

## ANALYSIS OF CAR EXHAUST POLLUTANTS CONCENTRATION IN STREET CANYONS

Lucyna Brzozowska, Krzysztof Brzozowski

University of Bielsko-Biala  
Department of Mechanics and Computer Methods  
Willowa 2,43-309 Bielsko-Biala, Poland  
tel.: +48 33 8279285, fax: +48 33 8279289  
e-mail: lbrzozowska@ath.bielsko.pl

### Abstract

*In the paper are presented results of modelling of car exhaust pollutant concentration in street canyons. Four different models are taken into consideration: three analytical with empirical constants and one numerical model. The analytical models are used in practice in order to predict pollutant concentration in street canyons. The numerical model was formulated by the authors and the newest version was validated successfully against the wind tunnel data sets according to the VDI methodology. The analysis performed concerns spatial distribution of car exhaust pollutant concentration obtained for three different street canyon configurations. The flow field had been obtained using the numerical model and was used as pre-processor for the analytical models. Vertical and horizontal profiles of carbon monoxide concentration were analysed for all street canyon configuration. Although the analytical models were parameterised by experimental data sets the modelling results are really different. In some cases the results obtained by one analytical model are quite similar to those obtained from the numerical model. The paper was worked out under of the realization of the research project of No. 4T1200830 sponsored by Ministry of Science and Higher Education.*

**Keywords:** modelling, air quality, pollutant, emission, dispersion

## ANALIZA STĘŻEŃ ZANIECZYSZCZEŃ POCHODZENIA SAMOCHODOWEGO W KANIONACH ULICZNYCH

### Streszczenie

*W pracy porównano wyniki modelowania stężeń zanieczyszczeń emitowanych przez silniki pojazdów w obszarach kanionów ulicznych. Wyniki otrzymano z wykorzystaniem trzech modeli analityczno-empirycznych oraz własnego modelu numerycznego. Model numeryczny, opisujący przepływ powietrza w obszarze kanionu pomyślnie przeszedł procedury weryfikacyjne według wymagań VDI. Z kolei wykorzystane w pracy modele analityczne są modelami wykorzystywanymi w praktyce inżynierskiej. Analizie poddano wyniki dotyczące przestrzennego rozkładu stężeń substancji pasywnej obliczone przez poszczególne modele dla trzech różnych konfiguracji kanionu ulicznego. Pole prędkości powietrza uzyskano z modelu numerycznego i wykorzystano jako preprocesor dla modeli analitycznych. Przeanalizowano pionowy i poziomy rozkład stężenia tlenku węgla dla każdej z rozważanych konfiguracji kanionu. Pomimo, że zastosowane modele analityczne parametryzowane były w wyniku rzeczywistych pomiarów, obliczeniowe stężenia znacznie się różnią. Niemniej jednak, jak wykazały obliczenia, w niektórych przypadkach jeden z modeli analitycznych umożliwia otrzymanie wyników niewiele odbiegających od wyników z modelu numerycznego. Artykuł powstał w trakcie realizacji projektu badawczego nr 4T1200830, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.*

**Słowa kluczowe:** modelowanie, jakość powietrza, zanieczyszczenie, emisja, dyspersja

### 1. Wstęp

Zgodnie z dyrektywą Unii Europejskiej, w procesie oceny jakości powietrza oprócz bezpośrednich pomiarów stężeń należy korzystać także z modeli matematycznych. Szczególnie istotną rolę odgrywają modele związane z mikro i mezoskalą przestrzenną, tj. takie, w których

skala przestrzenna modelowanych zjawisk rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń obejmuje od kilku metrów do kilku kilometrów. Modele mikroskalowe (do 1 km) wymagają dokładnej parametryzacji wszystkich procesów determinujących emisję i dyspersję zanieczyszczeń. Takiemu modelowaniu podlega emisja i dyspersja z różnych źródeł, przy czym dominującymi w obszarach miejskich są zanieczyszczenia powstające w trakcie spalania paliw węglowodorowych w silnikach pojazdów. Nie wszędzie w obszarach zabudowanych musi to prowadzić do znacznej koncentracji związków szkodliwych spalin. Takie niebezpieczeństwo ze względu na zdrowie ludzi zachodzi w obszarach, w których z jednej strony występuje duże natężenie ruchu pojazdów, a z drugiej konfiguracja budynków powoduje zaburzenie swobodnego przepływu powietrza prowadząc do zmniejszenia intensywności przewietrzania. Ogranicza to skutecznie adwekcyjny transport zanieczyszczeń powodując powstawanie lokalnych znacznych koncentracji związków szkodliwych spalin. Przykładem takich obszarów są kaniony uliczne istniejące we wszystkich większych obszarach miejskich. W literaturze można znaleźć szereg modeli rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, spośród których modele stosowane wyłącznie w obszarach kanionów stanowią osobną grupę. Wśród nich można znaleźć modele typu BOX, modele empiryczne, analityczno-empiryczne oraz modele numeryczne [4]. Nie jest zaskoczeniem, że w ocenie jakości powietrza najczęściej wykorzystywane są modele o prostej strukturze matematycznej, utworzone po przyjęciu szeregu założeń upraszczających i nie wymagające specjalistycznego oprogramowania. Mimo tych zalet mają one jednak jedną podstawową wadę – uzyskiwane rozwiązanie jest stacjonarne, tzn. procesy emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń są traktowane jako niezależne od czasu. Tej wady nie posiadają numeryczne modele klasy CFD, muszą one być jednak należycie weryfikowane i oceniane, tak aby użytkownik znał dokładność uzyskiwanych wyników. Interesujące jest porównanie wyników uzyskiwanych przy użyciu modeli różnych klas. W pracy skoncentrowano się zatem na analizie wyników modelowania przestrzennych rozkładów stężeń w kanionach ulicznych z użyciem trzech modeli analityczno-empirycznych oraz autorskiego modelu numerycznego.

## 2. Modele analityczne

### 2.1. Model STREET

Jednym z modeli analityczno-empirycznych opisujących rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń pochodzenia samochodowego w kanionach ulicznych jest model STREET. Model ten bazuje na danych uzyskanych z pomiarów stężeń zanieczyszczeń wzdłuż ulic dokonanych w San Jose i St. Luis i wykorzystywany był w szeregu prac [1, 5, 8, 9].

W modelu STREET stężenie poszczególnych związków szkodliwych spalin w kanionie ulicznym ( $\phi_s$ ) jest proporcjonalne do natężenia emisji spalin odniesionego do jednostki długości -  $Q$  i odwrotnie proporcjonalne do prędkości wiatru na wysokości zabudowy -  $u$ . Model jest stosowany dla wiatru wiejącego pod kątem większym niż  $30^\circ$  w stosunku do osi kanionu. Stężenia zanieczyszczeń oblicza się z następujących wzorów:

- dla strony zawietrznej:

$$\phi_s = \frac{K}{u + u_s} \sum_i \left[ \frac{Q_i}{(x_i^2 + z^2)^{1/2} + h_0} \right], \quad (1)$$

- dla strony nawietrznej:

$$\phi_s = \frac{K}{u + u_s} \frac{H - z}{H} \sum_i \frac{Q_i}{W}, \quad (2)$$

gdzie:

- $K$  - stała empiryczna zwykle przyjmowana jako 7,
- $u_s$  - prędkość powietrza powodowana ruchem samochodów ( $u_s \approx 0,5$  m/s),

- $h_0$  - wysokość warstwy mieszania się zanieczyszczeń ( $h_0 = 2$  m),  
 $x_i$  - odległość w poziomie punktu pomiarowego od źródła na i-tej jezdni,  
 $z$  - odległość w pionie punktu pomiarowego od źródła,  
 $Q_i$  - natężenie emisji zanieczyszczeń odniesione do jednostki długości na i-tej jezdni,  
 $H$  - wysokość kanionu ulicznego,  
 $W$  - szerokość kanionu ulicznego.

Zanieczyszczenia emitowane przez silniki pojazdów są transportowane z wiatrem po stronie zawietrznej (1), natomiast po stronie nawietrznej wartość stężenia zanieczyszczeń krążących w kanionie jest przyjmowana jako niezależna od odległości od źródła (2).

## 2.2 Model Hotchkissa i Harlowa

Kolejnym modelem wykorzystanym w pracy jest model zaproponowany przez Hotchkissa i Harlowa [7]. Model ten wykorzystuje analityczne rozwiązanie równań ruchu powietrza (2D) oraz dwuwymiarowego równania adwekcji-dyfuzji dla zagadnienia stacjonarnego.

Równanie opisujące pole stężeń zanieczyszczeń dla dwuwymiarowego kanionu ulicznego ma postać (3):

$$\phi_s = S \left[ \frac{1}{u_w} - \frac{y}{v_t} \right] - \frac{S u_n y}{4k v_t^2 (1 - \beta)} \left[ e^{ky} (1 - ky) - \beta e^{-ky} \right] \cos(kx), \quad (3)$$

gdzie:

$$k = \frac{\pi}{W}, \quad y = z - H, \quad \beta = e^{-2kH}, \quad u_w = \left( \frac{v_t u_t}{W} \right)^{1/2},$$

$S = Q/W$  - przy założeniu, identycznego natężenia emisji  $Q$  na wszystkich jezdniach,

$u_n$  - prędkość powietrza nad budynkami,

$v_t$  - współczynnik dyfuzji turbulentnej,

$u_t$  - prędkość powietrza na środku kanionu na wysokości  $H$ .

## 2.3 Model OSPM

Model OSPM bazuje na elementach modelu CPBM [11] oraz NBB [1]. Stężenia gazów wylotowych są obliczane przy użyciu kombinacji modelu smugowego i pudełkowego dla części zanieczyszczeń podlegającej recyrkulacji. W modelu wprowadzono prostą parametryzację warunków przepływu i dyspersji w kanionie ulicznym [1]. Bezpośredni udział obliczany jest na podstawie modelu smugi. Przyjmuje się, że zarówno ruch pojazdów jak i emisja cechują się równomiernym rozkładem przestrzennym w kanionie, przy czym źródła emisji traktuje się jako skończone źródła liniowe umiejscowione prostopadle do kierunku wiania wiatru w odstępach równych  $dx$ . Stężenie zanieczyszczeń w wypadku gdy kierunek wiatru jest prostopadły do osi jezdni oblicza się ze wzoru:

$$\phi_d = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{Q}{W \sigma_w} \ln \frac{h_0 + (\sigma_w / u_b) W}{h_0}, \quad (4)$$

gdzie:  $u_b$  - prędkość wiatru na poziomie jezdni,

$\sigma_w$  - pionowy współczynnik dyfuzji uwzględniający również wpływ turbulencji mechanicznej generowanej ruchem pojazdów.

Człon recyrkulacyjny w modelu OSPM opisuje równanie:

$$\phi_{rec} = \frac{Q}{\sigma_{wt} W}, \quad (5)$$

gdzie  $\sigma_{wt} \approx 0,1u_t$ .

### 3. Model numeryczny

Wykorzystany w pracy model numeryczny jest modelem mikroskalowym, umożliwiającym obliczenia pola prędkości powietrza oraz koncentracji zanieczyszczeń [4]. Jego pierwsze wersje stosowane były do oceny jakości powietrza w obszarach takich jak parkingi otwarte i zamknięte, w których emisja zanieczyszczeń jest szczególnie duża w związku z emisją po zimnym lub chłodnym rozruchu silników [2]. Obecnie, możliwości obliczeniowe zostały poszerzone, w związku z czym model można stosować w obszarach zabudowy, między innymi w kanionach ulicznych [3, 4]. Co istotne, został on poddany procesowi weryfikacji i walidacji zgodnie z wytycznymi VDI [10]. W modelu tym, stężenie zanieczyszczeń w obszarze kanionu uzyskuje się jako niestacjonarne rozwiązanie równania adwekcji-dyfuzji:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + U_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \lambda \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] + I, \quad (6)$$

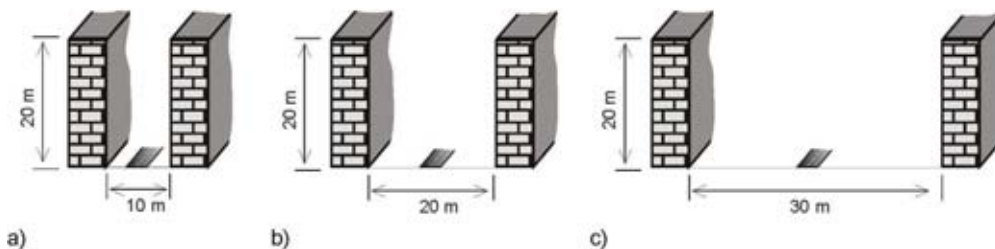
gdzie:

- $\phi$  - stężenie zanieczyszczenia,
- $t$  - czas,
- $U_j$  - składowe wektora prędkości powietrza,
- $x_j$  - współrzędne w układzie kartezjańskim,
- $I$  - człon źródłowy opisujący natężenie źródeł masy w jednostce objętości,
- $\lambda$  - współczynnik dyfuzji turbulentnej.

Warto tutaj wspomnieć, że model ten uwzględnia przy obliczaniu pola prędkości powietrza turbulencje mechaniczną generowaną ruchem pojazdów, która determinuje warunki początkowe rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w obszarze kanionu ulicznego. Szczegółowy opis najnowszej wersji modelu przedstawiono w monografii [4].

### 4. Obszar analizy

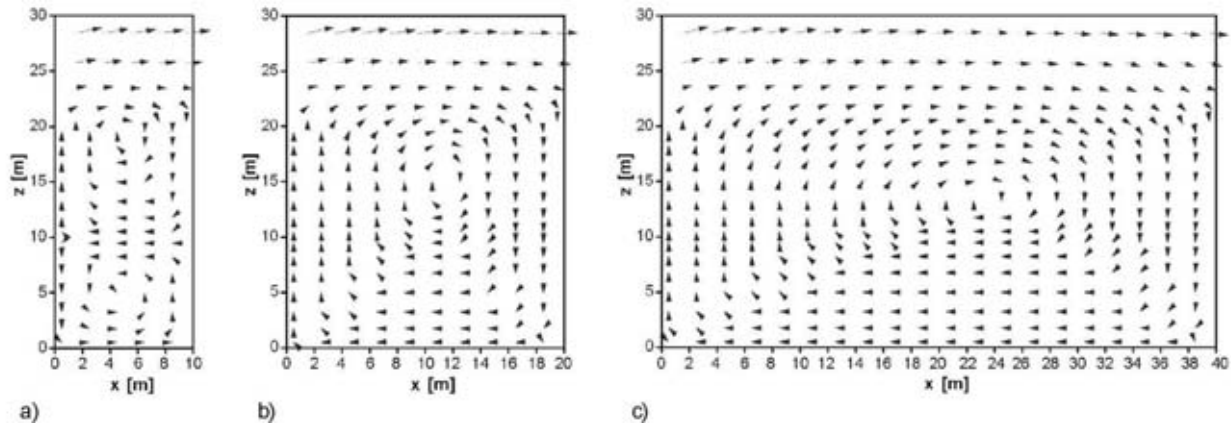
Analizowano trzy warianty zabudowy kanionu ulicznego. Poszczególne przypadki różniły się szerokością kanionu przy tej samej wysokości zabudowy, przy czym w pierwszym przypadku (kanion I – rys.1a) stosunek wysokości kanionu i szerokości wynosi 2, w drugim (kanion II – rys.1b) 1, a w trzecim 1/2 ( kanion III – rys.1c).



Rys. 1. Analizowane warianty zabudowy- a) kanion I, b) kanion II, c) kanion III  
Fig. 1. Configurations of the street canyons considered- a) canyon I, b) canyon II, c) canyon III

Modelowanie rozprzestrzeniania się związków szkodliwych spalin wymaga znajomości pola prędkości powietrza w analizowanym obszarze. Pole prędkości powietrza umożliwiające określenie wielkości wejściowych w modelach analitycznych przyjęto jako identyczne z uzyskanym w modelu numerycznym [4].

Rozkład prędkości powietrza dla tych trzech wariantów przedstawia rysunek 2 (gdzie odpowiednio a), b) i c) odpowiadają kanionowi I, II i III), przy czym kierunek wiatru nad kanionem jest zgodny z kierunkiem osi  $oy$ .



Rys. 2. Obliczone pole prędkości powietrza w obszarze rozpatrywanych kanionów ulicznych  
 Fig. 2. The computed air flow field inside the street canyons considered

Wielkością wejściową do modelu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń jest natężenie emisji związków szkodliwych spalin. Do obliczeń, zarówno w modelu numerycznym, jak i w opisanych wyżej modelach analitycznych przyjęto, że źródło emisji jest źródłem liniowym, a rozpatrywanym zanieczyszczeniem jest tlenek węgla. Przyjęto ponadto, że pojazdy poruszają się ruchem jednostajnym, a jezdnia jest jezdnią dwukierunkową. Dane dotyczące natężenia ruchu i struktury pojazdów dla przyjętego modelu emisji zanieczyszczeń przedstawiono w pracy [3], średnie emisje drogowe pojazdów przyjmując według modelu INFRAS [6].

### 5. Porównanie wyników obliczeń dla modeli analitycznych i modelu numerycznego

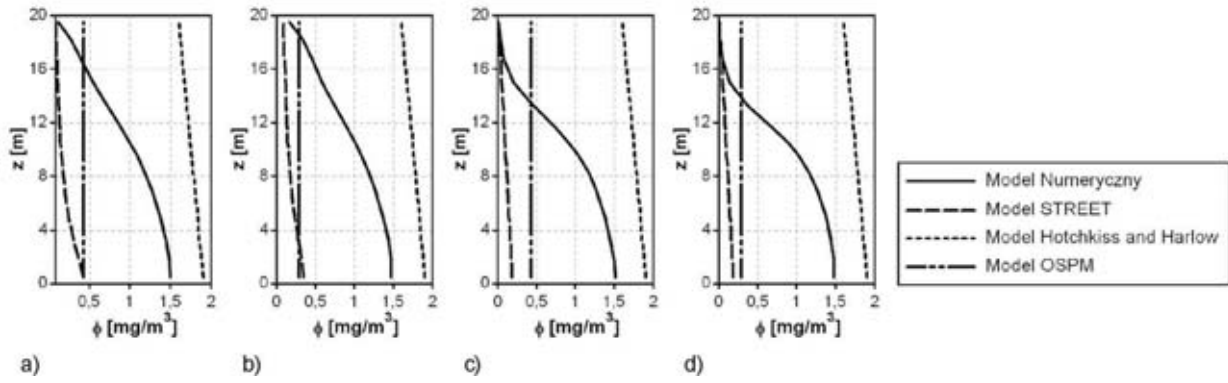
Wartości stężeń tlenu węgla obliczono z wykorzystaniem opisanych modeli analitycznych oraz modelu numerycznego. Pierwszy przypadek (kanion I), w którym wysokość kanionu jest dwukrotnie wyższa od jego szerokości jest rzadko spotykany w rzeczywistości. Modele analityczne nie są dobrze przystosowane do rozwiązywania zadania wyznaczania stężeń zanieczyszczeń w tak skrajnym przypadku. Zestawienie średnich wartości stężeń tlenu węgla w obszarze kanionu, dla analizowanych modeli i dla trzech różnych szerokości kanionu  $W$  i stałej wysokości ( $H=20$  m) przedstawia tabela 1.

Tab. 1. Średnie stężenie tlenu węgla [ $mg/m^3$ ] w obszarze kanionu  
 Tab. 1. The average concentration of carbon monoxide [ $mg/m^3$ ] inside the street canyon

Przypadek	Model numeryczny	Model STREET	Model Hotchkissa i Harlowa	Model OSPM
kanion I	0,89377	0,14021	1,75107	0,61496
kanion II	0,12489	0,13113	0,10366	0,36734
kanion III	0,03250	0,04057	0,03160	0,21319

Wartości średniego stężenia tlenu węgla w analizowanym obszarze nie oddają charakterystyki modelu pod kątem jakościowym. W wykorzystanych modelach różnie modelowana jest zależność stężenia od odległości od źródła emisji zarówno w kierunku pionowym jak i poziomym. Istotny jest także wpływ pola prędkości powietrza. Jedynie model numeryczny pozwala na uwzględnienie go w całym analizowanym obszarze. W modelach analitycznych i empirycznych prędkość powietrza (wiatru) uwzględniana jest na wysokości zabudowy kanionu, w modelu OSPM dodatkowo na poziomie jezdni.

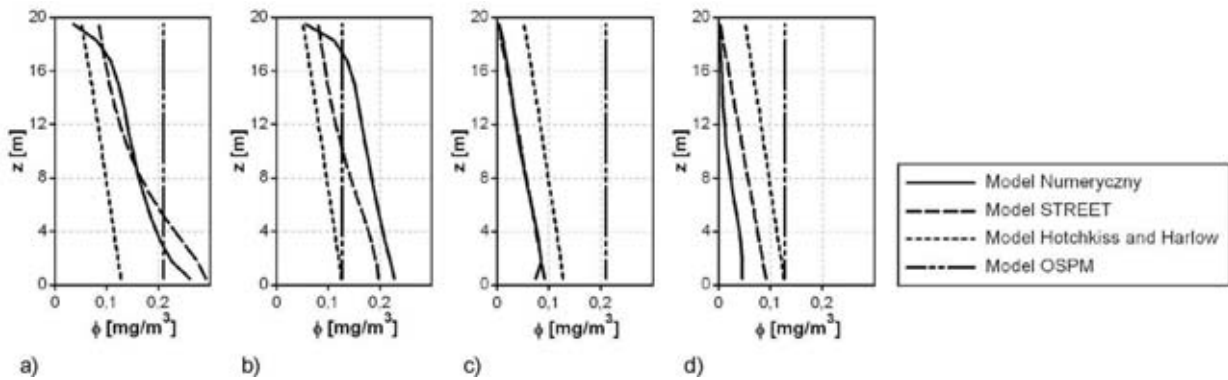
Profile stężeń wraz z wysokością przedstawiono na rysunkach 3.1 – 3.3.



Rys. 3.1. Pionowy profil stężeń tlenku węgla dla kanionu I: a) 2,5 m i b) 3,5 m oraz od zabudowy od strony zawietrznej; c) 2.5 m i d) 3.5 m od zabudowy od strony nawietrznej

Fig. 3.1. Vertical profiles of carbon monoxide concentration in canyon I:

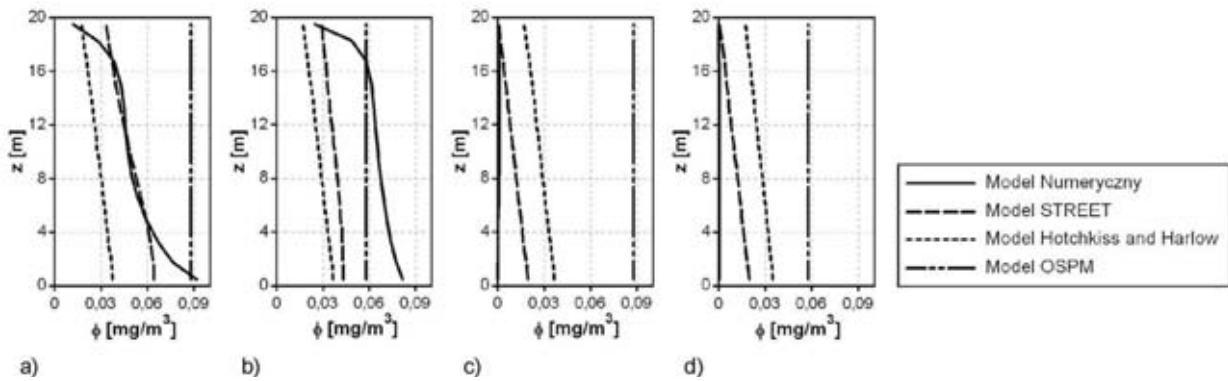
a) 2.5 m and b) 3.5 m from leeward building; c) 2.5 m and d) 3.5 m from windward building



Rys. 3.2. Pionowy profil stężeń tlenku węgla dla kanionu II: a) 2,5 m i b) 3,5 m oraz od zabudowy od strony zawietrznej; c) 2.5 m i d) 3.5 m od zabudowy od strony nawietrznej

Fig. 3.2. Vertical profiles of carbon monoxide concentration in canyon II:

a) 2.5 m and b) 3.5 m from leeward building; c) 2.5 m and d) 3.5 m from windward building



Rys. 3.3. Pionowy profil stężeń tlenku węgla dla kanionu III: a) 2,5 m i b) 3,5 m oraz od zabudowy od strony zawietrznej; c) 2.5 m i d) 3.5 m od zabudowy od strony nawietrznej

Fig. 3.3. Vertical profiles of carbon monoxide concentration in canyon III:

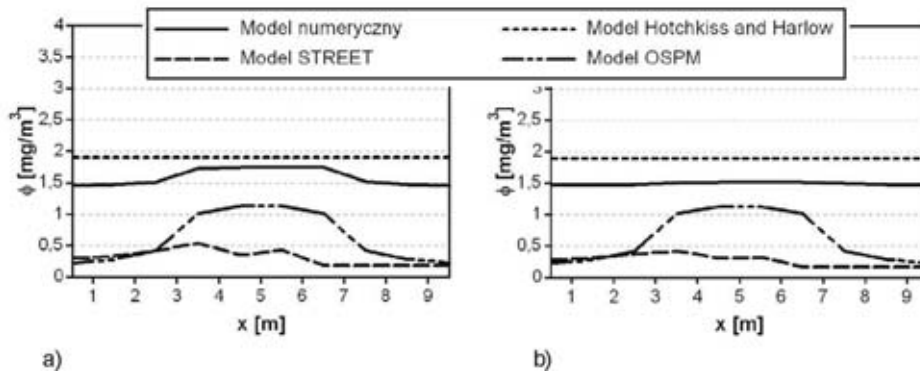
a) 2.5 m and b) 3.5 m from leeward building; c) 2.5 m and d) 3.5 m from windward building

Można zaobserwować różnice w pionowych profilach prędkości dla części zawietrznej kanionu (rysunki 3a i 3b) w stosunku do pionowych profili prędkości uzyskanych w części nawietrznej (rysunki 3c i 3d). Szczególnie duże zmiany wraz z wysokością są widoczne przy stosowaniu modelu numerycznego i modelu STREET. W modelu STREET wartości stężeń zanieczyszczeń wylicza się z osobnych równań dla części za- i nawietrznej (równania 1 i 2).

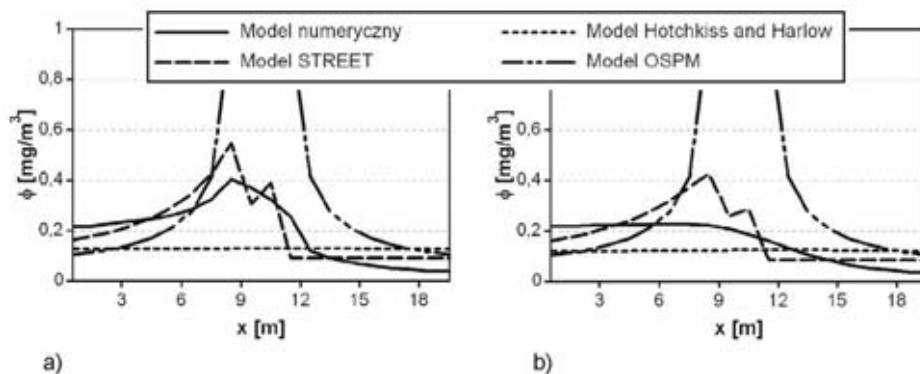
W zależności od szerokości kanionu zmienia się także szybkość przewietrzania kanionu. Jest to widoczne na skali stężeń dla rysunków 3.1, 3.2 i 3.3.

Na kolejnych rysunkach przedstawiono profile stężeń zanieczyszczeń w poprzek kanionu dla dwóch wybranych wysokości.

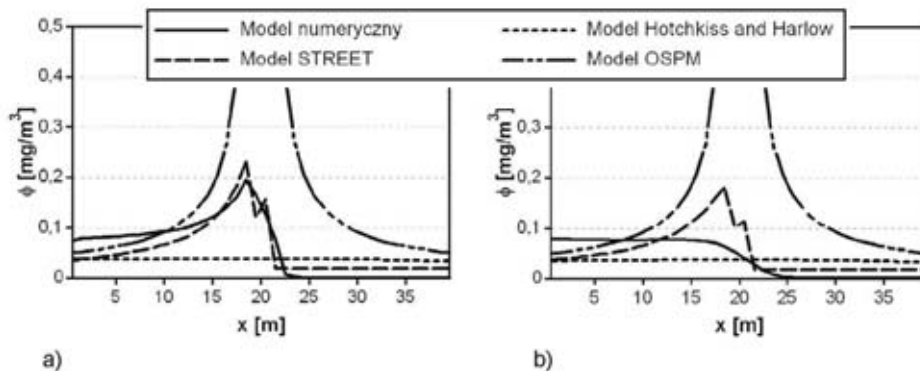
Jak już wspomniano modele analityczne nie oddają dobrze zmian w stężeniu zanieczyszczeń w wypadku gdy kanion jest dwukrotnie węższy niż jego wysokość (rys.4.1). Zależność od odległości od źródła jest też w niektórych modela bardzo słaba (model Horchkissa i Harlowa), podczas, gdy w innych wpływ źródła jest bardzo wyeksponowany (model OSPM). Można też zaobserwować dużą zbieżność w wynikach obliczeń uzyskanych przy użyciu modelu analitycznego STREET i modelu numerycznego.



Rys. 4.1. Profil stężeń tlenku węgla na wysokości: a) 0.5 m i b) 1.75 m dla kanionu I  
 Fig. 4.1. Horizontal profiles of carbon monoxide at height: a) 0.5 m i b) 1.75 m for canyon I



Rys. 4.2. Profil stężeń tlenku węgla na wysokości: a) 0.5 m i b) 1.75 m dla kanionu II  
 Fig. 4.2. Horizontal profiles of carbon monoxide at height: a) 0.5 m i b) 1.75 m for canyon II



Rys. 4.3. Profil stężeń tlenku węgla na wysokości: a) 0.5 m i b) 1.75 m dla kanionu III  
 Fig. 4.3. Horizontal profiles of carbon monoxide at height: a) 0.5 m i b) 1.75 m for canyon III

## 6. Podsumowanie i wnioski

Modele rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń pochodzenia motoryzacyjnego odgrywają ważną rolę w ocenie i prognozowaniu oddziaływania motoryzacji na środowisko. Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń modele analityczne pozwalają na określenie średnich wartości stężeń w analizowanym obszarze, są też przeważnie dwuwymiarowe. Bazują przy tym na współczynnikach i wzorach uzyskanych na podstawie badań empirycznych – zastosowanie poszczególnych modeli jest przez to dosyć ograniczone (kierunkiem, czy prędkością przepływu powietrza, szerokością zabudowy, wartością natężenia emisji itp.). Mimo to łatwość uzyskania wyników obliczeń, bez konieczności użycia specjalistycznego oprogramowania, czy sprzętu o dużych wymaganiach powoduje, że ich stosowanie w prognozowaniu i szacowaniu koncentracji zanieczyszczeń w kanionach ulicznych jest uzasadnione. Znacznie bardziej złożony jest model numeryczny. Pozwala on jednak na obliczenie stężeń związków szkodliwych po uwzględnieniu szeregu elementów nie uwzględnianych (lub uwzględnianych wybiórczo) w modelach analitycznych. Są to między innymi: możliwość rozwiązywania zadania niestacjonarnego, uwzględnienie zmian pola prędkości powietrza w całym analizowanym obszarze, uwzględnienie przemian chemicznych związków szkodliwych spalin (głównie tlenków azotu), uwzględnienie zaburzeń w polu prędkości powietrza spowodowanych ruchem pojazdów, trójwymiarowość modelu.

Przeprowadzone obliczenia wskazują, że model STREET pozwala na uzyskanie wyników zbliżonych do modelu numerycznego. Jednakże jest to możliwe tylko w przypadku określonych warunków – szerokość kanionu ulicznego nie jest mniejsza od jego wysokości, wiatr wieje pod kątem od 30° do 90° do osi jezdni.

Artykuł powstał w trakcie realizacji projektu badawczego nr 4T1200830, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

- [1] Berkowicz, R., Hertel, O., Larsen, S. E., Sørensen N. N., Nielsen, M., *Modelling traffic pollution in streets*, Ministry of Environment and Energy, National Environmental Institute, January 1997.
- [2] Brzozowska, L., Brzozowski, K., *Komputerowe modelowanie emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń samochodowych*, WN Śląsk, Katowice-Warszawa 2003.
- [3] Brzozowska, L., Brzozowski, K., *Numeryczna analiza stężeń zanieczyszczeń w kanionach ulicznych*, *Archiwum Motoryzacji* 2, pp. 101-117, 2007.
- [4] Brzozowski, K., *Mikroskalowe modele emisji i dyspersji zanieczyszczeń samochodowych*. Rozprawy Naukowe, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, nr 18, Bielsko-Biała 2006.
- [5] Buckland, A. T., *Validation of a street canyon model in two cities*, *Environmental Monitoring and Assessment* 52, pp. 255-267, 1998.
- [6] HBEFA: *Handbook of emission factors for road traffic*. Version 2.1, Infras AG, Bern 2004.
- [7] Hotchkiss, R. S., Harlow, F. H., *Air pollution transport in street canyons*, EPA-R4-73-029, 1973.
- [8] Johnson W. B., Ludwig F. L., Dabbert, W. F., Allen R. J., *An urban diffusion simulation model for carbon monoxide*, *JAPCA*, 23: 490-498, 1973.
- [9] Mensink, C., Lewyckyj, N., Jassen, L., *A new concept for air quality modelling in street canyons*, *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 2, pp. 339-349, 2002.
- [10] *VDI Guideline on environmental meteorology – Prognostic microscale wind field models – Evaluation for flow around buildings and obstacles*. 3783 Part 9, Düsseldorf 2005.
- [11] Yamartino, R. J., Wiegand, G., *Development and evaluation of simple models for flow, turbulence and pollutant concentration fields within an urban street canyon*, *Atmospheric Environment* 20, pp. 2137-2156, 1986.