



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

DIFUZOR U AUTOMOBILOVÉHO PODVOZKU

CAR CHASSIS DIFFUSER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Albert Kindl

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

SUPERVISOR

Brno 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Albert Kindl
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

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

Difuzor u automobilového podvozku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Difuzor, jako součást automobilového podvozku, má výrazný vliv na velikost přítlaku na vozidlo, ale také ovlivňuje rychlostní pole za vozidlem a velikost aerodynamického odporu. Kromě závodních automobilů se dnes využívá i osobních vozidel. Návrh difuzoru vychází ze základních rovnic mechaniky tekutin, ale jeho konkrétní tvarování pak probíhá s využitím prostředků CFD a experimentálního modelování.

Cíle bakalářské práce:

Práce má především rešeršní charakter, ale její součástí bude i výpočtové modelování na zjednodušené geometrii vozidla s podvozkovým difuzorem. Součástí bakalářské práce: Rešerše – co to je difuzor, teorie proudění, k čemu slouží, atd. Použití difuzoru na osobních vozech vs. závodních vozech – příklady. Analýza závislosti úhlu difuzoru na aerodynamických koeficientech. Výpočtové modelování na zjednodušené geometrii.

Seznam doporučené literatury:

KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. 1. Cambridge, USA: Bentley Publishers, 2006. ISBN 978-0-8376-0142-7.

CENGEL, Yunus A. a John M. CIMBALA. Fluid Mechanics - Fundamentals and Applications. 2. Boston: McGraw Hill, 2010.

BUSCARIOLO, F. F., G. ASSI a S. SHERWIN. Computational study on an Ahmed Body equipped with simplified underbody diffuser. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2021, 209, 1-21.

HUMINIC, A., G. HUMINIC a A. SOICA. Study of aerodynamics for a simplified car model with the underbody shaped as a Venturi nozzle. International Journal of Vehicle Design. 2012, 58(1), 15-32.

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

V Brně, dne

L.S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Zlepšení aerodynamických vlastností automobilu může ušetřit spotřebované palivo, navýšit dojezd, či zvýšit jeho rychlost a ovladatelnost. Aby toho bylo dosaženo, jsou automobilům navrhovány aerodynamické úpravy a vylepšení. Cílem této práce je popsat difuzor na automobilovém podvozku. Pozornost je zaměřena především na vliv jeho úhlu divergence na odpor a vztlak. Tyto závislosti jsou zkoumány na zjednodušeném modelu automobilu pomocí CFD simulace v Ansys Fluent. V rešeršní části je rozebráno proudění v difuzoru a jeho ztráty, další významné aerodynamické prvky a význam difuzoru u Formule 1 a u osobních automobilů. Výsledky práce ukazují významný vliv difuzoru na přítlak a odpor vozidla a naznačují důležité postavení tohoto prvku v budoucnosti automobilního průmyslu.

Abstract

Improving a car's aerodynamic properties can save fuel, increase range, or improve speed and handling. To achieve this, aerodynamic modifications and improvements are proposed to cars. The aim of this thesis is to describe a diffuser on an automotive chassis. The focus is mainly on the effect of its divergence angle on drag and lift. These dependencies are investigated on a simplified car model using CFD simulation in Ansys Fluent. The research section discusses the diffuser flow and losses, other important aerodynamic features and the importance of the diffuser in Formula 1 and passenger cars. The results of the thesis show the significant effect of the diffuser on the downforce and drag of the vehicle and indicate the important position of this element in the future of the automotive industry.

Klíčová slova

Difuzor na podvozku automobilu, aerodynamika, odpor, vztlak, formule, CFD

Keywords

Car chassis diffuser, aerodynamics, drag, lift, formula, CFD

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KINDL, Albert. *Difuzor u automobilového podvozku* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/150376>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Difuzor u automobilového podvozku vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 22. 5. 2023

Albert Kindl

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Pavlovi Rudolfovi Ph.D. za cenné rady, nápady a vedení při tvorbě bakalářské práce. Dále děkuji rodině, přátelům a přítelkyni za podporu při studiu.

Obsah

1	Úvod	11
2	Důležité pojmy, rovnice a jevy	12
2.1	Proudění a jeho druhy	12
2.2	Bernoulliho rovnice	12
2.3	Rovnice kontinuity	12
2.4	Navier-Stokesova rovnice	13
2.5	Venturiho efekt	13
2.6	Viskozita	13
2.7	Reynoldsovo číslo	14
2.8	Mezní vrstva	14
2.9	Aerodynamické síly působící na vozidlo a bezrozměrné součinitele	15
2.9.1	Třecí odpor	16
2.9.2	Tlakový odpor	16
2.9.3	Celkový odpor	16
3	Používané aerodynamické prvky na vozidlech	19
3.1	Přední splitter a air dam	19
3.2	Přední křídlo	21
3.3	Zadní spoiler a křídlo	24
3.3.1	Křídlo	24
3.3.2	Spoiler	26
3.4	Rozšířené prahy a boční generátory vírů	27
3.5	Obtékání kol	28
4	Difuzor	29
4.1	Proudění v difuzoru	29
5	Difuzor na automobilovém podvozku	32
5.1	Důvody používání	32
5.1.1	Princip tvorby přítlaku	32
5.1.2	Aerodynamická hysterze	36
5.1.3	Princip snižování odporu	36
5.2	Přepážky v difuzoru	37
5.3	Materiál	39
6	Závodní automobily a osobní automobily	40
6.1	Formule 1	40
6.1.1	Dvojitý difuzor	40
6.1.2	Ovlivňování difuzoru jinými prvky monopostu	41
6.1.3	Difuzor a slipstream	42

6.2	Interakce difuzoru na podvozku se zadním křídlem a spoilerem	44
6.3	Potenciál u osobních automobilů.....	45
6.3.1	Vliv hladkého podvozku na funkci difuzoru	46
6.3.2	Implementace difuzoru na různé karoserie.....	48
7	Výpočtové modelování na zjednodušené 2D geometrii	51
7.1	Geometrie	51
7.2	Síť konečných objemů.....	52
7.3	Okrajové podmínky a referenční hodnoty	53
7.4	Nastavení numerického modelu	53
7.5	Výsledky.....	54
7.5.1	Součinitel odporu.....	54
7.5.2	Součinitel vztlaku	55
7.5.3	Rychlostní a tlakové pole	56
7.6	Závěr 2D modelu.....	59
8	3D model	60
8.1	Geometrie a síť konečných objemů.....	60
8.2	Nastavení numerického modelu a okrajové podmínky	60
8.3	Výsledky.....	61
8.4	Závěr 3D simulace.....	67
9	Závěr.....	68
	Seznam použitých zdrojů	70
	Seznam použitých veličin.....	76

1 Úvod

Aerodynamika je obor zabývající se pohybem plynů a je tedy významnou součástí návrhu automobilu. V minulosti byly aerodynamické prvky řešeny především u závodních a sportovních vozů, kde bylo potřeba dosáhnout co nejvyššího přítlaku a co nejmenšího odporu vzduchu, aby se vozidlo mohlo pohybovat v co nejvyšších rychlostech a dosahovat nejlepších umístění v závodech. V současnosti se ovšem aerodynamické prvky dostávají do popředí i u osobních automobilů. Ekologické potřeby v současnosti požadují nízké (případně nulové) emise a využití aerodynamických prvků je jedna z možných a významných cest, jak emise snižovat, protože již při rychlosti 100 km/h je podíl aerodynamického odporu v odporu celkovém zhruba 70 % (zbytek vytváří valivý odpor atd.) v závislosti na druhu vozidla. Se zvyšující se rychlostí procento dále roste [1]. Současně také dosahují vysoké popularity automobily na elektrický pohon. U elektromobilů je potřeba řešit aerodynamiku vozu především kvůli navyšování dojezdu, který je stále velkou nevýhodou elektromobilů oproti vozidlům s tradičním pohonem spalovacího motoru.

Existuje značné množství prvků a úprav automobilů, které aerodynamiku zlepšují. Nejvýznamnější z nich jsou v práci popsány. Podrobně se pak práce zabývá konkrétním aerodynamickým prvkem – difuzorem na podvozku automobilu. Je rozebrán princip jeho fungování a jeho použití v různých sférách automobilismu. Kromě rešeršní části práce obsahuje CFD model zjednodušeného automobilu – Ahmed body. Na tomto tělese je zkoumán vliv úhlu difuzoru na aerodynamické vlastnosti vozu.

Difuzor je úprava v zadní části podvozku, tak aby se vhodně upravilo proudění pod automobilem a zvýšil se přítlak vozu a ideálně se snížil koeficient odporu. Difuzor byl historicky poprvé použit na závodních automobilech soutěže Can-Am racing v 60. letech minulého století. Později se objevil na voze Formule 1 Lotus 78 a znamenal revoluci v aerodynamice podvozku závodních vozidel [2]. Dnes se difuzory stále používají spíše u závodních či sportovních aut, ale nikoliv výhradně. Vzhledem ke zmíněnému důrazu na ekologii v dnešní společnosti se difuzorů, za účelem snížení emisí, či zvýšení dojezdu, začíná využívat i u běžných osobních aut. Z produkce nejpopulárnější české automobilky Škoda, je difuzorem vybaven elektrický vůz Škoda Enyaq.

2 Důležité pojmy, rovnice a jevy

2.1 Proudění a jeho druhy

Částice konají neuspořádaný pohyb daný svojí teplotou a také pohyb vyvolaný vnějším podnětem. Vnější podmínkou může být podtlak v místě kam proudění směřuje nebo také silové pole (např. gravitační). Pro znázornění proudění se využívají takzvané proudnice, což jsou pomyslné čáry, ke kterým tečna určuje, v každém jejím bodě, směr rychlosti proudění. Proudění může být rozlišováno podle proměnnosti v čase na stacionární (charakteristika proudění se v čase nemění) a nestacionární (proudění se v čase mění) [3]. Dále se proudění rozděluje na laminární a turbulentní. U laminárního proudění tekutina teče v jednotlivých vrstvách, které se nepromíchávají. Oproti tomu při turbulentním proudění vznikají víry, promíchávají se jednotlivé vrstvy tekutiny a proudnice se tím pádem prolínají. Částice takového proudění mají mimo postupné rychlosti také rychlost fluktuální, kterou se částice pohybují mezi vrstvami tekutiny. Dále se můžeme bavit o proudění ideální tekutiny a tekutiny reálné. Pokud se uvažuje proudění reálné tekutiny, musí se brát v potaz viskozita a stlačitelnost tekutiny [4].

2.2 Bernoulliho rovnice

Jedna z nejvýznamnějších rovnic využívající se v aerodynamice je Bernoulliho rovnice. Jedná se o rovnici, která dává do souvislosti rychlost a tlak tekutiny na proudnici. V podstatě se jedná o zákon zachování energie pro ustálené proudění ideální kapaliny. V kontextu aerodynamiky automobilů se pak rovnice často užívá ve tvaru:

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{v_A^2}{2} = \frac{p_\infty}{\rho} + \frac{v_\infty^2}{2} \quad (1)$$

Pokud je uvažována skutečná tekutina, je nutné uvažovat také člen, zahrnující ztráty:

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{v_A^2}{2} = \frac{p_\infty}{\rho} + \frac{v_\infty^2}{2} + Y_z \quad (2)$$

Ztráty zahrnují jednak ztráty délkové a jednak ztráty místní, které jsou významné právě v difuzoru. Je třeba zdůraznit, že oba tvary uvažují stacionární proudění. [4]

2.3 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity není o nic méně důležitá než Bernoulliho rovnice a podobně jako ona vychází ze zákona zachování, tentokrát hmotnosti. Pojednává o závislosti velikosti průřezu kanálu a rychlosti tekutiny. Její integrální tvar, který je používán při běžných výpočtech:

$$Q_m = \rho S v \quad (3)$$

Kromě tohoto tvaru lze zapsat také v obecném diferenciálním tvaru pro stlačitelnou tekutinu [4]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(v\rho) = 0 \quad (4)$$

2.4 Navier-Stokesova rovnice

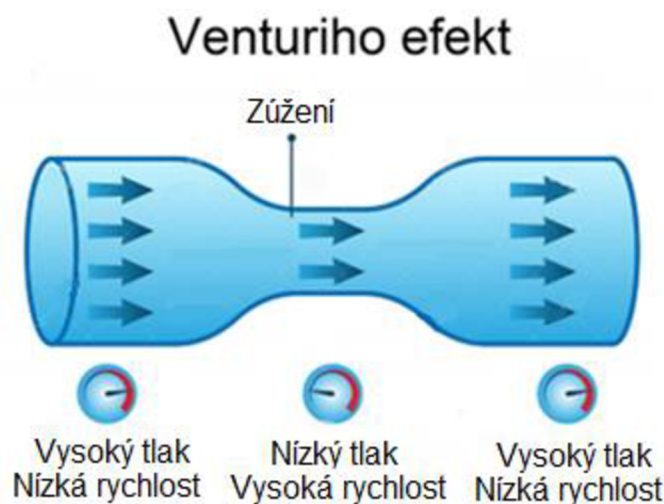
Další důležitá rovnice je rovnice, která vyjadřuje silovou rovnováhu laminárně proudící skutečné (viskózní) tekutiny. Rovnici je možné zapsat ve vektorovém tvaru:

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

Navier-Stokesova rovnice má několik členů. Zleva členy vyjadřují: lokální složku zrychlení od setrvačných sil, konvektivní složku zrychlení od setrvačných sil, zrychlení od vnějších objemových sil, zrychlení od tlakových sil a člen zahrnující viskozitu, tedy zrychlení od třecích sil. Tato rovnice má značný význam pro CFD simulace, neboť je jednou z hlavních rovnic, která je ve výpočtech řešena. [4]

2.5 Venturiho efekt

Venturiho efekt je jev, který vzniká při pohybu tekutiny zužujícím se průřezem kanálu. Při toku do užší části kanálu se zvyšuje rychlost proudění, což lze objasnit rovnicí kontinuity popsanou výše. Pokud dojde ke zvýšení rychlosti proudění, pak musí zákonitě, podle Bernoulliho rovnice, dojít ke snížení statického tlaku proudící kapaliny. Tento jev je pro konstrukci difuzoru velice důležitý, protože právě vytvoření podtlaku pod vozem je jeden z cílů jeho použití [1].



Obrázek 1: Ilustrace Venturiho efektu, upraveno dle [5]

2.6 Viskozita

Viskozita je vlastnost tekutiny, která vypovídá o tom, jak velké smykové napětí vzniká v tekutině při jejím pohybu. Rozlišujeme viskozitu dynamickou a viskozitu kinematickou. Dynamická viskozita je označována písmenem μ a má jednotku $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$. Kinematická viskozita je označována písmenem ν a má jednotku $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Dynamická viskozita je koeficientem přímé úměry mezi tečným napětím v tekutině a gradientu rychlosti v této tekutině [1] [4]. Obecně platí, že s rostoucí teplotou dynamická viskozita klesá. Závislost na tlaku je potom zanedbatelná [4]. Můžeme tedy zapsat rovnici pro výpočet tečného napětí pro rovinné proudění newtonovské tekutiny:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (6)$$

Pro proudění v prostoru musí být zapsán tenzor tečného napětí:

$$\tau_{ij} = \frac{1}{2} \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

Kinematická viskozita je oproti tomu definována jako poměr viskozity dynamické a hustoty tekutiny: [1]

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (8)$$

2.7 Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo je jedna z hlavních charakteristik proudění. Toto podobnostní číslo umožňuje určit, zda je proudění ještě laminární nebo už se stává turbulentním. Pokud je Reynoldsovo číslo, spočtené pro konkrétní proudění nižší než kritické Reynoldsovo číslo, jedná se o proudění laminární. Pokud je vyšší, pak je proudění turbulentní. Hodnotu této bezrozměrné veličiny lze spočítat jako: [4]

$$Re = \frac{\rho v_{\infty} L}{\mu} \quad (9)$$

Vzorec lze dále pro praktičtější využití zjednodušit:

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad (10)$$

Za L se obecně dosazuje charakteristický rozměr, u automobilů často délka. Další význam Reynoldsova čísla spočívá v porovnávání jednotlivých proudění. Pokud mají dvě proudění obtékající tělesa stejného tvaru, avšak jiných rozměrů stejné Reynoldsovo číslo, pak na tyto dvě obtékání můžeme nahlížet jako na stejný jev. To je užitečné při ověřování aerodynamických modelů ve větrných tunelech, kdy stačí vyrobit menší (a levnější) model karoserie a použít vyšší rychlost proudění, pro dosažení stejných výsledků, kterých by nabýval experiment s karoserií skutečných rozměrů. Toto využití je nazýváno modelová podobnost. [1]

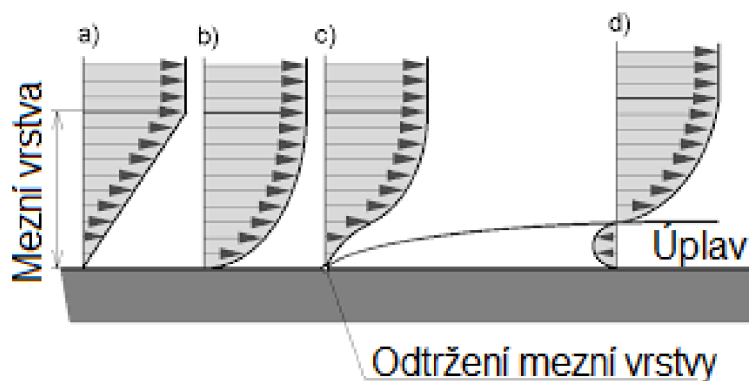
2.8 Mezní vrstva

Mezní vrstva je obvykle relativně tenká oblast na okraji obtékaného tělesa. V této vrstvě jsou třecí síly srovnatelně velké jako síly dynamické a tekutinu tedy nelze považovat za ideální, je třeba počítat s viskozitou tekutiny. Rychlost přímo u tělesa je nulová a tekutina ulpívá na stěně obtékaného tělesa. Dále se v mezní vrstvě rychlost různě mění. Mezní vrstva může být laminární, turbulentní, či přechodová (část vrstvy je laminární a přechází do turbulentní). Mezní vrstva je u vozidel obvykle tlustá v řádu jednotek milimetrů (vrstva se po délce vozidla zvětšuje).

Obecně lze tloušťku mezní vrstvy spočítat podle numerického řešení a postupu podle Blasiusa, toto řešení však lze aplikovat pouze v případě, že je mezní vrstva laminární a nedošlo k jejímu odtržení. Z rovnice lze odvodit, že průběh mezní vrstvy v průběhu po tělese je parabolický. [4]

$$\delta_x = 5 \sqrt{\frac{\nu x}{v_\infty}} \quad (11)$$

Při obtékání tělesa dochází k přeměně kinetické energie na tlakovou, a to směrem od náběžné hrany k odtokové. Následkem toho se v oblastech vzdálenějších od náběžné hrany tekutina zastavuje, a dokonce začíná téct v opačném směru, než je směr hlavního proudění. To má za následek vznik neuspořádaného proudění a vznik tzv. úplavu. [4]



Obrázek 2: Vznik úplavu [6]

Z obrázku 2 si lze odvodit, že v určité vzdálenosti od obtékaného tělesa se rychlost v mezní vrstvě snižuje s tím, jak je těleso obtékáno. Tedy v malé vzdálenosti od obtékaného tělesa je rychlost v bodě b na obrázku 2 vyšší než rychlost ve stejné vzdálenosti v bodě c. Když je vyšší rychlost, pak je na základě Bernoulliho rovnice nižší tlak. To má za následek nucený pohyb tekutiny zpět směrem k náběžné hraně. V momentě, kdy tento vliv tekutiny na povrchu obtékaného tělesa zastaví a ta se začíná pohybovat zpět, vzniká úplav [1] [4].

2.9 Aerodynamické síly působící na vozidlo a bezrozměrné součinitele

Na pohybující se vůz můžou obecně působit síly ve všech třech směrech kartézského soustavného systému. Aerodynamické síly obvykle působí pouze ve směru x (směr aerodynamického odporu) a ve směru z (směr vztlaku, respektive přítlaku). Tvary těles (vozidel) jsou v tomto ohledu charakterizovány, obvykle experimentálně zjištěnými, součiniteli. Součinitele jsou obvykle charakterizovány rovnicí ve tvaru poměru mezi silou působící na těleso (vozidlo) v daném směru a měrnou kinetickou energií proudění vynásobenou plochou průřezu kolmému na směr proudění. Odporový součinitel C_d (rovněž uváděn jako C_x) se určí jako: $C_d = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^2 S}$ a součinitel vztlaku C_l (rovněž také C_z) jako $C_l = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^2 S}$.

Koeficient C_y není z hlediska aerodynamiky, na kterou se tato práce zaměřuje, významný, ale v případě potřeby jej lze spočítat analogicky.

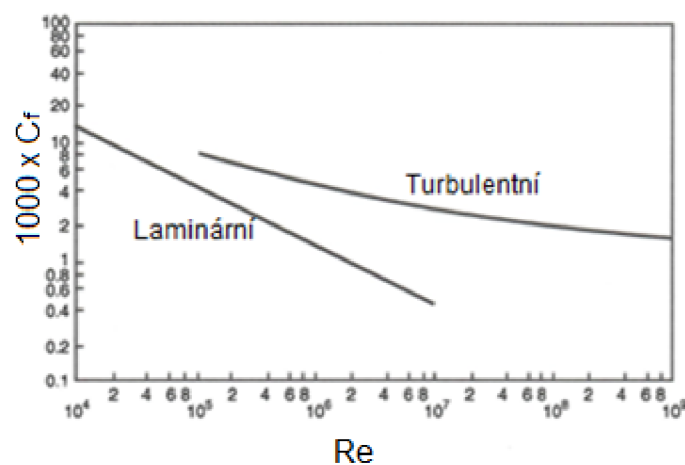
Celkový odpor se skládá ze dvou složek – z třecího odporu a tlakového odporu. [1]

2.9.1 Třecí odpor

Třecí odpor vzniká v mezní vrstvě, kde tekutina musí být považována za reálnou, a tedy viskózní. Velikost třecího odporu charakterizuje součinitel C_f , který je definován vztahem:

$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^2} \quad (12)$$

Součinitel C_f je závislý na druhu proudění, a tedy na Reynoldsově čísle (druh proudění v mezní vrstvě může ovlivnit i např. drsnost povrchu atd.) [1]. Zároveň platí, že pokud se v mezní vrstvě vyskytuje turbulentní proudění, je třecí odpor vyšší než při laminární mezní vrstvě za proudění se stejným Reynoldsovým číslem. S rostoucím Reynoldsovým číslem součinitel třecího odporu klesá, a to do chvíle, kdy je tak vysoké, že se v mezní vrstvě začíná vyskytovat turbulentní proudění [1] [4].



Obrázek 3: Závislost součinitele třecího odporu na Reynoldsově čísle, upraveno dle [1]

2.9.2 Tlakový odpor

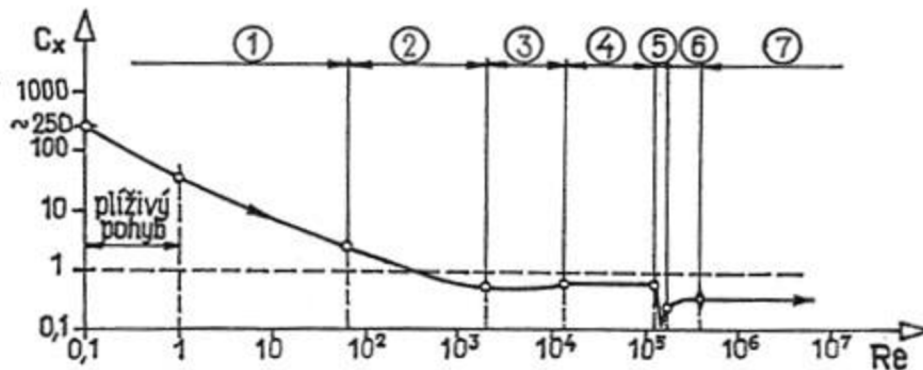
Tlakový odpor je odpor, který vzniká nesymetrií tlaků kolem obtékaného tělesa. Zatímco v přední části tělesa dochází k přeměně dynamického tlaku na statický a ke vzniku vysokého stagnačního tlaku, za vozidlem, v oblasti brázdy, se nachází oblast s tlakem nízkým. Výsledný profil působí na těleso silou proti jeho směru pohybu a vzniká tlakový (někdy nazývaný tvarový) odpor [4]. Tlakový odpor tělesa daného tvaru je charakterizován rozložením tlakového pole okolo tělesa. To lze kvantifikovat součinitelem tlaku: [1]

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho v_\infty^2} = 1 - \frac{v^2}{v_\infty^2} \quad (13)$$

2.9.3 Celkový odpor

Sloučením tlakového a třecího odporu vzniká odpor celkový. Celkový odpor je definovaný součinitelem C_d definovaným výše. Jelikož jsou dílčí složky (třecí a tlakový odpor) závislé na Reynoldsově čísle, musí na něm být závislý pochopitelně i odpor celkový. Závislost lze popsat experimentálně zjištěnými funkcemi. Přitom je nutné zohlednit razantní změnu chování funkce při přechodu z laminárního proudění na proudění turbulentní. Na obrázku 4 je graf závislosti součinitele odporu C_d na Reynoldsově čísle při obtékání koule. Závislost je však

velmi podobná i při obtékání dalších těles. V oblasti 1 je hlavní složkou odporu složka třecího odporu, protože za tělesem nevzniká úplav, a tlakový odpor tedy není významný. K odtržení mezní vrstvy dochází až v oblasti 2. V oblasti 3 můžeme pozorovat lehký nárůst celkového součinitele odporu, který je důsledkem zvýšeného víření za obtékaným tělesem. Od této oblasti je nejvýznamnější složkou odporu odpor tlakový. V oblasti 4 je součinitel téměř konstantní, dochází však k přechodu mezní vrstvy do turbulentní fáze. V oblasti 5 je pak znatelný prudký pokles součinitele, který je způsobený tím, že v místě, kde mezní vrstva přechází do turbulentního stavu, dochází také k utržení mezní vrstvy a ke vzniku úplavu. V oblasti 6 dochází k mírnému zvýšení celkového odporu a dále v oblasti 7 už je téměř konstantní [4].



Obrázek 4: Závislost C_x na Re pro tvar koule [4]

Třecí odpor nelze nikdy dokonale eliminovat, neboť vždy bude existovat tření mezi tekutinou a tělesem. U běžných silničních vozidel způsobuje tato složka odporu nárůst součinitele C_d o 0,04 až 0,05. Oproti tomu složka odporu způsobená nesymetrií tlakového profilu způsobuje nárůst až 0,45 (obvykle okolo 0,3). Druhý takto významný nárůst může být způsobený snahami o co nejvyšší přítlak (pomocí např. přitlačných křidélek), neboť rozkladem aerodynamické síly působící na profil křídélka vzniká vždy také odpor. Další, už však jen marginální, přírůstky na C_d vznikají prouděním vzduchu do masky chladiče, nebo vnitřním prouděním například při otevřených okénkách [1].

Sílu celkového odporu lze vyjádřit Newtonovým vztahem: [4]

$$F_D = \frac{1}{2} \rho c_d S v_\infty^2 \quad (14)$$

Při vztažení tohoto vzorce k aerodynamice automobilu lze dojít k tomu, že o celkových jízdních vlastnostech vozu nerozhoduje pouze součinitel odporu, ale také celkový obsah čelního průřezu automobilu.

U klasických silničních vozidel, kde se obvykle nenachází žádná přitlačná křídélka, ani další prvky vytvářející přítlak, se pracuje tedy především se snižováním tlakového odporu. Ten lze snižovat vhodným tvarem karoserie. Pro demonstraci, jak tvar karoserie ovlivňuje C_d , může posloužit 4. generace vozu Škoda Octavia, která se vyrábí v provedení liftback a kombi. Zatímco pro provedení liftback je uváděn C_d jako 0,24, pro variantu kombi činí 0,26 [7].



Obrázek 5: CFD simulace vozu Škoda Octavia liftback, rychlostní profil [7]



Obrázek 6: CFD simulace vozu Škoda Octavia kombi, rychlostní profil [7]

Rozdíl C_d mezi oběma variantami lze zdůvodnit při pohledu na CFD simulace obou vozů. Největší rozdíl lze pozorovat ve velikostech úplavu vznikajících za vozidlem. Je očividné, že za variantou kombi je úplav znatelně větší a za vozidlem vzniká podtlak na větší ploše. Tlakový odpor je tedy vyšší než u varianty liftback. Sedany a liftbacky mají obecně často velmi dobrou karoserii, co se aerodynamiky týče [8]. Například elektromobil Tesla Model S dosahuje součinitele odporu 0,208, což z ní dělá jeden z neaerodynamičtějších sériově vyráběných vozů [9].

3 Používané aerodynamické prvky na vozidlech

V této kapitole bude popsáno několik významných aerodynamických prvků, používaných jak na závodních (sportovních), tak osobních automobilech. Prvky a úpravy, které mají zlepšovat aerodynamiku vozů, mohou snižovat odpor a vztlak. Za aerodynamické prvky však můžeme považovat také prvky, které upravují proudění vzduchu tak, aby přispívalo k chlazení brzd či motoru. Mnoho níže popsaných prvků a úprav má skutečný význam pouze u speciálních sportovních vozů, případně u formulí, a to především protože začínají být efektivní až při rychlostech převyšujících rychlosti povolené na silnicích a dálnicích. Kromě aerodynamického využití se však jedná také do jisté míry o estetické doplňky, dodávající autu sportovní vzhled, a proto jsou k vidění i na vozech běžného provozu. Důležité je také podotknout, že všechny prvky jsou velice komplexní a není cílem této práce je popsat dopodrobna. Cílem této kapitoly je vytvořit kontext pro difuzor na podvozku vozidla, který je hlavním předmětem této práce.

3.1 Přední splitter a air dam

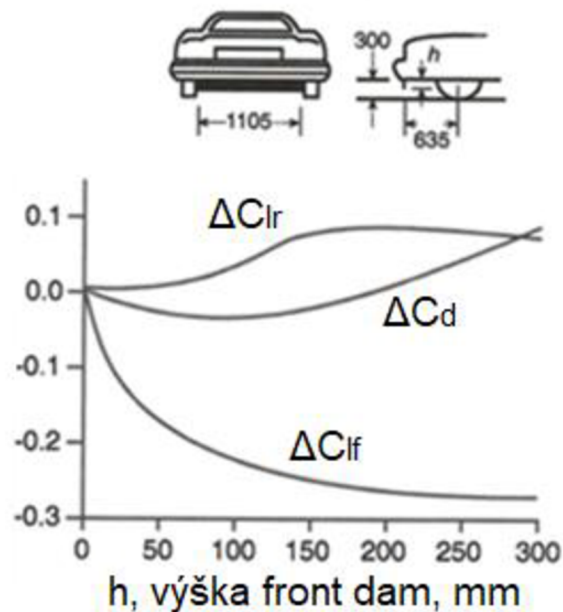
Přední splitter se nachází v přední části vozidla, kde je umístěný na spodní část nárazníku. Jedná se v podstatě o plochou desku, kopírující tvar nárazníku. Jeho hlavní význam spočívá v tvorbě přtlaku v přední části vozu. Tvorba přtlaku (tedy snižování koeficientu C_l) vzniká nárazem vzduchu na přední část vozu, kde aby mohl splitter obtékat, musí vzduch změnit svůj směr a tím pádem v jeden moment zastavit. Zastavení vzduchu má za následek vznik vysokého stagnačního tlaku. Z toho vyplývá, že na horní ploše splitteru vzniká přetlak a na dolní ploše podtlak. Plocha splitteru tedy poskytuje potřebnou plochu pro tvorbu přtlakové síly. Další výhodou vzniku přtlaku nad splitterem může být vyšší proudění do masky chladiče, to je důvod proč se náznaky splitterů objevují u klasických sériově vyráběných osobních vozidel. [10]



Obrázek 7: Přední splitter přidaný v rámci tuningu na Škodu Octavii IV RS. [11]

Uvádí se obecná poučka, která říká, že aby splitter účinně produkoval přtlak, musí být alespoň dvakrát delší, než je světlá výška vozidla. Dále se uvádí, že efektivní přtlak je znát až v rychlostech vyšších než 120 km/hod. Po uvážení těchto dvou faktů je zřejmé, že splitter je efektivní využívat jen u závodních automobilů, protože pro pohyb na běžných komunikacích je nutná určitá světlá výška vozidla a splitter by tedy musel být příliš rozměrný. Dále pak běžná vozidla obvykle nedosahují rychlosti 120 km/hod, v České republice to lze pouze na dálnicích, na kterých se obvykle nenachází prudké zatáčky, pro jejichž průjezd by bylo potřeba generovat další přtlak. [10]

Oproti tomu air dam (což by šlo volně přeložit jako vzduchová přepážka) je v podstatě jen rozšíření předního nárazníku směrem dolů, což snižuje světlou výšku vozidla a zlepšuje vlastnosti podobně jako splitter, ale méně efektivně [10] [12]. Snížení světlé výšky vytvoří menší prostor pro obtékání pod vozidlem, čímž se proudění zrychlí a sníží se mu tlak. Air dam a splitter se často využívají společně, protože snížení světlé výšky zvyšuje efektivitu splitteru. Zajímavé je, že se air dam používá například i u vozů typu pick-up, které mají jinak velmi špatné aerodynamické vlastnosti [12].



Obrázek 8: Graf závislosti změny jednotlivých koeficientů na výšce air dam, upraveno dle [1]

Na obrázku 8 je znázorněna závislost změny koeficientů odporu ΔC_d a koeficientů vztlaku v přední a zadní části vozu ΔC_{lf} a ΔC_{lr} . Geometrie automobilu odpovídá generickému sedanu. Lze pozorovat, že při zvyšování výšky air dam nepřímo úměrně klesá koeficient vztlaku (a tedy roste přítlak) v přední části vozu, což je primárním účelem tohoto prvku. V zadní části vztlak vlivem této úpravy automobilu lehce naůstá. Koeficient odporu nejprve lehce poklesne (řádově o jednotky setin) a následně začne narůstat [1].

Lehkého poklesu se však využívá k šetření paliva například u vozů typu pick-up, jaký lze vidět na obrázku 9 [12].



Obrázek 9: Americký pick-up Ford F150 s úpravou air dam [12]

Jak už bylo zmíněno splitter a air dam na vozidle má kromě přítlaku také pozitivní vliv na součinitel odporu, který snižuje. Například sportovní vůz Mazda Miata 1990–1997 (v Evropě prodávána pod názvem MX-5), který má bez úprav součinitel odporu 0,36, dosáhl přidáním vzduchové přepážky C_d 0,31 a přidáním vzduchové přepážky a předního splitteru dokonce hodnoty 0,29. Pro součinitel vztlaku C_l byly hodnoty 0,27 z výroby, s air dam -0,36 a s kombinací air dam a splitter -0,49 [13].



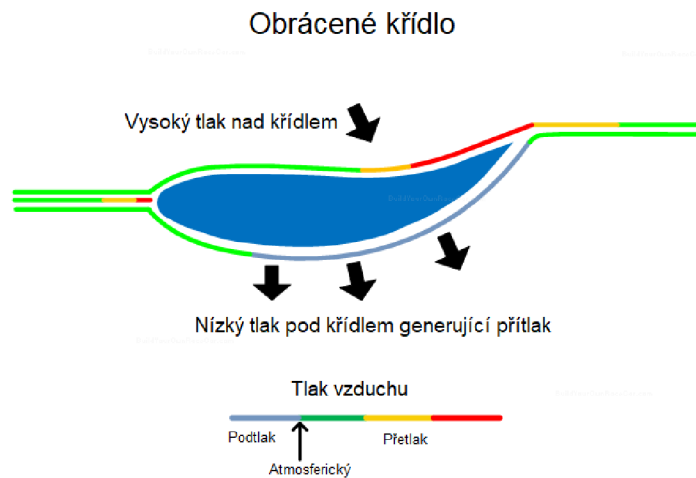
Obrázek 10: CFD simulace rychlostního profilu Mazda Miata [13]

3.2 Přední křídlo

Podobně jako splitter popsany v předchozí kapitole se v přední části některých vozů nachází přední křídlo. Přední křídla se využívají u monopostů s nekrytými koly, jakými mohou být například vozy Formule 1, IndyCar a jiné formule. U závodních vozů s krytými koly nejsou křídla samostatná součást, ale tvaruje se předek vozu tak, aby měl vhodné aerodynamické vlastnosti [1]. Přední křídlo je velice komplexní záležitost, a protože se využívá výhradně pro závodní vozy, bývá laděno vždy pro konkrétní závod a okruh. U Formule 1 má přední křídlo zhruba 100 různých nastavení, které ovlivňují jeho funkci [14].

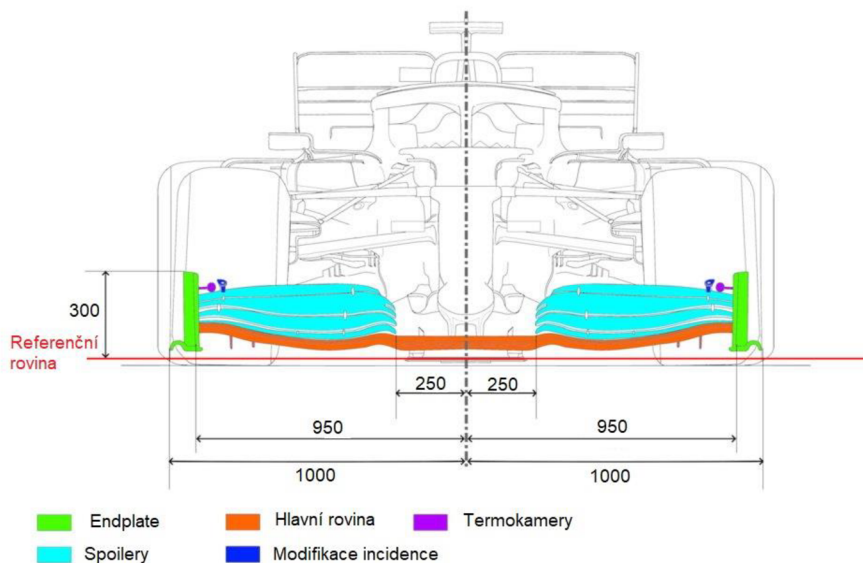
Přední křídlo má dvě hlavní funkce. První z nich je generace přítlaku vozu. Princip předního křídla u vozu je stejný jako princip křídla u letadla. Ovšem zatímco geometrie křídla letadla generuje vztlak, geometrie obráceného křídla, která se využívá u aut, generuje přítlak (jak je znázorněno na obrázku 11) [1]. Za obvyklé situace je až jedna třetina celkového přítlaku monopostu Formule 1 generována předním křídlem. V případě jízdy za jiným vozem, který víří vzduch se podíl snižuje. Druhá neméně důležitá funkce předního křídla je vhodná distribuce

proudění k dalším částem monopostu. Další proudění se vhodně přivádí k dalším aerodynamickým prvkům (např. k difuzoru na podvozku) nebo se využívá k chlazení (např. k chlazení brzd) [14].



Obrázek 11: Geometrie obráceného křídla, upraveno dle [15]

Přední křídla moderních monopostů Formule 1 se skládají z mnoha částí, které jsou vyobrazeny na obrázku 12.

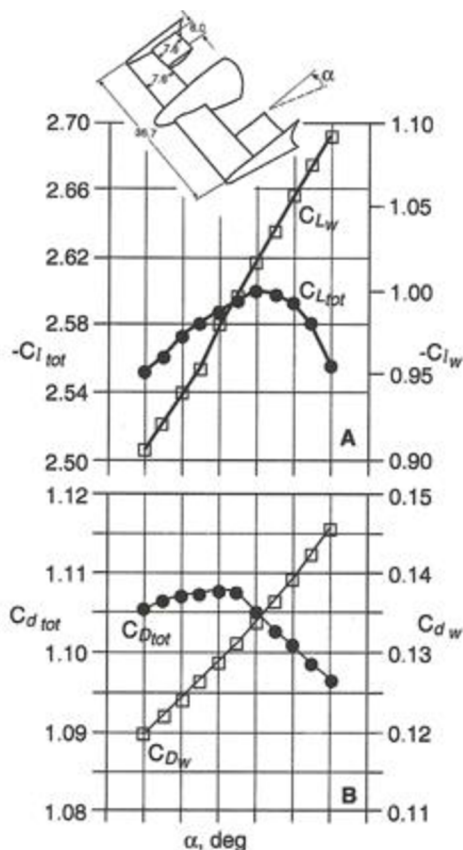


Obrázek 12: Části předního křídla monopostu Formule 1 (do sezony 2021), upraveno dle [16]

Na boční části křídla se nachází endplates, které odklání proudění od vnějších stran předních kol a zabraňují tak škodlivým turbulencím. Významnou částí křídla jsou dále spoilery, které generují samotný přítlak. Spoilerů bývalo obvykle pět, nyní čtyři, což je počet, který pravidla umožňují. Dále je na obrázku 12 znázorněna hlavní rovina. Její geometrie je podrobena přísným pravidlům a je kontrolována při technických kontrolách monopostu. Pravidla určovaly například neutrální zónu 250 mm od osy monopostu (oblast, kde se nemohou nacházet spoilery), maximální šířku 1000 mm na každou stranu od osy vozu, či maximální výšku 300 mm [16]. Na sezónu 2022 byla pravidla soutěže Formule 1 upravena a ve snaze omezení

tvorby turbulencí škodlivých pro vozy jedoucí za jiným, byla zrušena neutrální zóna a počet spoilerů byl snížen z pěti na čtyři [17].

Protože přední křídlo kromě tvorby přitlaku ovlivňuje i další proudění, a tedy funkci dalších prvků, liší se průběhy v součinitelích odporu a vztlaku pro samotná křídla a pro vůz jako celek. Součinitele jsou závislé na úhlu náběhu, tak jak je znázorněno na obrázku 13, kde jsou pozorovány součinitele celkové (s indexem „tot“) a součinitele v přední části vozu (s indexem „w“) [1].



Obrázek 13: Závislost součinitelů na úhlu náběhu [1]

Jak je vidět na obrázku 13, při rostoucím přitlaku roste také odpor, který je nežádoucí. Často se tedy zavádí poměr $-C_l/C_d$, který má dosáhnout co nejvyšší hodnoty (tzn. co největšího přitlaku za co nejmenšího odporu). Obrázek 13 zobrazuje přední křídlo formule soutěže Indy Racing League 2002, nejedná se tedy o příliš aktuální monopost. Spíš než konkrétní hodnoty z grafů je důležitý trend způsobený křídlem [1].

Jiný zdroj uvádí následující tabulku, jejíž hodnoty byly získány pomocí CFD simulací. Tyto hodnoty byly získány pro vozy Formule 1 [18].

Tabulka 1: Hodnoty součinitelů v závislosti na úhlu náběhu, dle [18]

Úhel náběhu [°]	C_l [-]	C_d [-]	C_l/C_d [-]
-1	-1,09	0,39	-2,79
0	-1,14	0,4	-2,85
1	-1,21	0,412	-2,94
3	-1,25	0,423	-2,96
4	-1,3	0,438	-2,97
5	-1,27	0,454	-2,80

V absolutní hodnotě se nejvyššího poměru C_l/C_d dosahuje při úhlu náběhu 4 °, tento úhel lze tedy považovat za optimální. Jak již však bylo zmíněno výše, přední křídlo má mnoho nastavitelných prvků a konkrétní vlastnosti se tedy navrhuje pro konkrétní potřeby závodu [18].

Další faktor, který ovlivňuje efektivitu je světlá výška křídla, respektive poměr světlé výšky a délky křídla. Experimenty ukázaly, že pro nejvyšší efektivitu křídla je vhodný poměr světlé výšky ku délce křídla 0,22 [18].

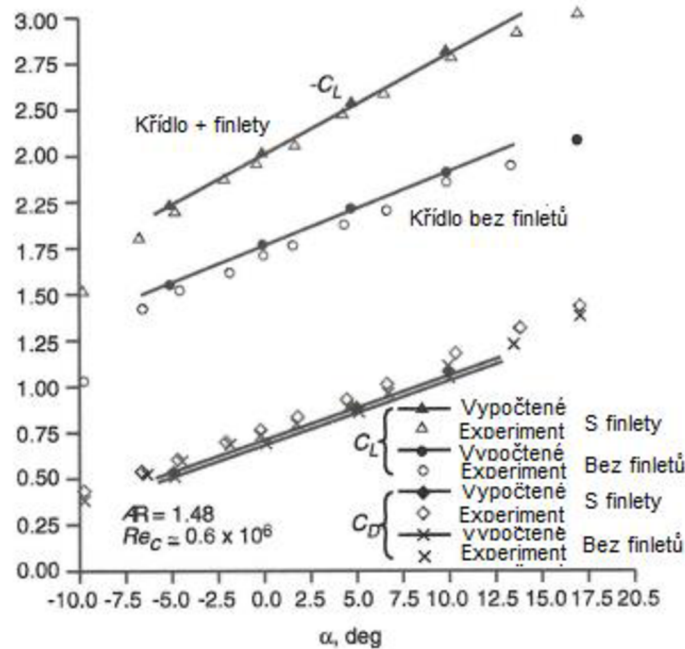
3.3 Zadní spoiler a křídlo

V návaznosti na předchozí podkapitoly je také nutné podotknout, že monopost či vůz obecně, musí být v aerodynamické rovnováze a musí se tedy pracovat jak s přítlakem v přední, tak i v zadní části vozu. Přítlak přední části vozu zajišťuje z největší části přední křídlo, které bylo popsáno v předchozí podkapitole. Přítlak v zadní části zajišťuje prvek vícero. Kromě zadního křídla či spoileru, to může být právě difuzor na podvozku [1]. Rozdíl mezi spoilerem a zadním křídlem není přesně definovaný, v některé literatury tyto dva pojmy považují za synonymum. Spoiler je však obecně méně výrazný a menší prvek. Spoiler bývá obvykle souvisle navazující součást zadní části vozu, zatímco křídlo bývá umístěno ve větší vzdálenosti od karoserie na konstrukci [19].

3.3.1 Křídlo

Hlavní funkcí zadního křídla je vytváření přítlaku. Funguje na stejném principu jako křídlo letadla, avšak místo vztlaku vytváří přítlak, který je pro automobily žádoucí. Přítlak vzniká následkem rozkladu aerodynamické síly na geometrii obráceného křídla, která je uvedena na obrázku 11. Při návrhu zadního křídla jsou rozhodující tři hlavní parametry. Podobně jako je tomu u předního křídla, ovlivňuje vlastnosti náběžný úhel, dále také délka samotného křídla a počet křídel. Počet křídel může být vyšší především u vozů s odkrytými koly.

S vícero křídly sice stále klesá součinitel vztlaku, ale zároveň klesá absolutní hodnota poměru vztlaku a odporu, tedy v tomto ohledu přestává být použití křídla efektivní. [1]



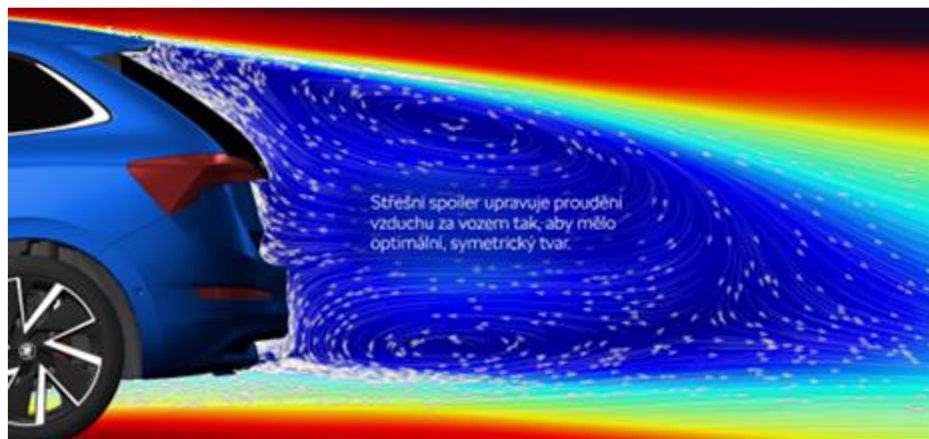
Obrázek 14: Závislost koeficientů na úhlu náběhu křídla, upraveno dle [1]

Na obrázku 14 je znázorněná závislost součinitelů přitlaku a odporu v závislosti na náběžném úhlu křídla. Z grafu je zřejmé, že jak součinitel odporu, tak součinitel vztlaku je přímo úměrný náběžnému úhlu (ovšem s jinou konstantou úměrnosti). Použití zadního křídla tedy spolu s lepším, větším přitlakem přináší i nárůst odporu. Při návrhu náběžného úhlu musí podle požadavků na konkrétní vozidlo dojít k určitému kompromisu mezi nárůstem přitlaku (v zadní části vozu) a nárůstem odporu [1].

Zadní křídla mají velice často, podobně jako přední křídla, na svých koncích finlety, které zabraňují vzniku škodlivých turbulencí. Podobně jako winglety zabraňují víření vzduchu na koncích křídel u letadla a vzniku indukovaného odporu [1].

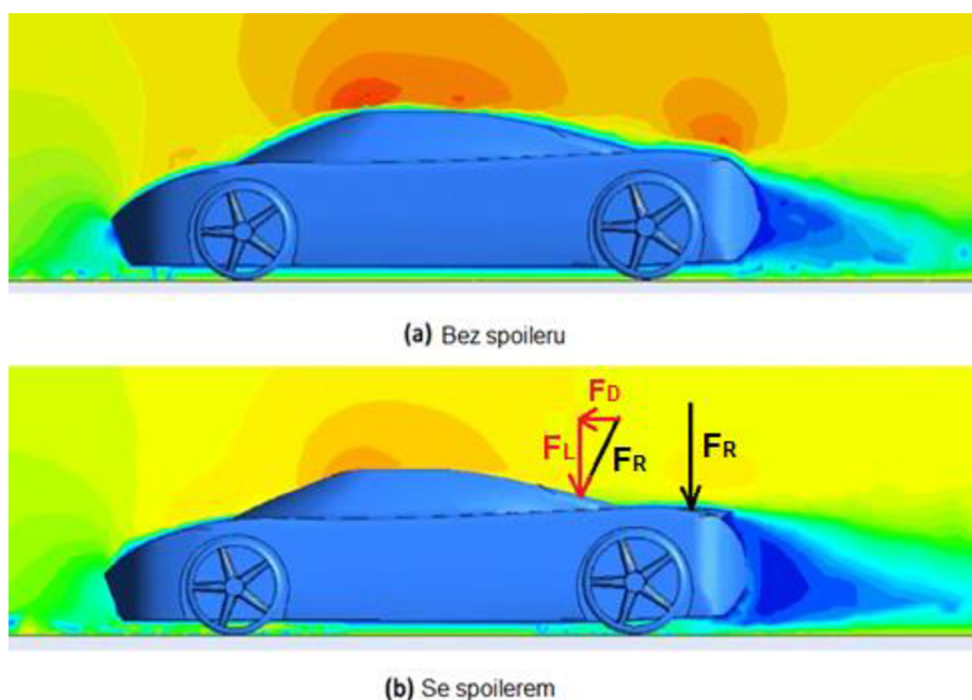
3.3.2 Spoiler

Zatímco u závodních automobilů a u formulí jsou zadní křídla obvykle velmi rozměrným prvkem, u běžných silničních automobilů se využívá spoilerů, které bývají často nenápadné. U některých vozů, nejčastěji automobilů s karosérií SUV, kombi, hatchback, či MPV, pomáhají k lepším vlastnostem také finlety, které mají stejnou funkci, jakou zastávají endplates [20].



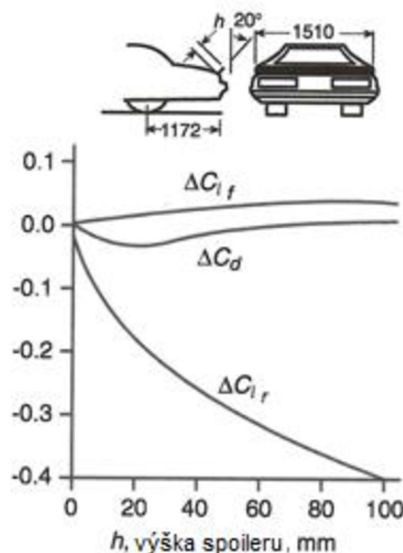
Obrázek 15: CFD simulace rychlostního profilu za vozem Škoda Scala se střešním spoilerem [20]

Spoiler má oproti křídlu nespornou výhodu v tom, že za vhodné volby náběžného úhlu a délky spoileru může dojít dokonce ke snížení součinitele odporu a zlepšení přitlaku zároveň. Spoiler ovlivňuje jednak rychlostní, resp. tlakové pole nad vozidlem, a jednak nízkotlakou brázdou vznikající za vozidlem [21]. Snížení rychlosti na horní straně vozu vyvolá vyšší tlak v této oblasti. To generuje přitlak a při vhodné karosérii, kdy není konec vozu vodorovný, ale je nakloněný pod úhlem, se tato síla rozkládá do složky přitlaku a síly ve směru osy x , která má ovšem směr ve směru pohybu vozu a odpor tedy ve skutečnosti snižuje. Rychlostní pole a rozklad síly je naznačený na obrázku 16 [22].



Obrázek 16: Rychlostní profil okolo vozidla bez spoileru vs. se spoilerem, upraveno dle [21]

Podle grafu na obrázku 17 je vidět, že záporná změna součinitele odporu se nachází jen v úzkém pásmu výšky spoileru. Součinitel vztlaku (v zadní části vozu) má klesající trend za každého rozměru [1] [22]. Aby tedy spoiler zlepšoval jak odpor, tak přítlak, musí být jeho návrh velice důkladný.



Obrázek 17: Závislost součinitelů na výšce spoileru, upraveno dle [1]

3.4 Rozšířené prahy a boční generátory vírů

Při generování přítlaku je nutné, aby pod podvozkem vozu byl rychle proudící vzduch o nízkém tlaku. Toho je dosahováno také malou světlou výškou vozu, splittery či využitím air dam, což bylo popsáno v předchozí kapitole. Po stranách vozidla je tedy oproti prostoru pod podvozkem přetlak. Aby se předešlo vyrovnávání tlaku a byl zachován podtlak pod vozidlem, využívají se prahy nebo generátory vírů. Rozšířené prahy jsou jednoduchým prvkem, který funguje jako mechanická zábrana vyrovnávání tlaků [23]. Oproti tomu generátory vírů jsou obvykle jen malá křídélka umístěná na přední nárazník. Vytvořené víry následně fungují jako bariéra, která také brání vyrovnání tlaků. Toto řešení je méně efektivní a často je využíváno v kombinaci s rozšířenými prahy. S vhodnou geometrií a umístěním mohou generátory vírů přítlak tvořit také stejným principem jako přední a zadní křídla [24]. Aby tyto prvky přítlak generovaly efektivně, musí být dosahováno vysokých rychlostí. Zároveň platí, že rozšířené prahy fungují pouze pokud jsou umístěny velice nízko nad zemí [23].

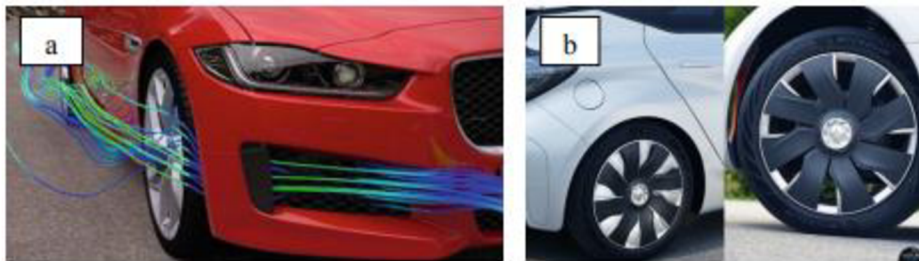


Obrázek 18: Znázornění vzniklého víru u závodního automobilu [24]

3.5 Obtékání kol

Kola jsou z hlediska aerodynamiky problematická část vozidla. Obzvláště pak u vozů s nekrytými koly. V prvé řadě lze kolo považovat za válec a při jeho obtékání vzniká v jeho přední části vysoký stagnační tlak a za ním naopak nízkotlaká oblast brázdy. To ještě umocňuje fakt, že kolo rotuje. Částice vzduchu, které ulpívají na kole se rotací dostávají do přední části kola, a přispívají k vysokému rozdílu tlaků [25].

K efektivnímu snížení odporu a vztlaku dojde při zmenšení šířky kola. Zúžení kola však může negativně ovlivnit jízdní vlastnosti automobilu. Proto jsou u osobních automobilů využívány jiné způsoby, jak aerodynamiku kola zlepšit. Mezi nejjednodušší patří deflektory, které snižují tlak před kolem samotným. U nových, moderních vozů je navrhován „air curtain“, což lze volně přeložit jako vzduchová clona. Jedná se o vtoky umístěné v přední části nárazníků. Vhodné vedení proudění z oblasti předního nárazníku nebo motorového prostoru okolo kola vytváří clonu mezi prouděním v okolí a povrchem pneumatiky, což zlepšuje aerodynamické vlastnosti kola. V posledních letech se také využívá aerodynamických krytů kol [25].



Obrázek 19: a) znázornění funkce air curtain b) aerodynamické kryty kol [25]

Problém, který vzniká v souvislosti s obtékáním předních nekrytých kol (například u vozů Formule 1), je množství vírů vzniklé v brázdě za kolem, které se pohybují dále kolem vozidla [1]. Ku příkladu monoposty Formule 1 tento vířivý vzduch usměrní deflektory do sání chlazení motoru. Deflektor je upevněný na horizontální desce, která, díky tomu že u sání vzniká vyšší tlak, produkuje další přitlak formule [26].

4 Difuzor

Jako difuzor se obecně označuje kanál, trubice, tunel atp., kterému se postupně (či náhle) rozšiřuje obsah jeho průřezu. Difuzor má opačný efekt, než jaký má tryska. Hlavní efekt při průchodu proudění difuzorem, důležitý v kontextu automobilů, je snížení jeho rychlosti a nárůst tlaku. Ke snížení rychlosti dochází v důsledku zákona zachování hmotnostního toku a k následnému nárůstu tlaku na základě Bernoulliho rovnice. Kromě toho lze energetickou rovnicí odvodit nárůst teploty a rovnicí stavovou pokles hustoty proudící tekutiny, a to za předpokladu rychlosti vyšší než zhruba 80 m/s. Tyto důsledky průchodu difuzorem však nejsou z hlediska této práce podstatné. Princip difuzoru se kromě automobilů využívá například také v reakčních proudových motorech náporových a pulzačních. Tyto motory pracují na Braytonově respektive Humphreyově cyklu a průchod nasávaného vzduchu difuzorem zajišťuje dostatečnou kompresi. Využití difuzorů nachází také obecně v turbínách v elektrárnách. Difuzor se využívá také v lopatkových strojích anebo v odstředivých čerpadlech, kde zajišťuje transformaci kinetické energie čerpaného média na energii tlakovou, tedy potenciální [27]. Další využití difuzorů nalézá v sušičce vzduchu, kde se využívá ke zpomalení vzduchu, čímž umožňuje vstřebávání vlhkosti sušicím materiálem. Takové difuzory mají oproti difuzoru na automobilovém podvozku větší úhel rozšiřování, cca 30 ° [28].

4.1 Proudění v difuzoru

Ačkoliv se konstrukce a geometrie difuzoru jeví velice jednoduše, proudění uvnitř něj je složitější. Důležitý je pro difuzor definovat ztrátový koeficient ζ (v některých literaturách K_L) a účinnost difuzoru.

Účinnost difuzoru při proudění plynů, lze odvodit z energetické bilance vycházející z Bernoulliho rovnice pro skutečnou, viskózní, tekutinu. Důležitý je poznatek, že v difuzoru není konána žádná práce a energie na vstupu difuzoru se tedy musí rovnat energii na výstupu. V kontextu automobilových difuzorů je možné zanedbat potenciální energii tíhového pole, protože měrná energie kinetická a tlaková ji značně převyšuje. Rovnici energetické bilance lze tedy zapsat ve tvaru:

$$\frac{p_i}{\rho} + \frac{v_i^2}{2} = \frac{p_e}{\rho} + \frac{v_e^2}{2} + Y_z \quad (15)$$

Levá strana rovnice se dá označit jako Y_i – měrná energie na vstupu, pravá strana jako $Y_e + Y_z$ – měrná energie proudění na výstupu a ztráty. Pomocí těchto zavedených veličin lze definovat účinnost difuzoru jako:

$$\eta = \frac{Y_e}{Y_i} = \frac{Y_i - Y_z}{Y_i} \quad (16)$$

Ztráty vznikají vnitřním třením tekutiny, třením o stěny difuzoru a vířením [29]. Další definice účinnosti je určena jako poměr reálného a ideálního koeficientu obnovy tlaku, které jsou definovány níže:

$$\eta = \frac{C_p}{C_{pi}} \quad (17)$$

Obecně lze ztrátový koeficient definovat jako tlakovou ztrátu při přeměně dynamického tlaku ku dynamickému tlaku na počátku:

$$\zeta = \frac{\Delta p_{ztráty}}{\frac{1}{2} \rho v_i^2} \quad (18)$$

Dále je možné ztrátový koeficient zapsat pomocí ideálního a reálného koeficientu obnovy statického tlaku, což jsou součinitelé definovány následovně [30] [31]:

$$C_{pi} = 1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (19)$$

$$C_p = \frac{p_e - p_i}{\frac{1}{2} \rho v_1^2} \quad (20)$$

Ztrátový koeficient lze zapsat rovnicí [30]:

$$\zeta = C_{pi} - C_p \quad (21)$$

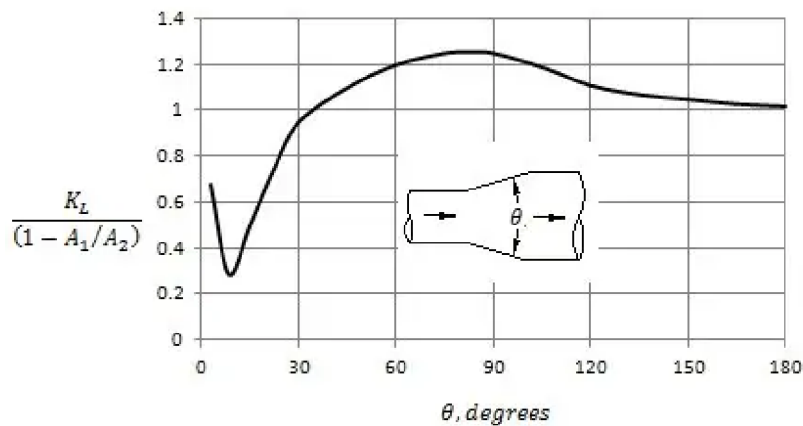
Protože ideální koeficient je závislý na veličinách, které závisí na geometrii difuzoru, závisí na geometrii difuzoru také ztrátový koeficient [31]. Ztráty v difuzoru jsou tedy závislé na vlastnostech proudění (jeho Reynoldsově čísle) a geometrii difuzoru, přesněji úhlu rozšiřování (divergence):

$$\zeta = f(Re, \theta) \quad (22)$$

Lze dokázat, že ve valné většině případů proudění v difuzorech je Reynoldsovo číslo dostatečně velké a viskózní účinky jsou zanedbatelné, následkem čehož bude ztrátový koeficient na Reynoldsově čísle nezávislý, tedy:

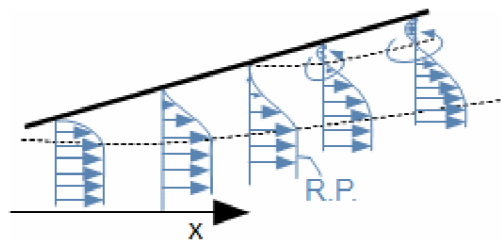
$$\zeta = f(\theta) \quad (23)$$

Závislost ztrátového koeficientu v závislosti na úhlu difuzoru popisuje pro vstupní čistě axiální proudění následující graf [32]:



Obrázek 20: Závislost ztrát difuzoru na jeho úhlu rozšiřování [32]

Na grafu na obrázku 20 lze vidět, že od 0° do zhruba 7° ztráty klesají, protože většina ztrát je způsobena třením a s větším úhlem stačí kratší difuzor (kratší difuzor znamená méně délky na které tření probíhá) pro stejnou přeměnu dynamického tlaku na statický. V tomto úhlu je difuzor nejefektivnější, protože se rozšiřuje nejrychleji a zároveň ještě nedochází k odtržení mezní vrstvy [32]. S narůstajícím úhlem dochází ke tvorbě turbulentních vířů odtržením mezní vrstvy, které nesou nevyužitelnou kinetickou energii a zároveň vytváří nevyužitelné teplo třením. Od mezního úhlu se vznik turbulentních vířů stává hlavním zdrojem ztrát. Dalšími marginálními zdroji jsou rozptyl kinetické energie středního toku a tření [30]. Zajímavé je, že vrchol křivky se nenachází přímo nad 90° ale těsně před ním. To je následkem ztrát vzniklých třením, které jsou u difuzoru s úhlem divergence 90° menší (téměř žádné) než u difuzoru s úhlem o něco menším, zatímco ztráty vířením jsou velmi podobné [29].



Obrázek 21: Znázornění odtrhování mezní vrstvy při rozšiřování difuzoru [29]

5 Difuzor na automobilovém podvozku

5.1 Důvody používání

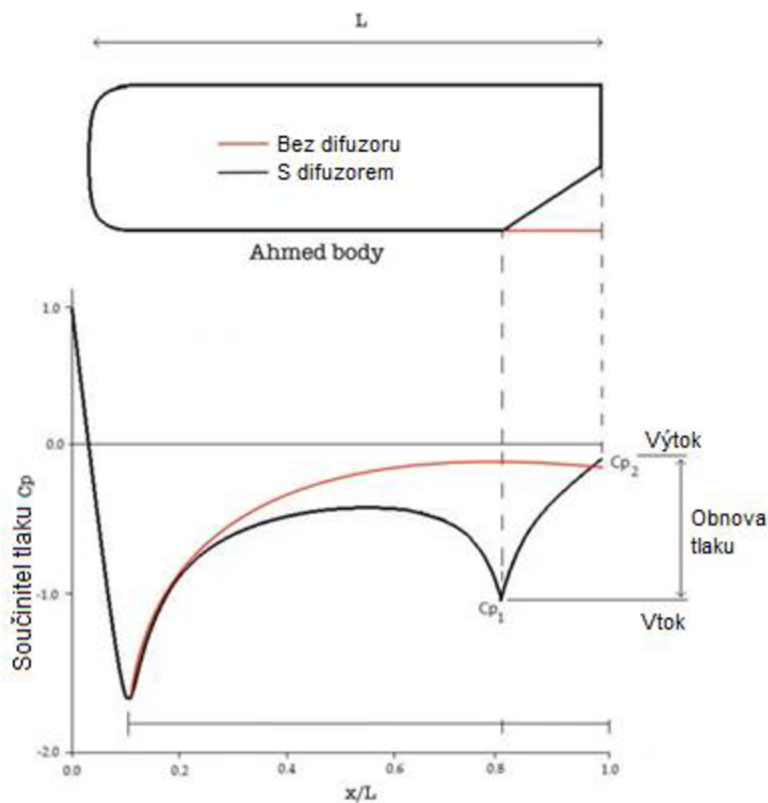
Jak bylo v této práci několikrát zmíněno, je žádoucí u vozidla dosahovat vysokého přitlaku za nízkého nárůstu odporu, nebo ideálně jeho poklesu. Z tohoto hlediska je difuzor na automobilovém podvozku efektivním prvkem, protože kromě vytváření přitlaku částečně eliminuje aerodynamický odpor [1] [21].

5.1.1 Princip tvorby přitlaku

Zatímco generování přitlaku na křídélkách lze objasnit rozkladem sil na obráceném křídle, v difuzoru vzniká přitlak na jiném principu. K jeho popsání slouží Bernoulliho rovnice, resp. Venturiho efekt. Princip generování přitlaku lze rozdělit na tři hlavní jevy – přízemní efekt, rozšíření difuzoru a tzv. „diffusor pumping“. Jak vysoký přitlak bude difuzorem na podvozku generovaný, určuje množství parametrů difuzoru a vozidla. Mezi hlavní parametry patří světlá výška vozidla, délka difuzoru a úhel difuzoru [33]. Podrobněji je vliv těchto parametrů rozebrán dále v práci.

Přízemní efekt je jev, který je hlavním obecným principem generování přitlaku. Aby byl na vozidle generován přitlak, je potřeba, aby se nad vozidlem nacházel vyšší tlak než pod vozidlem. V takovém případě působí výsledná síla v ose z směrem k silnici a vozidlo se stává lépe ovladatelným. Přízemní efekt zahrnuje dva fyzikální jevy. Prvním je již zmíněná Bernoulliho rovnice, kdy rychle pohybující se proudění pod podvozkem vytváří nižší tlak vzhledem k tlaku okolí. Prostor pod vozidlem se dá považovat za zúžený a podobně jako ve venturiho trubici, se ve zúžení zvyšuje rychlost a snižuje statický tlak. Druhý důležitý jev, který je třeba v tomto kontextu zmínit je Couettovo proudění [34].

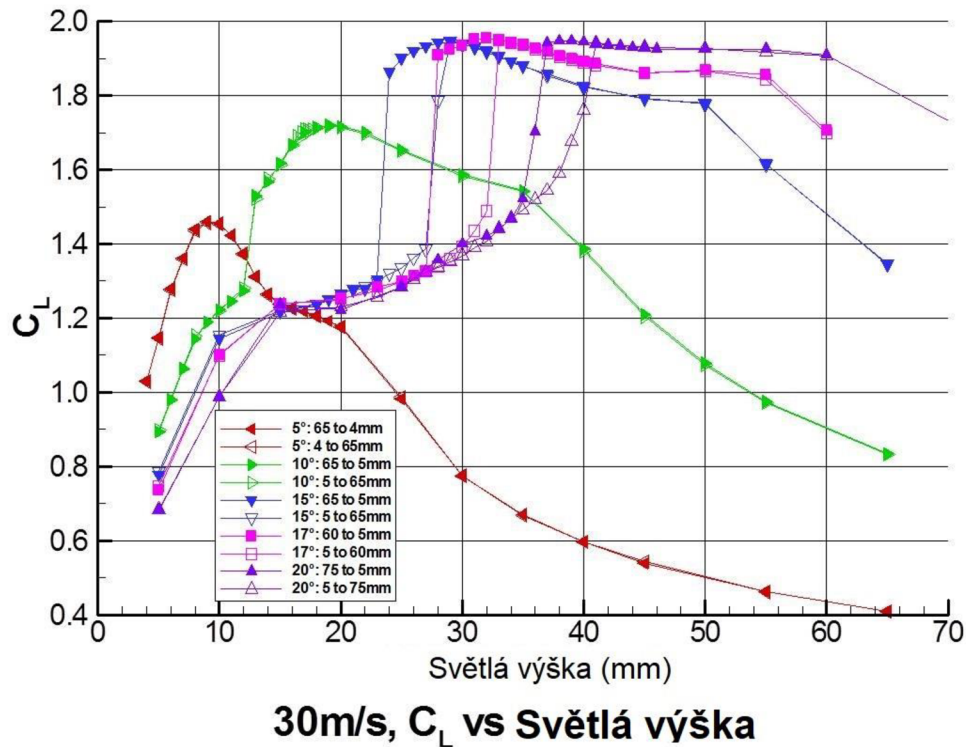
Jev pojmenovaný „diffuser pumping“ je spojený s rozšiřující se šířkou difuzoru po jeho délce a vysvětluje, jak difuzor urychluje proudění pod vozidlem a snižuje tím statický tlak. Při větším rozdílu obsahu průřezů na vstupu a výstupu difuzoru, čehož lze docílit například větším úhlem divergence, nebo větší délkou difuzoru, se zvyšuje schopnost obnovy dynamického tlaku na statický. Protože tlak za difuzorem je konstantní, vzniká nižší podtlak na vstupu difuzoru [33]. Názorný je jev při popisu obrázku 22.



Obrázek 22: Vývoj koeficientu obnovy statického tlaku, upraveno dle [35]

Na obrázku 22 je graf znázorňující průběh koeficientu tlaku. Jak je na grafu vidět, při vstupu proudění pod vůz (znázorněný Ahmedovým tělesem) tlak prudce poklesne. To je způsobeno tím, že do té doby volné proudění se musí koncentrovat do úzkého prostoru pod vozidlem, čímž podle rovnice kontinuity naroste jeho rychlost, a tak klesne statický tlak. Následně pod vozidlem proudění zpomaluje a statický tlak roste. V případě, že na vozidle difuzor není, tlak se srovná s tlakem okolním. V případě, že se na vozidle difuzor nachází, dojde na jeho začátku k poměrně výraznému poklesu tlaku. Dále při proudění v samotném difuzoru dochází k rychlému zpomalení proudění a nárůstu tlaku. Pokles tlaku na začátku difuzoru je výhodný, protože nutí proudění před difuzorem proudit rychleji, udržovat pod vozidlem nízký tlak a vytvářet tak přitlak. Toho si lze všimnout i na grafu na obrázku 22. [35]

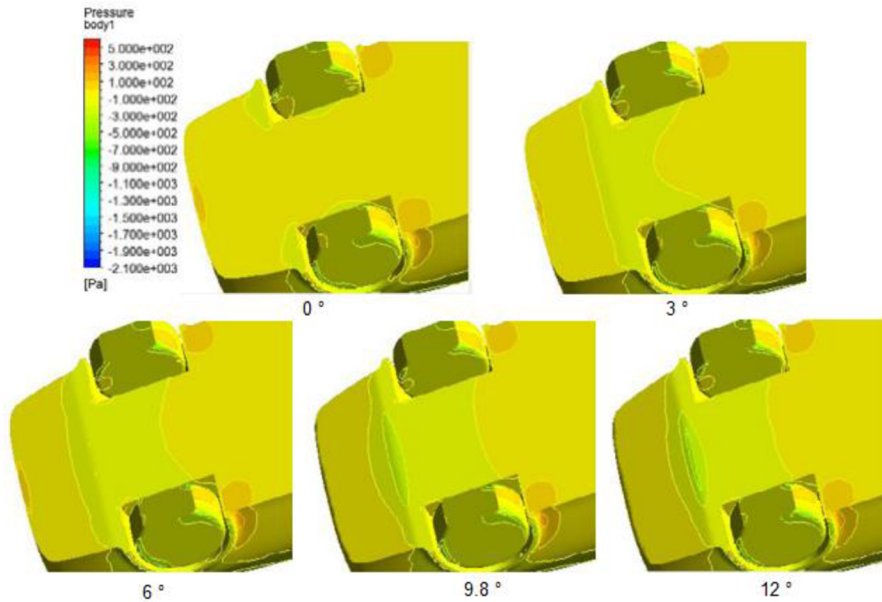
Velikost přitlaku je závislá na světlé výšce vozidla. Do určitého momentu platí, že s nižší světlou výškou roste přitlak. Vyšší přitlak při snižování světlé výšky je dán silněním vírů generovaných na okrajích difuzoru (tyto víry jsou více popsány v podkapitole 5.2). Při dalším snižování však víry slábnou a následně zanikají, což má za následek i pokles generovaného přitlaku. Závislost přitlaku na světlé výšce je různá pro různé úhly difuzoru, jak znázorňují křivky na grafu na obrázku 23 [36].



Obrázek 23: Závislost přitlaku na světlé výšce pro různé úhly, upraveno dle [36]

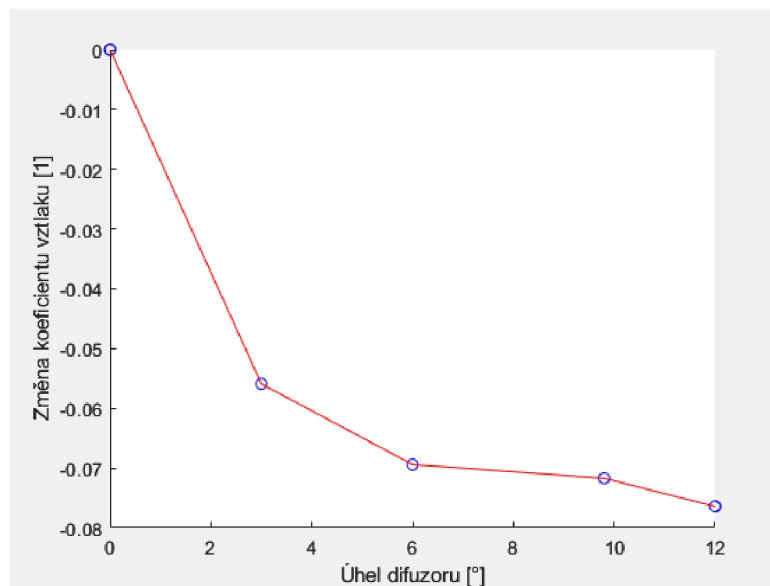
Na grafech je zároveň vidět, že vyššího přitlaku dosahují difuzory s větším úhlem divergence.

Na rozdíl od součinitele odporu přítlak roste s úhlem difuzoru stále (v realizovatelném spektru úhlů) až do mezního úhlu, kdy difuzor přestane fungovat jako difuzor. Pro generický sedan, stejný jako je na obrázku 26, a pro stejné úhly pro které jsou vyobrazeny tlaky, byly numerickými modely zjištěny součinitele vztlaku. Jeho změna vůči referenčnímu úhlu 0° je zobrazena na obrázku 25. [37]



Obrázek 24: Tlakové profily na podvozku u různých úhlů difuzoru, upraveno dle [37]

Na tlakových konturách je pozorovatelný nižší tlak při vyšším úhlu divergence difuzoru. Dobře pozorovatelný je také vrcholek poklesu tlaku na počátku difuzoru, který byl popsán výše.



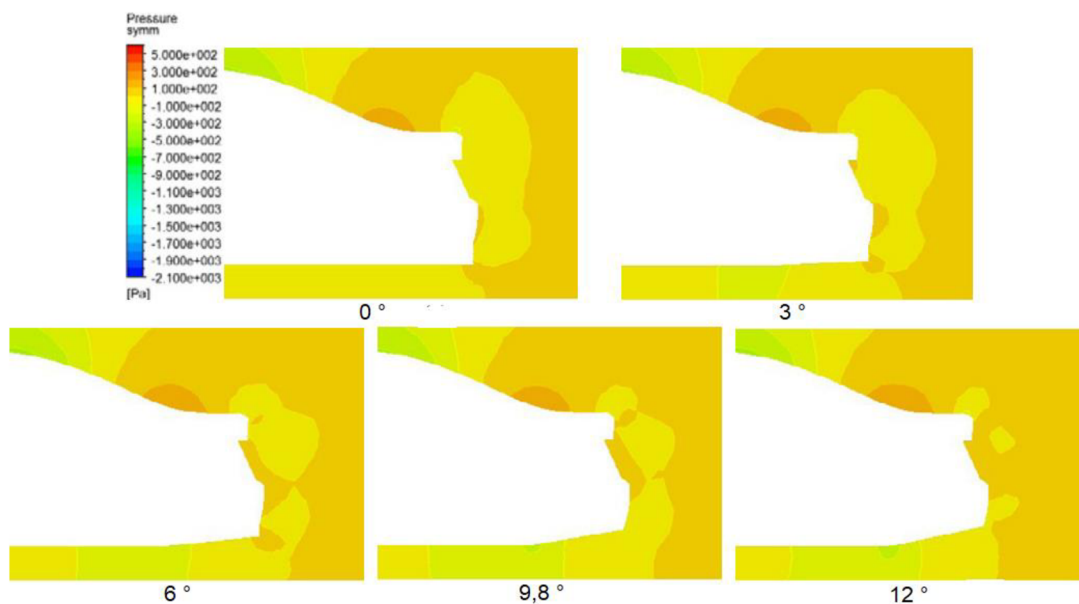
Obrázek 25: Závislost změny koeficientu vztlaku na úhlu difuzoru, dle [37]

5.1.2 Aerodynamická hysterze

Tento jev se projevuje především u difuzorů s větším úhlem divergence. Pokud dojde k zániku vírů na okrajích difuzoru a dojde k výraznému poklesu přtlaku, je pro znovu obnovení stejného přtlaku potřeba vyšší světlá výška, než byla při zániku vírů, který pokles způsobil. Na grafech na obrázku 23 je to možné pozorovat v podobě dvou křivek pro jeden úhel difuzoru – jeden průběh při snižování světlé výšky a jeden pro zvyšování. [36]

5.1.3 Princip snižování odporu

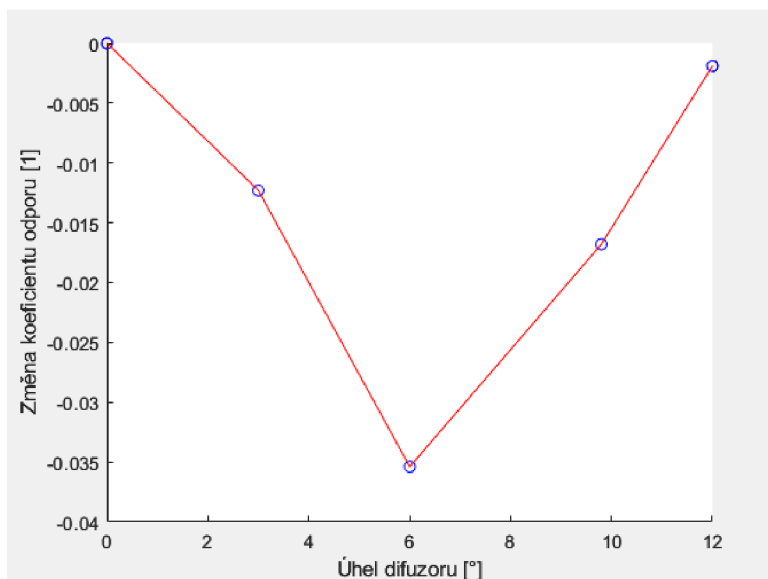
Jak je uvedeno v kapitole 2.9.3 největší část odporu vozidla je způsobena rozdílem tlaků v přední a zadní části automobilu. Při snižování součinitele odporu C_d je snahou konstruktérů co nejlépe upravit oblast brázdy za vozidlem, což je oblast s nízkým tlakem. Je snahou za vozidlem generovat tlak co nejvyšší, aby byla co nejmenší nesymetrie tlakových profilů před a za vozidlem. Protože je však v brázdě tlak vždy nižší, než je stagnační tlak před vozidlem, je snahou, aby tento tlak působil na co nejmenší ploše – aby se zmenšovala brázda. To je obecný cíl, pro jehož dosažení se používají všechny prvky, které v zadní části vozu snižují součinitel odporu. Toho se dosahuje prací s místem oddělení mezní vrstvy. Nízký tlak v brázdě je totiž následkem oddělení mezní vrstvy tekutiny od karoserie vozidla. Za vozidlo se následně dostává méně částic tekutiny a jejich absence způsobuje podtlak [38]. Stejně jako u zvyšování přtlaku platí, že záleží na mnoha faktorech, jak efektivní difuzor bude, především na úhlu a délce difuzoru a světlé výšce vozidla. Jak úhel difuzoru ovlivňuje brázdu a tím tlakový odpor, lze pozorovat na numerických simulacích tlakového profilu provedených na geometrii generického sedanu s různými úhly difuzoru [37].



Obrázek 26: Tlakový profil v brázdě za vozidlem s různým úhlem difuzorů [37]

Již podle tlakového profilu lze dobře odhadnout jaký bude průběh odporu v závislosti na úhlu. V případě, že se bezprostředně za autem nachází nízký tlak, bude odpor vysoký. Vidíme, že na největší ploše je nízký tlak bez difuzoru (s 0° divergence). Naopak vyšší tlak je na největší ploše automobilu s difuzorem s úhlem 6° .

Již podle tlakového rozložení lze říct, že odpor bude s rostoucím úhlem nejprve klesat a od jistého úhlu kolem 6° bude zase růst. Tento odhad dokládají hodnoty, které byly pro jednotlivé případy vypočítány:

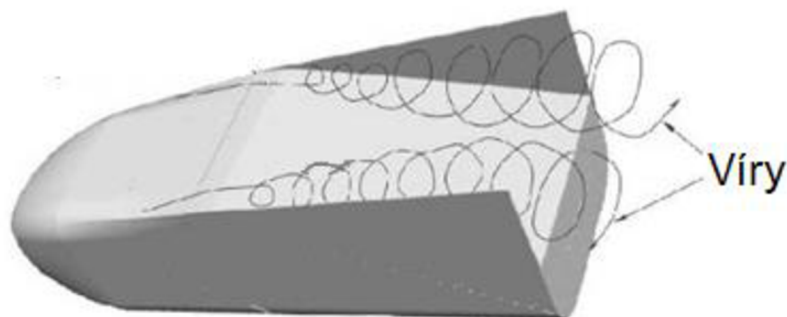


Obrázek 27: Závislost změny koeficientu odporu na úhlu difuzoru u generického sedanu, dle [37]

Je zřejmá podobnost grafu závislosti změny C_d na obrázku 27 a grafu závislosti ztrát obecného difuzoru na jeho úhlu na obrázku 20. Efektivita difuzoru je totiž dána jeho ztrátami. Difuzor s nejlepší konfigurací (6° až 7°) má nejnižší ztráty a nejlépe tedy redukuje odpor. S narůstajícím úhlem divergence dochází k dřívějšímu oddělení proudění od stěny difuzoru a podvozku automobilu, což způsobuje ztráty, a tedy nárůst odporu. Je důležité zmínit, že takový průběh platí pouze pro jednoduchý difuzor. Pokud by byl difuzor jinak upraven, například přepážkami a generátory vírů, mohl by být efektivnější i při vyšších úhlech.

5.2 Přepážky v difuzoru

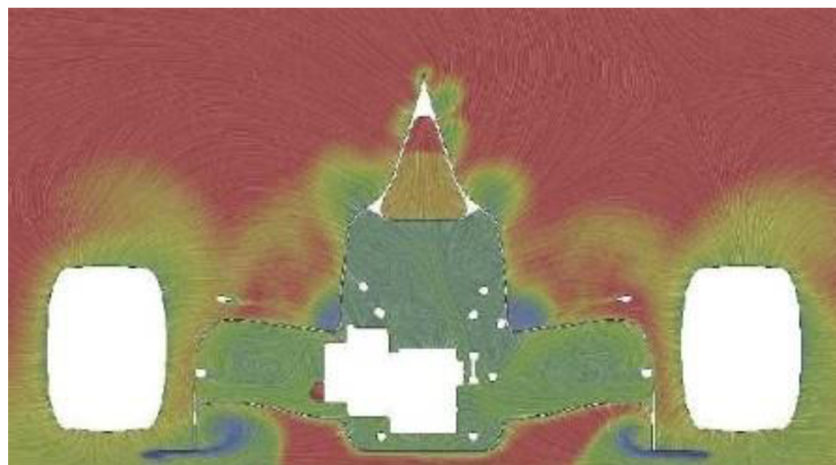
Část reálných difuzorů na podvozku automobilů či formulí obsahuje různý počet horizontálně umístěných přepážek, které rozdělují difuzor na několik kanálů. Tyto kanály mohou obsahovat také generátory vírů. Tyto úpravy zlepšují efektivitu difuzoru a zvyšují přítlak [1]. K objasnění, jak přepážky a generátory vírů přítlak zvyšují, může být použitý následující obrázek:



Obrázek 28: Zjednodušený automobil s jednoduchým difuzorem, upraveno dle [36]

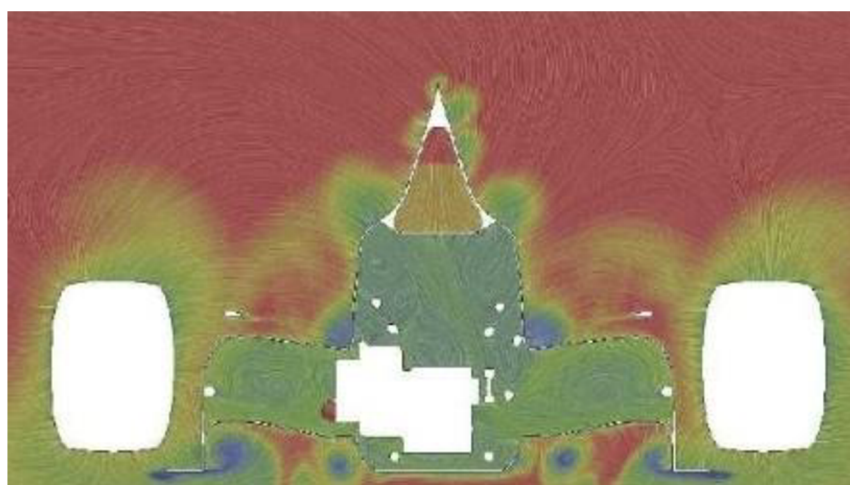
Na obrázku 28 je vidět, jak se na okraji difuzorů vytváří spirálovité víry, pokračující po celé délce difuzoru. Naopak uprostřed vozu se žádné víry nevytváří. Z hlediska tlakového profilu

to znamená, že na krajích, v oblasti vírů, bude nízký tlak a uprostřed bude vzduch s vyšší tlakovou energií, a tedy vyšším tlakem. CFD simulace tlakového profilu formule s takovým difuzorem je zobrazena na následujícím obrázku:



Obrázek 29: Tlakový profil v zadní části formule s jednoduchým difuzorem [36]

Oproti tomu, pokud bude difuzor vybaven přepážkami a generátory vírů (v oblasti, kde by se jinak vyskytovalo proudění o vyšším tlaku), dojde ke stejnému efektu, jako docházelo v předchozím případě pouze na okraji difuzoru i v místech s přepážkami uprostřed [36]. Přepážky tyto oblasti s různou energií rozdělují, zabraňují jejímu promíchávání a vzniku ztrát [33].



Obrázek 30: Tlakový profil v zadní části formule s difuzorem s přepážkami a generátory vírů [36]

Na tlakovém profilu je vidět, že tam kde je s jednoduchým difuzorem vysoký tlak, vytváří víry tlak nižší, a tím vytváří vyšší přitlak [36]. Tím, že difuzorem prochází turbulentní proudění, se navíc dopomáhá tomu, aby nedošlo k oddělení mezní vrstvy (což je důvod vzniku ztrát a především odporu). Při turbulentním proudění se na tělese drží mezní vrstva déle díky přenosu hybnosti mezi jednotlivými vrstvami tekutiny. Tekutina tak má vyšší kinetickou energii a lépe odolává nepříznivému tlakovému gradientu [39]. Pro difuzor to tedy znamená, že je možné navrhnout větší úhel (u složitě optimalizovaných difuzorů v motosportu to může být až 20 °). Často je možné pozorovat, že se přepážky rozšiřují také do horizontálního směru, což zvyšuje velikost plochy jeho průřezu na výstupu, a to zvyšuje jeho efektivitu. Ideální poměr plochy na vstupu a výstupu je zhruba 1:6 [36]. Další uváděná funkce je izolace škodlivých vírů,

vzniklých rotací kola, od proudění pod podvozkem, které by jím bylo jinak negativně ovlivněno. Konkrétní tvar a počet přepážek je důkladně navrhován za využití větrných tunelů a CFD simulací, protože nevhodně umístěná přepážka dokáže proudění v difuzoru naopak pokazit [1].

5.3 Materiál

Nejvhodnější a nejčastěji používané materiály, které se používají k výrobě nejen zadních difuzorů, ale i většiny dalších prvků (jako jsou spoilery, přední splitterly atd.) je karbon, respektive kompozitní materiál z propletených karbonových vláken a matrice, která je obvykle složena z epoxidu, fenolové pryskyřice nebo termoplastu smíchaného s kapalnými kaučuky nebo pryskyřicemi. Tato matrice je vytvrzována, a to buď ve vytvrzovací peci, nebo v tlakových komorách [40].

Konkrétní používaný příklad je materiál XC110 210g 2x2 Twill 3k Prepreg Carbon Fibre. Jeho název částečně udává vlastnosti. 210 g udává hmotnost jedné vrstvy vláken na m^2 . 2x2 Twill je styl pletení, který díky menšímu ohýbání vláken eliminuje koncentrátoři napětí a zlepšuje pevnostní charakteristiku. Hodnota 3k udává počet vláken v propletení na 3000. Prepreg značí, že epoxid k tvorbě matrice je již obsažený ve vláknech samotných a materiál je přímo připravený k vytvrzování. Šířka jedné vrstvy materiálu je 0,25 mm a podíl hmotnosti matrice je 45 %.

Karbonové kompozity se využívají především pro nízkou hmotnost a vysoké pevnostní charakteristiky. Výše zmíněný materiál má pevnost v tahu 521 MPa a pevnost v tlaku 483 MPa [41]. To jsou hodnoty srovnatelné s hodnotami ocelí, která jsou však mnohonásobně těžší. Nízká hmotnost je nutný požadavek, protože přidání vysoké hmotnosti by negativně ovlivnilo dynamiku vozidla. Protože se difuzor nachází na podvozku vozidla, mohl by být náchylný na poškození při přejezdu nerovností atp., proto je důležité, aby byl materiál také pevný a odolný [42]. Karbonové kompozity se používají pro výrobu difuzorů široké škály vozů od difuzorů monopostů Formule 1 po tuningové úpravy běžných silničních vozů [43].

Kromě karbonových kompozitů, které jsou poměrně drahé, se difuzory můžou vyrábět také jako součást zadního nárazníku ze stejného materiálu. Tento přístup se využívá především u osobních automobilů, kde jsou požadavky na difuzor nižší (jak z hlediska pevnostních vlastností, tak z hlediska produkovaného přítlaku a snižování odporu) [42]. Tyto součásti jsou pak nejčastěji vyrobeny z plastových materiálů jako jsou polykarbonáty, polypropyleny, polyamidy, polyester, polypropyleny, polyamidy, polyester, polyuretany a termoplastické olefiny. Často jsou využívány kombinace těchto materiálů [44].

6 Závodní automobily a osobní automobily

6.1 Formule 1

V soutěži Formule 1 jsou všechny aerodynamické prvky nějakým způsobem regulovány a definovány v oficiálním dokumentu FIA (Mezinárodní automobilová federace) „Formula 1 technical regulations“. Pravidla se historicky vyvíjela. Difuzor byl poprvé použit britskou stájí Lotus na modelu Lotus 78. Tehdy byl podvozek monopostu vytvarován do tvaru obráceného křídla, čímž vznikl po délce vozidla rozšiřující se tunel (uzavřený zemí) [45]. Zatímco tento model využíval celého podvozku ve tvaru obráceného křídla, později se začalo využívat rovné podlahy s rozšířením v zadní části vozu s úhlem až 7° až 10° (tento způsob byl poprvé využit u formule Williams FW07) [46]. Protože pro tvorbu přtlaku je potřeba, aby podtlak, vytvořený rychle proudícím vzduchem pod vozidlem, působil na co největší ploše, bylo u modelu Lotus 78 využito největších rozměrů šířky, délky a rozvoru, jaké tehdejší pravidla definovala. V tabulce 2 jsou uvedeny tyto parametry s porovnáním s konkurenční formulí té doby stáje Ferrari, modelem 312T [45]. Díky svým vylepšením byl monopost stáje Lotus schopný se pohybovat v zatáčkách se zrychlením 2,8g až 3g, zatímco konkurenční vozy pouze 2g [46].

Tabulka 2: Porovnání parametrů vozů Lotus a Ferrari, dle [47] [48]

	Lotus 78	Ferrari 312T
Délka [mm]	4547	4143
Rozvor [mm]	2741	2518
Šířka [mm]	2146	2030
Hmotnost [kg]	578	575,155

Dále byla, z dnešního pohledu, nezvykle řešená bariéra mezi okolním tlakem a podtlakem v difuzoru. Zatímco dnes je tento problém řešený rozšířenými prahy, případně bočními generátory vírů, u tohoto modelu byly použity nejprve tuhé kartáče a později pevné nylonové zábrany. Celkově tyto úpravy vozu dodávaly o 15 % víc přtlaku než u konkurenčních vozů té doby, a to za minimálního přírůstku odporu [45].

6.1.1 Dvojitý difuzor

Soutěže Formule 1 se účastní týmy s obrovskými rozpočty, které byly v roce 2022 omezeny na 145 000 000 USD a velké množství těchto peněz se používá právě na vývoj aerodynamiky [49]. Vývoj veškerých prvků, a to včetně zadního difuzoru, jde neustále dopředu jednak kvůli nutnosti získání výhody nad konkurenčními týmy a jednak kvůli pravidlům každoročně vydávanými FIA, které difuzor defínují a kterým musí odpovídat.

Důkazem toho, jak dramaticky mohou soutěž pravidla ovlivnit, je soutěžní sezona 2009. V roce 2008 FIA vydala technická pravidla, ve kterých byla výrazně omezena geometrie difuzoru na podvozku formule. V pravidlech bylo psáno: „*Žádná karoserie, která je viditelná zespodu vozu a která leží mezi osou zadního kola a bodem 350 mm za ním, nesmí být více než 175 mm nad referenční rovinou. Jakýkoli průsečík ploch v této oblasti s příčnou nebo podélnou svislou rovinou by měl tvořit jednu souvislou čáru, která je viditelná zespodu vozu.*“ [50]. Toto omezení bylo přidáno kvůli vůli zvýšit atraktivitu závodů a předjíždění. Jelikož, jak bylo vysvětleno v předchozí kapitole, difuzor znatelně zmenšuje brázdu vzniklou za formulí (a vozidlem obecně), zabraňuje za ním jedoucímu monopostu využívat tzv. slipstreamu – tedy pohybovat se v úplavu za vozidlem, kde má vozidlo nízký odpor [51]. Difuzor do roku 2009 produkoval až 70 % veškerého přtlaku. Protože je difuzor vysoce citlivý na zvířený vzduch, který se

v brzdě nachází, negeneroval tak vysoký přítlak při těsném pronásledování vozidla, čímž byl pronásledující vůz znevýhodněn. Dalším cílem pravidel tedy bylo donutit stáje, aby zmenšily procento generovaného přítlaku difuzorem [51] [52].

Tato pravidla po svém interpretovaly stáje Brawn GP (dříve Honda) na monopostu Brawn BGP 001, Williams na monopostu Williams FW31 a Toyota na monopostu Toyota TF109 [51]. Tyto tři týmy kreativně interpretovaly výše citovanou část pravidel a vytvořily další kanál difuzoru, který považovaly za samostatnou entitu. Zvětšily tak velikost a tím i účinnost difuzoru [53]. Další týmy tuto interpretaci pochopitelně napadaly, avšak neúspěšně. FIA ponechala možnost využívat tento typ difuzoru ještě následující sezonu, ale na sezonu 2011 byl již princip zakázán [54].



Obrázek 31: Kanál dvojitého difuzoru na voze stáje Williams [53]

Toyota později vyvinula také trojitý difuzor pracující na podobném principu [51]. Stáj Red Bull přišla s jinou úpravou difuzoru na podvozku svých modelů – „blown diffuser“. Princip tohoto difuzoru spočíval ve vypouštění horkých spalin o vysoké rychlosti do difuzoru, čímž se v něm naroste rychlost a zlepší se jeho efektivita [55].

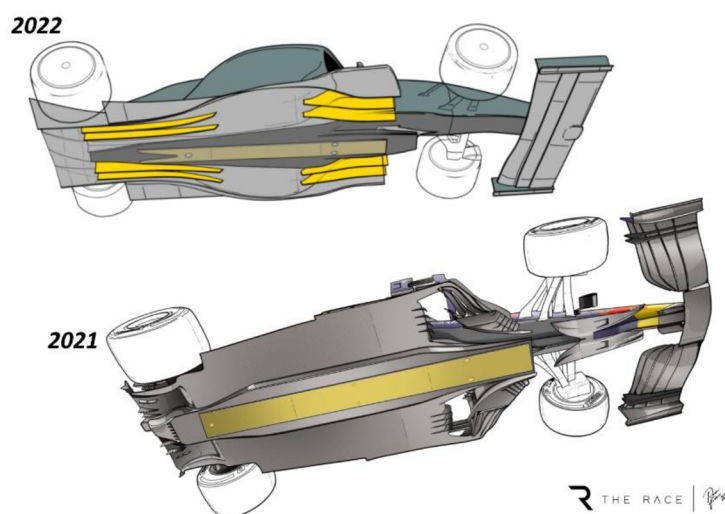
6.1.2 Ovlivňování difuzoru jinými prvky monopostu

Protože různé aerodynamické prvky ovlivňují proudění kolem vozu, ovlivňují také funkci dalších částí vozu, které s prouděním pracují. Difuzor není výjimkou.

Prvním prvkem, který ovlivňuje proudění následně zpracovávané difuzorem je přední křídlo. Pro přední křídlo je žádoucí, aby proudění pod křídlem procházelo s co nejvyšší rychlostí a nad křídlem s co nejnižší, aby tvořilo co nejvyšší přítlak. To je pozitivní také pro funkci difuzoru, protože rychlejší proudění v difuzoru, resp. pod podvozkem vozu, umožňuje jeho efektivnější fungování [56]. Křídla byla konstruována tak, aby vytvářela tzv. víry Y250, které sloužily jednak k odstínění brázdy vytvořené koly a jednak vedením kolem kraje podvozku tvořily bariéru mezi nízkotlakým vzduchem pod podvozkem a okolím. Křídlo tedy sloužilo jako generátor víru zmíněný v dřívější kapitole, a tím zlepšovalo i funkci difuzoru samotného. Po úpravě pravidel na rok 2022 se už nehovoří o vírech Y250, protože název byl odvozen od rozměru neutrální zóny, která byla zrušena. Víry stejného principu jsou generovány pořád [16] [57].

Změnou pravidel na rok 2022, která ovlivnila funkci difuzoru, bylo znovu povoleno Venturiho efektu na podvozku formule. Do tohoto roku musel být podvozek rovný. Ačkoliv by se mohlo

zdát, že tato úprava ovlivní značně jak funkci difuzoru, tak celé rozložení přítlaku, děje se tak pouze ve chvíli, kdy formule jede ve zvířeném vzduchu po jiné formuli. Jinak je zlepšení jen v řádu jednotek procent [58].



Obrázek 32: Porovnání struktury podvozků formulí ze sezón 2021 a 2022 [58]

Další vliv na difuzor měl sklon formule („rake angle“). Formule měla v zadní části vyšší světlou výšku než v části přední. Typicky toho využívala stáj Red Bull (ale i další). Se změnou pravidel na rok 2022 a povolením podvozků ve tvaru Venturiho trubice ztratil princip smysl, protože pro dosažení přízemního efektu, a tím, přítlaku je pro takový podvozek výhodná nízká světlá výška v předu i vzadu [59]. Do roku 2022 princip naklonění formule o malý úhel ($1,9^\circ$ u vozů stáje Red Bull) zefektivňoval funkci difuzoru. Jak známo difuzor produkuje větší přítlak při větším úhlu jeho naklonění. Přítlak se naopak zmenšuje při zvyšování světlé výšky vozidla. Vyšší sklon formule zvyšoval úhel difuzoru vzhledem k zemi, a tedy generoval větší přítlak. K vyššímu přítlaku také přispívalo to, že díky průběhu světlé výšky po délce formule se zvětšil poměr vstupní a výstupní plochy průřezu difuzoru. Zvýšením světlé výšky byly oslabeny víry na okraji difuzoru a musely být podpořeny víry vytvořenými například z proudění spalín, tak aby se nárůst přítlaku nakloněním nevyrušil s poklesem zvýšením světlé výšky [60].

6.1.3 Difuzor a slipstream

Při závodech Formule 1 se podobně jako při jiných, nejen automobilových, závodech využívá jevu slipstream. Slipstream neboli aerodynamický stín, se nazývá jev, kdy při pohybu brázdou zvířeného vzduchu vznikající za vozidlem, vzniká menší odpor pro další vozidlo. Pohyb v brázdě má však negativní vliv na chladicí systém, kterému snižuje účinnost a také na většinu aerodynamických prvků, které produkují nižší přítlak. Rozvířený vzduch se často označuje jako „dirty air“, volně přeloženo jako „špinavý vzduch“ [61].

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole na sezonu 2022 byla vydána nová pravidla, která povolila podvozek ve tvaru Venturiho trubice, a tím se snížila škodlivost zvířeného vzduchu na přítlak formule. V této kapitole bude rozebráno, jak rozvířený vzduch ovlivňoval difuzor na vozech před touto změnou pravidel. Studie [62] provádí analýzu na modelu vytvořeném na základě pravidel z roku 2017.

Při pohybu v nerozvířeném vzduchu vytváří difuzor přes 60 % přítlaku (61,09 %), to je nejvíce ze všech prvků. Další významné generování přítlaku zastávají zadní a přední křídlo

(35,46 % a 22,84 %). Oproti tomu karoserie samotná či kola generují vztlak (záporná procenta přitlaku). Největší výhoda difuzoru spočívá v malém nárůstu odporu, kterého vytváří pouze 15 % (oproti například zadnímu křídlu, které tvoří 20,38 % odporu).

O tom, jak je pro jezdce Formule 1 výhodné pohybovat se ve slipstreamu jiného závodníka vypovídají hodnoty výkonu nutného k překonání odporu vzduchu. Zatímco při pohybu v klidném vzduchu je potřeba k překonání odporu vzduchu 88 kW, při pohybu ve vzdálenosti dvou délek formu za jiným vozem je to jen 67,32 kW, při jedné délce 50,77 kW, při jedné polovině délky 40,39 kW a při jedné čtvrtině délky 33,44 kW (pokaždé při rychlosti 180 km/hod) [61]. Potřebný výkon lze spočítat podle vzorce:

$$P = F_D v_\infty = \frac{1}{2} \rho c_D S v_\infty^3 \quad (24)$$

Potřebný výkon je závislý na třetí mocnině rychlosti pohybu formule vůči vzduchu.

Jak už bylo řečeno, při jízdě v brázdě klesá přitlak a odpor formule. Při vzdálenosti dvou délek formule poklesne přitlak druhé formule o 23,5 % a odpor o 14,2 %, při jedné délce o 42,3 % a 21 %, při polovině délky 54,1 % a 30,7 % a při vzdálenosti jedné čtvrtiny délky poklesy činí 62 % respektive 40 %. Pokles odporu je vítaný jev, oproti tomu pokles celkového přitlaku přínosný není. Brázda navíc ovlivňuje jednotlivé prvky různě. Právě difuzor je ovlivňovaný nejvíce. Jeho vlastnosti jsou ovlivňovány podle následující tabulky 3. [62]

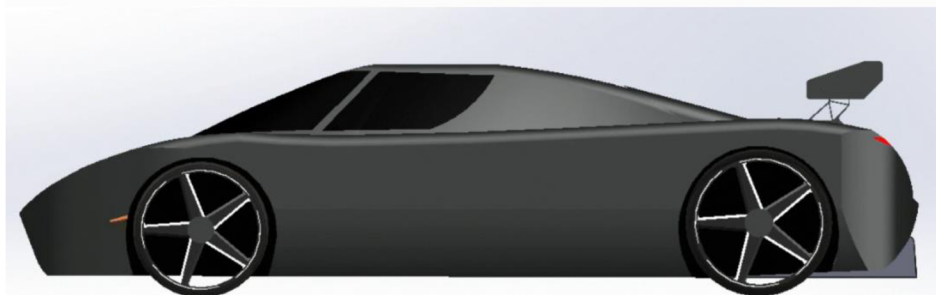
Tabulka 3: Vliv brázdy na difuzor, dle [62]

Vzdálenost formulí	Pokles přitlaku [%]	Pokles odporu [%]
0,25L	70,2	57,2
0,5L	62,8	48,7
1L	46,1	29
2L	25,3	16,9

Bylo řečeno, že další dva prvky masivně generující přitlak jsou přední a zadní křídlo. Například v případě jízdy formulí ve vzdálenosti 0,25L od sebe přitlak předního křídla poklesne o 38 % a zadního o 57,9 %, čímž vzniká problém s vyvážením formule. Formule musí být přitlačována v přední a zadní části vozu s ohledem na rozložení hmotnosti monopostu, to je zhruba 45,5 % hmotnosti na přední nápravě a 54,5 % na zadní. Je potřeba, aby těžiště hmotnosti bylo před těžištěm přitlaku – tak jsou formule konstruovány. Při pohybu brázdou jsou pak prvky v zadní části a difuzor především ovlivněny víc než prvky v přední části a těžiště přitlaku se posouvá před těžiště hmotností (tíhové síly). Takto ovlivněná formule je náchylná na přetáčivost a snižuje se schopnost manévrovat. V konečném důsledku je pro formule tedy vhodné využívat slipstream především na rovinkách, kde navíc šetří palivo, ale nevýhodné v zatáčkách, kde chybí potřebný přitlak pro předjížděcí manévry. [62]

6.2 Interakce difuzoru na podvozku se zadním křídlem a spoilerem

Aerodynamika vozidla je velice komplexní. Obvykle se na voze nachází velké množství prvků, které se navzájem ovlivňují, jak bylo demonstrováno i u formulí. Tato podkapitola se zabývá tím, jaký vliv má interakce difuzoru a zadního křídla či spoileru na celkové vlastnosti sportovního vozu. V tabulce 4 je uvedeno, jak ovlivnilo zadní křídlo a spoiler součinitele C_d a C_l samy o sobě a jak v kombinaci s difuzorem. Hodnoty jsou ze stejného zdroje jako CFD simulace rychlostního pole na obrázku 16 a jsou pro stejný model. [21]



Obrázek 33: Model závodního automobilu s difuzorem a křídlem [21]

Tabulka 4: Hodnoty součinitelů C_d a C_l u modelu sportovního vozu s variantami úprav, dle [21]

	Součinitel odporu C_d [1]	Součinitel vztlaku C_l [1]
Bez úprav	0,3441	0,7181
Křídlo	0,4765	-0,0502
Křídlo a difuzor	0,4715	-0,1151
Spoiler	0,2918	0,3177
Spoiler a difuzor	0,2872	0,3174
Difuzor samotný	0,3343	0,6882

V tabulce 5 jsou vyneseny hodnoty změny součinitelů bez interakce. Jsou to hypotetické hodnoty, které by vznikaly, pokud by se činnosti aerodynamických prvků neovlivňovaly. Tj. původní hodnota součinitele by se snížila o hodnotu, o kterou ji snižuje samotný difuzor, plus o hodnotu, o kterou snižuje samotný další prvek. Změna součinitele s interakcí, je pak hodnota, která vznikla výpočtem modelu, který obsahoval oba prvky. Podíl interakce je pak rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami.

Tabulka 5: Vliv interakcí jednotlivých prvků

Kombinace prvků	Změna součinitele odporu ΔC_d bez interakce [1]	Změna součinitele odporu ΔC_d s interakcí [1]	Podíl ΔC_d interakce [1]	Změna součinitele odporu ΔC_l bez interakce [1]	Změna součinitele odporu ΔC_l s interakcí [1]	Podíl ΔC_l interakce [1]
Křídlo a difuzor	0,1226	0,1274	0,0048	-0,7982	-0,8332	-0,0350
Spoiler a difuzor	-0,0621	-0,0569	0,0052	-0,4303	-0,4007	0,0296

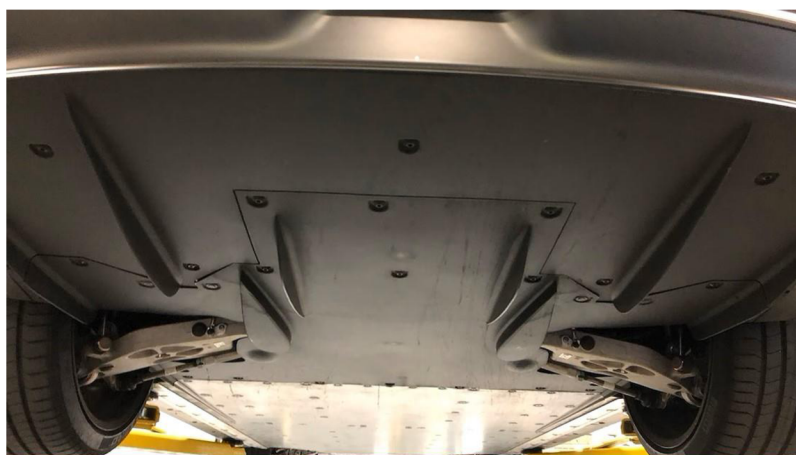
Z interpretace dat ze zdroje [21] vyplývá, že při použití difuzoru s křídlem či spoilerem (a zřejmě i jinými prvky) je jejich efekt vzájemně ovlivněn. Při použití difuzoru spolu s křídlem je koeficient odporu vyšší o 0,0048, než když by prvky fungovaly nezávisle na sobě. Na koeficient vztlaku je vliv naopak pozitivní – je snížen o 0,035. Při použití difuzoru spolu s spoilerem je koeficient odporu vyšší o 0,0052, než když by prvky fungovaly nezávisle na sobě. Vliv na koeficient vztlaku je také negativní, protože jej navyšuje o 0,0296. Ukazuje se tedy, že spoiler s difuzorem se ovlivňují negativně a snižují si účinnost eliminace odporu a vztlaku. U použití difuzoru s křídlem je vzájemný vliv negativní, co se týče odporu, ale pozitivní, co se týče vztlaku. Tyto konkrétní výsledky platí jen pro zkoumanou geometrii a konkrétně nastavené prvky. Důležitý je však fakt, že se prvky navzájem ovlivňují. To se musí brát v potaz především u návrhu závodních aut, kde jsou prvky výrazné a je jich mnoho.

6.3 Potenciál u osobních automobilů

Použití zadních difuzorů u osobních automobilů je poměrně nová záležitost. Na rozdíl od závodních vozidel jsou difuzory u osobních aut používány především k eliminaci odporu, čímž se může snižovat spotřeba, a tím i emise automobilu se spalovacím motorem. U elektromobilů pak může použití difuzoru zvýšit dojezd, a tím zvýšit atraktivitu vozu.

Po schválení zákazu spalovacích motorů na fosilní paliva je pravděpodobné, že budoucnost (minimálně v Evropě) je v elektrických pohonech. Někteří jazykové z řad odborníků i politiků (například Akido Toyoda, prezident automobilky Toyota nebo mnozí politici z největší skupiny v EP – Evropské lidové strany) však elektrické budoucnosti nevěří, resp. tak rychlému nástupu. Proto je potřeba bavit se také o jiných pohonech jako například pohonech hybridních.

Pro elektrické i hybridní pohony je aerodynamika obzvláště důležitá. U těchto vozů je energie spotřebována na překonání aerodynamického odporu o 20 % vyšší než u vozidel s konvenčním pohonem. Důvodem je především větší možnost práce s rekuperací energie například při brzdění, což snižuje vliv hmotnosti [63] [64]. Lze tedy předpokládat, že ať bude budoucnost pohonů jakákoliv, bude potřeba vyvíjet vozy aerodynamické – a to i za pomoci difuzoru. Jako příklad elektromobilu s difuzorem můžou být použity vozy, které se řadí mezi vozy s nejnižší spotřebou elektrické energie na kilometr a zároveň k vozům s nejvyšším dojezdem. Řadí se mezi ně například vozidla luxusní automobilky Lucid Motors, které dosahují koeficientu odporu pod 0,200 [65]. Dalším příkladem může být vozidlo Tesla model S, nebo jihokorejský elektromobil Hyundai Ioniq 6, které mají téměř shodné koeficienty odporu 0,21 [66] [9].



Obrázek 34: Difuzor na podvozku vozidla Lucid Air [65]

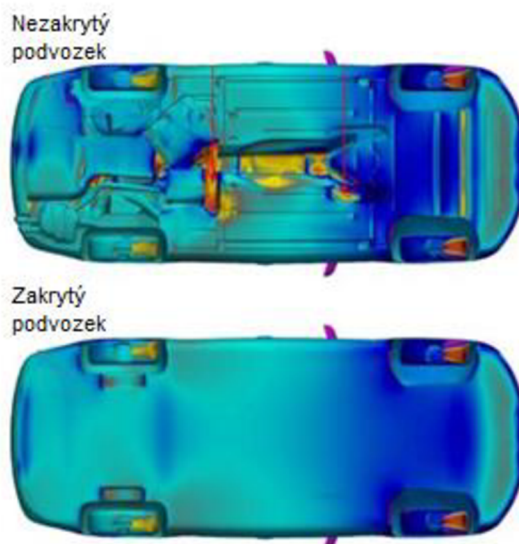
6.3.1 Vliv hladkého podvozku na funkci difuzoru

Výhodou elektromobilů z hlediska aerodynamiky je možnost hladkého podvozku, protože se zde nenachází různé součásti jako u konvenčních aut, jako převodovka nebo výfukový systém, který není možné zakrýt, protože proudící vzduch je chladí. Typický hladký podvozek elektromobilu můžeme vidět na obrázku 34. Docílit co nejhladšího podvozku se snaží některé automobilky docílit také u spalovacích aut, jako to udělala automobilka Porsche na SUV Cayenne [67].



Obrázek 35: Podvozek Porsche Cayenne s vyznačenými úbytky na součiniteli odporu, upraveno dle [67]

Jak je znát z obrázku 35, hladký podvozek sám o sobě snižuje odpor, a dokonce snižuje také vztlak. Dále je v práci zkoumáno, jak hladký podvozek ovlivňuje funkci samotného difuzoru.

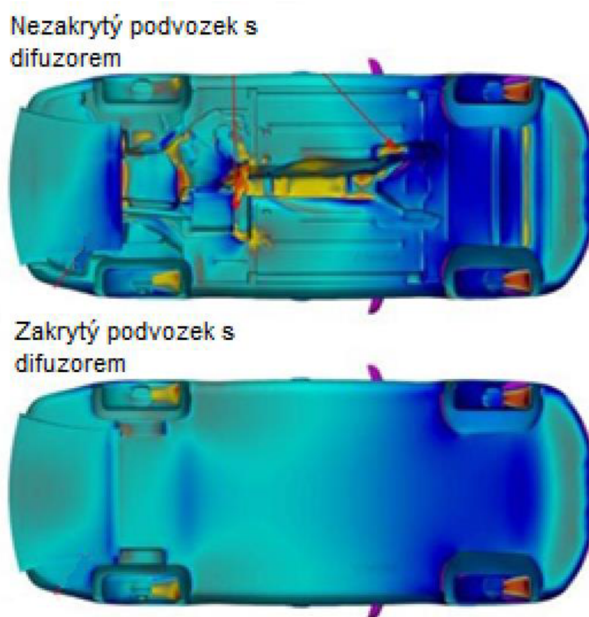


Obrázek 36: Srovnání nezakrytého a zakrytého podvozku, upraveno dle [68]

Na obrázku 36 je simulován tlakový profil pod podvozky dvou modelů jednoho vozidla a to DrivAer, což je v podstatě generický sedan. Jeden model má podvozek hladký, zakrytý a druhý nezakrytý („dirty“). Ze simulací plyne, že nerovnosti na nezakrytém podvozku způsobují

pod podvozkem oblasti s vysokým tlakem, které způsobují nárůst odporu i vztlaku. Po zakrytí podvozku klesla odporová síla o 270 N a vztlak poklesl o 230 N [68].

Ze simulací vyplývá, že hladký podvozek není nutný pro využití difuzoru. Dokonce hodnoty získané ze simulace ukazují, že difuzor je efektivnější a samotný jako takový poskytuje větší přítlak a eliminaci odporu, když je podvozek automobilu nezakrytý. Nicméně faktem zůstává, že celkově nejnižšího odporu vozidlo dosahuje při použití difuzoru s hladkým podvozkem. Tlakový profil je možné pozorovat na obrázku 37 [68].

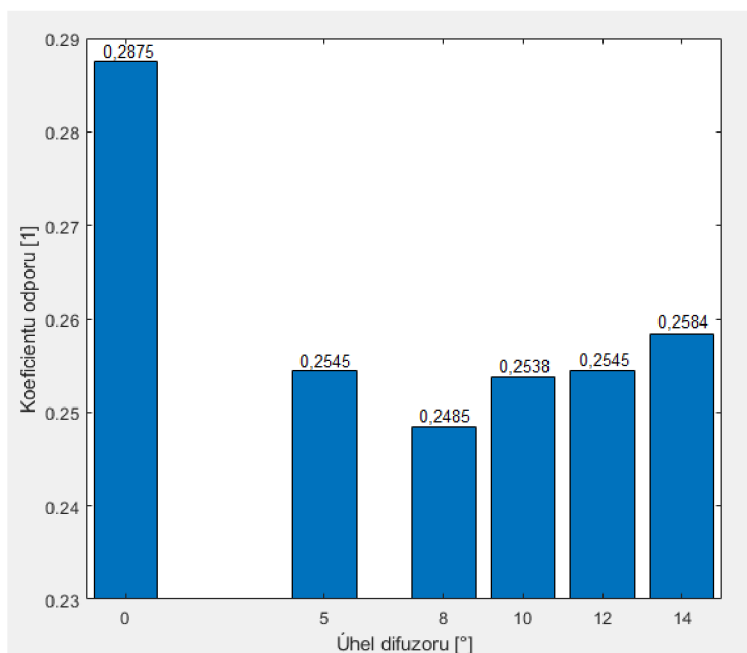


Obrázek 37: Tlakový profil na podvozku modelu s difuzorem, upraveno dle [68]

Při použití difuzoru na modelu s nehladkým podvozkem došlo ke snížení celkové odporové síly o 117,9 N. U modelu s hladkým podvozkem pouze o 9,45 N. Celkové odporové síly s difuzorem pak činily 1145,6 N u nehladkého podvozku a 987,1 N u podvozku hladkého. Použitím difuzoru došlo také ke snížení vztlaku a to o 45,9 N u nehladkého podvozku a u hladkého podvozku došlo dokonce ke zvýšení vztlaku o 43,7 N, což je samozřejmě nežádoucí. Avšak jak zdroj sám přiznává, tento jev je způsobený tím, že difuzor není dobře konfigurovaný pro dané použití a pokud by difuzoru samotnému byla věnována větší pozornost, dosáhlo by se i v tomto případě vyššího přítlaku. Nicméně lze shrnout, že difuzor má význam nejen v kombinaci s hladkým podvozkem, ale i u vozů s podvozkem nehladkým, neboť takový podvozek má špatné vlastnosti, které difuzor dokáže částečně vylepšit [68].

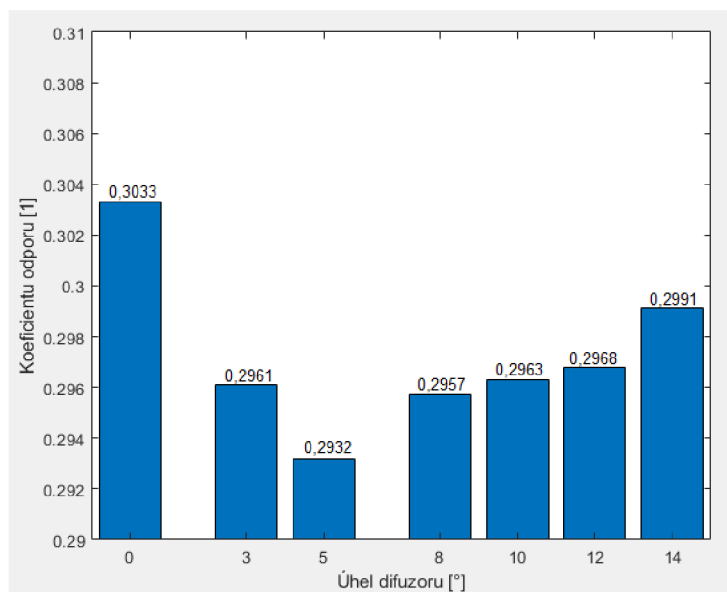
6.3.2 Implementace difuzoru na různé karoserie

Pomocí výpočtového modelování je možné jakýkoliv model automobilu modifikovat, a to včetně úprav jeho podvozku a difuzoru na něm. Snadno pak lze pozorovat změnu odporu a vztlaku. Modifikace byla provedena na modelu vozidla SAAB 9-3, a to ve variantách sedan a kombi. Jedná se o sériový vůz střední třídy švédské automobilky, který byl vyráběn v letech 1998 až 2014. Standardní verze automobilu neměla, podobně jako další vozy střední třídy v tomto období, žádné výjimečné aerodynamické prvky (tedy ani difuzor ne). Na model pro CFD byly pro oba typy karoserií přidány difuzory s úhly 5 °, 8 °, 10 °, 12 ° a 14 °. [69]



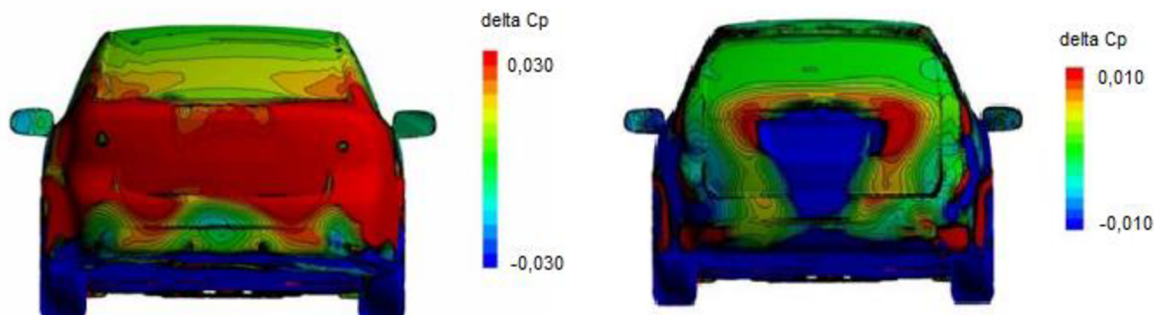
Obrázek 38: Součinitel odporu v závislosti na úhlu difuzoru u SAAB 9-3 sedan, dle [69]

Na grafu na obrázku 38 lze pozorovat trend, který by odpovídal předpokladu na základě znalostí proudění v difuzoru. Tedy poklesu odporu až do ideálního úhlu a následný růst.



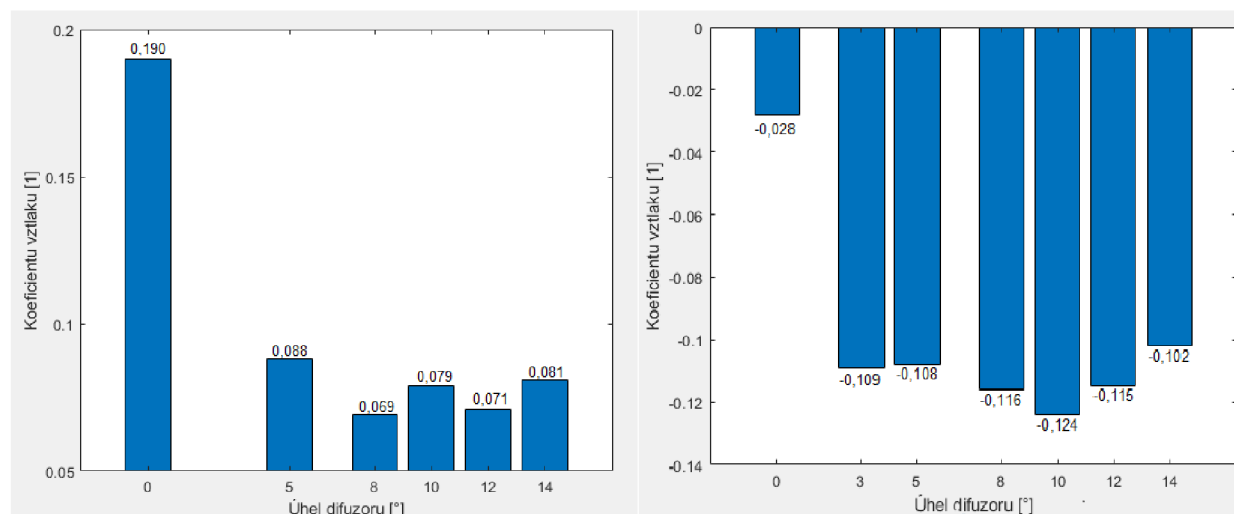
Obrázek 39: Součinitel odporu v závislosti na úhlu difuzoru u SAAB 9-3 kombi, dle [69]

Na grafu na obrázku 39 jsou vyneseny hodnoty součinitele odporu pro verzi kombi. Zatímco trend je podobný, nejnižší hodnoty je dosaženo už při úhlu 5° (oproti 8° u sedanu). Procentuální pokles součinitele oproti referenční hodnotě se sklonem 0° je výrazně nižší než u verze sedan. Zatímco u varianty kombi je maximální pokles pouze okolo 3,3 % u verze sedan to je 13,6 %. Z hlediska snižování odporu má tedy karoserie sedan výrazně vyšší potenciál než karoserie kombi. Pro vysvětlení, proč je rozdíl tak výrazný, můžou posloužit kontury znázorňující změnu koeficientu tlaku C_p při implementaci podvozkového difuzoru. [69]



Obrázek 40: Změna součinitele tlaku pro sedan (vlevo) a kombi (vpravo), upraveno dle [69]

Na porovnání na obrázku 40 je zřetelně znát, že na karoserii sedanu dokáže difuzor zvýšit nejen hodnotu tlaku za vozidlem, ale také plochu, na které vyšší tlak působí. Vůz s karoserií kombi tlak za vozidlem zvyšuje jen na velmi malé ploše a jinde jej dokonce snižuje. Ve výsledku tedy sedan s difuzorem eliminuje tlakový odpor mnohem lépe než vůz kombi s difuzorem.



Obrázek 41: Souč. vztlaku v závislosti na úhlu difuzoru u SAAB 9-3 sedan (vlevo) a kombi (vpravo), dle [69]

Z grafů na obrázku 41 plyne, že vztlak je difuzorem efektivně snižován u obou variant karoserií. Zajímavé je, že v obou případech je vztlak snížen zhruba na stejnou hodnotu u jakéhokoliv úhlu difuzoru.

Protože, jsou rozdíly mezi karoseriemi vozu SAAB 9-3 poměrně dost vysoké, je možné předpokládat, že podobně bude vypadat výsledek i u jiných vozů stejných karoserií. Dá se předpokládat, že efekt difuzoru u vozů dalších populárních karoserií hatchback a SUV by se spíše podobal variantě kombi, neboť se tvarově spíše podobají. U SUV by byl vliv pravděpodobně výrazný ještě méně, kvůli velké světlé výšce, která tyto vozy charakterizuje.

Závěrem lze tedy říct, že pro využití maximálního potenciálu difuzoru na podvozku osobního automobilu, je nejvhodnější navrhovat jej na karoserii sedan, liftback, či karoserie jim podobné. [69]

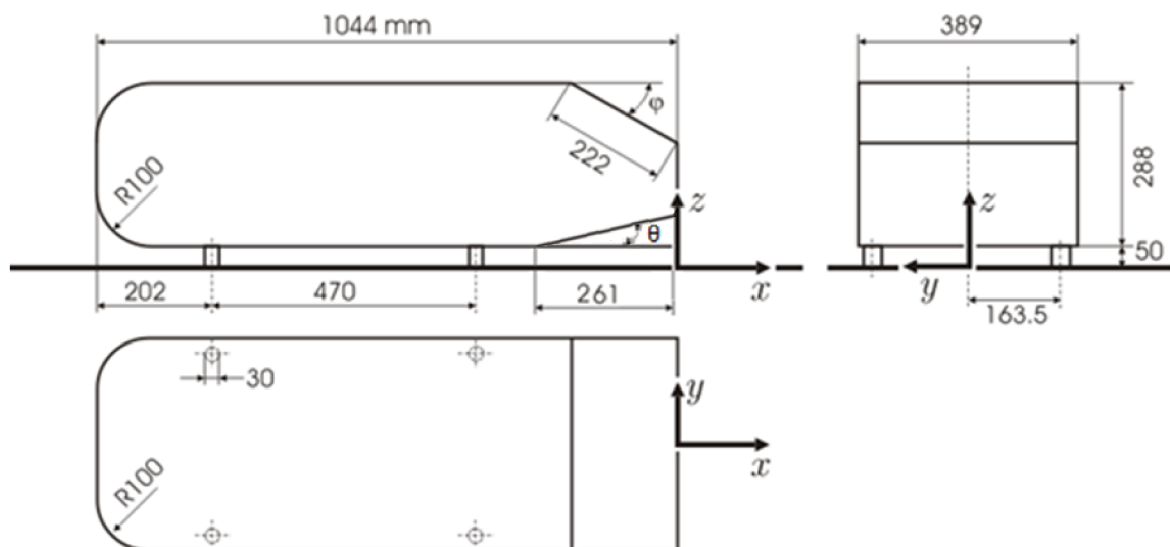
7 Výpočtové modelování na zjednodušené 2D geometrii

Veškeré aerodynamické prvky jsou složité a komplexní záležitosti, které musí být navrhovány do nejmenšího detailu, aby byla zajištěna optimální funkce. Jedním z přístupů navrhování aerodynamických prvků automobilů je výpočtové modelování CFD (Computational Fluid Dynamics – výpočetní dynamika tekutin), která využívá metodu konečných objemů. Pro zvýšení relevantnosti simulací se v technické praxi provádí validace experimentem například v aerodynamickém tunelu. Při návrhu aerodynamiky automobilu se tedy obvykle využívá jak aerodynamických tunelů, tak i CFD. Poměr využití metod se liší u každé automobilky. Obvykle převládá užívání aerodynamických tunelů, nicméně česká Škoda auto využívá převážně CFD a to zhruba z 80 % [70].

V této práci bude pomocí CFD a programu ANSYS Fluent simulováno proudění okolo zjednodušené geometrie vozidla tvz. Ahmed body neboli Ahmedova tělesa. Bude zkoumán vliv úhlu difuzoru na podvozku zjednodušeného vozidla na součinitel vztlaku a odporu. Ve 2D budou simulovány čtyři úhly divergence a nejefektivnější z nich bude vytvořen i na 3D tělese, kde je větší prostor pro sledování podstatných jevů.

7.1 Geometrie

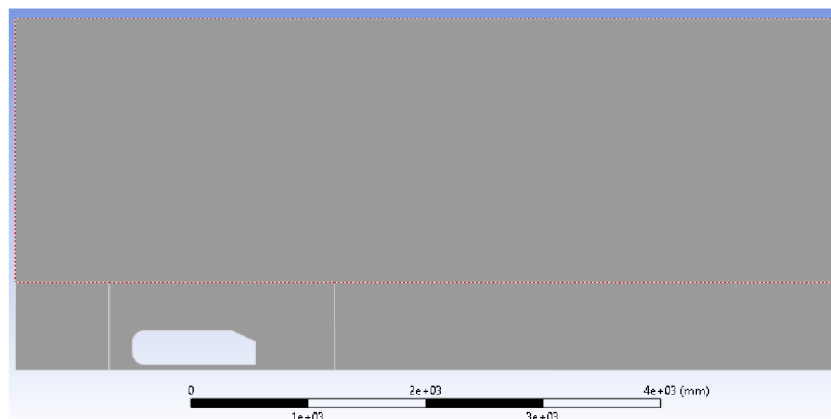
Ahmed body bylo zvoleno, protože se jedná o jednoduchý tvar, na kterém je ovšem možné pozorovat jevy podstatné pro aerodynamiku vozidel, jako je například stagnační tlak v přední části vozidla, zrychlení proudění mezi vozidlem a vozovkou nebo vznik úplavu za vozidlem. Geometrie je znázorněna na obrázku 42.



Obrázek 42: Geometrie Ahmedova tělesa, upraveno dle [71]

Délka, výška, světlá výška a parametry zkosení v horní části geometrie jsou rozměry určené definicí Ahmed body. Ahmedovo těleso je široké 389 mm, což je zohledněno při zadávání referenčních hodnot nutných pro výpočet součinitelů vztlaku a odporu. Délka difuzoru byla určena jako $\frac{1}{4}$ délky vozidla. Difuzory u reálných automobilů jsou obvykle kratší, avšak na základě poznatků z rešeršní části práce lze předpokládat, že na delším difuzoru bude lépe pozorovatelný jeho účinek. Úhel difuzoru θ nabývá hodnot 0° , 3° , 7° , 10° a 13° . Tyto úhly byly zvoleny ke zkoumání také na základě poznatků z rešeršní části práce.

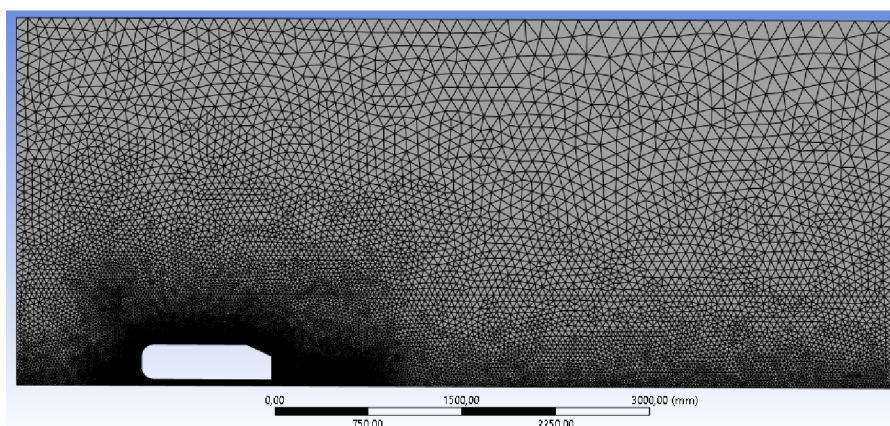
Okolí samotné geometrie Ahmed body bylo rozděleno na několik ploch, tak aby bylo následně možné vytvořit v blízkosti tělesa síť dostatečně jemnou. Samotné modelované okolí bylo vymodelováno cca jednu délku vozidla (1044 mm) před tělesem, přibližně pět délek za vozidlem a vysoké zhruba tři délky vozidla. Doména proudění byla takto navrhnutá, aby bylo možné plně rozvinutí proudění před obtékáním Ahmed body a aby naopak došlo k ustálení proudění před opuštěním domény. Samotná vymodelovaná geometrie je zobrazena na obrázku 43.



Obrázek 43: Geometrie domény proudění

7.2 Síť konečných objemů

Síť byla vytvořena s metodou All triangles, tedy trojúhelníkovými prvky. Na hranicích obtékaného Ahmed body byla vytvořena, pomocí příkazu inflation, prizmatická vrstva. Výška prvního prvku prizmatické vrstvy byla nastaven na 1 mm. Výška prvního prvku byla určena tak, aby se hodnota y^+ na hranici Ahmedova tělesa pohybovala kolem 50. Prizmatická vrstva se skládá z 12 prvků s koeficientem růstu 1,01. Prvky v síti jsou lineární, protože se ukázalo, že při nastavení prvků na kvadratické, dává výpočet téměř totožné výsledky. V rámci šetření výpočetního času jsou tedy lineární prvky vhodnější. Síť byla zjemněna především v oblasti obtékaného tělesa a silnice, kde musí platit podmínka ulpívání. Síť použitá při výpočtu referenčního tělesa je na obrázku 44.



Obrázek 44: Síť referenčního tělesa

Maximální aspect ratio v síti byl 7,3 což je dostatečně nízká hodnota. Maximální šikmost sítě je 0,607. Počet prvků a uzlů v síti se lehce odlišuje u sítí jednotlivých úhlů difuzorů.

Tabulka 6: Počet prvků a uzlů v jednotlivých sítích

Úhel difuzoru	Počet prvků:	Počet uzlů:
0 °	45 681	25 937
3 °	46 433	26 625
7 °	46 884	26 844
10 °	47 122	26 976
13 °	47 633	27 387

7.3 Okrajové podmínky a referenční hodnoty

Rychlost obtékajícího vzduchu na vstupu do domény byla zvolena 30,555 m/s, a to protože je to rychlost, která odpovídá 110 km/hod, což je povolená rychlost na českých silnicích pro motorová vozidla. Rychlost je navíc dostatečně vysoká na to, aby se projevil efekt difuzoru. Gauge pressure je na výstupu 0, tedy tlak na vstupu odpovídá tlaku atmosférickému. Na výstupu je nastavena okrajová podmínka požadující gauge pressure také nulový. Stejně jako na vstupu je tedy i na výstupu požadován atmosférický tlak. Na vstupu i výstupu je použita metoda modelování turbulence na základě její intenzity a poměru viskozity. Intenzita turbulence byla zvolena 3 %, což odpovídá hůře zkonstruovanému větrnému tunelu. Poměr turbulentní a laminární viskozity byl nastaven na 0,288, což odpovídá výšce obtékaného tělesa v metrech. Na dolní hranu domény, tedy simulovanou silnici, a na hranice Ahmedova tělesa byla nastavena podmínka no-slip, tedy podmínka ulpívání. Tyto hranice byly nastaveny jako nepohybující se stěny. Na horní hranu byla nastavena podmínka symetrie, ačkoliv by byla vhodnější podmínka no-slip stěny. Protože se však horní hrana nachází dostatečně daleko od zkoumané oblasti, je možné nastavit i tuto podmínku. Výhodou této podmínky na této hraně je, že síť kolem této hrany může být hrubší. Jako obtékaná tekutina byl uvažován vzduch při 15 °C s hustotou 1,225 kg/m³ a viskozitou 1,7894 · 10⁻⁵ m²/s. Ahmed body je 288 mm vysoké a 389 mm široké a plochá průřezu je tedy 0,112 m². Délka Ahmed body je 1044 mm.

7.4 Nastavení numerického modelu

Typ řešení byl nastaven jako Pressure-Based, formulace rychlosti absolutní, čas stabilní a 2D prostor rovinný. Model turbulence byl zvolen k-epsilon, který je vhodný pro vytvořenou síť, která má na hranici Ahmed body hodnoty y+ okolo 50 a na dolní hraně – silnici – v jeho okolí okolo 150. Nastavení k-epsilon modelu bylo následující:

k-epsilon model:	Standard
Near-wall funkce:	Standard Wall Functions
C _{mu} :	0,09
C1-Epsilon:	1,44
C2-epsilon:	1,92
TKE Prandltovo číslo:	1
TDR Prandltovo číslo:	1,3

Metody řešení a jeho ovládací prvky byly zvoleny následovně:

Propojení rychlosti a tlaku:	
Schéma:	Coupled
Prostorová diskretizace:	
Gradient:	Green-Gauss Cell Based
Tlak:	PRESTO!
Hybnost:	QUICK
Turbulentní kinetická energie:	QUICK
Míra disipace turbulentní kinetické energie:	QUICK
Ovládací prvky řešení:	
Tlak:	0,7
Hybnost:	0,7
Hustota:	1
Síly tělesa:	1
Turbulentní kinetická energie:	0,7
Míra disipace turbulentní kinetické energie:	0,7
Turbulentní viskozita:	1

Bylo provedeno celkem 2500 iterací.

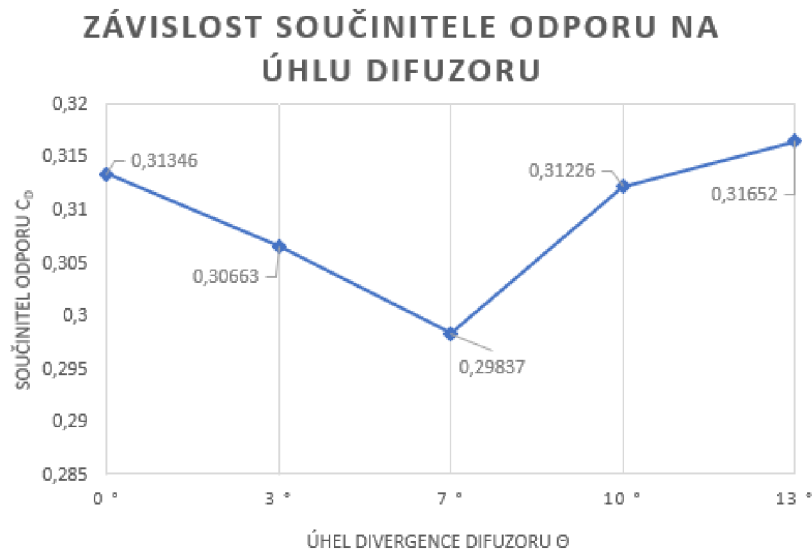
7.5 Výsledky

7.5.1 Součinitel odporu

Byla pozorována závislost součinitele odporu Ahmed body na úhlu divergence difuzoru. Odpor referenčního tělesa byl vypočten jako 0,314. Experimentálně zjištěný součinitel odporu je udáván 0,298 [72]. Hlavní důvod, proč se výsledek simulace liší od hodnoty získané experimentem, je zřejmě provedení simulace ve 2D. Výsledek se liší cca o 5 %. Při zvážení časové, finanční i jiné náročnosti 2D simulace oproti experimentu, je to chyba přijatelná. Zvláště pak v kontextu této práce, kdy je zkoumán vliv difuzoru, a větší důležitost má relativní změna veličin než konkrétní hodnoty. Nicméně protože se vypočtená hodnota součinitele odporu blíží hodnotě experimentální, je možné považovat model v tomto směru za validní.

Na obrázku 45 je vynesena graf se závislostí součinitele odporu Ahmedova tělesa na úhlu divergence difuzoru. Získané hodnoty odpovídají trendu, který byl očekáván na základě poznatků z rešeršní části práce. Je možné pozorovat, že použití difuzoru snižuje odpor, a to až do úhlu 7 °, kde se nachází minimum. S dalším zvyšováním úhlu součinitel odporu zase roste a dostává se až nad hodnotu referenčního tělesa. Tento kritický úhel se nachází mezi 10 ° a 13 °. Tento kritický úhel nastal o něco dříve než v jiných studiích zmíněných v této práci. Například ve studii [69], kde byl zkoumán vliv difuzoru na reálný automobil dochází ke snížení odporu i při úhlu 14 °.

Je pravděpodobné, že rozdíl je způsoben jednak provedením simulace ve 2D (kdežto zmíněná studie byla provedena ve 3D) a v rozdílnosti geometrie. Lze totiž očekávat, že pro různé geometrie (automobily) bude vliv také různý.



Obrázek 45: Graf závislosti součinitele odporu na úhlu difuzoru

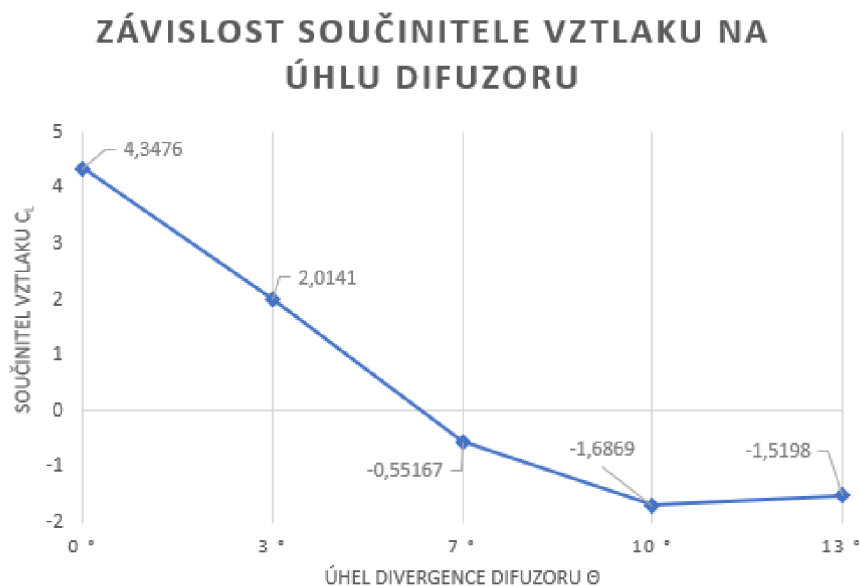
Jak bylo řečeno, k minimálnímu odporu dochází při úhlu 7 °. To bylo očekáváno a tento úhel difuzoru byl vymodelován i ve 3D simulaci, aby byl dále zkoumán.

7.5.2 Součinitel vztlaku

Stejně jako byl zkoumán součinitel odporu, byl pozorován i součinitel vztlaku v závislosti na úhlu difuzoru. Na rozdíl od odporu se však výsledek 2D simulace neblížil hodnotě získané experimentem. Experimentální hodnota referenčního tělesa byla zjištěna 0,345, zatímco provedená 2D simulace udává hodnotu 4,4376 – tedy hodnotu řádově vyšší. Byl zkoumán původ tak markantního rozdílu a byl dosažen závěr, že tato 2D simulace není vhodná pro pozorování konkrétních hodnot součinitele vztlaku. Ve 2D simulaci je obtékající vzduch nucený projít pod nebo nad obtékaným tělesem. To je rozdíl mezi 3D simulací, případně experimentem. Přes horní či dolní stranu tělesa tedy teče tekutina, která by těleso ve skutečnosti obtékala po stranách a generuje tlak, respektive součinitel vztlaku, který neodpovídá skutečnosti. Ve 2D simulaci také není prostor pro výhradně 3D jevy, které také ovlivňují hodnoty vztlaku, například víry po stranách difuzoru.

Ačkoliv konkrétní hodnoty vztlaku zřejmě neodpovídají skutečnosti, je i tak možné pozorovat průběh vztlaku, který odpovídá očekáváním. Vztlak s narůstajícím úhlem klesá. Na rozdíl od součinitele odporu pokles vztlaku pokračuje i po překročení úhlu 7 °. Konkrétně se minimum nachází mezi 10 ° a 13 °. Po překročení tohoto úhlu difuzor přestává fungovat správně a vztlak mírně narůstá.

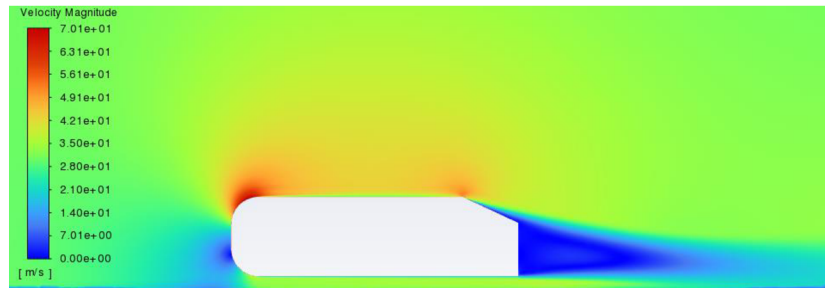
Úhel minima se podobně jako úhel minima odporu liší s jinými studii na jiných geometriích. Například ve studii [37] provedené na generickém sedanu vztlak dále klesá i při úhlu 12° . Naopak ve studii [69] provedené na modelu skutečného vozidla SAAB součinitel vztlaku mezi úhly 8° a 14° jednoznačně neklesal ani nerostl.



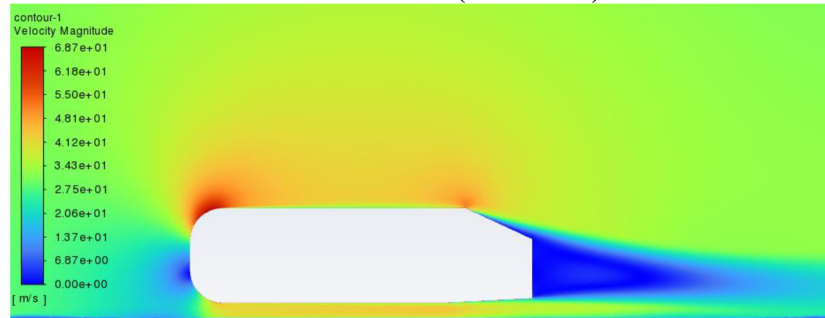
Obrázek 46: Graf závislosti součinitele vztlaku na úhlu divergence

7.5.3 Rychlostní a tlakové pole

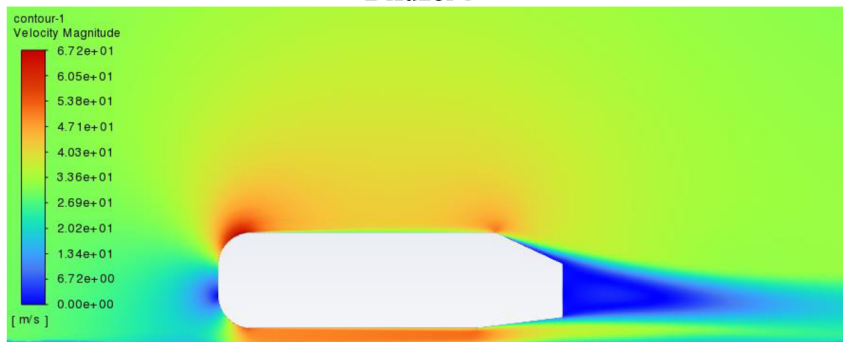
Na obrázku 47 jsou vyobrazeny rychlostní profily v okolí Ahmed body s různými úhly difuzorů. Na rychlostních profilech lze pozorovat množství jevů, které je možné pozorovat i při studování aerodynamiky skutečných vozidel. Nejdůležitější jevy jsou úplav za vozidlem a stagnační tlak na přední části vozidla. Dále je možné pozorovat zrychlení proudění především na horním zaoblení v přední části tělesa. Tyto jevy jsou důležité, protože společně utvářejí rozdíl mezi tlakovým polem v přední a zadní části vozu, což je hlavní podíl na odporu automobilu.



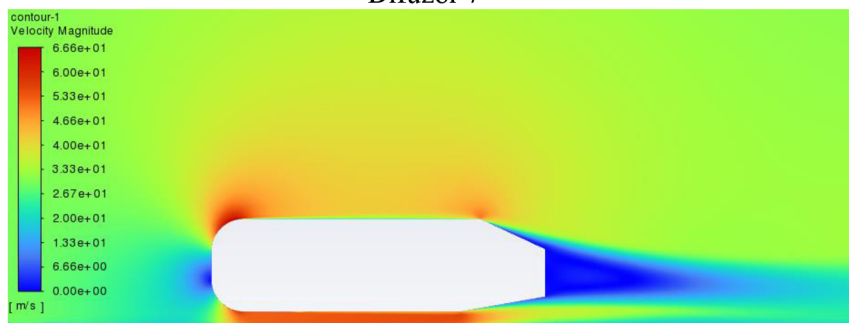
Referenční těleso (difuzor 0 °)



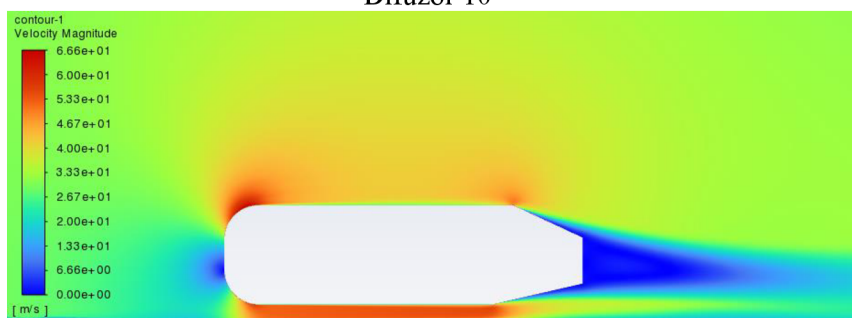
Difuzor 3 °



Difuzor 7 °



Difuzor 10 °

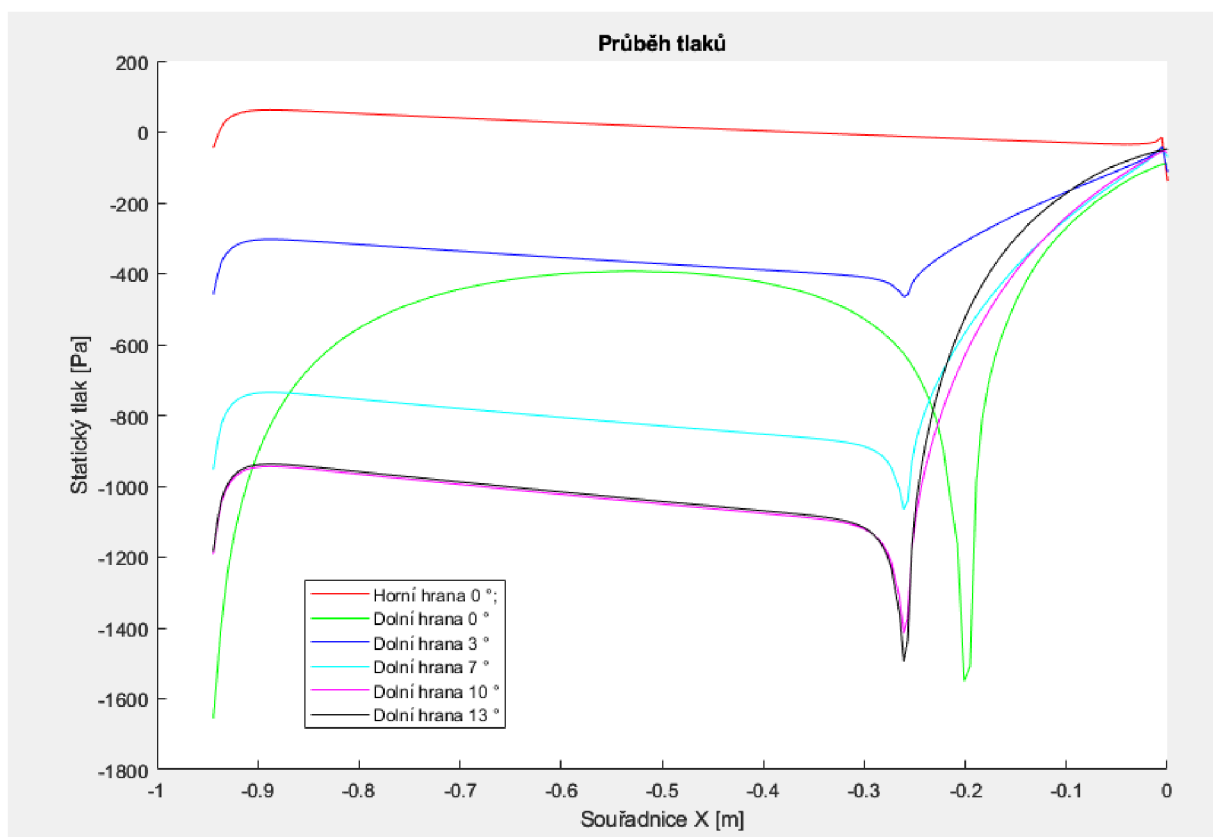


Difuzor 13 °

Obrázek 47: Rychlostní profily v okolí Ahmed body s různými difuzory

Při pozorování rychlostního pole pod vozidlem je zřejmé, jak významným prvkem difuzor je. Toto grafické znázornění rychlosti pod vozidlem vysvětluje průběh součinitele vztlaku v závislosti na úhlu difuzoru. Z kontur je zřejmé, že se zvyšujícím se úhlem difuzoru roste rychlost proudění pod vozidlem, což způsobuje nižší tlak a vyšší přitlak vozidla.

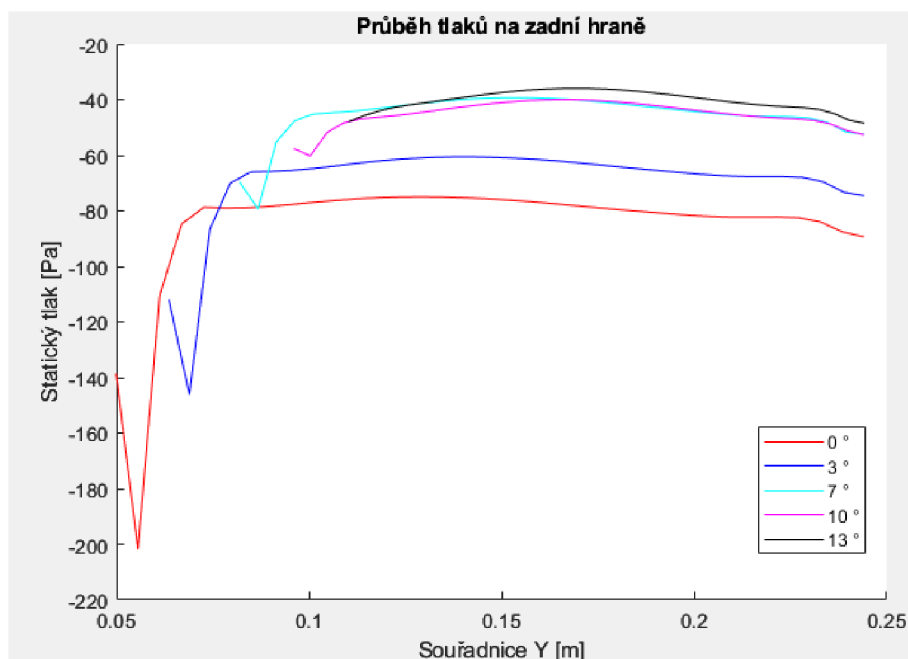
Průběh tlaku nad tělesem a pod tělesem je možné pozorovat i na vykresleném grafu. Na obrázku 48 se nachází průběh tlaku na obtékaném tělese. Na křivce ukazující průběh tlaku na horní hranici Ahmed body je možné pozorovat prudký výkyv, který je způsoben zkosením v zadní části horní hrany tělesa. Průběh tlaku na dolní hraně se výrazně liší s úhlem difuzoru. Je možné pozorovat, že křivky znázorňující tlak na dolní hranici se pro úhly difuzoru 0° a 3° nachází nad křivkou znázorňující tlak na horní hraně. Z toho plyne, že při takové konfiguraci bude na těleso působit kladná vztlaková síla, a tedy i součinitel vztlaku bude kladný. To je ve shodě s vypočtenými hodnotami.



Obrázek 48: Průběh tlaků na dolních hranách Ahmed body

Podobně jako na horní hraně dochází i na dolní hraně tělesa ke skokovému poklesu tlaku na počátku difuzoru. Tento jev je popsán v rešeršní části práce. Je zřejmé, že pokles je vůči tlaku před počátkem difuzoru tím výraznější, čím je vyšší úhel divergence. Z grafu je vidět, že tlak před difuzorem je zhruba stejný pro úhel 10° a 13° . Tlak přímo pod zkosením difuzoru je pak dokonce vyšší u úhlu 13° . To opět koresponduje s vypočítanými hodnotami součinitele vztlaku, protože pro 13° je vztlak vyšší než pro 10° . Jak již tedy bylo vyřčeno, mezi těmito dvěma úhly se nachází úhel kritický. U úhlu považovaného za kritický již difuzor nefunguje správně jako difuzor a na konturách rychlosti je vidět, že rychlý proud vzduchu se odděluje od podvozku dříve. To je důvod proč se křivka na grafu na obrázku 48 dostává v oblasti části difuzoru nad křivku úhlů 7° a 10° a nezpůsobuje tak výrazný přitlak jako úhel 10° .

Stejně tak lze pozorovat tlak na zadní hraně Ahmed body. Zde se naopak generuje odpor. Pro co nejnižší odpor je vhodné, aby tlak za vozidlem byl co nejvyšší. Protože za vozidlem vždy vzniká úplav, kde je tlak vždy nižší než tlak před vozidlem, je vhodné, aby působil na co nejmenší ploše. Na obrázku 49 jsou vyneseny průběhy tlaků na zadní hraně Ahmed body.



Obrázek 49: Průběh tlaků na zadní hraně Ahmed body

Je však nutné brát v potaz, že odporovou složku má i síla způsobená tlakem v difuzoru. Ten není v obrázku 49 zahrnut. Na konturách rychlostí na obrázku 47 je však vidět, že u úhlu vyšším než 7° dochází k dřívějšímu oddělení proudění od stěny difuzoru a úplav vzniká již dříve v difuzoru. Roste tedy plocha, na které působí nízký tlak úplavu, což se projevuje nárůstem odporu. To je zřejmě důvod, proč ačkoliv je na zadní hraně srovnatelný tlak u úhlů 7° , 10° a 13° , je odpor nejnižší u úhlu 7° .

7.6 Závěr 2D modelu

Jako celkově nejvýhodnější ze zkoumaných úhlů difuzoru se jeví úhel 7° a 10° . Úhel 7° zapříčiňuje nejvyšší snížení odporu a značné snížení vztlaku. Úhel difuzoru 10° odpor lehce snižuje, především pak dochází k nejvyššímu snížení vztlaku. Lze tedy říct, že pro osobní automobily je nejvhodnější úhel 7° , protože poskytuje nejnižší odpor, a tedy relativně nižší emise, nebo vyšší dojezd v případě elektromobilů. Pro automobily sportovní je pak nejvhodnější úhel 10° , protože nízký součinitel vztlaku dává možnost vyšší rychlosti v zatáčkách a lepší ovladatelnost vozidla. Jak však bylo uvedeno v rešeršní části, lze vytvořit i efektivnější difuzory, a to za použití přepážek v difuzoru, generátoru vírů apod.

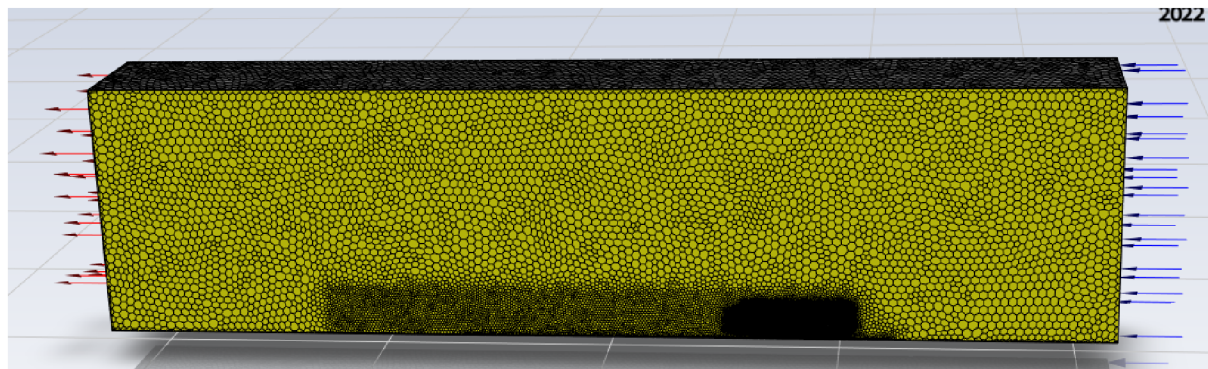
Je důležité zdůraznit, že 2D simulace se ukázala pro tuto problematiku jako značně omezující. Nevhodná se ukázala především pro zkoumání konkrétních hodnot součinitele vztlaku. Není na ní možné pozorovat ani vzniklé víry, které jsou pro problematiku difuzoru důležité. Proto byla provedena také simulace referenčního tělesa a úhlu 7° ve 3D. Pro 3D modelování byl zvolen úhel 7° , protože na něm je možné dobře zkoumat jak snižování vztlaku, tak i odporu.

8 3D model

Jak bylo uvedeno výše, ve 2D simulaci není možné pozorovat některé podstatné jevy, které jsou z hlediska funkce difuzoru důležité. Jedná se zejména o tvorbu vírů, které se v difuzoru tvoří. Princip těchto vírů a jejich vliv a důležitost na funkci difuzoru byl popsán v kapitole 5.2. Bylo vymodelováno a spočítáno referenční těleso bez difuzoru, respektive s úhlem difuzoru 0° . Dále byl na základě výsledků 2D modelu zvolen úhel 7° , který byl také vymodelován a zkoumán.

8.1 Geometrie a síť konečných objemů

Geometrie samotného tělesa je stejná jako ve 2D simulaci. Bylo využito faktu, že Ahmedovo těleso je symetrické a byla vymodelována pouze jeho polovina. Což snižuje počet prvků o polovinu. Byl vymodelován prostor dvě délky tělesa před a pět délek vozidla za tělesem. Výška domény činí dvě délky tělesa a šířka modelované poloviny je jedna délka tělesa. Při tvorbě sítě bylo použito příkazu `make polyhedra`, který tetrahedrové prvky pospojuje do polyhedrů. Použitím této funkce se docílí snížení počtu prvků, a tedy i výpočetního času. Po aplikování tohoto příkazu na síť z tetrahedrů se docílilo v síti referenčního tělesa 662 655 prvků a 2 232 410 uzlů. U sítě s difuzorem s úhlem divergence pak síť obsahovala 653 052 prvků a 2 251 910 uzlů.



Obrázek 50: Pohled na síť s difuzorem

Na obrázku 50 se nachází síť Ahmed body s difuzorem složená z polyhedrů. Síť byla zjemněna pomocí příkazu `inflation` na hranicích Ahmed body a na hranici domény v blízkosti obtékaného tělesa. Výška prvního prvku prizmatické vrstvy byla nastavena 1 mm a to proto, aby bylo dosaženo vhodné hodnoty y^+ okolo 50, stejně jako u 2D sítě.

8.2 Nastavení numerického modelu a okrajové podmínky

Typ řešení byl nastaven jako Pressure-Based, formulace rychlosti absolutní, čas stabilní. Model turbulence byl zvolen k-epsilon, který je vhodný pro vytvořenou síť, která má na hranici Ahmed body hodnoty y^+ okolo 50 a na dolní hraně – silnici – v jeho okolí okolo 150. Okrajové podmínky byly totožné jako u 2D simulace. Podobně jako u 2D modelu, byla i u 3D modelu na horní hranici domény nastavena symetrie, a to z toho důvodu, aby nemusela být zjemněna síť, kvůli podmínce ulpívání. Ze stejného důvodu byla symetrie nastavena i na boční hranici odlehle od obtékaného tělesa. Na hranici, které protíná Ahmed body v jeho polovině, byla symetrie nastavena také, a to proto, aby nemuselo být modelováno celé těleso a ušetřil se počet prvků. Protože byl výpočet 3D simulace prováděn na výkonnějším počítači, byl nastaven přesnější model turbulence, který je náročnější na výpočetní výkon. Byla nastavena Non-equilibrium wall function, namísto standard wall function, která uvažuje laminární mezní vrstvu v okolí těles. V realitě je mezní vrstva turbulentní, což uvažuje výpočetně náročnější non-equilibrium wall

function. Takové nastavení dává přesnější výsledky, protože při uvažování laminární mezní vrstvy může dojít například k dřívějšímu oddělení mezní vrstvy. Stejně tak byl použit k-epsilon model realizable, který je také přesnější oproti k-epsilon standard.

Nastavení k-epsilon modelu bylo následující:

k-epsilon model:	Realizable
Near-wall funkce:	Non-equilibrium Wall Functions
C2-epsilon:	1,9
TKE Prandltovo číslo:	1
TDR Prandltovo číslo:	1,2

Metody řešení a jeho ovládací prvky byly zvoleny následovně:

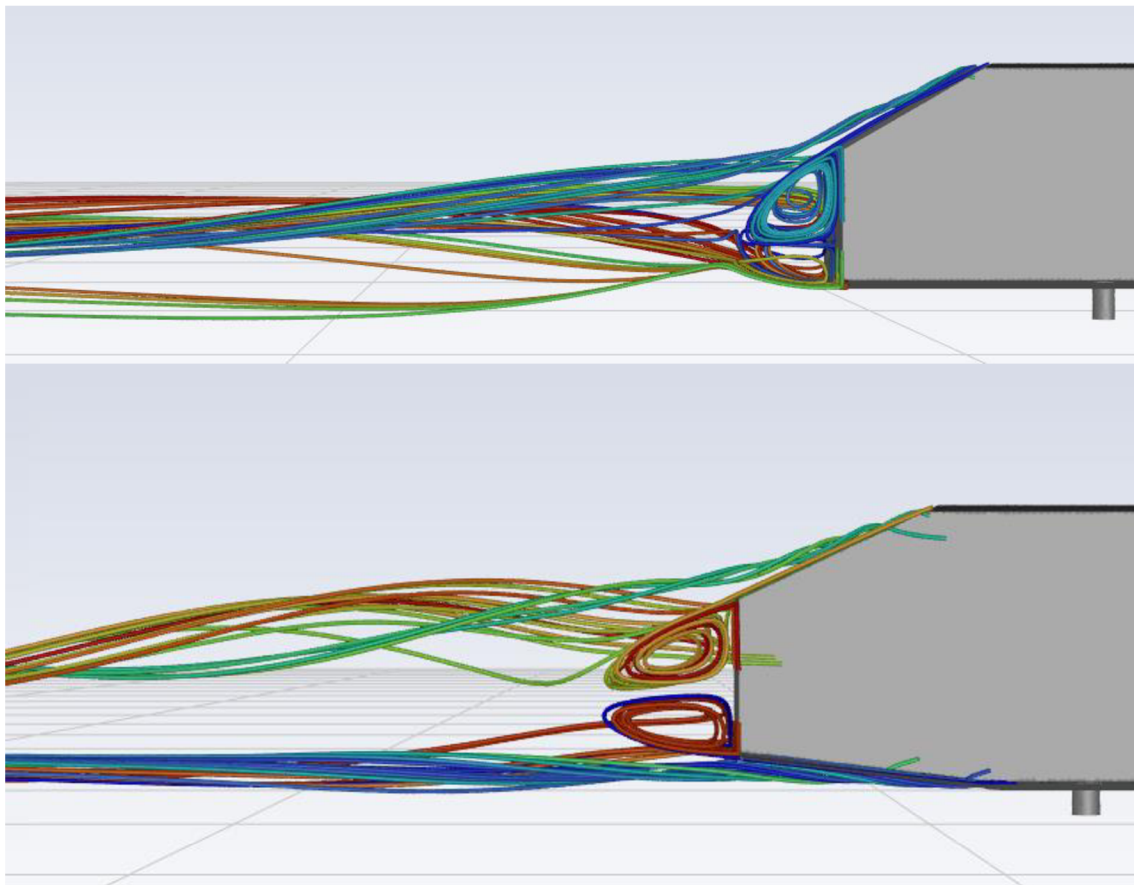
Propojení rychlosti a tlaku:	
Schéma:	Simple
Prostorová diskretizace:	
Gradient:	Least Squares Cell Based
Tlak:	Standard
Hybnost:	Second Order Upwind
Turbulentní kinetická energie:	Second Order Upwind
Míra disipace turbulentní kinetické energie:	Second Order Upwind
Ovládací prvky řešení:	
Tlak:	0,3
Hybnost:	0,7
Hustota:	1
Síly tělesa:	1
Turbulentní kinetická energie:	0,8
Míra disipace turbulentní kinetické energie:	0,8
Turbulentní viskozita:	1

Bylo provedeno celkem asi 60 000 iterací, tolik však nebylo potřeba.

8.3 Výsledky

Součinitel odporu byl simulací vypočítán jako 0,28422 a odchylka od hodnoty získané experimentem je tedy okolo 5 %. Součinitel vztlaku byl spočítán jako 0,27210 což se liší od výsledků experimentu o cca 22 %. Je však nutno zdůraznit, že experiment a simulace je prováděna za rozdílné rychlosti (u experimentu 60 m/s vs. 30,555 m/s v simulaci) a liší se zřejmě také intenzita turbulencí, která je v experimentu dána kvalitou větrného tunelu. Z těchto důvodů jsou výsledky považovány za správné, a tedy i užitá síť je vhodná k dalším výpočtům. Při vytvoření difuzoru s úhlem divergence 7 ° byl zjištěn součinitel odporu 0,25301 a součinitel vztlaku -0,00445. Snížení odporu je výraznější než u 2D simulace. Srovnání vztlaku ze 2D a 3D modelu nemá význam, protože jak bylo zdůvodněno výše, konkrétní hodnoty vztlaku u 2D modelu tělesa nejsou zcela relevantní. Výsledky 3D simulace jsou pochopitelně přesnější a více se blíží realitě. Bylo řečeno, že 2D model je nevhodný pro výpočet vztlaku, protože tekutina je nucena nepřírodně protékat buď nad nebo pod tělesem. To se u 3D tělesa neděje a tekutina může, stejně jako v realitě, obtékat těleso také po stranách. Dále se 3D simulace více blíží realitě, protože v ní mohou vznikat prostorové víry, které z podstaty věci ve 2D nevznikají. Bylo také použito přesnější nastavení modelu turbulence.

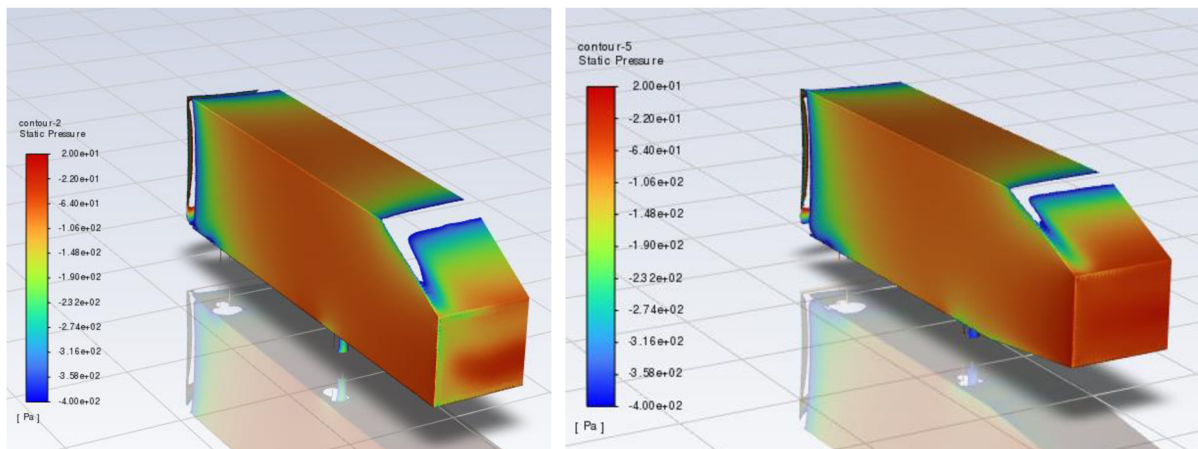
Bylo pozorováno několik jednotlivých částic pohybujících se v zadní části vozidla a za ním. Trajektorie pozorovaných částic jsou vyobrazeny na obrázku 51. Je zde možné pozorovat víření za vozidlem a vznik úplavu.



Obrázek 51: Částice za referenční vozidlem (nahore) a za vozidlem s difuzorem 7 ° (dole)

Při porovnání obou těles lze pozorovat několik rozdílů. Je možné si všimnout, že zatímco u vozidla s difuzorem vznikají nezávisle na sobě dva víry srovnatelných rozměrů, za tělesem bez difuzoru vznikne horní vír výrazně větší. U tělesa s difuzorem se do dolního víru dostávají částice, které prošly pod vozidlem. U referenčního tělesa se do dolního víru dostanou pouze některé částice, které se nacházely i ve víru horním.

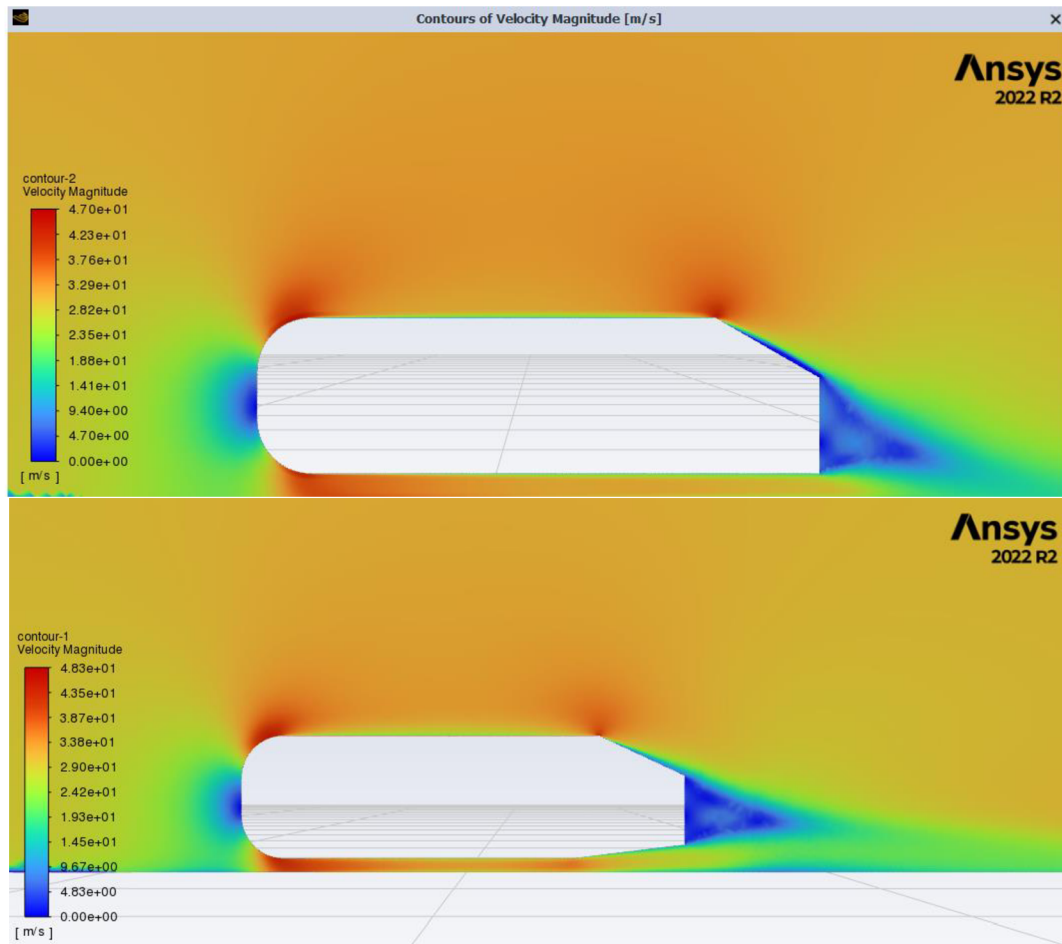
Částice procházející pod vozidlem se do vírů ve velké míře nedostávají. V této oblasti se tedy nachází výrazně méně částic a je zde nižší tlak než u vozidla s difuzorem, kde je částic více a tlak zde není tak nízký. To přispívá ke snížení odporu.



Obrázek 52: Tlak v zadní části vozidel (vpravo bez difuzoru, vlevo s difuzorem)

Snížení odporu difuzorem objasňuje obrázek 52, kde jsou vyobrazeny kontury tlaku na vozidle s difuzorem a bez něj. Oba snímky mají stejné škálování tlaků. Na zadní stěně vozidla je s difuzorem tlak výrazně vyšší než bez něj. Rozdíl mezi stagnačním tlakem před vozidlem a tlakem za vozidlem bude s difuzorem nižší a tlakový odpor tedy také. Vyšší bude odpor třecí, protože se prodlužuje plocha, kterou vzduch obtéká. Tato část odporu je však minoritní a celkově se difuzor projeví snížením celkového odporu.

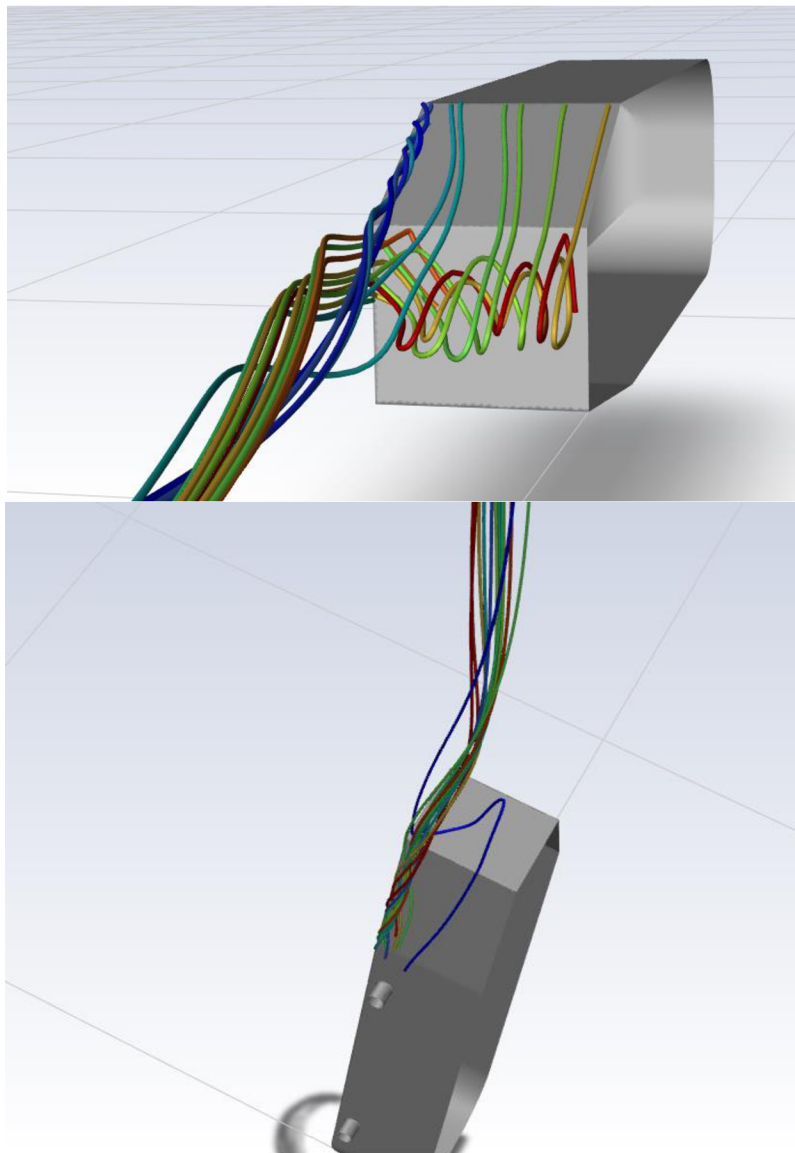
Rozdílné úplavy jsou znázorněny pomocí rychlostních kontur i na obrázku 53.



Obrázek 53: Rychlostní pole okolo referenčního tělesa (nahore) a tělesa s difuzorem (dole) na ose symetrie

Na konturách je také možno pozorovat mnoho dalších jevů a odlišností od 2D simulace. Především je možné vidět skutečné rychlosti pod vozidlem, které nejsou ve 2D simulaci správné.

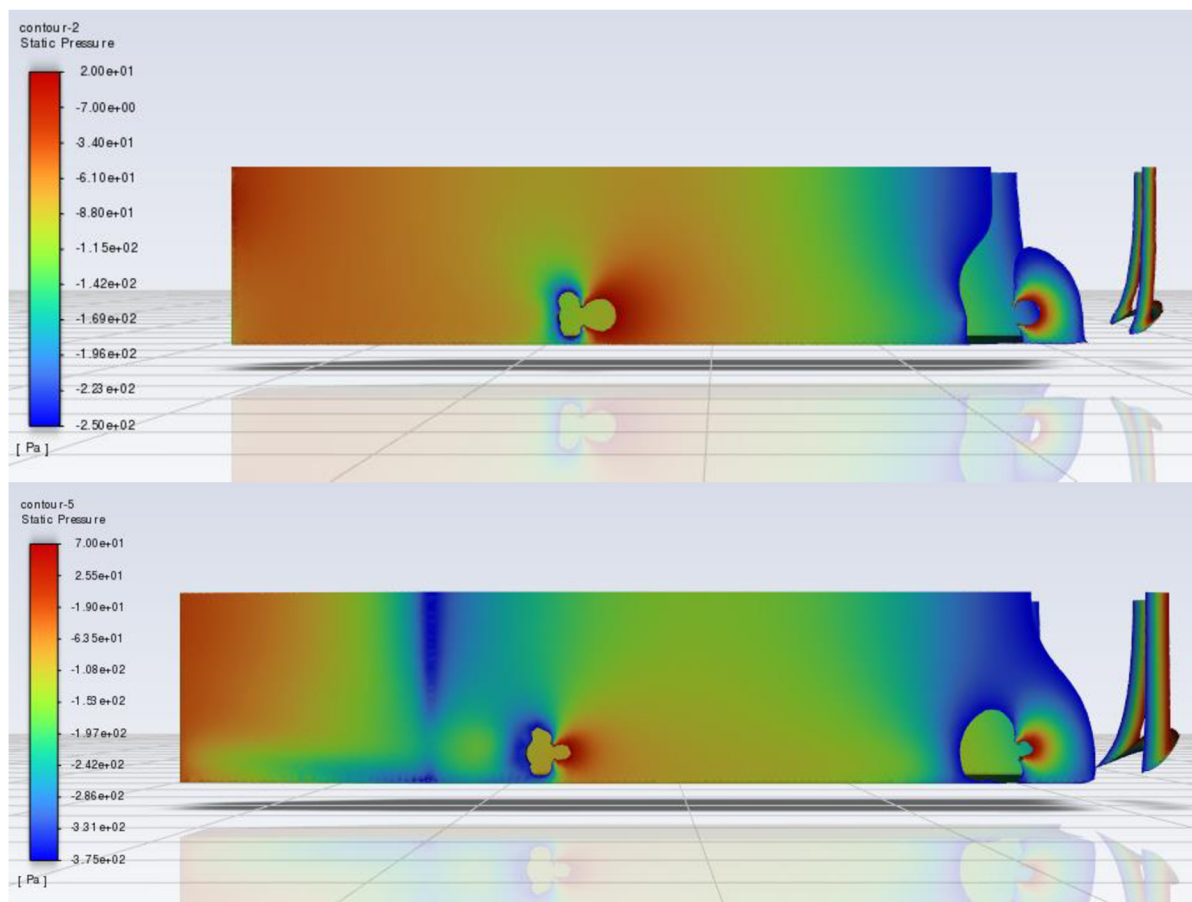
Jak bylo řečeno, jednou z hlavních výhod 3D modelování je možnost pozorovat vírové struktury. Víry na geometrii Ahmed body vznikají na hranách zkosení – tedy na horním zkosení a na hraně difuzoru.



Obrázek 54: Spirálovité víry vzniklé na hranách

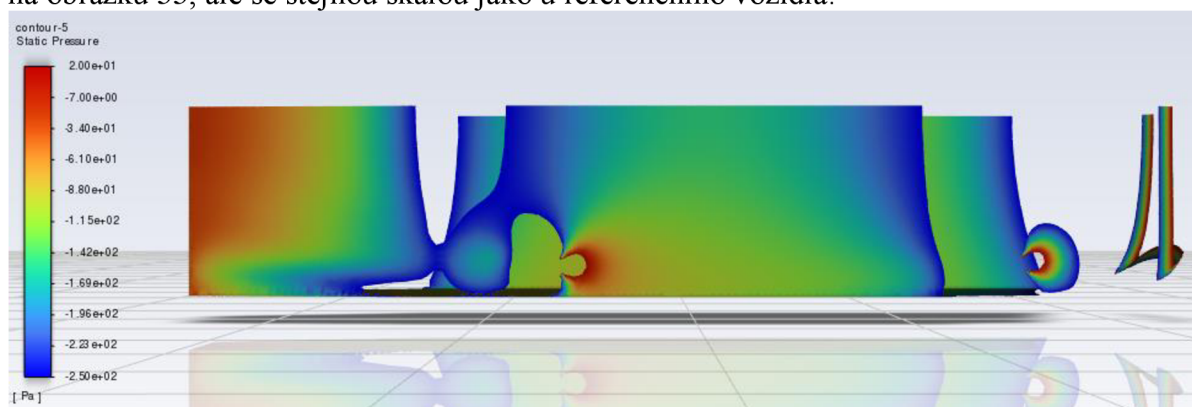
Na obrázku 54 jsou graficky vyobrazeny víry, které vznikají na hranách skosení. Tyto víry s sebou nesou nízký tlak. To je možné sledovat na obrázku 52, kde se v oblasti víru na horní hraně tvoří nízký tlak. To je nevýhodné na horní straně vozidla, neboť takový vír generuje vztlak a zhoršuje vlastnosti automobilu. Stejným principem vzniká vír i na hraně difuzoru. Na podvozku automobilu má takový vír naopak pozitivní vliv, neboť generuje nízký tlak a přítlak.

Na obrázku 55 se nachází kontury rozložení tlaku na podvozku vozidla bez difuzoru a s difuzorem. Tlak u jednotlivých obrázků nemá stejnou škálu. Na hraně difuzoru je viditelný značný pokles, způsobený právě spirálovitým vírem.



Obrázek 55: Tlak na podvozku vozidel (bez difuzoru nahoře, s difuzorem dole)

Mimo to je na této kontuře mnoho dalších jevů. Na počátku difuzoru je znát výrazné snížení tlaku. Pro lepší porovnání je na obrázku 56 stejné tlakové pole na podvozku s difuzorem, jako na obrázku 55, ale se stejnou škálou jako u referenčního vozidla.



Obrázek 56: Tlak na podvozku s difuzorem (odpovídající škála tlaku)

Na první pohled je zřejmé, že tlak je po celém podvozku nižší u tělesa s difuzorem (někde je tak nízký, že se nevyobrazuje v tomto škálování tlaku). To je vysvětlení snížení součinitele vztlačku použitím difuzoru.

Kromě jevů týkajících se difuzoru se projevují i jiné jevy. Například na obrázcích 55 a 56 je znatelné ovlivnění proudění koly automobilu. Kola si vytvářejí vlastní stagnační tlak a vlastní úplav, což zvyšuje odpor. V praxi se problém obtékání kol částečně řeší například použitím deflektorů před koly.

8.4 Závěr 3D simulace

Bylo simulováno referenční těleso bez difuzoru a dále těleso s difuzorem s úhlem divergence 7° , což se ukázalo jako nejvhodnější úhel ve 2D simulaci. S použitím difuzoru, stejně jako ve 2D, došlo ke snížení odporu i vztlaku. Snížení odporu bylo výraznější než ve 2D. To může být způsobeno přesnějším nastavením numerického modelu a také promítnutím výhradně 3D jevů do výpočtu.

Ukazuje se, že 3D simulace je pro problém difuzoru výrazně vhodnější než simulace ve 2D. 3D simulace ukázala, že snížení odporu a přítlaku generují i jevy, které jsou pozorovatelné výhradně ve 3D a jejich vliv se ve 2D nepromítá.

9 Závěr

Cílem práce bylo popsat fungování difuzoru na automobilovém podvozku, proudění v difuzoru a princip snižování odporu a vztlaku jeho použitím. V úvodní části práce je popsána teorie proudění a nejpodstatnější fyzikální jevy a rovnice z hlediska aerodynamiky obecně. Práce dále popisuje podstatné aerodynamické prvky, jakými jsou například přední křídlo, air dam, zadní spoiler a křídlo nebo generátory vírů. Popis těchto prvků slouží především pro vytvoření kontextu pro hlavní téma práce, kterým je difuzor na automobilovém podvozku. Práce se věnuje proudění v difuzoru obecně, shrnuje ztráty v difuzoru a zasazuje jej do kontextu automobilů. Je pojednáno o principu, kterým je snižován vztlak a odpor. V práci je věnována pozornost použití difuzoru na monopostech Formule 1. Další kapitola se věnuje potenciálu difuzoru u osobních automobilů.

Rešerše přinesla podstatné závěry – první z nich se týká používání difuzoru a jeho budoucnosti. Difuzor je prvek donedávna užívaný výhradně u závodních vozů, kde má jistě pevné místo a budoucnost. Difuzor je velice výhodný prvek, protože při snížení vztlaku, nezvyšuje nebo dokonce snižuje odpor, což je cíl při konstrukci závodního automobilu. Tím se liší například od zadního křídla, které sice snižuje vztlak, ale zároveň zvyšuje odpor. Difuzor má zcela určitě nenahraditelnou pozici v této kategorii vozů a nepochybně budou vznikat jeho další úpravy a vylepšení. Zatímco u závodních automobilů je hlavním přínosem snížení vztlaku, u osobních automobilů je výhodný především snižováním odporu. Protože trend vývoje automobilů se zaměřuje na snižování emisí, je nízký odpor zájmem všech automobilek. To souvisí také s rozvojem elektromobility. Značnou aerodynamickou výhodou elektromobilů je hladký, zakrytý podvozek. Práce však ukazuje, že výraznějšího zlepšení odporu difuzorem dochází při nezakrytém podvozku. Nicméně zůstává faktem, že v absolutních číslech dosahuje nejlepších hodnot difuzor s podvozkiem hladkým. Práce pojednává také o potenciálu použití difuzoru u různých karoseriích. Konkrétně porovnává karoserii sedan a kombi. Ukazuje se, že difuzor má vyšší potenciál zlepšit aerodynamiku karoserie sedan. Ačkoliv použití difuzoru u osobních automobilů nemá takovou historii jako u závodních aut, lze předpokládat, že v budoucnu bude hojně využíván, a to jak u automobilů se spalovacím motorem, tak u elektromobilů.

Druhý podstatný výstup z rešeršní části byl předpoklad průběhu závislosti součinitele vztlaku a odporu na úhlu divergence difuzoru. Tyto informace byly využity v praktické části, kde posloužily pro volbu zkoumaných úhlů a také při vyhodnocování výsledků, jako kontrola správnosti výpočtu. V praktické části práce byla provedena CFD simulace obtékání zjednodušeného modelu automobilu s použitím různých úhlů difuzorů. K simulaci bylo zvoleno tzv. Ahmed body. Bylo zvoleno, neboť se jedná o jednoduché, snadno modelovatelné těleso. Simulace probíhala nejprve ve 2D. Ve 2D simulaci byl hledán nejvhodnější úhel divergence difuzoru. Ke zkoumání byly zvoleny úhly 3 °, 7 °, 10 ° a 13 °. Difuzor byl pro všechny tyto případy navrhnout 267 mm dlouhý, což činí čtvrtinu z celkové délky vozidla. Tato poměrně vysoká hodnota, byla zvolena proto, aby se dostatečně projevil všechny studované jevy. Jako nejvhodnější úhel, co se týče snižování odporu se projevil úhel 7 °. Pro snížení vztlaku je nejvhodnější úhel 10 °. Tyto výsledky odpovídají předpokladům z rešeršní části. Ukázalo se, že pro zkoumání konkrétních hodnot vztlaku, není 2D simulace vhodná. Ve 3D simulaci bylo modelováno pouze referenční těleso a difuzor s úhlem 7 °. Snižování odporu bylo výraznější než u 2D simulace. 3D simulace je vhodná i k výzkumu vztlaku a pozorování jevů, které jsou výhradně prostorové.

Práce nabízí velký prostor pro rozšíření především v praktické části. Například v diplomové práci by mohlo být zjednodušující Ahmedovo těleso nahrazeno realističtějším modelem automobilu, nebo přímo modelem skutečného vozu. Přínosný by byl také další výzkum interakce difuzoru s dalšími aerodynamickými prvky, především s těmi v oblasti podvozku. Rozšíření práce by mohlo spočívat také ve zkvalitnění výpočetní sítě, například vytvořením strukturované sítě. Strukturovaná síť již byla vytvořena i pro tuto práci, protože však nedávala správné výsledky, bylo od jejího využití upuštěno.

Seznam použitých zdrojů

- [1] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*. 1734 Massachusetts Avenue Cambridge, MA 02138 USA: Robert Bentley, 1996. ISBN 9780837601427.
- [2] TECH TUESDAY: The Lotus 79, F1's ground effect marvel. In: *Formula1* [online]. 2018 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.formula1.com/en/latest/technical/2018/8/tech-tuesday-retro-lotus-79.html>
- [3] Základní pojmy dynamiky tekutin. In: [Http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/123-zakladni-pojmy-dynamiky-tekutin](http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/123-zakladni-pojmy-dynamiky-tekutin) [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/123-zakladni-pojmy-dynamiky-tekutin>
- [4] ŠOB, František. *Hydromechanika*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-214-3578-0.
- [5] Venturi effect flow pressure vector illustration diagram. In: *Dreamstime.com* [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.dreamstime.com/venturi-effect-flow-pressure-vector-illustration-diagram-fluid-air-movement-dynamical-physics-example-experiment-tube-model-image173140979>
- [6] HYDROMECHANIKA: Obtékání těles. In: *Sps-ko.cz* [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: https://www.sps-ko.cz/wp-content/uploads/2020/09/24_Obtekani_teles.pdf
- [7] The perfectly aerodynamic ŠKODA OCTAVIA. In: *Skoda-storyboard.com* [online]. 2020 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/en/skoda-world/innovation-and-technology/the-perfectly-aerodynamic-skoda-octavia/>
- [8] 10 of the most aerodynamic cars ever made. In: *Carwow.co.uk* [online]. 2022 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.carwow.co.uk/best/most-aerodynamic-cars#gref>
- [9] GOLSON, Daniel. Tesla says the new Model S is the world's most aerodynamic production car. In: *Cnet.com* [online]. 2021 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.cnet.com/roadshow/news/tesla-says-the-new-model-s-is-the-worlds-most-aerodynamic-production-car/>
- [10] Splitter and air dam. In: *Formula1-dictionary.net* [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.formula1-dictionary.net/splitter.html>
- [11] Přední spoiler Škoda Octavia IV RS 2019- černá lesklá | Milotec. In: *Carvin.cz* [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: https://www.carvin.cz/specialni-tuning-2/predni-spoiler-milotec-skoda-octavia-iv-rs-2019-cerna-leskla/?gclid=CjwKCAiAv9ucBhBXEiwA6N8nYKAAsZPWKvNuzm0ZWKFghjlh5R8m384x1F_1YEzwnQmn6xxPohcr1xoCWH0QAvD_BwE
- [12] The Purpose of a Front Air Dam on a Truck. In: *Gorecon.com* [online]. 2021 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://gorecon.com/blogs/blog/the-purpose-of-a-front-air-dam-on-a-truck>
- [13] HAZEN, Eric. Air Dam or Splitter - A Closer Look. In: *Verus-engineering.com* [online]. 2015 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.verus-engineering.com/blog/cfd-cases-4/air-dam-or-splitter-a-closer-look-12>

- [14] HARISH, Ajay. Front Wing of an F1 Car: How to Optimize Its Design. In: *Simscale.com* [online]. 2022 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/blog/front-wing-f1-car-optimize/>
- [15] Car Aerodynamics Basics and How-To Design Tips cont.... In: *Buildyourownracecar.com* [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.buildyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design/4/>
- [16] GIULIANA, Rosario. Tech 101: How does a Formula 1 front wing work?. In: *Motorsportweek.com* [online]. 2020 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.motorsportweek.com/2020/08/24/tech-101-how-does-a-formula-1-front-wing-work/>
- [17] ANDERSON, Gary. GARY ANDERSON: HOW F1 FRONT WINGS ARE CHANGING FOR 2022. In: *The-race.com* [online]. 2022 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://the-race.com/formula-1/gary-anderson-how-f1-front-wings-are-changing-for-2022/>
- [18] SYAL, Aysus. Effect of Front-wing ground clearance and angle of attack on F1 car's performance. In: *Medium.com* [online]. 2020 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://medium.com/@ayushsyalaviator/effect-of-front-wing-ground-clearance-and-angle-of-attack-on-f1-cars-performance-3933c2bedf35>
- [19] SKWARCZEK, Matthew. A Car Spoiler Is Not the Same Thing as a Wing. In: *Motorbiscuit.com* [online]. 2021 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.motorbiscuit.com/a-car-spoiler-is-not-the-same-thing-as-a-wing/>
- [20] KAROSERIE ŠKODA SCALA. In: *Skoda-storyboard.com/en* [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: https://cdn.skoda-storyboard.com/2019/03/SCALA_Karoserie_aerodynamika.pdf
- [21] NATH, Devang, Prashant PUJARI, Vikas RASTOGI a Amit JAIN. Drag reduction by application of aerodynamic devices in a race car. *Advances in Aerodynamics* [online]. 2021, 3(4) [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1186/s42774-020-00054-7>
- [22] EDGAR, Julian. Spoiler or wing? Which is better for downforce and low drag?. In: *Youtube.com* [online]. 2020 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=QYwJ1sRb2TA>
- [23] Side skirts. In: *Formula1-dictionary.net* [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: https://www.formula1-dictionary.net/side_skirts.html
- [24] Canards (Dive plates) and vortex generators. In: *Formula1-dictionary.net* [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.formula1-dictionary.net/canards.html>
- [25] ILEA, L a D IOZSA. Wheels aerodynamics and impact on passenger vehicles drag coefficient. *Materials Science and Engineering* [online]. 2018, 2018(444) [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/444/7/072005
- [26] ZHEN, LINGHAO. Wheel Aerodynamics: The Flow Deflector Explained. In: *Racecar-engineering.com* [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.racecar-engineering.com/articles/wheel-aerodynamics-the-flow-deflector-explained/>
- [27] ŠTĚTINA, Josef. *TERMOMECHANIKA - 6TT PROUDĚNÍ PLYNŮ A PAR*. 2021. Dostupné také z: <https://sites.google.com/vutbr.cz/termomechanika/doma/termomechanika-6tt>

- [28] SUNDARARAJ, S., P. KRISHNAKUMAR a B. ABRAHAM. Computational fluid dynamics analysis of flow in diffuser of a desiccant type air dryer. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, 1517-1523 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.120](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.120)
- [29] ŠKORPÍK, Jiří. *Proudění plynů a par difuzory* [online]. Brno, 2016-03 [cit. 2023-04-09]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/41.html>
- [30] MENG, Xu, Zhigang ZUO, Michihiro NISHI a Shuhong LIU. A Numerical Study on the Flow Mechanism of Performance Improvement of a Wide-Angle Diffuser by Inserting a Short Splitter Vane. *Processes* [online]. 2020 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/pr8020143](https://doi.org/10.3390/pr8020143)
- [31] MIMIC, Dajan, Florian HERBST a Christoph JÄTZ. Correlation between total pressure losses of highly loaded annular diffusers and integral stage design parameters. *Journal of the Global Power and Propulsion Society* [online]. 2018, 388-401 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.22261/JGPPS.I9AB30](https://doi.org/10.22261/JGPPS.I9AB30)
- [32] Minor Head Loss. In: *Sbainvent.com* [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://sbainvent.com/fluid-mechanics/minor-head-loss/>
- [33] Diffuser. In: *Formula1-dictionary.net* [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.formula1-dictionary.net/diffuser.html>
- [34] Validating My Theory Based on Couette-Poiseuille Flow For Race Car Underbodies. In: *Racingtech.wordpress.com* [online]. 2013 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://racingtech.wordpress.com/2013/08/12/validating-my-theory-based-on-couette-poiseuille-flow-for-race-car-underbodies/>
- [35] GUERRERO, Alex, Robert CASTILLA a Giorgio EID. A Numerical Aerodynamic Analysis on the Effect of Rear Underbody Diffusers on Road Cars. *Applied Sciences* [online]. 2022, 12(8) [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/app12083763](https://doi.org/10.3390/app12083763)
- [36] TOET, Willem. Willem Toet explains... motorsport diffusers. In: *Racetechnmag.com* [online]. 2017 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.racetechnmag.com/2017/08/willem-toet-explains-motorsport-diffusers/>
- [37] HU, Xingjun, Rui ZHANG, Jian YE, Xu YAN a Zhiming ZHAO. Influence of Different Diffuser Angle on Sedan's Aerodynamic Characteristics. *Physics Procedia* [online]. 2011, 239–245 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: [doi:10.1016/j.phpro.2011.11.038](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.11.038)
- [38] HALLER, Kira. Re:Why the pressure is negative in wake region behind the vehicle?. In: *Researchgate.net* [online]. 2022 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/post/Why_the_pressure_is_negative_in_wake_region_behind_the_vehicle
- [39] Flow separation (boundary layer separation). In: *Tec-science.com* [online]. 2020 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.tec-science.com/mechanics/gases-and-liquids/flow-separation-boundary-layer-separation/>
- [40] REAR DIFFUSERS. In: *Feral-industries.com* [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://feral-industries.com/collections/rear-diffusers>

- [41] XC110 210g 2x2 Twill 3k Prepreg Carbon Fibre (1250mm). In: *Easycomposites.co.uk* [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.co.uk/xcl10-210g-22-twill-3k-prepreg-carbon-fibre>
- [42] CARBON FIBER VS ABS PLASTIC. In: *Feral-industries.com* [online]. 2022 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://feral-industries.com/blogs/news/carbon-fiber-vs-abs-plastic>
- [43] BOXALL-LEGGE, Jake. What are flexi-wings and why do F1 teams want them?. In: *Motorsport.com* [online]. 2021 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.motorsport.com/f1/news/what-are-flexi-wings-analysis/6512614/>
- [44] UNDERSTANDING HOW WE REPAIR YOUR PLASTIC BUMPER THE QUICKEST. In: *Badellscollision.com* [online]. 2017 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.badellscollision.com/blog/quick-repair-plastic-bumper/>
- [45] TECH TUESDAY: The Lotus 79, F1's ground effect marve. In: *Formula1.com* [online]. 2018 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.formula1.com/en/latest/technical/2018/8/tech-tuesday-retro-lotus-79.html>
- [46] BRIET, T., N. SANCHEZ a E. SCALABRONI. Rake angle on a F1 car. In: *F1technical.net* [online]. 2021 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.f1technical.net/features/23505>
- [47] Lotus 78 - Mario Andretti's Favorite F1 Car. In: *Snaplap.net* [online]. 2017 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.snaplap.net/lotus-78/>
- [48] 1975 Ferrari 312 T Specifications. In: *Conceptcarz.com* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.conceptcarz.com/s21632/ferrari-312-t.aspx>
- [49] MITCHELL-MALM, Scott. BUDGET DIFFERENCES BETWEEN F1 TEAMS DOWN TO '\$10-20M'. In: *The-race.com* [online]. 2022 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://the-race.com/formula-1/budget-differences-between-f1-teams-down-to-10-20m/>
- [50] FIA. 2008 FORMULA ONE TECHNICAL REGULATIONS. 2008. Dostupné také z: http://www.jomenvisst.de/fia/2008TechnicalRegulations/1-2008_20F1_20TECHNICAL_20REGULATIONS_2022-02-2008.pdf
- [51] Diffuser. In: *F1.fandom.com* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://f1.fandom.com/wiki/Diffuser>
- [52] EDMONDSON, Laurence. Busting the myth of Brawn GP's legendary double diffuser. In: *Espn.com* [online]. 2019 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: https://www.espn.com/f1/story/_/id/28167450/busting-myth-brawn-gp-legendary-double-diffuser
- [53] F1 TECHNICAL: WHAT IS THE SECRET OF THE INFAMOUS DOUBLE-DECKER DIFFUSER?. In: *Auto123.com* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.auto123.com/en/news/f1-technical-what-is-the-secret-of-the-infamous-double-decker-diffuser/33278/>
- [54] TOET, Willem. The Mysteries of Formula 1 Double Diffusers. In: *Linkedin.com* [online]. 2016 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/mysteries-formula-1-double-diffusers-willem-toet>

- [55] FILISETTI, Paulo. Blown diffusers explained. In: *Espn.co.uk* [online]. 2010 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <http://en.espn.co.uk/f1/motorsport/story/21825.html>
- [56] ANDERSON, Gary. HOW F1 2022'S VARIED FRONT WING DESIGNS WORK. In: *The-race.com* [online]. 2022 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://the-race.com/formula-1/how-f1-2022s-varied-front-wing-designs-work/>
- [57] MANSELL, Scott. Why F1's New Front Wing Is GENIUS. In: *Youtube.com* [online]. 2021 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=nhUeEv0BkBo>
- [58] ANDERSON, Gary. GARY ANDERSON: WHAT 2022-STYLE F1 GROUND EFFECT LOOKS LIKE. In: *The-race.com* [online]. 2022 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://the-race.com/formula-1/gary-anderson-what-2022-style-f1-ground-effect-looks-like/>
- [59] MAHER, Thomas. Newey: 2022 rules will force Red Bull to abandon high rake concept. In: *Racingnews365.com* [online]. 2021 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://racingnews365.com/newey-2022-rules-will-force-red-bull-to-change-high-rake-concept>
- [60] Rake Angle. In: *Formula1-dictionary.net* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: https://www.formula1-dictionary.net/rake_angle.html
- [61] ONO, Alto. Slipstream and 'dirty air' explained. In: *Racecar-engineering.com* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.racecar-engineering.com/tech-explained/slipstream-and-dirty-air-explained/>
- [62] GUERRERO, Alex. Aerodynamic Study of the Wake Effects on a Formula 1 Car. *Energies* [online]. Basel, 2020, **13**(19), 5183 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/en13195183](https://doi.org/10.3390/en13195183)
- [63] The Effect of Aerodynamic Drag on Fuel Economy. In: *Arcindy.com* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <http://www.arcindy.com/effect-of-aerodynamic-drag-on-fuel-economy.html>
- [64] Lightyear 0, the most aerodynamic production car in the world as wind tunnel tests make automotive history. In: *Lightyear.one* [online]. 2022 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://lightyear.one/articles/lightyear-0-the-most-aerodynamic-production-car-in-the-world-as-wind-tunnel-tests-make-automotive-history>
- [65] MARKUS, Frank. How the Lucid Air's Aerodynamic Tricks Gain It Access to the .200 Club. In: *Motortrend.com* [online]. 2021 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.motortrend.com/news/2022-lucid-air-luxury-ev-design-aero-tricks/>
- [66] PANAIT, Mircea. Hyundai Details the Aerodynamic Trickery of the Ioniq 6. In: *Autoevolution.com* [online]. 2022 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.autoevolution.com/news/hyundai-details-the-aerodynamic-tricks-of-the-ioniq-6-203375.html>
- [67] EDGAR, Julian. Porsche Cayenne under-car aerodynamics. In: *Youtube.com* [online]. 2020 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ukOu6myatCU>
- [68] HAZEN, Eric. Is a Flat Underbody Necessary for a Rear Diffuser to Function?. In: *Verus-engineering.com* [online]. 2019 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.verus-engineering.com/blog/cfd-cases-4/is-a-flat-underbody-necessary-for-a-rear-diffuser-to-function-76>

- [69] LEVIN, Johan a Rikard RIGDAL. *Aerodynamic analysis of drag reduction devices on the underbody for SAAB 9-3 by using CFD*. Goteborg, Švédsko, 2011. Diplomová práce. Chalmers University of technology.
- [70] Aerodynamika nové Škody Octavia dopodrobna. Ladí se i ty nejmenší detaily. In: *Auto-mania.cz* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://auto-mania.cz/aerodynamika-nove-skody-octavia-dopodrobna-ladi-se-i-ty-nejmensi-detaily/>
- [71] MISHRA, Sujit, Ashok MISRA a Psv RAMANARAO. Advances and Applications in Fluid Mechanics MULTIPHASE MIXTURE MODEL SIMULATION OVER A SIMPLIFIED CAR. *Pushpa Publishing House* [online]. 2019 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: doi:10.17654/FM023010017
- [72] AHMED, R., G. RAMM a G. FALTIN. Some Salient Features Of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake. *SAE Technical Paper*. 1984, **1984**. ISSN 0148-7191. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.4271/840300>

Seznam použitých veličin

a	[m/s ²]	zrychlení tekutiny od vnějších objemových sil
t	[s]	čas
v	[m/s]	rychlost proudění tekutiny
Y_z	[J/kg]	měrná ztrátová energie
Y_k	[J/kg]	měrná kinetická energie
Y_{pp}	[J/kg]	měrná energie potenciální tlaková
Y_g	[J/kg]	měrná energie potenciální tíhová
ρ	[kg/m ³]	hustota
p	[Pa]	tlak tekutiny
v_∞	[m/s]	rychlost vzdáleného proudění
p_∞	[Pa]	tlak vzdáleného proudění
v_A	[m/s]	rychlost v konkrétním bodě
p_A	[Pa]	tlak v konkrétním bodě
Q_m	[kg/s]	hmotnostní průtok
S	[m ³]	obsah plochy průřezu
τ	[Pa]	tečné napětí
μ	[N·s·m ⁻²]	dynamická viskozita
y	[m]	souřadnice y
x	[m]	souřadnice x
ν	[m ² ·s ⁻¹]	kinematická viskozita
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
L	[m]	délka tělesa
δ_x	[m]	tloušťka mezní vrstvy
C_d	[1]	součinitel odporu
C_l	[1]	součinitel vztlaku
α	[°]	úhel náběhu křídla
F_D	[N]	síla ve směry osy x
F_L	[N]	síla ve směry osy z
F_R	[N]	tlaková síla, působící kolmo na vozidlo
C_f	[1]	součinitel třecího odporu

C_p	[1]	tlakový součinitel
p_i	[Pa]	tlak na vstupu do difuzoru
p_e	[Pa]	tlak na výstupu z difuzoru
v_i	[m/s]	rychlost na vstupu do difuzoru
v_e	[m/s]	rychlost na výstupu z difuzoru
Y_i	[J/kg]	měrná energie na vstupu
Y_e	[J/kg]	měrná energie na výstupu
η	[1]	účinnost difuzoru
C_{pi}	[1]	ideální tlakový součinitel
ζ	[1]	ztrátový koeficient
A_1	[m ²]	obsah průřezu difuzoru na vstupu
A_2	[m ²]	obsah průřezu difuzoru na výstupu
θ	[°]	úhel divergence difuzoru
P	[W]	výkon spotřebovaný na překonání odporu vzduchu