

# Ocena uciążliwości geologiczno-górnich warunków eksploatacji węgla kamiennego i ich wpływ na koszty prac górnich

Eugeniusz Jacek Sobczyk<sup>1</sup>, Michał Kopacz<sup>1</sup>



E.J. Sobczyk

M. Kopacz

**Assessing geological and mining nuisance and its impact on the cost of exploitation in hard coal mines.** *Prz. Geol.*, 66: 177–184.

*Abstract.* This article presents the use of the multi-criterion Analytic Hierarchy Process (AHP) method to assess the nuisance of geological and mining conditions to the longwall mining operations in selected coal mines in Poland. For this purpose, a methodology has been developed to calculate the exploitation nuisance index WUe in the context of coal mining costs in individual longwalls. Components of the nuisance index include four sub-indicators: natural hazard index (UZN), index describing the seam parameters (UPZ), index describing the technical parameters (UT), and environmental impact index (UŚ).

The analysis showed a strong correlation between the level of nuisance to the exploitation and the operating costs of these longwalls. The design of the longwall schedule should therefore also take into account the nuisance arising from the geological and mining conditions of the operations. Selective mining management allows optimizing the costs of mining in underground mines using the longwall system. This knowledge can also be used to reduce the total operating costs of mines as a result of abandoning the accessing and mining works in longwalls, and parts and entire areas of mines, which could be permanently unprofitable. Finally, it should be added that underground mines currently do not employ this type of solution, which even more emphasizes the need to popularize this approach.

**Keywords:** hard coal mining, Hierarchical Problem Analysis, AHP, nuisance to the mining process conditions, costs of mining

Polskie górnictwo węgla kamiennego jest obecnie w bardzo trudnej sytuacji zarówno pod względem technicznych możliwości wydobywania, jak i ekonomicznym, co wynika w dużej mierze z niskich cen węgla na rynkach światowych i w związku z tym również na rynku krajowym. Nie można jednak nie zauważyć i bagatelizować faktu, że trudną sytuację finansową polskich przedsiębiorstw górnich znacznie pogłębiają wysokie koszty ich działania. To właśnie poziom kosztów pozyskania węgla oraz jego ceny stanowią dwa zasadnicze elementy efektywności polskich kopalń. Podczas gdy ceny węgla są, w pewnym sensie, pochodną cen na rynkach międzynarodowych i nie mogą być w dowolny sposób kształtowane przez zarządy kopalń i spółek węglowych, to koszty produkcji węgla stają się elementem troski zarządów. Nie jest to sprawą łatwą, zwłaszcza gdy proste metody ich redukcji zostały wyczerpane.

Na koszty wydobywania, a w konsekwencji na ocenę efektywności ekonomicznej zakładów górnich wpływają m.in. warunki geologiczne i górnice prowadzenia eksploatacji. Wszelkie parametry charakteryzujące złoża i mające wpływ na ograniczenia procesu wydobywania można określić jako uciążliwość procesu eksploatacji.

Warunki geologiczno-górnice to ogół czynników związanych z występowaniem, udostępnianiem i eksploatacją pokładów węgla kamiennego w złożu. Wynikają one z budowy geologicznej i struktury złoża, warunków hydrogeologicznych, gazowych, geotermicznych lub geotechnicznych. Część z nich może się zmieniać w miarę postępu prac wydobywczych zakładu górnego, a część jest związana z wpływem eksploatacji sąsiednich kopalń. Decydują one o bezpieczeństwie i ekonomicznej efektywności wydobywania oraz o stopniu wykorzystania zasobów.

Uwzględnienie w analizie wszystkich czynników mających wpływ na ograniczenie eksploatacji umożliwi skwantyfikowanie ryzyka eksploatacji wynikającego z uciążliwości warunków geologicznych i górnich oraz wskazanie ich wpływu na koszty wydobywania. Uciążliwość geologicznych i górnich warunków eksploatacji w kopalniach podziemnych jest określana przez czynniki naturalne i techniczne, które łącznie decydują o możliwości i sposobie prowadzenia eksploatacji, a także o bezpieczeństwie i ekonomicznej efektywności wydobywania oraz o stopniu wykorzystania zasobów. Trzeba przy tym pamiętać, że warunki geologiczno-górnice w kopalniach pogarszają się w miarę postępu działalności wydobywczej, co w podziemnej metodzie wydobywania i wobec występujących zagrożeń naturalnych zwiększa problemy techniczne i koszty wydobywania węgla.

Celem pracy jest ocena uciążliwości geologiczno-górnich warunków eksploatacji w 11 polskich kopalniach węgla kamiennego i oszacowanie ich wpływu na koszty eksploatacji.

## METODYKA BADAŃ

Ocena uciążliwości geologicznych i górnich warunków prowadzenia eksploatacji w kopalniach węgla kamiennego, w szczególności w ścianach eksploatacyjnych, jest bardzo złożonym i wielokryterialnym zagadnieniem. Jest ona uzależniona nie tylko od liczby ścian eksploatacyjnych w kopalniach i liczby analizowanych czynników, ale również od różnorodności ich cech oraz intensywności ich oddziaływania. Czynniki te mogą być określone nie tylko ilościowo, ale również jakościowo.

<sup>1</sup>Institut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, Polska Akademia Nauk, ul. J. Wybickiego 7A, 31-261 Kraków; jsobczyk@meeri.pl; kopacz@meeri.pl.

Charakterystyka uciążliwości warunków eksploatacji należy niewątpliwie do zadań systemowych, które wymagają zastosowania odpowiedniego narzędzia do opracowania modelu oceny całego procesu (np. ustalenia kryteriów oceny, wzajemnych zależności i ich intensywności).

W celu określenia uciążliwości warunków geologiczno-górnich i ich wpływu na koszty eksploatacji w 11 analizowanych kopalniach węgla kamiennego opracowano schemat postępowania, do utworzenia którego wykorzystano trzy metody badawcze:

- 1) matematyczną wielokryterialną metodę podejmowania decyzji AHP (*Analytic Hierarchy Process*), która wykorzystuje hierarchię do strukturalizacji problemu i znajduje zastosowanie w wielu różnych dziedzinach badań, w tym m.in.: marketingu (Wind, Saaty, 1980; Mark, 2001), energetyce (Pohekar, Ramachandran, 2004), medycynie (Liberatore, Nydick, 2008), inżynierii środowiska (Biedrawa, Sobczyk, 2010), a także w górnictwie (Sobczyk, 2008; Bascetin, 2009; Sobczyk i in., 2011);
- 2) statystyczną wielowymiarową analizę porównawczą;
- 3) analizę korelacji uciążliwości technicznej i kosztów ścian.

Wyróżniono następujące główne etapy prac:

- określenie modelu uciążliwości geologicznych i górniczych warunków prowadzenia eksploatacji;
- obliczenie wag (wycena priorytetów) poszczególnych kryteriów tworzących model uciążliwości eksploatacji;
- konstrukcja wskaźnika uciążliwości eksploatacji;
- porównawcza, statystyczna analiza wielowymiarowa;
- identyfikacja kosztów eksploatacji ścian węgla;
- analiza współwystępowania uciążliwości technicznych oraz wzrostu kosztów eksploatacji poszczególnych ścian, prowadzona metodą korelacji.

Dwa pierwsze etapy badań zostały zrealizowane z zastosowaniem metody AHP. Wyniki tych prac wykorzystano do realizacji trzeciego i czwartego etapu prac, stosując metody statystycznej analizy wielowymiarowej (SAW). Istotą piątego i szóstego etapu badań było wyodrębnienie kosztów eksploatacji ścian wyrobiska w układzie kosztów działalności kopalni oraz analiza ich związków z uciążliwością geologicznych i górniczych warunków eksploatacji. Tak opracowana metodyka posłużyła do obliczenia wskaźnika uciążliwości procesu eksploatacji (WUe), określającego wpływ uciążliwości na koszty przypisane do ścian. Interpretacja wskaźnika pokazuje, że im większa jest jego wartość, tym większy wpływ geologiczno-górnich warunków prowadzenia eksploatacji na wyniki ekonomiczne procesu wydobywania.

Analizą objęto 471 ścian wydobywczych w 11 polskich kopalniach węgla kamiennego, w tym 277 ścian, które były eksploatowane w latach 2011–2016 oraz 194 ścian, które mają być eksploatowane w latach 2017–2021. Jednak po wyeliminowaniu wyników obserwacji odstających lub zawierających błędy liczbę ścian poddanych analizie zredukowano do 190.

Ponieważ poprawność analizy i obiektywizm wyceny w dużej mierze zależą od doboru ekspertów, do współpracy zaproszono dużą grupę specjalistów, którą stanowili kierownicy i pracownicy 11 kopalni uczestniczących w badaniach, reprezentujący działy: Przygotowania Produkcji, Robót Górniczych, Wentylacji oraz Mierniczo-Geologiczny, a także pracownicy naukowcy z wyższych uczelni i innych

instytucji naukowych. Łącznie w badaniach uczestniczyło 50 osób.

### **Hierarchiczny model uciążliwości geologicznych i górniczych warunków eksploatacji węgla kamiennego**

Elementy hierarchicznego modelu uciążliwości geologiczno-górnich warunków eksploatacji ścian węgla kamiennego w 11 analizowanych kopalniach zostały wybrane we współpracy z kadrą inżyniersko-techniczną tych kopalni. Do jego budowy wykorzystano taki zestaw kryteriów (ryc. 1), na podstawie których możliwe było ocenienie poziomu uciążliwości warunków eksploatacji i ich wpływ na koszty wydobywania węgla. Model ten składał się z 5 poziomów. Na pierwszym poziomie umieszczono cel zadania, tj. uciążliwość warunków prowadzenia eksploatacji i jej wpływ na koszty wydobywania. Drugi poziom modelu był reprezentowany przez 4 główne grupy kryteriów, do których zaliczono kategorie uciążliwości:

- uciążliwość zagrożeń naturalnych (UZN);
- uciążliwość parametrów złoża (UPZ);
- uciążliwość techniczną (UT);
- uciążliwość środowiskową (UŚ).

Na trzecim poziomie modelu wprowadzono kryteria cząstkowe, stanowiące bardziej szczegółowe rozwinięcie grup kryteriów poziomu drugiego. Niektóre z kryteriów cząstkowych dodatkowo uszczegółowiono – poziom czwarty (ryc. 1). Każdej zmiennej przypisano miarę, która opisuje stopień oddziaływania na poszczególne ściany eksploatacyjne, będące wariantami modelu.

W kategorii uciążliwości zagrożeń naturalnych (UZN) uwzględniono w szczególności:

- zagrożenie metanowe, tj. metanonośność [ $\text{m}^3$  metanu/Mg czystej substancji węglowej] (UZN1);
- skłonność węgla do samozapalenia [ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ] (UZN2);
- zagrożenie wybuchem pyłu węglowego [klasa] (UZN3);
- zagrożenie wyrzutami gazów i skał [kategoria] (UZN4);
- zagrożenie tąpniętami w pokładzie [stopnie] (UZN5);
- zagrożenie wodne – dopływ wody do ściany [ $\text{m}^3/\text{min}$ ] (UZN6);
- zagrożenie klimatyczne – temperatura pierwotna górotworu [ $^{\circ}\text{C}$ ] (UZN7).

W kategorii uciążliwości parametrów złoża (UPZ) wydzielono 3 szczegółowe kryteria:

- parametry strukturalne złoża (UPZ1) – charakteryzowane przez następujące zmienne:
  - tektonika – wskaźnik zuskokowania [ $\text{m}/\text{m}^2$  powierzchni ściany] (UPZ1.1);
  - zaburzenia sedymentacyjne [skala od 1 = brak do 5 = b. duże] (UPZ1.2);
- parametry jakościowe pokładu (UPZ2) – uwzględniające następujące zmienne:
  - głębokość [m] (UPZ2.1);
  - grubość pokładu wraz z przerostami [m] (UPZ2.2);
  - przerosty [m] (UPZ2.3);
  - kąt nachylenia [stopnie] (UPZ2.4);
- parametry geomechaniczne pokładu (UPZ3) – określone przez następujące zmienne:
  - urabialność [klasa] (UPZ3.1);
  - warunki stropowe [klasa] (UPZ3.2);
  - warunki spągowe [klasa] (UPZ3.3).

W kategorii uciążliwości technicznych (UT) wzięto pod uwagę 3 kryteria cząstkowe:

- lokalizacja ściany (UT1) – określona przez:
  - długość dostawy i transportu [m] (UT1.1);
  - czas dojścia załogi do ściany [minuty] (UT1.2);
  - odległość od szybu wdechowego lub wydechowego [m] (UT1.3);
- parametry geometryczne ściany (UT2), w tym:
  - długość ściany [m] (UT2.1);
  - wybieg ściany [m] (UT2.2);
  - wysokość ściany [m] (UT2.3);
  - nachylenie poprzeczne [stopnie] (UT2.4);
  - nachylenie podłużne [stopnie] (UT2.5);
- interakcja ściany i górotworu (UT3), z podziałem na:
  - występowanie zaszłości eksploatacyjnych w otoczeniu ściany [skala od 1 = b. małe do 5 = b. duże] (UT3.1);
  - wpływ likwidacji zrobów na sąsiednie partie pokładów [skala od 1 = b. mały do 5 = b. duży] (UT3.2).

W grupie uciążliwości środowiskowych (UŚ) wydzielono 2 kryteria cząstkowe:

- ilość skały płonnej w urobku [Mg] (UŚ1);
- wpływ na powierzchnię, czyli osiadanie [mm] (UŚ2).

Na podstawie analizy składowych wektora wag czterech głównych grup kryteriów stwierdzono, że największy wpływ na warunki prowadzenia eksploatacji ma uciążliwość wynikająca z parametrów technicznych (0,52), w dalszej kolejności uciążliwość parametrów złoża (0,23) i uciążliwość zagrożeń naturalnych (0,21), a najmniejszy – uciążliwość środowiskowa (0,05).

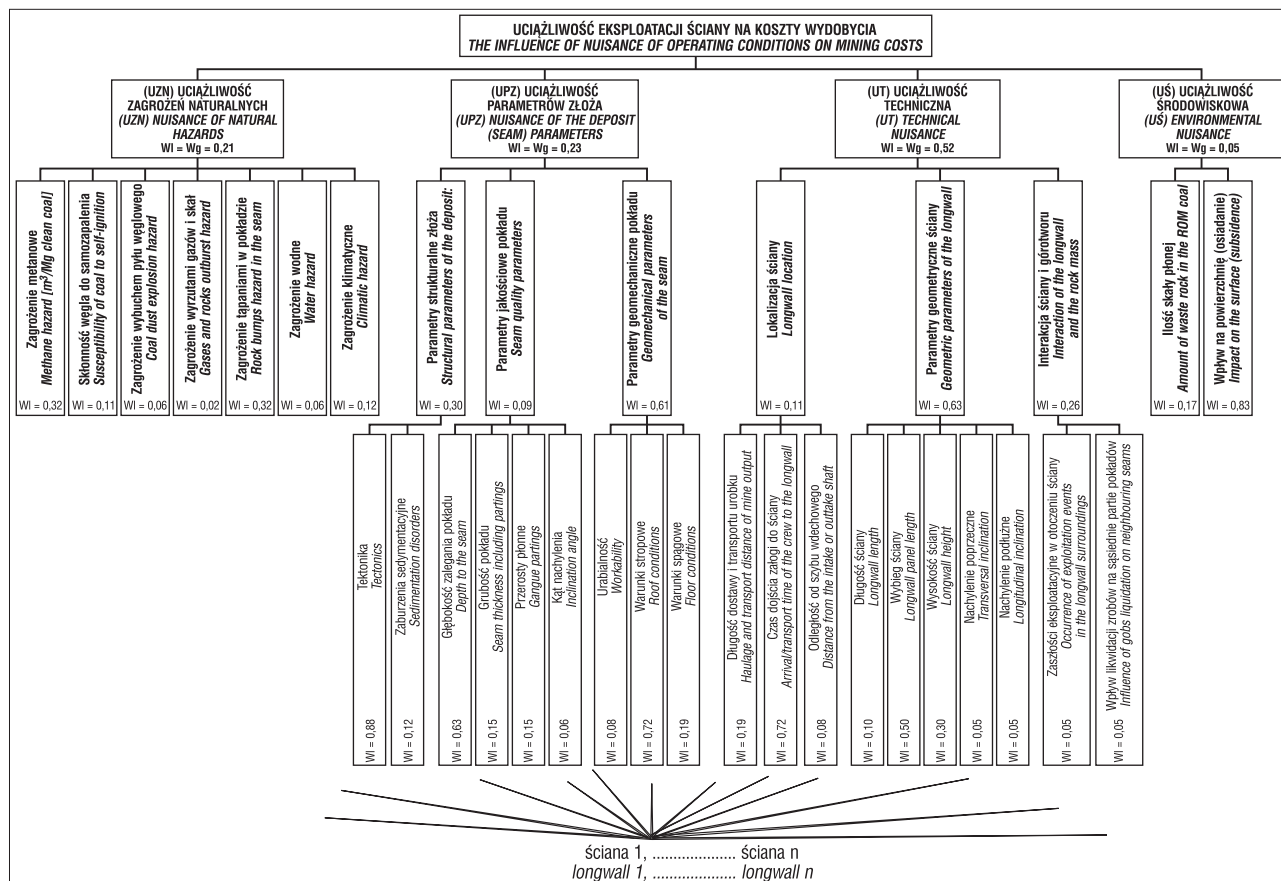
Spośród kryteriów charakteryzujących uciążliwość techniczną (UT) największy wpływ na jej poziom mają parametry geometryczne ściany (0,63). W mniejszym stopniu zależy ona od interakcji ściany i górotworu (0,26). A relatywnie najmniej istotna jest lokalizacja ściany w obszarze górniczym (0,11).

Na uciążliwość parametrów złoża (UPZ) największy wpływ mają parametry geomechaniczne pokładu (0,61), a przede wszystkim warunki stropowe, co ma bezpośrednie przełożenie na ilość skały płonnej w urobku. W mniejszym stopniu uciążliwość ta jest związana z parametrami strukturalnymi pokładu (0,30), wśród których największą rolę odgrywa tektonika. Natomiast parametry jakościowe pokładu mają najmniejsze znaczenie (0,09).

W przypadku uciążliwości zagrożeń naturalnych (UZN) największe znaczenie mają zagrożenie metanowe (0,32) oraz zagrożenie tąpnięciami (0,31). Natomiast zagrożenie wyrzutami gazów i skał (0,02) oraz zagrożenie wodne (0,06) i zagrożenie wybuchem pyłu węglowego (0,06) odgrywają mniejszą rolę.

O wpływie uciążliwości środowiskowej (UŚ) na wynik ekonomiczny decyduje przede wszystkim oddziaływanie eksploatacji na powierzchnię terenu, powodujące głównie jego osiadanie (0,83). Zdecydowanie mniejszą wagę (0,17) przypisano ilości skały płonnej w urobku.

Wagi przypisane poszczególnym kryteriom mają znaczenie lokalne, a pomnożone przez wagi odpowiedniego elementu poziomu wyższego są określane mianem wag globalnych na danym poziomie.



Ryc. 1. Model analizy uciążliwości geologicznych i górniczych warunków eksploatacji  
Fig. 1. Model of analysis of geological and mining nuisance

Wagi lokalne i globalne poszczególnych czynników oraz poziomów posłużyły do obliczenia wskaźnika uciążliwości eksploatacji (WUe). Jak już wspomniano, wskaźnik ten w sposób syntetyczny obrazuje uciążliwość geologicznych i górniczych warunków eksploatacji węgla kamiennego z poszczególnych ścian w kopalni.

## WYNIKI

### Rezultaty analizy uciążliwości warunków eksploatacji

Do oceny uciążliwości geologicznych i górniczych warunków eksploatacji węgla kamiennego wykorzystano miernik (WUe) utworzy według formuły agregatywnej, która jest powszechnie stosowana w wielowymiarowej statystycznej analizie porównawczej. Interpretacja wskaźnika pokazuje, że im większa jest jego wartość, tym większy jest wpływ niekorzystnych geologiczno-górniczych warunków prowadzenia eksploatacji węgla kamiennego na ekonomiczne wyniki tej działalności.

Uciążliwość warunków eksploatacji (WUe) określono za pomocą skali trzystopniowej, którą opracowano na podstawie statystyki pozycyjnej, z wykorzystaniem tzw. grup decylowych. Decyle to wartości (jest ich dziewięć), które dzielą uporządkowany szczegółowy szereg statystyczny na dziesięć części, mniej więcej równych co do liczebności. Pierwszy decyl to taka liczba, dla której 10% wartości jest od niej mniejszych, drugi decyl to taka liczba, dla której 20% wartości jest od niej mniejszych itd., aż do decyla dziewiątego, od którego jest mniejszych 90% wartości. Do utworzenia trzystopniowej skali uciążliwości wykorzystano decyl trzeci (30%) i decyl siódmy (70%). Wprowadzenie takiej skali umożliwiło podział wszystkich ścian w 11 kopalniach uczestniczących w badaniach na trzy podgrupy o zbliżonym poziomie uciążliwości warunków eksploatacji (tab. 1).

Średnie wartości wskaźników uciążliwości warunków eksploatacji węgla kamiennego w 11 analizowanych kopalniach, wyliczone dla lat 2011–2021, przedstawiono w tabeli 2.

Najwyższą średnią wartością wskaźnika uciążliwości eksploatacji (WUe = 16,41), która może odcisnąć piętno na ekonomicznej efektywności eksploatacji w latach 2011–2021, charakteryzuje się kopalnia nr 10. Na tak dużą wartość tego wskaźnika wpłynęły niekorzystne warunki złożowe oraz ograniczenia spowodowane zagrożeniami naturalnymi – najwyższy wśród 11 analizowanych kopalń wskaźnik uciążliwości warunków naturalnych (UZN = 13,0), a także bardzo wysoki wskaźnik określający niekorzystne parametry pokładów przewidzianych do eksploatacji (UPZ = 13,19). W kopalni tej aż 17 spośród 22 analizowanych ścian charakteryzowało się dużym wskaźnikiem uciążliwości warunków eksploatacji (WUe > 17,0), a jedynie dwie ściany małym (WUe < 14,0).

Drugie miejsce w rankingu kopalń węgla kamiennego o najbardziej uciążliwych warunkach eksploatacji zajęła kopalnia nr 2 (WUe = 16,35), która ma największy wskaźnik uciążliwości technicznych (UT = 32,43) i środowiskowych (UŚ = 13,88). Spośród 52 analizowanych ścian eksploatacyjnych aż 28 charakteryzuje się wysokim poziomem uciążliwości warunków eksploatacji (WUe > 17,0).

**Tab. 1.** Skala uciążliwości geologicznych i górniczych warunków eksploatacji w 11 analizowanych kopalniach węgla kamiennego

**Table 1.** The scale of geological and mining condition nuisance in the exploitation process

Poziom uciążliwości warunków eksploatacji <i>The nuisance level in the exploitation process</i>	WUe
niski / <i>low</i>	<14
średni / <i>medium</i>	14–17
wysoki / <i>high</i>	>17

WUe – wskaźnik uciążliwości warunków eksploatacji / *the nuisance index in the exploitation process*

**Tab. 2.** Średnie wartości wskaźników uciążliwości warunków eksploatacji (WUe, UZN, UT, UPZ, UŚ) w 11 analizowanych kopalniach węgla kamiennego w latach 2011–2021

**Table 2.** Mean values of operational nuisance indexes in the context of economic efficiency (WUe, UZN, UT, UPZ, UŚ) for the period 2011–2021

Kopalnia <i>Mine</i>	WUe	UZN	UT	UPZ	UŚ
10	16,41	13	23,68	13,19	6,58
2	16,35	6,79	32,43	6,48	13,88
5	15,91	11,1	26,38	10,42	5,13
4	15,5	11,54	26,17	9,57	2,65
3	14,97	9,66	20,43	14,23	9,54
7	14,94	7,49	26,3	10,3	5,01
6	14,85	9,72	26,45	8,16	4,86
11	14,24	2,73	25,84	11,47	9,08
8	13,96	4,88	24,17	11,14	7,39
9	13,69	3,98	22,32	12,28	10,91
1	12,88	6,49	23,2	7,43	8,14

UZN – uciążliwość zagrożeń naturalnych / *nuisance of natural hazards*

UT – uciążliwość techniczna / *technical nuisance*

UPZ – uciążliwość parametrów złoża / *nuisance of the deposit (seam) parameters*

UŚ – uciążliwość środowiskowa / *environmental nuisance*

Najmniejszą uciążliwość warunków eksploatacji stwierdzono w kopalni nr 1 (WUe = 12,88). Spośród 56 analizowanych ścian eksploatacyjnych tej kopalni aż 51 charakteryzuje się niskim poziomem uciążliwości warunków eksploatacji (WUe < 14,0). Podobnie niewielką uciążliwością warunków eksploatacji charakteryzują się kopalnie węgla 9 (WUe = 13,69), 8 (WUe = 13,96) i 11 (WUe = 14,24). Kopalnie te mają najniższe wskaźniki wynikające z niewielkich zagrożeń naturalnych oraz dobrych parametrów technicznych.

Wartości wskaźnika WUe umożliwiły liniowe uporządkowanie ścian eksploatacyjnych według poziomu uciążliwości procesu eksploatacji zarówno w okresie historycznym, jak i dla prognozy do roku 2021. Wskaźnik ten może i powinien być wykorzystywany do podejmowania decyzji o terminie eksploatacji poszczególnych ścian w kopalniach. Przykładowy harmonogram eksploatacji (biegu) ścian w kopalni nr 10, ustalony według oceny wpływu uciążliwości warunków eksploatacji na ekonomiczne efekty wydobywania, przedstawia tabela 3.

**Tab. 3.** Przykładowy harmonogram eksploatacji ścian w kopalni 10 wraz z oceną uciążliwości warunków eksploatacji  
**Table 3.** An example of a longwall schedule in Mine 10 with an assessment of the exploitation nuisance

Kopalnia 10 Mine 10		Wskaźnik uciążliwości eksploatacji ścian WUe w latach Longwall nuisance WUe in subsequent years of operation											Subwskaźniki WUe Sub-indicators WUe			
Pokład Seam	Ściana Longwall	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	UZN	UPZ	UŚ	UT
408/4	n102	18											10,7	16	5,1	27,4
405/2	i100	14,8	14,8	14,8									12,8	13,3	9,2	18,7
409/1	v100	17,4	17,4										12,1	13,4	3,7	27,6
504	q100		13,8	13,8									7,8	11,9	8,2	21
408/1	l101			17,5									11,1	14,6	2,2	27,6
408/4	n105			18,3	18,3								16,2	13,2	2,3	27,6
405/2	i101				17	17	17						14,9	13,9	8,3	23
408/4	n108					17,8	17,8						15,4	13,2	4,7	26,2
408/4	n100					15,8	15,8						13,2	11,8	6,4	23,1
416	x100						14	14	14				14,1	11,9	5	17,6
404/5	gc100						15,7	15,7					8,5	13,1	3,4	25,4
405/1	h100a							16,7	16,7				9,6	13,6	7,5	26,1
416	x103								15,6	15,6			14,1	12,1	5,6	21,9
405/2	i102								19,3	19,3			16,2	14,1	8,4	28,3
414/2	tb103									17,8			11,4	11,2	4,4	31
405/1	h100b									16,8	16,8		9,5	15	7,6	25,3
408/4	n107									16,7	16,7		15,3	13,3	10	22,1
408/4	n113										18,6		16,2	13,2	6,1	27,5
405/2	i103										19,9	19,9	16,6	14	8,5	29,7
418/1	śc1										15,1	15,1	9,6	12,9	6,2	22,6
416	x104											15,8	14,1	11	5,8	23,2
418/1	śc3											15,7	9,6	12,9	3,6	24,8
Wartości średnie Average values		16,4	14,8	15,8	17,3	17,1	16,2	14,8	16,6	17,5	18,2	15,9	13	13,2	6,6	23,7

Oznaczenie wskaźników wyjaśnia tab. 1 i 2 / For explanations see tab. 1 and 2

### Identyfikacja zależności pomiędzy wskaźnikiem uciążliwości eksploatacji a kosztami wydobycia węgla

Następny etap badań polegał na identyfikacji kosztów eksploatacji poszczególnych ścian w analizowanych kopalniach oraz obserwacji ich zależności od uciążliwości warunków eksploatacji w latach 2011–2016. Zależność ta była mierzona na podstawie analizy korelacji, choć owa analiza – z definicji – nie musi wskazywać na występowanie relacji przyczynowo-skutkowych (Iman, 1982).

Wyniki eksperymentalnych badań przeprowadzonych w 11 kopalniach węgla kamiennego potwierdzają jednak fakt, że pomiędzy kosztami eksploatacji ścian a wskaźnikiem uciążliwości warunków geologicznych i górniczych istnieje wyraźna zależność, która może być mierzona za pomocą współczynnika korelacji (IGSMiE, 2016). Niestety, istnieją jednak pewne trudności, uniemożliwiające systematyczną ewidencję kosztów w miejscach ich generowania w kopalniach węgla kamiennego. W szczególności dotyczy to ewidencji i rozliczania dekretów finansowych właściwych dla kilku obiektów rozliczeniowych, obiektów ruchomych w kopalniach czy też kosztów wspólnych, rozliczanych kluczami podziałowymi (Sierpińska i in., 2007;

Turek i in., 2013). Problem ten można częściowo zredukować, analizując wybrane grupy kosztów bezpośrednich, w zakresie których jest ewidencjonowane gro najistotniejszych kosztów związanych z udostępnieniem rejonu ścian, wykonawstwem wyrobisk korytarzowych i prac przygotowawczych, eksploatacją ścian czy też robotami zbrojenowymi i likwidacją wyrobisk. Taki właśnie tok postępowania przyjęto w przeprowadzonych analizach.

Badanie zależności kosztów wydobycia węgla od wskaźników uciążliwości warunków eksploatacji bazuje na hipotezie, że związek taki istnieje i może być potwierdzony wynikami analizy korelacji, co daje podstawy do określenia siły i kierunku tej zależności. Gawlik (2008) zwraca uwagę, że istnieje możliwość powiązania (przy niskim wskaźniku determinacji R<sup>2</sup>) wybranych grup kosztów rodzajowych w kopalniach podziemnych z poziomem ich produkcji. Stosując regresję liniową, można zatem powiązać koszty całkowite i produkcji w określonej funkcji matematycznej i określić współczynnik korelacji, będący pierwiastkiem wskaźnika determinacji R<sup>2</sup>. Również Labys (1999) wskazuje na to, że wielkość zasobów, grubość pokładów, głębokość zalegania, warunki stropowe czy ilość skały płonnej mają wpływ na koszty pozyskiwania kopaliny. Choć twierdzi on, opierając się również na badaniach innych, że modelowanie tego zjawiska za pomocą

funkcji produktywności jest problemem skomplikowanym i wieloaspektowym. Zdaniem Rodrigueza i Ariasa (2008) istotny wpływ na efektywność działalności górniczej mają w szczególności wielkość zasobów i ich szczyptywalność (przy czym negatywne skutki szczyptywalności mogą być równoważone przez postęp techniczny).

Liniiowy związek uciążliwości warunków eksploatacji i kosztów wydobywania węgla z poszczególnych ścian analizowano na podstawie wskaźnika korelacji  $r$ -Pearsona, wyliczonego wg formuły klasycznej (Miller, 2012).

Do analizy związku kosztów wydobywania z uciążliwością warunków geologicznych i górniczych wybrano wskaźnik uciążliwości technicznej (UT), który w większości przypadków wykazywał najlepszą korelację z jednostkowymi kosztami operacyjnymi ścian i reprezentował ponad 50% informacji uwzględnionej w zagregowanym wskaźniku uciążliwości (WUe).

Wyliczenie kosztów eksploatacji poszczególnych ścian wymagało przyjęcia określonego sposobu postępowania w całym cyklu życia przodka ścianowego – w szczególności identyfikacji kosztów procesów bezpośrednio związanych z eksploatacją węgla (Kustra, 2013). Stąd też koszty przypisane do ścian nie obejmują kosztów stałej infrastruktury kopalni, a jedynie koszty związane z działalnością górniczą w rejonie danej ściany, w szczególności:

- koszty robót przygotowawczych i udostępniających;
- koszty robót eksploatacyjnych i kierowania stropem;
- koszty wyposażenia, utrzymania i likwidacji wyrobisk;
- pozostałe koszty, obejmujące profilaktykę, dozór, łączność, przewietrzanie, BHP, transport i dostawy.

W każdej z analizowanych kopalń układ ewidencji kosztów był taki sam i pochodził z tego samego systemu kontrolnego, co umożliwiło ich wzajemne porównywanie i stosowanie tej samej metody analizy. W sumarycznym rachunku kosztów eksploatacji w rejonach ścian uwzględniono wszystkie miejsca pracy przynależne poszczególnym ścianom. Włączenie do obliczeń narzutu kosztów pozostałych procesów wydobywczych oraz utrzymania infrastruktury kopalni spowodowałoby rozmycie wyrazi-

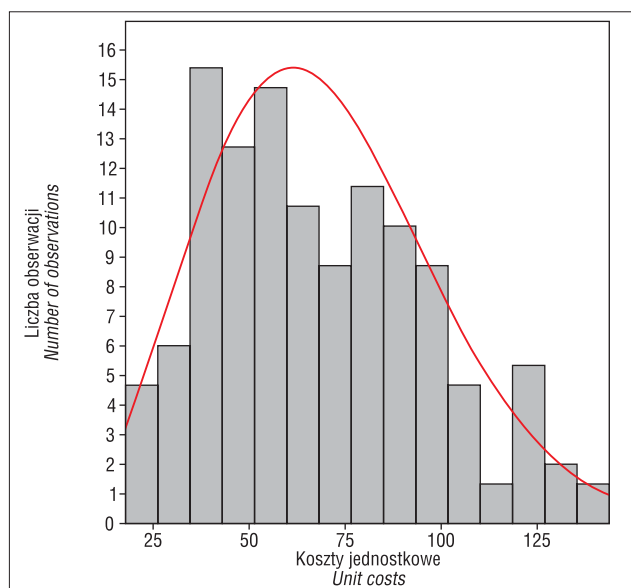
stości zależności kosztów eksploatacji od uciążliwości warunków jej prowadzenia.

Dane kosztowe poddano weryfikacji pod kątem ich kompletności oraz spójności. Wylimitowano obserwacje odstające, zawierające możliwe błędy, które powstały na etapie ich identyfikacji, estymacji wyników pomiarów lub ich rejestracji i archiwizowania. Ostatecznie liczbę ścian poddanych analizie zredukowano do 190 (69% wszystkich ścian, które zakończyły bieg do końca 2016 r.). Analizy wykonano dla kosztów gotówkowych, tj. z pominięciem amortyzacji kosztów rodzajowych, po przeliczeniu ich na ilość wydobytego węgla, co umożliwiło powiązanie kosztów z oszacowanym tonażem surowego węgla, który pozyskano z poszczególnych ścian.

### Ocena oddziaływania uciążliwości technicznej na koszty eksploatacji

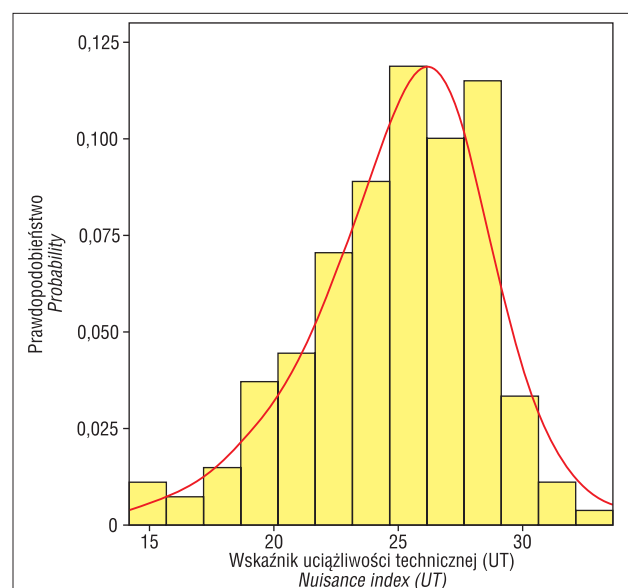
Rozkład jednostkowych kosztów eksploatacji ścian w 11 badanych kopalniach węgla kamiennego oraz wskaźnika uciążliwości technicznej (UT) przedstawiono na rycinach 2 i 3. Minimalne koszty eksploatacji węgla kamiennego wynosiły 18,5 zł/Mg, a maksymalne 151,7 zł/Mg, przy średnich kosztach 69,3 zł/Mg. Rozkład ten cechuje prawostronna asymetria, kurtoza (2,76) i współczynnik zmienności 0,42. W rozkładzie wskaźnika uciążliwości technicznej UT eksploatacji ścian średnia wartość wynosi 25,13, minimalna – 15,3, a maksymalna – 34,5. W rozkładzie tym jest widoczna lewostronna asymetria (–0,3) oraz kurtoza (3,76). Współczynnik zmienności wynosi 0,15. Wartości przedstawionych statystyk opisowych wskazują, że mamy do czynienia z rozkładami odbiegającymi od rozkładu normalnego

Na rycinie 4, ilustrującej zmienność wskaźnika UT oraz przebieg krzywych kosztów eksploatacji wszystkich analizowanych 190 ścian, widać zgodność trendów analizowanych zmiennych, przy czym siła korelacji jest różna. Istnieje przeciętna dodatnia zależność korelacyjna (+0,64) jednostkowych kosztów w fazie zbrojenia, eksploatacji i likwidacji ścian od uciążliwości technicznej tych działań.



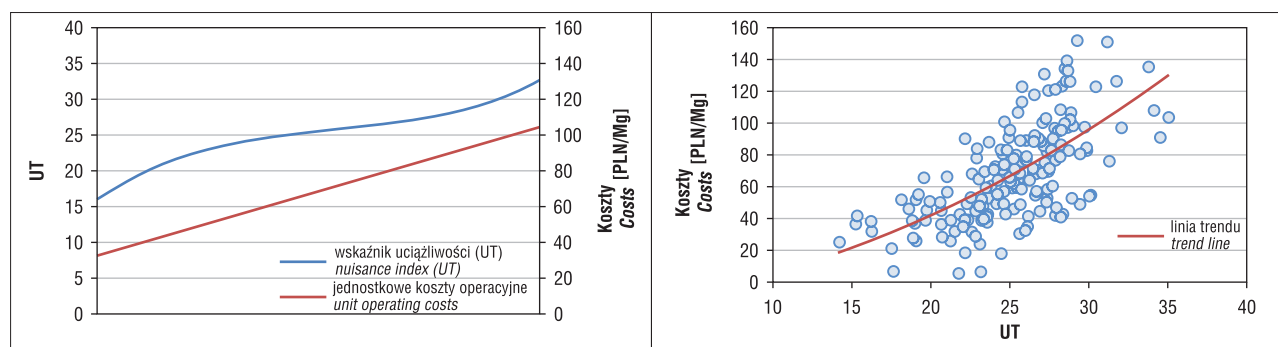
**Ryc. 2.** Rozkład jednostkowych kosztów eksploatacji ścian [zł/Mg]

**Fig. 2.** Distribution of unit costs of the analysed longwalls [zł/Mg]



**Ryc. 3.** Rozkład wskaźnika uciążliwości technicznej (UT) eksploatacji ścian

**Fig. 3.** Distribution of nuisance index (UT) of the analysed longwalls



**Ryc. 4.** Zmienność wskaźnika uciążliwości technicznej (UT) na tle jednostkowych kosztów eksploatacji analizowanych ścian węgla  
**Fig. 4.** Variability of the nuisance index (UT) against the unit operating costs of the analysed longwalls

**Tab. 4.** Współczynniki korelacji r-Pearsona kosztów eksploatacji i wskaźnika uciążliwości technicznej (UT)  
**Table 4.** r-Pearson correlation coefficients calculated based on analysed longwalls in individual mines

Kopalnia / Mine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Współczynnik korelacji r-Pearsona <i>r-Pearson coefficient</i>	0,73	0,68	0,78	0,77	0,63	0,68	0,79	0,66	0,77	0,71	0,59
Liczba ścian eksploatacyjnych <i>Number of longwalls</i>	24	17	20	15	15	17	12	27	22	10	11
Wartość prawdopodobieństwa testowego (p-value) <i>Value of the test probability (p-value)</i>	0,001	0,003	0	0,001	0,012	0,003	0,002	0	0	0,023	0,053

**Tab. 5.** Średnie koszty eksploatacji ścian w analizowanych kopalniach węgla kamiennego [zł/Mg] na tle uciążliwości technicznej (UT)  
**Table 5.** The average costs of longwalls in analysed mines [zł/Mg]

UT	Kopalnia / Mine										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<23	36	28,7	45,3	83,7	n/a	40,2	n/a	45,9	40,5	39,8	32,3
23–28	58,9	43,9	76,2	94,8	84,2	60,8	75,6	65,3	72,3	63,9	57,5
>28	n/a	58,8	82	124,8	117,3	92,2	116,4	90,4	139,3	n/a	62,5

n/a – brak ścian o takim poziomie uciążliwości / no reference number for calculation

Im większa była techniczna uciążliwość warunków eksploatacji (UT), tym wyższe były gotówkowe koszty eksploatacji ścian.

Wartości obliczonych współczynników korelacji r-Pearsona zestawiano w tabeli 4. Wobec 10 kopalń wyniki analizy potwierdziły statystyczną istotność skalkulowanych wskaźników korelacji na poziomie 0,05 (p-value niższa od 0,05 daje podstawę odrzucenia hipotezy zerowej o braku korelacji pomiędzy zmiennymi). Wyjątek stanowiła kopalnia 11.

Zgodnie ze skalą proponowaną przez Sobczyka (2006), korelacje te można zaliczyć do silnych, natomiast stosując skalę użytą przez Herkenhoff i Fogli (2013) nawet do bardzo silnych. Według Gawlik (2008) taki poziom istotności korelacji kosztów wydobycia węgla kamiennego ze wskaźnikiem uciążliwości technicznych jest znaczący.

Wykazanie silnych związków korelacyjnych daje podstawę formułowania wniosków o faktycznej zależności kosztów eksploatacji ścian od uciążliwości warunków geologicznych i górniczych, co wydaje się być uzasadnione i zgodne z intuicją. Interesująco przedstawia się też zależność średnich kosztów eksploatacji ścian w funkcji uciążliwości warunków geologicznych i górniczych mierzonych wskaźnikiem UT.

W celu określenia poziomów technicznej uciążliwości eksploatacji UT, postąpiono podobnie jak w przypadku

uciążliwości WUe, to znaczy wprowadzono trzystopniową skalę uciążliwości, opracowaną na podstawie statystyki pozycyjnej z zastosowaniem tzw. grup decylowych, przyjmując, że:

- poziom niski –  $UT < 23$ ;
- poziom średni –  $23 < UT < 28$ ;
- poziom wysoki –  $UT > 28$ .

Średnie koszty wydobycia węgla ze ścian o ustalonym poziomie technicznych uciążliwości eksploatacji zestawiono w tabeli 5, natomiast średnie wartości minimalne, średnie i maksymalne tych kosztów w tabeli 6. Można zauważyć, że zróżnicowanie kosztów w tych samych przedziałach uciążliwości jest stosunkowo duże. W klasie  $UT < 23$  średnia wartość minimalna kosztów wyniosła 28,7 zł/Mg,

**Tab. 6.** Koszty eksploatacji ścian w warunkach uciążliwości UT  
**Table 6.** The range of costs of analysed longwalls divided into three groups of technical nuisance UT

UT	Koszt minimalny <i>Minimum cost</i> [zł/Mg]	Koszt maksymalny <i>Maximum cost</i> [zł/Mg]	Koszt średni <i>Average cost</i> [zł/Mg]
<23	28,7	83,7	43,6
23–28	43,9	94,8	68,5
>28	58,8	139,3	98,2

**Tab. 7.** Różnice w średnich kosztach eksploatacji ścian w analizowanych kopalniach [zł/Mg] w przedziałach uciążliwości technicznej (UT)  
**Table 7.** Differences in average costs of longwalls in analysed mines

UT	Kopalnia / Mine										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
23–28	22,8	20,6	15,2	30,9	19,4	n/a	11	24,1	31,8	n/a	25,2
>28	n/a	31,3	14,9	5,8	25,1	40,8	30	n/a	67,1	33,1	5

n/a – brak ścian o takim poziomie uciążliwości / no reference number for calculation

**Tab. 8.** Zestawienie różnic średnich kosztów eksploatacji ścian w 11 badanych kopalniach [zł/Mg] w relacji do uciążliwości technicznej (UT)

**Table 8.** The range of differences in costs of analysed longwalls in relation to technical nuisance (UT)

UT	Różnice w średnich kosztach eksploatacji Differences in average operations cost		
	minimalne minimum	maksymalne maximum	średnie average
23–28	11	31,8	22,3
>28	5	67,1	28,1

a wartość maksymalna 83,7 zł/Mg, przy średniej 43,6 zł/Mg. W klasie uciążliwości pomiędzy 23 a 28 średni koszt wydobycia wyniósł 68,5 zł/Mg, minimalny – 43,9 zł/Mg, a maksymalny – 94,8 zł/Mg. W najwyższej klasie uciążliwości (>28) najwyższy koszt wynosił 139,3 zł/Mg, minimalny – 58,8 zł/Mg, przy średnim – 98,2 zł/Mg.

Na podstawie zgromadzonych danych można stwierdzić, że poziom średnich kosztów istotnie redukuje się w niższych klasach uciążliwości technicznych (tab. 7 i 8). Dla wartości wskaźnika uciążliwości UT w przedziale 23–28 średnie koszty eksploatacji ścian są wyższe względem klasy <23 o 22,3 zł w przeliczeniu na 1 Mg urobku węglowego, co oznacza zmianę rzędu 32,5%. Natomiast o blisko 28,6% wyższe są koszty dla klasy uciążliwości UT powyżej 28 w stosunku do klasy 23–28. Przejście pomiędzy tymi klasami skutkuje zmianą kosztów średnio o 28,1 zł/Mg.

## WNIOSKI

Rezultaty analizy wpływu warunków geologicznych i górniczych na koszty eksploatacji upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

1) uciążliwość geologicznych i górniczych warunków eksploatacji jest istotnym barometrem prognostycznym kosztów przyszłej eksploatacji. Ściany charakteryzujące się większą uciążliwością warunków eksploatacji będą generować wyższe koszty operacyjne. Skwantyfikowana maksymalna średnia różnica w kosztach wydobycia węgla może wynosić nawet 50,4 zł/Mg;

2) istnieje duże prawdopodobieństwo, że ściany charakteryzujące się dużą uciążliwością warunków eksploatacji, jako nieefektywne ekonomicznie będą generować finansowe straty kopalni. Ich wybieranie, konieczne z uwagi na uwarunkowania techniczne i górnicze, winno być przewidziane na okresy sprzyjających cen węgla;

3) wskaźnik uciążliwości warunków eksploatacji (WUe) może być wykorzystywany jako element podejmowania decyzji o kolejności i czasie eksploatacji poszczególnych ścian.

Selektywne zarządzanie wydobyciem umożliwia optymalizację kosztów wydobycia w kopalniach podziemnych

stosujących system ścianowy. Wiedza ta może być wykorzystana również do obniżenia całkowitych kosztów operacyjnych kopalń wskutek zaniechania udostępniania i eksploatacji ścian, partii i całych rejonów, które mogą być trwale nierentowne. Na koniec należy dodać, że w kopalniach podziemnych nie stosuje się tego typu rozwiązań, co tym bardziej wskazuje na potrzebę popularyzacji tego podejścia.

Składamy serdeczne podziękowania recenzentom: Prof. Elżbiecie Pietrzyk-Sokulskiej i Prof. Mariuszowi Krzakowi za dyskusje i cenne merytoryczne uwagi, umożliwiające udoskonalenie treści artykułu. Badania zostały sfinansowane ze środków przeznaczonych na działalność naukowo-badawczą IGSMiE PAN.

## LITERATURA

- BASCETIN A. 2009 – The study of decision making tools for equipment selection in mining engineering operations. *Gosp. Sur. Miner.*, 25 (3): 37–56.
- BIEDRAWA A., SOBCZYK W. 2010 – AHP – komputerowe wspomaganie podejmowania złożonych decyzji. *Rocz. Nauk. Uniw. Rzesz. Edukacja – Technika – Informatyka*, 1: 285–292.
- GAWLIK L. 2008 – Wpływ poziomu wydobycia węgla kamiennego na koszty jego pozyskania w kopalniach. *Stud., Rozpr. Monogr.*, 148.
- HERKENHOFF L., FOGLI J. 2013 – *Applied Statistics for Business and Management using Microsoft Excel*. Springer Science+Business Media, New York, US.
- IGSMiE PAN, 2016 – Strategia wychodzenia JSW SA z kryzysu z uwzględnieniem uciążliwości warunków geologiczno-górniczych w perspektywie roku 2021. Raport. Arch. IGSMiE PAN, Kraków.
- IMAN R.L., CONOVER W.J. 1982 – A distribution-free approach to inducing rank correlation among input variables. *Communications in Statistics – Simulation and Computation*, 11 (3): 311–334.
- KUSTRA A. 2013 – Zarządzanie kosztami w cyklu życia projektu geologiczno-górniczego. *Wyd. AGH, Rozpr. Monogr.*, 278.
- LABYS W.C. 1999 – *Modeling mineral and energy markets*. Springer Science+Business Media, New York, US.
- LIBERATORE M.J., NYDICK R.L. 2008 – The analytic hierarchy process in medical and health. *European J. Operational Res.*, 189: 194–207.
- MARK D. 2001 – Adaptive AHP: a review of marketing applications with extensions. *European J. Marketing*, 35 (7/8): 872–894.
- MILLER M.B. 2012 – *Mathematics and Statistics for Financial Risk Management*. John Wiley&Sons, Hoboken, New Jersey, Canada.
- POHEKAR S.D., RAMACHANDRAN M. 2004 – Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – a review. *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 8: 365–381.
- RODRIQUES X.A., ARIAS C. 2008 – The effects of resource depletion on coal mining productivity. *Energy Economics*, 30: 397–408.
- SIERPIŃSKA M. (red.) 2007 – Wykorzystanie nowoczesnych koncepcji wspomaganie decyzji dla poprawy efektywności zarządzania zakładem górnym i spółką węglową. ART-TEKST, Kraków.
- SOBCZYK M. 2006 – *Statystyka aspekty praktyczne i teoretyczne*. UMC, Lublin.
- SOBCZYK E.J. 2008 – Analytic Hierarchy Process (AHP) and Multivariate Statistical Analysis (MSA) in Evaluating Mining Difficulties in Coal Mines. 21st World Mining Congress – New Challenges and Visions for Mining. Kraków. Taylor&Francis Group, A Balkema Book, London.
- SOBCZYK E.J., WOTA A., KRĘŻOLEK S. 2011 – The application of mathematical multi-criteria methods for choosing the optimal alternative for hard coal acquisition. *Gosp. Sur. Miner.*, 27 (3): 51–69.
- TUREK M. (red.) 2013 – Analiza i ocena kosztów w górnictwie węgla kamiennego w Polsce w aspekcie poprawy efektywności wydobycia. Difin, Warszawa.
- WIND Y., SAATY T.L. 1980 – Marketing applications of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science*, 26 (7): 641–658.