

Parametryzacja kluczowych własności przestrzeni porowej skał na podstawie badań tomograficznych

Parameterization of key rock pore space properties based on tomographic measurements

Katarzyna Drabik, Anna Przelaskowska, Urszula Zagórska

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Celem pracy było wykonanie szerokiej analizy parametrów przestrzeni porowej otrzymanych na podstawie obrazów rentgenowskiej tomografii komputerowej. W pracy określono geometryczne i topologiczne parametry struktury wewnętrznej próbek skał, pełniące kluczową rolę dla prognozowania przepływu mediów złożowych. Materiał badawczy stanowiły próbki dolomitu z kanalikami robaczkowymi powstałymi w wyniku zabiegu kwasowania. Modele 3D przestrzeni porowej zostały wykonane przy zastosowaniu nowoczesnego specjalistycznego oprogramowania Avizo 3D Pro (Thermo Fisher Scientific). Praca polegała na określeniu szeregu parametrów geometrycznych, takich jak: objętość, powierzchnia właściwa, grubość, szerokość i długość oraz sferyczność, maksymalna i minimalna średnica Fereta, liczba Eulera i inne. Do wyliczenia parametrów, oprócz oprogramowania Avizo 3D Pro, wykorzystano również program poROSE (poROUs materials examination SoftwarE, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków). Następnie wybrano największe obiekty w każdej z próbek i przeprowadzono dla nich proces transformacji obrazu w szkielet, co pozwoliło na ich charakterystykę topologiczną. Uzyskano szereg informacji dotyczących kanalików porowych, m.in. o ich średnim promieniu, długości, krętości, liczbie połączeń (węzłów) i liczbie koordynacyjnej. Następnie porównano i przeanalizowano wszystkie parametry dla trzech obiektów pochodzących z trzech badanych próbek. Obiekt o największej objętości zidentyfikowano w próbce C. Wszystkie wybrane do analizy obiekty charakteryzowała podobna wartość średnia średniego promienia kanalików. Podobne są także średnie wartości liczby koordynacyjnej – wynoszą około 3. Najbardziej rozbudowaną strukturą charakteryzują się obiekty w próbkach B i C, na co wskazuje liczba Eulera. Przeprowadzone analizy pokazały, jak wiele informacji na temat szczegółów struktury porowej skał można uzyskać na podstawie wyników tomografii komputerowej. Otrzymane parametry mogą posłużyć do budowy modelu sieci porowej, a także do przeprowadzenia symulacji przepływu mediów przez skałę.

Słowa kluczowe: rentgenowska tomografia komputerowa, przestrzeń porowa, własności topologiczne i geometryczne, modelowanie sieci porowej.

ABSTRACT: The purpose of the study was to perform an extensive analysis of pore space parameters obtained from X-ray computed tomography images. Geometric and topological parameters of the internal structure of rock samples, which play a key role in predicting the flow of reservoir media were determined. The investigations were carried out on dolomite samples with “wormholes” formed as a result of the acidizing treatment. 3D models of the pore space were prepared using modern specialized programming Avizo 3D Pro (Thermo Fisher Scientific). A number of geometric parameters such as volume, specific surface area, thickness, width, length, sphericity, min. and max. Feret diameters, Euler number and others were determined. In addition to Avizo 3D Pro software, the poROSE program (poROUs materials examination SoftwarE, AGH University of Krakow) was used to calculate these parameters. The largest objects in each sample were then selected and a skeletal image transformation process was carried out for them, allowing for their topological characteristics. A range of information on pore channels was obtained, including their average radius, length, curvature, number of connections (nodes), and coordination number. All parameters were then compared and analysed for three objects, derived from the three samples studied. The object with the largest volume was identified in sample C. All the objects selected for analysis were characterized by a similar average value of the average radius of the channels. The average values of the coordination number are also similar and amount to approx. 3. The most extensive structure is characterized by the objects in samples B and C, as indicated by the Euler number. The analyses showed how much information on the details of the pore structure of rocks can be obtained from the results of CT scans. The acquired parameters can be used to build a pore network model, as well as to simulate the flow of media through the rock.

Key words: computed X-ray tomography, pore space, topological and geometric properties, pore network modelling.

Autor do korespondencji: K. Drabik, e-mail: katarzyna.drabik@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 12.12.2023 r. Zatwierdzono do druku: 28.02.2024 r.

Wprowadzenie

Wysokorozdzielcza rentgenowska tomografia komputerowa (CT) jest nowatorską technologią wchodzącą w skład szerokiego zakresu badań geologicznych. Jest to szybka i nieniszcząca metoda tworzenia obrazów odzwierciedlających wewnętrzną strukturę badanych obiektów. W ostatnich latach obserwuje się rozwój zarówno technik pomiarowych (coraz lepsza rozdzielczość obrazów), jak też specjalistycznego oprogramowania. Obecnie pozwala ono na ilościową charakterystykę geometrii oraz topologii porów i gardzieli, a także na modelowanie sieci porów, które stanowi podstawę wykonania symulacji przepływów. Zrozumienie zasad przepływu płynów przez porowate media ma zasadnicze znaczenie w bardzo wielu dziedzinach, m.in. w:

- sekwestracji i magazynowaniu CO₂ (Shah et al., 2016);
- szczelinowaniu hydraulicznym;
- kwasowaniu (Cooper et al., 2023);
- obserwacji zmian struktury skały podczas badań mechanicznych (Dohnalik et al., 2021);
- wydobyciu węglowodorów;
- projektowaniu instalacji geotermalnych;
- badaniu migracji metanu w pokładach węgla (Wang et al., 2020);
- wulkanologii (Zandomenighi et al., 2010; Cnudde i Boone, 2013);
- badaniach archeologicznych (Reedy i Reedy, 2022);
- inżynierii (budowa geologicznych składowisk dla paliwa jądrowego i odpadów promieniotwórczych (Baychev et al., 2019)).

Publikacja przedstawia wykorzystanie parametryzacji przestrzeni porowej w badaniu wewnętrznej struktury skał.

Metodyka

Tomografia rentgenowska polega na „prześwietleniu” badanego obiektu promieniami rentgenowskimi, co pozwala uzyskać trójwymiarowy obraz przestrzeni porowej wewnątrz badanej próbki. Przetworzenie obrazu 3D umożliwia otrzymanie informacji dotyczących geometrii i topologii przestrzeni porowej. Topologia informuje zarówno o lokalizacji porów, jak i o połączeniach między nimi, a więc w znacznym stopniu wpływa na przepuszczalność, uzależnioną od połączeń między porami. Geometria natomiast definiuje rozmiar i kształt pustek, które także decydują o przepływie mediów w skale. Dla złóż, w których szczeliny nie występują bądź występują rzadko, najważniejsze parametry geometryczne przestrzeni porowej to objętość, powierzchnia, promień i kształt porów oraz gardzieli. Główne parametry topologiczne to: stopień

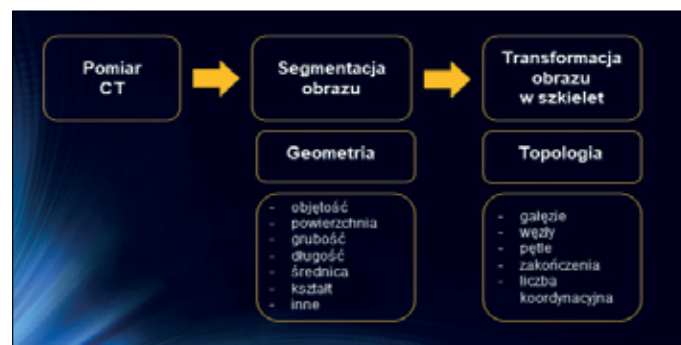
skomunikowania, krętość kanalików porowych, liczba Eulera i liczba koordynacyjna. W przypadku zbiorników szczelinowych (np.: łupki i pokłady węgla) ich charakterystyka powinna zawsze obejmować parametryzację szczelin, ponieważ mają one znaczący wpływ na przepływ mediów w skałach (Clarkson i Bustin, 1996; Wu et al., 2019).

W ramach pracy przeprowadzono możliwie najszerszą analizę przestrzeni porowej na podstawie obrazów rentgenowskiej tomografii komputerowej wybranych próbek skał. Prace eksperymentalne wykonano, wykorzystując tomograf komputerowy Geotek RXCT (*rotating X-ray and computed tomography*), obsługiwany przez program Geotek MSCL-XCT 4.0 oraz program Geotek Image Reconstructor, odpowiedzialny za rekonstrukcję danych pomiarowych. Rozdzielczość obrazów wynosiła 35 μm.

Do analizy i wizualizacji wyników wykorzystano nowoczesne oprogramowanie Avizo 3D Pro (Thermo Fisher Scientific) oraz poROSE (poROus materials examination SoftwarE, AGH). Oprócz określenia szeregu parametrów geometrycznych przestrzeni porowej (objętość, powierzchnia, maksymalna i minimalna rozwartość, kształt, maksymalna i minimalna średnica Fereta i inne) przeprowadzono także transformację obrazu binarnego do szkieletu, aby uzyskać informacje na temat połączeń pomiędzy porami (liczba węzłów, gałęzi, gardzieli, krętość kanalików porowych i inne).

W ramach pracy przebadano trzy próbki dolomitu po zabiegu kwasowania. Rdzeniki miały wysokość około 7,50 cm i średnicę około 3,80 cm. Na podstawie analizy obrazu tomograficznego określono ich całkowitą porowatość tomograficzną K_{p_CT} , która wyniosła odpowiednio: próbka A – 3,80%, próbka B – 4,96% i próbka C – 2,92%.

Aby uzyskać geometryczne i topologiczne parametry skały, należy zastosować odpowiednie techniki przetwarzania obrazu 3D, którymi są segmentacja oraz transformacja obrazu binarnego w szkielet. Etapy uzyskiwania parametrów systemu skalnego przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Schemat otrzymywania parametrów geometrycznych i topologicznych struktury porowej

Figure 1. Scheme for obtaining geometric and topological parameters of pore structure

Tabela 1. Parametry przestrzeni porowej otrzymane w eksperymencie (wg Avizo User's Guide, poROSE User Guide i Drabik et al., 2021)

Table 1. Pore space parameters obtained by the experiment (according to Avizo User's Guide, poROSE User Guide and Drabik et al., 2021)

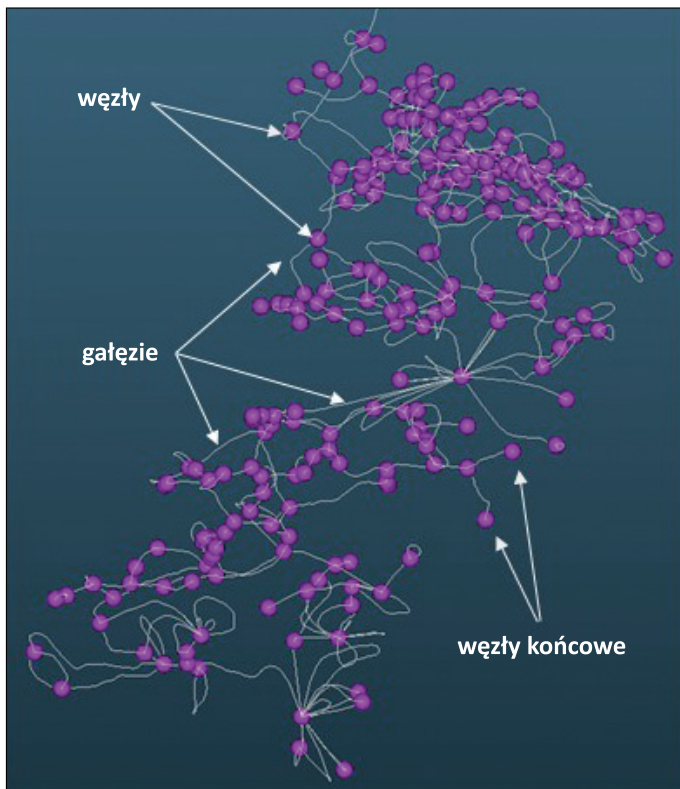
Parametr	Źródło	Opis
Volume3D [woksel]	Avizo 3D Pro i poROSE	objętość obiektu odpowiadająca liczbie wokseli w obiekcie
Area3D [piksel ²]	Avizo 3D Pro	obszar obiektu liczony na podstawie wokseli sąsiadujących bezpośrednio z obiektem
Surface Mesh Area [piksel ²]	poROSE	pole powierzchni obiektu liczone na podstawie siatki trójkątów rozpiętej na obiekcie
Breadth3D [piksel]	Avizo 3D Pro	największa odległość pomiędzy dwiema równoległymi liniami dotykającymi obiektu bez jego przecinania i leżącymi w płaszczyźnie prostopadłej do maksymalnej średnicy Fereta
Thickness3D [piksel]	Avizo 3D Pro	miąższość obiektu – największy odcinek, który dotyka obiektu swoimi punktami końcowymi i leży w płaszczyźnie prostopadłej do maksymalnej średnicy Fereta i prostopadłej do średnicy Breadth3D
Thickness max [piksel]	poROSE	maksymalna grubość znaleziona w obiekcie (dla szczelin – maksymalna rozwartość)
Thickness min [piksel]	poROSE	minimalna wartość grubości znaleziona w obiekcie
Thickness mean [piksel]	poROSE	średnia grubość obiektu
Thickness std	poROSE	odchylenie standardowe grubości
Length3D [piksel]	Avizo3D Pro	maksymalna średnica Fereta
Width3D [piksel]	Avizo3D Pro	minimalna średnica Fereta
Shape_VA3D	Avizo3D Pro	współczynnik kształtu – odzwierciedla wklęsłość lub skrzywienie obiektu
Anisotropy	Avizo3D Pro	wskazuje na odchylenie kształtu obiektu od kształtu sferycznego
Elongation	Avizo3D Pro	opisuje wydłużenie obiektu
Flatness	Avizo3D Pro	opisuje stopień spłaszczenia obiektu
EqDiameter [piksel]	Avizo3D Pro i poROSE	średnica równoważna to średnica kuli o tej samej objętości
FeretShape3D	Avizo3D Pro	współczynnik kształtu Fereta
Sphericity	Avizo3D Pro	sferyczność będąca miarą kulistości obiektu
Euler Sum	poROSE	liczba Eulera odzwierciedlająca jakość połączenia porów
XY Plane Connection	poROSE	informacja o połączeniu struktury porów ze ścianami obiektu w płaszczyźnie XY
XZ Plane Connection	poROSE	informacja o połączeniu struktury porów ze ścianami obiektu w płaszczyźnie XZ
YZ Plane Connection	poROSE	informacja o połączeniu struktury porów ze ścianami obiektu w płaszczyźnie YZ
Effective Pore to Throat Ratio Coefficient	poROSE	stosunek średnicy maksymalnej (pory) do średnicy minimalnej (gardziele porowe) sfery wpisanej w oś centralną obiektu

W tabeli 1 przedstawiono parametry geometryczne charakteryzujące przestrzeń porową.

Oprócz właściwości geometrycznych kluczowe znaczenie dla przepływu mediów przez system skalny mają własności topologiczne formacji. Charakterystyka topologiczna wymaga redukcji przestrzeni porów do sieci złożonej z gałęzi i węzłów, a następnie określenia rodzaju skomunikowania porów poprzez zdefiniowanie takich parametrów jak: liczba koordynacyjna, liczba gałęzi (kanalików porowych), liczba węzłów (porów), krętość kanalików porowych i inne (Liang et al., 2000; Gong et al., 2020). Charakterystykę tych parametrów

umożliwia transformacja obrazu binarnego w szkielek. Za taką transformację w programie Avizo 3D Pro odpowiada moduł *Skeletonization* i kilka innych modułów z nim powiązanych.

Działanie modułu polega na iteracyjnym usuwaniu poszczególnych wokseli powierzchni przestrzeni porowej przy zachowaniu właściwości topologicznych. Woksele są usuwane symetrycznie, a proces kończy się, gdy nie można już usunąć żadnego woksela (Liang et al., 2000; Idowu et al., 2014). Szkielek, który powstaje w ten sposób, odpowiada osi środkowej obiektu. Jest ona zbiorem punktów (wokseli), w którym niektóre mają dokładnie jednego sąsiada (piksele na końcu



Rysunek 2. Elementy szkieletu: gałęzi, węzły, pętle, zakończenia kanalików

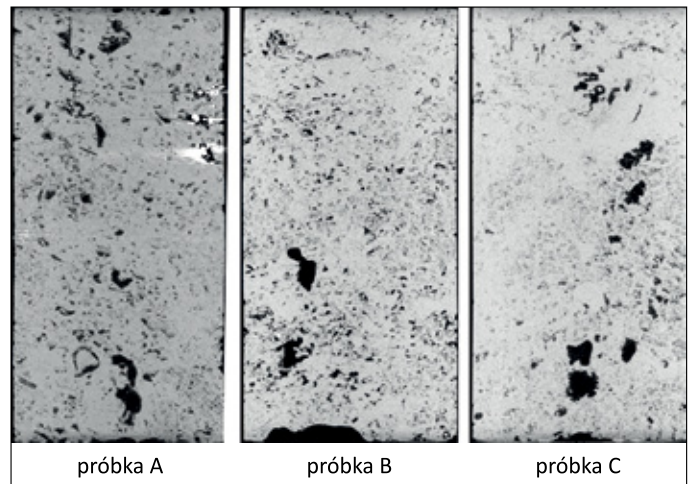
Figure 2. Elements of the skeleton: branches, nodes, loops, terminal nodes

gałęzi – zakończenia kanalików). Pozostałe punkty szkieletu to punkty węzłowe (punkty z więcej niż dwoma sąsiadami) lub punkty łączące (punkty z dokładnie dwoma sąsiadami) (rysunek 2).

Program pozwala na otrzymanie statystyk takich atrybutów jak: liczba i długość oraz krętość gałęzi, ich średnica, liczba węzłów, liczba koordynacyjna i inne. Każda gałąź szkieletu (segment) jest rozważana jako oddzielny kanalik porowy. Podczas transformacji zostają zachowane informacje o lokalnej grubości kanalika porowego w każdym punkcie powstającej gałęzi, a algorytm zakłada, że kanalik ma przekrój okręgu o określonym promieniu. Parametr *Mean Radius* jest wyznaczany dla gałęzi i odpowiada średniej wartości promieni we wszystkich jej punktach.

Wyniki

Badania trzech próbek dolomitu metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej (rysunek 3) stanowiły podstawę dalszych prac. Po wykonaniu binaryzacji obrazu CT w skali szarości określono wybrane parametry geometryczne struktury porowej, takie jak: Volume3D, Area3D, Surface Mesh Area, Breadth3D, Thickness3D, Thickness max, Thickness



Rysunek 3. Obraz tomograficzny w skali szarości – przekroje w kierunku XZ przez analizowane próbki

Figure 3. Grayscale CT image – cross-sections in XZ direction through analysed samples

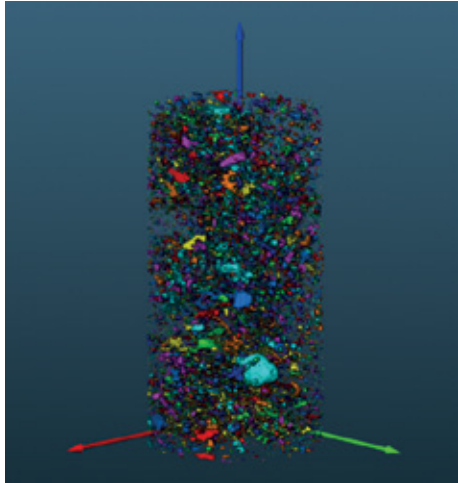
min, Thickness mean, Shape_VA3D, Anisotropy, Elongation, Flatness, Sphericity, Length3D, Width3D, EqDiameter, FeretShape3D, Euler Sum, Effective Pore-to-Throat Ratio Coefficient. Wyniki przedstawiono w tabelach 2–4.

Na podstawie wyników zawartych w tabelach można stwierdzić, że największy obiekt występuje w próbce C, a jego objętość wynosi 38 162 100,00 wokseli, jednak średnia objętość pustek jest wyższa dla próbki A (2048,47). Wartość parametru *Sphericity* zmienia się od 0,06 (próbka B) do 1,00 (próbki A, B i C). Współczynnik kształtu Fereta (*FeretShape3D*), wiążący ze sobą parametry wydłużenia i spłaszczenia, zawiera się w przedziale: 0,91–11,15 (średnio 1,72) dla próbki A, 0,91–12,91 (średnio 0,91) dla próbki B i 0,90–6,84 (średnio 1,70) dla próbki C. Wyższe wartości parametru wskazują na wydłużenie obiektu. Maksymalne wartości parametru *Breadth3D* wynoszą: 832,56 piksela (próbka A), 849,64 piksela (próbka B) i 1023,97 piksela (próbka C), ale średnie wartości są znacznie mniejsze (odpowiednio: 8,84; 9,65; 7,18), co wynika z występowania znacznej liczby mniejszych elementów we wszystkich próbkach. W przypadku wszystkich próbek można obserwować spadek sferyczności obiektów wraz ze wzrostem ich objętości (rysunek 4).

Rozkład wielkości porów jest istotny w strukturze ośrodka skalnego, jednak dla prawidłowego modelowania procesów przepływu ważne są także gardziele. Zwężenia w dużym stopniu kontrolują efekty kapilarne, a jeśli zwężenia gardzieli są wystarczająco duże w porównaniu z rozmiarem porów, to mogą również wpływać na spadek ciśnienia między dwoma sąsiednimi porami (Maalal et al., 2021). Dlatego ważne jest określenie stosunku średnicy maksymalnej (pory) do średnicy minimalnej (gardziele porowe) sfery wpisanej w oś centralną obiektu (Drabik et al., 2021). Im wyższa jest wartość tego parametru,

Tabela 2. Rozmieszczenie pustek w próbce A oraz wartości liczbowe wybranych parametrów

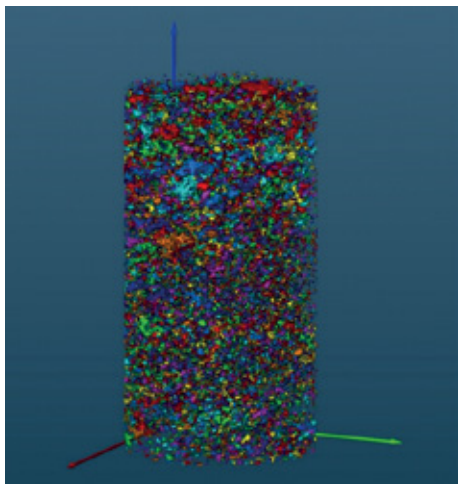
Table 2. Distribution of pores in sample A and numerical values of the selected parameters

Parametr	Wartość min. i max.	Średnia	Rozmieszczenie pustek w próbce
Volume3D	1,00–18 777 904,00	2048,47	
Area3D	3,00–3 442 773,25	726,91	
Surface Mesh Area	0,87–3 790 827,95	802,65	
Breadth3D	1,00–832,56	8,84	
Thickness3D	1,00–738,51	6,00	
Thickness max	2,00–59,40	8,61	
Thickness min	2,00	2,00	
Thickness mean	2,00–60,23	2,91	
Shape_VA3D	0,24–2826,89	3,04	
Anisotropy	0,00–1,00	0,61	
Elongation	0,00–1,00	0,40	
Flatness	0,00–1,00	0,45	
Sphericity	0,07–1,00	0,75	
Length3D	1,00–1446,00	13,09	
Width3D	1,00–933,46	7,05	
EqDiameter	1,24–329,77	6,48	
VoxelFaceArea	6,00–5 300 718,00	1128,71	
FeretShape3D	0,91–11,15	1,72	
Euler Sum	-6797,00–3,00	-0,57	
Effective Pore-to-Throat Ratio Coefficient	1,00–46,30	1,83	

Uwaga: kolory porów na rysunku dobrano w sposób losowy.

Tabela 3. Rozmieszczenie pustek w próbce B oraz wartości liczbowe wybranych parametrów

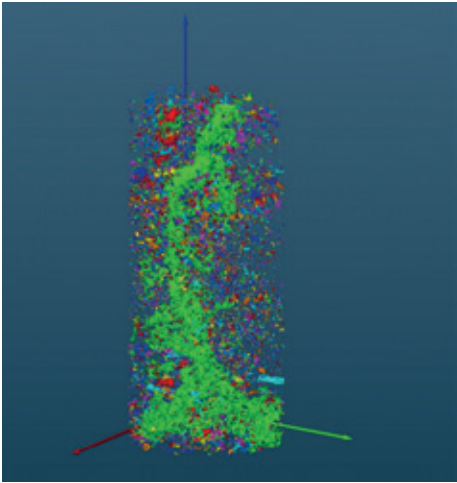
Table 3. Distribution of pores in sample B and numerical values of the selected parameters

Parametr	Wartość min. i max.	Średnia	Rozmieszczenie pustek w próbce
Volume3D	1,00–26 493 900,00	1162,81	
Area3D	3,00–7 325 570,00	555,78	
Surface Mesh Area	1,73–8 045 829,78	610,26	
Breadth3D	1,00–849,64	9,65	
Thickness3D	1,00–705,19	6,09	
Thickness max	2,00–103,29	3,83	
Thickness min	2,00	2,00	
Thickness mean	2,00–52,42	3,10	
Shape_VA3D	0,24–4952,01	2,66	
Anisotropy	0,00–1,00	0,82	
Elongation	0,00–1,00	0,40	
Flatness	0,00–1,00	0,46	
Sphericity	0,06–1,00	0,77	
Length3D	1,00–1815,00	13,18	
Width3D	1,00–1181,47	7,11	
EqDiameter	1,24–369,87	6,55	
VoxelFaceArea	6,00–11 236 100,00	856,30	
FeretShape3D	0,91–12,91	0,91	
Euler Sum	-7845,00–2,00	0,47	
Effective Pore-to-Throat Ratio Coefficient	1,00–51,64	1,92	

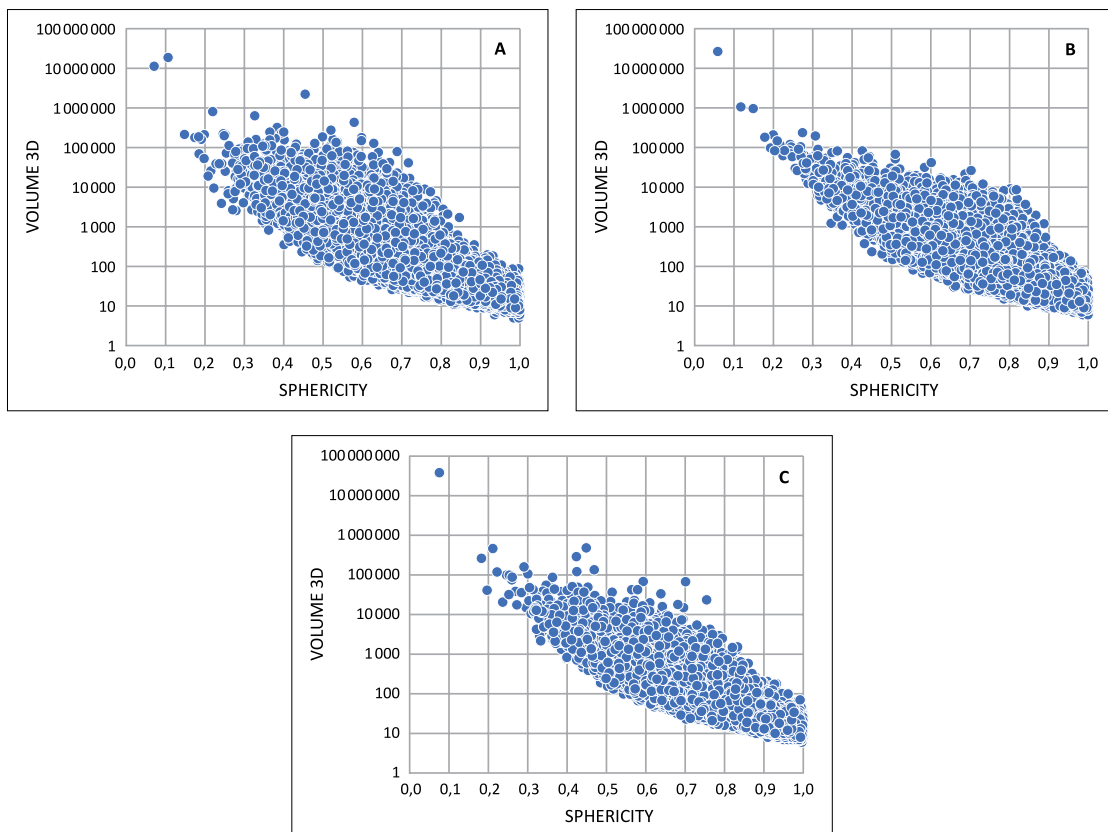
Uwaga: kolory porów na rysunku dobrano w sposób losowy.

Tabela 4. Rozmieszczenie pustek w próbce C oraz wartości liczbowe wybranych parametrów

Table 4. Distribution of pores in sample C and numerical values of the selected parameters

Parametr	Wartość min. i max.	Średnia	Rozmieszczenie pustek w próbce
Volume3D	1,00–38 162 100,00	1618,14	
Area3D	3,00–7260 340,00	491,98	
Surface Mesh Area	1,73–7964 837,23	540,31	
Breadth3D	1,00–1023,97	7,18	
Thickness3D	1,00–827,90	5,04	
Thickness max	2,00–122,67	3,25	
Thickness min	2,00	2,00	
Thickness mean	2,00–33,06	2,69	
Shape_VA3D	0,24–2323,56	2,33	
Anisotropy	0,00–1,00	0,82	
Elongation	0,00–1,00	0,40	
Flatness	0,00–1,00	0,47	
Sphericity	0,08–1,00	0,79	
Length3D	1,00–2009,00	10,62	
Width3D	1,00–1308,66	5,77	
EqDiameter	1,24–417,71	5,36	
VoxelFaceArea	6,00–11 148 600,00	760,76	
FeretShape3D	0,90–6,84	1,70	
Euler Sum	-8488,00–2,00	0,36	
Effective Pore-to-Throat Ratio Coefficient	1,00–61,34	1,62	

Uwaga: kolory porów na rysunku dobrano w sposób losowy.



Rysunek 4. Zależność między sferycznością a objętością obiektów w próbkach A, B i C

Figure 4. Relationship between sphericity and object volume in samples A, B and C

tym węższe są gardziele, co może negatywnie wpływać na przepływ mediów złożowych. Wartość tego parametru odgrywa także ważną rolę w przepływie ciepła w mediach porowatych (Ozgumus i Mobedi, 2015). W przypadku analizowanych skał maksymalne wartości współczynnika były znacznie wyższe od średnich (próbka A – max. 46,30, średnia 1,83; próbka B – max. 51,64, średnia 1,92; próbka C – max. 61,34, średnia 1,62), ale jednak we wszystkich próbkach przeważały mniejsze wartości, w zakresie od 1,00 do 5,00. Przewaga niskich wartości pozwala sądzić, że wąskie gardziele w tym przypadku nie stanowią przeszkody dla przepływu mediów.

Stopień skomunikowania przestrzeni porowej jest niezwykle istotny w przypadku przewidywania migracji ropy naftowej, gazu lub wody termalnej. Lokalne połączenia można scharakteryzować za pomocą liczby koordynacyjnej, natomiast liczba Eulera jest parametrem informującym o połączeniach pory–gardziele dla całego modelu sieci porów (Xie et al., 2022). W badanych próbkach system połączeń między porami jest słabo rozwinięty, a średnia liczba Eulera waha się od $-0,57$ (próbka A) do $0,47$ (próbka B). Wartości wskazujące na bardziej skomplikowane struktury porowe (od $-6797,00$ do $-8488,00$) cechują największe obiekty w rdzeniach.

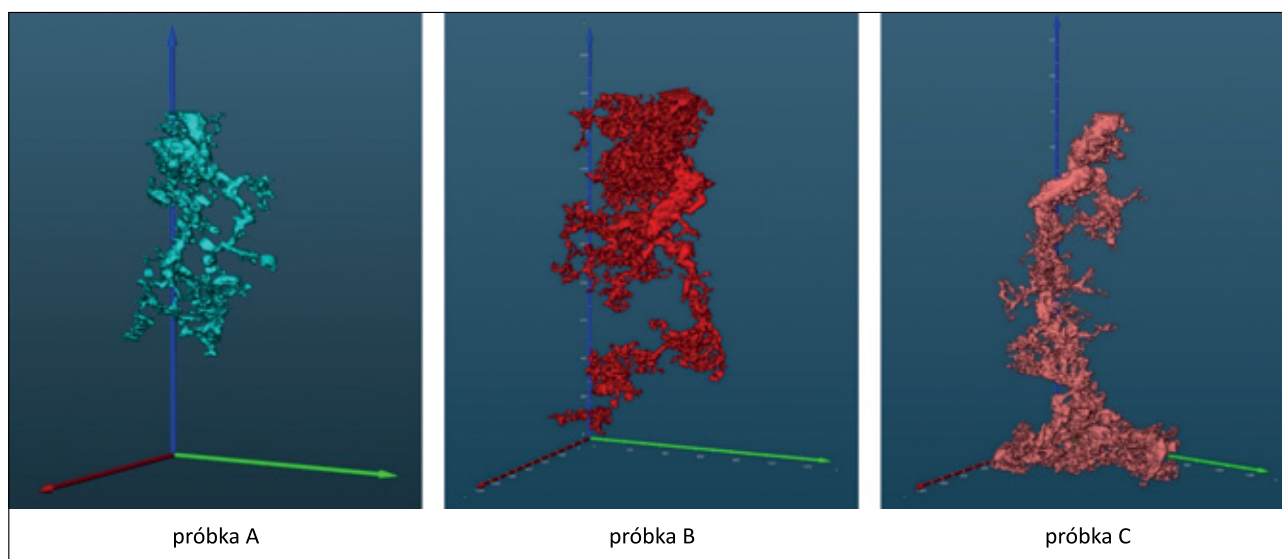
Dalszą analizę przestrzeni porowej, polegającą na wyznaczeniu parametrów topologicznych, przeprowadzono na największych zidentyfikowanych w próbkach obiektach (rysunek 5).

Obiekt o największej objętości zidentyfikowano w próbce C (38 162 100 wokseli). Składa się on z 25 180 gałęzi oraz 16 615 węzłów, w tym 2187 z nich to węzły końcowe. Drugi co do wielkości obiekt (26 493 900 – próbka B) buduje 25 505 gałęzi oraz 17 691 węzłów (w tym 3189 końcowych). Trzeci obiekt z próbki A ma objętość 18 777 900 wokseli, składa się z 12 839

gałęzi oraz 7896 węzłów, w tym 759 końcowych. Najdłuższe gałęzie występują w obiekcie w próbce A (144,29 piksela) i B (155,03 piksela), jednak dłuższych gałęzi jest zdecydowanie mniej niż krótszych i średnie wartości ich długości mieszczą się w przedziale 10,70–20,19 piksela. Podobnie jest w przypadku średnich promieni kanalików. Kanalik o największym promieniu (60,11 piksela) występuje w próbce C, ale generalnie promienie wszystkich kanalików charakteryzują się znacznie mniejszymi wartościami; średnia wartość średniego promienia zmienia się od 2,85 piksela (próbka B) do 3,72 piksela (próbka A). Średnia wartość krętości większości kanalików we wszystkich trzech próbkach wynosi około 1,20.

Częstym zjawiskiem w skałach węglanowych jest występowanie próbek o tej samej porowatości różniących się przepuszczalnością, którą determinuje liczba koordynacyjna przestrzeni porowej (Gharbi i Blunt, 2012). W związku z tym Rabbani et al. (2017) przeprowadzili badania, na podstawie których stwierdzili, że w przypadku węglanów to właśnie porowatość i liczba koordynacyjna mogą bezpośrednio opisywać przepuszczalność. Doszli także do wniosku, że nie ma zauważalnego związku między przepuszczalnością a takimi parametrami jak: średni rozmiar porów, średni rozmiar gardzieli i średnia długość kanalików. Określenie liczby koordynacyjnej w węglanach można więc uznać za kluczowe. W przypadku wszystkich analizowanych kanalików przeważają niskie wartości liczby koordynacyjnej (średnio od 2,88 do 3,25). Największą wartość (58) można obserwować w próbce A.

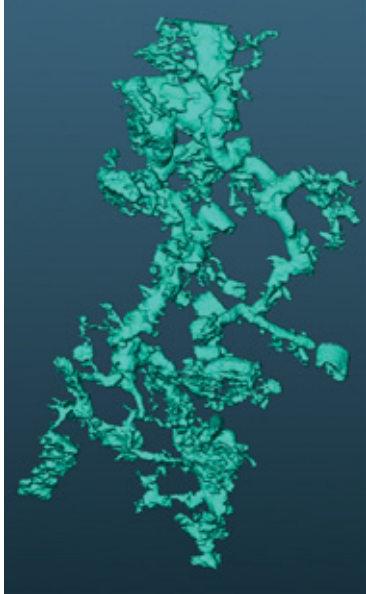
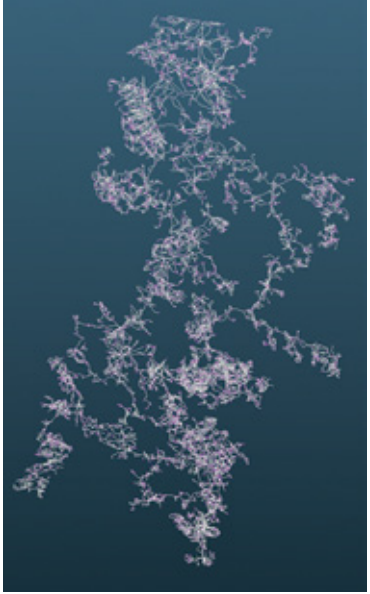
Podsumowując, największym objętościowo obiektem jest ten w próbce C. Charakteryzuje się najwyższą wartością parametru *Effective Pore-to-Throat Ratio Coefficient*, co świadczy o dużej dysproporcji między średnicą porów i gardzieli. We wszystkich obiektach średnia wartość średniego promienia

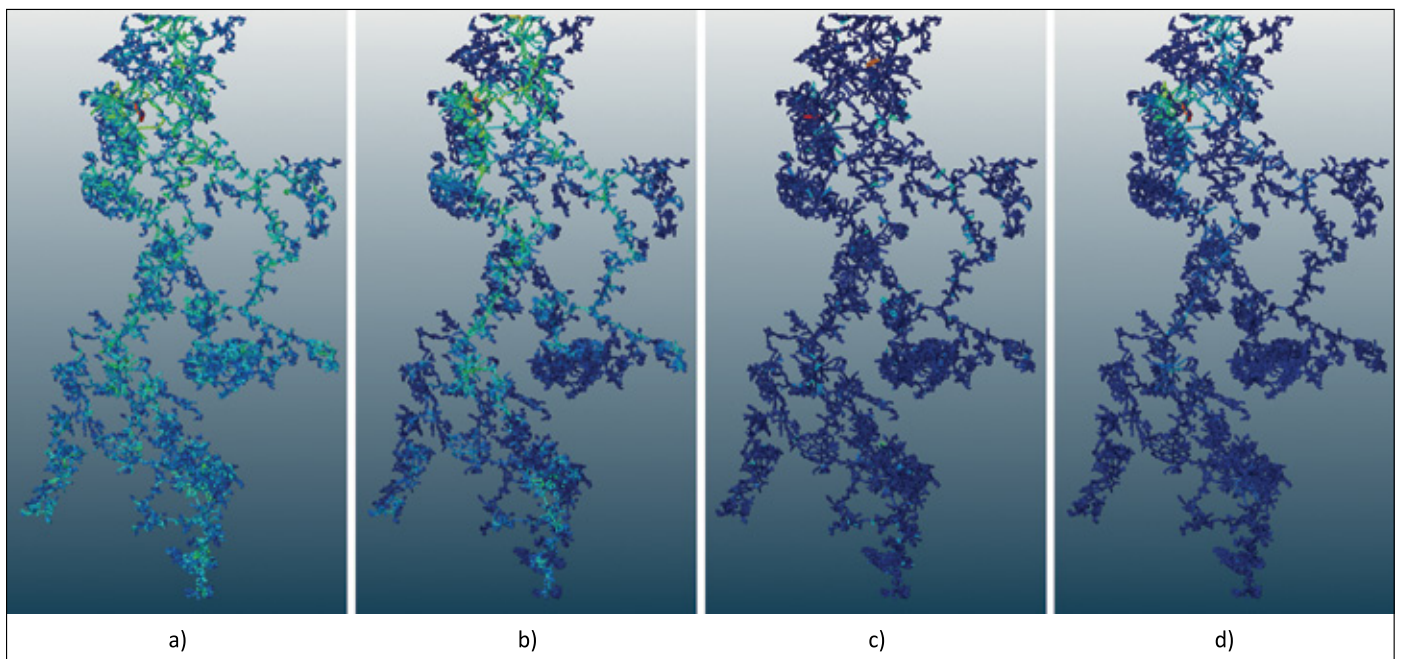


Rysunek 5. Największe struktury porowe w próbkach dolomitu

Figure 5. Largest pore structures in dolomite samples

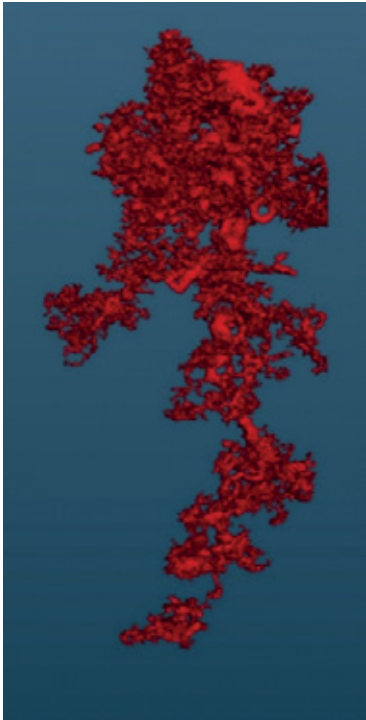

Tabela 5. Wybrane parametry geometryczne i topologiczne dla kanalika w próbce A
Table 5. Selected geometric and topological parameters for the wormhole in sample A

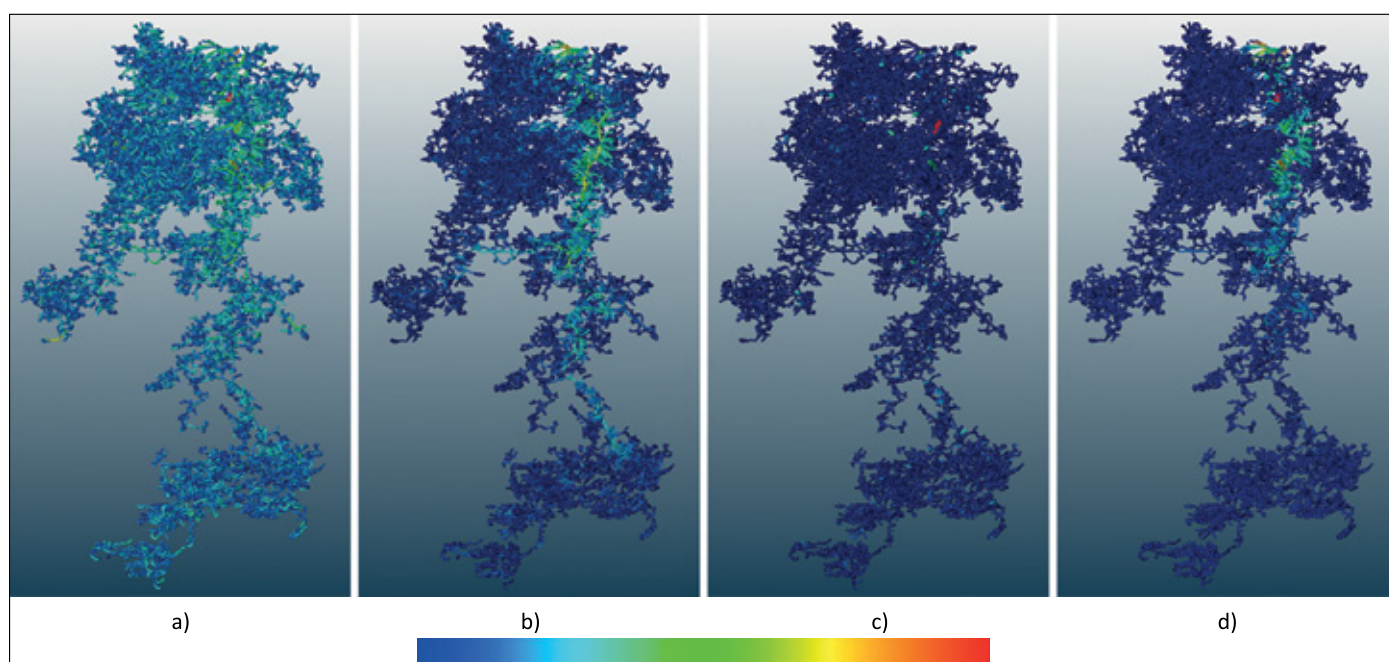
Parametr	Wartość min. i max.; średnia	Obraz 3D	Obraz po procesie transformacji w szkielet
Volume3D	18 777 900,00		
Surface Mesh Area	3 547 266,90		
Breadth3D	832,56		
Thickness3D	738,51		
Anisotropy	0,85		
Elongation	0,16		
Flatness	0,94		
Length3D	1446,00		
Width3D	933,46		
EqDiameter	329,77		
FeretShape3D	1,38		
Sphericity	0,11		
Euler Sum	-4688,00		
Effective Pore-to-Throat Ratio Coefficient	46,30		
Number of Subgraphs	1,00		
Number of Segments	12 839,00		
Total Volume	33 646 984,00		
Total Length	161 243,97		
Mean Radius	3,72		
Tortuosity	1,00–35,37; 1,29		
Number of Nodes	7896,00		
Branching Nodes	7137,00		
Coordination Number	1,00–58,00; 3,25		



Rysunek 6. Próbkę A, kanalik robaczkowy po procesie transformacji w szkielet – paleta barwna odzwierciedla następujące parametry: a) długość gałęzi, b) średni promień gałęzi, c) krętość i d) objętość gałęzi
Figure 6. Sample A, wormhole after the transformation process into a skeleton – the colour palette reflects the following parameters: (a) branch length, (b) average branch radius, (c) tortuosity and (d) branch volume

Tabela 6. Wybrane parametry geometryczne i topologiczne dla wybranego obiektu w próbce B
Table 6. Selected geometric and topological parameters for the wormhole in sample B

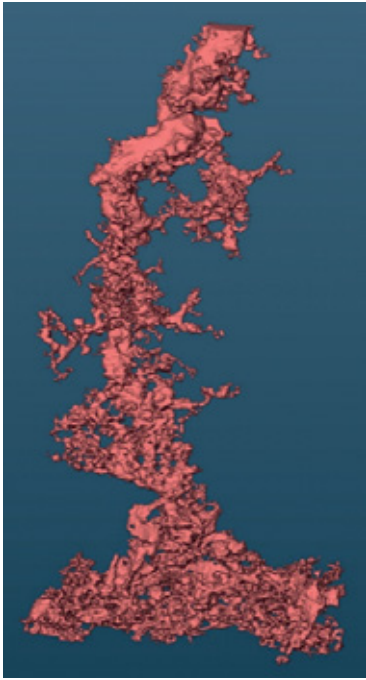

Parametr	Wartość min. i max.; średnia	Obraz 3D	Obraz po procesie transformacji w szkielet
Volume3D	26493 900,00		
Surface Mesh Area	8 045 829,78		
Breadth3D	849,64		
Thickness3D	705,19		
Anisotropy	0,91		
Elongation	0,15		
Flatness	0,57		
Length3D	1815,00		
Width3D	1181,47		
EqDiameter	369,87		
FeretShape3D	1,37		
Sphericity	0,06		
Euler Sum	-7845,00		
Effective Pore-to-Throat Ratio Coefficient	51,64		
Number of Subgraphs	1,00		
Number of Segments	25 505,00		
Total Volume	38 488 020,00		
Total Length	328 902,19		
Mean Radius	2,85		
Tortuosity	1,00–33,74; 1,22		
Number of Nodes	17 691,00		
Branching Nodes	14 502,00		
Coordination Number	1,00–18,00; 2,88		

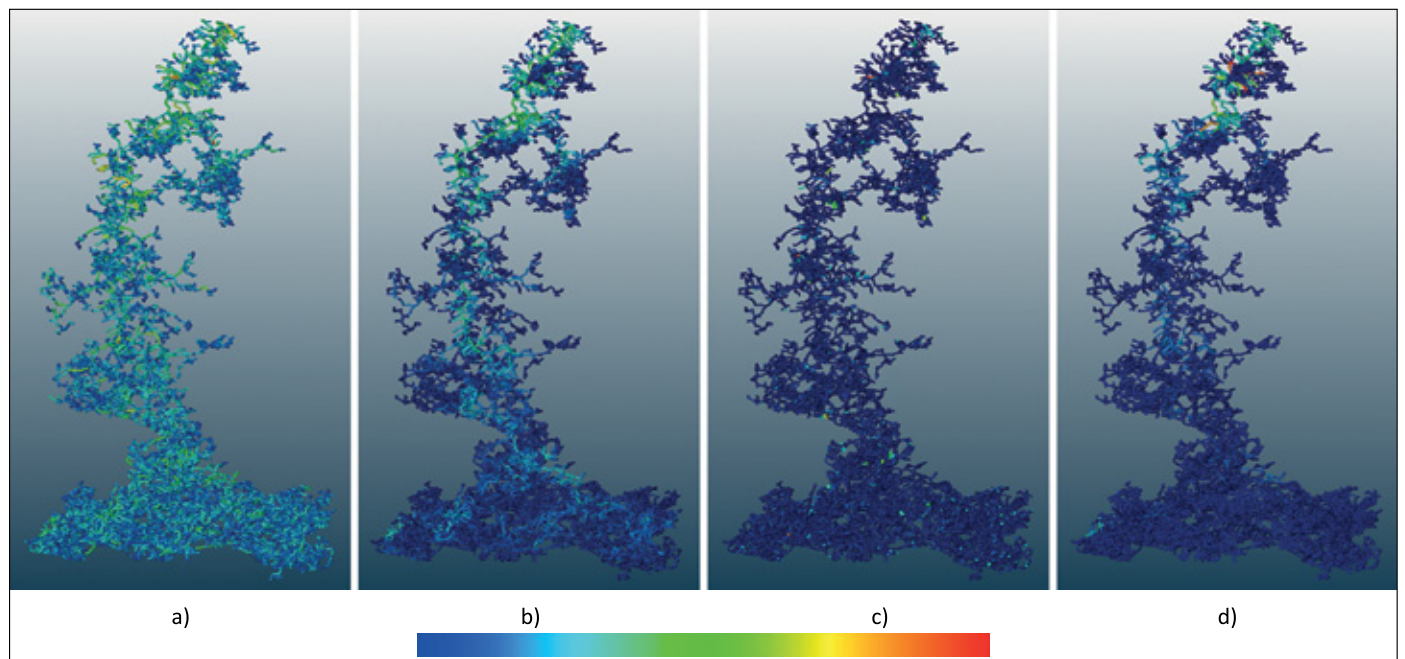


Rysunek 7. Próbkę B, kanałek robaczkowy po procesie transformacji w szkielet – paleta barwna odzwierciedla następujące parametry: a) długość gałęzi, b) średni promień gałęzi, c) krętość i d) objętość gałęzi

Figure 7. Sample B, wormhole after the transformation process into a skeleton – the colour palette reflects the following parameters: (a) branch length, (b) average branch radius, (c) tortuosity and (d) branch volume

Tabela 7. Wybrane parametry geometryczne i topologiczne dla wybranego obiektu w próbce C
Table 7. Selected geometric and topological parameters for the wormhole in sample C

Parametr	Wartość min. i max.; średnia	Obraz 3D	Obraz po procesie transformacji w szkielet
Volume3D	38 162 100,00		
Surface Mesh Area	7 260 340,00		
Breadth3D	7 964 837,23		
Thickness3D	1 023,97		
Anisotropy	0,96		
Elongation	0,08		
Flatness	0,53		
Length3D	2 009,00		
Width3D	1 308,66		
EqDiameter	417,71		
FeretShape3D	1,37		
Sphericity	0,08		
Euler Sum	-8 488,00		
Effective Pore-to-Throat Ratio Coefficient	61,34		
Number of Subgraphs	1,00		
Number of Segments	25 180,00		
Total Volume	55 257 756,00		
Total Length	319 624,28		
Mean Radius	3,28		
Tortuosity	1,00–17,70; 1,20		
Number of Nodes	16 615,00		
Branching Nodes	14 428,00		
Coordination Number	1,00–24,00; 3,03		



Rysunek 8. Próbkę C, kanałik robaczkowy po procesie transformacji w szkielet – paleta barwna odzwierciedla następujące parametry: a) długość gałęzi, b) średni promień gałęzi, c) krętość i d) objętość gałęzi

Figure 8. Sample C, wormhole after the transformation process into a skeleton – the colour palette reflects the following parameters: (a) branch length, (b) average branch radius, (c) tortuosity and (d) branch volume

kanalików jest podobna i wynosi około 3 pikseli. Podobnie wygląda również rozkład liczby koordynacyjnej – średnia dla wszystkich obiektów jest podobna i wynosi około 3. Najbardziej rozbudowaną strukturę mają obiekty w próbkach B i C, na co wskazuje liczba Eulera, która jest największa w tych dwóch przypadkach.

W tabelach 5–7 przedstawiono wartości wybranych parametrów geometrycznych i topologicznych dla omówionych obiektów z próbek skał A, B i C. Rysunki 6–8 prezentują wybrane obiekty po procesie ich transformacji w szkielek – za pomocą palety barwnej pokazano zmiany wartości takich parametrów jak: długość kanalika, średni promień kanalika, krętość i objętość.

Podsumowanie

Zarówno geometria porów, jak i topologia połączeń między nimi wpływają na migrację mediów złożowych. Przeprowadzone analizy pokazały, jak wiele informacji na temat szczegółów struktury porowej skał można uzyskać na podstawie wyników tomografii komputerowej. Otrzymane parametry mogą posłużyć do budowy modelu sieci porowej (pore network model), a także do przeprowadzenia symulacji przepływu mediów przez skałę. Prezentowane wyniki stanowią przyczynek do dalszych prac, obejmujących całościowe modelowanie zarówno struktury porowej skał, jak i transportu mediów złożowych. Niezwykle interesująca będzie także możliwość porównania teoretycznej symulacji przepływu uzyskanej na podstawie obrazu tomograficznego z wynikami badań laboratoryjnych prowadzonych w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Parametryzacja kluczowych własności przestrzeni porowej skał na podstawie badań tomograficznych*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0020/SW/2023, nr archiwalny: DK-4100-0003/2023.

Literatura

- Baychev T.G., Jivkov A.P., Rabbani A., Raeini A.Q., Xiong Q., Lowe T., Withers P.J., 2019. Reliability of Algorithms Interpreting Topological and Geometric Properties of Porous Media for Pore Network Modelling. *Transport in Porous Media*, 128: 271–301. DOI: 10.1007/s11242-019-01244-8.
- Clarkson C.R., Bustin M.R., 1996. Variation in micropore capacity and size distribution with composition in bituminous coal of the Western Canadian Sedimentary Basin: Implications for coalbed methane potential. *Fuel*, 75: 1483–1498. DOI: 10.1016/0016-2361(96)00142-1.
- Cnudde V., Boone M.N., 2013. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. *Earth-Science Reviews*, 123: 1–17. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.04.003.
- Cooper M.P., Sharma R.P., Magni S., Blach T.P., Radliński A.P., Drabik K., Tengattini A., Szymczak P., 2023. 4D tomography reveals a complex relationship between wormhole advancement and permeability variation in dissolving rocks. *Advances in Water Resources*, 175: 104407. DOI: 10.1016/j.advwatres.2023.104407.
- Dohnalik M., Krakowska-Madejska P., Puskarczyk E., Jelonek I., 2021. Wyniki badań testu wytrzymałościowego próbki węgla w świetle badań tomograficznych. *Nafta-Gaz*, 77(1): 3–9. DOI: 10.18668/NG.2021.01.01.
- Drabik K., Krakowska-Madejska P., Puskarczyk E., Dohnalik M., 2021. Ocena przydatności wykorzystania geometrycznych parametrów przestrzeni porowej z obrazów tomograficznych w kontekście pomiarów NMR, porozymetrii rtęciowej i porozymetrii helowej. *Nafta-Gaz*, 77(11): 725–735. DOI: 10.18668/NG.2021.11.02.
- Gharbi O., Blunt M.J., 2012. The impact of wettability and connectivity on relative permeability in carbonates: a pore network modeling analysis. *Water Resources Research*, 48(12). DOI: 10.1029/2012WR011877.
- Gong L., Nie L., Xu Y., 2020. Geometrical and topological analysis of pore space in sandstones based on X-ray computed tomography. *Energies*, 13: 3774. DOI: 10.3390/en13153774.
- Idowu N.A., Nardi C., Long H., Varslot T., Øren P.E., 2014. Effects of Segmentation and Skeletonization Algorithms on Pore Networks and Predicted Multiphase Transport Properties of Reservoir Rock Samples. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 17(4): 473–483. DOI: 10.2118/166030-PA.
- Liang Z., Ioannidis M.A., Chatzis I., 2000. Geometric and topological analysis of three-dimensional porous media: pore space partitioning based on morphological skeletonization. *Journal of Colloid Interface Science*, 221(1): 13–24. DOI: 10.1006/jcis.1999.6559.
- Maalal O., Prat M., Peinador R., Lasseux D., 2021. Determination of the throat size distribution of a porous medium as an inverse optimization problem combining pore network modeling and genetic and hill climbing algorithms. *Physical Review E*, 103: 023303. DOI: 10.1103/PhysRevE.103.023303.
- Ozgumus T., Mobedi M., 2015. Effect of Pore to Throat Size Ratio on Interfacial Heat Transfer Coefficient of Porous Media. *Heat and Mass Transfer*, 137(1): 012602. DOI: 10.1115/1.4028764.
- Rabbani A., Assadi A., Kharrat R., Dashti N., Ayatollahi S., 2017. Estimation of carbonates permeability using pore network parameters extracted from thin section images and comparison with experimental data. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 42: 85–98. DOI: 10.1016/j.jngse.2017.02.045.
- Reedy C.L., Reedy C.L., 2022. High-resolution micro-CT with 3D image analysis for porosity characterization of historic bricks. *Heritage Science*, 10(83). DOI: 10.1186/s40494-022-00723-4.
- Shah S.M., Gray F., Crawshaw J.P., Boek E.S., 2016. Micro-computed tomography pore-scale study of flow in porous media: Effect of voxel resolution. *Advances in Water Resources*, 95: 276–287. DOI: 10.1016/j.advwatres.2015.07.012.
- Wang X., Pan J., Wang K., Ge T., Wei J., Wu W., 2020. Characterizing the shape, size, and distribution heterogeneity of pore-fractures in high rank coal based on X-ray CT image analysis and mercury intrusion porosimetry. *Fuel*, 282: 118754. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118754.
- Wu Y., Tahmasebi P., Lin C., Zahid M.A., Dong C., Golab A.N., Ren L., 2019. A comprehensive study on geometric, topological and fractal characterizations of pore systems in low-permeability reservoirs based on SEM, MICP, NMR, and X-ray CT experiments. *Marine and Petroleum Geology*, 103: 12–28. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2019.02.003.
- Xie L., You Q., Wang E., Li T., Song Y., 2022. Quantitative characterization of pore size and structural features in ultra-low

permeability reservoirs based on X-ray computed tomography. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208(E): 109733. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109733.

Zandomenighi D., Voltolini M., Mancini L., Brun F., Dreossi D., Polacci M., 2010. Quantitative analysis of X-ray microtomography images of geomaterials: Application to volcanic rocks. *Geosphere*, 6: 793–804. DOI: 10.1130/GES00561.1.



Mgr Anna PRZELASKOWSKA
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: anna.przelaskowska@inig.pl



Mgr inż. Katarzyna DRABIK
Główny specjalista inżynierijno-techniczny w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: katarzyna.drabik@inig.pl



Mgr Urszula ZAGÓRSKA
Asystent w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: urszula.zagorska@inig.pl

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU GEOFIZYKI WIERTNICZEJ

- badania tomograficzne skał:
 - » trójwymiarowa wizualizacja i analiza wewnętrznej struktury przestrzeni porowej skał metodą mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT),
 - » tomografia metrowych odcinków skał, profilowanie zmian parametrów petrofizycznych rdzenia (porowość, gęstość objętościowa);
- badania metodą jądrowego rezonansu magnetycznego:
 - » określanie rozkładu nasycenia wodą przestrzeni porowej próbek,
 - » generacja map T1-T2, szacowanie nasycenia wodą/węglowodorami,
 - » identyfikacja obecności substancji organicznej TOC,
 - » oznaczanie jakościowego i ilościowego składu mineralnego skał oraz wydzielonej frakcji ilastej na podstawie analizy rentgenowskiej;
- wyznaczanie zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych: uranu, toru i potasu w skałach, płuczkach wiertniczych i materiałach budowlanych;
- ocena elektrycznych parametrów skał (wskaźnika struktury porowej i zwilżalności);
- określanie zależności elektrycznej oporności właściwej płuczek wiertniczych od temperatury;
- ocena prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w skałach, kamieniach cementowych i płuczkach wiertniczych;
- badanie przewodności cieplnej skał;
- wyznaczanie współczynnika przepuszczalności;
- badanie gęstości, gęstości właściwej i porowości;
- interpretacja i ocena profilów geofizyki wiertniczej w zakresie określenia litologii i parametrów zbiornikowych skał oraz ocena stanu zacementowania rur okładzinowych w otworach;
- badania serwisowe:
 - » pomiary składu chemicznego skał metodą fluorescencji rentgenowskiej XRF wykonywane w celu oceny składu mineralnego oraz analiz chemostratygraficznych,
 - » spektrometryczne pomiary gamma na rdzeniu wiertniczym: ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th , total gamma przy wykorzystaniu mobilnego urządzenia „Gamma Logger”.



Kierownik: dr inż. Rafał Skupio Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków
Telefon: 12 650 64 84 Faks: 12 653 16 65 E-mail: skupio@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
– Państwowy Instytut Badawczy