

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Jarosława Kulpy pt. „Metodyka oceny atrakcyjności złoża i kwantyfikacja ryzyka
w procesie eksploatacji”

Podstawą wykonania niniejszej recenzji rozprawy doktorskiej jest Uchwała Nr 6/II/2024 Rady Naukowej Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk w Krakowie z dnia 01.08.2024 r.

Ocena strony formalnej pracy

Rozprawa doktorska mgr Jarosława Kulpy została zrealizowana w Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk w Krakowie pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Eugeniusza Jacka Sobczyka. Liczy ona 183 strony, tekst podstawowy obejmuje 10 merytorycznych rozdziałów zawierających 61 rysunków i 38 tabel. Jego częścią składową jest również wykaz 216 pozycji literatury.

Układ pracy obejmuje następujące rozdziały:

1. Wprowadzenie
2. Cel i tez badawcza oraz uzasadnienie podjęcia tematu pracy
3. Ryzyko w projektach inwestycyjnych
4. Cyfrowy model złoża i narzędzia do planowania i harmonogramowania produkcji
5. Metody wielokryterialne wspomaganie decyzji
6. Metodyka kwantyfikacji poziomu ryzyka podziemnej eksploatacji złóż węgla kamiennego
7. Metodyka oceny atrakcyjności złoża
8. Oszacowanie ryzyka w procesie eksploatacji
9. Analiza efektywności ekonomicznej z uwzględnieniem wskaźnika RF
10. Podsumowanie i wnioski

W rozdziale pierwszym, Doktorant wprowadził w tematykę górniczych projektów inwestycyjnych i metod ich oceny. Wskazał, że polski przemysł wydobywczy węgla kamiennego znajduje się w trudnej sytuacji technicznej i ekonomicznej, ze względu na wysokie koszty funkcjonowania i zmienność cen węgla. Autor ocenił że, w tej sytuacji usprawnienie procesów planowania wydobycia, uwzględniające złożoność warunków geologiczno-górnictwa, mogłoby poprawić efektywność ekonomiczną kopalń. Rozdział drugi, to sformułowany problem badawczy i cel pracy oraz teza badawcza. Do zdefiniowania problemu badawczego skłoniły Autora rozprawy własne doświadczenia związane z poziomem wykorzystania danych geologicznych oraz górniczych, zagregowanych w cyfrowym modelu złoża. W polskich warunkach tylko dwie spółki górnicze posiadają w pełni wdrożone rozwiązania informatyczne obejmujące oprogramowanie do modelowania złóż, w tym weryfikacji i przechowywania danych geologicznych oraz planowania i harmonogramowania produkcji górniczej. Powyższe obserwacje pozwoliły Doktorantowi na zdefiniowanie problemu badawczego, polegającego na ocenie złoża pod kątem efektywności jego eksploatacji w podejściu holistycznym. Miara

atrakcyjności w tym podejściu, jest zagregowany wskaźnik RF, określony dla ścian, parcel i złoża, będący podstawą do korekty stopy dyskontowej przy ocenie projektu inwestycyjnego. Głównym celem rozprawy było opracowanie metodyki oceny atrakcyjności złoża oraz kwantyfikacja ryzyka w procesie eksploatacji w podejściu wielokryterialnym, z wykorzystaniem cyfrowego modelu złoża, narzędzi do harmonogramowania produkcji oraz modelu oceny efektywności ekonomicznej.

Na 25 stronach rozdziału trzeciego, Autor syntetycznie przedstawił definicję ryzyka i proces zarządzanie ryzykiem, a także metody oceny ryzyka w górniczych projektach inwestycyjnych. Analiza literatury w zakresie oceny ryzyka w górniczych projektach inwestycyjnych, metod wspomagania decyzji oraz wykorzystania cyfrowego modelu złoża w planowaniu górniczym pozwoliła Doktorantowi ustalić stan wiedzy w tych obszarach i określić obszary wymagające dalszych badań.

W rozdziale czwartym (obejmującym 17 stron) Doktorant, na podstawie przeglądu literatury wykazał, że cyfrowy model złoża powinien być powszechnie wykorzystywany jako narzędzie w dokumentowaniu budowy geologicznej złoża oraz przy szacowaniu wielkości jego zasobów. Cyfrowy model złoża można bowiem traktować jako bazę danych geologicznych (przedstawioną w ciągłej, trójwymiarowej formie) dla planowania i harmonogramowania produkcji górniczej.

Na 18 stronach rozdziału piątego, Autor opisał znaczenie metody wieloatrybutowego wspomagania decyzji (określanej także, jako wielokryterialne metody dyskretne), szczególnie przy niewielkiej liczbie ustalonych wariantów decyzyjnych. Przegląd zastosowań tych metod wykazał, że najczęściej stosowaną jest metoda Hierarchicznej Analizy Problemu (AHP) oraz metoda FAHP, która jest jej ulepszoną wersją.

Rozdziały szósty (34 strony), siódmy (18 stron), ósmy (8 stron) i dziewiąty (28 stron) stanowią zasadniczą merytoryczną część rozprawy doktorskiej. Doktorant przedstawił w nich własną metodykę oceny atrakcyjności złoża na bazie zidentyfikowanych i istotnych czynników ryzyka, których wpływ został skwantyfikowany przy zastosowaniu rozmytej metody AHP z wykorzystaniem danych geologiczno-górniczych pochodzących z cyfrowego modelu złoża. Zaproponowana metodyka składa się z etapów obejmujących:

- Opracowanie cyfrowego modelu geologicznego złoża (i harmonogramu eksploatacji) z jego rozbudową o wybrane czynniki ryzyka powiązane z warunkami geologicznymi i górniczymi.
- Określenie i selekcję czynników, które uznano za istotne dla kwantyfikacji wskaźnika atrakcyjności złoża i ryzyka (jako jego odwrotności) za pomocą analizy statystycznej wykorzystującej regresję segmentową.
- Opracowanie wskaźnika ryzyka eksploatacji RF z użyciem rozmytego analitycznego procesu hierarchicznego FAHP.
- Wyznaczenie wartości wskaźnika RF dla poszczególnych partii w testowym złożu węgla kamiennego oraz niezależnie dla wybranych złóż węgla kamiennego.
- Implementację wartości wskaźnika ryzyka RF dla potrzeb korekty stopy dyskontowej, która może być użyta do wyceny wartości określonej partii (parceli) górniczej lub całego złoża;
- Opracowanie modelu ekonomicznego do oceny efektywności ekonomicznej z uwzględnieniem wskaźnika RF.
- Weryfikację metodyki na wybranych kopalniach (projektach inwestycyjnych).

Rozdział dziesiąty (8 stron), obejmuje syntetycznie podsumowanie rozprawy doktorskiej oraz osiem wniosków, w których Doktorant potwierdził, że opracowana autorska metodyka oceny atrakcyjności złoża i kwantyfikacji ryzyka poprzez oszacowanie wskaźnika RF udowodniła przyjętą tezę, że istnieje możliwość wykorzystania informacji o zmienności warunków geologicznych i górniczych zawartych w cyfrowym modelu złoża do oceny jego atrakcyjności i oszacowania ryzyka w procesie eksploatacji.

Układ rozprawy, którego kompozycja jest logiczna oceniam pozytywnie. Uważam, że poszczególne jej części mają odpowiednie proporcje i tworzą zwartą całość odnoszącą się do treści wyrażonej w tytule, a także do jej celu i przedstawionego modelu procesu badawczego. Generalnie stwierdzam, że **recenzowana rozprawa posiada poprawny układ formalny. Zawiera wszystkie niezbędne elementy swojej struktury przynależne pracom naukowym.**

Ocena wartości naukowej pracy

Zgodnie z wymogami Ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym...” rozprawa doktorska „...ma stanowić oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego oraz wykazać... ogólną wiedzę teoretyczną w danej dyscyplinie naukowej i umiejętność samodzielnego prowadzenia” przez Doktoranta „...pracy naukowej”.

Polski przemysł wydobywczy węgla kamiennego znajduje się obecnie w trudnej sytuacji technicznej i ekonomicznej, ze względu na wysokie koszty funkcjonowania i zmienność cen węgla. Autor rozprawy wskazał, że w tej sytuacji usprawnienie procesów planowania wydobycia, uwzględniające złożoność warunków geologiczno-górnich, mogłoby poprawić efektywność ekonomiczną kopalń.

Badania literaturowe Autora w zakresie oceny ryzyka w górniczych projektach inwestycyjnych, metod wspomagania decyzji oraz wykorzystania cyfrowego modelu złoża w planowaniu górniczym, pozwoliły ustalić aktualny stan wiedzy w tych obszarach i określić obszary wymagające dalszych badań. Podstawowym sposobem uwzględnienia ryzyka w analizie ekonomicznej przedsięwzięcia jest oszacowanie kosztu kapitału. Często stosowanym w tym zakresie podejściem jest model wyceny aktywów kapitałowych (CAPM). Model ten pozwala przedstawić zależność między ponoszonym ryzykiem systematycznym, a oczekiwaną stopą zwrotu z portfela aktywów finansowych. Ocena efektywności ekonomicznej inwestycji ma charakter prognostyczny, podczas gdy parametry modelu CAPM opierają się na danych z przeszłości. Ryzyko rynkowe określane jest na podstawie pochodzących z analizy regresji danych historycznych, podczas, gdy prognozowana wielkość β , niezbędna do oszacowania kosztu kapitału własnego, opiera się w ostateczności na subiektywnej ocenie prognostyka. Doktorant wykazał również, że cyfrowy model złoża powinien być wykorzystywany powszechnie jako narzędzie w dokumentowaniu budowy geologicznej złoża oraz przy szacowaniu wielkości jego zasobów. Cyfrowy model złoża można bowiem traktować jako bazę danych geologicznych dla planowania i harmonogramowania produkcji górniczej. Oprócz parametrów strukturalnych i jakościowych może on zawierać informacje pozwalające na klasyfikację zasobów złoża do zdefiniowanych przez użytkownika dyskretnych grup (kategorie rozpoznania, stopnie i kategorie zagrożeń naturalnych i in.). Natomiast dokonany przez Autora przegląd zastosowań wielokryterialnych metod dyskretnych wykazał, że najczęściej stosowaną metodą wspomagania decyzji wielokryterialnych jest metoda Hierarchicznej Analizy Problemu (AHP). Metoda ta doczekała się wielu modyfikacji i ulepszeń. Jedną z nich jest metoda FAHP, która, podobnie jak w przypadku klasycznej metody AHP, wykorzystuje opinie ekspertów do oszacowania współczynników wagowych określających ważność poszczególnych cech. Jednocześnie FAHP pozwala na eliminację tych cech, które mają najmniejsze znaczenie w zagadnieniu porządkowania liniowego obiektów poprzez ustalenie wagi poszczególnych cech na podstawie rozmytych opinii ekspertów.

Mgr inż. Jarosław Kulpa jako główny cel rozprawy określił opracowanie metodyki oceny atrakcyjności złoża oraz kwantyfikacja ryzyka w procesie eksploatacji w podejściu wielokryterialnym, z wykorzystaniem cyfrowego modelu złoża, narzędzi do harmonogramowania produkcji oraz modelu

oceny efektywności ekonomicznej. Celami szczegółowymi były: (1) opracowanie cyfrowych modeli wybranych złóż węgla koksowego uwzględniających skonstruowane i skwantyfikowane czynniki ryzyka, (2) opracowanie harmonogramów produkcji pod kątem oceny zmienności wydobywania węgla, zanieczyszczenia urobku, rozkładu parametrów jakościowych oraz czynników ryzyka, (3) zbudowanie modelu hierarchicznego dla oceny atrakcyjności złóż węgla koksowego. (4) zaproponowanie metodyki doboru (korekty) zmiennej w czasie stopy dyskontowej oraz (5) opracowanie modelu ekonomicznego pozwalającego na ocenę efektywności ekonomicznej projektu inwestycyjnego z uwzględnieniem ryzyka eksploatacji. Moim zdaniem cel rozprawy został sformułowany prawidłowo i w konsekwencji przyczynia się do rozwiązania problemu badawczego. Pozytywnie oceniam również przedstawienie przez Autora modelu procesu badawczego i wybranych metod badawczych.

Opracowana przez Doktoranta metodyka oceny atrakcyjności złoża na bazie zidentyfikowanych i istotnych czynników ryzyka, których wpływ został skwantyfikowany przy zastosowaniu rozmytej metody AHP z wykorzystaniem danych geologiczno-górnicznych pochodzących z cyfrowego modelu złoża obejmuje następujące etapy:

- Opracowanie cyfrowego modelu geologicznego złoża z jego rozbudową o wybrane czynniki ryzyka powiązane z warunkami geologicznymi i górnictwem. W jego ramach Autor opracował modele strukturalne dla sześciu złóż węgla koksowego, które opisują budowę fizyczną złoża oraz modele obrazujące zmienność parametrów jakościowych węgla w przestrzeni złoża. Dla potrzeb kwalifikacji ryzyka eksploatacji zasobów węgla modele cyfrowe Autor rozbudował o osiem parametrów opisujących poszczególne typy zagrożeń oraz parametry geologiczno-górniczne.
- Określenie i selekcję czynników istotnych dla kwantyfikacji wskaźnika atrakcyjności złoża i ryzyka za pomocą analizy statystycznej wykorzystującej regresję segmentową oraz opracowanie wskaźnika ryzyka eksploatacji RF z użyciem rozmytego analitycznego procesu hierarchicznego FAHP. Do analizy wpływu czynników ryzyka na jednostkowe koszty eksploatacji Doktorant wykorzystał wyniki produkcyjne i ekonomiczne 81 ścian wyeksploatowanych w latach 2016-2022. Łącznie analizą objął 21 kryteriów wpływających na jednostkowe koszty eksploatacji. Za pomocą analizy statystycznej wykorzystującej regresję segmentową wytypował z tej grupy 10 czynników, które posłużyły do opracowania prognozy ryzyka w dwóch złożach przewidzianych do eksploatacji do 2041 r. oraz 2056 r. (wybrane zostały dwie kopalnie o najmniejszym i największym poziomie ryzyka).
- Opracowanie wskaźnika ryzyka eksploatacji RF z użyciem rozmytego analitycznego procesu hierarchicznego FAHP. W etapie tym Autor uwzględnił czynniki wynikające z zagrożeń naturalnych, budowy geologicznej złoża (pokładu) oraz ograniczeń technicznych. Opracował wskaźnik ryzyka RF, do którego konstrukcji zastosował rozmytą analizę procesu hierarchicznego (FAHP). Zaproponowany przez Doktoranta model hierarchiczny, opracowany został na podstawie wytypowanych czynników ryzyka i składa się z 4 poziomów. Na pierwszym z nich umieścił główny cel zadania – ocenę poziomu ryzyka w partiach złoża. Drugi poziom modelu reprezentowany jest przez 3 główne grupy czynników ryzyka, do których zaliczył: czynniki górnictwa, czynniki geologiczne oraz zagrożenia naturalne. Na ostatnim, czwartym poziomie znalazły się warianty rozwiązania, czyli wartości wskaźnika RF w poszczególnych partiach złoża. W celu określenia stabilności modelu oceny atrakcyjności złóż węgla koksowego, przeprowadzona została przez Autora analiza wrażliwości. Dowiodła ona, że zmiana wag czynników geologicznych, zagrożeń naturalnych oraz czynników technicznych

(górnictwa) nie wpływa zasadniczo na ranking atrakcyjności analizowanych parcel eksploatacyjnych.

- Wyznaczenie wartości wskaźnika RF dla poszczególnych partii w testowym złożu węgla kamiennego oraz niezależnie dla wybranych złóż węgla kamiennego. Wartości wskaźnika ryzyka RF uzyskane zostały przez Autora rozmytą metodą AHP. Oszacowano je dla sześciu złóż i ośmiu partii wybranego złoża węgla kamiennego. Wskaźnik składa się z dziesięciu czynników ryzyka zgrupowanych w trzy grupy: czynniki górnicze, czynniki geologiczne i zagrożenia naturalne. Wyniki modelowania rozmytą metodą AHP wskazały na duże różnice atrakcyjności w analizowanych partiach co skłania do wniosku o dużej zmienności czynników geologicznych w obrębie jednego złoża i wynikających z nich parametrów technicznych wyrobisk eksploatacyjnych. Następnie Autor oszacował zagregowane wskaźniki RF dla wszystkich modelowanych złóż. W kolejnym kroku dla dwóch wybranych złóż (kopalń) z wysokim i niskim poziomem atrakcyjności (określonej miarą atrakcyjności RF) opracował harmonogramy eksploatacji i prognozy wskaźnika RF dla każdego roku (dla obydwu kopalń).
- Implementacja wartości wskaźnika ryzyka RF dla potrzeb korekty stopy dyskontowej, która może być użyta do wyceny wartości określonej partii (parceli) górniczej lub całego złoża. Doktorant, oszacowane wcześniej wartości wskaźników RF, wykorzystał do wyznaczania skorygowanej oceny ryzyka własnego przedsięwzięć inwestycyjnych, w ocenie efektywności ekonomicznej wybranych złóż węgla koksowego. Zaproponowana metodyka pozwoliła na wyznaczenie skorygowanej wartości ważonego kosztu kapitału (WACC) dla poszczególnych partii i całej kopalni (złoża testowe) oraz dla poszczególnych lat w harmonogramie produkcji dla wybranych kopalń A i D.
- Opracowanie modelu ekonomicznego do oceny efektywności ekonomicznej z uwzględnieniem wskaźnika RF. Autor rozprawy dla potrzeb oceny efektywności ekonomicznej metodą NPV dwóch wytypowanych złóż węgla kamiennego opracował modele ekonomiczne bazujące na kalkulacji wolnych przepływów pieniężnych w podejściu FCFF. Dla obu zakładów górniczych przygotowane zostały harmonogramy wydobycia i produkcji węgla handlowego (na podstawie danych pochodzących z cyfrowego modelu złoża), oszacował przychody ze sprzedaży (na podstawie referencyjnej ceny węgla oraz zmiennych w czasie parametrów jakościowych urobku), określił wielkość nakładów inwestycyjnych oraz kosztów operacyjnych, jak i pozostałych aspektów technicznych i finansowych (jak np. zmienny w czasie WACC czy wpłaty na FLZG).
- Weryfikacja metodyki na wybranych kopalniach (projektach inwestycyjnych). W etapie tym Autor rozprawy przeprowadził ocenę efektywności ekonomicznej przy pomocy metod NPV i IRR, w dwóch wariantach: ze (i) stałą oraz (ii) zmienną w czasie stopą dyskontową z uwzględnieniem wskaźnika RF i korekty stopy dyskontowej.

Podsumowując rozprawę Doktorant potwierdził, że opracowana autorska metodyka oceny atrakcyjności złoża i kwantyfikacji ryzyka poprzez oszacowanie wskaźnika RF udowodniła tezę pracy, że istnieje możliwość wykorzystania informacji o zmienności warunków geologicznych i górniczych zawartych w cyfrowym modelu złoża do oceny jego atrakcyjności i oszacowania ryzyka w procesie eksploatacji.

Moim zdaniem przeprowadzone badania i opracowaną metodykę należy uznać za wkład Autora pracy w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Jarosława Kulpy zasługuje na pozytywną ocenę pod względem wartości naukowej. Uważam, że Autor pracy w sposób prawidłowy

sformułował problem badawczy, a następnie dla jego rozwiązania, przyjął odpowiedni cel. Ponadto w sposób prawidłowy dobrał metody badawcze. Realizacja poszczególnych etapów procesu badawczego umożliwiła osiągnięcie celu pracy. Autor wykazał się umiejętnością syntetycznego podsumowania wyników i sformułowania wniosków.

W mojej opinii, podjęty problem badawczy jest aktualny, przedstawione wyniki pracy są oryginalne i stanowią wkład ich Autora w rozwój dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka. Ponadto istotne jest, że mają one ważne znaczenie dla praktyków zarządzania w kopalniach czy w przedsiębiorstwach górniczych.

Rozprawa doktorska zasługuje na wysoką ocenę, a otrzymane rezultaty są interesujące zarówno z poznawczego, jak i z aplikacyjnego punktu widzenia.

Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Jarosława Kulpy „Metodyka oceny atrakcyjności złożeń i kwantyfikacja ryzyka w procesie eksploatacji” odpowiada warunkom określonym w art. 13 ustęp 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, w związku z art.179 ustęp 2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie Wyższym. Stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i świadczy o wiedzy teoretycznej Doktoranta w dyscyplinie naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, jak też potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Ponieważ Doktorant spełnia ustawowe wymogi uzasadniające nadanie stopnia doktora nauk technicznych, toteż wnoszę do Rady Naukowej Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk w Krakowie o przyjęcie recenzowanej rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

