

Modele zmian ścisłości przestrzeni porowej mioceńskich skał zbiornikowych z rejonu zapadliska przedkarpackiego

Models of changes in the pore compressibility of Miocene reservoir rocks from the Carpathian Foredeep region

Krzysztof Nowak

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Ścisłość porowa skał jest jednym z istotnych parametrów wykorzystywanych w trakcie badań złóż węglowodorów. Nieprawidłowe oszacowanie tego czynnika, a co za tym idzie – porowatości pierwotnej w warunkach *in situ*, prowadzi do błędów w szacowaniu zasobów złóż węglowodorów. Dotychczasowe próby opisania zależności pomiędzy porowatością mierzoną w ramach rutynowych badań petrofizycznych a ścisłością porową doprowadziły do powstania szeregu modeli umożliwiających oszacowanie współczynnika ścisłości porowej. Niestety, w trakcie prac zaczęto zauważać, że wyniki otrzymane na podstawie modeli nie mogą zastąpić badań laboratoryjnych, a jedynie służyć jako narzędzie pomocnicze. Dodatkowo wykazano, że uzyskane rezultaty różnią się w zależności od litologii, miejsca pochodzenia próbek i ciśnień, w jakich były badane. Doprowadziło to do powstawania coraz większej liczby modeli o różnym przeznaczeniu. W artykule użyto kilku najpopularniejszych modeli służących do oceny współczynnika ścisłości piaskowców, które próbowano dopasować do uzyskanych wyników eksperymentalnych. Obiektem badań było 20 próbek piaskowców i heterolitów z rejonu zapadliska przedkarpackiego o porowatości od kilku do dwudziestu kilku procent. Przebadano je pod kątem właściwości petrofizycznych takich jak porowatość i przepuszczalność, a także dokonano analizy petrograficznej. Następnie przeprowadzono badanie ścisłości porowej i wykonano analizę zależności pomiędzy ścisłością a porowatością. Po uzyskaniu wyników eksperymentalnych porównano je z wynikami otrzymanymi na podstawie modeli literaturowych. W wyniku analizy statystycznej wytypowano najlepszy z modeli, który następnie został zmodyfikowany z wykorzystaniem języka R i środowiska Posit w celu jak najlepszego dopasowania do danych laboratoryjnych. Pozwoliło to na opracowanie modelu, który w porównaniu z dostępnymi modelami pozwala z dużo większą dokładnością przewidzieć współczynnik ścisłości porowej piaskowców i heterolitów z zapadliska przedkarpackiego.

Słowa kluczowe: ścisłość porowa, porowatość, model, piaskowiec, objętość porów.

ABSTRACT: The pore compressibility of rocks is a crucial parameters used in studying hydrocarbon deposits. Inaccurate calculations of this parameter, along with the initial porosity of reservoir rocks under geostatic pressure conditions, can result in errors when estimating the capacity and potential scale of hydrocarbon accumulation. Owing to the challenges associated with conducting these measurements and their time-consuming nature, for more than fifty years, several authors have endeavoured to describe the relationship between the initial porosity measured from the obtained cores in surface conditions and the pore compressibility. These efforts led to the development of many models that allow for the calculation of the pore compressibility coefficient using the initial porosity as a basis. Unfortunately, during the course of these studies, it became evident that the results derived from models cannot substitute laboratory tests but only serve as an auxiliary tool. In addition, the results vary depending on the lithology, and the pressures applied during testing. This has led to the creation of an increasing number of models for various purposes. In the following article, multiple well-known sandstone models were used and compared with laboratory test findings. Finally, a new model was formulated, tailored to the examined rock samples. The study focused on 20 samples of sandstones and heteroliths sourced from the Carpathian Foredeep with a porosity spectrum ranging from a few to twenty percent. The samples were tested to assess their petrophysical characteristics, including porosity and permeability alongside a petrographic analysis. Then, pore compressibility tests were conducted, and an examination of the correlation between compressibility and porosity was carried out. After obtaining the experimental data, a comparative analysis was performed, contrasting the obtained results with those derived from existing literature models. As a result of a statistical analysis, the best model was identified and subsequently adjusted using the R language and the Posit environment to optimize its alignment with the laboratory data. This resulted in the creation of a model that, in contrast to existing models, allows for significantly enhanced accuracy in predicting the pore compressibility coefficient for selected sandstones and heteroliths originating from the Carpathian Foredeep.

Key words: pore compressibility, porosity, model, sandstone, pore volume.

Autor do korespondencji: K. Nowak, e-mail: nowakk@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 31.07.2023 r. Zatwierdzono do druku: 13.10.2023 r.

Wstęp

Ścisłość porów skalnych to zmiana objętości porowatości pod wpływem zmian ciśnienia zewnętrznego działającego na skałę. Parametr ten można opisać, używając współczynników ścisłości porowej C_{pp} i C_{pc} (Hall, 1953; Zimmerman, 1986, 1990; Schutjens i Heidung, 2012; Cicha-Szot, 2018):

- C_{pp} – jest zmianą objętości porowej w wyniku zmian ciśnienia porowego przy stałym ciśnieniu okólnym:

$$C_{pp} = \frac{-1}{V_p} \left(\frac{dV_p}{dP_p} \right)_{\Delta P_c=0} \quad (1)$$

gdzie:

- V_p – objętość porowa [ml],
- P_p – ciśnienie porowe [psi],
- P_c – ciśnienie okólne [psi];

- C_{pc} – jest zmianą objętości porowej pod wpływem zmian ciśnienia okólnego przy stałym ciśnieniu porowym:

$$C_{pc} = \frac{-1}{V_p} \left(\frac{dV_p}{dP_c} \right)_{\Delta P_p=0} \quad (2)$$

gdzie:

- V_p – objętość porowa [ml],
- P_c – ciśnienie okólne [psi],
- P_p – ciśnienie porowe [psi].

Ścisłość porowa jest znanym od dawna i ważnym czynnikiem wpływającym na szacowanie zasobów złóż ropy naftowej i gazu ziemnego. Dokładniejsze poznanie zależności pomiędzy ścisłością a innymi właściwościami petrofizycznymi skał, a także zmian związanych z tym czynnikiem może umożliwić lepsze szacowanie złóż zasobów naturalnych oraz poszerzyć wiedzę o mechanizmach zachodzących w złożu. Brak informacji dotyczącej wartości ścisłości porowej lub złe określenie ścisłości porowej skał złożowych może wpłynąć na przeszacowanie lub niedoszacowanie objętości mediów złożowych w skałach. Dlatego też badania laboratoryjne ścisłości porowej powinny być traktowane jako standardowe pomiary w przypadku badań nad złożami węglowodorów, zwłaszcza w przypadku słabo zbadanych lub intensywnie eksploatowanych terenów. Dodatkowo kluczowym problemem przy szacowaniu zasobów złóż jest fakt, że skały wydobyte z otworu w postaci rdzeni z czasem w warunkach powierzchniowych ulegają rozprężeniu i zwiększają swoją objętość porową.

Badania ścisłości nie zawsze są możliwe do przeprowadzenia w odpowiednio dużej skali. Z tego powodu od lat trwają badania nad stworzeniem modelu pozwalającego na szacowanie ścisłości bez prowadzenia długotrwałych badań laboratoryjnych.

Zagadnienie ścisłości porowej było znane osobom zajmującym się przemysłem naftowym od ponad pół wieku (Carpenter i Spencer, 1940; Fatt, 1958; da Silva et al., 2015). Jedne z pierwszych kompleksowych badań nad tym zagadnieniem prowadził Hall (1953). W ich wyniku powstał pierwszy wzór przedstawiający zależność pomiędzy ścisłością a porowatością.

Wzór przedstawiony przez Halla (1953) jest następujący:

$$C_{pc} = \left(\frac{1,782}{\emptyset^{0,488}} \right) \times 10^{-6} \quad (3)$$

gdzie:

- C_{pc} – zmiana objętości porowej pod wpływem zmian ciśnienia okólnego przy stałym ciśnieniu porowym,
- \emptyset – porowatość (ułamek).

Była to pierwsza tego rodzaju próba opisanie związku ścisłości z innymi właściwościami petrofizycznymi skał. Równanie Halla stało się tym samym podstawą dalszych badań prowadzonych przez badaczy takich jak Fatt (1958), Newman (1973), Horne (1990) czy Jalalh (2006). Część autorów skupiała się tylko na skałach węglanowych (m.in. Aloki Bakhtiari et al., 2011), opisując zależności pomiędzy ścisłością a zróżnicowanymi typami wapieni i dolomitów. Wspomniani autorzy opracowywali kolejne wzory opisujące zależność ścisłości – porowatość.

Horne (1990) przedstawił trzy wzory opisujące zależność pomiędzy ścisłością a porowatością wapieni, piaskowców związanych i piaskowców luźnych (o porowatości powyżej 20%).

Wzór przedstawiony przez Horne'a (1990) dla piaskowców skonsolidowanych był następujący:

$$C_{pc} = \exp(5,118 - 36,26\emptyset + 63,98\emptyset^2) \times 10^{-6} \quad (4)$$

gdzie:

- C_{pc} – zmiana objętości porowej pod wpływem zmian ciśnienia okólnego przy stałym ciśnieniu porowym,
- \emptyset – porowatość (ułamek).

Biorąc pod uwagę uzyskane przez Horne'a w pracy z 1990 roku wzory i odpowiednio je modyfikując, Jalalh (2006) przedstawił zmodyfikowaną korelację Horne'a, a następnie, poszukując lepszego opisu zależności pomiędzy ścisłością a porowatością dla własnych próbek piaskowca, stworzył nowy model zależności pomiędzy porowatością a ścisłością.

Zmodyfikowany wzór Horne'a ma postać:

$$C_{pc} = \exp(3,1895 - 15,249\emptyset + 31,599\emptyset^2) \times 10^{-6} \quad (5)$$

gdzie:

- C_{pc} – zmiana objętości porowej pod wpływem zmian ciśnienia okólnego przy stałym ciśnieniu porowym,
- \emptyset – porowatość (ułamek).

Wzór przedstawiony przez Jalalha (2006) dla piaskowców ma postać:

$$C_{pc} = \left(\frac{1}{-2,141^{-2} + 4,064^{-2} (\emptyset)^{0,4652}} \right) \times 10^{-6} \quad (6)$$

gdzie:

C_{pc} – zmiana objętości porowej pod wpływem zmian ciśnienia okólnego przy stałym ciśnieniu porowym,
 \emptyset – porowatość (ułamek).

Pomimo ciągłych prac nad modelami Jalalh (2006) stwierdził, że nie zastąpią one badań laboratoryjnych, a mogą jedynie stanowić dodatkowe źródło informacji, gdy przeprowadzenie testów na próbkach skalnych nie jest możliwe. Dodatkowo Farahani et al. (2022) wykazali, że poszczególne modele mogą mieć lepsze lub gorsze dopasowanie do wyników eksperymentalnych w zależności od wysokości zadanych ciśnień. W związku z tym w pracy tej przedstawiono również nowy model z uwzględnieniem warunków ciśnienia, w których była badana próbka skalna.

Wzór przedstawiony przez Farahaniego et al. (2022) jest następujący:

$$C_{pc} = (0,75 \times \sigma^{-1,15} \times \emptyset_i^{-0,864}) \times 10^{-6} \quad (7)$$

gdzie:

C_{pc} – zmiana objętości porowej pod wpływem zmian ciśnienia okólnego przy stałym ciśnieniu porowym,
 σ – ciśnienie nadkładu [psi],
 \emptyset_i – porowatość początkowa [%].

Wszystkie te badania doprowadziły do powstania szeregu modeli, nie dając jednak jednego uniwersalnego wzoru na oszacowanie ściśliwości na podstawie porowatości. Jak wykazała część autorów wspomnianych powyżej (Horne, 1990; Jalalh 2006; Farahani et al., 2022), na ściśliwość wpływa nie tylko porowatość, ale także inne czynniki, jak litologia, stopień konsolidacji skały czy wielkość ciśnienia, pod jakim była badana próbka. Wszystkie te czynniki sprawiają, że zagadnienie ściśliwości przestrzeni porowej jest tematem skomplikowanym, który wymaga prowadzenia badań laboratoryjnych z uwzględnieniem wielu czynników.

Artykuł ten ma na celu przetestowanie istniejących modeli ściśliwości oraz stworzenie nowego modelu przeznaczonego dla skał zbiornikowych z rejonu zapadliska przedkarpackiego.

Metodyka badań

Na wytypowanych próbkach piaskowców i heterolitów (skał zbudowanych z naprzemiennych drobnych lamin piaskowców

i mułowców) z zapadliska przedkarpackiego przeprowadzono podstawowe badania petrofizyczne, takie jak porozymetria rtęciowa (MICP), badania współczynnika przepuszczalności skał oraz analiza petrograficzna. Na koniec wykonano również badanie ściśliwości porowej na urządzeniu DCI RCS. Analiza ta miała na celu pomiar zmian przestrzeni porowej w próbce pod wpływem zwiększającego się ciśnienia nadkładu. Zasięg badań obejmował ciśnienia od 500 psi do 7000 psi ciśnienia nadkładu i stałe 300 psi ciśnienia porowego. Dzięki dwóm osobnym systemom nadawania ciśnienia (jeden odpowiada za ciśnienie nadkładu, drugi za ciśnienie porowe) było możliwe podniesienie ciśnienia nadkładu (okólnego) etapami co 500 psi przy jednoczesnym utrzymaniu ciśnienia porowego na stałym poziomie (tabela 1). Zgodnie z przyjętą procedurą po każdym zwiększeniu ciśnienia o 500 psi należy odczekać godzinę – lub w przypadku braku stabilizacji warunków wewnętrznych aż do jej osiągnięcia – zanim nastąpi właściwy pomiar i podniesienie ciśnienia do następnej wartości.

Tabela 1. Etapy zmiany ciśnienia nadkładu i porowego w trakcie badań

Table 1. The stages of changes in overburden and pore pressure during the study

Etap	Ciśnienie nadkładu [psi]	Ciśnienie porowe [psi]
1 (warunki początkowe, w ciśnieniach minimalnych)	~300	~50
2	500	300
3	1000	300
4	1500	300
5	2000	300
6	2500	300
7	3000	300
8	3500	300
9	4000	300
10	4500	300
11	5000	300
12	5500	300
13	6000	300
14	6500	300
15	7000	300

Dokładną procedurę przeprowadzania badania ściśliwości porowej zamieszczono we wcześniejszym artykule (Nowak, 2022).

Uzyskane wyniki badań ściśliwości, po analizie zależności od wysokości ciśnienia i od porowatości, porównano z wynikami otrzymanymi z istniejących modeli (Hall, 1953; Horne, 1990; Jalalh, 2006; Farahani et al., 2022). Wyniki

tego porównania nie dały wystarczająco dobrych rezultatów, w związku z czym podjęto próbę stworzenia nowego modelu, tak by otrzymać wyniki jak najbliższe danym uzyskanym eksperymentalnie.

Po otrzymaniu wyników badań ścisłości przeanalizowano wpływ zmian ścisłości w zależności od wysokości ciśnienia i od porowatości. Następnie spróbowano dopasować uzyskane wyniki do istniejących modeli (Hall, 1953; Horne, 1990; Jalalh, 2006; Farahani et al., 2022). Po przeanalizowaniu wyników dopasowania do istniejących modeli podjęto próbę stworzenia nowego modelu dla lepszego oszacowania ścisłości badanych skał z terenu zapadliska przedkarpackiego. Model ten został stworzony z wykorzystaniem języka R i środowiska Posit. Z szeregu możliwych modeli wybrano kilka najbardziej pasujących do rozkładu danych otrzymanych laboratoryjnie. Następnie, po analizie parametrów statystycznych poszczególnych modeli, wybrano jeden z nich, który wykazywał najlepsze dopasowanie do uzyskanych wyników eksperymentalnych. Pod uwagę zostały wzięte trzy parametry statystyczne używane przy opisywaniu dopasowania modeli. Pierwszy z nich to współczynnik determinacji R^2 (RSQ), opisujący jakość dopasowania modelu do zmiennej. Jak wskazują autorzy wielu prac (Jalalh, 2006; Farahani et al., 2022), nie zawsze jest to

idealny środek do stwierdzenia, czy zastosowany model jest odpowiedni dla zmiennych. Jako drugi uwzględniono średni błąd bezwzględny (MAE), który jest średnią bezwzględną wielkością błędów pomiędzy wartościami otrzymanymi laboratoryjnie a wartościami otrzymanymi na podstawie modelu. Ostatnim wziętym pod uwagę parametrem statystycznym był pierwiastek błędu średniokwadratowego (RMSE), który pozwala ocenić błąd prognozy modelu, przy czym na wynik w tym przypadku o wiele silniej wpływają wyniki odstające o większych odstępach od modelu.

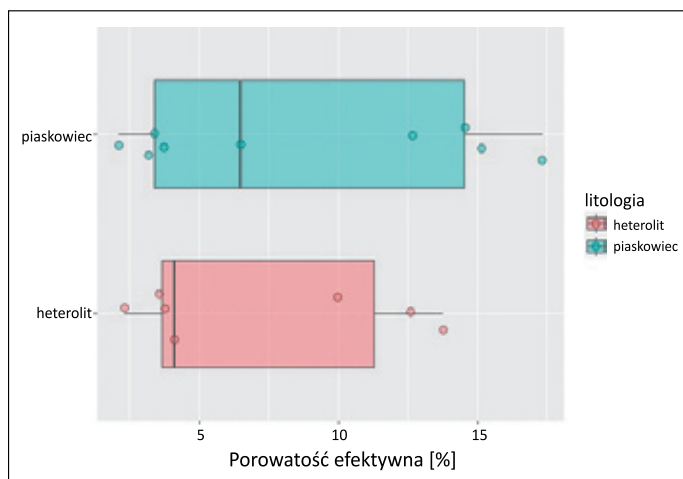
Charakterystyka petrofizyczna badanych próbek

Przebadane próbki obejmują piaskowce i heterolity o generalnie dobrych właściwościach zbiornikowych. W tabeli 2 pokazano, że próbki można podzielić na dwie grupy: o porowatościach powyżej 10% i porowatościach poniżej 5%. Wśród próbek o porowatościach powyżej 10% znajduje się 6 piaskowców i 2 heterolity (rysunek 1). Największa porowatość wynosi 21,96% dla próbki A-1-1. Średnia wynosi 15,83%, a mediana 14,85%. W grupie tej widać wyraźny podział na piaskowce i heterolity. Mimo podobnych porowatości wśród

Tabela 2. Wyniki badań petrofizycznych (część I)

Table 2. The results of petrophysical studies (part I)

ID	Otwór	Głębokość	Litologia	Porowatość efektywna	Porowatość całkowita	Powierzchnia właściwa	Średnica wejścia	Średnica progowa
		[m]		[%]	[%]	[m ² /g]	[μm]	[μm]
K-1-1	K-1	3077,55	heterolit	3,76	7,08	4,62	0,50	0,030
K-1-2	K-1	3080,10	heterolit	3,59	6,61	4,35	0,15	0,030
K-1-3	K-1	3086,85	heterolit	4,12	7,50	5,24	0,10	0,030
K-1-4	K-1	3088,60	piaskowiec	2,12	3,17	1,44	0,30	0,050
K-1-5	K-1	3089,45	heterolit	2,33	4,60	1,80	1,00	0,050
K-1-6	K-1	3200,70	piaskowiec	3,39	4,79	0,12	37,00	10,000
K-1-7	K-1	3203,55	piaskowiec	12,67	13,87	0,09	69,00	30,000
K-1-8	K-1	3206,50	piaskowiec	17,34	17,34	0,17	50,00	26,000
K-1-9	K-1	3210,55	piaskowiec	15,15	16,56	0,25	100,00	30,000
K-1-10	K-1	3214,40	piaskowiec	3,18	4,70	0,26	8,00	0,900
K-1-11	K-1	3185,80	piaskowiec	6,19	7,62	0,28	30,00	12,000
K-1-12	K-1	3194,25	piaskowiec	5,87	6,87	0,16	23,00	12,000
W-1-1	W-1	2278,55	piaskowiec	6,50	8,49	0,27	20,00	4,900
W-1-2	W-1	2280,90	piaskowiec	14,55	18,70	0,55	23,00	10,000
WZ-3-1	WZ-3	1411,55	heterolit	9,97	11,73	2,32	2,50	0,910
WZ-3-2	WZ-3	1651,55	heterolit	12,60	14,38	3,41	2,50	0,910
BW-2-1	BW-2	911,75	heterolit	13,77	21,68	12,10	0,20	0,045
BW-2-2	BW-2	913,40	piaskowiec	3,74	6,87	1,14	0,50	0,030
A-1-1	A-1	1522,55	piaskowiec	21,96	23,68	0,97	22,00	14,000
A-1-2	A-1	1514,50	piaskowiec	18,60	24,00	1,76	30,00	12,000



Rysunek 1. Rozkład wyników porowatości efektywnej (pierwotnej)

Figure 1. The distribution of effective (initial) porosity results

przestrzeni porowej piaskowców dominują mega- i makropory, natomiast wśród heterolitów dominują nano- i mikropory (tabela 3). Przepuszczalność piaskowców (tabela 3) zmienia się od 0,039 mD do 591,38 mD, a średnia wynosi 130,97 mD, natomiast w przypadku heterolitów przepuszczalności wynoszą 0,001 mD. Udział spoiwa dla heterolitów jest znaczący i wynosi

około 40%, a dla piaskowców osiąga maksymalnie do 10% (tabela 4). Zarówno w jednej, jak i drugiej grupie dominuje spoiwo węglanowe z cementem kwarcowym na obwódkach ziaren kwarcu. Do grupy próbek poniżej 5% porowatości należy 7 piaskowców i 5 heterolitów (rysunek 1). Średnia porowatości efektywnej w tej grupie wynosi 4,56%, a mediana 3,75% (tabela 2). Podobnie jak w pierwszej grupie można tu dostrzec różnice pomiędzy piaskowcami a heterolitami. Tutaj również mega- i makropory zdominowały przestrzeń porową piaskowców, a mikro- i nanopory – heterolitów. Podobnie jak w grupie pierwszej lepsze własności filtracyjne charakteryzują również piaskowce (tabela 3). Spoiwo jest tutaj także składnikiem dominującym dla większości heterolitów (od 26,69% do nawet 76,99%). W przypadku piaskowców dominującym składnikiem, podobnie jak w pierwszej grupie, jest szkielet ziarnowy (powyżej 50% składu) (tabela 3). Generalnie heterolity bez względu na grupy charakteryzują się dużą powierzchnią właściwą (powyżej 1,5 m²/g), natomiast najwyższa wartość dla piaskowców wynosi 1,44 m²/g. Podobna zależność pojawia się w przypadku średnicy wejścia, jak i progowej. Dla większości piaskowców średnice te są znacznie większe niż dla heterolitów. Nawet heterolity o porowatościach powyżej 10% mają wartości nie większe niż 2,5 μm dla średnicy wejścia

Tabela 3. Wyniki badań petrofizycznych (część II)

Table 3. The results of petrophysical studies (part II)

ID	Otwór	Głębokość [m]	Litologia	Megapory (>10 μm)	Makropory (10–1 μm)	Mezopory (1–0,1 μm)	Mikropory (0,1–0,01 μm)	Nanopory (<0,01 μm)	Przepuszczalność właściwa [mD]
				[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
K-1-1	K-1	3077,55	heterolit	0,00	0,00	0,00	3,52	96,48	<0,0010
K-1-2	K-1	3080,10	heterolit	0,00	0,00	0,00	0,92	99,08	<0,0010
K-1-3	K-1	3086,85	heterolit	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	<0,0010
K-1-4	K-1	3088,60	piaskowiec	0,00	0,00	0,00	2,95	97,05	<0,0010
K-1-5	K-1	3089,45	heterolit	0,00	0,00	0,96	11,41	87,63	0,1000
K-1-6	K-1	3200,70	piaskowiec	6,76	62,23	9,40	15,87	5,73	0,1300
K-1-7	K-1	3203,55	piaskowiec	78,62	12,17	5,19	3,21	0,81	77,2200
K-1-8	K-1	3206,50	piaskowiec	62,27	23,85	9,96	3,05	0,88	591,3800
K-1-9	K-1	3210,55	piaskowiec	48,09	27,70	16,01	6,22	1,99	116,0600
K-1-10	K-1	3214,40	piaskowiec	0,00	6,45	30,25	50,88	12,42	0,0100
K-1-11	K-1	3185,80	piaskowiec	22,22	59,96	6,23	6,47	5,12	24,5100
K-1-12	K-1	3194,25	piaskowiec	2,62	47,53	27,39	18,16	4,30	1,2700
W-1-1	W-1	2278,55	piaskowiec	3,85	27,61	44,13	18,23	6,18	<0,0010
W-1-2	W-1	2280,90	piaskowiec	5,30	64,26	15,86	9,58	5,00	19,4900
WZ-3-1	WZ-3	1411,55	heterolit	0,00	0,15	11,68	60,16	28,01	0,0742
WZ-3-2	WZ-3	1651,55	heterolit	0,00	0,09	16,77	51,14	32,01	0,0393
BW-2-1	BW-2	911,75	heterolit	0,00	0,00	0,00	1,47	98,53	0,0010
BW-2-2	BW-2	913,40	piaskowiec	0,00	0,00	1,67	13,26	85,08	<0,0010
A-1-1	A-1	1522,55	piaskowiec	25,76	48,92	11,14	8,75	5,43	110,2800
A-1-1	A-1	1514,50	piaskowiec	4,93	52,41	17,53	14,08	11,06	20,5800

Tabela 4. Wyniki badań mikroskopowych

Table 4. The results of microscopic studies

ID	Otwór	Głębokość	Litologia	Szkielet ziarnowy	Porowatość	Spoiwo
		[m]		[%]	[%]	[m ² /g]
K-1-1	K-1	3077,55	heterolit	40,180	0,00	59,81
K-1-2	K-1	3080,10	heterolit	38,160	0,19	61,64
K-1-3	K-1	3086,85	heterolit	23,010	0,00	76,99
K-1-4	K-1	3088,60	piaskowiec	67,370	1,74	30,88
K-1-5	K-1	3089,45	heterolit	72,990	0,32	26,69
K-1-6	K-1	3200,70	piaskowiec	85,940	2,01	12,06
K-1-7	K-1	3203,55	piaskowiec	80,510	14,65	4,84
K-1-8	K-1	3206,50	piaskowiec	77,880	20,87	1,25
K-1-9	K-1	3210,55	piaskowiec	78,690	11,64	9,66
K-1-10	K-1	3214,40	piaskowiec	65,880	4,05	30,07
K-1-11	K-1	3185,80	piaskowiec	72,760	4,75	22,49
K-1-12	K-1	3194,25	piaskowiec	61,780	4,12	34,10
W-1-1	W-1	2278,55	piaskowiec	82,730	8,21	9,06
W-1-2	W-1	2280,90	piaskowiec	87,880	6,25	5,87
WZ-3-1	WZ-3	1411,55	heterolit	54,520	6,52	38,94
WZ-3-2	WZ-3	1651,55	heterolit	53,450	1,01	45,56
BW-2-1	BW-2	911,75	heterolit	52,470	7,58	39,97
BW-2-2	BW-2	913,40	piaskowiec	62,530	7,25	30,22
A-1-1	A-1	1522,55	piaskowiec	75,080	20,14	4,78
A-1-1	A-1	1514,50	piaskowiec	6,759	21,78	8,47

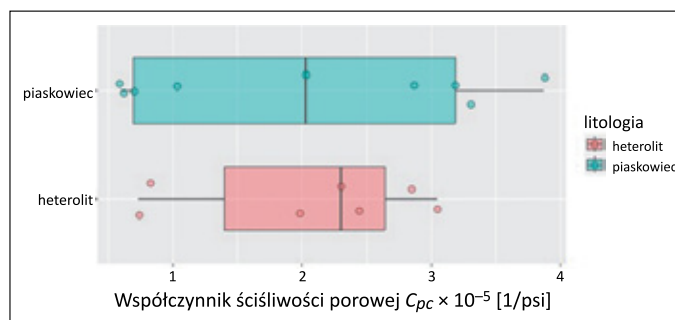
i 0,9 μm dla średnicy progowej. W przypadku piaskowców wartości te poza nielicznymi przypadkami wynoszą powyżej 10 μm (rysunek 2).

Uzyskane wyniki charakterystyki petrofizycznej pokazują, że wybrany zestaw próbek dobrze oddaje zróżnicowanie potencjalnych skał zbiornikowych zapadliska przedkarpacciego i stanowi dobry materiał do prowadzenia rozważań na temat ściśliwości porowej.

Wyniki badań ściśliwości porowej

Otrzymane wyniki badań ściśliwości przestrzeni porowej przedstawiono w tabeli 5. W kolumnach 5 i 6 przedstawiono początkowe wartości porowatości zarówno w procentach, jak i mililitrach. Porowatość podana w procentach jest wartością uzyskaną na podstawie wcześniejszych badań petrofizycznych z uwzględnieniem porowatości zmierzonej na urządzeniu RCS w warunkach początkowych. Jest to porowatość tzw. pierwotna. W przypadku danych porowatości w mililitrach należy pamiętać, że są one także zależne od wielkości samej próbki skalnej, której średnica wynosiła około 2,54 cm, a wysokość zmieniała się od 3 cm do 5 cm. Następną kolumną (7) obrazuje, jak bardzo zmniejszyła się objętość porowa próbki pod wpływem ciśnienia.

Widać tutaj, że w skrajnych przypadkach skały mogą tracić ponad $\frac{1}{4}$ swojej pierwotnej porowatości (np. K-1-10, BW-2-2). W następnych kolumnach (8–9) ujęto końcowy efekt pomiarów, czyli ile wynosi porowatość próbek przy 7000 psi ciśnienia nadkładu. Kolumny 10 i 11 ukazują natomiast różnice pomiędzy wartościami początkowymi a końcowymi. Ostatnia kolumna pokazuje współczynnik C_{pc} otrzymany na podstawie równania (2) zaprezentowanego przez Zimmermana (1990). Jest to najważniejszy czynnik w tej tabeli, pozwalający na prowadzenie dalszych analiz przy modelach. Wyniki dla tego współczynnika wahają się od $0,59 \times 10^{-5}$ 1/psi do $3,87 \times 10^{-5}$ 1/psi. Średnia to $2,02 \times 10^{-5}$ 1/psi, a mediana $2,17 \times 10^{-5}$ 1/psi (rysu-



Rysunek 2. Rozkład wyników współczynnika ściśliwości porowej
Figure 2. The distribution of pore compressibility coefficient results

Tabela 5. Wyniki badań ścisłości porowej
Table 5. Pore compressibility results

ID	Otwór	Głębokość [m]	Litologia	Porowatość otwarta		Zmiana objętości porowej [%]	Porowatość otwarta przy 7000 psi		Różnica w objętościach		Współczynnik ścisłości, C_{pc} [10 ⁻⁵ 1/psi]
				[%]	[ml]		[%]	[ml]	[%]	[ml]	
K-1-1	K-1	3077,55	heterolit	3,76	1,65	-17,04	3,12	1,37	0,64	0,28	2,43
K-1-2	K-1	3080,10	heterolit	3,59	1,63	-27,10	2,62	1,28	1,96	0,35	3,05
K-1-3	K-1	3086,85	heterolit	4,12	1,61	-16,04	3,46	1,38	1,03	0,22	1,97
K-1-4	K-1	3088,60	piaskowiec	2,12	0,67	-28,71	1,51	0,52	0,95	0,15	3,19
K-1-5	K-1	3089,45	heterolit	2,33	1,68	-16,08	1,96	1,41	0,75	0,27	2,30
K-1-6	K-1	3200,70	piaskowiec	3,39	1,03	-14,21	2,91	0,88	0,61	0,15	2,03
K-1-7	K-1	3203,55	piaskowiec	12,67	3,21	-7,20	11,76	2,98	0,98	0,23	1,03
K-1-8	K-1	3206,50	piaskowiec	17,34	4,41	-4,36	16,67	4,21	0,86	0,19	0,62
K-1-9	K-1	3210,55	piaskowiec	15,15	3,98	-5,14	14,37	3,78	0,86	0,19	0,70
K-1-10	K-1	3214,40	piaskowiec	3,18	0,83	-27,09	2,32	0,61	0,95	0,23	3,87
K-1-11	K-1	3185,80	piaskowiec	6,19	1,14	-21,49	4,86	0,94	1,33	0,20	2,53
K-1-12	K-1	3194,25	piaskowiec	5,87	1,13	-23,28	4,51	0,91	1,37	0,21	2,70
W-1-1	W-1	2278,55	piaskowiec	6,50	0,97	-25,11	4,87	0,78	1,63	0,20	2,87
W-1-2	W-1	2280,90	piaskowiec	14,55	2,96	-4,34	13,92	2,83	0,66	0,12	0,59
WZ-3-1	WZ-3	1411,55	heterolit	9,97	2,77	-19,96	7,98	2,22	3,33	0,55	2,85
WZ-3-2	WZ-3	1651,55	heterolit	12,60	2,80	-5,82	11,87	2,64	0,78	0,16	0,83
BW-2-1	BW-2	911,75	heterolit	13,77	2,13	-5,44	13,02	2,02	0,72	0,11	0,74
BW-2-2	BW-2	913,40	piaskowiec	3,74	0,52	-30,08	2,61	0,40	1,13	0,12	3,30
A-1-1	A-1	1522,55	piaskowiec	21,96	3,61	-8,43	20,11	3,33	1,85	0,28	1,11
A-1-1	A-1	1514,50	piaskowiec	18,14	3,34	-12,43	16,29	2,97	2,31	0,37	1,58

nek 2). Są to wyniki zgodne z tym, co prezentują inni autorzy (m.in. Newman, 1973; Jalalh, 2006; Farahani et al., 2022), przedstawiający wyniki ścisłości sięgające od 10×10^{-5} 1/psi do 10×10^{-6} 1/psi.

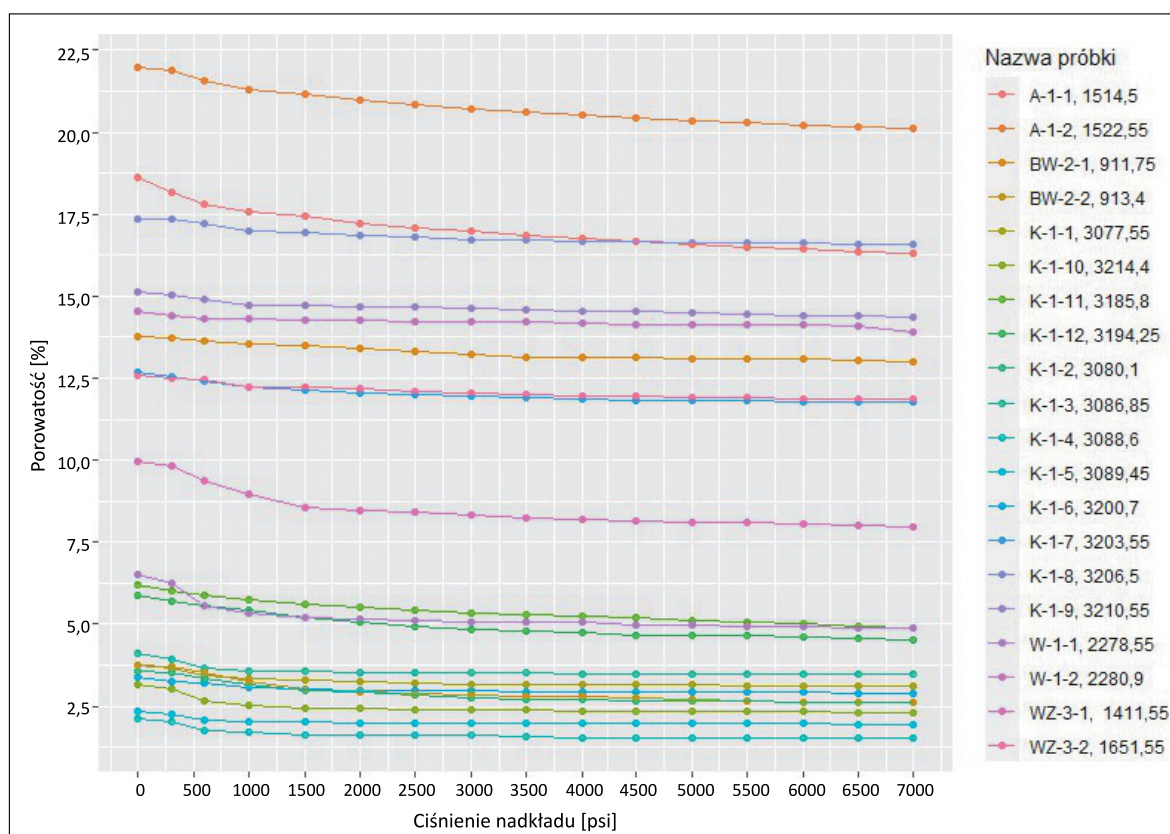
Przyglądając się zmianom porowatości i objętości porowej następującym wraz ze wzrostem ciśnienia nadkładu (rysunki 3 i 4), można zauważyć, że największe zmiany zachodzą przy niższych ciśnieniach (do 1500 psi). W przypadku wyższych ciśnień zmiany te są znacznie mniej dostrzegalne, często minimalne, co sugeruje, że część próbek dosyć szybko osiągnęła maksimum swojej ścisłości porowej. Podobne obserwacje można poczynić na wykresie zmian wartości współczynnika ścisłości porowej (rysunek 5). Choć zmiany te są słabsze, to jednak ogólny trend się powtarza; przy niższych ciśnieniach następuje znaczna zmiana wartości współczynnika, by następnie wraz ze wzrostem oddziałujących ciśnień stopniowo zanikać. Obserwacje te są spodziewane, jako że zmiany porowatości [%] i objętości porowej [ml] opisują to samo zjawisko, a współczynnik ścisłości jest wyliczany na podstawie zmian wcześniej wspomnianych parametrów i ciśnienia. Wszystko to powoduje, że generalnie przy wyższych ciśnieniach współczynnik ścisłości porowej jest niższy. Dodatkowo wykresy

te pokazują, że porowatość skał spada generalnie wykładniczo wraz ze wzrostem ciśnienia nadkładu.

Na rysunku 6 widać zależność pomiędzy współczynnikiem ścisłości a porowatością. Wykres ten pokazuje, że próbki o większej porowatości charakteryzują się mniejszym współczynnikiem ścisłości porowej. Rozkład wyników wskazuje, że standardowe modele liniowe są niewystarczające do dokładnego oszacowania ścisłości.

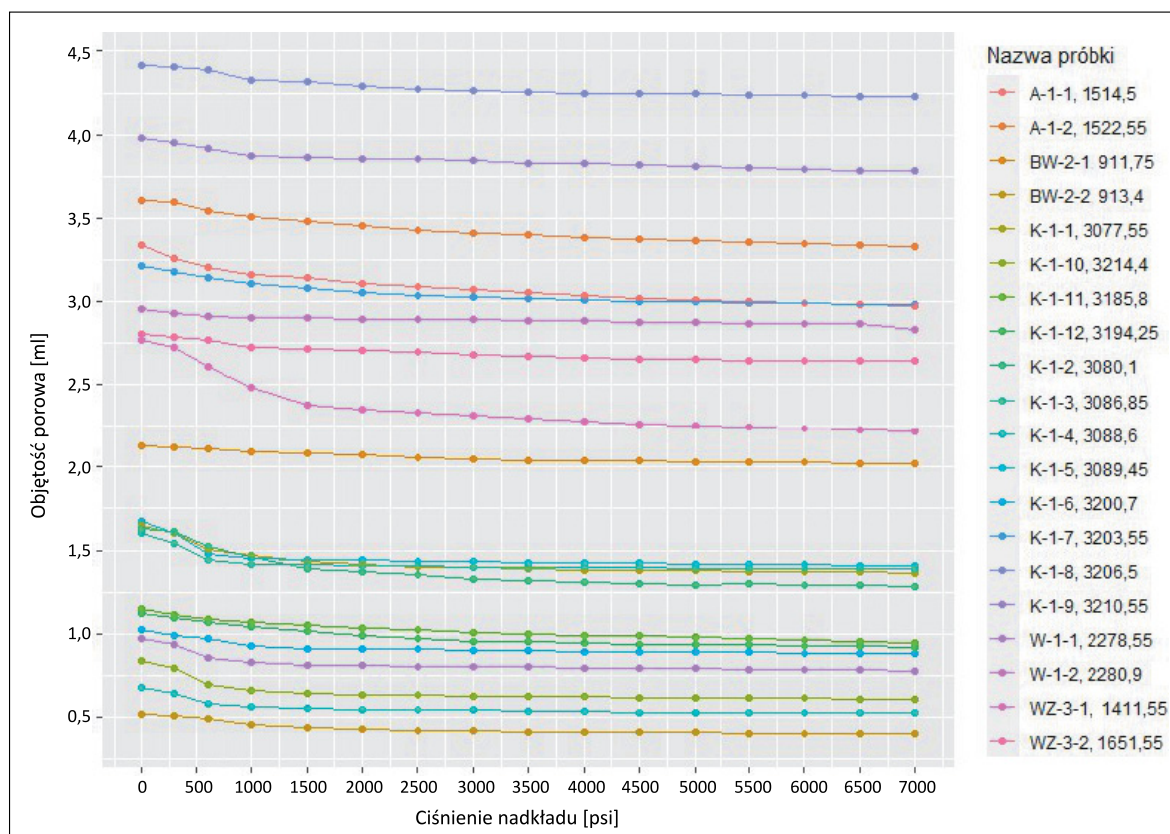
Test modeli

Uzyskane wyniki ścisłości zmierzonej eksperymentalnie przy 7000 psi ciśnienia nadkładu zostały porównane z wynikami ścisłości uzyskanymi dla tych samych porowatości, ale za pomocą 6 modeli. Dodatkowo w tabeli 5 dla każdego modelu przedstawiono trzy wartości statystyczne opisujące dopasowanie modelu do danych laboratoryjnych. Jak widać na rysunku 7, model Halla (1953) wykazuje najsłabsze dopasowanie do danych otrzymanych eksperymentalnie, znacznie zawiązując wyniki, na co wskazują również dane statystyczne (tabela 6).



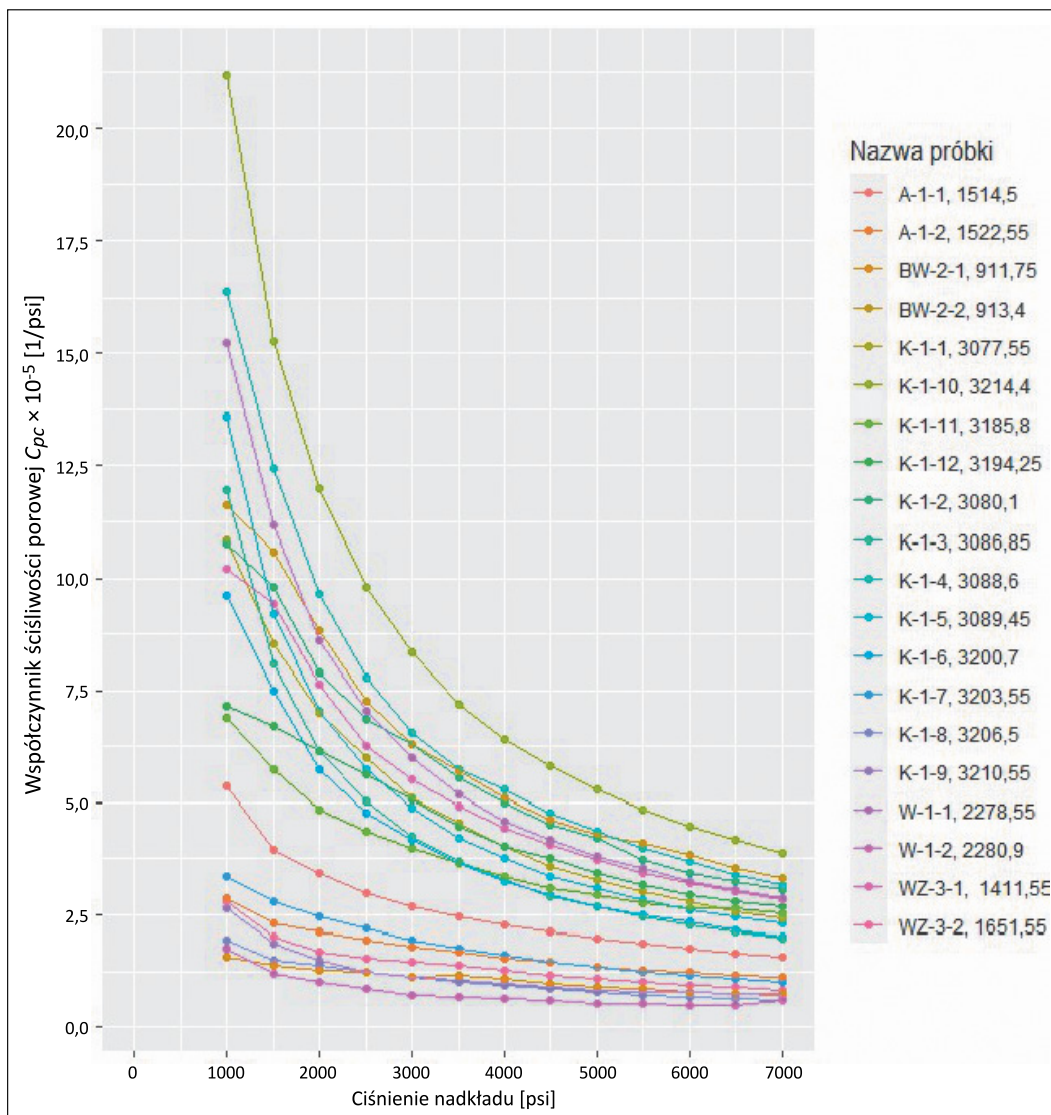
Rysunek 3. Zmiany porowatości [%] wraz ze wzrostem ciśnienia nakładu

Figure 3. Changes in porosity [%] with increasing overburden pressure



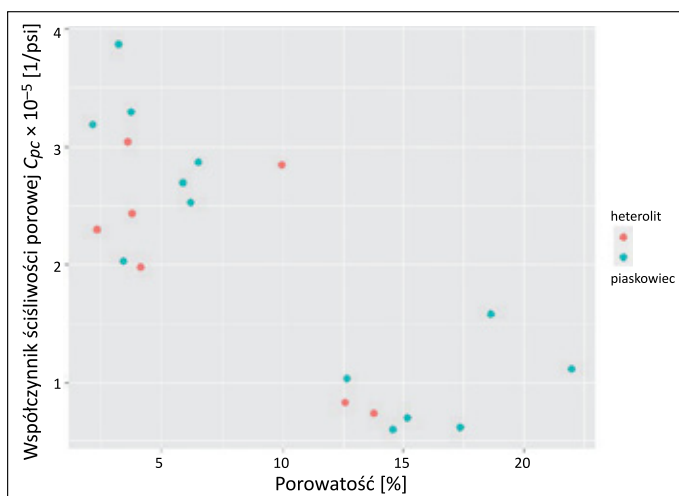
Rysunek 4. Zmiany objętości porowej [ml] wraz ze wzrostem ciśnienia nakładu

Figure 4. Changes in pore volume [ml] with increasing overburden pressure



Rysunek 5. Zmiany współczynnika ściśliwości porowej wraz ze wzrostem ciśnienia nadkładu

Figure 5. Changes in pore compressibility coefficient with increasing overburden pressure



Rysunek 6. Współczynnik ściśliwości porowej w zestawieniu z porowatością pierwotną próbek

Figure 6. Pore compressibility coefficient in comparison with initial porosity

Współczynnik determinacji R^2 dla modelu Halla utrzymuje się pomiędzy innymi wynikami R^2 dla zaprezentowanych modeli, natomiast średni błąd bezwzględny i pierwiastek błędu średniokwadratowego są tutaj największe. Modele Jalalha (2006) i Farahaniego et al. (2022) dają rezultaty poniżej wyników otrzymanych laboratoryjnie, głównie w przedziale od 10×10^{-6} do 1×10^{-6} na osi y. Wydaje się, że są one lepiej dostosowane do próbek o mniejszej ściśliwości. Uzyskane wyniki pokazują, że jedynie zmodyfikowany model Horne może zostać wykorzystany do predykcji współczynnika ściśliwości na podstawie wyników porowatości dla badanych próbek (rysunek 7, tabela 6). W modelu tym R^2 , MAE i RMSE wynoszą odpowiednio 0,62, 6,67 i 9,17. Model ten jednak nie doszacowuje współczynnika ściśliwości dla większości próbek. W pracy podjęto próbę zmodyfikowania istniejącego zmodyfikowanego modelu Horne'a tak, aby uzyskać dobre dopasowanie do danych eksperymentalnych.

W rozważaniach na temat ścisłości wart zaznaczenia jest problem ciśnień oddziałujących na skały. W przypadku większości przytoczonych tutaj modeli nie ma podanych wprost ciśnień, w jakich prowadzono badania, lub jest jedynie wspomniane, że było to ciśnienie odpowiadające ciśnieniu litostatycznemu z głębokości, z której pochodziła próbka. Powoduje to trudność w dopasowaniu tych modeli do otrzymanych w pracy wyników laboratoryjnych. Jedynie model Farahaniego et al. (2022) bierze pod uwagę ciśnienia oddziałujące na skałę.

Tabela 6. Wyniki analizy statystycznej modeli zmian ścisłości porowej

Table 6. The results of the statistical analysis of models for changes in pore compressibility

Model	R ² (RSQ)	MAE	RMSE
Hall (1953)	0,580	39,40	41,47
Jalalh (2006)	0,629	17,44	20,04
Horne (1990)	0,520	15,32	20,83
ModHorne (Jalalh, 2006)	0,623	6,67	9,17
Farahani et al. (2022)	0,520	13,75	15,83
Nowy model	0,600	5,51	6,63

Dyskusja

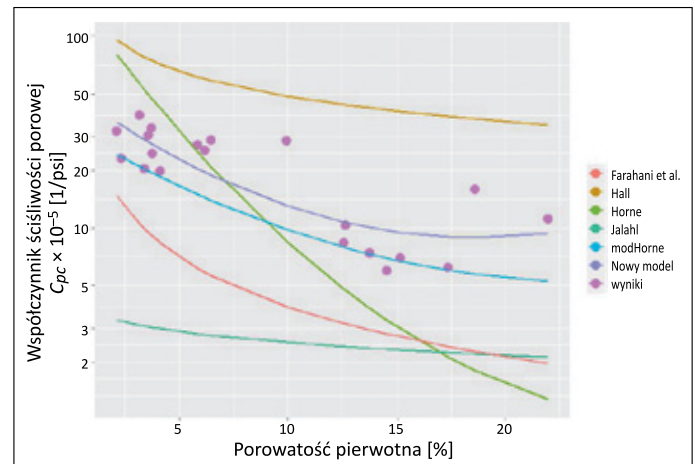
Jak pokazano wcześniej, zastosowane modele nie wykazują zbyt dużej zgodności z danymi otrzymanymi w sposób eksperymentalny. Najlepszy z nich (modHorne) zaniża większość wyników. Dopiero zastosowanie modelu utworzonego za pomocą zmodyfikowanego wzoru Horne'a pozwoliło na stworzenie nowego wariantu, który najlepiej spośród wszystkich zaprezentowanych tutaj modeli pokrywa się z wynikami laboratoryjnymi. Jego formuła wygląda następująco:

$$C_{pc} = \exp(3,9411 - 18,7193 + 49,8454\varnothing^2) \times 10^{-6} \quad (8)$$

gdzie:

C_{pc} – zmiana objętości porowej pod wpływem zmian ciśnienia okólnego przy stałym ciśnieniu porowym,
 \varnothing – porowatość (ułamek).

Na rysunku 7 widać, że nowo utworzony model utrzymuje wartości pomiędzy wynikami uzyskanymi laboratoryjnie. Współczynnik R² jest tutaj wyższy niż dla części modeli, a średni błąd bezwzględny i pierwiastek błędu średniokwadratowego są najniższe i zbliżone do siebie (tabela 6). Biorąc pod uwagę te parametry, zaprezentowany model wydaje się najlepszy do opisanego współczynnika ścisłości dla badanych próbek. Ponadto, jak wskazują Farahani et al. (2022), w rozważaniach na temat zmian ścisłości należy brać pod uwagę ciśnienia, w jakich prowadzono pomiar/eksperymenty. Jak wspomniano



Rysunek 7. Modele literaturowe oraz nowo utworzony model pokazujące zależność pomiędzy współczynnikiem ścisłości porowej a porowatością pierwotną; wyniki badań laboratoryjnych oznaczone różowymi punktami

Figure 7. Literature models and a newly created model illustrating the relationship between the pore compressibility coefficient and the original porosity; laboratory test results marked with pink dots

wcześniej, w przypadku większości modeli trudno stwierdzić, dla jakich ciśnień zostały przygotowane. Wszystko to daje podstawy do stwierdzenia, że nowo stworzony model spośród wszystkich tutaj zaprezentowanych sprawdza się najlepiej dla przebadanych próbek pochodzących z rejonu zapadliska przedkarpackiego.

Podsumowanie

1. W artykule wykazano istnienie zależności pomiędzy ścisłością porową a porowatością, którą można opisać stwierdzeniem, że im większa porowatość pierwotna danej próbki (do około 20–30%), tym mniejszy współczynnik ścisłości porowej (rysunek 6).
2. Widoczne jest, że spadek ścisłości porowej wraz ze wzrostem ciśnienia nadkładu następuje wykładniczo (rysunek 5).
3. Nie ma jednego właściwego modelu zależności pomiędzy porowatością pierwotną a współczynnikiem ścisłości. Ich dopasowanie jest zależne od szeregu czynników, jak litologia, ciśnienia oddziałujące na skały czy region pochodzenia.
4. W związku z trudnościami w użyciu modeli badania laboratoryjne ścisłości porowej są nieodzowne do oszacowania rozmiarów/potencjału złóż.
5. Zaproponowany w artykule model dotyczy przebadanych próbek rdzeniowych piaskowców i heterolitów z rejonu zapadliska przedkarpackiego. Mimo małej liczby prób pozwala na szacunkowe określenie współczynnika ścisłości w stopniu lepszym od innych dostępnych modeli. Nie jest

to natomiast model w jakimkolwiek stopniu uniwersalny czy możliwy do zastosowania na większą skalę, choćby dla całego rejonu zapadliska przedkarpackiego. Jak wspomniano wcześniej, każdy model, o ile istnieją takie możliwości, należy przetestować na próbie wyników laboratoryjnych.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Modele zmian ścisłości skał złożowych w różnych warunkach ciśnienia porowego*, praca INiG – PIB; numer zlecenia: 0049/SG/2022, nr archiwalny: DK-4100-0037/2022.

Literatura

- Aloki Bakhtiari H.A.V., Moosavi A., Kazemzadeh E., Goshtasbi K., Esfahani M.R., Vali J., 2011. The effect of rock types on pore volume compressibility of limestone and dolomite samples. *Geopersia*, 1(1): 37–82. DOI: 10.22059/jgeo.2011.22163.
- Carpenter C.B., Spencer G.B., 1940. Measurements of compressibility of consolidated oil-bearing sandstones. *Report 3540, United States Department of the Interior, Bureau of Mines*.
- Cicha-Szot R., 2018. Współczynnik ścisłości skał i płynów – parametr petrofizyczny, który należy uwzględnić, czy który można pominąć w charakterystyce złóż surowców płynnych? *Nafta-Gaz*, 74(6): 451–456. DOI: 10.18668/NG.2018.06.05.
- da Silva Jr G.P., Franco D.R., Stael G.C., de Oliveira Lima M.C., Martins R.S.A., de Moraes França O., Azeredo R.B.V., 2015. Petrophysical studies of north American carbonate rock samples and evaluation of pore-volume compressibility models. *Journal of Applied Geophysics*, 123: 256–266. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.10.018.
- Farahani M., Aghaei H., Saki M., Asadolaphour S.R., 2022. Prediction of pore volume compressibility by a new non-linear equation in carbonate reservoirs. *Energy Geoscience*, 3(3): 290–299. DOI: 10.1016/j.engeos.2022.04.005.
- Fatt I., 1958. Compressibility of sandstones at low to moderate pressures. *AAPG Bulletin*, 42(8): 1924–1957. DOI: 10.1306/0BDA5B8E-16BD-11D7-8645000102C1865D.
- Hall H.N., 1953. Compressibility of reservoir rocks. *Journal of Petroleum Technology*, 5(1): 17–19. DOI: 10.2118/953309-G.
- Horne R.N., 1990. Modern well test analysis, a computer-aided approach. *Petroway Inc.*
- Jalalh A.A., 2006. Compressibility of porous rocks: Part II. New relationships. *Acta Geophysica*, 54(4): 399–412. DOI: 10.2478/S11600-006-0029-4.
- Newman G.H., 1973. Pore-volume compressibility of consolidated, friable, and unconsolidated reservoir rocks under hydrostatic loading. *Journal of Petroleum Technology*, 25(2): 129–134.
- Nowak K., 2022. Analiza współczynnika ścisłości piaskowców o zróżnicowanych parametrach petrofizycznych w zmiennych warunkach ciśnień porowych i nadkładu. *Nafta-Gaz*, 78(7): 503–512. DOI: 10.18668/NG.2022.07.02.
- Schutjens P., Heidung W., 2012. On the pore volume compressibility and its application as a petrophysical parameter. *9th Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad*.
- Zimmerman R.W., 1986. Compressibility of two-dimensional cavities of various shapes. *Journal of Applied Mechanics*, 53(3): 500–504. DOI: 10.1115/1.3171802.
- Zimmerman R.W., 1990. Compressibility of sandstones. *Elsevier*. ISBN: 9780080868875.



Mgr Krzysztof NOWAK
Specjalista inżynierijno-techniczny w Zakładzie
Geologii i Geochemii
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: nowakk@inig.pl