

Analiza zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego pyłami charakterystycznymi dla niskiej emisji

Atmospheric air pollution analysis with dusts characteristic of low emissions

Tadeusz Kwilosz, Bogdan Filar, Mariusz Miziołek

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Pomimo wielu wysiłków organizacji pozarządowych i zwiększającej się z upływem czasu świadomości ludzi stan jakości powietrza w wielu polskich miastach nie uległ poprawie. Szacuje się, że z powodu zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego Europejczycy żyją średnio o 9 miesięcy krócej. Z problemem tym zmagają się mieszkańcy dużych aglomeracji miejskich oraz małych miejscowości. Nawet jeśli w danej miejscowości nie są zlokalizowane zakłady przemysłowe emitujące szkodliwe substancje do atmosfery, to źródłem zanieczyszczeń utrzymujących się na niskich wysokościach są: miejskie kotłownie, domowe piece opalane węglem i transport samochodowy. Emisja zanieczyszczeń scharakteryzowana przez wymienione cechy nosi nazwę „niskiej emisji”. Jednym z ważniejszych zadań związanych z diagnozą i przeciwdziałaniem temu zjawisku jest ciągłe monitorowanie zanieczyszczenia powietrza poprzez rozlokowane na terenach miejskich urządzenia pomiarowe – sensory oraz lokalizowanie obszarów najbardziej zanieczyszczonych. Celem prezentowanej pracy było wykonanie analizy wyników pomiarów zanieczyszczeń powietrza pyłami zawieszonymi oraz opracowanie metody lokalizacji obszarów, w których znajdują się potencjalne źródła skażenia. Terenem badań był obszar miejski Krosna – miasta w południowo-wschodniej części Polski. Do przeprowadzenia wspomnianej analizy wykorzystano metody analizy geostatystycznej. Zasadniczą trudność w zrealizowaniu tak postawionego zadania polega na tym, że punkty pomiarowe, na podstawie których czerpiemy wiedzę o skażeniach, znajdują się w przypadkowo zlokalizowanych miejscach i nie są związane ze źródłami zanieczyszczeń. Wyniki rozkładów badanych parametrów, uzyskiwane metodą kriginu, mogą sugerować, że punkty pomiarowe reprezentują źródła. Tak jest w wielu przypadkach badań środowiskowych. Na przykład mierząc natężenie hałasu w obiektach przemysłowych, ustawia się mikrofony przy źródłach hałasu (silniki, wentylatory, pompy itp.) oraz w otoczeniu (aby zmierzyć propagację hałasu w miejscach oddalonych od jego źródła). W przypadku badań zanieczyszczeń powietrza tak nie jest. Aby zobrazować różnice w uzyskanych (różnymi metodami) wynikach, posłużono się dwiema metodami geostatystycznej analizy danych: kriginem i symulacją warunkową. Wykonano analizę wyników pomiarów zanieczyszczeń powietrza pyłami zawieszonymi (PM₁, PM_{2,5} i PM₁₀) na podstawie danych rzeczywistych pozyskanych z pomiarów wykonanych na terenie miasta Krosna. Wyznaczono rejony największego skażenia powietrza. Zobrazowano uzyskane wyniki w postaci map przestrzennych rozkładów poziomu zanieczyszczenia powietrza pyłami: PM₁, PM_{2,5} oraz PM₁₀. Wykazano, że metoda symulacji warunkowej pozbawiona jest wady lokalizowania obszarów najbardziej zanieczyszczonych w punktach pomiarowych i dlatego charakteryzuje się lepszą skutecznością (w porównaniu z kriginem).

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie powietrza, krigin, symulacja warunkowa.

ABSTRACT: Despite many efforts of non-governmental organizations and the increasing awareness of people over time, the air quality in many Polish cities has not improved. It is estimated that Europeans live 9 months shorter on average due to air pollution. The inhabitants of large urban agglomerations and small towns are struggling with the air pollution problem. Even if no industrial plants emitting harmful substances into the atmosphere are located in a given locality, there are others sources of pollution, such as: coal-fired stoves and car transport. The emission of pollutants characterized by these features is called “low emission”. One of the most important tasks related to the diagnosis and prevention of this phenomenon is the continuous monitoring of air pollution by measuring devices – sensors located in urban areas. The aim of the presented work was to analyze the results of measurements of air pollution data. Based on the data a method of locating the most polluted areas was developed. The urban area of Krosno, a city located in southeastern Poland, was chosen as the research area. The analysis was performed using the methods of geostatistical analysis. The main difficulty in carrying out such a task is that the measuring points on the basis of which we learn about contamination are located in randomly located places and are not associated with the sources of contamination. The results of the distributions of the examined parameters, obtained by the kriging method, may suggest that the measuring points represent sources. For example, when measuring noise levels in industrial facilities, microphones are positioned at noise sources (motors, fans, pumps, etc.) and in the surrounding area (to measure noise propagation in places far from its sources). This is not the case with air pollution studies. To illustrate the differences in the obtained results, two

Autor do korespondencji: T. Kwilosz, e-mail: tadeusz.kwilosz@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 21.12.2021 r. Zatwierdzono do druku: 22.07.2022 r.

methods of geostatistical data analysis were used: kriging and conditional simulation. An analysis of the results of measurements of air pollution with suspended dust (PM1, PM2.5 and PM10) was performed on the basis of actual data obtained from measurements made in the city of Krosno. The areas of the highest air pollution were determined. The obtained results were presented in the form of spatial maps of the distribution of PM1, PM2.5 and PM10 air pollution levels. It has been shown that the conditional simulation method demonstrates better efficiency of locating the most polluted areas (compared to kriging).

Key words: air pollution, kriging, conditional simulation.

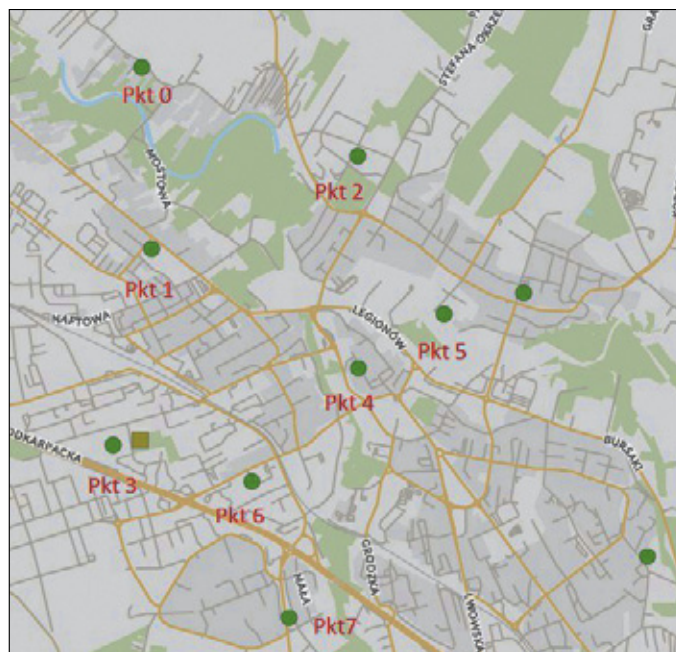
Wstęp

Od wielu już lat obserwowana jest coraz większa świadomość społeczeństwa na temat szkodliwości oddziaływania zanieczyszczonego powietrza na organizm. Dawniej zanieczyszczenie powietrza kojarzono głównie z emisją spalin wydobywających się z kominów przemysłowych wielkich przedsiębiorstw i spalin emitowanych przez transport samochodowy (Ebel et al., 1997; Rataj, 2014). Na skutek stosowania na szeroką skalę nowoczesnych technologii oczyszczania spalin przemysłowych sytuacja związana ze skażeniem generowanym przez przemysł uległa poprawie. Nie wpłynęło to jednak w znaczący sposób na poprawę jakości powietrza atmosferycznego. Obecnie głównym źródłem zanieczyszczenia powietrza wdychanego przez ludzi jest tzw. niska emisja (Granier et al., 2004; Hławiczka et al., 2012; Rataj i Holewa-Rataj, 2020). Pod tym pojęciem kryją się pyły i aerozole zawierające szkodliwe związki chemiczne utrzymujące się na niskiej wysokości, do 40 m (Zajusz-Zubek et al., 2015). Wymienione pyły, gazy i aerozole zawierają głównie: SO₂, tlenki azotu NO_x i pyły zawieszane PM10 i PM2,5 (Kaczmarczyk, 2015). Pochodzą one ze spalania węgla i zawilgoconego drewna w domowych piecach i kotłowniach (Juda-Rezler, 2006; Klejnowski et al., 2012; Kaleta, 2014; Bruce et al., 2015; Degórska, 2016).

Pomiary poziomu zanieczyszczeń w aglomeracji miejskiej

Dane dotyczące pomiarów zanieczyszczenia zostały pobrane z usługi sieciowej (<https://airly.eu/map/pl>). Dane pobrano w dniu 26.11.2021 r. w godzinach 15:40–19:20. Serwis *airly* udostępnia, poprzez mechanizm API, dane dotyczące pomiarów stężenia aerozoli atmosferycznych klasyfikowanych jako: PM1, PM2,5 oraz PM10 i takie dane zostały poddane analizie. W badanym obszarze miejskim zlokalizowanych jest 14 punktów pomiarowych. Ze względu na ograniczenia związane z udostępnianiem danych przez serwis (100 odczytów na dobę) ograniczono się do 8 punktów pomiarowych zlokalizowanych w zwartej zabudowie centrum miasta, rejestrując 12 pomiarów co 20 minut dla trzech stężeń aerozoli (PM1, PM2,5 oraz PM10).

Rozmieszczenie punktów pomiarowych na planie miasta przedstawiono na rysunku 1. Poszczególne punkty pomiarowe ponumerowano od 0 do 7 (tabele 1–3 i rysunki 1–3).



Rysunek 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na planie miasta Krosna

Figure 1. Distribution of measurement points on the map of Krosno city

W celu wykonania przestrzennych rozkładów mierzonych parametrów dokonano transformacji współrzędnych geograficznych punktów pomiarowych do współrzędnych modelu obejmującego obszar o rzeczywistych rozmiarach 4000 × 4000 m.

Generowanie przestrzennych rozkładów badanych parametrów metodą krigingu

W celu określenia korelacji przestrzennych występujących w badanych zbiorach danych posłużono się metodami analizy wariograficznej (Journel, 1989; Pebesma, 2004; Oh i Hwang, 2015).

W niniejszym opracowaniu ograniczono się do stosowania modelu sferycznego, jako najczęściej używanego. Dopasowanie wariogramu teoretycznego do eksperymentalnego

Tabela 1. Wyniki pomiarów zanieczyszczenia powietrza dla PM1

Table 1. Air pollution measurements results for PM1

Pomiar dla PM1 [mg/m ³]								
Godzina pomiaru	Pkt 0	Pkt 1	Pkt 2	Pkt 3	Pkt 4	Pkt 5	Pkt 6	Pkt 7
15:42:59	15,25	15,34	13,72	16,77	21,53	17,82	19,26	15,90
16:03:01	17,33	15,97	14,55	17,54	23,25	19,13	20,34	16,27
16:23:04	19,11	15,89	15,25	18,03	22,27	20,87	19,34	16,75
16:43:08	19,43	16,29	15,95	18,61	21,84	22,18	17,96	17,42
17:03:11	18,83	16,58	16,43	19,25	21,65	22,87	17,71	17,95
17:23:16	18,20	16,67	16,55	19,87	21,70	23,20	18,57	18,14
17:43:20	18,28	16,71	16,62	20,10	21,63	23,35	19,16	18,37
18:03:23	18,69	16,67	17,06	20,29	22,60	22,86	18,67	18,22
18:23:26	19,20	16,80	17,62	20,58	23,98	22,36	19,29	18,65
18:43:28	19,08	17,12	18,21	21,04	26,06	21,96	19,62	18,74
19:03:31	18,95	17,52	18,41	21,35	26,27	22,68	20,22	19,19
19:23:34	18,81	17,82	18,56	21,34	25,54	23,21	19,87	19,26

Tabela 2. Wyniki pomiarów zanieczyszczenia powietrza dla PM2,5

Table 2. Air pollution measurements results for PM2.5

Pomiar dla PM2,5 [mg/m ³]								
Godzina pomiaru	Pkt 0	Pkt 1	Pkt 2	Pkt 3	Pkt 4	Pkt 5	Pkt 6	Pkt 7
15:42:59	22,38	24,74	20,03	25,42	33,19	26,77	28,91	25,22
16:03:01	25,75	25,67	21,35	26,76	36,05	28,67	29,43	25,87
16:23:04	28,44	25,50	22,64	27,62	34,12	31,23	28,58	26,30
16:43:08	28,85	26,24	23,61	28,52	33,46	33,13	27,52	27,18
17:03:11	27,84	26,67	24,28	29,48	33,08	34,16	27,91	27,85
17:23:16	26,90	26,83	26,90	30,47	33,16	34,63	29,10	28,21
17:43:20	27,02	26,88	24,72	30,84	33,18	34,86	29,98	28,61
18:03:23	27,74	26,86	25,55	31,22	34,97	34,07	29,45	28,49
18:23:26	28,65	27,08	26,41	31,55	37,46	33,56	30,34	29,26
18:43:28	28,61	27,66	27,31	32,17	40,71	33,13	30,73	29,52
19:03:31	28,37	28,37	27,58	32,66	40,88	34,35	31,54	30,43
19:23:34	28,17	28,89	27,81	32,73	39,59	34,91	31,18	30,54

Tabela 3. Wyniki pomiarów zanieczyszczenia powietrza dla PM10

Table 3. Air pollution measurements results for PM10

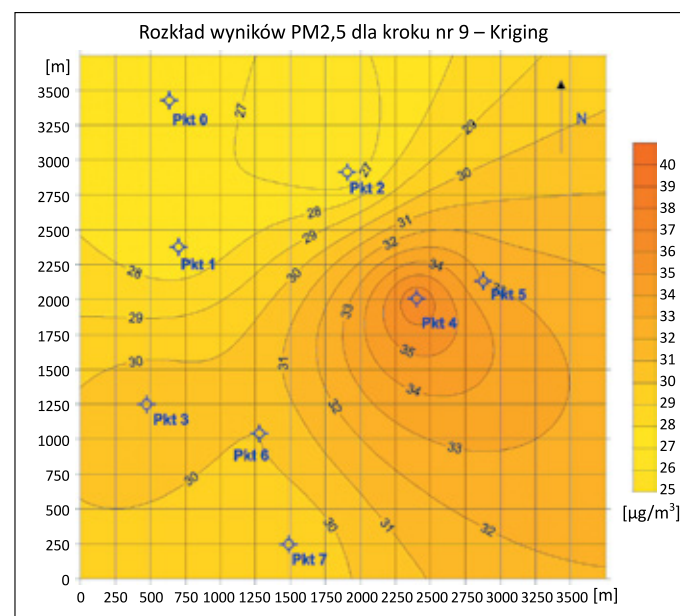
Pomiar dla PM10 [mg/m ³]								
Godzina pomiaru	Pkt 0	Pkt 1	Pkt 2	Pkt 3	Pkt 4	Pkt 5	Pkt 6	Pkt 7
15:42:59	32,13	38,16	27,58	43,10	56,35	41,14	42,85	39,86
16:03:01	38,43	39,73	29,90	45,94	62,01	44,75	44,15	41,14
16:23:04	43,44	39,56	32,17	47,78	57,96	49,37	43,07	41,93
16:43:08	44,15	40,97	34,09	49,50	56,75	52,57	41,32	43,66
17:03:11	42,36	41,83	35,39	51,26	55,92	54,24	42,09	44,78
17:23:16	40,60	42,02	35,63	52,73	55,84	54,94	44,04	45,38
17:43:20	40,70	42,08	35,94	53,52	56,00	55,39	45,71	46,22
18:03:23	42,02	42,17	37,54	54,24	59,71	54,04	44,93	46,15
18:23:26	43,61	42,46	39,46	55,17	64,82	53,14	46,49	47,79
18:43:28	43,56	43,53	41,27	56,42	70,89	52,37	47,07	48,36
19:03:31	43,12	44,62	41,70	57,30	71,12	54,69	48,35	50,22
19:23:34	42,90	45,57	42,08	57,29	68,57	55,95	47,83	50,35

jest standardowym problemem z zakresu modelowania danych. Definiując wariogram, zakłada się lokalną stacjonarność drugiego rzędu (Isaaks i Srivastava, 1989; Zawadzki et al., 2005; Zawadzki, 2011; Oliver i Webster, 2015). W trakcie generowania przestrzennych rozkładów badanych parametrów dokonano automatycznego dopasowania wariogramu teoretycznego do danych eksperymentalnych pomiarów PM1, PM2,5 i PM10. Badania wykonano dla wszystkich 12 kroków czasowych przy użyciu programu Surfer.

Jednym z zadań tego opracowania było zlokalizowanie stref, w których rozmieszczone są źródła zanieczyszczeń. Zasadnicza trudność w zrealizowaniu tak postawionego zadania polega na tym, że punkty pomiarowe, na podstawie których czerpiemy wiedzę o skażeniach, znajdują się w przypadkowo zlokalizowanych miejscach, często odległych od źródeł zanieczyszczeń. Najczęściej używana metoda generowania przestrzennego rozkładu badanych parametrów – kriging generuje wyniki sugerujące, że punkty pomiarowe reprezentują źródła, co uwiadcza się na mapach rozkładu badanego parametru w postaci charakterystycznych „bawolińskich oczu” (Malvić et al., 2019). W przypadku badań zanieczyszczeń powietrza tak nie jest. Aby zobrazować różnice w uzyskanych wynikach, posłużono się dwiema metodami geostatystycznej analizy danych: krigingiem (Journel, 1989; Deutsch, 2002; Caineta, 2010) i symulacją warunkową (Vann et al., 2002; Nowak i Verly, 2005; Webster i Oliver, 2007; Manchuk i Deutsch, 2012).

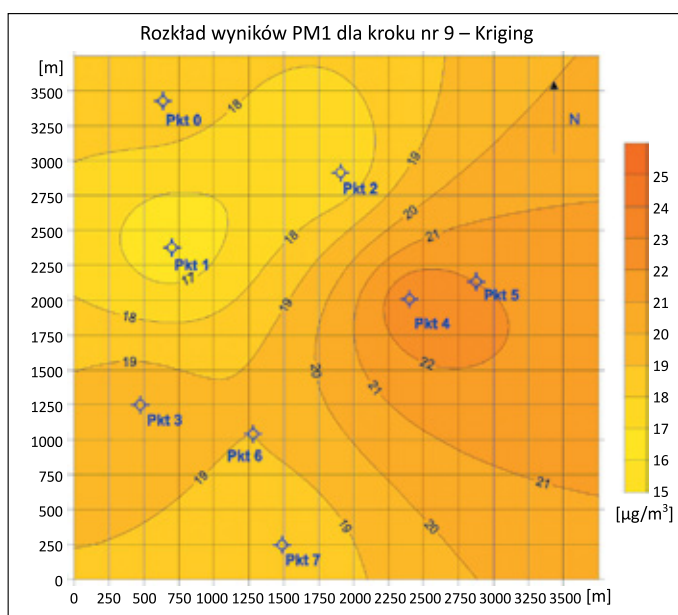
Pomimo wszystkich wad krigingu, związanych z efektem wygładzania niskich i niedoszacowania wysokich wartości parametrów w węzłach sieci interpolacyjnej, jest to metoda znana

i akceptowana w przemyśle oraz łatwa do zaimplementowania. Przyjęto założenie, że rozmieszczenie źródeł zanieczyszczeń nie wykazuje korelacji przestrzennych (jest losowe). W związku z tym dokonano wyboru krigingu zwykłego bez narzuconego trendu i sporządzono mapy przestrzennych rozkładów PM1, PM2,5 i PM10 dla wszystkich 12 kroków czasowych. Przykładowe rozkłady badanych parametrów zamieszczono na rysunkach 2–4.



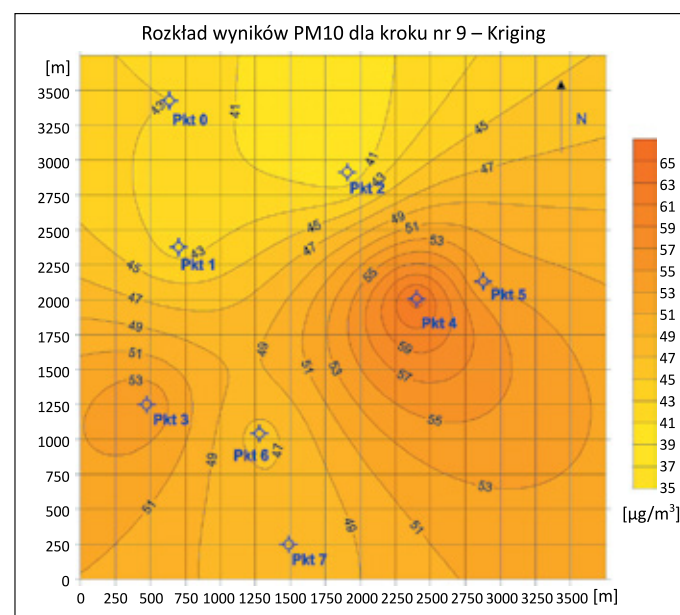
Rysunek 3. Rozkład przestrzenny stężenia pyłów PM2,5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] – krok czasowy 9

Figure 3. Spatial distribution of PM2.5 dust concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] – time step 9



Rysunek 2. Rozkład przestrzenny stężenia pyłów PM1 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] – krok czasowy 9

Figure 2. Spatial distribution of PM1 dust concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] – time step 9



Rysunek 4. Rozkład przestrzenny stężenia pyłów PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] – krok czasowy 9

Figure 4. Spatial distribution of PM10 dust concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] – time step 9

Symulacja warunkowa

Symulacja warunkowa jest metodą generowania przestrzennych rozkładów badanych parametrów pozwalającą na uzyskanie następujących rezultatów:

- odtworzenie wartości w punktach pomiarowych;
- możliwie najdokładniejsze dopasowanie wariogramu generowanego przez siebie rozkładu (w kolejnych krokach iteracyjnych) do z góry zadanego wariogramu modelowego lub eksperymentalnego.

Symulacja warunkowa wymaga zastosowania metody optymalizacyjnej służącej do generowania rozkładów zbieżnych do założonego rozkładu teoretycznego. Na użytek tego opracowania zastosowano metodę optymalizacyjną zwaną *simulated annealing* (symulowane wyzarczenie). Jest to bezgradientowa i efektywna metoda optymalizacyjna często stosowana do rozwiązywania zagadnień optymalizacyjnych, dla których funkcje celu nie występują w postaci analitycznej. Realizacja metody przebiega w dwóch etapach:

- 1) wygenerowanie losowego rozkładu początkowego o zadanych parametrach (średniej i wariancji) odtwarzającego wartości w punktach ustalonych;
- 2) dokonanie przekształceń wygenerowanego rozkładu tak, aby zachować jego parametry i uzyskiwać w kolejnych krokach poprawę dopasowania odpowiadającego mu wariogramu $\gamma^j(h)$ do założonego wariogramu teoretycznego $\gamma(h)$.

Realizacja pierwszego etapu polega na wygenerowaniu losowego rozkładu badanego parametru (w omawianym przykładzie są to wartości zanieczyszczeń: PM1, PM2,5 i PM10) dla wszystkich punktów siatki modelu. Zbiór losowo wygenerowanych wartości uzupełniany jest o wyniki pomiarów (PM1, PM2,5 i PM10) zarejestrowanych w punktach pomiarowych.

Zakłada się, że rozkład prawdopodobieństwa jest zgodny z rozkładem normalnym o zadanych parametrach wyznaczonych za pomocą analizy wariograficznej. Parametry rozkładu dobrane są tak, aby nie odbiegały znacząco od odpowiadających im parametrów rozkładu dla danych pomiarowych ($Z_{\text{śred}}, \sigma^2$) oraz parametrów wariogramu teoretycznego (σ^2).

W zastosowanej w opracowaniu metodzie użyto generatora liczb pseudolosowych do wygenerowania rozkładu jednorodnego, a następnie dokonano przekształcenia tak wyznaczonych wartości do rozkładu normalnego poprzez transformację za pomocą funkcji odwrotnej do dystrybuanty F rozkładu normalnego o zadanych parametrach (Webster i Oliver, 2007):

$$Z_N = F^{-1}(Z_j) \tag{1}$$

gdzie:

- Z_N – wylosowana wielkość zgodna z rozkładem normalnym,
- Z_j – wylosowana wielkość zgodna z rozkładem jednorodnym,
- F – dystrybuanta rozkładu normalnego o parametrach $Z_{\text{min}}, Z_{\text{max}}, Z_{\text{śred}}, \sigma^2$.

Tak wygenerowany rozkład uzupełnia się wartościami ustalonymi w punktach pomiarowych. Uzupełnienie to nie zmienia parametrów rozkładu.

Drugi etap algorytmu ma postać iteracji. W każdym kroku (j) iteracji:

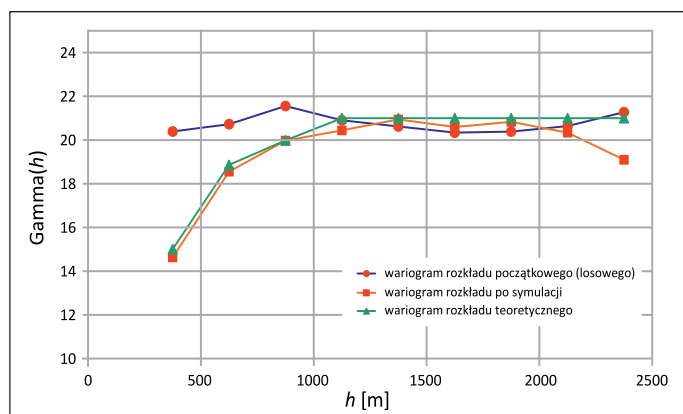
- losuje się położenia dwóch różnych punktów $(x^j, y^j)_1, (x^j, y^j)_2$ na siatce modelu w taki sposób, aby żadne z nich nie było położeniem punktu ustalonego (pomiarowego);
- dokonuje się zamiany wartości wylosowanych punktów $Z(x^j, y^j)_1 := Z(x^j, y^j)_2, Z(x^j, y^j)_2 := Z(x^j, y^j)_1$, zmieniając w ten sposób rozmieszczenie wylosowanych punktów rozkładu, ale nie parametrów rozkładu;
- dla tak wygenerowanego rozkładu M^j wyznacza się funkcję wariogramu $\gamma^j(h)$;
- wylicza się wartość funkcji celu $F_{\text{celu}}(M^j)$ będącą miarą dopasowania wariogramu rozkładu M^j do wariogramu teoretycznego:

$$F_{\text{celu}}(M^j) = \sum_{i=1}^{n_w} \frac{[\gamma(h_i) - \gamma^j(h_i)]^2}{[\gamma(h_i)]^2} \tag{2}$$

W tym miejscu zaczyna działać algorytm metody optymalizacyjnej. Algorytm ten porównuje aktualnie wyliczoną wartość funkcji celu z najniższą dotychczas obliczoną wartością $F_{\text{celu}}(M^{OPT})$:

- w przypadku gdy nowa wartość jest niższa – akceptuje rozkład M^j jako rozkład optymalny $M^{OPT} = M^j$;
- w przypadku gdy nowa wartość jest wyższa – losowana jest liczba $R \in (0,1)$ i obliczana jest wartość wyrażenia $e^{-\frac{\Delta F}{kT}}$.

Jeśli $e^{-\frac{\Delta F}{kT}} < R$ to rozkład M^j jest odrzucany. Parametr T jest parametrem procedury optymalizacyjnej zwanym temperaturą, a k – stałym czynnikiem. Wielkość parametru T ustalana jest na początku procedury w przedziale 0,5–1, a następnie w trakcie wykonywania iteracji jest zmniejszana. Po zaakceptowaniu lub odrzuceniu rozkładu M^j sprawdzane jest kryterium zakończenia iteracji i jeśli jest ono spełnione, to procedura kończy swoje działanie, a jeśli nie, następuje przejście do kolejnego, $j + 1$ kroku iteracyjnego. Jako kryterium zakończenia iteracji stosuje się osiągnięcie odpowiednio małej zmiany względnej wartości funkcji celu bądź wykonanie zadanej liczby iteracji. W prezentowanych dalej przykładach jako kryterium zakończenia przyjęto wykonanie 60 000 iteracji. Przeprowadzone eksperymenty numeryczne wykazały, że po przekroczeniu tej liczby iteracji nie odnotowano istotnej zmiany wartości funkcji celu. Tak wyliczony rozkład M^{OPT} jest wielkością wynikową procedury symulacji warunkowej. Przykładowy wynik dopasowania wariogramu teoretycznego do wariogramu reprezentującego rozkład uzyskany w wyniku symulacji warunkowej przedstawia rysunek 5.



Rysunek 5. Dopasowanie wariogramu rozkładu teoretycznego do wariogramu eksperymentalnego dla pomiaru PM1

Figure 5. Fitting the variogram of the theoretical distribution to the experimental variogram for the measurement of PM1

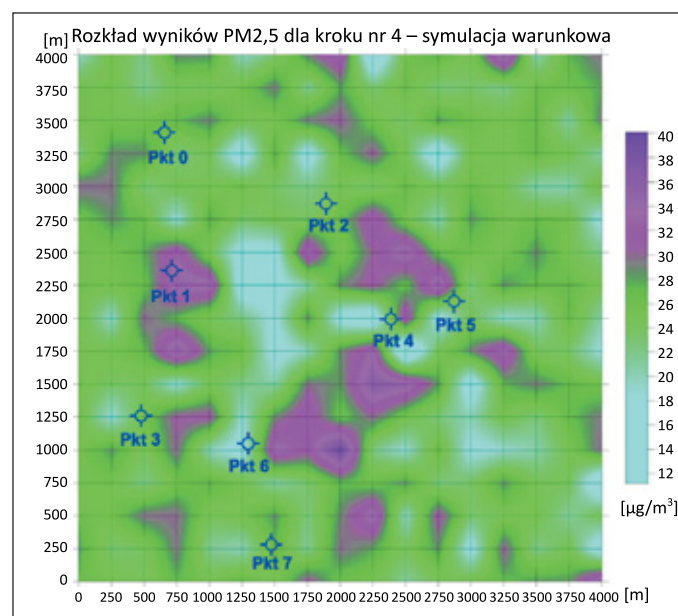
Metoda symulacji warunkowej generuje rozkłady o znaczeniu ilościowym. Rozkłady te są zgodne w znaczeniu odzwierciedlenia wariogramu teoretycznego i posiadają zgodne z wariogramem parametry statystyczne. W wyniku zastosowania symulacji warunkowej dla pomiarów PM1, PM2,5 i PM10 w 12 krokach czasowych uzyskano rozkłady poziomu zanieczyszczeń w postaci wyników rozmieszczonych na siatce modelu.

W celu zobrazowania uzyskanych wyników posłużono się kolejnym razem metodą krigingu. Uzyskane wyniki zamieszczono na rysunkach 6–8.

Z analizy wyników przeprowadzonych symulacji warunkowych wynika, że uzyskano dobrą zgodność dopasowania

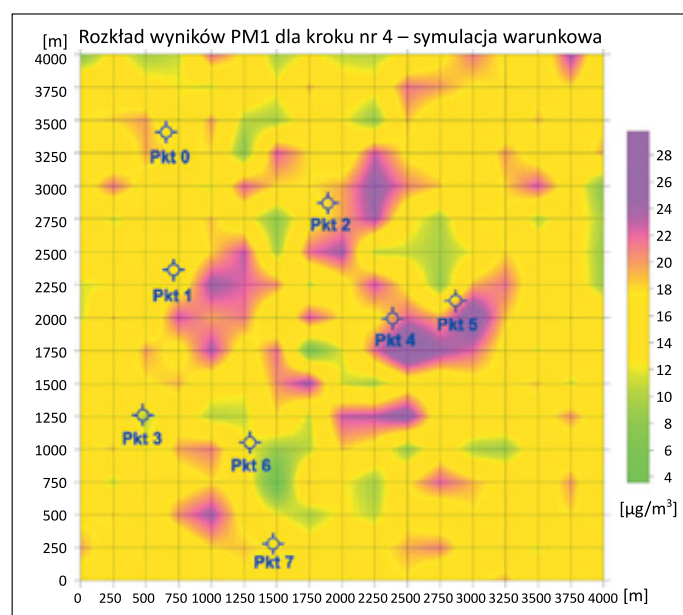
rozkładów wariogramów teoretycznych z wariogramami otrzymanymi w wyniku zastosowanej metody. Miarą tej zgodności są wartości optymalizowanej bezwymiarowej funkcji celu ($F_{celu}(M')$). Wartości tej funkcji zawierają się w przedziałach: 0,038–0,078 dla PM1, 0,068–0,099 dla PM2,5 i 0,079–0,098 dla PM10.

Uzyskane końcowe wartości funkcji celu nie przekraczają 1% jej wartości początkowych.



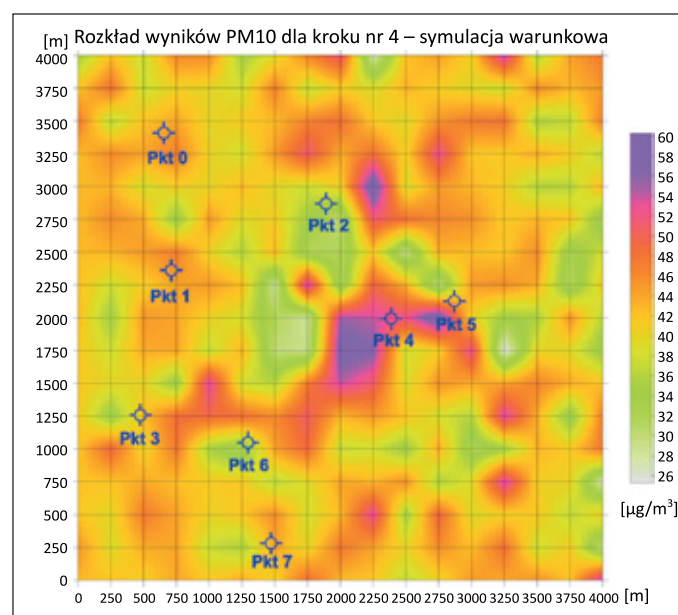
Rysunek 7. Lokalizacja obszarów potencjalnych źródeł emisji pyłów PM2,5 – krok czasowy 4

Figure 7. Location of areas of potential PM2.5 emission sources – time step 4



Rysunek 6. Lokalizacja obszarów potencjalnych źródeł emisji pyłów PM1 – krok czasowy 4

Figure 6. Location of areas of potential PM1 emission sources – time step 4



Rysunek 8. Lokalizacja obszarów potencjalnych źródeł emisji pyłów PM10 – krok czasowy 4

Figure 8. Location of areas of potential PM10 emission sources – time step 4

Wnioski

1. Na podstawie interpretacji otrzymanych wyników można zauważyć, że po zastosowaniu metody krigingu lokalizacja obszarów o największych i najmniejszych poziomach zanieczyszczeń jest zgodna z rozmieszczeniem punktów pomiarowych.
2. Zakładając rozmieszczenie obszarów siatki modelu zgodnie z kierunkami geograficznymi, można zauważyć, że obszarem o największym poziomie zanieczyszczeń jest obszar usytuowany w centralno-wschodniej części rejonu badań, z zaznaczonym źródłem zanieczyszczeń o mniejszym nasileniu w rejonie południowo-zachodnim. Najmniejszy poziom zanieczyszczeń uwidocznił się w części północnej badanego obszaru.
3. Analizując wyniki symulacji warunkowej, można dostrzec, że obszary z ekstremalnymi poziomami zanieczyszczeń w większości przypadków nie pokrywają się z lokalizacją punktów pomiarowych.
4. Interpretując wyniki symulacji warunkowej, można stwierdzić, że nie obserwuje się znaczących poziomów zanieczyszczeń w części wschodniej badanego obszaru. Jest to rozbieżne z interpretacją wyników uzyskanych metodą krigingu. Największy poziom zanieczyszczeń interpretowany na podstawie symulacji warunkowej związany jest z częścią centralną – na południe od punktów pomiarowych 4 i 5. W części wschodniej badanego obszaru (na zachód od punktu 2) oraz na północny zachód od punktu 1 można zaobserwować również zwiększony poziom zanieczyszczeń.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Model analizy zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego i wyznaczenia potencjalnych źródeł największego stężenia* – praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0029/KP/2021, nr archiwalny: DK-4100-0017/2021.

Literatura

- Bruce N., Pope D., Rehfuess E., Balakrishnan K., Adair-Rohani H., Dora C., 2015. WHO indoor air quality guide lines on household fuel combustion: Strategy implications of new evidence on interventions and exposure-risk functions. *Atmospheric Environment*, 106: 451–457. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.08.064.
- Caineta J.A.R., 2010. Applying Spatial Bootstrap and Bayesian Update in uncertainty assessment at oil reservoir appraisal stages. *arXiv*: 1702.04450v1.
- Degórska A., 2016. Źródła emisji pyłu pierwotnego. [W:] Juda-Rezler K., Toczko B. (red.). *Pyły drobne w atmosferze. Kompendium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce*: 22–25. *Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa*. ISBN 978-83-61227-73-1.
- Deutsch C.V., 2002. Geostatistical Reservoir Modelling. *Oxford University Press, Oxford*. ISBN 9780195138061.
- Ebel A., Friedrich R., Rodhe H. (eds.), 1997. Tropospheric Modelling and Emission Estimation. *Springer-Verlag, Berlin Heidelberg*. DOI: 10.1007/978-3-662-03470-5.
- Granier G., Artaxo P., Reeves C.E. (eds.), 2004. Emissions of Atmospheric Trace Compounds. *Kluwer Academic Publishers*. DOI: 10.1007/978-1-4020-2167-1.
- Hławiczka S., Kliś C., Cenowski M., Strzelecka-Jastrzab E., Długosz J., Bronder J., 2012. Nowe podejście do oceny niskiej emisji z ogrzewania mieszkań w kształtowaniu stężeń pyłu na obszarze gminy. II. Modelowanie stężeń pyłu. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 51: 22–46.
- Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989. Applied Geostatistics. *Oxford University Press, New York*. ISBN 978-0-19-505013-4.
- Journel A.G., 1989. Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons. *American Geophysical Union, Washington*. <<https://www.nrc.gov/docs/ML0227/ML022770097.pdf>> (dostęp: 22.09.2021).
- Juda-Rezler K., 2006. Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza na środowisko. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*. ISBN 83-7207-211-6.
- Kaczmarczyk M. (red.), 2015. Niska emisja – od przyczyn występowania do sposobów eliminacji. *Geosystem Burek, Kotyza s.c., Kraków*: 144. ISBN 978-83-64339-02-8.
- Kaleta D., 2014. State of Air Pollution in Silesia Province Including Low Emission Sources. *Architecture Civil Engineering Environment Journal*, 7(4): 79–87. <<http://acee-journal.pl/1,7,33,Issues.html>> (dostęp: 15.09.2021).
- Klejnowski K., Pastuszka J., Rogula-Kozłowska W., Talik E., Krasa A., 2012. Mass Size Distribution and Chemical Composition of the Surface Layer of Summer and Winter Airborne Particles in Zabrze, Poland. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 88: 255–259. DOI: 10.1007/s00128-011-0452-3.
- Malvić T., Ivšiniović J., Velić J., Rajić R., 2019. Kriging with a Small Number of Data Points Supported by Jack-Knifing, a Case Study in the Sava Depression (Northern Croatia). *Geosciences*, 9(1): 36. DOI: 10.20944/preprints201811.0614.v1.
- Manchuk J.G., Deutsch C.V., 2012. A flexible sequential Gaussian simulation program: USGSIM. *Computers & Geosciences*, 41: 208–216. DOI: 10.1016/j.cageo.2011.08.013.
- Nowak M., Verly G., 2005. The Practice of Sequential Gaussian Simulation. [W:] Leuangthong O., Deutsch C.V. (eds.). *Geostatistics Banff 2004. Quantitative Geology and Geostatistics*, 14. *Springer, Dordrecht*. DOI: 10.1007/978-1-4020-3610-1_39.
- Oh D.-R., Hwang C.S., 2015. A Comparative Study on the Spatial Statistical Models for the Estimation of Population Distribution. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 3(3): 145–153. DOI: 10.7848/ksgpc.2015.33.3.145.
- Oliver M., Webster R., 2015. Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging. *Springer, Cham*. DOI: 10.1007/978-3-319-15865-5.
- Pebesma E., 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*, 30(7): 683–691. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.03.012.
- Rataj M., 2014. Wymagania w analizie zawartości pyłów w spalinach z kominków i wkładów kominkowych. *Nafta-Gaz*, 70(6): 719–723.
- Rataj M., Holewa-Rataj J., 2020. Analiza zmian jakości powietrza Małopolski w latach 2012–2020. *Nafta-Gaz*, 76(11): 854–863. DOI: 10.18668/NG.2020.11.11.
- Vann J., Bertoli O., Jackson S., 2002. An overview of geostatistical simulation for quantifying risk. *Proceedings of Geostatistical Association of Australasia Symposium „Quantifying Risk and Error”*.
- Webster R., Oliver M.A., 2007. Geostatistics for Environmental Scientists. *John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England*. ISBN 978-0-470-02858-2.

Zajusz-Zubek E., Mainka A., Korban Z., Pastuszka J.S., 2015. Evaluation of highly mobile fraction of trace elements in PM10 collected in Upper Silesia (Poland): Preliminary results. *Atmospheric Pollution Research*, 6: 961–968. DOI: 10.1016/j.apr.2015.05.001.

Zawadzki J., 2011. Metody geostatystyczne dla kierunków przyrodniczych i technicznych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa*. ISBN 978-83-7207-953-4.

Zawadzki J., Cieszewski C.J., Zasada M., Lowe R.C., 2005. Applying geostatistics for investigations of forest ecosystems using remote

sensing imagery. *Silva Fennica*, 39(4): 599–617. DOI: 10.14214/sf.369.



Mgr inż. Bogdan FILAR
Starszy specjalista badawczo-techniczny; kierownik Zakładu Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: bogdan.filar@inig.pl



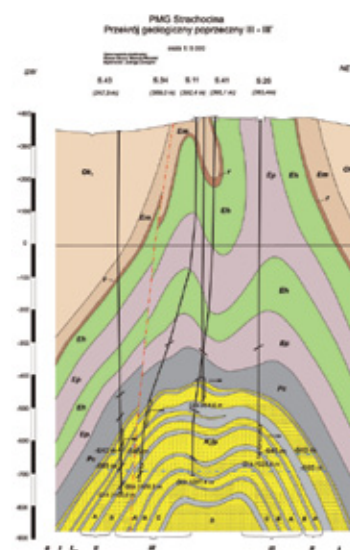
Dr Tadeusz KWIŁOSZ
Adiunkt w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: tadeusz.kwilosz@inig.pl



Mgr Mariusz MIZIOLEK
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: mariusz.miziolek@inig.pl

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU PODZIEMNEGO MAGAZYNOWANIA GAZU

- analiza struktur geologicznych złóż gazu ziemnego, ropy naftowej oraz obiektów zawodniomych, pod kątem możliwości ich przekształcenia w PMG;
- szczegółowa analiza warunków geologiczno-złożowych, ocena dotychczasowej eksploatacji złoża, warunków hydrodynamicznych, zdolności wydobywczych odwiertów;
- ocena stanu technicznego istniejącej infrastruktury w aspekcie jej wykorzystania w pracy PMG;
- wykonywanie cyfrowych modeli geologicznych PMG, złóż gazu ziemnego i ropy naftowej;
- wykonywanie projektów budowy PMG;
- analiza dotychczasowej pracy istniejących PMG w celu optymalizacji parametrów dalszej eksploatacji magazynów na bazie symulacji komputerowej;
- opracowanie projektów prac geologicznych, dotyczących poszukiwania i rozpoznawania złóż gazu ziemnego i ropy naftowej;
- opracowanie dokumentacji geologicznych złóż ropy naftowej i gazu ziemnego;
- opracowanie programu optymalnej eksploatacji złoża, wydajności poszczególnych odwiertów, tempa szczypania itp.



Kierownik: mgr inż. Bogdan Filar Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno
Telefon: 13 436 89 41 w. 5202 Faks: 13 436 79 71 E-mail: bogdan.filar@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
– Państwowy Instytut Badawczy