

Aleksander Wilk

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

## Prognozowanie ciśnień porowych w ośrodku geologicznym z wykorzystaniem modułu *Seismic Pore Pressure Modeling* firmy WesternGeco

Do obliczenia gradientu ciśnień porowych wykorzystano moduł *Seismic Pore Pressure Modeling* firmy WesternGeco, który został udostępniony autorowi na okres jednego miesiąca. Atutem wspomnianego modułu jest jego interaktywność oraz fakt, iż pracuje on w systemie Petrel firmy Schlumberger, będącym jednym z podstawowych narzędzi interpretacyjnych używanych przez polskie jednostki przemysłowe. Do obliczeń wykorzystano rzeczywiste pomiary ze zdjęcia sejsmicznego 3D z północnego obszaru Polski. Uzyskano zadowalające wyniki potwierdzające użyteczność tego narzędzia w pracach poszukiwawczych.

Słowa kluczowe: ciśnienie porowe, gradient ciśnień porowych, naprężenie efektywne, model kompaktacji, profilowanie akustyczne, gęstość, prędkość.

### Predicting pore pressure in the geological medium, based on the module “Seismic Pore Pressure Modeling” of WesternGeco

Pore pressure gradient calculations were based on the module “Pore Pressure Seismic Modeling” of WesternGeco, which was made available to the author for a period of one month. The advantage of this module is its interactivity, and the fact that it works in the Schlumberger Petrel system, which is one of the basic tools of interpretation used by our native oil industry. For calculations, actual measurements of the 3D seismic survey of the northern Polish territory were used. Satisfactory results confirming the usefulness of this tool in exploration work was achieved.

Key words: pore pressure, pore pressure gradient, effective stress, compaction model, sonic, density, velocity.

### Wstęp

Znajomość rozkładu ciśnień porowych w ośrodku geologicznym jest niezwykle istotna w procesie przygotowania i prowadzenia prac wiertniczych. Dobór odpowiednich technik wiercenia i materiałów eksploatacyjnych podnosi poziom bezpieczeństwa prac i przyczynia się do redukcji kosztów. Znajomość ciśnień porowych stanowi dodatkową informację służącą poprawnemu określeniu rozkładu naprężeń w ośrodku, co jest niezbędnym elementem w optymalnym projektowaniu otworów do zabiegów szczelinowania w formacjach typu *shale gas*, *shale oil* oraz *tight gas*. Może być również wykorzystana jako bezpośrednia metoda poszukiwawcza,

a także jako narzędzie weryfikujące i uzupełniające inne metody poszukiwawcze. Predykcji ciśnień porowych można dokonać na podstawie danych sejsmicznych.

Temat obliczania ciśnień złożowych bazującego na pomiarach sejsmicznych jest szeroko omawiany w literaturze [2, 4–17, 19, 22–24]. Predykcja ciśnień porowych oparta na znajomości prędkości w ośrodku geologicznym wykorzystuje wzajemne związki pomiędzy parametrami fizycznymi zachodzące w ośrodku skalnym. Są to głównie relacje pomiędzy gęstością objętościową, porowatością, prędkością, temperaturą, ciśnieniem oraz naprężeniem [1, 4].

Podstawy teoretyczne

Wyjściem do obliczenia ciśnień porowych w ośrodku skalnym jest relacja (1):

$$P_{ob}(z) = \sigma_{eff}(z) + P_p(z) \quad (1)$$

gdzie:

$P_{ob}(z)$  – ciśnienie nadkładu,  
 $\sigma_{eff}(z)$  – naprężenie efektywne,  
 $P_p(z)$  – ciśnienie porowe,  
 $z$  – głębokość.

Na podstawie równania (1) otrzymujemy formułę na określenie ciśnienia porowego:

$$P_p(z) = P_{ob}(z) - \sigma_{eff}(z) \quad (2)$$

Ciśnienie nadkładu można obliczyć według wzoru (3):

$$P_{ob}(z) = g \cdot \int_{z=0}^z \rho(z) dz \quad (3)$$

gdzie:

$\rho(z)$  – gęstość objętościowa,  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie.

Gęstość objętościową skał uzyskuje się z pomiaru w otworze bądź korzysta się z relacji pomiędzy gęstością a porowatością:

$$\rho(z) = \rho_m(1 - \phi(z)) + \rho_f\phi(z) \quad (4)$$

gdzie:

$\phi(z)$  – porowatość całkowita,  
 $\rho_m$  – gęstość szkieletu skalnego,  
 $\rho_f$  – gęstość cieczy.

W literaturze przedstawione są także inne sposoby określenia gęstości, na przykład z relacji gęstość–prędkość, opracowanej przez Gardnera [13].

Porowatość można określić z relacji [16]:

$$\Delta t(z) = \Delta t_m(z) \cdot (1 - \phi(z))^{-x} \quad (5)$$

gdzie:

$\Delta t(z)$  – czas interwałowy mierzony przy PA,  
 $\Delta t_m(z)$  – czas interwałowy w szkielecie skalnym,  
 $x$  – współczynnik zależny od litologii.

Kluczem do estymacji ciśnień porowych jest znajomość wartości naprężenia efektywnego  $\sigma_{eff}$  (2).

Istnieje wiele wzorów na określenie naprężenia efektywnego, wykorzystujących związek pomiędzy prędkością a naprężeniem efektywnym [4]. Jednym z nich jest wzór zaproponowany przez Isslera [16]:

$$\sigma_{eff}(z) = 1/k \cdot \ln[\phi_0 \cdot \Delta\tau(z)^\alpha / (\Delta\tau(z)^\alpha - 1)] \quad (6)$$

gdzie:

$\sigma_{eff}(z)$  – naprężenie efektywne,  
 $\phi_0$  – porowatość dla  $z = 0$ ,  
 $\Delta\tau(z) = \Delta t(z) / \Delta t_m(z)$   
 $\alpha = 1/x$ ,  $x$  – współczynnik zależny od litologii,  
 $k$  – gęstość objętościowa osadów i wody porowej.

Na podstawie równania (6) można obliczyć naprężenie efektywne, a tym samym ciśnienie porowe (2).

Dutta [11] podaje formułę:

$$\sigma_{eff}(z) = \sigma_0 \cdot e^{-\varepsilon\beta(T)} \quad (7)$$

gdzie:

$\sigma_0$  – stała (maksymalne naprężenie efektywne),  
 $\beta(T)$  – funkcja temperatury,  
 $\varepsilon = \phi(z) / (1 - \phi(z))$ .

Korzystając z relacji (5) i (7), wyznacza się ciśnienie porowe (2).

Określenia ciśnień porowych wykorzystujące rozkład naprężeń efektywnych bazują na założeniu, że ciśnienie w ośrodku geologicznym jest wywołane kompaktacją. Założenie to sprawdza się w przypadku osadów klastycznych (sekwencje piaskowcowo-ilaste). Kompaktacja to główne, lecz nie jedyne źródło anomalnych ciśnień porowych. Inne czynniki to: termiczna ekspansja wody, tektonika, krakowanie materii organicznej i węglowodorów, diagenaza ilów, osmoza, diagenaza siarczanów, kompaktacja węglanów [15]. Jeśli głównym czynnikiem sprawczym anomalnych ciśnień porowych są inne czynniki niż kompaktacja, to stosowanie metod estymacji ciśnień porowych w oparciu o ten mechanizm nie da dobrych rezultatów. Widać to szczególnie w przypadku skał węglanowych, w którym rozkładu ciśnień nie daje się wytłumaczyć tylko mechanizmem kompaktacji. Mechanika naprężeń w tych skałach nie jest wystarczająco wyjaśniona, a występujące w nich zmiany ciśnień są słabo obserwowane w zapisie sejsmicznym. Problem stanowią również sole, które charakteryzują się niską gęstością w stosunku do wysokich prędkości.

Dla prawidłowego oszacowania ciśnień porowych w ośrodku geologicznym znajomość prędkości jest ważnym elementem. Obecnie najlepszym przestrzennym źródłem pola prędkości są dane sejsmiczne. W przypadku sejsmiki 2D posiadamy dwuwymiarowy rozkład pola prędkości (co przy dużej liczbie profili daje przybliżony obraz trójwymiarowy), a w przypadku danych 3D otrzymujemy

przestrzenny rozkład pola prędkości. Najlepsze rezultaty w określeniu rozkładu ciśnień porowych daje zastosowanie prędkości z inwersji sejsmicznej i inwersji tomograficznej na danych sejsmicznych przed składaniem. Metody te bazują nie tylko na czasie rejestracji, ale również na amplitudzie zapisu sejsmicznego, w wyniku czego uzyskuje się lepsze rezultaty niż przy wykorzystaniu innych metod. Poprawiają również rozdzielczość sejsmiki poprzez dodanie składowej wysokoczęstotliwościowej, co skutkuje większą rozdzielczością pola prędkości. Prędkości składania (sumowania), które mają najczęstsze zastosowanie do predykcji ciśnień porowych w ośrodku geologicznym, wymagają odpowiedniego przygotowania, gdyż użycie ich wprost do wyznaczenia ciśnień porowych może generować zbyt znaczące błędy. Prędkości te w praktyce analizowane są z dużym krokiem poziomym, a ich rozdzielczość pionowa uwarunkowana jest tzw. centrami energetycznymi, które obrazują najlepsze dopasowanie refleksów tras sejsmicznych w procesie analiz prędkości [6, 10]. Nie zawsze tak jest.

### Metodyka

Proces obliczeniowy wykorzystany w aplikacji Seismic Pore Pressure Modeling firmy WesternGeco wygląda następująco. Na podstawie modelu strukturalnego (model strukturalny obrazują mapy głębokościowe, którym przypisuje się wiek w milionach lat) i wykresów profilowań – dla każdego otworu obliczany jest model kompaktacji, w którym teoretyczne krzywe akustyczne i gęstości są aproksymacją profilowań rzeczywistych (rysunek 4). Model zakłada wzrost gęstości i prędkości z głębokością. Na bazie różnicy występującej pomiędzy krzywymi teoretycznymi (wynikającymi z modelu kompaktacji) a krzywymi pomierzonymi określane jest naprężenie efektywne. Dodatkowe informacje, które wykorzystywane są do wyznaczenia modelu kompaktacji, to rozkład temperatury, gęstość płuczki i ciśnienie porowe. W przypadku braku tych informacji program używa wartości domyślnych. Dane na temat ciśnienia służą do kalibracji wartości obliczonych przez program. W razie braku tych danych obliczenia wykonywane są bez kalibracji. Wspomnieć należy, że jeśli wykorzystywany jest jakiś rodzaj danych do obliczeń, muszą one występować we wszystkich otworach ujętych w modelu.

Program daje możliwość wyboru modelu (nazwy odpowiadają nazwiskom twórców): Dutta, Normal Compaction Eaton, Normal Compaction Dutta i Extended Bowers. Modele te różnią się formułami obliczania naprężenia efektywnego [24]. W przypadku modeli Normal Compaction Eaton i Normal Compaction Dutta jest to ten sam wzór, natomiast występuje różnica w sposobie liczenia teoretycznych krzywych profilowań akustycznych. Minimum koniecznym do

Dochodzą do tego pułapki w postaci „pozostałości” odbić wielokrotnych oraz liczne błędy wynikające z zastosowanych procedur, które fałszują obraz prędkości. W literaturze można znaleźć szereg rozwiązań i sposobów opracowania pola prędkości z danych sejsmicznych [6, 7, 10].

Obliczony przestrzenny rozkład ciśnień porowych, który stanowi podstawę do opracowania warunków technicznych przyszłego wiercenia, jest modelem teoretycznym, obciążonym błędami, wynikającymi z przyjętego modelu kompaktacji oraz modelu prędkości. Model taki należy interpretować w sensie jakościowym. Do rozpatrywania modelu w sensie ilościowym konieczna jest weryfikacja w warunkach rzeczywistych. Takiej weryfikacji dokonuje się na bieżąco w trakcie wiercenia. Firmy naftowe dysponują metodami rozwiązującymi ten problem. Metody te bazują na pomiarach sejsmicznych i akustycznych w otworze w czasie wiercenia [11] bądź na profilowaniach gęstości skał ilasto-lupkowych, temperatury płuczki lub wytrzymałości przewierconych osadów, a także na prędkości wiercenia [14].

przeprowadzenia obliczeń, niezależnie od wyboru metody, jest krzywa akustyczna (czyli czas interwałowy) z pomiaru profilowania akustycznego w otworze.

Poprawność obliczeń analizuje się w czasie rzeczywistym w oknie „Well section” (rysunek 4), w którym można obserwować dopasowanie krzywych teoretycznych do rzeczywistych (kolumna 3 i 4) oraz wynikające z tego modelu: rozkład naprężeń efektywnych (kolumna 5), ciśnienie nadkładu, ciśnienie hydrostatyczne, ciśnienie porowe oraz gradient spękań (kolumna 6).

Wykorzystując przestrzenny rozkład pola prędkości, na podstawie przyjętego modelu można obliczyć przestrzenny rozkład gradientu ciśnienia porowego (rysunek 5) oraz: gradient ciśnienia nadkładu, gradient naprężeń efektywnych, gradient spękań, gęstość objętościową, porowatość całkowitą i temperaturę.

Wszystkie dane potrzebne do obliczeń pochodzą z pomiarów w otworach, pomiarów laboratoryjnych albo zostają wyliczone. Parametry, które są we wzorach współczynnikami, stałymi i potęgami i nie są określone laboratoryjnie ani obliczone, mogą być wyznaczone poprzez dopasowanie teoretycznych krzywych obliczonych przez program do pomiarów rzeczywistych. Praktycznie realizuje się to poprzez wpisywanie ich wartości i obserwowanie zmian w przebiegu tych krzywych.

Drugim sposobem jest optymalizacja automatyczna. Użytkownik wybiera parametry, które chce optymalizować. Optymalizacji automatycznej dokonuje program, wykorzystując

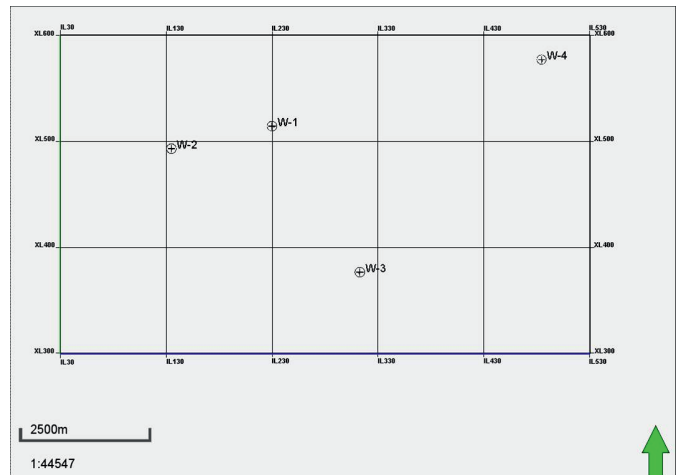
w tym celu metodę najmniejszych kwadratów. Dopasowanie obserwuje się w czasie rzeczywistym. Można w ten sposób wybierać każdy dowolny parametr i zmieniać jego wartość iteracyjnie, aż do uzyskania zadowalającej zgodności

krzywych rzeczywistych i obliczonych. Wartości parametru można zmieniać lokalnie, tzn. dla każdego otworu określić inną wartość, bądź globalnie, czyli wskazać jedną wartość dla wszystkich otworów.

**Przygotowanie danych**

Realizację zadania wykonano, wykorzystując opracowane dane jednego z tematów zrealizowanych i udokumentowanych przez Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo w północnej części kraju (rysunek 1).

Rys. 1. Plan sytuacyjny zdjęcia sejsmicznego 3D z lokalizacją otworów wiertniczych



**Dane otworowe**

Z danych otworowych, które mogą być wykorzystane do obliczenia ciśnień porowych, do dyspozycji były tylko pomiary akustyczne i gęstości. Dane te były dostępne dla

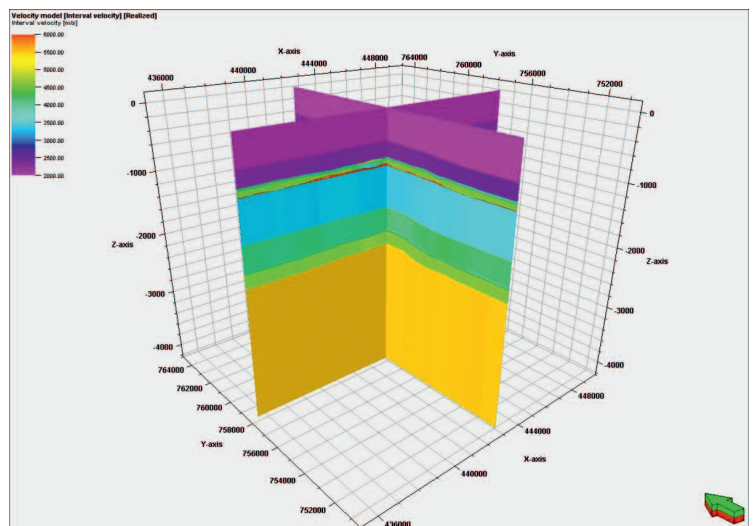
czterech otworów W-1, W-2, W-3, W-4. W celu wyeliminowania anomalnych wartości krzywe te zostały poddane procedurze *despiking*.

**Pole prędkości do konwersji czas-głębokość**

Ze względu na fakt, że estymacja ciśnień porowych odbywa się w domenie głębokości, pole prędkości również musi być w domenie głębokości. Na potrzeby realizacji niniejszej pracy konieczne było utworzenie nowego modelu prędkości do konwersji czas-głębokość, gdyż po terminie realizacji opracowania ze wspomnianego tematu PGNiG w obszarze zdjęcia sejsmicznego odwiercono nowe otwory.

Do budowy pola prędkości wykorzystano dziewięć map czasowych i dziewięć map głębokościowych, które zostały wyinterpretowane w ww. opracowaniu. Mapy głębokościowe zostały skorygowane reperami stratygraficznymi z uwzględnieniem danych z nowych otworów.

Uzyskany model prędkości (rysunek 2) zastosowano do przeliczenia zapisu sejsmicznego z domeny czasu na domenę głębokości.



Rys. 2. Model prędkości interwałowych do konwersji czas-głębokość

**Pole prędkości do prognozy ciśnień porowych**

Pole prędkości wyznaczono, wykorzystując moduł do liczenia inwersji genetycznej, który wchodzi w skład opro-

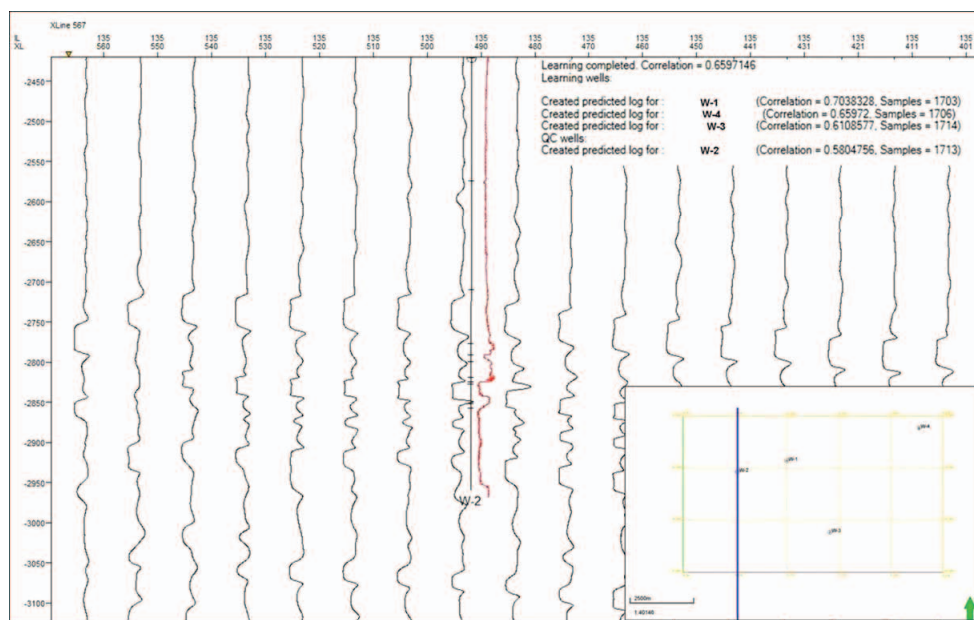
gramowania Petrel (Schlumberger) [3, 18, 20, 21, 25, 26]. Istotną zaletą tej metody w stosunku do klasycznej inwersji

sejsmicznej jest to, że można z danych sejsmicznych oszacować nie tylko impedancję akustyczną, ale też inne parametry mające dobrą korelację z parametrami sejsmicznymi, np. prędkością, gęstością objętościową, porowatością całkowitą itp. Natomiast wada metody to konieczność wykonywania dużej liczby testów w celu doboru parametrów liczenia tak, aby dopasowanie wzorca do wyniku osiągnęło zadowalający poziom. Czas liczenia zwiększa się wraz ze wzrostem ilości danych wejściowych do procesu uczenia, jak i wielkości danych sejsmicznych.

Uczącymi elementami wejściowymi były dane z otworów W-1, W-3 i W-4, a tzw. ślepą próbę stanowił otwór W-2, natomiast parametrem była krzywa akustyczna. Zbiór danych tworzyła kostka sejsmiczna w domenie głębokości. Wynikiem był *volume* tras krzywych akustycznych (rysunek 3).

W prawym górnym rogu na rysunku 3 widoczne są wartości współczynnika dopasowania po-

między danymi wejściowymi (rzeczywistymi) a obliczonymi. Wartości oscylują od 0,58 do 0,71, a średnia wynosi  $-0,66$ . Z otrzymanego przestrzennego rozkładu prędkości fal akustycznych zostały obliczone prędkości interwałowe według relacji:  $V_{int} = 1/\Delta t$ , które zostały użyte do oszacowania przestrzennego rozkładu ciśnień porowych.



Rys. 3. Trasy krzywych akustycznych – fragment profilu IL 135 – wersja głębokościowa. Krzywa w kolorze czerwonym – rzeczywisty pomiar akustyczny po procedurze *despiking*

## Obliczenia i wyniki

Do policzenia modelu kompaktacji wybrano metodę Normal Compaction Eaton oraz Extended Bowers.

Dane pomiarowe, jakie zostały użyte do obliczenia ciśnień w otworach, to pomiary akustyczne i gęstości objętościowej oraz pomiar temperatury w otworze W-4 na głębokości 2950 m. Temperatura ta wynosiła  $82,83^{\circ}\text{C}$ , a jej wartość posłużyła do obliczenia gradientu temperatury, który został zastosowany do wszystkich otworów.

Pozostałe parametry zostały wygenerowane w wyniku „ręcznego” i automatycznego procesu dopasowania krzywych teoretycznych do pomierzonych. Wynik modelowania przedstawiony jest oknie „Well section window” (rysunek 4). Na rysunku zaprezentowano model kompaktacji dla otworu W-2. Zawiera on sześć kolumn. Pierwsza kolumna przedstawia pionową skalę głębokości w metrach (wartość „0” = wylot otworu), oznaczoną symbolem TVD (*true vertical depth*). W drugiej kolumnie znajdują się:

- krzywa „Smectite Fraction” (kolor turkusowy) – linia przejścia smektytu w illit skonstruowana w oparciu o model geologiczny i rozkład temperatury, z której liczone są parametry użyte w modelu kompaktacji,

- linia czerwona „Temperature”, określająca gradient temperatury w otworze,
- linia zielona „Delta Density”, określająca korektę gęstości objętościowej  $\Delta\rho(z)$  w przypadku wyboru modelu uwzględniającego diagenезę. W omawianym przypadku jest ona równa zero,
- linia ciemnozielona, oznaczająca głębokość 50% przejścia smektytu w illit.

Trzecia kolumna zawiera dwie krzywe:

- „RHOB\_desp” (kolor niebieski) – pomierzona krzywa gęstości objętościowej,
- „Bulk density” (kolor czerwony) – teoretyczna krzywa gęstości objętościowej aproksymująca krzywą rzeczywistą (model zakłada wzrost gęstości wraz z głębokością).

W czwartej kolumnie znajdują się:

- „DT\_desp” (kolor niebieski) – czas interwałowy,
- „Sonic NCT” (kolor czerwony) – teoretyczna krzywa akustyczna aproksymująca krzywą rzeczywistą (model zakłada wzrost prędkości z głębokością).

W piątej kolumnie znajduje się krzywa „Effective Stress Gradient” (kolor czerwony), czyli rozkład naprężeń efektyw-

nych obliczonych na bazie zbudowanego modelu kompaktacji, opisanego przez wyekstrahowane krzywe widoczne w trzech pierwszych kolumnach.

Szósta kolumna zawiera cztery krzywe, którymi są:

- krzywa w kolorze brązowym „Pore Pressure Gradient” – gradient ciśnień porowych,
- krzywa w kolorze niebieskim „Overburden Gradient” – przedstawiająca ciśnienie nadkładu,
- krzywa w kolorze turkusowym „Fracture Gradient” – gradient spękań,
- krzywa w kolorze zielonym „Hydrostatic Pressure Gradient” – gradient ciśnienia hydrostatycznego.

W przedziale głębokości od ~750 m do ~1100 m obserwuje się niezeczywiste wartości gradientu naprężeń efektywnych, gradientu ciśnień porowych i gradientu spękań. Anomalie te pochodzą od utworów węglanowych (widoczne trzy anomalnie duże „piki”) oraz utworów soli (anomalna w przedziale od ~850 m do ~1030 m), w których rozkładu ciśnień nie można opisać prostym modelem kompaktacji, o czym już wspomiano.

Na podstawie obliczonych modeli wygenerowano przestrzenny rozkład gradientu ciśnień porowych (rysunek 5). Wyznaczone wartości zawężono do przedziału głębokościowego od -2200 m do -3100 m (poziom odniesienia = poziom morza).

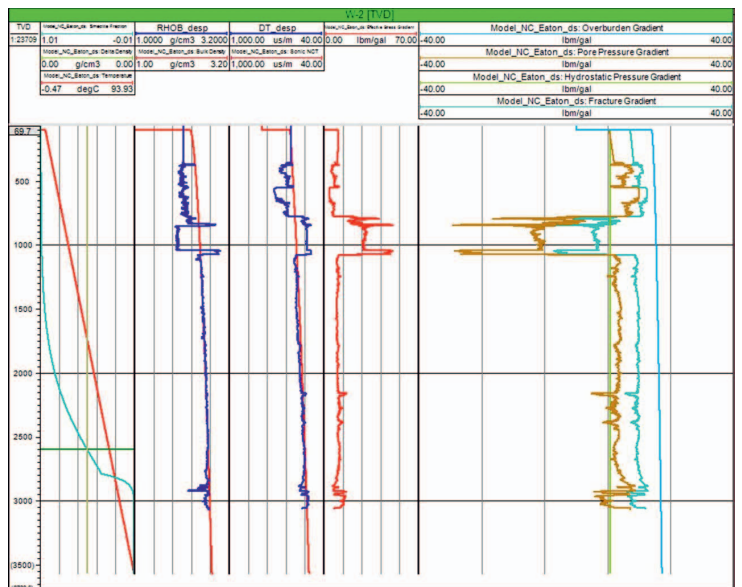
Trudno jednoznacznie ocenić wyniki rozkładu ciśnień porowych, gdyż znana jest wartość tylko jednego pomiaru ciśnienia złożowego w otworze W-1 na głębokości 2943 m, wynosząca 31,581 MPa.

W rozkładzie ciśnień uzyskanych przy zastosowaniu metody Normal Compaction Eaton w otworze W-1 na tej głębokości ciśnienie jest równe 29,2225 MPa, czyli błąd względny wynosi 7% (rysunek 6).

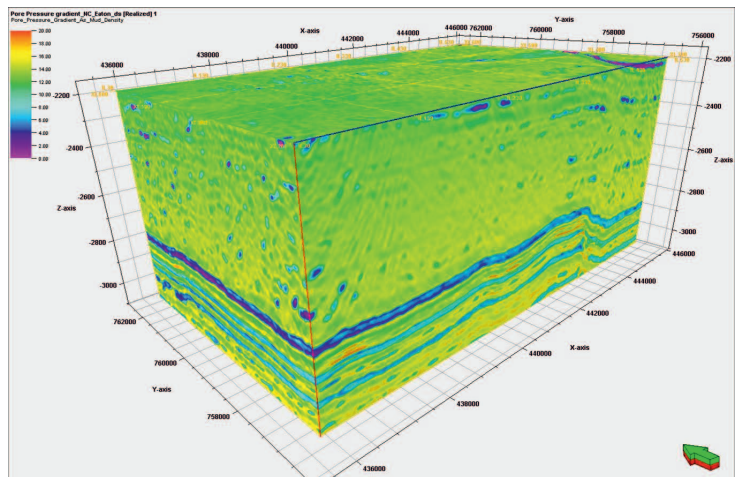
W przypadku wyboru modelu Extended Bowers wartość w tym samym miejscu jest równa 20,9375 MPa, co stanowi 34% błędu względnego.

Model kompaktacji Normal Compaction Eaton jest bliższy warunkom analizowanego ośrodka geologicznego niż model Extended Bowers.

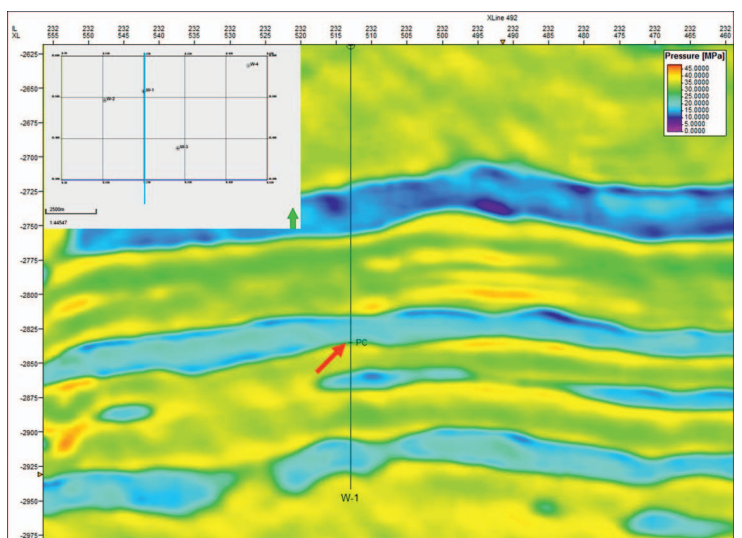
Należy mieć na uwadze, że nie wszystkie obserwowane anomalie są spowodowane wysokimi ciśnieniami porowymi. Mogą być również wynikiem zmian litologii, błędów w rozkładzie prędkości, a także niewłaściwego modelu kompaktacji przyjętego do obliczeń. Widoczny obraz jest również ciekawy pod względem poszukiwawczym. Zważywszy na fakt, że w otworze W-1 zarejestrowano przyływy gazu na poziomie „PC”, występujący zapis podwyższonego ciśnienia na prawo od otworu na poziomie „PC” wygląda interesująco (rysunek 6).



Rys. 4. Okno aplikacji „Well section window” – model Normal Compaction Eaton



Rys. 5. Przestrzenny rozkład gradientu ciśnienia porowego [lbm/gal], model Normal Compaction Eaton, poziom odniesienia = poziom morza



Rys. 6. Fragment profilu sejsmicznego IL 232 – ciśnienie porowe, model Normal Compaction Eaton; „PC” – poziom pomiaru ciśnienia w otworze W-1

## Wnioski końcowe

Otrzymane wyniki potwierdzają przydatność wykorzystanej aplikacji do obliczania rozkładu ciśnień porowych w pracach poszukiwawczych.

Zaletą użytego oprogramowania jest to, że oprócz możliwości wyznaczenia gradientu ciśnień porowych w ośrodku geologicznym można określić dodatkowe parametry, takie jak: gradient ciśnienia nadkładu, gradient naprężeń efektywnych, gradient spękań, gęstość objętościowa, porowatość całkowita oraz temperatura. Daje to możliwość zobrazowania bardziej szczegółowego modelu geologicznego. Dane te mogą być wykorzystane do dalszego modelowania ośrodka geologicznego.

Bardzo przydatny w pracy jest interaktywny charakter aplikacji, czyli obliczanie i obserwacja na bieżąco budowy

modelu kompaktacji, wpływu wprowadzanych zmian oraz korekty danych i uzyskiwanych wyników.

Przy określaniu rozkładu ciśnień porowych w ośrodku geologicznym z wykorzystaniem omawianego oprogramowania istotny jest wybór modelu do obliczeń, ilość danych pomiarowych i ich jakość, dokładność aproksymacji pomiarów rzeczywistych przez teoretyczne krzywe akustyczne i gęstościowe, dokładność pola prędkości. Wymaga to współpracy geologów, geofizyków wiertniczych, inżynierów złożowych, geomechaników, geochemików oraz sejsmików.

Obliczony rozkład ciśnień porowych wymaga kalibracji w warunkach rzeczywistych.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2016, nr 2, s. 79–86, DOI: 10.18668/NG.2016.02.01

Artykuł nadesłano do Redakcji 9.11.2015 r. Zatwierdzono do druku 18.01.2016 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Prognoza ciśnień porowych w ośrodku geologicznym na podstawie zapisu sejsmicznego* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia 0089/SR/15, nr archiwalny SR-4101-0089/15.

## Literatura

- [1] Bała M., Skupio R.: *Wpływ ciśnienia i temperatury na kształtowanie się parametrów sprężystych i gęstość mediów złożowych*. Nafta-Gaz 2013, nr 12, s. 887–893.
- [2] Banik N., Koesoemadinata A., Wagner Ch., Inyang Ch., Bui H.: *Pre-drill pore-pressure prediction from seismically derived acoustic impedance*. SEG Houston 2013, Annual Meeting, s. 2905–2909.
- [3] Boschetti F., Dentith M. C., List R. D.: *Inversion of seismic refraction data using genetic algorithms*. Geophysics 1996, vol. 61, no. 6, s. 1715–1727.
- [4] Bowers G. L.: *Pore Pressure Estimation From Velocity Data: Accounting for Overpressure Mechanisms Besides Undercompaction*. SPE Drilling & Completion, June 1995, s. 89–95.
- [5] Carcione J. M., Helle H. B., Pham N. H., Toverud T.: *Pore pressure estimation in reservoir rocks from seismic reflection data*. Geophysics 2003, vol. 68, no. 5, s. 1569–1579.
- [6] Chopra S., Huffman A.: *Velocity determination for pore pressure prediction*. CSEG Recorder 2006, vol. 31, no. 4, s. 28–46.
- [7] Cibin P., Pizzaferrri L., Martera M. D.: *Seismic Velocities for Pore-Pressure Prediction. Some Case Histories*. International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad 2008, P-87, s. 1–5.
- [8] den Boer L. D., Sayers C. M., Nagy Z. R., Hooyman P. J., Woodward M. J.: *Pore pressure prediction using well-conditioned seismic velocities*. First Break 2006, vol. 24, no. 5, s. 43–49.
- [9] Dutta N. C.: *Deepwater geohazard prediction using prestack inversion of large offset P-wave data and rock model*. The Leading Edge 2002, vol. 21, no. 2, s. 193–198.
- [10] Dutta N. C.: *Geopressure prediction using seismic data: Current status and road ahead*. Geophysics 2002, vol. 67, no. 6, s. 2012–2041.
- [11] Dutta N. C., Khazanehdari J.: *Estimation of formation fluid pressure using high-resolution velocity from inversion of seismic data and a rock physics model based on compaction and burial diagenesis of shales*. The Leading Edge 2006, vol. 25, no. 12, s. 1528–1539.
- [12] Finkbeiner T., Zoback M., Flemings P., Stump B.: *Stress, pore pressure, and dynamically constrained hydrocarbon columns in the South Eugene Islands 330 field, Northern Gulf of Mexico*. AAPG Bulletin 2001, vol. 85, no. 6, s. 1007–1031.
- [13] Gardner G. H. F., Gardner L. W., Gregory A. R.: *Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps*. Geophysics 1974, vol. 39, no. 6, s. 770–780.
- [14] Herman Z.: *Anomalnie wysokie ciśnienia na obszarze Polski*. Nafta-Gaz 2000, nr 7–8, s. 395–410.
- [15] Herman Z., Migdał M.: *Metody określania anomalnie wysokich ciśnień porowych na obszarze Karpat*. Nafta-Gaz 2000, nr 9, s. 476–487.
- [16] Issler D. R.: *A new approach to shale compaction and stratigraphic restoration; Beaufort-McKenzie Basin and Mackenzie Corridor, northern Canada*. AAPG Bulletin 1992, vol. 76, no. 8, s. 1170–1189.
- [17] Jędrzejowska-Tyczkowska H., Żukowska K., Misiarz P., Bartoń R., Żuławiński K.: *Prognozowanie występowania stref anomalnie wysokich ciśnień górotworu na podstawie danych sejsmicznych*. Nafta-Gaz 2000, nr 12, s. 689–706.
- [18] Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D.: *Sztuczne sieci neuronowe. Podstawy i zastosowania*. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, 1994. ISBN 83-7101-197-0.
- [19] Kumar B., Niwas S., Mangaraj B. K.: *Pore Pressure Prediction from Well Logs and Seismic Data*. 9<sup>th</sup> Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad 2012, P-005, s. 1–7.
- [20] Osowski S.: *Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1997. ISBN 83-204-2197-7.
- [21] Sambridge M., Drijkoningen G.: *Genetic algorithms in seismic waveform inversion*. Geophysical Journal International 1992, vol. 109, no. 2, s. 323–342.

- [22] Sayers C. M.: *An introduction to velocity-based pore-pressure estimation*. The Leading Edge 2006, vol. 25, no. 12, s. 1496–1500.
- [23] Sayers C. M., Johnson G. M., Denyer G.: *Pre-drill pore-pressure prediction using seismic data*. Geophysics 2002, vol. 67, no. 4, s. 1286–1292.
- [24] Schlumberger: *Seismic Pore Pressure Modeling. User Guide. Version 2014.1*.
- [25] Tadeusiewicz R.: *Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładowymi programami*. Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, 1998. ISBN 83-7101-400-7.
- [26] Veeken P. C. H., Priezzhev I. I., Shmaryan L. E., Shteyn Y. I.,

Barkov A. Y., Ampilov Y. P.: *Nonlinear multitrace genetic inversion applied on seismic data across Shtokman field, offshore northern Russia*. Geophysics 2009, vol. 74, no. 6, s. WCD49-WCD59.

Mgr inż. Aleksander WILK  
 Główny specjalista inżynieryjno-techniczny w Zakładzie Sejsmiki.  
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
 ul. Lubicz 25 A  
 31-503 Kraków  
 E-mail: [wilka@inig.pl](mailto:wilka@inig.pl)

OFERTA

## ZAKŁAD OCHRONY ŚRODOWISKA

Zakres działań:

- analiza zagrożeń środowiska, związanych z działalnością przemysłu naftowego i gazowniczego;
- monitoring jakości środowiska (powietrza, wód i gleby) na terenach poszukiwania i eksploatacji złóż węglowodorów i innych terenach przemysłowych;
- badania ścieków (w tym wód złożowych i cieczy technologicznych) i odpadów (w tym odpadów wiertniczych, odpadów po zabiegu hydraulicznego szczelinowania) oraz ocena ich potencjalnej szkodliwości dla środowiska;
- klasyfikacja odpadów wraz ze sporządzeniem podstawowej charakterystyki odpadu;
- inwentaryzacja emisji metanu z sektora poszukiwania, wydobycia, magazynowania oraz przesyłu i dystrybucji gazu;
- ocena wielkości emisji gazów cieplarnianych;
- opracowanie i weryfikacja technologii środowiskowych w przemyśle naftowym i gazowniczym;
- ocena jakości paliw węglowodorowych: gazu ziemnego, koksowniczego, gazów wytwarzanych w przemyśle, biogazu, skroplonych gazów węglowodorowych;
- kompleksowa analiza biogazu, w tym analiza związków krzemu, chloru i fluoru;
- monitoring jakości gazu ziemnego w systemie gazowniczym;
- badania podkładów kolejowych odpadowych, wykorzystywane do ich klasyfikacji pod względem bezpieczeństwa dla środowiska;
- pomiary i ocena narażenia zawodowego na szkodliwe czynniki fizyczne w środowisku pracy;
- sporządzanie i aktualizacja kart charakterystyki substancji i mieszanin niebezpiecznych.



**Kierownik:** dr Ewa Kukulska-Zajac  
**Adres:** ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków  
**Telefon:** 12 617-74-36  
**Faks:** 12 653-16-65  
**E-mail:** [ewa.kukulska@inig.pl](mailto:ewa.kukulska@inig.pl)

