

*Norbert Skoczylas\**

## KONCEPCJA WSPOMAGANIA ANALIZY RYZYKA ZA POMOCĄ LOGIKI ROZMYTEJ NA PRZYKŁADZIE ZAGROŻENIA WYRZUTOWEGO W KOPALNI WĘGLA KAMIENNEGO

---

### **1. Wstęp**

Wśród wielu zagrożeń występujących we współczesnym górnictwie węgla kamiennego najtrudniejsze do pełnego rozpoznania są zagrożenia zjawiskami dynamicznymi. Zagrożenie wyrzutami węgla i gazów opisywane jest w literaturze fachowej od ponad 160 lat (Taylor, 1853 r.). Występowaniem tego zjawiska zagrożone są (lub były) prawie wszystkie zagłębia węglowe [1]. Obecnie problem ten jest najbardziej aktualny w kopalniach węgla kamiennego w Chinach, gdzie występuje jedna trzecia wyrzutów na całym świecie [2]. Z dużym zagrożeniem wyrzutowym borykają się także Ukraina, Polska i Australia [3]. W ostatnich 5 latach w Górnśląskim Zagłębiu Węglowym wystąpiły dwa wyrzuty węgla i metanu [4, 5]. Były to pierwsze dwa wyrzuty w tym regionie od połowy lat 80. XX wieku. Obydwie kopalnie, w których wystąpiły te zjawiska, należą do kopalń silnie metanowych.

### **2. Metodyka oceny stanu zagrożenia wyrzutowego w Polsce**

Zgodnie z obowiązującymi przepisami, dla rozpoznania i oceny stanu zagrożenia wyrzutami wykonywane są pomiary wskaźnika intensywności desorpcji, zwięzłości węgla i wychodu zwiercin z małośrednicowych otworów badawczych.

Wykorzystanie informacji pochodzących z omówionych pomiarów wymaga ciągłego udoskonalania. Pewne propozycje rozwiązań w tym kierunku podano w pracach [6, 7]. Au-

---

\* Instytut Mechaniki Górnotworu Polskiej Akademii Nauk, Kraków

tor zachęca do zapoznania się z propozycją wykorzystania logiki rozmytej jako narzędzia służącego do przetworzenia wyników wykonywanych pomiarów. Rozwiązanie takie mogłoby dostarczyć narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji dotyczących prowadzenia działań profilaktycznych podczas prac eksploatacyjnych.

Klasyczne podejście do oceny stanu zagrożenia wyrzutowego w polskim górnictwie węglowym z wykorzystaniem wyników pomiarów kinetyki desorpcji [8] oraz zwięzłości węgla ma charakter progowy. Dla wymienionych wskaźników określona jest wartość progowa, której przekroczenie oznacza istnienie zagrożenia wyrzutami w wyrobisku. Progowy sposób definiowania stanu zagrożenia powoduje, że zagrożenie wyrzutowe pojawia się w momencie, gdy np. wskaźnik intensywności desorpcji lub zwięzłość węgla przekroczy ustaloną wartość. Tymczasem rzeczywisty stan zagrożenia wyrzutowego nie zawsze zmienia się w sposób nagły, lecz w sposób ciągły (mniej lub bardziej dynamicznie) wraz z postępem przodku. Problem odpowiedniego prognozowania zagrożenia wyrzutowego polega również na tym, że mimo upływu ponad 150 lat od pierwszego opisu zjawiska przez Taylora (1853 r.), wyrzut nadal nie jest w pełni rozpoznany fizycznie, a o możliwości jego zaistnienia decyduje bardzo wielka liczba wzajemnie ze sobą sprzężonych czynników [9].

W sytuacjach, gdy wiedza o rozwiązywanym problemie zawiera reguły, które są nieprecyzyjne, częściowo sprzeczne, źle określone lub przybliżone, możliwe jest zastosowanie rozmytych systemów eksperckich pozwalających na wnioskowanie oparte na podobieństwie, zapewniając przy tym jawność wiedzy przechowywanej w strukturach o charakterze symbolicznym. Użyteczność logiki rozmytej [10, 11] jest szczególnie wysoko ceniona przy rozwiązywaniu bardzo złożonych problemów, których najczęściej nie da się zaimplementować przy pomocy modeli analitycznych. Do tego typu bardzo złożonych zagadnień zaliczyć można systemy decyzyjne oceniające niektóre zagrożenia naturalne w górnictwie, w tym zagrożenie występowaniem wyrzutów skalno-gazowych.

W niniejszej pracy przedstawiono potencjalne możliwości zastosowania logiki rozmytej dla oceny stanu zagrożenia wyrzutami skalno-gazowymi. Ideą autora jest zasygnalizowanie istnienia narzędzia, które w autora mniemaniu predysponuje je do wspomagania rozwiązywania tego typu problemów.

Metoda prognozowania z zastosowaniem logiki rozmytej jest pewną kompilacją prognozowania heurystycznego (opartego na wykorzystaniu opinii i wiedzy ekspertów) z prognozowaniem przyczynowo-skutkowym.

### **3. Pozyskiwanie wiedzy i doświadczeń od inżynierów i ekspertów — zaproponowany przykład rozmytego systemu analizy ryzyka**

Największą zaletą prognozowania opartego na logice rozmytej jest możliwość wykorzystania zasobów wiedzy i doświadczenia ludzi. Otwiera to możliwość stosowania jej wszędzie tam, gdzie stopień złożoności procesów nie pozwala na jednoznaczne i pewne określenie warunków sprzyjających danemu zjawisku lub w pełni go wykluczających.

Brak zależności funkcyjnych opisujących rozpatrywane zjawisko nie wyklucza faktu, iż istnieją doświadczeni ludzie, eksperci, których wiedza o charakterze intuicyjnym dzięki logice rozmytej może zostać wykorzystana.

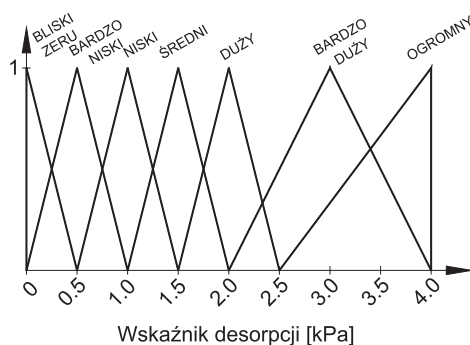
W procesie pozyskiwania wiedzy od eksperta z dziedziny wyrzutów skalno-gazowych można wskazać następujące etapy:

- wybór zmiennych wejściowych, które ekspert uznał za szczególnie istotne w analizie ryzyka wyrzutowego,
- wyznaczenie fizycznych dziedzin dla wybranych zmiennych,
- wybór i nazwanie zmiennych lingwistycznych opisujących każdą ze zmiennych wejściowych/wyjściowych,
- wyznaczenie funkcji przynależności dla zdefiniowanych zmiennych lingwistycznych,
- stworzenie bazy reguł.

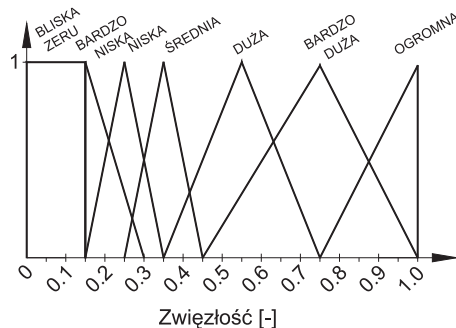
W proponowanym przez autora przykładzie wymienione etapy pozyskiwania wiedzy dają następujące wyniki:

- wybór zmiennych wejściowych: wskaźnik desorpcji oraz zwięzłość węgla, zmienna wyjściowa: zagrożenie wyrzutem,
- fizyczne dziedziny wybranych powyżej zmiennych to zakres wskaźnika desorpcji w granicach 0÷4 kPa, wskaźnika zwięzłości do 1,0, natomiast ryzyko wyrzutu w granicach od 0 do 1,
- wszystkim zmiennym przypisujemy po siedem zmiennych lingwistycznych nazywając je: bliski zeru, bardzo niski, niski, średni, duży, bardzo duży oraz ogromny.

We współpracy z ekspertem wykreślone zostały funkcje przynależności dla wszystkich zmiennych lingwistycznych opisujących wskaźnik desorpcji (rys. 1) i zwięzłość (rys. 2). Funkcje przynależności informują nas, w jakim stopniu dana wielkość wejściowa/wyjściowa odpowiada kolejnym zmiennym lingwistycznym.



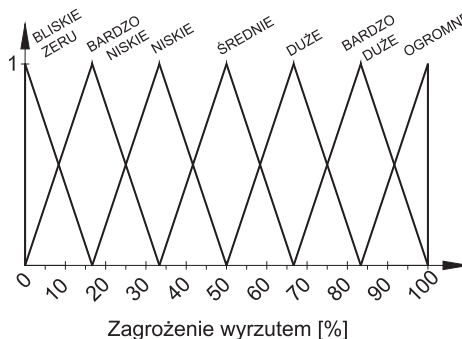
**Rys. 1.** Funkcje przynależności określające zmienne lingwistyczne zmiennej wejściowej — wskaźnika desorpcji



**Rys. 2.** Funkcje przynależności określające zmienne lingwistyczne zmiennej wejściowej — zwięzłości

Jak widać, kształt jednej z funkcji przynależności — określającej BLISKĄ ZERU zwięzłość (rys. 2) — został przez eksperta określony za pomocą prostokąta. Uznał on, iż węgiel poniżej wskaźnika zwięzłości 0,15 nie jest w stanie tworzyć stabilnych geomechanicznie struktur.

Funkcje przynależności opisujące zmienne lingwistyczne dla wyjścia naszego wnioskowania — zagrożenia wyrzutem — równomiernie rozłożono na wybranej dziedzinie z zakresu 0 do 1. Także tutaj posłużono się trójkątnymi funkcjami przynależności (rys. 3).



**Rys. 3.** Funkcje przynależności określające zmienne lingwistyczne zmiennej wyjściowej — zagrożenia wyrzutem

Osoba tworząca system ekspercki oparty na logice rozmytej pozyskuje od eksperta z danej dziedziny bazę reguł, czyli formy zdaniowe wiążące ze sobą zmienne wejściowe w związku typu: JEŚLI twierdzenie rozmyte pierwsze WTEDY twierdzenie rozmyte drugie, przy czym twierdzenia rozmyte pierwsze zawierają najczęściej wszystkie kombinacje koniunkcji pojęć lingwistycznych dla danych zmiennych wejściowych [12].

W naszym przypadku użyto po 7 pojęć lingwistycznych do opisu obydwu zmiennych wejściowych. Pozwala to stworzyć do 49 ( $7 \times 7$ ) reguł opisujących proces wnioskowania.

Poniżej podano przykładowe reguły, które zostały pozyskane od eksperta.

- JEŻELI wskaźnik desorpcji jest duży ORAZ zwięzłość jest niska WTEDY zagrożenie wyrzutem jest duże.
- JEŻELI wskaźnik desorpcji jest duży ORAZ zwięzłość jest bardzo duża WTEDY zagrożenie wyrzutem jest ogromne.

Pełna baza reguł zebrana jest w tabeli (rys. 4).

<b>WSKAŹNIK DESORPCJI</b>	OGROMNY	O	O	O	O	O	BD	D	<b>ZWIĘZŁOŚĆ</b>	<b>ZAGROŻENIE</b>
	BARDZO DUŻY	O	O	O	O	BD	D	Ś		
	DUŻY	O	O	O	BD	D	Ś	N		
	ŚREDNI	O	O	BD	D	Ś	N	BN		
	NISKI	O	O	D	Ś	N	BN	BZ		
	BARDZO NISKI	O	O	Ś	N	BN	BZ	BZ		
	BLISKA ZERU	O	O	N	BN	BZ	BZ	BZ		
		BLISKA ZERU	BARDZO NISKA	NISKA	ŚREDNIA	DUŻA	BARDZO DUŻA	OGROMNA		

Rys. 4. Pozyskana od eksperta baza reguł

W bazie reguł dla zerowych oraz bardzo niskich wartości zwięzłości zagrożenie określono na poziomie „ogromne” niezależnie od wartości wskaźnika desorpcji, zakładając że obecność gazu, nawet w niewielkich ilościach, w tak słabym węglu jest bardzo groźna.

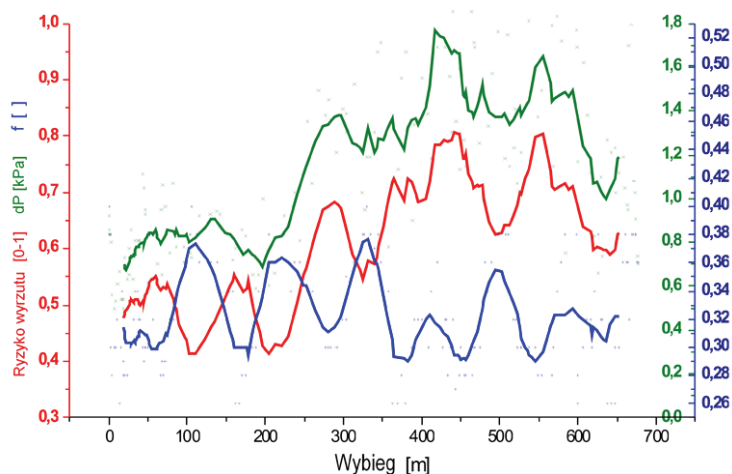
Na tym etapie kończy się proces pozyskiwania wiedzy od eksperta. Pozostaje skorzystać z jednej z gotowych aplikacji pozwalającej na implementację systemów rozmytych bądź stworzyć ją samemu w dowolnym języku programowania. Autor pracy korzystał z własnej aplikacji napisanej w języku C++.

#### 4. Uzyskane wyniki — interpretacja

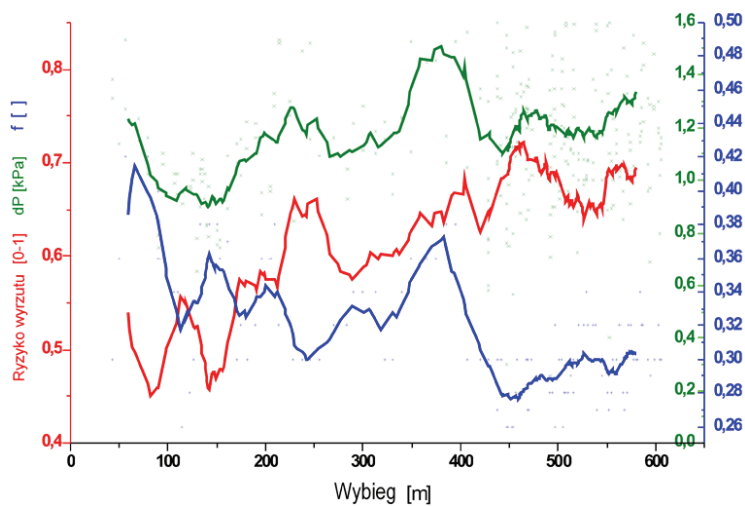
Wnioskowanie zostało przeprowadzone zgodnie ze schematem Mamdaniego [11]. Użyto metody defuzyfikacji zwanej metodą wysokości [13].

Zbudowany system zastosowano do analizy ryzyka zaistnienia wyrzutu w dwóch wybranych chodnikach drążonych w kopalni „Zofiówka”. W tym celu wygenerowane zostały wartości ryzyka wystąpienia wyrzutu (rys. 5 i rys. 6 — kolor czerwony) dla wszystkich

pomiarów  $f$  (kolor zielony) i  $dp$  (kolor niebieski) zmierzonych podczas eksploatacji chodnika. Dla lepszego zobrazowania wpływu zmienności wskaźników  $dp$  i  $f$  na ryzyko wystąpienia wyrzutu wyniki pomiarów uśredniano na odcinkach czterdziestometrowych, wykorzystując metodę średnich kroczących.



Rys. 5. Analiza ryzyka zaistnienia wyrzutu dla chodnika nadścianowego H4 409/3 w KWK „Zofiówka”



Rys. 6. Analiza ryzyka zaistnienia wyrzutu dla chodnika podścianowego H6 409/3 w KWK „Zofiówka”

Analizując przebiegi można stwierdzić, iż zagrożenie rośnie wraz ze wzrostem wskaźnika desorpcji i spadkiem zwięzłości węgla. Zależne jest ono jednak od wzajemnej relacji między tymi wskaźnikami.

Przykładowo, przedstawiony model wnioskowania rozmytego przyporządkował zbliżony poziom zagrożenia wyrzutowego dla par wskaźników  $f = 0,37$  i  $dp = 1,45$  kPa i dla  $f = 0,29$  i  $dp = 1,18$  kPa. Zrozumiałe jest bowiem, że przekroczenie wartości granicznej jednego ze wskaźników (desorpcji lub zwięzłości) nie jest warunkiem wystarczającym do wystąpienia zjawiska wyrzutu.

Na przedstawionych wykresach można zaobserwować, w jaki sposób zagrożenie wyrzutem zależy od wzajemnej relacji pomiędzy zmiennymi wejściowymi ( $dp$  i  $f$ ). Widać iż zmienia się ono w sposób ciągły. Osiąga maksymalne wartości, gdy jednocześnie wzrasta wartość  $dp$  i spada  $f$ , co jest zgodne z wiedzą i doświadczeniem eksperta.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Wyrzut węgla i gazu jest procesem niezwykle skomplikowanym, a jego natura nie jest w pełni opisana fizycznie. Matematyczne opisanie tego zjawiska jest więc zadaniem niezwykle trudnym lub w obecnym stanie wiedzy wręcz niewykonalnym. Zdaniem autora istnieje potrzeba prowadzenia prac nad stworzeniem nowoczesnego systemu oceny stanu zagrożenia wyrzutami w kopalniach węgla kamiennego, opartego o systemy informatyczne.

W pracy przedstawiony został przykład praktycznego konstruowania systemu eksperckiego na bazie logiki rozmytej. System taki ma szereg zalet. Jeden z najważniejszych atutów polega na sposobie jego tworzenia, w budowie takiego systemu nie jest bowiem wymagana znajomość zależności matematycznych opisujących dane zjawisko. Metoda ta wykorzystuje w ocenie wartości wskaźników stanu zagrożenia określane rutynowo w kopalniach parametry węgla oraz wiedzę i doświadczenie ekspertów w omawianej dziedzinie. Wiedza ekspercka w łatwy sposób może być przelana na funkcje przynależności i bazę reguł systemu w celu stworzenia obiektywnego narzędzia analizy ryzyka.

Ogromną zaletą logiki rozmytej jest łatwość dodania kolejnych parametrów, jak np.: wychód zwiercin z małośrednicowych otworów badawczych, metanonośność, metanowość wyrobiska, zawartość części lotnych  $V_{daf}$ , zawartość wilgoci, co zapewne wpłynęłoby na poprawę jakości prognozy. Ponieważ wnioskowanie rozmyte oparte jest na schematach wnioskowania, jakie zachodzą w ludzkim mózgu, mamy pewność, iż wyniki uzyskane w ten sposób będą zgodne z wiedzą i doświadczeniem ludzi uznanych za ekspertów w danej dziedzinie.

Metoda pozwala również na wprowadzenie do oceny zagrożenia parametrów nie dających się opisać liczbowo, jak np. budowa geologiczna złoża, wpływ metanu z otworu lub inne objawy zagrożenia.

Wyniki przedstawione w pracy, oparte na rzeczywistych wynikach uzyskanych w kopalni, winny być traktowane w kategoriach jakościowych. Stworzenie rzetelnego systemu wspomaganiania służb przeciwwyrzutowych proponowaną metodą wymaga uwzględnienia specyfiki danej kopalni i szczegółowej wiedzy o dotychczas wykonanych pomiarach i doświadczenia zawodowego służb kopalnianych.

## LITERATURA

- [1] *Lama, R.D.; Bodziony, J.*: Outbursts of Gas, Coal and Rock in Underground Coal Mines. R.D. Lama & Associates, Wollongong, NSW, Australia, 1996
- [2] *T. Xu, C.A. Tang, T.H. Yang, W.C. Zhu, J. Liu*: Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 43, 2006, 905–919
- [3] *Basil Beamish, Peter J. Crosdale*: Instantaneous outbursts in underground coal mines: An overview and association with coal type. *International Journal of Coal Geology* 35, 1998, 27–55
- [4] *Jakubów A., Tor A., Tobiczek S.*: Wyrzut metanu i skał w drążonej lunecie rurowej II na poziomie 1000 m w KWK Pniówek — okoliczności, przyczyny i skutki. Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Szczyrk, 2003
- [5] *Tor A., Jakubów A.*: Wyrzuty metanu i skał w kopalniach Jastrzębskiej Spółki Węglowej S.A. Materiały 4. Szkoły Aerologii Górniczej, Kraków, 10–13 października 2006, 159–176
- [6] *Gawor M., Wierzbicki M.*: Komputerowe wspomaganie służb przeciwwyrzutowych w kopalniach na podstawie programu do analizy i oceny stanu zagrożenia wyrzutami metanu i skał. *Miesięcznik WUG*, nr 12, 2000
- [7] *Wierzbicki M.*: Analiza zmienności wskaźnika desorpcji z zastosowaniem metody średnich ruchomych. *WUG, Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, nr 3 (139), 2006, 22–27
- [8] *Strączek A., Sinka A.*: Ocena stanu zagrożenia wyrzutami metanu i skał na podstawie wyznaczonego granicznego wskaźnika intensywności desorpcji gazu z węgla. *Przegląd Górniczy*, nr 11, 2004
- [9] *Wierzbicki M.*: Zmiany stanu naprężenia i wytężenia materiału w trakcie prowokowania i inicjacji laboratoryjnego wyrzutu skalno-gazowego. IMG PAN, Rozprawy, monografie, nr 4, 2003, 134
- [10] Zadeh, Lotfi A. Fuzzy sets, *Inf. Control* 8, 1965, 338–353
- [11] *Mamdani E.*: Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamics Plant. *Proceedings of the IEEE*, 121(12), 1974, 1585–1888
- [12] *Yager R.R., Filev P.D.*: Podstawy modelowania i sterowania rozmytego. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 1995
- [13] *Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M.*: Wprowadzenie do sterowania rozmytego. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 1996