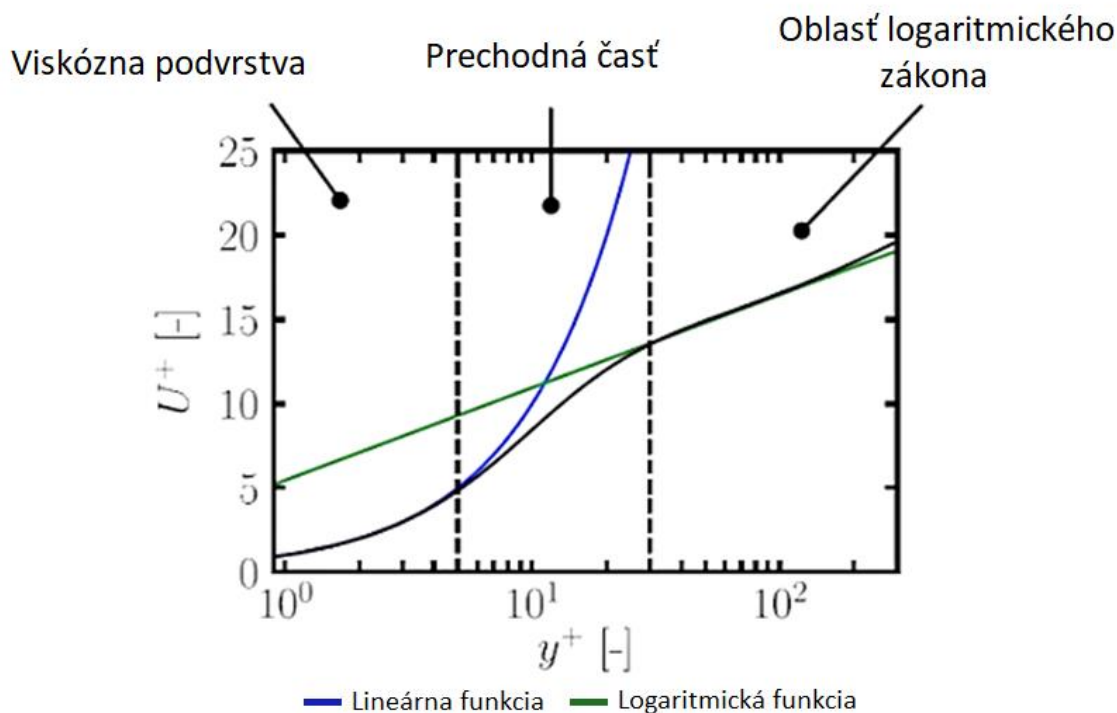
Rýchlosť prúdenia pri stene je nulová. So zvyšujúcou sa vzdialenosťou vidíme nelineárny nárast rýchlosti. Pri stene je gradient rýchlosti najväčší. Steny sú zdrojom vytvárania vírov a pri úlohách prúdenia si vyžadujú špeciálnu pozornosť. Čo najpresnejšie určenie parametrov prúdenia a turbulencií v hraničnej vrstve steny je kľúčové.

Stenové funkcie sú empirické vzťahy ktoré sa snažia napodobniť pozorované vlastnosti prúdenia pri stene. Oblasť hraničnej vrstvy môže byť rozdelená na tri podvrstvy. V každej z nich má prúdenie iné charakteristiky a môže byť modelované použitím iných prístupov: [28]

- Viskózna podvrstva- Vo vrstve prúdu v kontakte so stenou je dominantný viskózný efekt a prúdenie je skoro laminárne. Turbulentné vplyvy sú zanedbateľné. Priemerná rýchlosť prúdenia závisí od hustoty, viskozity, vzdialenosti od steny a od šmykového napätia.
- Oblasť logaritmickeho zákona- uplatňujú sa tu viskózne a turbulentné vplyvy
- Prechodná oblasť- oblasť medzi viskóznou podvrstvou a oblasťou logaritmickeho zákona.

Čierna čiara v obr. 42 predstavuje vypočítané správanie prúdenia pri stene. Zelená a modrá čiara označujú funkcie, ktoré najlepšie aproximujú k pôvodnej funkcii v danej oblasti. Profil v grafe je rozdelený na tri oblasti. Pre hodnoty y^+ menšie ako 5, v ľavej časti grafu, vidíme že modrá funkcia najlepšie odpovedá profilu. Pre hodnoty y^+ väčšie ako 30 odpovedá profilu najlepšie zelená priamka. [27]

Osa x v grafe je zobrazená v logaritmickej mierke, ale osa y je zobrazená v lineárnej mierke. Preto je zelená priamka v skutočnosti logaritmicke funkcia, ale modrá krivka v oblasti viskózne podvrstvy je v lineárna funkcia. Pre strednú, vyrovnávaciu oblasť nie je vhodná ani jedna z týchto aproximačných funkcií.



obr. 42 Bezrozmerná závislosť rýchlosti prúdenia a vzdialenosti od steny [29]

Matematické vyjadrenie týchto funkcií je: [27]

$$u^+ = y^+ \quad \text{pre } y^+ < 5 \quad (13)$$

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(E' y^+) \quad \text{pre } 30 < y^+ < 200 \quad (14)$$

Kde y^+ je bezrozmerná normálová vzdialenosť od steny, u^+ je bezrozmerná tangenciálna rýchlosť, κ je empirický koeficient ($\sim 0,42$) a E' je empirický koeficient (~ 9).

Dôvodom, prečo sa používajú bezrozmerné hodnoty y^+ a u^+ je ten, že takéto vyjadrenie ktoré zachytáva prúdenie v oblasti steny je univerzálnym vyjadrením, ktoré môže byť aplikované pre rôzne prúdenia, rôzne geometrie a rýchlosti.

$$y^+ = \frac{y u^*}{\nu} \quad (15)$$

$$u^+ = \frac{u}{u^*} \quad (16)$$

Kde y je normálová vzdialenosť od steny po stred bunky, u^* je referenčná rýchlosť, závislá od šmykového napätia a hustoty, ν je kinematická viskozita a u je zložka rýchlosti steny bunky rovnobežne so stenou.

Pre simuláciu bola vybraná funkcia *all y+ wall treatment*. Tento prístup sa odporúča použiť vždy, ak je dostupný, zvlášť v úlohách kde nie je možné dosiahnuť čisto vysoké alebo nízke hodnoty pre y^+ kvôli variabilnosti geometrie a rýchlostí. [27]

7.2 IMPLICITNÝ NESTABILNÝ MODEL

Výberom vhodného časového modelu je možné kontrolovať iterácie a kroky výpočtu. Star CCM+ ponúka niekoľko možností modelov:

- Stabilný
- Explicitný nestabilný
- Implicitný nestabilný
- PISO nestabilný
- Harmonický

Pri implicitnom nestabilnom prístupe každý fyzický časový krok zahŕňa určitý počet vnútorných iterácií, aby riešenie konvergovalo pre daný čas. Môže sa určiť veľkosť časového kroku. Tento model je jediný dostupný na modelovanie odtrhnutia prúdenia. Rozhodnutie medzi týmto modelom a jeho alternatívou- explicitným nestabilným modelom je na tom, aký časový rámec výpočtu nás zaujíma. Prednastavený časový krok je 0,001 s. [27]

7.3 MODEL TURBULENCIE A RANS

Dynamika prúdenia sa dá rozdeliť na dva princípy prúdenia- laminárne a turbulentné. Laminárny tok je veľmi jednoduchý, predvídateľný a pre aplikácie v skutočnom svete má tendenciu byť menej užitočný. Na druhej strane, turbulentný tok môže byť použitý na modelovanie prakticky akejkoľvek situácie toku v reálnom svete. Vyznačuje sa veľmi chaotickým a nepredvídateľným tokom. Modelovanie turbulentného toku je preto podstatne komplikovanejšie ako laminárne prúdenie. [24] [26]

Rovnice, ktoré popisujú prúdenie vo všetkej komplexnosti sa nazývajú Navier-Stokesove rovnice. Získanie priameho numerického riešenia Navier-Stokesovej rovnice zatiaľ nie je možné. Aby sa dospelo k uspokojivému riešeniu, používa sa časovo spriemerovaná Navier-Stokesova rovnica (RANS- Reynolds-Averaged Navier-Stokes), ktorá spolu s turbulentným modelom vyrieši problém. [24][26]

Hlavnou myšlienkou tejto úpravy je, že každá premenná vstupujúca do výpočtu sa môže rozdeliť na priemernú hodnotu a meniacu sa (flukтуаčnú) hodnotu.

$$\theta = \bar{\theta} + \theta' \quad (17)$$

Pričom prvý člen môže reprezentovať rýchlosť, tlak alebo energiu v danom čase, druhý člen predstavuje priemernú hodnotu a tretí predstavuje premenlivú odchýlku od priemernej hodnoty. [27]

7.4 K – OMEGA SST MODEL

Model turbulencie $K - \omega$ je model s dvoch rovníc, ktorý rieši transportné (prenosové) rovnice pre turbulentnú kinetickú energiu „ k “ a mieru rozptylu „ ω “ - disipačnú rýchlosť na jednotku turbulentnej kinetickej energie.

Jednou z uvádzaných výhod modelu K-Omega oproti modelu K-Epsilon je jeho lepšie charakterizovanie hraničných vrstiev pri nepriaznivom tlakovom gradiente. Snáď najvýznamnejšou výhodou je však to, že sa môže aplikovať v celej hraničnej vrstve, vrátane viskózne dominantnej oblasti, bez ďalších úprav. [27]

Model K – omega obsahuje prechodnú funkciu, ktorá ošetruje rozdiely pri prúdení ďaleko od steny a v jej blízkosti. Tento prístup spojil modely K- Epsilon, využívaný pre prúdenie ďaleko v poli výpočtu s modelom K- omega pre oblasť pri stene. [27]

Model K – omega SST (shear stress transport- prenos šmykového napätia) je nadstavba pôvodných modelov, ktorých nevýhodou bolo, že nadhodnocovali hodnotu šmykového napätia pri stene. SST model obsahuje limiter viskozity, ktorý zníži hodnotu viskozity v blízkosti steny kde je zväčšené šmykové napätie. To spôsobí väčšiu pravdepodobnosť vzniku odtrhnutého prúdenia. SST model sa lepšie zhodoval s experimentami ktoré sa sústredili na mierne odtrhnuté prúdenia, napríklad pri krídlach a pri skúmaní oddelenia prúdenia pri hladkých povrchoch. [27] [30]

7.5 GRADIENTS MODEL REFERENCE

Popri premenlivých hodnotách sú vo výpočte vyžadované aj premenlivé gradienty zadávané pre stredy buniek. Gradienty sa používajú napríklad na výpočet hodnôt v stene bunky a výpočet tlakových gradientov pre prepojenie tlaku a rýchlosti. [27]

Pre simuláciu bola vybraná hybridná metóda *Gauss- Metóda najmenších štvorcov*, ktorá je aj programom predurčená. Jej výhoda oproti metóde *Green-Gauss*, ktorú tiež program ponúka, je vo vyššej presnosti.

Vybraná hybridná metóda obsahuje dva matematické postupy- Green-Gaussovu metódu a metódu najmenších štvorcov. Pomocou umelo vytvorenej prechodnej funkcie β , ktorá nadobúda hodnoty $\langle 0 ; 1 \rangle$ sa určuje, aká metóda bude zvolená pre jednotlivé bunky. [27]

pre $\beta = 1$ sa použije metóda najmenších štvorcov (LSQ)

pre $\beta = 0$ sa použije Green – Gaussova metóda (GG)

pre $\beta = \langle 0 ; 1 \rangle$ $grad(\theta) = (\beta)LSQgrad(\theta) + (1 - \beta)GGgrad(\theta)$

Kde $LSQgrad(\theta)$ je príslušný diel gradientu metódy najmenších štvorcov, $GGgrad(\theta)$ je príslušný diel gradientu Gaussovej metódy a $grad(\theta)$ je výsledný gradient.

7.6 COUPLED FLOW- SPOJENÉ PRÚDENIE

Model spojeného prúdenia rieši rovnice pre zachovanie hmotnosti, hybnosti a energie súčasne. Jednou z výhod takejto formulácie je stabilita a robustnosť pri riešení úloh prúdenia s výraznými zdrojmi rotácií. Ďalšou z výhod spojeného riešenia je, že miera konvergencie sa nezhorší, pri zhustení siete. [27]

7.7 CELL QUALITY REMEDIATION

Tento model upravujúci kvalitu buniek pomáha získať riešenia na sieťach nízkej kvality, tým že identifikuje bunky nízkej kvality pomocou súboru preddefinovaných kritérií, ako je uhol bezchybnosti prekračujúci určitú úroveň. Po označení týchto buniek a susediacich buniek, gradienty v týchto bunkách upravia tak, aby sa zlepšila odolnosť výpočtu. [27]

Všeobecne je účinok zmeny kvality buniek obmedzený na bezprostredné okolie degenerovaných buniek, takže vplyv na celkovú presnosť riešenia je minimálny. Vedľajším účinkom je však to, že parametre ktoré určia nedostatočné bunky sa prepočítavajú vždy pri zmene siete, preto je niekedy použitie tohto modelu výpočtovo náročné. [27]

7.8 EXACT WALL DISTANCE

Vzdialenosť od steny je parameter, ktorý reprezentuje vzťah medzi stredom bunky k najbližšej stene bunky pre ktorú platí podmienka bez skluzu. V programe Star CCM+ sú dostupné dva modely:

- Exact Wall Distance- tento model robí projekciou v reálnom priestore presný výpočet vzdialenosti
- PDE Wall Distance- tento model tvorí približný odhad ktorý je založený na parciálnych diferenciálnych rovniciach.

Prvý zmieneny model je programom prednastavený. PDE prístup je rýchlejší, ale riešenie pre exaktnú vzdialenosť steny je presnejšie. Tento krok program vykonáva pri inicializácii výpočtu. Pre výpočet v tejto práci bol zvolený model exaktnej vzdialenosti steny. [27]

7.9 KONŠTANTNÁ HUSTOTA

Model konštantnej hustoty je vhodný pre nestlačiteľné plyny alebo tekutiny. Táto možnosť je jediná vhodná voľba pre viskózne prúdenie

7.10 MATERIÁL VÝPOČTOVÉHO PRIESTORU

Ako materiál bol samozrejme nastavený vzduch, ktorého vlastnosti sú popísané v tabuľke.

Tabuľka 1 Nastavenie plynného média

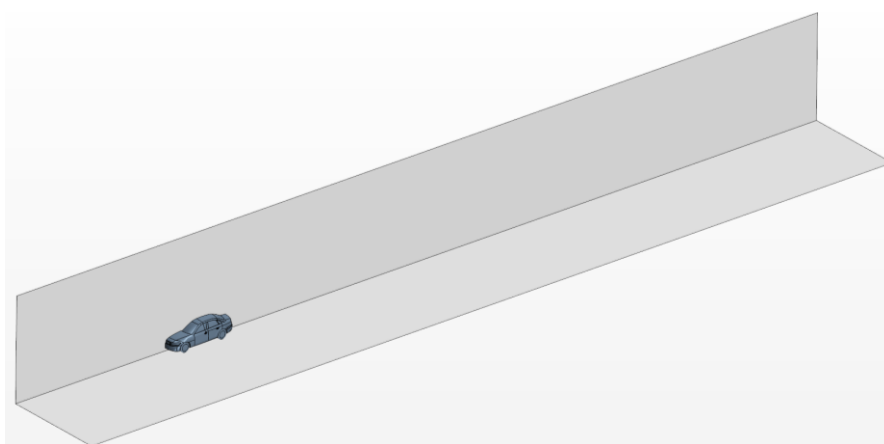
Hustota	1,184 kg·m ⁻³
Dynamická viskozita	1,855 * 10 ⁻⁵ Pa·s
Rýchlosť plynu	140 km·h ⁻¹
Prvotná hodnota tlaku	0 Pa
Tlak	101 325 Pa

8 SIMULÁCIE VOZIDIEL V ZÁSTUPE

8.1 TUNEL

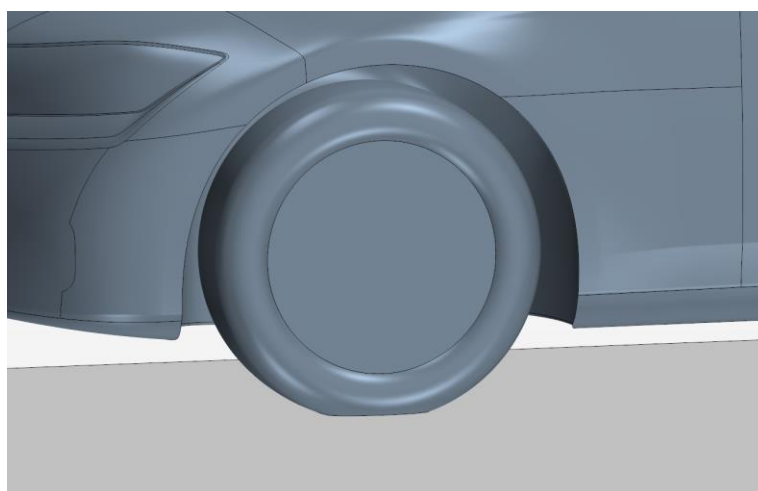
Vozidlo je umiestnené v počiatku súradnicového systému, tunel začína 11 m pred vozidlom a má dĺžku 60 m. Takéto rozmery majú zaistiť, aby cez vstupnú plochu na prednej stene tunela dopadal na vozidlo ustálený prúd. Tunel je vysoký 7 metrov a široký 7 metrov. Bočná stena tunelu pretína pozdĺžnu osu vozidla a celý výpočet prebieha s predpokladom symetrie. Na obrázku obr. 43 sú znázornené rozmery tunelu a umiestnenie prvého vozidla.

Pri voľbe rozmerov tunela je nutné overiť hodnoty blokácie tunela, ktoré by nemali presiahnuť 5 %. Jedná sa o pomer priemetu plochy vozidla ktorú zaberá v smere prúdenia, k ploche tunelu v rovnakom smere. [1] Pre takto zvolené hodnoty je blokácia tunela 2 %, to znamená že zvolené rozmery tunela sú adekvátne.



obr. 43 Umiestnenie vozidla v tuneli

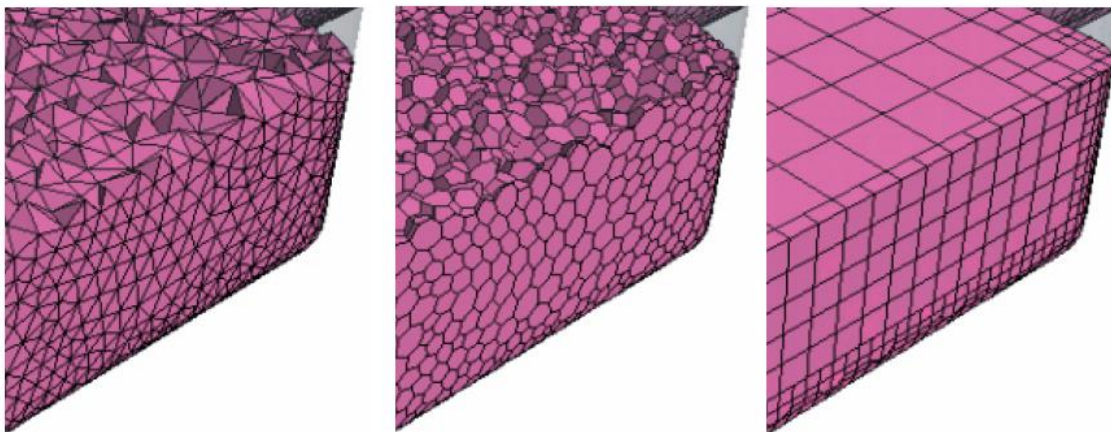
Vozidlo je umiestnené na vozovke tunela s posuvom v ose -Z o 30 mm. Je to z toho dôvodu, aby sa simuloval reálny zdeformovaný tvar pneumatiky pri dotyku s vozovkou. Taktiež sa zamedzí situácií kedy sa geometria vozidla a tunelu pretína v bode alebo čiare, pričom takáto geometria by mohla komplikovať výpočet v okolí.



obr. 44 Pneumatika posunutá pod úroveň vozovky o 30 mm

8.2 VÝPOČTOVÁ SIETĚ

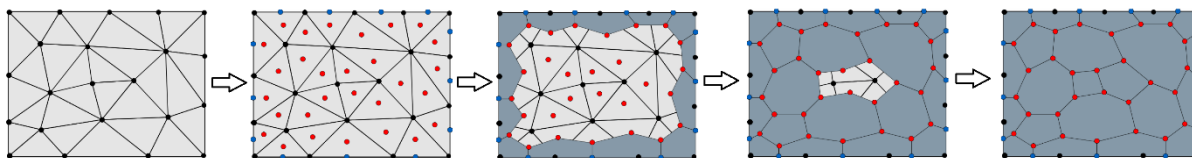
Prvým krokom pri vytvorení siete je vytvorenie povrchovej siete, od ktorej sa následne odvíja objemová sieť. Star CCM+ ponúka nástroj *surface wrapper*, pre prípady kedy vložená geometria je zlej kvality, s pretínajúcimi sa alebo nenadväzujúcimi plochami. Táto operácia vytvorí uzavretý (nepriepustný) povrch. *Surface remesher* pracuje s kvalitnou geometriou, ktorú rozloží na trojuholníkové plochy, ako prípravu na objemovú sieť. Na obr. 45 sú znázornené tri prvky pre objemovú sieť, ktoré ponúka program Star CCM+. [27]



obr. 45 Zľava - Tetrahedrálňa sieť, Polyhedrálňa sieť, Hexahedrálňa sieť [27]

Tetrahedrálňa sieť- Ponúka efektívne a jednoduché riešenia pre komplexné siete. Z troch ponúkaných buniek je tetrahedrálňa sieť najrýchlejšia a používa najmenšie množstvo pamäte. [27]

Polyhedrálňa sieť je relatívne nenáročná pri vytváraní a ponúka vyváženú sieť aj pre komplexné objemy. Obsahuje asi 5 krát menej buniek ako tetrahedrálňa sieť. Kvalita sietí z oboch prvkov je však vysoko závislá od kvality spracovania povrchovej siete. Proces vytvorenia polyhedrálnej siete spočíva vo využití tetrahedrálnej siete ktorá sa vytvára ako súčasť procesu. Postup vytvárania siete je zobrazený na obrázku nižšie. Na začiatku je vygenerovaná tetrahedrálňa sieť. Proces dualizácie označí stredy buniek (červené body) a stredy hrán na okrajových bunkách (modré body). Vytvorí sa polyhedrálne bunky začínajúc od okrajov, postupujúc do priestoru. [27]

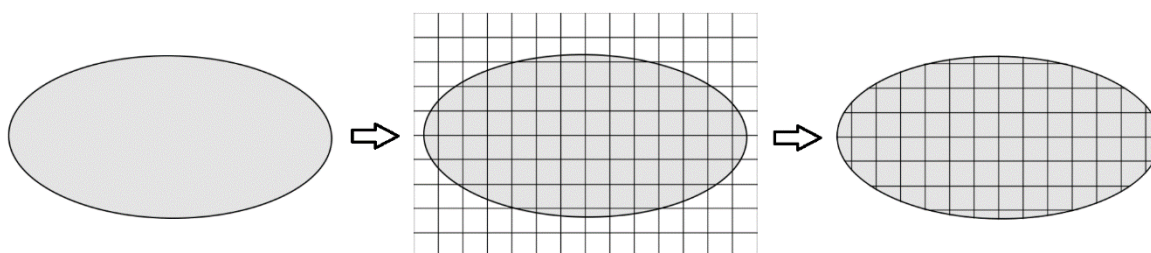


obr. 46 Proces vytvorenia polyhedrálnej siete z tetrahedrálnej siete [27]

Hexahedrálňa sieť je veľmi spoľahlivý a robustný spôsob ako vytvoriť kvalitnú sieť pre jednoduché, aj komplexné objemy. Poskytuje dobrý kompromis medzi komplexnosťou siete a náročnosťou na výpočet. Táto sieť kombinuje niekoľko, pre používateľa pozitívnych charakteristík. Táto sieť obsahuje dominantne hexahedrálňa sieť s minimálnym počtom

šikmých plôch, zjemnenie siete má nadväznosť na hodnoty ktoré zadáva a kontroluje užívateľ, je nezávislá od kvality povrchovej siete, môže byť zarovnané so súradnicovým systémom ktorý si zvolí užívateľ. [27] Pre tieto dôvody bola sieť zvolená na tento výpočet.

Na obrázku obr. 47 je schematicky znázornený princíp vytvárania siete. Objem je rozdelený sieťou a výsledné bunky sú prevažne hexahedrálne. Bunky na okrajoch objemu sú polyhedrálne, ale dajú sa vlastne popísať ako zrezané hexahedrálne bunky. [27]



obr. 47 Proces vytvorenia hexahedrálnej siete [27]

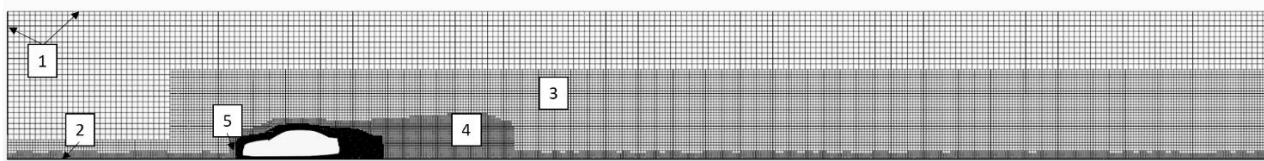
8.3 VŠEOBECNÉ NASTAVENIE SIETE

Tabuľka 2 Najdôležitejšie hodnoty z nastavenia výpočtu

Všeobecné	Base size	100 mm
Povrchová sieť	Target surface size	16 mm
	Minimum surface size	2 mm
	Surface growth rate	1,6
Objemová sieť	Maximum cell size	256 mm
Prizmatické vrstvy	počet	6
	Výška prvej	1,4 mm
	Celková výška	16 mm

8.4 LOKÁLNE NASTAVENIA SIETE

Vo výpočtovom priestore je nutné zjemniť sieť na miestach záujmu- v okolí vozidla, v oblasti úplavu za vozidlom, v dostatočnej vzdialenosti pred vozidlom, alebo v okolí kolies a vozovky. Takto upravený tunel je na obr. 48.



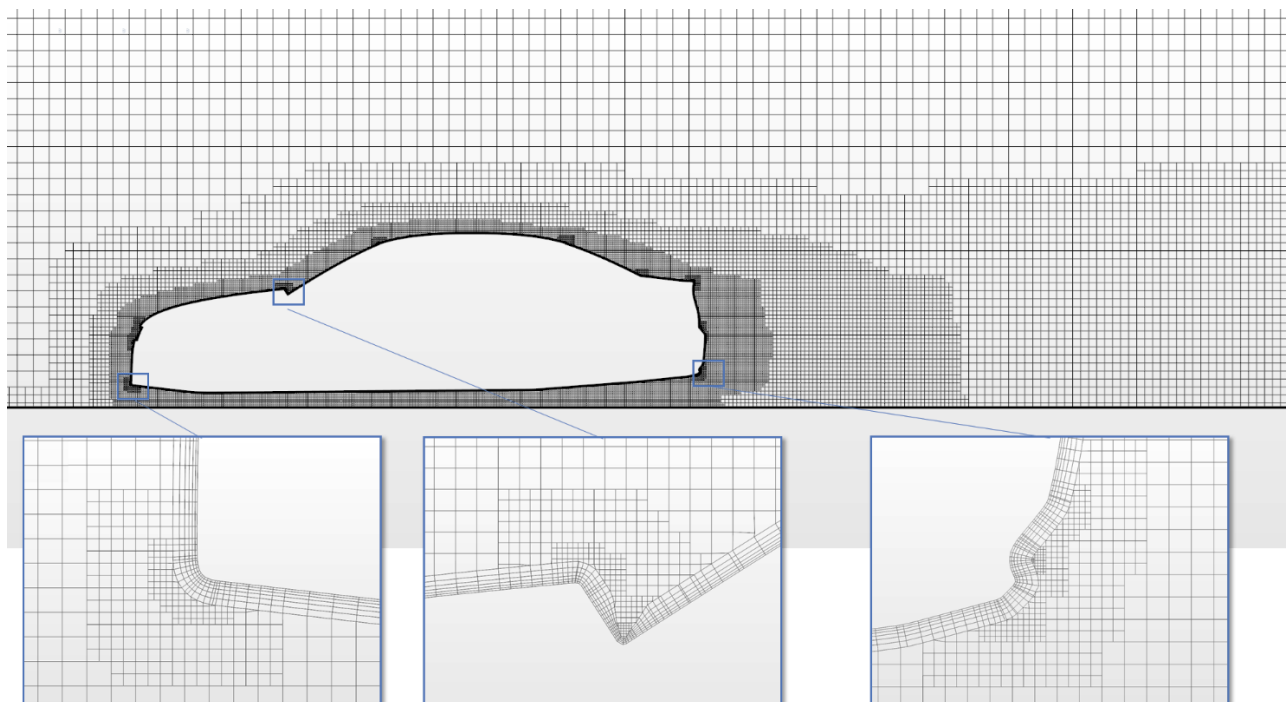
obr. 48 Zjemnenie siete

Pozícia 1- steny s funkciou *surface control*. Znamená to, že sa na týchto stenách nevytvorili zjemňujúce prizmatické vrstvy. Pozícia 2 označuje funkciu *target surface size*, ktorá zjemní sieť tak, aby bolo správne zachytené prúdenie popri vozovke. Rovnaká funkcia je zvolená aj v okolí kôl, pretože pri ich nastavenej rotácii vznikajú v okolí pneumatík a podbehov prúdenia ktoré jemná sieť lepšie zachytí. Pozícia 3 označuje ďalšie zjemnenie siete tvaru kvádra s dĺžkou 52 m. Pozície 4 a 5 označujú zjemnenie siete ktoré kopíruje vozidlo, viacnásobným použitím funkcie *wake refinement*.

Tabuľka 3 Zvolené hodnoty pre lokálne nastavenie siete

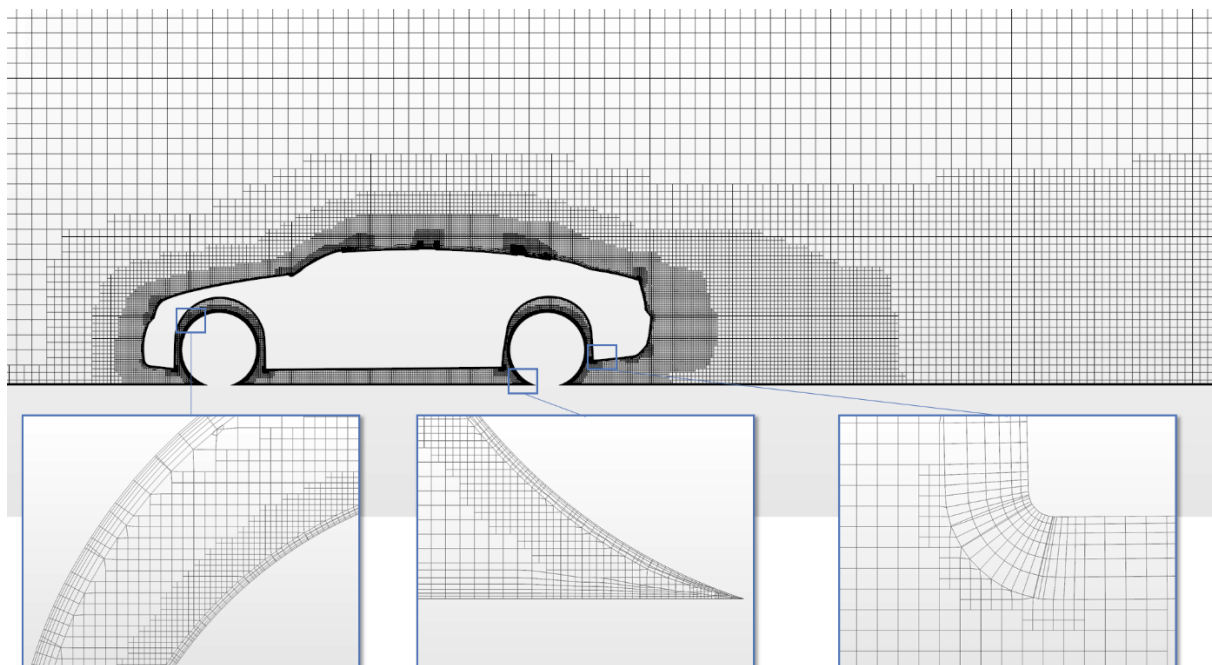
Vložený tunel [3]	Volumetric control	128 mm
Vozovka	Target surface size	64 mm
Kolesá	Počet prizmatických vrstiev	4
	Výška prvej prizmatickej vrstvy	0,8 mm
	Celková výška	6 mm
Wake refinement	Vzdialenosť 0,5 m, osa +X	16 mm
	Vzdialenosť 0,15 m, osa -X	16 mm
	Vzdialenosť 2 m, osa +X	32 mm
	Vzdialenosť 8 m, osa +X	64 mm
	Vzdialenosť 0,5 m, osa -Z	16 mm

Na obr. 49 sú vybrané detaily siete z povrchu vozidla v rovine symetrie. Na každom detaile je možné vidieť prizmatické vrstvy a zhustenie siete na miestach s komplexnejším tvarom karosérie.



obr. 49 Detaily siete v ose symetrie vozidla

Na obr. 50 sú zobrazené detaily v rovine pretínajúcej koleso. Sú tu zobrazené príklady sieťovania oblasti medzi kolesom a vozidlom, alebo detail styku kolesa a vozovky.



obr. 50 Detaily siete v ose kola

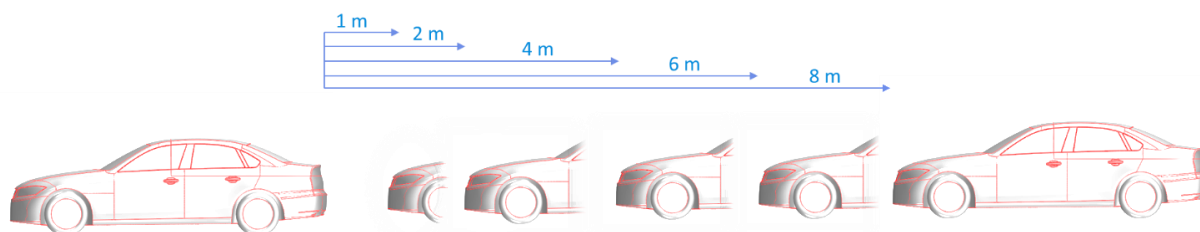
8.5 NASTAVENIA VÝPOČTU

Tabuľka 4 Zvolené okrajové hodnoty pre jednotlivé plochy geometrie

Tlak	Reference pressure	101325 Pa
Tunel	Vstup (velocity inlet)	140 km·h ⁻¹
	Vozovka (tangential velocity)	140 km·h ⁻¹
	Výstup	0 Pa
Kolesá	Relatívna rýchlosť (relative rotation)	129,63 rad·s ⁻¹

9 VYHODNOTENIE KOEFICIENTOV ODPORU

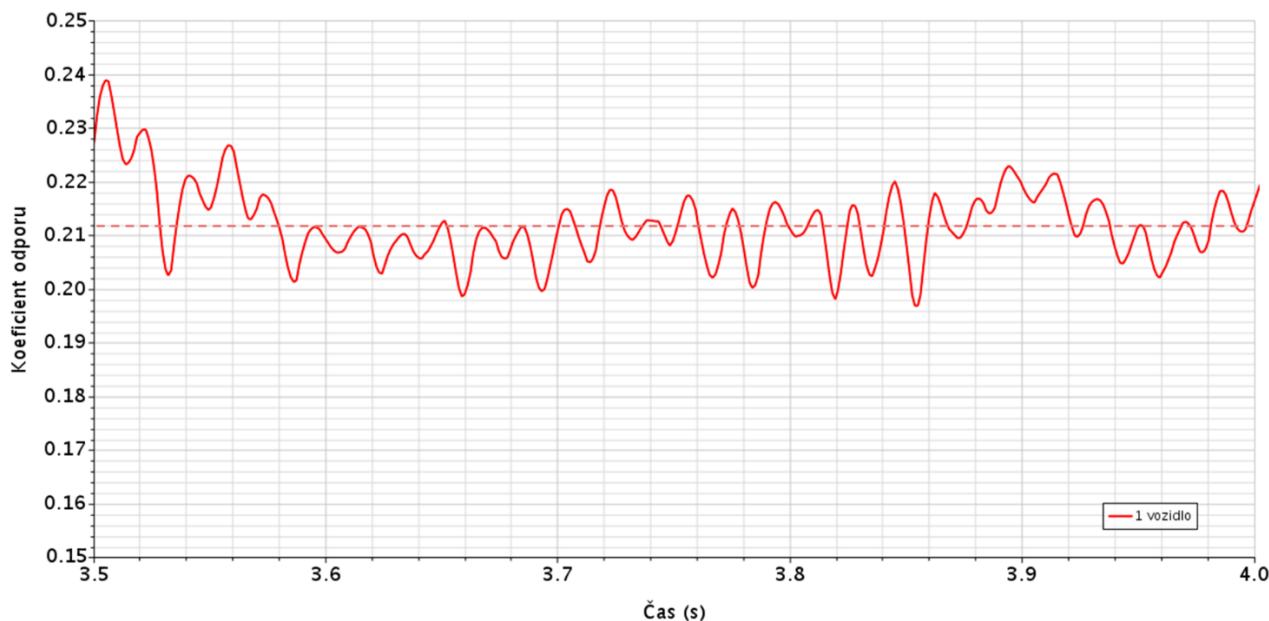
V nasledujúcej časti sú zobrazené koeficienty odporu vozidiel vo všetkých konfiguráciách. Prvý výpočet a graf 1 zobrazuje prípad kedy je v tuneli umiestnené iba jedno vozidlo. Tento výpočet sa bude používať ako referenčná hodnota pre všetky porovnávania. Ďalšie konfigurácie sú vytvorené pre vozidlá, medzi ktorými je medzera 1 m, 2 m, 4 m, 6 m, 8 m. Celkovo sa tak vytvorilo šesť výpočtov, ktorých výsledky sú zobrazené nižšie.



obr. 51 Konfigurácie výpočtu podľa medzier medzi vozidlami

Pre výber nasledujúcich dát boli vybrané tie časové úseky kde sa dal vysledovať pokles reziduálov. Sledovanie reziduálov je užitočné pri posúdení konvergencie riešenia a zároveň sa jedná o vyhodnotenie, s akou presnosťou sa vypočítalo riešenie pre jednotlivé bunky. Následne boli hodnoty priemerované.

9.1 JEDNO VOZIDLO



graf 1 Koeficient odporu jedného vozidla

Priemerný koeficient odporu jedného vozidla

$0,2121 \pm 0,0096$

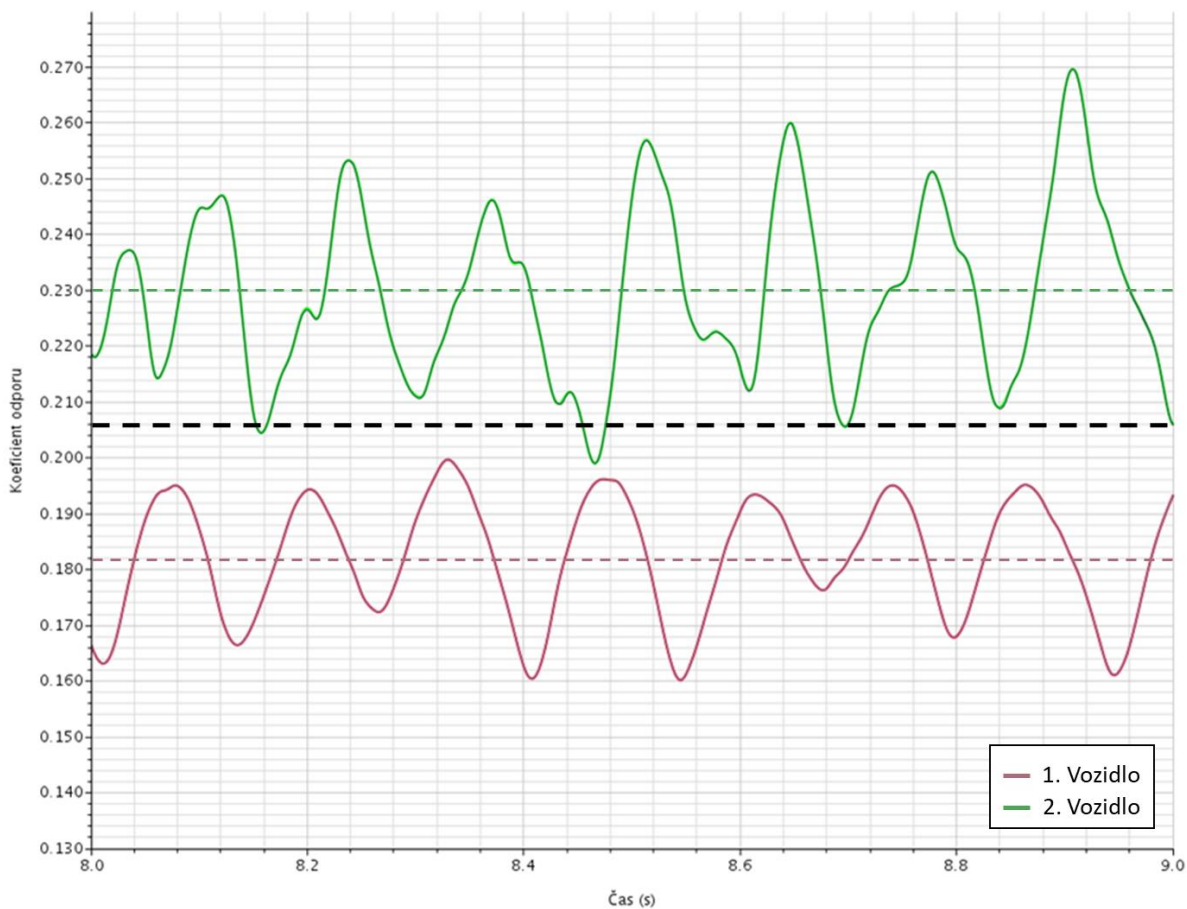
9.2 VZDIALENOSŤ VOZIDIEL 1 M



graf 2 Koefficient odporu vozidiel vo vzdialenosti 1 m

Výpočet pre vozidlá vzdialené jeden meter bol zastavený, pretože riešenie nekonvergovalo. Možné dôvody tejto situácie a prípadné návrhy na budúce vylepšenia výpočtu sú popísané v závere práce. Hodnoty z tejto konfigurácie nebudú uvažované v nasledujúcom spracovávaní dát, pretože sa nedajú považovať za úplne alebo presné.

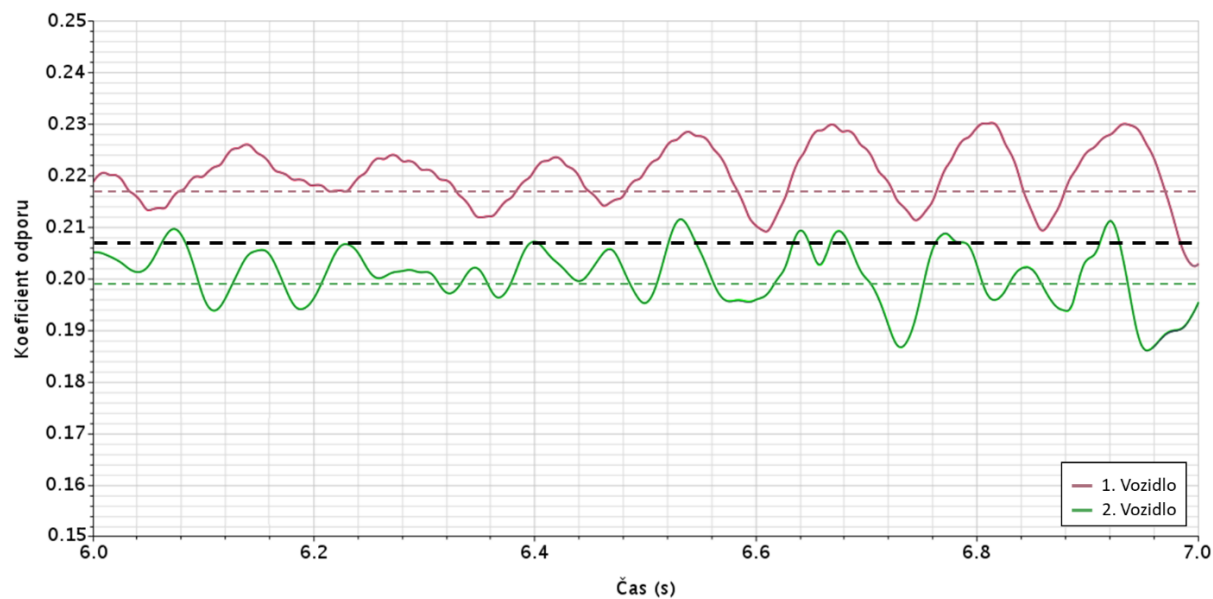
9.3 VZDIALENOSŤ VOZIDIEL 2 M



graf 3 Koefficient odporu vozidiel vo vzdialenosti 2 m

Priemerný koefficient odporu prvého vozidla	0,1818 ± 0,0106
Priemerný koefficient odporu druhého vozidla	0,2300 ± 0,0156
Priemerný koefficient odporu sústavy vozidiel	0,2059 ± 0,0275

9.4 VZDIALENOSŤ VOZIDIEL 4 M



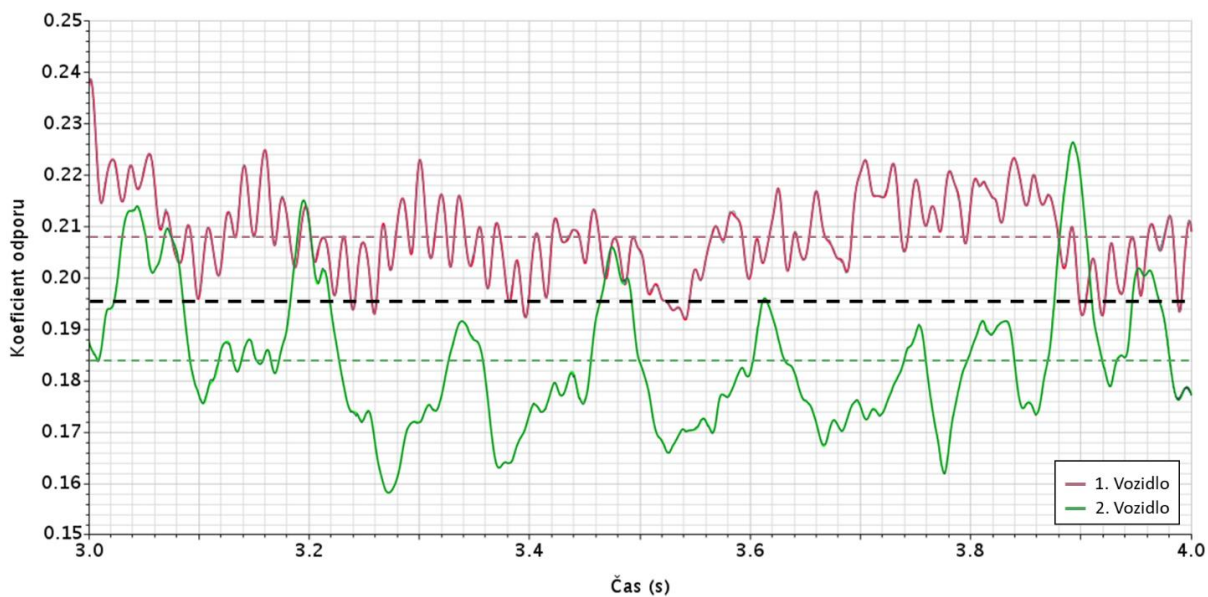
graf 4 Koefficient odporu vozidiel vo vzdialenosti 4 m

Priemerný koefficient odporu prvého vozidla	0,2174 ± 0,0075
---	-----------------

Priemerný koefficient odporu druhého vozidla	0,1974 ± 0,0067
--	-----------------

Priemerný koefficient odporu sústavy vozidiel	0,2074 ± 0,0122
---	-----------------

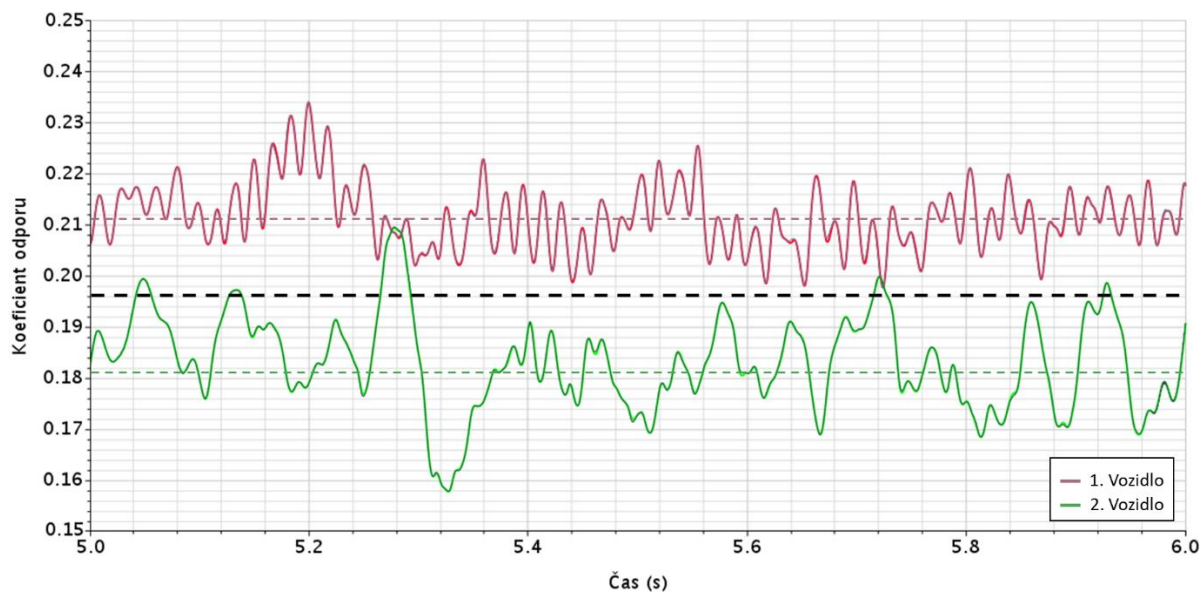
9.5 VZDIALENOSŤ VOZIDIEL 6 M



graf 5 Koefficient odporu vozidiel vo vzdialenosti 6 m

Priemerný koefficient odporu prvého vozidla	$0,2079 \pm 0,0075$
Priemerný koefficient odporu druhého vozidla	$0,1838 \pm 0,0125$
Priemerný koefficient odporu sústavy vozidiel	$0,1959 \pm 0,0159$

9.6 VZDIALENOSŤ VOZIDIEL 8M



graf 6 Koefficient odporu vozidiel vo vzdialenosti 8 m

Priemerný koefficient odporu prvého vozidla 0,2114 ± 0,0058

Priemerný koefficient odporu druhého vozidla 0,1818 ± 0,0086

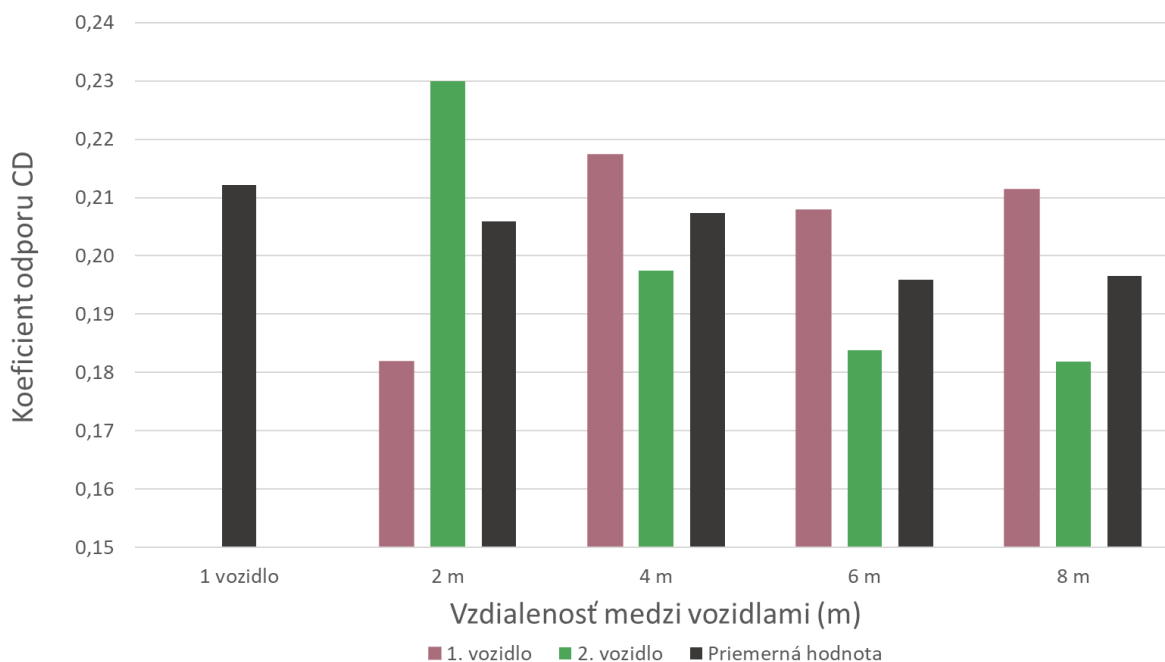
Priemerný koefficient odporu sústavy vozidiel 0,1966 ± 0,0165

9.7 POROVNANIE KOEFICIENTOV ODPOROV

Tabuľka 5 Súhrn hodnôt koeficientov odporov

Vzdialenosť	1. vozidlo	2. vozidlo	Priemer
1 vozidlo	0,2121		
1m	-	-	-
2m	0,1818	0,2300	0,2059
4m	0,2174	0,1974	0,2074
6m	0,2079	0,1838	0,1959
8m	0,2114	0,1818	0,1966

Tabuľka 5 je vyjadrená aj v grafe 7. Ako referenčná hodnota pre ďalšie porovnávanie sa bude vždy používať koeficient odporu samostatného vozidla (prvý stĺpec). Už pri prvom pohľade na tmavé stĺpce v sérii (jedno vozidlo a priemerné hodnoty) je vidieť, že koeficient odporu pre každú konfiguráciu je nižší ako koeficient odporu jedného vozidla. Je to výsledok, ktorý bol očakávaný na základe informácií z kapitol 3 a 4. Tieto rozdiely však nie sú príliš výrazné, zvlášť pri medzere 2 m a 4 m. V týchto prípadoch sa hodnoty dajú považovať za skoro zhodné, keďže úspora na koeficiente odporu je v oboch prípadoch menšia ako 3 %. Výraznejší rozdiel v hodnotách sa javí až od vzdialenosti 6 m.



graf 7 Súhrn hodnôt koeficientov odporu všetkých konfigurácií

Pri medzere dvoch metrov sú rozdiely medzi koeficientmi odporu výrazne odlišné ako v ostatných troch prípadoch. Prvé vozidlo ukazuje o viac ako 20 % nižší koeficient odporu ako druhé. Výrazný rozdiel koeficientov odporu naznačoval aj nedokončený výpočet pre vzdialenosť 1 m. Takéto údaje sa zhodujú s experimentom, popísaným v kapitole 4.4, ktoré

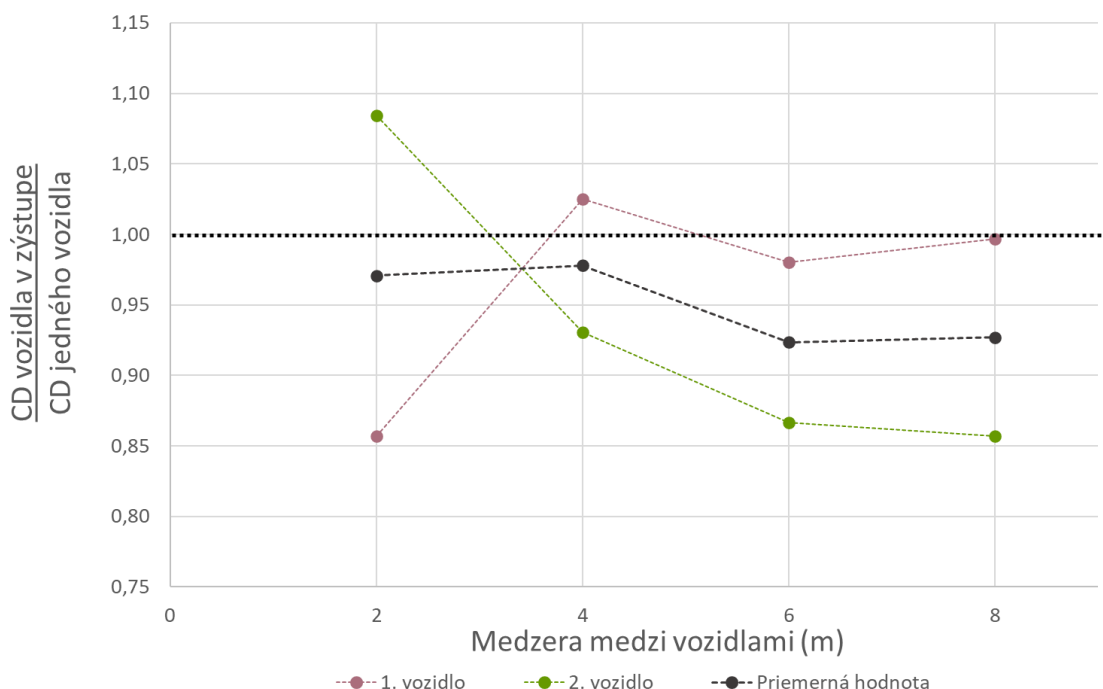
taktiež ukázali že pri extrémne malých vzdialenostiach medzi vozidlami bude mať prvé vozidlo nižší koeficient odporu, ako druhé.

Najvýhodnejšia vzdialenosť pre najvyššiu úsporu energie prvého vozidla je v našom prípade 2 m. Dá sa predpokladať, že aj medzera 1 m by bola podobne efektívna aj keď to nie je podložené dokončeným výpočtom, ale nasvedčuje tomu experiment popísaný v kapitole 4.

Druhému vozidlu klesá koeficient odporu so zvyšujúcou sa vzdialenosťou, avšak menší koeficient odporu ako samostatné vozidlo dosiahne až pri vzdialenosti 4 m. (Skutočná vzdialenosť sa bude pohybovať v intervale medzi 2 až 4 m, ale presné určenie by vyžadovalo výpočet množstva konfigurácií s malými rozdielmi v medzerách, čo z časových dôvodov nebolo uskutočniteľné.) Avšak, dá sa konštatovať že zaradenie druhého vozidla do zástupu vo vzdialenosti minimálne 4 m mu prinesie úsporu na koeficiente odporu aspoň 7 %.

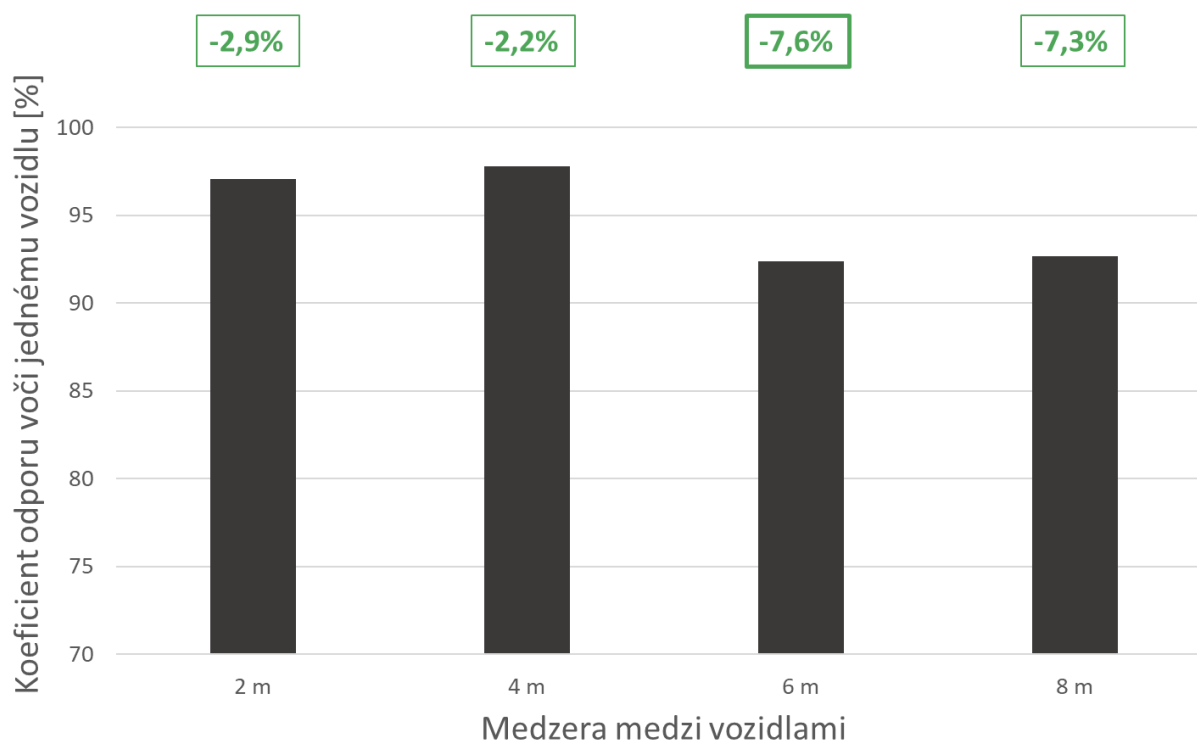
Druhému vozidlu samozrejme nebude koeficient odporu klesať donekonečna, ale v určitej vzdialenosti začne stúpať, až sa ustáli na hodnote pre samostatne idúce vozidlo. Stane sa tak v momente, kedy vplyv úplavu za prvým vozidlom úplne vymizne a okolie sa ustáli tak, že vozidlo bude znova rozrážať vzduch s nulovou rýchlosťou a atmosférickým tlakom. (Alebo vo výpočtových simuláciách je rýchlosť média rovná rýchlosti vozidla ktorú chceme simulovať.)

Nasledujúci graf 8 pre lepšiu názornosť zobrazuje hodnoty koeficientov odporu vozidiel v zástupe, v pomere ku koeficientu odporu samotného vozidla. Všetky údaje pod hodnotou 1 tak znamenajú zníženie koeficientu odporu skupiny voči stavu kedy sa vozidlo pohybuje samostatne.



graf 8 Pomerové koeficienty odporu k samostatnému vozidlu

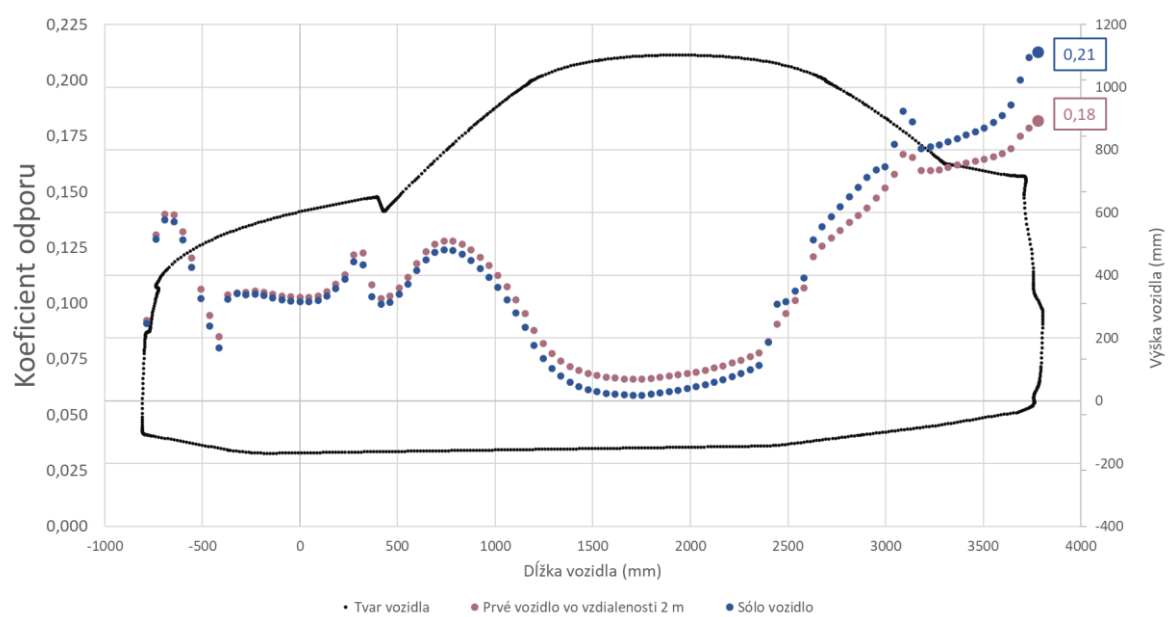
Graf 9 zobrazuje, o koľko percent sa zníži priemerný koeficient odporu skupiny v porovnaní so samostatným vozidlom. Pre rozostupy 2 m a 4 m sú úspory minimálne, až zanedbateľné. Najúspornejšia vzdialenosť medzi vozidlami je rozostup 6 m. Pri tomto rozostupe je aerodynamický odpor menší o 7,6 %. Je to taktiež prvá konfigurácia, kedy sa koeficienty oboch vozidiel dostanú pod úroveň samotného vozidla, čo znamená že pri takomto rozostupe nešetří jedno vozidlo na úkor druhého. Pri rozostupe 8 m je úspora 7,3 %. Môže sa predpokladať, že pre narastajúce vzdialenosti 10 m a 12 m by hodnoty postupne stúpali až by obe vozidlá dosiahli opäť hodnotu koeficientu odporu samostatného vozidla. Tieto simulácie však nebolo možné vykonať pre obmedzenia, ktoré boli spojené s výpočtovou a časovou náročnosťou úlohy.



graf 9 Percentuálne vyjadrenie zníženia koeficientu odporu

9.8 POROVNANIE KOEFICIENTOV POZDĹŽ VOZIDLA

Na grafe 10 sú zobrazené hodnoty koeficientu odporu tak, ako stúpa alebo klesá v závislosti na časti vozidla. Zobrazené dáta sa týkajú samostatne idúceho vozidla, a prvého vozidla v konfigurácii 2 m. V oblasti na začiatku vozidla a predných kolesách sú priebehy koeficientov rozdielne len minimálne, vozidlo v zástupe si sústavne udržuje mierne vyšší koeficient odporu až do bodu kedy sa strecha začína zvažovať k zadnému oknu. Takisto sa jedná o oblasť začiatku zadných kôl, asi na úrovni 2500 mm centra súradnicového systému vozidla. V tejto oblasti vidíme pokles koeficientu odporu prvého vozidla v zástupe a túto zníženú hodnotu si udržuje až ku koncu vozidla, čo prináša výsledný koeficient odporu 0,18. Je možné, že od tejto úrovne má na hodnotu vplyv aj prítomnosť zadného vozidla, ktoré môže ovplyvniť spôsob, ako sa odtrhne prúdenie za vozom a tak výrazne ovplyvňovať koeficient odporu predného vozidla.



graf 10 Porovnanie koeficientov odporov pre vozidlo v zástupe a samostatné vozidlo

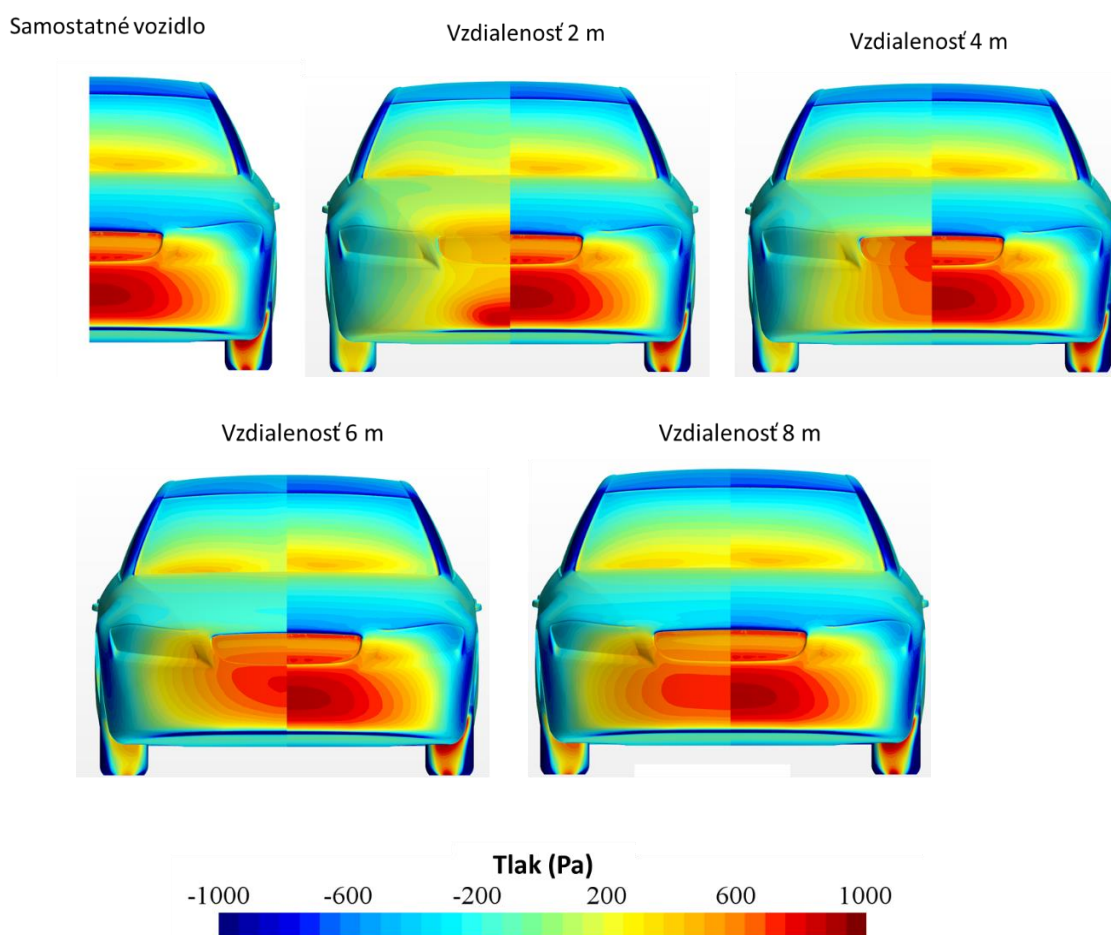
10 ROZLOŽENIE TLAKU A RÝCHLOSTI

10.1 TLAKOVÉ POLE

Na obr. 52 je vykreslené rozloženie tlaku v každej konfigurácii výpočtu. Na prednom vozidle (vždy pravá časť vozidla) nie sú výrazné zmeny pri žiadnej konfigurácii. To je očakávaný výsledok, pretože oblasť prúdenia vzduchu pred prvým vozidlom ostáva vždy nezmenená.

Na druhom vozidle (vždy vľavo) je možné vidieť zo začiatku prevládanie zelenej až oranžovej farby na prednej maske, čo podľa spektra rozloženia tlaku popisuje hodnoty v okolí atmosférického tlaku, až navýšenie tlaku o 600 Pa. So zväčšujúcou sa vzdialenosťou, ako sa zadné vozidlo vzdiaľuje od oblasti úplavu prvého vozidla, sa tlaky na prednej maske a skle menia. Hodnoty sa presúvajú k obom okrajom farebného spektra. Čoraz väčšiu plochu vozidla zaberajú hodnoty o 300 Pa až 800 Pa menšie ako atmosférický tlak, zároveň sa na prednej maske sústreďuje oblasť vysokého tlaku.

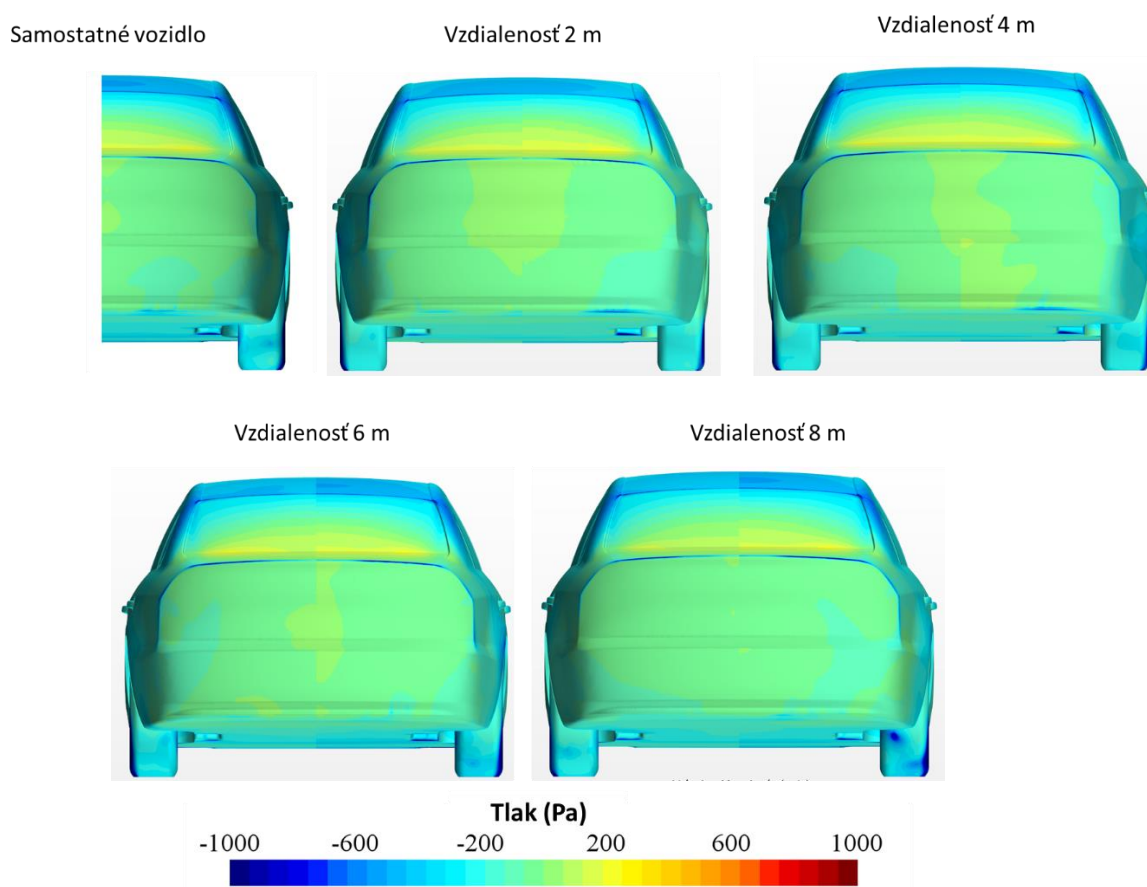
So zvyšujúcou vzdialenosťou sa rozloženie tlakov na prednej strane vozidiel začína podobať, s tým rozdielom, že zadné vozidlo nikdy nedosiahne tak extrémny nárast tlaku koncentrovaný v bode kde predná maska rozráža vzduch.



obr. 52 Rozloženie tlaku na vozidle, pravá polovica- prvé vozidlo, ľavá polovica- druhé vozidlo

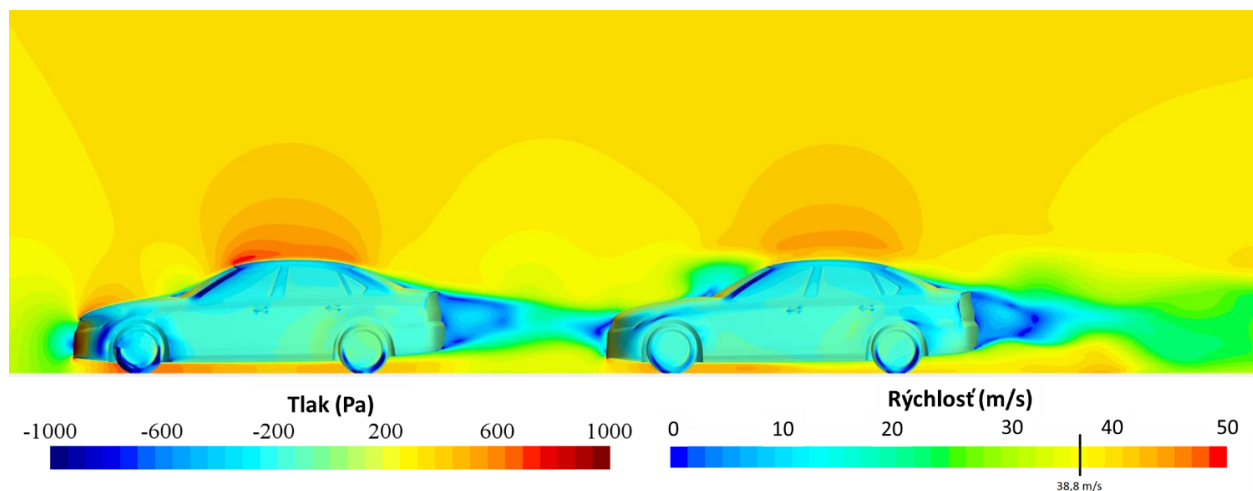
Rozloženie tlakov na obr. 53 na zadnej karosérii nie je dramaticky rozdielne naprieč konfiguráciami. V tomto prípade bolo predpokladané že rozloženie tlaku na zadnej karosérii zadného vozidla (vždy vľavo) bude prevažne zhodná, pretože v tejto oblasti už nie sú žiadne vplyvy ktoré by spôsobili rozdiely.

Na prednom vozidle (vždy vpravo) je vidieť mierne klesanie tlaku so zväčšujúcou sa vzdialenosťou. Hodnoty sa pohybujú vo vzdialenosti jedného metra o 200 Pa nad atmosférickým tlakom a pomaly klesajú so zvyšujúcou sa vzdialenosťou až k miernemu podtlaku. Tieto rozdiely môžu byť spôsobené tým, ako zadné vozidlo zasahuje do oblasti úplavu prvého vozidla.



obr. 53 Rozloženie tlaku na vozidle, pravá polovica- prvé vozidlo, ľavá polovica- druhé vozidlo

10.2 RÝCHLOSTNÉ POLE



obr. 54 Rýchlosť v okolí vozidiel so vzdialenosťou 1 m a 2 m

Na obr. 54 sú zobrazené tlaky na povrchu vozidla a rýchlosť vzduchu v okolí vozidiel. Na prednej maske vozidiel je možné vidieť oblasť vzduchu s nízkou rýchlosťou, blížiacou sa k nule. Je to zároveň oblasť vysokého tlaku, kde vozidlo tlačí vzduch dopredu. Jedným z dôvodov, prečo sa pri malých vzdialenostiach hodnoty obrátia a prvé vozidlo dosahuje paradoxne nižší koeficient odporu môže byť popri vplyvu na odtrhnutie úplavu aj skutočnosť, že zadné vozidlo pred sebou taktiež tlačí kapsu vzduchu ktorá má vyšší tlak, to ovplyvňuje úplav a znižuje rozdiely tlakov pred a za prvým vozidlom. Ako je vysvetlené v kapitole 3.3, práve výrazné rozdiely tlakov pred a za vozidlom je zdroj zvyšovania koeficientu odporu.

Na časti kolies na ktorých je nastavená rotácia a ktoré sú vystavené priamo náporu vetra je oblasť s vysokou rýchlosťou a nízkym tlakom na povrchu kolesa. Na prvom stĺpiku medzi čelným sklom a dverami je vidieť oblasť nízkeho tlaku. Je to obvyčajne oblasť kde sa prúdenie utrhuje a vytvoria sa víry. Podľa očakávaní, ponad strechu prúdi urýchlený vzduch a zvýšená rýchlosť vzduchu je viditeľná aj medzi podvozkom a vozovkou.

Práve táto oblasť môže spôsobovať výraznejšie odchýlky simulácie od skutočnosti. Ako bolo ukázané na obr. 39, v modeli je zvolený značne zjednodušený podvozok. Takto zvolená geometria môže výrazne ovplyvňovať rýchlosť prúdenia vzduchu medzi vozovkou a podvozkom. Toto prúdenie urýchleného vzduchu cez medzeru môže ovplyvniť schopnosť úplavu klesnúť. Tým by sa zmenila výška v ktorej predná maska zadného vozidla rozráža úplav a to ovplyvní rozloženie tlaku na kapote aj prednom skle.

Ďalší zdroj rozdielov v porovnaní s experimentálnym meraním môže pochádzať z využívania symetrie. Takéto zjednodušenie bude mať negatívny dopad na presnosť tvaru úplavu. Vo výpočte nie je zohľadnený fakt, že úplav sa netvorí symetricky ale čiastočne sa prelieva. Tvar víru za vozidlom ovplyvňujú prúdnice po celom priereze vozidla a stena symetrie môže výpočet až neúmerne zjednodušiť.

V prílohách sú zahrnuté tvary úplavu vo všetkých konfiguráciách a izoplochy ktoré znázorňujú tvar úplavu. Treba však zmieniť že jeden obrázok nemôže plne reprezentovať tvar úplavu, keďže sa jedná o premenlivý jav. Obrázky slúžia skôr na pozorovanie do akej vzdialenosti úplav zasahuje a aká je jeho interakcia s druhým vozidlom.

11 PREPOČET NA SPOTREBU PALIVA

Nasledujúca kapitola popisuje postup, akým by sa dala vyjadriť úspora paliva, ak sú známe jazdné odpory. Keďže vozidlo vo výpočte reálne neexistuje, mnoho premenných, ktoré vstupujú do výpočtu boli zvolené na základe podobnosti s inými vozidlami podobnej váhovej a výkonnostnej kategórie. Preto aj výsledky tejto kapitoly by sa mali považovať za ilustračné a účelové pre tento daný postup výpočtu.

Jazdné odpory sú sily ktoré vozidlo prekonáva pri pohybe. Celkový odpor ktorý vozidlo prekonáva pri nepravidelnom pohybe dopredu je súčet odporu vzduchu, odporu valenia, odporu pri stúpaní a odporu pri zrýchľovaní. Môžeme zapísať ako: [18]

$$\text{celkový odpor} = D_{aerodyn} + R_{valenia} + R_{stúpania} + R_{zrýchlenia} \quad (18)$$

Jednotlivé členy sa dajú rozpísať ako:

$$D_{aerodyn} = C_D \frac{1}{2} \rho v^2 A_f \quad (19)$$

Kde:

Koeficient odporu vzduchu	C_D	dosadiť hodnoty z výpočtov
Hustota vzduchu	ρ	1,25 kg·m ⁻³
Rýchlosť vozidla	v	140 km·h ⁻¹ = 38,8 m·s ⁻¹
Čelný priemet plochy	A_f	1,95 m ²

$$R_{valenia} = r_0 M g \quad (20)$$

Kde:

Odpor valenia	r_0	0,012*
Hmotnosť vozidla	M	1900 kg**
Tiažové zrýchlenie	g	9,81 m·s ⁻²

*Hodnota je vybraná podľa rozmedzí pre asfalt podľa [8]

**Model vozidla DrivAer vychádza z vozidiel Audi A4 a MBW radu 3. Hodnota 1900 kg približná hodnota priemeru váhy týchto vozidiel s dvoj-člennou posádkou.

$$R_{stúpania} = \sin\theta M g \quad (21)$$

Pre tento výpočet platí predpoklad jazdy po rovine, takže uhol stúpania $\sin\theta$ je rovný 0 a tento člen sa v nasledujúcich výpočtoch nebude vyskytovať.

$$R_{zrýchlenia} = M (1 + \varepsilon) \frac{dV}{dt} \quad (22)$$

Hodnota ε zodpovedá rotujúcim hmotám pri určitom prevodovom zapojení. Pre tento výpočet nebudeme uvažovať zrýchlenie, ale stálu rýchlosť 140 km/h, preto sa tento člen v nasledujúcich výpočtoch nebude nachádzať.

Tabuľka 6 Odpor valenia a aerodynamické odpory pre jednotlivé konfigurácie

		186,4 N
Odpor valenia		+
Aerodynamický odpor	Jedno vozidlo	389,2 N
	Vzdialenosť 2 m	377,7 N
	Vzdialenosť 4 m	380,5 N
	Vzdialenosť 6 m	359,4 N
	Vzdialenosť 8 m	360,7 N

Jediná premenná ktorá je ovplyvnená faktorom, že sa vozidlá pohybujú v zástupe je aerodynamický odpor. Výkon motoru ktorý je potrebný na prekonanie celkového odporu v určitej rýchlosti je: [18]

$$P = \frac{\text{celkový odpor}}{\eta_T} U \quad (23)$$

Kde P je výkon, η_T je účinnosť prevodov. Obyčajne je to hodnota v okolí 0,9 a vyjadruje účinnosť prevodov v dôsledku mechanických strát.

Tabuľka 7 Výkon motoru potrebný na prekonanie odporov pri rýchlosti 140 km/h

Výkon	
Jedno vozidlo	24,81 kW
Vzdialenosť 2 m	24,32 kW
Vzdialenosť 4 m	24,44 kW
Vzdialenosť 6 m	23,53 kW
Vzdialenosť 8 m	23,58 kW

Tabuľka 7 ukazuje výkon motoru, ktorý je potrebný na udržanie rýchlosti 140 km/h pri jazde po rovine. Táto hodnota vstupuje do vzťahu pre spotrebu paliva v litroch na kilometer. [18]

$$\text{spotreba paliva} = \frac{P \text{ msp}}{U} \quad (24)$$

Kde *msp* je merná spotreba paliva. Pre osobné benzínové automobily sa hodnota pohybuje od 220 do 360 g·kW⁻¹·h⁻¹. Pre tento výpočet použijeme strednú hodnotu 290. Pre reálny výpočet je nutné vybrať hodnotu podľa mapy mernej spotreby paliva. Hodnota je závislá od otáčok motora, výkonu alebo prevodového stupňa. Vo výpočte treba taktiež zahrnúť premenu jednotiek z váhy paliva na jeho objem, pričom bola použitá hustota benzínu 0,72 kg·dm⁻³.

Tabuľka 8 Úspora paliva pre rôzne konfigurácie

	Spotreba paliva na 100 km	Percentuálna úspora paliva
Jedno vozidlo	7,13 l	
Vzdialenosť 2 m	7,08 l	1,9 %
Vzdialenosť 4 m	7,03 l	1,5 %
Vzdialenosť 6 m	6,76 l	5,2 %
Vzdialenosť 8 m	6,78 l	4,9 %

ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo zostavenie CFD modelu vozidiel idúcich v zástupe. Bolo vytvorených celkovo 6 prostredí v programe Star CCM+. Pre geometriu vozidla bol vybraný voľne dostupný model DrivAer, v čiastočne zjednodušenej verzii, kde sa nenachádzajú spätné zrkadlá, komponenty podvozku a taktiež komponenty motorového priestoru. Výpočtové konfigurácie obsahujú samostatné vozidlo a sústavy dvoch vozidiel v tuneli medzi ktorými sa zväčšuje vzdialenosť. V týchto výpočtoch sa sledovali aerodynamické charakteristiky vozidiel a porovnávali sa primárne so samostatne idúcim vozidlom.

Stena tunelu (stena výpočtového priestoru) prechádza pozdĺžnou rovinou modelu vozidla a vo všetkých výpočtoch je využitá symetria. Je to výhodné pre zníženie výpočtovej náročnosti, ale menej výhodné pre tvorbu úplavu za vozidlom, ktorý zrejme použitím symetrie stráca typický tvar a znižuje presnosť výpočtu. Steny tunelu, takisto ako povrch vozidla bol náležite ošetrený vhodnými okrajovými podmienkami, prizmatickými vrstvami a taktiež bola v oblasti za vozidlom primerane zjemnená sieť, aby výpočet čo najvernejšie zachytil pohyb a turbulencie média.

Využitie symetrie nevytvára zásadný rozdiel pre koeficient odporu jedného vozidla. Výsledná hodnota koeficientu odporu samotného vozidla- 0,21 je považovaná za adekvátnu, s prihliadnutím na to, že sa jedná o značne zjednodušený model a že podobné vozidlá môžu dosahovať koeficienty odporu od 0,23 do 0,25.

Priemerný koeficient odporu dvoch vozidiel bol vždy menší, ako pre vozidlo jazdiace samostatne. To znamená že zaradenie vozidiel do zástupu bude vždy výhodné pre úsporu paliva skupiny, ako celku. Avšak na vozidlách s rozstupom 2 m a 4 m je úspora na koeficiente odporu skoro zanedbateľná, a to na úrovni pod 3 %. Výraznejší pokles hodnôt nastáva pri vzdialenostiach 6 a 8 m, kedy priemerný koeficient odporu klesne o viac ako 7 %. Z výpočtu vychádza, že najvýhodnejšia medzera medzi vozidla je 6 m, pričom priemerný koeficient odporu klesne až o 7,6 %. Pri následnom prepočte na spotrebu paliva je percentuálna úspora o niečo menšia, a to z toho dôvodu že aerodynamický odpor nie je jediná veličina, ktorá do výpočtov vstupuje. Na spotrebu paliva majú vplyv aj parametre ako odpor valenia, rotujúcich súčastí, zrýchľovania alebo stúpania, ktoré sa nemenia so zmenou medzery medzi vozidlami.

Dáta ukazujú že vozidlá, ako samostatné jednotky, nie vždy profitujú z uloženia v zástupe. Pri medzere 2 m, ktorá je najvýhodnejšia pre prvé vozidlo, dosahuje druhé vozidlo najvyšší koeficient odporu. V porovnaní so samotným vozidlom ide o navýšenie 8,4%. V ostatných prípadoch sa koeficient odporu prvého vozidla príliš nelíši od samostatne idúceho vozidla, naopak druhému vozidlu koeficient odporu klesá a najvýhodnejšia je pre neho vzdialenosť 8 m, prípadne ešte väčšia, keby sme mali k dispozícii viac konfigurácií.

Samozrejme nemožno tvrdiť, že takéto CFD simulácie absolútne odrážajú realitu. Aby sa potvrdila validita takýchto simulácií, obyčajne sa musí meranie reprodukovať vo veternom tuneli a následne nastaviť výpočet, aby sa čo najviac približoval už dosiahnutým výsledkom.

Najväčšie rozdiely od skutočných výsledkov môžu byť spôsobené priveľmi zjednodušenou geometriou, kde pod hladkým podvozkom dôjde k neprimeranému urýchleniu prúdiaceho vzduchu. Ten pri výstupe z pod zadnej hrany karosérie neumožní úplavu rýchlo poklesnúť, naopak ho udržuje neprimerane vysoko, čo spôsobuje neočakávanú interakciu v oblasti kapoty a čelného skla na zadnom vozidle.

Ďalší dôvod nečakaných výsledkov môže byť už spomínaný vplyv symetrie, pretože vo výpočte nie je zohľadnený fakt, že úplav má často chaotický tvar ktorý sa prelieva ako vo vertikálnej tak v horizontálnej rovine za vozidlom a využitie symetrie nie je schopné adekvátne zachytiť toto správanie.

V tomto bode sa ukazuje možnosť nadviazať na prácu a vyšetriť konfigurácie jedného a dvoch metrov bez použitia symetrie, prípadne s iným turbulentným modelom. Takýto model by mohol lepšie konvergovať a dopracovať sa k ustáleným hodnotám koeficientu odporu. Prípadne je možné vytvoriť geometriu DrivAer Notchback vo verzii s členitým podvozkom, predviesť simuláciu s rovnakými nastaveniami riešiča, porovnať tvar úplavu za vozidlom a vyhodnotiť vplyv členitého podvozku na pokles úplavu.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HUCHO, W.H. Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering. 5. London: Butterworths, 1987. ISBN 978-0-7506-1267-8.
- [2] Automobile drag coefficient. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-08-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Automobile_drag_coefficient
- [3] ŠOB, F. Hydromechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o, 2002, 238 s. : il. ISBN 80-214-2037-5.
- [4] HOUGHTON, E. L., P. W. CARPENTER, S. H. COLLIOTT a D. T. VALENTINE. Aerodynamics for engineering students. Seventh edition. Amsterdam: Elsevier ; Butterworth-Heinemann, 2017, xiv, 671 stran : ilustrace. ISBN 978-0-08-100194-3
- [5] MUNSON, B. R., D. F. YOUNG a T. H. OKIISHI. Fundamentals of fluid mechanics. Sixth Edition. New York: Wiley, 2009. ISBN 047185526X
- [6] ANDERSON, J. D. Fundamentals of aerodynamics. 5th ed. New York: McGraw-Hill, c2011. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering. ISBN 0073398101
- [7] LEWINGTON, N. Aerodynamics Fundamentals for Automotive Ford Motor Company [online]. SAE-Australasia Aerodynamics Seminar, Ford Motor Company, 2005 [cit. 2020-07-19]
- [8] GILLESPIE, T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. SAE International, 1992. ISBN 978-1-56091-199-9
- [9] SAE International. Automated driving levels of driving automation are defined in new SAE international standard J3016 [online]. 2014 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/
- [10] Levels of driving automation: SAE Standards News: J3016 automated-driving graphic update. *SAE International* [online]. [cit. 2020-08-30]. Dostupné z: <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>
- [11] Advanced Sensor Coverage. *Tesla* [online]. 2020 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/autopilot>
- [12] ELIOT, L. LIDAR Put Into A Tesla. *Forbes* [online]. 2019 [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/lanceeliot/2019/10/08/lidar-put-into-a-teslaand-the-world-doesnt-come-to-an-end/#37475be7f879>

- [13] KILLINGER, D K. Lidar (light detection and ranging). *Laser Spectroscopy for Sensing*. 2014, s. 21. ISBN 10.1533/9780857098733.2.292
- [14] Shape Effect on Drag [online]. In: . Glenn Research centre, 15.5.2015 [cit. 2020-07-19]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/shaped.html>
- [15] Drag coefficient. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-08-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient#/media/File:14ilf11.svg
- [16] DÁVILA, A., E. DEL PONZO, E. ARAMBURU, A. FREIXAS. Environmental Benefits of Vehicle Platooning. *SAE International*. India, 2013, 6. DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-26-0142>. ISSN 0148-7191
- [17] SIVARAJ, G., K. M. PARAMMASIVAM a G. SUGANYA. Reduction of Aerodynamic Drag Force for Reducing Fuel Consumption in Road Vehicle using Basebleed. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2018, (11/6), 7. DOI: 10.29252/jafm.11.06.29115. ISSN 1735-3572
- [18] ZABAT, M., N. STABILE, S. FARASCAROLI, F. BROWAND. The Aerodynamic Performance Of Platoons: A Final Report. 1995. UC Berkeley
- [19] LE GOOD, G. M., K. P. GARRY. On the Use of Reference Models in Automotive Aerodynamics. SAE Technical Paper 2004-01-1308. SAE Technical Paper 2004-01-1308, 2004, , 28. DOI: <https://doi.org/10.4271/2004-01-1308>. ISSN 0148-7191
- [20] MEILE, W., G. BRENN, A. REPPENHAGEN, B. LECHNER, A. FUCHS. Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed body. *CFD Letters*. 2011 (3 (1), 9.
- [21] LE GOOD, G., P. BOARDMAN, M. RESNICK a B. CLOUGH. An Investigation of Aerodynamic Characteristics of Three Bluff Bodies in Close Longitudinal Proximity. *SAE Technical Paper 2019-01-0659*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-01-0659>. ISSN 0148-7191.
- [22] YANG, Z., Shu-Hong LI, Ai-Min LIU, Zhuo YU, Huan-Jing ZENG, Shi-Wu LI. Simulation study on energy saving of passenger car platoons based on DrivAer model. *Energy Sources: Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 03.2019(41:42), 10. DOI: 10.1080/15567036.2019.1587050. ISSN 1556-7230
- [23] STRANGFELD, CH., D. WIESER, H. J. SCHMIDT, R. WOSZIDLO, CH. NAYARI a CH. PASCHEREIT. Experimental Study of Baseline Flow Characteristics for the Realistic Car Model DrivAer. *SAE Technical Paper*. 2013, 2013-01-1251, 8. DOI: 10.4271/2013-01-1251. ISSN 0148-7191

- [24] HEFT, A., T. INDINGER, N. ADAMS. Investigation of Unsteady Flow Structures in the Wake of a Realistic Generic Car Model. 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference. 27 - 30 June 2011, 14. DOI: 10.2514/6.2011-3669.
- [25] YAZDANI, R. Steady and Unsteady Numerical Analysis of the DrivAer Model. Goteborg, Sweden, 2015. Master's thesis in Applied Mechanics. Chalmers University of Technology
- [26] SHUKLA, V., G. SAXENA. Computational Drag Analysis of Passenger Car Using Splines and Spoiler. International Journal of Engineering Trends and Technology. 2015, 21(1), 12. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V21P201. ISSN 2231-5381.
- [27] STAR-CCM+ (verzia 13.02.011): User Guide. Simcenter Star CCM+, Siemens PLM Software
- [28] BREDBERG, J. On the Wall Boundary Condition for Turbulence Models. Goteborg, Sweden, 2000. Department of Thermo and Fluid Dynamics. Chalmers University Of Technology
- [29] WIMSHURST, A. [CFD] What are Wall Functions and How do they work? In: <https://www.fluidmechanics101.com/> [online]. September 2018 [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=fJDYtEGMgzs&>
- [30] MENTER, F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulance Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*. 1994, No. 8, August 1994, pp. 1598-1605(1598-1605), 8. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.12149>

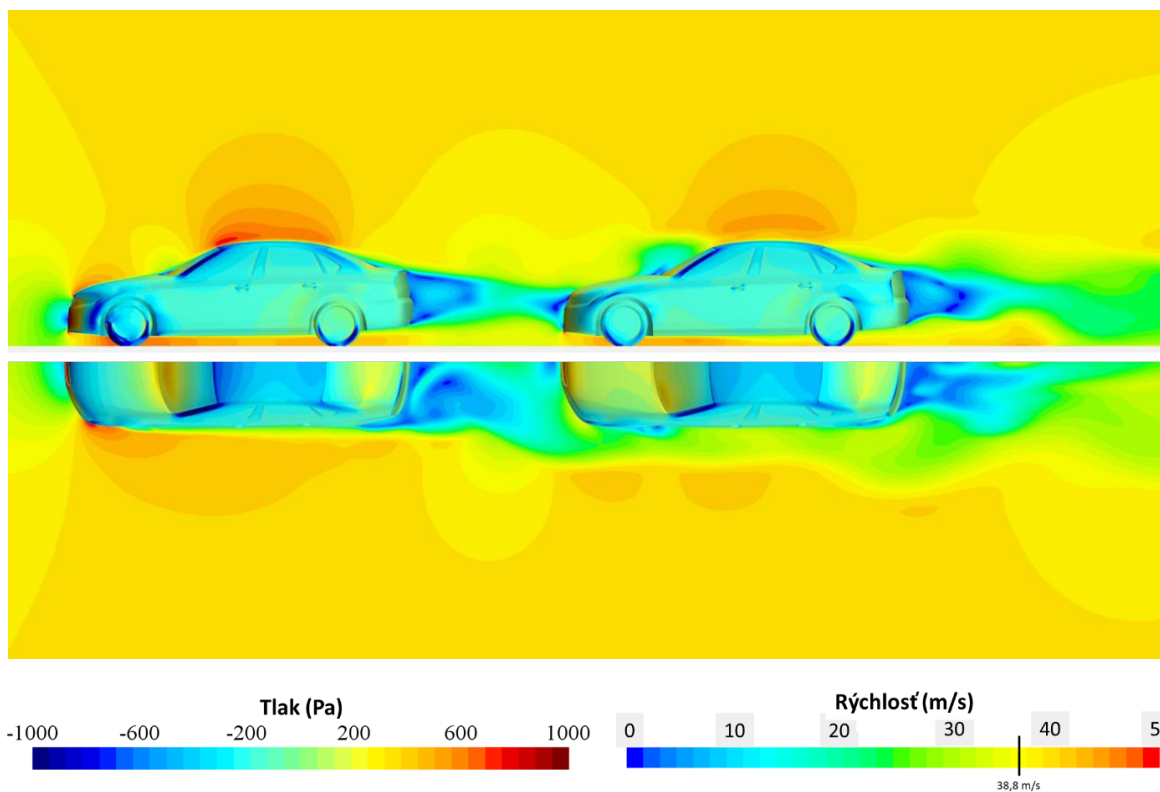
ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

p	[Pa]	Tlak
F	[N]	Sila
F_n	[N]	Normálová sila
F_f	[N]	Tečná zložka sily
S	[m ²]	Plocha
A_f	[m ²]	Plocha priemetu vozidla
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota
v	[m·s ⁻¹]	Rýchlosť
μ	[Pa·s]	Dynamická viskozita
τ	[N·m ²]	Šmykové napätie
dv/dn	[s ⁻¹]	Rýchlostný gradient
ν	[m ² ·s ⁻¹]	Kinematická viskozita
l	[m]	Dĺžka
d	[m]	Charakteristická dĺžka (priemer)
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
r_0	[-]	Koeficient rotujúcej pneumatiky
M	[kg]	Hmotnosť vozidla
g	[m·s ⁻²]	Gravitačné zrýchlenie
P	[W]	Výkon motoru
C_D	[-]	Koeficient odporu
C_{Da}	[-]	Akumulovaný koeficient odporu
$C_{D\infty}$	[-]	Koeficient odporu jedného vozidla
$C_{Dzástup}$	[-]	Koeficient odporu vozidiel v zástupe
C_L	[-]	Koeficient vztlaku
C_S	[-]	Koeficient bočnej sily
D	[N]	Odporová sila
L	[N]	Vztlaková sila
S	[N]	Bočná sila
θ	[rad·s ⁻¹]	Uhlová rýchlosť
y^+	[-]	Bezrozmerná normálová vzdialenosť
u^+	[-]	Bezrozmerná tangenciálna rýchlosť
y	[m]	Normálová vzdialenosť
u^*	[m·s ⁻¹]	Referenčná rýchlosť

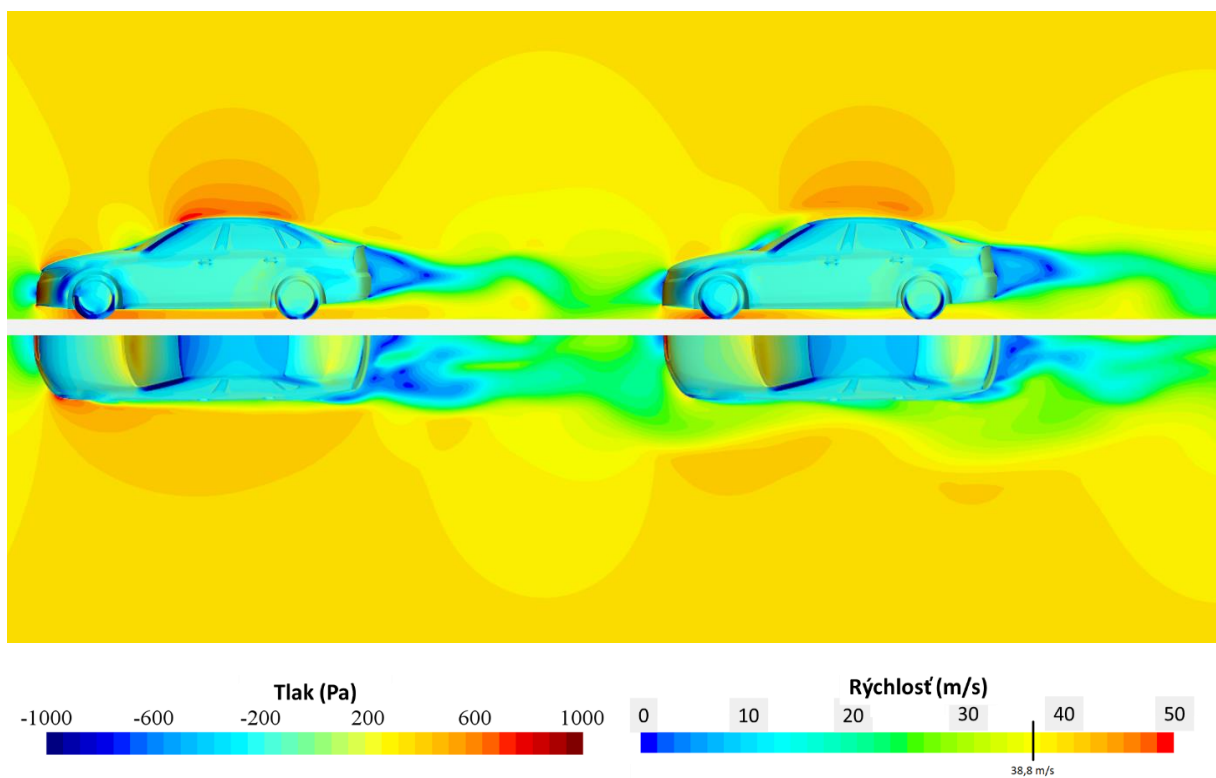
ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1	Tlakové a rýchlostné pole pre vozidlá vzdialené 2 m	I
Príloha 2	Tlakové a rýchlostné pole pre vozidlá vzdialené 4 m	I
Príloha 3	Tlakové a rýchlostné pole pre vozidlá vzdialené 6 m	II
Príloha 4	Tlakové a rýchlostné pole pre vozidlá vzdialené 8 m	II
Príloha 5	Úplav zobrazený izoplochou atmosférického tlaku samostatného vozidla	III
Príloha 6	Úplav zobrazený izoplochou atmosférického tlaku vozidiel vzdialených 2 m	III
Príloha 7	Úplav zobrazený izoplochou atmosférického tlaku vozidiel vzdialených 4 m	IV
Príloha 8	Úplav zobrazený izoplochou atmosférického tlaku vozidiel vzdialených 6 m	IV
Príloha 9	Úplav zobrazený izoplochou atmosférického tlaku vozidiel vzdialených 8 m	IV

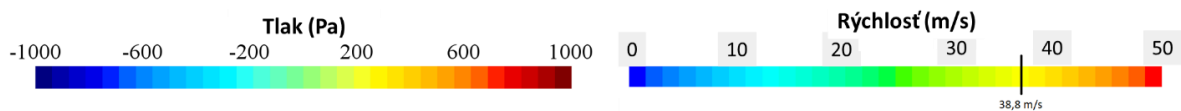
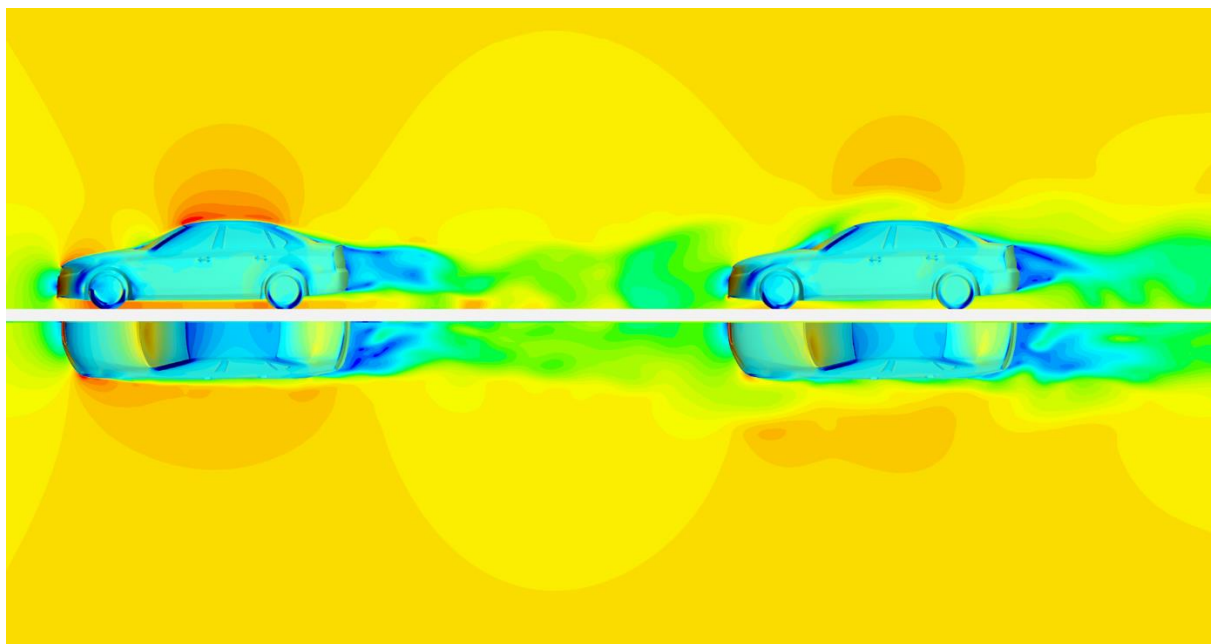
PRÍLOHY PRÁCE



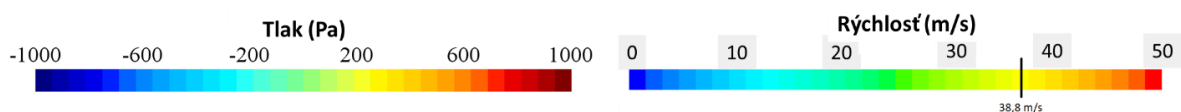
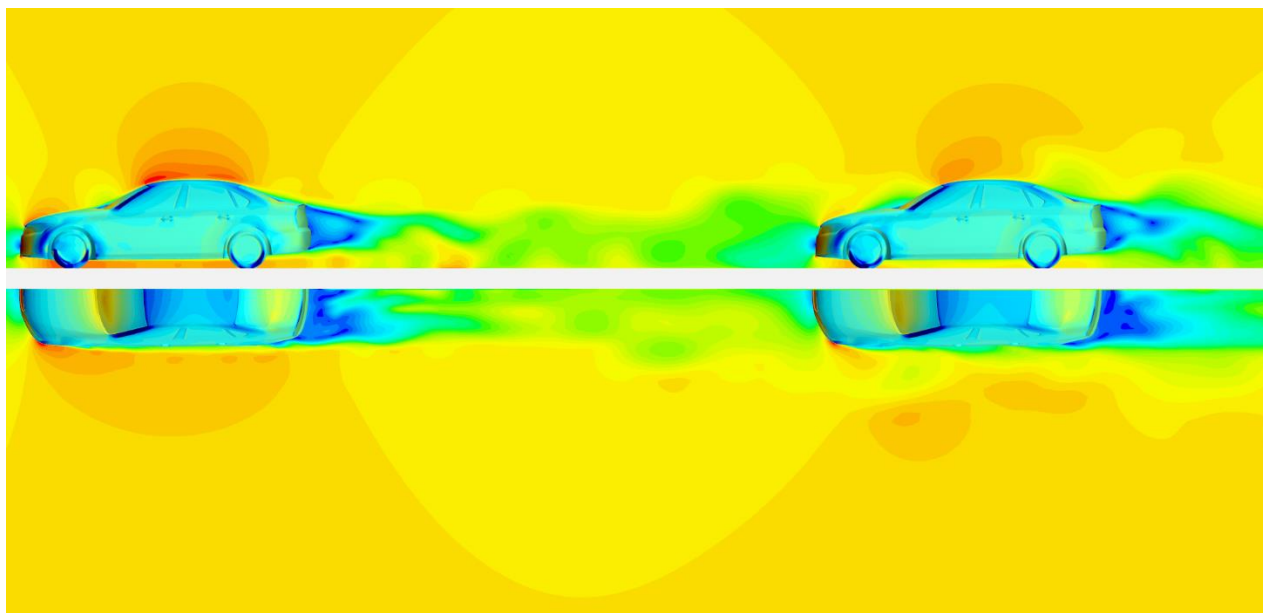
Príloha 1 Tlakové a rýchlostné pole pre vozidlá vzdialené 2 m



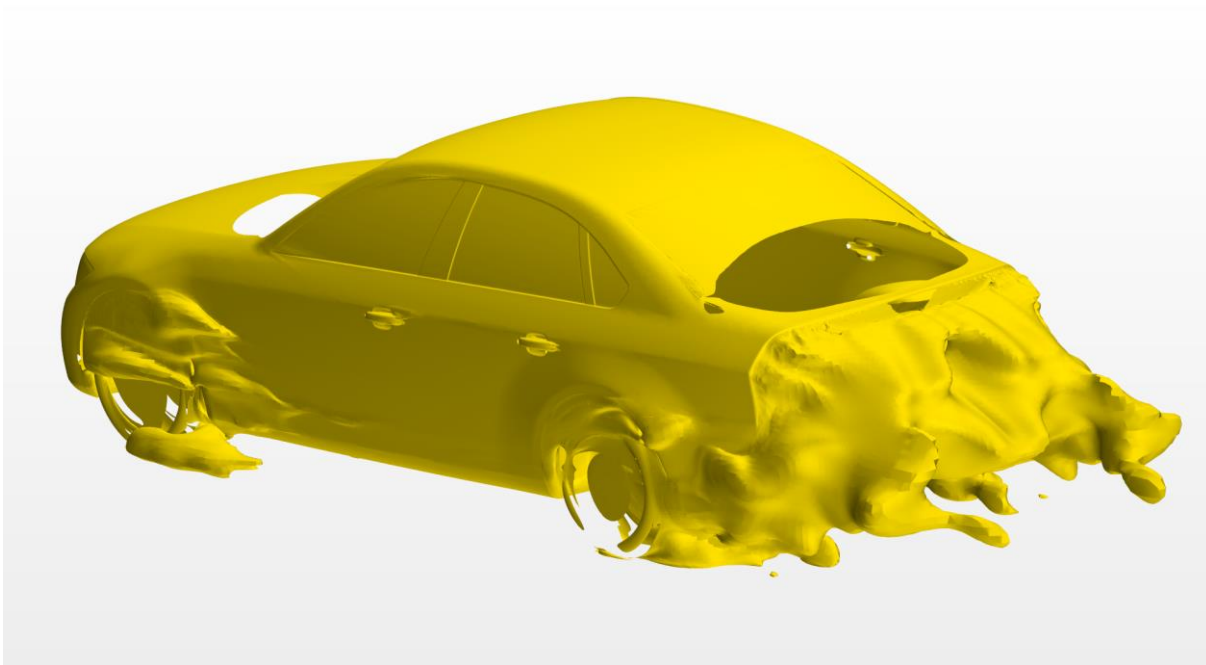
Príloha 2 Tlakové a rýchlostné pole pre vozidlá vzdialené 4 m



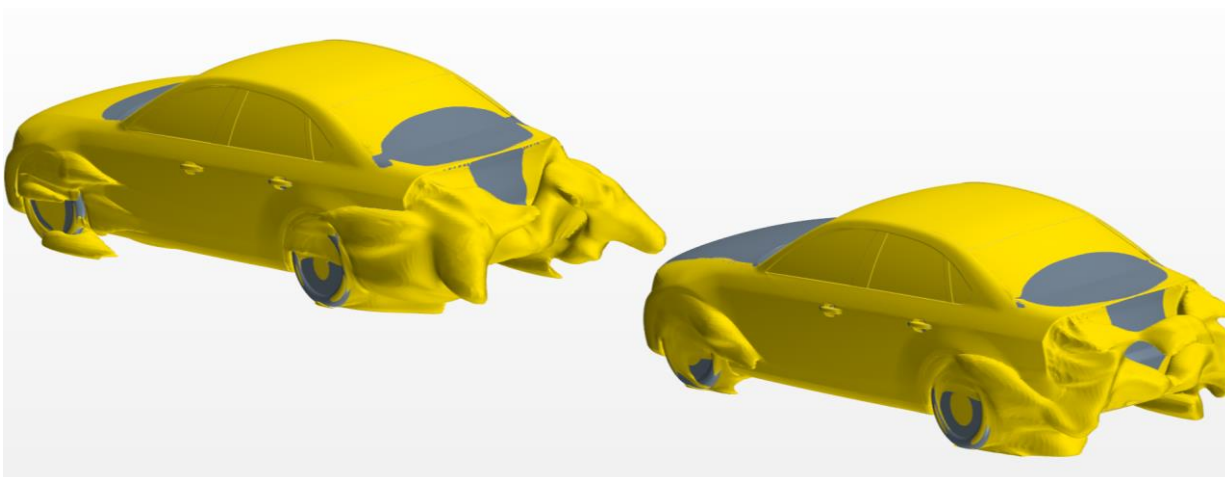
Príloha 3 Tlakové a rýchlostné pole pre vozidlá vzdialené 6 m



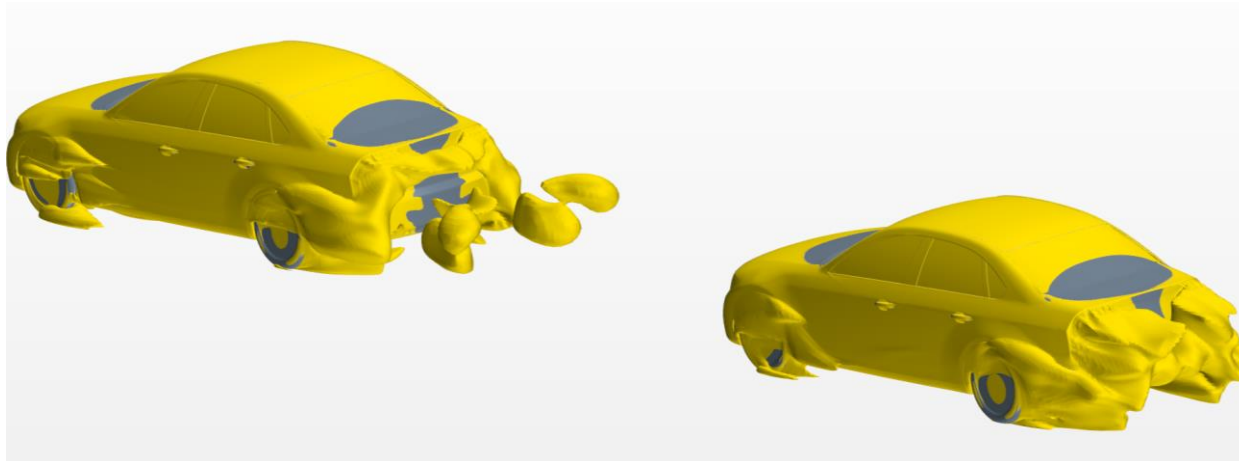
Príloha 4 Tlakové a rýchlostné pole pre vozidlá vzdialené 8 m



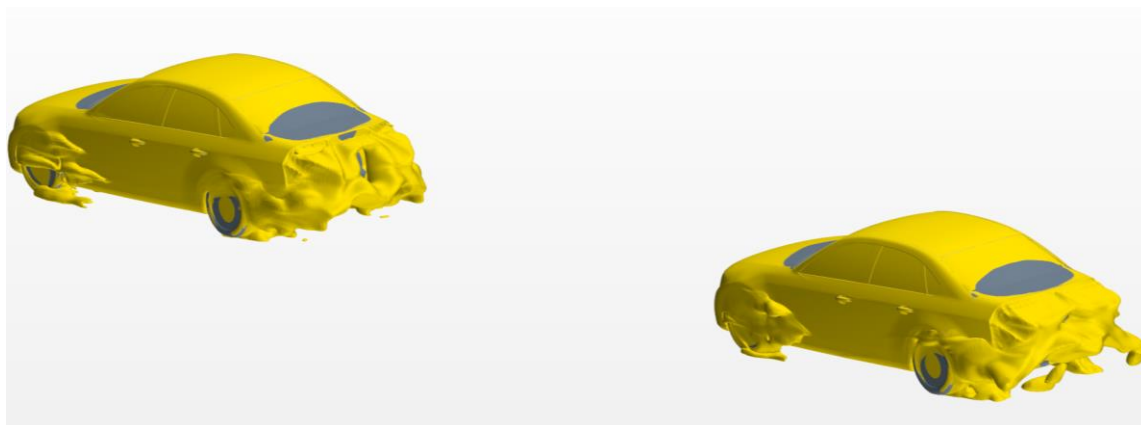
Príloha 5 Úplav zobrazený izoplochou atmosférického tlaku samostatného vozidla



Príloha 6 Úplav zobrazený izoplochou atmosférického tlaku vozidiel vzdialených 2 m



Príloha 7 Úplav zobrazený izoplochou atmosférického tlaku vozidiel vzdialených 4 m



Príloha 8 Úplav zobrazený izoplochou atmosférického tlaku vozidiel vzdialených 6 m



Príloha 9 Úplav zobrazený izoplochou atmosférického tlaku vozidiel vzdialených 8 m