

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 223

ISSN 1213-418X

Jiří Pospíšil

**NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ
TRANSPORTU
SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC
GENEROVANÝCH
SILNIČNÍ DOPRAVOU**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

**Numerické modelování transportu suspendovaných částic
generovaných silniční dopravou**

Numerical modelling of traffic produced particulate matter
dispersion

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2007

KLÍČOVÁ SLOVA

numerické modelování, suspendované částice, rozptyl, depozice, resuspenze

KEY WORDS

numerical modelling, particulate matter, dispersion, deposition, re-suspension

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Oddělení pro vědu a výzkum Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA HABILITAČNÍ PRÁCE	4
SEZNAM POUŽITÉHO OZNAČENÍ	5
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	6
1.1 Suspendované částice	7
1.2 Současný stav modelování transportu suspendovaných částic	8
2 CÍLE PRÁCE	9
3 POPISNÁ ČÁST	9
3.1 Popis proudění vzduchu	9
3.2 Transport suspendovaných částic	11
3.3 Depozice částic	13
3.4 Resuspenze částic	13
3.5 Použitý software StarCD	14
4 REALIZAČNÍ ČÁST	15
4.1 Transport suspendovaných částic v lokální městské oblasti	15
4.1.1 Tvorba modelu	15
4.1.2 Okrajové podmínky	16
4.1.3 Zahrnutí vlivu pohybujících se automobilů	16
4.1.4 Porovnání Eulerova-Lagrangeova přístupu s přístupem pasivního skaláru	17
4.1.5 Srovnání výsledků modelování a měření	19
4.1.6 Depozice částic na travnatých plochách	20
4.1.7 Stanovení denního průběhu koncentrací částic	20
4.2 Modelování šíření suspendovaných částic v regionální oblasti	21
5 ZÁVĚREČNÉ SHRNU TÍ	23
6 SUMMARY	23
7 LITERATURA	24

Představení autora habilitační práce

Jiří Pospíšil se narodil v roce 1974 v Novém Městě na Moravě. V roce 1997 absolvoval FSI VUT v Brně, obor Tepelná a jaderná energetická zařízení, specializace Tepelně energetická zařízení. Navazující doktorské studium absolvoval na Odboru termomechaniky a techniky prostředí EU FSI VUT v Brně. V roce 2003 obhájil disertační práci na téma *Řešení rozptylu emisí produkovaných automobily v městské zástavbě* a získal titul Ph.D.

V průběhu doktorského studia v roce 1999 začal na poloviční úvazek pracovat jako asistent na Odboru tepelných a jaderných energetických zařízení EU FSI. Po ukončení prezenční formy doktorského studia zůstal zapojen do vědeckovýzkumných aktivit OTTP druhou polovinou pracovního úvazku. Po úspěšném obhájení disertační práce přešel zcela na pracoviště Odboru energetického inženýrství, kde působí i v současné době.

Pedagogické zkušenosti získal již v průběhu doktorského studia, kdy zajišťoval cvičení z předmětů *Termomechanika* a *Zdroje a přeměna energie*. V dalších letech samostatně vedl předměty *Zdroje a přeměna energie*, *Experimentální metody oboru*, *Obnovitelné zdroje energie*, *Tepelné pochody*, *Seminář k bakalářské práci*, *Seminář k diplomové práci*. V letech 2005 a 2006 vedl pro zahraniční studenty výuku předmětu *Renewable energy sources*. Pro zájemce z průmyslové sféry přednáší v rámci vzdělávacích seminářů problematiku tepelných čerpadel. V roce 2006 přednášel pro Státní zdravotní ústav problematiku řešenou v rámci vědeckovýzkumné činnosti – modelování transportu suspendovaných částic v atmosféře. Od roku 2003 byl vedoucím 30 úspěšně obhájených bakalářských prací a 4 diplomových prací.

Jeho odborným zaměřením je oblast aplikované termomechaniky a energetiky zabývající se zdroji energie a způsoby jejich efektivního využívání, včetně hodnocení dopadů na životní prostředí. Vědeckovýzkumná činnost je již od doktorského studia svázána s využíváním numerického modelování založeného na metodě kontrolních objemů. Uplatnění numerického modelování je zaměřeno na vývoj a testování nových modelů pro popis šíření znečišťujících látek v blízkosti jejich zdrojů. V této oblasti byly řadu let aktivity autora zaměřeny na šíření plyných emisí. V posledních letech byla problematika aktuálně rozšířena i na kapalně a tuhé částice dlouhodobě setrvávající v atmosféře (suspendované částice). Druhá oblast vědeckovýzkumné činnosti spojená s efektivním využíváním energetických zdrojů je orientována na uplatnění absorpčních oběhů v energetickém zásobování (trigenerace, chlazení, tepelná čerpadla, tepelné transformery).

V průběhu celého působení na VUT se podílel na řešení řady projektů vědy a výzkumu. Již v prvních letech doktorského studia byl zapojen do řešení projektu EUROTRAC-2 E1489: *Transport and transformation of environmentally-relevant trace constituents in the troposphere over Europe*. V následujících letech byl spoluřešitelem nebo členem řešitelského týmu projektů, OC 715.80: *Výpočtové modelování aplikované na šíření emisí (pod vlivem hybnosti a turbulence indukované automobily) v městském měřítku*, CEZ J22/98-262100001: *Počítačové a fyzikální modelování problémů inženýrské termofluidní mechaniky, mechaniky těles a fázových přeměn*, GA101/03/0299: *Mikrocentrála pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla na bázi motoru s vnějším přestupem tepla*, ENK6-CT-2001-00533: *RESHYVENT – Demand Controlled Residential Hybrid Ventilation*, FF-P2/050: *Využití tepelných čerpadel při vytápění a přípravě teplé užitkové vody v kombinaci s kondenzačním kotlem na spalování zemního plynu a propanu*, GA101/04/1278: *Energetické parametry biomasy*, 1P04OC633.001: *Prachové částice v městském ovzduší – jejich transport a depozice v městských oblastech*, 1F54H/098/520: *Prašnost dopravy a její vlivy na imisní zatížení ovzduší suspendovanými částicemi*, GA101/06/0650: *Výzkum čištění energoplynu* a MS 1350003: *Ekologicky a energeticky řízené soustavy zpracování odpadů a biomasy*. Jako mladý začínající pracovník byl řešitelem 3 interních grantů FSI.

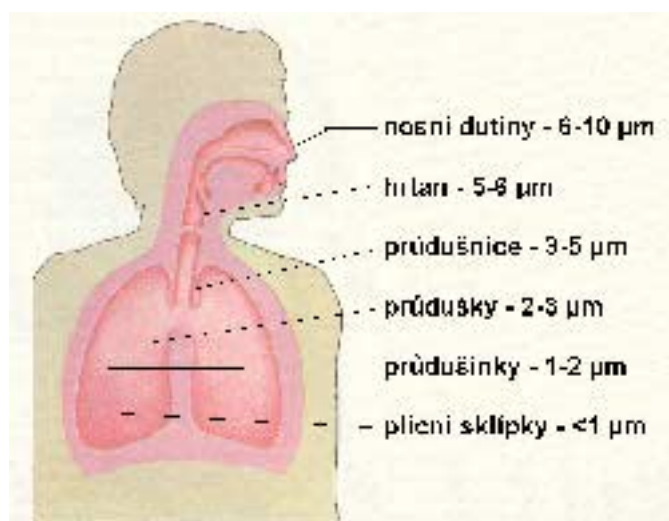
Je autorem nebo spoluautorem 5 vědeckých prací uveřejněných v mezinárodních impaktovaných časopisech (10 citací dle *SCI*) a 33 příspěvků převážně ve sbornících světových konferencí a symposií.

Seznam použitého označení

A	[m ²]	plocha povrchu částice
A_p	[m ²]	čelní plocha automobilu
C_1	[1]	parametr sekundární emise prachových částic
C_2	[1]	geometrický součinitel částice
C_3	[1]	pomocný odporový součinitel
C_C	[1]	Cunningham factor
C_D	[1]	tvarový odporový součinitel
D_p	[m ² s ⁻¹]	difuzivita suspendovaných částic
F	[N]	vertikální složka síly působící na částici při resuspenzi
G	[N]	tíhová síla působící na částici
J_d	[kg/s]	hmotnostní tok částic dosedajících na povrch
Q_{car}	[aut/s]	intenzita dopravy
S_A	[kg/sm ³]	zdrojový člen složky A
S_T	[m ²]	půdorysná plocha sledované oblasti
T	[K]	absolutní teplota
U_∞	[m/s]	rychlost volného proudu
U_{car}	[m/s]	rychlost jízdy automobilu
c	[kg/m ³]	hmotnostní koncentrace částic
d_p	[m]	průměr částice
k	[m ² s ⁻²]	kinetická energie turbulence
k_B	[JK ⁻¹]	Boltzmannova konstanta
m_p	[kg]	hmotnost částice
p	[Pa]	tlak
t	[s]	čas
u	[m/s]	složka rychlosti ve směru osy x
u^*	[m/s]	smyková (třecí) rychlost
v	[m/s]	složka rychlosti ve směru osy y
v_d	[m/s]	rychlost depozice
v_p	[m/s]	rychlost částice
v_s	[m/s]	pádová (sedimentační) rychlost
w	[1]	množství suspendovaných částic vyjádřené jako hmotnostní zlomek
z	[m]	výšková souřadnice
β	[1]	konstanta odlučivosti suspendovaných částic na vegetaci
Γ	[m ² /s]	zobecněný součinitel difúze
ε	[m ² s ⁻³]	rychlost disipace
κ	[m ² s ⁻¹]	turbulentní difuzivita
μ	[Pa.s]	dynamická viskozita
μ_t	[Pa.s]	turbulentní viskozita
ν	[m ² s ⁻¹]	kinematická viskozita
ρ	[kg/m ³]	hustota vzduchu
ρ_p	[kg/m ³]	hustota částice
ν	[m ² s ⁻¹]	efektivní viskozita

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Zvyšující se nároky na kvalitu životního prostředí spojené s požadavkem na prodloužení doby života obyvatel jsou dlouhodobě hlavní hnací silou ve výzkumu škodlivých vlivů, kterým je lidský organismus vystaven. Vzhledem k celoživotnímu pobytu lidí v přízemní části atmosféry představují přítomné suspendované částice z dlouhodobého hlediska významné zdravotní nebezpečí. Význam jejich vlivu je umocněn skutečností, že vzduch s přítomnými suspendovanými částicemi je vdechován, a tím se částice dostávají do přímého kontaktu s životně důležitými orgány. Společně s částicemi jsou do plic zanášeny všechny látky adsorbované na jejich povrchu. Do spodní části plic se tímto způsobem dostávají látky, které jsou jinak zachyceny v horních partiích dýchacího traktu. Také těžké kovy jsou často vázány na suspendované částice velmi malých rozměrů [1] a s jejich přispěním se dostávají do nejspodnějších částí plic. Částice nejmenších rozměrů jsou schopné pronikat až do krevního oběhu stejnou cestou, jako molekuly kyslíku.



Obr. 1.1 Zasažení dýchacího traktu člověka suspendovanými částicemi různých velikostí

V nedávné minulosti byla hlavní pozornost v oblasti čistoty ovzduší zaměřena na sledování koncentrací plynných imisí CO, SO₂, NO_x a hrubé frakce prachu (TSP). Značná pozornost věnovaná uvedeným škodlivinám vedla k výraznému snížení jejich produkce v posledních desetiletích.

Na základě rozsáhlých imunologických studií, které poukázaly na významnou škodlivost suspendovaných částic na lidské zdraví a prokázaly skutečnost, že zvýšené koncentrace suspendovaných částic v ovzduší výrazně zkracují délku života, vešla v roce 1999 v Evropské unii v platnost směrnice 1999/30/EC stanovující limity pro koncentrace prachových částic menších než 10 µm, označovaných jako suspendované částice PM₁₀. Česká republika tuto směrnici implementovala do své legislativy po přistoupení do EU.

V souladu s uvedenou směrnicí začal být prováděn monitoring koncentrací suspendovaných částic PM₁₀, který ukázal na výrazné překračování doporučených limitů ve většině velkých evropských měst. Za hlavní zdroj suspendovaných částic je v městských oblastech považována silniční doprava a spalovací procesy. Snaha o snížení koncentrací suspendovaných částic odhalila nedostatečné poznání této oblasti a vyvolala celosvětový intenzivní multidisciplinární výzkum ve všech souvisejících oblastech. V rámci těchto aktivit bylo nutné přistoupit k tvorbě vhodných modelových nástrojů umožňujících sledovat šíření suspendovaných částic v nejvíce zasažených lokalitách.

Nutnost vývoje nových matematických modelů řešících transport suspendovaných částic generovaných dopravou v geometricky složitých městských územích vyplývá z absence vhodného

modelového nástroje, kterým by tento problém mohl být řešen při zpracování rozptylových studií. Situaci komplikuje skutečnost, že i řešení rozptylu plynných emisí v městské zástavbě („pod střechami budov“) představuje problém s omezenými možnostmi řešení.

1.1 SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE

Termín „suspendované částice“ je legislativně vymezen nařízením vlády [2] jako částice pevného nebo kapalného materiálu, které v důsledku zanedbatelné pádové rychlosti setrvávají dlouhou dobu v atmosféře. Tomuto vymezení vyhovují částice velikosti od několika nm až po 100 μm . Suspendované částice vytvářejí v atmosféře složitou heterogenní směs z hlediska velikosti částic a jejich chemického složení.

Množství, fyzikální a chemické vlastnosti částic jsou závislé na zdrojích, mechanismech vzniku částic a transformačních procesech, kterými částice během doby své existence procházejí [1]. Obsah částic v atmosféře závisí na mnoha faktorech. Kromě okamžité produkce zdrojů ovlivňují aktuální koncentraci částic v ovzduší meteorologické podmínky, konkrétně teplota a relativní vlhkost.

Dle původu rozdělujeme suspendované částice na:

- primární,
- sekundární.

Primární suspendované částice jsou uvolňovány v průběhu přírodních procesů (sopečná činnost, mořský aerosol, bioaerosoly), nebo jsou rozptýleny v atmosféře v důsledku lidské činnosti (spalovací procesy, abraze). Dle mechanismu vzniku rozdělujeme primární antropogenní suspendované částice do dvou hlavních skupin:

- spalovací částice,
- nespalovací částice.

Spalovací částice zahrnují částice, jejichž vznik je spojen se spalovacími procesy. V jejich složení převažuje uhlík a přítomny jsou dále nejčastěji O, N, S. Nespalovací částice zahrnují částice vzniklé abrazí nebo rozpadem materiálů a jejich složení je závislé na složení původního materiálu.

Sekundární suspendované částice vznikají z primárních suspendovaných částic chemickými a fyzikálními procesy (kondenzace, absorpce, koagulace) v průběhu pobytu částic v atmosféře. Mezi sekundární suspendované částice jsou dále zahrnuty částice uvolněné do ovzduší resuspenzí dříve deponovaných částic, která je vyvolána prouděním v blízkosti pevných povrchů.

Ve vztahu k silniční dopravě zahrnujeme mezi primární suspendované částice všechny částice uvolněné z automobilů před jejich prvním kontaktem s pevným povrchem, nebo fyzikálně-chemickou přeměnou. Patří sem částice opouštějící výfuky automobilů, částice vznikající otěrem pneumatik, brzdového obložení, spojky a částice uvolněné v souvislosti s korozí automobilů. Mezi primární částice související s dopravou se dále řadí i částice uvolněné z povrchu vozovky a příslušenství komunikace. Do této skupiny patří částice vzniklé otěrem povrchu vozovky a korozí pouličního příslušenství (svodidla, dopravní značení, osvětlení).

Sekundární částice emitované dopravou jsou z největší části spojené s resuspenzí částic deponovaných na vozovce a v jejím těsném okolí. V městských oblastech je množství sekundárních částic rozptýlených v ovzduší převažující nad částicemi primárními. S ohledem na velikost částic je nutné poznamenat, že sekundární částice jsou ve většině případů částice větších rozměrů (2,5–10 μm), zatímco primární částice zahrnují nejmenší velikostní třídy (5 nm–1 μm).

Suspendované částice hrubé frakce dominantním způsobem ovlivňují hmotnostní koncentraci suspendovaných částic v ovzduší. Zdravotní rizika však ve většině případů souvisejí s počtem vdechovaných částic.

1.2 SOUČASNÝ STAV MODELOVÁNÍ TRANSPORTU SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC

Primárním účelem matematických modelů je stanovit prostorové rozložení koncentrací znečišťujících látek v ovzduší na základě zadaných meteorologických podmínek a specifikování emisních zdrojů. Výsledky výpočtů realizovaných prostřednictvím matematických modelů jsou využívány při sledování a řízení kvality ovzduší se zaměřením na indikaci pravděpodobného překročení imisních limitů. Detailní popis transportu znečišťujících látek v atmosféře umožňuje zviditelnit hlavní přenosové trasy a blíže pochopit zákonitosti šíření znečišťujících látek v řešené oblasti.

Transport suspendovaných částic je dnes ve většině případů řešen s využitím meteorologických modelů velkých měřítek, které byly primárně vytvořeny pro řešení rozptylu plynných emisí. Vhodnou modifikací výpočtových parametrů je umožněno modelování transportu suspendovaných částic. Výsledky poskytnuté těmito modely jsou uspokojivé pro hodnocení transportu částic ve vyšších vrstvách atmosféry.

Horší situace je mezi modely malých měřítek až mikro měřítek zahrnujících část atmosféry „pod střechami budov“. Transport suspendovaných částic v těchto oblastech je řešen pouze na omezeném počtu vědeckovýzkumných pracovišť. Jedná se vždy o originální modely, které jsou vytvořeny pro konkrétní oblast a zahrnují její specifika.

Uplatnění pro odpovídající model řešící pohyb suspendovaných částic v městské zástavbě je hned v několika oblastech. Běžně realizovaná měření koncentrací suspendovaných částic jsou prováděna ve vybraných lokalitách. Požadavky legislativy však vyžadují plošné hodnocení koncentrací suspendovaných částic a pravidelné vypracování emisních inventur. Vzhledem ke složitosti popisu pohybu suspendovaných částic v městských oblastech je možné odpovídající mapu plošného rozložení koncentrací suspendovaných částic získat pouze uplatněním detailního matematického modelu využívajícího výstupy realizovaných měření.

Matematický model je také nezbytný pro pochopení zákonitostí transportu suspendovaných částic, zviditelnění jejich toků, vymezení rizikových oblastí a otestování vlivu různých opatření na koncentrace suspendovaných částic. Pokud jsou na základě modelování získány dostatečně kvalitní podklady informující o koncentračním zatížení oblasti, je možné tyto informace využít pro následné posouzení expozice populace.

Matematické modely používané pro řešení rozptylu suspendovaných částic využívají různé přístupy, které ovlivňují jejich přesnost, výpočetní náročnost a oblast vhodného použití.

Základní typy používaných matematických modelů jsou:

- Gaussovské vlečkové modely,
- Eulerovské modely,
- Lagrangeovské modely,
- statistické modely.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem předložené práce bylo zhodnotit možnosti využití numerického modelování založeného na metodě kontrolních objemů při řešení transportu suspendovaných částic v geometricky složitých územích. Pozornost byla zaměřena na modelování transportu suspendovaných částic v městských oblastech, které jsou zpravidla zatíženy nejvyššími koncentracemi suspendovaných částic. Jako hlavní zdroj částic byla uvažována silniční doprava, která produkuje velké množství částic charakteristických značnou tvarovou a rozměrovou rozmanitostí. Numerické řešení transportu suspendovaných částic bylo doplněno řadou experimentálních měření koncentrací suspendovaných částic v modelových lokalitách.

Dílčí cíle řešení byly formulovány následovně:

- provést teoretický rozbor matematického popisu všech významných transportních mechanismů ovlivňujících disperzi suspendovaných částic v přízemní části atmosféry,
- s užitím komerčního software StarCD otestovat možnosti řešení rozptylu suspendovaných částic v lokální městské oblasti (cca. 1×1 km) a regionální oblasti zahrnující městskou zástavbu (cca 10×10 km),
- posoudit vliv zahrnutí pohybu automobilů na řešená koncentrační pole suspendovaných částic v lokální oblasti,
- otestovat vhodné způsoby zadávání okrajových podmínek lokálních a regionálních modelů,
- porovnat Eulerovský a Lagrangeovský přístup řešení pohybu suspendovaných částic,
- využít inverzního modelování pro stanovení produkce suspendovaných částic ve sledovaných částech modelových oblastí,
- otestovat možnosti zahrnutí dočasné, dlouhodobé a trvalé depozice suspendovaných částic.

3 POPISNÁ ČÁST

Modelování transportu suspendovaných částic představuje komplexní problém vyžadující korektní řešení pohybu spojitě fáze (vzduchu) a diskrétní fáze (suspendovaných částic). Řešení pohybu spojitě fáze v geometricky složitém prostředí využívá pokročilých nástrojů fluidní mechaniky. Zahrnutí suspendovaných částic do řešení vyžaduje respektování všech významných transportních mechanismů. Popis transportu suspendovaných částic je dále komplikován interakcí suspendovaných částic s pevnými povrchy, kde může docházet k odrazu, dočasné nebo trvalé depozici. Částice dočasně deponované na pevném povrchu mohou být za jistých podmínek znovu rozptýleny ve spojitě fázi, což může výrazně ovlivnit konečnou koncentraci suspendovaných částic.

Z výše uvedeného výčtu je zřejmé, že řešení rozptylu suspendovaných částic představuje specifický problém značně odlišný od řešení rozptylu plynných emisí a vyžaduje vzhledem ke své aktuálnosti zvýšenou pozornost.

3.1 POPIS PROUDĚNÍ VZDUCHU

Přesnost řešení proudového pole přízemní části atmosféry rozhodujícím způsobem ovlivňuje přesnost popisu transportu suspendovaných částic. Pro korektní řešení proudového pole je nezbytné sestavit řešitelnou soustavu rovnic, která chování tekutiny jednoznačně popisuje.

Pohybové rovnice

Pro řešení turbulentního proudového pole využíváme Navierovy-Stokesovy rovnice vyjadřující silovou rovnováhu na elementu tekutiny (1). Zapsaná soustava rovnic popisuje chování tekutiny v případě nestlačitelného, turbulentního proudění. Uvedené rovnice jsou plně využitelné při řešení

proudění vzduchu v přízemní části atmosféry. Členy v závorkách na pravé straně rovnice (1) představují dodatečná napětí působící na element kapaliny. Tyto členy jsou nazývány Reynoldsova napětí. Reynoldsova napětí zahrnují do řešení vliv turbulence, který je popisován různými matematickými modely.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \nabla^2 \bar{u} - \left(\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \quad (1a)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \nabla^2 \bar{v} - \left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \quad (1b)$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \nabla^2 \bar{w} - \left(\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right) \quad (1c)$$

Společným znakem běžně užívaných modelů turbulence je zavedení turbulentní viskozity μ_t . Narozdíl od laminární viskozity μ , která představuje fyzikální vlastnost dané tekutiny, turbulentní viskozita μ_t je vlastnost toku látky a udává, jak intenzivní výměna hybnosti se uskutečňuje pomocí turbulentních vírů. Reynoldsova napětí jsou pak podle Boussinesqovy hypotézy vyjádřena vztahem

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \overline{\rho u'_k u'_k} \quad (2)$$

Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity je další rovnicí nezbytnou pro popis proudění. Z fyzikálního hlediska vyjadřuje zákon zachování hmoty

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (3)$$

Model turbulence

Modely turbulence nám poskytují vztahy pro řešení Reynoldsova napětí a turbulentního přenosu skalární veličiny. Pro popis vlastností turbulentního proudu se používají diferenciální nebo algebraické rovnice. Speciálním případem jsou pak modely, které se používají k popisu mezní vrstvy podél stěn. Všeobecně nejpoužívanější je dnes velmi dobře známý k - ε model [3], který zavádí transportní rovnice pro turbulentní energii k a pro hodnotu její disipace ε . Rovnice pro kinetickou energii turbulence v případě ustáleného nestlačitelného proudění v izotermním poli má tvar

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t P - \rho \varepsilon + S_k \quad (4)$$

kde k představuje kinetickou energii turbulence, ε je její disipace, P vyjadřuje produkci kinetické energie turbulence způsobenou smykovým a normálovým napětím, S_k je dodatečný člen zahrnující produkci kinetické energie turbulence a μ_{eff} je efektivní viskozita daná vztahem

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (5)$$

Rovnice pro disipaci kinetické energie má tvar

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}. \quad (6)$$

Hodnota turbulentní viskozity je určena ze vztahu

$$\mu_t = C_\mu f_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (7)$$

Použité modelové konstanty [4] nabývají hodnot $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, f_μ je dodatečný člen určený ze vztahu

$$f_\mu = e^{\left(\frac{-3.4}{\left(1 + \frac{R_t}{50}\right)^2} \right)}. \quad (8)$$

3.2 TRANSPORT SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC

Pohyb suspendovaných částic v atmosféře je ovlivněn řadou transportních mechanismů, které různou měrou ovlivňují výslednou disperzi částic. Pomineme-li vliv deště a kontakt s povrchem jiného tělesa, hovoříme o transportních mechanismech ovlivňujících pohyb částic v neomezeném prostoru. V takovém případě může být transport částic ovlivněn následujícími mechanismy:

- advektivní transport,
- turbulentní difúze,
- Brownova difúze,
- působení vnějších sil,
- působení setrvačných sil,
- forézní mechanismy.

Pouze v ojedinělých případech je nutné uvažovat všechny uvedené mechanismy transportu společně. Ve většině případů jsou uvažovány pouze mechanismy s dominantním vlivem na transport částic a vliv ostatních mechanismů se zanedbává. Advektivní mechanismus tvoří základ transportních mechanismů a musí být zahrnut v matematickém popisu vždy. Turbulentní přenos je nutné uvažovat vždy, pokud se nejedná o striktně laminární proudění. Sedimentační rychlost vyvolaná působením gravitačního pole je významná u částic větších jak $0,5 \mu\text{m}$, u částic menších je možné její hodnotu zanedbat. Brownova difúze hraje významnou roli při transportu velmi malých částic s rozměrem pod $0,2 \mu\text{m}$, u částic větších rozměrů se prakticky neprojevuje. Působení setrvačných sil je uvažováno pouze v případech, kdy proud vzduchu mění náhle svůj směr a částice mohou dosedat na blízký povrch. Působení elektrického pole a forézních mechanismů není pro běžný popis disperze suspendovaných částic v atmosféře využíváno.

Matematické vyjádření hmotnostních toků částic vyvolaných jednotlivými mechanismy je dále uvedeno pro nestlačitelné proudění, které je dominantně užíváno pro modelování lokálních dějů v přízemní vrstvě atmosféry.

Advektivní transport

Advektivní mechanismus popisuje přenos suspendovaných částic unášených pohybujícím se vzduchem. Rozhodující pro tento přenos je rychlost a směr proudění vzduchu. U suspendovaných částic je zvykem používat vyjádření hmotnostní koncentrace c . Hmotnostní tok částic procházejících jednotkovou plochou ve směru i vyvolaný advektivním přenosem je možno zapsat s využitím hmotnostního podílu částic w nebo hmotnostní koncentrace částic c ve tvaru

$$J_{Ai} = \rho w u_i = c u_i . \quad (9)$$

Turbulentní difúze

Turbulentní proudění je charakterizováno všesměrovým přenosem. Toto chování je způsobeno přítomností velkého množství vírů, jejichž rotace umožňuje prostorový přenos hmoty. Hmotnostní tok suspendovaných částic způsobený turbulentní difúzí závisí na gradientu koncentrace suspendovaných částic a turbulentních charakteristikách proudu. Hmotnostní tok suspendovaných částic jednotkovou plochou je v tomto případě vyjádřen s využitím turbulentní difuzivity κ ve tvaru

$$J_{Ti} = -\rho \kappa \frac{\partial w}{\partial x_i} = -\kappa \frac{\partial c}{\partial x_i} . \quad (10)$$

Brownova difúze

Pohyb velice malých částic je ovlivněn Brownovou (molekulární) difúzí. Hmotnostní tok částic závisí stejně jako v předešlém případě na gradientu koncentrace částic a difuzivitě. Směr toku částic je orientován z místa vyšší koncentrace do místa s nižší koncentrací. Matematické vyjádření hmotnostního toku částic jednotkovou plochou za jednotku času je dáno Fickovým zákonem

$$J_{Bi} = -\rho D_p \frac{\partial w}{\partial x_i} = -D_p \frac{\partial c}{\partial x_i} , \quad (11)$$

kde difuzivitu suspendovaných částic D_p vyjadřujeme [5]

$$D_p = \frac{k_B T}{6\pi\mu d_p} \left[2 + \frac{10^{-4}}{pd_p} \left(12,64 + 4,02e^{-1095pd_p} \right) \right] . \quad (12)$$

Působení setrvačných sil

Setrvačné síly působí na suspendované částice vždy při změně směru nebo rychlosti proudu vzduchu. Při užití Eulerova řešení se setrvačné síly zanedbávají a pohyb suspendovaných částic se ztotožňuje s pohybem vzduchu. Lagrangeovo řešení sleduje detailně setrvačné síly působící na částici a poskytuje detailní popis výsledné trajektorie částic. Při řešení je využívána pohybová rovnice ve tvaru

$$m_p \cdot \frac{\partial v_p}{\partial t} = \frac{3\pi\mu d_p u}{C_c} . \quad (13)$$

Vliv setrvačných sil získává na významu při obtékání překážek, kde může zapříčinit kontakt částice s povrchem překážky.

3.3 DEPOZICE ČÁSTIC

Depozicí částic nazýváme děj, kdy dojde k odloučení částice ze vzduchu v důsledku kontaktu částice s povrchem tuhé nebo kapalné fáze. Pokud částice není schopna na povrchu setrvat (např. hladká vertikální stěna), jedná se o kontakt označovaný jako odraz.

Vertikální transport suspendovaných částic je obecně ovlivněn vertikální složkou rychlosti proudění vzduchu, pádovou rychlostí částic, turbulentní difúzí a Brownovou difúzí [6]. V blízkosti povrchu je možné normálovou složku rychlosti proudění vzduchu zanedbat. Pro vertikální tok částic je v tomto případě možno zapsat

$$J_v = \kappa \frac{\partial c}{\partial z} + D_p \frac{\partial c}{\partial z} + v_s c. \quad (14)$$

Hmotnostní tok deponujících částic je pro potřeby matematického popisu praktické vyjádřit s využitím rychlosti depozice v_d ve tvaru

$$J_d = v_d c. \quad (15)$$

Rychlost depozice zahrnuje transportní vlastnosti celé vrstvy vzduchu nacházející se mezi povrchem a pozicí známé koncentrace suspendovaných částic.

Vegetace v našich podmínkách pokrývá rozhodující část povrchu terénu a sehrává velmi důležitou roli v procesu depozice suspendovaných částic. Svoji přítomností silně ovlivňuje proudění v mezní vrstvě u povrchu terénu a velkou plochou listů přispívá k depozici částic ještě nad zemským povrchem. V městských oblastech s hustou zástavbou představují zatravněné plochy často jedinou možnost trvalého odloučení částic přítomných v ovzduší. Většina matematických modelů používaných při řešení transportu suspendovaných částic využívá pro popis depozice na povrchu pokrytém vegetací experimentálně stanovené rychlosti depozice [7]. Obecně platí, že s rostoucí výškou vegetačního pokryvu se rychlost depozice zvětšuje.

Účinnost zachycení částic na povrchu vegetace při vzájemném kontaktu je možno považovat za stoprocentní pouze v případech mokrého nebo lepivého povrchu. V ostatních případech je účinnost zachycení snížena vlivem odrazů částic [8], [9]. Velmi malé částice (do 1 μ m) jsou zachytávány s vysokou účinností na jakémkoliv typu povrchu. Opačným případem jsou částice větší než 5 μ m, které jsou charakteristické častými odrazy na všech neadhezivních plochách [10].

3.4 RESUSPENZE ČÁSTIC

V závislosti na místních podmínkách mohou částice dosedající na povrch buď na tomto povrchu setrvat trvale, anebo jsou vlivem intenzivního proudění vzduchu znovu zvednuty z povrchu a opětovně rozptýleny v přízemní vrstvě atmosféry. Zda dojde k zvednutí částice z povrchu je rozhodujícím způsobem ovlivněno místním prouděním, které musí částici „strhnout“ působením tlakových a třecích sil. Teoretické odvození velikosti mezní rychlosti, při které dochází ke vzhledu usazených částic, je velice nesnadné vzhledem ke složitosti proudění v mezní vrstvě nad povrchem. Z tohoto důvodu jsou pro stanovení mezní rychlosti používány empirické vztahy formulované na základě výsledků provedených experimentů.

Poměr síly působící na usazenou částici svisle vzhůru F a tíhové síly působící na částici v opačném směru G je označován jako parametr sekundární emise prachu C_1 .

$$C_1 = \frac{F}{G} = \frac{3\pi \nu \rho \cdot u_*}{C_2 \cdot \rho_p \cdot g \cdot d_p^2} + \frac{C_3 \rho \cdot u_*^2}{C_2 \cdot \rho_p \cdot g \cdot d_p}. \quad (16)$$

Hraniční podmínkou je hodnota parametru $C_1 = 1$, kdy se síly F a G nacházejí v rovnováze. Pro hodnoty $C_1 < 1$ k resuspenzi nedochází, pro $C_1 > 1$ k resuspenzi částic dochází.

Pokud nad povrchem s jistým množstvím usazených prachových částic dojde ke zvýšení rychlosti proudění a parametr sekundární emise prachu překoná výrazně hodnotu 1, dochází

v případě náhlého poryvu větru ke zvednutí veškerých usazených částic během krátkého časového intervalu. Pokud dojde pouze k nepatrnému překonání hraniční hodnoty parametru sekundární emise, dochází k postupnému odnášení částic z povrchu.

3.5 POUŽITÝ SOFTWARE StarCD

Pro modelování disperze suspendovaných částic bylo využito komerčního software StarCD, který představuje špičkový modelový nástroj využívající metodu kontrolních objemů. Jeho nasazení nachází uplatnění při řešení obecných problémů popisu proudění, přenosu tepla a hmoty. StarCD umožňuje doplňovat základní předdefinované rovnice vlastními doplňky zapsanými v jazyce Fortran.

Matematický popis použitý v programovém balíku StarCD vychází z bilance na objemových elementech, která je popsána pro obecný případ neustáleného proudění stlačitelné tekutiny. Formální zápis použité obecné rovnice zákonu zachování hybnosti, energie a hmoty v třírozměrném prostoru má tvar

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j}) + S_\Phi, \quad (17)$$

kde Φ je obecná proměnná veličina (rychlost, teplota, koncentrace) a S_Φ obecný zdrojový člen. Členy na levé straně rovnice (17) jsou označovány jako akumulací a konvektivní, na pravé straně rovnice pak difúzní a zdrojový.

Pohybové rovnice jsou z rovnice (17) získány dosazením složky rychlosti u_i za obecnou veličinu Φ a zdrojový člen S_Φ obsahuje v tomto případě tlakový člen

$$S_\Phi = -\frac{\partial p}{\partial x}. \quad (18)$$

Rovnici kontinuity získáme z rovnice (17) dosazením $\Phi = 1$, $\Gamma = 0$ a $S_\Phi = 0$.

Prostor zahrnutý v matematickém modelu je popsán soustavou parciálních diferenciálních rovnic, která je řešena numericky po zadání příslušných okrajových a počátečních podmínek. Vlastní řešení je realizováno jako diskrétní na síti objemových elementů, které byly použity při „stavbě“ modelu. Klasickou diferenční metodou přechodu od diferenciálních rovnic k diskrétnímu řešení (diskretizace) je nahrazení parciálních derivací diferenčními podíly na jednotlivých objemových elementech. Takto získaná soustava diskretizovaných rovnic je následně numericky řešena iteračním procesem.

4 REALIZAČNÍ ČÁST

Aktivity vykonané autorem v uplynulých letech byly zaměřeny na vývoj a testování numerických modelů, které umožňují věrný popis disperze suspendovaných částic generovaných dopravou v městské zástavbě a jejich využití pro objasnění zákonitostí transportu suspendovaných částic v městských oblastech. Pro studium šíření prachových částic pomocí numerického modelování byly vybrány vhodné oblasti městské zástavby.

První směr vývoje byl zaměřen na poznání chování částic v blízkosti zdrojů částic, konkrétně v blízkosti komunikace s intenzivním pohybem automobilů, uzavřených v městské zástavbě. Model vybrané lokální oblasti městské zástavby umožnil sledovat šíření částic od zdrojů do blízkého okolí a detailně popsat děje, jako je deponice a následná resuspenze částic, které jsou v modelech větších měřítek obtížně postihnutečné.

Druhý směr reagoval na nutnost popsat zákonitosti šíření částic v rozsáhlých městských oblastech vzhledem k velmi dlouhé době setrvání částic v přízemní části atmosféry. Zde již nebyl kladen důraz na detailní popis disperze částic v blízkosti všech zdrojů, ale pozornost byla zaměřena na popis transportu částic mezi jednotlivými oblastmi městské aglomerace.

4.1 TRANSPORT SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC V LOKÁLNÍ MĚSTSKÉ OBLASTI

Jako vhodná oblast lokálního modelu byla vybrána ulice Kotlářská a její okolí, která se nachází v centrální části města Brna. Ulice Kotlářská je součástí městského dopravního okruhu, čímž je dána vysoká hustota provozu v této lokalitě. Detailní pohled na řešenou oblast (obr. 4.1) ukazuje křížení uličních kaňonů v této oblasti. Budovy umístěné podél ulic vytvářejí uzavřené dvory, které jsou částečně zaplněny zelení. Vozovka v ulici Kotlářské je rozdělena do čtyř jízdních pruhů, dva pro každý směr jízdy.



Obr. 4.1 Detail lokální modelované oblasti

4.1.1 Tvorba modelu

Vybraná oblast městské zástavby byla zpracována do podoby matematického modelu. Pozornost byla věnována detailnímu popisu ulice Kotlářské. V této ulici byla věrně zachycena poloha vozovky a její rozdělení do čtyř jízdních pruhů. Objemové elementy, které se nacházely v místech pohybu automobilů, byly využity pro následné zadání vlivu pohybujících se automobilů. Pro sestavení modelu bylo využito cca 1 mil. kontrolních objemů. Nad střechami budov byla do řešení zahrnuta 200 m vysoká vrstva vzduchu. Vhodný model turbulence použitelný pro co nejuvěrnější

popis pohybu prachových částic byl volen na základě zkušeností získaných z dřívějších studií řešících rozptyl emisí v městské zástavbě [11]. Pro řešení rozptylu v modelové oblasti byl použit k-ε RNG model turbulence.

4.1.2 Okrajové podmínky

Vytvořený matematický model reprezentoval pouze část skutečné oblasti zastavěné budovami. Omezení související s velikostí modelu vedla k nutnosti používat na hranicích vhodné okrajové podmínky, které věrně postihují vliv navazující oblasti. Na horní hranici řešené oblasti byla použita okrajová podmínka „stěna bez tření“. Odpovídající parametrická drsnost byla zadána na plochy tvořící povrch terénu. Na bočních stěnách modelu byly otestovány dva odlišné přístupy zadání okrajových podmínek.

Rychlostní profil

První přístup předepisoval známý rychlostní profil větru na stěny modelu, kterými vzduch vstupoval do sledované oblasti. Ostatním stěnám byla přiřazena tlaková okrajová podmínka. Tento přístup umožňuje zahrnout vliv okolní zástavby a vegetace v místě hranice oblasti. Vzdušná masa definovaná okrajovou podmínkou se pohybuje nad terénem s parametrickou drsností k budovám zahrnutým detailně v modelu. Vliv terénu a překážek deformuje původní rychlostní profil. Se zvětšující se vzdáleností od hranice modelu narůstá deformace zadaného rychlostního profilu.

Rychlostní vrstva

Druhý přístup pro zadání okrajových podmínek využíval známé rychlosti větru nad střechami budov ve sledované oblasti. V matematickém modelu byla vybrána vrstva vzduchu ve výšce odpovídající pozici měřicího anemometru. V této vzdušné vrstvě byla zadána rychlost a směr větru ve shodě s údaji z provedeného měření. Bočním stěnám modelu byla přiřazena tlaková okrajová podmínka. Tento způsob zadání okrajových podmínek udržuje rychlost větru nad sledovaným uličním kaňonem ve shodě s měřenou rychlostí a směrem větru. Rychlostní profil větru v přízemní vrstvě se vytváří vlivem aktuální geometrie a parametrické drsnosti povrchu.

Porovnání obou přístupů zadání okrajových podmínek bylo provedeno testovací sérií výpočtů. Korektnější řešení rychlostního pole bylo na lokální modelové oblasti opakovaně dosaženo s použitím přístupu „rychlostní vrstvy“. Při řešení rozsáhlejších oblastí však tento způsob zadání okrajových podmínek vytvářel nereálná rychlostní pole a korektnější výsledky byly získány předepsáním rychlostního profilu větru přímo na stěnách modelové oblasti.

4.1.3 Zahrnutí vlivu pohybujících se automobilů

Rychlostní pole v řešené oblasti je utvářeno vlivem působení zadaného větru a v blízkosti komunikací se přidává vliv pohybujících se automobilů. Vliv automobilů je pro řešení prostoru nad vozovkou a v těsném okolí komunikace ve většině případů dominantní. Zahrnutí vlivu pohybujících se automobilů do řešení je realizováno ve dvou krocích:

- zahrnutí silového působení automobilů na vzduch,
- zahrnutí produkce kinetické energie turbulence.

Silové působení

Silové působení vzduchu na jedoucí automobil je popsáno odporovou silou

$$\vec{F}_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_p |\vec{U}_\infty - \vec{U}_{car}| (\vec{U}_\infty - \vec{U}_{car}) . \quad (19)$$

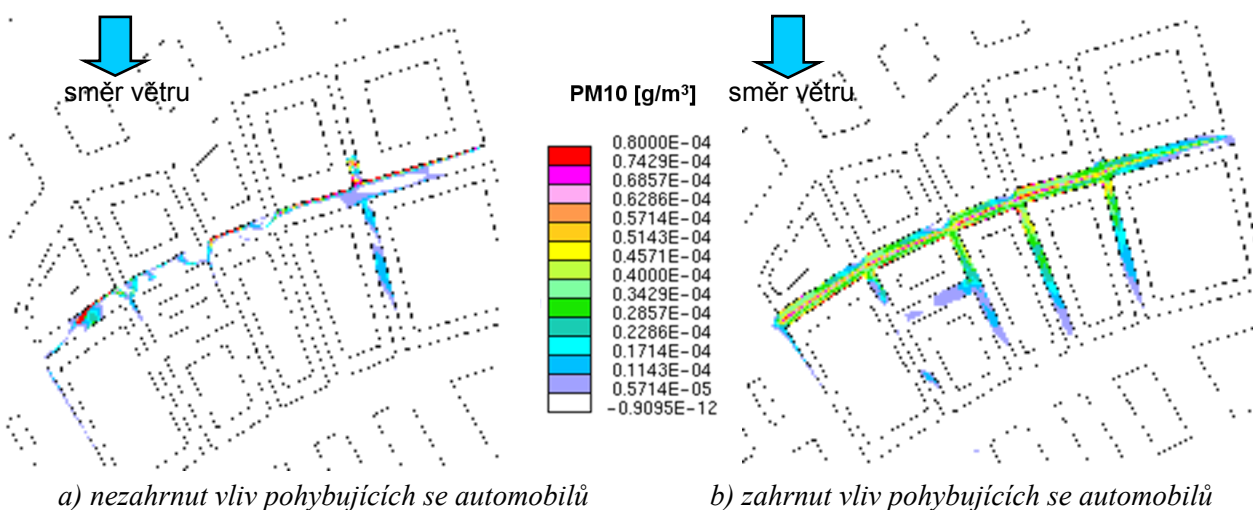
Reakcí k odporové síle je síla, kterou automobil působí na vzduch. Toto působení zahrneme do výpočtu formou objemové síly působící v místech, kterými automobil projíždí.

Produkce kinetické energie turbulence

Pohybující se objekty indukují ve svém okolí dodatečnou kinetickou energii turbulence, která je do rovnice (4) zahrnuta pomocí členu S_k . Ze studií [12], [13] a [14] vyplývá, že turbulence vzniká převážně v úplavu za automobilem. Proto jsou dodatečné zdroje kinetické energie turbulence zahrnuty podél trajektorie automobilu do kontrolních objemů využitých pro zadání silového působení. Pro výpočet dodatečné produkce kinetické energie turbulence je dle [13] využíván vztah

$$S_k = C_{car} \rho (U_{car} - U_{\infty})^2 \dot{Q}_{car} \quad (20)$$

Zahrnutí vlivu pohybujících se automobilů do výpočtu se ukázalo jako nezbytné pro korektní popis disperze suspendovaných částic produkovaných silniční dopravou a pro věrné postižení depozice a resuspenze v blízkém okolí vozovky. Detailní studie vlivu pohybujících se automobilů na proudové pole v uličním kaňonu prokázala výrazný vliv produkce kinetické energie turbulence na rychlost otáčení příčného víru vytvořeného v prostoru uličního kaňonu.



Obr. 4.2 Vypočtená koncentrační pole částic PM10 získaná v horizontálním řezu vedeném 1,5 m nad povrchem

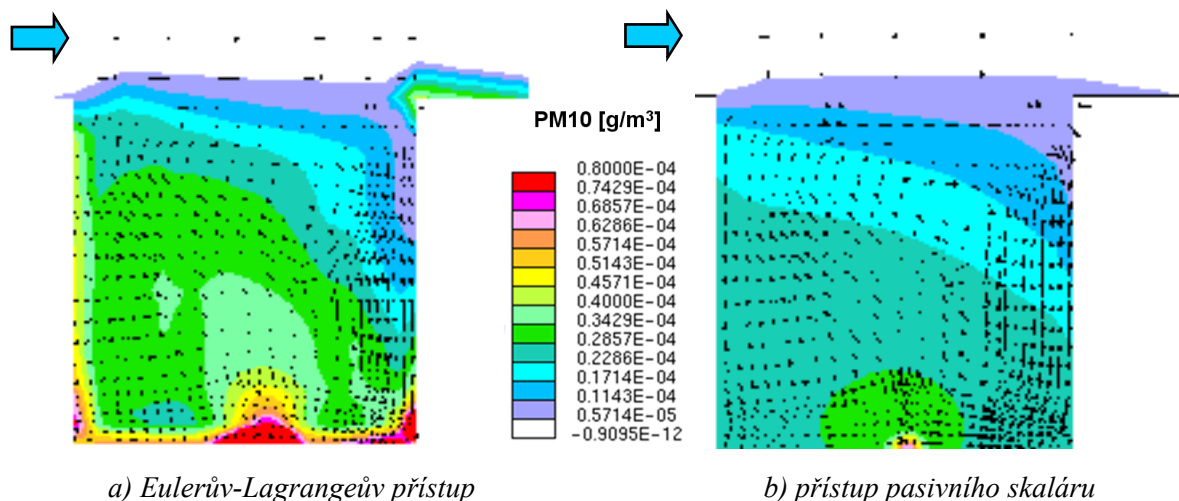
4.1.4 Porovnání Eulerova-Lagrangeova přístupu s přístupem pasivního skaláru

Pro řešení pohybu suspendovaných částic ve vzdušné masě je možné využít dvou odlišných matematických přístupů, jejichž nasazení použité numerické modelování umožňuje. První přístup řeší skutečnou odporovou sílu působící na částici v každém okamžiku pohybu v atmosféře. Tento přístup je nazýván jako Eulerův-Lagrangeův, neboť interakce vzduchu a částice se plně promítá do řešení Eulerovy a Lagrangeovy rovnice. Prioritně je tento přístup využíván pro zahrnutí aerodynamických sil větších objektů, u kterých je tvarový odpor výrazně větší než odpor třecí. Druhým přístupem je využití pasivního skaláru. Tento přístup neřeší silovou interakci mezi tekutinou a pevnou fází, ale popisuje šíření částic od zdroje pomocí difúzního a advektivního mechanismu. Přístup je vhodný pro popis šíření velmi malých objektů, u kterých je třecí odpor výrazně větší než odpor tvarový.

Eulerův-Lagrangeův přístup detailně řeší interakci mezi tekutinou a částicemi pevné fáze. Řešení použité v software StarCD uvažuje s kulovým tvarem částic a odlišné tvary musí být zohledněny pomocí odpovídajícího aerodynamického průměru. Zadání vyžaduje informace o průměru

a hustotě částic. Výsledná aerodynamická síla je řešena na základě vyjádření relativní rychlosti mezi tekutinou a částicí. Pohyb částic je sledován a v konečném výsledku umožňuje zobrazovat trajektorie částic. Vzhledem k tomu, že při vlastním řešení je nutné řešit rovnice popisující proudění kontinuální fáze a zároveň rovnice popisující pohyb částic, je zřejmé, že výpočet se stává náročnější. Tato náročnost se projevuje delší dobou běhu výpočtu a značně velkými výsledkovými soubory. Předností tohoto přístupu je možnost nastavení interakce tuhé částice při kontaktu se stěnou. Zde může být použita podmínka přilepení částice, dokonalého odrazu, případně libovolně modifikovaného odrazu pro získání co nejuvěrnějšího popisu chování částic. Vliv proudění turbulentního charakteru je do výpočtu zahrnut pomocí hodnoty kinetické energie turbulence. Z tohoto parametru je určena velikost flukтуаční složky rychlosti tekutiny, které je přiřazena orientace získaná náhodným generováním. Výsledná rychlost tekutiny je tedy vypočtena jako součet ustálené a flukтуаční složky. Řešení umožňuje vyloučit vliv flukтуаční složky, takové řešení potom nezahrnuje turbulentní disperzi částic.

Přístup pasivního skaláru nezahrnuje do řešení konkrétní aerodynamické charakteristiky. Řešení neuvažuje s působením částic na tekutinu, což řešení značně zjednodušuje. Difúzní transport umožňuje postihnout jak molekulární, tak turbulentní difúzi, což řešení výrazně přibližuje k realitě. Advektivní transport plně souvisí s vypočteným lokálním prouděním. Jelikož částice v tomto přístupu nejsou modelovány jako reálné částice, nejsou při řešení proudového pole řešeny jejich trajektorie. Použitý software však umožňuje na vyřešeném rychlostním poli provést dodatečné trasování (v rámci postprocesingu), které nemůže ovlivnit rychlostní pole, ale umožňuje sledovat unášení částic v proudu tekutiny. Přístup pasivního skaláru neumožňuje volbu různých typů interakce částice-stěna. Částice se v řešení chovají shodně jako molekuly kontinuální fáze a jejich pohyb může být interpretován jako dokonalý odraz. Z tohoto důvodu je nutné pro simulaci depozice a resuspenze vhodně upravit standardní programové řešení tak, aby byla depozice a resuspenze postížena odpovídajícím zdrojovým členem.



Obr. 4.3 Koncentrační pole suspendovaných částic PM10 v příčném řezu uličního kaňonu

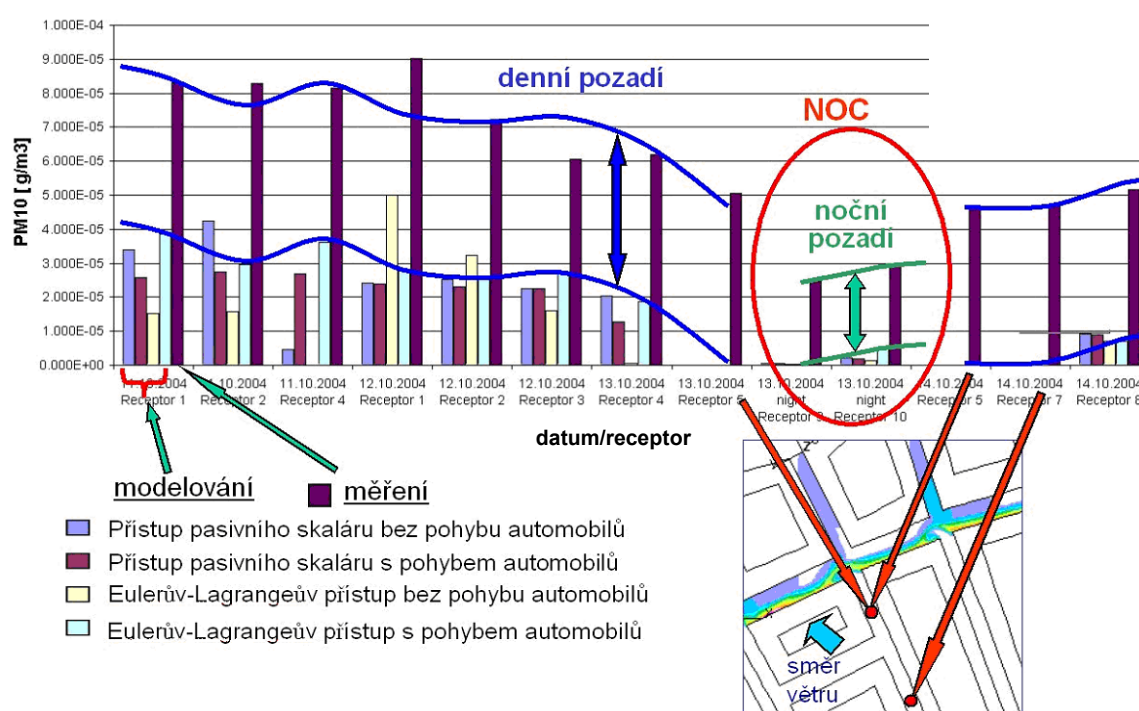
Porovnání výsledků dosažených při užití uvedených přístupů ukazuje vyšší koncentrace částic PM10 v blízkosti liniového zdroje a těsně nad povrchem vozovky při užití Eulerova-Lagrangeova přístupu popisu pohybu částic. Tato skutečnost souvisí s korektnějším zahrnutím vlastní hmotnosti částic v porovnání s přístupem pasivního skaláru. V jisté vzdálenosti od liniového zdroje oba přístupy poskytují téměř shodné koncentrace částic, což potvrzuje oprávněnost užití přístupu pasivního skaláru při řešení rozsáhlejších území. Odchytky výsledků dosažených oběma přístupy jsou zanedbatelné s ohledem na míru nejistoty zadávané produkce částic. Výrazně vyšší rychlosti

výpočtu dosahované při užití přístupu pasivního skaláru a jeho využitelnost při řešení oblastí libovolné velikosti ho předurčují pro řešení obecných úloh transportu suspendovaných částic.

4.1.5 Srovnání výsledků modelování a měření

Výsledky dosažené výpočtem na matematickém modelu byly porovnány s hodnotami získanými z provedených měření. Pro vyhodnocení byly využity koncentrace částic PM10 získané z výpočtů uvažujících pouze částice produkované dopravou ve sledovaném uličním kaňonu. Vliv lokálního pozadí nebyl do výpočtu zahrnut a bylo nutné tuto skutečnost zohlednit v průběhu vyhodnocování výsledků.

Vzhledem ke skutečnosti, že pro každý den měření byly provedeny výpočty s využitím dvou různých popisů pohybu prachových částic a se zahrnutím i vyloučením vlivu dopravy, byly získány pro každý den čtyři různé výsledky řešení. Výsledky všech vypočtených variant jsou současně s naměřenými hodnotami zobrazeny ve sloupcovém grafu na obr. 4.4.



Obr. 4.4 Porovnání hodnot koncentrací prachových částic získaných výpočty a měřením

Porovnání vypočtených výsledků a naměřených hodnot umožnilo formulovat následující závěry:

- řešení provedená bez zahrnutí vlivu pohybujících se automobilů poskytují výsledky bez zřejmé závislosti k naměřeným hodnotám,
- řešení provedená se zahrnutím vlivu pohybujících se automobilů vykazují trend odpovídající průběhu naměřených hodnot,
- z prezentovaných výsledků nabízí nejvěrnější vystižení tohoto trendu Eulerův-Lagrangeův přístup se zahrnutím pohybu automobilů.

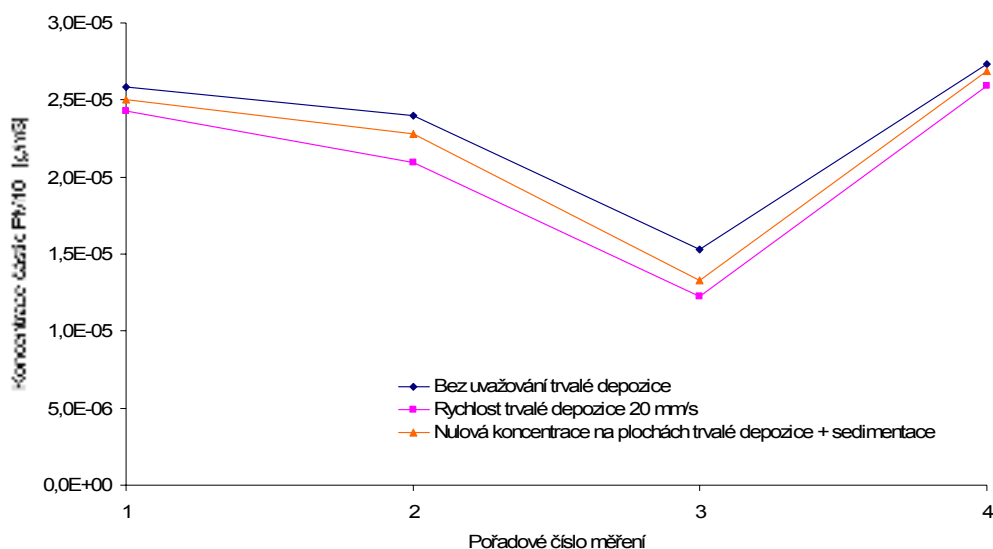
Hodnoty dosažené s využitím Eulerova-Lagrangeova přístupu a zahrnutím vlivu pohybu automobilů byly využity pro vytvoření křivky umožňující přehlednější srovnání průběhu vypočtených koncentrací, viz obr. 4.4. Posunutím této křivky vzhůru do polohy odpovídající hodnotám koncentrací získaných z měření získáváme druhou křivku vyobrazenou v obr. 4.4. Vzdálenost mezi křivkami vyjadřuje koncentraci pozadí, která není ve vypočtených hodnotách zahrnuta. V pravé části grafu jsou pro některé situace vyobrazeny pouze hodnoty koncentrací získané z měření. Výpočtem

byly pro tyto situace získány nulové hodnoty koncentrací prachových částic. Jak je znázorněno ve výřezu obr. 4.4, nacházejí se příslušné kontrolní body v místech neovlivněných částicemi generovanými v uličním kaňonu vzhledem k příslušné orientaci vanoucího větru. Koncentrace naměřené v těchto bodech odpovídají koncentraci lokálního pozadí a korespondují se vzdáleností mezi sestrojenými křivkami.

Uvedeným porovnáním vypočtených a naměřených hodnot byla ověřena reálnost výsledků výpočtů dosažených při zahrnutí vlivu dopravy do matematického modelu. Oba testované přístupy popisu pohybu částic poskytují blízké hodnoty koncentrací. Popis bližší realitě je však umožněn při využití Eulerova-Lagrangeova přístupu.

4.1.6 Depozice částic na travnatých plochách

Zahrnutí depozice suspendovaných částic na travnatých plochách bylo otestováno s využitím standardních stěnových funkcí nabízených použitým software StarCD. Následně také s využitím experimentálně získané rychlosti depozice zadané prostřednictvím příslušných zdrojových členů. Provedené výpočty ukázaly, že stěnové funkce jsou použitelné pro sledování depozice částic na hladkých povrchových plochách, ale v případě depozice na travnatém povrchu poskytují výrazně podhodnocené hodnoty toku deponujících částic. Využití zdrojových členů zadaných v přízemní vrstvě kontrolních objemů umožňuje korektní postihu depozice na všech typech vegetačních pokryvů se známou hodnotou rychlosti depozice.

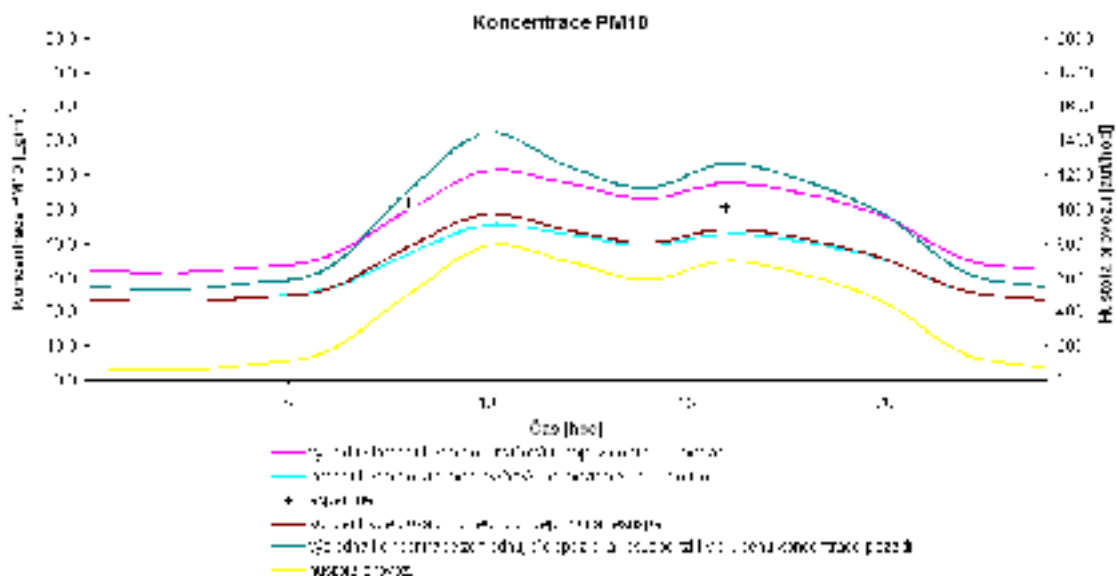


Obr. 4.5 Vypočtené střední koncentrace částic PM10 v prostoru uličního kaňonu

4.1.7 Stanovení denního průběhu koncentrací částic

Pro stanovení denního průběhu koncentrací suspendovaných částic v lokální modelové oblasti bylo využito výsledků výpočtů provedených pro situace minimálního a maximálního dopravního zatížení. Hlavním parametrem využitým pro stanovení denního průběhu koncentrací suspendovaných částic bylo dopravní zatížení, jehož časový průběh při stálých meteorologických podmínkách rozhodujícím způsobem ovlivňuje změny rychlostního pole a aktuální emise částic. Dopravní zatížení v průběhu dne kolísá mezi mezními stavy a jeho průběh byl určen na základě chodů dopravního zatížení [15]. Pro parametry závislé na aktuální hustotě provozu, kterými jsou: primární produkce částic, plocha dlouhodobé depozice a koncentrace prachových částic v ovzduší, je v prezentovaném přístupu uvažována lineární závislost v rozmezí hodnot ohraničených hodnotami z výpočtů mezních stavů.

Pro věrné vyjádření denního průběhu koncentrací suspendovaných částic v modelové oblasti bylo nutné zaměřit pozornost na korektní popis průběhu příspěvku dopravy a koncentrace lokálního pozadí. Vyhodnocení denního průběhu koncentrací suspendovaných částic PM10 v modelové oblasti zahrnovalo resuspenzi i dlouhodobou depozici v prostoru sledovaného uličního kařonu. Získaný průběh koncentrací vykazoval sníženou hodnotu koncentrace částic v nočních hodinách a její zvýšení v období vysoké hustoty provozu, viz obr. 4.6.

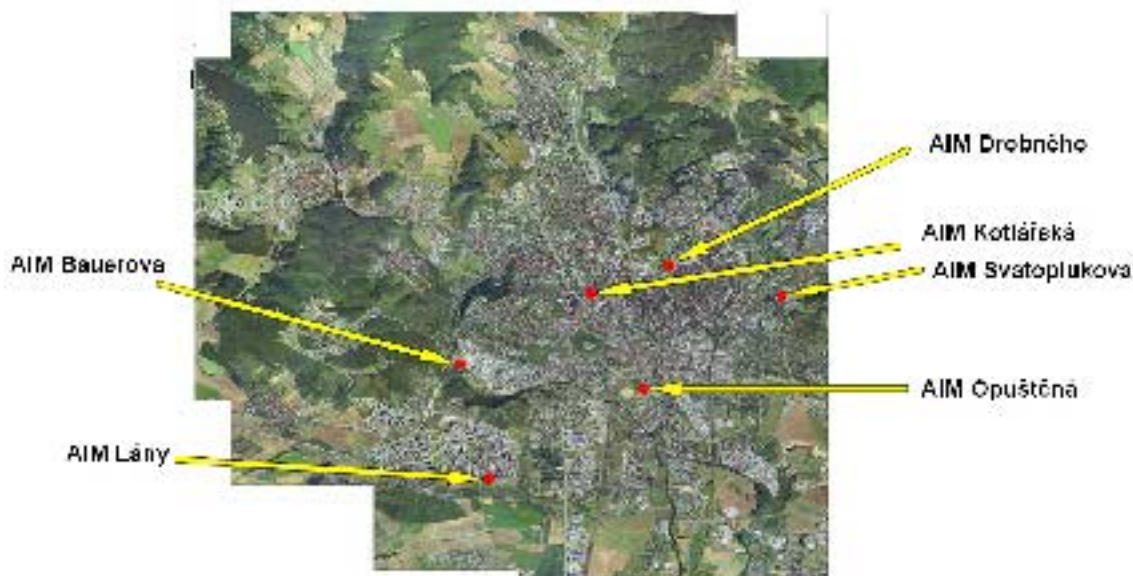


Obr. 4.6 Denní průběh koncentrací částic PM10 získaný výpočtem ze dvou mezních situací

Průběh výsledného koncentračního zatížení uličního kařonu získaný se zohledněním dlouhodobé depozice a resuspenze v příspěvku dopravy a průběhu koncentrace lokálního pozadí vykazuje intenzivní nárůst koncentrace částic v obdobích zvyšující se hustoty provozu. Maximální hodnota koncentrace suspendovaných částic PM10 byla získána v okamžiku ranní dopravní špičky ve shodě s provedeným měřením. Značně vysoké hodnoty koncentrace částic v uličním kařonu vykazuje získaný průběh v období odpolední dopravní špičky, pro kterou byly realizovaným měřením získány koncentrace podstatně nižší. Nadhodnocení koncentrace částic v období odpolední špičky se objevilo také při řešení průběhů koncentrací ostatních dnů měřicí kampaně. Nižší naměřené hodnoty odpoledních koncentrací částic v uličním kařonu byly prokazatelně vyvolány snížením koncentrace částic lokálního pozadí v odpoledních hodinách, za jehož nejpravděpodobnější příčinu jsou považovány fotochemické transformační procesy a intenzivní vymývání oblasti.

4.2 MODELOVÁNÍ ŠÍŘENÍ SUSPENDOVANÝCH ČÁSTIC V REGIONÁLNÍ OBLASTI

Oblast zahrnující většinu městských částí Brna a přilehlé okolí byla zpracována do podoby regionálního modelu. Poloha oblasti byla volena s ohledem na pozici plánovaných lokálních modelů, jejichž umístění je vhodné v centrální části regionálního modelu. Modelová oblast čtvercového půdorysu zahrnovala plochu 144 km² (12 × 12 km), viz obr. 4.7. Regionální model využil blokové řešení disperze suspendovaných částic, které vyžaduje definovat síť vhodně velkých pracovních oblastí, které slouží pro zadání emisních zdrojů a okrajových podmínek spojených s popisem charakteru povrchu. Vzhledem k značným rozměrům modelované oblasti a omezené velikosti řešitelných modelů nebylo možné popsat detailně geometrii všech překážek umístěných na povrchu terénu. Z tohoto důvodu byl vliv vegetace, budov a ostatních překážek zahrnut do řešení předepsáním vhodné aerodynamické charakteristiky povrchové terénní plochy, kterou představuje ekvivalentní drsnostní výška z_0 [16].

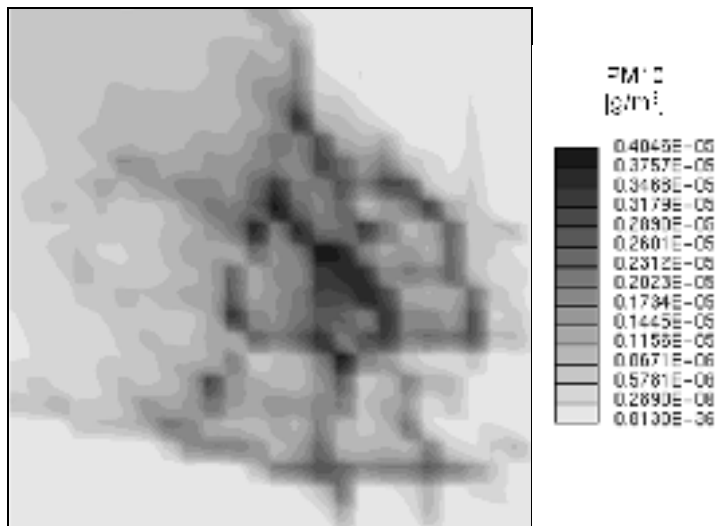


Obr. 4.7 Oblast regionálního modelu s naznačením poloh využitých měřicích stanic

Produkce částic silniční dopravou byla určena s využitím známého dopravního výkonu v jednotlivých pracovních oblastech a příslušných emisních faktorů. Depozice částic na povrchu pokrytém vegetací byla zadána pomocí zdrojových členů objemových elementů v přízemní vrstvě. Na základě zadaných parametrů byla na regionální oblasti vypočtena mapa koncentrací částic PM₁₀, která byla porovnána s naměřenou koncentrací pozadí lokální modelové oblasti. Vypočtené hodnoty ukázaly výrazné podhodnocení (50 %) skutečného koncentračního zatížení oblasti, což plně koresponduje s výsledky rozptylových studií provedených s použitím jiných modelových nástrojů (SYMOS, ATEM).



Obr. 4.8 Silniční komunikace zahrnuté v regionálním modelu



Obr. 4.9 Koncentrační pole částic 10µm ve výšce 3 m nad terénem, JV vítr 2 m/s

Podhodnocení vypočtených koncentrací je připisováno „nekvantifikované produkci“ částic, která souvisí s nezohledněnou resuspenzí, stavební činností a sprašovým charakterem půd ve sledované oblasti. Pro vytvoření mapy produkce částic v jednotlivých pracovních oblastech regionálního modelu byl použit inverzní přístup, který využil výpočtů na regionálním modelu společně se záznamy dlouhodobých měření koncentrací částic PM₁₀. Tímto způsobem byl získán přehled

o produkci částic v oblastech, které se nacházejí mezi body realizovaných dlouhodobých měření. Okrajové části modelu značně vzdálené od měřicích bodů není možno tímto způsobem korektně řešit a poskytují zkreslené údaje o místní produkci částic. Představený postup prezentuje nový způsob využití dlouhodobě měřených dat, která v současné době slouží pouze pro sledování překročení imisních limitů.

5 ZÁVĚREČNÉ SHRUTÍ

Cílem habilitační práce bylo zhodnotit možnosti využití numerického modelování založeného na metodě kontrolních objemů při řešení transportu suspendovaných částic v geometricky složitých územích. Na praktických úlohách bylo ověřeno, že použité numerické modelování umožňuje s dostatečnou přesností zahrnout do výpočtu detailní geometrii řešené oblasti a vliv pohybu automobilů. Matematický popis transportu suspendovaných částic postihl hlavní transportní mechanismy, kterými jsou advekce, molekulární a turbulentní difúze, působení tíhové a setrvačné síly. Depozice částic byla uvažována jako jeden z hlavních mechanismů odloučení částic z atmosféry. Pozornost byla dále věnována mechanismu možného opětovného rozptýlení dříve usazených částic (resuspenzi). Realizované výpočty poskytly dobrý přehled o možnostech a úskalích použitého numerického modelování. S ohledem na současný stav v oblasti modelových nástrojů pro řešení transportu suspendovaných částic v městských oblastech představuje numerické modelování založené na metodě kontrolních objemů nástroj umožňující nejkorektnější řešení tohoto problému. Dosažené výsledky přehledně prezentují možnosti numerického řešení transportu suspendovaných částic v městských oblastech a budou využity v navazujícím vývoji modelových nástrojů specializovaných na rozptyl suspendovaných částic. Stanovený cíl habilitační práce byl splněn ve všech formulovaných bodech.

6 SUMMARY

The main objective of the habilitation work was to evaluate possibilities of the numerical modelling, based on finite volumes method, for prediction of suspended particles dispersion in urban areas with complex geometry. Practical calculations verified possibilities of the numerical modelling, correct inclusion of the details of the studied domains geometry and influence of moving cars. The mathematical description of particle transport involved all main transport mechanisms, namely advection, molecular diffusion, turbulent diffusion, gravitational settling, and inertial force influence. The deposition process was considered as one of the most important mechanisms of particle elimination from the atmosphere. The re-suspension of once deposited particles was considered as well. The presented solutions provided a valuable overview of the strengths and weaknesses of particle dispersion modelling. The numerical modelling based on the finite volumes method represents the convenient tool for dispersion modelling of suspended particles in urban areas. The obtained results clearly demonstrate possibilities of numerical modelling and the conclusions will be applied in further investigation of the problem. The defined target of the habilitation work was successfully achieved in all specified points.

7 LITERATURA

- [1] ADAMEC, V.: *Pevné částice produkované dopravou: Průběžná zpráva o realizaci projektu COST633.003 v roce 2005*. Brno: CDV, 2005. 20 s.
- [2] *Nařízení vlády, kterým se stanoví imisní limity a podmínky a způsob sledování, posuzování, hodnocení a řízení kvality ovzduší*. Nařízení vlády č. 350/2002 Sb., Praha, 2002.
- [3] LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B.: *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England, 1972, p. 169.
- [4] *StarCD: methodology manual*. Adapco, USA, 2002.
- [5] CROWE, C.; SOMMERFELD, M.; TSUJI, Y.: *Multifase flow with droplets and particles*. Boca Raton, CRC Press, 1998, 1st ed. 471 p. ISBN 0-8493-9469-4.
- [6] GREGORY, P. H.; STEDMAN, O. J.: Deposition of air-borne Lycopodium spores. *Annals of Applied Biology*, 1953. vol.40, pp.651–674.
- [7] OULD-DADA, Z.: Dry deposition profile of small particles within a model spruce canopy. *Science of Total Environment*, 2002, vol. 286, no. 1, pp. 83–96.
- [8] CARTER, M. V.: Ascospore deposition in *Eutypa armeniacae*. *Australian Journal of Agriculture Research*, 1965, vol. 16, no. 5, pp. 825–836.
- [9] GREGORY, P. H.: *The Mikrobiology of the Atmosphere*, Leonard Hill, London, 1961.
- [10] CHAMBERLAIN, A. C.: The movement of particles in plant communities. *Vegetation and the Atmosphere*, 1975, vol.1, pp. 155–228.
- [11] POSPÍŠIL, J.; JÍCHA, M.; NIACHOU, K.; SANTAMOURIS, M.: Computational modelling of airflow in urban street canyon and comparison with measurements. *Int. J. of Environment and Pollution*, 2005, Vol. 25, Nos. 1/2/3/4, ISSN 0957-4352.
- [12] ESKRIDGE, R. E.; HUNT, J. C. R.: Highway modelling. Part I: Prediction of velocity and turbulence fields in the wake of vehicles. *J. of Applied Meteorology* 1979, vol.18, pp. 387–392.
- [13] SEDEFIAN, L.; RAO, S. T.; CZAPSKI, U.: Effects of traffic-generated turbulence on near-field dispersion. *Atmospheric Environment*, 1981, vol. 15, pp. 527–535.
- [14] SINI, J. F.; MESTAYER, P. G.: Traffic-induced urban pollution: A numerical simulation of street dispersion and net production. In *Proceedings of 22nd NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application*, 1997, Clermont-Ferrand, France.
- [15] NOVÁK, J.; BUBNÍK, J.; MACOUN, J.: *Výzkum, vývoj a implementace nových měřicích metod pro hodnocení znečištění ovzduší a využití v rámci legislativy ES*. Zpráva z řešení projektu VaV/740/2/02, Český hydrometeorologický ústav: Úsek čistoty ovzduší, 2003, Praha.
- [16] STULL, R. B.: *Boundary Layer Meteorology*, Kluwert Academic Publishers, 1990, ISBN 90-277-2768-6.
- [17] *Generel ovzduší*. Magistrát města Brna: Odbor životního prostředí. Brno, 2005.
- [18] BACHE, D.: Analysing particulate deposition to plant canopies. *Atmospheric Environment*, 1981, vol. 15, pp. 1759–1761.
- [19] BUBNÍK, J.; KEDER, J.; MACOUN, J.; MAŇÁK, J.: *SYMOS'9 – Metodická příručka pro výpočet znečištění ovzduší z bodových, plošných a liniových zdrojů*. MŽP, Praha, 1998.
- [20] CHAMBERLAIN, A.: The movement of particles in plant canopies. *Vegetation and the Atmosphere*, Academic Press, London, 1975, vol. 1, pp. 155–228.
- [21] ZITOUNY, O. D.; NASSER, M. B.: Resuspension of small particles from tree surfaces. *Journal of Atmospheric Environment*, 2001, vol. 35.
- [22] PECHAN: *Recommendation for Emission Factor Equation in AP-42: Paved road section*. Technical memorandum, US – Environment Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, USA. 1995.

- [23] MEASTAYER, G.; SINI J. F.: Pollutant Dispersion in the Street Canyons. In *Proceedings of Air Pollution 95*, 1995, Porto Carras, Greece.
- [24] ŠEBOR, G.; PÍŠA, V.; HORNÍČEK, K.; CHUDOBA, J.: *MEFA v.02 – Software pro výpočet emisních faktorů motorových vozidel*. Praha: VŠCHT (pro MŽP ČR), 2006.
- [25] DURING, I.; BACHLIN, W.; BAUM, A.; HAUSMANN, A.; LOHMEYER, A.: Emission Factor for Vehicle Induced Non Exhaust PM. In *Proceedings of 14th Symposium Transport and Air Pollution*, Graz, 2005, vol. I, pp. 382–390.
- [26] CSANADY, G.T.: *Turbulent Diffusion in the Environment*. Reidel, Dordrecht, Holland, 1973.
- [27] CHEMBERLAIN, A. C.: Transport of Lycopodium spores and other small particles to rough surfaces. *Proceedings of Royal Society of London*, 1967, Ser. A 296, pp. 45–70,
- [28] PETROFF, A.: Mechanistic Study of aerosol dry deposition on vegetated canopies, In *Proceedings of Ecorad 2004*, 2004, Aix en Provence.
- [29] GOEL, N. S.; STREBEL, D. E.: Simple beta distribution representation of leaforientation in vegetation canopies. *Agronomy Journal*, 1984, no. 76, pp. 800–802.
- [30] POLHAUSEN, E.; ANGEL, Z.: Integral boundary-layer Tudory. *Math. Mech.*, 1921, vol. 1, pp. 115–121.
- [31] BELOT, Y.; TAILLE, A.; DELMAS, J. L.: Numerical model of the dispersion of atmospheric pollutants in the presence of a plant canopy – Application to forest canopies. *Atmospheric Environment*, 1976, vol. 10, no. 2, pp. 89–98.
- [32] *EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 3rd edition [online]*. EEA Technical report No. 30, September 2004. Dostupný z WWW: <http://air-climate.eionet.europa.eu/reports>.
- [33] CADLE, S. H.; WILLIAMS, R. L.: Characterisation of tire emissions using an indoor test facility. *Rubber Chemistry and Technology*, 1979, vol. 51, no. 1, pp. 7–25.
- [34] RAUTERBERG; WULFF: Determination of emission factor for tyre wear particles up to 10 µm by tunel measurements. In *Proceedings of 8th International Symposium Transport and Air Pollution*, Graz, Austria, 1999.
- [35] MIGUEL, A. G.; CASS, G. R.; GLOVSKY, M.; Weiss, J.: Allergens in paved road dust and airborne particles. *Environmental Science and Technology*, 1999, Vol. 33, pp. 4159–4168.
- [36] DANNIS, M. L.: Rubber dust from the normal set of tires. *Rubber Chemistry and Technology*, 1974, vol. 47, pp. 1011–1037.
- [37] GARG, D. B.; Steven CADLE, H. S.; MULAWA, A. P.; GROBLICKI, P. J.: Brake Wear Particulate Matter emission. *Environ. Sci. Technol.*, 2000, vol. 34, no. 21, pp. 4463–4469.
- [38] SANDERS, P. G.; XU, N.; DALKA, T. M.; MARICQ, M. M.: *Airborne brake wear debris: Size Distributions, Composition and a Comparisou of Dynamometer ans Vehicle Tests*. Research Laboratory, Ford Motor Co., Michigan, USA, 2002.
- [39] FAUSER, P.: *Particulate Air Pollution with Emphasis on Traffic Generated Aerosols*. Risp National Laboratory, Roskilde, Denmark, , 1999, 150 p. ISBN-87-550-2532-3.
- [40] *Limity a referenční koncentrace*. Novela č. 429/2005 Sb. zákona č. 350/2002 Sb. ČR.