



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

VLIV TLAKOVÉ ZTRÁTY CHLADIČE VOZIDLA NA JEHO AERODYNAMICKÝ ODPOR

INFLUENCE OF VEHICLE RADIATOR PRESSURE DROP ON ITS AERODYNAMIC DRAG

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matúš Pavlovič

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Vančura, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Matúš Pavlovič
Studijní program:	Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Jan Vančura, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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:

Vliv tlakové ztráty chladiče vozidla na jeho aerodynamický odpor

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na numerické posouzení vlivu tlakové ztráty chladiče vozidla na jeho aerodynamické parametry. Těžiště práce se nachází v posouzení vhodnosti využití výměníků s výrazně vyšším koeficientem tlakové ztráty oproti běžně používaným.

Cíle diplomové práce:

- 1) Rešerše vlivu motorového prostoru a jeho komponent na aerodynamický odpor vozidla
- 2) Sestavení CFD modelu vozidla DrivAer se zjednodušeným motorovým prostorem
- 3) Komparační simulace aerodynamických charakteristik vozidla s různými charakteristikami tlakové ztráty chladiče
- 4) Zhodnocení výsledků

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 2021/22

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 zameriava na numerickú simuláciu modelov vozidla DrivAer s rôznymi tlakovými stratami chladiča. Pre jednotlivé typy chladičov sú vytvorené CFD modely vozidla v karosárskej verzii Estate, spolu s chladičom a zjednodušeným motorovým priestorom. Cieľom práce je porovnanie vlastností konvenčného hliníkového chladiča s vlastnosťami prototypu polymérového chladiča a ich vplyv na aerodynamický odpor vozidla.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

chladič, DrivAer, motorový priestor, hliník, polymér, odpor, CFD, tlaková strata, tepelný výkon

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on numerical simulation of DrivAer vehicle model with different pressure losses of the radiator. CFD models of the vehicle in Estate body version for individual type of radiator are created, together with a radiator and a simplified engine compartment. The aim of this work is to compare characteristics of conventional aluminium radiator with characteristics of polymeric prototype radiator and their impact on aerodynamic drag of the vehicle.

KEYWORDS

radiator, DrivAer, engine compartment, aluminium, polymer, drag, CFD, pressure loss, thermal performance

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

PAVLOVIČ, Matúš. *Vliv tlakové ztráty chladiče vozidla na jeho aerodynamický odpor*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139698>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 73 s. Vedoucí práce Jan Vančura.



ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojim pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Jana Vančuru a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa 20. mája 2022

.....

Matúš Pavlovič

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som rád poďakoval vedúcemu mojej diplomovej práce pánovi Ing. Janovi Vančurovi, PhD. za odborné vedenie a rady pri spracovaní tejto práce. Ďalej by som chcel poďakovať mojej rodine za stálu podporu pri mojom štúdiu.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Vlastnosti tekutín a ich vplyv na aerodynamiku vozidla	12
1.1 Základné fyzikálne veličiny	12
1.1.1 Hustota.....	12
1.1.2 Viskozita.....	12
1.1.3 Tepelná vodivosť	13
1.2 Typy a charakteristiky prúdenia	13
1.2.1 Reynoldsovo číslo	14
1.2.2 Tvorba medznej vrstvy	14
1.3 Rovnice popisujúce prúdenie.....	14
1.3.1 Bernoulliho rovnica	15
1.3.2 Navier-Stokesova rovnica.....	15
1.4 Aerodynamické sily a momenty	15
2 Vnútrotná aerodynamika vozidla.....	17
2.1 Motorový priestor	17
2.2 Vzduchové kanály.....	18
2.3 Chladiaci systém	19
2.3.1 Umiestenie chladiča.....	19
2.3.2 Výstup chladiaceho vzduchu z vozidla	21
2.3.3 Odpor chladiaceho systému.....	22
2.4 Pomocné prvky	25
3 Určovanie aerodynamických charakteristík	26
3.1 Aerodynamický tunel.....	26
3.2 Jazdná skúška.....	27
3.3 CFD.....	28
3.4 Referenčné modely vozidiel	28
3.4.1 Jednoduché modely	28
3.4.2 Modely so základnými tvarmi vozidla	29
3.4.3 Model DrivAer	30
4 Výpočtová dynamika tekutín.....	31
4.1 Metódy CFD	31
4.2 Dostupný software	31
4.3 Rans modely	32
4.3.1 Spalart-Allmaras Model	33
4.3.2 K-Epsilon Model	33
4.3.3 K-Omega model	33
4.4 Výpočtová sieť.....	33
4.4.1 Povrchová sieť	34
4.4.2 Objemová sieť	35
5 Príprava výpočtového modelu.....	36
5.1 Výpočtová doména	37
5.2 Súradné systémy vozidla a kolies	38

5.3	Nastavenie siete.....	39
5.3.1	Základné nastavenia siete.....	39
5.3.2	Lokálne nastavenia siete	39
5.3.3	Kontrola siete a medznej vrstvy.....	40
5.4	Parametre výmenníkov.....	42
5.5	Okrajové podmienky	44
5.5.1	Nastavenie regiónov.....	44
5.5.2	Nastavenie fyzikálneho modelu.....	45
5.6	Záznam údajov	46
6	Vyhodnotenie výsledkov simulácií.....	47
6.1	Rozdiely v pôsobení aerodynamického odporu	54
6.2	Výsledný aerodynamický odpor.....	57
6.3	Optimalizácia modelu s polymérovým výmenníkom	58
6.3.1	Vyhodnotenie výsledkov optimalizovaného modelu.....	59
6.3.2	Zmeny pôsobenia odporu na častiach vozidla	63
6.3.3	Výsledný aerodynamický odpor optimalizovaného modelu.....	66
	Záver	67
	Použité informačné zdroje.....	68
	Zoznam použitých skratiek a symbolov.....	71

ÚVOD

Aerodynamika vozidla predstavuje neoddeliteľnú súčasť vlastností každého z vozidiel a má výrazný dopad na jeho charakter v oblastiach dynamiky, výkonu, spotreby paliva a z toho vyplývajúcej ekológie jeho prevádzky. Práve z hľadiska ekológie dopravy, na ktoré je čoraz viac kladený väčší dôraz sa skúmanie aerodynamiky stalo zásadným činiteľom v tejto oblasti, hlavne s cieľom znižovania odporu vozidla a tým znižovania spotreby paliva a zvyšovania efektívnosti prevádzky motorových vozidiel, ale aj vozidiel s elektrickým pohonom, pri ktorých je hlavným cieľom zvyšovanie ich dojazdu.

Hlavný nástroj pre skúmanie aerodynamiky a pôsobenia prúdiaceho vzduchu na vozidlo od počiatkov predstavoval aerodynamický tunel, ktorý výskumníkom poskytoval experimentálny prístup skúmania hlavne vonkajšej aerodynamiky vozidla, neskôr boli možnosti skúmania rozšírené o numerické simulácie, ktoré poskytli značné výhody v istých oblastiach oproti experimentálnemu meraniu a práve kombinácia týchto prístupov dnes tvorí pre výrobcov neoddeliteľnú súčasť vývoja a optimalizácie každého automobilu.

Práve rozšírené možnosti, ktoré poskytujú CFD simulácie umožnili podrobnejšie prvotné skúmania aj vnútornej aerodynamiky vozidla a prúdenia v motorovom priestore, bez nutnosti absolvovať značne komplikovanejšie a nákladnejšie experimentálne skúmanie v aerodynamickom tuneli pri vývoji alebo dielčích optimalizáciách systému za cieľom zníženia jeho odporu. Pomerne bežným spôsobom redukcie prúdenia v motorovom priestore a zníženia jeho odporu sa stáva jeho uzavretie na vstupe, ktoré je realizované pomocou automaticky ovládaných mriežok, ďalším možným spôsobom je použitie chladiča s vyššou tlakovou stratou, ktorého vplyv skúma táto práca.

1 VLASTNOSTI TEKUTÍN A ICH VPLYV NA AERODYNAMIKU VOZIDLA

Vzhľadom k základnému zameraniu aerodynamiky na pohyb a prúdenie tekutín a ich interakciu s pevnými telesami, môžeme obdobným spôsobom definovať aj pohyb automobilu v reálnom prostredí, z ktorého následne vyplýva nutnosť definície vplyvov tohto prostredia.

1.1 ZÁKLADNÉ FYZIKÁLNE VELIČINY

Pre pochopenie základných vlastností prúdenia je potrebné poznať fyzikálne veličiny, ktoré naň majú významný dopad a pochopiť ich vplyv na prúdenie.

1.1.1 HUSTOTA

Hustota ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] ako jedna zo základných fyzikálnych veličín je definovaná ako jej hmotnosť v jednotke objemu. V prípade kvapalín je táto vlastnosť závislá na tlaku p [Pa] a na teplote T [$^{\circ}\text{C}$]. Zmena hustoty v závislosti na zmene tlaku a teploty pri veľmi vysokých rýchlostiach, napríklad pri rýchlosti zvuku môže byť značne výrazná. Pri bežnej prevádzke motorových vozidiel však takéto rýchlosti nedosahujeme. Pre naše prakticky dosiahnuteľné rýchlosti sú takéto zmeny hustoty minimálne, a preto môžu byť zanedbané a tekutina môže byť považovaná za nestlačiteľnú [1].

1.1.2 VISKOZITA

Viskozita je spôsobená molekulárnym trením medzi vnútornými časticami tekutiny a je závislá na tlaku a teplote. Podľa Newtonovho zákona platí:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (1)$$

Kde:

τ tečné napätie [Pa]

μ dynamická viskozita [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

$\frac{du}{dy}$ rýchlosť deformácie tekutiny [s^{-1}]

Z rovnice (1), vyplýva, že napätie je priamo úmerné rýchlosti deformácie tekutiny. Dynamická viskozita v tomto prípade predstavuje konštantu. Ďalej rozlišujeme viskozitu kinematickú, pre ktorú platí [1]:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

Kde:

ν kinematická viskozita [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]

1.1.3 TEPELNÁ VODIVOSŤ

Tepelná vodivosť predstavuje vlastnosť tekutiny prenášať teplo vedením. Tepelná vodivosť predstavuje konštantu, tepelný tok je teda závislý na gradiente teploty. Podľa Fourierovho zákona platí [1]:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dy} \quad (3)$$

Kde:

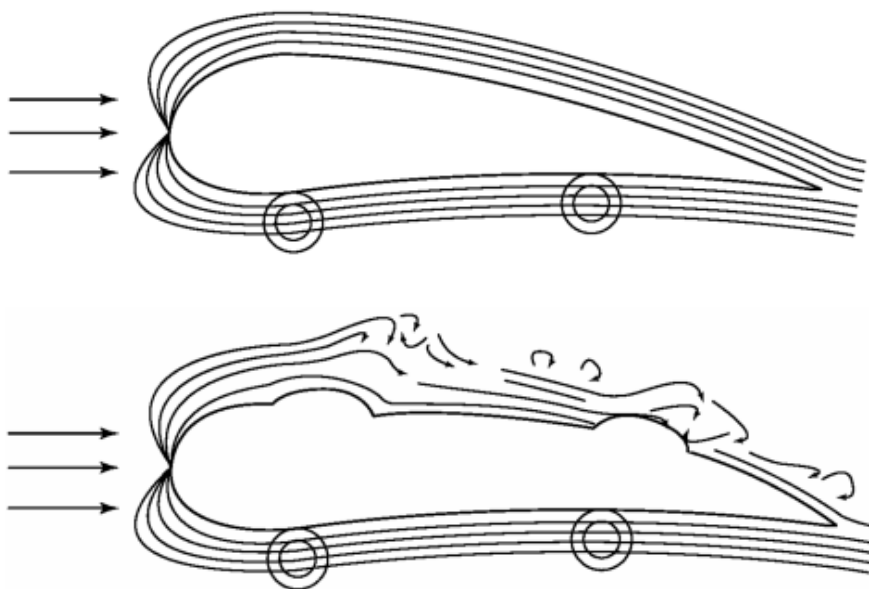
q tepelný tok [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

λ tepelná vodivosť [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

$\frac{dT}{dy}$ gradient teploty [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$]

1.2 TYPY A CHARAKTERISTIKY PRÚDENIA

Laminárne prúdenie je charakterizované prúdnicami stáleho tvaru, ktoré sú navzájom rovnobežné a nijak sa nemiešajú. Pri turbulentnom prúdení, naopak, dochádza k narušeniu stáleho tvaru a k miešaniu prúdnic, a tým aj k vzniku vírov [2].



Obr. 1 Laminárne prúdenie (hore) a turbulentné prúdenie (dole) [2]

1.2.1 REYNOLDSOVO ČÍSLO

Reynoldsovo číslo má významný dopad na vlastnosti medznej vrstvy, a taktiež vo veľkej miere určuje povahu viskózneho prúdenia. Jedná sa o bezrozmerné číslo, ktoré je určené ako:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (4)$$

Kde:

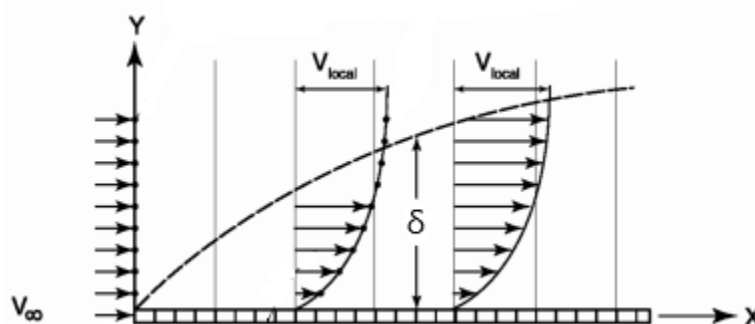
v rýchlosť prúdenia kvapaliny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

d charakteristický rozmer telesa [m]

Reynoldsovo číslo nám určuje povahu prúdenia v zmysle toho, či je prúdenie laminárne, alebo sa z neho stáva prúdenie turbulentné. Ako vyplýva zo vzťahu (4), veľkosť Reynoldsovho čísla a teda povahu prúdenia môžeme ovplyvňovať, a to napríklad zmenou rýchlosti prúdenia alebo úpravou tvaru predmetu, ktorý prúd obteká [2].

1.2.2 TVORBA MEDZNEJ VRSTVY

Medzná vrstva vyjadruje oblasť v bezprostrednej blízkosti telesa, kde sú účinky viskozity najdominantnejšie. V miestach, kde dochádza k priamemu stretu povrchu s prúdiacim médiom je rýchlosť prúdenia nulová, a postupne sa smerom od povrchu zvyšuje a pokračuje až ku koncu medznej vrstvy v oblasti voľného prúdu. Hlavným parametrom, ktorý slúži na určenie medznej vrstvy je jej hrúbka, označovaná ako δ , ktorá je závislá na rýchlosti prúdenia a kvality obtekaného povrchu. Z rastúcou rýchlosťou prúdenia a so zvyšujúcou sa kvalitou obtekaného povrchu sa medzná vrstva stenšuje a naopak [2].



Obr. 2 Princíp tvorby medznej vrstvy pri pevnej stene [2]

1.3 ROVNICE POPISUJÚCE PRÚDENIE

Rovnice popisujúce prúdenie vyjadrujú rôzne zákony zachovania, ktoré vyplývajú z vlastností tekutín. Takouto pomerne jednoduchou rovnicou je Bernoulliho rovnica, naopak zložitejšou je Navier-Stokesova rovnica, ktorej analytické riešenie je značne obmedzené.

1.3.1 BERNOULLIHO ROVNICA

Bernoulliho rovnica, ako základná rovnica popisujúca dynamiku tekutín hovorí, že súčet statického p_s a dynamického tlaku p_d v každom bode na povrchu vozidla je konštantný, a je rovný práve súčtu statického a dynamického tlaku v nerušenom prúde vzduchu. Pre príklad, pokiaľ vzduch prúdi z oblasti vyššieho statického tlaku do oblasti nižšieho statického tlaku, prúdenie vzduchu zvyšuje svoju rýchlosť v a naopak:

$$p = p_s + p_d = p_s + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{konšt.} \quad (5)$$

1.3.2 NAVIER-STOKESOVA ROVNICA

Navier-Stokesová (N-S) rovnica popisuje zákon zachovania hybnosti v prúdiacej, stlačiteľnej a viskózne tekutine. Všetky numerické metódy určené k riešeniu prúdenia tekutín sú založené na aproximácii úplných Navier-Stokesových rovníc. Tieto rovnice sú nelineárne diferenciálne rovnice druhého rádu, ktoré popisujú všetky pohyby tekutiny. Pre analytické riešenie sú vhodné iba najjednoduchšie prípady, inak sú rovnice riešené práve pomocou numerických metód, ako napríklad metódou konečných prvkov, objemov alebo konečných diferencií [1]. N-S rovnice sú odvodené z Cauchyho rovníc rovnováhy pomocou Stokesovej hypotézy.

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{v}\mathbf{v}^T) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho\mathbf{f} \quad (6)$$

Kde:

$\frac{\partial(\rho\mathbf{v})}{\partial t}$ jednotková sila pri lokálnom zrýchlení

$\nabla \cdot (\rho\mathbf{v}\mathbf{v}^T)$ jednotková sila pri konvektívnom zrýchlení

∇p jednotková sila spôsobená tlakovým spádom

$\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$ jednotková sila potrebná k prekonaniu trecích síl

$\rho\mathbf{f}$ jednotková sila potrebná k prekonaniu objemových síl

1.4 AERODYNAMICKÉ SILY A MOMENTY

Bez ohľadu na zložitosť tvaru obtekaného telesa, aerodynamická sila je vždy zapríčinená rozložením tlaku p a šmykového napätia τ na povrchu telesa [3]. Môže byť určená v závislosti na danej ose, ku ktorej sa vzťahuje, k ose x ako F_D pre aerodynamický odpor, k ose y ako F_L pre aerodynamický vztlak a k ose z ako bočná sila F_y [4]:

$$F_{D,L} = \frac{1}{2}\rho v_\infty^2 c_{D,L} A \quad (7)$$

Kde:

v_{∞} rýchlosť voľného prúdu vzduchu okolo vozidla [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

$c_{D,L}$ c_D ako aerodynamický koeficient, c_L ako súčiniteľ vztlaku [-]

A referenčná plocha [m^2]

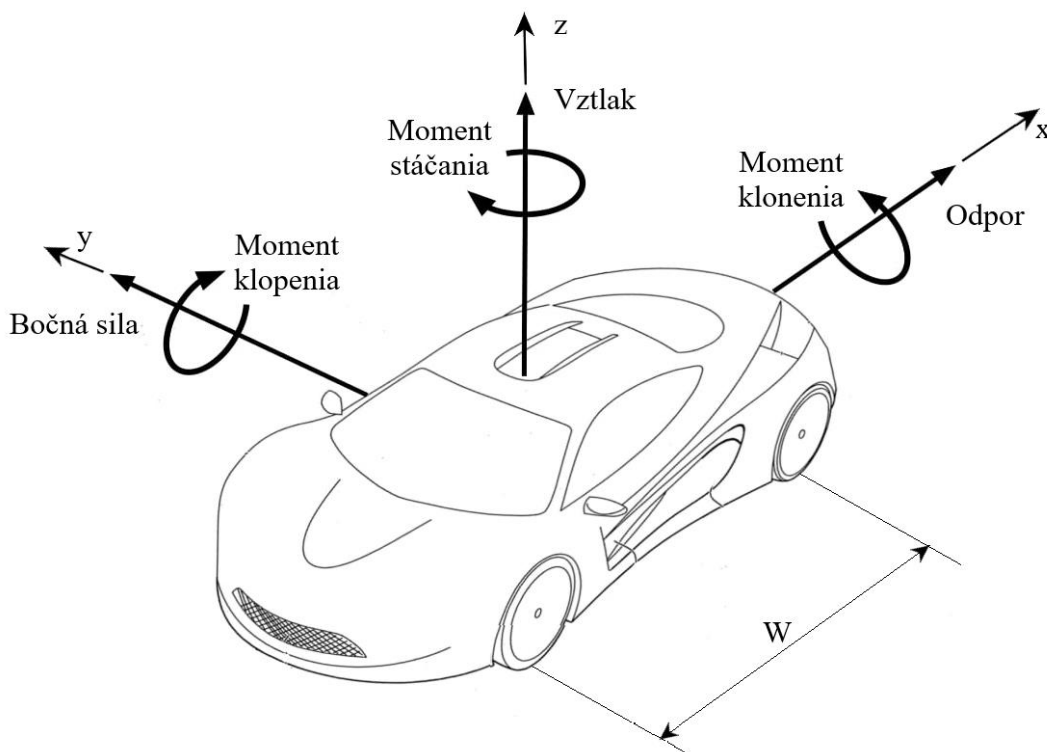
Aerodynamické momenty pôsobiace na vozidlo je taktiež možné určiť v závislosti na ose, ku ktorej sa vzťahujú ako moment klopenia M_x , klonenia M_y a stáčania M_z :

$$M_{x,y,z} = \frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2 c_{Mx,y,z} A W \quad (8)$$

Kde:

$c_{Mx,y,z}$ aerodynamický koeficient momentu pre danú osu [-]

W rázvor kolies [m]



Obr. 3 Rozloženie síl a momentov na vozidle [5]

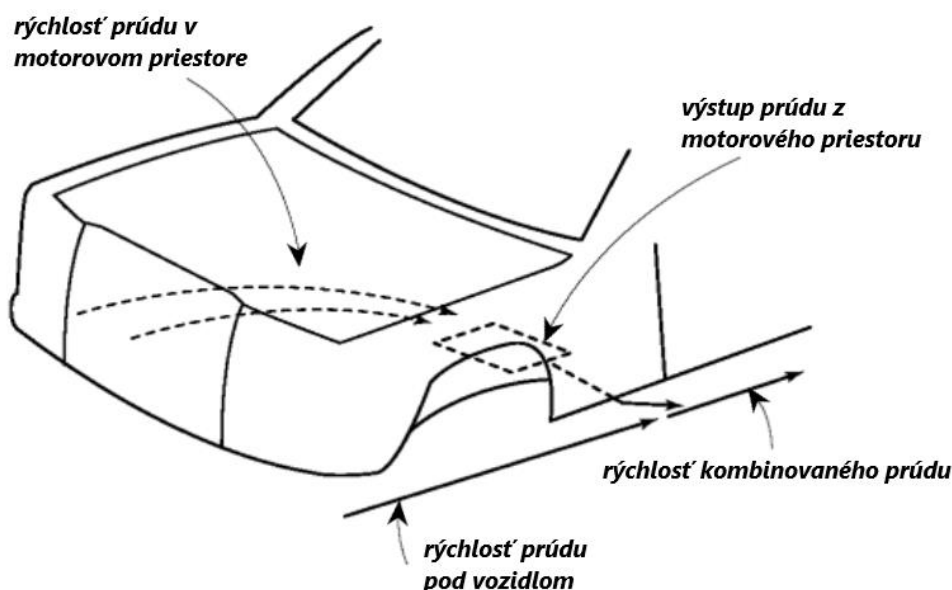
2 VNÚTORNÁ AERODYNAMIKA VOZIDLA

S plynutím dnešnej doby a jej odrazom na vývoj v automobilovom priemysle sa čoraz väčší dôraz kladie na zníženie aerodynamického odporu, hlavne v súvislosti so znížením emisií, a z toho vyplývajúceho zníženia spotreby. Touto snahou si získava pozornosť aj aerodynamický odpor, spôsobený práve prúdením v motorovom priestore a vzduchových kanáloch vozidla. Samozrejme, najväčší podiel na aerodynamickom odpore zostáva stále externej aerodynamike vozidla, ale takisto aj vnútorná aerodynamika má naň nemalý vplyv. Vnútornú aerodynamiku môžeme rozdeliť na dve hlavné odvetvia, prvé pre ventiláciu vozidla a jeho klimatizáciu a druhé pre chladiaci systém vozidla. V prípade posúdenia týchto dvoch odvetví, markantný vplyv na aerodynamický odpor vozidla má hlavne chladiaci systém vozidla, ktorý pri optimálnom návrhu dosahuje hodnôt približne 4% celkového aerodynamického odporu, ale v skutočnosti môže dosahovať hodnôt 10 až 20% celkového aerodynamického odporu vozidla [2].

Vnútorne prúdenie vo vzťahu k vozidlu môžeme opísať ako hmotnosť alebo časť vzduchu, odobratú z vonkajšieho prúdenia okolo vozidla, ktorá je smerovaná do predom určených vnútorných častí vozidla tak, aby týmito časťami pretekala. Ako názov vypovedá, primárnou úlohou chladiaceho systému je efektívne chladenie motoru, primárne výmenou tepla vytvoreného samotným motorom a jeho časťami s vonkajším okolím.

2.1 MOTOROVÝ PRIESTOR

V porovnaní s vonkajším profilom vozidla, ktorý tvorí prevažne jednotný tvar, motorový priestor je tvorený neporovnateľne väčším množstvom komponentov, počnúc samotným motorom, prevodovkou, nádržkami prevádzkových kvapalín, nemalou sústavou hadíc a všetkých ostatných komponentov potrebných k jeho bezchybnej prevádzke. Práve úlohou tímu konštruktérov motorového priestoru je, aby tento celok bol navrhnutý čo najefektívnejšie.

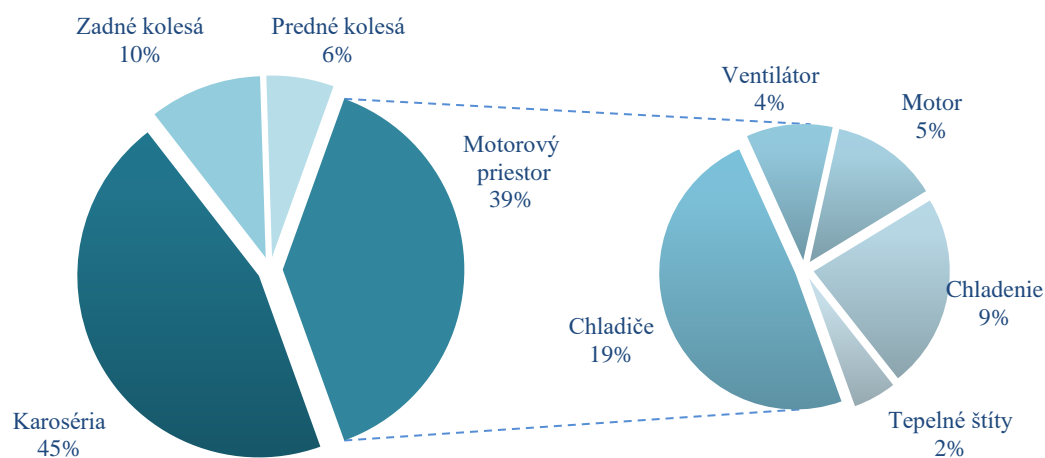


Obr. 4 Zjednodušené znázornenie prúdenia motorovým priestorom [2]

K zníženiu vplyvu motorového priestoru na aerodynamický odpor vozidla je dôležité, aby prúd chladiaceho vzduchu dokonale nadväzoval na prúdenie v okolí vozidla. Ideálna je situácia, kedy rýchlosť vytekajúceho prúdu chladiaceho vzduchu je vyššia ako rýchlosť prúdu pod vozidlom, tu však môže nastať problém z dôvodu veľkého ovplyvňovania prúdu pod vozidlom rýchlosťou voľného prúdu. V praktickom prístupe je preto podstatou najskôr pre chladiaci vzduch navrhnuť cestu, ktorou bude z motorového priestoru vytekať tak, aby sme docielili výrazne nižší tlak vytekajúceho vzduchu z motorového priestoru v porovnaní s tlakom na jeho vstupe. Tento prístup následne zaručí, že prúdiaci vzduch je vedený práve po tejto ceste smerom k nami definovanému výstupu. V prípade, že rýchlosť vytekajúceho chladiaceho vzduchu je vyššia ako rýchlosť vozidla, v priestore pod vozidlom je následne prúd vzduchu strhávaný práve týmto prúdom. Pokiaľ by však nastala situácia, že rýchlosť prúdenia chladiaceho vzduchu je nižšia ako rýchlosť prúdenia pod vozidlom, dôjde k oddeleniu prúdu v mieste, kde sa chladiaci vzduch z motorového priestoru stretáva s prúdom pod vozidlom. Dôsledkom tohto javu je nie len zvýšený aerodynamický odpor, ale aj vztlak.

Pri návrhu vstupu a výstupu motorového priestoru, sa odporúča dodržiavať nasledovné [2]:

- Vstup umiestnený na mieste s vyšším statickým tlakom ako je okolitý tlak
- Výstup umiestnený na mieste s nižším statickým tlakom ako je okolitý tlak



Obr. 5 Rozloženie celkového odporu vozidla pre jednotlivé komponenty pre rýchlosť približne 50 km/h [6]

2.2 VZDUCHOVÉ KANÁLY

Vzduch, ktorý prúdi vozidlom môže byť vo vozidle využitý na účely primárneho chladenia, do ktorého spadajú vzduchom chladené motory a chladenie kabíny vozidla, alebo na účel sekundárneho chladenia, kde spadajú chladiče, chladiče oleja alebo vedenia brzdovej kvapaliny. V konvenčných moderných vozidlách sa takéto kanály využívajú hlavne pre chladenie brzd, širší rozsah využiteľnosti však nájdu v závodných, prípadne športovo orientovaných vozidlách [2].

2.3 CHLADIACI SYSTÉM

Spaľovací motor je významným producentom tepla. Vzhľadom k jeho obmedzenej termodynamickej účinnosti a vysokým teplotám v spaľovacom priestore, je nutné pre správnu funkciu motora toto teplo odvádzať. Na túto úlohu slúžia vo väčšine moderných motorov chladených kvapalinou kvapalinové chladiče, ale v minulosti bolo používané aj pasívne chladenie, a to v prípade motorov chladených vzduchom, prípadne môže byť použitá kombinácia týchto dvoch spôsobov.

Úlohou chladiča chladiacej kvapaliny je odvádzanie prebytočného tepla do okolitého priestoru. Samotný chladič je konštruovaný za účelom čo najväčšieho prietoku vzduchu a zároveň s čo najmenším odporom. Chladič býva zväčša konštruovaný ako rúrkový. Rúrky, cez ktoré následne prúdi chladiaca kvapalina, sú osadené do rebrovaní, ktoré slúži na zväčšenie prietocnej plochy, cez ktorú prúdi vzduch a tým zvyšuje efektívnosť chladiča.



Obr. 6 Automobilový hliníkový chladič [7]

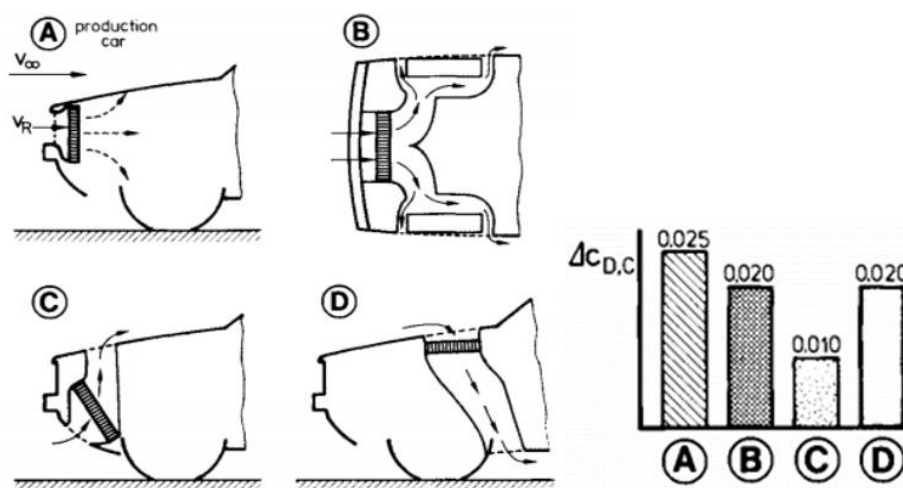
2.3.1 UMIESTENIE CHLADIČA

V prípade pozície chladiča vo vozidle existuje viacero možností jeho umiestnenia, ktoré sú volené vzhľadom na konštrukciu vozidla. Táto problematika sa môže značne komplikovať v prípade vozidiel, v ktorých nie je použitý jeden, ale hneď viacero chladičov. To sa týka najmä výkonných, športovo ladených, alebo inak špeciálne upravených závodných vozidiel, kde je nutné zabezpečiť dostatočné chladenie motora vzhľadom na jeho vysoký výkon a charakter. V prípade vozidla Porsche 911 GT2 RS si môžeme všimnúť až päť chladičov, z toho tri v prednej časti a dva v zadnej časti, ku ktorým prúdi vzduch pomocou vzduchových kanálov v bočných častiach vozidla.



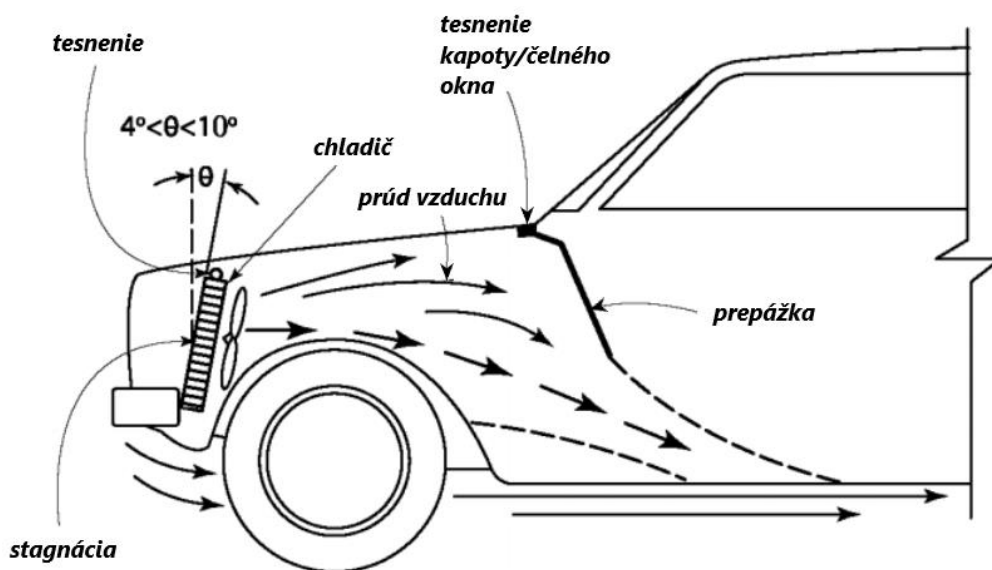
Obr. 8 Vozidlo Porsche 911 GT2 RS [8]

V prípade umiestnenia chladiča bežného produkčného vozidla v prednej časti motorového priestoru sa ako možnosť optimalizácie jeho umiestnenia naskytá možnosť variability jeho sklonu a následné vedenie prúdu vzduchu k výstupom z vozidla. Ako už bolo spomínané, pri konštrukcii alebo umiestnení chladiča sa prihliada na potrebu čo najväčšieho prietoku v kombinácii s čo najmenším odporom.



Obr. 7 Možnosti umiestnenia chladiča a ich vplyv na súčiniteľ aerodynamického odporu motorového priestoru [1]

Vyššie spomenuté predpoklady najlepšie spĺňa umiestnenie chladiča, pri ktorom je chladič mierne naklonený smerom dopredu (viď obr. , možnosť C) v pozdĺžnom smere vozidla. Toto umiestnenie však spôsobuje, že horúci vzduch prechádzajúci cez chladič následne prúdi priamo smerom k vstupu čerstvého vzduchu pre posádku v interiéri vozidla, preto sa táto možnosť pri použití v produkčných vozidlách javí ako nepraktická, a jej využitie je obmedzené práve pre už spomínané závodné vozidlá. Viac praktická v tomto ohľade je opačná orientácia chladiča, kde je chladič naklonený mierne dozadu. Táto pozícia chladiča pomáha usmerňovať prúd vzduchu smerom k jeho východu z motorového priestoru, a umožňuje jeho pripojenie k prúdu pod vozidlom [1][2].

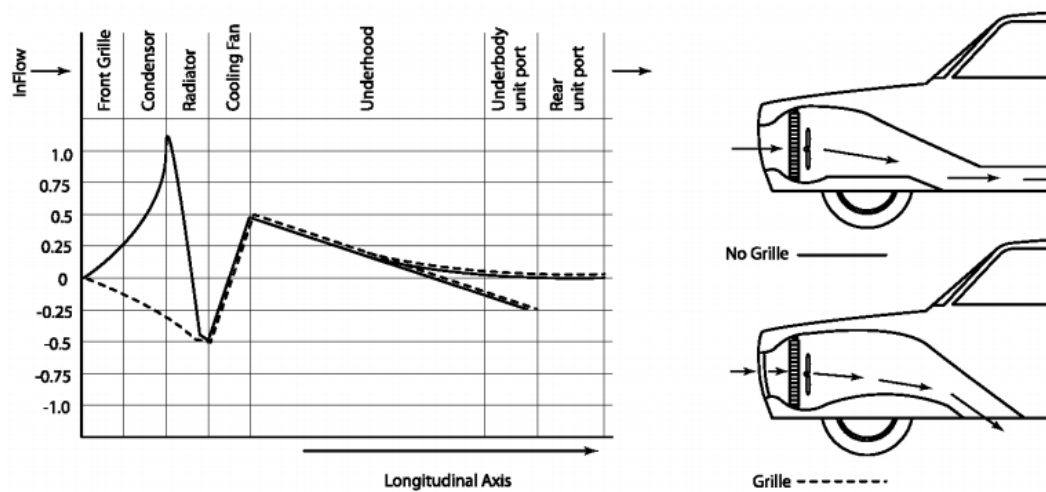


Obr. 9 Umiestnenie chladiča a následný prúd vzduchu v motorovom priestore [2]

2.3.2 VÝSTUP CHLADIACEHO VZDUCHU Z VOZIDLA

Umiestnenie výstupu chladiaceho vzduchu z vozidla ovplyvňuje výsledný odpor a aj vztlak, ktoré priaznivo ale aj nepriaznivo ovplyvňujú charakteristiky vozidla, a je úlohou konštruktérov opäť nájsť optimálnu rovnováhu. Najmenší prínos k odporu predstavuje vyústenie vzduchu čo najparalelnejšie k podlahe vozidla. V tomto ohľade sa ako najoptimálnejšie riešenie naskytá umiestnenie výstupu vzduchu v zadnej časti vozidla. Toto riešenie má najmenší prínos pre odpor a aj vztlak, je preto vo veľkej miere používané pri závodných vozidlách.

Ďalším riešením je umiestnenie výstupu vertikálne smerom hore, ktoré má prínos pre prítlak vozidla, ale taktiež aj pre aerodynamický odpor. Pri vyústení vertikálne smerom dolu je prírastok k aerodynamickému odporu výraznejší. Ako uvádza práca [10], výstupy vzduchu v blízkosti kolies majú vplyv na následné prúdenie v ich okolí, čo môže mať za následok negatívny ale aj pozitívny vplyv na ich výsledný odpor.



Obr. 10 Vplyv jednotlivých komponentov na tlakový koeficient C_p [2]

2.3.3 ODPOR CHLADIACEHO SYSTÉMU

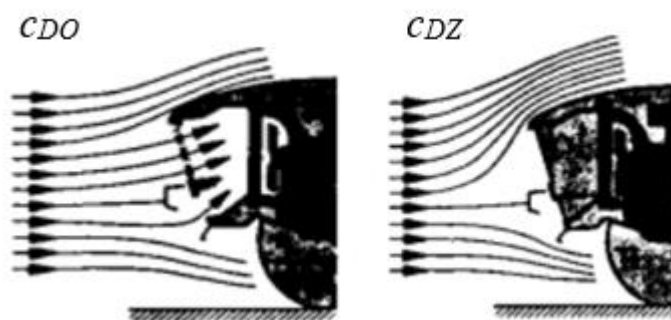
Odpor chladiaceho systému v stave ako býva uvažovaný, v podstate pozostáva z dvoch hlavných častí, pre ktoré zatiaľ neexistuje metóda k ich separácii na jednotlivé komponenty. Jedná sa o samotný odpor spôsobený tlakovými stratami prúdením v priestore chladiaceho systému a prídavným odporom spôsobeným vzájomným ovplyvňovaním prúdu chladiaceho vzduchu a vonkajšieho prúdenia okolo vozidla.

Na stanovenie odporu chladiaceho systému bohužiaľ neexistuje dostatočne presný spôsob, ale len spôsoby pre približné porovnanie aerodynamického odporu, pretože zásahom do prúdenia cez chladiaci systém automaticky ovplyvňujeme aj prúdenie v okolí vozidla. Jedným z prakticky najpoužívanejších spôsobov je stanovenie celkového odporu vozidla so sprístupneným chladiacim systémom c_{DO} a následne stanovenie odporu vozidla bez prístupu k chladiacemu systému c_{DZ} , ako je znázornené na Obr. 11.

Výsledný odpor chladiaceho systému následne vyplýva z rozdielu odporov stanovených týmito dvoma spôsobmi [1][11]:

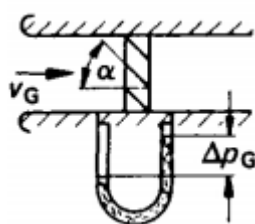
$$c_{DC} = c_{DO} - c_{DZ} \quad (9)$$

Doplňkovým spôsobom pre určenie charakteristík prúdenia v motorom priestore môže byť napríklad meranie použitím tlakových senzorov. Pomocou vhodného rozmiestenia senzorov môžeme identifikovať oblasti stagnácie prúdu alebo pomalého prúdenia a taktiež stanoviť relatívne hodnoty tlakového koeficientu. Následne na základe zistených dát dochádza k úpravám a prispôbieniu tvaru zasahujúcich častí vozidla. K presnému určeniu súčiniteľa aerodynamického odporu motorového priestoru sa však najčastejšie používajú CFD simulácie.



Obr. 11 Prúdenie vzduchu pri sprístupnenom chladiacom systéme (vľavo) a pri neprístupnom chladiacom systéme (vpravo) [1]

Obmedzenia inštalácie chladiča vo vozidle sú primárne dané a obmedzované ostatnými súčasťami vozidla, ako je motor, jeho sanie, prídavné zariadenia ale aj samotným dizajnom prednej časti vozidla, a taktiež aj veľkosť vstupu prúdiaceho vzduchu do vozidla je značne limitovaná. K tlakovým stratám spôsobeným odporom proti prúdeniu vzduchu chladiacim systémom sa pridávajú nie len trecie straty spôsobené prúdením vzduchu cez chladič, ale aj odpor častí vozidla, ktorých úlohou je prevažne dizajn, nie funkčnosť. Takýmto prvkom sú napríklad mriežky, ktoré majú taktiež vplyv na vnútorné prúdenie vo vozidle. Prúd vzduchu nenaráža na vstup paralelne vzhľadom na povrch vozovky, čo taktiež znázorňuje Obr. 11, a s narastajúcim uhlom dopadu vzduchu na mriežku α_G [°] narastá rozdiel tlakov pred a za mriežkou, vid' Obr. 12, a tým narastá aj koeficient tlakovej straty mriežky ξ_G [-]. Táto skutočnosť musí byť pri návrhu komponentov zohľadnená, preto sú mriežky navrhované s istým kompromisom, kde je stále prihliadané na dizajn, ale aj na funkčnosť.



Obr. 12 Vplyv mriežky na tlakovú stratu [1]

Koeficient tlakovej straty mriežky je následne definovaný ako:

$$\xi_G = \frac{\Delta p_G}{\frac{\rho}{2} \cdot v_G^2} \quad (10)$$

Kde:

Δp_G rozdiel tlakov pred a za mriežkou [Pa]

Prúdenie v priestore pred chladičom je uvažované obdobne ako prúdenie pred poróznou stenou. Pre daný prípad môže byť uvažované pre chladič s clonou, prípadne bez clony, kedy nie je usmerňovaný výtok prúdiaceho vzduchu z chladiča. Pre rýchlosť vozidla v môže byť rýchlosť prúdenia pred chladičom v_C určená ako funkcia koeficientu tlakovej straty, a to vrátane chladiča. Z toho vyplýva, že všetky tlakové straty spôsobené zúčastnenými komponentami sú vyjadrené pomocou jednej premennej, ktorou je práve koeficient tlakovej straty ξ [-] [1].

Koeficient tlakovej straty ξ sa dá ďalej vyjadriť pre nízke a vysoké rýchlosti:

- Nízka rýchlosť a laminárne prúdenie:

$$\xi = \frac{1}{v_C} \quad (11)$$

- Vysoká rýchlosť a turbulentné prúdenie:

$$\xi = \frac{1}{v_C^{\frac{5}{3}}} \quad (12)$$

Koeficient tlakovej straty je značne ovplyvnený zástavbou chladiča. Väčšia koncentrácia rebrovania znamená vyššiu hodnotu ξ . Taktiež je nutné podotknúť, že rýchlosť v_C je rýchlosťou priamo pred vstupom do chladiča, nie v jeho jadre. Z praktického hľadiska je určenie rýchlosti pred chladičom jednoduchšie, ako určenie rýchlosti v jeho jadre. Z rovníc kontinuity je následne možné vyjadriť tlakovú stratu chladiča ako:

$$\Delta p = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_C^2\right) \cdot \xi \quad (13)$$

Ako sa uvádza v predošlých výskumoch [6] princípe platí, že pri zvyšovaní tlakovej straty chladiča sa zvyšuje jeho odpor, ale zároveň so zvyšujúcimi sa zotrvačnými stratami v chladiči a následnými nižšími rýchlosťami prúdov v motorovom priestore spolu s redukciou prúdov ústiacich z motorového priestoru do priestoru pod vozidlom a pripájajúcich sa k vonkajším prúdom sa dá predpokladať zníženie celkového odporu.

Typické hodnoty pre koeficient tlakovej straty veľmi porózneho systému sú približne $\xi = 4$, pre ťažšie priechodný systém je hraničnou hodnotou $\xi = 8$.

Na základe koeficientu tlakovej straty je následne možné určiť aerodynamický koeficient chladiaceho systému ako:

$$c_{DC} = 2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \xi}} - \frac{1}{1 + \xi} \right] \quad (14)$$

Aerodynamický koeficient chladiaceho systému c_{DC} môže byť následne prevedený na hodnoty odpovedajúce spoločnému celkovému koeficientu aerodynamického odporu, pomocou pomeru vstupnej plochy chladiča A_C a čelnej plochy vozidla A .

$$\Delta c_{DC} = c_{DC} \frac{A_C}{A} \quad (15)$$

2.4 POMOCNÉ PRVKY

Pri prevádzke vozidla nastávajú situácie, kedy sú nároky na chladenie znížené a množstvo vzduchu prechádzajúce plne otvoreným vstupom do chladiaceho systému nie je potrebné. V takomto prípade sa naskytuje možnosť zamedzenia prístupu tohoto prebytočného množstva vzduchu do motorového priestoru, napríklad použitím aktívnej mriežky, ktorá na základe teploty chladiacej kvapaliny, teploty oleja, rýchlosti jazdy a ďalších faktorov dokáže v priebehu pár sekúnd automaticky prispôbiť veľkosť otvoru pre prúdenie vzduchu do motorového priestoru, a tým prispieť k zníženiu aerodynamického odporu vozidla.



Obr. 13 Aktívne mriežky vozidla BMW, otvorené (hore) a zatvorené (dole) [9]

3 URČOVANIE AERODYNAMICKÝCH CHARAKTERISTÍK

Aerodynamické charakteristiky vozidla môžeme skúmať tromi spôsobmi. Experimentálnym testovaním v aerodynamickom tuneli pri simulovaných podmienkach, testovaním jazdnou skúškou pri realistických podmienkach, alebo simuláciou pomocou CFD softvéru, teda výpočtovou dynamikou tekutín. Spoľahlivosť výsledkov simulácií je závislá na experimentálnom riešení, pomocou ktorého je nutné overenie reálnosti výsledkov.

3.1 AERODYNAMICKÝ TUNEL

Podstatou aerodynamického tunela je testovanie reálneho vozidla alebo jeho modelu v uzavretom prostredí, v ktorom testovacie podmienky nie sú ovplyvňované okolitým prostredím, a zároveň máme možnosť tieto podmienky dokonale kontrolovať. Hlavnou výhodou použitia aerodynamického tunela je možnosť merania aerodynamických síl a momentov pomocou balancie tunela, ktorá umožňuje meranie v troch osiach vzhľadom k referenčnému súradnému systému. Jeho ďalšou výhodou je opakovateľnosť meraní v porovnaní s jazdnou skúškou, pri ktorej nevieme zaručiť nepremenné podmienky vonkajšieho prostredia. Aerodynamické tunely môžu byť klasifikované podľa rozdielnych parametrov, medzi ktoré patrí napríklad základná stavba tunelu, teda či tunel pozostáva z otvoreného, alebo uzavretého okruhu, ďalej môžu byť klasifikované podľa rýchlosti prúdenia, ktorú sú schopné produkovať, podľa tlaku vzduchu alebo podľa veľkosti. Celkovú kvalitu aerodynamického tunela určuje hlavne rozsah Reynoldsových a Machových čísiel, v ktorých dokáže tunel pracovať. Jedným z problémov, ktorý sa objavuje pri testovaní v aerodynamickom tuneli je nepohyblivá podlaha, ktorá sa v reálnych podmienkach nevyskytuje. Tu dochádza k tvorbe medznej vrstvy práve na podlahe tunela pod testovaným objektom. K zamedzeniu tohto javu sa používa viacero spôsobov, ako napríklad umiestnenie modelu na vyzdvihnutú plošinu, odsávanie vzduchu pred vstupom prúdenia pod model alebo celkové odsávanie vzduchu pod modelom. Dnes už vo väčšine tunelov býva štandardom použitie pohybujúceho pásu, simulujúceho jazdu po reálnej vozovke.



Obr. 14 Pohybujúci sa pás, schopný simulovať jazdu až do 290 km/h [14]

Ďalším rozdielom oproti reálnym podmienkam je vplyv teplôt, či už od motora alebo brzd vozidla, ktoré vo veternom tuneli vieme simulovať len veľmi obtiažne.

Vo veternom tuneli sa naskytá možnosť pre simuláciu problému použiť zmenšený model. Pri použití zmenšených modelov je vhodné čo najväčšie zachovanie detailov pôvodného modelu, ale aj fyzikálnych vlastností prisluhujúcich danému zmenšeniu, čo sa však v mnohých prípadoch môže negatívne prejaviť na finančných nákladoch. Ďalším z toho vyplývajúcim problémom, ktorý môže nastať pri použití zmenšených modelov, je zmena prúdenia, respektíve rozdiel v zmenách prúdenia pri rozdielnych veľkostiach modelu, kde sa pri zmenšenom modeli zmena prúdenia neprejaví v takom rozsahu, ako pri jeho reálnej veľkosti. Veterný tunel nám taktiež umožňuje vizualizáciu prúdenia použitím dymových prúdov, ktoré znázorňujú prúdenie v tesnej blízkosti vozidla a taktiež môžu pôsobiť efektne pri reprezentatívnych účeloch.



Obr. 15 Dymové prúdy znázorňujúce prúdenie okolo vozidla Mercedes-Benz [13]

3.2 JAZDNÁ SKÚŠKA

V prípade testovania jazdnou skúškou prevláda výhoda testovania reálneho modelu vozidla pri reálnych podmienkach, avšak tento spôsob so sebou prináša aj značné nevýhody. Príkladom môže byť napríklad zmena okolitých podmienok, ale aj vysoké nároky na potrebné vybavenie a vysoká cena. Testovanie jazdnou skúškou býva využívané pre určenie koeficientov jazdných odporov pomocou dojazdovej skúšky, pri ktorej je vozidlo rozbehnuté vysokou rýchlosťou a následne pozvoľne spomaľuje až do zastavenia. Zo zaznamenaných údajov je následne dopočítaný celkový odpor, pozostávajúci z aerodynamického a mechanického odporu. Mechanický odpor môže byť následne určený pomocou jazdnej skúšky vozidla v špeciálnom prívесе, ktorý eliminuje vplyv aerodynamického odporu.

3.3 CFD

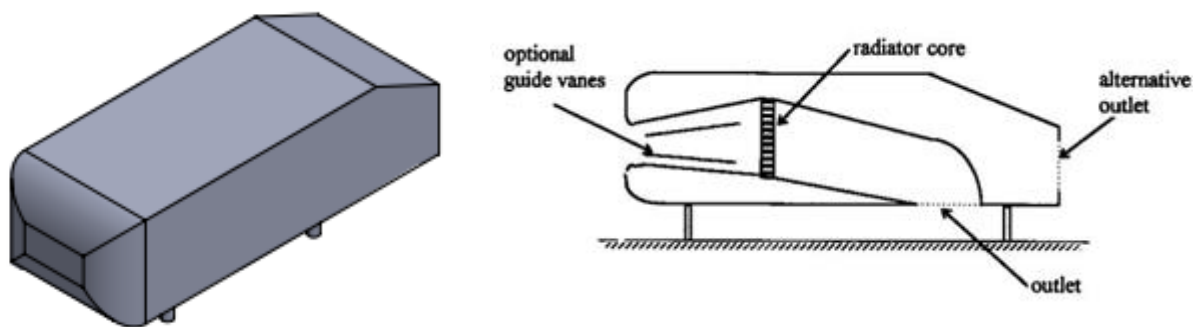
V modernej histórii technológií bolo od počiatku snahou nie len pochopenie prúdenia, ale aj vytvorenie analýzy pre vzduch, kvapaliny a plyny na základe matematických modelov, ktoré by následne umožnili uľahčenie vývoja a hlavne odbremenenie človeka od komplexných výpočtov, keďže prvotne prebiehali výpočty spravidla ručne. S nástupom moderných výpočtových technológií sa otvorila cesta práve pre vývoj a implementovanie odpovedajúcich zákonov a výpočtov do moderných výpočtových softvérov, ktoré vďaka matematickým metódam uľahčujú riešenie a pochopenie problémov, ktoré majú svoj základ v prúdení kvapalín a interakcií samotných kvapalín a pevných povrchov. Spočiatku prebiehala analýza prúdenia prevažne v 2D, k vývoju a komerčnému používaniu komplexných 3D analýz došlo následne v priebehu 80-tych rokov minulého storočia. V dnešnom období sa z používania CFD softvérov v ktoromkoľvek odvetví priemyslu stal v podstate štandard. Ťažiskom uplatnenia CFD softvérov sa stal hlavne letecký a automobilový priemysel, kde sa stal neodmysliteľnou súčasťou vývoja a optimalizácie produktov. V prípade použitia v automobilovom priemysle zohráva významnú úlohu už pri prvotných fázach vývoja, na ktorých základe vieme predikovať ďalšie kroky vo vývoji, a fáza testovania vo veternom tuneli sa tým odsúva až na neskoršiu fázu vývoja, čo má výrazný vplyv na finančné prostriedky. Svoje výhody uplatňuje aj pri simulovaní situácií, ktoré by boli obtiažne pre simulovanie vo veternom tuneli, napríklad pri jazde dvoch vozidiel za sebou, predchádzaní vozidiel alebo práve pri simulovaní prúdenia chladiacim systémom, kde je vyžadovaný komplexný model. Zo svojej podstaty výsledky CFD sú určené len približne, preto je spoľahlivosť výsledkov CFD softvéru výrazne závislá na možnosti porovnania s reálnymi výsledkami, napríklad z veterného tunela, a následným implementovaním týchto poznatkov do úprav a ďalšieho vývoja softvéru, za účelom neustáleho zvyšovania ich presnosti.

3.4 REFERENČNÉ MODELY VOZIDIEL

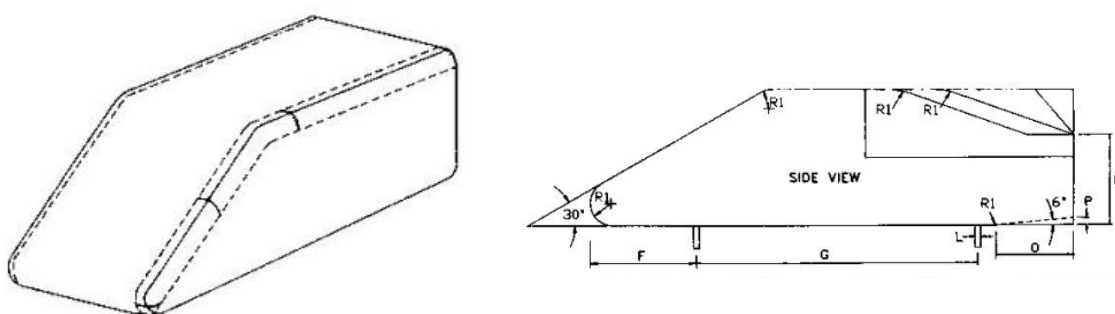
V počiatkoch výskumu aerodynamiky vozidiel, iniciovaným hlavne prvou ropnou krízou vznikali prvé referenčné modely vozidiel. Tieto modely môžeme rozdeliť na dve kategórie, a to na jednoduché modely, kde patria napríklad modely Ahmed, SAE alebo Rover, a ďalej na modely so základnými tvarmi vozidla, kde patria napríklad modely MIRA. V súčasnosti je rozšíreným modelom model DrivAer, ktorý najpresnejšie zodpovedá reálnemu vozidlu.

3.4.1 JEDNODUCHÉ MODELY

Model Ahmed Body vznikol v roku 1984 úpravami modelov z predošlých rokov. Model Ahmed Body umožnil skúmanie vplyvu sklonu zadnej časti vozidla na prúdenie a aerodynamické charakteristiky, a taktiež na ňom boli skúmané prínosy jednotlivých častí modelu k aerodynamickému odporu. Neskôr došlo k vylepšeniu modelu implementáciou zjednodušeného motorového priestoru pre vôbec prvé skúmanie odporu vnútorného prúdenia. Model Ahmed Body sa stal základom ďalšieho vývoja referenčných modelov a CFD softvéru. Modely SAE vznikali vo viacerých modifikáciách a boli používané pre skúmanie vplyvu zmeny tvarov prednej aj zadnej časti na prúdenia. Obsiahly rozbor týchto a mnohých ďalších modelov je dostupný v práci [12].



Obr. 16 Referenčný model Ahmed Body, pôvodný (vľavo) a s chladiacim systémom (vpravo) [12][15]



Obr. 17 Model SAE s možnými modifikáciami zadnej časti [12]

3.4.2 MODELY SO ZÁKLADNÝMI TVARMÍ VOZIDLA

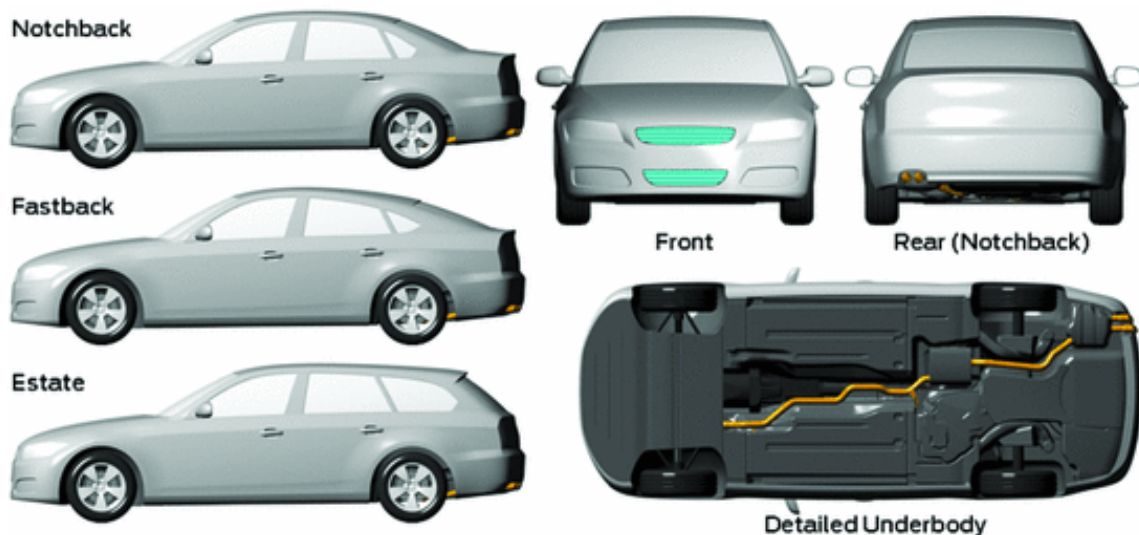
Model MIRA (Motor Industry Research Association) bol vyvinutý v raných 80-tych rokoch, ako model zodpovedajúci základným tvarom vozidla. Ako príklad mu slúžili bežné produkčné vozidlá danej doby, ktorých hlavné črty model nesie, so zjednodušenými povrchovými plochami a zanedbaním zložitých detailov. Taktiež vznikli modely rôznych karosárskych verzií, konkrétne Notchback, Fastback, Estateback a Pick-up a taktiež boli k dispozícii rôzne mierky modelov. Model MIRA sa osvedčil pri štúdiách simulácie reálnych podmienok a následných úpravách veterných tunelov, ich kalibrácií a spočiatku boli používané aj na validáciu výsledkov CFD.



Obr. 18 Rôzne karosárske verzie modelu MIRA [18]

3.4.3 MODEL DRIVAER

Model DrivAer predstavuje detailný referenčný model vozidla, ktorý vznikol v spolupráci automobiliek BMW a Audi a Inštitútu aerodynamiky a fluidnej mechaniky TU Mníchov. Model je založený na kombinácii vozidiel BMW radu 3 a Audi A3. Vďaka vysokej detailnosti modelu umožňuje skúmať veľké množstvo odvetví týkajúcich sa aerodynamiky a taktiež môže byť používaný k porovnávaniu výsledkov simulácií vo veternom tuneli s výsledkami CFD simulácií. Model samotný ponúka tri varianty karosérie, Fastback, Notchback a Estate, kde jediným rozdielom medzi jednotlivými variantami je iba zmena zadnej časti, zvyšok modelu zostáva nezmenený. Model ponúka veľké množstvo možných kombinácií rôznych modifikácií jednotlivých častí modelu, na výber sú rôzne typy kolies, kde sú v ponuke kolesá s klasickými diskami, alebo kolesá uzavreté, ďalej rôzne detailne spracovaná spodná časť vozidla, výfukový systém, zjednodušené spracovaný motorový priestor a simulátor chladiča, ktorý reprezentuje tlakovú stratu chladiaceho systému produkčného vozidla [16][17].



Obr. 19 Varianty modelu DrivAer [19]

4 VÝPOČTOVÁ DYNAMIKA TEKUTÍN

Výpočtovú dynamiku tekutín tvorí súbor numerických metód, ktoré sa používajú k získaniu približných riešení problémov prúdenia tekutín a prenosu tepla. Využíva sa metóda konečných objemov, pričom dochádza k rozdeleniu riešenej domény na konečný počet kontrolných objemov. Riadiace pohybové rovnice v konkrétnych objemoch sú následne diskretizované v integrálnej forme, pričom následná aproximácia integrálov vyžaduje znalosť premenných, ktoré sú uložené v centre jednotlivých buniek. Analýza sa zameriava na distribuované vlastnosti tekutín, čo prispieva k zložitosti riešenia rovníc a výpočtovej náročnosti.

4.1 METÓDY CFD

Pre CFD simulácie sú dostupné rôzne metódy, ktoré sa líšia predovšetkým presnosťou a popisom riešenia a od toho závislou výpočtovou náročnosťou. Metóda DNS (Direct Numerical Simulation) je založená na priamom riešení úplných Navier-Stokesových pohybových rovníc. Nepotrebuje žiadny pomocný model turbulencie a rieši celé spektrum rozmerov vírových štruktúr, k čomu je potrebná detailná sieť. Je však natoľko výpočtovo náročná, že svoje praktické uplatnenie v priemysle nájde veľmi ťažko a jej riešenie je obmedzené len pre vysokovýkonné superpočítače a nízke rýchlosti prúdenia.

Pre praktické využitie je nutné zabezpečiť modely riešenia turbulentného prúdenia, ktoré budú menej výpočtovo náročné. To je možné docieľiť zjednodušením modelu pomocou doplnkových rovníc popisujúcich turbulentné prúdenie spolu s Navier-Stokesovými rovnicami. Takéto zjednodušovanie so sebou však prináša aj nevýhodu vo forme znižovania presnosti výsledkov a popisu prúdenia. Metóda LES (Large Eddy Simulation) predstavuje zjednodušenie vo forme riešenia veľkých vírov zachytených sieťou priamym riešením N-S rovníc, kdežto malé víry sú zjednodušené, odfiltrované stanovením siete a riešené podsieťovým modelom ako časovo nezávislé. Táto metóda je menej náročná ako DNS, ale stále vyžaduje pomerne vysoké výpočtové nároky.

V praxi najbežnejšie využívaným modelom je model RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), ktorý je založený na časovom priemerovaní N-S rovníc. Hlavnou výhodou tohto modelu je krátky výpočtový čas v porovnaní s predchádzajúcimi modelmi. Ďalším výpočtovým modelom je model URANS, ktorý je založený na modely RANS, ku ktorému je ako premenná pridaný čas, čiže tento model je riešený ako časovo závislý. Kombináciou modelov RANS a LES vznikne model DES (Detached Eddy Simulation), ktorý pomocou ustáleného RANS modelu rieši prúdenia v blízkosti stien, a pomocou neustáleného prúdenia LES rieši prúdenia ďalej od stien. Zjednodušením modelu DES následne vznikne model SAS, kde je model LES nahradený modelom URANS. Tento nestacionárny model má výhodu v tom, že si sám dokáže určiť, či v danej oblasti bude prúdenie riešiť stacionárne, alebo nestacionárne [20].

4.2 DOSTUPNÝ SOFTWARE

CFD software môžeme rozdeliť na niekoľko kategórií podľa ich dostupnosti alebo schopností.

Vstavaný CFD software býva spravidla súčasťou CAD systému, ako je napríklad SolidWorks alebo Inventor. Výhodou vstavaných softwarov je práve ich samotné priame spojenie s CAD

systemom a jednoduchosť použitia, ale ich možnosti v oblasti riešenia CFD sú obmedzené len na jednoduché úlohy ustáleného prúdenia.

Voľne dostupné software sa môžu javiť ako dobrá alternatíva k drahším produktom. Znáмым open-source softwarom je Open-FOAM. Nevýhodou open-source softwarov býva často neprívetivé užívateľské prostredie či nedostatočná užívateľská podpora i v prípade riešenia problémov. Ďalšou nevýhodou je, že nastavenie a následné spracovanie výsledkov prebieha často externe mimo hlavný solver.

Do ďalšej kategórie môžeme zaradiť software s konkrétnou špecializáciou na dané odvetvie, napríklad CONVERGE alebo AVL-Fire, ktoré sa špecializujú hlavne na simulácie spaľovacích procesov v motoroch. Pre aplikáciu v námorníctve je určený FINE/Marine, použitie CFX sa zase sústreďuje na turbodúchadlá, čerpadlá a iné rotujúce stroje.

Komplexnými, a zároveň najrozšírenejšími sú FLUENT a Star-CCM+. FLUENT je používaný prevažne v elektrotechnickom priemysle, Star-CCM+ má hlavné zastúpenie v automobilom a leteckom priemysle. Ich výhodami je všeobecne vyššia prepracovanosť, kvalitnejšie užívateľské prostredie a užívateľská podpora, čo sa však odzrkadľuje na vyššej cene [21]. Množstvo dostupného CFD softwaru je však omnoho väčšie, zoznam ďalších je prístupný na odkaze [22].

4.3 RANS MODELY

Modely RANS sa stali v praxi najbežnejšie používanými modelmi, vďaka kombináciám jednoduchosti, nízkej výpočtovej náročnosti a pomerne prijateľnej presnosti výsledkov. Princípom RANS modelov je Reynoldsovo časové priemerovanie veličín popisujúcich turbulentné prúdenie, pri ktorom sa jednotlivé veličiny rozdeľujú na svoju priemernú hodnotu a flukтуаčnú zložku. Časové priemerovanie však do výpočtu N-S rovníc prináša problém v podobe tenzora Reynoldsových napätí, v ktorom sa nachádza 6 neznámych. Tieto neznáme je nutné dopočítať pomocou daného modelu turbulencie. Pri použití RST (Reynolds Stress Transport) modelu sú zložky tenzora Reynoldsových napätí riešené priamo výpočtom radiacích pohybových rovníc. Výhodou modelu RST je vyššia presnosť pri zložitejších prúdeniach, keďže ráta s anizotropným efektom pri turbulencii, zakriveniami prúdnic a rotáciou vírov, čo však zvyšuje výpočtovú náročnosť modelu je celkovo 7 výpočtov potrebných na určenie Reynoldsových napätí, kdežto pri použití Eddy Viscosity Modelu sú potrebné len dva výpočty.

Eddy Viscosity Model je založený na podobnosti medzi molekulárnym prenosom hybnosti a prenosom hybnosti turbulentnými fluktuáciami. Pomocou princípu vírivej viskozity μ_T je možné modelovať tenzor Reynoldsových napätí ako funkciu stredných hodnôt hlavných veličín prúdenia. EVM model na rozdiel od RST modelu neráta s anizotropiou turbulencie, takže tenzor napätí je uvažovaný ako lineárne závislý na strednom šmykovom pomere. K riešeniu vírivej viskozity je potrebné pridať ďalšie diferenciálne rovnice, ktoré umožnia jej výpočet. Jednotlivé modely sa následne líšia počtom diferenciálnych rovníc, ktoré k výpočtu používajú na nula-rovnicové, jedna-rovnicové a dvoj-rovnicové modely.

4.3.1 SPALART-ALLMARAS MODEL

Tento model bol vyvinutý primárne pre letecký priemysel, kde pri typických situáciách napríklad pre prúdenie okolo krídla alebo trupu lietadla, kedy nedochádzalo k oddeleniu medznej vrstvy a výrazným separáciám prúdu dosahoval presné výsledky. Jedná sa o jednorovnicový model, ktorý k riešeniu vírivej viskozity používa výpočet transportnej rovnice modifikovanej difuzivity.

4.3.2 K-EPSILON MODEL

Model K-Epsilon je príkladom dvoj-rovnicového modelu turbulencie, ktorý rieši diferenciálne transportné rovnice pre kinetickú energiu turbulencie k a rýchlosť disipácie turbulencie ε za účelom určenia vírivej viskozity. Vďaka výhodnej kombinácii medzi presnosťou výpočtu a prijateľnou výpočtovou náročnosťou sa tento model stal najpoužívanejším priemyslovým štandardom pre veľké spektrum aplikácií. Pri prvotnom modeli boli použité stenové funkcie, s uvažovaním vysokého Reynoldsovho čísla, preto je tento model pomerne presný pri počítaní plne rozvinutého prúdenia vo väčšej vzdialenosti od stien, jeho presnosť v oblastiach blízko stien však klesá. Tento prístup sa v podstate nazýva Standard K-Epsilon, a neskôr bol modifikovaný aj pre použitie v blízkosti pevných stien pri nízkom Reynoldsovom čísle a taktiež alternatívou k nízkemu Re-číslu, dvoj-vrstvovým prístupom, ktorý umožňuje použitie modelu vo viskózne vrstve v blízkosti stien, kedy rýchlosť disipácie turbulencie ε a turbulentná viskozita μ_T sú určené ako funkcia vzdialenosti obtekanej steny. Spolu s prístupom Realizable K-Epsilon, ktorý používa k výpočtu rýchlosti disipácie turbulencie modifikovanú transportnú rovnicu a v mnohých aplikáciách je presnejší, môže byť použitý pri dostatočne jemnej sieti, ktorá je schopná identifikovať viskóznú vrstvu.

4.3.3 K-OMEGA MODEL

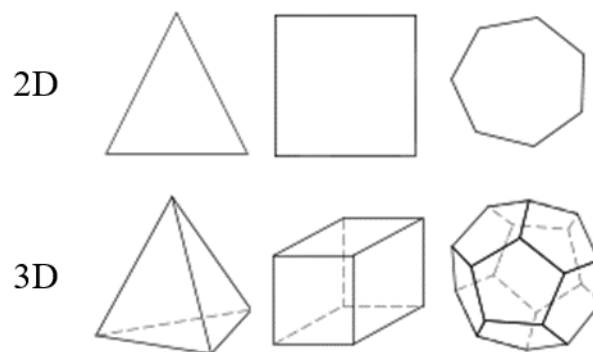
Model K-Omega je taktiež príkladom dvoj-rovnicového modelu turbulencie, ktorý na rozdiel od modelu K-Epsilon rieši transportné rovnice pre kinetickú energiu turbulencie k a vírivosť ω , ktorá charakterizuje mieru rotácie kvapaliny v danom bode. Výhodou oproti modelu K-Epsilon je vylepšené riešenie v oblasti medzných vrstiev prostredníctvom tlakových gradientov, je preto vhodnejšia na aplikácie v oblasti viskózných vrstiev s nízkym Re-číslom, bez nutnosti definície vzdialenosti stien. Nevýhodou je však citlivosť výpočtov medzných vrstiev na hodnoty vírivosti v plne rozvinutom prúdení, preto nie je vhodná pri riešení prúdenia vo väčších vzdialenostiach od stien. Modifikáciou prístupu Standard K-Omega je prístup SST K-Omega, ktorý kombinuje transportné rovnice disipácie turbulencie ε modelu K-Epsilon s modelom K-Omega a umožňuje použitie kombinácie týchto modelov a ich lokálnych výhod v závislosti na vzdialenosti od steny, kde je model K-Omega použitý v blízkosti stien a model K-Epsilon vo väčšej vzdialenosti od nich.

4.4 VÝPOČTOVÁ SIETĚ

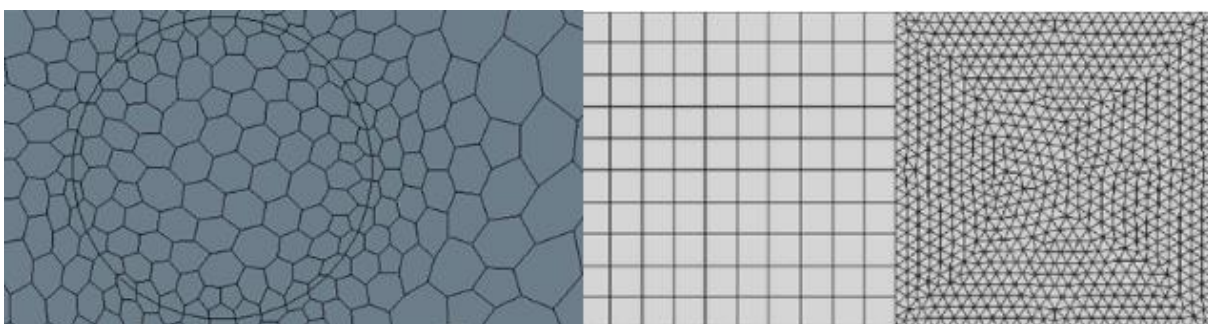
Sieť slúži na diskretizáciu výpočtovej domény do jednotlivých kontrolných objemov. Výpočtová doména je oblasť, ktorá v prípade skúmania vnútorného prúdenia môže obsahovať priamo skúmanú súčasť, alebo jej okolie v prípade skúmania vonkajšieho prúdenia. Nároky

na sieť sa líšia v závislosti od skúmaného prípadu. Zvýšená hustota siete priamo ovplyvňuje rýchlosť simulácie, ale taktiež zaručuje zvýšenú presnosť dosiahnutých výsledkov. Použitie jemnejšej siete je preto vhodné v oblastiach v blízkosti stien a v oblastiach, kde očakávame zmeny charakteristík prúdenia. V kombinácii s použitím hrubšej siete v oblastiach, ktoré nie sú hlavným predmetom skúmania vieme optimalizovať výpočtový čas. Pre ďalšie zníženie výpočtového času je možné použiť tzv. štruktúrovanú sieť, ktorá je zložená z usporiadaných prvkov a oproti sieti neštruktúrovanej je menej náročná na výpočtový čas. Kombináciou štruktúrovanej a neštruktúrovanej siete vznikne sieť hybridná. V závislosti na návaznosť siete dvoch susediacich prvkov rozdeľujeme sieť na konformnú, kedy jednotlivé uzly siete na rozhraní dvoch prvkov na seba naväzujú, a nekonformnú, kedy uzly na seba nenaväzujú.

Sieť môžeme primárne rozdeliť na povrchovú a objemovú, a následne podľa tvaru použitých prvkov pre kontrolné objemy. Povrchovú sieť rozdeľujeme na trojuholníkovú, štvoruholníkovú a polygonálnu, objemovú sieť zase na tetrahedrálnu, hexahedrálnu a polyhedrálnu [20].



Obr. 20 Typy prvkov siete, plošné (hore) , objemové (dole) [20]



Obr. 21 Konformná sieť (vľavo), nekonformná sieť (vpravo) [20][23]

4.4.1 POVRCHOVÁ SIEŤ

Softvér STAR-CCM+ poskytuje nástroje ktoré pomáhajú zlepšiť kvalitu povrchovej siete pred vygenerovaním objemovej siete. Ich použitie závisí od vstupnej kvality upravovaného modelu a na výber sú celkom tri nástroje. Surface Wrapper slúži pre úpravu siete veľmi zlej kvality, ktorá obsahuje napríklad diery alebo medzery a pomáha tieto hrubé nedokonalosti

odstrániť, ale sieť je potrebné ďalej upraviť. Na to slúži Surface Remesher, ktorý už uzavretý povrch modelu upravuje prevedením pôvodne vytvorených plôch na trojuholníky, a tým podstatne zvyšuje jeho kvalitu. Jednotlivé kroky úprav siete ako napríklad vyplnenie dier alebo spájanie hrán môžu byť na importovanej geometrii použité aj manuálne, a tak si užívateľ môže geometriu upraviť na základe svojich predstáv. Prípadne pre šetrenie námahy užívateľa môže celý proces prebehnúť aj automaticky, použitím funkcie Automatic Surface Repair, ktorý však nezaručuje také výsledky, ako pri manuálnej úprave.

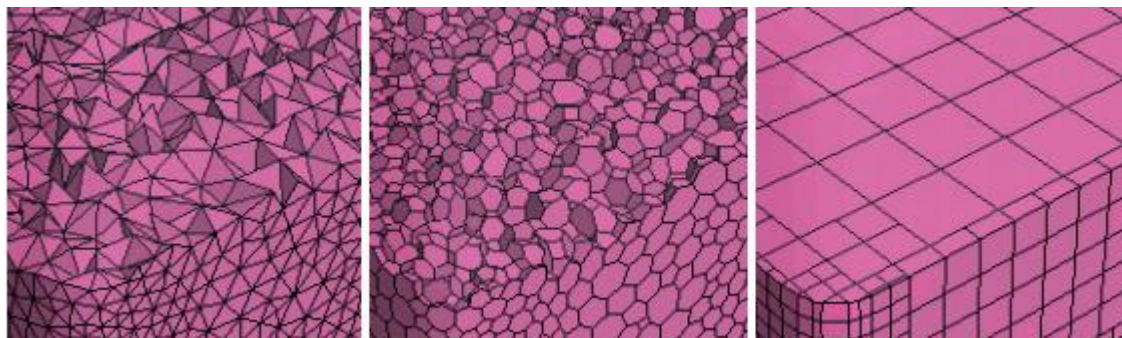
4.4.2 OBJEMOVÁ SIETĽ

Po príprave kvalitnej povrchovej siete nasleduje tvorba siete objemovej. Pre tvorbu objemovej siete sú v softvéri STAR-CCM+ dostupné tri základné modely: tetrahedrálnej sieť, polyhedrálnej sieť a hexahedrálnej sieť. Doplnkovými modelmi sú Thin Mesh a Advancing Layer Mesh, ktoré slúžia k tvorbe siete v oblasti stien telies pomocou prizmatických prvkov.

Tetrahedrálne model siete je z troch dostupných modelov najmenej časovo náročný na tvorbu, v danom objeme tvorí menší počet uzlov, avšak je náchylný na tvorbu nekvalitných prvkov. Sieť je tvorená smerom od povrchu do vnútra domény a jej kvalita je priamo závislá na kvalite povrchovej siete upravenej trianguláciou, pretože prvky objemovej siete priamo naväzujú na prvky siete povrchovej.

Polyhedrálne model vychádza z obdobnej povrchovej siete ako tetrahedrálne model, teda bunky sú takisto tvorené smerom od povrchu do vnútra domény a sú priamo závislé na povrchovej sieti, je preto nutné zaručiť jej dostatočnú kvalitu. Na rozdiel od tetrahedrálneho modelu však daný objem zaplní približne 5-krát menším počtom buniek, je preto menej náročný na následný výpočtový čas.

Hexahedrálne model tvorí vysoko kvalitnú sieť a ponúka veľké množstvo užívateľovi dostupných nastavení. Kvalita objemovej siete nie je závislá na kvalite siete povrchovej. Základ tvorí hexahedrálne sieť, ktorá je vygenerovaná na základe požadovanej veľkosti bunky a následne je pomocou povrchov v doméne orezaná, čím vznikne isté množstvo polyhedrálnych buniek. Tento model sa stal výhodným pri použití v skúmaní externej aerodynamiky aj vďaka prvku Wake Refinement, ktorý umožňuje lokálne zjemnenie siete v zadnej časti obtekaného telesa [20].



Obr. 22 Tetrahedrálne sieť, polyhedrálne sieť a hexahedrálne sieť (zľava) [20]

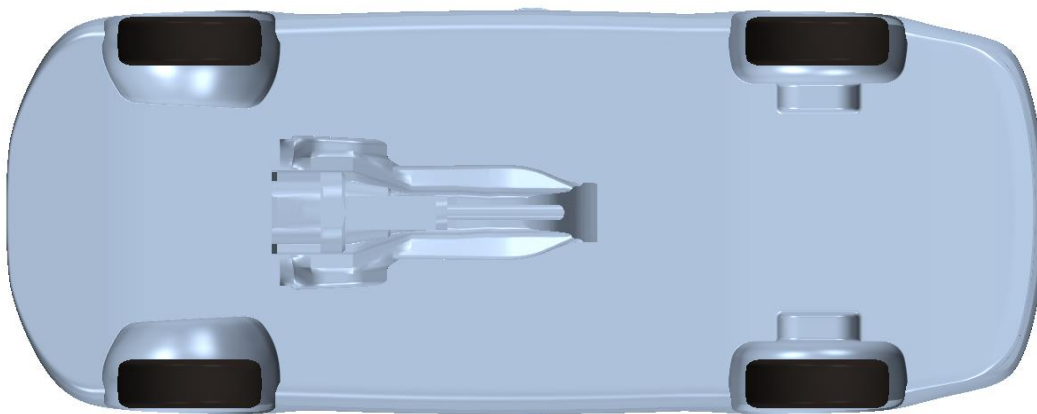
5 PRÍPRAVA VÝPOČTOVÉHO MODELU

Model DrivAer ponúka veľké množstvo rôznych kombinácií častí a prvkov vozidla, rôzne karosárske verzie vozidla, a taktiež rôznu detailnosť niektorých častí vozidla. Samotný model DrivAer je voľne dostupný pre akéhokoľvek používateľa. Pre tento prípad bola zvolená karosárska verzia Estate, u ktorej je predpokladaný najväčší celkový aerodynamický odpor z dostupných karosárskych verzií, a teda sa dá predpokladať lepšie badateľný vplyv odporu chladiaceho priestoru.



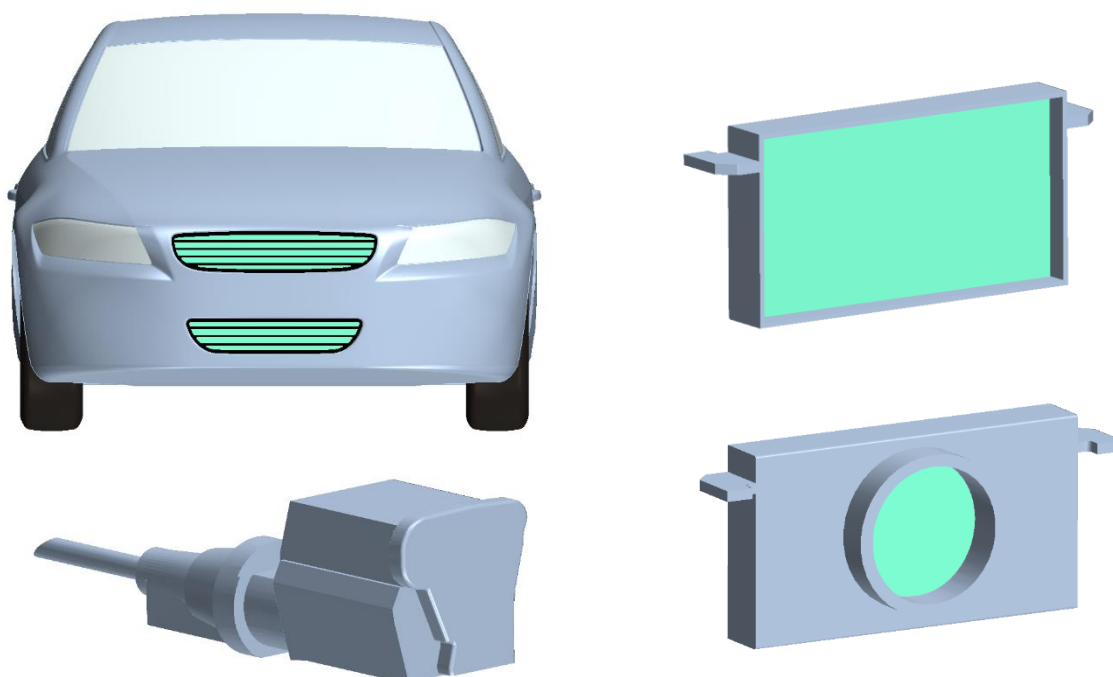
Obr. 23 Model vozu v karosárskej verzii Estate

Pri zostavovaní modelu bola braná v úvahu očakávaná vysoká výpočtová náročnosť, ktorá narastá so zväčšujúcim sa počtom buniek, ktorých počet ovplyvňuje detailnosť modelu, preto bolo pristúpené k zjednodušeniu modelu v istých oblastiach menej podstatných pre výpočet, čo umožní do istej miery znížiť výpočtový čas. Pre zjednodušenie boli použité plné disky kolies spolu s pneumatikami s hladkým povrchom. V prednej časti vozidla bol zjednodušený a vyhladený povrch nárazníku, kde sa inak nachádzali otvory pre prísun chladiaceho vzduchu ku kolesám. Použité neboli ani spätné zrkadlá. Najkomplikovanejší a najdetailnejší je v tomto ohľade podvozok vozidla, ktorý obsahuje veľké množstvo funkčných plôch a kanálov, čo môžeme vidieť aj na *Obr. 19*. Bol preto použitý jednotný hladký povrch podvozku, obmedzený len na potrebný výstup vzduchu z motorového priestoru.



Obr. 24 Zjednodušený podvozok modelu

Pri geometrii motorového priestoru naopak neboli žiaduce žiadne veľké zjednodušenia. Je použitý balík geometrie motorového priestoru, ktorý predstavuje zjednodušený model pozdĺžne uloženého motoru, na ktorý následne nadväzuje prevodovka, a keďže model vozidla ráta so zadným náhonom, súčasťou prevodovky je z nej ústiaci vývodový hriadeľ. Prevodovka a vývodový hriadeľ sú uložené v stredovom tuneli, ktorý následne vyúsťuje do podvozku vozidla. Ďalším prvkom je balík chladiaceho systému, ktorý obsahuje uloženie chladiča a samotné teleso chladiča, ktoré sú umiestnené v prednej časti motorového priestoru. Prúdenie vzduchu do chladiča je zabezpečené sprístupnením oboch možných otvorov v prednej maske vozidla, ktoré sú osadené dizajnovými mriežkami, rovnako ako pri skutočnom vozidle.



Obr. 25 Model vozidla spredu (vľavo hore), geometria motoru a prevodovky (vľavo dole), geometria chladiča (vpravo)

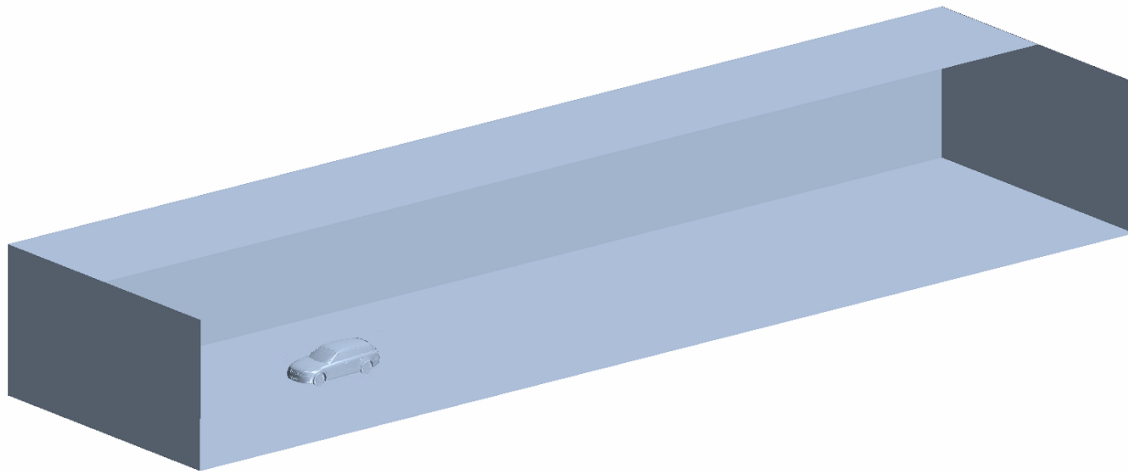
5.1 VÝPOČTOVÁ DOMÉNA

Veľkosť výpočtovej domény, v tomto prípade pomysleného aerodynamického tunelu musí dosahovať parametrov, ktoré nebudú žiadnym spôsobom ovplyvňovať výsledky simulácie. To predovšetkým znamená, že umožnia plne rozvinuté prúdenie ako okolo vozidla, ktoré nebude ovplyvňované stenami tunela, tak aj pred vozidlom a za vozidlom, na ktoré má vplyv umiestnenie vozidla a jeho vzdialenosť od vstupnej a výstupnej steny tunela.

V prípade rozmerov plôch domény je nutné brať v úvahu aj ďalší parameter, ktorým je blokácia plôch tunelu. Na základe praktických znalostí z aerodynamických tunelov by jej hodnota nemala presiahnuť hodnotu 3%. Z praktických skúseností sú odporúčanými rozmermi vždy viacnásobky základných rozmerov skúmaného predmetu. Pre dĺžku výpočtovej domény v prípade vozidla je odporúčanou dĺžkou tunela minimálne 8-násobok dĺžky skúmaného modelu. Ďalej je nutné stanoviť vhodnú vzdialenosť vstupnej a výstupnej plochy, kde pre zaručenie plne rozvinutého prúdenia pred vozidlom a ustálenia prúdenia za

vozidlom je odporúčané umiestnenie vozidla vo vzdialenosti minimálne 2-násobku dĺžky vozidla od vstupnej steny tunela.

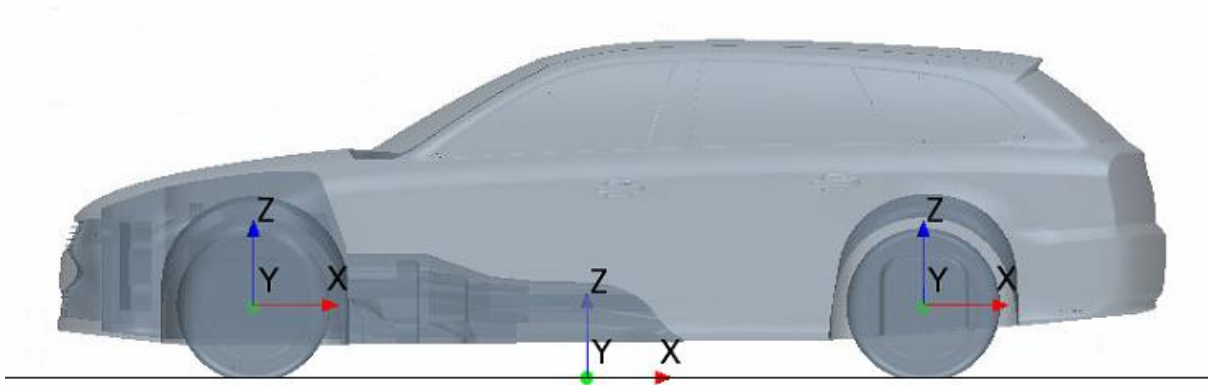
Odporúčania pre minimálne rozmery vstupnej a výstupnej plochy sú stanovené obdobným spôsobom. Šírka vstupnej a výstupnej plochy je určená ako 4-násobok dĺžky vozidla a ich výšku ako 2-násobok dĺžky vozidla. Výsledkom je výpočtová doména tvaru kvádra o rozmeroch 7x14x50 m. Vozidlo je následne umiestnené vo vzdialenosti 11 m od vstupnej plochy vzniknutej domény, a následne posunuté v zápornom smere osy Z o 25 mm. Posunutím o túto hodnotu sa simulácia viac približuje reálnym prevádzkovým podmienkam, keďže sa berie do úvahy deformácia skutočnej pneumatiky, a taktiež sa tým zamedzí tvorbe nekvalitnej siete, ktorá by inak vznikala v mieste kontaktu kolesa s vozovkou.



Obr. 26 Výpočtová doména s umiestneným vozidlom

5.2 SÚRADNÉ SYSTÉMY VOZIDLA A KOLIES

Hlavný súradný systém vozidla sa nachádza v strede medzi rázvorom náprav a rozchodom kolies vozidla a leží v rovine vozovky, kladný smer osy x je v smere prúdenia vzduchu okolo vozidla. Pre kolesá vozidla boli vytvorené nové, vlastné súradné systémy, ktoré budú použité pre simulovanie ich rotácie.



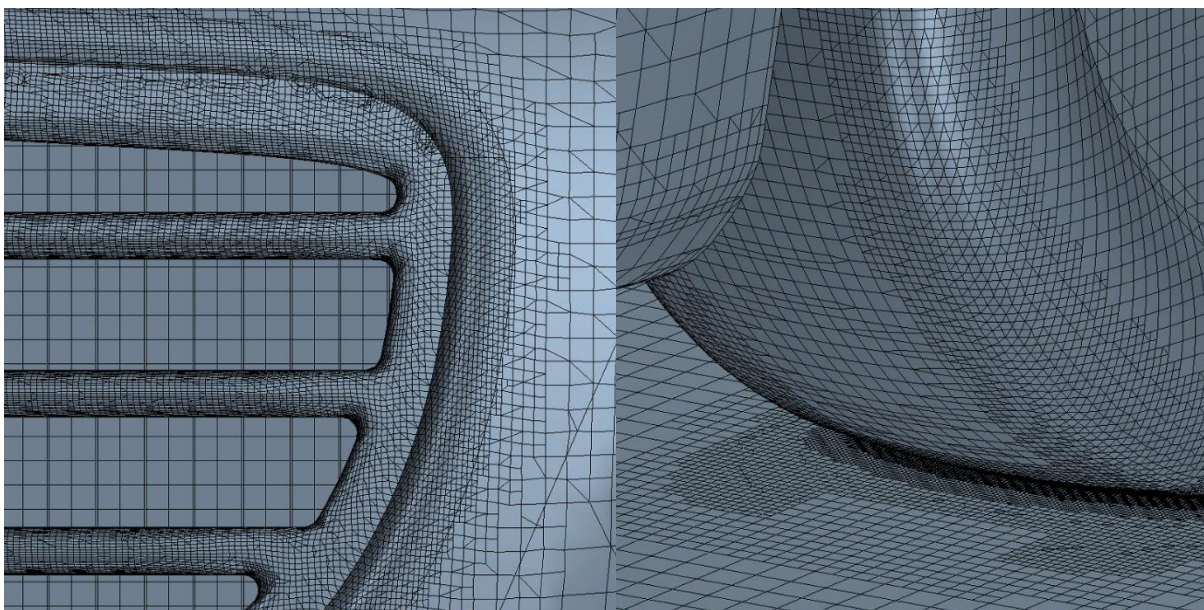
Obr. 27 Súradné systémy vozidla

5.3 NASTAVENIE SIETE

Pre vybudovanie kvalitnej objemovej siete je potrebné zaručiť dostatočnú kvalitu siete povrchovej, ktorá sa odvíja od kvality povrchu modelu. Pre skvalitnenie povrchu a vytvorenie povrchovej siete bol použitý prvok Surface remesher, pomocou ktorého boli pôvodné plochy modelu prevedené na trojuholníkovú sieť. Následne je tvorená objemová sieť, ktorá bola z dôvodu zaručenia vysokej kvality zvolená ako hexahedrál, pod položkou Trimmed cell mesher a pre tvorbu prizmatických buniek na povrchu modelu je použitý prvok Prism layer mesher.

5.3.1 ZÁKLADNÉ NASTAVENIA SIETE

V základnom nastavení siete má užívateľ možnosť voľby prevažne veľkostných parametrov siete. Prvotným nastavením siete je vzťažný rozmer Base size, ku ktorému sú následne ostatné zvolené parametre siete stanovené ako jeho percentuálna hodnota. V prípade zmeny tohto vzťažného rozmeru dôjde k automaticky k úprave ostatných parametrov na základe ich percentuálneho podielu. Následným definovaním ostatných parametrov dochádza k úpravám veľkosti siete v daných medziach. Pod položkou Target surface size je nastavená hodnota veľkosti povrchovej siete, ktorú sa mesher snaží primárne dosiahnuť. Ďalej pod položkou Minimum surface size je nastavená hodnota minimálnej prípustnej veľkosti povrchovej siete, čo umožní zjednodušenie malých hrán, ktorých rozmery sa nachádzajú pod touto hodnotou. Pre zabezpečenie jednotných buniek na povrchu modelu je použitý Prism layer mesher, ktorý vytvorí zhodné bunky na povrchu modelu v požadovaných vrstvách a o zadanej hrúbke.

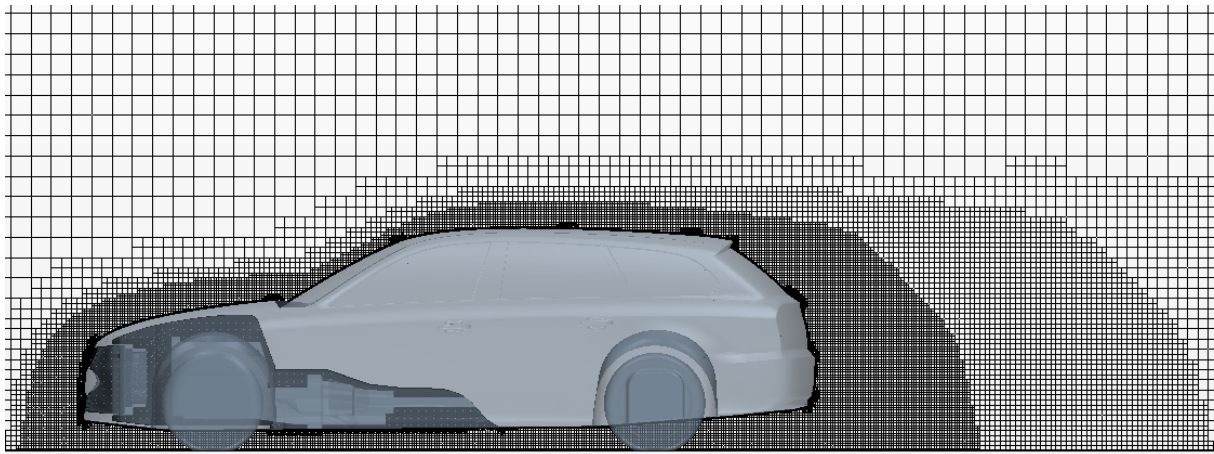


Obr. 28 Detaily povrchovej siete modelu

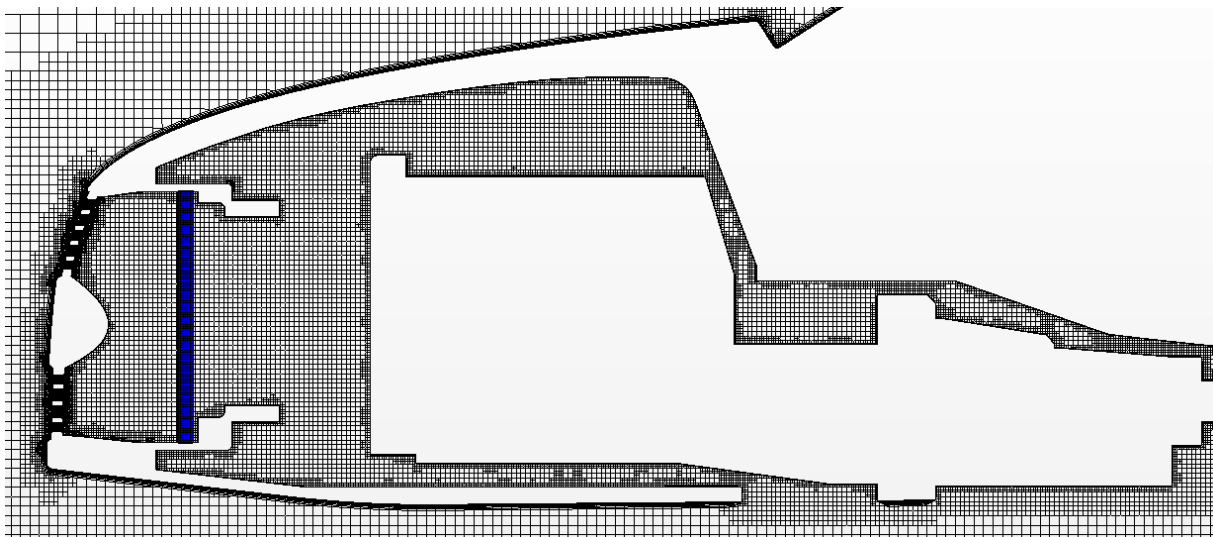
5.3.2 LOKÁLNE NASTAVENIA SIETE

V lokálnom nastavení siete sú nastavované parametre siete pre jednotlivé oblasti modelu, v ktorých je potrebné napríklad dodatočné zjemnenie siete. To sa týka oblastí, v ktorých bude sústredená pozornosť vzhľadom na riešenie a v ktorých sa predpokladajú zmeny v prúde. Konkrétne sa to týka v prvom rade oblasti motorového priestoru, blízkej oblasti vozidla, úplavu za vozidlom a oblastí v okolí kolies vozidla. Pomocou prvku Surface control bola zmenená veľkosť siete na povrchu prednej masky vozidla, motorového priestoru, kolies

a taktiež plochách tunela. Následne pomocou prvku Volumetric control bola upravovaná veľkosť objemovej siete v motorovom priestore a v okolí vozidla, od najnižšej hodnoty po najvyššiu v závislosti na vzdialenosti od vozidla. Volené boli vždy celočíselné delitele maximálnej veľkosti bunky a to v piatich jednotlivých krokoch, aby bola zabezpečená plynulá náväznosť susediacich buniek rozdielnej veľkosti. K tvarovaniu oblastí zjemnenia siete bol použitý prvok Transform, ktorý na základe zvolenej geometrie vozidla vytvorí novú oblasť, ktorú je možné upraviť do ľubovoľných rozmerov a smerov. Následne boli upravené hodnoty prizmatických vrstiev v motorovom priestore a na povrchu výmenníku, kde boli obmedzené len na jednu prizmatickú vrstvu.



Obr. 29 Objemová sieť v okolí vozidla



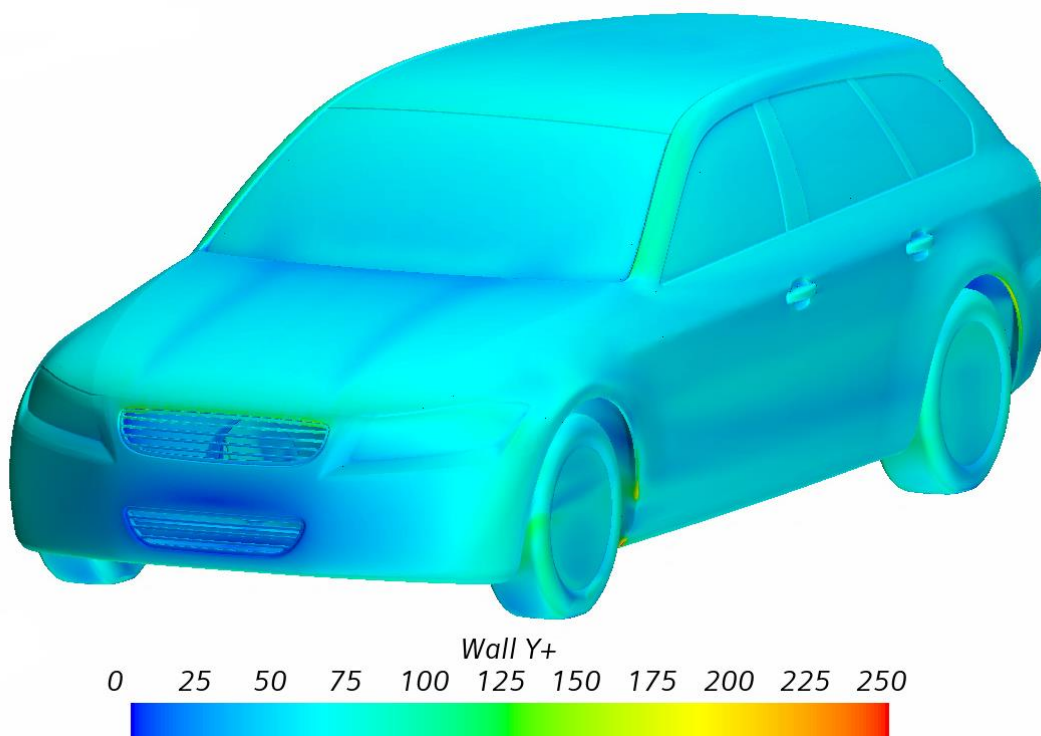
Obr. 30 Objemová sieť v motorovom priestore

5.3.3 KONTROLA SIETE A MEDZNEJ VRSTVY

Presnosť výsledku simulácie je priamo závislá na kvalite výpočtovej siete. Kvalita siete ovplyvňuje ako presnosť výpočtu, tak aj rýchlosť jeho konvergencie. Pri veľmi zlej kvalite siete však ku konvergovaní nemusí dôjsť vôbec a v prípade, že softvér vyhodnotí sieť ako

invalidnú, nebude uskutočnený ani samotný výpočet. Sieť je kontrolovaná pomocou nástroja Mesh Diagnostic, ktorý vytvorí report s vlastnosťami a zhodnotením kvality siete. Hlavnými vzťažnými údajmi sú Face validity, Volume change a Skewness angle. Softvér taktiež v reporte vypíše presný počet a percentuálne zastúpenie zhodnotených buniek v danom regióne. Face validity určuje kvalitu bunky na základe normál jej stien, ktoré v prípade kvalitnej bunky smerujú von, od jej centra. Hodnota Face validity <1 znamená nekvalitné bunky, v prípade hodnoty <0.5 sú to bunky so záporným objemom. Kvalita podľa Volume change je určovaná na základe pomeru objemu bunky a jej susediacej bunky. Hodnota Volume change $=1$ udáva, že objem bunky je adekvátny k objemu bunky susediacej. Za nekvalitné bunky sú považované tie s hodnotou <0.01 . V prípade veľkých rozdielov v objemoch môže dôjsť k nepresnostiam a nestabilite výpočtu. Skewness angle určuje kvalitu buniek na základe uhlu normály steny bunky a spojnice centier dvoch susediacich buniek. Bunky s hodnotou uhlu $>85^\circ$ sú považované za nekvalitné. Celkový počet buniek siete nepresahuje 9 000 000, pričom pomer nekvalitných buniek je pod 0,002 %.

Pri použití stenových funkcií je nutná kontrola výšky prvej bunky medznej vrstvy pre overenie adekvátnosti rozsahu vzdialeností y^+ pre ich správnu funkciu. Pre modelovanie medznej je použitý prístup Two-Layer All y^+ , ktorý je dostupný pre daný dvojvrstvový model turbulencie, a na rozdiel od ostatných prístupov nie je obmedzený len na určité spektrum Reynoldsových čísiel, a vďaka zmiešanému prístupu umožňuje správnu funkciu aj pri rozdielnej hustote siete pri povrchu modelu. K výraznejším zmenám hodnôt veličiny y^+ dochádza v oblastiach stagnácie prúdu alebo výrazných zmien prúdenia. Hodnoty veličiny y^+ sú v rozmedzí 0 až 250, pričom pre optimálnu funkciu stenových funkcií je prijateľná hodnota veličiny stanovená na $30 < y^+ < 300$, avšak použitý prístup akceptuje aj hodnoty $y^+ < 30$ a aj pri nich zabezpečuje dostatočne presné výsledky [20].

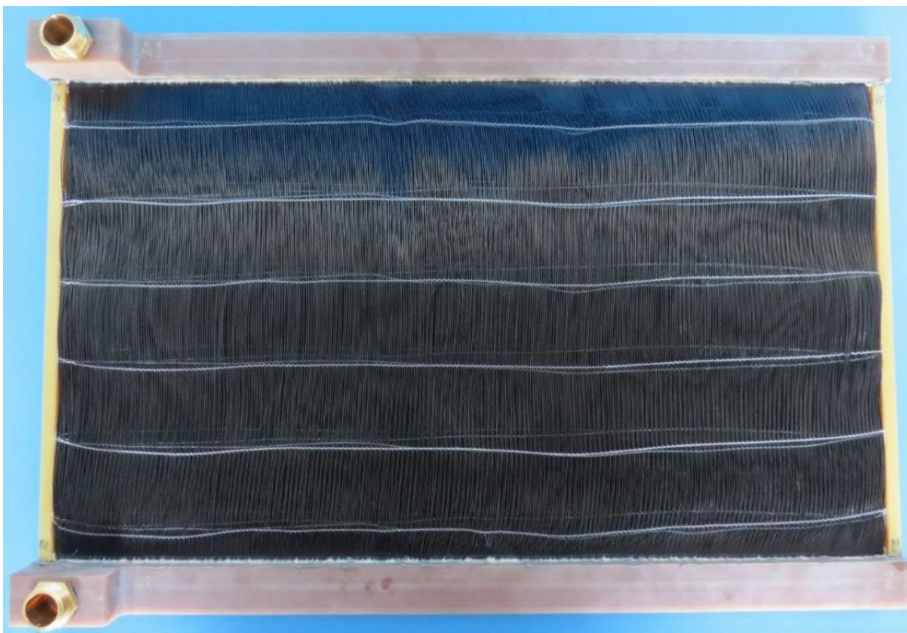


Obr. 31 Hodnoty y^+ na povrchu vozidla

5.4 PARAMETRE VÝMENNÍKOV

Predmetom práce je porovnanie konvenčného výmenníka s výmenníkom s vyššou tlakovou stratou. Konvenčný výmenník je v tomto prípade zastúpený bežne používaným hliníkovým výmenníkom, ktorý nájde zastúpenie v každom bežnom motorovom vozidle. Konštrukcia tohto výmenníka pozostáva z plochých hliníkových tenkostenných trubiek, ktoré sú oddelené vloženým rebrovaním.

Výmenník s vyššou tlakovou stratou je zastúpený polymérovým výmenníkom. Výmenníky tohto typu nájdu využitie prevažne v pracovných oblastiach, kde hrozí riziko zvýšenej oxidácie alebo iné komplikácie spojené s chemikáliami, ktoré neumožnia použitie hliníkového výmenníka. Motiváciou pre použitie tohto výmenníka v automobiloch sú jeho výhody v porovnaní s konvenčným výmenníkom. Podľa práce [24], ktorá sa zameriava na porovnanie vlastností týchto dvoch typov výmenníkov, polymérový výmenník je schopný zaručiť výraznú úsporu hmotnosti až o 30%, pričom je schopný dosahovať porovnateľné vlastnosti v oblasti prenosu tepla. V istých rýchlostiach prúdenia vzduchu a taktiež prietoku kvapaliny cez výmenník dokonca dosahuje lepších hodnôt tepelného výkonu ako konvenčný výmenník. Tento konkrétny skúmaný výmenník bol navrhnutý a vyrobený v Laboratóriu prenosu tepla a prúdenia VUT Brno. Jeho konštrukcia pozostáva z 12 240 dutých polymérových vlákien s dĺžkou 480 mm. Vonkajší priemer vlákien je 0,8 mm a vnútorný priemer 0,64 mm, s možnou variabilitou priemeru 5%, vzhľadom na výrobný proces, ktorý v tomto prípade predstavuje výrobu týchto vlákien ťahaním. Tieto vlákna sú následne v jednotlivých zväzkoch uložené v 34 vrstvách. Konštrukciu tohto výmenníka môžeme vidieť na obrázku nižšie.



Obr. 32 Prototyp polymérového výmenníku [24]

Základnými parametrami výmenníkov, ktoré sú potrebné pre ich simuláciu v softvéri Star CCM+ sú rýchlosť prúdenia vzduchu cez výmenník v a na nej závislá tlaková strata Δp . Z tejto závislosti je následne potrebné určiť parametre priepustnosti média, a to porézny odpor zotrvačnosti, vyjadrený parametrom P_i , a porézny odpor viskozity, vyjadrený parametrom P_v .

Tieto parametre sa vyskytujú ako premenné polynómu druhého stupňa, ktorý vyjadruje závislosť tlakovej straty na rýchlosti prúdenia a je určený rovnicou:

$$\Delta p = L \cdot (P_i \cdot v^2 + P_v \cdot v) \quad (16)$$

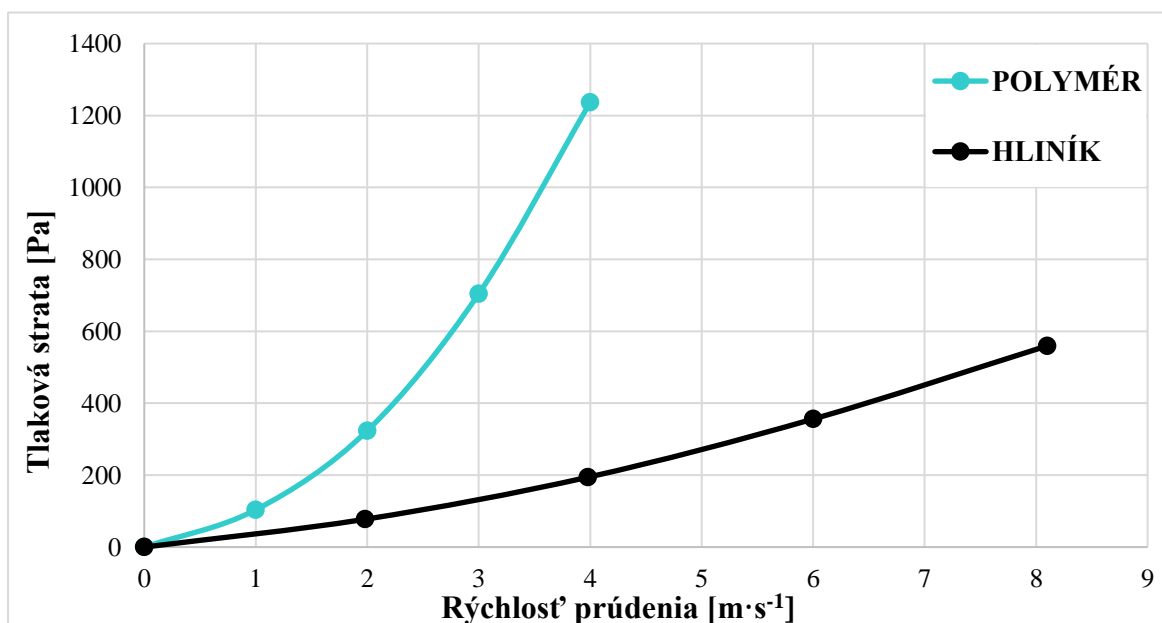
Kde:

L hrúbka výmenníku [m]

Vstupné hodnoty rýchlosti prúdenia a tlakovej straty pre výmenníky konkrétneho materiálu sú uvedené v *Tabuľka 1*. Na základe týchto hodnôt sú následne zostrojené grafické závislosti tlakovej straty pre daný typ výmenníku, viď *Graf 1*. Na zostrojených krivkách tlakovej straty si môžeme všimnúť výrazný rozdiel v ich závislosti, kde krivka vyjadrujúca tlakovú stratu polymérového výmenníku narastá v závislosti na rýchlosti omnoho prudšie, ako krivka hliníkového výmenníku, a teda evidentne reprezentuje výmenník s vyššou tlakovou stratou.

Tabuľka 1 : Vstupné hodnoty výmenníkov

Materiál výmenníku			
Polymér		Hliník	
Rýchlosť prúdenia [m·s ⁻¹]	Tlaková strata [Pa]	Rýchlosť prúdenia [m·s ⁻¹]	Tlaková strata [Pa]
1.0	104	2.0	77
2.0	324	4.0	194
3.0	704	6.0	356
4.0	1236	8.1	560



Graf 1 : Závislosť tlakovej straty na rýchlosti prúdenia

Výstupom zadaných vstupných hodnôt výmenníkov a daného polynómu sú okrem kriviek tlakových strát aj potrebné koeficienty priepustnosti pre jednotlivé výmenníky, ich hodnoty sú uvedené v *Tabuľka 2*.

Tabuľka 2 : Hodnoty koeficientov priepustnosti

	Polymér	Hliník
P_i [kg·m ⁻⁴]	2880,5	207,4
P_v [kg·m ⁻³ ·s ⁻¹]	810,1	1131,3

5.5 OKRAJOVÉ PODMIENKY

Nastavenie okrajových podmienok prebieha v súlade s čo možno najpresnejším simulovaním reálnych podmienok. Ťažisko spočíva v nastavení výpočtového modelu, jednotlivých regiónov, ktoré reprezentujú dané prostredia modelu a následne nastavenia Interface, ktoré definujú vlastnosti spojenia výmenníku a okolitého prostredia.

5.5.1 NASTAVENIE REGIÓNOV

Voľba nastavenia jednotlivých regiónov umožňuje určenie fyzikálnych vlastností danej oblasti. Tejto možnosti je potrebné využiť samostatne pre výmenník a ostatné časti modelu, keďže základným princípom pri simulácii výmenníku je jeho uvedenie ako porózneho regiónu. Okrajové podmienky vstupnej a výstupnej plochy výmenníku sú nastavené ako Wall, čiže steny. Ekvivalent týchto stien je vytvorený aj v samotnom modeli vozidla, čo umožní vytvorenie spojenia na rozhraní týchto inak samostatných modelov a ich regiónov cez spomínaný prvok Interface, čo následne umožní prechod hmoty, energie a ostatných veličín medzi týmito dvoma regiónmi. V regióne výmenníku sú taktiež nastavené hodnoty porézneho odporu zotrvačnosti a porézneho odporu viskozity pre daný typ výmenníku, ktorým sa bližšie venuje predošlá kapitola *Parametre výmenníkov*.

Samotný model vozidla spolu s tunelom tvoria jeden región, ktorý je nastavený ako Fluid Region, čiže ako región tekutiny. V okrajových podmienkach modelu vozidla sú všetky jeho plochy nastavené ako Wall. Rovnako je nastavená aj spodná plocha tunelu. Pre simuláciu rotácie kolies je použitá podmienka Wall Relative Rotation. Pre vstupnú plochu tunelu je nastavená podmienka Velocity Inlet, ktorá prezentuje vstup do tunela pri užívateľom zadanej rýchlosti prúdenia. Pre zadnú stenu tunela je použitá podmienka Pressure Outlet, ktorá predstavuje výstup z tunela. Kombinácia týchto dvoch podmienok pre vstup a výstup z domény zaručuje stabilné riešenie simulácie.

Tabuľka 3 Okrajové podmienky regiónu výmenníka

Výmenník – Porous Region		
Časť regiónu	Typ okrajovej podmienky	Počiatočná hodnota
Vstup	Wall	Interface 1
Výstup	Wall	Interface 2

Tabuľka 4 Okrajové podmienky regiónu vozidla

Vozidlo/tunel – Fluid Region		
Časť regiónu	Typ okrajovej podmienky	Počiatočná hodnota
Vozidlo – Plochy	Wall	-
Vozidlo – Kolesá	Wall Relative Rotation	129,63 rad/s
Vozidlo – Výmenník – Vstup	Wall	Interface 1
Vozidlo – Výmenník – Výstup	Wall	Interface 2
Tunel – Vstup	Velocity Inlet	140 km/h
Tunel – Výstup	Pressure Outlet	-
Tunel – Cesta	Wall Relative Velocity	140 km/h
Tunel – Rovina symetrie	Symetry Plane	-
Tunel – Steny	Symetry Plane	-

5.5.2 NASTAVENIE FYZIKÁLNEHO MODELU

Fyzikálny model simulácie je nastavovaný pod položkou Continua, spolu so vstupnými parametrami daného média. Nastavené sú parametre samotného riešiča a to model turbulencie, typ prúdenia, spôsob tvorby medznej vrstvy i typ prúdiaceho média. Médium je v tomto prípade vzduch, riešič bol zvolený ako Realizable K-Epsilon, spolu so stenovými funkciami pri tvorbe medznej vrstvy.

Tabuľka 5 Nastavenie riešiča

Riešič	
Model	Nastavenie
Model hustoty	Konštantná hustota
Spôsob riešenia prúdenia	Coupled flow
Médium	Plyn – vzduch
Viskózný model	Turbulentný
Model turbulencie	Realizable K – Epsilon two-layer
Tvorba medznej vrstvy	all y+
Premenlivosť prúdenia v čase	Steady

Tabuľka 6 Vstupné hodnoty média

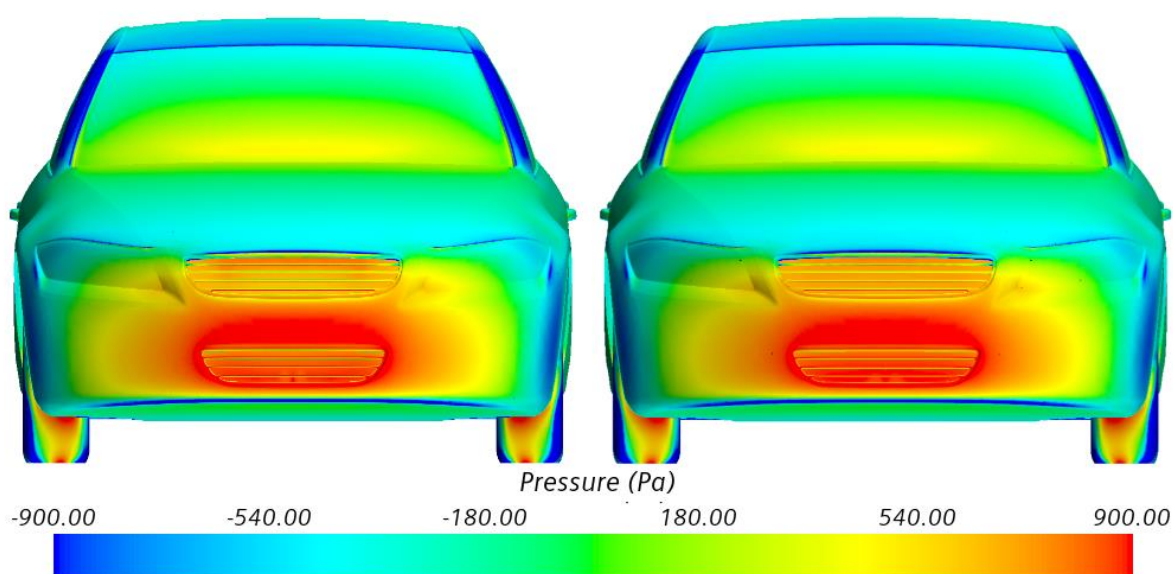
Médium – Vzduch	
Veličina	Hodnota
Hustota	1,225 kg/m ³
Dynamická viskozita	1,8558·10 ⁻⁵ Pa·s
Referenčný tlak	101325 Pa
Počiatočný tlak	0 Pa
Počiatočná rýchlosť	140 km/h

5.6 ZÁZNAM ÚDAJOV

Pre vyhodnocovanie simulácie softvér ponúka priamy záznam požadovaných veličín, ich sledovanie a ukladanie počas celej doby každého iteračného kroku, a následne ich zobrazenie v grafoch. Jednotlivé sledované veličiny ako sily, momenty, prietok sú zadávané pod položkou Reports. Následne sú tieto veličiny vzorkované a ukladané počas riešenia simulácie pomocou prvku Monitors. Sledovanie reziduálov je pod touto položkou vytvorené automaticky. Vybrané veličiny je následne možné vyniesť do grafov v prvku Plots, a sledovať ich priebeh aj v reálnom čase počas prebiehajúceho výpočtu. Pre sledovanie vlastností a priebehu prúdenia v rezoch v okolí vozidla sú vytvorené rezy v rovinách X, Y a Z pod položkou Derived parts.

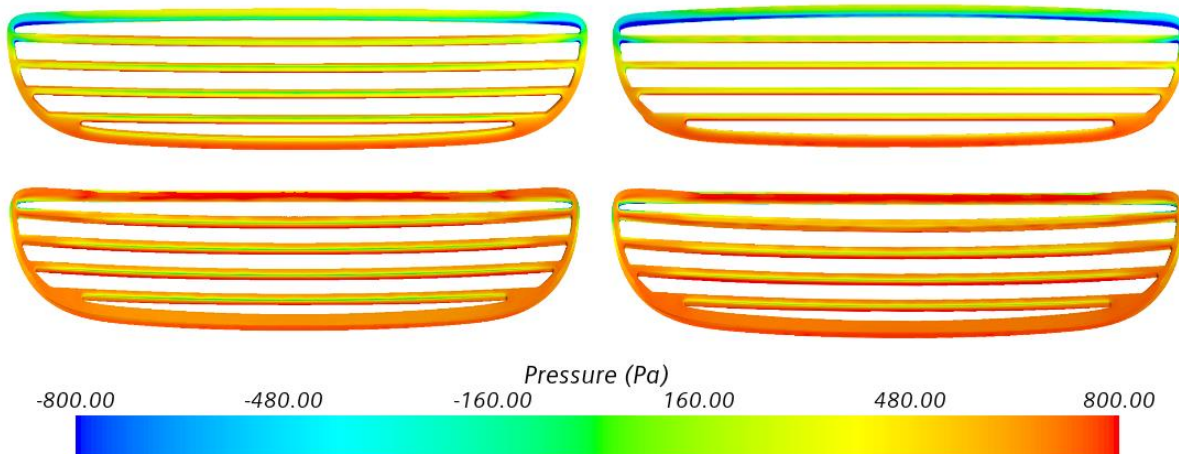
6 VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV SIMULÁCIÍ

Na základe získaných výsledkov dvoch simulácií je možné prikrčiť k ich vzájomnému porovnaniu. Na *Obr. 33* je znázornené rozloženie tlaku na prednej časti oboch modelov vozidiel. K najväčšiemu rozdielu tlakov dochádza priamo v horných častiach vrchnej mriežky vozidla a následne nadväzujúcej prednej časti kapoty, kde v prípade modelu s polymérovým výmenníkom sú hodnoty tlaku v tejto oblasti nižšie. Vysoké hodnoty tlaku na prednom nárazníku v dôsledku najväčšieho náporu vzduchu v tejto oblasti sú približne rovnaké, avšak už z tohto pohľadu je zrejma vyššia hodnota tlaku na polymérovom výmenníku. Práve z týchto zistení vyplýva, že k najväčším zmenám prúdenia a tlaku dochádza práve v hornej prednej časti vozidla a v oblasti pred výmenníkom a následne za ním, prúdenie v okolí ostatných častí vozidla zostáva prevažne bez výrazných zmien.



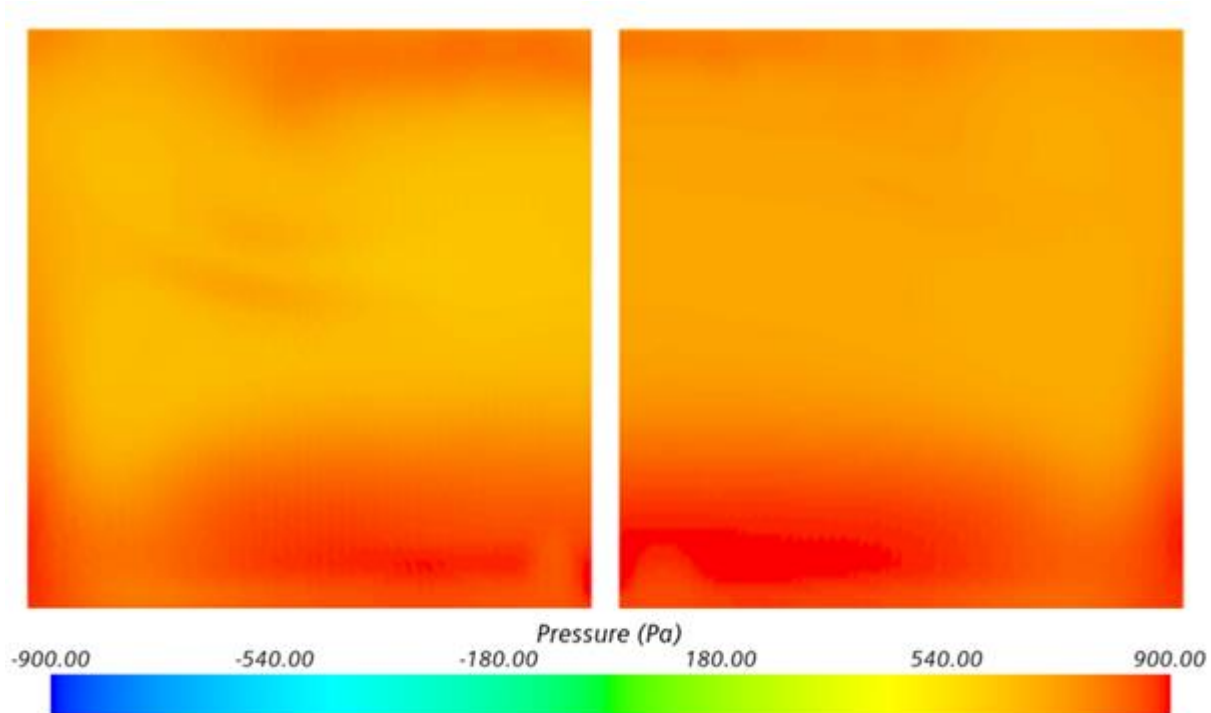
Obr. 33 Rozloženie tlaku na povrchu vozidla, model s hliníkovým výmenníkom (vľavo), model s polymérovým výmenníkom (vpravo)

Pri bližšom pohľade na mriežky jednotlivých modelov si všimneme výraznejšie rozdiely v pôsobiacich tlakoch na ich povrchu. V prípade modelu s hliníkovým výmenníkom dochádza k výraznejšiemu poklesu tlaku v horných častiach mriežky, smerom k jej krajom. Naopak pri modeli s polymérovým výmenníkom sa táto oblasť nízkeho tlaku výraznejšie rozširuje aj smerom do stredu vrchnej časti mriežky. V prednej časti vozidla a jej dolnej časti následne dochádza k zvýšenej stagnácii prúdenia a teda aj k zvýšeniu pôsobenia tlaku na túto oblasť. Následne znížená rýchlosť prúdenia aj pred polymérovým výmenníkom je evidentná z rozloženia tlaku na vnútornej strane mriežok, kde je v tomto prípade celoplošne zvýšená hodnota tlaku na povrch mriežky v porovnaní s hliníkovým modelom. Vo všeobecnosti tieto rozdiely naznačujú zmeny v charaktere prúdenia najmä v hornej, ale aj spodnej časti mriežky, čo môže mať jednak pozitívny, ale aj negatívny vplyv na aerodynamický odpor. Rozloženie tlaku na mriežkach jednotlivých modelov je znázornené na *Obr. 34*.



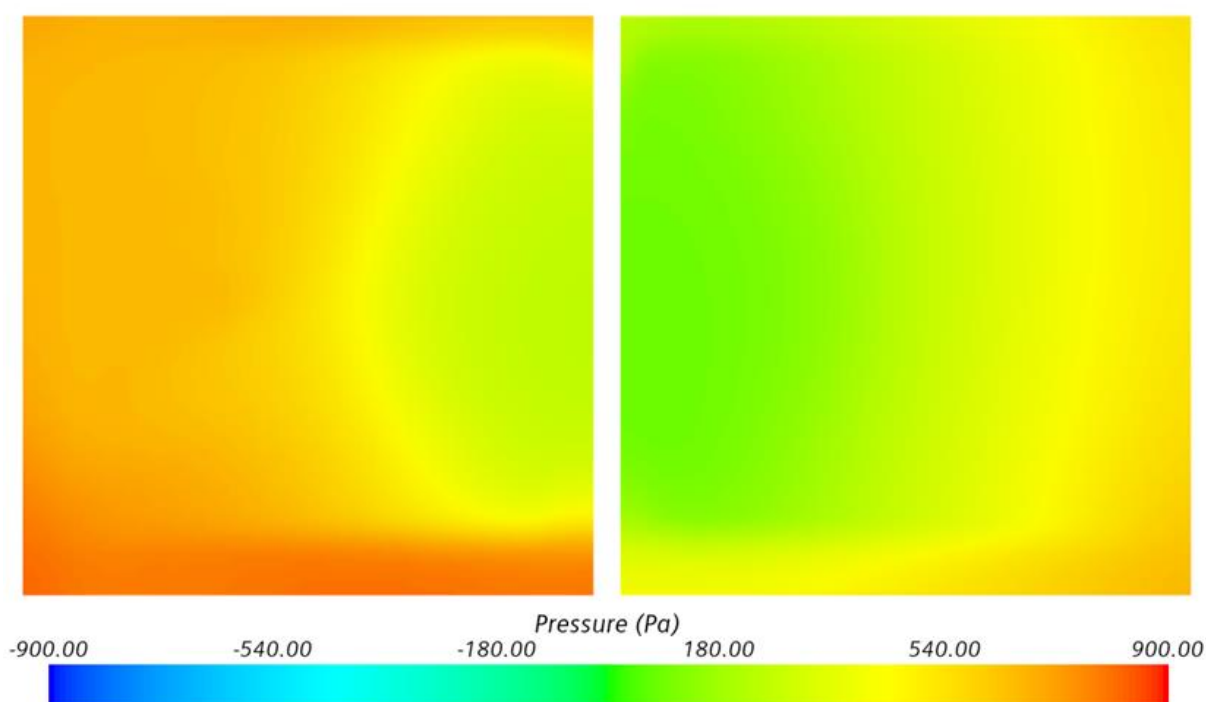
Obr. 34 Rozloženie tlaku na mriežkach vozidla, model s hliníkovým výmenníkom (vľavo), model s polymérovým výmenníkom (vpravo), predná strana mriežky (hore), zadná strana mriežky (dole)

Predpokladané zvýšenie tlaku v oblasti pred výmenníkom sa potvrdzuje pri pohľade na rozloženie tlaku na vstupnej ploche výmenníkov, ktoré je znázornené na Obr. 35, zobrazená je vždy polovica každého z výmenníkov. Dochádza prevažne k celoplošnému zvýšeniu tlaku v prípade polymérového modelu oproti modelu hliníkovému. Počnúc od spodnej časti, kde dochádza k najväčšiemu náporu prúdiaceho vzduchu a následne dochádza k zvýšeniu tlaku aj na väčšine zvyšnej plochy výmenníka, avšak k istému poklesu tlaku dochádza v jeho hornej časti, čo signalizuje možnosť úniku tlaku z tejto oblasti, vzhľadom na charakter tlakovej straty výmenníka a jeho odpor proti prúdiacemu vzduchu.



Obr. 35 Rozloženie tlaku na vstupnej ploche výmenníkov, hliníkový model (vľavo), polymérový model (vpravo)

V dôsledku vysokého rozdielu závislostí tlakovej straty výmenníkov dochádza aj k značným zmenám tlaku pôsobiaceho na ich výstupnú plochu, čo vidíme na obr. V prípade hliníkového výmenníka je dôsledkom nižšej tlakovej straty podstatne vyšší tlak na celej jeho výstupnej ploche. Hodnoty tlaku sú najvyššie v jeho spodnej časti a postupne aj od okrajov pomerne nesúmerne klesajú smerom k jeho stredu. V prípade polymérového výmenníka sa jeho prudšie narastajúca tlaková strata prejavuje na výrazne nižších hodnotách tlaku na jeho výstupnej ploche. Tlak je taktiež najvyšší v spodnej časti a na jeho okrajoch, tu však dochádza k jeho rovnomernejšiemu rozloženiu na celej ploche v porovnaní s hliníkovým výmenníkom a taktiež následne klesaniu smerom k jeho stredu.

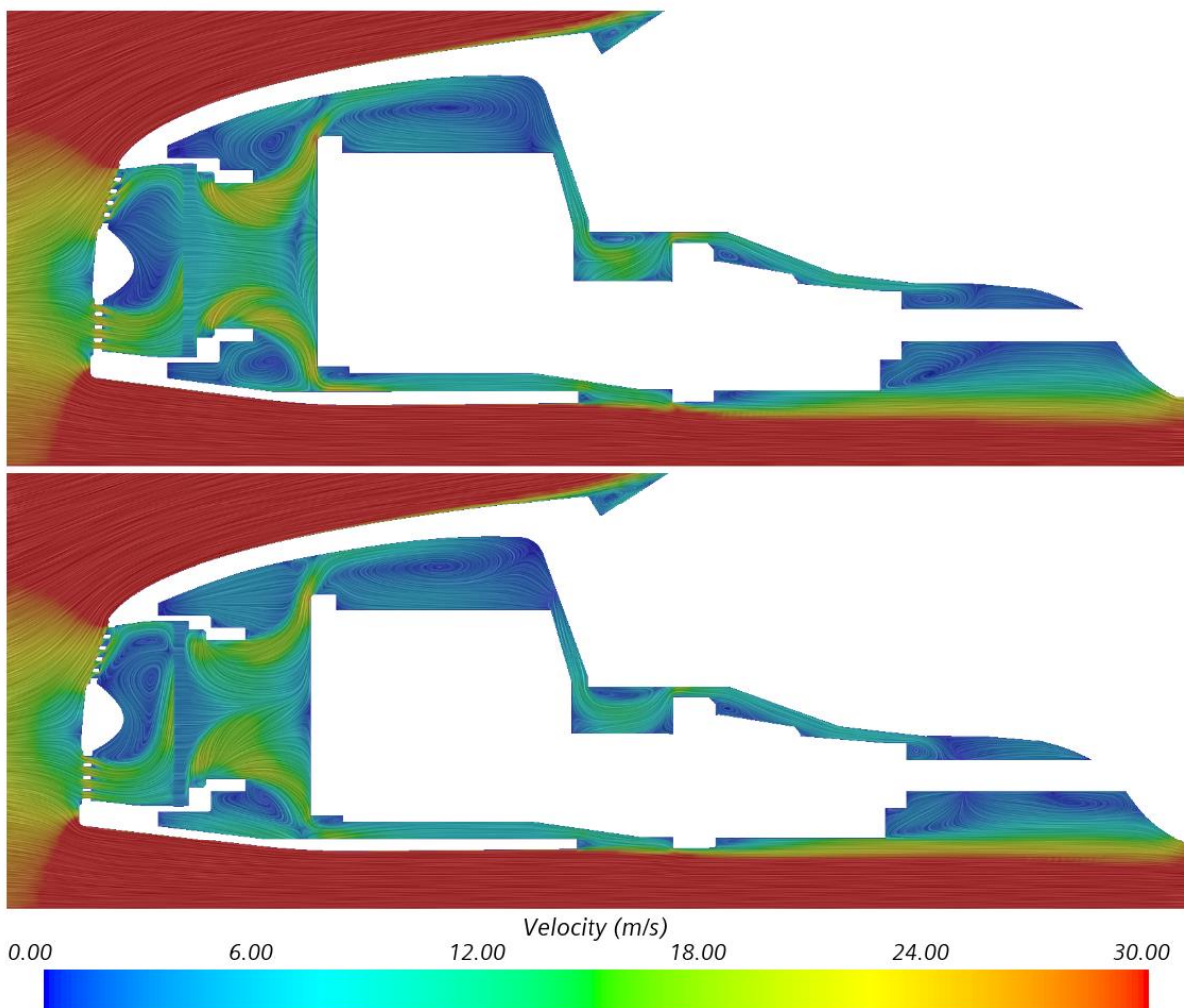


Obr. 36 Rozloženie tlaku na výstupnej ploche výmenníkov, hliníkový model (vľavo), polymérový model (vpravo)

Zmeny tlakovej straty výmenníka majú priamy súvis hlavne so zmenami prúdenia v motorovom priestore, ale aj pred samotným výmenníkom, čo sme mohli vidieť už v predchádzajúcom opise rozloženia tlaku na mriežkach jednotlivých vozidiel. V motorovom priestore, teda za výmenníkom je v prípade nižšej tlakovej straty hliníkového výmenníka prúdenie viac rozvinuté a dosahuje vyššej rýchlosti, ktorej sa dosahuje už pri samotnom prúdení cez výmenník. Následne po opustení výmenníku a jeho uloženia sa prúdenie zrýchľuje po obvodu kruhového výstupu, rozdeľuje sa a následne dochádza k obtekaniu motoru a tvorbe vírov nad a pod uloženími výmenníka. K ďalšiemu urýchleniu prúdenia dochádza kritických zúžených miestach v okolí spodnej časti motoru, medzi motorom a protipožiarnou prepážkou a medzi prevodovkou a jej tunelom.

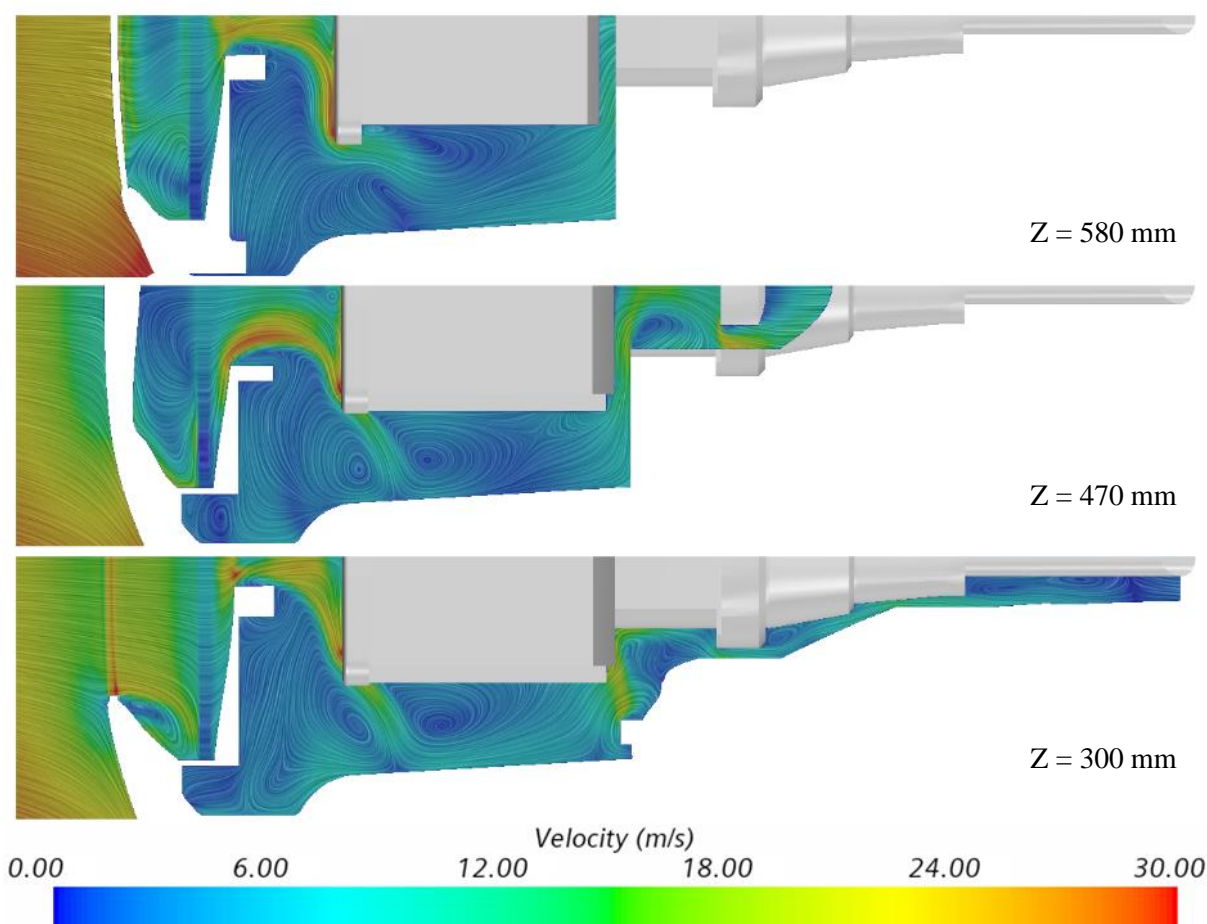
V prípade polymérového výmenníka má prúdenie obdobný charakter, ale už v samotnom výmenníku má nižšiu rýchlosť, a tento trend sa udržuje počas celej doby prechodu motorovým priestorom. Po výstupe z uloženia výmenníku je síce prúdenie rozdelené menej

rovnomerne v dôsledku väčšieho náporu prúdenia na spodnú časť výmenníku, avšak následne je jeho celková rýchlosť nižšia a nedochádza k tvorbe vírov nad uložením výmenníku. K ďalšiemu urýchleniu dochádza tak ako v prípade hliníkového modelu v kritických miestach medzi motorom a stenami motorového priestoru, ako aj medzi prevodovkou a jej tunelom. Na spôsobnú nerovnomernosť v prúdení za polymérovým výmenníkom má priamy vplyv prúdenie pred ním, kde má prevahu práve spodný prúd. Pri bližšom skúmaní zistíme, že v hornej časti masky dochádza k spätnému toku prúdiaceho vzduchu, ktorý má tendenciu z tejto oblasti vytekať späť pred vstup do mriežky, kde je následne strhávaný vonkajším prúdením okolo vozidla a tým prispieva k už spomínaným poklesom tlaku v tejto oblasti a následne v oblasti prednej časti kapoty. Tento unikajúci vzduch, ktorý nie je spotrebovaný na využitie potenciálu polymérového výmenníka a práve v tejto časti vozidla môže mať negatívny vplyv na jeho celkový aerodynamický odpor, stáva sa táto oblasť vhodným predmetom pre ďalšiu optimalizáciu tohto modelu.



Obr. 37 Rýchlostný profil prúdenia motorovým priestorom, hliníkový model (hore), polymérový model (dole)

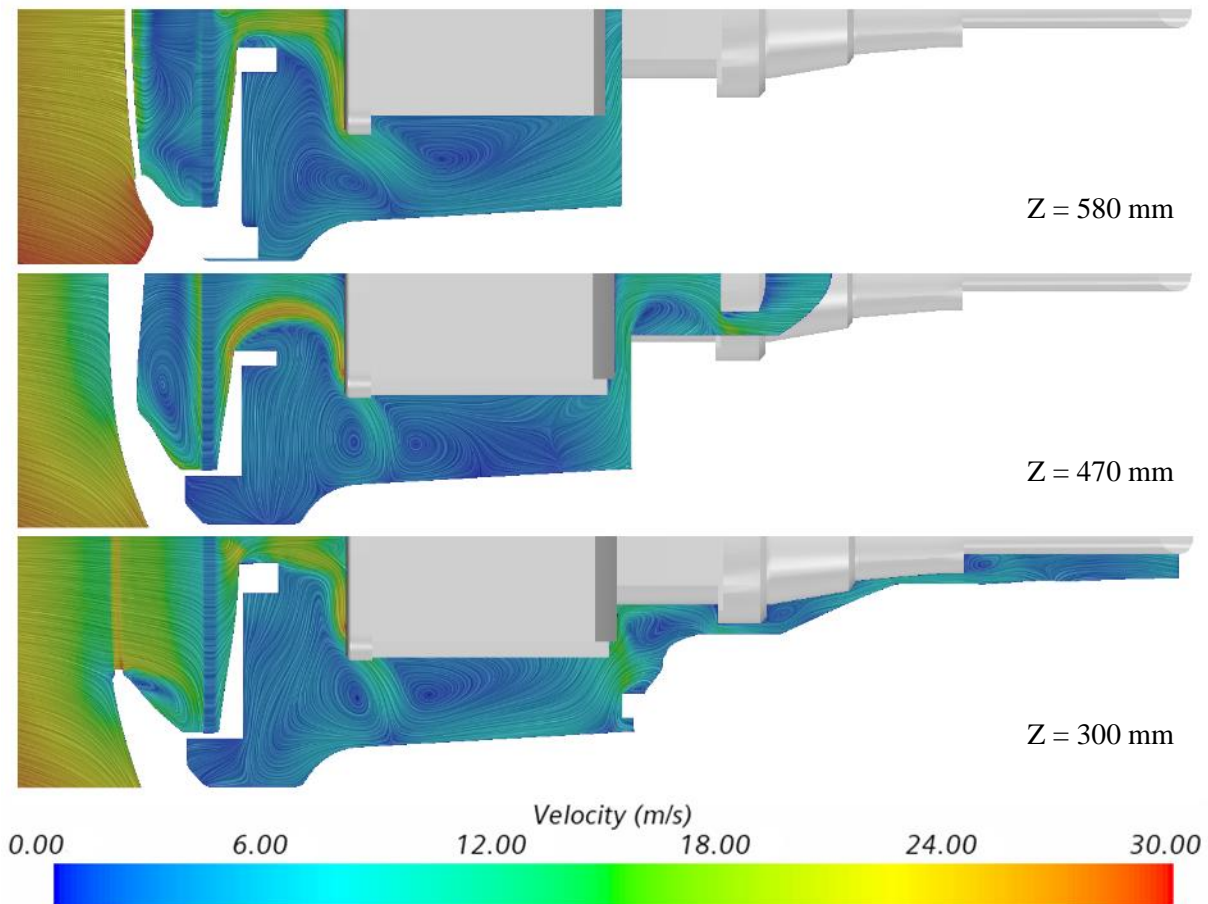
Na Obr. 38 vidíme rýchlostný profil z pohľadu zhora, v troch horizontálnych rovinách. V prípade hliníkového výmenníka nastáva k už spomínanej vyššej rýchlosti prúdenia cez samotný výmenník a následne k rozdeleniu prúdenia smerom k stranám motorového priestoru, kde prúdenie dosahuje najvyšších rýchlostí pri obtekaní motoru, najviac v prípade jeho vrchnej časti, a následne v časti strednej. Po obtečení motoru dochádza medzi motorom a stenami motorového priestoru k tvorbe vírov hlavne v spodnej polovici motorového priestoru, prúd vzduchu následne naráža na kritické miesta medzi prevodovkou a jej uložením, kde dochádza opäť k jeho urýchleniu, až následne opúšťa motorový priestor otvorom v podlahe vozidla.



Obr. 38 Rýchlostný profil prúdenia v motorovom priestore v horizontálnych rovinách, model s hliníkovým výmenníkom, zhora – 580 mm, 470 mm a 300 mm vo vzdialenosti od vozovky

Prúdenie v motorovom priestore v prípade polymérového výmenníka má prevažne obdobnú charakteristiku, avšak dochádza tu k istým zmenám v rýchlosti prúdenia v kritických miestach a tvorbe vírov. Prúdenie má nižšiu rýchlosť už od polymérového výmenníka a v tomto trende pokračuje aj ďalej v motorovom priestore. Členenie prúdenia cez motorový priestor je takmer totožné, s rozdielom menších maximálnych rýchlostí pri obtekaní motoru a prevodovky. Zmeny nastávajú aj v tvorbe vírov, ktoré sa v tomto prípade tvoria v celom rozsahu výšky motorového priestoru a dochádza k nim aj pred vstupom do výmenníka. Rýchlostné polia

prúdenia pre polymérový výmenník sú znázornené na *Obr. 39*, obdobne ako pre model s hliníkovým výmenníkom.

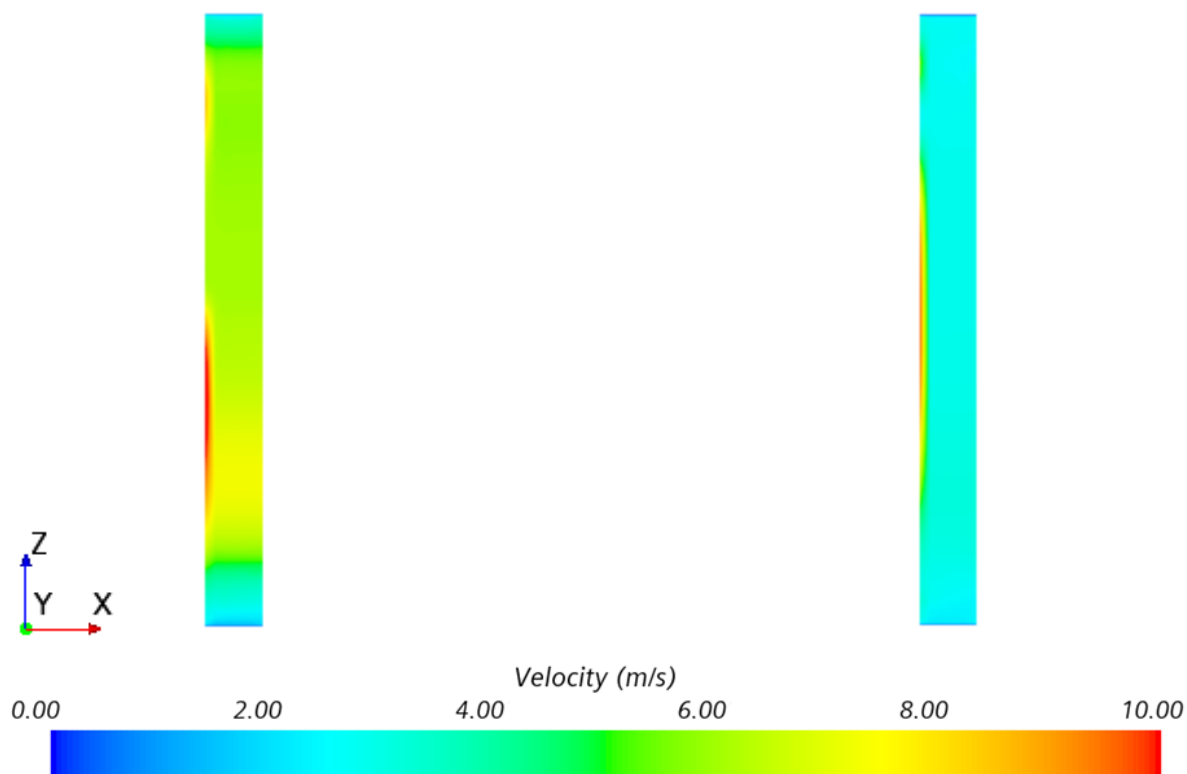


Obr. 39 Rýchlostný profil prúdenia v motorovom priestore v horizontálnych rovinách, model s polymérovým výmenníkom, zhora – 580 mm, 470 mm a 300 mm vo vzdialenosti od vozovky

V prípade prúdenia cez samotné výmenníky, ktoré sú hlavným činiteľom v dopade na následné prúdenie v motorovom priestore dochádza k práve najväčším rozdielom, ktoré sú evidentné už z počiatočných zadaných parametrov. V prípade hliníkového výmenníka je rýchlosť prúdenia najvyššia v jeho spodnej časti, kde sa nachádza oblasť najväčšieho náporu vzduchu prevažne zo spodnej vstupnej mriežky vozidla. Postupom cez výmenník dochádza k rozloženiu rýchlosti do širšieho poľa, ktorého pôsobnosť však zotrúva v spodnej polovici výmenníka. Vo vrchnej polovici výmenníka je rýchlosť prúdenia nižšia, keďže nápor vzduchu zo spodnej mriežky vozidla prevláda nad náporom z mriežky hornej.

V prípade polymérového výmenníka je podľa predpokladov rýchlosť prúdenia vzduchu výrazne nižšia a taktiež rovnomernejšie rozložená a nedochádza k tak výrazným rozdielom v jednotlivých častiach výmenníka. Ako v prípade hliníkového výmenníka však opäť prevláda vyššia rýchlosť prúdenia v jeho spodnej časti, nápor vzduchu zo spodnej mriežky má však výraznejší dopad a je viac dominantný, čo je spôsobené vyšším odporom výmenníka a už spomínaným únikom horného prúdu z vrchnej časti mriežky vozidla, ktorý je vytlačovaný

práve týmto spodným prúdom. Porovnanie rýchlosti prúdenia cez jednotlivé výmenníky je znázornené na Obr. 40.



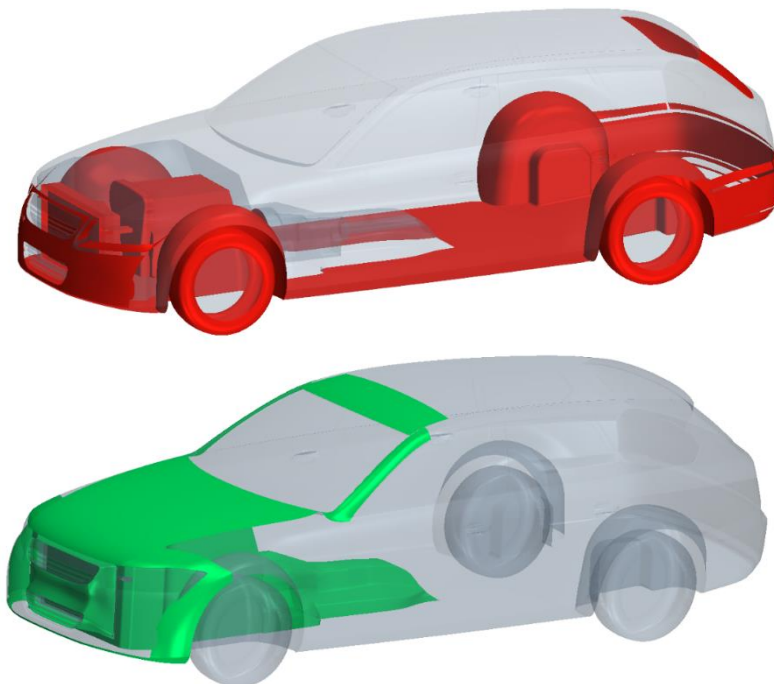
Obr. 40 Rýchlostný profil v rovine symetrie výmenníka, vľavo – hlinikový model, vpravo – polymérový model

6.1 ROZDIELY V PÔSOBNÍ AERODYNAMICKÉHO ODPORU

Hlavnými činiteľmi v príspevku k aerodynamickému odporu v prípade hliníkového modelu výmenníka sú v oblasti motorového priestoru uloženie výmenníka, vstupná plocha výmenníka a motor. Hlavnými prispievateľmi v častiach mimo motorového priestoru sú pneumatiky vozidla, podbehy, podlaha vozidla a hlavne predný nárazník. V pozitívnom smere dochádza k redukcii odporu na samotných stenách motorového priestoru, tuneli prevodovky a výstupnej ploche výmenníka. Mimo motorového priestoru sú to hlavne kapota, strecha, bočné časti predného nárazníka a A – stĺpik. Konkrétne hodnoty sú uvedené v *Tabuľka 7* a zobrazené na zodpovedajúcich častiach vozidla na *Obr. 41*.

Tabuľka 7 Negatívny a pozitívny prínos odporu hliníkového modelu

HLINÍK – Negatívny príspevok		HLINÍK – Pozitívny príspevok	
Časť vozidla	CDN	Časť vozidla	CDP
Predná pneumatika	0,0240	Tunel prevodovky	-0,0187
Zadná pneumatika	0,0166	Motorový priestor	-0,0636
Motor	0,0147	Kapota	-0,0122
Sahara	0,0824	Predná časť kapoty	-0,0226
Predný nárazník	0,1049	Predný nárazník bok	-0,0173
Zadný nárazník	0,0208	Predný spliter	-0,0138
Podlaha	0,0225	Blatník	-0,0142
Podbehy	0,0369	A – stĺpik	-0,0176
Zadné okno	0,0154	Strecha	-0,0232
Interface 1	0,1278	Interface 2	-0,0981

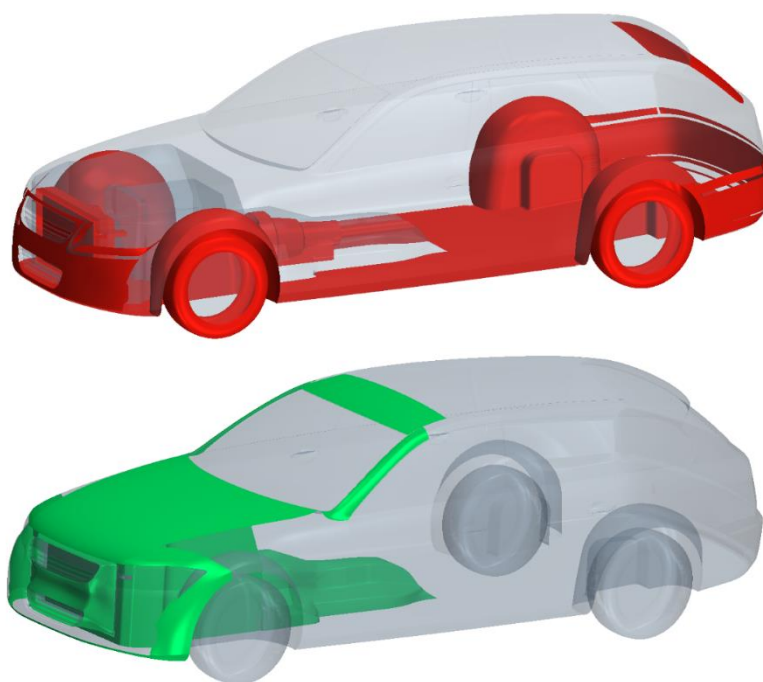


Obr. 41 Negatívny a pozitívny prínos odporu na častiach vozidla, hliníkový model, negatívny prínos (hore), pozitívny prínos (dole)

V prípade polymérového modelu sú hlavnými prispievateľmi k odporu motorového priestoru taktiež uloženie výmenníka, rolu motoru však tentokrát nahrádza teleso prevodovky, úloha vstupnej plochy výmenníka zostala zachovaná. Došlo k miernej úprave hodnôt odporu, konkrétne k zníženiu negatívneho prínosu uloženia výmenníka, naopak prínos vstupnej plochy výmenníku sa mierne zvýšil. Prínos ostatných častí vozidla zostal vo veľkej miere zachovaný, ak pomineme minimálne zmeny hodnôt v oblasti podbehov a podlahy vozidla. K zvýšeniu pozitívneho prínosu v porovnaní s hliníkovým modelom došlo hlavne na stenách samotného motorového priestoru a tuneli prevodovky. V oblastiach mimo motorového priestoru došlo k pozitívnym zmenám najmä v oblasti prednej časti kapoty.

Tabuľka 8 Negatívny a pozitívny prínos odporu polymérového modelu

POLYMÉR – Negatívny príspevok		POLYMÉR – Pozitívny príspevok	
Časť vozidla	CDN	Časť vozidla	CDP
Predná pneumatika	0,0240	Tunel prevodovky	-0,0276
Zadná pneumatika	0,0164	Motorový priestor	-0,0831
Prevodovka	0,0131	Kapota	-0,0125
Sahara	0,0664	Predná časť kapoty	-0,0236
Predný nárazník	0,1034	Predný nárazník bok	-0,0175
Zadný nárazník	0,0207	Predný spliter	-0,0143
Podlaha	0,0219	Blatník	-0,0144
Podbehy	0,0371	A – stĺpik	-0,0174
Zadné okno	0,0155	Strecha	-0,0232
Interface 1	0,1331	Interface 2	-0,0529

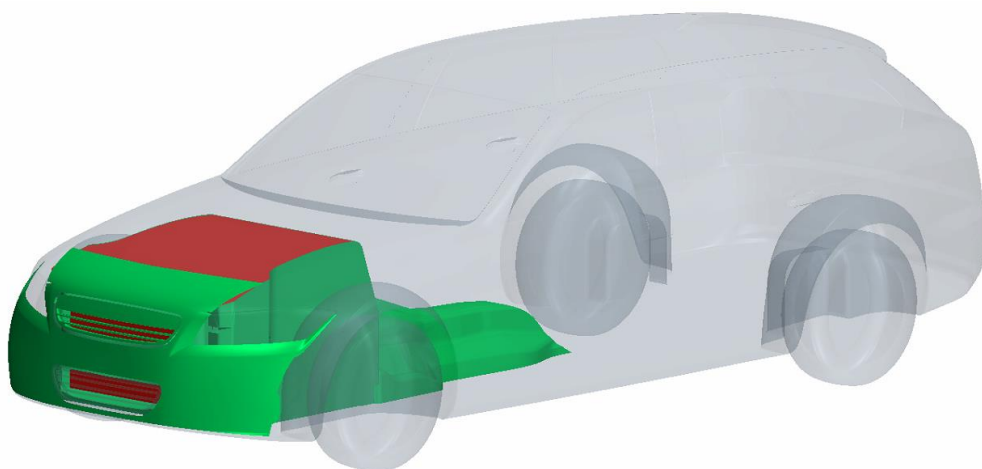


Obr. 42 Negatívny a pozitívny prínos odporu na častiach vozidla, polymérový model, negatívny prínos (hore), pozitívny prínos (dole)

Porovnanie výsledných rozdielov hodnôt odporov pôsobiacich na jednotlivé časti vozidiel hliníkového a polymérového modelu sú uvedené v *Tabuľka 9*. Najväčší pozitívny rozdiel pôsobiaceho odporu je zaznamenaný na uložení výmenníka, na stenách motorového priestoru a následne na samotnom motore, kde došlo k redukcii rýchlosti prúdenia v prípade polymérového modelu. V negatívnom smere sa odráža pôsobenie odporu na hornú časť motorového priestoru, kde v prípade polymérového modelu dochádza k výraznejšej tvorbe vírov v hornej časti motorového priestoru v porovnaní s hliníkovým modelom. Najväčší negatívny rozdiel zastupuje výstupná plocha polymérového výmenníka, ktorý je najvyšší spomedzi všetkých hodnôt a taktiež je negatívny rozdiel zaznamenaný aj na vstupnej ploche výmenníka. Konkrétne hodnoty sú uvedené v *Tabuľka 9*, graficky na zodpovedajúcich častiach vozidla sú následne znázornené na *Obr. 43*.

Tabuľka 9 Hlavné rozdiely odporu hliníkového a polymérového modelu

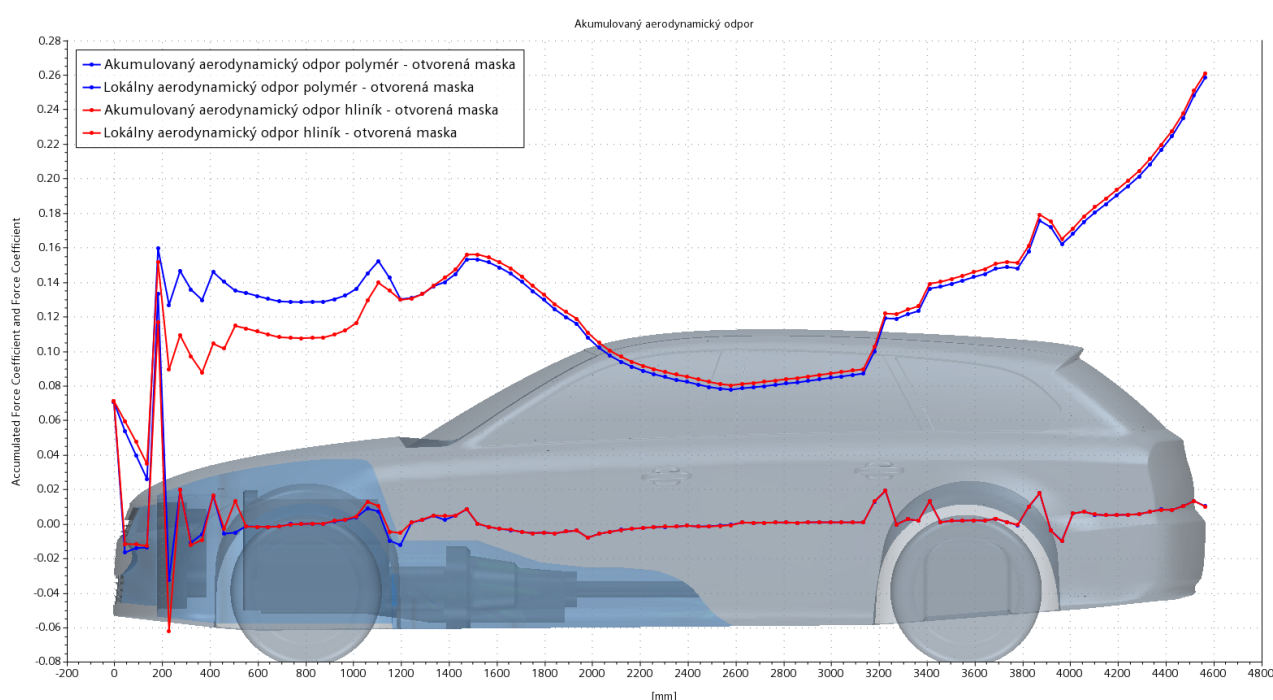
HLINÍK/POLYMÉR	
Časť vozidla	ΔC_D
Motor	-0,0116
Tunel prevodovky	-0,0088
Motorový priestor	-0,0195
Horná časť motorového priestoru	0,0100
Sahara	-0,0160
Predná časť kapoty	-0,0011
Predný nárazník	-0,0015
Maska	-0,0014
Interface 1	0,0052
Interface 2	0,0452



Obr. 43 Hlavné rozdiely v pôsobení aerodynamického odporu na časti vozidla

6.2 VÝSLEDNÝ AERODYNAMICKÝ ODPOR

Na Obr. 44 je zobrazený lokálny a akumulovaný aerodynamický odpor modelu s hliníkovým a polymérovým výmenníkom. Na lokálnom zobrazení odporu dochádza k prvému poklesu odporu polymérového modelu už na prednej maske vozidla, následne však odpor narastá na samotnom výmenníku. Ďalej lokálny odpor zodpovedá predošlým zisteniam, k jeho poklesu dochádza hlavne v častiach vozidla v okolí styku prúdiaceho vzduchu s motorom a následne v kritických miestach okolo motora, prevodovky a jej tunela. V nasledujúcich častiach vozidla je lokálny odpor z väčšej časti totožný s modelom s hliníkovým výmenníkom. Tieto zmeny sa v konečnom dôsledku prejavujú na znížení akumulovaného aerodynamického odporu, i keď sa stávajú dominantné až v oblasti za motorom vozidla, kde je do tejto fázy akumulovaný odpor modelu s hliníkovým výmenníkom nižší, predovšetkým vďaka nižším lokálnym odporom práve na výmenníku.



Obr. 44 Akumulovaný aerodynamický odpor

Výsledné hodnoty aerodynamického odporu a hmotnostného toku sú uvedené v tabuľke nižšie. Pri modeli s polymérovým výmenníkom došlo k zníženiu celkového aerodynamického odporu o $\Delta c_D = 0,0027$, a taktiež vzhľadom k charakteristike výmenníka aj k zníženiu jeho hmotnostného toku o $\Delta m' = 0,35 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Pomocou vzťahu (17) je určená stredná rýchlosť prúdenia danými chladičmi, ktorá je ďalej využitá v Obr. 46 na určenie ich tepelného výkonu.

$$v_m = \frac{m'}{A_c \cdot \rho} \quad (17)$$

Tabuľka 10 Výsledný aerodynamický odpor a hmotnostný tok

	Hliník	Polymér
c_D	0,2609	0,2582
$m' [\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$	1,3346	0,9846

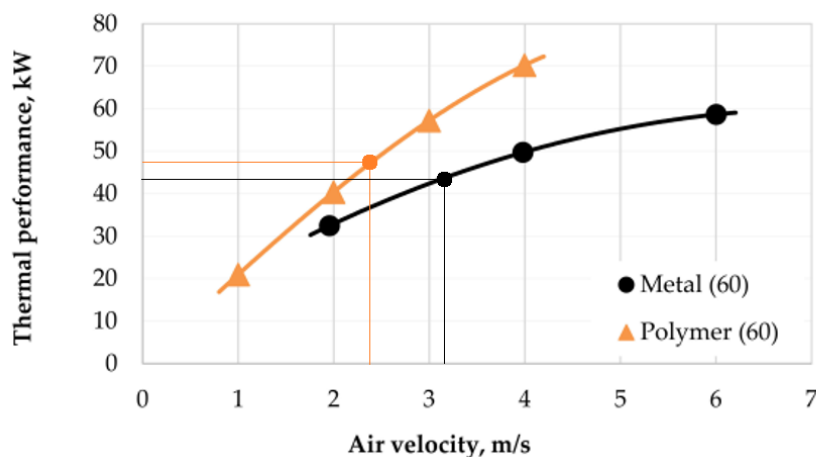
6.3 OPTIMALIZÁCIA MODELU S POLYMÉROVÝM VÝMENNÍKOM

Ako bolo zistené v simulácii modelu s otvorenou maskou, prúdiaci vzduch smerujúci cez hornú masku vozidla k výmenníku má tendenciu vo vrchnej časti masky obrátiť smer svojho prúdenia a vytekať smerom von, kde je následne strhávaný prúdením smerujúcim na prednú časť kapoty vozidla. Tento vzduch teda nie je využívaný priamo k prúdeniu cez výmenník a teda bolo pristúpené k zmene geometrie hornej masky, ktorá je znázornená na *Obr. 45*. Tu boli uzatvorené dva horné prietoky, čo približne zodpovedá 50% uzatvoreniu prietočnej plochy.



Obr. 45 Modifikovaná horná časť masky modelu *DrivAer*

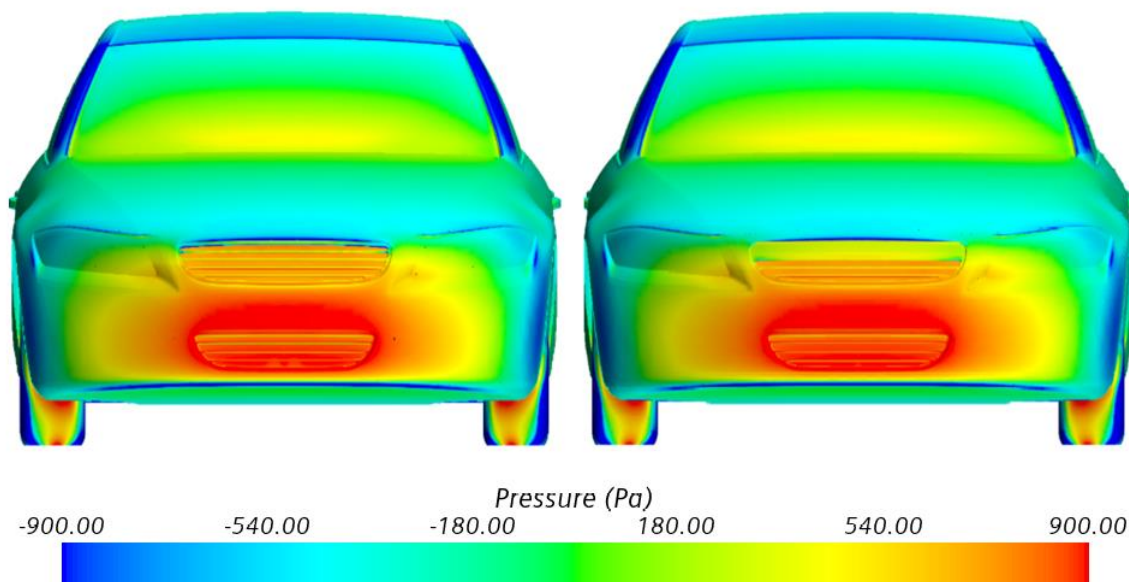
Predpokladom teda je usmernenie pritekajúceho vzduchu a zamedzenie jeho spätnému toku, aj vzhľadom na závislosti tepelnej výkonnosti výmenníkov, ktorá je znázornená na *Obr. 46* a hmotnostné prietoky cez výmenníky, je evidentný vyšší tepelný výkon polymérového výmenníka pri danej strednej rýchlosti prúdenia v porovnaní s hliníkovým, a zároveň by táto úprava mala zabezpečiť dodatočné zníženie aerodynamického odporu vozidla.



Obr. 46 Závislosť tepelného výkonu výmenníkov na rýchlosti prúdenia vzduchu [24]

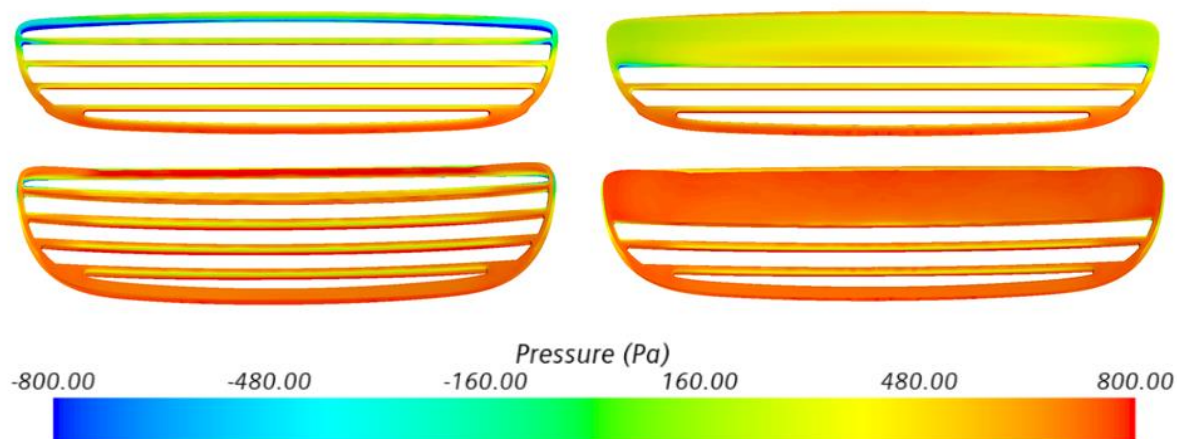
6.3.1 VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV OPTIMALIZOVANÉHO MODELU

Úpravou geometrie masky vznikajú isté zmeny v pôsobení tlaku hlavne v prednej časti kapoty. Tu dochádza vzhľadom na zmeny prúdenia k miernemu zmenšeniu oblasti s nízkym tlakom, ostatné oblasti vozidla okrem samotnej masky však zostávajú bez výrazných zmien.



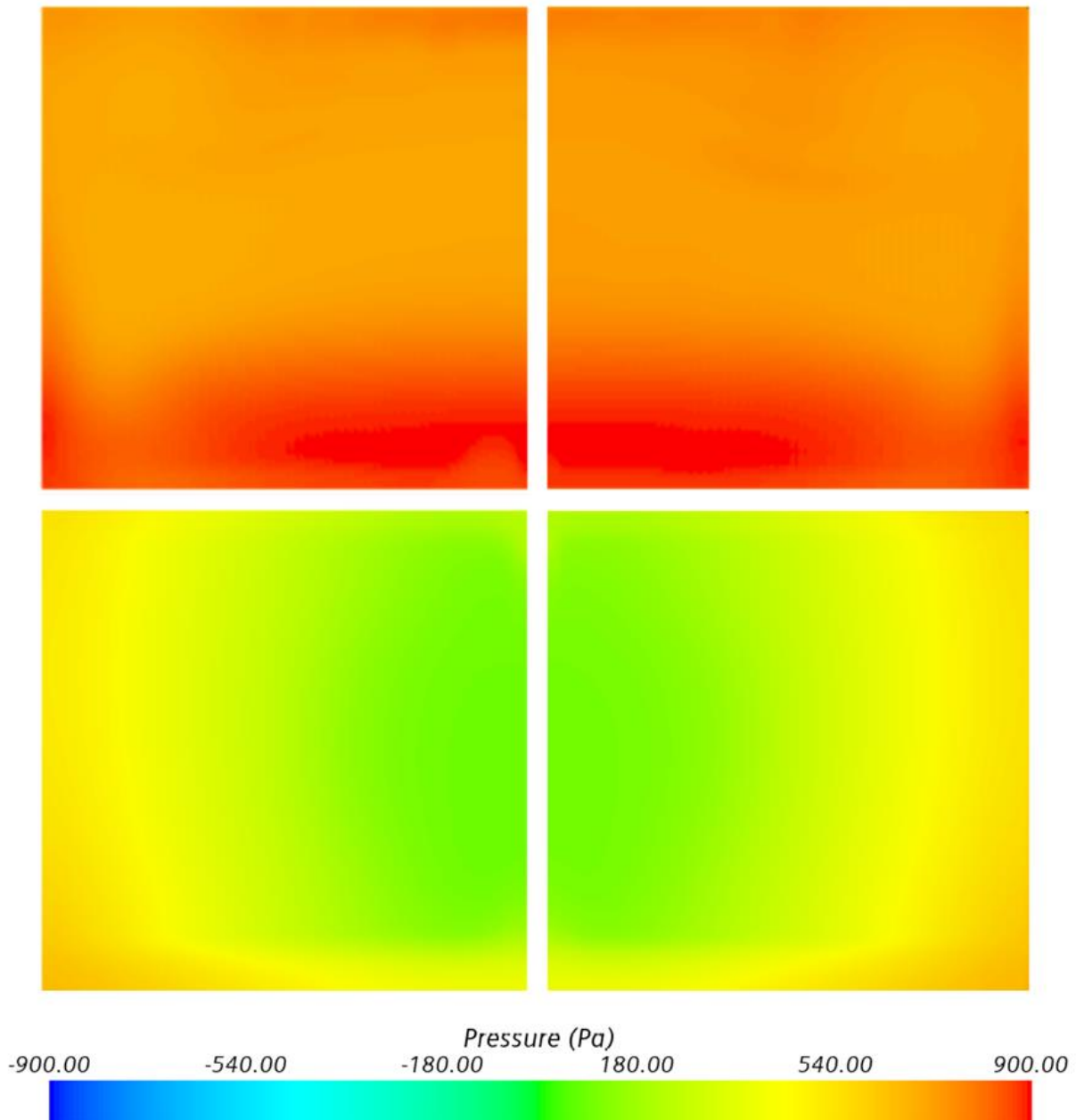
Obr. 47 Rozloženie tlakov na prednú časť vozidla, vľavo – pôvodný model, vpravo – model s uzavretou maskou

Uzavretie hornej časti masky má za následok zmenu pôsobenia tlakov oproti pôvodnej otvorenej maske. Tu dochádzalo k úniku prúdu jej vrchnou časťou, čo malo pri vzniku spätného toku za následok pokles tlaku v tejto oblasti, vid' Obr. 48. Obtekajúci vzduch v prednej časti uzavretej masky smerom k jej krajom spôsobuje pokles tlaku, zatiaľ čo jej uzavretie vedie k zamedzeniu úniku prúdu a udržaniu zvýšeného tlaku za ňou.



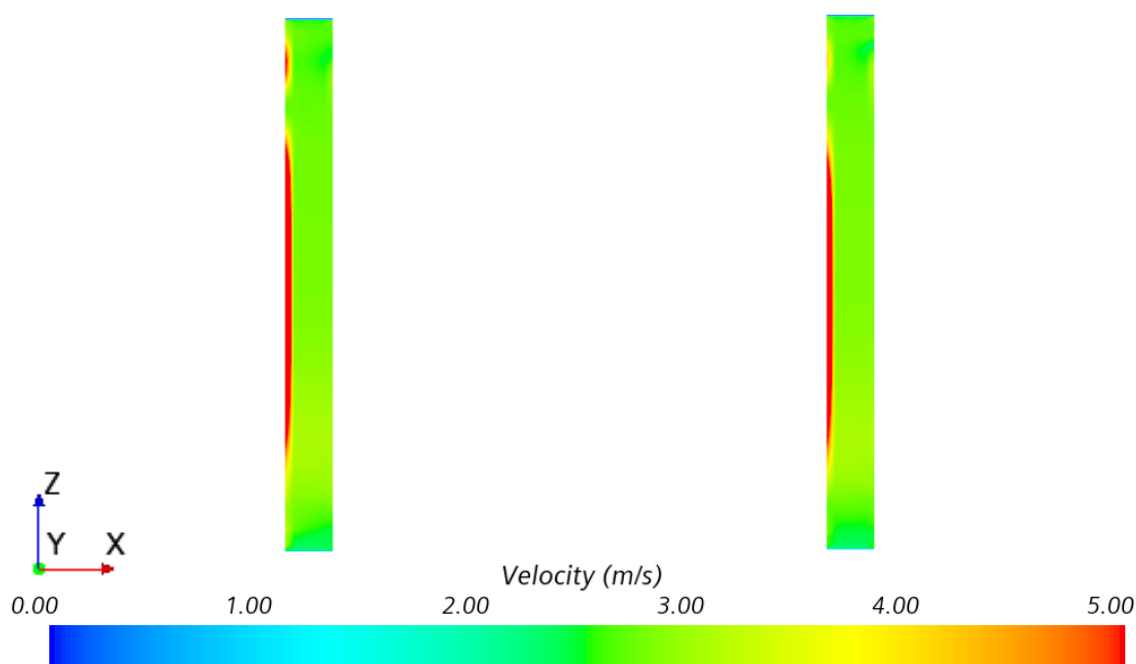
Obr. 48 Rozloženie tlaku na uzavretej a otvorenej maske vozidla, hore – predná strana, dole – zadná strana

Zvýšenie tlaku za uzavretou maskou následne vedie k zvýšeniu tlaku v celej oblasti, to znamená aj na vstupnej ploche výmenníku. Ako môžeme vidieť na *Obr. 49*, pri porovnaní oboch výmenníkov, táto zmena nie je nijak zvlášť markantná, avšak nastáva hlavne v hornej polovici výmenníka, práve v miestach kde viac nedochádza k úniku a spätnému toku prúdu. Na výstupnej ploche výmenníka sa vplyv týchto zmien ďalej výrazne neprejavuje.



Obr. 49 Rozloženie tlaku na výmenníku, hore – predná strana, dole – zadná strana, vpravo – pôvodný model, vpravo – optimalizovaný model

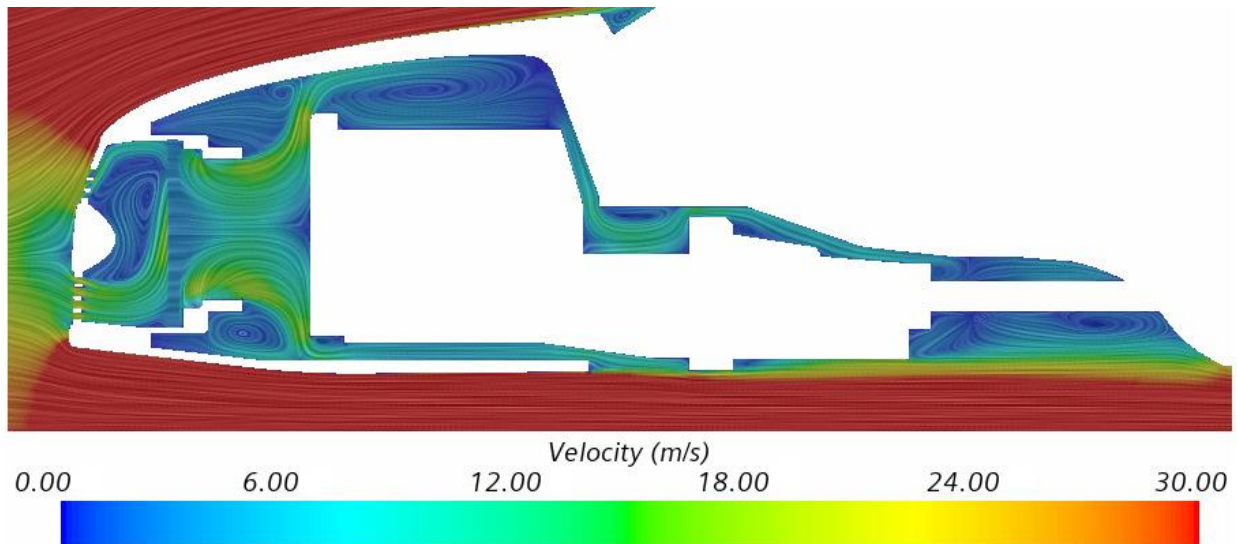
Vzhľadom na charakteristiku tepelného výkonu polymérového výmenníka je na *Obr. 50* vyobrazený priebeh rýchlosti prúdenia v rovine symetrie výmenníkov, ako pôvodného modelu tak modelu optimalizovaného. Priebeh rýchlostí prúdenia vzduchu sa mení prevažne v hornej časti výmenníka, avšak len do určitej hrúbky výmenníka, čo je pochopiteľne spôsobené uzavretím masky v tejto oblasti a redukciou rýchlosti vstupujúceho prúdu. V ostatných častiach výmenníka nedochádza k žiadnym výrazným zmenám rýchlosti prúdenia, z čoho sa dá predpokladať obdobný tepelný výkon oboch výmenníkov, takže prevedená úprava masky by nemala mať nežiadúci vplyv na funkciu výmenníka.



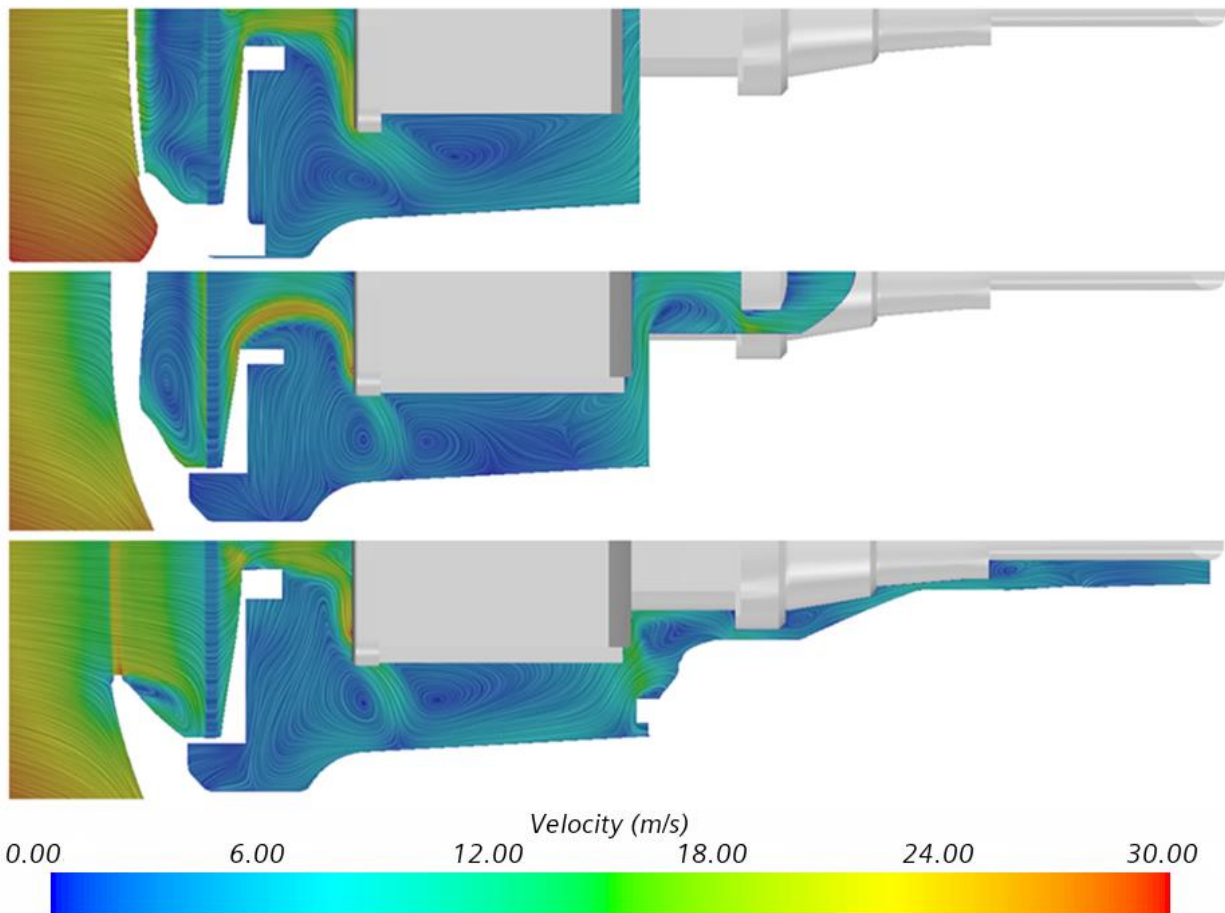
Obr. 50 Rýchlostný profil v rovine symetrie výmenníka, vľavo – pôvodný model, vpravo – optimalizovaný model

Rýchlostný profil v rovine symetrie vnútri motorového priestoru postupujúci až k výstupu z motorového priestoru pod vozidlo je znázornený na *Obr. 51* a v horizontálnych rovinách na *Obr. 52*. Prúd vtekajúci vrchnou časťou masky nemá naďalej tendenciu meniť smer svojho prúdenia, a došlo aj k miernej redukcii jeho rýchlosti, a takisto k miernemu poklesu rýchlosti prúdu vzduchu vstupujúceho spodnou maskou vozidla a celkovo k poklesu rýchlosti a vírenia vzduchu pred výmenníkom, čo má za následok spomínaný nárast tlaku. Prúdenie iniciované priamo za výmenníkom smerujúce k motoru je v tomto prípade rozdelené viac symetricky pre horný a spodný smer prúdenia ako je to v prípade pôvodného modelu. Dochádza k miernemu rozšíreniu hlavných prúdov s vyššou rýchlosťou, ale aj k poklesu maximálnej rýchlosti hlavných prúdov okolo motora, ale aj k zníženiu rýchlosti prúdenia v častiach pod a nad uložením výmenníka v blízkosti kapoty a podlahy motorového priestoru. V prípade prúdenia po stranách motora smerom k stenám motorového priestoru je toto prúdenie dominantné v hornej a spodnej horizontálnej rovine motorového priestoru. V zúženom priestore medzi

motorom a protipožiarnou prepážkou dochádza taktiež k miernemu poklesu rýchlosti oproti pôvodnému modelu, a taktiež k miernemu poklesu rýchlosti dochádza následne aj v priestoroch medzi prevodovkou a jej tunelom.



Obr. 51 Rýchlostný profil prúdenia v motorovom priestore v rovine symetrie



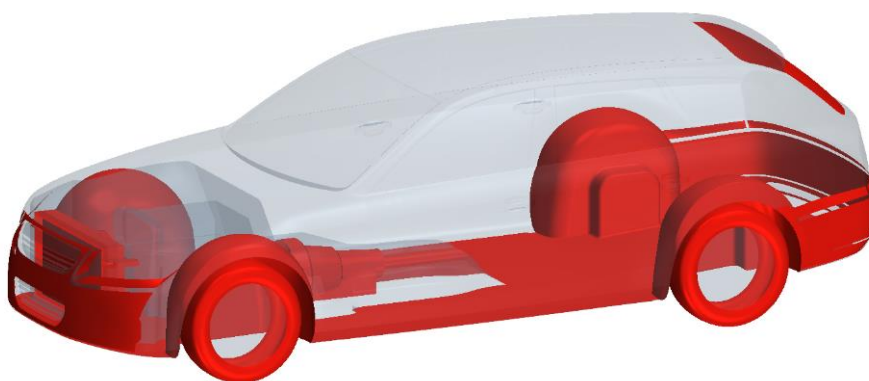
Obr. 52 Rýchlostný profil prúdenia v motorovom priestore v horizontálnych rovinách, zhora – 580 mm, 470 mm a 300 mm vo vzdialenosti od vozovky

6.3.2 ZMENY PÔSOBENIA ODPORU NA ČASTIACH VOZIDLA

Samotné pôsobenie aerodynamického odporu na jednotlivé časti vozidla sa v porovnaní s pôvodným modelom polymérového výmenníka nijak výrazne nemení, dochádza prevažne k miernym zmenám jeho hodnôt, čo je znázornené v tabuľkách a na obrázkoch nižšie. Tak ako v prípade pôvodného modelu, hlavný negatívny prínos odporu motorového priestoru zastupuje uloženie výmenníka, jeho vstupná plocha a teleso prevodovky.

Tabuľka 11 Negatívny prínos odporu optimalizovaného modelu

POLYMÉR - 50 – Negatívny príspevok	
Časť vozidla	CDN
Predná pneumatika	0,0242
Zadná pneumatika	0,0162
Prevodovka	0,0132
Sahara	0,0666
Predný nárazník	0,1038
Zadný nárazník	0,0205
Podlaha	0,0217
Podbehy	0,0369
Zadné okno	0,0153
Interface 1	0,1357

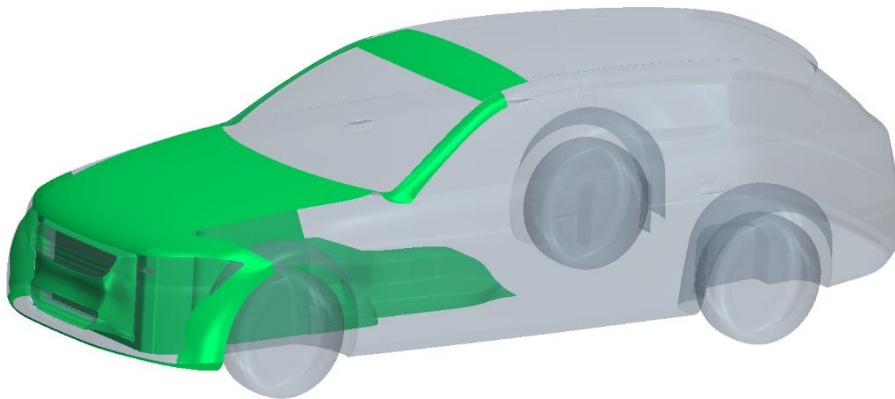


Obr. 53 Negatívny prínos odporu na častiach vozidla

Pozitívny prínos k aerodynamickému odporu taktiež pozostáva z obdobných častí modelu ako pri neoptimalizovanom modeli, aj napriek úprave prednej časti masky vozidla. Hlavný pozitívny prínos v rámci motorového priestoru v tomto prípade obstaráva samotný motorový priestor, tunel prevodovky a výstupná plocha výmenníka. Mimo motorového priestoru sú to hlavne časti kapoty vozidla, bočná časť predného nárazníku a strecha. Hodnoty pozitívneho príspevku a časti jeho pôsobenia vidíme v tabuľke a na obrázku nižšie.

Tabuľka 12 Pozitívny prínos odporu optimalizovaného modelu

POLYMÉR - 50 – Pozitívny príspevok	
Časť vozidla	CDP
Tunel prevodovky	-0,0272
Motorový priestor	-0,0848
Kapota	-0,0124
Predná časť kapoty	-0,0234
Predný nárazník bok	-0,0174
Predný spliter	-0,0143
Blatník	-0,0143
A – stĺpik	-0,0177
Strecha	-0,0232
Interface 2	-0,0552



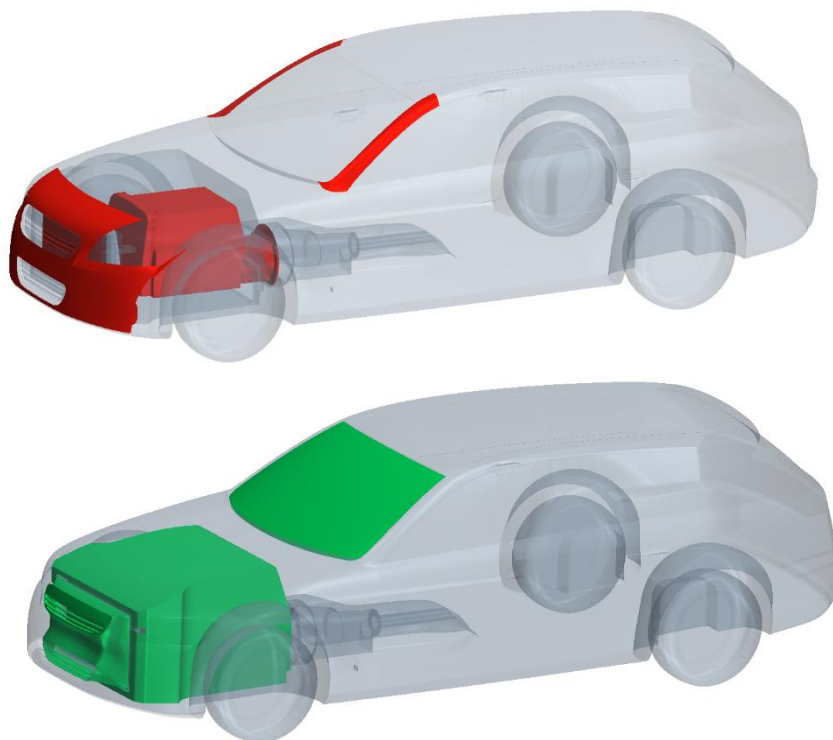
Obr. 54 Pozitívny prínos odporu na častiach vozidla

Hlavné rozdiely v pôsobení aerodynamického odporu na jednotlivé časti vozidla v pôvodnom modeli a v modeli s optimalizovanou prednou maskou nie sú v žiadnej časti majoritné a predstavujú prevažne minimálne rozdiely, ktoré však v konečnom dôsledku vedú k určitému poklesu celkového aerodynamického odporu. Tieto rozdiely v istých častiach vozidla spôsobené usmernením prúdenia a jeho následnou miernou zmenou v motorovom priestore a v okolí vozidla v prvom rade negatívne vplyvajú hlavne na odpor v oblasti motora a vstupnej plochy výmenníka. Menší dopad na negatívne zmeny odporu je zjavný v oblastiach predného nárazníka, prednej časti kapoty a A-stĺpikov.

Najväčší pozitívny vplyv majú tieto zmeny na odpor samotnej upravenej masky vozidla a výstupnej plochy výmenníka. Zmeny v oblasti samotného motorového priestoru sú paradoxne taktiež pozitívne, i keď v menšej miere, takisto ako oblasť čelného okna vozidla, vid' Tabuľka 13. Hodnoty odporu v oblastiach kolies, podbehov a podlahy vozidla, ktoré majú najväčší negatívny vplyv na odpor zostali v podstate nezmenené.

Tabuľka 13 Hlavné rozdiely odporu pôvodného a optimalizovaného modelu

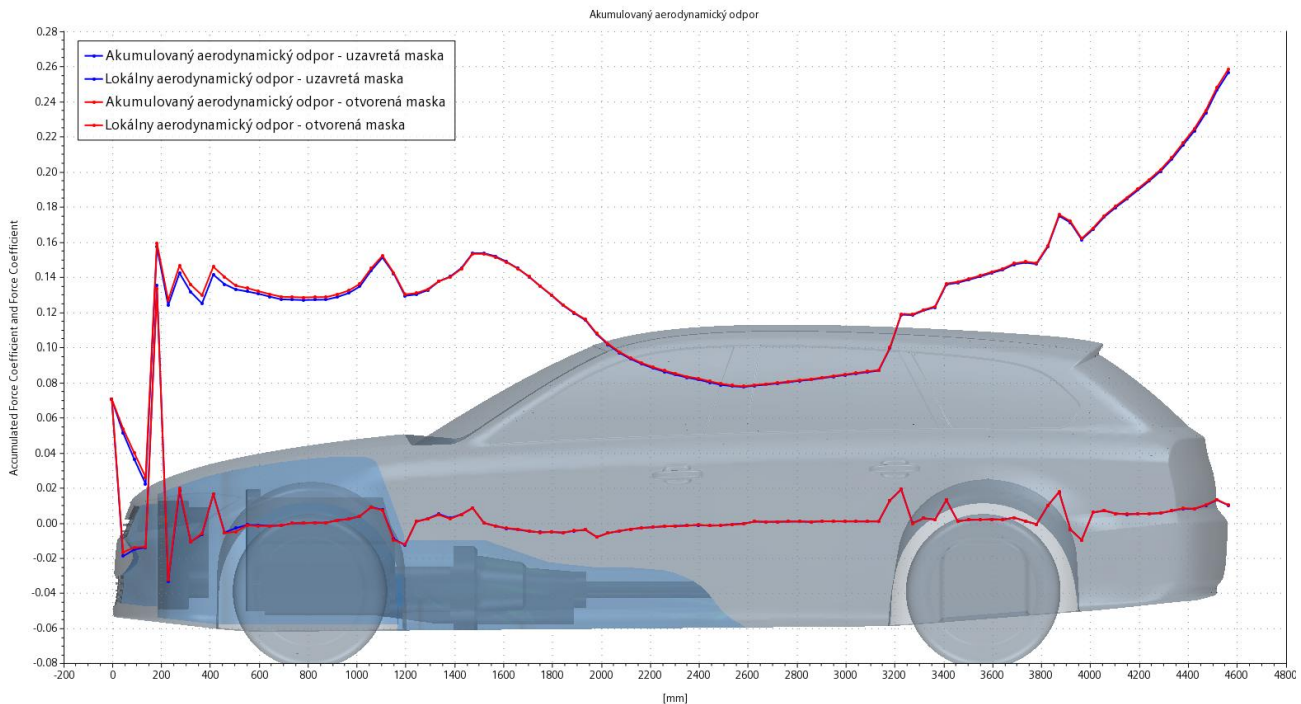
POLYMÉR/POLYMÉR - 50	
Časť vozidla	ΔC_D
Motor	0,0025
Motorový priestor	-0,0017
Horná časť motorového priestoru	-0,0008
Predná časť kapoty	0,0003
Predný nárazník	0,0005
A – stĺpik	0,0007
Čelné okno	-0,0003
Maska	-0,0028
Interface 1	0,0027
Interface 2	-0,0022



Obr. 55 Hlavné rozdiely v pôsobení odporu na časti vozidla, hore – negatívny rozdiel, dole – pozitívny rozdiel

6.3.3 VÝSLEDNÝ AERODYNAMICKÝ ODPOR OPTIMALIZOVANÉHO MODELU

Na Obr. 56 vidíme porovnanie akumulovaného aerodynamického odporu pôvodného modelu a modelu s uzavretou maskou. Na lokálnom zobrazení odporu pre daný úsek vozidla vidíme pokles odporu už pri prvotnom styku vzduchu s prednou časťou vozidla, odpor následne dosahuje nižších hodnôt na celom úseku pred výmenníkom, až po kontakt s ním. K miernemu nárastu odporu oproti pôvodnému modelu dochádza tesne pred motorom vozidla, následne sú však rozdiely v ďalších hodnotách mizivé.



Obr. 56 Akumulovaný aerodynamický odpor, optimalizovaný model

V konečnom súčte pozitívnych a negatívnych ovplyvnení modelu po optimalizácii dochádza k miernemu zlepšeniu celkového aerodynamického odporu, konkrétne o $\Delta c_D = 0,0019$. Hmotnostný tok cez plochu výmenníka bol dokonca mierne zvýšený, takže úprava modelu zjavne nebude mať žiadny vplyv na zníženie jeho tepelného výkonu. Vzhľadom k skutočnosti, že rozdiel v celkovom aerodynamickom odpore nie je zvlášť veľký a fakt, že výmenník disponuje dostatočnou rezervou pre svoju správnu funkciu, naskytá sa možnosť ďalšej optimalizácie prednej časti vozidla, prípadne ďalších úprav pre dodatočné zníženie odporu.

Tabuľka 14 Výsledný aerodynamický odpor a hmotnostný tok, optimalizovaný model

	Polymér	Polymér 50
c_D	0,2582	0,2563
$m' [kg \cdot s^{-1}]$	0,9846	0,9886

ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo zostavenie a realizácia CFD modelu vozidla s chladičom a zjednodušeným motorovým priestorom a následne skúmanie vplyvu charakteristických vlastností chladiča na aerodynamický odpor vozidla. Pri zostavovaní modelu bolo nutné vytvoriť požadovanú konfiguráciu geometrie a taktiež bolo pristúpené k úpravám a zjednodušeniu geometrie vozidla v oblastiach nezasahujúcich do skúmanej oblasti pre dosiahnutie zjednodušenia výpočtovej náročnosti. Výsledkom sú dva samostatné modely vozidla v karosárskej verzii Estate, zvlášť pre konvenčný hliníkový chladič a zvlášť pre prototyp polymérového chladiča, ktoré umožňujú porovnávanie vplyvu ich rozdielnych charakteristických vlastností, reprezentovaných hlavne rozdielnou tlakovou stratou na aerodynamický odpor vozidla.

Pri vzájomnom porovnaní výsledkov simulácií oboch modelov sa použitie prototypu polymérového chladiča javí ako perspektívne. Zaznamenaný je pokles v celkovom aerodynamickom odpore vozidla v porovnaní s modelom hliníkového chladiča, a to o $\Delta c_D = 0,0027$. Vzhľadom na zvýšenú tlakovú stratu polymérového chladiča a rozdielnu charakteristiku tepelného výkonu, došlo k zmenám hmotnostného toku chladičom, rýchlosti prúdenia a s tým súvisiacej zmene tepelnej výkonnosti chladiča v porovnaní s hliníkovým modelom. Hmotnostný tok bol síce znížený o $\Delta m' = 0,35 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, avšak vzhľadom k rozdielnej charakteristike tepelnej výkonnosti bol tepelný výkon naopak navýšený približne o 4 kW.

S tendenciou navyšovania tepelného výkonu chladiča sa naskytá možnosť ďalšej optimalizácie modelu za cieľom zníženia odporu vozidla. Táto optimalizácia, ktorá bola spracovaná nad rámec zadania práce, pozostáva s čiastočného uzavretia prednej masky vozidla, s cieľom úpravy prúdenia v tejto oblasti. Týmito úpravami bolo dosiahnuté dodatočné zníženie odporu vozidla o $\Delta c_D = 0,0019$, spolu so zanedbateľným vplyvom na hmotnostný tok cez chladič, a teda nedochádza ani k výrazným zmenám jeho tepelného výkonu. Na základe týchto zistení sa predná časť vozidla javí ako vhodná oblasť pre ďalšiu optimalizáciu modelu, s predpokladom ďalšieho znižovania aerodynamického odporu bez negatívneho dopadu na funkciu chladiča, ktorý naďalej svojim výkonom prevyšuje konvenčný hliníkový chladič.

Vzhľadom k vyššie uvedeným zisteniam, ktoré potvrdzujú potenciál využitia polymérového chladiča, môže táto práca poslúžiť ako vhodný základ pre ďalšie výskumy v tejto oblasti a jeho využiteľnosti v praxi.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] HUCHO, Wolf-Heinrich, ed. *Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering*. London: Butterworths, 1990. ISBN 0-408-01422-9.
- [2] OBIDI, T. Yomi. *Theory and applications of aerodynamics for ground vehicles*. Warrendale, Pennsylvania: SAE International, [2014]. ISBN 9780768021110.
- [3] ANDERSON, John D. *Fundamentals of aerodynamics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, c2011. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering. ISBN 0073398101.
- [4] The Contact Path: Aerodynamic forces. *The Contact Path* [online]. 2021 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://the-contact-patch.com/book/road/c1416-aerodynamic-forces>
- [5] Sports car lateral aerodynamics: Concepts for generating lateral aerodynamic forces by means of an asymmetric airflow. *AirShaper* [online]. 2021 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://airshaper.com/research/sports-car-lateral-aerodynamics>
- [6] Kuthada, T., Wittmeier, F., Bock, B., Schoenleber, C. et al. The Effects of Cooling Air on the Flow Field around a Vehicle. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* [online]. 2016, 9(2), 10 [cit. 2022-04-19]. ISSN 1946-3995. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2016-01-1603>
- [7] Scirocco Style Drag Racing Radiator Open. *C&R Racing* [online]. 2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.crracing.com/product/scirocco-style-drag-racing-radiator-open-22-x-13-20-an-port-inlet-outlet-specify-fittings>
- [8] The 2018 Porsche 911 GT2 RS and the Science of Speed. *Motortrend* [online]. 2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.motortrend.com/features/2018-porsche-911-gt2-rs-and-the-science-of-speed/>
- [9] AldersonAutoGroup: Active Kidney Grille. *YouTube* [online]. 2018 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=iXjHJgNuzMk&ab_channel=AldersonAutoGroup
- [10] Wittmeier, F. and Kuthada, T. Open Grille DrivAer Model - First Results. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* [online]. 2015, 8(1) [cit. 2022-04-19]. ISSN 1946-3995. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1553>
- [11] Larson, L. and Woodiga, S. Aerodynamic Investigation of Cooling Drag of a Production Pickup Truck Part 1: Test Results. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* [online]. 2018, 11(5), 16 [cit. 2022-04-19]. ISSN 1946-3995. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0740>
- [12] Le Good, G. M., Garry, K. P.,. On the Use of Reference Models in Automotive Aerodynamics. *SAE 2004 World Congress & Exhibition* [online]. 2004, 28 [cit. 2022-04-19]. ISSN 0148-7191. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2004-01-1308>

- [13] Mercedes-Benz EQX: Translating the Wild Streamliner EQXX Into Reality. *Motortrend* [online]. 2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.motortrend.com/features/mercedes-benz-eqx-electric-vehicle-sedan-renderings/>
- [14] Here Is How Car Treadmills Are Used In Wind Tunnel Testing. *Wonderful Engineering* [online]. 2018 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://wonderfuleengineering.com/reason-car-windmills-used-wind-tunnel-testing/>
- [15] Gutierrez, J. E. Ch., Duarte, L. E. V., Oliveira Jr., A. A. M., Cancino, L. R.,. THE AHMED BODY'S EXTERNAL AERODYNAMICS AT 25° SLANT ANGLE REAR SURFACE: A NUMERICAL ANALYSIS USING CFD. *18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering* [online]. 2020, 11 [cit. 2022-04-19]. ISSN ENC-2020-0060. Dostupné z: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/217969/ENCIT2020-0060-JECGutierrez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [16] DrivAer - Chair of Aerodynamics and Fluid Mechanics: DrivAer Model. *Chair of Aerodynamics and Fluid Mechanics TUM* [online]. 2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.epc.ed.tum.de/en/aer/research-groups/automotive/drivaer/>
- [17] Kuthada, T., Wittmeier, F., Bock, B., Schoenleber, C. et al. The Effects of Cooling Air on the Flow Field around a Vehicle. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* [online]. 2016, 9(2), 10 [cit. 2022-04-19]. ISSN 1946-3995. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2016-01-1603>
- [18] VONDRUŠ, Jan. *VLIV ZADNÍ ČÁSTI KAROSERIE NA AERODYNAMICKOU INTERAKCI VOZIDEL* [online]. Brno, 2020 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=213507. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jan Vančura.
- [19] Spring Nature. *Spring Nature* [online]. 2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://media.springernature.com/original/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-319-67822-1_3/MediaObjects/455301_1_En_3_Fig1_HTML.gif
- [20] STAR CCM+ USER GUIDE. *VDOCUMENTS* [online]. 2017 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://vdocuments.mx/star-ccm-user-guide.html>
- [21] A Comparison of CFD Software. *Resolved Analytics* [online]. 2020 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.resolvedanalytics.com/theflux/comparing-cfd-software>
- [22] Commercial and free software. *CFDyna* [online]. 2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: http://www.cfdyna.com/Home/CFD_Softwares.html
- [23] Geometry Operations in GAMBIT. *SlidePlayer* [online]. 2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/13585187/>

- [24] Kroulíková, T.; Kůdelová, T.; Bartuli, E.; Vančura, J.; Astrouski, I. Comparison of a Novel Polymeric Hollow Fiber Heat Exchanger and a Commercially Available Metal Automotive Radiator. *Polymers* [online]. 2021, 1175(7), 13 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym13071175>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

A	[m ²]	Referenčná plocha, priemet vozidla
A _C	[m ²]	Čelná plocha chladiča
c _D	[-]	Celkový súčiniteľ aerodynamického odporu
c _{DC}	[-]	Aerodynamický koeficient chladiaceho systému
c _{DN}	[-]	Negatívny prínos aerodynamického odporu
c _{DO}	[-]	Koeficient odporu vozidla so sprístupneným chladiacim systémom
c _{DP}	[-]	Pozitívny prínos aerodynamického odporu
c _{DZ}	[-]	Koeficient odporu vozidla s uzavretým chladiacim systémom
c _L	[-]	Koeficient vztlaku
c _{Mx}	[-]	Aerodynamický koeficient momentu klopenia
c _{My}	[-]	Aerodynamický koeficient momentu klonenia
c _{Mz}	[-]	Aerodynamický koeficient momentu stáčania
C _p	[-]	Tlakový koeficient
d	[m]	Charakteristický rozmer telesa
F _D	[N]	Aerodynamický odpor
F _L	[N]	Aerodynamický vztlak
F _Y	[N]	Aerodynamická bočná sila
k	[J]	Kinetická energia turbulencie
L	[m]	Hrúbka výmenníka
m'	[kg·s ⁻¹]	Hmotnostný tok
M _x	[Nm]	Moment klopenia
M _y	[Nm]	Moment klonenia
M _z	[Nm]	Moment stáčania
p	[Pa]	Tlak
p _d	[Pa]	Dynamický tlak
P _i	[kg·m ⁻⁴]	Porézny odpor zotrvačnosti
p _s	[Pa]	Statický tlak
P _v	[kg·m ⁻³ ·s ⁻¹]	Porézny odpor viskozity
q	[W·m ⁻²]	Tepelný tok
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
T	[°C]	Teplota
T	[m]	Rozchod kolies vozidla

v	$[m \cdot s^{-1}]$	Rýchlosť prúdenia kvapaliny
v_m	$[m \cdot s^{-1}]$	Stredná rýchlosť prúdenia kvapaliny
v_∞	$[m \cdot s^{-1}]$	Rýchlosť voľného prúdu
v_C	$[m \cdot s^{-1}]$	Rýchlosť prúdenia pred chladičom
v_G	$[m \cdot s^{-1}]$	Rýchlosť vzduchu pred mriežkou
v_{local}	$[m \cdot s^{-1}]$	Aktuálna rýchlosť prúdu
W	$[m]$	Rázvor kolies vozidla
y^+	$[-]$	Bezrozmerná vzdialenosť od stien
α_G	$[^\circ]$	Uhol dopadu vzduchu na mriežku vozidla
δ	$[m]$	Hrúbka medznej vrstvy
Δc_D	$[-]$	Rozdiel v pôsobení aerodynamického odporu
Δc_{DC}	$[-]$	Aerodynamický koeficient chladiaceho systému prevedený na hodnoty zodpovedajúce celkovému aerodynamickému koeficientu
$\Delta m'$	$[kg \cdot s^{-1}]$	Rozdiel hmotnostného toku
Δp	$[Pa]$	Tlaková strata
Δp_G	$[Pa]$	Rozdiel tlaku pred a za mriežkou
ε	$[m^2 \cdot s^{-3}]$	Rýchlosť disipácie turbulencie
θ	$[^\circ]$	Uhol sklonu chladiča
λ	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Tepelná vodivosť
μ	$[Pa \cdot s]$	Dynamická viskozita
μ_T	$[Pa \cdot s]$	Vírivá viskozita
ν	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita
ξ	$[-]$	Koeficient tlakovej straty
ξ_G	$[-]$	Koeficient tlakovej straty mriežky
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota tekutiny
τ	$[Pa]$	Tečné napätie
ω	$[kg \cdot s^{-1}]$	Vírivosť
CFD		Computational Fluid Dynamics
CAD		Computer – Aided Design
DES		Detached Eddy Simulation
DNS		Direct Numerical Simulation
EVM		Eddy Viscosity Model

LES	Large Eddy Simulation
MIRA	Motor Industry Research Association
N-S	Navier – Stokes
RANS	Reynolds – Averaged Navier – Stokes
RST	Reynolds Stress Transport
SAE	Society of Automotive Engineers
SAS	Scale Adaptive Simulation
TU	Technická Univerzita
URANS	Unsteady Reynolds – Averaged Navier – Stokes