

Zastosowanie komputerowej analizy obrazu w badaniach petrofizycznych

Grzegorz Leśniak*

Mikroskopowa analiza obrazu dostarcza informacji o realnych wielkościach, kształtach i rozkładach badanych porów, uwzględniając wszelkie przeławienia i laminacje. Otrzymane wyniki korelują się bardzo dobrze z innymi metodami, co pozwala zastosować metodę macierzy korelacyjnych w celu pełniejszego, matematycznego opisu przestrzeni porowej.

Słowa kluczowe: komputerowa analiza obrazu mikroskopowego, porowatość, przestrzeń porowa, petrologia

Grzegorz Leśniak — **Application of computer analysis of microscopic images in petrophysical investigations.** Prz. Geol., 47: 644–651.

Summary. Microscopic imaging analysis gives us informations about real sizes and shapes of pores and their distribution in pore space. Parametres of laminations and layers are taken into account. Obtained results correlate with results obtained with the use of other methods and allow to applicate correlation matrix in interpretation works.

Key words: microscopic images, komputer analysis, porosity, pore space, petrology

Komputerowa analiza obrazu polega na przekształceniu obrazów na system cyfrowy i następnie jego szczegółowym przetwarzaniu oraz analizie. Przy zastosowaniu odpowiedniej operacji przetwarzania obrazów można uzyskać informacje, które normalnie nie są różnicowane przez system wzrokowy człowieka. Analiza obrazu jest realizowana w różnych systemach wizyjnych. Znajdują one zastosowanie w coraz większej ilości dziedzin (Ratajczak i in., 1998; Kopczyński & Rochewicz, 1993; Tadeusiewicz & Kohoroda, 1997). Stosowane są w wyposażeniu robotów, przy nadzorowaniu procesów przemysłowych, w medycynie, analizie zdjęć satelitarnych, metalurgii, przeróbce surowców mineralnych oraz wielu innych dziedzinach.

W systemie wizyjnym analizy obrazu można wyróżnić następujące urządzenia realizujące podstawowe funkcje:

- moduł wprowadzania obrazu,
- urządzenie do wyświetlania obrazów,
- przyjęcie i zapamiętanie obrazu,
- właściwa obróbka (przetwarzanie i analiza) obrazu.

Analiza obrazu przebiega najczęściej następująco:

1. Wstępne przetwarzanie obrazu. Ma ono na celu wyeliminowanie z obrazu elementów nieistotnych lub zakłócających z punktu widzenia zamierzonych celów analizy, jak również uwypuklenie interesujących cech analizowanego obrazu. Przetworzenie to prowadzi do określonych zmian w obrazie, a jego wynikiem jest również obraz.

2. Dokonanie pomiarów poszukiwanych cech analizowanego obrazu. Pomiaru pozwalają uzyskać wielkości ilościowe opisujące określone cechy analizowanego obrazu.

3. Interpretacja otrzymanych wyników ilościowych.

Typy pomiarów możemy podzielić na kategorie wielkości:

- parametry lokalne, które opisują pewien uśredniony element obrazu,
- parametry globalne, opisujące cechy grupy obiektów lub innych elementów obrazu.

W komputerowej analizie obrazu parametry lokalne, jak i globalne są wyznaczane pośrednio na podstawie pomiarów przeprowadzonych dla poszczególnych obrazów.

System wizyjny analizy obrazu stosowany w mikroskopowych badaniach petrofizycznych polega na włączeniu w drogę świetlną mikroskopu kamery RGB, połączeniu jej z komputerem i zastosowania odpowiedniego programu do zamrażania i obróbki obrazu. Można zastosować kamerę zarówno kolorową, jak i czarno-białą. Kamera czarno-biała umożliwi pracę w odcieniach szarości. Ze względu na typy próbek (obrazy mikroskopowe skał) lepsze efekty daje zastosowanie kamery kolorowej. W naszym laboratorium zastosowano kamerę kolorową CCD Hitachi HV-C20-E/K-S4, połączoną z komputerem przy pomocy łącza RGB z kartą akwizycji Matrox Meteor oraz kartą graficzną Matrox Millenium AGP. W komputerze zainstalowano program analizy obrazu Lucia-G oferowany przez firmę Nikon. Komputer jest wyposażony w płytę główną dwuprocessorową, opartą na procesorach Pentium II, stosowaną w systemach AutoCad. Zastosowanie tego typu połączeń daje możliwość pracy zarówno na obrazach rzeczywistych (obraz z mikroskopu jest prezentowany na monitorze komputera, jeden procesor służy do prezentacji graficznej, drugi wykonuje wszystkie przekształcenia obrazu), jak i zapisanych wcześniej w pamięci komputera. Program umożliwia również pracę na zdjęciach wprowadzonych do komputera przy pomocy skanera. Komputerowa analiza obrazu polega na wczytywaniu obrazu mikroskopowego przez kamerę RGB do komputera, następnie przy zastosowaniu odpowiednich procedur przetwarzanie kolorowych obrazów, wykonanie pomiarów interesujących wartości i parametrów. Używany zestaw umożliwi pracę na obrazach czarno-białych, kolorowych, binarnych, nałożonych i własnych.

Stosowanie kamery przesyłającej obraz z mikroskopu na ekran monitora komputera wymaga skalibrowania programu analizy obrazu (Lucia-G) do obiektywów stosowanych w mikroskopie. Jest to podyktowane narzuceniem dla programu wzorców pomiarowych podczas wykonywania obliczeń i pomiarów. Wykonuje się to przy pomocy płytki cienkiej z milimetrem wzorcowym. Optymalne z punktu

*Instytut Górnictwa Naftowego i Gazownictwa, ul. Lubicz 25a, 31-503 Kraków; e-mail lesniak@igng.krakow.pl

Tab. 1. Wyniki badań porowatości

Numer próbki	Pow. preparatu	Mierzona pow.	Porow. [%]	Porow. średnia	Porow. z porozym.
t1-1	6,6904	3,2906	49,18	29,34	23,68
t1-2	6,6904	1,2822	19,16		
t1-3	6,6904	1,1137	16,64		
t1-4	6,6904	2,1668	32,38		
t10-1	1,7141	1,1256	65,66	35,37	23,47
t10-2	6,6904	1,3893	20,76		
t10-3	6,6904	1,3170	19,68		
t3-1	1,7141	0,2719	15,86	21,68	26,4
t3-2	1,7141	0,3922	22,88		
t3-3	1,7141	0,4510	26,31		
t5-1	1,7141	1,2396	72,32	32,2	25,2
t5-2	1,7141	0,2921	17,04		
t5-3	1,7141	0,1244	7,25		
t6-2	6,6904	0,0567	0,84	1,24	8,11
t6-3	1,7141	0,0282	1,64		
t7-1	6,6904	0,8491	12,69	7,01	21,6
t7-2	6,6904	0,6800	10,16		
t7-3	6,6904	0,2689	4,02		
t7-4	6,6904	0,0778	1,16		
t8-1	6,6904	0,8264	12,35	18,41	26,31
t8-2	6,6904	1,4200	21,22		
t8-3	6,6904	1,4500	21,67		
t9-1	1,7141	0,3064	17,87	20,25	18,96
t9-2	1,7141	0,4162	24,28		
t9-3	1,7141	0,3189	18,6		
d74-2	1,7141	0,3286	19,17	19,9	17,32
d74-3	1,7141	0,3558	20,76		
d74-1	1,7141	0,3392	19,79		
d76-1	1,7141	0,5575	32,52		27
si1-1	6,6904	1,7350	25,93	21,19	30
si1-2	6,6904	1,1008	16,45		
si6	1,7141	0,2987	17,43		
si6-2	1,7141	0,2500	14,58	17,86	27
si6-3	1,7141	0,3700	21,58		

widzenia wielkości obszaru pomiarowego jest pracowanie na stosunkowo małych powiększeniach. Jednak w przypadku oceny porowatości wtórnej w pojedynczych ziarnach detrytycznych należy stosować duże powiększenia w celu uzyskania lepszej rozdzielczości kolorów w analizowanym obrazie. W przypadku piaskowców grubo- i bardzo gruboziarnistych w celu zwiększenia pola widzenia, należy zastosować łącznik optyczny, pozwalający powiększyć pole widzenia z mikroskopu. W przypadku zastosowania tego typu łącznika należy wykonać ponownie kalibrację dla odpowiednich obiektów.

Praca z kamerą pozwala nam również na szybkie wczytywanie obrazów do pamięci komputera oraz tworzenie

albumów obrazów. W ten sposób z jednego preparatu możemy wykonać dowolną liczbę obrazów i po zapisaniu wykonywać na nich zaplanowane wcześniej analizy. Umożliwia to nam dość dobre uśrednienie otrzymywanych wyników dla próbek o niejednorodnym wykształceniu związanym np. ze strukturami sedimentacyjnymi

Przechowywanie obrazów w albumach pozwala również na powrót w dowolnym czasie do analizowanych preparatów i powtórzenie wykonanych analiz lub wykonanie nowych potrzebnych w trakcie rozwiązywania danego problemu. Program umożliwia również integrację 4 lub 8 obrazów w zależności od stosowanej rozdzielczości.

Algorytmy przekształcania obrazu

Wśród algorytmów przetwarzania obrazu dostępnych w ramach dostarczonego oprogramowania w przeprowadzanych analizach petrofizycznych wykorzystuje się następujące przekształcenia morfologiczne (Lucia..., 1998a, b; Tadeusiewicz & Kohoroda, 1997):

Erozja. Erozja w sensie matematycznym jest to filtr minimalny, to znaczy taki operator, w którym każdemu punktowi przypisuje się minimum z wartości jego sąsiadów. Cechy erozji wykorzystywane w prowadzonych badaniach to zdolność do eliminacji drobnych szczegółów i wygładzania brzegu figury. Erozję można przeprowadzać w elementach strukturalnych typu macierzy o liczbie elementów od 3 do 9 pikseli. Optymalne jest zastosowanie elementu strukturalnego 3x3. W przypadku obrazów o wielu poziomach jasności erozję można również zapisać jako:

$$L'(m,n) = \min_{m_j, n_j \in B(m,n)} (L(m_j, n_j))$$

gdzie: $L(m,n)$ — jasność punktu o współrzędnych (m,n) ,

$B(m,n)$ — element strukturalny z punktem centralnym o współrzędnych (m,n) .

Dylatacja. Dylatacja jest przekształceniem odwrotnym do erozji i można ją zdefiniować analogicznie do erozji jako filtr maksymalny. Wykorzystywane cechy dylatacji to zamykanie małych otworów i wąskich zatok oraz zdolność łączenia obiektów położonych blisko siebie. W przypadku obrazów o wielu poziomach jasności erozję można również zapisać jako:

$$L'(m,n) = \max_{m_j, n_j \in B(m,n)} (L(m_j, n_j))$$

gdzie: $L(m,n)$ — jasność punktu o współrzędnych (m,n) ,

$B(m,n)$ — element strukturalny z punktem centralnym o współrzędnych (m,n) .

Zarówno erozja, jak i dylatacja mają jednak istotną wadę, zmieniają pole powierzchni przekształcanych obrazów. Erozja je zmniejsza a dylatacja powiększa.

Otwarcie i zamknięcie. Otwarcie i zamknięcie eliminuje opisaną powyżej wadę. Jest to przekształcenie będące złożeniem opisanych powyżej przekształceń.

otwarcie = erozja + dylatacja

zamknięcie = dylatacja + erozja

— otwarcie usuwa drobne obiekty i drobne szczegóły,

— zamknięcie wypełnia wąskie wcięcia i zatoki wewnątrz obiektu,

— obydwie operacje nie zmieniają kształtu ani wymiarów dużych obiektów o wyrównanym i gładkim brzegu.

Po wykonaniu przekształceń morfologicznych na zapisanych obrazach przechodzimy do wykonania pomiarów interesujących z punktu widzenia prowadzonych badań.

Warunkiem wyjściowym do wykonania pomiarów jest wyznaczenie pola pomiarowego — w kształcie ramki jeżeli jest mniejsze od oglądanego obrazu, lub pole całego oglądanego obrazu. Pole powierzchni może być podawane w pikselach lub jeśli mamy skalibrowany obraz w rzeczywistych rozmiarach.

Współczynniki kształtu służą do opisu badanych obiektów za pośrednictwem ich cech (Lucia..., 1998a, b).

1. Obwód

$$Obw = \frac{\pi \cdot (Pr_0 + Pr_{45} + Pr_{90} + Pr_{135})}{4}$$

Pr — sieczne prowadzone pod kątem 0°, 45°, 90°, 135°.

Do obliczania obwodu jest wykorzystywana formuła Croftona:

$$Obw = \int_0^\pi D(\alpha) d(\alpha)$$

$D(\alpha)$ — długość rzutu

(α) — kąt rzutu

2. Długość

$$L = \frac{Obw + \sqrt{Obw \cdot Obw - 16 \cdot S}}{4}$$

gdzie: S — pole powierzchni

3. Szerokość

$$W = \frac{S}{L}$$

4. Maksymalna średnica Fereta — jest wyliczana jako największa średnica z projekcji długości w zakresie od 0° do 180°.

5. Minimalna średnica Fereta — jest wyliczana jako najmniejsza średnica z projekcji długości w zakresie od 0° do 180°.

6. Wydłużenie

$$Wyd = \frac{MaxFeret}{MinFeret}$$

7. Kolistość — określa powierzchnię badanego obiektu w stosunku do idealnego koła

$$Kol = \frac{4\pi \cdot S}{Obw \cdot Obw}$$

gdzie: S — pole powierzchni
Obw — obwód

8. Równoważna średnica — wylicza równoważną średnicę koła dla powierzchni badanej próbki

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$$

gdzie: S — pole powierzchni obiektu

9. Objętość równoważnego cylindra

$$VEC = \frac{\pi d^2}{4} \cdot (I - D) + \frac{\pi}{6} d$$

I = max (Feret, długość)

d = min (Feret, szerokość)

10. Objętość równoważnej kuli

$$VES = \frac{\pi}{6} D^3$$

11. Średnia cięciwa

$$MCh = \frac{4 \cdot S}{Pr_0 + Pr_{45} + Pr_{90} + Pr_{135}}$$

jest wyliczana z pola powierzchni i siecznych prowadzonych pod kątem 0°, 45°, 90° i 135°.

Przygotowanie preparatów

W zależności od typu zakładanych badań należy w odpowiedni sposób przygotować preparaty (płytki cienkie) (Ryzula & Jezek, 1987; Soeder, 1990; Yanguas & Dravis, 1985). Przygotowanie próbki do badań petrofizycznych polega na impregnacji jej żywicą zabarwioną barwnikiem niebieskim w Epovaciu (urządzenie do impregnacji w próżni). Impregnacja próbek żywicą powoduje zachowanie niezmięnionej struktury i tekstury skały. Żywicę zabarwioną na niebiesko stosuje się w celu podkreślenia otwartej porowatości. Z tak przygotowanych próbek wykonuje się następnie klasyczne płytki cienkie polerowane. Należy zwrócić uwagę na dodanie odpowiedniej ilości barwnika do żywicy. Zastosowanie zbyt małej ilości barwnika prowadzi do trudności w odróżnianiu otwartych porów od ziarn kwarcu (niewielka różnica odcieni) z nałożoną na nie cienką warstwą żywicy.

Wykonanie pomiaru

Impregnowanie próbek w trakcie przygotowania żywicą zabarwioną na niebiesko, pozwala na obserwowanie otwartej porowatości. Równocześnie pozwala na definiowanie otwartej przestrzeni porowej dla wykonania pomiarów porowatości. W realizowanych pomiarach „powierzchnia wyróżniona” jest jednym z najważniejszych kryteriów.

Definiowanie otwartej przestrzeni porowej można przeprowadzać w sposób dwójaki (Lucia..., 1998a, b; Tadeusiewicz & Kohoroda, 1997). Pierwszy to definiowanie koloru do analizy przy pomocy trzech składowych RGB. Drugi to definiowanie koloru znacznikiem (punkt lub punkty na obrazie) i następnie końcowe definiowanie za pomocą HSI (odcień, nasycenie, intensywność). Drugi sposób postępowania pozwala nam na dokładniejsze definiowanie odcieni analizowanego koloru i unikanie pomyłek związanych na przykład z delikatnym rozmyciem zabarwionej żywicy na ziarnach detrytycznych. W takich miejscach nasycenie koloru jest słabsze. Zdefiniowanie

Tab. 2. Porównanie wyników pomiarów na obrazie binarnym i kolorowym

Próbka	D 74-3 b				D 74-3k			
Liczba pól	1				1			
Liczba obiektów	1374				1374			
Obiektów na pole	1374				1374			
Mierzona powierzchnia	1,71414 [mm ²]				1,71414 [mm ²]			
Obiektów na obszar	801,569/[mm ²]				801,569/[mm ²]			
Wycinek obszaru	0,184734				0,184734			
Właściwość	Średnia	Odch. stand.	Minimum	Maksimum	Średnia	Odch. stand.	Minimum	Maksimum
<i>Area*</i>	0,00023047	0,0010924	4,23E-06	0,02318	0,00023047	0,0010924	4,23E-06	0,02318
<i>FillArea</i>	0,00023826	0,0011536	4,23E-06	0,025618	0,00023826	0,0011536	4,23E-06	0,025618
<i>FillRatio</i>	0,99677	0,013632	0,83333	1	0,99677	0,013632	0,83333	1
<i>EqDiameter</i>	0,0089424	0,014611	0,0023218	0,17179	0,0089424	0,014611	0,0023218	0,17179
<i>VolumeEq Sphere</i>	1,07E-05	0,000097333	6,55E-09	0,0026548	1,07E-05	9,73E-05	6,55E-09	0,0026548
<i>VolumeEq Cylinder</i>	1,94E-06	1,15E-05	4,56E-09	0,00028319	1,94E-06	0,000011535	4,56E-09	0,00028319
<i>Length</i>	0,025586	0,087023	0,0020576	1,567	0,025586	0,087023	0,0020576	1,567
<i>Width</i>	0,0035512	0,0026498	0,0017045	0,018866	0,0035512	0,0026498	0,0017045	0,018866
<i>MaxFeret</i>	0,015169	0,03032	0,0020576	0,37119	0,015169	0,03032	0,0020576	0,37119
<i>MinFeret</i>	0,0085751	0,017377	0,0020576	0,25119	0,0085751	0,017377	0,0020576	0,25119
<i>Circularity</i>	0,79663	0,2839	0,023671	1	0,79663	0,2839	0,023671	1
<i>Elongation</i>	1,6573	0,6432	1	6	1,6573	0,6432	1	6
<i>MeasuredArea</i>	1,7141	0	1,7141	1,7141	1,7141	0	1,7141	1,7141

**Area* — średnia powierzchnia mierzonego obiektu, *fillarea* — jeżeli obiekt zawiera dziury (*holes*), to *FillArea* wyznacza powierzchnie razem z dziurami, *FillRatio* — stosunek *Area* do *FillArea*, *EqDiameter* — równoważna średnica, *VolumeEqSphere* — objętość równoważnej kuli, *VolumeEqCylinder* — objętość, równoważnego walca, *Length* — długość, *Width* — szerokość, *MaxFeret* — maksymalna średnica w projekcji kątowej od 0° do 180°, *MinFeret* — minimalna średnica w projekcji kątowej od 0° do 180°, *Circularity* — kolistość, stosunek pola powierzchni obiektu do idealnej kuli o danej powierzchni, *Elongation* — wydłużenie, stosunek *MaxFeret* do *MinFeret*, *MeasuredArea* — całkowita powierzchnia, której dotyczą wykonywane pomiary

koloru powoduje powstanie tzw. obrazu nałożonego (ryc. 2), tzn. na obrazie rzeczywistym pojawia się drugi obraz złożony ze zdefiniowanego przez nas koloru (pole wyróżnione). Na podstawie obrazu nałożonego definiuje się również obraz binarny. Obraz binarny jest obrazem zapisanym w układzie 0.1 (czarny, biały). W obrazie binarnym pole wyróżnione jest białe. Podczas definiowania pola wyróżnionego należy zwrócić uwagę na dokładne zdefiniowanie badanego obszaru. Zaznaczenie innej intensywności lub odcienia koloru prowadzi do zakłamania wyników prowadzonych pomiarów. Pomiary można przeprowadzać zarówno na obrazie binarnym, jak i obrazie kolorowym nałożonym. W badaniach ukierunkowanych na przestrzeń porową główne pomiary można wykonywać na obrazie kolorowym. Jednak istnieje pewna ilość przekształceń morfologicznych obrazu, których wykonanie jest związane tylko z obrazem binarnym.

Na tak zdefiniowanym obrazie zaznaczamy obszar pomiarowy. Może on obejmować całe pole obserwacji lub dowolny wycinek tego pola zaznaczony na obrazie. Umożliwia to np. analizę porowatości w danej próbce skały lub np. pomiar wielkości porowatości wtórnej w jednym zaznaczonym ziarnie detrytycznym.

Pomiary możemy przeprowadzać w dwóch wersjach – pomiary pól i pomiary obiektów (*Lucia...*, 1998a, b; Tadeusiewicz & Kohoroda, 1997). Przed rozpoczęciem pomiarów należy zdefiniować właściwości pola lub obiektów, które będziemy mierzyli. Następnie zaznaczamy pole mierzone i wykonujemy pomiar pola. Następną operacją jest skanowanie pola wyróżnionego. Na obserwowanym obrazie są zaznaczane elementy składowe, które będą uwzględniane w pomiarach. Równocześnie następuje policzenie wszystkich obiektów uwzględnianych w procesie pomiarowym. Obiekty, pola zaliczane do powierzchni pomiarowej są zaznaczane na zielono. Obiekty nie zaliczone do powierzchni pomiarowej są znakowane na niebiesko — są to obiekty nie zamykające się całkowicie w obrębie pola pomiarowego. Po wykonaniu skanowania otrzymujemy Dane Pola i Dane Obiektów — są to nasze wyniki pomiarów. W przypadku wykluczenia przy skanowaniu pewnej liczby obiektów należy je dodać do otrzymanych wyników. Umożliwia to opcja programu Pojedynczy Obiekt. Dane dla pojedynczego obiektu możemy dodać do już istniejących danych obiektów lub edytować na ekranie. Program umożliwi nam eksport otrzymanych wyników w

formie pliku txt., wydruku lub do schowka. W przypadku wykonywania większej liczby pomiarów najwygodniejszy jest eksport w formie pliku. Możliwy jest eksport jednego z wybranych parametrów lub wszystkich pomierzonych. Można przeprowadzać pomiary dla kilku obrazów równocześnie. Program daje możliwości sumowania wyników

dla wszystkich obrazów, lub odczytywanie dla poszczególnych obrazów.

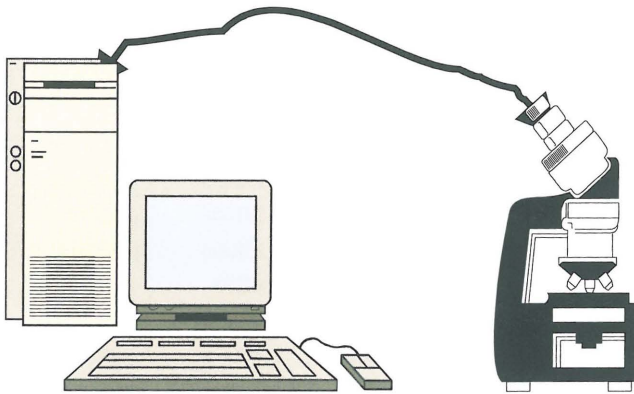
Otrzymane wyniki można prezentować w różnej postaci. Dla każdej z prezentowanych próbek (zdjęcie + porowatość zmierzona) dołączono pomiary wielkości lokalnych (Danych Obiektu) charakteryzujące dany obraz. Na wydrukach część nazw zostawiono w języku angielskim.

Wybór parametrów przedstawianych w formie tabeli, wybieramy w zależności od prowadzonych typów badań. Parametry wymienione powyżej w sposób najpełniejszy opisują mierzone pory i przenoszą wyniki pomiarów poprzez statystykę na całą przestrzeń porową badanej skały.

Oprócz podanych powyżej wielkości analiza obrazu umożliwia nam pomiar kątów, wielkości ziarna bezpośrednio na obrazie i eksport otrzymanych wielkości w formie pliku. Pomiar wielkości ziarna można przeprowadzać:

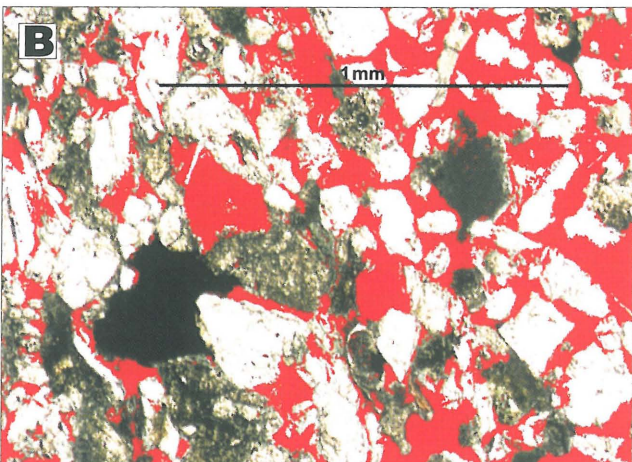
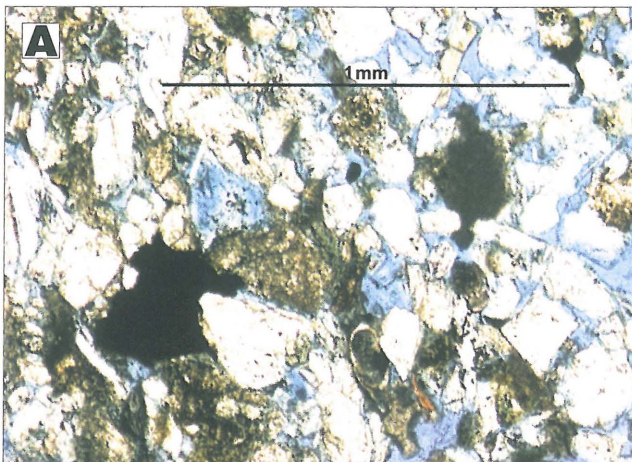
- za pomocą dwóch linii pionowych,
- tzw. wolna ręka (sami wyznaczamy początek i koniec pomiaru, wzdłuż prostej o dowolnej orientacji),
- linią łamaną,
- odcinkami linii łamanej,
- autodetekcja pomiar jest wykonywany pomiędzy punktami o takiej samej charakterystyce HSI.

Oprócz wyznaczania „pola wyróżnionego” dla wykonywania pomiarów, możemy wykonywać pomiary intere-



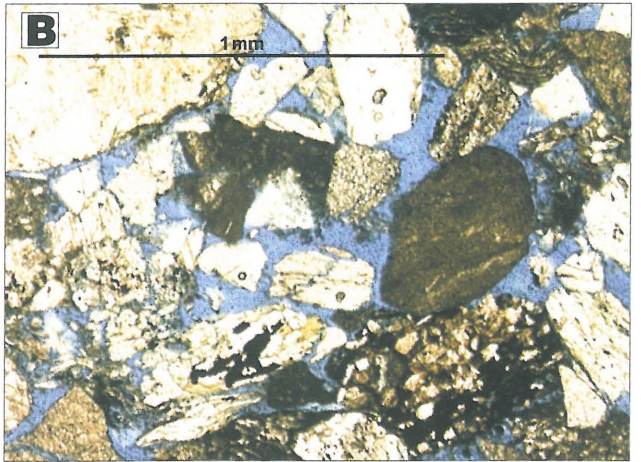
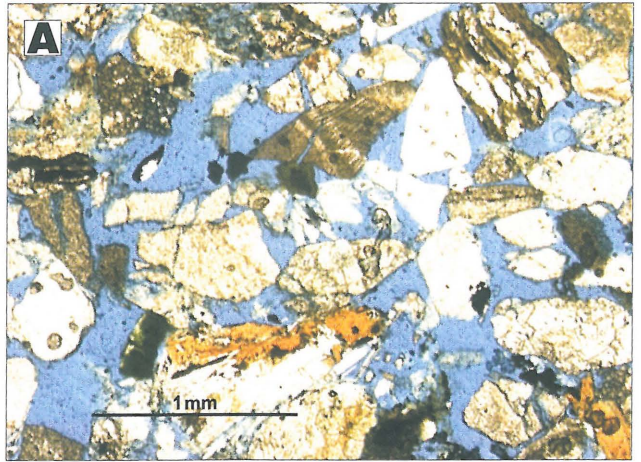
Ryc. 1. Schemat blokowy stanowiska do komputerowej analizy obrazu

Fig. 1. Block sketch of computer imaging analysis device



Ryc. 2. Próbką T-4; A — obserwacje w świetle przechodzącym; kolor niebieski oznacza otwartą porowatość; B — obraz nałożony, przygotowany do wykonania pomiaru

Fig. 2. Sample T-4; A — microphotograph, plane light; blue colour represents open porosity, B — image prepared to numerical computations



Ryc. 3. Próbką T-4-1; A — obserwacje w świetle przechodzącym; porowatość mierzona 32,39%, B — obserwacje w świetle przechodzącym; porowatość mierzona 26,32%

Fig. 3. Sample T-4-1; A — microphotograph, plane light; measured porosity 32,39%; B — microphotograph, plane light; measured porosity 26,32%

Tab. 3. Wyniki pomiarów parametrów przestrzeni porowej

Właściwość	T 4-1				T 3-3			
	Średnia	Odch. stand.	Minimum	Maksimum	Średnia	Odch. stand.	Minimum	Maksimum
<i>Area*</i>	0,0010721	0,0060103	4,23E-06	0,085027	0,00030408	0,0035839	4,23E-06	0,098232
<i>FillArea</i>	0,001113	0,0063106	4,23E-06	0,089019	0,00032707	0,0039507	4,23E-06	0,10916
<i>FillRatio</i>	0,99722	0,013713	0,82812	1	0,9969	0,015817	0,74286	1
<i>EqDiameter</i>	0,01751	0,032533	0,0023218	0,32903	0,0074402	0,018216	0,0023218	0,35366
<i>VolumeEq Sphere</i>	1,24E-04	0,0012451	6,55E-09	0,018651	4,00E-05	7,49E-04	6,55E-09	0,02316
<i>VolumeEq Cylinder</i>	1,96E-05	1,41E-04	4,56E-09	0,0020393	5,73E-06	0,00010461	4,56E-09	0,0033554
<i>Length</i>	0,056051	0,207	0,0020576	2,774	0,022749	0,13133	0,0020576	3,0658
<i>Width</i>	0,0059083	0,006089	0,0017045	0,03335	0,0031018	0,0025572	0,0017045	0,043776
<i>MaxFeret</i>	0,03324	0,07955	0,0020576	0,93904	0,012956	0,042219	0,0020576	0,92352
<i>MinFeret</i>	0,017422	0,039588	0,0020576	0,44291	0,0069343	0,020707	0,0020576	0,41927
<i>Circularity</i>	0,73844	0,30448	0,033958	1	0,82619	0,2633	0,017394	1
<i>Elongation</i>	1,7332	0,67258	1	5,8462	1,6498	0,69415	1	5,429
<i>Measured Area</i>	1,7141	0	1,7141	1,7141	1,7141	0	1,7141	21,7141

*objaśnienia przy tabeli 2

Tab. 4. Uśrednione wartości właściwości obiektów

Próbka	D74	T 9	T 8	T 7	T 6	T 5	T 3	T 1	T 10
<i>Area*</i>	0,00026046	0,00044132	805,88	243,260557	46,8590695	43,1545786	0,00068809	3002,45	0,3089619
<i>FillArea</i>	0,00026847	0,00045846	829,575	247,560566	47,8325702	48,3520798	0,00072003	3118,65	0,47627955
<i>FillRatio</i>	0,99637666	0,997225	0,997225	0,9979	0,998125	0,99713	0,99706	0,99809	0,82295
<i>EqDiameter</i>	0,00952746	0,0108285	19,2605	8,5741095	3,40972075	2,7172531	0,0124751	24,8185	0,4523695
<i>VolumeEq Sphere</i>	1,18483 E-05	3,26365 E-05	53447	11222,0000	1000,05000	3406,00000	8,21305 E-05	779755	0,1818735
<i>VolumeEq Cylinder</i>	2,35483 E-06	5,99195 E-06	12148	3599,05001	283,840000	218,795000	1,26752 E-05	127427,5	0,06308765
<i>Length</i>	0,027477	0,032129	48,6455	15,8469695	7,3884155	8,3923715	0,0394	73,99	1,167325
<i>Width</i>	0,00373776	0,00414015	8,0458	4,3013783	1,59692365	1,34129845	0,00450505	9,25975	0,1396138
<i>MaxFeret</i>	0,016289	0,0186245	31,8355	13,314521	5,821543	4,535713	0,023098	44,637	0,9761825
<i>MinFeret</i>	0,00926796	0,010546	18,551	7,5811515	2,91970295	2,47337125	0,01217815	23,8015	0,571763
<i>Circularity</i>	0,79230333	0,7931	0,774165	0,789215	0,831425	0,823155	0,782315	0,79277	0,567715
<i>Elongation</i>	1,6331	1,664	1,60905	1,7064	1,6811	1,6855	1,6915	1,70345	1,69335
<i>Measured Area</i>	1,7141	1,7141	6690400	3345203,34	857053,345	857050,857	1,7141	6690400	4,21755

*objaśnienia przy tabeli 2

sujących nas wielkości na bezpośrednio wskazywanych obiektach. Wyznaczanie obiektów do pomiarów przeprowadza się:

— wolna ręka — dokładnie wytyczamy kursorem interesujący obiekt,
— elipsa — sami dobieramy wielkość elipsy,
— koło,

Tab. 5. Wyniki badań porozymetrycznych

Głęb. [m]	Porow. [%]	Średnia [um]	Powierz. [m ² /g]	Średnica [um]	Histereza [%]
T 1	23,68	0,5	0,94	80	22
T 3	26,4	0,4	1,45	20	36
T 5	25,22	0,41	0,27	15	41
T 6	8,11	0,23	0,56	4	69
T 7	21,6	0,44	0,96	30	27
T 8	26,31	0,39	1,42	20	37
T 9	18,96	0,26	1,53	15	53
T 10	23,47	0,47	0,96	100	19
d74	16,08	3,04	0,10	15	15
d76	20,08	1,94	0,20	15	14

Tab. 6. Korelacja wyników badań porozymetrycznych i mikroskopowych

Porozymetr / Mikroskop	Śred. kapilara	Pow. właściwa	Śred. progowa	Histereza
Area*	-0,1429	0,1235	0,9459	-0,3790
FillArea	-0,1425	0,1221	0,9461	-0,3787
FillRatio	-0,6735	0,1780	0,4293	0,3668
EqDiameter	-0,2522	0,2277	0,7738	-0,3150
VolumeEq Sphere	-0,1021	0,0515	0,9552	-0,3681
VolumeEq Cylinder	-0,1076	0,0636	0,9575	-0,3726
Length	-0,2276	0,1978	0,8215	-0,3240
Width	-0,2751	0,2314	0,7281	-0,3034
MaxFerret	-0,2438	0,2149	0,7997	-0,3175
MinFerret	-0,2455	0,2327	0,7741	-0,3180
Circularity	-0,1432	-0,6231	-0,3038	0,5859
Elongation	-0,4250	-0,0306	0,3992	0,0569

*objaśnienia przy tabeli 2

— prostokąt,
— autodetekcja — obiekt jest wyznaczany na podstawie histogramu HSI w najbliższej okolicy.

Otrzymane wyniki

Dobierając próbki do badań kierowano się tylko wynikami badań porozymetrycznych. Starano się dobrać próbki o zróżnicowanej porowatości. Wybrano 17 próbek reprezentujących różne typy piaskowców od grubo do drobno ziarnistych (skały będące najczęściej przedmiotem badań) oraz 2 próbki wapieni.

Ze wszystkich próbek wykonano płytki cienkie, polerowane, nasycone żywicą zabarwioną na kolor niebieski. Następnie wykorzystując kamerę podłączoną do mikroskopu z każdej płytki cienkiej zostały „zamrożone” (zapisane w komputerze) od dwóch do czterech obrazów. Na zamrożonych obrazach wykonano następnie przekształcenia morfologiczne i pomiary właściwości pola i obiektów.

Na podstawie wykonanych pomiarów wyliczono porowatość dla poszczególnych obrazów oraz średnią dla danej

próbki (tab. 1). W tabeli zamieszczono również wyniki oznaczeń porowatości z porozymetru. Różnice w otrzymanych wynikach można wytłumaczyć niejednorodnością materiału skalnego. Niejednorodność wykształcenia piaskowców (laminacja materiałem drobniejszym, niejednorodność rozmieszczenia spoiwa typu wypełniającego) należy eliminować przez nałożenie większej ilości obrazów na badaną próbkę.

Ponieważ pomiary można przeprowadzać na obrazach kolorowych i binarnych, wykonano pomiary dla kilku próbek w jednym i drugim typie obrazu. Otrzymane wyniki pomiarów właściwości Obiektów są identyczne (tab. 2). Potwierdza to możliwości wykonywania pomiarów na obu typach obrazów. Jest to istotne ze względu na większą ilość przekształceń morfologicznych (szkieletyzacja, strefy wpływu) możliwych do przeprowadzenia tylko na obrazie binarnym. W badaniach niektórych typów skał np. kwarcytów, praca na obrazach binarnych powinna być łatwiejsza i dawać lepsze efekty. Ponieważ istnieje ciągłe przejście pomiędzy obrazem binarnym i kolorowym część pomiarów można wykonywać na jednym a część na drugim obrazie.

W zestawieniu graficznym zamieszczono na jednej stronie dwa obrazy wykonane dla jednej płytki cienkiej z naniesionym znacznikiem 1mm (ryc. 3). Poniżej zdjęcia podano porowatość zmierzoną z mikroskopu oraz porowatość z porozymetru. W tabeli 3 podano właściwości Danych Obiektu w formie tabelarycznej dla każdego prezentowanego obrazu. W tabeli 4 zostały zaprezentowane wartości właściwości obiektów po uśrednieniu dla każdej próbki. Ponieważ obiektami mierzonymi są pory znajdujące się w skale, właściwości obiektów mierzonych dobrano w ten sposób, aby jak najlepiej opisywały przestrzeń porową. W celu stwierdzenia zgodności i poprawności wykonanych pomiarów z pomiarami porozymetrycznymi (tab. 5) wykonano korelację pomiędzy parametrami opisującymi przestrzeń porową uzyskanymi z badań porozymetrycznych i właściwościami obiektów (przestrzeń porowa) z analizy obrazu (tab. 6). W tabeli zamieszczono wycinek macierzy korelacji, obejmujący tylko interesujące nas wielkości. Najlepszą wartość korelacji uzyskano dla średnicy progowej z objętością równoważnej kuli i objętością równoważnego cylindra. Takiego rezultatu należało się spodziewać, ponieważ porozymetr bazuje na walcowym modelu przestrzeni porowej. Bardzo dobre wartości korelacji średnicy progowej uzyskano również dla właściwości Area (średnia wielkość pola jednego obiektu), FillArea oraz wszystkich parametrów opisujących rozmiary obiektów (równoważna średnica, długość, szerokość, MaxFerret, MinFerret). Dobrą wartość korelacji uzyskano również dla histerezy i kolistości. Tłumaczy to powstawanie efektu histerezy, polegającego na zatrzymywaniu rtęci w dużych porach połączonych wąskimi kapilarami. Odwrotną korelację otrzymano dla średniej kapilary z FillRatio i wydłużeniem. Również korelację odwrotną otrzymano dla powierzchni właściwej i kolistości, co można wytłumaczyć: im mniej regularnie wykształcona przestrzeń porowa tym większa jej powierzchnia właściwa.

Podsumowanie

Przy pomiarach porowatości skał zbiornikowych często spotykamy się ze skałami słabo zwięzłymi, rozsypliwymi, o dużej lub bardzo dużej porowatości. W takich przypadkach klasyczne metody badań porowatości mogą

zawodzić ze względu na niemożność poboru próbki w stanie niezmiennym lub zmianę porowatości próbki podczas wykonywania pomiaru. W takich przypadkach pomagają nam mikroskop z komputerową analizą obrazu.

Zastosowanie analizy komputerowej przestrzeni porowej wydaje się konieczne również do pełnej charakterystyki przestrzeni porowej badanych profili. Przestrzeń porowa znacznej części skał odpowiada tzw. modelowi perkolacyjnemu (Bliefnick & Kaldi, 1996; Donaldson & Tiab, 1996) tj. modelowi stosunkowo wąskich kanałów kapilarnych łączących duże wolne komory w przestrzeni porowej. Tak wykształcona przestrzeń porowa nie odzwierciedla się w pomiarze porozymetrycznym. Podczas wykonywania krzywej nasiąkania, przy rosnących ciśnieniach kapilarnych, rtęć migruje do kanałów łączących komory i wlewa się do nich dając, dla danego ciśnienia kapilarnego (odpowiadającego średnicy kanałów), duży wzrost nasycenia rtęcią. Sytuacja taka powtarza się dla następnych ewentualnych średnic kanałów łączących komory. Krzywa kumulacyjna rejestruje ten efekt jako zwiększenie ilości kanałów łączących o danej średnicy. Efekt łącznej objętości komór można oszacować z krzywej osuszania (ilość pułapek kapilarnych), ale pomiar porozymetryczny nie daje nam rozkładu wielkości tych komór. Efektem mierzalnym przy tak ukształtowanej przestrzeni porowej jest anomalna relacja porowatość–przepuszczalność, bowiem wolne komory dają duży wkład do porowatości i znikomy do przepuszczalności. Zastosowanie analizy obrazu pomaga rozwiązać ten problem.

Parametry opisujące przestrzeń porową uzyskiwane w wyniku analizy obrazu w pełniejszy sposób opisują tę przestrzeń niż parametry uzyskiwane z badań piknometrycznych i porozymetrycznych. Uzyskiwane wyniki korelują się bardzo dobrze, co pozwala zastosować metodę analizy obrazu do opisu przestrzeni porowej w przypadkach gdy zawodzi metoda porozymetryczna. W celu najlepszego opisu przestrzeni porowej należałoby wykonywać badania porozymetryczne, następnie na ich podstawie wyróżniać typy i klasy przestrzeni porowej i dla każdego typu i klasy wykonywać analizę obrazu. Przy takim postępowaniu dla każdego typu przestrzeni porowej uzyskalibyśmy jej najpełniejszy opis. Analizę obrazu powinno się również wykonywać z próbek walcowych na których przeprowadzono badania przepływów fazowych. Prawdopodobnie parametry uzyskiwane w wyniku analizy obrazu pomogły by w lepszy sposób zrozumieć i interpretować zachodzące procesy.

Stosując metodę analizy obrazu do badań petrofizycznych należy porównać jej możliwości z badaniami porozymetrycznymi. Poniżej przedstawiono wady i zalety obu metod.

Analiza obrazu:

1. Zalety:

— dostarczają informacji o wielkościach, kształtach i rozkładach badanej przestrzeni porowej (większa liczba parametrów opisujących przestrzeń porową niż otrzymane z porozymetru),

— pozwalają na określenie współczynników szczelinowatości (sposobu transportu płynów złożowych),

— pozwalają przeprowadzić badania petrograficzne

— pozwalają przebadać przestrzeń porową na kilku cm², uwzględniając wszystkie przeławienia i laminacje (badania można przeprowadzić na płytkach cienkich wykonanych z rdzeników użytych do przepuszczalności fazowych).

2. Wady i ewentualne sposoby ich likwidacji:

— pomiar dwuwymiarowy (część właściwości wyliczanych z algorytmów matematycznych przekształca go w pomiar trójwymiarowy),

— nieczułość na pory zamknięte (można to zlikwidować poprzez funkcję pomiaru pojedynczych obiektów),

— nieczułość na mikropory (odpowiedni dobór powiększeń i praca na obrazie może to w dużym stopniu zredukować, nałożenie na próbkę odpowiednio dużej ilości obrazów),

— koszt wykonania analizy (koszt wykonania płytki cienkiej).

Analiza porozymetryczna:

1. Zalety:

— pomiary wykonywane na próbkach trójwymiarowych,

— mierzona porowatość efektywna,

— szybki pomiar dostosowany do wykonywania długich serii.

2. Wady:

— nie obejmuje porów większych od 0,3 mm,

— nie mierzy porowatości całkowitej (pory zamknięte),

— jest nieczuła na mikroszczelinowatość.

Literatura

- BLIEFNICK D.M. & KALDI J.G. 1996 — Pore Geometry: Control on Reservoir Properties, Walker Creek Field, Columbia and Lafayette Counties, Arkansas. AAPG Bull., 80: 1027–1044.
- DONALDSON E.C. & TIAB D. 1996 — Petrophysics. Elsevier, New York.
- Lucia User's Guide, System for Image Processing and Analysis 1998a — Laboratory Imaging LTD.
- Lucia Function Reference, System for Image Processing and Analysis 1998b — Laboratory Imaging LTD.
- RATAJCZAK T., MAGIERA J., SKOWROŃSKI A. & TUMIDAJSKI T. 1998 — Ilościowa analiza mikroskopowa skał. Wyd. AGH.
- ROCHEWICZ A. & KOPCZYŃSKI R. 1993 — Rola i znaczenie badań mineralogiczno-petrograficznych w przygotowaniu danych dla projektowania zabiegów stymulacyjnych. Mat. Konf. „Nowe metody laboratoryjne i techniki badawcze w geologii naftowej i geologii złożowej”, Jadwisin.
- RYZULA K. & JEZEK D.J. 1987 — Standing method for recognition of pore space in thin and polished sections. J. Sediment. Petrol., 57: 777–778.
- SOEDER D.J. 1990 — Applications of fluorescence microscope to study of pores in tight rock. AAPG, 74: 30–40.
- TADEUSIEWICZ R. & KOHORODA P. 1997 — Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów. WFPT Kraków.
- YANGUAS J.E. & DRAVIS J.J. 1985 — Blue fluorescent dye technique for recognition of microporosity in sedimentary rock. J. Sediment. Petrol., 55: 600–602.