

# SYSTEM OCENY JAKOŚCI POWIETRZA W MEZOSKALI

Lucyna BRZOZOWSKA, Krzysztof BRZOZOWSKI, Łukasz DRAĞ

**Streszczenie:** W artykule opisano zintegrowany system oceny jakości powietrza w aglomeracjach miejskich. Zilustrowano budowę systemu z uwzględnieniem procesów zachodzących w trakcie modelowania poszczególnych elementów, takich jak: moduł dotyczący ruchu potoku pojazdów oraz emisji zanieczyszczeń, moduł pozwalający na obliczenie pola prędkości powietrza, moduł rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń oraz moduł pre- i postprocesingu danych. Przedstawiono także przykład zastosowania proponowanego systemu do oceny jakości powietrza atmosferycznego w obszarze małego miasta.

**Słowa kluczowe:** modelowanie komputerowe, emisja, rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń, transport drogowy, jakość powietrza.

## 1. Wstęp

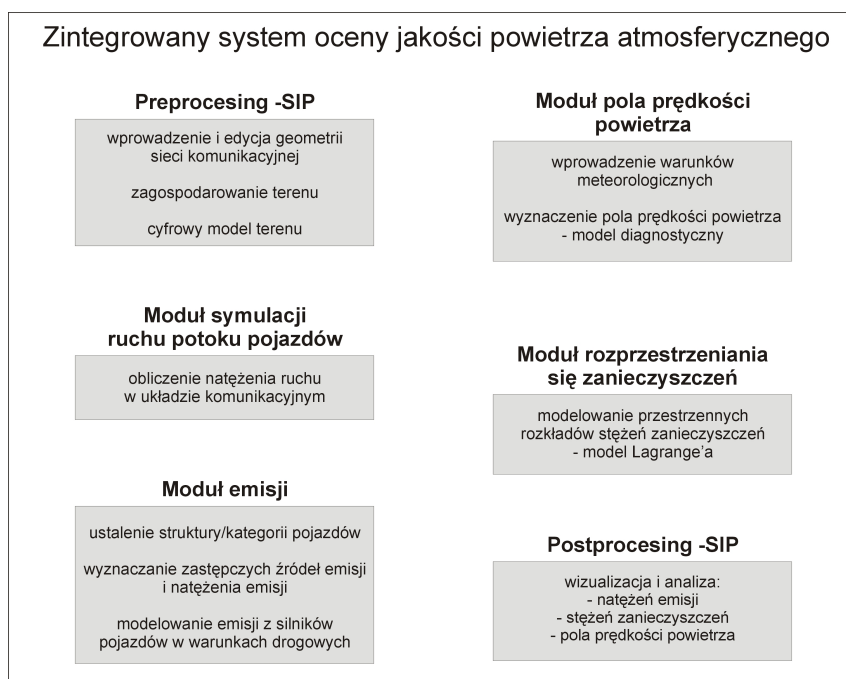
Ocena jakości powietrza atmosferycznego w aglomeracjach miejskich stała się w obecnym czasie ważnym elementem polityki lokalnej. Stężenia zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym w obszarach zurbanizowanych często przekraczają dopuszczalne wartości ustalone przez przepisy Unii Europejskiej i Światowej Organizacji Zdrowia. W Europie prawie 30% ludności zamieszkującej na terenach miejskich jest narażone na oddziaływanie stężeń tlenków azotu i ozonu w dawkach przekraczających wartości dopuszczalne [8]. Do najistotniejszych źródeł emisji zanieczyszczeń w aglomeracjach miejskich zalicza się pojazdy samochodowe napędzane silnikami spalinowymi. Na całkowitą ilość emitowanych zanieczyszczeń pochodzenia motoryzacyjnego i pośrednio również poziom stężeń tych zanieczyszczeń, oprócz rosnącego natężenia ruchu, wpływ ma także sprawność techniczna pojazdów, jakość paliwa oraz stan sieci dróg i ich nawierzchni. Istotna jest również budowa i złożoność układów komunikacyjnych, czyli liczba skrzyżowań i czas przebywania na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną oraz położenie i ilość miejsc do parkowania.

Emisja związków szkodliwych powstających w wyniku spalania paliw węglowodorowych może być ograniczana poprzez wprowadzanie efektywnych metod zarządzania infrastrukturą i ruchem drogowym w obrębie aglomeracji miejskich na podstawie oceny stanu istniejącego, jak i prognozowanego stopnia zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego. Umożliwiają to systemy oceny jakości powietrza atmosferycznego np. takie jak: AirQUIS [1] czy FUTURE [9], w których znaczną rolę odgrywają coraz bardziej złożone modele rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń. Modele te, zgodnie z europejską polityką w zakresie ochrony powietrza stanowią jeden z najbardziej istotnych elementów systemu. Są one wykorzystywane do ustalenia przyczyn przekroczeń dopuszczalnych stężeń, wyszukiwania obszarów szczególnie narażonych na przekroczenia, oraz do oceny skutków planowanych i podejmowanych działań [15].

## 2. Zintegrowany system oceny jakości powietrza atmosferycznego

W aglomeracjach miejskich, wdrożenie systemu zarządzania jakością powietrza wymaga posiadania modelu operacyjnego pozwalającego na uwzględnienie specyfiki źródeł emisji, jakimi są silniki pojazdów, a także złożoności obszaru miejskiego z zabudową, infrastrukturą drogową, parkingami itp. Do najważniejszych komponentów systemów zarządzania i monitoringu jakości powietrza w obszarach miejskich można zaliczyć: sieci monitoringu jakości powietrza, bazy danych o źródłach emisji, modele opisujące dynamikę i położenie źródeł, modele rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza, normy jakości powietrza, systemy informacji przestrzennej (do zarządzania, udostępniania, wizualizacji danych przechowywanych i przetwarzanych w systemie), systemy komunikowania z lokalną społecznością (najczęściej serwis www), systemy podejmowania decyzji do formułowania i interpretowania strategii oraz projektowania alternatywnych rozwiązań [13, 14].

Schemat proponowany przez autorów niniejszej pracy systemu oceny jakości powietrza atmosferycznego w aglomeracjach miejskich, uwzględniającego kluczowe elementy wymienione powyżej, przedstawiono na rys.1.



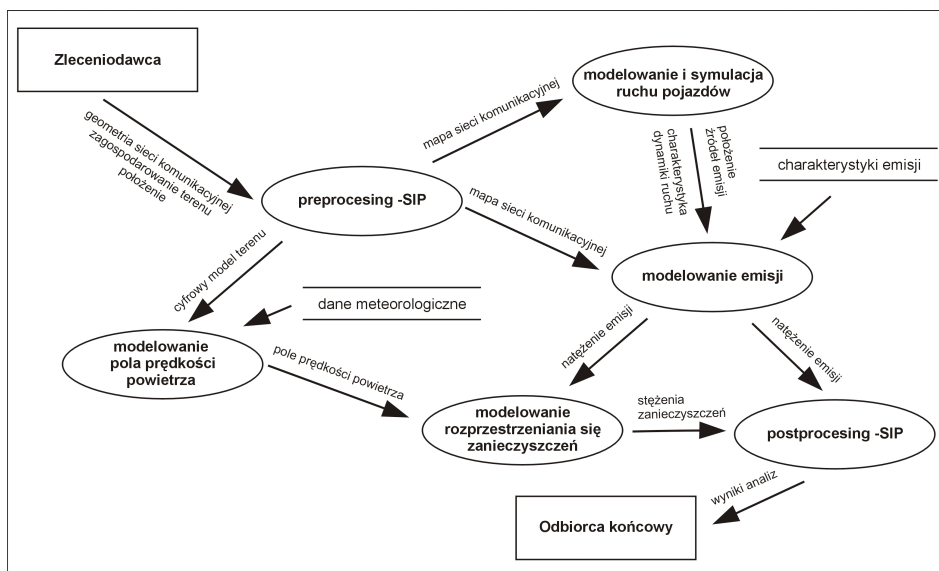
Rys. 1. Elementy systemu oceny jakości powietrza

Do integracji modułów wykorzystano autorską koncepcję zastosowania systemu informacji przestrzennej [5, 7]. Integracja ta pozwala na przyspieszenie operacji związanych z przygotowaniem danych wejściowych oraz związanych z analizą i wizualizacją wyników obliczeń numerycznych. W tym celu wykorzystano system informacji przestrzennej Idrisi w wersji Andes z dodatkowo zaimplementowanymi modułami eksportu i importu danych [7].

Poszczególne moduły proponowanego systemu oceny jakości powietrza stanowią obecnie indywidualne narzędzia badawcze. Celem autorów jest doprowadzenie do powstania jednolitego oprogramowania, niewymagającego od użytkownika końcowego znajomości sposobu działania poszczególnych modułów i dostosowanego do możliwości komputerów klasy PC.

Jednym z narzędzi programowania złożonych systemów komputerowych są diagramy przepływu danych (DPD). Najczęściej do opisu procesów, jak i całych systemów stosuje się jedną z trzech metod: metodę Warniera-Orra, traktującą struktury danych jako szkielet do budowy hierarchicznych systemów i programów, metodę Gane-Sarsona nazywaną inaczej modelowaniem logicznym oraz metodę Yourdona pozwalającą na analizę i projektowanie funkcjonalne oraz strukturalne systemów [12, 16]. W tej ostatniej metodzie występują trzy zasadnicze elementy projektowania. Są to: podział programu na moduły, uporządkowanie hierarchiczne modułów oraz zapewnienie spójności i wzajemnych sprzężeń modułów [17].

Schemat DPD dla proponowanego systemu, zaprojektowany według metody Yourdona przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Diagram przepływu danych dla proponowanego systemu oceny jakości powietrza atmosferycznego

W proponowanym systemie istnieje kilka niezależnych, zewnętrznych składnic danych. Są to bazy związane z natężeniem ruchu, modele emisji oraz informacje o warunkach meteorologicznych. W trakcie modelowania w samym systemie mogą być tworzone także inne tymczasowe magazyny danych. Ich powstawanie jest jednak związane z działaniem i budową poszczególnych modułów, co na ogólnym diagramie jest trudne do przedstawienia.

W następnych rozdziałach omówione zostaną poszczególne moduły, ich zadania i stosowane metody.

### 3. Preprocessing i postprocessing

Przygotowanie danych i ich wstępna obróbka do formatów odpowiednich dla kolejnych etapów modelowania zachodzi w module preprocessingu wykorzystującym system informacji przestrzennej. Preprocessing danych obejmuje przygotowanie cyfrowego modelu terenu wraz z obliczeniem szorstkości aerodynamicznej podłoża oraz cyfrowych danych o lokalizacji i typie układu komunikacyjnego.

Z kolei moduł postprocessingu obejmuje analizy przestrzenne oraz wizualizację wyników powstających w systemie na różnych etapach modelowania. Analiza przestrzenna obejmuje, między innymi:

- wyznaczenie obszarów o dominującym wpływie emisji z danego segmentu sieci komunikacyjnej,
- wyznaczenie obszarów o przekroczonym stężeniu dopuszczalnym,
- obliczenie minimalnego, maksymalnego i średniego stężenia zanieczyszczeń,
- wyznaczenie profili przestrzennych,
- wyznaczenie zasięgu oddziaływań stężeń zanieczyszczeń.

W module tym realizowana jest także wizualizacja wyników obliczeń poprzez tworzenie histogramów rozkładu stężenia zanieczyszczeń bądź seryjną analizę czasową rozkładu stężenia zanieczyszczeń, natężenia ruchu i emisji z pojazdów [3, 7].

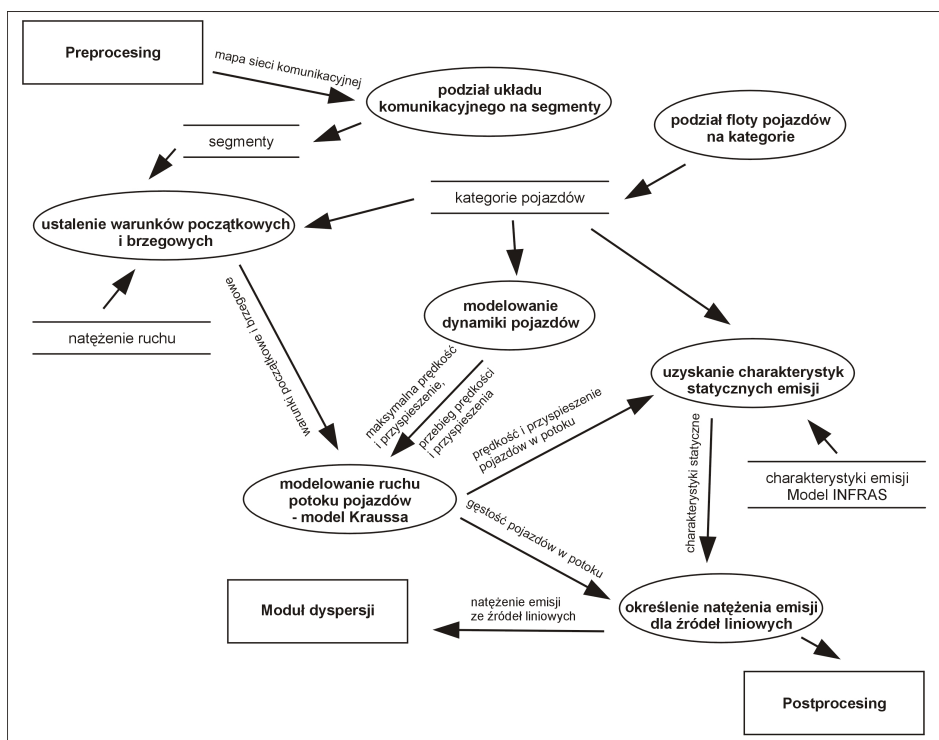
### 4. Moduł emisji związków szkodliwych spalin w warunkach miejskich oraz moduł ruchu potoku pojazdów

Pierwszym etapem po wprowadzeniu danych o geometrii układu komunikacyjnego i zagospodarowaniu terenu (preprocessing) jest modelowanie ruchu potoku pojazdów. Modele emisji stanowiące kolejny element modelu oceny jakości powietrza atmosferycznego w aglomeracjach miejskich wymagają bowiem znajomości takich wielkości jak prędkość ruchu, czy przyspieszenie pojazdu. Wielkości charakteryzujące ruch drogowy potrzebne w modelowaniu emisji drogowej to także gęstość potoku pojazdów oraz długość kolejki pojazdów przed sygnalizacją świetlną bądź skrzyżowaniem dróg.

Wielkości te, dla istniejących układów komunikacyjnych można zarejestrować eksperymentalnie, jednakże w przypadku, gdy ocena ma zostać wykonana dla projektowanych, bądź modernizowanych układów komunikacyjnych można je otrzymać wyłącznie poprzez modelowanie ruchu potoku pojazdów. Dodatkowo modele ruchu potoku pojazdów pozwalają na uwzględnienie zjawisk dynamicznych, wynikających ze zmienności warunków ruchu, co ma zasadnicze znaczenie przy bilansowaniu emisji.

W niniejszym systemie zastosowano model ruchu potoku pojazdów należący do klasy modeli mikroskopowych, a do jego parametryzacji wykorzystano model dynamiki pojazdu. Szczegółowy opis obu modeli zawarto w pracach [3, 7].

Do modelowania emisji zastosowano charakterystyki statyczne, uzyskane według modelu INFRAS [10, 11]. Pojazdy zróżnicowano według kategorii na pojazdy osobowe, lekkie pojazdy dostawcze, jednoczłonowe pojazdy ciężarowe, wieloczłonowe pojazdy ciężarowe i autobusy miejskie. Udziały procentowe poszczególnych kategorii uzależniono od rodzaju układu komunikacyjnego. Opis modelowania emisji przy użyciu charakterystyk statycznych i dynamicznych można znaleźć we wcześniejszych pracach autorów [2, 4, 6, 7]. Diagram przepływu danych dla modułu ruchu potoku pojazdów i modułu emisji przedstawiono na rys. 3.



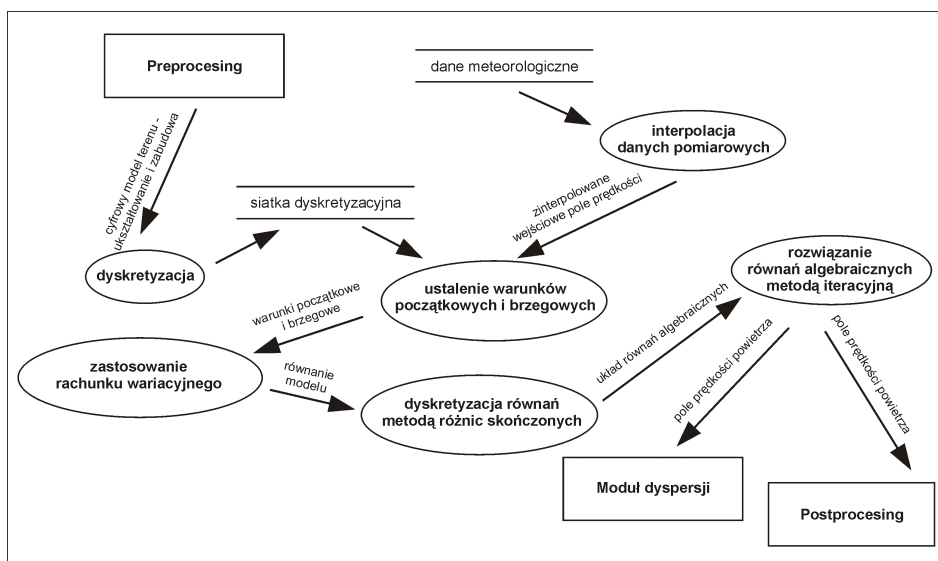
Rys. 3. Diagram DPD dla modułów: modelowanie ruchu potoku pojazdów i emisji

## 5. Moduł pola prędkości powietrza

Modelowanie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w warunkach miejskich wymaga przestrzennego pola prędkości powietrza. W tym celu zwykle stosuje się numeryczne modele pola prędkości powietrza, inaczej nazywane numerycznymi modelami meteorologicznymi. Modele te można podzielić na prognostyczne (dynamiczne) i diagnostyczne (kinematyczne). Do pierwszej grupy należą modele wykorzystujące układ równań opisujących transport masy, energii i pędu w płynie z uwzględnieniem turbulencji. Natomiast w modelach diagnostycznych do otrzymania przestrzennego pola prędkości powietrza wykorzystywane jest tylko równanie bilansu masy i wejściowe dane pomiarowe. Modele te nie uwzględniają wszystkich czynników determinujących ruch powietrza, umożliwiają jednak pozyskanie informacji wejściowych do modelu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w warunkach ustalonych, przy znacznie niższych kosztach obliczeń w stosunku do modeli prognostycznych.

W prezentowanym systemie wykorzystano model diagnostyczny, zapewniający, że wynikowe pole prędkości spełnia równanie ciągłości dla płynu nieściśliwego [3].

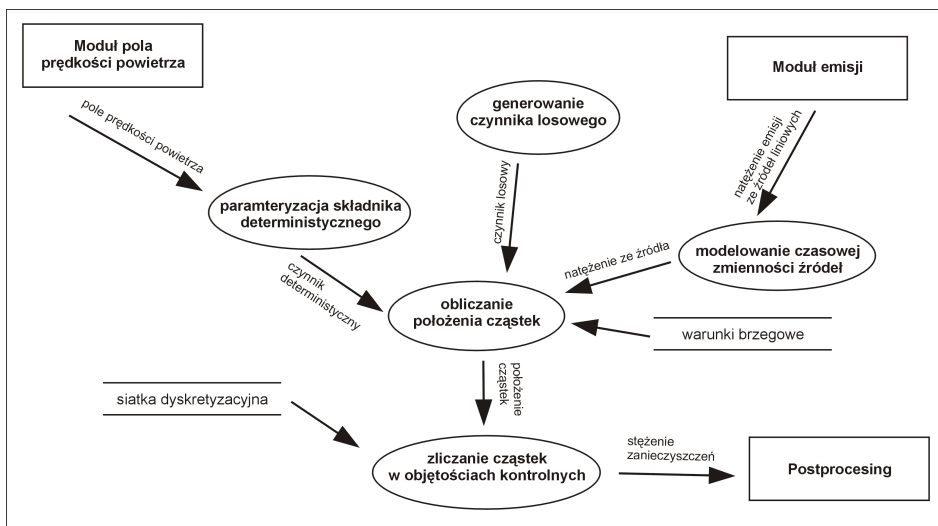
Na rys. 4 przedstawiono schemat postępowania dla modelu diagnostycznego przy rozwiązywaniu zadania modelowania pola prędkości powietrza.



Rys. 4. Diagram DPD dla modułu pola prędkości powietrza

## 6. Moduł rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń

Wśród modeli rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń wykorzystywanych do analizy procesów turbulentnego transportu masy w atmosferze wyróżnić można dwie podstawowe grupy: modele fizyczne oraz modele matematyczne [14, 18]. Te ostatnie wykorzystywane są w procesach oceny jakości powietrza.



Rys.5. Diagram DPD dla modułu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń

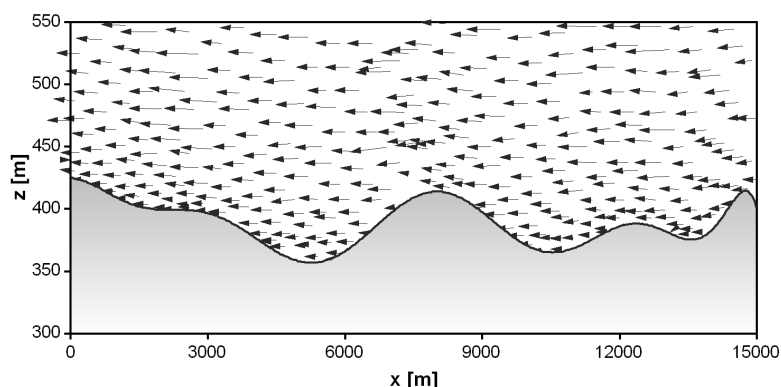
Termin modele matematyczne obejmuje modele analityczne, statystyczne i numeryczne. Wśród nich można wyróżnić modele o różnym horyzoncie czasowym i o różnej skali przestrzennej stosowane do opisu zjawisk zachodzących w obszarze pojedynczego kanionu ulicznego lub parkingu (lokalne), przez region całego miasta lub jego części, po państwa i obszary większe.

Pośród matematycznych modeli rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, ze względu na kryterium układu odniesienia, można wyróżnić: modele Eulerowskie i Lagrangeowskie. W proponowanym systemie zaproponowano efektywny ze względu na czas obliczeń Lagrangeowski model cząstek [18]. Schemat przepływu danych w module rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń przedstawiono na rys. 5.

## 7. Ocena jakości powietrza atmosferycznego za pomocą systemu zintegrowanego

W dalszej części przedstawiono zastosowanie systemu oceny jakości powietrza dla średniej wielkości miasta, położonego na terenie górzystym, w którym maksymalna różnica wysokości wynosi 250 m. Wykorzystano wszystkie omówione wcześniej moduły, a dokładny opis postępowania został przedstawiony w pracy [3].

Analizowany obszar 180 km<sup>2</sup> poddany został dyskretyzacji. Wykonano symulacje pola prędkości powietrza dla siatki dyskretyzacyjnej składającej się z około 600000 węzłów. Na rys. 6 przedstawiono obliczone pole prędkości powietrza w wybranym przekroju przez analizowany obszar.

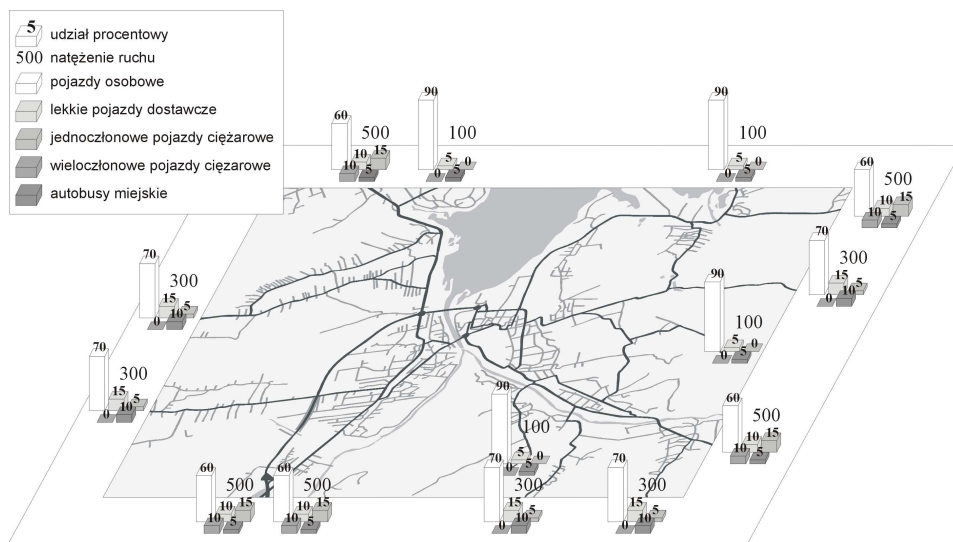


Rys. 6. Obliczone pole prędkości dla wybranego przekroju [3]

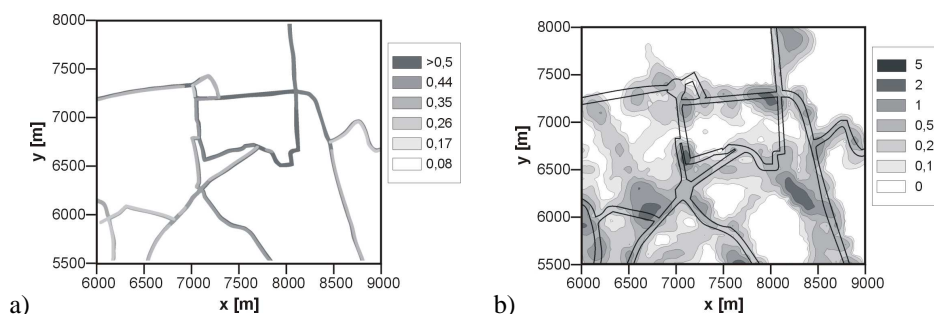
W kolejnym kroku przeprowadzono symulacje ruchu potoku pojazdów w sieci komunikacyjnej miasta o długości blisko 110 km. Pojazdy zróżnicowano według skumulowanych kategorii, a udziały procentowe poszczególnych kategorii uzależniono od rodzaju układu komunikacyjnego. Sieć komunikacyjną wraz z przyjętymi natężeniami ruchu na drogach wlotowych przedstawiono na rys. 7. Poszczególne układy komunikacyjne zostały podzielone na segmenty o zmiennej długości (nie mniejszej niż 150 m). Symulacje przeprowadzono dla jednej godziny, w czasie której co 15 minut przeliczono aktualne średnie natężenie emisji dla każdego segmentu reprezentującego liniowe źródło emisji.

Wyniki obliczeń natężenia emisji tlenku węgla i jego średniego stężenia na wysokości 2 m nad poziomem terenu dla fragmentu centrum miasta w wybranym przedziale czasowym

przedstawiono na rys. 8. Średnie 15-minutowe rozkłady stężeń tlenu węgla wizualizowano z wykorzystaniem systemu informacji przestrzennej Idrisi.



Rys. 7. Przyjęte udziały procentowe dla poszczególnych kategorii pojazdów oraz natężenie ruchu pojazdów na drogach wlotowych w modelowanej sieci komunikacyjnej [3]



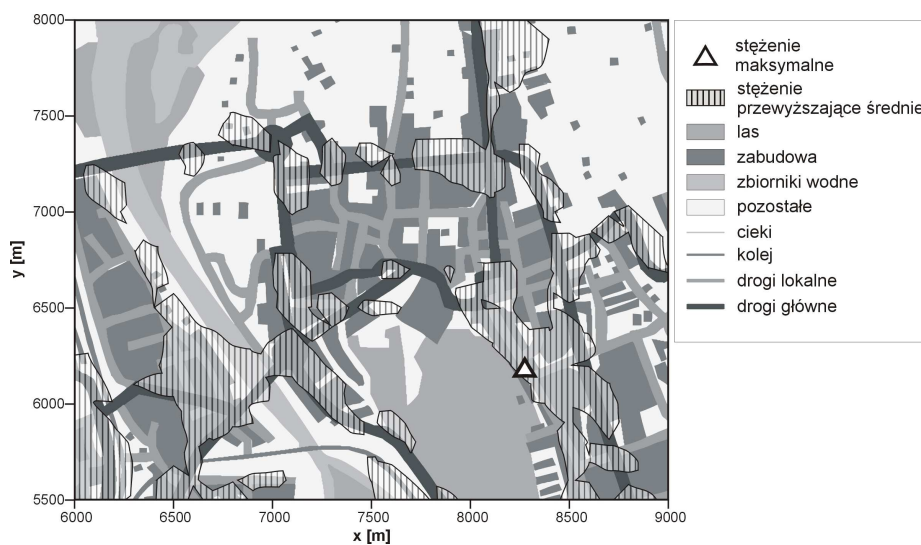
Rys. 8. Natężenie emisji CO w  $[mg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$  – a) i stężenia CO  $[mg \cdot m^{-3}]$  – b) w wybranym przedziale czasowym symulacji [3]

Przeprowadzone obliczenia umożliwiają identyfikację stopnia oddziaływania ruchu drogowego na jakość powietrza w centrum miasta. Szczegółowa analiza wymaga wykorzystania narzędzi dostępnych w systemach informacji przestrzennej. Możliwe jest zlokalizowanie obszarów, w których stężenia związków szkodliwych spalin osiągają wysokie wartości (przy określonym kierunku wiatru) i mogą kwalifikować te obszary jako wymagające ciągłego monitoringu. Dla przykładu, na rys 9. przedstawiono graficznie obszary występowania stężeń przewyższających średnie stężenie jednogodzinne i miejsce, w którym obliczone stężenie tlenu węgla jest największe.

Dodatkowa analiza pozwala na wskazanie miejsc o słabszym przewietrzeniu (przy założonych warunkach meteorologicznych), w których najszybciej może dojść do przekroczenia stężeń dopuszczalnych. Obliczono, że obszar słabszego przewietrzania



stanowi 23,1% powierzchni centrum miasta, natomiast 83% powierzchni centrum miasta znajduje się w zasięgu oddziaływań CO emitowanego w wyniku ruchu kołowego. Prawie jedną czwartą powierzchni terenu pokrywają więc obszary, dla których należałoby przeprowadzić osobną, szczegółową analizę warunków przewietrzania. Analizę taką można przeprowadzić przy użyciu modelu mikroskalowego [6]. Inne rodzaje analiz i wizualizacji danych z wykorzystaniem modułu postprocesingu zostały przedstawione w pracy [3].



Rys. 9. Miejsce występowania obliczonego maksymalnego stężenia tlenku węgla oraz obszar, w którym obliczone stężenie przekracza wartość średniej jednogodzinnej dla całego analizowanego obszaru [3].

## 8. Podsumowanie

Przedstawiony system oceny jakości powietrza atmosferycznego stanowi obecnie narzędzie badawcze. Sposób modelowania poszczególnych elementów, jak i budowa modułów mogą zostać poszerzone o dodatkowe rozwiązania pozwalające np. na uwzględnienie mikroskalowych aspektów zagadnienia modelowania pola prędkości powietrza, czy rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń. Ważnym elementem jest także modelowanie osiadania cząstek stałych emitowanych z silników pojazdów. W systemie oceny jakości powietrza atmosferycznego może zostać również zawarty moduł pozwalający na ocenę oddziaływania transportu drogowego pod kątem hałasu. Jednakże już w obecnie istniejącym i opisanym systemie jest możliwa zarówno diagnoza, jak i prognozowanie jakości powietrza w aglomeracjach miejskich z uwzględnieniem nawet skomplikowanej zabudowy oraz dla terenów o złożonej topografii.

## Literatura

1. Bøhler T., Karatzas K., Peinel G., Rose T., San Jose R.: Providing multi-modal access to environmental data-customizable information services for disseminating urban air

- quality information in APNEE. *Computers, Environment and Urban Systems* 26, 2002, 39-61.
2. Brzozowska L., Brzozowski K.: Komputerowe modelowanie emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń samochodowych. WN Śląsk, Katowice-Warszawa, 2003.
  3. Brzozowska L., Brzozowski K., Drąg Ł.: Transport drogowy a jakość powietrza atmosferycznego. Modelowanie komputerowe w mezoskali. WKŁ, Warszawa, 2008 (w druku)
  4. Brzozowska L., Brzozowski K., Wojciech S.: Computational modelling of car pollutant dispersion. WN Śląsk, Katowice, 2001.
  5. Brzozowska L., Drąg Ł.: Modelowanie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza emitowanych przez silniki pojazdów z zastosowaniem GIS. *Journal of KONES Powertrain and Transport* Vol. 13, Nr 4, 2006, 239-246.
  6. Brzozowski K.: Mikroskalowe modele emisji i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń samochodowych. Wydawnictwo ATH, Rozprawy Naukowe nr 18, Bielsko-Biała, 2006.
  7. Drąg Ł.: Wpływ modeli ruchu pojazdów na obliczeniową emisję zanieczyszczeń. Rozprawa doktorska, Akademia Techniczno-Humanistyczna (2008), Bielsko-Biała.
  8. EEA Report: Air Pollution in Europe 1990–2004, Copenhagen, 2007.
  9. Finardi S., De Maria R., D’Allura A., Cascone C., Calori G., Lollobrigida F.: A deterministic air quality forecasting system for Torino urban area, Italy. *Environmental Modelling & Software* 23, 2008, 344-355.
  10. HBEFA: Handbook of emission factors for road traffic. Version 1.2, Infras AG, Bern, 1999.
  11. HBEFA: Handbook of emission factors for road traffic. Version 2.1, Infras AG, Bern, 2004.
  12. Jaszkevicz A: Inżynieria oprogramowania. Helion, 1997.
  13. Karatzas K., Moussiopoulos N.: Development and use of integrated air quality management tools in urban areas with the aid of environmental telematics. *Environmental Monitoring and Assessment* 65, 2000, 451-458.
  14. Khare M., Sharma P.: Modelling urban vehicle emissions. WIT Press, Southampton, 2002.
  15. Łobocki L.: Wskazówki metodyczne dotyczące modelowania matematycznego w systemie zarządzania jakością powietrza. Ministerstwo Środowiska, Warszawa, 2003.
  16. Wrycza S.: Analiza i projektowanie systemów informatycznych zarządzania. Metodyki, techniki, narzędzia. PWN, Warszawa, 1999.
  17. Yourdon E., Constantine Larry L.: Structured Design: Fundamentals of a Discipline of Computer Program and System Design. Englewood Cliffs: Yourdon Press, 1979.
  18. Zannetti P.: Air pollution modeling. Theories, computational methods and available software. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.

Dr inż. Lucyna BRZozowska

Dr hab. inż. Krzysztof BRZozowski

Mgr inż. Łukasz DRĄG

Katedra Mechaniki i Informatyki, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

43-309 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2

tel./fax.: (033) 8279 289

e-mail: brzozowska@ath.eu; kbrzozowski@ath.eu; ldrag@ath.eu