

prof. dr hab. inż. Marian Turek

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jarosława Kulpy pt.

„Metodyka oceny atrakcyjności złoża i kwantyfikacja ryzyka w procesie eksploatacji”

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Eugeniusz Jacek Sobczyk

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie zlecenia Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie, zawartego w piśmie znak: AO-520-19/24 z dnia 01.08.2024 roku.

2. Problem badawczy postawiony w pracy

Problemem badawczym określonym w pracy jest możliwość oceny złoża węgla kamiennego pod kątem efektywności jego eksploatacji w podejściu holistycznym. Ma to umożliwić zaproponowana przez Doktoranta metodyka oceny atrakcyjności złoża, uwzględniająca ocenę ryzyka związanego z jego wybieraniem (w oparciu o cyfrowy model złoża i harmonogram robót górniczych) oraz ocenę efektywności ekonomicznej planowanego przedsięwzięcia.

3. Ocena formalna, zakres pracy

Przedłożona do oceny praca, licząca 183 strony, składa się z dziesięciu rozdziałów – w tym wprowadzenia, przedstawienia celu podjęcia pracy (**rozdziały pierwszy i drugi**) oraz podsumowania i wniosków – a także wykazu literatury, spisów tabel i rysunków (liczba tabel wynosi 39, a rysunków 61).

Rozdziały trzeci, czwarty i piąty, zredagowane w oparciu o liczne źródła literaturowe, są zbiorami informacji dotyczących zagadnień związanych z:

- a. ryzykiem, zarządzaniem ryzykiem, ryzykiem realizacji eksploatacją, w podejściu wielokryterialnym z wykorzystaniem cyfrowego modelu złoża, narzędzi do górniczych projektów inwestycyjnych, atrakcyjnością eksploatacji złóż w aspekcie określonych warunków techniczno-ekonomicznych i opłacalności ekonomicznej – rozdział trzeci,

- b. rozwojem tworzenia cyfrowego modelu złóż i jego wykorzystania w opracowywaniu harmonogramów eksploatacji w kopalniach węgla kamiennego – rozdział czwarty,
- c. metodami wielokryterialnego wspomaganie decyzji AHP i FAHP – rozdział piąty.

Rozdział szósty jest poświęcony szczegółowemu opisowi metodyki skwantyfikowania poziomu ryzyka związanego z podziemną eksploatacją złoża węgla kamiennego. Podstawę do tego stanowi skonstruowany w pierwszej kolejności cyfrowy model złóż wybranych do analizy w pracy. W oparciu o wykonane otwory badawcze (lub wcześniej prowadzoną eksploatację) jest możliwe zobrazowanie stratygrafii zalegających w nim warstw, z zamodelowaniem powierzchni stropów i spągów oraz miąższości poszczególnych pokładów, miąższości nadkładu i warstw międzypokładowych oraz deformacji występujących w zaleganiu pokładów. W następnej kolejności, dla potrzeb kwantyfikacji ryzyka eksploatacji poszczególnych pokładów, cyfrowe modele złóż zostały rozszerzone o osiem parametrów, ustalonych przez Doktoranta, charakteryzujących wybrane zagrożenia naturalne lub opisujących wybrane parametry geologiczno-górnice, mogące mieć wpływ na ryzyko planowanej eksploatacji. Są nimi (w kolejności przedstawianej w pracy):

1. metanowość całkowita,
2. kategoria rozpoznania złoża w standardzie ⁰JRC Code,
3. zagrożenie wybuchem pyłu węglowego,
4. wskaźnik zaburzeń tektonicznych i sedymentacyjnych (ustalony przez Autora),
5. zagrożenie wodne,
6. skłonność węgla do samozapalenia,
7. zagrożenie tąpnięciami,
8. zagrożenie wyrzutami gazów i skał.

W opracowywaniu cyfrowego modelu złoża ostatnim krokiem było przygotowanie trójwymiarowego modelu planowanych wyrobisk wraz z harmonogramem prowadzenia w nich robót górniczych.

W oparciu o uzyskane wyniki produkcyjne i ekonomiczne 81 ścian, którymi eksploatowano pokłady w latach 2016–2022, z wykorzystaniem testu Shapiro-Wilka na normalność rozkładu ich wartości oraz analiz eksperckich, do prowadzenia analiz statystycznych, w pracy zostało ustalone 17 tzw. zmiennych objaśniających odnoszących się do zmiennej objaśnianej (w kontekście wzrostu ryzyka eksploatacji), którą są koszt jednostkowe brutto jej prowadzenia. Po przeprowadzeniu analiz statystycznych danych dotyczących uzyskanych wyników, z wykorzystaniem regresji segmentowej, pozwalającej

na modelowanie zależności między różnymi zmiennymi, do analiz mających na celu oszacowanie wpływu ryzyka na efektywność prowadzenia eksploatacji w różnych partiach zasobowych, Doktorant zdecydował o wykorzystaniu dziesięciu czynników, podzielonych na trzy grupy:

1. czynniki górnicze: wybieg ściany, długość ściany, odległość do najbliższego szybu materiałowo-zjazdowego,
2. czynniki geologiczne: miąższość, zasoby do wydobycia, głębokość zalegania,
3. zagrożenia naturalne: zagrożenie metanowe, wskaźnik samozapalności węgla, zagrożenie tąpnięciami, wskaźnik zaburzeń tektonicznych i sedymentacyjnych.

Posłużyły one następnie do oceny atrakcyjności złoża. Do tego celu wykorzystano wskaźnik ryzyka eksploatacji RF, do konstrukcji którego zastosowano rozmytą analizę procesu hierarchicznego. Temu zagadnieniu jest poświęcony **siódmy rozdział** pracy.

W pierwszej kolejności, w oparciu o opinie 16 ekspertów (pracowników naukowych oraz praktyków inżynieryjno-technicznych kopalń) zostały wyliczone wektory priorytetów dla wszystkich czynników łącznie między sobą oraz w poszczególnych grupach. W związku z tym, że część czynników jest stymulantami, a część destymulantami, z wykorzystaniem odpowiednich wzorów matematycznych należy je wcześniej ujednolicić i doprowadzić do porównywalności, a następnie można wyliczyć wartości wskaźnika ryzyka. Wartości te zostały wyliczone w dwóch wariantach.

Pierwszy z nich dotyczył sześciu złóż węgla w kopalniach oznaczonych w pracy od „A” do „F”, w których oceniano wszystkie zaprojektowane ściany. Na podstawie wyliczonego wskaźnika ryzyka oceniono, że najniższe ryzyko (największa atrakcyjność) dotyczy kopalni „C”, a w następnej kolejności kopalni „A”.

W drugim przypadku wartości wskaźnika wyliczano dla wszystkich ścian zaprojektowanych w kopalni „C”, zlokalizowanych w ośmiu partiach pokładów. W tym przypadku również możliwe było wskazanie partii charakteryzującej się najniższym ryzykiem eksploatacji.

Ósmy rozdział pracy jest poświęcony prezentacji autorskiej koncepcji oceny ryzyka własnego wybierania złoża węgla w oparciu o wskaźnik RF z wykorzystaniem ważonego kosztu niezbędnych kapitałów własnych i obcych (WACC).

W podejściu tym, ryzyko projektowe jest rozumiane jako składnik kosztu kapitału własnego (KKW). Autor proponuje dostosowanie WACC tak, aby oddać specyfikę i zmienność parametrów geologicznych i górniczych, mających wpływ na ocenę ekonomiczną

złóż węgla. Kluczowe założenie to możliwość agregacji zmienności czynników geologicznych i górniczych w postaci ryzyka projektowego R_p , wyrażonego wskaźnikiem RF.

Model ten zakłada, że koszt kapitałów własnych (KKW) można obliczać na podstawie modelu CAPM, uwzględniając premię za ryzyko projektowe. Z kolei koszt kapitałów obcych (KKO) jest sumą stopy wolnej od ryzyka (r_f), dostosowanej do okresu trwania projektu, oraz marży banku (W), która obejmuje ocenę ryzyka projektowego.

Wzór na WACC uwzględnia również udziały kapitału własnego i obcego oraz podatek dochodowy. Na tej podstawie Autor proponuje wzór na wyznaczenie wskaźnika R_p , który można następnie zastosować do kalkulacji KKW i KKO dla poszczególnych partii złóż.

Model ten zakłada, że koszt kapitałów własnych można obliczać na podstawie modelu CAPM, uwzględniając premię za ryzyko projektowe. Z kolei, koszt kapitałów obcych jest sumą stopy wolnej od ryzyka, dostosowanej do okresu trwania projektu, oraz marży banku, obejmującej ocenę ryzyka projektowego.

Następnie, Doktorant dokonał analizy zmienności wskaźnika RF dla różnych partii złóż, co prowadzi do zróżnicowanych wartości WACC.

W drugiej części rozdziału dla wybranych kopalń węgla kamiennego „A” i „D” Autor obliczył średnioroczne koszty kapitału oraz oszacowuje ich zmienność w czasie na podstawie zaproponowanego wskaźnika RF. W podsumowaniu podkreślił, że powszechnie przyjmuje się iż stopa dyskontowa powinna być degresywna w miarę rozwoju projektu, ale jednocześnie zaznaczył, że wzrost ryzyka związany z eksploatacją w trudniejszych warunkach geologiczno-górniczych może prowadzić do wzrostu stopy dyskontowej będącej miarą ryzyka projektu. W związku z tym, zmienne w czasie warunki eksploatacji powinny znaleźć odzwierciedlenie w odpowiedniej korekcie stopy dyskontowej.

W **dziwiątym rozdziale** są zawarte dane i obliczenia dotyczące efektywności ekonomicznej eksploatacji złóż węgla koksowego w kopalniach:

- „A”, dla której wyliczony wskaźnik ryzyka był najmniejszy – wybranie około 113,3 mln Mg węgla w ciągu 32 lat, z jednoczesnym biegiem 3–4 ścian,
- „D”, dla której wyliczony wskaźnik ryzyka był największy – wybranie około 67,3 mln Mg węgla w ciągu 17 lat, z jednoczesnym biegiem 3–4 ścian.

W przypadku każdej kopalni zostały określone: wielkości wydobywania brutto oraz węgla handlowego (61,3 mln Mg w kopalni „A”, 46,7 mln Mg w kopalni „D”), parametry jakościowe węgla, parametry opisujące czynniki ryzyka eksploatacji w przypadku każdej ściany oraz dodatkowo w odniesieniu do koksu wyprodukowanego z węgla – wskaźnik reakcyjności koksu i wytrzymałość koksu po reakcji.

Następnie dane te zostały wykorzystane do oszacowania:

- wielkości niezbędnych nakładów inwestycyjnych w zakresie budownictwa podziemnego,
- nakładów na wyposażenie maszynowe,
- wielkości zatrudnienia,
- kosztów operacyjnych związanych z: wynagrodzeniami z narzutami, usługami obcymi, zużyciem materiałów i energii, podatkami i opłatami, pozostałymi kosztami rodzajowymi,
- wielkości odpisów na Fundusz Likwidacji Zakładu Górniczego na koniec okresu eksploatacji,
- przychodów ze sprzedaży węgla handlowego (przy założeniu, że jego cena w całym okresie eksploatacji wyniesie 800 zł/Mg).

W analizie efektywności ekonomicznej wykorzystano metody wartości zaktualizowanej netto (NPV) oraz wewnętrznej stopy zwrotu (IRR), stosując w dwóch wariantach kolejno stałą i zmienną w czasie stopę dyskontową. Wyniki wykazały, że zmienność kluczowych parametrów, takich jak koszty, nakłady i ceny węgla, ma istotny wpływ na wartość NPV obu kopalń.

W celu zidentyfikowania zmiennych o kluczowym wpływie na efektywność ekonomiczną analizowanych kopalń – miernik NPV, oraz jako uzupełnienie ww. przedstawionej oceny efektywności ekonomicznej wybranych kopalń, przeprowadzono analizę wrażliwości. Zgodnie z algorytmem analizy, za zmienną objaśnianą przyjęto NPV (wyliczone na podstawie zmiennego WACC), natomiast do zmiennych objaśniających zaliczono: wynagrodzenia wraz z narzutami, koszty materiałów i energii, koszty usług obcych, nakłady inwestycyjne oraz cenę węgla handlowego. W analogiczny sposób, jak w przypadku analizy wrażliwości NPV, wykonano analizę wrażliwości dla skumulowanego zysku netto, skumulowanej wartości EBITDA oraz skumulowanej wartości FCFF.

Ostatni, **dziesiąty rozdział** pracy zawiera jej podsumowanie i wnioski.

4. Merytoryczna ocena pracy

Recenzowana rozprawa doktorska Pana Jarosława Kulpy mieści się w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Poruszono w niej bardzo istotne zagadnienia dla branży podziemnego górnictwa węglowego, dotyczące efektywności ekonomicznej i ryzyka związanych z planowanymi zamierzeniami dotyczącymi udostępniania i wybierania nowych złóż. Postawiony przez

Doktoranta podstawowy cel pracy, którym było opracowanie metodyki oceny atrakcyjności złoża oraz ryzyka w procesie eksploatacji w podejściu wielokryterialnym (parametry geologiczno-górnice i ocena efektywności ekonomicznej), został w pełni zrealizowany.

W poszczególnych etapach opracowywania metodyki zwracają uwagę: staranny i trafny dobór pozycji przeglądu literatury przedmiotu, stanowiącego jasne wprowadzenie w poruszaną tematykę pracy, bardzo dobra praktyczna znajomość prezentowanych kwestii dotyczących cyfrowego modelu złóż, geologiczno-górnich uwarunkowań prowadzenia podziemnej eksploatacji, a w szczególności doskonałe opanowanie wykorzystania wielu, często skomplikowanych zagadnień matematycznych.

5. Uwagi do treści pracy

Pod względem merytorycznym recenzowaną pracę oceniam pozytywnie. Chciałbym jednak przedstawić kilka uwag dotyczących jej treści.

1. Z powodu konieczności wykorzystywania określonych parametrów, pewną „niedogodnością” praktycznego stosowania nowo opracowanej metody jest wymóg wcześniejszego stosunkowo dobrego i bardzo dobrego rozpoznania złóż. Dotyczy to, między innymi, parametrów geometrycznych złoża, uwarunkowań geologicznych, stopni i kategorii zagrożeń naturalnych.

Innym problemem może być także konieczność dysponowania przez przedsiębiorstwa wydobywcze cyfrowymi modelami złóż, co przynajmniej w przypadku niektórych z nich będzie istotnym problemem.

2. W celu możliwości skwantyfikowania ryzyka eksploatacji, Autor wybrał osiem parametrów charakteryzujących różne zagrożenia naturalne oraz parametry geologiczno-górnice (tak naprawdę są to tylko parametry geologiczne). Dwa z nich budzą wątpliwości co do zasadności wykorzystywania:

- zagrożenie wybuchem pyłu węglowego – sam Autor stwierdza, że „zdecydowana większość pokładów” w polskich kopalniach jest zaliczona do kategorii „B”. Jeżeli jest to wiadome, to raczej nie zagrożenie to nie przyczynia się do wzrostu ryzyka prowadzenia eksploatacji. Przy jej planowaniu od razu zakłada się prowadzenie odpowiedniej profilaktyki przeciwdziałającej temu zagrożeniu w całym okresie jej prowadzenia. W dalszej części pracy, w komentarzu dotyczącym Tabeli 6.8 Autor stwierdza, że zrezygnowano z tego parametru;
- skłonność węgla do samozapalenia – węgiel zalegający w danym pokładzie złoża ma określony wskaźnik samozapalności, który jest jednakowy w każdej jego części.

Podobnie, jak w przypadku zagrożenia wybuchem pyłu węglowego na etapie planowania eksploatacji są ustalane odpowiednie zasady jej prowadzenia zapobiegające lub nawet niwelujące to zagrożenie.

Brakuje natomiast dwóch bardzo ważnych parametrów, mogących mieć znaczący wpływ na ryzyko prowadzenia eksploatacji. Są nimi dane dotyczące wytrzymałości skał stropowych i spągowych oraz stabilności stropu i spągu. W pracy w ogóle nie odniesiono się do nich.

3. Na początku podrozdziału 6.2 Autor pisze, że będzie rozpatrywany wpływ czynników ryzyka na „jednostkowe koszty eksploatacji”. Co one obejmują? W dalszej części tego podrozdziału są z kolei zapisy o „kosztach jednostkowych brutto”. Czy to jest to samo? Jak one są wyliczane, jeżeli zazwyczaj w sprawozdaniach obejmujących zestawienia wyników techniczno-ekonomicznych kopalni jest podawany jednostkowy koszt wydobywania lub jednostkowy koszt produkcji?
4. W Tabeli 6.9 są zestawione dane dotyczące eksploatacji 81 ścian, którymi eksploatowano pokłady w ubiegłych latach (uwaga: nie eksploatuje się ściany, lecz ścianą eksploatuje się pokład). Pierwsza kolumna zawiera wielkości „kosztów jednostkowych brutto” podawanych w złotych na jedną tonę. Niektóre z nich są wprost nieprawdopodobne! Przykładowo: ściana XIV – 13,8 zł/Mg(!), ściana B6 – 26,3 zł/Mg, ściana XV – 32,0 zł/Mg, ściana C1 – 35,6 zł/Mg, ściana B11 – 35,9 zł/Mg. Podane przykłady są skrajnymi wielkościami, ale w zasadzie wszystkie są bardzo niskie (największa wartość to 187,5 zł/Mg). Wymaga to wyjaśnienia.
5. Praktyczne zastosowanie zaproponowanej metodyki jest pokazane na przykładzie dwóch kopalń – „A” i „D”. W obydwu przypadkach uwagę zwraca bardzo duży stopień zanieczyszczenia urobku przerostami, wynoszący w przybliżeniu około 50%. Czy to jest „norma” w przypadku analizowanych kopalń, czy zostały one wybrane celowo ze względu na tak dużą wartość wskaźnika?
6. Przykłady dotyczące kopalń „A” i „D” dotyczą całych okresów wybierania zalegających w nich złóż, określonych na 32 lata w przypadku kopalni „A” i 17 lat w przypadku kopalni „D”. I dla tak długich okresów są przedstawiane wyliczenia niezbędnych nakładów, przychodów (przy stałej cenie zbytu węgla wynoszącej 800 zł/Mg) oraz projekcje finansowe rachunków zysku i strat. Czy jest zasadne rozpatrywanie tak długich okresów? Mogą przecież diametralnej zmianie ulec wszystkie koszty lub może dochodzić do dekoniunktury na rynku węgla (o czym wspomina sam Autor).

6. Wniosek końcowy

Przedłożoną do oceny pracę doktorską pod względem formalnym i merytorycznym oceniam wysoko. Spełnia ona w pełni wymogi określone w *Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (t.j. Dz. U. z 2023 r., poz. 742) i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, dowodząc posiadania przez Doktoranta ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie naukowej górnictwo i geologia inżynierska oraz potwierdzając umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W związku z powyższym, wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Gospodarki surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Jarosława Kulpy pt. „*Metodyka oceny atrakcyjności złoża i kwantyfikacja ryzyka w procesie eksploatacji*” do publicznej obrony oraz dalszych etapów przewodu doktorskiego.



prof. dr hab. inż. Marian Turek