

Małgorzata Kowalska-Włodarczyk, Barbara Darlak
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych i logiki rozmytej w tworzeniu baz danych dla złóż *dual porosity – dual permeability*

Wstęp

W praktyce geologicznej, przy określaniu właściwości zbiornikowych mamy do czynienia ze skałami: od czysto porowatych (takie są np. piaskowce czerwonego spągowca), poprzez porowate, poprzecinane różnej wielkości szczelinami, o różnym udziale jednych i drugich, aż po całkowicie szczelinowe (takie występują najczęściej w skałach wapiennych i w dolomicie). Struktura typu *dual porosity – dual permeability* odgrywa znaczącą rolę w procesach gromadzenia i transportu płynów złożowych. Ropa czy gaz, gromadzące się w porowatych warstwach skał odizolowanych od siebie uszczelniającymi przekładkami, kontaktują się jedynie przez ewentualną sieć szczelin, które mogą być jedyną drogą transportu. Takie złoża spotyka się

w warstwach jury, skąd pochodził materiał do przeprowadzonych badań. Badania wykonano w dwóch zasadniczych kategoriach, a mianowicie: badania porozymetryczne, dla określenia porowatości i właściwości porowej przestrzeni intergranularnej oraz badania przepuszczalności absolutnej, a następnie badania szczelinowatości na szlifach i zgładach – dla znalezienia porowatości i przepuszczalności szczelinowej. Za pomocą sieci neuronowych uzupełniono i zweryfikowano podstawową bazę danych. Wykonano również kwalifikację skał za pomocą nowych metod obliczeniowych: sieci neuronowych i logiki rozmytej (*fuzzy logic*). Wyniki przedstawiono w odpowiednich tabelach i na rysunkach.

Metoda logiki rozmytej

Do opracowania danych wykorzystano metodę logiki rozmytej. Metoda ta została opracowana i wprowadzona przez autorki w poprzednich pracach [3, 5]. Tutaj przypomnieć należy tylko, że jest to jedna z najnowocześniejszych metod obliczeniowych, wykorzystująca pojęcie zbioru rozmytego [1, 10].

W teorii klasycznej, ze zbioru głównego zostają wydzielone podzbiory na zasadzie bliskiego pokrewieństwa – takiego, że każdy element danego podzbioru nie występuje w innych podzbiórach, innymi słowy – granice podzbiorów są ostro zdefiniowane, co oznacza, że przynależność do podzbioru wynosi 0 lub 1.

W logice rozmytej przynależność do zbioru określają reguły rozmyte; w analizie skupień rozmytych podzbiory częściowo się przenikają, granice między nimi są niewyraźne, a dana składowa podzbioru może występować także w innych podzbiórach. Dokładne omówienie zagadnienia można znaleźć w zacytowanej literaturze [6-9]. Wydaje się, że w takich zagadnieniach jak *dual porosity – dual permeability*, gdzie rozmyte są granice wzajemnych oddziaływań przepuszczalności i porowatości intergranularnej i szczelinowej, właśnie technika obliczeniowa oparta na logice rozmytej może okazać się najskuteczniejsza.

Wykonanie obliczeń

W dotychczasowych badaniach ustalono podstawowy zestaw danych laboratoryjnych [2, 4], nie mniej jednak w każdym nowym zagadnieniu konieczne jest przeprowadzenie selekcji danych i ich weryfikacji. Za pomocą sieci neuronowych wykonano więc uzupełnienie profili i dobrano odpowiednie parametry. W wyniku przeprowadzonych analiz, w skład których wchodziły: analiza porozymetryczna, pomiar gęstości, pomiar przepuszczalności absolutnej oraz porowatości i przepuszczalności szczelinowej, uzyskano kompleksowy obraz badanego materiału skalnego. Za pomocą sieci neuronowej zweryfikowano i uzupełniono podstawową bazę danych, uzyskując w ten sposób pełne profile wybranych parametrów odpowiedzialnych za przepływ i magazynowanie płynów złożowych.

Jak już wspomniano wyżej, badania zostały wykonane na ponad stu próbkach pochodzących ze skał wapiennych jury. Jest to materiał o przestrzeni trudnej do zinterpretowania – występowała w nim duża zmienność parametrów opisujących przestrzeń porowo-szczelinową. W tabelicy 1 przedstawiono zakresy zmian tych parametrów.

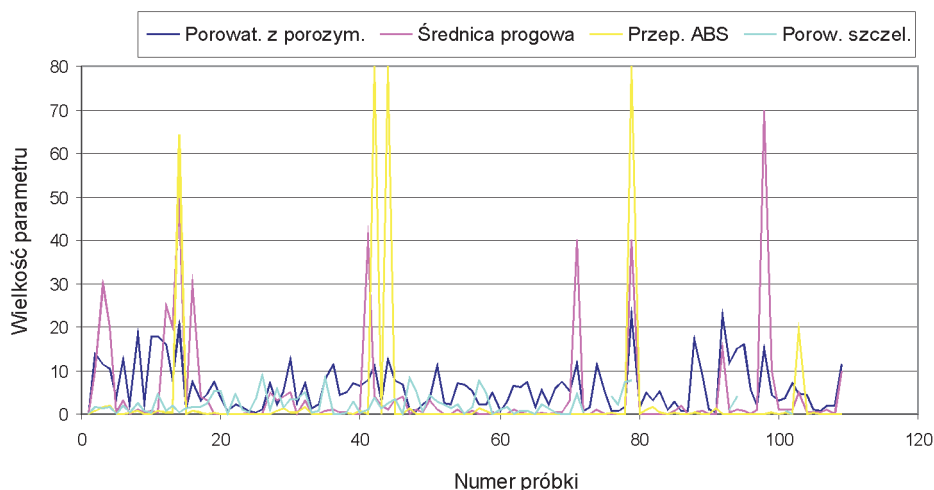
Z danych umieszczonych w tabelicy 1 wyselekcjonowano te, które w najistotniejszy sposób wiążą się z przestrzenią omawianą, czyli *dual porosity – dual permeability*. Są to: porowatość efektywna, przepuszczalność absolutna i szczelinowa oraz średnica progowa. Na rysunku 1 przedstawiono wyselekcjonowane parametry, których rozkład wydaje się dość chaotyczny; podjęto więc próbę ich uporządkowania. Posługując się metodą logiki rozmytej spróbowano wydzielić podstawowe typy przestrzeni porowo-szczelinowych; takich, w których dominuje porowatość intergranularna, takich

gdzie przeważa struktura szczelinowa i wreszcie typ, w którym struktury porowata i szczelinowa są w równowadze.

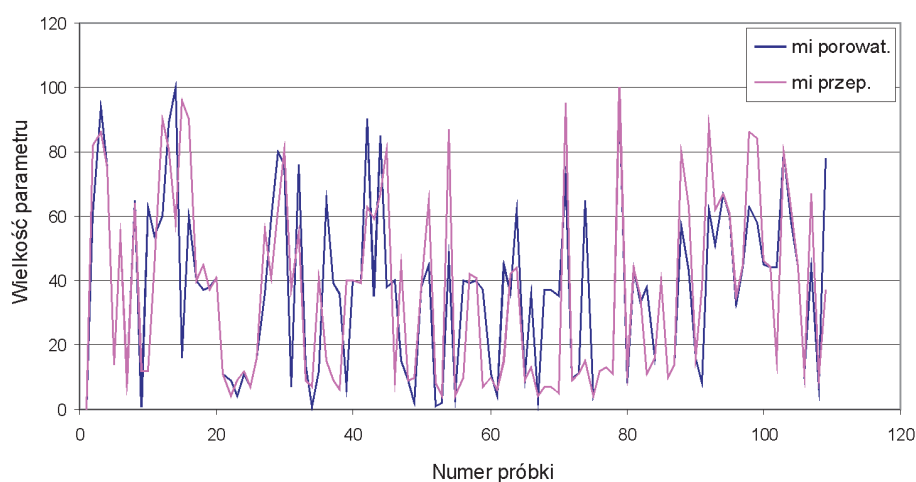
Użycie logiki rozmytej wymaga tzw. grupowania rozmytego, które polega na znalezieniu odpowiedników lingwistycznych dla kolejnych zestawów ostrych wielkości parametrów petrofizycznych, czego odzwierciedleniem jest funkcja przyporządkowania [1, 5]. Operację rozmywania wykonano na dwa sposoby: w pierwszym przypadku znaleziono funkcje przyporządkowania ze względu na właściwości szczelinowe, a w drugim – ze względu na porowatość intergranularną. Wyniki przedstawiono na rysunku 2. Obrazują one wielkość różnic pomiędzy jedną strukturą a drugą. Ponieważ naszym problemem do rozwiązania jest przestrzeń *typu dual porosity – dual permeability*, czyli przestrzeń porowo-szczelinowa, w której obie formy odgrywają istotną rolę, powyższe działanie pozwoliło wyeliminować ze zbioru skrajne struktury, czyli bliskie czysto szczelinowej i bliskie czysto porowej oraz bliskie strukturom swoistym dla skał uszczelniających.

Tabela 1. Zakresy parametrów petrofizycznych

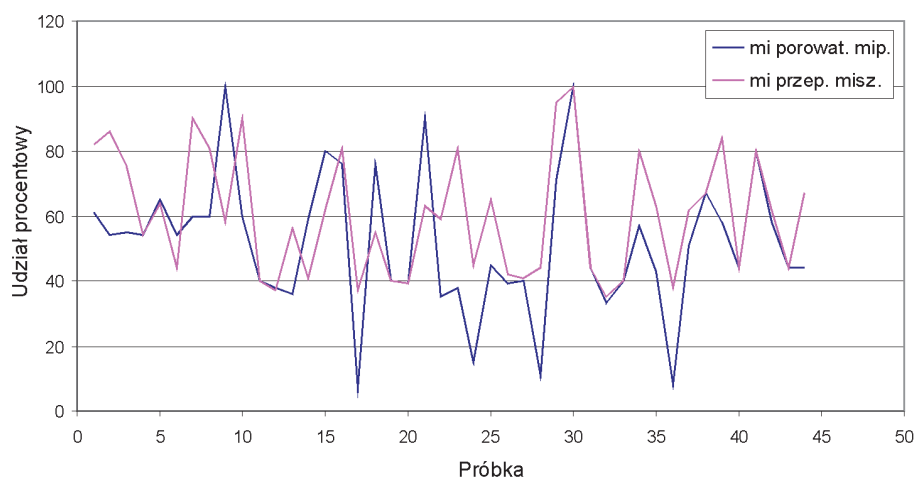
Parametr	Maksymalna wielkość	Minimalna wielkość
Porowatość [%]	22,8	0
Gęstość objętościowa [g/cm ³]	2,82	2,13
Powierzchnia właściwa [m ² /g]	6,02	0
Średnica progowa [μm]	70	0
Przepuszczalność absolutna [mD]	381,1	0
Przepuszczalność szczelinowa [mD]	495,8	0
Porowatość szczelinowa [%]	9,9	0



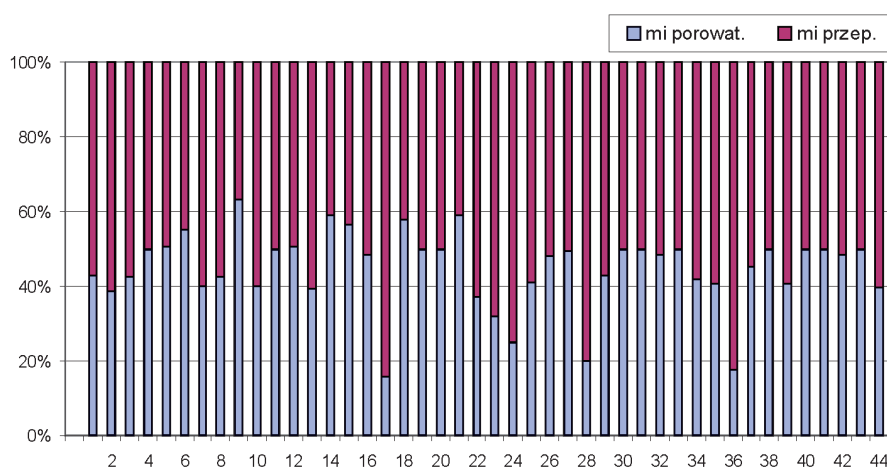
Rys. 1. Zestawienie parametrów petrofizycznych



Rys. 2. Zestawienie udziałów przestrzeni porowo-szczelinowej



Rys. 3. Zestawienie udziałów porowatości i przepuszczalności w strukturze



Rys. 4. Udział procentowy porowatości i przepuszczalności

Pozostałe dane poddano kolejnej analizie za pomocą logiki rozmytej. Na rysunku 3 przedstawiono funkcje przyporządkowania wyselekcjonowanego zbioru. Nadal obserwuje się różnice w funkcjach przyporządkowania obliczonych dla

materiału bardziej zeszcelinowanego, w stosunku do bardziej porowatego. Wykonane przyporządkowanie pozwoliło ocenić trendy rozwoju przestrzeni porowo-szczelinowej, co przedstawiono na rysunku 4. Daje się tam prześledzić udział

struktury porowej i szczelinowej w kolejnych próbkach. Na tej podstawie wydzielono trzy zbiory próbek, należących

do trzech typów przestrzeni porowo-szczelinowej. Wyniki przedstawiono w tablicach 2, 3 i 4 oraz na rysunkach 5-10.

Tablica 2. Zbiór danych petrofizycznych z przewagą struktury porowej

Lp.	Porowatość z porozymetrią [%]	Średnica progowa [μm]	Przepuszczalność absolutna [mD]	Przepuszczalność szczelinowa [mD]	μ porowat.	μ przep.
1.	11,33	30,00	1,58	8,96	94	86
2.	18,00	0,20	0,52	10,37	54	44
3.	8,04	20,00	0,33	5,20	89	81
4.	20,20	50,00	64,43	0,36	100	58
5.	2,10	3,00	0,48	8,03	59	41
6.	5,12	4,00	1,09	10,65	80	62
7.	7,19	3,00	1,47	14,51	76	55
8.	11,18	4,00	104,95	8,80	90	63

μ – funkcja przynależności

Tablica 3. Zbiór danych petrofizycznych z przewagą struktury szczelinowej

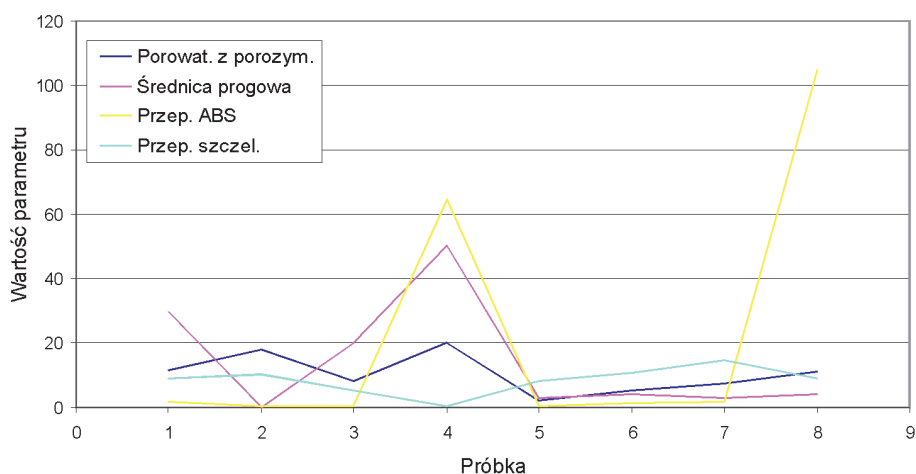
Lp.	Porowatość z porozymetrią [%]	Średnica progowa [μm]	Przepuszczalność absolutna [mD]	Przepuszczalność szczelinowa [mD]	μ porowat.	μ przep.
1.	15,92	25,00	0,23	64,14	60	90
2.	7,53	30,00	0,53	28,71	60	90
3.	7,02	5,00	0,10	5,23	36	56
4.	12,67	5,00	0,22	8,16	76	81
5.	2,58	0,04	0,29	14,36	7	37
6.	2,82	2,00	0,01	11,96	35	59
7.	7,62	3,00	0,10	8,19	38	81
8.	0,99	0,02	1,08	24,23	15	45
9.	11,13	1,00	0,10	11,86	45	65
10.	11,59	40,00	0,10	35,67	71	95
11.	17,17	0,40	0,31	19,50	57	80
12.	8,59	0,60	0,00	10,80	43	63
13.	0,41	0,02	1,22	15,20	8	38
14.	4,35	10,00	0,38	9,70	58	84
15.	4,30	0,30	0,10	32,36	58	62
16.	1,89	1,00	0,11	17,10	44	67

Tablica 4. Zbiór danych petrofizycznych z równowagą form szczelinowej i porowej

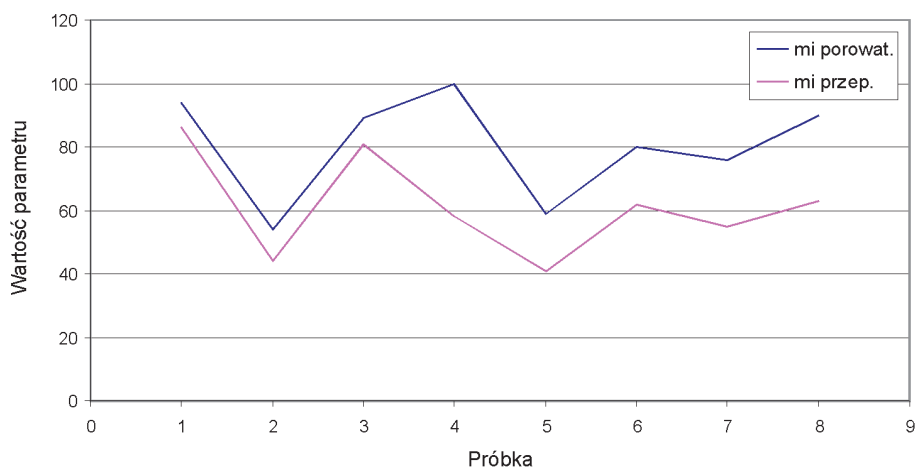
Lp.	Porowatość z porozymetrią [%]	Średnica progowa [μm]	Przepuszczalność absolutna [mD]	Przepuszczalność szczelinowata [mD]	μ porowat.	μ przep.
1.	10,56	20,00	1,80	2,07	75	75
2.	12,53	3,00	0,10	5,11	54	54
3.	18,55	1,00	0,70	7,44	65	64
4.	3,03	4,00	0,42	6,66	40	40

Tablica 4. Zbiór danych petrofizycznych z równowagą form szczelinowej i porowej

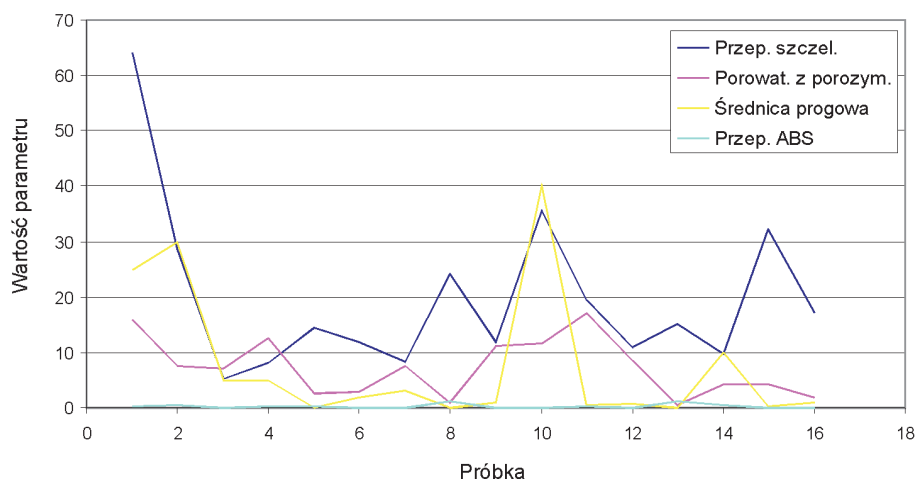
Lp.	Porowatość z porozymetrią [%]	Średnica progowa [um]	Przepuszczalność absolutna [mD]	Przepuszczalność szczelinowata [mD]	μ porowat.	μ przep.
5.	7,48	0,10	0,26	7,44	38	37
6.	6,40	0,10	0,55	0,31	40	40
7.	7,81	40,00	0,10	4,94	39	39
8.	2,04	0,10	0,60	6,86	40	41
9.	22,82	40,00	184,50	82,50	100	100
10.	4,84	0,06	0,81	7,00	44	44
11.	2,96	0,07	1,53	6,70	33	35
12.	2,62	0,50	0,38	25,05	40	40
13.	15,05	0,90	0,10	16,86	67	67
14.	3,55	1,00	0,31	3,13	44	44
15.	4,64	5,00	19,44	23,30	80	80
16.	1,07	0,30	0,16	23,00	44	44
17.	2,96	0,07	1,53	6,70	33	35



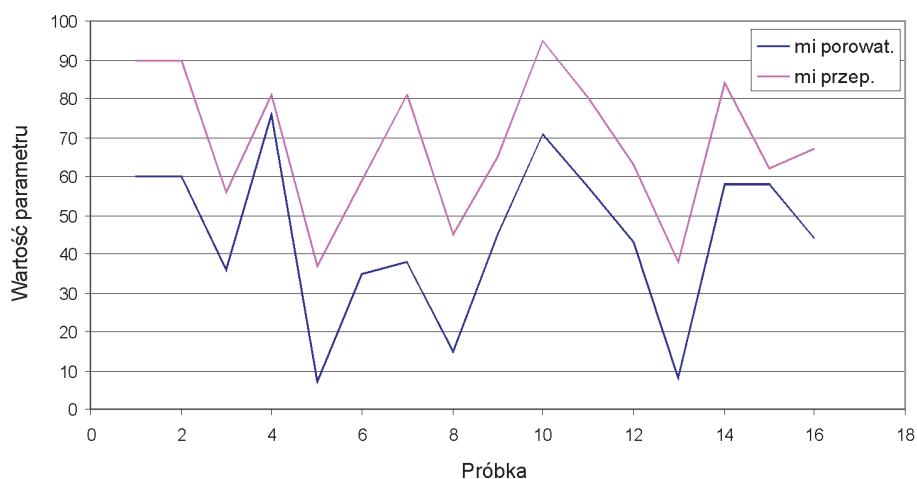
Rys. 5. Zestawienie parametrów petrofizycznych dla próbek z przewagą struktury porowej



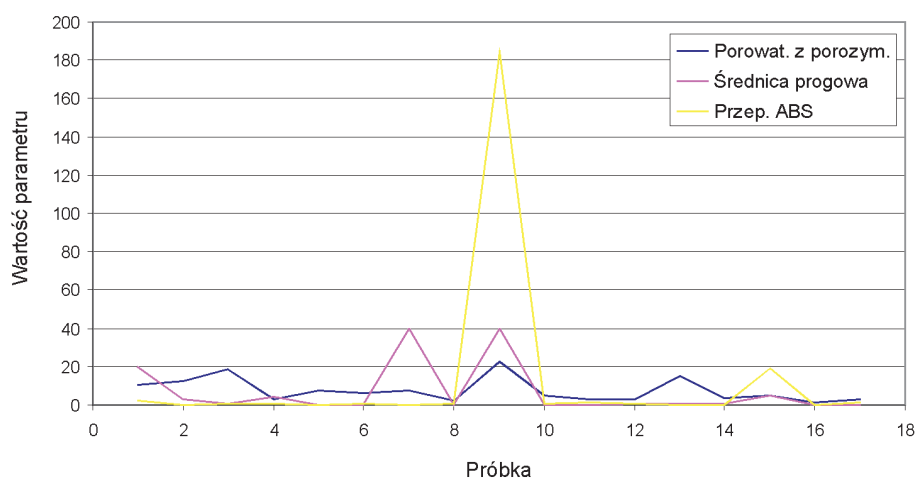
Rys. 6. Udział porowatości i przepuszczalności dla próbek z przewagą struktury porowej



Rys. 7. Zestawienie parametrów petrofizycznych dla próbek z przewagą struktury szczelinowej



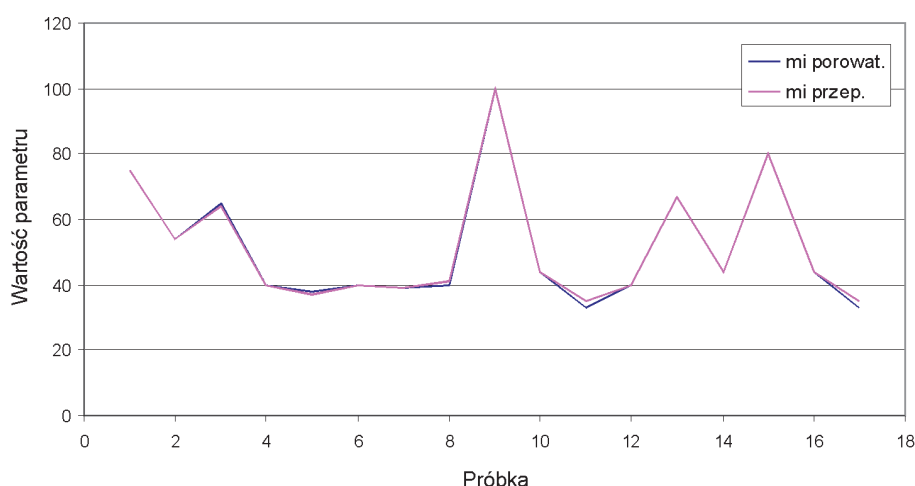
Rys. 8. Udział porowatości i przepuszczalności dla próbek z przewagą struktury szczelinowej



Rys. 9. Zestawienie parametrów petrofizycznych dla próbek z równową form

Na rysunkach 5, 7 i 9 przedstawiono krzywe zmienności poszczególnych parametrów, a na rysunkach 6, 8 i 10 zaprezentowano odpowiadające im przyporządkowanie dla trzech wydzielonych typów skał ze względu na ich

strukturę porowo-szczelinową – dla skał z dominującą strukturą porową (linia czerwona) i szczelinową (linia niebieska). Na rysunku 10 obie linie pokrywają się, co dowodzi jednakowego udziału obu struktur.



Rys. 10. Udział porowatości i przepuszczalności dla próbek z równowągą form

Omówienie wyników

Dokonano wydzielenia na podstawie analizy parametrów petrofizycznych. Otrzymane wyniki przedstawiono w tablicach 2-4 i na rysunkach 5-10. Analiza pozwoliła na wydzielenie skał reprezentujących różne modele przepływu płynów złożowych przez przestrzeń porową. Podstawowym parametrem przy tym podziale była oczywiście przepuszczalność intergranularna i szczelinowa. Otrzymano następujące wydzielenia:

- z przewagą struktur porowych (tablica 2, rysunki 5 i 6) – TYP 1,
- z przewagą struktur szczelinowych (tablica 3, rysunki 7 i 8) – TYP 2,
- z równym udziałem obu struktur (tablica 4, rysunki 9 i 10) – TYP 3.

Dla wszystkich typów znaleziono skały; od nisko do bardzo wysoko porowatych (TYP 1 – od 2,1 do 20,20%, TYP 2 – od 0,99 do 17,17% i TYP 3 – od 1,07 do 22,82%). Widać więc, że przepuszczalność dla skał o mieszanym typie przestrzeni porowej nie jest specjalnie istotnym parametrem i zdominowana jest przez porowatość intergranularną.

TYP 1 został zaprezentowany w tablicy 2. Widać tu, że dla tych skał przepuszczalność szczelinowa jest niezerowa (*double permeability*). Tym niemniej, wyznaczone parametry przestrzeni porowej korelują się z przepuszczalnościami i można stwierdzić, że badania porozymetryczne oddają charakter przestrzeni porowej tych skał.

TYP 2 – dla tego typu (tablica 3) dominacja przepuszczalności szczelinowej jest absolutna. Przepuszczalności intergranularne nie przekraczają wartości 1,5 mD. Dzięki wydzieleniu tej grupy ewidentnym faktem staje się nieprzystawalność parametrów wyznaczonych z pomiarów porozymetrycznych dla badań korelacyjnych. Średnice progowe rzędu 10–50 μm oznaczone w tych badaniach pokazują po prostu istnienie szczelin i ich ewentualne rozwarości, natomiast realna przestrzeń porowa jest mikroporowa i obejmuje pory o średnicach mniejszych od 3 μm . Reasumując, jest to typ o czysto szczelinowym charakterze przepływu płynów złożowych, dla którego porowatość szczelinowa jest dodatkowym elementem zwiększającym właściwości zbiornikowe.

TYP 3, tj. *double porosity – double permeability* (tablica 4). Obie przepuszczalności są równie istotne w statystycznym znaczeniu tego słowa. Porowatość szczelinowa, mimo że stosunkowo niewielka, przy porowatości intergranularnej wspomaga parametry zbiornikowe. Obie przepuszczalności są istotne przy transporcie płynów złożowych. Dokładna analiza zestawionych parametrów umożliwi dokonanie poprawek do uzyskanych parametrów porozymetrycznych; chodzi tu np. o próbkę nr 7, w której dominuje przepuszczalność szczelinowa, a wartość średnicy progowej jest jej odbiciem – nie zaś parametrem wynikającym z budowy przestrzeni porowej. Takie wartości są odrzucane przy badaniach korelacyjnych.

Podsumowanie

Logika rozmyta (*fuzzy logic*) okazała się jedynym narzędziem umożliwiającym wydzielenie określonych typów skał zbiornikowych tak, by możliwa stała się dalsza obróbka statystyczna tych danych w sytuacji, gdy żadne korelacje zastosowane do pełnej, nierozdzielonej bazy danych nie dają satysfakcjonujących wyników.

Logika rozmyta umożliwia poprawną interpretację wyników (szczelinowe konotacje parametrów porozymetrycznych) i ich przyporządkowanie do określonego typu przepuszczalności. Jest procedurą matematyczną obiektywizującą dokonane podziały, które zostają uwolnione od subiektywizmu interpretatora.

Artykuł nadesłano do Redakcji 30.11.2009 r. Przyjęto do druku 18.12.2009 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

- [1] Bezdek J.C. et al.: *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*. Plenum, New York 1981.
- [2] Darlak B., Kowalska-Włodarczyk M.: *Niektóre problemy oceny właściwości skał zbiornikowych z wykorzystaniem sieci neuronowych*. Prace IGNiG Nr 120, 2003.
- [3] Darlak B., Kowalska-Włodarczyk M.: *Zastosowanie logiki rozmytej w budowie modeli geologicznych*. Nafta-Gaz Nr 6, s. 454-461, 2009.
- [4] Darlak B., Kowalska-Włodarczyk M.: *Zastosowanie sztucznej sieci neuronowej do uzupełnienia danych zbiornikowych*. Przegląd Geologiczny, T. 49, Nr 9, s. 797-806, 2001.
- [5] Darlak B., Włodarczyk M.: *Próba zastosowania logiki rozmytej do interpretacji parametrów petrofizycznych skał zbiornikowych*. Nafta-Gaz Nr 5, s. 305-413, 2007.
- [6] Łęski J.: *Systemy neuronowo rozmyte*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 2008.
- [7] Piegat A.: *Modelowanie i sterowanie rozmyte*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 1999.
- [8] Piegat A.: *Fuzzy modeling and control*. ISBN 3-7908, p. 1385-1390, 2001.
- [9] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L.: *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*. PWN, 1997.
- [10] Zadeh L.A.: *Fuzzy sets*. Information and Control, p. 338-353, 1965.



Mgr inż. Małgorzata KOWALSKA-WŁODARCZYK – absolwentka Wydziału Energochemiczne Przetwórstwo Węgla i Fizykochemii Sorbentów w AGH w Krakowie. Od roku 1980 jest pracownikiem INiG w Krakowie w Zakładzie Geologii i Geochemii, Laboratorium Petrofizyki, na stanowisku starszy specjalista badawczo-techniczny. Zajmuje się wykorzystaniem sieci neuronowych w zagadnieniach geologicznych.



Mgr Barbara DARLAK – absolwentka Wydziału Chemii na Uniwersytecie Jagiellońskim w Krakowie. Od 1979 roku jest pracownikiem Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie w Zakładzie Geologii i Geochemii, Laboratorium Petrofizyki, na stanowisku starszy specjalista badawczo-techniczny. Zajmuje się wykorzystaniem sieci neuronowych w zagadnieniach geologicznych.