



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ROZPTYL ZNEČIŠTĚNÍ TUHÝMI ČÁSTICEMI Z ELEKTROMOBILŮ VE MĚSTĚ POMOCÍ CFD

DISPERSION OF PARTICULATE MATTER POLLUTION FROM ELECTRIC VEHICLES IN URBAN AREAS
USING CFD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Lipka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub

Linda

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jakub Lipka**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Linda**
Akademický rok: 2023/24

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:

Rozptyl znečištění tuhými částicemi z elektromobilů ve městě pomocí CFD

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Elektromobila neznamená úplnou čistotu. Tato vozidla produkují výrazné množství prachových částic z abrazivních procesů, znečišťujících ovzduší. Jelikož tento zdroj je velmi specifický, nabízí se řešit jej pomocí CFD (computational fluid dynamics). Není známo, jak daleko od cesty se tyto částice dostanou a zda představují riziko i pro lidi na přilehlých chodnících. Práce se zaměří na modelování rozptylu prachových částic pocházejících z elektromobilů pomocí CFD. Výsledky ukáží, zda je znečištění z elektromobility lokální, nebo znečišťuje větší oblasti.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše v oblasti znečištění ovzduší pocházejícího z elektromobility
Rešerše přístupů modelování proudění v okolí vozidla pomocí CFD
Tvořba modelu disperze tuhých částic za pohybujícím se vozů pomocí přístupu CFD
Zhodnocení vytvořeného modelu

Seznam doporučené literatury:

ŠKORPÍK, Jiří. Využití energie větru, Transformační technologie, 2006-10, [last updated 2020-10-23]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/04.html>.

CENEK, Miroslav. Obnovitelné zdroje energie. 2. upr. a dopl. vyd. Praha: FCC Public, 2001, 208 s. : il., tabulky, mapy. ISBN 80-901985-8-9.

TNI 73 0351, Energetické hodnocení soustav s tepelnými čerpadly - Zjednodušený výpočtový postup, 2014

TNI 73 0302, Energetické hodnocení solárních tepelných soustav - Zjednodušený výpočtový postup, 2014

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Napříč společností často panuje přesvědčení, že elektromobily jsou bezemisní alternativou k automobilům se spalovacími motory. Toto však není pravdivé, jelikož elektromobily sice neprodukují výfukové emise, ale jejich provozem stále dochází ke generování pevných částic, které jsou posléze uvolňovány do okolí. Jedná se převážně o částice vzniklé abrazivními procesy při opotřebení brzd, pneumatik a vozovky. Tyto emise navíc u elektromobilů bývají vyšší, díky jejich zvýšené hmotnosti. V této práci byl proto pomocí CFD vytvořen model rozptylu znečištění tuhými částicemi, které tato vozidla produkují, skládající se z modelu proudění kolem elektromobilu a z modelu unášení pevných částic. Bylo zjištěno, že emise pevných částic jsou prouděním unášeny zejména díky vírovým strukturám vznikajícím za automobilem. Částice mohou být uneseny až 1,9 m nad povrch vozovky a až 2,5 m do stran od automobilu, díky čemuž existuje riziko vdechování vzduchu s vysokou koncentrací těchto částic chodci na přilehlých chodnících.

Klíčová slova

Elektromobil, nevýfukové emise, částice, CFD, model proudění, Ahmedovo těleso

ABSTRACT

There is an opinion across the society, that electric vehicles (EV) are emission-free alternative to vehicles using internal combustion engines (ICEV). This is not true. Although electric vehicles do not produce emissions connected to internal combustion, they still produce non-combustion emissions that are emitted into surrounding air. Non-combustion emissions in question are brake wear particles (BWP), tire wear particles (TWP) and road wear particles (RWP). These emissions, due to EV's greater mass, tend to be higher compared to ICEVs. Therefore, in this thesis, model of dispersion of non-combustion emissions generated by EVs was created using CFD consisting of two models – airflow model around EV and particle dispersion model. It was found that those emissions are captured and distributed by airflow, mainly thanks to vortices generated in the wake zone behind the vehicle. Those particles can be suspended up to 1,9 m into the air and up to 2,5 m laterally away from the vehicle. Thanks to that there is a risk of pedestrian inhaling air with high concentration of those particles in places near roads like pavements.

Key words

Electric vehicle, non-combustion emissions, particulate matter, CFD, airflow model, Ahmed body

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LIPKA, Jakub. *Rozptyl znečištění tuhými částicemi z elektromobilů ve městě pomocí CFD* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157629>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jakub Linda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Rozptyl znečištění tuhými částicemi z elektromobilů ve městě pomocí CFD** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, dne 24. 5. 2024

Datum

Jakub Lipka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Jakubu Lindovi jako vedoucímu práce za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Taktéž děkuji Ing. Jakubu Elcnerovi Ph.D. za rady ohledně CFD.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Znečištění generované provozem elektromobilů.....	12
1.1 Elektromobilita.....	12
1.2 Baterie elektromobilů.....	12
1.3 Částice generované elektromobily.....	13
1.3.1 Velikostní rozdělení částic.....	13
1.3.2 Částice generované brzdnými procesy.....	13
1.3.3 Částice generované opotřebením pneumatik.....	15
1.3.4 Částice generované opotřebením jízdního povrchu.....	16
1.4 Regenerativní brzdění.....	16
2 Model šíření emisí z elektromobilů.....	18
2.1 Podstata CFD.....	18
2.2 Princip.....	18
2.2.1 Diskretizační metody.....	18
2.2.2 Řídící rovnice proudění.....	19
2.2.3 Výpočetní síť.....	20
2.2.4 Okrajové a počáteční podmínky.....	21
2.3 Proudění.....	22
2.3.1 Laminární proudění.....	23
2.3.2 Turbulentní proudění.....	23
2.3.3 Proudění v mezní vrstvě.....	24
2.4 Modelování turbulencí.....	24
2.5 Metodologie.....	25
2.5.1 Tvorba geometrie modelu elektromobilu.....	25
2.5.2 Tvorba výpočetní domény.....	26
2.5.3 Nastavení okrajových podmínek.....	27
2.5.4 Tvorba výpočetní sítě.....	28
2.5.5 Volba fyzikálních modelů.....	29
2.5.6 Nastavení pevných fází.....	30
2.5.7 Nastavení zdrojů pevných částic.....	32
3 Výsledky.....	34
3.1 Proudění.....	34
3.1.1 Konvergence.....	34
3.1.2 Rychlostní pole.....	34
3.1.3 Tlakové pole.....	35
3.1.4 Vírové struktury.....	36
3.1.5 Validace.....	39
3.2 Částice.....	40
3.2.1 Částice vzniklé opotřebením brzd.....	40
3.2.2 Částice vzniklé opotřebením pneumatik.....	43

3.2.3 Částice vzniklé opotřebením jízdního povrchu.....	45
DISKUSE.....	48
ZÁVĚR	49
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	50
SEZNAM OBRÁZKŮ	53

ÚVOD

V posledních letech se pozornost automobilek čím dál více zaměřuje na automobily nevyužívající k pohonu motory s vnitřním spalováním, ale elektromotory napájené z baterií. Mnozí se domnívají, že tyto elektromobily nepřispívají k tvorbě emisního znečištění, avšak i přes absenci spalovacího motoru tato vozidla produkují emise pevných částic spojené s opotřebením brzd, pneumatik a vozovky. Tvorba těchto částic je však závislá na hmotnosti vozidla a tu mívají elektromobily vzhledem k užívání těžkých baterií vyšší. Tyto částice jsou posléze vlivem proudění vzniklým pohybem vozidla unášeny do okolí. Cílem této práce je proto pomocí CFD modelu proudění zjistit, jak jsou tyto částice unášeny a zda tyto částice mohou být doneseny až do míst, kde se pohybují chodci.

Pro tyto účely byla nejprve vypracována rešerše zabývající se způsoby znečištění okolí elektromobily. V této části práce je vysvětlena základní podstata elektromobility spolu se základními informacemi o bateriích užívaných elektromobily, díky kterým mají tato vozidla zpravidla vyšší hmotnost, která úzce souvisí i s mírou, jakou jsou zmíněné částice generovány. Dále je vysvětlen původ a charakteristika tří druhů částic, se kterými je pracováno v pozdějších částech práce.

Následuje přehled informací spojených s CFD. Je zde popsána podstata výpočtového modelování spolu s principy, které jsou využívány při tvorbě výpočtových modelů proudění. Pozornost byla také kladena na informace o proudění tekutin a modelování turbulencí. Na základě zjištěných poznatků byl následně tvořen model proudění kolem modelu reprezentujícího elektromobil. Tvorba tohoto modelu je detailně popsána v kapitole o metodologii. Následně bylo přistoupeno k modelování rozptylu tuhých částic do okolí, které je ve zmíněné kapitole taktéž popsáno.

Výstupem je model rozptylu znečištění pevnými částicemi z elektromobilů, který je postaven na CFD modelu proudění kolem tzv. Ahmedova tělesa. Získané poznatky jsou popsány v kapitole věnující se výsledkům.

1 Znečištění generované provozem elektromobilů

1.1 Elektromobilita

Technologický pokrok a sílící obavy z klimatické změny v posledních letech pozvedly produkci a vývoj vozidel, které k pohonu využívají i jiných způsobů, než je čistě užívání spalovacího motoru. Mezi tato vozidla se řadí také vozidla, které spalovací motor neuvžívají vůbec a jsou nazývány elektromobily.

Základní myšlenkou je užívat vozidla, která by při svém provozu negenerovala výfukové emise a CO₂, které jsou tvořeny nedokonalým vnitřním spalováním a následně emitovány do okolního ovzduší, kde přispívají k prohlubování klimatické krize.

Tato vozidla jsou nazývána elektromobily a v odborné literatuře bývají nejčastěji označovány zkratkami „EV“ (z anglického „Electric Vehicle“) nebo „BEV“ (z anglického „Battery Electric Vehicle“) [1]. Hlavními komponenty těchto vozidel jsou elektrické motory, baterie a měnič [2]. Díky nahrazení spalovacího motoru tedy nedochází ke generování spalovacích emisí a díky tomuto faktu bývají často považována za „Eco-Friendly“ (z anglického „přátelský k přírodě“) nebo dokonce bez-emisní [3].

Toto tvrzení je však značně přehnané, je-li bráno v potaz, že energie potřebná k provozu elektromobilů musí být vyrobena, a to za užití převážně fosilních zdrojů. Dále je také nutné vyrobit těžké baterie, které jsou vyráběny s toxických materiálů, které jsou přírodě i zdraví škodlivé [2]. Dále také tato vozidla produkují emise pevných částic, které nejsou spojené s vnitřním spalováním, ale s abrazivními procesy [3]. Tyto emise navíc vlivem vyšší hmotnosti elektromobilů, způsobené užíváním těžkých baterií, jsou vyšší než u vozidel se spalovacími motory [4].

1.2 Baterie elektromobilů

Baterie jsou nezbytnou součástí elektromobilů a v dnešní době je kladen velký důraz na jejich vývoj a vylepšování, neboť baterie mají velký vliv na dojezd, který se v dnešní době snaží každý výrobce posunout na co nejlepší úroveň.

Tyto baterie často obsahují látky, které mohou být nešetrné, nebo škodlivé životnímu prostředí a zdraví živých organismů [2]. Mezi prvky využívané k výrobě baterií patří například nikl, lithium, kadmium, olovo a další [5]. Tyto materiály bývají málo dostupné a drahé, to se často projevuje na vysokých nákladech na výrobu těchto baterií.

Další nepříjemností je omezená životnost baterií. Většina baterií užívaných v dnešních elektromobilech často nevydrží ani 15 let, což je průměrná životnost osobních vozidel. Baterie je považována jako nevyhovující pro automobilový průmysl v okamžiku, kdy ztratí 20 % své původní kapacity [6].

Po ukončení životního cyklu je několik možností, jak s použitými bateriemi naložit. Jednou z možností, jak naložit se starými bateriemi je znovuvyužití baterií pro jiné účely, než účely elektromobility. Takto vyřazené baterie mohou sloužit jako zásobárny energie pro vyrovnávání energetické sítě, nebo mohou sloužit přímo koncovým uživatelům jako baterie [7].

Další možností je repasování. Po ukončení provozu baterie v elektromobilu jsou vyměněny komponenty, které již nevyhovují dalšímu provozu a baterie po repasování může být opět použita k účelům elektromobility či k jiným účelům. Repasování je považováno za nejpřívetivější způsob nakládání s vyřazenými bateriemi [6].

Recyklace je nejčastěji skloňovanou metodou nakládání s vyřazenými bateriemi. Vyřazené baterie mají stále přibližně 80% kapacitu, materiály v baterii tedy stále mají potenciál efektivně fungovat [6]. Z tohoto důvodu je vhodné materiály recyklovat, aby mohly být použity k výrobě nových baterií. To je vhodné nejen z ekologických důvodů, ale i z hlediska

ekonomického. Materiály jako kobalt a nikl jsou drahé a jejich recyklací může dojít ke snížení výrobních nákladů na výrobu nových baterií [7]. To platí také pro lithium, jež je jednou z hlavních složek dnešních baterií pro elektromobily [6]. Při vhodné zvolené metodě recyklace může být ušetřeno až přibližně 51 % výrobních nákladů a ušetřeno přibližně 70 % spotřeby energie na výrobu [7].

S bateriemi pro elektromobily je spojena ještě jedna nepříjemnost a tou je jejich hmotnost. Vlastní hmotnost baterie tvoří velkou část hmotnosti vozidla, se kterou se pojí i vyšší míra generování nevyfukových pevných částic spojených s provozem elektromobilů.

1.3 Částice generované elektromobily

Elektromobily nejsou, jak se mnozí domnívají, naprosto bezemisními vozidly. Při jejich provozu dochází ke vzniku a následnému uvolňování pevných částic. Tyto částice typicky vznikají v důsledku abrazivních procesů, kdy dochází k mechanickému opotřebování brzd, pneumatik a taktéž jízdního povrchu, po kterém se vozidlo pohybuje. Taktéž dochází k víření částic usazených na povrchu vozovky, které je nazýváno resuspenzí.

1.3.1 Velikostní rozdělení částic

Pevné částice mohou být rozděleny podle takzvaného aerodynamického průměru do tří základních skupin, a to na hrubé, jemné a super jemné částice [8]. Aerodynamický průměr částice je definován jako průměr koule o hustotě $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (tj. přibližně hustota vody), která se v uklidněném vzduchu usadí stejnou rychlostí jako dotyčná částice. [9]

První skupinou jsou tzv. hrubé částice, v odborné literatuře označovány jako PM_{10} (z anglického „Particulate matter“ a $10 \mu\text{m}$). Tyto částice jsou definovány jako částice s aerodynamickým průřezem menším než $10 \mu\text{m}$ [8]. Další skupinou jsou částice jemné. Tyto částice jsou v odborné literatuře označovány na stejném principu jako hrubé částice, a to jako $\text{PM}_{2,5}$. Jejich aerodynamický průměr je menší $2,5 \mu\text{m}$, mohou tedy být o poznání jemnější než PM_{10} [8]. Poslední skupinou velikostního dělení jsou částice nazývané jako super jemné. V odborné literatuře jsou označovány jako $\text{PM}_{0,1}$ a jejich aerodynamický průměr je menší než $0,1 \mu\text{m}$ [8].

1.3.2 Částice generované brzdnými procesy

V poslední době je na veřejnosti a v médiích často skloňováno slovní spojení, týkající se částic generovaných brzdným procesem. Každé vozidlo je totiž vybaveno brzdami, z nichž některé mohou produkovat a do okolí vypouštět pevné částice vzniklé jejich používáním.

Na začátek je vhodné představit hlavní druhy brzd, které se vyskytují v dnešních osobních i nákladních vozidlech. V dnešní době jsou ve většině automobilů používány zejména dva druhy brzd, a to bubnové a kotoučové.

Bubnové brzdy (v anglické literatuře označovány jako „Drum Brakes“) jsou staršími z dvojice jmenovaných. Jejich konstrukce se skládá z válcového krytu, který je nazýván brzdovým bubnem, uvnitř kterého jsou brzdové čelisti, na kterých je instalováno brzdové obložení, které je čelistmi přitlačováno na buben a tím je generována třecí síla, tvořící brzdový moment [10]. Díky uzavřené konstrukci tak částice tvořené abrazivními procesy při brzdění nejsou emitovány do okolí, z tohoto důvodu nebude na bubnové brzdy v této práci kladen další důraz. Tyto brzdy byly v minulosti instalovány u většiny automobilů na předních i zadních nápravách, v dnešní době bývají využívány převážně na zadních nápravách v kombinaci s brzdami kotoučovými na předních nápravách [11]. U těžších automobilů bývají nahrazeny u obou náprav právě brzdami kotoučovými.

Kotoučové brzdy (v angličtině také označovány jako „Disk Brakes“) jsou novějším typem a na rozdíl od brzd bubnových mají otevřenou konstrukci. Skládají se primárně z pěti částí,

z nichž pro znečištění jsou zásadní především brzdové kotouče a destičky. V současné době jsou užívány u většiny automobilů na předních nápravách, u těžších nebo závodních vozidel jsou užívány u všech kol. Důvodem je fakt, že přibližně 70 % brzdného výkonu přenáší právě brzdy u předních kol, musí tedy být efektivnější a zároveň musí být kladen větší důraz na jejich údržbu [11]. Díky otevřené konstrukci však na rozdíl od brzd bubnových, do okolí vylučují částice spojené s abrazivními procesy při brždění.

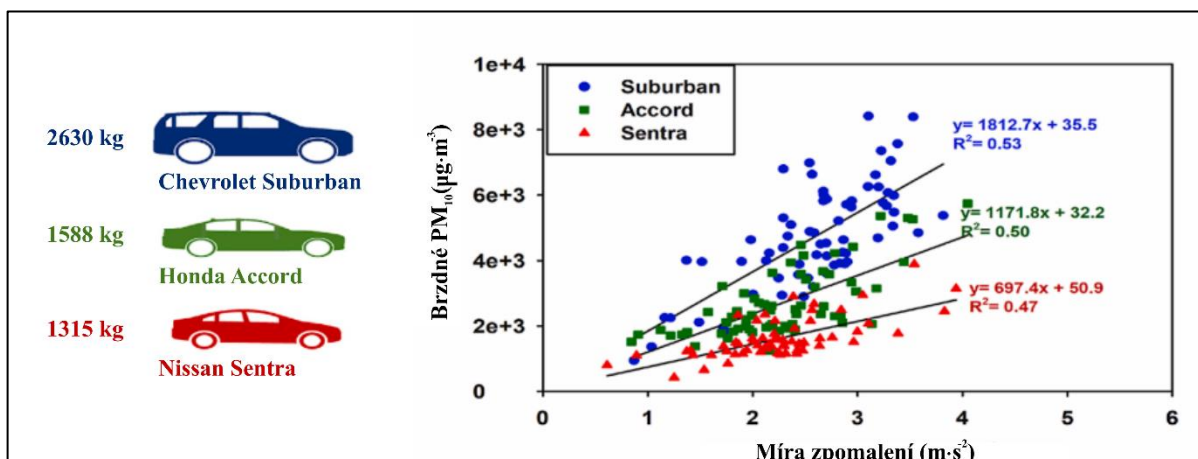
Brzdové disky bývají vyrobeny nejčastěji z litiny, v méně častých případech bývá využita ocel [10]. Brzdové destičky, které jsou přitlačovány na brzdové disky, bývaly původně vyráběny z materiálů obsahujících azbest. Tyto materiály jsou pro daný účel efektivní, avšak později bylo zjištěno, že tyto materiály jsou zdraví škodlivé, a tak začaly být nahrazovány materiály na základě plastových vláken [10] a s nízkým obsahem kovů. Dvěma hlavními druhy v dnešní době používaných brzdových destiček jsou destičky typů „NAO“ a „LM“ [3].

Prvním zmíněným druhem jsou destičky z organických materiálů neobsahující azbest, označované jako „NAO“ (z anglického „Non-azbestos Organic“). V porovnání s ostatními druhy brzdových destiček mají tyto destičky nižší koeficient tření, ale zároveň nižší míru opotřebenosti a při brždění jsou tišší [12]. Destičky tohoto typu bývají používány zejména ve Spojených Státech, Japonsku nebo v Koreji [3].

Dále jsou používány destičky označované jako „LM“ (z anglického „Low-metallic“). U těchto destiček je využíváno stejného typu matrice jako u destiček typu NAO, směs ale obsahuje vyšší podíl kovových složek než dříve zmíněných destiček. Vyznačují se vyšším koeficientem tření a lepší odolností vůči vyšším teplotám, to je však vykoupeno vyšší mírou opotřebenosti a díky tomu i vyššími emisemi pevných částic [12]. Tento druh destiček bývá používán u vozidel zejména v Evropě [3].

Při kontaktu brzdových destiček a brzdových disků při procesu brždění, dochází k abrazivnímu opotřebenosti obou zmíněných částí a k následnému uvolnění pevných částic do okolí, nebo k zachycení na povrchu automobilu. Tyto částice jsou v odborné literatuře nazývány jako „BWP“ (z anglického „Brake Wear Particles“). Tyto vzniklé částice jsou v městském prostředí zodpovědné za přibližně 55 % celkových emisí pevných částic PM₁₀ nesouvisících s vnitřním spalováním a až za 22 % hmotnosti všech emisí PM₁₀ spojených s dopravou [11].

Míra generování pevných částic opotřebením brzd závisí na hmotnosti vozidla. Těžší vozidla generují větší množství částic, než vozidla lehčí [13]. Tato míra je téměř lineárně závislá na hmotnosti vozidla [4]. Kvůli vysokým hmotnostem elektromobilů, které jsou způsobeny užíváním těžkých baterií, proto elektromobily generují větší množství těchto částic než jejich protějšky se spalovacími motory.



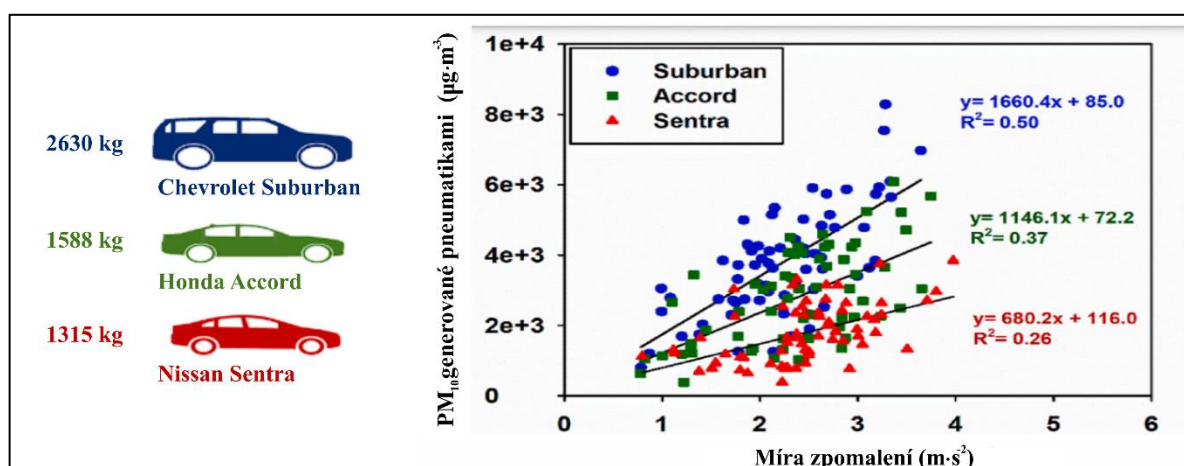
Obr. 1 Vliv hmotnosti vozidla na míru generování PM₁₀ opotřebením brzd, převzato a upraveno z [13]

1.3.3 Částice generované opotřebením pneumatik

Důležitou složkou bezvýfukových emisí jsou částice produkované přímo při jízdě automobilu, které vznikají v oblasti pneumatik.

Tyto částice jsou v anglické literatuře označovány jako „TWP“ (z anglického „Tyre-wear Particles“) [3]. Typicky vznikají v důsledku vytvoření smykového napětí při kontaktu mezi pneumatikou a jízdním povrchem. Takto vzniklé částice bývají převážně hrubé. Druhým způsobem vzniku emisí spojených s užíváním pneumatik je těkání, v důsledku zvýšeného tepelného namáhání, tyto částice bývají převážně jemné [14].

Míra opotřebením pneumatik závisí na mnoha faktorech, jako je například materiál, druh vozidla, jízdni styl a druh povrchu po kterém se auto pohybuje [14]. Stejně jako u opotřebením brzd platí, že těžší vozidla generují více pevných částic souvisejících s opotřebením pneumatik, než vozidla lehčí [13]. Při experimentálních měřeních navíc do problematiky vstupují i částice vygenerované opotřebením jízdniho povrchu, nebo například částice, které jsou zviřeny prouděním z jízdniho povrchu. Z tohoto důvodu je náročné stanovovat množství částic generovaných opotřebením pneumatik [15].



Obr. 2 Vliv hmotnosti vozidla na míru generování PM₁₀ opotřebením pneumatik, převzato a upraveno z [13]

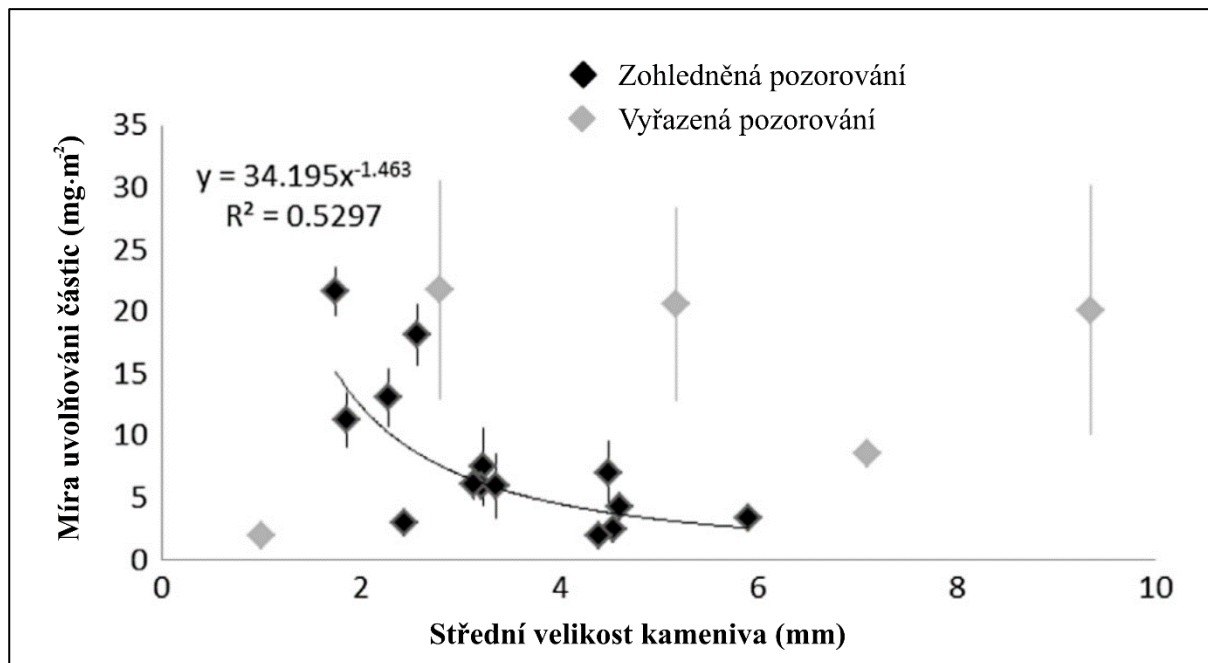
Je odhadováno, že u osobních automobilů vydrží průměrná pneumatika přibližně 40 až 50 tisíc kilometrů, než dojde k opotřebením 10 až 30 % materiálu, který je postupně

uvolňován do okolí. Odhady toho, jakou měrou přispívají částice spojené s pneumatikami do celkového podílu částic v ovzduší se značně liší. Tyto odhady týkající se PM_{10} se v různých studiích pohybují mezi přibližně 1 a 10 % [14] a závisí na rychlosti a míře zrychlení a zpomalení. Ve většině studií je jako dominantní faktor uváděna rychlost.

1.3.4 Částice generované opotřebením jízdního povrchu

Při jízdě vozidla, dochází k interakci pneumatik a povrchu vozovky, po kterém se vozidlo pohybuje. To má za následek opotřebávání povrchu vozovky formou odlučujících se pevných částic, které jsou následně prouděním unášeny dále do ovzduší. V odborné literatuře bývají označovány jako „RWP“ (z anglického „Road-wear Particles“) [3]. Ukazuje se, že betonové povrchy jsou nejméně náchylné na opotřebením a emitují menší množství PM_{10} než ostatní povrchy [14]. Obecně lze také říct, že drsnější povrchy akumulují méně částic, které mohou být uvolněny [16].

Z důvodu uvolňování částic ze stejné plochy, jako je tomu i částic produkovaných opotřebáváním pneumatik a také díky víření unášený usazený prach a pevné částice na povrchu vozovky, je taktéž při měření obtížné rozlišit, zda se jedná o částici generovanou opotřebením pneumatik, nebo jízdního povrchu [3].



Obr. 3 Vliv velikosti kameniva na emise pevných částic, převzato a upraveno z [16]

Jednou z možností, jak mohou být uvolňovány částice související s jízdním povrchem do okolí je také tzv. resuspenze. Jedná se o prach a jemné částice usazené na jízdním povrchu, které jsou následně zvednuty z povrchu vlivem proudění a turbulencí v oblasti úplavu vozidla a unášeny do okolí [3].

1.4 Regenerativní brzdění

U elektrických a hybridních vozidel se nabízí využití tzv. regenerativního brzdění k částečnému dobití baterie vozidla při brzdění. Při klasickém brzděním procesu je nutné pohybující automobil zbavit kinetické energie, aby došlo ke zpomalení či zastavení. Kinetická energie je typicky přeměňována na teplo pomocí tření mezi brzdnými destičkami a kotouči, nebo pomocí brzdění motorem. Při využívání regenerativního brzdění dochází k přeměně části kinetické energie do energie elektrické, která je posléze předána zpět do baterie [10]. K tomu

je využíváno schopnosti elektromotorů fungovat nejen v motorickém, ale i v generátorickém módu a při dodávání kroutícího momentu dodávat energii zpět do baterie.

Z důvodu převedení části brzdného výkonu z brzd do elektromotorů část výrobců začíná využívat levnějších bubnových brzd i u zadních náprav některých elektromobilů, navzdory jejich vyšší hmotnosti.

Právě využívání regenerativního brždění může vést ke snížení celkového objemu emisí pevných částic generovaných procesem brždění. V závislosti na nastavené úrovni regenerace, lze dosáhnout různých hodnot snížení celkových emisí od brždění. Některé studie ukazují až 90% snížení emisí BWP díky využití regenerativního brždění [3].

2 Model šíření emisí z elektromobilů

Model šíření emisí z elektromobilů se skládá ze dvou větších částí. První částí je tvorba modelu proudění kolem zjednodušeného modelu elektromobilu pomocí CFD, které následně unáší částice generované elektromobilem do okolí a druhou částí je nastavení parametrů a zdrojů pevných částic vpouštěných do simulace.

V následujících podkapitolách bude vysvětlena podstata a principy modelování pomocí CFD a následně metodologie tvorby samotného modelu.

2.1 Podstata CFD

Při problémech souvisejících s prouděním tekutin nebo přenosem tepla, které vědci a inženýři řeší, se nabízí několik možných způsobů, jak k dané problematice přistupovat. Lze využít metod, které jsou známé již delší dobu, jako je analytické řešení rovnic popisujících proudění nebo využití experimentu.

Tyto metody sice přináší realistický výsledek, ale často se lidé užívající těchto metod, dostanou do situací, které jsou například dosti komplexní na to, aby byly jen těžce vyřešitelné analytickou metodou. Také se mohou dostat do situací, u nichž by provedení experimentu stálo obrovské množství času na přípravu a provedení, nebo by bylo finančně neschůdné jej provést. [17] V těchto situacích se nabízí využití novější metody, která je nazývána CFD (z anglického „Computational Fluid Dynamics“) [18].

Tato metoda je, jak vyplývá z jejího názvu, používána za přispění výpočetní techniky, která umožní uživateli, pomocí numerických metod simulovat chování zkoumaného systému obsahující tekutiny.

2.2 Princip

Prostor, ve kterém se nachází proudící médium je nazýván výpočetní doménou. Doména je část systému, který uživatel vyjme a modeluje v něm jevy související s prouděním kapalin. V této doméně se taktéž mohou nacházet i pevná tělesa, která budou s prouděním interagovat. Pro vhodné popsání tohoto prostoru, je tedy nutné zvolit počáteční podmínky a výpočetní doménu vhodně zdiskretizovat. To znamená že je rozdělena na množství menších bodů nebo objemů, kterým jsou posléze přiděleny rovnice, které popisují proudění. Tyto rovnice jsou sestavovány na základě zmíněných okrajových podmínek a vybraných modelech popisujících fyzikální chování média. Posléze se pomocí metod sloužících k řešení těchto rovnic dochází k výsledkům, které jsou na konci procesu modelování pomocí CFD vyhodnocovány.

2.2.1 Diskretizační metody

Jedním z prvních kroků k řešení problému pomocí CFD je tzv. diskretizace. Jedná se o převedení spojité domény na konečnou množinu uzlů nebo objemů, uspořádaných do výpočetní sítě a následné převedení diferenciálních rovnic, které je náročné vyřešit, v každém z nově vzniklých uzlů/objemů, na soustavu algebraických rovnic, které lze na základě nastavených okrajových a počátečních podmínek snadněji iterativně vyřešit [18].

K tomuto kroku může být použito několik metod, z nichž nejpoužívanějšími pro potřeby CFD jsou metoda konečných diferencí (zkráceně FDM, z anglického „Finite Difference Method“), metoda konečných prvků (FEM, z anglického „Finite Element Method“) a metoda konečných objemů (FVM, z anglického „Finite Volume Method“) [18].

Metoda konečných diferencí (FDM) je nestarší ze zmíněných metod, používaná již Eulerem [19]. K diskretizaci spojité domény využívá vytvoření množiny tzv. uzlových bodů. V každém z těchto uzlových bodů výpočetní síť následně využívá nejčastěji tzv. centrální diference k aproximaci derivací v sousedních bodech. Tato metoda je v porovnání s ostatními dále zmíněnými považována za nejjednodušší, výpočetní náročnost tedy není v porovnání

s ostatními metodami příliš velká, avšak nevýhodou je, že metoda je vhodná pro počítání se spíše tvarově jednoduššími doménami, primárně tvarovaných jako hranoly a kvádry [18].

Další hojně využívanou metodou je metoda konečných prvků (FEM), která byla původně používána pouze ke strukturálním analýzám [19]. Podobně jako metoda konečných rozdílů, dělí spojitou doménu na síť s konečným počtem uzlových bodů, nebo také prvků (odtud „metoda konečných prvků“). Každému prvku jsou přiřazeny jednodušší polynomiální funkce, kterými jsou popsány neznámé parametry proudění. Tyto rovnice jsou poté řešeny jednou z iteračních metod až do doby, kdy řešení dosáhne požadované přesnosti, nebo dokud není vyčerpán potenciál výpočetní sítě. Výhodou oproti metodě konečných rozdílů je, že pomocí této metody je možné počítat i jevy v tvarově složitých doménách. V dnešní době sice může být FEM používána k řešení problému pomocí CFD, avšak je používána převážně pro řešení strukturálních úloh, spojených s mechanikou těles [18].

Metoda konečných objemů přímo využívá zákony zachování, tedy integrální formy Navier-Stokesových rovnic [19]. Patří k těm nejpoužívanějším metodám v CFD a podobně jako dvě předešlé metody dělí tuto metodu spojitou doménu do výpočetní sítě, avšak u této sítě není kladen důraz na uzlové body, ale doména je dělena na síť o konečném množství kontrolních objemů (odtud metoda konečných objemů). Každému z těžišť takto vzniklých kontrolních objemů jsou přiřazeny základní rovnice popisující proudění tekutin, které jsou posléze převedeny na algebraické rovnice, které jsou v těchto bodech řešeny. Následně je využíváno interpolace k aproximaci hodnot na stěnách kontrolních objemů. Díky využívání sítě konečných objemů a ne prvků, je možné využívat širokou škálu druhů výpočetních sítí. Mohou tedy být snadno použité i nestrukturované sítě, díky tomu lze, jako například u FEM, dobře popsat i složité geometrie [18]. Taktéž díky množině konečných objemů může metoda dobře pracovat se zákony zachování, kterými se CFD řídí.

2.2.2 Řídící rovnice proudění

Při výpočtovém modelování proudění, je využíváno tzv. řídících, nebo také základních rovnic fluidní mechaniky. Ty vyjadřují tzv. fyzikální zákony zachování. Jedná se o zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie [19]. Tyto parciální diferenciální rovnice jsou přiřazeny každému kontrolnímu objemu a jsou následně pomocí diskretizačních principů převedeny na tvar, jež je, na základě počátečních a okrajových podmínek, možný vyřešit pomocí numerických metod [18].

První rovnicí je rovnice, vyjadřující zákon zachování hmotnosti – **rovnice kontinuity**:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

kde ρ je hustota tekutiny, t je čas, ∇ je operátor nabla a v je rychlost proudění. Tato rovnice říká, že hmota nemůže být vytvořena ani zničena [19] a že míra změny hmotnosti uvnitř kontrolního objemu musí být stejná, jako hmotností tok kontrolním objemem [18].

Druhou rovnicí je rovnice, vycházející z 2. Newtonova zákona, reprezentující zákon zachování hybnosti u viskózních tekutin – **Navier-Stokesova rovnice**:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \text{grad } v = a - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad } p + \nu \Delta v \quad (2)$$

kde v je rychlost, t je čas, a je zrychlení od vnějších sil, ρ je hustota, p je tlak, ν je kinematická viskozita a Δ je Laplaceův operátor. Jedná se o transportní rovnici vyjadřující transport lineárního momentu napříč výpočetní doménou. [17]

Další rovnicí je rovnice popisující zákon zachování energie – 1. zákon termodynamiky neboli **energetická rovnice**:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho E v = f_b v + \nabla(U\sigma) - \nabla q + S_E \quad (3)$$

kde E je celková měrná energie, q je tepelný tok, σ je tenzor napětí, f_b je výsledná síla vztažená na jednotku hmotnosti a S_E je zdroj energie na jednotku objemu. [20] Ta říká, že změny celkové energie v čase, jsou způsobeny mírou práce sil působících na kontrolní objem a tepelným tokem do něj vstupujícím [19].

Tyto rovnice popisují fyzikální chování proudění tekutin, avšak kvůli nelinearitě jsou analyticky velice těžce řešitelné. V CFD jsou nejčastěji pomocí metody konečných objemů převedeny do formy lineárních rovnic, které jsou následně řešeny v každé buňce výpočetní sítě, respektive v jejím těžišti.

2.2.3 Výpočetní síť

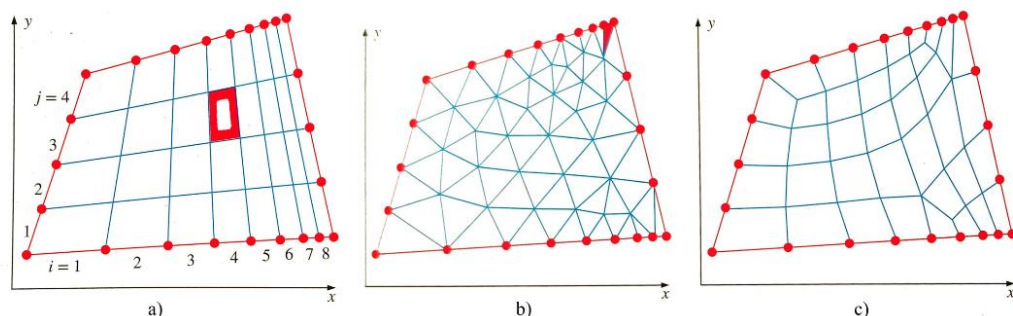
Jak bylo zmíněno v kapitole 2.2.1, spojitou doménu je, pro potřeby jedné ze zvolených metod, potřeba rozdělit na konečnou množinu uzlových bodů nebo objemů, uspořádaných do výpočetní sítě (taktéž mřížky), ve kterých budou následně řešeny řídicí rovnice napříč doménou [18]. Z důvodu používání metody konečných objemů ve většině komerčních CFD řešičů, se tato kapitola bude zabývat právě tvorbou sítě konečných objemů.

Pro správné fungování výpočtového modelu (dále jen modelu) je nezbytné dobře vytvořit výpočetní síť (v anglické literatuře „Mesh“). Jedná se o jednu z nejtěžejnějších částí tvorby celého výpočtového modelu [17]. Základními parametry, kterými se každý uživatel CFD tvořící výpočetní síť zabývá, jsou velikost buněk a typ výpočetní sítě. Obecně platí, že jemnější síť umožňuje dosažení přesnějších výsledků, avšak na úkor výpočetní náročnosti. Se zmenšujícími se rozměry buněk totiž narůstá jejich celkový počet a s nimi i nároky na hardware a výpočetní čas.

V některých případech je nutné, pro dosažení dostatečně přesných výsledků, použít velice jemné síť, avšak pouze v některých oblastech, jako jsou například tvarově složité prvky, za kterými by mohlo docházet ke vzniku vírů, odtržení mezní vrstvy, nebo ke vzniku recirkulace. V těchto případech je vhodné využít lokálních zjemnění sítě (v anglické literatuře označováno jako „Mesh Refinement“), díky kterému je možné síť zjemnit pouze v oblastech, které uživatel předem vytipuje jako potenciálně problémové, nebo v průběhu simulace vyplynou jako oblasti, ve kterých by bylo vhodné síť zjemnit.

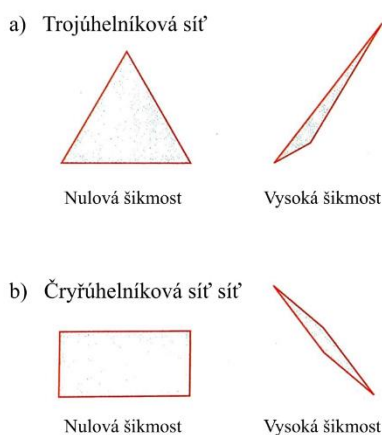
Při tvorbě sítě lze volit z několika druhů výpočetní sítě, přičemž mohou být tyto druhy základně rozděleny na strukturované, nestrukturované a smíšené nebo hybridní síť [19]. Nejjednodušší metou pro generování výpočetních sítí je využití strukturované sítě [18]. Tato metoda využívá čtyřúhelníky pro tvorbu 2D sítí a šestistěny pro tvorbu 3D sítí. Ačkoliv se tyto tvary mohou lišit od pravoúhlých obdélníků a kvádrů, mohou být v rovině či prostoru očíslovány pomocí indexů (i, j, v v případě 3D sítě i, j, k) [17].

Nestrukturované síť pro diskretizaci domény využívají typicky trojúhelníky u 2D a čtyřstěny pro 3D síť. V dnešní době ale lze použít i jiných tvarových prvků, jako jsou například hexaedry [19]. Tyto buňky, na rozdíl od buněk u strukturovaných sítí, nemohou být lehce rozlišeny na základě indexování, ale k rozlišení mezi individuálními buňkami je zapotřebí využití jiných technik [17]. Díky rozmanitosti tvarů buněk lze nestrukturovanou síť vysíťovat i tvarově složité a zakřivené prvky [18]. Pro uživatele je rovněž jednodušší vygenerovat nestrukturovanou síť než tu strukturovanou, avšak zejména u starých CFD řešičů nenabízí takovou přesnost jako síť strukturovaná [17].



Obr. 4 a) 2D strukturovaná výpočetní síť, b) 2D nestrukturovaná trojúhelníková výpočetní síť, c) 2D nestrukturovaná čtyřúhelníková výpočetní síť, převzato a upraveno z [18]

Nehledě na to, jakou metodu tvoření výpočetní sítě uživatel používá, je nutné dbát na kvalitu vytvořené sítě. Hlavní starostí uživatele by měla být šikmost buněk. Pokud je u příliš velkého množství buněk příliš vysoká, mohou tyto nekvalitní buňky vést k nepřesnostem simulace a k problémům s konvergencí [17].



Obr. 5 Šikmost buněk výpočetní sítě, převzato a upraveno z [17]

Při síťování složitých domén, lze použít taktéž smíšené sítě. Tyto mřížky vznikají kombinováním prvků různých druhů v jedné doméně. Dále je možné využít taktéž hybridních sítí, které využívají prvků strukturovaných a zároveň nestrukturovaných sítí v jedné doméně [19].

Zvláštní důraz také musí být kladen na síťování mezní vrstvy. V této vrstvě dochází vlivem podmínky ulpívání k vyvíjení rychlostního profilu, taktéž se zde vlivem vysokého smykového napětí odehrává intenzivnější tření. Díky tomu dochází k ovlivnění proudění [21]. Pro potřeby důkladného popsání proudění v této mezní vrstvě je využíváno lokální zjemnění, ke kterému je použito velké množství malých buněk, které mohou být natažené [18]. To z důvodu, že proudění poblíž stěny má většinou dominantní směr rovnoběžný se stěnou. Tyto elementy jsou nazývány prismatickými elementy, které jsou následně napojeny na okolní výpočetní síť [19].

2.2.4 Okrajové a počáteční podmínky

Krokem následujícím diskretizaci s tvorbu výpočetní sítě je nastavení počátečních a okrajových podmínek, na základě, kterých budou řešeny řídicí a případně dodatkové rovnice.

Počáteční podmínka vyjadřuje stav, ve kterém se tekutina nachází na začátku simulace, tedy v čase $t=0$, nebo při první iteraci řešení rovnic [19]. Okrajová podmínka (dále také jako OP) vyjadřuje napojení výpočetní domény na zbytek systému, ve kterém se řešená doména vyskytuje [19]. Je nastavována uživatelem pro účely stanovení fyzikální reprezentace proudění, které vstupuje do domény a která interaguje s jejími prvky [18]. Tyto počáteční podmínky jsou rozděleny na základě druhu interakce s výpočetní doménou. V této podkapitole budou představeny základní druhy běžně používaných okrajových podmínek napříč CFD řešiči.

Okrajová podmínka „Wall“ (z anglického stěna) je nezákladnější okrajovou podmínkou využívanou CFD řešiči. Jak z jejího názvu vyplývá, reprezentuje neprostupnou zeď. Z tohoto důvodu, předepisuje na povrchu okrajové podmínky složku relativní rychlosti k ní kolmou na nulovou hodnotu [17]. Často je zde také uživatelem předepsaná nulová hodnota taktéž tečné složce relativní rychlosti, z důvodu užívání podmínky ulpívání [19]. Na rozhraní výpočetní domény a okrajové podmínky „Wall“ je taktéž často speciálně stavěná výpočetní síť, z důvodu správného popsání proudění v mezní vrstvě.

Okrajová podmínka „Inlet“ (z anglického vstup, nebo vtok) je obecně podmínka, která je nastavována na okraji výpočetové domény, kterým do systému vstupuje proudící tekutina. Tuto okrajovou podmínku lze dále dělit na rychlostní a tlakovou. Na rychlostní (anglicky „Velocity Inlet“) zadává uživatel rychlost proudění vstupující do domény, na tlakové (anglicky „Pressure Inlet“) specifikuje uživatel tlak na ploše okrajové podmínky [17].

Okrajová podmínka „Outlet“ (z anglického výtok nebo výstup) je opakem OP typu „Inlet“, tedy specifikuje oblast, kterou bude proudění doménu opouštět. Často bývá označována také jako „Pressure Outlet“, uživatel zde zadává hodnotu tlaku na výstupu z domény, často bývá zadáván atmosférický tlak [17].

Okrajová podmínka „Symmetry“ (často označována také „Symmetry Plane“, z anglického symetrická plocha). Tato OP je nastavována v situacích, kde je předpokládáno symetrické chování proudění podél plochy (u 2D problémů podél křivky) na kterou je OP předepsána. Tato podmínka počítá s nulovým průtokem přes plochu na které je předepsána, je zde tedy předepsána nulová velikost složky rychlosti proudění kolmé k ploše OP [19].

2.3 Proudění

Proudění tekutin může být rozděleno na základě několika možných pohledů. V této podkapitole budou tyto základní dělení stručně popsány.

Na základě časové proměnnosti je možné proudění rozdělit na stacionární (taktéž ustálené, v anglické literatuře „steady“) a nestacionární (taktéž neustálené, v anglické literatuře „unsteady“). U ustáleného proudění nedochází ke změně parametrů proudění, jako je například rychlost proudění, teplota a další, v čase. Na druhé straně u neustáleného proudění k těmto změnám dochází [17].

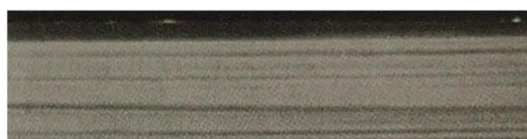
Dále může být proudění děleno podle uspořádanosti a předvídatelnosti na laminární a turbulentní. Reálné proudění je totiž důsledkem viskozity ovlivňováno třením, které způsobuje změnu rychlostí i dalších parametrů proudění. Z těchto důvodů je tedy nutné stanovit, zda se jedná o laminární, či turbulentní proudění [21].

Pro orientační stanovení druhu proudění lze využít podobnostního bezrozměrného Reynoldsova čísla, označovaného Re , porovnáním vypočtené hodnoty s kritickou hodnotou Reynoldsova čísla Re_{kr} . Je-li hodnota námi spočteného Reynoldsova čísla vyšší než hodnota Re_{kr} , jedná se o proudění turbulentní, naopak je-li nižší, proudění je laminární [21]. Hodnota Re_{kr} závisí na druhu proudění (např volné, v trubce atd.). Toto posouzení je však pouze orientační, je možné navodit laminární proudění s vyšší hodnotou Re než je Re_{kr} a naopak. Reynoldsovo číslo lze vypočítat následujícím vztahem:

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

kde v je střední rychlost proudění, l je charakteristický rozměr a ν je kinematická viskozita tekutiny [17].

Taktéž je možno pozorovat tzv. přechodné proudění, tedy proudění, které se nachází na hranici turbulentního a laminárního proudění a které mezi nimi přechází [17]. Hranice mezi nimi totiž není přesně stanovena.



a) Laminární proudění



b) Přechodné proudění



c) Turbulentní proudění

Obr. 6 Druhy proudění dle uspořádanosti, převzato a upraveno z [17]

2.3.1 Laminární proudění

Laminární proudění může být charakterizováno jako uspořádané a předvídatelné a je realizováno v nekonečně tenkých vrstvách, které po sobě kloužou (laminární z latinského „lamina“ – tenký plátek, vrstva) [21]. Toto proudění lze pro jednoduché případy řešit i analyticky pomocí integrování Navier-Stokesových rovnic [21], ve složitějších případech je také nutné využít numerických metod a CFD.

Laminární proudění se ale v reálném světě a ve většině inženýrských aplikací téměř nevyskytuje. Nejčastěji lze nalézt tento druh proudění v situacích, kde se vyskytují malé rychlosti proudění, malé charakteristické rozměry, nebo tekutiny s vysokou viskozitou, viz rovnice (4) [21].

2.3.2 Turbulentní proudění

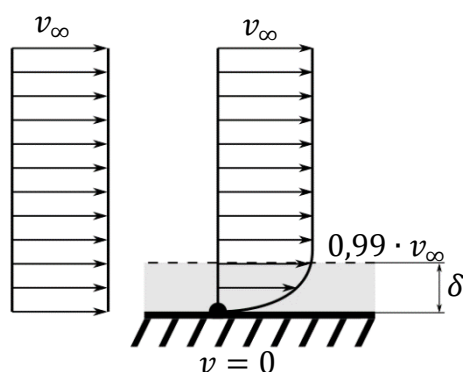
Turbulentní proudění je na rozdíl od laminárního vysoce nepředvídatelné a neuspořádané. Částice tekutiny již nevykonávají pohyb uspořádaný do tenkých vrstev, ale stále přecházejí z jedné do druhé, a navíc konají chaotický kmitavý pohyb. Při tom dochází k neustálé výměně kinetické energie, pohyb má tedy náhodný charakter [21].

V reálném světě i v inženýrské praxi tento druh proudění výrazně převládá nad prouděním laminárním, a proto je důležité se zabývat studiem a porozuměním turbulentního proudění.

Z důvodů nepředvídatelnosti, nelinearity a neustálé výměny energie není možné toto proudění analyticky řešit a pro řešení je nutné využít výpočetní techniky a CFD. Z tohoto důvodu je tak nezbytné, mít metody a postupy, kterými lze turbulentní proudění modelovat.

2.3.3 Proudění v mezní vrstvě

Mezní vrstva je označení tenké vrstvy v těsné blízkosti obtékaného povrchu, kde je proudění silně ovlivněno účinky vnitřního tření, vzniklých důsledkem viskozity tekutiny. V této vrstvě je rychlost proudění významně ovlivněna vývojem rychlostního profilu proudění [21]. Ten vzniká důsledkem tzv. podmínky ulpívání (v angličtině označované jako „No Slip Boundary Condition“), která říká, že na povrchu obtékaného tělesa jsou relativní rychlost proudění vůči tělesu a taktéž smykové napětí nulové [18].



Obr. 7 Rychlostní profil proudění v mezní vrstvě

Jak je vidět na obr. 7 vývoj rychlostního profilu se odehrává v těsné blízkosti povrchu obtékaného tělesa. Rychlostní pole se vyvíjí od nulové rychlosti na jeho povrchu až po rychlost v dostatečné vzdálenosti od povrchu neovlivněnou třecími účinky, označovanou jako v_∞ . Šířka mezní vrstvy δ je definovaná jako kolmá vzdálenost mezi povrchem obtékaného tělesa a místem v rychlostním poli, kde rychlost proudění dosahuje 0,99tinásobku v_∞ [21]. Z důvodu značného ovlivnění rychlostního pole v blízkosti tělesa, je nezbytné klást důraz na dobré popsání mezní vrstvy, a to zejména při vytváření výpočetní sítě v simulacích CFD.

2.4 Modelování turbulencí

V případě simulování turbulentního proudění se jedná o simulace mnohem náročnější než simulace laminárního proudění. Důvodem je nepředvídatelnost a neustálenost proudění, které se mění ve všech třech rozměrech a výskyt turbulencí o různých rozměrech, to činí řešení řídicích rovnic náročnějším než u případu s laminárním prouděním [17].

První možností řešení řídicích rovnic je tzv. přímá numerická simulace (označovaná jako DNS, z anglického „Direct Numerical Simulation“). Tato metoda využívá přímého řešení časově závislých Navier-Stokesových rovnic [19]. K použití DNS je nutné vytvořit velice jemnou síť, aby bylo možné popsat jak velké, tak i extrémně malé víry, které vnikají v doméně. To vyžaduje extrémně silné počítače a vysoké výpočetní časy [17]. Právě díky veliké výpočetní a časové náročnosti je dobře aplikovatelná pouze na jednodušší případy proudění na nižších hodnotách Reynoldsova čísla [19]. V praxi se tedy využívá metod, kde jsou turbulence, ať už v plné, či částečné míře nahrazovány modely turbulencí.

Metoda RANS (z anglického „Reynolds-averaged Navier-Stokes“) přímo neřeší turbulence, bez ohledu na jejich velikost, ale nahrazuje okamžitý stav proudění zprůměrovanou hodnotou. K tomu využívá matematické modely, které zahrnují zvýšené mísení tekutiny

a difuzi [17]. Tato metoda rozkládá proměnné proudění na průměrnou a fluktuující část [19]. Následně dojde k nahrazení Navier-Stokesových rovnic tzv. RANS rovnicí [17]. V současnosti je k dispozici mnoho modelů turbulencí, mezi nejrozšířenější patří například model $k - \omega$, $k - \varepsilon$ a $q - \omega$. Tyto tzv. dvou-rovnicové modely přidávají dvě transportní rovnice, kterými je doplněn systém rovnic, který je následně numericky řešen [17].

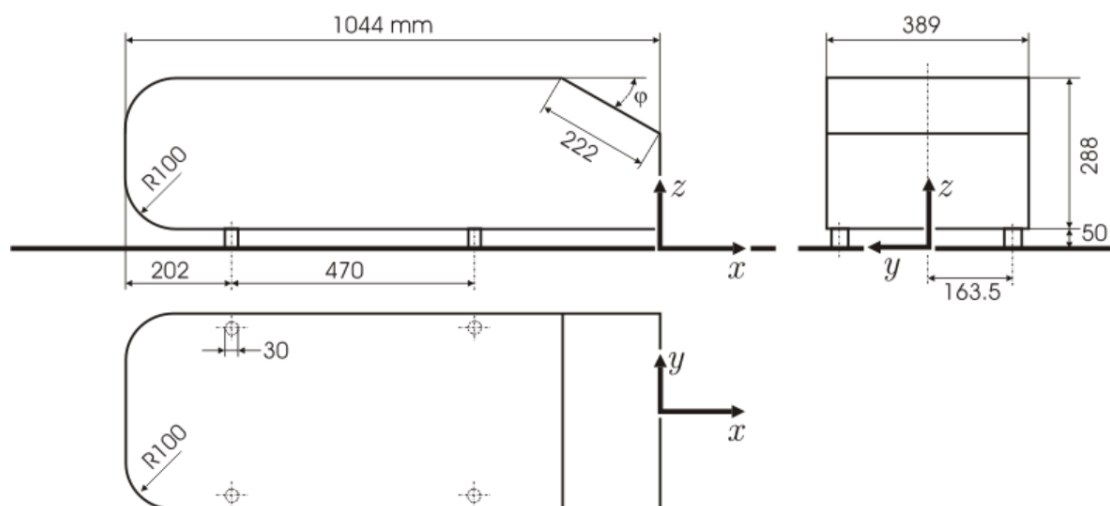
Další možnou metodou je metoda LES (z anglického „Large Eddy Simulation“). Tato metoda nahrazuje modelem turbulence pouze malé vírové struktury, zatímco ty velké řeší po vzoru DNS. V porovnání s DNS je metoda výpočtovou a časovou náročností mnohem více přívětivá, avšak stále se jedná o metodu, která patří mezi metody vyžadující veliký nárok na výpočetní výkon [17].

2.5 Metodologie

Pro tvorbu modelu pro výpočtové simulování rozptylu pevných částic generovaných elektromobily byl zvolen software Simcenter STAR-CCM+ 2210 Build 17.06.007 od firmy Siemens. Bylo modelováno proudění o rychlosti $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

2.5.1 Tvorba geometrie modelu elektromobilu

Jako reprezentace geometrie automobilu bylo zvoleno tzv. Ahmedovo těleso. Ahmedovo těleso je 3D objekt, poprvé použitý S. R. Ahmedem, G. Rammem a G. Faltinem v jejich studii o proudění okolo modelu automobilu. Jedná se o zjednodušenou a zmenšenou geometrii, mající některé z hlavních prvků automobilů, která byla posléze testována ve větrném tunelu s různými hodnotami úhlu sklonu v zadní části tělesa (anglicky „Slant Angle“) za účelem zjištění vlivu úhlu sklonu na koeficient odporu vzduchu, se kterým souvisí spotřeba paliva [22]. Geometrii Ahmedova tělesa je možno vidět na obr. 8.

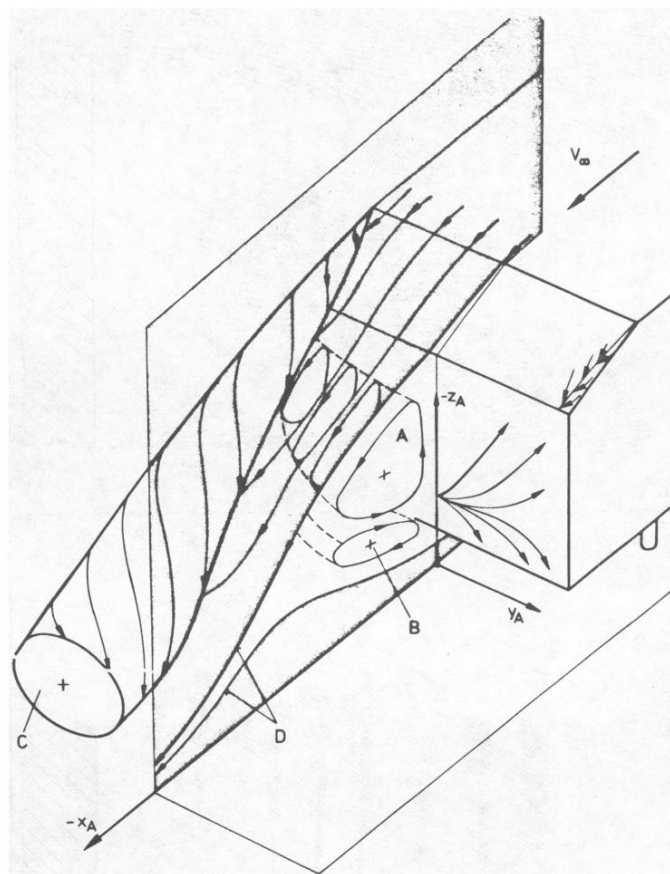


Obr. 8 Geometrie Ahmedova tělesa [23]

Z důvodu potřeby pozdějšího vyhodnocení rozptylu částic do okolí bylo nutné Ahmedovo těleso zvětšit, aby se charakteristickým rozměrem podobalo automobilu, na němž bylo prováděno měření spojené s generováním pevných částic. Autem sloužícím jako rozměrová předloha bylo Hyundai Kona 2020 na kterém prováděli měření vědci z výzkumných institucí v korejském Daejeonu a Soulu [3], ze kterého byla k dispozici data využitelná pro potřeby práce. Jako charakteristický rozměr byla zvolena výška automobilu. Všechny rozměry modelu tedy byly zvětšeny 4,6krát při zachování všech úhlů v modelu. Podstavce

ve tvaru válce, reprezentující kola automobilu nebyly použity z důvodu nepřesné reprezentace a kvůli složitostem spojeným s tvorbou výpočetní sítě.

Mezi výrazné prvky proudění kolem Ahmedova tělesa patří zejména zóna úplavu za autem, které dominuje dvojice vírů (C) odtrhávajících se od bočních hran v zadní oblasti tělesa, kde dochází ke zkosení geometrie. Taktéž lze pozorovat dva výrazné protichůdné víry v úplavu těsně za tělesem (A, B), které se za tělesem potkávají s opačnou vířivostí (anglicky „Vorticity“). Tyto prvky proudění za tělesem lze vidět v následující ilustraci z originálního článku na obr. 9. Tyto poznatky byly několikrát ověřeny jak experimentálně, tak pomocí simulací CFD.



Obr. 9 Virové struktury formující se za Ahmedovým tělesem [22]

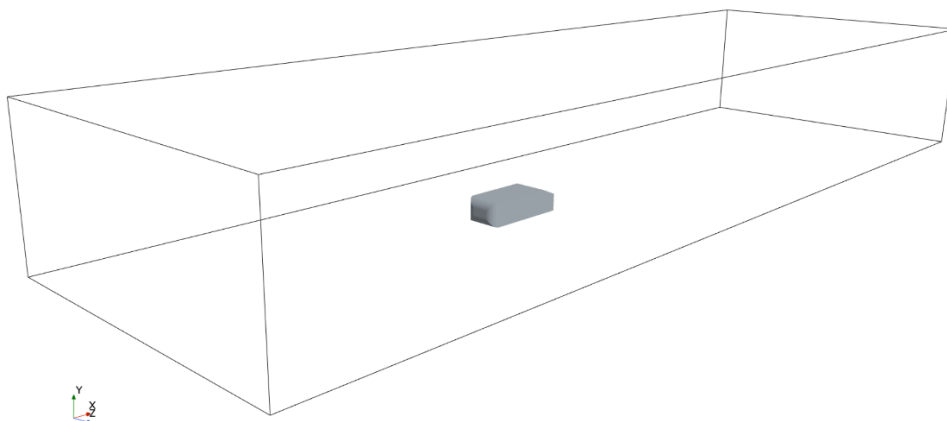
2.5.2 Tvorba výpočetní domény

Napříč výpočetní doménou jsou v pozdějších fázích tvorby modelu řešeny řídicí a dodatkové rovnice používané v CFD. Zahrnuje jak geometrii automobilu – Ahmedovo těleso, tak i v tomto případě vzduch kolem automobilu. Na základě několika studií byly rozměry velikosti výpočetní domény voleny v násobcích rozměrů upraveného Ahmedova tělesa následovně:

- Na délku 4 délky před a 7 délek za modelem
- Na šířku 10 šířek, přičemž model je umístěn ve středu
- Na výšku 6 výšek, přičemž model je umístěn 158 mm nad spodní stěnou výpočetní domény, na základě jízdní výšky elektromobilu Hyundai Kona 2020

Výsledná podoba výpočetní domény je viditelná na obr. 10.

Simcenter STAR-CCM+



Obr. 10 Výpočetní doména

2.5.3 Nastavení okrajových podmínek

Po nahrání geometrie vytvořené v programu SolidWorks do programu Star CCM+ ve formě regionu bylo nutné geometrii rozdělit na jednotlivé okrajové podmínky.

Pomocí funkce „Split by Angle“ byla geometrie rozdělena na následující okrajové podmínky, kterým byl přidělen typ okrajových podmínek následovně viz 2.2.4:

- Car – Wall: OP reprezentující geometrii Ahmedova tělesa
- Road – Wall: OP reprezentující vozovku
 - Předepsána tangenciální rychlost pohybu okrajové podmínky na $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ve směru osy x pro zabezpečení pohybové ekvivalence (vzduch a cesta mají stejnou rychlost)
- Inlet – Velocity Inlet: OP reprezentující vstup proudění do domény
 - Předepsána rychlost $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ na vstupu do výpočetní domény
- Outlet – Outlet: OP reprezentující výstup proudění z domény
 - Předepsán atmosférický tlak o hodnotě $101\,325 \text{ Pa}$ na výstupu z výpočetní domény
- Top – Symmetry plane: OP reprezentující horní stěnu výpočetní domény
- Right – Symmetry plane: OP reprezentující pravou stěnu výpočetní domény
- Left – Symmetry plane: OP reprezentující levou stěnu výpočetní domény

Na OP „Road“ bylo nutné předepsat i tangenciální rychlost ve směru osy x pro dosažení pohybové ekvivalence. V reálné situaci se totiž nepohybuje vzduch, ale automobil, který se relativně pohybuje i vzhledem k jízdnímu povrchu, to tedy znamená, že vzduch a cesta mají nulovou rychlost a automobil se vůči nim pohybuje. V simulaci není možné předepsat rychlost automobilu, bylo tedy nutné, aby se kromě média hýbala i OP „Road“. Při vyhodnocování výsledků je proto nutné tuto skutečnost brát v potaz.

2.5.4 Tvorba výpočetní sítě

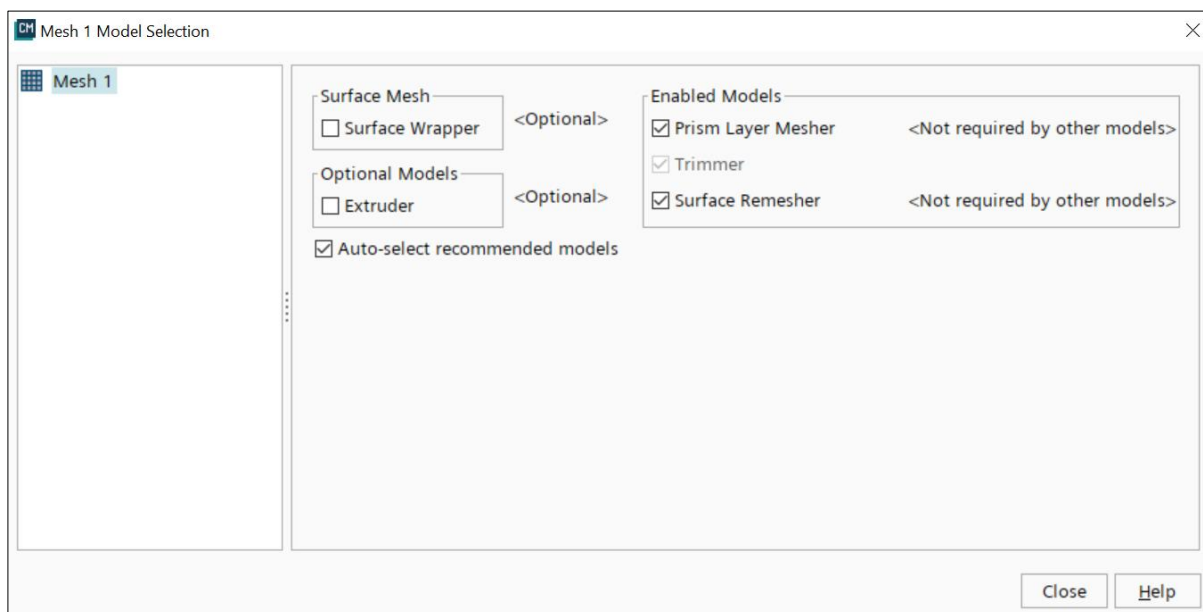
Tvorbu výpočetní sítě v programu Star CCM+ je možné realizovat pomocí dvou přístupů – „Region based“ a „Part based“. Po potřebu práce byla zvolena metoda „Region based“.

V obou případech se tvorba výpočetní sítě skládá ze dvou hlavních, na sebe navazujících kroků, jimiž jsou tvorba povrchové a následně tvorba objemové sítě, se kterou se pojí i tvorba výpočetní sítě v mezní vrstvě proudění viz 2.3.3.

Pro tvorbu povrchové sítě bylo nutné vybrat ve volbě síťovací modelů model „Surface Remesher“, který tento krok umožňuje. Povrchová síť byla vytvořena z trojúhelníků, které popisují povrch okrajových podmínek „Car“ a „Road“. Pro zachování charakteristických křivek geometrie automobilu bylo nutné použít funkci „Feature Curves“ na některých křivkách Ahmedova tělesa.

Následně byla vygenerována objemová síť typu „Trimmer“, skládající se z krychlí, které vyplňují výpočetní doménu. Jedná se o strukturovanou síť, kterou je vhodné využívat pro vnější usměrněné proudění [20].

Pro lepší popsání proudění v mezní vrstvě byla zvolena taktéž metoda, jež umožňuje zvláště modelovat výpočetní síť v blízkosti povrchů stanovených jako okrajová podmínka „Wall“. Při volbě síťovacích modelů byl navíc vybrán model „Prism Layer Mesher“, který toto modelování umožňuje. Volba modelů síťování v programu Star CCM+ je viditelná na obr. 11.



Obr. 11 Volba modelů výpočetní sítě

Pro snížení výpočetní náročnosti byla základní velikost objemových buněk zvolena vysoká na hodnotě 1 m. Tato hodnota však absolutně není vyhovující v blízkosti modelu automobilu. Pro dostatečně přesné popsání chování proudění bylo pomocí funkce „Volumetric Control“ využito tří vrstev lokálního zjemnění (v anglické literatuře „Wake Refinement“) výpočetní sítě v okolí automobilu následovně:

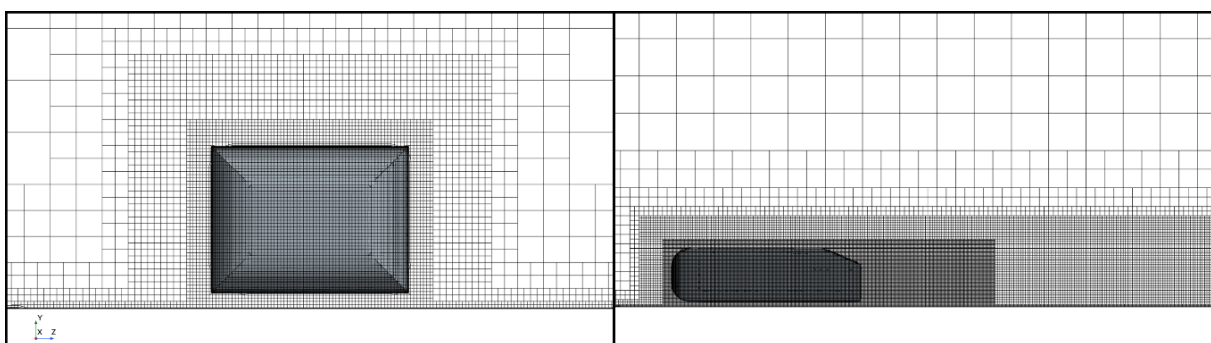
- Velká oblast – sahající přibližně až 4 délky auta za model, 50% velikost buněk oproti velikosti základní
- Středně velká oblast – sahající přibližně 2,5 délek auta za model, 10% velikost buněk oproti velikosti základní

- Malá oblast – v nejbližší blízkosti modelu automobilu, sahající přibližně 0,5 délky auta za model, 5% velikost buněk oproti velikosti základní

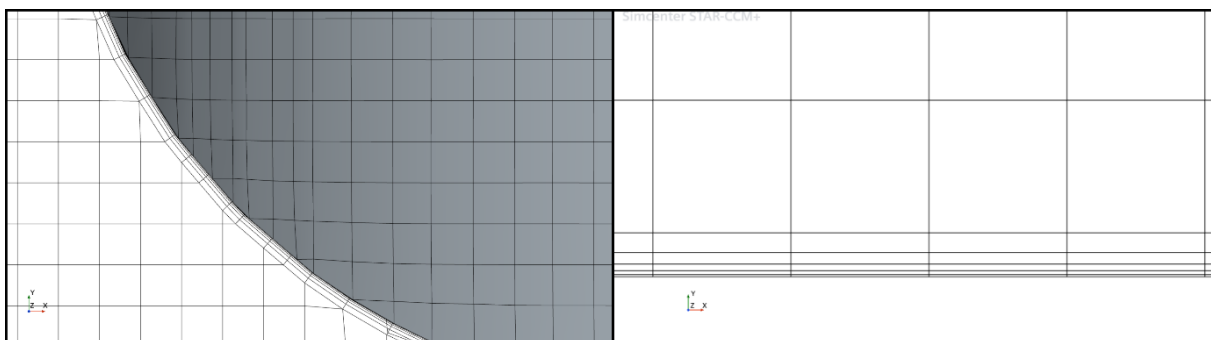
Pro síťování mezní vrstvy bylo nastaveno 5 vrstev prismatických buněk. Celková tloušťka mezní vrstvy byla nastavena na 3 % základní velikosti objemové vrstvy, tedy na 30 mm. Tloušťka první vrstvy, tedy té nacházející se v přímém kontaktu s okrajovou podmínkou typu „Wall“ byla nastavena na hodnotu 1 mm.

V okolí hran upraveného Ahmedova tělesa bylo využito lokálního zjemnění síťování mezní vrstvy pomocí funkce „Volumetric control“ pro dokonalejší popsání proudění v mezní vrstvě.

Výsledná výpočetní síť čítá 3 086 666 objemových buněk a její podoba je viditelná na obr. 12. Detail síťování mezní vrstvy lze vidět na obr. 13.



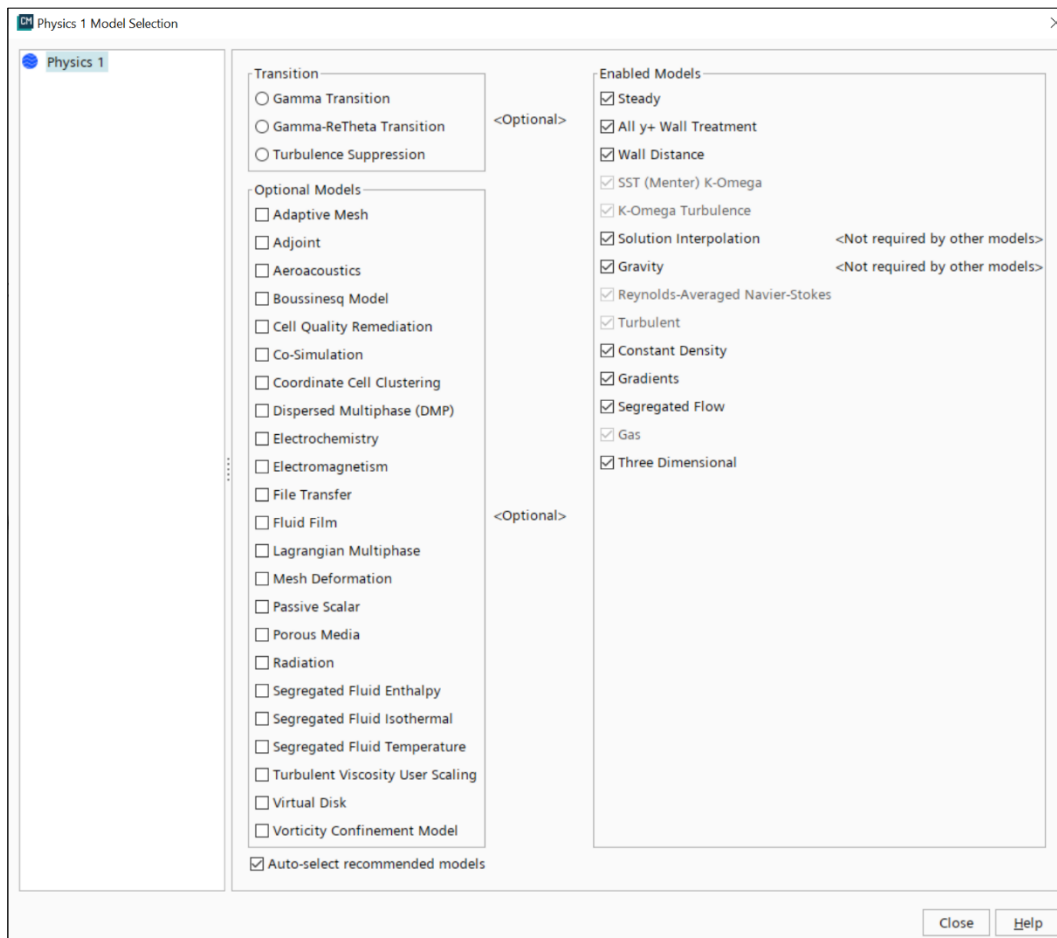
Obr. 12 Výpočetní síť



Obr. 13 Detail prizmatické sítě mezní vrstvy

2.5.5 Volba fyzikálních modelů

Aby bylo možno modelovat proudění kolem upraveného Ahmedova tělesa, bylo nutné vybrat fyzikální modely, na základě, kterých budou sestavovány řídicí a doplňkové rovnice proudění. Podrobná volba fyzikálních modelů je k vidění na obr. 14.



Obr. 14 Volba fyzikálních modelů

Proudění je modelováno jako proudění nestlačitelného plynu s parametry vzduchu v trojrozměrném prostoru. Model „Steady“, tedy model ustáleného proudění byl vybrán z důvodu zjednodušení modelu a snížení výpočetní náročnosti, navzdory faktu, že proudění kolem automobilů je neustálené. Pro řešení turbulencí byla zvolena metoda „RANS“, z důvodu přijatelné výpočetní náročnosti v porovnání s ostatními metodami jako například „LES“, které jsou pro výpočetní techniku, která byla k dispozici pro účely závěrečné práce, příliš náročné. Jako model turbulencí byl po konzultaci s vedoucím práce zvolen model „k- ω “. Jeho výhodou oproti modelu „k- ϵ “ je možnost lepšího popsání proudění v oblasti mezní vrstvy [20]. Pro řešení proudění v mezní vrstvě byl zvolen model „All y+ Wall Treatment“, který je vývojářem doporučovaný jako nejuniverzálnější a vhodný pro téměř všechny případy proudění [20]. Následně byla spuštěna simulace.

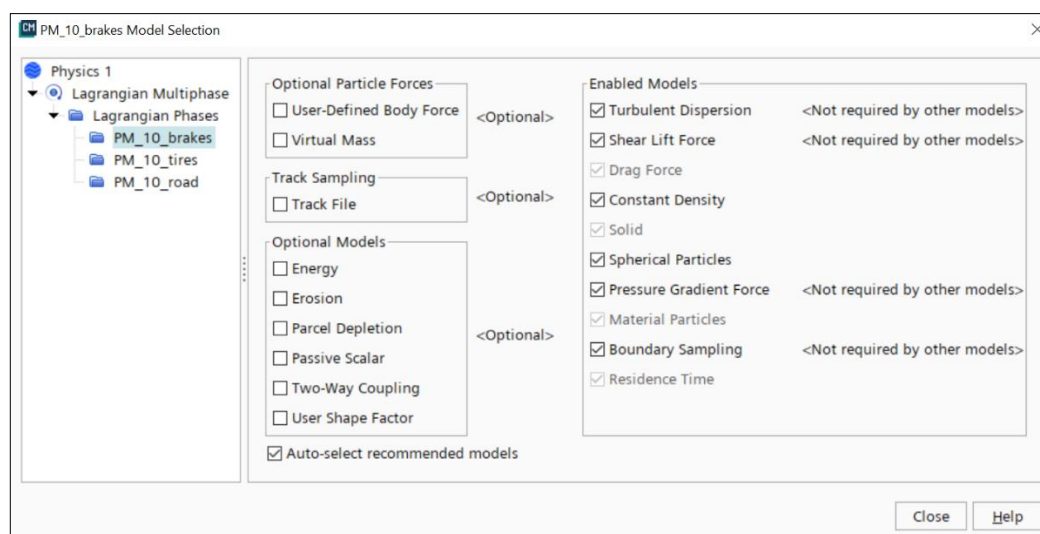
2.5.6 Nastavení pevných fází

Pro možnost řešení problematiky spojené s pevnými částicemi bylo nutné ve výběru fyzikálních modelů vybrat doplňkový model „Lagrangian Multiphase“. Tento model umožňuje sledovat chování jiné fáze, v případě této práce pevných částic, pomocí Lagrangeova přístupu.

Lagrangeův přístup je jeden ze dvou přístupů vyhodnocování proudění, druhým přístupem je Eulerův přístup [17]. Langrangeův přístup sleduje polohu, rychlost a zrychlení vybrané částice v čase, zatímco Eulerův přístup využívá kontrolních objemů, do kterých vtéká a vytéká tekutina a ve kterých sleduje její chování [21].

Při modelování vícefázových případů proudění lze taktéž využít dvou přístupů. Metoda Euler–Euler je používána v případech, kdy podíl druhé fáze v proudění není zanedbatelně malý, nebo v případech, kdy dochází vícefázovému proudění dvou a více tekutin. Pokud je podíl další fáze poměrně malý, nebo se jedná o pevnou fázi, je možné využít metody Euler–Lagrange, při které je další fáze vpouštěna do domény jako konečné množství částic, kterým jsou následně, na základě předpočítaných hodnot proudění, určeny veličiny jako rychlost nebo například trajektorie [18]. Pro potřeby práce byla zvolena právě metoda Euler–Lagrange.

Následně byly nadefinovány tři Lagrangeovské fáze reprezentující částice generované opotřebením brzd, pneumatik a jízdního povrchu. Pro tyto fáze byly zvoleny fyzikální modely viz obr. 15.



Obr. 15 Volba modelů fází

Nadefinované fáze byly zvoleny jako materiálové částice, aby bylo umožněno pracovat s různými hustotami náležícími fázím, které jsou konstantní. Model kulových částic byl zvolen, protože velikosti fází částic jsou definovány na základě aerodynamického průměru, který pracuje právě s kulovými částicemi. Na částice působí síly jak odporové, tak síly související se vztlakem vycházejícím ze smykových napětí. Doplnkový model „Boundary Sampling“ umožňuje sledovat místa, kde se částice zachytí na povrchu okrajové podmínky typu „Wall“, nebo kde opustí výpočetní doménu. Z důvodu užívání metody „RANS“ pro modelování proudění, který průměruje hodnoty proudění, byl zvolen doplnkový model „Turbulent Dispersion“, který do určité míry nahrazuje turbulence a stará se o rozptýlení unášených částic. Tři jednotlivé fáze byly navoleny následovně:

- PM_10_brakes – kulové, pevné částice, o konstantní hustotě $2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (po konzultaci s vedoucím práce, hodnotu je obtížné stanovit kvůli velkému množství materiálů používaných k výrobě brzdových destiček, taktéž je nutno brát v potaz kombinaci opotřebením brzdových destiček i disků zároveň)
- PM_10_tires – kulové, pevné částice, o konstantní hustotě $1,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ [24][25]
- PM_10_road – kulové, pevné částice, o konstantní hustotě $2,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ [24]

Každé fázi bylo nastaveno kompozitní chování při interakci s okrajovou podmínkou „Wall“ – tedy při kontaktu s OP může dojít buď k odražení od povrchu, nebo k zachycení k povrchu. O zachycení či odražení bylo rozhodováno na základě smykových napětí na povrchu OP.

2.5.7 Nastavení zdrojů pevných částic

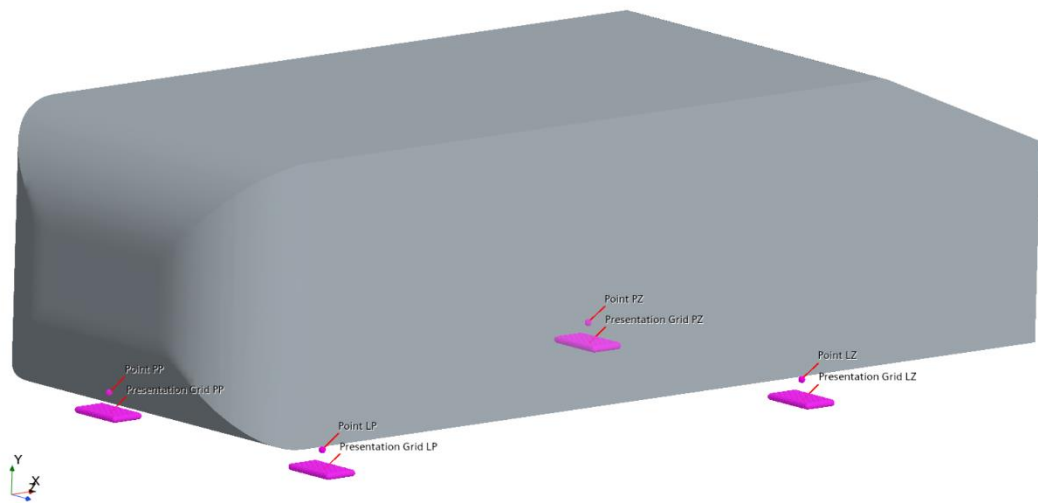
Každá skupina pevných částic má charakteristický zdroj, dále také jako injektor. Každý z těchto zdrojů má definovanou polohu a parametry s jakými uvolňuje částice. Pro nastavení zmíněných zdrojů bylo využito funkce „Injector“.

Pro každou fázi byl nadefinován vlastní injektor, kterému byly přiděleny oblasti, ze kterých bude částice vypouštět, průměr vypouštěných částic a hmotnostní průtok vypouštěných částic. Hmotnostní průtoky částic byly stanoveny na základě dat dodaných vedoucím práce, vycházejících z výzkumu korejských vědců z Daejeonu a Soulu [3]. Injektory byly nastaveny následovně:

- Injector_brakes – zdroj reprezentující opotřebení brzd v oblasti brzd automobilu
 - Průměr částic: 10 μm
 - Hmotnostní průtok: $4,979 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, hodnota odpovídající brždění o zrychlení $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
 - Oblasti: Point PP, Point PZ, Point LP, Point LZ
- Injector_tires – zdroj reprezentující opotřebení pneumatik v oblasti kontaktu pneumatik a jízdního povrchu
 - Průměr částic: 10 μm
 - Hmotnostní průtok: $1,464506173 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, hodnota odpovídající jízdě o rychlosti $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
 - Oblasti: Presentation Grid PP, Presentation Grid PZ, Presentation Grid LP, Presentation Grid LZ, všechny mřížky jsou umístěny 2 mm nad OP „Road“
- Injector_road – zdroj reprezentující opotřebení vozovky v oblasti kontaktu pneumatik a jízdního povrchu
 - Průměr částic: 10 μm
 - Hmotnostní průtok: $1,967592593 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, hodnota odpovídající jízdě o rychlosti $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
 - Oblasti: Presentation Grid PP, Presentation Grid PZ, Presentation Grid LP, Presentation Grid LZ, všechny mřížky jsou umístěny 2 mm nad OP „Road“

Polohy injektorů byly zvoleny viz obr. 16.

Simcenter STAR-CCM+



Obr. 16 Pozice injektorů

Z důvodu velkého množství vypouštěných částic bylo taktéž nutné předepsat každému z injektorů hodnotu tzv. „Parcel Streams“. Tato funkce z důvodu zmírnění výpočetní náročnosti sjednotí předepsaný počet částic do předepsaného počtu „balíčků“ a považuje je za společný celek s vlastnostmi jedné částice. Celkový počet „Parcel Streams“ byl předepsána na 300 000 a byl rovnoměrně rozdělen mezi 3 druhy injektorů.

3 Výsledky

3.1 Proudění

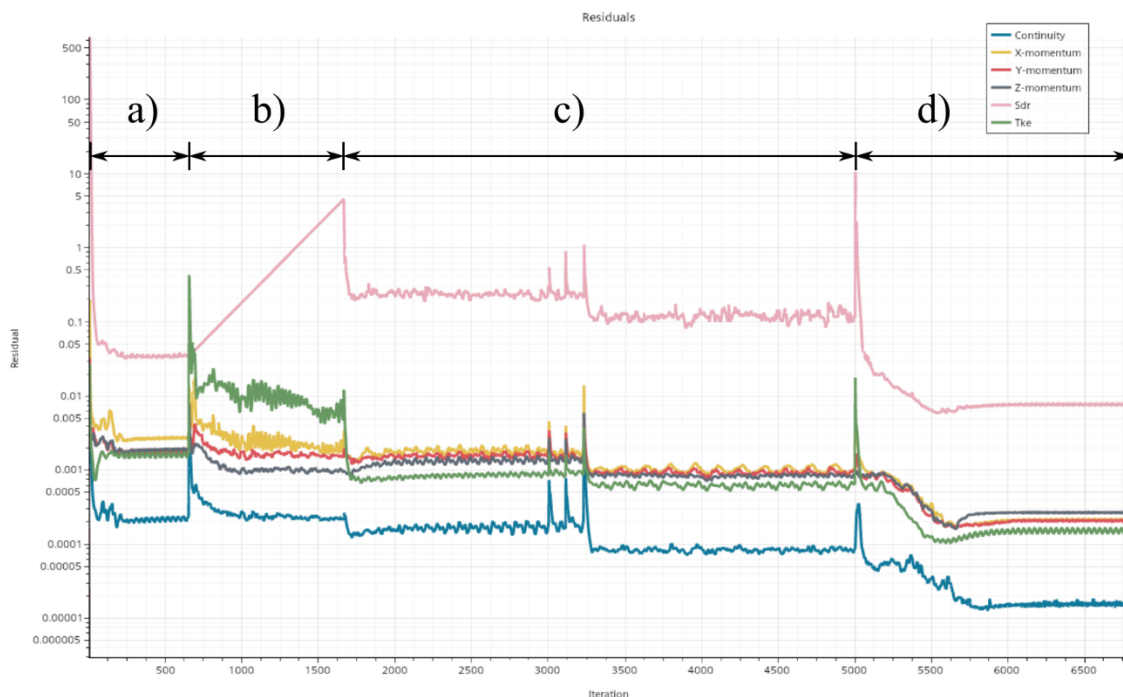
Výsledky uváděné v této podkapitole se týkají zjednodušeného modelu proudění o rychlosti $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ s pohyblivou okrajovou podmínkou „Road“ typu „Wall“ podél upraveného Ahmedova tělesa.

3.1.1 Konvergence

Konvergence při procesech numerických simulací ukazuje, jak stabilní je řešení systému řešených rovnic. U iterativních procesů tak ukazuje chybovost mezi výsledky jednotlivých iterací [18]. O konvergenci bylo rozhodováno na základě sledování hodnot reziduí, počítaných a vykreslovaných programem.

Pro každou diskretizovanou rovnici jsou tato rezidua sledována. Rezidua implikují, zdali řešení má spíše trend konvergence či divergence [18]. Řešení je pak považováno za dostatečně přesné, nepřesahují-li rezidua předem určené hodnoty.

V grafu na obr. 17 je možno sledovat průběh hodnot jednotlivých reziduí v závislosti na počtu iterací. Jsou zde patrné čtyři oblasti. Oblast a) popisuje hodnoty reziduí při prvotním nastavení simulace, využívající model turbulencí $k-\omega$. V oblasti b) došlo k přenastavení modelu turbulence na $k-\varepsilon$. V oblasti c) byl opět zvolen model $k-\omega$, přičemž výrazné špičky souvisí se změnami síťování mezní vrstvy. Na začátku oblasti d) byla předepsána rychlost pohybu okrajové podmínky $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ na OP „Road“, poté bylo spočítáno přibližně 2000 iterací. Níže na obr. 17 je možno vidět hodnoty, na kterých došlo k ustálení jednotlivých reziduí.

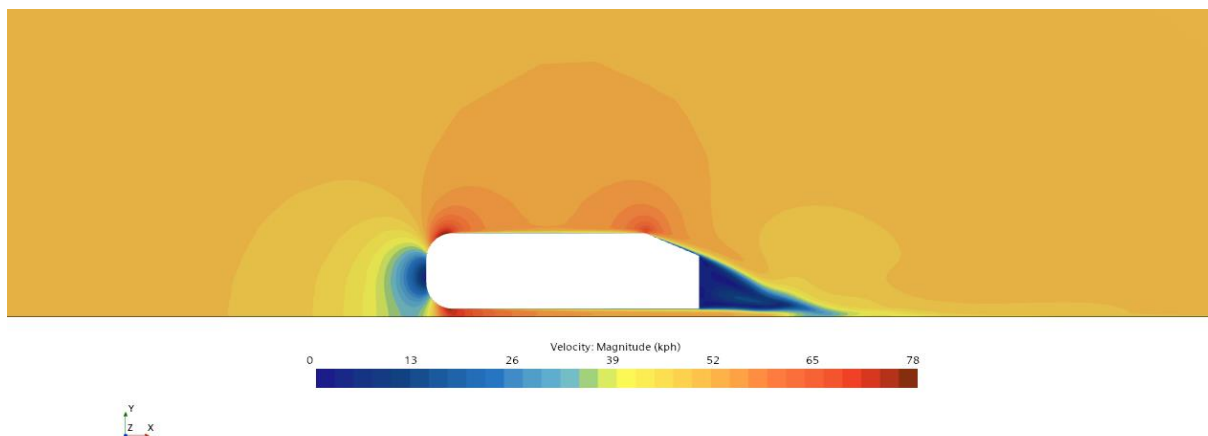


Obr. 17 Rezidua

3.1.2 Rychlostní pole

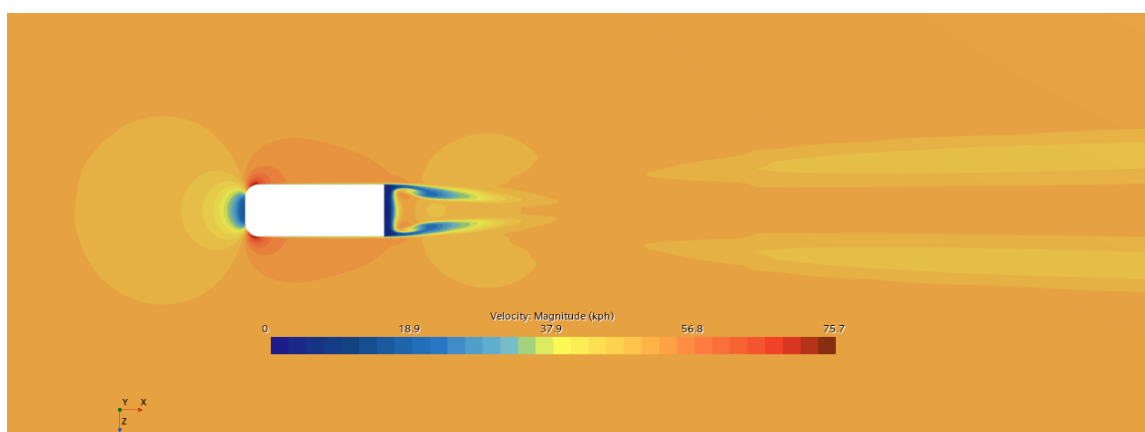
Výsledky ukazují oblast úplavu za Ahmedovým tělesem, ve kterém je zjevné snížení rychlosti proudění související se vznikem vírů vznikajících spojením dvou proudů (proudy nad a pod modelem) viz obr. 18. Proudění je zpomaleno taktéž v oblasti těsně před modelem.

Zjevná je také oblast urychleného proudění pod automobilem. Vzduch je tam naháněn do malé oblasti a v zájmu dodržení kontinuity je proudění urychleno.



Obr. 18 Rychlostní pole proudění v podélné rovině

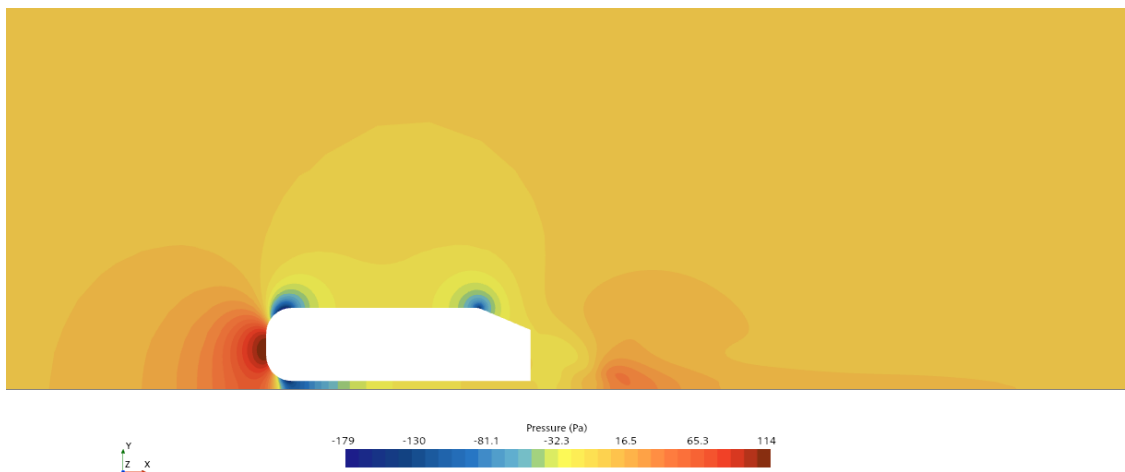
V obr. 19 je možné pozorovat dvě výrazné oblasti zpomaleného proudění za automobilem, implikující vznik vírů odtrhávajících se od hran modelu podobně, jak je možno vidět v obr. 9 z originálního článku o Ahmedově tělese [22].



Obr. 19 Rychlostní pole proudění ve vodorovné rovině 1 m nad vozovkou

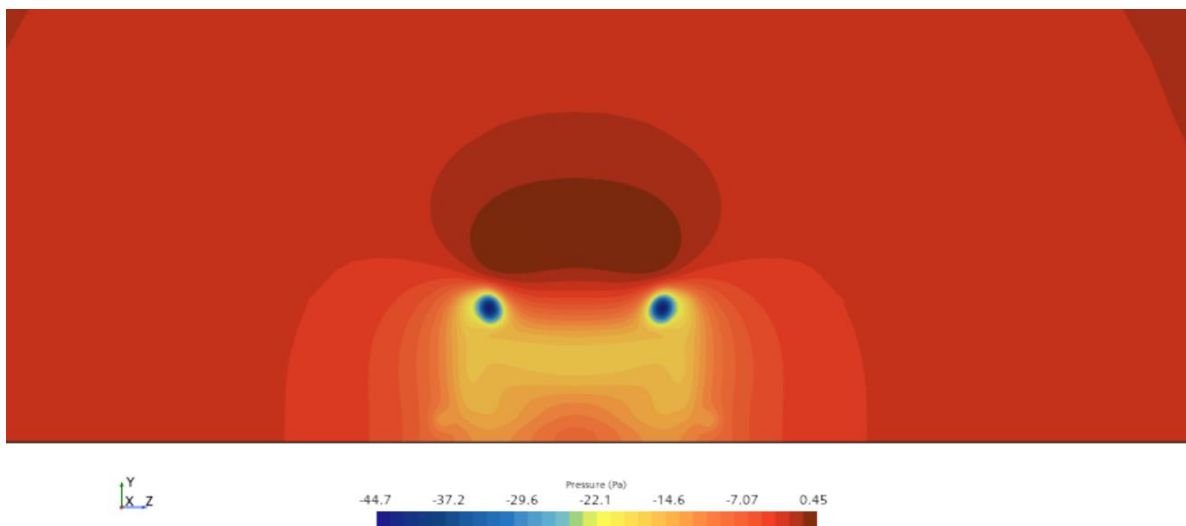
3.1.3 Tlakové pole

Tlakové pole úzce souvisí s polem rychlostním. V oblastech, kde je možné sledovat zvýšenou rychlost proudění, můžeme očekávat snížení tlaku. To je taktéž očekáváno v oblastech předpokládaných vzniků vírů. Před automobilem se nachází oblast vysokého tlaku, souvisejícím s interakcí proudící tekutiny s modelem automobilu. Těsně za automobilem je možné sledovat oblast sníženého tlaku, která je způsobena víry vznikajícími těsně za tělesem viz obr. 20. Tyto dva tlakové extrémny hrají hlavní roli ve vzniku odporové tlakové síly působící na těleso. Rovněž je zřetelná oblast nízkého tlaku pod podlahou v přední části tělesa. Dochází zde k tzv. Bernoulliho jevu z důvodu urychlení proudění v dané oblasti.



Obr. 20 Tlakové pole proudění v podélné rovině

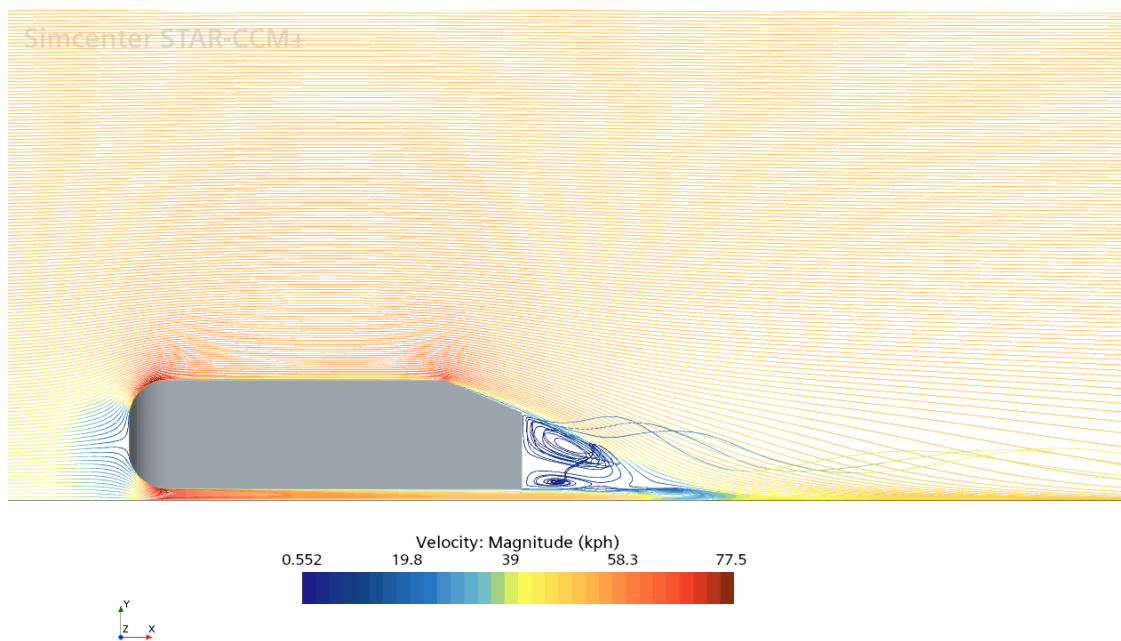
Taktéž mohou být pozorovány dvě kruhové oblasti nízkého tlaku za automobilem, které úzce souvisí s již zmíněnou dvojicí vírů tvořících se v zadní části automobilu na ostrých hranách viz obr. 21.



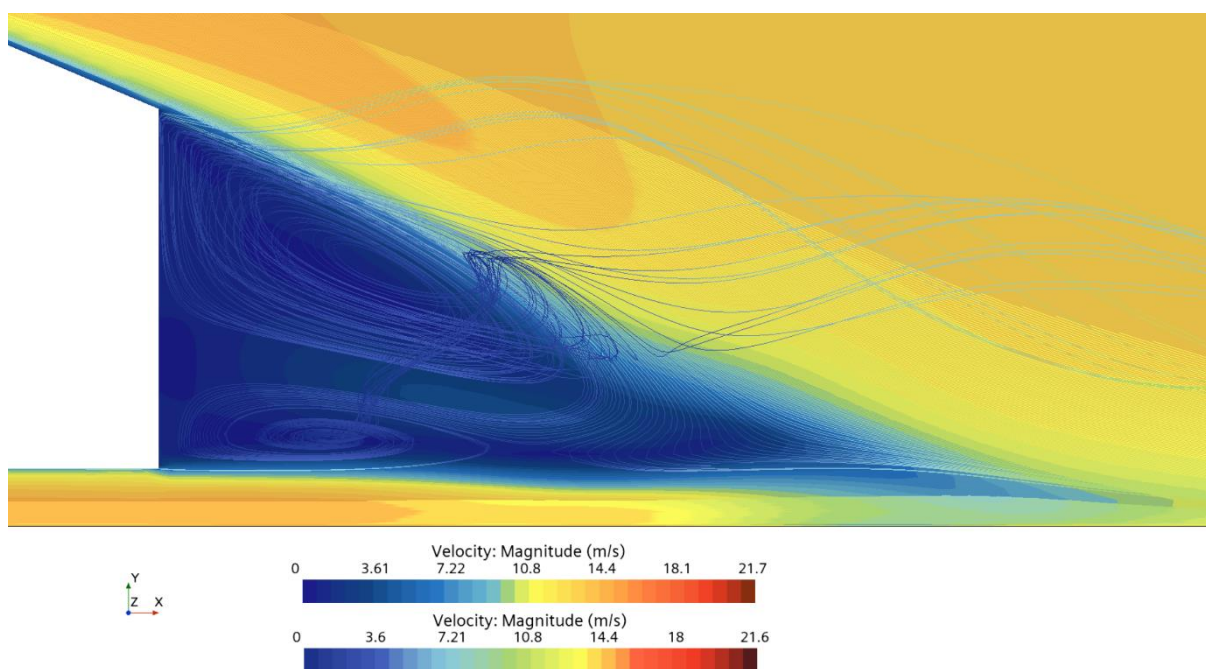
Obr. 21 Tlakové pole v příčné rovině ve vzdálenosti 0,75 m za Ahmedovým tělesem

3.1.4 Vírové struktury

Za modelem Ahmedova tělesa bylo možné sledovat vznik několika vírových struktur, které byly implikované už v kapitolách 3.1.2 a 3.1.3. První skupinou byla dvojice protichůdných vírů tvořících se v oblasti úplavu těsně za modelem viz obr. 22. Jejich detail je vyobrazen na obr. 23. Tyto víry jsou také zřetelně viditelné jako víry A a B v obr. 9.

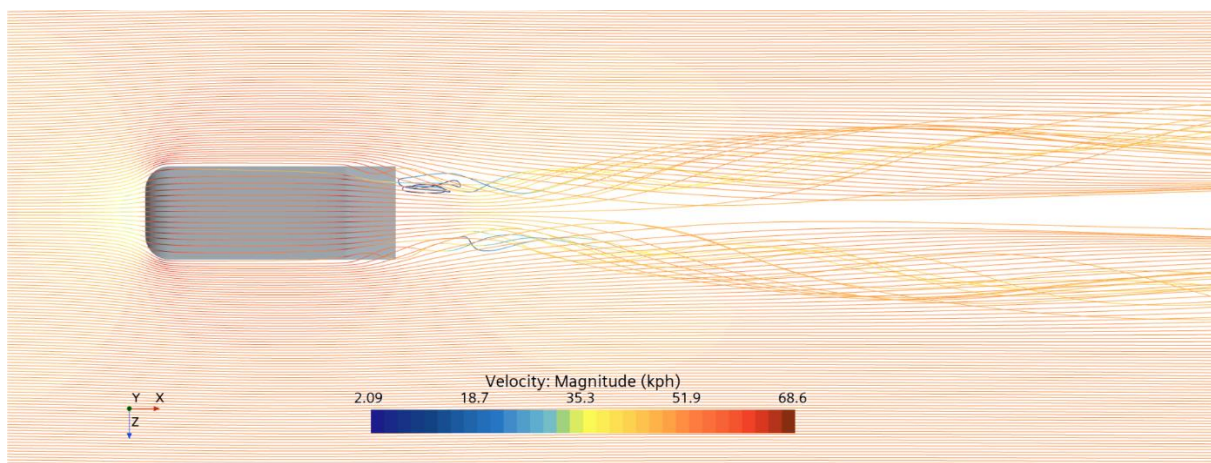


Obr. 22 Proudnice v podélné rovině



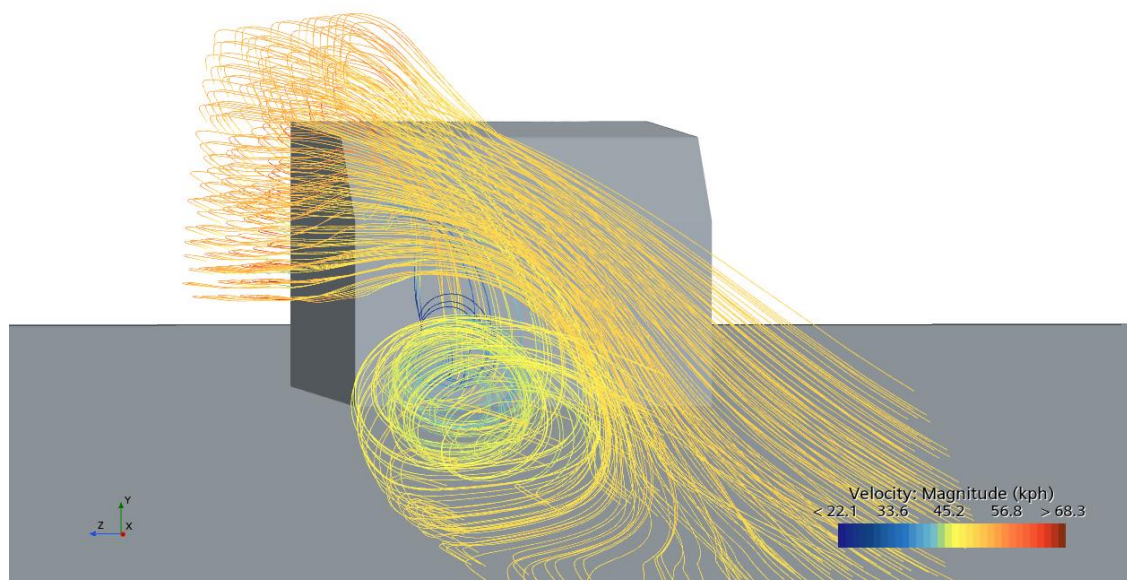
Obr. 23 Detail vírových struktur v úplavu těsně za Ahmedovým tělesem

Dalšími výraznými víry, je dvojice vírů odtrhávající se od bočních horních hran Ahmedova tělesa, viditelné v obr. 24, obr. 25 a v obr. 26. Tyto víry byly taktéž implikovány již obr. 19 a obr. 21. Víry se táhnou do velkých vzdáleností za automobilem, respektive je-li uvažována pohybová ekvivalence, po dlouhou dobu zůstávají přítomné v ovzduší u místa uvolnění, zatímco se vozidlo vzdaluje.



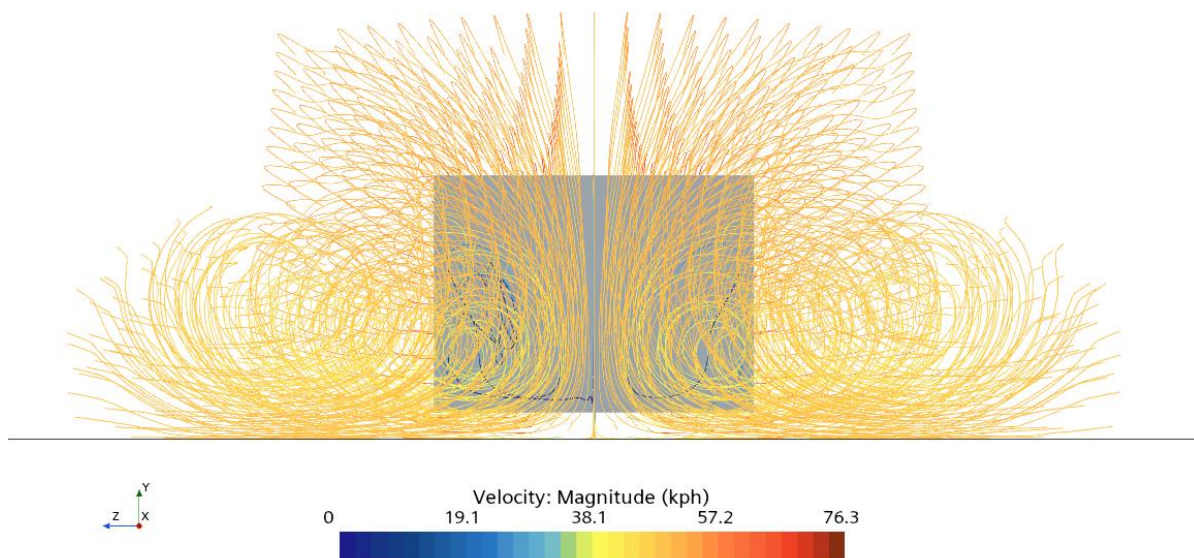
Obr. 24 Proudnicve ve vodorovné rovině 1 m nad vozovkou

Simcenter STAR-CCM+



Obr. 25 Proudnicve popisující vznik víru za hranou Ahmedova tělesa

Simcenter STAR-CCM+



Obr. 26 Pohled zezadu na Ahmedovo těleso popisující vírové struktury odtržené od hran modelu

3.1.5 Validace

Na každé těleso umístěné do proudící tekutiny působí odporová síla. Tato síla má dvě složky. Složku tlakovou, která vzniká rozdílem tlaků před a za obtékaným tělesem, a složku třecí, vznikající v důsledku viskozity proudící tekutiny. Ve většině případů uživatele zajímá celková odporová síla, která je součtem dvou zmíněných složek.

Každému tělesu takto vystavenému vnějšímu proudění může být přiřazen koeficient odporu C_D , který může být zjištěn následujícím vztahem:

$$C_D = \frac{F_D}{A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}} \quad (5)$$

kde F_D je celková odporová síla, A je čelní plocha obtékaného tělesa, ρ je hustota proudící tekutiny a v je rychlost proudění [17].

Obecně platí, že velikost koeficientu odporu závisí na Reynoldsově čísle u proudění s hodnotou Reynoldsova čísla nižší než $Re = 10^4$. U proudění s vyšším Reynoldsovým číslem zůstávají hodnoty koeficientu odporu téměř konstantní [17].

Při práci v programu Star CCM+ není možné získat hodnotu koeficientu odporu přímo pomocí jedné funkce, ale je nutné ji dopočítat pomocí Rovnice (5). Hodnotu celkové odporové síly a čelní plochy tělesa lze zjistit pomocí funkce „Report“.

Konkrétní hodnoty pro simulaci k závěrečné práci:

- Celková odporová síla: $F_D \doteq 75,616062 \text{ N}$
- Čelní plocha modelu: $A \doteq 2,636358 \text{ m}^2$

- Hustota tekutiny: $\rho = 1,18415 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Rychlost proudění: $v = 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 13,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Výsledná hodnota koeficientu odporu je $C_D \doteq 0,2511$. To je v porovnání se studiemi, které uvádí hodnoty C_D kolem 0,28 až 0,29 [22][26][27] nižší. Před předepsáním tangenciální rychlosti na OP „Road“ však vycházel koeficient odporu blíže hodnotám ze zmíněných studií na hodnotě $C_D \doteq 0,3014$, je tedy zjevné že předepsáním pohybu okrajové podmínky došlo k ovlivnění odporové síly. Tlaková složka celkové odporové síly je přibližně 4,5krát vyšší než složka třecí.

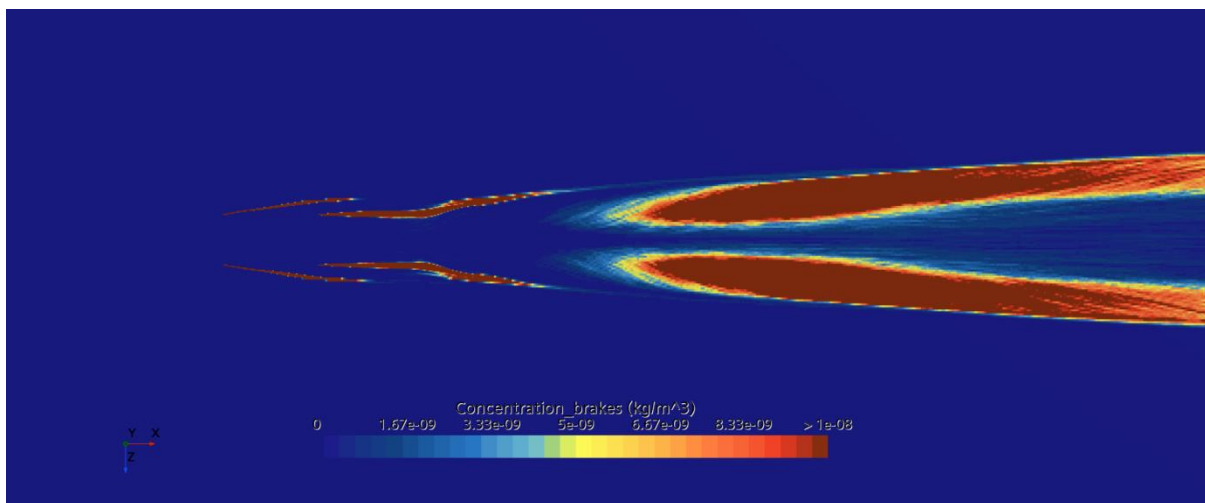
3.2 Částice

Hlavními výstupy z modelu rozptylu znečištění tuhými částicemi, jsou koncentrační pole pro každý druh částic a následné sledování míst, kde dojde k zachycení reprezentací částic na OP „Road“, nebo míst kde dojde k opuštění reprezentací částic z výpočetní domény.

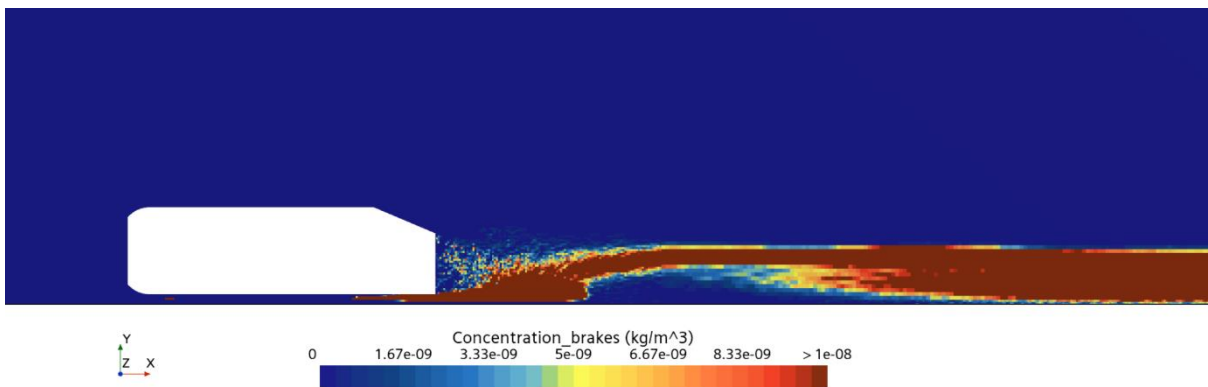
3.2.1 Částice vzniklé opotřebením brzd

Částice charakterizující opotřebení brzd byly vypouštěny ze 4 bodů ve výšce 10 cm nad zemí. Díky poloze zdrojů, které nejsou těsně nad zemí je možné vidět, že částice jsou výrazně ovlivněny prouděním a vzniklými vírovými strukturami (vír typu C na obr. 9). Většina brzdných emisí je tedy unášena vírovými strukturami až do značných vzdáleností za autem. To je vidět na obr. 27 a obr. 28, které zobrazují pole koncentrací ve dvou různých rovinách. Na obr. 29 jsou vidět buňky výpočetní sítě s koncentrací brzdných částic vyšší než $5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, doplněné o proudnice šedé barvy vizualizující vír vznikající za Ahmedovým tělesem. Je zde jasně zřetelné, že tyto buňky se nachází právě v oblasti zmíněných vírů. Taktéž je vidět, že částice vypouštěné v oblasti předních brzd jsou prouděním téměř okamžitě vytaženy na stranu zpod auta, na rozdíl od částic uvolněných v oblasti zadních brzd, které jsou po celou dobu unášeny pod autem.

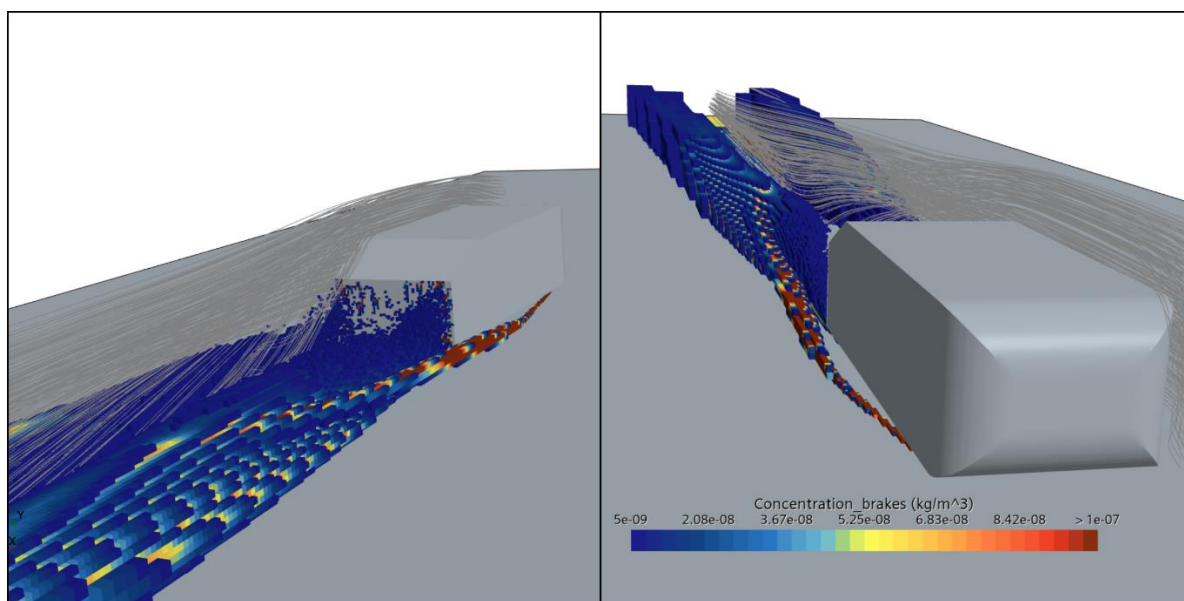
Nejvyšší hodnoty koncentrace brzdných částic ve vzduchu můžeme pozorovat pochopitelně těsně za injektory, v úplavu za elektromobilem se nejvyšší koncentrace nacházejí právě v oblasti již zmíněných vírů.



Obr. 27 Koncentrační pole brzdných částic ve vodorovné rovině 10 cm nad vozovkou

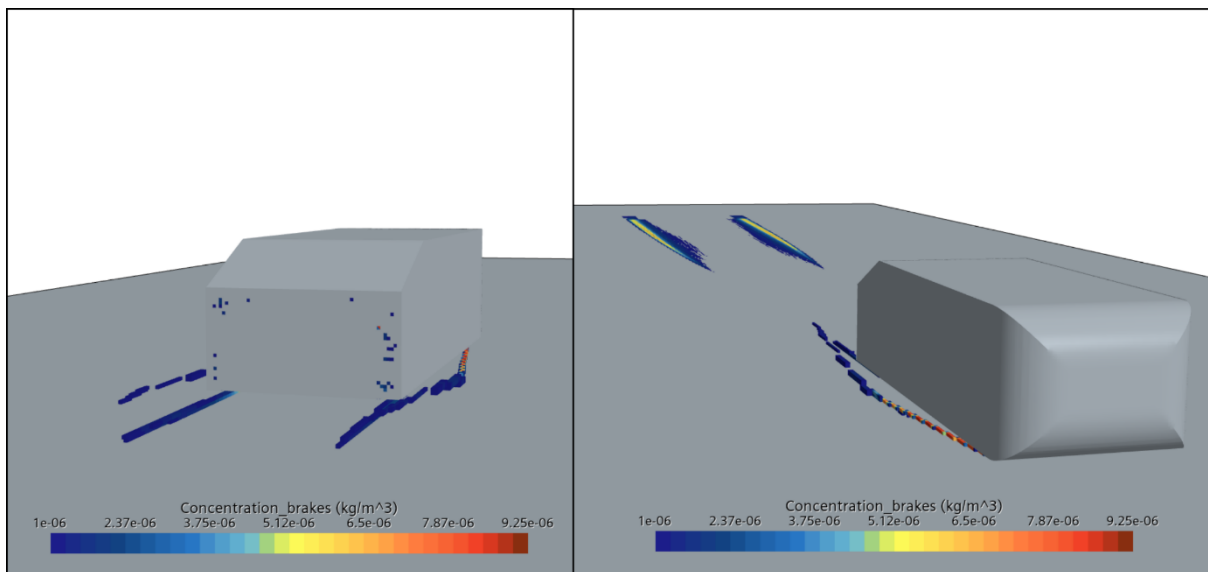


Obr. 28 Koncentrační pole brzdných částic v podélné rovině procházející levými brzdami



Obr. 29 Oblasti s vysokou koncentrací částic uvolněných z oblasti brzd

V místech v blízkosti bodů reprezentujících brzdy, byly zjištěny hodnoty koncentrace v řádu jednotek $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ viz Obr. 30. To odpovídá měření vědců z univerzity v Kalifornii ve Spojených Státech [13]. Je také zřetelné, že dochází k rychlému rozptýlení těchto částic do blízkého okolí.

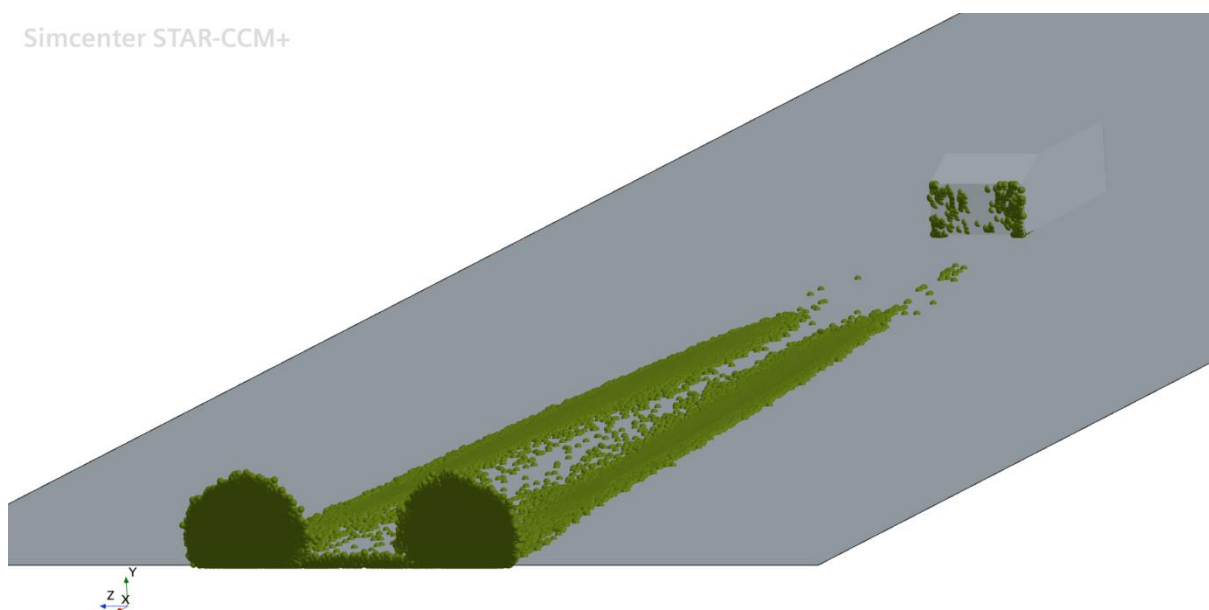


Obr. 30 Oblasti s koncentrací vyšší než $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$

Pro možnost sledování míst, kde dojde k usazení částic na povrchu OP, nebo k opuštění domény byl využit doplňkový model „Boundary sampling“. Zelené body na obr. 31 ukazují právě tato místa. Částice zachytávající se v doméně na OP „Road“, se začínají zachytávat až přibližně 1,5 délky modelu za vozidlem. Pod vozidlem nedochází k zachytávání částic na vozovce. To může být způsobeno polohou injektorů, které nejsou v těsné blízkosti země, jako je tomu u injektorů částic od pneumatik a opotřebení jízdního povrchu. Tomu taktéž napomáhá fakt, že je v oblasti pod automobilem urychleno proudění viz obr. 18. Část částic se taktéž zachytává přímo na zadní stěně automobilu, to z důvodu působení vírových struktur v úplavu těsně za Ahmedovým tělesem viditelných na obr. 23.

Taktéž je odtud možné sledovat míru, do jaké jsou částice prouděním unášeny do stran od elektromobilu. V oblasti OP „Outlet“ je již proudění za automobilem opět usměrněno téměř rovnoběžně s okolním prouděním, jak je vidět na obr. 24. Díky tomu lze změřit vzdálenosti do stran od vozidla, do kterých mohou být částice unášeny. Takto unášené částice mohou být zaneseny až do vzdálenosti přibližně 2,5 m do strany. To může znamenat že ve městech v oblastech, kde je například chodník hned vedle silnice může dojít k interakci těchto částic s člověkem a může dojít k jejich vdechnutí. Tento problém by mohl být částečně omezen například travnatým pásem mezi chodníkem a silnicí, díky kterému by byla vzdálenost mezi projíždějícími automobily a chodci vyšší.

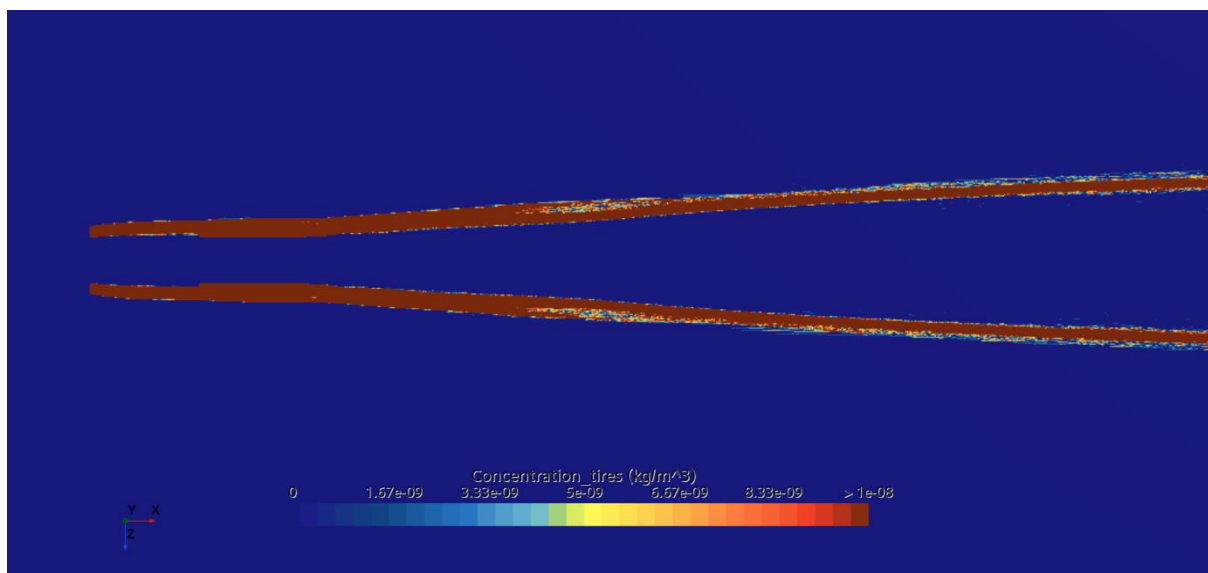
Ze značného počtu částic opouštějících doménu je taktéž možné sledovat přibližnou výšku, do které tyto částice vlivem proudění můžou vystoupat. Maximální výška opuštění domény je přibližně 1,8 m.



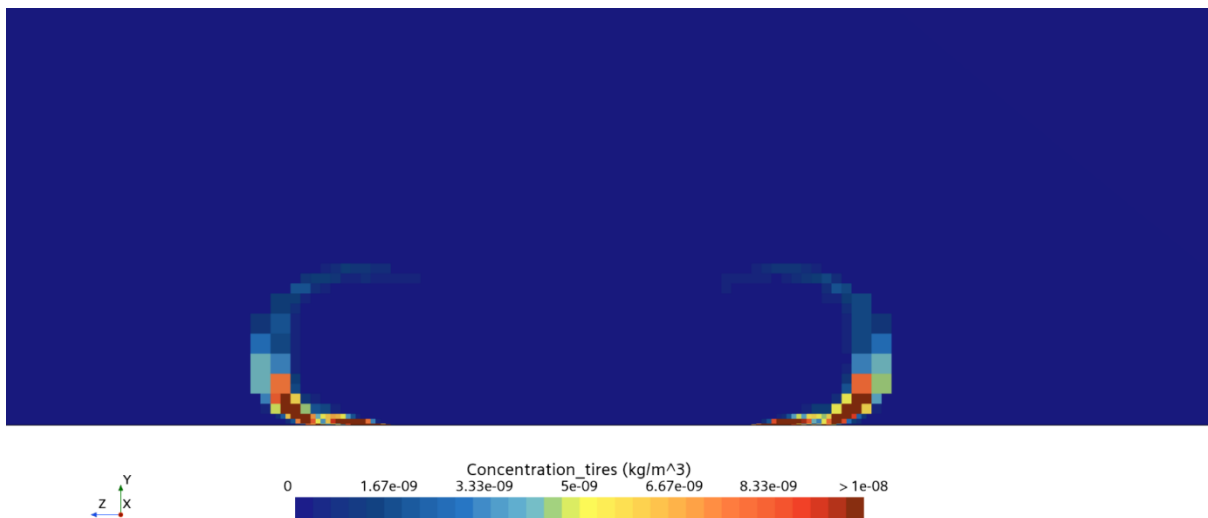
Obr. 31 Interakce brzdných částic s okrajovými podmínkami

3.2.2 Částice vzniklé opotřebením pneumatik

Zdrojem vypouštěných částic byly 4 mřížky viditelné na obr. 16 ve výšce 2 mm nad povrchem cesty, v oblastech reprezentujících kontakt pneumatiky a jízdního povrchu. Na obr. 32 je vidět, že částice jsou unášeny již zmíněnými víry typu C. Z důvodu polohy injektorů těsně nad povrchem cesty je na obr. 33 vidět, že koncentrace částic je nejvyšší v blízkosti jízdního povrchu. Taktéž je v něm jasně vidět ovlivnění víry, vznikajícími za Ahmedovým tělesem.

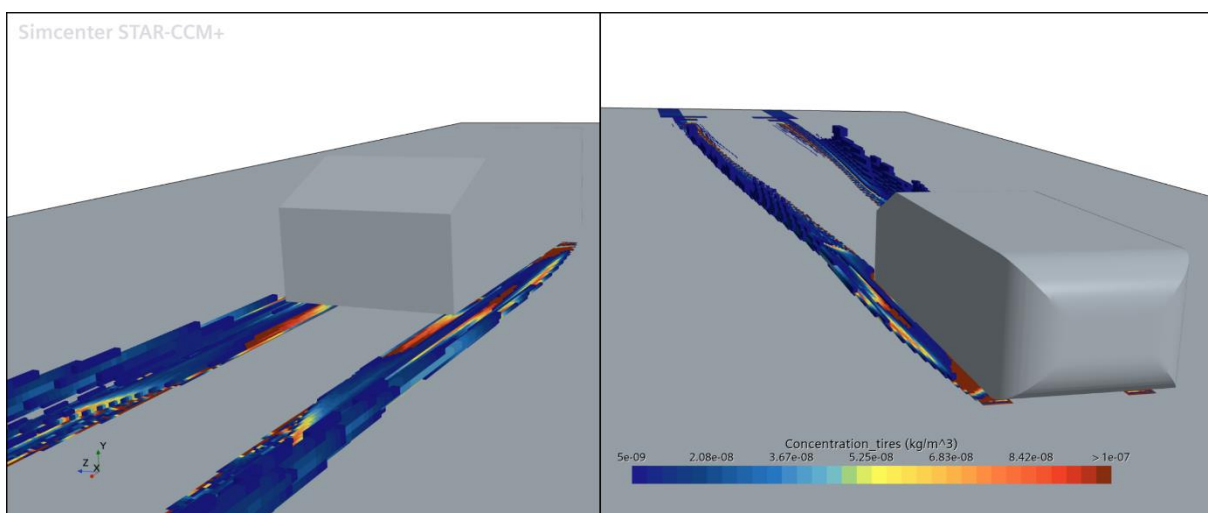


Obr. 32 Koncentrační pole částic vzniklých opotřebením pneumatik ve vodorovné rovině 2 mm nad vozovkou



Obr. 33 Koncentrační pole částic vzniklých opotřebením pneumatik v příčné rovině přibližně 5 m za automobilem

To je způsobeno odlišným prouděním v blízkosti povrchu, které je vyvozeno díky podmínce ulpívání viz 2.3.3, která předepisuje nulovou relativní tangenciální složku rychlosti proudění vzhledem k OP typu „Wall“. Na vypouštěné částice tedy působí proudění o malé rychlosti a ovlivnění vírovými strukturami za Ahmedovým tělesem taktéž není tak výrazné, ale je stále zřejmé. To ovlivňuje i koncentraci v prostoru. Nejvyšší koncentraci lze opět pozorovat v oblasti injektorů, nebo v oblastech výskytu vírových struktur v blízkosti vozovky. Je taktéž zřejmé, že díky menšímu vlivu vírových struktur nejsou částice unášeny do takových vzdáleností, jako například brzdné částice. Buňky výpočetní sítě s koncentrací vyšší než $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ je možné vidět na obr. 34.

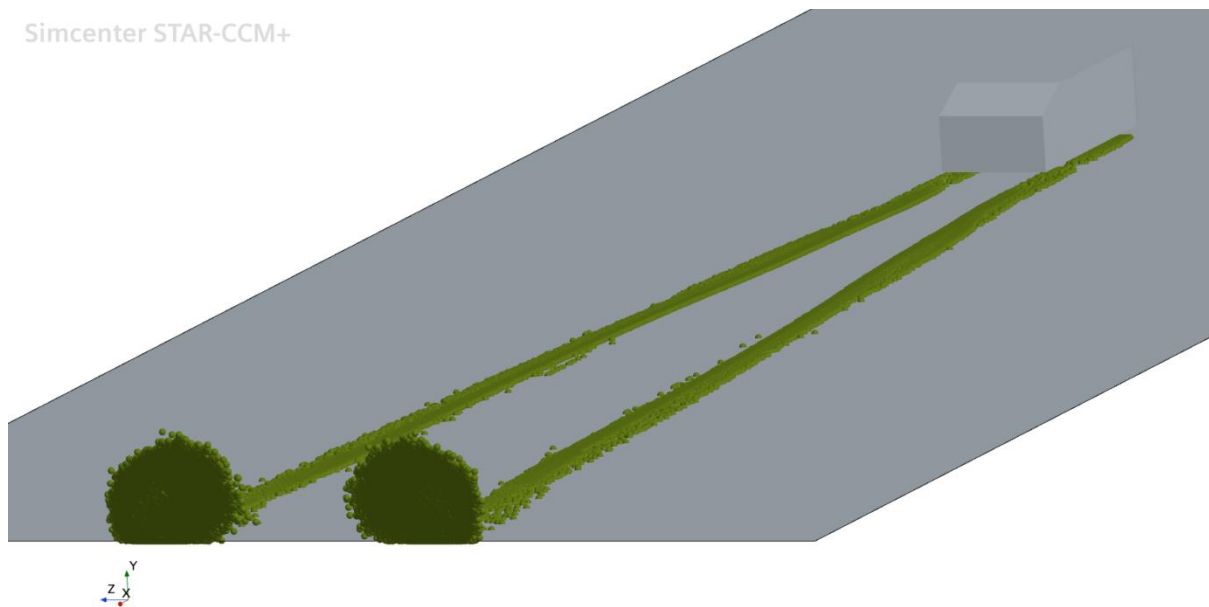


Obr. 34 Oblasti s vysokou koncentrací částic vzniklých opotřebením pneumatik

Podobně jako u brzdných částic, lze pomocí funkce „Boundary Sampling“ sledovat interakci částic spojených s provozem pneumatik s okrajovými podmínkami. Tyto částice díky poloze injektorů těsně nad povrchem nejsou vyzvednuty vírem vznikajícím v úplavu těsně za Ahmedovým tělesem a díky tomu se nezachytávají na zadní stěně tělesa. Taktéž je jasné

na obr. 35 vidět, že na rozdíl od brzdných částic, se částice od pneumatik začínají zachytávat na povrch vozovky výrazně dříve, některé dokonce v těsné blízkosti zdrojů.

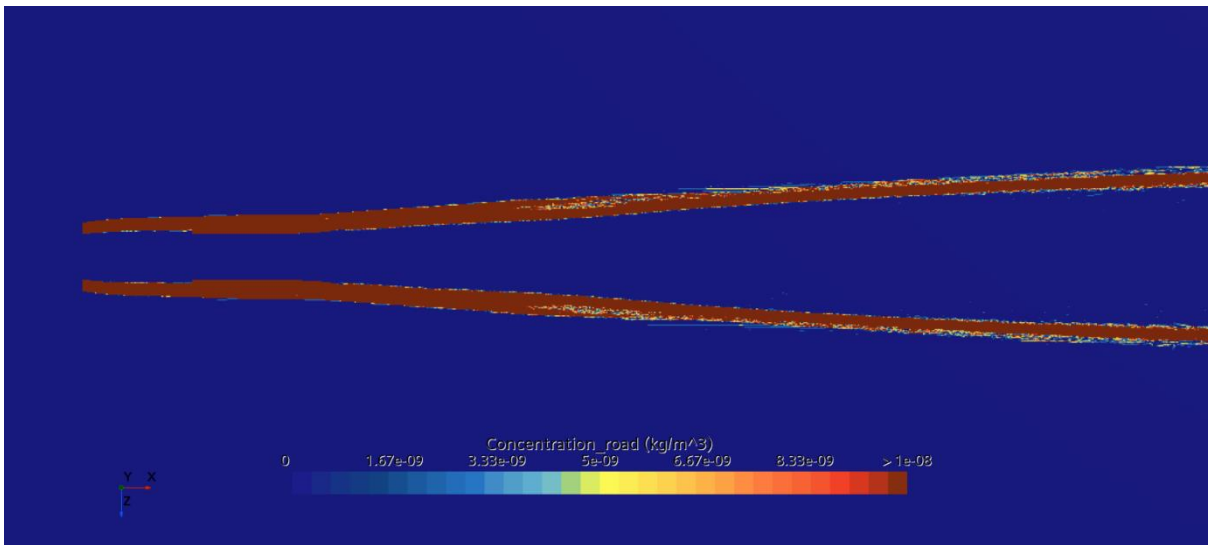
Opět bylo na OP „Outlet“ možné měřit vzdálenosti, do kterých jsou do stran unášeny prouděním částice. Podobně jako u brzdných částic mohou být částice vzniklé opotřebením pneumatik unášeny až 2,5 m do stran od elektromobilu. Taktéž mohou být unášeny až do výšky přibližně 1,9 m, což je nepatrně vyšší než u částic generovaných brzdami, pravděpodobně díky nižší hustotě částic. Podobné hodnoty vzdáleností jako u brzdných částic jsou zapříčiněny faktem, že všechny druhy částic jsou unášeny stejným vírem.



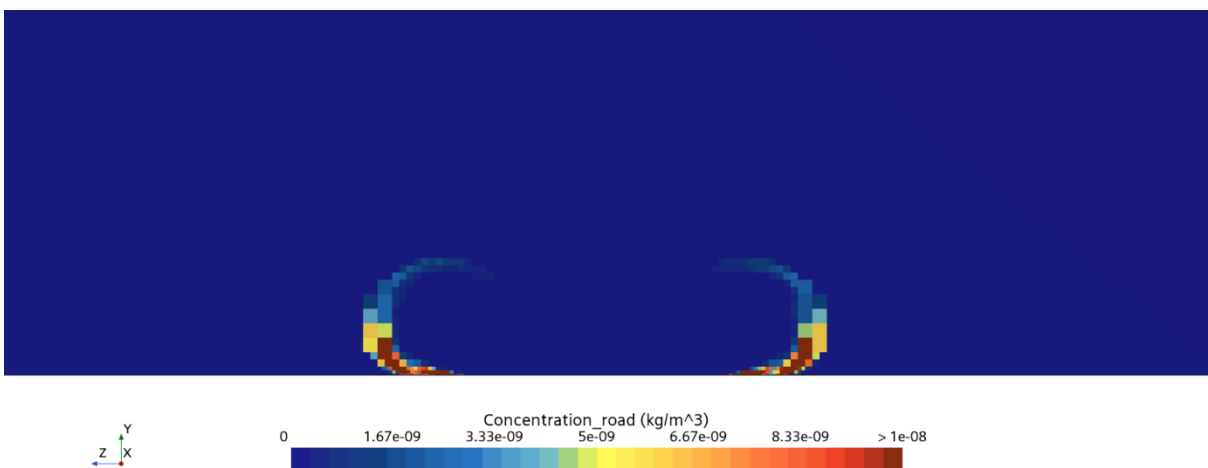
Obr. 35 Interakce částic vzniklých opotřebením pneumatik s okrajovými podmínkami

3.2.3 Částice vzniklé opotřebením jízdního povrchu

Podobně jako u částic spojených s opotřebením pneumatik v předchozí podkapitole, byly zdrojem částic vznikajících opotřebením vozovky 4 mřížky identické s těmi u pneumatik, reprezentující kontakt kol s jízdním povrchem. To vysvětluje chování velice podobné tomu, jako u částic spojených s opotřebením pneumatik. Koncentrační pole jsou vidět na obr. 36 a obr. 37.

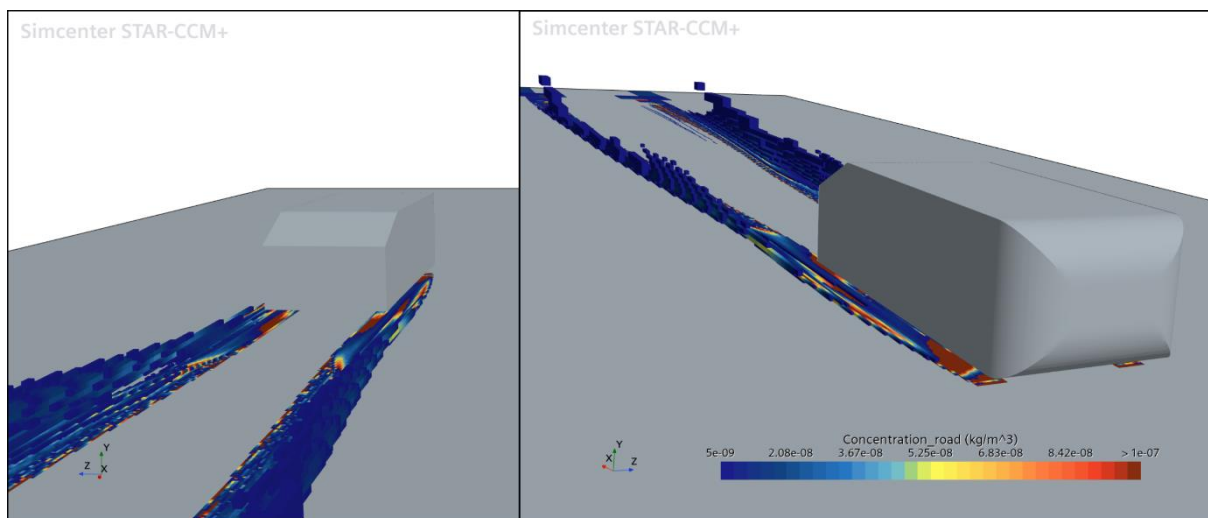


Obr. 36 Koncentrační pole částic vzniklých opotřebením vozovky ve vodorovné rovině 2 mm nad vozovkou



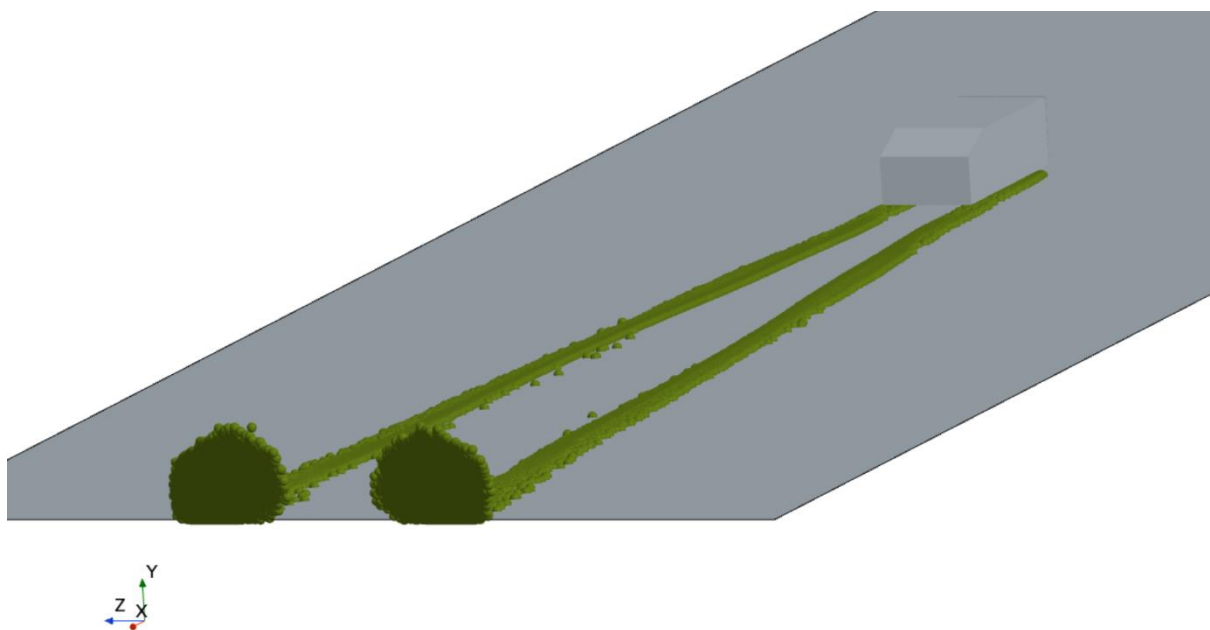
Obr. 37 Koncentrační pole částic vzniklých opotřebením vozovky v příčné rovině přibližně 5 m za automobilem

Zvýšenou koncentraci částic ve vzduchu lze opět, podobně jako v předešlé podkapitole, sledovat v blízkosti jízdního povrchu, právě díky nízké poloze injektorů. Oproti pneumatikám jsou hodnoty koncentrace nepatrně vyšší, díky vyššímu zadanému hmotnostnímu průtoku a hustotě pevné fáze. Buňky, ve kterých koncentrace přesáhla hodnotu $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, lze vidět na obr. 38.



Obr. 38 Oblasti se zvýšenou koncentrací částic vzniklých opotřebením jízdního povrchu

Výstupy z modelu „Boundary Sampling“ jsou v případě opotřebení cesty téměř identické s výstupy u opotřebení pneumatik a jsou vidět na obr. 39. Je tomu tak nejspíše z důvodu sdílení injektorů, proudění tedy ovlivňovalo oba druhy částic s téměř totožným efektem.



Obr. 39 Interakce částic vzniklých opotřebením vozovky s okrajovými podmínkami

Jediným zřejmým rozdílem je výška, které částice dosahovaly na OP „Outlet“. Částice z jízdního povrchu mohou být unášeny do nepatrně nižší výšky okolo 1,85 m nad vozovkou, patrně díky vyšší hustotě než u částic spojených s opotřebením pneumatik. Resuspence nebyla uvažována.

DISKUSE

Geometrie

Ačkoliv Ahmedovo těleso představuje reprezentaci automobilu a poskytuje do určité formy hlavní druhy vírových struktur, nejedná se o přesnou reprezentaci. Moderní automobily mají mnoho prvků, kterých poslední dobou přibývá a přibývá i na jejich složitosti, které ovlivňují proudění. Hlavním nedostatkem použitého modelu je absence kol. Kola jsou u reálného automobilu výrazným zdrojem turbulencí, který znatelně ovlivňuje charakter proudění v blízkosti automobilu. Možným zdokonalením modelu jako celku by tedy mohlo být přidání zdrojů turbulencí v oblasti kol, které by ovlivnily distribuci částic za automobilem, nebo využití modelu reálného elektromobilu.

Model proudění

Používaný model proudění je zejména kvůli ulehčení výpočetní náročnosti, z důvodu hardwarových omezení, dosti zjednodušený. V použitém modelu je proudění modelováno jako stacionární, navzdory faktu, že proudění kolem automobilů bývá silně nestacionární. Jednou z hlavních změn v navazujících studiích by tedy mohla být volba neustáleného proudění. Taktéž by bylo vhodné zvážit tvorbu jemnější výpočetní sítě pro přesnější popsání proudění v oblasti úplavu za vozidlem, to se však pojí se zvýšením výpočetní náročnosti. Jednou z možností, jak pozvednout realističnost modelu je taktéž volba jiného přístupu k řešení turbulencí, než „RANS“. Nabízelo by se například využití metody „DES“, nebo „LES“, tato možnost však byla pro potřeby práce ihned zavrhnuta, z důvodu využívání příliš slabých počítačů pro zmíněné metody.

Modelování částic

Zjevným nedostatkem modelu je modelování pouze unášení částic typu PM_{10} z důvodu dispozice dat právě pouze pro PM_{10} . V rozvíjejících pracích by tedy mohly být přidány i emise $PM_{2.5}$. Taktéž by mohly být namodelovány situace pro užívání různých hodnot regenerativního brždění, které je u současných elektromobilů hojně využíváno. V poslední řadě by taktéž úroveň modelu mohla pozvednout přítomnost resuspenze, která nebyla uvažována z důvodů přílišné náročnosti. Napočítaná koncentrační pole je taktéž obtížné validovat, kvůli časové proměnlivosti proudění.

ZÁVĚR

Prostřednictvím CFD simulace v programu Star CCM+ bylo zjištěno, že pevné částice typu PM₁₀ související s opotřebením brzd, pneumatik a jízdního povrchu, jsou po vypuštění do proudění pomocí nadefinovaných zdrojů unášeny vypočítaným prouděním. Unášení těchto částic je výrazně ovlivněno vznikem vírových struktur za upraveným Ahmedovým tělesem, reprezentujícím elektromobil, které byly popsány již v originálním článku S. R. Ahmeda, G. Ramma a G. Faltina o Ahmedově tělese.

V případě brzdících částic, se vysoké koncentrace částic ve vzduchu nachází primárně ve vírech odtrhávajících se od bočních hran v zadní části automobilu. Částice vzniklé opotřebením jízdního povrchu a pneumatik vykazovaly vysoké koncentrace taktéž v oblasti vírů za modelem, avšak ve výrazné blízkosti jízdního povrchu, zejména díky poloze zdrojů, které byly umístěny těsně nad povrchem vozovky, proudění v okolí těchto zdrojů tedy bylo výrazně ovlivněno podmínkou ulpívání, a to mělo vliv i na unášené částice.

V dostatečné vzdálenosti za modelem elektromobilu, kde se již proudění blížilo ustálenému stavu, byly měřeny vzdálenosti částic od vozovky a do stran od automobilu. Bylo zjištěno, že nezanedbatelné množství reprezentací částic může vystoupat až do výšky 1,9 m nad povrch vozovky. V laterálním směru se vyskytovalo nezanedbatelné množství reprezentací částic až do vzdálenosti 2,5 m od vozidla.

To znamená že existuje možnost, že v oblastech, kde se chodci vyskytují v těsné blízkosti projíždějících automobilů, tedy primárně ve městech, kde jsou chodníky umístěny hned vedle silnic, může dojít ke vdechování vzduchu se zvýšenou koncentrací těchto pevných částic. To je navíc umocněno faktem, že z důvodů zvýšené hmotnosti elektromobilů oproti autům s klasickými spalovacími motory, je právě u aut s elektrickým pohonem generováno vyšší množství těchto nevyfukových pevných částic.

Možným řešením, jak předejít interakci chodců s tímto druhem částic, může být například využívání travnatých pásů, nebo pásů s jinou zelení, mezi chodníky a silnicemi, pro zvýšení vzdálenosti mezi projíždějícími vozidly a chodci. Další variantou by mohlo být zavedení přísnějších rychlostních limitů, z toho důvodu, že míra generování částic je závislá jak na rychlosti, tak na zrychlení. Bylo by tím ovlivněno i proudění, které pozorované částice unáší. Taktéž by jedním z řešení mohlo být zachytávání brzdících částic přímo u zdroje.

Podobný výzkum zjišťující koncentrace částic v ovzduší zatím nebyl realizován, zejména kvůli složitostem s měřením. Proudění za autem je totiž časově proměnlivé a v čase dochází k jeho výraznému vývoji. Měření, které se provádí v měřících intervalech je tedy nepřesné, právě díky časové změně proudění.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LOGAN, Kathryn G; HASTINGS, Astley a NELSON, John D. *Transportation in a net zero world: transitioning towards low carbon public transport*. Switzerland: Springer, 2022. ISBN 978-3-030-96673-7.
- [2] KALGHATGI, G. T; AGARWAL, Avinash K. (Avinash Kumar); LEACH, Felix a SENECAL, Kelly. *Engines and fuels for future transport*. Singapore: Springer, 2022. ISBN 978-981-16-8719-8.
- [3] WOO, Sang-Hee; JANG, Hyungjoon; LEE, Seung-Bok a LEE, Seokhwan. Comparison of total PM emissions emitted from electric and internal combustion engine vehicles: An experimental analysis. Online. *Science of The Total Environment*. 2022, roč. 842, s. 156961. ISSN 00489697. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156961>. [cit. 2024-02-15].
- [4] SONGKITTI, Worawat; SA-ARD-IAM, Sutthiphong; PLENGSA-ARD, Chalernpol a WIROJASKUNCHAI, Ekathai. Effects of Payloads on Non-exhaust PM Emissions from A Hybrid Electric Vehicle during A Braking Sequence. Online. *Aerosol and Air Quality Research*. 2022, roč. 22, č. 7, s. 220150. ISSN 16808584. Dostupné z: <https://doi.org/10.4209/aaqr.220150>. [cit. 2024-02-15].
- [5] MANZETTI, Sergio a MARIASIU, Florin. Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, roč. 51, s. 1004-1012. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.010>. [cit. 2024-05-13].
- [6] RAMONI, Monsuru Olalekan a ZHANG, Hong-Chao. End-of-life (EOL) issues and options for electric vehicle batteries. Online. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2013, roč. 15, č. 6, s. 881-891. ISSN 1618-954X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0588-4>. [cit. 2024-05-13].
- [7] KOTAK, Yash; MARCHANTE FERNÁNDEZ, Carlos; CANALS CASALS, Lluc; KOTAK, Bhavya Satishbhai; KOCH, Daniel et al. End of Electric Vehicle Batteries: Reuse vs. Recycle. Online. *Energies*. 2021, roč. 14, č. 8. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en14082217>. [cit. 2024-05-14].
- [8] STOJANOVIC, Nadica; GLISOVIC, Jasna; ABDULLAH, Oday I.; BELHOCINE, Ali a GRUJIC, Ivan. Particle formation due to brake wear, influence on the people health and measures for their reduction: a review. Online. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022, roč. 29, č. 7, s. 9606-9625. ISSN 0944-1344. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17907-3>. [cit. 2024-02-29].
- [9] SJOHOLM, PETRI; INGHAM, DEREK B.; LEHTIMAKI, MATTI; PERTTU-ROIHA, LEENA; GOODFELLOW, HOWARD et al. GAS-CLEANING TECHNOLOGY. Online. In: *Industrial Ventilation Design Guidebook*. Elsevier, 2001, s. 1197-1316. ISBN 9780122896767. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-012289676-7/50016-3>. [cit. 2024-03-01].
- [10] REIF, Konrad. *Fundamentals of automotive and engine technology: standard drives, hybrid drives, brakes, safety systems*. 2014. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN 365803971X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-03972-1>.
- [11] GRIGORATOS, Theodoros a MARTINI, Giorgio. Brake wear particle emissions: a review. Online. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015,

- roč. 22, č. 4, s. 2491-2504. ISSN 0944-1344. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8>. [cit. 2024-05-12].
- [12] SINHA, Ankur; ISCHIA, Gloria; MENAPACE, Cinzia a GIALANELLA, Stefano. Experimental Characterization Protocols for Wear Products from Disc Brake Materials. Online. *Atmosphere*. 2020, roč. 11, č. 10. ISSN 2073-4433. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/atmos11101102>. [cit. 2024-05-12].
- [13] OROUMIYEH, Farzan a ZHU, Yifang. Brake and tire particles measured from on-road vehicles: Effects of vehicle mass and braking intensity. Online. *Atmospheric Environment: X*. 2021, roč. 12. ISSN 25901621. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100121>. [cit. 2024-05-22].
- [14] GRIGORATOS, Theodoros a MARTINI, Giorgio. Non-exhaust traffic related emissions. Brake and tyre wear PM. Online. 2014, roč. 2014. ISSN 1831-9424. Dostupné z: <https://doi.org/10.2790/21481>. [cit. 2024-05-14].
- [15] BEBKIEWICZ, Katarzyna; CHŁOPEK, Zdzisław; SAR, Hubert a SZCZEPAŃSKI, Krystian. Comparison of pollutant emission associated with the operation of passenger cars with internal combustion engines and passenger cars with electric motors. Online. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2021, roč. 12, č. 2, s. 215-228. ISSN 2008-9163. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00382-4>. [cit. 2024-02-15].
- [16] AMATO, F.; PANDOLFI, M.; ALASTUEY, A.; LOZANO, A.; CONTRERAS GONZÁLEZ, J. et al. Impact of traffic intensity and pavement aggregate size on road dust particles loading. Online. *Atmospheric Environment*. 2013, roč. 77, s. 711-717. ISSN 13522310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.020>. [cit. 2024-05-22].
- [17] ÇENGEL, Yunus A; CIMBALA, John M. a KANOGLU, Mehmet. *Fluid Mechanics: fundamentals and applications*. Fourth edition in SI units. Spojené státy americké: McGraw-Hill Education, 2019. ISBN 978-981-315-788-0.
- [18] TU, Jiyuan; YEOH, Guan Heng a LIU, Chaoqun. *Computational fluid dynamics: a practical approach*. Third edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018. ISBN 978-0-08-101127-0.
- [19] BLAZEK, Jiri. *Computational fluid dynamics: principles and applications*. Third edition. Amsterdam: Elsevier ; Butterworth-Heinemann, 2015. ISBN 978-0-08-099995-1.
- [20] SIEMENS DIGITAL INDUSTRIES SOFTWARE. *Simcenter STAR-CCM+ Documentation: Version 2210*. 2210. 2022.
- [21] ČARNOGURSKÁ, Mária; PŘÍHODA, Miroslav a BRESTOVIČ, Tomáš. *Aplikovaná mechanika tekutin*. Košice: Strojnícka fakulta Technická Univerzita v Košiciach, 2021. ISBN 978-80-553-3950-4.
- [22] AHMED, S. R.; RAMM, G. a FALTIN, G. Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake. *SAE Transactions*. 1984, roč. 1984, č. vol. 93, s. 473-503.
- [23] HINTERBERGER, C.; GARCÍA-VILLALBA, M. a RODI, W. Large eddy simulation of flow around the Ahmed body. Online. In: MCCALLEN, Rose; BROWAND, Fred a ROSS, James (ed.). *The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains*. 19. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004, s. 77-87. ISBN

- 978-3-642-53586-4. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-540-44419-0_7. [cit. 2024-05-04].
- [24] KLÖCKNER, Philipp; REEMTSMA, Thorsten; EISENTRAUT, Paul; BRAUN, Ulrike; RUHL, Aki Sebastian et al. Tire and road wear particles in road environment – Quantification and assessment of particle dynamics by Zn determination after density separation. Online. *Chemosphere*. 2019, roč. 222, s. 714-721. ISSN 00456535. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.176>. [cit. 2024-05-17].
- [25] JUNG, Uiyeong a CHOI, Sung-Seen. Classification and Characterization of Tire-Road Wear Particles in Road Dust by Density. Online. *Polymers*. 2022, roč. 14, č. 5. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14051005>. [cit. 2024-05-17].
- [26] BAYRAKTAR, Ilhan; LANDMAN, Drew a BAYSAL, Oktay. Experimental and Computational Investigation of Ahmed Body for Ground Vehicle Aerodynamics. *JOURNAL OF COMMERCIAL VEHICLES*. 2001, roč. 2001, č. Vol. 110, s. 321-331.
- [27] MEILE, W.; BRENN, G.; REPPENHAGEN, A.; LECHNER, B. a FUCHS, A. Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed body. *CFD Letters*. 2011, roč. 2011, č. Vol. 3, s. 32-39.

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Vliv hmotnosti vozidla na míru generování PM_{10} opotřebením brzd, převzato a upraveno z [13]
- Obr. 2 Vliv hmotnosti vozidla na míru generování PM_{10} opotřebením pneumatik, převzato a upraveno z [13]
- Obr. 3 Vliv velikosti kameniva na emise pevných částic, převzato a upraveno z [16]
- Obr. 4 a) 2D strukturovaná výpočetní síť, b) 2D nestrukturovaná trojúhelníková výpočetní síť, c) 2D nestrukturovaná čtyřúhelníková výpočetní síť, převzato a upraveno z [18]
- Obr. 5 Šikmost buněk výpočetní sítě, převzato a upraveno z [17]
- Obr. 6 Druhy proudění dle uspořádanosti, převzato a upraveno z [17]
- Obr. 7 Rychlostní profil proudění v mezní vrstvě
- Obr. 8 Geometrie Ahmedova tělesa [23]
- Obr. 9 Vírové struktury formující se za Ahmedovým tělesem [22]
- Obr. 10 Výpočetní doména
- Obr. 11 Volba modelů výpočetní sítě
- Obr. 12 Výpočetní síť
- Obr. 13 Detail prizmatické sítě mezní vrstvy
- Obr. 14 Volba fyzikálních modelů
- Obr. 15 Volba modelů fázi
- Obr. 16 Pozice injektorů
- Obr. 17 Rezidua
- Obr. 18 Rychlostní pole proudění v podélné rovině
- Obr. 19 Rychlostní pole proudění ve vodorovné rovině 1 m nad vozovkou
- Obr. 20 Tlakové pole proudění v podélné rovině
- Obr. 21 Tlakové pole v příčné rovině ve vzdálenosti 0,75 m za Ahmedovým tělesem
- Obr. 22 Proudnice v podélné rovině
- Obr. 23 Detail vírových struktur v úplavu těsně za Ahmedovým tělesem
- Obr. 23 Detail vírových struktur v úplavu těsně za Ahmedovým tělesem
- Obr. 24 Proudnice ve vodorovné rovině 1 m nad vozovkou
- Obr. 25 Proudnice popisující vznik víru za hranou Ahmedova tělesa
- Obr. 26 Pohled zezadu na Ahmedovo těleso popisující vírové struktury odtržené od hran modelu
- Obr. 27 Koncentrační pole brzdných částic ve vodorovné rovině 10 cm nad vozovkou
- Obr. 28 Koncentrační pole brzdných částic v podélné rovině procházející levými brzdami
- Obr. 29 Oblasti s vysokou koncentrací částic uvolněných z oblasti brzd
- Obr. 30 Oblasti s koncentrací vyšší než $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Obr. 31 Interakce brzdných částic s okrajovými podmínkami
- Obr. 32 Koncentrační pole částic vzniklých opotřebením pneumatik ve vodorovné rovině 2 mm nad vozovkou
- Obr. 33 Koncentrační pole částic vzniklých opotřebením pneumatik v příčné rovině přibližně 5 m za automobilem
- Obr. 34 Oblasti s vysokou koncentrací částic vzniklých opotřebením pneumatik
- Obr. 35 Interakce částic vzniklých opotřebením pneumatik s okrajovými podmínkami
- Obr. 36 Koncentrační pole částic vzniklých opotřebením vozovky ve vodorovné rovině 2 mm nad vozovkou

Obr. 37 Koncentrační pole částic vzniklých opotřebením vozovky v příčné rovině přibližně 5 m za automobilem

Obr. 38 Oblasti se zvýšenou koncentrací částic vzniklých opotřebením jízdního povrchu

Obr. 39 Interakce částic vzniklých opotřebením vozovky s okrajovými podmínkami