

EUGENIUSZ J. SOBCZYK\*, ALDONA WOTA\*\*, STANISŁAW KRĘŻOLEK\*\*\*

## **Zastosowanie matematycznych metod wielokryterialnych do wyboru optymalnego wariantu źródła pozyskania węgla kamiennego**

### **Wprowadzenie**

Problem wyboru, czy decyzji inwestycyjnej, był i jest najczęściej spotykanym problemem w funkcjonowaniu jednostek gospodarczych. Każda decyzja niesie ze sobą niekiedy bardzo daleko idące skutki, a jej konsekwencje bywają często bardzo złożone. Ze względu na konsekwencje, podjęcie właściwej decyzji jest bardzo istotne dla inwestora. Bardzo ważnym etapem działalności gospodarczej jest faza, w której dokonuje się wyboru jednego z wariantów przyszłej inwestycji.

W przypadku wyboru optymalnego wariantu inwestycji, wybór musi być wieloaspektowy, uwzględniający różnorodność problemu. Przy ocenie wariantów nie można opierać się jedynie na analizie finansowej inwestycji, a należy uwzględniać również bardzo istotne kwestie, takie jak: aspekty techniczne, technologiczne, organizacyjne, środowiskowe czy społeczne.

Decyzja o wyborze wariantu realizacji projektu, wymaga także zbadania wariantów pod kątem ich pozytywnego i negatywnego oddziaływania. Do pozytywnych aspektów zalicza się korzyści i szanse, natomiast do negatywnych należą elementy związane z kosztami i ryzykiem. Problem z oceną wymienionych aspektów polega często na trudności wyrażenia ich w kategoriach liczbowych. Przykładowo, niektóre korzyści mają charakter jakościowy, chociażby środowiskowe, czy też elementy ryzyka – np: stopień rozpoznania geologicznego.

---

\* Dr hab. inż., prof. nadzw., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: jsobczyk@min-pan.krakow.pl

\*\* Dr., Śląska Wyższa Szkoła Zarządzania im. gen. Jerzego Ziętka, Katowice.

\*\*\* Dr inż., emeryt.

Decyzja bardzo często jest wyborem przypadkowym lub czysto intuicyjnym, nie poparta żadnymi analizami, ani planowaną strategią. Aby uniknąć błędów i przypadkowości wyboru, konieczne jest odwołanie się do sprawdzonych w praktyce metod naukowych. Do takich należy zaliczyć metody wielokryterialnego podejmowania decyzji – *Multiple Criteria Decision Making* (MCDM), albo metody wspomagania decyzji wielokryterialnych. MCDM tworzą nowoczesną dziedzinę badań operacyjnych, które są rozwijane i wdrażane, jako narzędzia wspomagające proces podejmowanie decyzji. Metody te stanowią obecnie fundament procedur decyzyjnych i wyróżnia się:

- MODM *Multi-Objective Decision-Making Methods* – metody wielocelowego podejmowania decyzji,
- MADM *Multi-Attribute Decision-Making Methods* – metody wieloatrybutowego podejmowania decyzji, określane także jako wielokryterialne metody dyskretne (Trzaskalik 2008).

Grupa metod MODM bada problemy decyzyjne, w których zbiór wszystkich dopuszczalnych decyzji jest zbiorem ciągłym, zawierającym nieskończoną liczbę możliwych wariantów rozwiązania. Problemy te posiadają natomiast zbiór kwantyfikowalnych celów, na podstawie których podejmowana jest decyzja oraz zbiór określonych ograniczeń na wartości zmiennych decyzyjnych możliwych wariantów.

W przypadku metod MADM ich cechą wyróżniającą jest ograniczona i niewielka liczba ustalonych wariantów decyzyjnych, natomiast ich wybór dokonywany jest na podstawie ustalonych kryteriów, które niekoniecznie muszą być kwantyfikowalne. Ze względu na dużą częstotliwość występowania tego typu problemów do ich rozwiązywania służą głównie takie metody jak np.: PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*), ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la Realite*), TOPSIS (*Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution*), SMART (*Simple Multi Attribute Rating Technique*), AHP (*Analytic Hierarchy Process*), ANP (*Analytic Network Process*).

Do wyboru optymalnego wariantu decyzyjnego w prezentowanej analizie zastosowano metodę matematyczną AHP, która jest jedną z najczęściej stosowanych metod MCDM na świecie. Metoda AHP jest metodą wielokryterialnych analiz decyzyjnych, w których występuje więcej niż jedno kryterium oraz jest rozważany przynajmniej dwuelementowy, skończony zbiór wariantów decyzyjnych. Ponadto metoda ta umożliwia porównywanie kryteriów ilościowych z jakościowymi (Sobczyk 2008; Bascetin 2009).

W przypadku wyboru najlepszego wariantu decyzyjnego, w którym należy uwzględnić pozytywne oraz negatywne oddziaływania wariantów, metoda AHP stosuje analizę BOCR (analiza korzyści – *benefits* (*B*), możliwości – *opportunities* (*O*), kosztów – *costs* (*C*) oraz ryzyka – *risks* (*R*) (Saaty 2001; Saaty, Ozdemir 2004; Diederik, Wijnmalen 2005).

W analizie, przed wskazaniem optymalnego wariantu decyzyjnego, w pierwszej kolejności należy zbudować cztery modele hierarchiczne dla analizy korzyści – *benefits* (*B*), możliwości – *opportunities* (*O*), kosztów – *costs* (*C*) oraz ryzyka – *risks* (*R*). Poszczególne modele charakteryzują się takimi samymi ocenianymi wariantami decyzyjnymi, natomiast

kryteria budujące modele są zwykle różne. W każdym z modeli – zgodnie z zasadami metody AHP – obliczane są końcowe, globalne wagi dla ocenianych wariantów.

Wskazanie najlepszego wariantu przebiega zgodnie z multiplikatywną formułą (*multiplicative formula*):

$$\frac{(B \cdot O)}{(C \cdot R)}$$

Zgodnie z nią dzieli się iloczyn priorytetów (wag) wariantów dla korzyści i szans (pozytywne grupy) przez iloczyn priorytetów (wag) wariantów dla kosztów i ryzyka (negatywne grupy).

Uzyskana wartość współczynnika  $(BO)/(CR)$  służy do uszeregowania wariantów i wyboru najlepszego z ocenianych. Najlepszym wariantem decyzyjnym jest ten, którego stosunek  $(BO)$  do  $(CR)$  jest najwyższy.

## 1. Opis analizowanych wariantów decyzyjnych

Metody wielokryterialnego podejmowania decyzji wykorzystano do oceny i wyboru najlepszego wariantu związanego z możliwością pozyskania węgla kamiennego na cele energetyczne przez potencjalnego Inwestora funkcjonującego w sektorze górniczo-energetycznym. Długofalową strategią działania Inwestora jest budowa elektrowni na węgiel kamienny. W ramach zaspokojenia potrzeb dla elektrowni Inwestor założył uniezależnienie się od dostaw zewnętrznych i poszukiwanie własnych źródeł pozyskania węgla kamiennego. Rozpatrywano następujące warianty, które mogą znaleźć się w obszarze zainteresowań potencjalnego Inwestora:

- Wariant I: Budowa nowej kopalni poprzez udostępnienie złoża perspektywicznego.
- Wariant II: Wznowienie działalności wydobywczej na złożu kopalni zlikwidowanej.
- Wariant III: Inwestycja w budowę nowego poziomu wydobywczego (rejonu) w czynnej kopalni węgla kamiennego.
- Wariant IV: Rozbudowa kopalni będącej w strukturze holdingu Inwestora.
- Wariant V: Pozyskanie kopalni węgla kamiennego na zasadzie akwizycji.
- Wariant VI: Pozyskanie kopalni węgla kamiennego w wyniku zakupu akcji prywatyzowanych podmiotów górniczych.

Ocenę i wybór wariantów przeprowadzono zgodnie z metodą AHP, uwzględniającą podział na grupy B, O, C, R. Zastosowana procedura obejmowała kolejno cztery etapy:

1. Budowa modeli – oddzielnie dla analizy korzyści – *benefits* ( $B$ ), możliwości – *opportunities* ( $O$ ), kosztów – *costs* ( $C$ ) oraz ryzyka – *risks* ( $R$ ). Modele sporządzono zgodnie z zasadami tworzenia struktur hierarchicznych.
2. Obliczenie priorytetów (wag) dla kryteriów i subkryteriów modeli. W tym celu oceniono elementy danego poziomu względem poziomu wyższego. Oceny (porównania parami

kryteriów i subkryteriów) przeprowadzili eksperci na podstawie 9-stopniowej skali ocen – tzw. skali Saaty’ego (Saaty 1977). Oceny zostały zapisane w macierzach kwadratowych, których wymiar był zależny od liczby znajdujących się elementów na danym poziomie modelu. Następnie obliczono priorytety (wagi) dla kryteriów i subkryteriów (składowe wektora własnego macierzy związanego z maksymalną wartością własną macierzy). W kolejnym kroku dla każdej macierzy sprawdzono poprawność przeprowadzonych ocen, obliczając wskaźnik ich zgodności. W przypadku popełnienia błędów wycen przez ekspertów – wyceny powtarzano.

3. Obliczenie wag globalnych dla wariantów. W tym celu porównano parami warianty względem każdego z elementów poziomu wyższego, postępując przy ocenie tak samo, jak w przypadku oceny kryteriów i subkryteriów. Wagi globalne uzyskano mnożąc macierz wag wariantów ze względu na elementy poziomu wyższego przez wektory wag elementów poziomów wyższych.
4. Wybór najlepszego wariantu zgodnie z formułą  $(BO)/(CR)$ .

## **2. Analiza modelu korzyści (*Benefits – B*)**

Wybór określonego wariantu niesie ze sobą określone korzyści. Do najważniejszych analizowanych korzyści, pozwalających na skuteczne porównywanie alternatyw, zaliczono:

- B1 – jednostkowe koszty operacyjne,
- B2 – termin zrealizowania celu,
- B3 – wielkość nakładów inwestycyjnych,
- B4 – kontrola nad inwestycją,
- B5 – uwarunkowania środowiskowe,
- B6 – uwarunkowania społeczne.

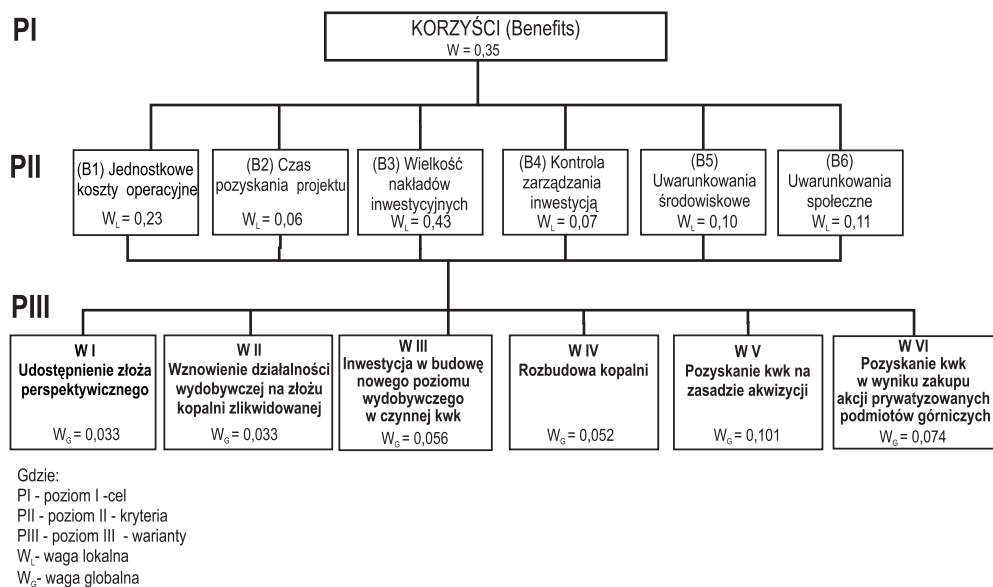
Czas pozyskania inwestycji stanowi istotne kryterium z punktu widzenia zrealizowania celu – również w kontekście wartości czasowej pieniądza. Znaczące źródło korzyści może stanowić poziom nakładów inwestycyjnych niezbędnych dla realizacji przedsięwzięcia, ale również koszty operacyjne, ponoszone w jej trakcie – w obu przypadkach są preferowane warianty o jak najmniejszych wartościach. Niebagatelną korzyść w kontekście zapewnienia bezpieczeństwa dostaw stanowi również posiadanie bezpośredniej kontroli nad inwestycją. Należy podkreślić, że inwestor może nie mieć pełnej kontroli w przypadku zrealizowania inwestycji w innej kopalni bądź w sytuacji decyzji o zakupie akcji innego przedsiębiorstwa. Istotną rolę pełnić mogą również uwarunkowania środowiskowe i społeczne. W obu przypadkach źródłem korzyści dla inwestora jest brak infrastruktury na powierzchni – w szczególności obiektów chronionych oraz osiedli mieszkaniowych, których występowanie znacznie ogranicza swobodę funkcjonowania kopalni („uwięzienie” partii zasobów w filarach ochronnych) oraz jest źródłem dodatkowych kosztów, związanych – w najlepszym przypadku – z koniecznością wypłacania odszkodowań z tytułu szkód górniczych. Z tego

powodu istotną korzyścią jest występowanie na powierzchni obszaru i terenu górniczego nieużytków, lasów i pól.

W ciągu ostatnich lat, w związku z ożywieniem na rynku surowcowym, odnotowano w Polsce bardzo liczne konflikty społeczne na tle środowiskowym, związane z udostępnianiem nowych lub uprzednio zlikwidowanych złóż kopalni. Częstokroć o podjęciu wydobycia, porzuceniu projektu lub zmianie obiektu zainteresowania przez przedsiębiorcę górniczego decyduje właśnie społeczne przyzwolenie na eksploatację kopaliny w danym rejonie. Opozycja wobec zagospodarowania złóż występuje ze strony pojedynczych mieszkańców, lokalnej opinii publicznej, władz samorządowych oraz/lub organizacji pozarządowych.

W przypadku czynnych kopalń węgla kamiennego kontestowane są raczej sposoby i skutki prowadzonej eksploatacji niż sama zasadność jej podejmowania. Znacznie większym problemem jest ustanowienie całkiem nowych obszarów koncesyjnych, poza dotychczasowymi terenami górniczymi, a także wznowienie wydobycia ze złóż kopalni zlikwidowanych w procesie restrukturyzacji górnictwa. W obydwu przypadkach należy założyć, że wystąpienie konfliktu i protesty są nieuniknione.

Wyróżnione najistotniejsze korzyści stanowiły podstawę do skonstruowania modelu do analizy *Benefits* (rys. 1). Struktura modelu składa się z trzech poziomów. Na pierwszym umieszczono cel decyzji, drugi poziom reprezentowany jest przez najistotniejsze kryteria związane z korzyściami, natomiast na najniższym, trzecim poziomie hierarchicznego modelu znajduje się sześć rozpatrywanych wariantów inwestycyjnych.



Rys. 1. Model hierarchiczny korzyści (*Benefits - B*)

Fig. 1. Hierarchical Model for Benefits

Tak opracowany model stanowi podstawę do obliczeń analitycznych, czyli do oceny wszystkich jego elementów składowych. Oceny ważności elementów zostały wyrażone w postaci priorytetów (wag). Oceny wszystkich składowych modelu zostały przeprowadzone z udziałem ekspertów. Eksperti na każdym poziomie hierarchii porównywali parami elementy danego poziomu, względem poziomu wyższego, a uzyskane oceny zapisywano w macierzy kwadratowej  $N \times N$ . W ten sposób 6 kryteriów znajdujących się na drugim poziomie modelu analizy *Benefits*, wyceniono pod kątem ich oddziaływania na element wyżej położony – czyli na realizację celu decyzji. W związku z tym, rozwiązano jedną macierz  $M_{1II}(B)$  o wymiarze  $(6 \times 6)$ , będącą wynikiem porównań parami kryteriów poziomu II względem elementu poziomu I. Należy wspomnieć, że w każdej macierzy zgodnie z metodą AHP, wykonuje się  $n(n - 1)/2$  porównań parami zmiennych. W macierzy  $M_{1II}(B)$  eksperci wykonali 15 porównań, odpowiadając kolejno na pytanie: które z porównywanych par kryteriów jest ważniejsze i w jakim stopniu ze względu na realizację celu?

Macierz  $M_{1II}(B)$  ma postać:

$$M_{1II}(B) = \begin{bmatrix} B1/B1 & B1/B2 & B1/B3 & B1/B4 & B1/B5 & B1/B6 \\ B2/B1 & B2/B2 & B2/B3 & B2/B4 & B2/B5 & B2/B6 \\ B3/B1 & B3/B2 & B3/B3 & B3/B4 & B3/B5 & B3/B6 \\ B4/B1 & B4/B2 & B4/B3 & B4/B4 & B4/B5 & B4/B6 \\ B5/B1 & B5/B2 & B5/B3 & B5/B4 & B5/B5 & B5/B6 \\ B6/B1 & B6/B2 & B6/B3 & B6/B4 & B6/B5 & B6/B6 \end{bmatrix}$$

gdzie:

- $B1$  – jednostkowe koszty operacyjne,
- $B2$  – termin zrealizowania celu,
- $B3$  – wielkość nakładów inwestycyjnych,
- $B4$  – kontrola nad inwestycją,
- $B5$  – uwarunkowania środowiskowe,
- $B6$  – uwarunkowania społeczne.

Po przeprowadzeniu wycen, obliczono priorytety (wagi) kryteriów. Sprawdzono również poprawność przeprowadzonych ocen ekspertów. W tym celu obliczono wskaźnik zgodności (konsekwencji) – C.I. (*Consistency Index*) – według wzoru:

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \leq 0,10$$

gdzie:

- $n$  – wymiar macierzy,
- $\lambda_{\max}$  – maksymalna wartość własna macierzy.

Po obliczeniu macierzy  $M_1W(B)$  otrzymano wektor wag lokalnych dla ocenianych kryteriów poziomu II, o następujących składowych:

$$W = [0,23_{B1}; 0,06_{B2}; 0,43_{B3}; 0,07_{B4}; 0,10_{B5}; 0,11_{B6}]$$

Składowe wektora wag dla sześciu głównych korzyści pokazują, że najistotniejszym kryterium ze względu na realizację celu jest poziom wielkości nakładów inwestycyjnych (0,43) oraz jednostkowe koszty operacyjne ponoszone w trakcie realizacji inwestycji (0,23).

Następny etap analizy modelu polegał na ocenie 6 wariantów względem każdego z kryteriów poziomu II. W tym celu zbudowano 6 macierzy o wymiarach (6 × 6):  $M_1W(B1)$ ,  $M_2W(B2)$ ,  $M_3W(B3)$ ,  $M_4W(B4)$ ,  $M_5W(B5)$ ,  $M_6W(B6)$ , gdzie:

- macierz  $M_1W(B1)$  jest oceną wariantów ze względu na kryterium (B1) – jednostkowe koszty operacyjne,
- macierz  $M_2W(B2)$  – ocena wariantów ze względu na kryterium (B2) – czas pozyskania projektu,
- macierz  $M_3W(B3)$  – ocena wariantów ze względu na (B3) – wielkość nakładów inwestycyjnych,
- macierz  $M_4W(B4)$  – ocena wariantów ze względu na (B4) – kontrola zarządzania inwestycją,
- macierz  $M_5W(B5)$  – ocena wariantów ze względu na aspekty środowiskowe,
- macierz  $M_6W(B6)$  – ocena wariantów ze względu na aspekty społeczne.

Poniżej przedstawiono budowę jednej z ocenianych macierzy, mianowicie macierz  $M_1W(B1)$ , która jest oceną wariantów ze względu na kryterium (B1) – jednostkowe koszty operacyjne.

$$M_1W(B1) = \begin{bmatrix} W1/W1 & W1/WII & W1/WIII & W1/WIV & W1/WV & W1/WVI \\ WII/W1 & WII/WII & WII/WIII & WII/WIV & WII/WV & WII/WVI \\ WIII/W1 & WIII/WII & WIII/WIII & WIII/WIV & WIII/WV & WIII/WVI \\ WIV/W1 & WIV/WII & WIV/WIII & WIV/WIV & WIV/WV & WIV/WVI \\ WV/W1 & WV/WII & WV/WIII & WV/WIV & WV/WV & WV/WVI \\ WVI/W1 & WVI/WII & WVI/WIII & WVI/WIV & WVI/WV & WVI/WVI \end{bmatrix}$$

gdzie:

$W1, WII, WIII, WIV, WV, WVI$  – analizowane warianty pozyskania węgla.

W każdej z 6 macierzy eksperci wykonali po 15 porównań parami, odpowiadając kolejno na pytanie: który z wariantów porównywanych par daje większe korzyści w odniesieniu do odpowiedniego kryterium poziomu II? Przykładowo, w macierzy  $M_1W(B1)$  pytanie odnosiło się do kryterium (B1), czyli jednostkowych kosztów operacyjnych. Priorytety (wagi) obliczone w każdej macierzy mają znaczenie lokalne (częstkowe), natomiast pomnożone przez wagi odpowiedniego poziomu wyższego, określane są jako priorytety globalne na danym

poziomie. Wagi globalne dla wariantów są zarazem wagami wynikowymi. W tabeli 1 przedstawiono wektory lokalne ważności wariantów ze względu na poszczególne kryteria. Stanowią one rozwiązanie macierzy  $M_1W(B1)$  do  $M_6W(B6)$ .

TABELA 1

Macierz ocen wariantów ze względu na poszczególne kryteria

TABLE 1

Matrix of evaluations of decision alternatives confronted to various criteria

Wariant	$B1$	$B2$	$B3$	$B4$	$B5$	$B6$
$WI$	0,05	0,04	0,05	0,27	0,04	0,36
$WII$	0,03	0,08	0,11	0,09	0,06	0,19
$WIII$	0,11	0,14	0,23	0,05	0,15	0,10
$WIV$	0,23	0,06	0,08	0,28	0,10	0,28
$WV$	0,41	0,31	0,26	0,28	0,43	0,04
$WVI$	0,16	0,38	0,28	0,03	0,23	0,03

Końcowe wagi analizowanych wariantów modelu korzyści uzyskano przez pomnożenie macierzy wariantów ze względu na poszczególne kryteria przez wektor wag kryteriów poziomu II oraz wektor wag poziomu I. Wektor ocen wariantów ze względu na korzyści ma następującą postać:

$$W = [0,033_{WI}; 0,003_{WII}; 0,056_{WIII}; 0,052_{WIV}; 0,101_{WV}; 0,074_{WVI}]$$

Analizując końcowe wagi dla wariantów, należy zauważyć, że najlepiej w ocenie wypadł wariant V – czyli dla Inwestora najkorzystniejszym byłoby pozyskanie kopalnię węgla kamiennego na zasadzie akwizycji (0,101) oraz w drugiej kolejności pozyskanie kopalni węgla kamiennego w wyniku zakupu akcji prywatyzowanych podmiotów górniczych (0,074). Natomiast inwestowanie w udostępnienie złoża perspektywicznego (wariant I) i wznowieniem działalności wydobywczej na złożu kopalni zlikwidowanej (wariant II) powinny zostać odrzucone, ze względu na zbyt niskie korzyści.

### 3. Analiza modelu szans (*Opportunities – O*)

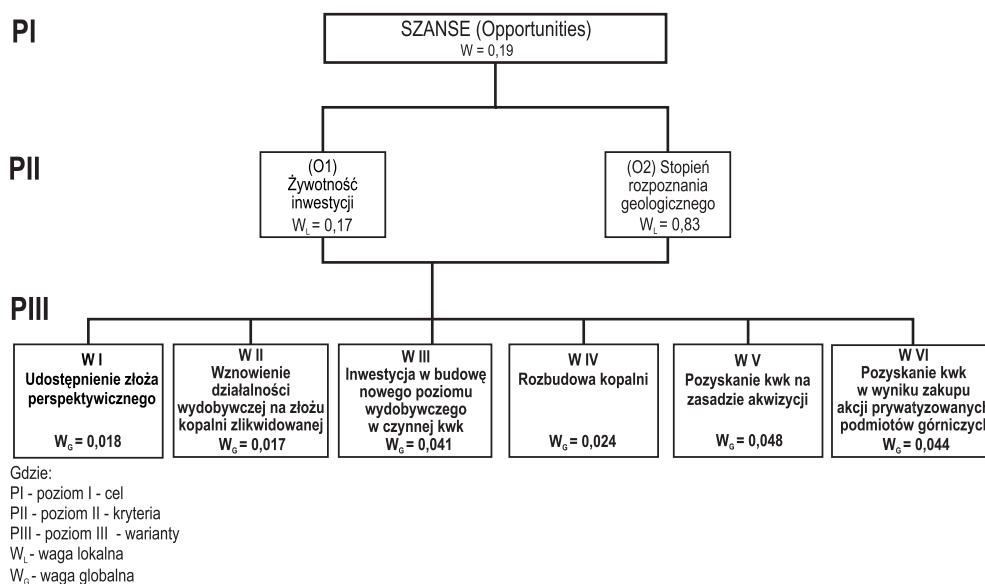
Celem analizy z punktu widzenia kategorii szans (*Opportunities*) jest określenie, z którym z rozpatrywanych wariantów wiąże się największe potencjalne zyski dla Inwestora. Ocenę rozpatrywanych wariantów rozpatrzono ze względu na dwa główne kryteria:

- O1 – żywotność inwestycji,
- O2 – stopień rozpoznania geologicznego.



Żywotność inwestycji rozumiana jest tutaj jako czas zabezpieczenia podaży węgla kamiennego dla nowej elektrowni Inwestora. W praktyce oznacza to korzystniejszy wariant o większej bazie zasobowej. Stopień rozpoznania geologicznego z kolei, wiąże się z poziomem nakładów inwestycyjnych – im większa znajomość budowy geologicznej złoża, tym niższych należy oczekiwać nakładów na rozpoznanie. Istnieją również mniejsze szanse, że zainwestowane nakłady nie zostaną bezpowrotnie utracone. Dobrze rozpoznane warunki geologiczno-górniczne oznaczają także bardziej wiarygodne oszacowanie podstawowych parametrów przedsięwzięcia: wydobywania i kosztów operacyjnych.

Strukturę rozpatrywanego zagadnienia szans (*Opportunities*) przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Model hierarchiczny szans (*Opportunities*)

Fig. 2. Hierarchical Model for Opportunities

Analogicznie jak w przypadku modelu *Benefits*, przeprowadzono stosowne obliczenia – zgodnie z metodyką AHP – w celu uzyskania końcowych wag dla analizowanych wariantów z punktu widzenia szans (*Opportunities*).

Oceny ważności ocenianych 6 wariantów przedstawiono w tabeli 2.

Końcowe wagi analizowanych wariantów modelu *Opportunities* uzyskano przez pomnożenie macierzy preferencji wariantów ze względu na kryteria O1 i O2 oraz wektor wag poziomu I. Wynikiem końcowym jest wektor wag ocenianych wariantów decyzyjnych ze względu na szanse.

$$W = [0,018_{WI}; 0,017_{WII}; 0,041_{WIII}; 0,024_{WIV}; 0,048_{WV}; 0,044_{WVI}]^T$$

TABELA 2

Macierz ocen wariantów ze względu kryteria O1 i O2

TABLE 2

Matrix of evaluations of decision alternatives confronted to criteria O1 i O2

Wariant	O1	O2
WI	0,37	0,04
WII	0,05	0,09
WIII	0,03	0,25
WIV	0,37	0,08
WV	0,09	0,28
WVI	0,08	0,26

Z oceny składowych wektora wag dla wariantów wynika, że najlepiej w ocenie wypadł wariant V (0,048). Oznacza to, że ze względu na potencjalne zyski dla potencjalnego Inwestora najkorzystniejszym jest pozyskanie kopalni węgla kamiennego na zasadzie akwizycji, natomiast w drugiej kolejności należałoby rozważyć wariant VI – czyli pozyskanie kopalni węgla kamiennego w wyniku zakupu akcji prywatyzowanych podmiotów górniczych (0,044). Natomiast najmniejsze potencjalne zyski daje wznowienie działalności wydobywczej na złożu kopalni zlikwidowanej (0,017) oraz inwestycja w złożo perspektywiczne (0,018).

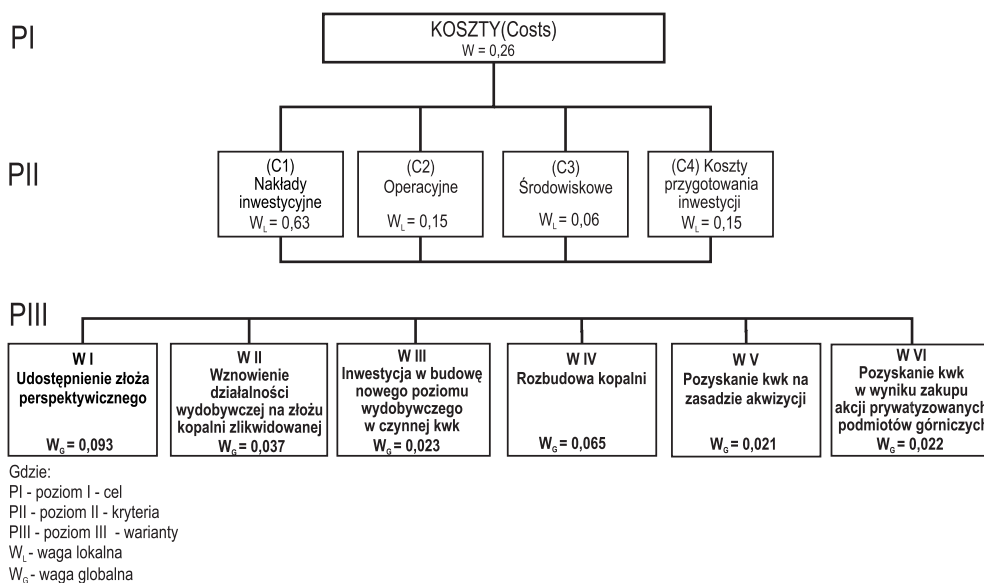
#### 4. Analiza modelu koszty (*Costs – C*)

Kolejnym etapem, który przybliży do wyboru najlepszego wariantu decyzyjnego – zgodnie z analizą BOCR – jest ocena wariantów ze względu na grupy negatywne, czyli koszty i ryzyko. Model hierarchiczny do analizy koszty (*Costs – C*) przedstawiono na rysunku 3.

W hierarchicznym modelu czynniki kosztów podzielone zostały na cztery grupy:

- C1 – związane z nakładami inwestycyjnymi,
- C2 – związane z kosztami operacyjnymi,
- C3 – związane z aspektami środowiskowymi,
- C4 – związane z okresem przygotowania inwestycji.

Z wyborem i realizacją określonego wariantu związane są – oprócz korzyści – konkretne koszty. Poziom nakładów inwestycyjnych wiąże się zwykle ze stanem zagospodarowania złoża, jego budową i głębokością zalegania. Analizując warianty Inwestor musi rozważyć, czy wybór wariantu o niskich nakładach inwestycyjnych nie będzie jednocześnie oznaczał ponoszenia wysokich kosztów operacyjnych pozyskiwania węgla. W przeważającej większości przypadków wysokie nakłady inwestycyjne pociągają za sobą wysokie



Rys. 3. Model hierarchiczny koszty (Costs – C)

Fig. 3. Hierarchical Model for Costs

koszty operacyjne – eksploatacja na dużych głębokościach wiąże się przeważnie z występowaniem większych zagrożeń naturalnych, głównie metanowego i sejsmicznego. Oznacza to konieczność ponoszenia znacznych kosztów operacyjnych. Jak już wspomniano, stan zagospodarowania terenu ma aktualnie istotne znaczenie dla możliwości skutecznej eksploatacji – zurbanizowanie terenów oraz występowanie na powierzchni obiektów o znaczeniu strategicznym mogą być przyczyną poważnych kosztów i utrudnień dla realizacji zaplanowanych działań. Ważne znaczenie dla Inwestora może mieć okres ubiegania się o pozyskanie inwestycji – w przypadkach budowy kopalń lub poziomów wydobywczych należy się liczyć ze stosunkowo długim okresem pozyskiwania koncesji oraz długim okresem inwestycyjnym.

Powyższe cztery wyróżnione grupy kryteriów eksperci ocenili w stosunku do poziomu wyższego (realizacja celu decyzji), czyli wyboru wariantu ze względu na koszty dotyczące zwiększenia produkcji węgla na cele energetyczne z nowych źródeł.

Obliczenia przeprowadzono analogicznie do analizy korzyści i szans. W wyniku obliczeń dla 4 macierzy ocen wariantów, otrzymano wektory lokalne ważności wariantów ze względu na poszczególne kryteria (tab. 3).

Końcowe wagi analizowanych wariantów modelu *Costs* uzyskano poprzez pomnożenie macierzy wariantów ze względu na kryteria C1, C2, C3 i C4 oraz wektor wag poziomu I. Wektor wag ocenianych wariantów decyzyjnych ze względu na koszty wyniósł:

$$W_{WC} = [0,093_{WI}; 0,037_{WII}; 0,023_{WIII}; 0,065_{WIV}; 0,021_{WV}; 0,022_{WVI}]^T$$

TABELA 3

Macierz ocen wariantów ze względu kryteria C1, C2, C3 i C4

TABLE 3

Matrix of evaluations of decision alternatives confronted to criteria C1, C2, C3 and C4

Wariant	C1	C2	C3	C4
WI	0,37	0,16	0,41	0,48
WII	0,11	0,24	0,12	0,17
WIII	0,04	0,25	0,09	0,10
WIV	0,28	0,19	0,22	0,18
WV	0,10	0,06	0,11	0,04
WVI	0,10	0,09	0,05	0,04

Dzięki analizie modelu kosztów możliwe było uzyskanie odpowiedzi, który z rozpatrywanych wariantów decyzyjnych jest najbardziej kosztowny, a który najmniej. Najbardziej kosztownym wariantem jest wariant I – czyli inwestycja w udostępnienie złoża perspektywicznego (0,093) oraz wariant VI, czyli rozbudowa kopalni. Natomiast najmniej kosztownym wariantem jest wariant V, czyli pozyskanie kopalni węgla kamiennego na zasadzie akwizycji (0,021) oraz porównywalny z nim wariant VI – czyli pozyskanie kopalni węgla kamiennego w wyniku zakupu akcji prywatyzowanych podmiotów górniczych (0,022).

### 5. Analiza modelu ryzyka (*Risks – R*)

Ocenę ostatniego elementu w analizie BOCR wykonano dla ryzyka (*Risks – R*). Ryzyko związane z podjęciem inwestycji podzielone zostało na dwa obszary:

- R1 – ryzyko początkowe,
- R2 – ryzyko bieżącej działalności.

Ryzyko początkowe wynika z niepewności w zakresie warunków wyboru wariantu inwestycji i mieści w sobie:

- R1.1 – ryzyko ekonomiczne,
- R1.2 – ryzyko społeczne,
- R1.3 – ryzyko geologiczne.

Ryzyko ekonomiczne wynika z relacji pomiędzy wielkością nakładów inwestycyjnych a możliwymi do uzyskania efektami.

Ryzyko społeczne związane jest z niepewnością w zakresie możliwości prowadzenia eksploatacji w sytuacji występowania na powierzchni osiedli mieszkaniowych i obiektów chronionych. Opór miejscowej ludności może być przyczyną uniemożliwienia eksploatacji.

Ważnym czynnikiem ryzyka jest również stan rozpoznania geologicznego. Może okazać się, że rzeczywiste zasoby oraz warunki geologiczno-górnice eksploatacji będą znacznie

gorsze od oczekiwanych, co w konsekwencji skutkować może mniejszą i nieregularną produkcją węgla i zmniejszeniem efektywności procesu produkcyjnego.

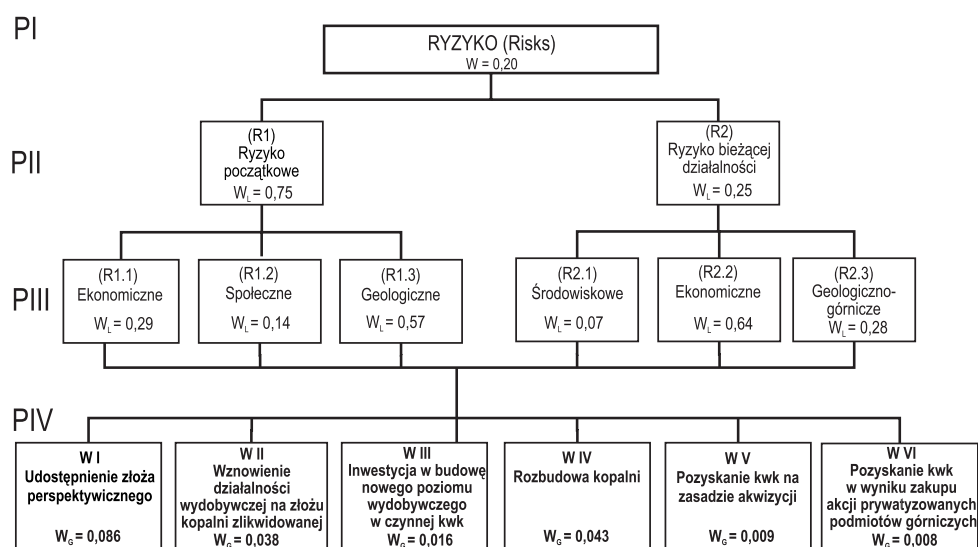
W obrębie ryzyka bieżącej działalności wyróżnione zostały następujące elementy:

- R2.1 – ryzyko środowiskowe,
- R2.2 – ryzyko ekonomiczne,
- R2.3 – ryzyko geologiczno-górniczne.

Ryzyko środowiskowe bieżącej działalności oznacza konieczność wywiązywania się ze zobowiązań (płacenie odszkodowań z tytułu szkód górniczych), konieczność stosowania podszdki hydraulicznej, co istotnie oddziałuje na poziom bieżących kosztów operacyjnych. Taki sam charakter ma ryzyko warunków górniczo-geologicznych – trudne warunki geologiczne i tektoniczne oraz konieczność opanowania zagrożeń naturalnych oznaczają w konsekwencji większe koszty operacyjne (opanowanie trudnych technologii – wybieranie cienkich pokładów, konieczność przechodzenia uskoków, profilaktyka przeciwważeniowa itp.). Ryzyko ekonomiczne związane jest z niepewnością w zakresie bieżącej działalności.

Wyżej wymienione uwarunkowania stanowiły podstawę zbudowania modelu hierarchicznego, wielokryterialnego do analizy wariantów ze względu na ryzyka (*Risks*). Strukturę modelu przedstawiono na rysunku 4.

Przedstawiony model – jak w przypadku wcześniej opisanych modeli dla B, O i C – stanowi podstawę do obliczeń analitycznych, czyli do oceny istotności wszystkich jej



Gdzie:

- PI - poziom I - cel
- PII - poziom II - kryteria
- PIII - poziom III - subkryteria
- PIII - poziom III - warianty
- $W_l$  - waga lokalna
- $W_g$  - waga globalna

Rys. 4. Model hierarchiczny ryzyka (*Risks – R*)

Fig. 4. Hierarchical Model for Risk

elementów składowych, a w konsekwencji do uzyskania wag końcowych dla ocenianych wariantów decyzyjnych z punktu widzenia ryzyka.

Obliczone wagi lokalne dla wariantów dla ryzyka ze względu na poszczególne subkryteria przedstawiono w tabeli 4.

TABELA 4

Macierz ocen wariantów ze względu na subkryteria  $R1.1$ – $R2.3$

TABLE 4

Matrix of evaluations of decision alternatives confronted to subcriteria  $R1.1$ – $R2.3$

Wariant	$R1.1$	$R1.2$	$R1.3$	$R2.1$	$R2.2$	$R2.3$
$WI$	0,38	0,37	0,48	0,32	0,43	0,38
$WII$	0,24	0,35	0,13	0,28	0,16	0,19
$WIII$	0,16	0,05	0,04	0,08	0,09	0,10
$WIV$	0,16	0,14	0,26	0,20	0,23	0,21
$WV$	0,03	0,04	0,05	0,07	0,05	0,06
$WVI$	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05

W ostatnim etapie obliczono

Końcowe wagi analizy modelu *Risks* dla wariantów decyzyjnych wynoszą:

$$W_{WR} = [0,086_{WI}; 0,038_{WII}; 0,016_{WIII}; 0,043_{WIV}; 0,009_{WV}; 0,008_{WVI}]^T$$

Z analizy składowych wektora wag wynika, że najmniejsze ryzyko inwestycji związane jest z wariantem VI – czyli pozyskaniem kopalni węgla kamiennego w wyniku zakupu akcji prywatyzowanych podmiotów górniczych (0,008). Porównywalnie niskie ryzyko związane jest również z wyborem wariantu V – czyli pozyskaniem kopalni węgla kamiennego na zasadzie akwizycji (0,009). Natomiast zdecydowanie największym ryzykiem obarczony jest wariant I – czyli inwestowanie w udostępnienie złoża perspektywicznego (0,086).

W tabeli 5 zestawiono wyniki ocen poszczególnych elementów modelu. Uwzględniono wagi lokalne uzyskane dla kryteriów i subkryteriów oraz wagi lokalne i globalne dla wariantów.

### Podsumowanie

Ocena wariantów decyzyjnych ze względu na *Benefits*, *Opportunities*, *Costs* i *Risks* pozwoliła na wskazanie najlepszego wariantu inwestycji. Optymalnym wariantem – zgodnie z zastosowaną multiplikatywną formułą (*multiplicative formula*)  $(B \cdot O)/(C \cdot R)$  – jest wariant V czyli pozyskanie kopalni węgla kamiennego na zasadzie akwizycji. Wskazany wariant decyzyjny charakteryzuje się zdecydowanie najwyższym priorytetem (wagą)  $(B \cdot O)/(C \cdot R)$  spośród wszystkich ocenianych wariantów i wynosi 25,11 (tab. 6).

TABELA 5

Zestawienie ocen elementów modeli B, O, C, R

TABLE 5

Listing of elements' evaluation in B, O, C, R models

Modele	Kryteria	$W_{LK}$	Subkryteria $W_{LS}$	$W_I$	$W_{II}$	$W_{III}$	$W_{IV}$	$W_V$	$W_{VI}$
Korzyści (0,35)	B1) jednostkowe koszty operacyjne	0,23		(0,05) 0,004	(0,03) 0,002	(0,11) 0,009	(0,23) 0,018	(0,41) 0,033	(0,16) 0,013
	B2) termin zrealizowania celu	0,06		(0,04) 0,001	(0,08) 0,002	(0,14) 0,003	(0,06) 0,001	(0,31) 0,007	(0,38) 0,008
	B3) wielkość nakładów inwestycyjnych	0,43		(0,05) 0,007	(0,11) 0,017	(0,23) 0,035	(0,08) 0,011	(0,26) 0,039	(0,28) 0,043
	B4) kontrola nad inwestycją	0,07		(0,27) 0,06	(0,09) 0,002	(0,05) 0,001	(0,28) 0,007	(0,28) 0,007	(0,03) 0,001
	B5) uwarunkowania środowiskowe	0,10		(0,04) 0,001	(0,06) 0,002	(0,15) 0,005	(0,10) 0,003	(0,43) 0,015	(0,23) 0,008
	B6) uwarunkowania społeczne	0,11		(0,36) 0,014	(0,19) 0,008	(0,10) 0,004	(0,28) 0,011	(0,04) 0,002	(0,03) 0,001
Szanse (0,19)	O1) żywotność inwestycji	0,17		(0,37) 0,012	(0,05) 0,002	(0,03) 0,001	(0,37) 0,012	(0,09) 0,003	(0,08) 0,003
	O2) stopień rozpoznania geologicznego	0,83		(0,04) 0,006	(0,09) 0,015	(0,25) 0,040	(0,08) 0,012	(0,28) 0,045	(0,26) 0,041
Koszt (0,26)	C1) nakłady inwestycyjne	0,63		(0,37) 0,061	(0,11) 0,018	(0,04) 0,007	(0,28) 0,046	(0,10) 0,016	(0,10) 0,016
	C2) koszty operacyjne	0,15		(0,16) 0,006	(0,24) 0,010	(0,25) 0,010	(0,19) 0,008	(0,06) 0,002	(0,09) 0,003
	C3) koszty środowiskowe	0,06		(0,41) 0,007	(0,12) 0,002	(0,09) 0,001	(0,22) 0,004	(0,11) 0,002	(0,05) 0,001
	C4) koszty przygotowania inwestycji	0,15		(0,48) 0,019	(0,17) 0,007	(0,10) 0,004	(0,18) 0,007	(0,04) 0,002	(0,04) 0,002
Ryzyko (0,20)	R1)ryzyko początkowe	0,75	R1.1) r. ekonomiczne (0,29)	(0,38) 0,016	(0,24) 0,010	(0,16) 0,007	(0,16) 0,007	(0,03) 0,001	(0,03) 0,001
			R1.2) r. społeczne (0,14)	(0,37) 0,008	(0,35) 0,007	(0,05) 0,001	(0,14) 0,003	(,04) 0,001	(0,04) 0,001
			R1.3) r. geologiczne (0,57)	(0,48) 0,041	(0,13) 0,011	(0,04) 0,004	(0,26) 0,022	(0,05) 0,004	(0,04) 0,004
	R2)ryzyko bieżącej działalności	0,25	R2.1) r. środowiskowe (0,07)	(0,32) 0,001	(0,28) 0,001	(0,08) 0,000	(0,20) 0,001	(0,07) 0,000	(0,05) 0,000
			R2.2) r. ekonomiczne (0,64)	(0,43) 0,014	(0,16) 0,005	(0,09) 0,003	(0,23) 0,007	(0,05) 0,002	(0,04) 0,001
			R2.3) r. geolog.-górnictwo (0,28)	(0,38) 0,005	(0,19) 0,003	(0,10) 0,001	(0,21) 0,003	(0,06) 0,001	(0,05) 0,001

$W_{LK}$  – waga lokalna kryteriów;  $W_{LS}$  – waga lokalna subkryteriów;  $W_I$ –VI (0,38) 0,001 – waga (lokalna) globalna ocenianych wariantów.

TABELA 6

Wynikowy ranking ocenianych wariantów decyzyjnych

TABLE 6

Resultant ranking of decision alternatives assessed

Warianty	Korzyści	Szanse	Koszty	Ryzyko	Formuła $B/C$	Formuła $B \cdot O/C \cdot R$
<b>W_V</b> – Pozyskanie kopalni węgla kamiennego na zasadzie akwizycji	0,101	0,048	0,021	0,009	4,719	<b>25,111</b>
<b>W_VI</b> – Pozyskanie kopalni węgla kamiennego w wyniku zakupu akcji prywatyzowanych podmiotów górniczych	0,074	0,044	0,022	0,008	3,428	<b>18,467</b>
<b>W_III</b> Inwestycja w budowę nowego poziomu wydobywczego (rejonu) w czynnej kopalni węgla kamiennego	0,056	0,041	0,023	0,016	2,510	<b>6,227</b>
<b>W_IV</b> – Rozbudowa kopalni	0,052	0,024	0,065	0,043	0,801	<b>0,440</b>
<b>W_II</b> Wznowieniem działalności wydobywczej na złożu kopalni zlikwidowanej	0,033	0,017	0,037	0,038	0,899	<b>0,393</b>
<b>W_I</b> – Udostępnienie złoża perspektywicznego	0,033	0,018	0,093	0,086	0,357	<b>0,073</b>

Komentując powyższy ranking należy zwrócić uwagę na bardzo nisko ocenione warianty związane z projektami udostępnienia złóż perspektywicznych i złóż kopalń zlikwidowanych. Wynika to z następujących czynników:

1. Bardzo wysokie nakłady inwestycyjne udostępniające złożo.
  2. Bardzo długi okres przygotowania inwestycji (ok. 15 lat):
    - działania zmierzające do pozyskania złoża – 4–5 lat,
    - prace projektowe i wszelkie niezbędne uzgodnienia – 2–3 lata,
    - udostępnienie złoża, w tym budowa powierzchniowej i podziemnej infrastruktury techniczno-technologicznej – 4–5 lat,
    - przygotowanie złoża do eksploatacji – 3–5 lat,
    - dochodzenie do pełnej zdolności produkcyjnej – 1 rok.
- Budowa nowej kopalni to decyzja o bardzo wysokim stopniu ryzyka. Wynika to z braku stabilnych i nie do końca możliwych do przewidzenia działań, tak w otoczeniu energetyki, jak i górnictwa. Wystarczy wymienić niektóre z nich:
- niepewność co do skali rozwoju gospodarczego Polski,
  - niepewność cen innych paliw dostępnych na rynku,
  - spadek produkcji węgla energetycznego w Polsce,
  - ustawodawstwo Unii Europejskiej, w tym ukierunkowanie na wysoki udział energii odnawialnej w strukturze produkcji energii elektrycznej,



- ograniczenia (regulacje) środowiskowe, ze szczególnym uwzględnieniem przepisów wynikających z Dyrektywy o unijnym handlu uprawnieniami zbywalnymi do emisji CO<sub>2</sub>,
  - spadek zapotrzebowania na węgiel kamienny przewidywany w polityce energetycznej do 2030 roku.
3. Bardzo duże ryzyko konfliktu społecznego na tle środowiskowym, związane z udostępnianiem nowych lub uprzednio zlikwidowanych złóż kopalni. Należy się liczyć z protestami na każdym etapie działalności górniczej, jednak etap uzyskiwania pierwszej koncesji uznać należy za najbardziej konfliktogenny.

Bardzo wysoko w rankingu znalazł się projekt dotyczący inwestycji w budowę nowego poziomu wydobywczego (rejonu) w czynnej kopalni węgla kamiennego. Należy zwrócić uwagę na ten wariant z wysokim prawdopodobieństwem realizacji. Przykładem może być Katowicki Holding Węglowy S.A., który ogłosił przetarg na eksploatację dwóch ścian w kopalniach Murcki-Staszic i Wujek dla podmiotów zewnętrznych. Jest to pierwsza taka oferta na rynku, a to oznacza, że taki wariant pozyskania węgla przez potencjalnego inwestora może być w krótkiej perspektywie bardzo realny.

Należy zaznaczyć, że przeprowadzenie kompleksowej oceny rozważanych wariantów z wykorzystaniem wielokryterialnej metody podejmowania decyzji AHP pozwoliło na rozpatrzenie wariantów inwestycyjnych w sposób systemowy. Ważnym jest, że cząstkowe wyniki uzyskane dla poszczególnych modeli B, O, C, R okazały się bardzo istotne w końcowej ocenie i wyborze wariantów. Zastosowanie procedury B, O, C, R umożliwiło w sposób przejrzysty przeprowadzenie wszechstronnej analizy wariantów decyzyjnych pozwalając podjąć optymalną decyzję wyboru wariantu inwestycyjnego.

#### LITERATURA

- Bascetin A., 2009 – The study of decision making tools for equipment. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 25, z. 3.
- Diederik J.D., Wijnmalen ., 2005 – Analysis of benefits, opportunities, costs, and risks (BOCR) with the AHP-ANP: A critical validation. The 8<sup>th</sup> International Symposium of the Analytic Hierarchy Process, 8–10 June 2005, University of Hawai'i, Honolulu (USA).
- Saaty T.L., 1977– Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 15.
- Saaty T.L., 2001 – The Analytic Network Process, fundamentals of decision making and priority theory. RWS Publications, Pittsburgh, Second edition.
- Saaty T.L., 2004 – Decision making the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 13(1).
- Saaty T.L., Ozdemir M.S., 2004 – The Encyclicon: a Dictionary of Decisions with Dependence and Feedback Based on the Analytic Network Process. RWS Publications, Pittsburgh.
- Sobczyk E.J., 2008 – Gospodarka zasobami złóż węgla kamiennego jako funkcja uciążliwości warunków geologiczno-górniczych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 24, z. 4/4.
- Trzaskalik T., 2008 – Wprowadzenie do badań operacyjnych z komputerem. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa. Wyd. 2.

ZASTOSOWANIE MATEMATYCZNYCH METOD WIELOKRYTERIALNYCH DO WYBORU OPTIMALNEGO WARIANTU  
ŹRÓDŁA POZYSKANIA WĘGLA KAMIENNEGO

Słowa kluczowe

Górnictwo węgla kamiennego, wybór wariantów decyzyjnych, Hierarchiczna Analiza Problemu AHP, analiza BOCR

Streszczenie

Artykuł przedstawia zastosowanie Metody Hierarchicznej Analizy Problemu AHP (ang. Analytic Hierarchy Process) do oceny i wyboru najlepszego wariantu związanego z możliwością pozyskania węgla kamiennego na cele energetyczne przez potencjalnego Inwestora funkcjonującego w sektorze górniczo-energetycznym. Analizie poddano 6 różnych źródeł pozyskania węgla, z których każde powinno zapewnić bezpieczną i niezależną dostawę surowca do nowo budowanej elektrowni na węgiel kamienny.

Przy wyborze najlepszego wariantu decyzyjnego uwzględniono pozytywne oraz negatywne oddziaływania wariantów, poprzez zastosowanie analizy BOCR: analiza korzyści – *benefits* (*B*), możliwości – *opportunities* (*O*), kosztów – *costs* (*C*) oraz ryzyka – *risks* (*R*). W tym celu zbudowano cztery niezależne modele hierarchiczne. Poszczególne modele charakteryzują się takimi samymi ocenianymi wariantami decyzyjnymi, natomiast różnią się kryteriami budującymi modele. W każdym z modeli zgodnie z zasadami metody AHP, obliczone zostały końcowe, globalne wagi dla ocenianych wariantów.

Wskazanie najlepszego wariantu uzyskano dzięki zastosowaniu multiplikatywnej formuły  $(B \cdot O)/(C \cdot R)$ , której wartość posłużyła do uszeregowania i wyboru najlepszego z ocenianych. Najlepszym wariantem decyzyjnym jest wariant, którego stosunek (*BO*) do (*CR*) jest najwyższy.

THE APPLICATION OF MATHEMATICAL MULTI-CRITERIA METHODS FOR CHOOSING THE OPTIMAL ALTERNATIVE  
FOR HARD COAL ACQUISITION

Key words

Hard coal mining, choice of decision alternatives, Analytic Hierarchy Process, BOCR analysis

Abstract

The paper presents the application of the Analytic Hierarchy Process technique to evaluate and choose the best alternative for acquiring hard coal for energy purposes by a potential Investor operating in the mining and energy sector. Six different sources supposed to provide hard coal were analysed, each of which might ensure a secure and independent supply of the material to the newly built coal-fired power plant.

When choosing the best decision alternative, the positive and negative impacts of alternatives were considered through the BOCR analysis: benefits (*B*), opportunities (*O*), costs (*C*) and risks (*R*) analysis. For this purpose, 4 independent hierarchical models were developed. Different models have the same decision alternatives assessed, but they differ in criteria used to develop the models. In each of the models, in accordance with the AHP rules, were calculated final, global weights for the alternatives being assessed. Showing the best alternative was possible by applying the multiplicative formula  $(B \cdot O)/(C \cdot R)$ , which value was used to rank and choose the best alternative from all assessed ones. The best decision alternative is the alternative where the  $(B \cdot O)/(C \cdot R)$  ratio is the highest.