

Analiza emisji zanieczyszczeń sektora energetyczno-przemysłowego z wykorzystaniem rozmytego analitycznego procesu hierarchicznego i metody TOPSIS

Dominika Siwiec*, Andrzej Pacana**

Emisja gazów cieplarnianych (w tym CO₂), głównie w nawiązaniu do sektora energetyczno-przemysłowego, generuje negatywne zmiany w środowisku naturalnym. Dlatego, aby podejmować skuteczne działania mające na celu redukcję tych emisji, ważne jest właściwe ich analizowanie. W związku z tym celem artykułu było zaproponowanie wykorzystania techniki do analizy emisji zanieczyszczeń, która uwzględni jednocześnie wielkość oraz szkodliwość wytwarzanych emisji. Technika tą był rozmyty analityczny proces hierarchiczny (FAHP, Fuzzy Analytic Hierarchy Process) oraz metoda TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution). Proponowaną technikę przetestowano na aktualnych, dostępnych danych statystycznych z Głównego Urzędu Statystycznego, dotyczących emisji zanieczyszczeń powietrza w Polsce w roku 2018 według sekcji PKD. W ramach przetestowania techniki określono, który z zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza według sekcji PKD ma największy wpływ na zanieczyszczenie powietrza, z jednoczesnym uwzględnieniem wielkości i szkodliwości wytwarzanych emisji. Mimo że uzyskane wyniki wynikają z subiektywnych ocen podmiotu stosującego technikę, wykazano, że technika ta umożliwia przeanalizowanie emisji zanieczyszczeń z jednoczesnym uwzględnieniem wielkości i szkodliwości emisji. Z kolei subiektywizm ocen po części zredukowano przez rozmytą skalę Saaty'ego. Stosując proponowaną technikę FAHP oraz metodę TOPSIS, wykazano, że możliwe jest dokonanie subiektywnej oceny szkodliwości emisji zanieczyszczeń oraz zintegrowanie ich z rzeczywistymi danymi, np. z danymi GUS. W związku z tym proponowana technika jest nowym podejściem do analizy emisji zanieczyszczeń, dlatego też jej zastosowanie może usprawnić proces decyzyjny w ramach ograniczania emisji, a tym dwutlenku węgla, którego redukcja, jak wskazano, jest aktualnym problemem na skalę globalną.

Słowa kluczowe: rozmyty analityczny proces hierarchiczny, TOPSIS, emisja zanieczyszczeń, redukcja zanieczyszczeń.

Nadesłany: 12.05.2020 | Zaakceptowany do druku: 15.12.2020

* **Dominika Siwiec** – mgr inż., Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Polska, <https://orcid.org/0000-0002-6663-6621>.

** **Andrzej Pacana** – prof. PRZ, dr hab. inż., Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Polska, <https://orcid.org/0000-0003-1121-6352>.

Adres do korespondencji: Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, Polska; e-mail: app@prz.edu.pl; d.siwiec@prz.edu.pl.

Analysis of pollution emission of the energy-industrial sector with use the fuzzy analytic hierarchy process and TOPSIS method

Greenhouse gas emissions (in it CO_2), mainly with reference to the energy and industrial sector, generate negative changes in the natural environment. Therefore, to make effective actions in order to reduce this emission, it is important to analyze them properly. Therefore, the aim of the article was to propose using a technique to analyze the emissions of pollutants, included at the same time the size and harmfulness of emissions produced. This technique was a fuzzy analytic hierarchy process (FAHP, Fuzzy Analytic Hierarchy Process) and TOPSIS method (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution). The proposed technique was tested on current, available statistic data from the Central Statistical Office, on emissions of air pollutants in Poland in the 2018 year, according to PKD section. As part of testing the technique, it was specified which of plants according to PKD section has the biggest influence in pollutant the air; with simultaneous consideration of the size and harmfulness of generated emissions. Although that obtained results arise from subjective assessments of the entity using the technique, it was shown that this technique allows analyzed the pollution emissions, by including at the same time the size and harmfulness of emission. In turn of the subjectivity of assessments partly was reduced by the fuzzy Saaty scale. Using the proposed FAHP technique and the TOPSIS method, it has been shown that it is possible to perform a subjective assessment of the harmfulness of pollutant emissions and to integrate them with actual data, e.g. with data from the Central Statistical Office. Therefore, the proposed technique is a new approach to analyse emissions pollutions, in it CO_2 , whose reduction, as indicated, is a current global problem.

Keywords: fuzzy analytic hierarchy process, TOPSIS, pollution emission, pollution reduction.

Submitted: 12.05.2020 | Accepted: 15.12.2020

JEL: Q01, Q51, Q53, Q54, Q56

1. Wstęp

Zmiany klimatu, a przede wszystkim zanieczyszczenie powietrza, stanowią jedno z podstawowych zagrożeń XXI wieku, generujących problemy w zrównoważeniu środowiska i zapewnieniu bezpiecznego życia i zdrowia społeczeństwa (Adiaha i in., 2020). Według Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych oraz Protokołu z Kioto, aby zredukować negatywne zmiany klimatu, konieczne jest ograniczanie emisji gazów cieplarnianych (*Stan środowiska w Polsce Raport 2018*, 2018). Ograniczanie to powinno koncentrować się u źródeł ich powstania, które to kontrolowane były przed rewolucją przemysłową (Przemysł 4.0) głównie przez procesy naturalne. Od uprzemysłowienia to antropogeniczne zmiany klimatu odgrywają jednak coraz bardziej istotną rolę (Bukosa i in., 2019), przy czym aż w 90% generowane są przez gazy cieplarniane (Zwoliński, 2011; Wu i Mu, 2019). To właśnie wzrost stężenia gazów cieplarnia-

nych, obok działań, takich jak przykładowo masowe zużycie paliw kopalnych w przemyśle, czy masowy transport, wpływa na antropogeniczne zmiany klimatu (Uprety i Cao, 2016; Zwoliński, 2011). Do wspomnianych gazów cieplarnianych, które wskazał Międzynarodowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC 2000) zaliczane są przede wszystkim: para wodna (H_2O), podtlenek azotu (N_2O), ozon (O_3), metan (CH_4) i dwutlenek węgla (CO_2) (Adiaha i in. 2020). Spośród wspomnianych gazów cieplarnianych to właśnie emisja dwutlenku węgla stała się jednym z głównych problemów globalnych i głównych obszarów badawczych (Bukosa i in., 2019; Liebermann i in., 2019; Uprety i Cao, 2016; Wu i Mu, 2019). W wyniku wzrostu stężenia CO_2 dochodzi do negatywnego oddziaływania tych emisji na ekosystemy całego świata, przykładowo wzrost produkcji biomasy, a także niekorzystne zmiany zachodzące w glebie oraz tzw. zdarzenia ekstremalne (Liebermann i in., 2019).

Problem z emisją gazów cieplarnianych jest analizowany przez rządy ponad 190 krajów UNFCCC (tj. Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie Zmian Klimatu) (Stan środowiska w Polsce Raport 2018, 2018). Wskazano przy tym, że to Chiny są największym konsumentem energii, a tym samym producentem emisji gazów cieplarnianych (Lin i in., 2019; Zhang i in., 2018), gdzie ponad 75% emisji gazów cieplarnianych w tym kraju pochodzi ze zużycia energii opartej na węglu (Liu, 2013). W przypadku Polski, w której odnotowano ponad 50 elektrowni i elektrociepłowni węglowych, problem z emisją gazów cieplarnianych również jest istotny (*Węgiel zabija*, 2013). Potwierdzeniem tego jest fakt, że to właśnie na spalaniu węgla w 90% bazuje polski sektor energetyczny, przy czym szczególne znaczenie mają elektrownie przemysłowe (*Węgiel zabija*, 2013). Dodatkowo, w wyniku procesów spalania paliw (około 93% całkowitej emisji dwutlenku węgla) największy udział, równy 49%, charakteryzuje przemysł energetyczny. Mimo że zredukowano emisję dwutlenku węgla o około 29% (od 1988 do 2017 roku) to jego ilość w kraju nadal jest znacząca, o czym świadczy odnotowana w 2017 roku sumaryczna emisja CO₂, która wyniosła około 81% całkowitej emisji gazów cieplarnianych (*Ochrona środowiska 2019*, 2019). Dodatkowo, zapowiadające wyniki modeli klimatycznych wskazują, że maksymalna emisja CO₂ przypada na lata 2020–2030, przy czym szacuje się, że całkowite jej zredukowanie nastąpi dopiero w 2100 roku (*Stan środowiska w Polsce Raport 2018*, 2018). Problem ten jest w szczególności zauważalny w aktualnie następującym wzroście częstotliwości i natężenia zjawisk, takich jak susze czy huragany, które wraz ze wzrostem gazów cieplarnianych będą się pogłębiać. Aby temu zapobiec, niezbędne jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, m.in. z sektora energetycznego, z którego udział emisji CO₂ odpowiada za 58,8% wszystkich emisji gazów cieplarnianych (Khan i Khan, 2019). Problematyka emisji CO₂ z sektora energetycznego, jak wskazuje przegląd wybranych pozycji literatury przedmiotu, była analizowana głównie w kontekście emisji gazów cieplarnianych.

Khan i Khan, w artykule z 2019 roku, przeanalizowali związek między globalną emisją dwutlenku węgla z sektora energe-

tycznego i średnim, globalnym wzrostem temperatury. W tym celu zastosowali techniki modelowania rozmytego (tj. adaptacyjne neuronowe systemy wnioskowania (ANFIS), sztuczne sieci neuronowe (ANNs) i modele rozmytych szeregów czasowych). Wykazano, że możliwe jest prognozowanie emisji CO₂ oraz trendów temperaturowych z większą efektywnością, gdzie rozmyte szeregi czasowe były najwydajniejszą techniką spośród pozostałych (Khan i Khan, 2019). Z kolei, w artykule z roku 2019 autorstwa Tian, Feng, Li, i Xu, przedstawiono scenariusze do analizy zużycia energii oraz zminimalizowania emisji CO₂. Prognozy przeprowadzono z uwzględnieniem zarówno wzrostu PKB, jak i zmian w wielkości populacji, dopasowaniu struktury energetycznej, czy usprawnieniu technologii i wzroście wydajności energetycznej. Techniki, które zastosowano, to autoregresyjny, zintegrowany model średniej ruchomej oraz model logistyczny. Wywnioskowano, że wyniki uzyskane ze scenariusza bazowego, w porównaniu do scenariusza planowania energetycznego wskazują na redukcję emisji dwutlenku węgla o 45%. Kolejno, w pracy Kusumadewi i Limmechokchai (2017), w ramach działań zrównoważonego rozwoju w sektorze energetycznym, wykorzystano model LEAP do przeliczenia zapotrzebowania na energię i emisję CO₂, po czym przedstawiono scenariusze dotyczące m.in. biogazu czy oświetlenia. Artykuł z roku 2011 Gerbelova, Ioakimidis i Ferrao zawiera natomiast analizę wdrożenia techniki wychwytywania i redukcji CO₂ w sektorze energii elektrycznej, tj. w elektrowniach termoelektrycznych działających na bazie paliw kopalnych. Analizę przeprowadzono za pomocą oprogramowania zintegrowanego modelu kontroli środowiska (IECM) do określonej konfiguracji elektrowni, po której wykazano zdolność oceny wydajności i kosztów redukcji emisji CO₂ (Gerbelova i in., 2011). Innym przykładem jest artykuł autorstwa Tolis i in. z 2010 roku, w którym autorzy wnioskuje, że produkcja energii elektrycznej powinna opierać się na optymalnej kombinacji źródeł zarówno konwencjonalnych, jak i odnawialnych. Za pomocą narzędzia obliczeniowego (modelu matematycznego) symulowano i optymalizowano struktury wytwarzania energii elektrycznej, bazując na obecnych i nowo powstających technologiach. Wykazano, że możliwe jest redukcowanie prze-

widywanej emisji dwutlenku węgla, wraz z jednoczesnym osiągnięciem minimalizacji aspektów społeczno-ekonomicznych. Źródło wiarygodnych analiz w kontekście emisji CO₂ stanowią także dane statystyczne (np. *Ochrona środowiska 2019, 2019*), które dotyczą przykładowo emisji gazów cieplarnianych, zanieczyszczeń do powietrza, czy ilości np. wytwarzanego dwutlenku węgla. Przykładowo, dane z Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) (*Ochrona środowiska, 2019*) wskazywały, że w 2017 roku gazem emitowanym w nadmiernej ilości przez sektor przemysłowo-energetyczny był dwutlenek węgla (CO₂).

Jak wskazuje przeprowadzony przegląd literatury, emisja gazów cieplarnianych (w tym CO₂), również w kontekście sektora energetycznego, jest problemem na skalę globalną, rozważanym przez autorów wielu prac badawczych. W pracach tych podejmowano działania mające na celu przewidywanie, identyfikowanie i redukcję emisji dwutlenku węgla. Wykorzystywano do tego między innymi techniki prognostyczne, techniki modelowania rozmytego czy modele matematyczne. Dodatkowo, w analizach, przykładowo, zanieczyszczeń powietrza emitowanych przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD (dane z GUS) (*Ochrona środowiska 2019, 2019*), uwzględniano emisję dwutlenku węgla. Nie wypracowano jednak jednej techniki, za pomocą której możliwe byłoby uwzględnienie zarówno wielkości emisji, jak i stopnia szkodliwości emisji poszczególnych zanieczyszczeń, w tym np. dwutlenku węgla. Dlatego też, w celu osiągnięcia efektywnych analiz, a tym samym możliwości efektywnej redukcji emisji, konieczne jest uwzględnianie nie tylko wielkości produkcji emisji, lecz także stopnia szkodliwości tych emisji. Wywnioskowano, że brak jednej techniki, która umożliwiałaby jednoczesne uwzględnienie w analizach wielkości emisji i stopnia szkodliwości tych emisji, stanowi lukę w dokonywaniu efektywnych analiz zanieczyszczeń klimatu, lecz także ogranicza możliwość efektywniejszego podejmowania działań w ramach redukcji tych emisji. W związku z tym celem autorów niniejszego artykułu było zaproponowanie wykorzystania techniki do analizy emisji zanieczyszczeń, która uwzględni jednocześnie wielkość oraz szkodliwość wytwarzanych emisji. Technika ta obejmowała wykorzystanie rozmy-

tego analitycznego procesu hierarchicznego (FAHP) oraz metody TOPSIS. Proponowaną metodę TOPSIS przetestowano na aktualnych, dostępnych danych statystycznych Głównego Urzędu Statystycznego dotyczących emisji zanieczyszczeń powietrza w Polsce w 2018 roku.

2. Przedmiot badań

Przedmiotem badań były zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji Polskiej Klasyfikacji Działalności (PKD), których sumarycznie w Polsce w 2018 roku było 1886. Zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD to miejscowe źródła emisji zanieczyszczeń, z uwzględnieniem wszystkich zakładów charakteryzujących się największą w skali kraju emisją zanieczyszczeń powietrza, którą wyznaczono, bazując na wysokości opłat za emisję substancji zanieczyszczających powietrze w stosunku rocznym (*Ochrona środowiska 2019, 2019*). Obszary szczególnie uciążliwe dla powietrza według sekcji PKD, które stanowiły przedmiot badań, to:

- górnictwo i wydobywanie,
- przetwórstwo przemysłowe,
- wytwarzanie i zaopatrywanie w energię elektryczną, gaz, parę wodną i gorącą wodę,
- pozostałe sekcje (*Ochrona środowiska 2019, 2019*).

Wybór przedmiotu badań wynikał z faktu, że w analizach zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza według sekcji PKD uwzględniano dwutlenek węgla, który – jak wskazano w przeglądzie literatury – jest jednym z głównych gazów generujących efekt cieplarniany. Dodatkowo, w analizie zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza według sekcji PKD, zarówno wspomniany gaz CO₂, jak i pozostałe uwzględniane w analizie emisje, nie były oceniane pod względem szkodliwości. Oprócz tego, ze względu na potrzebę przetestowania proponowanej techniki, która ma za zadanie umożliwić analizę danych jakościowych i ilościowych, uznano, że problematyka analiz zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza jest adekwatna. Przykładowo, ze względu na potrzebę jednoczesnego przeanalizowania: czterech różnych zakładów, czterech wybranych niezależnych emisji, a także różnych wartości wielkości

wytwarzanych emisji. Dodatkowo wywnioskowano, że zasadne w ramach proponowanej techniki jest przeanalizowanie, który zakład, po uwzględnieniu zarówno wielkości emisji, jak i szkodliwości tych emisji, ma największy wpływ na zanieczyszczenie czystości powietrza (*Ochrona środowiska 2019*, 2019).

3. Metoda

Metodę stanowiła technika rozmytego analitycznego procesu hierarchicznego (ang. *fuzzy analytic hierarchy proces*, FAHP) (Chang, 1996; Saaty, 1987) oraz metoda TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution*). Zastosowanie tych metod przedstawiono przykładowo w artykułach takich autorów jak Łuczak i Wysocki (2011); Mir i Padma (2016, s. 4); Radionovs i Užga-Rebrovs (2016, s. 19); Horvathova, Copikova i Mokra (2019); Pacana i Siwec (2018); Pacana, Siwec i Bednarova (2020); Piantanakulchai i Saengkhaio (2003).

W artykule metodę FAHP wykorzystano do oceny szkodliwości typów emisji wytwarzanych przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD. Z kolei metodę TOPSIS zintegrowano z rzeczywistymi danymi z Głównego Urzędu Statystycznego (GUS). Motywacją do zastosowania zintegrowanej techniki FAHP oraz metody TOPSIS była możliwość jednoczesnego przeanalizowania niezależnych od siebie wielkości emisji wytwarzanych przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD, jak i uwzględnienia w analizie szkodliwości poszczególnych emisji. Dodatkowo, w ramach uwzględnienia szkodliwości emisji, która może być różna w zależności od kontekstu analizy, zasadne było wykorzystanie rozmytej skali Saaty'ego (stosowanej w FAHP), która uwzględnia subiektywność podmiotu dokonującego analizy (Chang i Dong, 2017; Shabir i Padma, 2016). Z kolei motywacją do wykorzystania w analizie danych z Głównego Urzędu Statystycznego był fakt, że jest to wiarygodne źródło danych dotyczących m.in. emisji zanieczyszczeń w Polsce, w których znajdują się aktualne dane statystyczne. Na ich podstawie możliwe było przeprowadzenie oceny ilości wytwarzanych emisji przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD.

Początkowym etapem jest sprecyzowanie celu analizy. W analizowanym przypadku celem było określenie, który z zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza według sekcji PKD, ma największy wpływ na zanieczyszczenie czystości powietrza przy jednoczesnym uwzględnieniu wielkości i szkodliwości wytwarzanych emisji.

Kolejno założono wybranie przedmiotu badań. W analizowanym przypadku były to sekcje zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza według PKD (Polska Klasyfikacja Działalności), które wyszczególniono w rozdziale dotyczącym przedmiotu badań niniejszej pracy.

Następnie przyjęto wybranie rodzajów emisji. W analizowanym przypadku emisje dobrano na podstawie zestawienia emisji zanieczyszczeń powietrza z zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza według sekcji PKD w 2018 roku. Emisjami tymi były (*Ochrona środowiska 2019*, 2019):

- emisja zanieczyszczeń pyłowych ogółem,
- emisja zanieczyszczeń gazowych, w tym dwutlenek siarki,
- emisja zanieczyszczeń gazowych, w tym tlenek węgla,
- emisja zanieczyszczeń gazowych, w tym dwutlenek węgla.

W następnym etapie dokonywana jest ocena szkodliwości wybranych do analizy emisji, czyli przyznanie ocen wszystkim rodzajom emisji w rozmytej skali Saaty'ego (tabela 1), przy czym ocena szkodliwości powinna być dokonana w zależności od charakteru prowadzonej analizy.

W ramach wiarygodnych i efektywnych analiz ocena szkodliwości wybranych do analizy emisji powinna być wynikiem eksperckim, lub w zależności od potrzeb, wynikiem oceny podmiotu stosującego proponowaną technikę. Ze względu na fakt, że przeprowadzana analiza miała charakter testowy, oceny szkodliwości poszczególnych kategorii emisji w kontekście zanieczyszczenia powietrza zostały dokonane w sposób subiektywny przez autorów artykułu.

Na podstawie sporządzonej tabeli porównań parami dotyczących szkodliwości emisji (jak przedstawiono w tabeli 4) przeprowadzono obliczenia zgodnie z techniką FAHP. Początkowo obliczane są wartości cechy syntetycznej (syntetycznego miernika rozwoju) (1–3) (Chang, 1996):

Tabela 1. Rozmyta dziewięciostopniowa skala preferencji między dwoma porównywanymi elementami

Opis rozmytej dziewięciostopniowej skali preferencji	Klasyczna skala Saaty'ego	Skala rozmyta bazująca na trójkątnych liczbach rozmytych	Odwrotność wartości ze skali rozmytej
Równie ważny	1	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Niewiele ważniejszy	3	(1, 3, 5)	(1/5, 1/3, 1)
Ważniejszy	5	(3, 5, 7)	(1/7, 1/5, 1/3)
Znacznie ważniejszy	7	(5, 7, 9)	(1/9, 1/7, 1/5)
Zdecydowanie ważniejszy	9	(7, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/7)

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Saaty (1987).

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (1)$$

gdzie,

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left(\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \quad (2)$$

oraz

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^m u_j}, \frac{1}{\sum_{j=1}^m m_j}, \frac{1}{\sum_{j=1}^m l_j} \right), \quad (3)$$

gdzie:

l_j – pierwsza z trzech trójkątnych liczb rozmytych w skali Saaty'ego dotycząca oceny emisji,

m_j – druga z trzech trójkątnych liczb rozmytych w skali Saaty'ego dotycząca oceny emisji,

u_j – trzecia z trzech trójkątnych liczb rozmytych w skali Saaty'ego dotycząca oceny emisji.

Następnie uporządkowano liniowo i sklasyfikowano obiekty według wartości cechy syntetycznej, a także obliczono stopień możliwości, że liczba rozmyta M_1 jest większa bądź równa liczbie rozmytej M_2 (4) (Chang, 1996):

$$V(M_1 \geq M_2) = hgt(M_1 \cap M_2) = \begin{cases} 1, & \text{dla } m_1 \geq m_2 \\ 0, & \text{dla } l_2 \geq u_1 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)}, & \text{inne.} \end{cases} \quad (4)$$

gdzie:

$M_1 = (l_j, m_j, u_j)$,

$M_2 = (l_j, m_j, u_j)$, będące dwiema liczbami rozmytymi.

Następnie porównano wartości minimalne, czyli następuje obliczenie wskaźników udziału, gdzie wartości porównywane stanowiły ogólny wynik analizowanych rodzajów szkodliwości emisji wytwarzanych przez sekcje zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza według sekcji PKD. Wartości globalne współczynników ważonych otrzymuje się przy tym przez

pomnożenie lokalnych współczynników ważonych przez współczynniki ważne dla poszczególnych kryteriów (emisji). Wówczas uzyskane wartości stanowią współczynniki ważne, które można zapisać za pomocą wektora W (Chang, 1996). Dodatkowo znormalizowano uzyskane wartości, tj. otrzymane wartości minimalne podzielono przez sumę tych wartości minimalnych. Suma wartości normalizowanych dla danego kryterium powinna być równa wartości 1. Na podstawie uzyskanych wartości możliwe jest utworzenie rankingu, gdzie wartość maksymalna to pozycja pierwsza

w rankingu, oznaczająca, że emisja ta jest najbardziej szkodliwą dla czystości powietrza.

Kolejno, istotne jest sprawdzenie, czy przyznane oceny poszczególnym rodzajom emisji szkodliwości zanieczyszczeń zostały przyznane w sposób konsekwentny, dlatego też sprawdzono, czy uzyskane wyniki nie naruszają zasady stałości preferencji. Dlatego też niezbędne jest obliczenie maksymalne wartości własnej macierzy porównań (λ_{max}) (5) wskaźników zgodności macierzy porównań CI (6) oraz CR (7) (Saaty, 1987):

$$\lambda_{max} = \frac{1}{w_i} \sum_{j=1}^k w_{ij} w_j \quad (5)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

$$CR = \frac{CI}{r} \quad (7)$$

gdzie:

λ_{max} – współczynnik niespójności,

n – liczba analizowanych przyczyn potencjalnych,

w_{ij} – wartość oceny,

w_j – wartość wagi,

r – średnia wartość indeksu losowego dla n według Saaty'ego (Saaty, 1987).

Jeżeli w rezultacie uzyskano $\lambda_{max} = n$, $CI = 0$, $CR = 0$, to przyjmuje się, że wyniki są w pełni zgodne. Także akceptowalne jest osiągnięcie λ_{max} bliskiego n , dla $CI < 0,1$ oraz $CR < 0,1$. Jeżeli nie osiągnięto pełnej lub akceptowalnej zgodności uzyskanych wyników, to proces należy powtórzyć od etapu przydzielania ocen. Po uzyskaniu pełnej lub akceptowalnej zgodności wyników możliwe jest zintegrowanie za pomocą metody TOPSIS uzyskanych wag z rzeczywistymi danymi pozyskanymi z GUS za rok 2018 (*Ochrona środowiska*, 2019). Celem tej integracji jest dokonanie oceny wielkości wytwarzanych emisji przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD za rok 2018.

Początkowo dokonuje się obliczenia wektora znormalizowanego i tworzy się tzw. przekształcenie normalizacyjne (8) (Hwang, Yoon, 1981):

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}} \quad (8)$$

gdzie:

x_{ij} – rzeczywiste wartości emisji zanieczyszczeń powietrza wytwarzanych przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD w 2018 roku.

Kolejno tworzy się ważoną macierz znormalizowaną, będącą ilorzem wartości wag znormalizowanych dla szkodliwości badanych emisji (które obliczono metodą FAHP) i wartości znormalizowanej macierzy poszczególnych emisji zanieczyszczeń powietrza wytwarzanych przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD w 2018 roku.

Następnie wyznaczany jest wzorec oraz tzw. antywzorec (Hwang i Yoon, 1981). Założono, że w ramach analizy emisji zanieczyszczeń powietrza wytwarzanych przez zakłady szczególnie uciążliwe dla powietrza według sekcji PKD, wzorcem będą wartości minimalne emisji zanieczyszczeń powietrza, z kolei antywzorcem – wartości maksymalne emisji zanieczyszczeń powietrza. Wówczas kolejno możliwe jest obliczenie odległości euklidesowej od wzorca oraz antywzorca oraz wyniku wydajności (9–11) (Hwang i Yoon, 1981):

$$S_i^+ = \left[\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^+)^2 \right]^{0,5} \quad (9)$$

$$S_i^- = \left[\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^-)^2 \right]^{0,5} \quad (10)$$

$$P_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (11)$$

gdzie:

P_i – wynik wydajności,

V_{ij} – wartość z ważonej macierzy znormalizowanej dla poszczególnych emisji zanieczyszczeń powietrza,

V_j^+ – wartość wzorca odpowiadająca danej emisji zanieczyszczeń powietrza wytwarzanej przez zakład szczególnie uciążliwy dla czystości powietrza według sekcji PKD,

V_j^- – wartość antywzorca odpowiadająca danej emisji zanieczyszczeń powietrza wytwarzanej przez zakład szczególnie uciążliwy dla czystości powietrza według sekcji PKD.

Na podstawie wyniku wydajności możliwe jest stworzenie rankingu zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza według sekcji PKD. Wartość maksymalna wyniku wydajności P_i oznacza przy tym zakład według sekcji PKD, mający największy wpływ na zanieczyszczenie czystości powietrza z jednoczesnym uwzględnieniem wielkości i szkodliwości wytwarzanych emisji.

4. Wyniki

Na podstawie aktualnych danych statystycznych z Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) (*Ochrona środowiska*, 2019) zestawiono emisje zanieczyszczeń w przypadku zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza według sekcji PKD w 2018 roku (tabela 2).

Tabela 2. Zestawienie emisji zanieczyszczeń powietrza – zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD w 2018 roku

Wyszczególnienie	Emisje zanieczyszczeń			
	pyłowe	gazowe		
	ogółem	w tym		
		dwutlenek siarki	tlenek węgla	dwutlenek węgla
w tysiącach ton				
Ogółem	31,8	217,3	327,4	213 214,2
Górnictwo i wydobywanie	1,3	1,3	1,2	796,3
Przetwórstwo przemysłowe	16,5	49,0	258,6	59 967,4
Wytwarzanie i zaopatrywanie w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę	12,8	164,3	61,8	149 624,9
Pozostałe sekcje	1,2	2,7	5,8	2 825,6

Źródło: opracowanie własne na podstawie: *Ochrona środowiska 2019 (2019)*.

W sposób subiektywny dokonano oceny szkodliwości wybranych do analizy emisji za pomocą rozmytej skali Saaty'ego bazującej na trójkątnych liczbach rozmytych (tabela 3).

Tabela 3. Ocena szkodliwości emisji za pomocą rozmytej skali Saaty'ego

Symbol kategorii emisji	Klasyczna skala Saaty'ego	Skala rozmyta bazująca na trójkątnych liczbach rozmytych	Opis ocen w skali Saaty'ego
Tlenek węgla	5	(3, 5, 7)	ważniejszy
Dwutlenek węgla	7	(5, 7, 9)	znacznie ważniejszy
Emisje zanieczyszczeń pyłowych	3	(1, 3, 5)	niewiele ważniejszy
Dwutlenek siarki	5	(3, 5, 7)	ważniejszy

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4 przedstawia macierz porównań emisji zanieczyszczeń powietrza parami szkodliwości emisji badanych typów

Tabela 4. Macierz porównań parami badanych typów emisji zanieczyszczeń powietrza

Macierz porównań parami emisji zakładów wg sekcji PDK	Tlenek węgla	Dwutlenek węgla	Emisje zanieczyszczeń pyłowych	Dwutlenek siarki
Tlenek węgla	1, 1, 1	1/7, 1/5, 1/3	3, 5, 7	1, 1, 1
Dwutlenek węgla	3, 5, 7	1, 1, 1	5, 7, 9	3, 5, 7
Emisje zanieczyszczeń pyłowych	1/7, 1/5, 1/3	1/9, 1/7, 1/5	1, 1, 1	1/7, 1/5, 1/3
Dwutlenek siarki	1, 1, 1	1/7, 1/5, 1/3	3, 5, 7	1, 1, 1

Źródło: opracowanie własne.

Z kolei tabela 5 przedstawia wyniki obliczeń z metodą FAHP cechy syntetycznej przeprowadzonych na podstawie ocen z macierzy porównań parami szkodliwości wytwarzanych emisji przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD.

Tabela 5. Wyniki obliczeń wartości cechy syntetycznej (syntetycznego miernika rozwoju) szkodliwości emisji wytwarzanych przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD

Rodzaj emisji wytwarzanej przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza wg sekcji PKD	$\sum_{j=1}^m l_j$	$\sum_{j=1}^m m_j$	$\sum_{j=1}^m u_j$	S1	S2	S3
Tlenek węgla	5,14	7,20	9,33	0,10	0,20	0,38
Dwutlenek węgla	12,00	18,00	24,00	0,24	0,49	0,98
Emisje zanieczyszczeń pyłowych	2,25	4,34	6,53	0,05	0,12	0,27
Dwutlenek siarki	5,14	7,20	9,33	0,10	0,20	0,38
$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$	24,54	36,74	49,20	-	-	-
$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1}$	0,02	0,03	0,04	-	-	-

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki z obliczonego stopnia możliwości, wartości minimalne i utworzony z nich wektor analizowanych rodzajów szkodliwości emisji wytwarzanych przez sekcje zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza według sekcji PKD przedstawia tabela 6.

Tabela 6. Wyniki obliczeń stopnia możliwości oraz wartości minimalne porównań szkodliwości emisji wytwarzanych przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD

Wyniki obliczeń stopnia możliwości		Wartości minimalne porównań parami	
tlenek węgla i dwutlenek węgla	0,32	minimalna wartość porównania tlenku węgla z pozostałymi szkodliwymi emisjami	$\min_1 = 0,32$
tlenek węgla i emisje zanieczyszczeń pyłowych	1,00		
tlenek węgla i dwutlenek siarki	1,00		
dwutlenek węgla i tlenek węgla	1,00	minimalna wartość porównania dwutlenku węgla z pozostałymi szkodliwymi emisjami	$\min_2 = 1,00$
dwutlenek węgla i emisje zanieczyszczeń pyłowych	1,00		
dwutlenek węgla i dwutlenek siarki	1,00		
emisje zanieczyszczeń pyłowych i tlenek węgla	0,68	minimalna wartość porównania emisji zanieczyszczeń pyłowych z pozostałymi szkodliwymi emisjami	$\min_3 = 0,68$
emisje zanieczyszczeń pyłowych i dwutlenek węgla	0,92		
emisje zanieczyszczeń pyłowych i dwutlenek siarki	0,68		
dwutlenek siarki i tlenek węgla	1,00	minimalna wartość porównania dwutlenku siarki z pozostałymi szkodliwymi emisjami	$\min_4 = 0,32$
dwutlenek siarki i dwutlenek węgla	0,32		
dwutlenek siarki i emisje zanieczyszczeń pyłowych	1,00		
W	0,32; 1,00; 0,68; 0,32		

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki znormalizowanych wartości współczynników ważonych oraz ranking analizowanych rodzajów szkodliwości emisji wytwarzanych przez sekcje zakła-

dów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza według sekcji PKD przedstawia tabela 7.

Tabela 7. Wyniki znormalizowanych wartości współczynników ważonych dla szkodliwości emisji wytwarzanych przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD

Rodzaj emisji wytwarzanej przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza wg sekcji PKD	Wartość znormalizowana	Ranking
Tlenek węgla	0,43	1
Dwutlenek węgla	0,14	3
Emisje zanieczyszczeń pyłowych	0,29	2
Dwutlenek siarki	0,14	3

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki wykazały, że tlenek węgla zajmuje pierwszą pozycję w rankingu z wagą równą 0,43. Kolejno są to emisje zanieczyszczeń pyłowych (waga 0,29), następnie dwutlenek węgla oraz dwutlenek siarki z wagą 0,14. Dodatkowo, zbadano zgodność macierzy porównań, uzyskując wartość wskaźnika $CR = 0$, co świadczy o zgodności macierzy porównań.

Kolejno przeprowadzono analizę za pomocą metody TOPSIS, która dotyczyła szkodliwości i wielkości emisji wytwarzanych przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD. Wyniki obliczonego wektora znormalizowanego oraz utworzone przekształcenie normalizacyjne przedstawia tabela 8.

Tabela 8. Wyniki obliczonego wektora znormalizowanego oraz utworzone przekształcenie normalizacyjne dla emisji zanieczyszczeń powietrza

Wartości wektora znormalizowanego emisji wytwarzanej przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza wg sekcji PKD	emisje zanieczyszczeń pyłowych	dwutlenek siarki	tlenek węgla	dwutlenek węgla
		20,96	171,48	265,95
Macierz znormalizowana wartości uzyskanych dla emisji zanieczyszczeń powietrza	emisje zanieczyszczeń pyłowych	dwutlenek siarki	tlenek węgla	dwutlenek węgla
Górnictwo i wydobywanie	0,06	0,01	0,00	0,00
Przetwórstwo przemysłowe	0,79	0,29	0,97	0,37
Wytwarzanie i zaopatrywanie w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę	0,61	0,96	0,23	0,93
Pozostałe sekcje	0,06	0,02	0,02	0,02

Źródło: opracowanie własne.

Ważną macierz znormalizowaną dla emisji zanieczyszczeń i odległości euklidesowe od wzorca (V_j^+) oraz antywzorca (V_j^-), a także ranking zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza według sekcji PKD przedstawia tabela 9.

Tabela 9. Wyniki obliczeń ważonej macierzy znormalizowanej oraz ranking zakładów szczególnie uciążliwych dla czystości powietrza według sekcji PKD

ważona macierz znormalizowana	wartości wag znormalizowanych dla szkodliwości badanych emisji (wagi uzyskane z FAHP)				P_i	Ranking
	emisje zanieczyszczeń pyłowych	dwutlenek siarki	tlenek węgla	dwutlenek węgla		
		0,29	0,14	0,43		
Górnictwo i wydobywanie	0,02	0,00	0,00	0,00	0,98	1
Przetwórstwo przemysłowe	0,23	0,04	0,42	0,05	0,77	3
Wytwarzanie i zaopatrywanie w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę	0,18	0,13	0,10	0,13	0,87	2
Pozostałe sekcje	0,02	0,00	0,01	0,00	0,98	1
(V_j^+)	0,06	0,01	0,00	0,00	–	–
(V_j^-)	0,79	0,96	0,97	0,93	–	–

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki z obliczeń techniką FAHP oraz metodą TOPSIS wykazały, że po jednoczesnym uwzględnieniu wielkości oraz szkodliwości emisji największy wpływ na zanieczyszczenie czystości powietrza mają zakłady według sekcji PKD, tj.: górnictwo i wydobywanie oraz pozostałe sekcje.

Należy jednak mieć na uwadze, że ocena szkodliwości badanych typów emisji zanieczyszczeń została przeprowadzona w sposób subiektywny, dlatego też uzyskane wyniki w zależności od przyznanych ocen szkodliwości mogą się różnić.

5. Dyskusja

Dodatkowo dokonano oceny wrażliwości wykorzystanej techniki FAHP i metody TOPSIS w ramach możliwości przeprowadzenia analizy emisji zanieczyszczeń uwzględniającej zarówno wielkość wytwarzanych emisji, jak i stopień ich szkodliwości, przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD w 2018 roku. W tym celu założono zmianę wartości wagi uzyskanej dla tlenku węgla z wartości 0,43 na wartość 0,12. Wówczas waga dla dwutlenku węgla oraz dwutlenku siarki wyniosła 0,24; z kolei dla emisji zanieczyszczeń pyłowych waga była równa 0,40. Po zmianie wartości wag dla poszczególnych emisji zanieczyszczeń możliwe było wywnioskowanie, że nadal największy wpływ na zanieczyszczenie czystości powietrza mają zakłady według sekcji PKD, tj.: „Górnictwo i wydobywanie oraz pozostałe sekcje” (miejsce pierwsze w rankingu, z wynikiem wydajności $P_i = 0,98$). W przypadku sekcji zakładu według PKD, tj.: „Przetwórstwo przemysłowe”, uzyskano wynik wydajności $P_i = 0,84$, a więc wartość ta wzrosła o 0,7. Dlatego też zakład ten uplasował się na drugim miejscu w rankingu. Z kolei dla sekcji zakładu według PKD, tj.: „Wytwarzanie i zaopatrywanie w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę”, uzyskano wynik wydajności mniejszy o 0,7 od poprzedniego, a więc $P_i = 0,80$. Dzięki temu zakład ten uplasował się na trzecim miejscu w rankingu. Dlatego też wywnioskowano, że zmiana wartości wag emisji zanieczyszczeń miała największy wpływ na zakłady według sekcji PKD tj.: „Wytwarzanie i zaopatrywanie w energię elektryczną, gaz, parę wodną, gorącą wodę” oraz „Przetwórstwo przemysłowe”. Zakłada się przeprowadzenie w kolejnych badaniach dalszych analiz, które będą prowadziły do określenia najbardziej istotnych emisji zanieczyszczeń wytwarzanych przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD.

6. Wnioski

Nieustannie zachodzące zmiany w emisji gazów cieplarnianych generują potrzebę analiz poszczególnych emisji z uwzględnieniem nie tylko wielkości ich produkcji, ale także ich szkodliwości. Przeprowadzanie tych analiz w efektywny sposób przyczynia

się do usprawnienia procesu decyzyjnego w ramach działań związanych z redukowaniem tych emisji. Dlatego też celem autorów artykułu było zaproponowanie wykorzystania techniki do analizy emisji zanieczyszczeń, która uwzględni jednocześnie wielkość oraz szkodliwość wytwarzanych emisji. Technika ta jest rozmyty analityczny proces hierarchiczny (ang. *fuzzy analytic hierarchy process*, FAHP) oraz metoda, w której dane dotyczące wielkości wytwarzanych emisji stanowiły punkt odniesienia do przeprowadzonych porównań. Z tego względu proponowaną technikę przetestowano na aktualnie najnowszych dostępnych danych statystycznych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) dotyczących emisji zanieczyszczeń powietrza w Polsce w 2018 roku. Celem przetestowania proponowanej techniki było określenie, który zakład, szczególnie uciążliwy dla czystości powietrza według sekcji PDK, ma największy wpływ na zanieczyszczenie czystości powietrza z jednoczesnym uwzględnieniem wielkości i szkodliwości wytwarzanych emisji.

Bazując na danych z GUS, dokonano subiektywnej oceny wielkości emisji wytwarzanych przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PDK, wykorzystując przy tym stosowaną w FAHP rozmytą skalę Saaty'ego. Z kolei wykorzystując metodę TOPSIS, zintegrowano uzyskane wagi z wartościami rzeczywistymi danych dotyczących zanieczyszczeń powietrza wytwarzanych przez zakłady szczególnie uciążliwe dla czystości powietrza według sekcji PKD. Zintegrowanie wielkości i szkodliwości emisji pozwoliło wskazać, który z analizowanych zakładów ma największy wpływ na zanieczyszczenie czystości powietrza. Był to zakład wg sekcji PKD, tj.: górnictwo i wydobywanie oraz pozostałe sekcje.

Wykazano, że za pomocą proponowanej techniki FAHP oraz metody TOPSIS możliwe jest dokonanie analizy emisji zanieczyszczeń uwzględniającej zarówno wielkość wytwarzanych emisji, jak i stopień ich szkodliwości. Dodatkowo, w ramach testu, wykazano, że możliwe było wskazanie zakładu według sekcji PKD, który najbardziej oddziałuje na zanieczyszczenie czystości powietrza z uwzględnieniem jednocześnie wielkości i szkodliwości wytwarzanych emisji. Ze względu na zastosowaną w proponowanej metodzie FAHP, rozmytą

skalę bazującą na trójkątnych liczbach rozmytych, możliwe było zredukowanie z natury problematycznej do oszacowania i jednoznacznego zdefiniowania szkodliwości emisji. Wyniki z tej analizy mogą być jednak różne, co wynika przede wszystkim z możliwości przyznania różnych ocen szkodliwości analizowanych emisji, aczkolwiek, mimo to, proponowana technika okazała się skuteczna w analizach emisji zanieczyszczeń. Dlatego też może stanowić efektywną technikę środowiskową do analizy różnego rodzaju emisji. Za jej pomocą możliwe jest podejmowanie adekwatnych działań w ramach ograniczania emisji, w tym dwutlenku węgla, którego redukcja, jak wskazano, jest aktualnym problemem na skalę globalną.

Bibliografia

- Adiaha, M.S., Buba, A.H., Tangban, E.E. i Okpoho, A.N. (2020). Mitigating Global Greenhouse Gas Emission: The Role of Trees as a Clean Mechanism For CO₂ Sequestration. *Journal Of Agricultural Sciences*, 15(1), 101–115. <http://doi.org/10.4038/jas.v15i1.8675>.
- Bukosa, B., Deutscher, N.M., Fisher, J.A., Kubistin, D., Paton-Walsh, C. i Griffith, D.W. (2019). Simultaneous shipborne measurements of CO₂, CH₄ and CO and their application to improving greenhouse-gas flux estimates in Australia. *Atmospheric Chemistry And Physics*, 19(10), 7055–7072. <https://doi.org/10.5194/acp-19-7055-2019>.
- Chang, D.-Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649–655.
- Chang, Y. i Dong, S. (2017). Study on post evaluation of high-speed railway based on FAHP and Matlab simulation calculation. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 24(6), 1749–1758. <https://doi.org/10.17559/TV-20170319012219>.
- Gerbelova, H., Ioakimidis, C. i Ferrao, P. (2011). A techno-economical study of the CO₂ capture in the energy sector in Portugal. *Energy Procedia*, 4, 1965–1972. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.077>.
- Horvathova, P., Copikova, A., i Mokra, K. (2019). Methodology proposal of the creation of competency models and competency model for the position of a sales manager in an industrial organisation using the AHP method and Saaty's method of determining weights. *Economic Research-Ekonomska Istrazivanja*, 32(1), 2594–2613. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2019.1653780>.
- Hwang, C.L. i Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: methods and applications: a state-of-the-art survey*. Springer.
- Khan, M.Z. i Khan, M.F. (2019). Application of ANFIS, ANN and fuzzy time series models to CO₂ emission from the energy sector and global temperature increase. *International Journal Of Climate Change Strategies And Management*, 11(5), 622–642. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-01-2019-0001>.
- Kusumadewi, T.V. i Limmeechokchai, B. (2017). CO₂ Mitigation in Residential Sector in Indonesia and Thailand: Potential of Renewable Energy and Energy Efficiency. *Energy Procedia*, 138, 955–960. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.086>.
- Liebermann, R., Breuer, L., Houska, T., Kraus, D., Moser, G. i Kraft, P. (2020). Simulating Long-Term Development of Greenhouse Gas Emissions, Plant Biomass, and Soil Moisture of a Temperate Grassland Ecosystem under Elevated Atmospheric CO₂. *Agronomy-basel*, 10(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010050>.
- Lin, J., Khanna, N., Liu, X. Teng, F. i Wang, X. (2019). China's Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: Future Trajectories and Mitigation Options and Potential. *Scientific Reports*, 9(16095). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52653-0>.
- Liu, X. (2013). A grey neural network and input-output combined forecasting model and its application in primary energy related CO₂ emissions estimation by sector in China. *Energy Procedia*, 36, 815–824. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.094>.
- Łuczak, A. i Wysocki, F. (2011). Porządkowanie liniowe obiektów z wykorzystaniem rozmytych metod AHP i TOPSIS. *Przegląd Statystyczny, LVIII* (1–2), 3–23.
- Mir, S. i Padma, T. (2016). Evaluation and prioritization of rice production practices and constraints under temperate climatic conditions using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP). *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(4), 1–13.
- Ochrona środowiska 2019* (2019). Analizy statystyczne. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa. Publikacja dostępna na stronie: stat.gov.pl (dostęp: 20.04.2020).
- Pacana, A., Siwiec, D., i Bednarova, L. (2020). Method of Choice: A Fluorescent Penetrant Taking into Account Sustainability Criteria. *Sustainability*, 12(14), 5854, 1–21. <https://doi.org/10.3390/su12145854>.
- Pacana, A. i Siwiec, D. (2018). Dobór maszyny z wykorzystaniem drzewa decyzyjnego i metody AHP. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie*, 131, 431–439. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2018.131.34>.
- Piantanakulchai, M. i Saengkhao, N. (2003). Evaluation of alternatives in transportation planning

- using multi-stakeholders multi-objectives AHP modelling. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 4(1–2), 1613–1628.
- Radionovs, A. i Užga-Rebrovs, O. (2016). Fuzzy Analytical Hierarchy Process for Ecological Risk Assessment. *Information Technology and Management Science*, 19(1), 16–22. <https://doi.org/10.1515/itms-2016-0005>.
- Ramandi, M.M. i Cheshme, B.G. (2018). Possess of locating the elementary schools using combined FAHP-Fuzzy logic in the GIS. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(1), 255–265. https://doi.org/10.15421/2018_210.
- Saaty, R.W. (1987). The analytic hierarchy process – what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).
- Shabir, A.M. i Padma, T. (2016). Evaluation and prioritization of rice production practices and constraints under temperate climatic conditions using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP). *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(4), 1–13.
- Stan środowiska w Polsce. Raport 2018* (2018). Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Inspekcja Ochrony Środowiska. Warszawa.
- Tian, C., Feng, G., Li, S. i Xu F. (2019). Scenario Analysis on Energy Consumption and CO₂ Emissions Reduction Potential in Building Heating Sector at Community Level. *Sustainability*, 11(19). <https://doi.org/10.3390/su11195392>.
- Tolis, A.I., Rentizelas, A.A. i Tatsiopoulos, I.P. (2010). Optimisation of electricity energy markets and assessment of CO₂ trading on their structure: A stochastic analysis of the Greek Power Sector. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2529–2546. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.012>.
- Uprety, S. i Cao, C. (2016). Radiometric Comparison of 1.6- μ m CO₂ Absorption Band of Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) TANSO-FTS with Suomi-NPP VIIRS SWIR Band. *Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology*, 33(7), 1443–1453. <https://doi.org/10.1175/JTECHD-15-0157.1>.
- Węgiel zabija. Analiza kosztów zdrowotnych emisji zanieczyszczeń z polskiego sektora energetycznego* (2013). Greenpeace.
- Wu, B. i Mu, C. (2019). Effects on Greenhouse Gas (CH₄, CO₂, N₂O) Emissions of Conversion from Over-Mature Forest to Secondary Forest and Korean Pine Plantation in Northeast China. *Forests*, 10(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/f10090788>.
- Zhang, B., Zhang, Y., Zhao, X. i Meng J. (2018). Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions in China 2012: Inventory and Supply Chain Analysis. *Earths Future*, 6(1), 103–116. <https://doi.org/10.1002/2017EF000707>.
- Zwoliński, Z. (2011). Globalne zmiany klimatu i ich implikacje dla rzeźby Polski. *Landform Analysis*, 15, 5–15.