



CFD PREDICTION OF AIR QUALITY IN THE AREA BETWEEN TWO CITY ROAD TUNNEL OUTLETS CONSIDERING MOVING CARS

Jaroslav Katolický, Jiří Pospíšil, Miroslav Jícha *

Summary: *In the contribution, concentration field of different pollutants predicted with a CFD code are presented. The calculations were done with Star-CD code into which a special subroutine for moving vehicles is integrated. This subroutine is based on 3-D Eulerian-Lagrangian approach to moving objects and is capable of taking into account the traffic induced flow rate and turbulence [2]. The method has a significant advantage of separating contributions from different sources to a total concentration field of different pollutants. In such a way we are able to clearly determine what is the impact of tunnel outlets, line sources from vehicles moving along roads and what is the background. The method has been applied to prediction of concentration field of CO in the city area located in the vicinity of the upper portal of the Pisarky tunnel in Brno. The comparison of the results based on computer modelling and the values based on the measurements are presented.*

1. Úvod

Vzrůstající intenzita znečišťování ovzduší, zejména v centrech velkých měst, budí v současné době oprávněné obavy z negativních důsledků na přírodní procesy i na zdraví obyvatelstva a v některých silně znečištěných oblastech již představuje limitující faktor pro další ekonomický rozvoj. S rozvojem dopravy ve velkých městech se stále více setkáváme s tím, že zdroje exhalací produkované dopravou mají větší podíl na znečišťování ovzduší především hustě osídlených center těchto měst. Kritická situace nastává v blízkosti frekventovaných křižovatek a velkých dopravních tepen. A proto je nezbytné při budování nových průmyslových objektů a dopravních komunikací znát jejich dopad na okolní prostředí.

V příspěvku je prezentován CFD model sloužící pro predikci šíření exhalací pocházejících z dopravy v kritických uzlech městské zástavby. Tento model do řešení zahrnuje vliv pohybujících se automobilů na proudové pole v blízkosti dopravních komunikací včetně turbulence indukované dopravou. Významnou výhodou tohoto přístupu je možnost rozlišení příspěvku znečištění z jednotlivých zdrojů na celkové pole koncentrací. Tzn., že je možné, např. odlišit vliv portálu tunelu, liniových zdrojů z automobilů na komunikacích a nebo hodnoty koncentrací pozadí. Jsou zde prezentovány výsledky

* Ing. Jaroslav Katolický PhD., Ing. Jiří Pospíšil, Prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc. *VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Technická 2, 602 00 Brno*, e-mail: katolic@dt.fme.vutbr.cz

získané aplikací této metody v okolí horního portálu Pisáreckého tunelu v Brně, současně se srovnáním s měřením prováděným v této lokalitě.

2. MATEMATICKÝ POPIS PROBLÉMU

Řešený problém je popsán soustavou diferenciálních rovnic kontinuity, pohybových a energie pro nestlačitelné ustálené turbulentní proudění s přenosem tepla v kartézské souřadné soustavě. Pro zápis těchto rovnic je použita rovnice s obecnou proměnnou ϕ ve tvaru:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi + S_\phi^P \quad (1)$$

Obecná proměnná ϕ představuje jednotlivé složky rychlostí u , v , w , v pohybových rovnicích, teplotu T v rovnici energie a v modelu turbulence doplňuje parametry turbulence k a ε . Pro rovnici kontinuity je $\phi = 1$. S_ϕ je zdroj příslušné proměnné, tj. zdroj hmotnosti v rovnici kontinuity, zdroj hybnosti v rovnicích pohybových a zdroj energie v rovnici energie. Zdrojový člen S_ϕ^P reprezentuje interakci mezi pohybujícími se automobily a okolním prostředím. Řešení interakce je založeno na metodě „Particle-Source-In-Cell“ (PSICT) podle Crowe, 1977 [1]. Tento aditivní zdrojový člen představuje hybnost, kterou pohybující se automobily předávají okolnímu prostředí. Turbulence je řešena standardním k - ε modelem turbulence s aditivními zdrojovými členy, které do řešení zahrnují turbulenci generovanou pohybujícími se automobily.

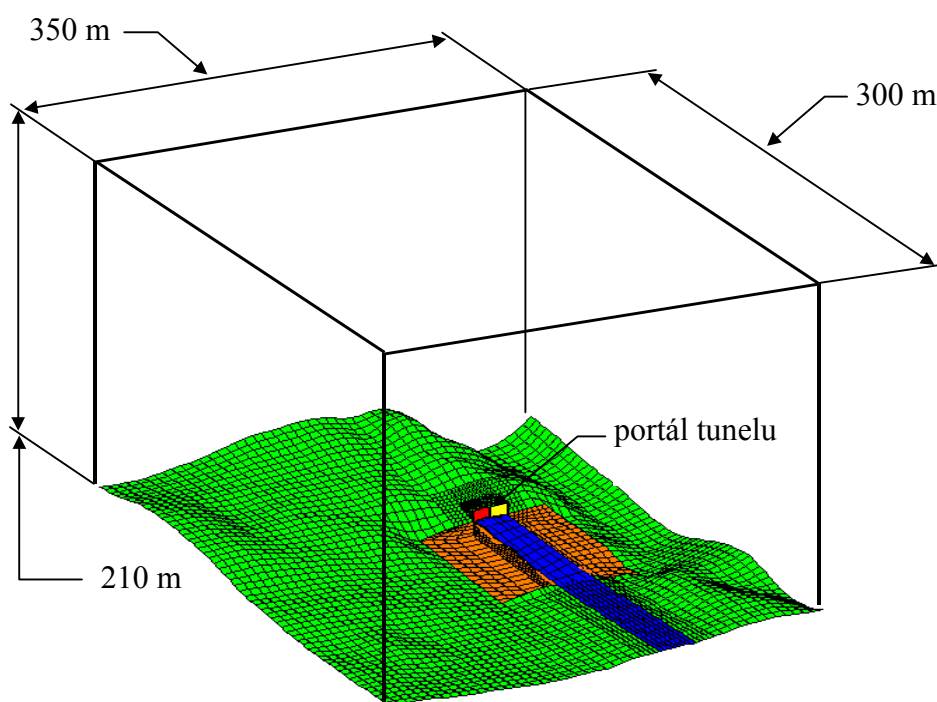
Výpočet aditivních členů S_ϕ^P je založen na řešení Lagrangeových rovnic pro pohybující se automobily:

$$m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = \frac{1}{2} \rho_\infty C_D A_p |\vec{U}_\infty - \vec{U}_p| (\vec{U}_\infty - \vec{U}_p) \quad (2)$$

kde, m_p , $\vec{U}_p$ a A_p jsou hmotnost, rychlost a čelní plocha pohybujícího se automobilu, C_D je součinitel odporu, ρ_∞ a $\vec{U}_\infty$ jsou hustota a rychlost okolního vzduchu a t je čas [3].

3. GEOMETRIE ŘEŠENÉ OBLASTI

Řešená oblast představuje okolí horního portálu tunelu v Brně Pisarkách a její rozměry jsou 300 x 350 m (obr. 1), výška řešené oblasti je 210 m nad nejvyšším bodem terénu. Model obsahuje portál tunelu, který se skládá ze dvou částí. Jedna polovina portálu simuluje výjezd z tunelu (červená barva) a druhá polovina je pak vjezd do tunelu (žlutá barva). Příjezdová komunikace k tunelu (modrá barva) křížuje řešenou oblast přibližně v JZJ směru. Část této komunikace v blízkosti portálu je tvořena mostem o délce asi 60 m a výšce 8 m. Plocha pod tímto mostem a jeho okolí tvoří parkoviště (oranžová barva). Povrch oblasti nalevo od příjezdové komunikace a z větší části kopec za portálem tunelu jsou tvořeny lesem. Terén napravo tvoří převážně zahrady a rodinné domky. Povrchu který představuje zastavěnou oblast odpovídá drsnost 0.5 m, zalesněné části je přiřazena drsnost 1 m, ostatní povrchy mají drsnost 0.03 m.



Obr. 1 Geometrie řešené oblasti

Řešeny byly tři varianty, které korespondují s podmínkami při kterých byla prováděna měření viz. tab. 1. Hodnoty měření byly získány od firmy ECOTECHNIEK CZ, spol. s r. o., která v této lokalitě provádí měření pro magistrát města Brna. U všech variant bylo použito izotermní teplotní zvrstvení a tomu odpovídající rychlostní profil – vztah (3). Hodnoty rychlosti u_0 jsou uváděny ve výšce 7 m nad terénem.

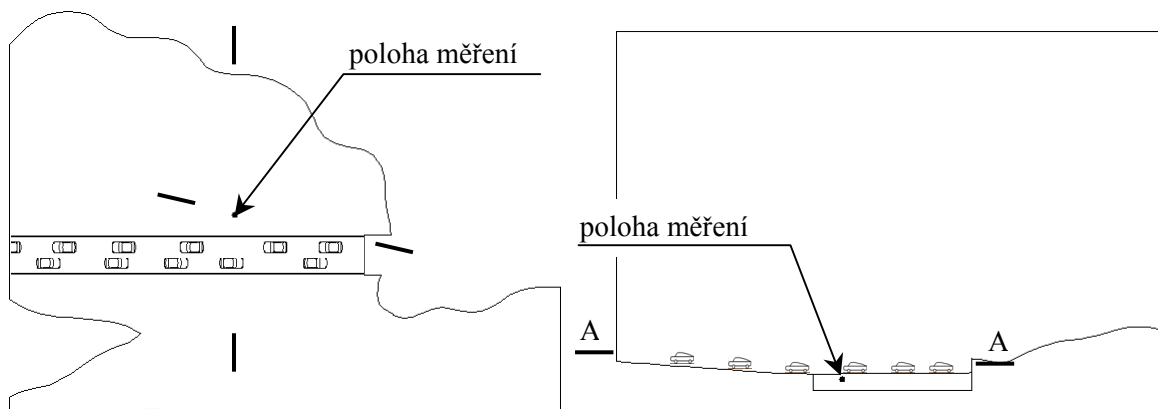
$$u = u_0 \left(\frac{z}{7} \right)^{0.35} \quad (3)$$

Tab. 1 Řešené varianty

varianta	vítr		teplota vzduchu [°C]	tunel			hustota dopravy [aut./hod]	
	směr [°]	rychlost u ₀ [m/s]		rychlost [m/s]		teplota [°C]		
				z tunelu	do tunelu		z tunelu	do tunelu
P3	3	0.2	0	2.96	0.82	0	554	994
P238	238	0.2	1.6	0.875	1.164	1.6	308	330
P277	277	0.6	0	1.012	1.58	0	704	696

4. VÝSLEDKY A ZÁVĚR

Řešeny byly tři pasivní skaláry. První pro hodnoty koncentrací pocházející z tunelu. Hodnota tohoto skaláru je rovna 1 na výjezdu z tunelu. Druhý pro hodnoty koncentrací pozadí tzn. hodnoty emisí přicházejících do řešené oblasti z vnějšku. Jeho hodnota na vstupu do řešené oblasti byla rovna 1. Třetí skalár byl řešen pro hodnoty koncentrací pocházející



Obr. 2 Označení řezu ve kterém jsou vykresleny výsledky

z dopravy na příjezdové komunikaci k tunelu. Zdroje tohoto skaláru byly definovány v jednotlivých jízdních pruzích podle vztahu (4), přičemž zdroj emisí z jednoho automobilu $\dot{Q}$ je 1 kg/s, tzn. že koncentrace exhalací jsou relativní k hodnotě zdroje z jednoho automobilu.

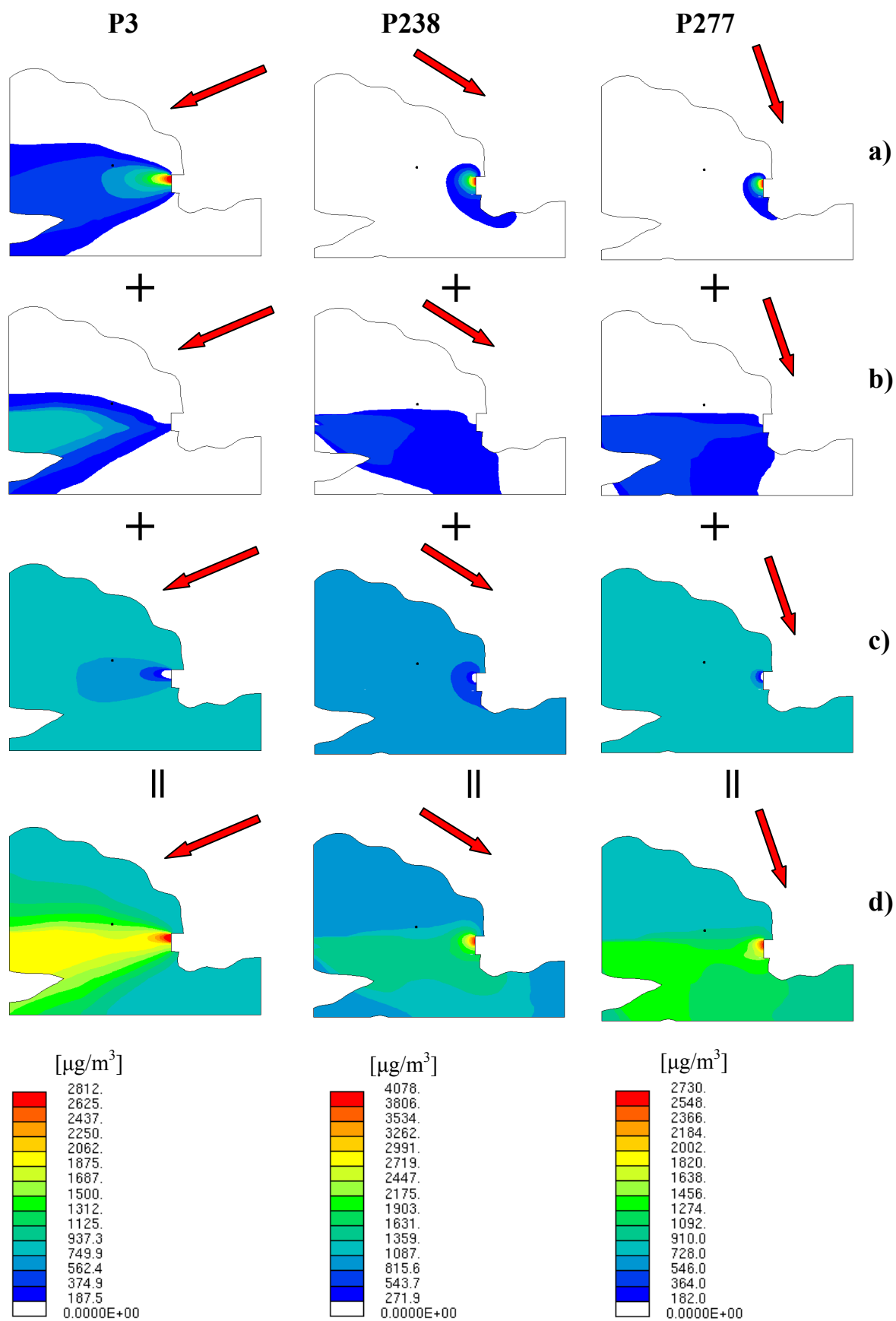
$$S_c = \frac{1}{u_c A_v} \dot{Q} Q_c \quad (4)$$

kde A_v plocha kontrolního objemu kolmá na směr pohybu automobilů

u_c rychlost automobilů

Q_c hustota provozu

V obr. 3 jsou zakresleny vypočtené hodnoty koncentrací CO v horizontální rovině vedené v poloviční výšce portálu (obr.2, řez A-A). V obrázcích je místo měření označeno černou tečkou, červená šipka označuje směr větru. V obr.3 a) jsou zobrazeny pole koncentrací CO pocházející z portálu tunelu. Tyto hodnoty jsou přepočteny pro hodnotu koncentrace CO, která byla naměřena v portále tunelu (tab. 2). Obr.3 b) ukazuje hodnoty koncentrací CO produkované dopravou na komunikaci před portálem tunelu. Uváděné hodnoty jsou přepočteny pro hodnotu 266 mg/s CO produkovanou jedním automobilem. A v obr.3 c) jsou koncentrace CO přicházející do řešené oblasti z vnějšku, tzn. hodnoty pozadí. Ve všech třech variantách byla brána hodnota pozadí $900 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Na obr. 3 d) jsou pak celkové hodnoty koncentrací CO, tzn. součet koncentrací pocházející z portálu tunelu, z dopravy na komunikaci před portálem a pozadí.



Obr. 3 Hodnoty koncentrace CO

Na *obr. 3* u varianty *P3* je vidět, že emise CO pocházející z tunelu se šíří podél komunikace před portálem a jejich koncentrace činí přibližně 2/3 hodnoty pozadí. Porovnáme-li vypočtené hodnoty v místě měření s měřením, které jsou uvedeny v *tab.2*, vidíme že výpočet se od měření liší asi o 6 %. Tato odchylka je spočtena podle vztahu (5), přičemž maximální hodnota koncentrace je hodnota v portále tunelu a minimální hodnota je hodnota pozadí. Z výpočtu je možné dále určit, že z 50 % se na této hodnotě podílí pozadí, z 36 % emise z tunelu a ze 14 % doprava před tunelem. U další varianty *P238* vidíme, že emise CO z tunelu se vlivem větru otáčí ve směru větru a v oblasti měření nejsou žádné hodnoty koncentrací CO pocházející z tunelu. Z *tab. 2* je vidět, že na hodnotě koncentrace CO v místě měření se podílí z 86 % hodnota pozadí a ze 14 % emise pocházející z dopravy. Srovnáním s naměřenými hodnotami je v tomto případě o něco horší, vypočtená hodnota celkové koncentrace se od naměřené liší přibližně o 26 %. *Obr. 3* pro variantu *P277* ukazuje stejný trend šíření emisí CO z tunelu jako u předchozí varianty. Hodnoty koncentrací CO v oblasti komunikace před tunelem pocházející z dopravy jsou také přibližně stejné ($500 \mu\text{g}/\text{m}^3$), i když hustota dopravy je v případě varianty *P277* dvojnásobná. Což je způsobeno větší rychlostí větru u varianty *P277*. Odchylka mezi naměřenými hodnotami a výpočtem je v tomto případě 3 %. Na hodnotě koncentrace CO v místě měření se podílí z 96 % hodnota pozadí a ze 4 % emise pocházející z dopravy.

$$\varepsilon = \frac{|\phi_{\text{num}} - \phi_{\text{exp}}|}{(\phi_{\text{max}} - \phi_{\text{min}})} \quad (5)$$

Tab. 2 Hodnoty koncentrací CO v místě měření

varianta	portál tunelu [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	pozadí [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	doprava [mg/aut. s]	měření [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	výpočet [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]				odchylka ε [%]
					tunel	pozadí	doprava	celkem	
P3	2812	900	266	1375	540	740	210	1490	6
P238	4078	900	266	1875	0	900	150	1050	26
P277	2730	900	266	1000	0	900	40	940	3

5. LITERATURA

- [1] Crowe G.T., Sharma M.P., Stock, D.E.: The Particle-Source-In-Cell Model for Gas-Droplet Flows J. Fluid Eng., 1977, 325-332
- [2] Jicha M., Pospíšil J., Katolický J.: Dispersion of pollutants in street canyon under traffic induced flow and turbulence, Journal of Environmental Monitoring and Assessment, 2000
- [3] Katolický J., Jicha M.: Eulerian-Lagrangian computational model for traffic induced flow field and turbulence inside a vehicle tunnel, Inženýrská mechanika, 1/2000
- [4] Pospíšil J., Katolický J., Jicha M.: Dispersion of pollutants under traffic induced flow and turbulence in two street canyon forming an intersection, Millennium NATO/CCMS International meeting on Air Pollution Modelling and its Application, Boulder, Colorado, USA, 2000