

Adam Sojda

Politechnika Śląska
Wydział Organizacji i Zarządzania
Instytut Ekonomii i Informatyki
adam.sojda@polsl.pl

Maciej Wolny

Politechnika Śląska
Wydział Organizacji i Zarządzania
Instytut Ekonomii i Informatyki
Maciej.Wolny@polsl.pl

ZASTOSOWANIE METODY AHP W OCENIE PROJEKTÓW INWESTYCYJNYCH KOPALNI WĘGLA KAMIENNEGO*

Streszczenie: Praca dotyczy zastosowania metody AHP do oceny projektów inwestycyjnych (ścianowych) w kopalni węgla kamiennego. Analizowany jest problem oceny i uporządkowania dziewięciu inwestycji, które są poddane ocenie względem wielu kryteriów, w kolejnych fazach cyklu życia inwestycji: robót przygotowawczych, eksploatacji oraz likwidacji. Rozważane kryteria, poza jednym odnoszącym się do występujących zagrożeń, mają charakter ilościowy i są związane z szeroko rozumianymi kosztami w odniesieniu do wielkości produkcji (złoża, oczekiwanego urobku). Końcowy ranking inwestycji porównano z rankingiem wynikającym z analizy jednokryterialnej na podstawie wskaźnika kosztów jednostkowych (koszty całkowite w stosunku do wielkości złoża). Różnice w ocenie projektów wynikają z uwzględnienia w sposób jawny kryterium związanego z zagrożeniami. Rozważania zaprezentowane w pracy prowadzą do wniosków, że metoda AHP może mieć szczególnie utylitarny charakter w tego typu problemach przy określaniu znaczenia kryteriów oraz umożliwia explicite wprowadzenie kryteriów o charakterze jakościowym do oceny inwestycji ścianowych.

Słowa kluczowe: AHP, ocena inwestycji, kopalnia węgla kamiennego.

* Praca powstała w ramach realizacji projektu badawczego nr N N524 341640 „Metoda wyznaczania wartości kopalni węgla kamiennego” finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

Wprowadzenie

Podstawowym celem pracy jest prezentacja, na przykładzie możliwości porównania i uszeregowania, inwestycji ścianowych w kopalniach węgla kamiennego z wykorzystaniem metody AHP (Analytic Hierarchy Process). Analiza skupia się na cyklu życia ściany, czyli porównania w fazach: przygotowania, eksploatacji, likwidacji oraz możliwości uwzględnienia kryteriów jakościowych. Pierwsza część pracy ma charakter wprowadzający, natomiast w drugiej części przedstawiono szczegółowo proponowaną metodę oraz specyfikę poruszanego zagadnienia wraz z cząstkowymi wynikami analiz w odniesieniu do oceny dziewięciu inwestycji ścianowych w kopalniach należących do Kompani Węglowej S.A. W ostatniej części pracy przedstawiono podsumowanie i wnioski końcowe dotyczące przeprowadzonej analizy oraz wskazano walory metody AHP szczególnie istotne zdaniem autorów w ocenie inwestycji ścianowych.

1. Metoda AHP

Analityczny hierarchiczny proces decyzyjny, czyli metoda AHP, jest metodą o szerokim spektrum stosowania. Metodę zaproponował Saaty [1977, 1980] i od wielu lat jest rozwijana (niektóre aspekty rozwoju zostały przedstawione w pracy [Kwiesielewicz, 2002]). Wyniki zapytań do bazy danych Science Direct o „analytic hierarchy proces” zaprezentowane w pracy [Gaul, Gartes, 2012] pokazują intensywny rozwój metody – od poziomu około 100 prac rocznie w początkowych latach XXI w. do ponad 560 w 2010 r. Nie sposób wymienić wszystkich obszarów zastosowań metody AHP oraz jej modyfikacji. Warto jednak zwrócić uwagę, że obok aplikacji z dziedziny nauk ekonomicznych [Trzaskalik, red., 2006], jest ona stosowana w naukach technicznych w problemach dotyczących górnictwa, m.in. w ocenie technologii [Azadeg, Osanloo, Ataei, 2010; Kabiesz i in., 2008; Kozioł i in., 2011] bądź ocenie bezpieczeństwa [Nian, Shi, Li, 2012].

AHP należy do metod wielokryterialnych i opiera się na teorii użyteczności addytywnej. Umożliwia ocenę obiektów (wariantów decyzyjnych) względem kryteriów poprzez określenie względnych wag, które odzwierciedlają użyteczność wariantów w stosunku do każdego kryterium. Końcowa ocena powstaje przez agregację poszczególnych użyteczności. Metoda AHP służy do porządkowania skończonej liczby wariantów decyzyjnych, które zwykle są oceniane względem wielu kryteriów (atrybutów).

Do istotnych cech tej metody należą:

- możliwość odwzorowania hierarchicznej struktury problemu decyzyjnego,
- porównywanie parami wariantów oraz kryteriów wraz z oceną werbalną związaną z preferencjami decydenta,
- wspomaganie decydenta poprzez przypisanie ocenie werbalnej wartości liczbowej, wykorzystywanej do obliczeń (tab. 1).

Tabela 1. Przyporządkowanie ocen liczbowych ocenom werbalnym

Ocena werbalna – wariant (x_i w porównaniu do x_j) jest preferowany względem kryterium	Ocena numeryczna
Ekstremalnie	9
Bardzo silnie	7
Silnie	5
Umiarkowanie	3
Równoważnie	1
Pośrednie preferencje	2,4,6,8
Preferencje odwrotne	Odwrotności ww. liczb

Źródło: [Saaty, 1980].

Na podstawie porównań parami wariantów decyzyjnych oraz kryteriów powstają macierze porównań. Dla każdego kryterium powstaje jedna macierz oraz dodatkowo macierz porównań kryteriów – w przypadku k rozważanych kryteriów otrzymuje się $k + 1$ macierzy porównań. Macierze te służą do budowy uszeregowania (rankingów) częściowych wariantów decyzyjnych względem każdego z kryteriów oraz rankingu kryteriów. Techniczną procedurę tworzenia rankingu częściowego można zaprezentować w następujących punktach:

- sumowanie po kolumnach wartości w macierzy porównań,
- normalizacja macierzy (podzielenie wartości macierzy w kolumnach przez ich sumy),
- uśrednienie wartości z każdego wiersza.

Otrzymane średnie wartości są względnymi wagami, które są nieujemne i sumują się do jedności. Wartości względnych wag informują o preferencjach decydenta – im wyższa waga, tym lepszy dany wariant lub kryterium.

Względne wagi względem wszystkich kryteriów tworzą macierz W , natomiast względne wagi kryteriów tworzą wektor w . Ranking końcowy otrzymuje się na podstawie wag wektora w^* :

$$w^* = W \cdot w. \quad (1)$$

Przedstawiona procedura opiera się na klasycznym podejściu opracowanym przez Saaty'ego.

Można zauważyć, że otrzymany ranking końcowy powstaje przez wykorzystanie metody przypisania liniowego, czyli końcowa ocena wariantu decyzyjnego w wektorze w^* powstaje przez sumowanie iloczynów względnej wagi wariantu względem kryteriów i wagę określonego kryterium. Otrzymane wagi można zatem interpretować, szczególnie w kontekście wag kryteriów, których wartości odwzorowują znaczenie kryteriów w procesie podejmowania decyzji i mogą służyć do analizy wpływu poszczególnych kryteriów na podejmowaną decyzję.

Bardzo ważną kwestią, którą należy poruszyć przy analizie AHP jest zgodność porównań, ponieważ przy porównywaniu parami wariantów może nie być spełniony jeden z warunków racjonalności – przechodność. Do oceny zgodności wykorzystuje się współczynnik zgodności:

$$c = \frac{\lambda_{\max} - n}{r(n - 1)}, \quad (2)$$

gdzie: n jest liczbą analizowanych wariantów (kryteriów), r jest wskaźnikiem przyjmującym wartości uzależnione od liczby n wariantów [Donegan, Dodd, 1991] (początkowe wartości przedstawiono w tab. 2), natomiast λ_{\max} jest (największą) wartością własną macierzy porównań. Wartość własną można wyznaczyć w dwóch krokach. Najpierw należy pomnożyć macierz porównań przez wektor wag, a następnie podzielić elementy otrzymanego wektora przez wagi oraz obliczyć średnią arytmetyczną. Średnia ta jest wyznaczoną wartością λ_{\max} .

Tabela 2. Wartości wskaźnika r w zależności od liczby porównywanych obiektów (wariantów lub kryteriów)

N	3	4	5	6	7	8	9	10
R	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Źródło: [Saaty, 1980].

Przyjmuje się, że porównania są zgodne, jeżeli $c \leq 0,1$. W przeciwnym wypadku, należy powtórnie dokonać porównania obiektów.

Zaletą metody AHP jest możliwość określenia wag kryteriów oraz ustalenie hierarchii wariantów na dowolnym poziomie struktury rozpatrywanego zagadnienia decyzyjnego.

2. Ocena inwestycji ścianowych z wykorzystaniem metody AHP

Rozpatrywane zagadnienie dotyczy porównania dziewięciu inwestycji ścianowych w kopalni węgla kamiennego. Strukturę hierarchiczną zagadnienia przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Struktura zagadnienia oceny projektów ścianowych

Źródło: Opracowanie własne.

Inwestycje te mogą być oceniane, w zależności od potrzeb oraz poziomu zarządzania, w różnych fazach cyklu życia ściany. Przy każdej fazie rozpatrywane kryteria mają charakter ekonomiczny.

Na kolejnych etapach cyklu życia inwestycji ścianowej można wyróżnić kryteria o charakterze ilościowym: długość drążonych wyrobisk, koszt wykonanych robót, czas trwania tych prac oraz wielkość złoza. Określenie wartości (pomiar) tych kryteriów jest nieustannie doskonalony, w dużej mierze dokonywany na podstawie wiedzy eksperckiej, oraz relatywnie dokładny (w sensie akceptowalności niezgodności szacunków z rzeczywistymi wartościami). Obok kryteriów strictly ekonomicznych, uwzględnia się także kryteria związane z występującymi zagrożeniami. Na rys. 1 nie wyróżniono zagrożeń na etapie robót przygotowawczych oraz likwidacji, jednak zagrożenia (głównie metanowe, tąpnięciami, wodne i pyłowe) występują. Zagrożenia te mają szczególne znaczenie na etapie eksploatacji, gdy ingerencja w górotwór jest największa, a z tym jest związane ryzyko utraty zdrowia lub życia przez pracowników. Ponadto wyróżnione kryteria mają teoretyczny charakter współzależny, np. im większe zagrożenie, tym większe koszty; im dłuższy czas wykonania prac, tym większe koszty itd. Zapewnienie bezpieczeństwa wydobycia jest ściśle określone przez normy

prawne, począwszy od najważniejszego – Prawa geologicznego i górniczego¹, poprzez rozporządzenia aż do regulacji na poziomie przedsiębiorstwa górniczego. Należy przy tym zaakcentować, że specyfika wydobycia (produkcji) węgla kamiennego, charakteryzująca się stochastycznym charakterem, powoduje, że te współzależności merytoryczne często nie znajdują wyraźnego potwierdzenia w badaniach statystycznych. W związku z tym ocena inwestycji ścianowej w postaci syntetycznej wartości, mającej charakter wskaźnika: koszty w odniesieniu do nakładów, może pomijać wiele istotnych aspektów, szczególnie związanych z zagrożeniami. Dodatkowo z punktu widzenia menedżera istotne jest wyszczególnienie zagrożeń jako kryterium, ponieważ związane z nimi ryzyko utraty zdrowia lub życia przez pracowników nie jest możliwe do skwantyfikowania w sensie kosztowym (wartości pieniężnych).

W każdym etapie zdecydowano się zdefiniować kryteria na podstawie wskaźników ilościowych, które są minimalizowane oraz kryterium związanego z oceną zagrożeń w fazie eksploatacji. Rozpatrywane kryteria przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Kryteria rozpatrywane przy ocenie inwestycji ścianowych

Źródło: Opracowanie własne.

¹ Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górniczne. Dz. U. z 2011 r. Nr 163, poz. 981 z późn. zm.

Badaniu poddano dziewięć inwestycji ścianowych w wybranych kopalniach Kompani Węglowej S.A. Dane dotyczyły inwestycji w latach 2010-2012.

Względne wagi poszczególnych inwestycji ze względu na przedstawione na rys. 2 kryteria oraz względne wagi kryteriów przedstawiono w tab. 3.

Tabela 3. Względne wagi ocenianych inwestycji oraz kryteriów

INWESTYCJA	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
	0,250	0,250	0,500	0,333	0,667	0,091	0,091	0,818	0,333	0,667
	DRAŻENIE			ZBROJENIE		EKSPLLOATACJA			LIKWIDACJA	
	0,667			0,333						
	PRZYGOTOWANIE					EKSPLLOATACJA			LIKWIDACJA	
0,334					0,568			0,098		
I	0,076	0,026	0,076	0,154	0,053	0,037	0,076	0,136	0,026	0,019
II	0,109	0,053	0,109	0,037	0,026	0,053	0,218	0,221	0,218	0,076
III	0,019	0,019	0,019	0,109	0,037	0,019	0,019	0,052	0,076	0,026
IV	0,154	0,307	0,154	0,218	0,307	0,307	0,307	0,083	0,053	0,154
V	0,307	0,218	0,218	0,076	0,154	0,218	0,037	0,083	0,019	0,037
VI	0,218	0,154	0,307	0,307	0,218	0,109	0,109	0,136	0,109	0,109
VII	0,037	0,076	0,026	0,019	0,076	0,026	0,154	0,034	0,037	0,053
VIII	0,026	0,037	0,053	0,026	0,019	0,076	0,053	0,221	0,307	0,218
IX	0,053	0,109	0,037	0,053	0,109	0,154	0,026	0,034	0,154	0,307

Źródło: Opracowanie własne.

Można zauważyć, że względne wagi dla kryteriów ilościowych (wszystkich poza F8) różnicują badane inwestycje, natomiast względem kryterium związanym z występującymi zagrożeniami (F8) występuje mniejsze zróżnicowanie. W przypadku występujących zagrożeń poszczególne inwestycje różniły się w obrębie zagrożeń metanowych (między pierwszym a czwartym stopniem zagrożenia) oraz zagrożeń tąpnięciami (nie występowały lub występowały pierwszego stopnia). Macierze porównań powstały z wykorzystaniem wiedzy ekspertów, przy tym w odniesieniu do kryteriów ilościowych względne wagi są proporcjonalne do wartości wskaźników określonych na rys. 2. Dla kryterium jakościowego F8 ocena lingwistyczna została natomiast transformowana zgodnie z tab. 1 – głównie w zakresie siły preferencji, ponieważ kolejność (porządek) rozważanych inwestycji wynika wprost z kategorii zagrożenia metanowego oraz zagrożenia tąpnięciami. W sposób szczególny należy zwrócić uwagę na doprowadzenie w ten sposób do porównywalności kryteriów o charakterze ilościowym z kryterium o charakterze jakościowym.

W celu potwierdzenia zgodności przy porównywaniu wariantów i kryteriów wyznaczono wartości współczynników zgodności, które nie przekraczały 0,036.

Rankingi inwestycji w poszczególnych etapach oraz ranking końcowy przedstawiono w tab. 4.

Tabela 4. Rankingi ocenianych inwestycji

INWESTYCJA	PRZYGO-TOWANIE	EKSPLO-ATACJA	LIKWIDACJA	OGÓLNIE	KOSZTY
I	5	5	9	6	7
II	4	1	3	3	5
III	9	7	7	9	9
IV	2	4	4	2	1
V	3	6	8	5	3
VI	1	3	5	1	2
VII	7	8	6	8	6
VIII	8	2	2	4	8
IX	6	8	1	7	4

Źródło: Opracowanie własne.

Z informacji zawartych w tab. 4 wynika, że najlepszą w sensie metody AHP jest inwestycja VI, która jednocześnie jest najlepszą w etapie eksploatacji. Inwestycje są różnie uporządkowane w różnych etapach cyklu życia, a największa zgodność uporządkowań występuje między rankingiem w etapie eksploatacji a rankingiem końcowym. Potwierdza to analiza korelacji przedstawiona w tab. 5.

Tabela 5. Analiza korelacji otrzymanych rankingów projektów inwestycyjnych

Korelacje (rho Spearmana)						
		Przygotowanie	Eksploatacja	Likwidacja	Ogólnie	Koszty
PRZYGO-TOWANIE	Współczynnik korelacji	1,000	,377	-,067	,800	,900
	Istotność (dwustronna)	.	,318	,865	,010	,001
EKSPLO-ATACJA	Współczynnik korelacji	,377	1,000	,243	,795	,117
	Istotność (dwustronna)	,318	.	,529	,010	,764
LIKWIDACJA	Współczynnik korelacji	-,067	,243	1,000	,283	,167
	Istotność (dwustronna)	,865	,529	.	,460	,668
OGÓLNIE	Współczynnik korelacji	,800	,795	,283	1,000	,667
	Istotność (dwustronna)	,010	,010	,460	.	,050
KOSZTY	Współczynnik korelacji	,900	,117	,167	,667	1,000
	Istotność (dwustronna)	,001	,764	,668	,050	.
N		9	9	9	9	9

Źródło: Opracowanie własne.

Wartości współczynników korelacji między rankingiem końcowym a rankingami w poszczególnych etapach odzwierciedlają względne wagi poszczególnych etapów wynikające z zastosowania metody AHP, tym samym potwierdzają wpływ ocen inwestycji w kolejnych etapach na końcową ocenę.

Projekty inwestycyjne można również ocenić wykorzystując wskaźnik jednostkowych nakładów przypadających na jednostkowy efekt (koszty jednostkowe przypadające na tonę wydobycia) oraz porównać otrzymane uporządkowanie z rankingiem końcowym metody AHP. Uporządkowanie oraz wartości współczynników korelacji związanych z tym wskaźnikiem przedstawiono w tab. 4 oraz tab. 5, w kolumnach i wierszu opisanych jako „KOSZTY”. Otrzymano inne uporządkowanie, które najsilniej jest skorelowane z uporządkowaniem projektów inwestycyjnych w etapie przygotowania. Fakt ten można uzasadnić uwzględnieniem w tym rankingu wyłącznie kryteriów ekonomicznych oraz relatywnie dużym udziałem kosztów robót przygotowawczych w kosztach całkowitych (w rozpatrywanym przykładzie średnie koszty robót przygotowawczych stanowią 48,9% kosztów całkowitych).

Podsumowanie i wnioski końcowe

Przeprowadzona analiza zagadnienia dotyczącego oceny projektów inwestycyjnych w kopalni węgla kamiennego prezentuje możliwości zastosowania metody AHP. Szczególnie istotne jest wykorzystanie metody do ustalenia preferencji względem kryteriów w postaci względnych wag, które odzwierciedlają znaczenie kryteriów w ocenie końcowej. Na podkreślenie zasługuje również możliwość wprowadzenia kryteriów o charakterze jakościowym, związanymi z występującymi zagrożeniami.

Rozpatrywane kryteria nie są niezależne, jednak menedżerowie są świadomi występujących relacji, które są uwzględniane przy budowaniu macierzy porównań kryteriów. Ze względu na specyfikę produkcji węgla kamiennego precyzyjna identyfikacja zależności i opis formalny są praktycznie niemożliwe. Analiza wielokryterialna, a w sensie podjętego tematu metoda AHP, umożliwia uwzględnienie wielu czynników, w tym wielu nieporównywalnych (zagrożenia związane z utratą zdrowia i życia pracowników a wskaźniki ekonomiczne). Należy jednak zaznaczyć, że w wyniku zastosowania metody AHP otrzymuje się syntetyczną ocenę projektu inwestycyjnego, będącą jednak konsekwencją rankingów względem rankingu kryteriów oraz poszczególnych kryteriów, które w związku z charakterem ilościowym łatwo zbudować. Budowa tego rankingu jest możliwa w metodzie AHP dzięki przypisaniu ocenie lingwistycznej wartości liczbowej.

Reasumując rozważania dotyczące zastosowania metody AHP do oceny inwestycji ścianowych w kopalni węgla kamiennego, można zaakcentować następujące walory takiego podejścia:

- wspomaganie decydenta w zakresie ustalania wag z wykorzystaniem oceny lingwistycznej, szczególnie w odniesieniu do preferencji między kryteriami,
- uwzględnienie kryteriów o charakterze jakościowym.

Literatura

- Azadeg A., Osanloo M., Ataei M. (2010), *A New Approach to Mining Method Selection Based on Modifying the Nicholas Technique*, „Applied Soft Computing”, Vol. 10, s. 1040-1061.
- Donegan H.A., Dodd F.J. (1991), *A Note on Saaty's Random Indexes*, „Mathematical and Computer Modelling”, Vol. 15, Iss. 10, s. 135-137.
- Gaul W., Gartes D. (2012), *A Note on Consistency Improvements of AHP Paired Comparison Data*, „Adv Data Anal Classif”, Vol. 6, No. 4, s. 286-302.
- Kabiesz J., Turek M., Drzewiecki J., Makówka J. (2008), *Ocena innowacyjności technologii eksploatacji węgla kamiennego metodą AHP*, „Gospodarka Surowcami Mineralnymi”, t. 24, z. 1-2 s. 103-121.
- Koziół W., Piotrowski Z., Pomykała R., Machniak Ł., Baic I., Witkowska-Kita B., Lutyński A., Blaschke W. (2011), *Zastosowanie analitycznego procesu hierarchicznego (AHP) do wielokryterialnej oceny innowacyjności technologii zagospodarowania odpadów z górnictwa kamiennego*, „Rocznik Ochrona Środowiska”, t. 13, s. 1619-1634.
- Kwiesielewicz M. (2002), *Analityczny hierarchiczny proces decyzyjny. Nierozmyte i rozmyte porównania parami*, IBS PAN, Warszawa.
- Trzaskalik T. (red.), 2006, *Metody wielokryterialne na polskim rynku finansowym*, PWE, Warszawa.
- Nian Q., Shi S., Li R. (2012), *Research and Application of Safety Assessment Method of Gas Explosion Accident in Coal Mine Based on GRA-ANP-FCE*, „Procedia Engineering”, Vol. 45, s. 106-111.
- Saaty T.L. (1977), *A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures*, „Journal of Mathematical Psychology”, Vol. 15, Iss. 3, s. 234-281.
- Saaty T.L. (1980), *The Analytic Hierarchy Process*, Mc-Graw Hill, New York.

AHP APPROACH TO EVALUATION OF INVESTMENT PROJECTS IN HARD COAL MINE

Summary: In this paper is considered the application of the AHP method to evaluate investment projects in a hard coal mine. There are analyzed the assessing and ranking problems of nine investments that are evaluated with respect to multiple criteria, in subsequent phases of the life cycle of the project: preparatory works, operation and decommissioning. The criteria, except one relating to existing threats, are qualitative and are associated with the costs of production volume (deposits, expected coal bed volume). The final ranking of investment compared to the ranking resulting from the single objective analysis on the basis of the ratio of unit costs (total costs in relation to the the coal bed volume). The differences in the evaluation of projects result from the inclusion the criteria explicitly related to threats.

Keywords: AHP, investment project evaluation, hard coal mine.