

Modelování šíření nebezpečných látek v městské zástavbě

Vladimír Fuka¹

¹Katedra meteorologie a ochrany prostředí, MFF, Univerzita Karlova v Praze

28. listopadu 2013



This work was possible thanks to the support of the project UNCE 204020/2012.

Model CLMM

- Charles University Large-Eddy Microscale Model — numerický model zaměřený na proudění v mezní vrstvě atmosféry v mikroměřítku.
- Kromě proudění se zaměřuje také na šíření znečišťujících příměsí.
- LES - large eddy simulation, simulace velkých vírů
- LES simuluje časový vývoj vírů popsatelných použitou sítí rovnicemi dynamiky tekutin
- Efekt menších vírů je aproximován.
- Fortran 2008, paralelizace: OpenMP, ve vývoji MPI.

Simulace velkých vírů

Filtrované pohybové (Navierovy-Stokesovy) rovnice

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial 2\nu \bar{S}_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \delta_{i3} \frac{g}{\theta_{\text{ref}}} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} + f \epsilon_{ij3} \bar{u}_j \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\theta} \bar{u}_j}{\partial x_j} = \kappa \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_j^2} + \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \overline{u_i u_j} \quad (3)$$

$$q_i = \bar{u}_i \bar{\theta} - \overline{u_i \theta} \quad (4)$$

Rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

Smagorinského model

Turbulentní viskozita

$$\tau_{ij} = 2\nu_t \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{ll} \delta_{ij} \quad (6)$$

$$q_i = \nu_{lt} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = \frac{\nu_t}{Pr_{sgs}} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \quad (7)$$

Nicoudův σ model

$$\nu_t = (C_\sigma \bar{\Delta})^2 D_\sigma \quad (8)$$

$$D_\sigma = \frac{\sigma_3(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_1^2}, \quad (9)$$

kde $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ jsou singulární čísla tenzoru $\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}$.

Metody diskretizace rovnic

- Projekční metoda s metodou Runge-Kutta 3. řádu a metodou Cranka-Nicolsonové 2. řádu.
- Metoda konečných objemů (FVM) na pravoúhlé posunuté síti.
- Advekce hybnosti: centrální difference 4. řádu
- Advekce skalárů: pozitivní metoda 3. řádu
- Ostatní členy: centrální difference 2. řádu

Modelové rovnice

$$\begin{aligned} \frac{\hat{u}_i^k - u_i^{k-1}}{\Delta t} = & -\gamma_k \left[\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} \right]^{k-1} - \rho_k \left[\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} \right]^{k-2} - \\ & - \alpha_k \frac{\partial p^{k-1}}{\partial x_i} + \frac{\alpha_k}{2} \left(\frac{\partial \tau_{ij}^k}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}^{k-1}}{\partial x_j} \right) + \alpha_k f_{ij3} u_j + \\ & + \gamma_k \delta_{i3} \frac{g}{\theta_{\text{ref}}} (\theta^{k-1} - \theta_{\text{ref}}) + \rho_k \delta_{i3} \frac{g}{\theta_{\text{ref}}} (\theta^{k-2} - \theta_{\text{ref}}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} = \frac{1}{\alpha_k \Delta t} \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_i} \quad (11)$$

$$u_i^k = \hat{u}_i^k - \alpha_k \Delta t \frac{\partial \varphi}{\partial x_i}, \quad (12)$$

$$p^k = p^{k-1} + \varphi - \frac{\alpha_k \Delta t v_t}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2}, \quad (13)$$

$$\frac{\theta^k - \theta^{k-1}}{\Delta t} = -\gamma_k \left[\frac{\partial \theta u_j}{\partial x_j} \right]^{k-1} - \rho_k \left[\frac{\partial \theta u_j}{\partial x_j} \right]^{k-2} + \alpha_k \left(\frac{1}{2} \frac{\partial q_j^k}{\partial x_j} + \frac{1}{2} \frac{\partial q_j^{k-1}}{\partial x_j} \right) \quad (14)$$

Úvod

- COST action ES1006 - "Evaluation, improvement and guidance for the use of local-scale emergency prediction and response tools for airborne hazards in built environments"
- Několik scénářů je modelováno mnoha skupinami a výsledky se porovnávají navzájem a s experimentálními daty.
- Několik validačních experimentů bylo vytvořeno speciálně pro tuto akci.

Michel-Stadt

- Idealizace, která zahrnuje komplexní tvary uliční zástavby a různou výšku budov
- Neobsahuje detaily, které by i podrobné modely musely zanedbávat.
- Finální termín pro odeslání dat v prosinci - ještě nebyly provedeny všechny analýzy výsledků.

Michel-Stadt

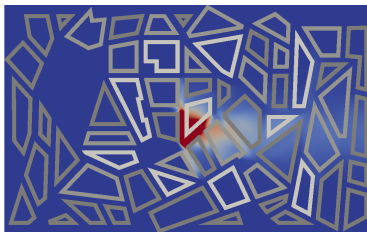
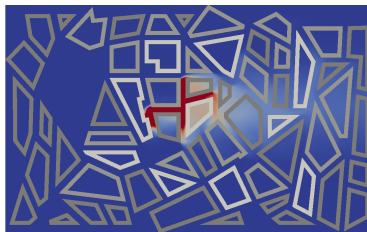
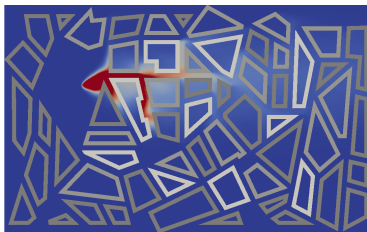
- Experimenty provedeny v Environmental Wind Tunnel Laboratory, Hamburg University.
- Několik umístění zdroje kontaminantu.
- Dva navzájem opačné směry větru.
- Dva druhy zdrojů:
 - kontinuální
 - puff (~obláček) - krátká doba vypouštění v porovnání s dobou šíření
- Všechny rozměry a časy budou uváděny v reálném měřítku. V tunelu byly rozměry menší a časy rychlejší v měřítku 1:225.
- Koncentrace jsou přepočteny na základě hypotetické síly zdroje a molekulární hmotnosti - obrázky jen relativní porovnání.

Kontinuální zdroje

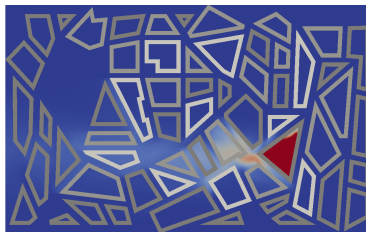
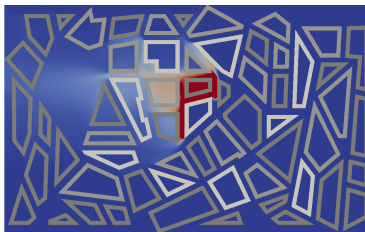
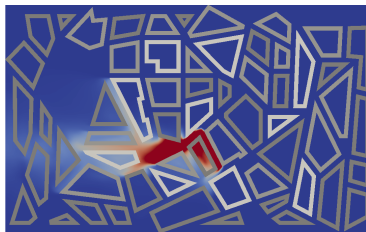
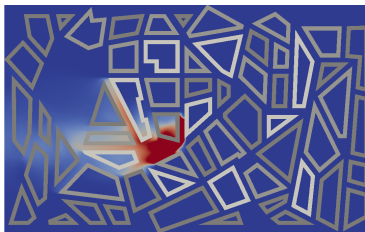
- Simuluje např. déletrvající požár, únik plynu trhlinou v nádrži, vypařování těkavé látky z většího množství kapaliny...
- V experimentech bývá statistické chyby okolo 1 % dosaženo po více než 20 h času (v reálném měřítku).
- V reálné atmosféře nelze mít stacionární podmínky po tak dlouhou dobu.
- V LES je takto dlouhá doba simulace velmi nákladná.

Parametry výpočtu

- délka simulovaného proudění $t = 2,8$ h
- rozlišení sítě $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 3m$
- 3 (vítr 0°) a 4 (vítr 180°) bodové zdroje znečištění
- Periodické okrajové podmínky v horizontálních směrech a konstatní tlakový gradient udržující stálou rychlost větru 6 m/s ve výšce 100 m.
- Podle předběžného porovnání výsledků je pro směr 0° chyba koncentrace 55 % bodů v rámci faktoru 2.



Průměrné koncentrace ve výšce 7,5 m pro směr větru 0° .



Průměrné koncentrace ve výšce 7,5 m pro směr větru 180°.

Ukázkové animace

- Zdroj na náměstí, vítr 0°
http://www.youtube.com/watch?v=9Ho_yMyLr-Q
- Zdroj v ulici, vítr 0°
<http://www.youtube.com/watch?v=bMOXBex7s14>
- Zdroj ve dvoře, vítr 180°
<http://www.youtube.com/watch?v=GJfCTjWedMM>
- Zdroj v ulici, vítr 180° , boční pohled
<http://www.youtube.com/watch?v=dYvVcqdSWP4>

Krátkodobé zdroje

- Zdroj otevřený jen po krátkou dobu simuluje náhlý únik nebezpečné látky, např. v důsledku protržení nádrže, výbuchu...
- Tunelové experimenty ukazují, že střední hodnoty charakteristických veličin konvergují opět pomalu a pro statistickou chybu v řádu jednotek procent je potřeba více než 200 puffů.
- V experimentech v reálné atmosféře je možné typicky vypustit jen několik jednotek puffů.
- V LES kompromis mezi rozlišením sítě a počtem puffů, které je možno simulovat.

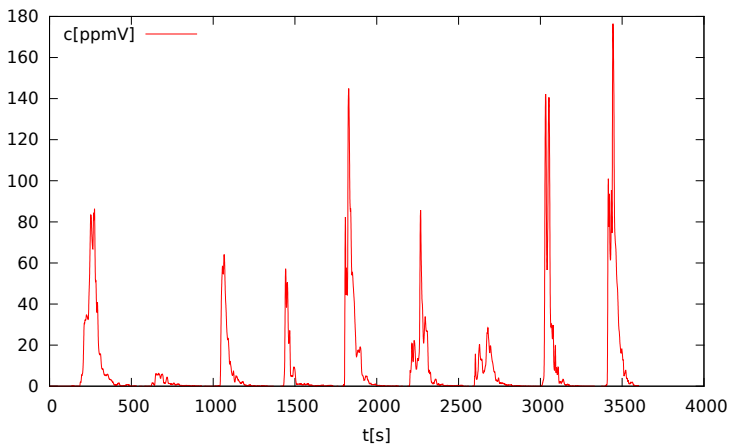
Parametry výpočtu

- délka simulovaného proudění $t = 2,8$ h
- rozlišení sítě $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 3m$
- 3 (vítr 0°) a 4 (vítr 180°) bodové zdroje znečištění
- Doba vypouštění 29 s, maximální doba rozptylu 15 min.
- Periodické okrajové podmínky v horizontálních směrech a konstatní tlakový gradient udržující stálou rychlost větru 6 m/s ve výšce 100 m.

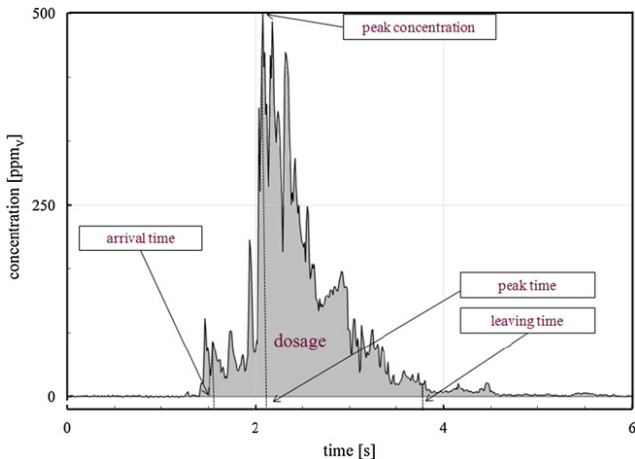
Sledované veličiny

- Určovány pro každý puff, poté z jejich souboru statistická distribuce a některé momenty.
- peak concentration pc - z řady klouzavých 15 s průměrných koncentrací
- dosage dos
- peak time pt
- arrival time at = čas 5 % dávky
- leaving time lt = čas 95 % dávky
- duration $dur = lt - at$
- ascent time $ast = pt - at$
- descent time $dst = lt - pt$

Ukázka simulované časové řady

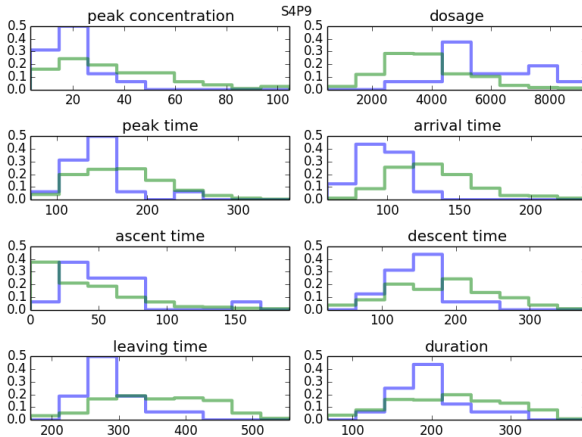


Sledované veličiny



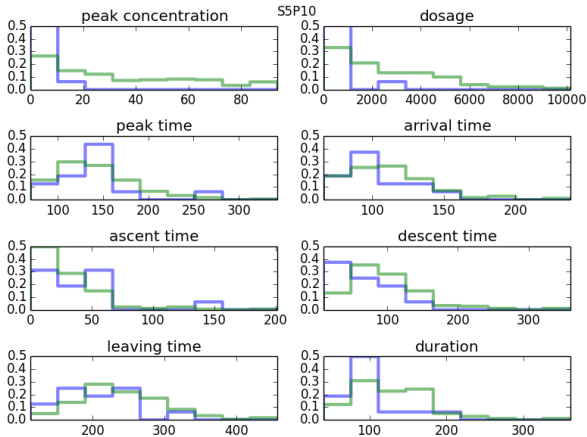
Ilustrace sledovaných charakteristických veličin puffu. Zdroj: Harms et al. JWEIA 99(4)

Výsledné histogramy



Porovnání simulovaných a naměřených histogramů určujících pravděpodobnost naměření různých hodnot charakteristických veličin puffu. Ukázka pro jeden bod s receptorem. Experimentální hodnoty zeleně, simulace modře.

Výsledné histogramy



Porovnání simulovaných a naměřených histogramů určujících pravděpodobnost naměření různých hodnot charakteristických veličin puffu. Ukázka pro jeden bod s receptorem. Experimentální hodnoty zeleně, simulace modře.

Ukázkové animace

- Zdroj na náměstí, vítr 0°

<http://www.youtube.com/watch?v=KCZcUWHXAHc>

- Zdroj v ulici, vítr 0°

<http://www.youtube.com/watch?v=5HfKWfkaXnI>

Závěr

- Podle předběžné analýzy je pro cca 55% bodů chyba průměrné koncentrace menší, než faktor 2.
- Charakteristické časy puffů simulovány poměrně dobře.
- Velká časová náročnost výpočtů. Pracujeme na lepší paralelizaci a plánujeme využití větších clusterů Metacentra.
- Výsledky budou využity ve společných publikacích COST ES1006 i individuálních.

Děkuji za pozornost!