

GIS IN MODELLING OF DISPERSION OF CAR EXHAUST POLLUTANTS

Lucyna Brzozowska, Łukasz Draj

University of Bielsko-Biala
Department of Mechanics and Computer Science
ul. Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biala, Poland
tel.: +48 33 8279285, fax: +48 33 8279289
e-mail: lbrzozowska@ath.bielsko.pl, ldrag@ath.bielsko.pl

Abstract

The paper presents an integrated computer system that allows computer modeling emission and dispersion of car exhaust pollutants near road section. This system consists of three connected modules: transport, emission and dispersion. Transport module allows to simulate different road scenarios taking into account changes in traffic flow. Road emission is calculated according to HBEFA model in emission module. The most important module is the dispersion. This module is based on gaussian finite line source model and allows to draw up map of pollutants concentration. To define parameters of dispersion model, a meteorological pre-processor based on relationships obtained from the Monin-Obukhov theory is used. Integrated computer system is also consists connected with geographical information systems (GIS). GIS enables the visualization and analysis of pollutant concentration in different scales. It is a data source input and can be put-upon pre- and post- process of given digital, and also for the analysis and visualization of results. The analysis usually concerns average, minimum, maximum and exceeded permissible values of concentration in fixed area.

Keywords: transport, car exhaust emission, dispersion of pollutants, geographical information systems, modelling

MODELOWANIE ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA EMITOWANYCH PRZEZ SILNIKI POJAZDÓW Z ZASTOSOWANIEM GIS

Streszczenie

W pracy przedstawiono zintegrowany system komputerowy umożliwiający modelowanie emisji i stężeń zanieczyszczeń w pobliżu istniejących i projektowanych ciągów komunikacyjnych. System składa się z trzech połączonych ze sobą modułów: transportu, emisji, dyspersji. Moduł transport, umożliwia symulowanie ruchu pojazdów dla różnych scenariuszy drogowych, np. zmiennego natężenia ruchu czy struktury kierunkowej i rodzajowej floty pojazdów. W module emisja przeprowadza się modelowanie emisji drogowych w oparciu o dane modelu HBEFA. Ważnym elementem systemu jest moduł dyspersji wykorzystywany do obliczeń rozkładu stężeń zanieczyszczeń. Jest on oparty na analitycznym gaussowskim modelu skończonego źródła liniowego (GFLSM). Model ten wymaga określenia dodatkowych parametrów determinujących proces rozprzestrzeniania, wyznaczanych z wykorzystaniem preprocesora meteorologicznego. Parametry skalujące przyziemną warstwę atmosfery obliczane są na podstawie teorii podobieństwa przepływu turbulentnego Monina-Obukhova. Zintegrowany system modelowania emisji i dyspersji zanieczyszczeń obejmuje także system informacji przestrzennej (GIS). Jest on źródłem danych wejściowych oraz może być wykorzystany w pre- i post- processingu danych cyfrowych, a także do analizy i wizualizacji wyników.

Słowa kluczowe: transport, emisja zanieczyszczeń samochodowych, rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń, systemy informacji przestrzennej, modelowanie

1. Wstęp

Powszechnie stosowaną metodą określenia wpływu transportu drogowego na jakość powietrza atmosferycznego jest pomiar stężenia substancji zanieczyszczających emitowanych przez pojazdy w wyniku ich eksploatacji. Pomiarów dokonuje się w obszarze istniejącej infrastruktury drogowej, dla różnej gęstości siatki pomiarowej ze szczególnym uwzględnieniem skrzyżowań oraz kanionów

ulicznych. W pomiarach wyszczególnia się często węzły drogowe, co jest uzasadnione tym, że w ich pobliżu dynamika ruchu pojazdów zasadniczo różni się od tej jaka występuje w pozostałej części odcinka drogowego. W obszarach skrzyżowań występują znaczne zmiany prędkości ruchu, a także rozruch, przyspieszenie i hamowanie pojazdów, co wpływa na zwiększenie emisji związków szkodliwych. W przypadku kanionów ulicznych tworzą się wiry o małej prędkości powietrza co sprzyja znacznej koncentracji zanieczyszczeń.

Pomiary zgodnie z wytycznymi przepisów Ministerstwa Środowiska, stanowią podstawowe narzędzie oceny jakości powietrza atmosferycznego [1]. Przeprowadza się je w aglomeracjach oraz strefach, w których poziom danej substancji zanieczyszczającej jest wyższy od górnego poziomu oszacowania. Wartość górnego poziomu oszacowania dla danej substancji zanieczyszczającej ustanawiana jest w drodze Rozporządzenia Ministra Środowiska. Stanowi ona pewien procent stężenia dopuszczalnego. W przypadku tlenu węgla wartość górnego poziomu oszacowania wynosi 70% wartości stężenia dopuszczalnego [2].

W sytuacji kiedy wartość górnego poziomu oszacowania nie jest przekraczana, dopuszcza się szacowanie jakości powietrza w oparciu o inne metody, w tym te, które związane są z modelowaniem matematycznym [1]. Głównym celem tych metod jest umożliwienie przygotowania naprawczych planów związanych z ochroną powietrza atmosferycznego poprzez modelowanie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń z uwzględnieniem zmian w intensywności źródeł emisji oraz zmian w warunkach meteorologicznych.

Model rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń zgodnie z wytycznymi [1] przed zastosowaniem powinien być odpowiednio dobrany. Istotnym kryterium wyboru modelu jest skala modelowanych zagadnień. Inne modele stosuje się w celu określenia poziomu zanieczyszczenia w obszarze pojedynczego skrzyżowania, a jeszcze inne dla całego obszaru miasta. Ważnym kryterium doboru modelu jest możliwość współpracy z systemami informacji przestrzennej (GIS). Tylko wówczas kiedy zapewni się kompatybilność oraz odpowiednie przetwarzanie danych cyfrowych możliwe jest efektywne tworzenie i analizowanie rozkładów stężeń zanieczyszczeń. Jednak budowa systemu umożliwiającego korzystanie z danych z systemów GIS nie jest zadaniem łatwym. Duża liczba komercyjnych pakietów, a co z tym związane różnorodność oferowanych analiz i formatów danych, tylko utrudnia zadanie. Rozwiązaniem tego problemu jest zbudowanie komputerowego systemu, integrującego model rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń z systemem GIS poprzez wymianę wyników w jednym z akceptowalnych formatów pliku.

W pracy przedstawiono zintegrowany system komputerowy umożliwiający modelowanie emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń pochodzenia komunikacyjnego, który współpracuje z systemem informacji przestrzennej. Jednocześnie, opisano zastosowany model emisji i dyspersji zanieczyszczeń oraz format danych pozwalający na przesyłanie wyników do jednego z systemów GIS. W celu określenia wpływu transportu na środowisko, zaproponowano wykonanie analiz przestrzennych rozkładu stężenia zanieczyszczeń w GIS. Są one związane z określeniem stężenia minimalnego, maksymalnego i średniego w wybranych obszarach sieci drogowej oraz pozwalają na stwierdzenie, czy górny poziom oszacowania został przekroczony.

2. Modelowanie emisji i dyspersji zanieczyszczeń

Elementy układu komunikacyjnego, po których poruszają się pojazdy można traktować jako źródła liniowe. Istnieją różne sposoby modelowania emisji oraz rozprzestrzeniania się substancji zanieczyszczających ze źródeł liniowych. W Polsce, podczas modelowania emisji z silników pojazdów w ruchu drogowym, stosuje się metodę średnich prędkości [3]. Pozwala ona na określenie emisji z każdego pojazdu zakwalifikowanego do jednej z reprezentatywnych kategorii w zależności od średniej prędkości przejazdu. W modelowaniu emisji uwzględnia się takie kategorie pojazdów jak: samochody osobowe, samochody dostawcze i ciężarowe oraz autobusy i motocykle. Dla każdej z kategorii dla określonego składnika spalin tworzona jest charakterystyka

styczna emisji. Następnie na podstawie takiej charakterystyki wyznacza się emisję na odcinku, który pojazd pokonał z daną prędkością średnią. Ze względu na brak w Polsce odpowiednich baz danych emisyjnych istnieje możliwość zastosowania charakterystyk z baz opracowanych w innych krajach. Należy przy tym wybierać bazy, w których struktura pojazdów jest zbliżona do istniejącej w Polsce. Na potrzeby modelowania emisji można wykorzystać bazę modelu HBEFA opracowaną dla Niemiec [4]. Jednak dodatkowo należy określić opóźnienie struktury pojazdów w Polsce do tej z Niemiec. Szacuje się, że jest to okres od 5 do 7 lat wstecz.

Do obliczania stężenia zanieczyszczeń najczęściej stosuje się różne wersje analitycznych formuł gaussowskich. Zalicza się do nich modele smugowe, smugi segmentowej oraz obłoku. Powszechnie wykorzystywanymi modelami, związanymi z oceną oddziaływania transportu drogowego na środowisko, są modele smugowe oraz modele obłoku. Te pierwsze pozwalają traktować drogę, po której poruszają się pojazdy, jako liniowe źródło emisji o stałym natężeniu w czasie 1 h. Natomiast modele obłoku, każdy pojazd traktują jako osobne źródło emisji, które w określonym czasie emituje pewną masę zanieczyszczenia [5]. Efektywność numeryczna modelu smugowego jest większa niż modelu obłoku, ale należy stosować go dla uśrednionych warunków meteorologicznych.

W niniejszej pracy do tworzenia przestrzennych rozkładów stężenia zanieczyszczeń wykorzystano model smugowy skończonego liniowego źródła emisji (GFLSM). W celu sporządzenia rozkładu w pierwszym etapie określa się natężenie emisji q_p poszczególnych składników spalin dla całego odcinka drogi odniesione do jednostki długości. Następnie oblicza się stężenie C_p zanieczyszczenia emitowanego ze źródła $(0, 0, H)$ o długości L w punkcie o współrzędnych (x, y, z) według wzoru [6, 7]:

$$C_p = \frac{q_p}{2\pi\sigma_z\bar{u}_e} \cdot \left[\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right\} + \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right\} \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left\{\frac{\sin\theta\left(\frac{L}{2}-y\right)-x\cos\theta}{\sqrt{2}\sigma_y}\right\} + \operatorname{erf}\left\{\frac{\sin\theta\left(\frac{L}{2}+y\right)+x\cos\theta}{\sqrt{2}\sigma_y}\right\} \right] \quad (1)$$

gdzie: C_p – stężenie związku p [g m^{-3}] w punkcie o współrzędnych (x, y, z) ,

q_p – natężenie emisji odniesione do jednostki długości składnika spalin p [$\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1}$],

H – wysokość źródła emisji [m],

L – długość liniowego źródła emisji [m],

\bar{u}_e – efektywna prędkość wiatru [m/s],

σ_y, σ_z – współczynniki poziomej i pionowej dyfuzji atmosferycznej [m],

θ – kierunek wiatru,

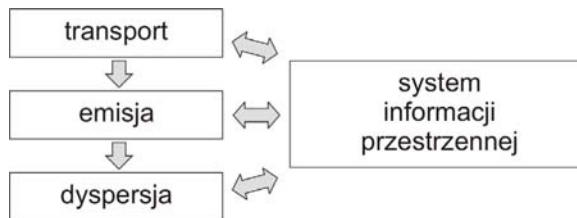
erf – funkcja błędu.

Parametry determinujące rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń σ_y, σ_z najczęściej wyznacza się poprzez dodatkowe obliczenia, w których w opisie struktury warstwy granicznej atmosfery uwzględnienia się teorię podobieństwa oraz parametry skalujące. Podstawowymi parametrami wykorzystywanymi do skalowania są: powierzchniowy strumień ciepła, powierzchniowy strumień pędu i wysokość warstwy mieszania. Natomiast dodatkowe parametry uwzględniają prędkość tarcia, konwekcyjną skalę prędkości, skalę długości Monina-Obukhova i skalę temperatury potencjalnej [8, 9].

3. Ocena oddziaływania transportu drogowego przy zastosowaniu systemów informacji przestrzennej (GIS)

Obecnie systemy informacji przestrzennej mają wiele różnorodnych zastosowań. Między innymi stosuje się je w planowaniu przestrzennym, zarządzaniu i działalności administracyjnej, ale także w ocenie i analizie stanu środowiska przyrodniczego [10]. W Polsce systemy GIS stosowano także w pracach związanych z określeniem oddziaływania transportu drogowego na środowisko [11, 12]. Prace dotyczyły nie tylko oddziaływania związanego z rozprzestrzenianiem się zanieczyszczeń pochodzenia samochodowego ale również generowanego hałasu. W obu przypadkach system GIS wykorzystany był do wizualizacji i analizy stanu aktualnego oraz w założonych horyzontach czasowych. Takie podejście pozwoliło autorom wyżej wymienionych prac wskazać obszary, w których jest lub nie jest przekraczany dopuszczalny poziom zanieczyszczeń.

Wykorzystanie systemu informacji przestrzennej w celu wizualizacji i analizowania rozkładów przestrzennych stężeń zanieczyszczeń wymaga utworzenia odpowiednio zaprojektowanego zintegrowanego systemu komputerowego. Jego zadaniem, oprócz eksportu danych do systemu GIS, powinno być zapewnienie wymiany informacji pomiędzy modułami: transport, emisja i dyspersja. Pierwszy z nich odpowiedzialny jest za generowanie oraz przechowywanie informacji związanych z siecią drogową. Moduł drugi za obliczenie sumarycznej emisji oraz natężenia emisji w poszczególnych odcinkach drogowych. Natomiast ostatni moduł (dyspersja) służy do modelowania pola stężenia zanieczyszczeń z jednoczesnym uwzględnieniem warunków meteorologicznych. Schemat zintegrowanego systemu komputerowego przedstawia rysunek 1.



Rys.1. Schemat zintegrowanego systemu komputerowego
Fig.1. Scheme of computer integrated system

W pracy do analizy stężenia zanieczyszczeń wykorzystano komercyjny system informacji przestrzennej Idrisi Klilimanjaro v. 14. Do poprawnego importu danych dotyczących stężeń z modułu dyspersja do systemu GIS wymagane są dodatkowe informacje, dotyczące:

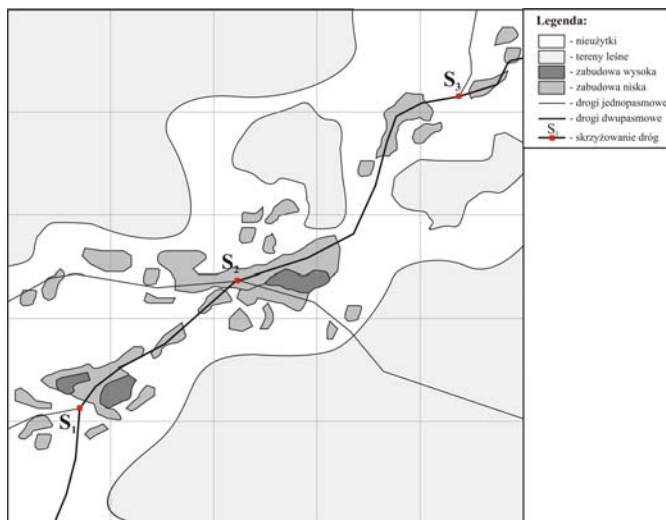
- typu danych cyfrowych (rastrowe, wektorowe),
- współrzędnych początku i końca analizowanego obszaru,
- stosowanego układu jednostek przestrzennych,
- minimalnej i maksymalnej wartości stężeń.

4. Przykład zastosowania GIS w obliczaniu stężeń zanieczyszczeń

Przykład zastosowania systemów GIS do analizy zagadnień związanych z transportem drogowym dotyczyły układu komunikacyjnego prezentowanego na rys. 2.

Założono występowanie kilku rodzajów terenu: nieużytków, terenów leśnych oraz dwu rodzajów zabudowy. Mapę terenu wygenerowano przy użyciu oprogramowania GIS Idrisi Klilimanjaro v. 14. Analizowano przy tym rozprzestrzenianie się tlenku węgla emitowanego przez silniki pojazdów w układzie komunikacyjny składający się z trzech skrzyżowań oraz dróg dwukierunkowych o dwu lub czterech pasach ruchu (rys. 2). Natężenie ruchu wynosiło od 2 000

P/h do 15 000 P/h (P-pojazdów) w zależności od fragmentu drogi, natomiast natężenie emisji z silników pojazdów przyjęto według modelu HABEFA, jak opisano w rozdziale 2.



Rys.2. Analizowany obszar
Fig.2. Analysing area

Rozważano różne warunki meteorologiczne, dla których wielkość zmienną stanowił kierunek wiatru (60° , 90° , 170° , 225°). Klasę atmosfery przyjęto jako *stabilną* o następujących wartościach parametrów meteorologicznych:

- | | |
|--|----------------------------------|
| - prędkość wiatru dla $z = 10\text{ m}$ | $U = 1,8\text{ m/s}$, |
| - szorstkość aerodynamiczna podłoża | $z = 0,2\text{ m}$, |
| - skala długości Monina-Obukchova | $L_* = 97\text{ m}$, |
| - prędkość dynamiczna | $u_* = 0,16\text{ m/s}$, |
| - strumień ciepła | $H = -4,2\text{ W/m}^2$, |
| - temperatura powietrza dla $z = 2\text{ m}$ | $T = 13\text{ }^\circ\text{C}$, |
| - ciśnienie atmosferyczne | $E = 0,1\text{ MPa}$. |

W programie własnym przeprowadzono obliczenia stężeń zanieczyszczeń w rozważanym obszarze przy przyjętym układzie komunikacyjnym i określonych powyżej warunkach meteorologicznych. Obliczenia oparto o wzór (1) przedstawiony w rozdziale 2.

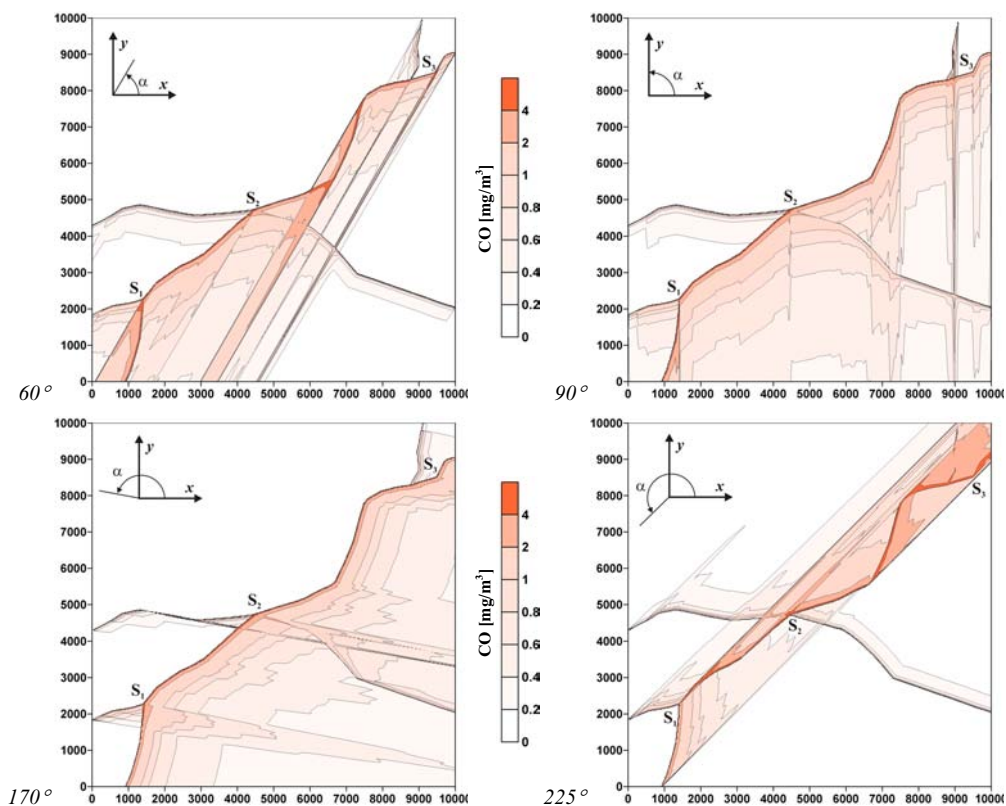
Otrzymane rozkłady stężeń tlenku węgla w przypadku występowania różnych kierunków wiatru przedstawiono na rysunku 3. Można zauważyć, że największe stężenia występują przy wietrze z kierunku 225° . Jest to spowodowane przedmuchiowaniem zanieczyszczeń wzdłuż głównej drogi, w kierunku kolejnych skrzyżowań. Na ostatnim z nich występują wartości maksymalne wynikające z częściowego sumowania się stężeń zanieczyszczeń.

Rozkład stężeń dla trzech kolejnych skrzyżowań w przypadku, gdy kierunek wiatru wynosił 60° oraz 225° przedstawia rysunek 4. Natomiast w tabeli 1 przedstawiono wartości średniego stężenia tlenku węgla w obszarze skrzyżowań $S_1 - S_3$.

Maksymalne wartości stężenia tlenku węgla (dla kierunków wiatru 60° i 225°) na krzyżowaniu pierwszym (S_1), drugim (S_2) i trzecim (S_3) wynosiły odpowiednio: $10,70\text{ mg/m}^3$, $6,90\text{ mg/m}^3$ oraz $7,30\text{ mg/m}^3$. Należy przy tym zwrócić uwagę, że dla różnych kierunków wiatru sposób

rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń może powodować, że wysokie stężenia pokrywać będą znaczne fragmenty terenów zabudowanych (np. dla kierunku wiatru 225°).

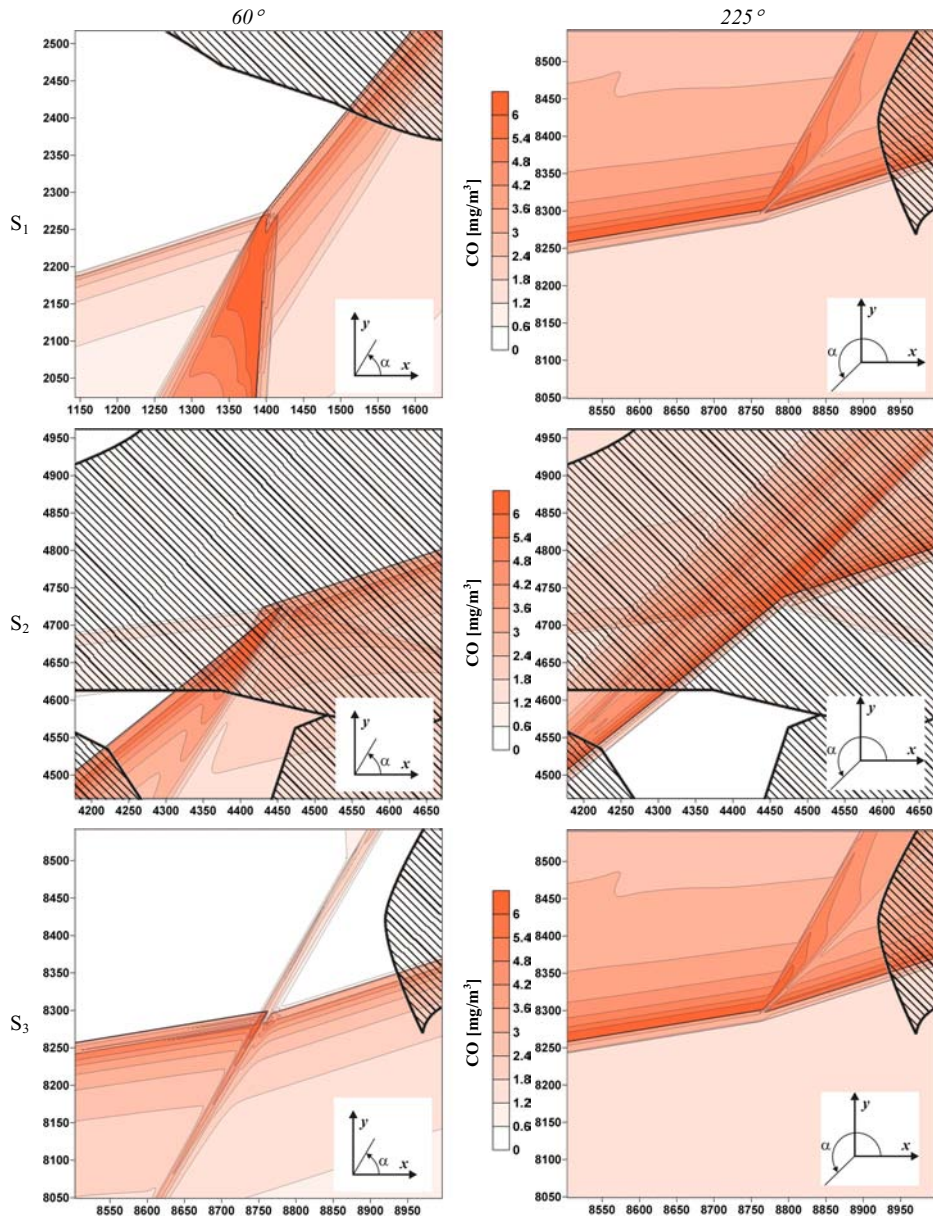
Tereny zabudowane w obszarach określanych jako $S_1 - S_3$ zajmowały różną powierzchnię. Największe wartości stężeń zanieczyszczeń występowały w otoczeniu skrzyżowania drugiego. Obliczenia wykonane przy użyciu pakietu Idrisi Kilimanjaro v. 14 wskazują, że w przypadku kierunku wiatru 225° aż 30% budynków mieszkalnych znajduje się w strefie, dla której stężenie tlenku węgla wynosi powyżej 4 mg/m³. Wprawdzie taka wartość stężenia tlenku węgla nie jest uznawana za niebezpieczną, ale częsta i długotrwała ekspozycja na jego oddziaływanie może stać się przyczyną wielu schorzeń u ludzi [13].



Rys.3. Stężenia zanieczyszczeń przy różnych kierunków wiatru
Fig.3. CO concentrations for different wind directions

Tab. 1. Wartości średniego stężenia tlenku węgla dla skrzyżowań $S_1 - S_3$
Tab. 1. Average CO concentrations near cross roads $S_1 - S_3$

Obszar	Kierunek wiatru	Średnie stężenie CO [mg/m ³]			
		60°	90°	170°	225°
Skrzyżowanie S_1		1,37	1,29	1,43	1,25
Skrzyżowanie S_2		2,42	2,50	2,53	2,02
Skrzyżowanie S_3		2,51	2,45	2,40	2,65
Cały obszar		0,32	0,38	0,36	0,32



Rys.4. Rozkład tlenku węgla na skrzyżowaniach $S_1 - S_3$, przy różnych kierunkach wiatru
 Fig.4. CO concentrations near cross roads $S_1 - S_3$ for different wind directions

5. Podsumowanie

Modelowanie emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń komunikacyjnych wymaga stosowania zintegrowanego systemu komputerowego. Podstawowym celem takiego systemu jest modelowanie i bilansowanie emisji oraz tworzenie map przestrzennych rozkładów zanieczyszczeń. Zastosowanie systemu GIS do analizy stężenia zanieczyszczeń pozwala na

wskazanie obszarów o zwiększonej wartości stężeń zanieczyszczeń drogowych. Wykonane analizy wykazują, że systemy informacji przestrzennej są przydatnym oraz wygodnym narzędziem wspomagającym inne moduły systemu. Możliwość budowy skryptów, wykorzystywanych do zautomatyzowania często wykonywanych operacji, podnosi efektywność tych systemów, poprzez skrócenie czasu potrzebnego na wykonanie określonych analiz.

Artykuł powstał w trakcie realizacji projektu badawczego nr 4T12D00830, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

Literatura

- [1] *Wskazówki metodyczne dotyczące modelowania matematycznego w systemie zarządzania jakością powietrza*, Ministerstwo Środowiska, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa, 2003.
- [2] *Wskazówki dla wojewódzkich inwentaryzacji emisji na potrzeby ocen bieżących i programów ochrony powietrza*, Ministerstwo Środowiska, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa, 2003.
- [3] *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 5 grudnia 2002 roku w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu*, (Dz. Ust. 2003, Nr 1, poz. 12).
- [4] *Handbook Emission Factors for Road Transport*, Version 1.2, INFRAS, 1999.
- [5] Brzozowski, K., Wojciech, S., *The numerical analysis of car pollutants dispersion*, Archiwum Motoryzacji, Nr 2, pp.127-140, 2000.
- [6] Khare, M., Sharma, P., *Modelling urban vehicle emissions*, WIT Press, Southampton, 2002.
- [7] Brzozowski, K., Drag, Ł., *Liniowa i quasi liniowa koncepcja źródła w modelowaniu oddziaływania emisji ze środków transportu kołowego*, Ochrona powietrza w teorii i praktyce (red. J.Koniecznyński, R.Zarzycki), IPIŚ PAN, pp. 49–59, 2004.
- [8] Brzozowska, L., Brzozowski, K., *Komputerowe modelowanie emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń samochodowych*, Wydawnictwo Naukowe Śląsk, Katowice-Warszawa, 2003.
- [9] Markiewicz, M. T., *Podstawy modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004.
- [10] Urbański, J., *Zrozumieć GIS. Analiza informacji przestrzennej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1997.
- [11] Baryzewska, K., Mazurkiewicz, M., Ulbrich, R., *Analiza wpływu kształtu układu drogowo-ulicznego zanieczyszczeń od komunikacyjnych i hałasu przy parametrach brzegowych na przykładzie Zabrza*, http://www.road.pl/Gis_emisja.htm.
- [12] Brzuchowska, J. Swędrak, M., *Przeciw spalinom i hałasowi, GIS jako narzędzie oceny uciążliwości rozwiązań komunikacyjnych we Wrocławiu*, Geodeta, Nr 10 (77), <http://atomnet.pl/~geodeta/2001/77text2.htm>, 2001.
- [13] Hazim, A., *Ventilations of building, 2nd edition*, Spoon Press, London And New York, 2003.