

Marcin Pelka, Aneta Rybicka

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
e-mail: marcin.pelka@ue.wroc.pl; aneta.rybicka@ue.wroc.pl

Justyna Brzezińska

Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach
e-mail: justyna.brzezinska@ue.katowice.pl

WIELOWYMIAROWA ANALIZA STATYSTYCZNA ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA W KRAJACH UNII EUROPEJSKIEJ

MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS OF AIR EMISSIONS IN THE EUROPEAN UNION STATES

DOI: 10.15611/pn.2018.507.21

JEL Classification: I15, Q53, Q54, C49

Streszczenie: Analiza zanieczyszczenia powietrza obejmuje rejestr zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z materiałów gospodarki narodowej do atmosfery. Po wejściu do atmosfery emitowane substancje znajdują się poza wszelką kontrolą człowieka i stają się częścią naturalnego obiegu materii; mogą wywoływać kilka rodzajów oddziaływań na środowisko. Celem artykułu jest ocena jakości czystości powietrza ze szczególnym uwzględnieniem zanieczyszczeń w krajach Unii Europejskiej na podstawie danych udostępnianych przez Eurostat. W artykule wykorzystane zostaną metody wielowymiarowej analizy statystycznej (skalowanie wielowymiarowe oraz porządkowanie liniowe) w celu identyfikacji krajów o znacznym wkładzie w walkę z zanieczyszczeniami, jak i krajów które tych zanieczyszczeń generują najwięcej. Otrzymane wyniki wskazują na poprawę jakości powietrza, mimo że nie wszystkie kraje UE osiągnęły zbliżony poziom zmian. Wszystkie obliczenia przeprowadzono w programie R.

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie powietrza, skalowanie wielowymiarowe, analiza skupień, porządkowanie liniowe.

Summary: Air emissions accounts record the flows of gaseous and particulate materials from the national economy into the atmosphere. After joining the atmosphere, the emitted substances are out of any human control and become part of natural materials cycles and may induce several types of environmental impacts. Across the EU Member States, the contributions by the various economic activities and households to total national greenhouse gas emissions differ. These differences are, in part, due to different economic structures and different mixes of non-renewable and renewable energy sources. This paper presents multivariate statistical analysis of greenhouse gas emission (CO₂, N₂O, CH₄) based on data reported by EUROSTAT. It presents an analysis of air quality with the application of multidimensional scaling and

linear ordering. The results show that air quality has improved although not all EU countries reached a similar level of improvement. All calculations will be done in R software.

Keywords: air emission, multidimensional scaling, cluster analysis, linear ordering.

Pozytywnie ocenia się obniżenie emisji gazów cieplarnianych w Europie od 1990 r. To istotny krok na drodze do osiągnięcia celu klimatycznego w 2030 i 2050 r. Aby przyspieszyć proces przejścia w kierunku społeczeństwa niskoemisyjnego, dalej powinny być zwiększane inwestycje w technologie i innowacje, dzięki którym zmniejszy się zależność od paliw kopalnych

Hans Bruyninckx,
dyrektor generalny Europejskiej Agencji
Ochrony Środowiska

1. Wstęp

Od końca lat siedemdziesiątych zanieczyszczenie powietrza było jednym z najważniejszych problemów związanych z ochroną środowiska w Europie. W grudniu 2013 r. Komisja Europejska przyjęła pakiet „Czyste Powietrze”, składający się z nowego programu Czyste Powietrze dla Europy, zawierającego nowe cele w zakresie jakości powietrza do 2030 r. Pakiet „Czyste Powietrze” ma istotnie obniżyć zanieczyszczenie powietrza w całej UE. Proponowana strategia pokazuje, jak i o ile, do 2030 r., zmniejszyć wpływ zanieczyszczenia powietrza na zdrowie człowieka i środowisko naturalne. Przewiduje ona też działania legislacyjne, by zaostrzyć normy emisji i pułapy zanieczyszczenia powietrza. Komisja Europejska ogłosiła pakiet 18 grudnia 2013 r. Pakiet ten składa się z komunikatu przedstawiającego program Czyste Powietrze dla Europy oraz z 3 wniosków legislacyjnych dotyczących emisji i zanieczyszczenia powietrza. Zmieniono dyrektywę w sprawie krajowych poziomów emisji, z surowszymi krajowymi pułapami emisji dla sześciu głównych zanieczyszczeń, oraz przygotowano wniosek dotyczący nowej dyrektywy w celu zmniejszenia zanieczyszczeń z instalacji spalania średniej wielkości. Emisje substancji zakwaszających, które powodują kwaśne deszcze, są w dużym stopniu regulowane przez protokół z Göteborga na mocy Konwencji o transgranicznym zanieczyszczeniu powietrza na szeroką skalę, podpisaną w 1979 r.

Zanieczyszczenie powietrza zarówno w Polsce, Europie, jak i na całym świecie jest ogromnym problemem. Dwutlenek azotu i związane z nim zanieczyszczenia stanowią poważne zagrożenie dla zdrowia. Delikatne obszary ekosystemu Europy są dotknięte kwaśnym osadzeniem nadmiaru tlenku siarki (SO_x), tlenku azotu (NO_x) oraz nieorganicznego związku chemicznego azotu i wodoru, tzw. amoniaku (NH₃).

Z działalności człowieka są emitowane zanieczyszczenia powietrza, głównie poprzez spalanie paliw. Dzięki wachlarzowi działań w zakresie polityki środowiskowej emisje zanieczyszczeń powietrza w Europie znacznie spadły w ciągu ostatnich 25 lat.

Eurostat jest urzędem statystycznym Unii Europejskiej, który odpowiedzialny jest za harmonizację, gromadzenie i rozpowszechnianie statystyk UE w kwestiach gospodarczych, społecznych i środowiskowych istotnych dla polityki europejskiej. Pomimo tego, że dane Eurostatu nie są specjalnie zbierane w celu oszacowania emisji gazów cieplarnianych, to zawierają one wiele informacji dotyczących tej tematyki.

Analiza i ocena antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych stanowi wspólne narzędzie, dzięki któremu strony Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu mogą oszacować poziom emisji, w odniesieniu do poszczególnych gazów i ich źródeł. Wszystkie strony Protokołu z Kioto zobowiązane są do sporządzania rocznego wykazu emisji gazów cieplarnianych oraz do przedstawienia sprawozdania dotyczącego swoich działań mających na celu kontrolę emisji gazów cieplarnianych.

Ewidencja ta pozwala analizować trendy emisji gazów cieplarnianych z roku na rok. Wynika ona ze zbioru standardowych wytycznych, które mają na celu zapewnienie spójności i porównywalności zgłoszeń. Ewidencja ta składa się ze znormalizowanych tabel (opartych na wspólnym formacie sprawozdawczym – CRF). Powinny towarzyszyć jej pisemne sprawozdania zawierające informacje o metodach i źródłach danych (krajowy raport inwentaryzacji – NIR). Każdy kraj rozwinięty, który jest sygnatariuszem Protokołu z Kioto, zobowiązany jest przedłożyć wykaz do 15 kwietnia każdego roku, podając szacunki dotyczące ich netto emisji gazów cieplarnianych w okresie od 1990 r. W ramach każdego z raportów dostarczane są dane¹, które mają na celu zapewnienie spójności i umożliwienie wprowadzenia ulepszeń technik pomiarowych i obliczeniowych. Państwa członkowskie UE, jako strony protokołu z Kioto, zobowiązane są przekazywać swoje indywidualne dane do UNFCCC.

Gazy cieplarniane są grupą związków chemicznych zdolnych do wychwytywania ciepła (promieniowanie długimi falami) w atmosferze, utrzymując powierzchnię Ziemi w cieplejszej temperaturze, niż gdyby nie były obecne. Zwiększenie ilości gazów cieplarnianych w atmosferze zwiększa efekt cieplarniany, powodując globalne ocieplenie, a tym samym zmianę klimatu. Każdy gaz cieplarniany ma inną zdolność powodowania globalnego ocieplenia, w zależności od właściwości radiacyjnych, masy cząsteczkowej i czasu pozostawania w atmosferze (zob. np. [Allison 2015; Karl, Trenberth 2003; Le Treut i in. 2007; Ramaswamy i in. 2001]). Globalny współczynnik ocieplenia (GWO) każdego gazu cieplarnianego określa się w odniesieniu do danej masy dwutlenku węgla w określonym czasie (dla celów protokołu z Kioto jest to okres 100 lat). GWO są wykorzystywane do konwersji emisji innych gazów cieplarnianych do równoważników dwutlenku węgla CO₂, co umożliwia po-

¹ Dane zawierają kompletne informacje o emisji gazów cieplarnianych od roku 1990, a nie tylko dane z ostatniego okresu.

równanie potencjalnych skutków emisji różnych gazów. Europejska Agencja Ochrony Środowiska sporządza w imieniu UE roczny raport inwentaryzacji gazów cieplarnianych. Szacunki dotyczące emisji gazów cieplarnianych są przygotowywane dla wielu źródeł, które są opisane w sektorach zgodnie z technologicznym źródłem emisji, opracowanym przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC). Pięć głównych sektorów źródeł emisji gazów cieplarnianych obejmuje:

- energię (spalanie paliw i emisje ulotowe z paliw), w tym transport,
- procesy przemysłowe i wykorzystanie produktu,
- rolnictwo,
- użytkowanie gruntów, zmiana użytkowania gruntów i leśnictwo,
- zarządzanie odpadami.

Celem artykułu jest ocena jakości czystości powietrza w krajach Unii Europejskiej na podstawie danych udostępnianych przez Eurostat.

2. Podstawowe wskaźniki zanieczyszczenia powietrza w UE

Całkowite emisje gazów cieplarnianych w UE-27 (z wyłączeniem użytkowania gruntów oraz zmian użytkowania gruntów i leśnictwa) wyniosły w 2007 r. 5045 mln ton ekwiwalentu CO₂. Liczba ta oznacza całkowite zmniejszenie o 9,3% lub około 519 mln ton ekwiwalentu CO₂ w porównaniu z rokiem 1990. W latach 2006–2007 emisja gazów cieplarnianych w UE-27 spadła o 1,2% (czyli około 59,8 mln ton ekwiwalentu CO₂). Zgodnie z protokołem z Kioto państwa członkowskie UE-15 zgodziły się zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych o 8% w pierwszym okresie 2008–2012.

W latach 1990–2007 całkowita redukcja emisji gazów cieplarnianych w UE-15 (z wyłączeniem użytkowania gruntów oraz zmian użytkowania gruntów i leśnictwa) wyniosła 4,3%, podczas gdy redukcja całkowitych emisji w latach 2006–2007 wyniosła 1,6%. W 2007 r. całkowita emisja gazów cieplarnianych w UE-15 (z wyłączeniem użytkowania gruntów oraz zmian użytkowania gruntów i leśnictwa) wyniosła 4052 mln ton ekwiwalentu CO₂.

Do tej pory najważniejszym źródłem emisji gazów cieplarnianych w UE-27 jest emisja spalin i emisja z powietrza (ta ostatnia składa się z przecieków wytwórczych z rur, zaworów i kołnierzy). W okresie od 1990 do 2007 r. emisje spalin i emisja zanieczyszczeń stanowiły od 77% do 80% wszystkich emisji gazów cieplarnianych w UE-27. Według najnowszych informacji stanowią one 79,3% udziału. Emisje spowodowane spalaniem paliw (3912 mln ton ekwiwalentu CO₂ w 2007 r.) pochodzą z dwóch głównych źródeł: elektrowni naftowych i gazowych wytwarzających energię elektryczną (szacuje się, że stanowiły one niemal 1/3 wszystkich emisji gazów cieplarnianych) oraz transportu drogowego, obejmującego korzystanie z samochodów osobowych, zbiorowego transportu drogowego osób i transportu towarowego (co stanowiło niemal 1/5 wszystkich emisji). Innymi głównymi czynnikami emisji były:

- przemysł wytwórczy (głównie energia energochłonna, np. produkcja żelaza i stali lub chemikaliów),
- gospodarstwa domowe (w formie spalania paliw do celów grzewczych).

Poza emisją spalin w rolnictwie w 2007 r. zanotowano 9,2% wszystkich emisji gazów cieplarnianych. W UE-27 emisje z procesów przemysłowych, rozpuszczalników i wykorzystania produktów były nieznacznie niższe (8,8%), a emisje z odpadów stanowiły pozostałe 2,8%.

Przegląd największych zmian emisji w latach 2013–2014 w krajach UE-28 według kluczowych sektorów w UE przedstawiono w tabeli 1. Uwzględnia ona zmiany w wielkości przynajmniej 3 mln ton.

Tabela 1. Przegląd zmian emisji według kluczowych sektorów w 28 krajach Unii Europejskiej w latach 2013–2014

Źródło emisji	Milion ton (ekwiwalent CO ₂)	Procent
Transport drogowy	6,6	-3,52
Produkcja stali i żelaza	5,6	-2,99
Produkcja cementu	3,4	-1,81
Paliwa chemiczne	-3,1	1,65
Rafinerie	-4,2	2,24
Odpady	-4,6	2,45
Przemysł wytwórczy	-18,1	9,65
Instytucje	-22,5	11,99
Tereny mieszkalne	-65,6	34,97
Energia elektryczna i ciepła	-85,1	45,36
Suma	-187,6	100

Źródło: Europejska Agencja Środowiska.

Największe redukcje emisji w UE wystąpiły w produkcji energii elektrycznej i ciepłej oraz w sektorze mieszkaniowym i handlowym. Bliższa analiza na szczeblu krajowym wskazuje, że 10 największych uczestników procesu redukcji emisji gazów cieplarnianych w UE w 2014 r. to:

- niższe zużycie węgla w elektrociepłowniach w Danii, Francji, Wielkiej Brytanii oraz w Polsce,
- niższe wykorzystanie gazu ziemnego w elektrociepłowniach i energetyce we Włoszech,
- niższe wykorzystanie gazu ziemnego w sektorze mieszkaniowym w Danii, Francji, Wielkiej Brytanii, Włoszech oraz Holandii.

Redukcje w tych obszarach stanowią prawie 60% całkowitej redukcji emisji osiągniętej przez UE w 2014 r.

3. Wizualizacja wyników porządkowania liniowego dla danych metrycznych z zastosowaniem skalowania wielowymiarowego

Propozycję wizualizacji wyników porządkowania liniowego dla danych metrycznych zaproponował [Walesiak 2017a], a następnie w pracy [Walesiak 2017b] zaproponowano zastosowanie skalowania wielowymiarowego do wizualizacji wyników porządkowania liniowego dla danych porządkowych.

Generalnie procedura postępowania w porządkowaniu liniowym umożliwiającą wizualizację wyników, która bazuje na wzorcu rozwoju (nazywanym także górnym biegunem rozwoju) lub antywzorcu rozwoju (nazywanym także dolnym biegunem rozwoju), dla danych metrycznych obejmuje kroki (zob. [Walesiak 2017a]):

1. Wybór zjawiska złożonego (P), które nie podlega pomiarowi bezpośredniemu. Zjawisko to jest nadrzędnym kryterium porządkowania zbioru obiektów A .

2. Wybór obiektów (A), które zostaną poddane porządkowaniu.

3. Dobór zmiennych (X) oraz budowa macierzy danych $[x_{ij}]$ (x_{ij} – wartość j -tej zmiennej dla i -tego obiektu).

4. Identyfikacja zmiennych preferencyjnych – stymulanty, destymulanty, nominanty. Zmienna jest stymulantą, jeżeli dla każdych dwóch jej obserwacji x_{ij}^S, x_{kj}^S dla obiektów i, k zachodzi $x_{ij}^S > x_{kj}^S \Rightarrow A_i \succ A_k$ (\succ oznacza dominację obiektu i nad k). Zmienna jest destymulantą, jeżeli dla każdych z dwóch jej obserwacji x_{ij}^D, x_{kj}^D dla obiektów i, k zachodzi $x_{ij}^D > x_{kj}^D \Rightarrow A_i \prec A_k$ (\prec oznacza dominację obiektu k nad i). Zmienna jest nominantą jednomodalną, jeżeli dla dwóch obserwacji x_{ij}^N, x_{kj}^N dla obiektów i, k oraz poziomu nominalnego tej zmiennej nom_j zachodzą związki: jeżeli $x_{ij}^N, x_{kj}^N \leq nom_j$, to $x_{ij}^N > x_{kj}^N \Rightarrow A_i \succ A_k$, natomiast jeżeli $x_{ij}^N, x_{kj}^N > nom_j$, to $x_{ij}^N > x_{kj}^N \Rightarrow A_i \prec A_k$.

5. Do zbioru danych dodaje się wzorzec (górną biegun rozwoju) oraz antywzorzec (dolny biegun rozwoju).

6. Normalizacja zmiennych. Przegląd formuł normalizacyjnych zawiera m.in. praca [Walesiak 2014]. W części empirycznej wykorzystano unitaryzację.

7. Pomiar odległości pomiędzy i -tym obiektem a wzorcem rozwoju. Tworzy się macierz odległości $[\delta_{ik}]$. W części empirycznej wykorzystano metrykę miejską do pomiaru odległości.

8. Przeprowadza się skalowanie wielowymiarowe, które pozwala na wizualizację odległości między obiektami z przestrzeni m -wymiarowej w przestrzeni q -wymiarowej ($q < m$) z zachowaniem relacji zachodzących między obiektami. Wymiary q nie są bezpośrednio obserwowalne – mają charakter zmiennych ukrytych, które pozwalają wyjaśniać podobieństwa i różnice między obiektami. Iteracyjny schemat skalowania wielowymiarowego w algorytmie **smacof** zaprezentowano w pracy [Borg, Groenen 2005, s. 204–205]. W efekcie otrzymuje się wyniki w postaci dwuwymiarowej macierzy danych.

9. Prezentacja graficzna oraz interpretacja wyników w przestrzeni dwuwymiarowej, w której prezentowane są wyniki skalowania wielowymiarowego, oraz jednowymiarowej, która wizualizuje rezultaty porządkowania liniowego:

- na rysunku łączy się linią prostą punkty reprezentujące wzorzec i antywzorzec, tworząc tzw. oś zbioru. Wyznacza się krzywe jednakowego rozwoju (tzw. izokwanty rozwoju), np. przez podzielenie zbioru na 4 części. Obiekty znajdujące się pomiędzy izokwantami mają zbliżony poziom rozwoju. Ten sam poziom rozwoju mogą mieć obiekty znajdujące się po przeciwnych stronach izokwanty (ze względu na inne wartości zmiennych). Taka prezentacja wyników znacznie wzbogaca wyniki porządkowania liniowego.

10. Wyznacza się unormowane odległości d_i^+ i -tego obiektu od wzorca rozwoju zgodnie ze wzorem [Hellwig 1981, s. 62]:

$$d_i^+ = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^2 (v_{ij} - v_{+j})^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^2 (v_{+j} - v_{-j})^2}}, \quad (1)$$

gdzie: $d_i^+ \in [0; 1]$, $\sqrt{\sum_{j=1}^2 (v_{ij} - v_{+j})^2}$ – odległość Euklidesowa i -tego obiektu od wzorca rozwoju; $\sqrt{\sum_{j=1}^2 (v_{+j} - v_{-j})^2}$ – odległość Euklidesowa pomiędzy górnym, a dolnym wzorcem rozwoju.

Porządkuje się obiekty badania według rosnących wartości miary odległości (1). Wyniki porządkowania liniowego przedstawia się na rysunku.

4. Wyniki badań empirycznych

W badaniu jakości powietrza uwzględniono następujące zmienne (dane z Eurostatu) z roku 2009 i 2014:

- a) x1 – odsetek populacji narażony na zanieczyszczenie powietrza (cząstki poniżej 2,5 μm),
- b) x2 – odsetek populacji narażony na zanieczyszczenie powietrza (cząstki poniżej 10 μm),
- c) x3 – emisja zanieczyszczeń ze środków transportu (cząstki organiczne inne niż metan),
- d) x4 – emisja gazów cieplarnianych *per capita*,
- e) x5 – emisja gazów cieplarnianych z tytułu zużycia energii,
- f) x6 – emisja tlenków siarki (SO_x),
- g) x7 – emisja tlenków azotu (NO_x),

- h) x8 – emisja związków organicznych innych niż metan,
- i) x9 – emisja amoniaku (NH_3),
- j) x10 – odsetek populacji narażony na zanieczyszczenie ozonem,
- k) x11 – średnia emisja dwutlenku węgla na kilometr kwadratowy z nowych samochodów osobowych.

Zmienne od x1 do x11 są destymulantami, zatem obiekt wzorzec zawiera najmniejsze (minimalne) wartości (realizacje) zmiennych, a antywzorzec największe (maksymalne) wartości zmiennych.

Do wyboru optymalnej procedury skalowania wielowymiarowego wykorzystano funkcje `optSmacofSym_mMDS` oraz `findOptimalSmacofSym` z pakietu `mdsOpt`. Funkcje te pozwalają na wybór optymalnej procedury skalowania wielowymiarowego dla danych metrycznych (zob. [Walesiak, Dudek 2017]). W wyniku zastosowania tej funkcji wybrano unitaryzację (n3) jako najlepszą metodę normalizacji oraz ilorazowy (ratio) model skalowania wielowymiarowego, w którym wykorzystano metrykę miejską. Wartość funkcji STRESS-1 wyniosła 0,125179, a indeks HHI 200,5794.

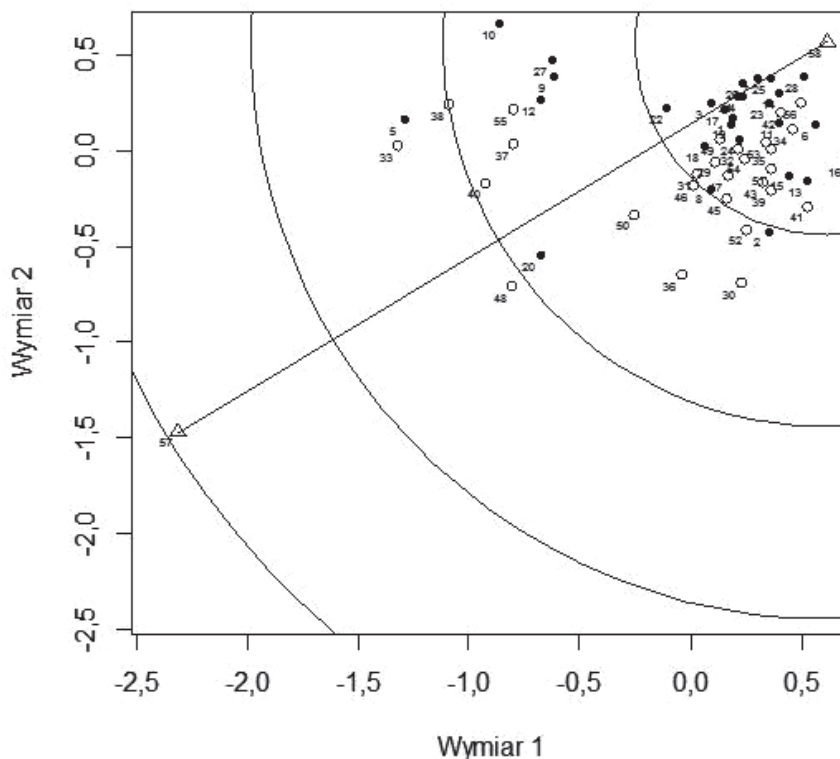
Na rysunku 1 przedstawiono graficzną prezentację wyników skalowania wielowymiarowego 58 obiektów – 28 krajów UE w każdym roku oraz wzorzec (obiekt 58) i antywzorzec (obiekt 57). Wyznaczono arbitralnie 4 izokwanty dzielące oś zbioru na 4 równe części. W tabeli 2 zawarto nazwy i numery obiektów na rys. 1.

Tabela 2. Oznaczenia obiektów na rysunku 1

Kraj	Rok				Kraj	Rok			
	2014		2009			2014		2009	
	Lp.	Poz. ¹	Lp.	Poz. ¹		Lp.	Poz. ¹	Lp.	Poz. ¹
Belgia	1	12	29	14	Litwa	15	14	43	11
Bułgaria	2	23	30	24	Luksemburg	16	10	44	10
Czechy	3	18	31	18	Węgry	17	16	45	17
Dania	4	8	32	7	Holandia	18	15	46	16
Niemcy	5	28	33	27	Austria	19	13	47	13
Estonia	6	3	34	2	Polska	20	27	48	28
Irlandia	7	4	35	4	Portugalia	21	7	49	8
Grecja	8	17	36	22	Rumunia	22	19	50	20
Hiszpania	9	24	37	23	Słowenia	23	11	51	12
Francja	10	26	38	25	Słowacja	24	20	52	19
Chorwacja	11	6	39	9	Finlandia	25	2	53	3
Włochy	12	25	40	26	Szwecja	26	5	54	5
Cypr	13	21	41	15	Wielka Brytania	27	22	55	21
Łotwa	14	9	42	6	Norwegia	28	1	56	1

Poz.¹ – pozycja w rankingu krajów UE w danym roku (obliczona zgodnie ze wzorem 1).

Źródło: opracowanie własne.



Kropki pełne reprezentują dane z roku 2014, a puste – dane z 2009. Wzorzec i antywzorzec reprezentowane są przez trójkąty.

Rys. 1. Graficzna prezentacja wyników skalowania wielowymiarowego w przestrzeni dwuwymiarowej 58 obiektów (28 krajów UE plus wzorzec – obiekt 58 i antywzorzec – obiekt 57).

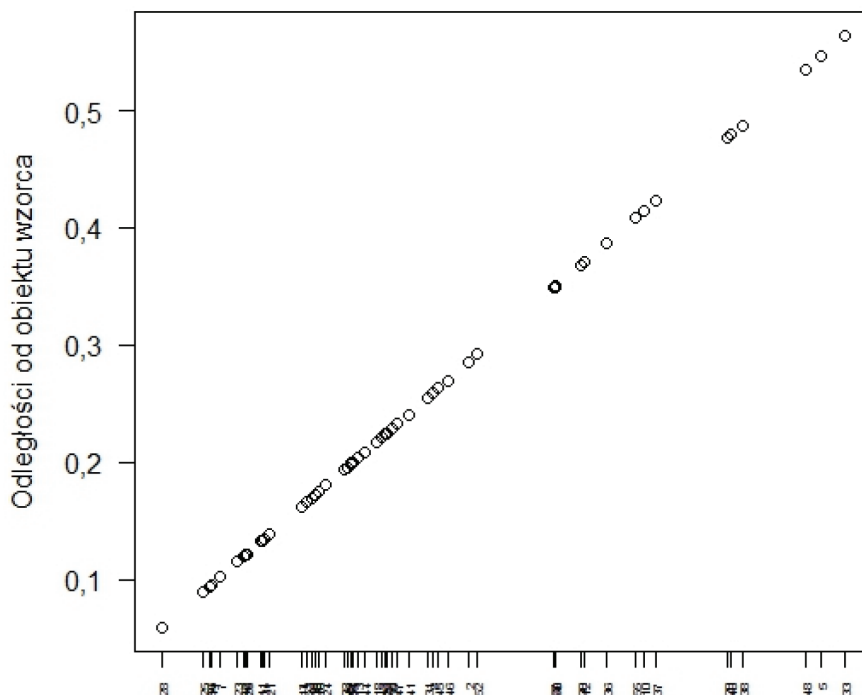
Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem programu R.

Biorąc pod uwagę rys. 1, można stwierdzić, że wszystkie kraje UE poprawiły jakość powietrza, porównując rok 2009 i 2014 (nastąpiło przesunięcie obiektów w stronę wzorca rozwoju). Na wykresie 1 można zidentyfikować kraje o podobnym poziomie jakości powietrza, ale o innej pozycji na wykresie – np. Rumunia, Grecja oraz Bułgaria w 2009 r. i Hiszpania, Wielka Brytania w 2009 r. oraz Włochy, Hiszpania i Francja w 2014 r.

Większość krajów UE zajmuje podobne pozycje w rankingu zarówno dla roku 2009, jak i 2014. Grecja poprawiła znacznie swoją pozycję, jeśli porównać ranking roku 2009 i 2014 (odpowiednio 22 i 17). Chorwacja przesunęła się z pozycji 9 na 6, a Łotwa spadła z pozycji 6 na 9. Podobnie Cypr przesunął się z pozycji 15 na 21.

Analizując rys. 1, można stwierdzić, że krajami o najlepszej czystości powietrza zarówno w 2009, jak i 2014 są głównie kraje skandynawskie oraz Irlandia i Estonia.

Wśród krajów o najgorszej jakości powietrza znalazły się Polska, Niemcy, Włochy oraz Francja.



Rys. 2. Graficzna prezentacja wyników porządkowania liniowego 56 obiektów pod względem jakości powietrza

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem programu R.

5. Zakończenie

Skalowanie wielowymiarowe pozwala wzbogacić interpretację wyników porządkowania liniowego zbioru obiektów.

Koncepcja izokwant i ścieżki rozwoju zaproponowana w pracy [Hellwig 1981] pozwala na graficzną prezentację wyników porządkowania liniowego tylko dla dwóch zmiennych. Zastosowanie skalowania wielowymiarowego rozszerza możliwości wizualizacji wyników porządkowania liniowego dla m zmiennych.

Krajami o najlepszej czystości powietrza zarówno w 2009, jak i 2014 są głównie kraje skandynawskie oraz Irlandia i Estonia. Wśród krajów o najgorszej jakości powietrza znalazły się Polska, Niemcy, Włochy oraz Francja.

Otrzymane wyniki wskazują, że w większość krajów Unii Europejskiej ma podobny poziom zanieczyszczeń (porównując rok 2009 i 2014). Oznacza to, że środki

finansowe przeznaczane przez Unię na walkę z zanieczyszczeniami powietrza pozwalają „utrzymać je w ryzach” także w warunkach rozwoju gospodarczego krajów. Niemniej jednak, mając na uwadze cele programów zapewniania jakości powietrza, należałoby oczekiwać większych zmian w okresie pięciu lat.

Obszarem przyszłych badań i analiz powinna stać się długookresowa analiza jakości powietrza w krajach Unii Europejskiej, co pozwoliłoby ocenić realną możliwość osiągnięcia założonych celów emisyjnych. Analiza ta pozwoliłaby także wskazać kraje konsekwentnie realizujące założone cele emisyjne i kraje, które mają problemy z realizacją takich celów.

Literatura

- Allison I., 2015, *The Science of Climate Change: Questions and Answers*, Australian Academy of Science, Canberra.
- Borg I., Groenen P.J.F., 2005, *Modern Multidimensional Scaling. Theory and Applications*, 2nd ed., Springer Science+Business Media, New York.
- Hellwig Z., 1981, *Wielowymiarowa analiza porównawcza i jej zastosowanie w badaniach wielocechowych obiektów gospodarczych*, [w:] *Metody i modele ekonomiczno-matematyczne w doskonaleniu zarządzania gospodarką socjalistyczną*, red. W. Welfe, PWE, Warszawa, s. 46–68.
- Le Treut H., Somerville R., Cubasch U., Ding Y., Mauritzen C., Mokssit A., Peterson T., Prather M., 2007, *Historical overview of climate change*, [w:] *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ramaswamy V., Boucher O., Haigh J., Hauglustaine D., Haywood J., Myhre G., Nakajima T., Shi G.Y., Solomon S., 2001, *Radiative forcing of climate change*, [w:] *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Karl T., Trenberth K., 2003, *Modern global climate change*, *Science*, vol. 302(5651), s. 1719–1723.
- Walesiak M., 2014, *Przegląd formuł normalizacji wartości zmiennych oraz ich własności w statystycznej analizie wielowymiarowej*, *Przegląd Statystyczny*, tom 61, z. 4, s. 363–372.
- Walesiak M., 2017a, *Visualization of linear ordering results for metric data with application of multi-dimensional scaling*, *Ekonometria*, vol. 2(52), s. 9–21.
- Walesiak M., 2017b, *Wizualizacja wyników porządkowania liniowego dla danych porządkowych z wykorzystaniem skalowania wielowymiarowego*, *Przegląd Statystyczny*, tom 64, z. 1, s. 5–19.
- Walesiak M., Dudek A., 2016, *The clusterSim package for R software*, [URL:] <http://www.r-project.org>.
- Walesiak M., Dudek A., 2017, *The mdsOpt package for R software*, [URL:] <http://www.r-project.org>.