

BADANIA MODELU IMISJI CZĄSTEK STAŁYCH PM10 W ŚRODOWISKU TRAS KOMUNIKACYJNYCH

ZDZISŁAW CHŁOPEK¹

Politechnika Warszawska

Streszczenie

W artykule przeanalizowano behawiorystyczne modele emisji cząstek stałych PM10. Przedmiotem badań były jednowymiarowe modele, uwzględniające liniową zależność emisji cząstek stałych PM10 od emisji dwutlenku azotu i emisji tlenku węgla. Do identyfikacji współczynników modeli wykorzystano wyniki badań empirycznych emisji zanieczyszczeń, dokonywane na stacji nadzorowania jakości powietrza Warszawa-Komunikacyjna w Warszawie przy Al. Niepodległości. Identyfikacji współczynników modeli dokonano dla zbiorów obejmujących wyniki pomiaru: w całym roku i w poszczególnych miesiącach. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono silną korelację między badanymi zbiorami oraz dużą niepewność zarówno współczynników korelacji badanych zbiorów, jak i współczynników modeli. Stwierdzono konieczność statystycznego traktowania identyfikacji behawiorystycznych modeli emisji cząstek stałych PM10 dla kategorii, opisujących właściwości źródeł emisji zanieczyszczeń i warunków ich rozprzestrzeniania.

Słowa kluczowe: motoryzacja, cząstki stałe, PM10, modelowanie, emisja.

1. Wstęp

Przekroczenia dopuszczalnych wartości stężeń cząstek stałych PM10, szczególnie w centrach miast, są najczęstszą przyczyną konieczności podejmowania działań naprawczych w związku z negatywną oceną jakości powietrza. Jakość powietrza ocenia się na podstawie uśrednionych w czasach przewidzianych przepisami emisji zanieczyszczeń – stężeń zanieczyszczeń rozproszonych w powietrzu na wysokości 1,5 m [20]. Tylko w nielicznych wypadkach istnieje możliwość empirycznego badania emisji cząstek stałych PM10, podobnie jak i innych zanieczyszczeń. W pozostałych sytuacjach istnieje konieczność oceny emisji cząstek stałych PM10 na podstawie modelowania ich emisji oraz modelowania rozprzestrzeniania zanieczyszczeń.

Istnieje wiele źródeł emisji pyłów [5–11, 13–16, 20, 23]. Naturalne źródła emisji są związane m.in. z procesami zachodzącymi z udziałem materiałów osadowych, z wybuchami

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, Narbutta 84, 02-524 Warszawa, e-mail: zchlopek@simr.pw.edu.pl, tel. 22 234 85 59

wulkanów i pożarami. Antropogennymi przyczynami są wszelkie działania cywilizacyjne, w szczególności przemysł, energetyka i transport. W miastach głównym źródłem emisji cząstek stałych jest transport samochodowy.

Do modelowania emisji cząstek stałych ze źródeł związanych z transportem samochodowym wykorzystuje się wielkości charakteryzujące jakość nawierzchni jezdnej, masę pojazdu, liczbę kół jezdnych oraz – w niektórych wypadkach – udział dni z opadami atmosferycznymi, a w innych modelach jest również uwzględniana średnia prędkość pojazdów. Są to modele zbudowane zgodnie z kryterium podobieństwa strukturalnego (morfologicznego) [4]. Modele takie zostały opracowane m.in. w US EPA (Environment Protection Agency – Agencja Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych Ameryki) [14–16] i w Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG – Karlsruhe Und Dresden (Pracownia Lohmeyera Sp. z o.o. – Karlsruhe i Drezno) [21]. Uogólnienie teorii modeli emisji cząstek stałych PM10 ze źródeł motoryzacyjnych, opracowanych zgodnie z kryterium podobieństwa strukturalnego, znajduje się w [5–9, 23]. Znamioną cechą tych modeli jest ich skomplikowana struktura i – w związku z tym – duża trudność identyfikacji licznych parametrów modelu.

Inną możliwością oceny zagrożenia środowiska cząstkami stałymi PM10 jest wykorzystanie modeli emisji cząstek stałych PM10, opracowanych zgodnie z kryterium podobieństwa funkcjonalnego (modele behawiorystyczne) [4]. Mimo że modeluje się w tym wypadku imisję zanieczyszczenia, tradycyjnie zalicza się te modele do kategorii modeli emisji. Do budowy behawiorystycznych modeli emisji cząstek stałych PM10 jest wykorzystywana zależność korelacyjna imisji cząstek stałych PM10 oraz imisji tlenków azotu i imisji tlenku węgla, postulowana jako liniowa na podstawie wyników badań empirycznych [1–3, 10, 12, 17, 18, 22, 23]. Parametry behawiorystycznych modeli emisji cząstek stałych są zależne od rodzajów źródeł emisji zanieczyszczeń i od warunków ich rozprzestrzeniania [1–3, 10, 12, 17, 18, 22, 23], istnieje jednak możliwość skutecznej oceny imisji cząstek stałych PM10 w porównywalnych warunkach do warunków badań empirycznych, wykorzystywanych do identyfikacji modelu [10].

W niniejszej pracy analizowano behawiorystyczne modele emisji cząstek stałych PM10. Wykorzystano do tego celu wyniki badań empirycznych, wykonywanych na stacji nadzorowania jakości powietrza Warszawa–Komunikacyjna, położonej w Warszawie przy Al. Niepodległości. Identyfikacji liniowych jednowymiarowych modeli emisji cząstek stałych PM10 dokonano na podstawie wyników pomiarów w 2009 r. oraz dla poszczególnych miesięcy tego roku.

2. Modele behawiorystyczne imisji cząstek stałych PM10

Do modelowania imisji cząstek stałych PM10 można wykorzystywać obserwowane zależności funkcyjne imisji różnych rodzajów zanieczyszczeń powietrza. Najczęściej wykorzystuje się zależności funkcyjne imisji cząstek stałych PM10 od imisji tlenków azotu, sprowadzonych do dwutlenku azotu, oraz od imisji tlenku węgla. W zakresie cząstek stałych, pochodzących ze źródeł motoryzacyjnych, zależności takie mają swe fizyczne uzasadnienie. Zwiększanie się natężenia emisji tlenków azotu z silników spalinywych jest skutkiem

zwiększonego obciążenia silników, a taki stan towarzyszy zwiększonej prędkości jazdy oraz zwiększonej masie ładunku. Wiadomo jest z badań empirycznych oraz z badań modeli strukturalnych emisji cząstek stałych PM10, że zwiększone wartości prędkości pojazdu oraz jego obciążenia powodują zwiększanie emisji cząstek stałych PM10 nie tylko z silnika spalinowego, ale i innych źródeł motoryzacyjnych. Podobnie dużym obciążeniem silnika spalinowego towarzyszy duże natężenie emisji tlenku węgla. Imisja zanieczyszczeń jest związana w sposób operatorowy z natężeniem emisji tych zanieczyszczeń, można jednak przyjąć, że uśrednione wartości imisji i natężenia emisji można potraktować jako zależne funkcyjnie [10, 11].

Ogólna postać modelu emisji cząstek stałych PM10, pochodzących z transportu drogowego, jest przyjęta w postaci funkcji:

$$I_{PM10} = f(I_{NOx}, I_{CO}) \quad (1)$$

gdzie:

I_{PM10} - imisja cząstek stałych PM10,

I_{NOx} - imisja tlenków azotu NO_x ,

I_{CO} - imisja tlenku węgla CO.

Funkcja ta spełnia warunki (2) w zakresie wartości imisji, zgodnych z wartościami z badań empirycznych wykorzystywanych do identyfikacji modelu.

$$\frac{\partial I_{PM10}}{\partial I_{NOx}} > 0; \quad \frac{\partial I_{PM10}}{\partial I_{CO}} > 0 \quad (2)$$

Najczęściej modele emisji cząstek stałych PM10 są przyjmowane jako liniowe względem imisji tlenków azotu i imisji tlenku węgla:

$$I_{PM10} = a_0 + a_1 \cdot I_{NOx} \quad (3)$$

$$I_{PM10} = a_0 + a_1 \cdot I_{CO} \quad (4)$$

Istnieje również możliwość przyjęcia nieliniowych modeli emisji cząstek stałych PM10, najczęściej w postaci funkcji wielomianowej stopnia drugiego:

$$I_{PM10} = a_0 + a_1 \cdot I_{NOx} + a_2 \cdot I_{CO} + a_3 \cdot I_{NOx}^2 + a_4 \cdot I_{CO}^2 + a_5 \cdot I_{NOx} \cdot I_{CO} \quad (5)$$

Identyfikacja behawiorystycznych modeli emisji cząstek stałych PM10 wskazuje na istotną zależność parametrów modeli od właściwości źródeł emisji zanieczyszczeń i warunków ich rozprzestrzeniania [10]. Zazwyczaj modele te mogą się znacznie różnić dla obszarów, różniących się intensywnością ruchu pojazdów [10].

W większości źródeł potwierdza się silniejsza korelacja imisji cząstek stałych PM10 i imisji tlenku węgla niż imisji cząstek stałych PM10 i imisji tlenków azotu [10, 24]. Mimo to bardziej rozpowszechnione jest wykorzystywanie do budowy modeli emisji cząstek stałych PM10 imisji tlenków azotu [1-3, 12, 13, 17, 18, 22].

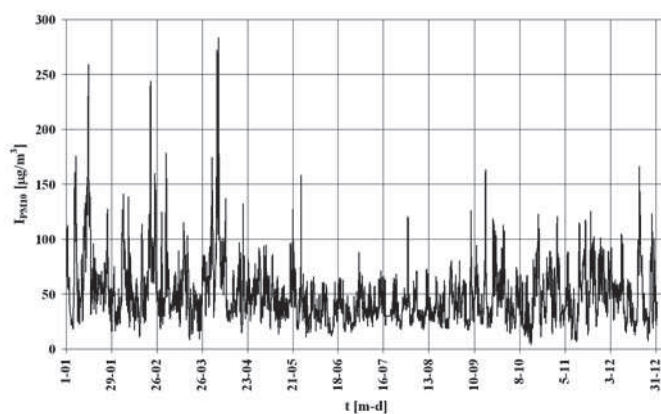
3. Identyfikacja modeli behawiorystycznych imisji cząstek stałych PM10

Do identyfikacji modeli liniowych imisji cząstek stałych PM10 (3 i 4) wykorzystano wyniki badań empirycznych, wykonywanych w 2009 r. na stacji nadzorowania jakości powietrza Warszawa-Komunikacyjna. W badaniach zmodyfikowano model (3), przyjmując jako miarę tlenków azotu dwutlenek azotu. Sprowadzanie tlenków azotu do dwutlenku azotu nie jest operacją jednoznaczną, ponieważ przereagowywanie tlenku azotu do dwutlenku azotu zależy od wielu czynników, m.in. złożonych zjawisk fotochemicznych. W związku z tym zdecydowano się identyfikować model:

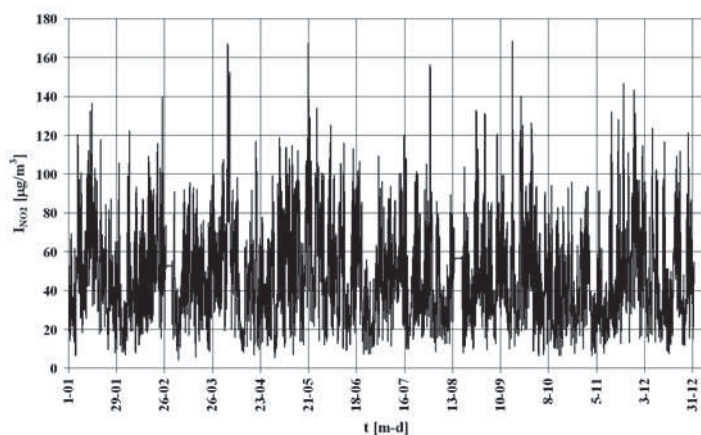
$$I_{PM10} = a_0 + a_1 \cdot I_{NO_2} \quad (6)$$

Źródłowe wyniki badań imisji zanieczyszczeń są w postaci wartości uśrednianych w ciągu 1 h. Wyniki poddano wstępnemu przetwarzaniu w postaci poszukiwania grubych błędów i uzupełniania braków. Do uzupełniania braków wykorzystano filtr Savitzky'ego-Golaya [21] z aproksymacją funkcją kwadratową pięciu punktów. Ten sam filtr posłużył do zmniejszenia udziału w sygnale szumów wysokoczęstotliwościowych.

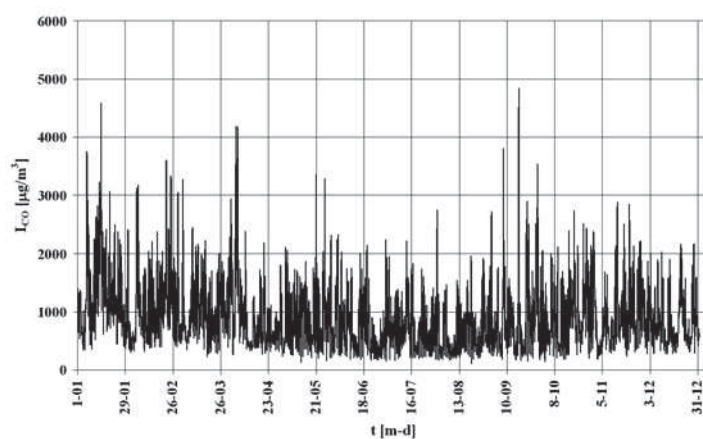
Na rysunkach 1–3 przedstawiono przebiegi imisji cząstek stałych PM10, dwutlenku azotu i tlenku węgla.



Rys. 1. Przebieg imisji cząstek stałych I_{PM10} .



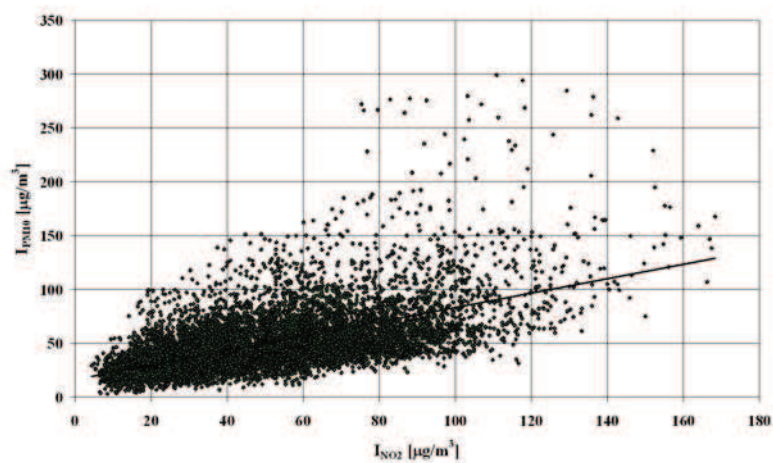
Rys. 2. Przebieg emisji dwutlenku azotu I_{N02} .



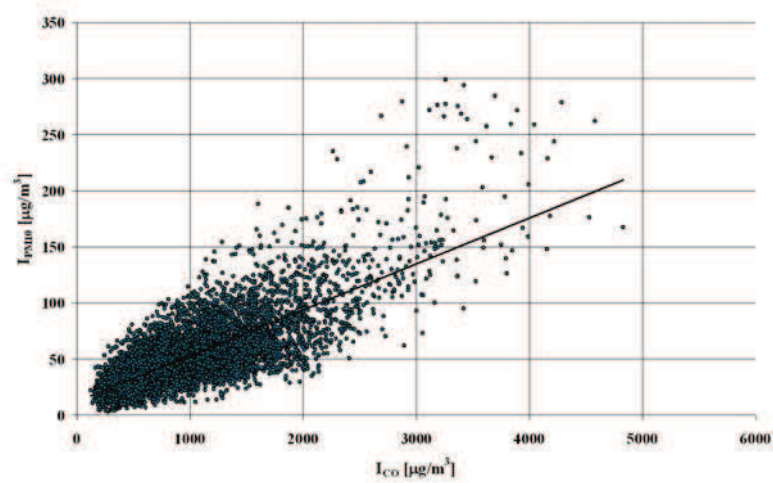
Rys. 3. Przebieg emisji tlenu węgla I_{CO} .

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono zależności korelacyjne emisji cząstek stałych od emisji dwutlenku azotu i tlenu węgla.

Badane zbiory są silnie ze sobą skorelowane. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona wynosi dla zbiorów emisji cząstek stałych PM10 i dwutlenku azotu 0,5919, cząstek stałych PM10 i tlenu węgla 0,7918. W obydwu wypadkach prawdopodobieństwo nieodrzućcia hipotezy o braku korelacji liniowej jest mniejsze od $1 \cdot 10^{-5}$.



Rys. 4. Zależność korelacyjna emisji cząstek stałych I_{PM10} od emisji dwutlenku azotu I_{NO_2} .



Rys. 5. Zależność korelacyjna emisji cząstek stałych I_{PM10} od emisji tlenku węgla I_{CO} .

Zidentyfikowane modele dla okresu, obejmującego 2009 r., mają postać:

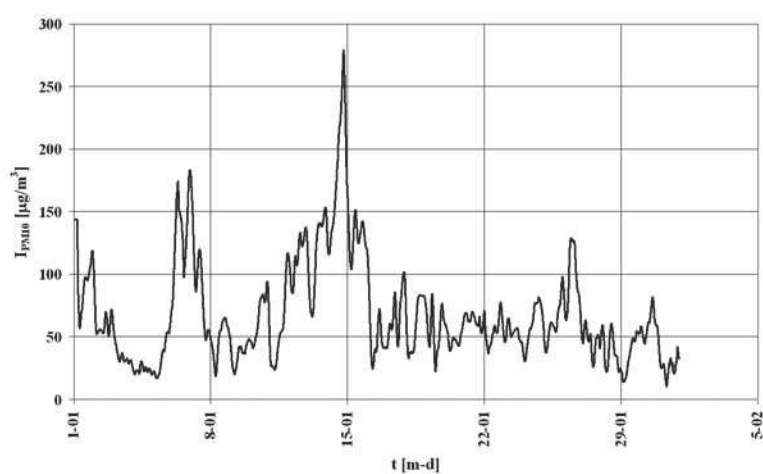
$$I_{PM10} = 16,43 + 0,668 \cdot I_{NO_2} \quad (7)$$

$$I_{PM10} = 12,24 + 0,0401 \cdot I_{CO} \quad (8)$$

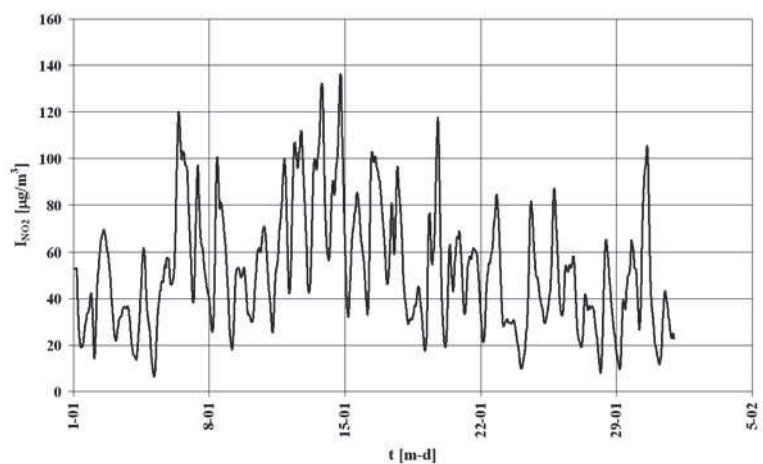
gdzie: I_{PM10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], I_{NO_2} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], I_{CO} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Przeprowadzono również identyfikację modeli dla poszczególnych miesięcy. Badania te wykonano w celu oceny niepowtarzalności parametrów modelu oraz wpływu pór roku na modele.

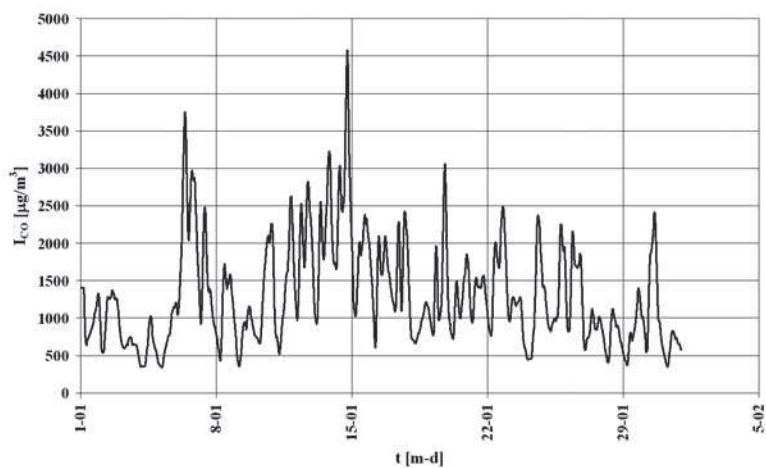
Na rysunkach 6–10 przedstawiono przykładowo przebiegi emisji cząstek stałych PM10, dwutlenku azotu i tlenku węgla oraz zależności korelacyjnych badanych zbiorów dla stycznia 2009 r.



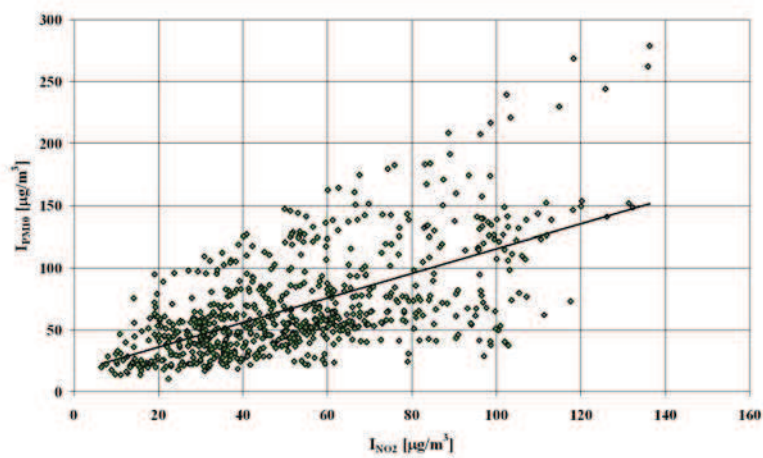
Rys. 6. Przebieg emisji cząstek stałych I_{PM10} w styczniu.



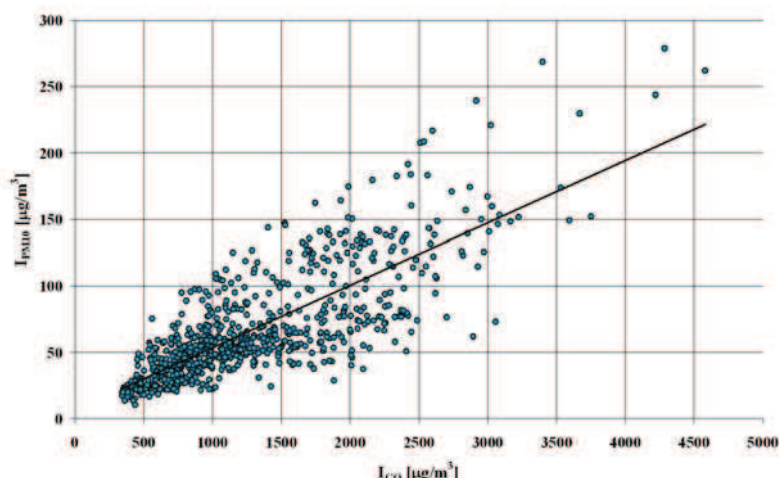
Rys. 7. Przebieg emisji dwutlenku azotu w styczniu I_{NO_2} .



Rys. 8. Przebieg imisji tlenku węgla w styczniu I_{CO} .

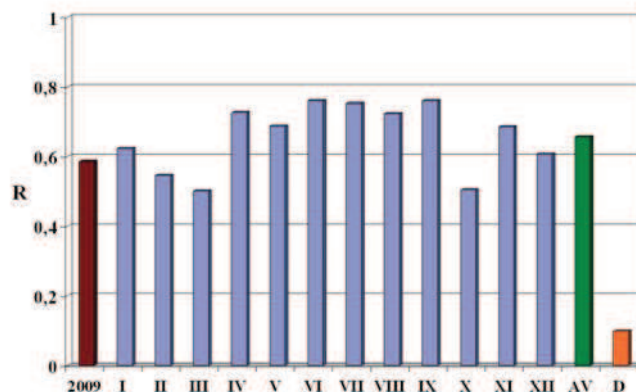


Rys. 9. Zależność korelacyjna imisji cząstek stałych $I_{PM_{10}}$ od imisji dwutlenku azotu I_{NO_2} w styczniu.

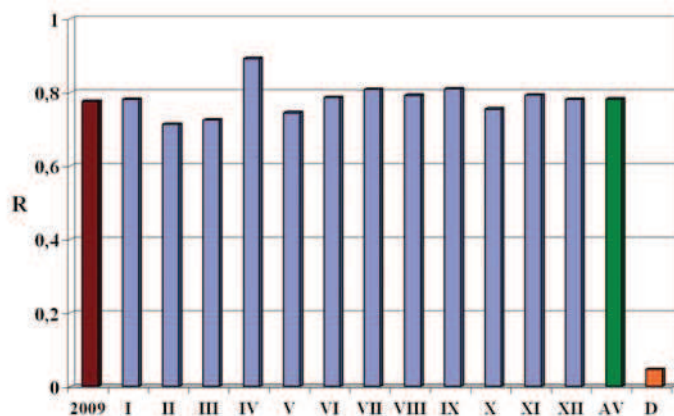


Rys. 10. Zależność korelacyjna emisji cząstek stałych I_{PM10} od emisji tlenku węgla I_{CO} w styczniu.

Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono współczynnik korelacji liniowej Pearsona zbiorów emisji cząstek stałych PM10 i dwutlenku azotu oraz cząstek stałych PM10 i tlenku węgla dla 2009 r., poszczególnych miesięcy oraz wartość średnią i odchylenie standardowe dla zbioru współczynnika w poszczególnych miesiącach.



Rys. 11. Wartość współczynnika korelacji liniowej Pearsona zbiorów emisji cząstek stałych PM10 i dwutlenku azotu dla 2009 r., poszczególnych miesięcy oraz wartość średnią AV i odchylenie standardowe D dla zbioru współczynnika w poszczególnych miesiącach.



Rys. 12. Wartość współczynnika korelacji liniowej Pearsona zbiorów imisji cząstek stałych PM10 i tlenku węgla dla 2009 r., poszczególnych miesięcy oraz wartość średnia AV i odchylenie standardowe D dla zbioru współczynnika w poszczególnych miesiącach.

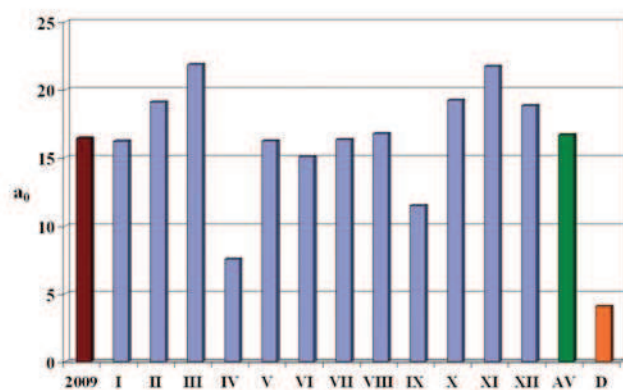
We wszystkich badanych wypadkach prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy o braku korelacji liniowej jest mniejsze od $1 \cdot 10^{-5}$.

Wyniki badań korelacyjnych w poszczególnych miesiącach potwierdzają dotychczasowe doświadczenia, że między imisją cząstek stałych PM10 i tlenku węgla istnieje silniejsza korelacja niż między imisją cząstek stałych PM10 i tlenków azotu (czy – w tym wypadku – dwutlenku azotu). Również znacznie mniejsza jest niepowtarzalność współczynnika korelacji między imisją cząstek stałych PM10 i tlenku węgla niż między imisją cząstek stałych PM10 i dwutlenku azotu. Współczynnik zmienności współczynnika korelacji dla zbiorów imisji w poszczególnych miesiącach wynosi:

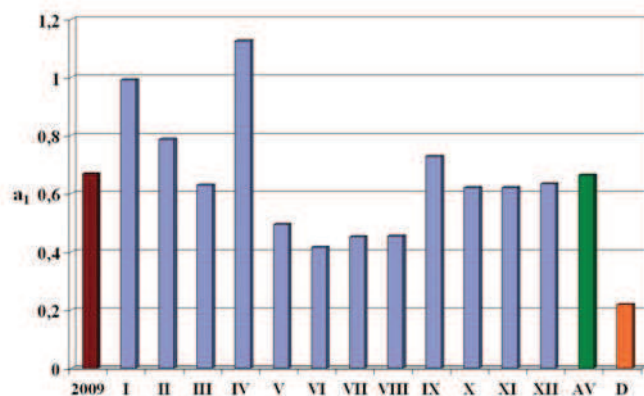
- dla zbiorów imisji cząstek stałych PM10 i imisji dwutlenku azotu: 0,1490,
- dla zbiorów imisji cząstek stałych PM10 i imisji tlenku węgla: 0,0595.

W wypadku zbiorów imisji cząstek stałych PM10 i dwutlenku azotu można zauważyć, że większe wartości współczynnika korelacji występują w miesiącach ciepłych. Spostrzeżenie to, uczynione na podstawie analizy w ciągu jednego roku, nie upoważnia jednak do uogólnienia takiego wniosku, tym bardziej, że w wypadku zbiorów imisji cząstek stałych PM10 i tlenku węgla nie potwierdza się ta tendencja.

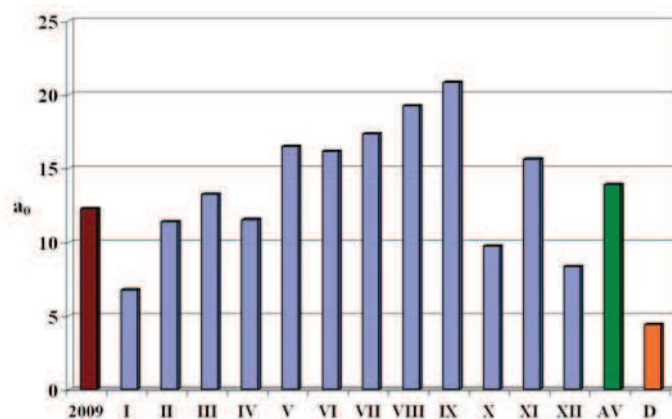
Na rysunkach 13–16 przedstawiono wartości współczynników modeli imisji cząstek stałych PM10 dla 2009 r., poszczególnych miesięcy oraz wartość średnią i odchylenie standardowe dla zbioru współczynnika w poszczególnych miesiącach.



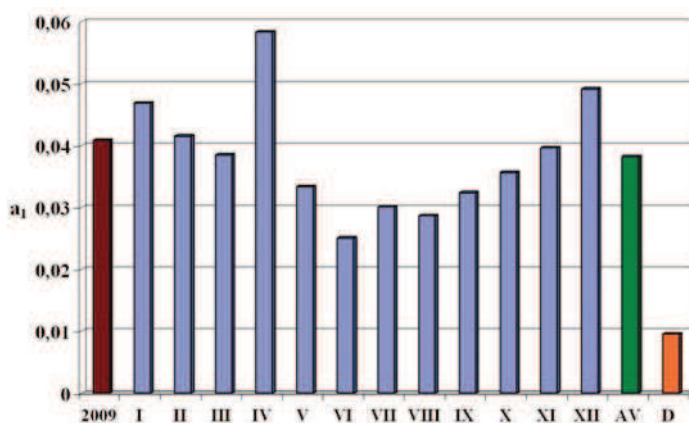
Rys. 13. Wartość współczynnika a_0 modelu (6) dla 2009 r., poszczególnych miesięcy oraz wartość średnia AV i odchylenie standardowe D dla zbioru współczynnika w poszczególnych miesiącach.



Rys. 14. Wartość współczynnika a_1 modelu (6) dla 2009 r., poszczególnych miesięcy oraz wartość średnia AV i odchylenie standardowe D dla zbioru współczynnika w poszczególnych miesiącach.



Rys. 15. Wartość współczynnika a_0 modelu (4) dla 2009 r., poszczególnych miesięcy oraz wartość średnia AV i odchylenie standardowe D dla zbioru współczynnika w poszczególnych miesiącach.



Rys. 16. Wartość współczynnika a_1 modelu (4) dla 2009 r., poszczególnych miesięcy oraz wartość średnia AV i odchylenie standardowe D dla zbioru współczynnika w poszczególnych miesiącach.

Z analizy współczynników modeli imisji cząstek stałych PM10 wynika, że charakteryzują się one znaczną niepowtarzalnością o wyraźnym braku regularności w dziedzinie czasu.

Współczynnik zmienności współczynników modeli dla zbiorów imisji w poszczególnych miesiącach wynosi:

- w wypadku zbiorów imisji cząstek stałych PM10 i imisji dwutlenku azotu: dla współczynnika a_0 : 0,2443 oraz dla współczynnika a_1 : 0,3293,
- w wypadku zbiorów imisji cząstek stałych PM10 i imisji tlenu węgla: dla współczynnika a_0 : 0,3181 oraz dla współczynnika a_1 : 0,2502.

Wyniki analizy współczynników behawiorystycznych modeli emisji cząstek stałych PM10 potwierdzają, stwierdzoną m.in. w [10], konieczność statystycznego traktowania identyfikacji tych modeli.

4. Podsumowanie

Duże trudności, związane z identyfikacją modeli emisji cząstek stałych PM10, zbudowanych na zasadzie podobieństwa strukturalnego, skłaniają do poszukiwania innych możliwości oceny zagrożenia środowiska przez pyły. Taką możliwość daje m.in. zastosowanie modeli zbudowanych na zasadzie podobieństwa funkcjonalnego. Modele te dotyczą emisji cząstek stałych PM10. Niestety i w tym wypadku istnieją poważne problemy, polegające na dużej wrażliwości parametrów modeli na właściwości źródeł emisji zanieczyszczeń i warunków ich rozprzestrzeniania. W niniejszej pracy podjęto próbę oceny wrażliwości parametrów liniowych jednowymiarowych modeli emisji cząstek stałych PM10 na właściwości źródeł emisji zanieczyszczeń i warunków ich rozprzestrzeniania. Wykorzystano do tego celu wyniki identyfikacji modeli w różnych okresach: w całym roku i w jego poszczególnych miesiącach.

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Korelacja między emisją cząstek stałych PM10 i emisją tlenku węgla i między emisją cząstek stałych PM10 i emisją dwutlenku azotu jest bardzo silna. Dla wszystkich badanych zbiorów emisji zanieczyszczeń stwierdzono, że prawdopodobieństwo nieodrżucenia hipotezy o braku korelacji jest mniejsze od $1 \cdot 10^{-5}$.
2. Potwierdza się, zauważana wcześniej regularność, silniejszej korelacji między emisją cząstek stałych PM10 i emisją tlenku węgla niż między emisją cząstek stałych PM10 i emisją dwutlenku azotu.
3. Istnieje duża niepowtarzalność współczynnika korelacji między badanymi zbiorami emisji zanieczyszczeń dla różnych miesięcy 2009 r. Jeśli przyjąć za miarę niepowtarzalności współczynnik zmienności, to znacznie większa niepowtarzalność współczynnika korelacji jest dla zbiorów emisji cząstek stałych PM10 i emisji dwutlenku azotu.
4. Niepowtarzalność współczynników modeli, zidentyfikowanych dla różnych miesięcy 2009 r., należy ocenić jako dużą. W tym wypadku nie ma zasadniczej różnicy dla modeli z wykorzystaniem emisji tlenku węgla i dwutlenku azotu.

Wyniki uzyskane dla modeli emisji cząstek stałych PM10, tworzonych na zasadzie podobieństwa funkcjonalnego, potwierdzają dużą wrażliwość współczynników modeli na właściwości źródeł emisji i warunków ich rozprzestrzeniania. Uzasadnia to celowość statystycznego potraktowania zadania identyfikacji modeli dla arbitralnie przyjętych kategorii wielkości, charakteryzujących właściwości źródeł emisji i warunków ich rozprzestrzeniania. Jest sprawą kompromisu wybór liczby tych kategorii. Większa liczba kategorii umożliwia osiągnięcie lepszej zgodności modeli z przedmiotami modelowania. Jednocześnie zwiększenie liczby kategorii wymaga zwiększenia nakładów pracy i prowadzi niekiedy do

problemów z zakwalifikowaniem istniejącej sytuacji do konkretnej kategorii, co w praktyce może być poważną trudnością.

Mimo częściowo krytycznej konkluzji, należy uznać modelowanie imisji cząstek stałych PM10 jako skuteczną metodę oceny zagrożenia środowiska przez pyły, szczególnie w skali masowych badań, uniemożliwiających wykonywanie badań empirycznych.

Literatura

- [1] BEŠLIĆ I., ŠEGA K., ŠIŠOVIĆ A.: *PM10, CO and NOx concentrations in the Tuhobić road tunnel, Croatia*. Int. J. Environment and Pollution, Vol. 25, Nos. 1/2/3/4, 2005, 251–262.
- [2] BRUSSELS ENVIRONMENT. BRUSSELS INSTITUTE FOR THE MANAGEMENT OF THE ENVIRONMENT. LABORATORY FOR ENVIRONMENTAL RESEARCH: *Black Carbon, PM10 Mass Concentration, Nitrogen Monoxide, Nitrogen Oxides and Particulate Number Concentration at the Woluwe Traffic Site*. Period July 2009 – June 2010, Preliminary Report, September 2010.
- [3] CANAGARATNA M.: *Case studies of particulate emissions from in-use New York City vehicles*. Aerosol Science and Technology, 2004, 38(6), 555–573.
- [4] CHŁOPEK Z., PIASECZNY L.: *Remarks about the modelling in science researches*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, No. 4/2001, 47–57.
- [5] CHŁOPEK Z., ŻEGOTA M.: *Badania emisji cząstek stałych PM10* Rozdział monografii "Edukacja ekologiczna. Podstawy działań naprawczych w środowisku. Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej, Nałęczów, 2004, 114–120.
- [6] CHŁOPEK Z., ŻEGOTA M.: *Emisja cząstek stałych PM10 z pojazdów samochodowych* Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej 4/2004. 102–116.
- [7] CHŁOPEK Z., ŻEGOTA M.: *Modelowanie emisji cząstek stałych PM10 ze źródeł motoryzacyjnych*. Transport Samochodowy, 1/2004. 67–88.
- [8] CHŁOPEK Z., ŻEGOTA M.: *Problemy modelowania emisji cząstek stałych PM10 w ruchu drogowym*. Archiwum Motoryzacji 1/2004: 25–42.
- [9] CHŁOPEK Z., ŻEGOTA M.: *The emission of particulate matter PM10 from vehicles*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, No. 1 (21)/2004, 3–13.
- [10] CHŁOPEK Z.: *Modele behawiorystyczne emisji cząstek stałych PM10 ze źródeł transportu drogowego*. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej 1(82)/2011: 111–118.
- [11] CHŁOPEK Z.: *Ocena stanu zagrożenia środowiska przez cząstki stałe PM2,5 ze źródeł transportu drogowego* Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej 1(82)/2011: 101–110.
- [12] CHOU CH. C.-K. ET AL.: *Influence of long-range transport dust particles on local air quality: A case study on Asian dust episodes in Taipei during the spring of 2002*. TAO, Vol. 15, No. 5, 881–899, December 2004.
- [13] ENVIRONMENT AUSTRALIA: *Emission estimation technique manual for aggregated emission from motor vehicles*. Version 1.0. Canberra, 2000.
- [14] EPA: *Addendum to Emission Factor Documentation for AP-42*. Section 11.2.5 and 11.2.6 (now 13.2.1), Paved Roads, Final Report, Sept. 1997.
- [15] EPA: *Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42*. 5th Edition, Vol. I, Chapter 13, Section 13.2.1. Miscellaneous sources. October 1997.
- [16] EPA: *Compilation of Air Pollution Emission Factors – AP 42*. Emission Factor Documentation, Section 13.2.1, Paved Roads, Appendix C.1: *Procedures for Sampling Surface Dust Loading* and Appendix C.2: *Procedures for Laboratory Analysis of Surface Loading Samples*. 1993.
- [17] HOEK G. ET AL.: *Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study*. Lancet, 2002, 360, 1203–1209.
- [18] JOHANSSON CH., NORMAN M., GIDHAGEN L.: *Spatial & temporal variations of PM10 and particle number concentrations in urban air*. Environ. Monit. Assess., 2007, 127, 477–487.

-
- [19] *Leksykon ekoinżynierii (Lexicon of eco-engineering)*. Joint publication edited by Gabriel Borowski, Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej, Warszawa, 2010.
- [20] LOHMEYER A., DÜRING I.: *Validierung von PM10-Immissionsberechnungen im Nahbereich von Straßen und Quantifizierung der Staubbildung von Straßen, Lützner Straße in Leipzig*. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden über Staatliche Umweltbetriebsgesellschaft, Radebeul, Februar 2001.
- [21] SAVITZKY A., GOLAY M.J.E.: *Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures*. Analytical Chemistry, 1964, 36, 1627–1639.
- [22] WANG F. ET. AL.: *Particle number, particle mass and NOx emission factors at a highway and an urban street in Copenhagen*. Atmos. Chem. Phys., 2010, 10, 2745–2764.
- [23] ŻEGOTA M.: *Modelowanie emisji cząstek PM10 z pojazdów samochodowych*. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska 2006.