

Piotr Łętkowski

*Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno*

## Identyfikacja warstw modelu symulacyjnego

Jednym ze wstępnych etapów budowy modelu symulacyjnego jest przyjęcie kryteriów jego podziału na warstwy. W praktyce, podział ten polega na „wzrokowej” analizie podobieństwa układów stratygraficznych w poszczególnych odwiertach i jest prowadzony w oparciu o dostępne dane pomiarowe. Jakkolwiek podejście takie posiada pewne zalety, to ma jednak charakter bardziej jakościowy niż ilościowy. Biorąc pod uwagę fakt, że sposób podziału na warstwy ma znaczący wpływ na kolejne etapy budowy modelu symulacyjnego (charakter przepływów złożowych, zbieżność procesów iteracyjnych, zbieżność procedury kalibracji), należy stwierdzić, że określenie jednoznacznych, ilościowych parametrów podobieństwa układów stratygraficznych i zalgorytmizowanie całego procesu podziału na warstwy modelu, pozwoliłoby na jego przyspieszenie oraz zwiększenie wiarygodności samego modelu. W artykule przedstawiono koncepcję algorytmu identyfikacji warstw modelu symulacyjnego, opartego na analizie statystycznej wyników profilowań geofizycznych w odwiertach. W tym celu określono: (1) typy danych pomiarowych mające wpływ na wynik identyfikacji warstw, (2) statystyczne parametry podobieństwa rozkładów parametrów złożowych, (3) kryteria podziału na warstwy oraz (4), statystyczne parametry podobieństwa układów stratygraficznych w odwiertach. Należy zauważyć, że w literaturze trudno spotykać opracowania dotyczące statystycznej analizy danych pomiarowych pod kątem podziału na warstwy modelu symulacyjnego, gdyż wiedza taka ma charakter praktyczny i rzadko stanowi obszar zainteresowania autorów publikacji.

### Layer identification for reservoir simulation

Identification of the layers of the simulation model is one of the primary stages of model building process. In practice, identification consists in the “visual” analysis of the similarities between the stratygraphic system in wells and it is based on available measurement data. Although, this approach has some advantages, it’s rather qualitative than quantitative. Because, the manner of identification of the model layers, determines the next stages of simulation model building, the definition of quantitative parameters of stratygraphic system and the algorithm of layers identification make the model more reliable and accelerate the entire process. This paper presents the method as well as procedure of identification of simulation model layers. Presented method is based on statistic analysis of available measurement data and takes into account the following tasks: (1) the definition of measurements data types, (2) the definition of statistic parameters of the reservoir parameters distribution, (3) identification criteria of the model layers, (4) definition of statistical parameters of similarities between stratygraphic systems in wells.

## Wstęp

Współczesna wiedza geologiczna i możliwości techniczne pozwalają w większości wypadków w zadowalający sposób zidentyfikować i wstępnie określić zarówno podstawowe wielkości charakteryzujące złożę, tj. granice złoża, strop, spąg, głębokości kontaktów płynów złożowych i litologię bryły złożowej, jak również wyznaczyć przestrzenne rozkłady parametrów złożowych (porowatość, przepuszczalność, czy nasycenia płynami złożowymi). Parametry określone na etapie rozpoznania złoża są następnie weryfikowane za pomocą modelu symulacyjnego złoża. Podstawowym elementem modelu symulacyjnego jest geometryczny model przestrzenny złoża, czyli rozłożony w przestrzeni zbiór sześciennych bloków, ułożonych warstwami. Model przestrzenny odwzorowuje trójwymiarowy obszar geometryczny (bryłę złożową), z nałożonymi skalarnymi polami podstawowych parametrów złoża. Podstawą

takiej reprezentacji geometrycznej są warstwy modelu, wydzielone w wyniku analizy dostępnych danych pomiarowych. Podział na warstwy modelu symulacyjnego dokonywany jest w praktyce metodą „wzrokową” i polega na analizie podobieństwa układów stratygraficznych w poszczególnych odwiertach.

Przedstawione podejście ma jednak charakter bardziej jakościowy niż ilościowy, co stanowi jego podstawowy mankament. Biorąc pod uwagę fakt, że sposób podziału na warstwy ma wpływ na późniejsze funkcjonowanie modelu symulacyjnego (odtworzenie przez model przepływów płynów złożowych, zbieżność procesu iteracyjnego, zbieżność procesu kalibracji modelu), należy stwierdzić, że określenie liczbowych kryteriów identyfikacji warstw w odwiercie i podobieństwa układów stratygraficznych oraz choćby częściowe zautomatyzowanie całego procesu, pozwoliłoby na

jego przyspieszenie oraz spowodowałyby zwiększenie wiarygodności tworzonego modelu.

W publikacji przedstawiono metodę identyfikacji warstw modelu symulacyjnego opartą na wybranych

metodach analizy statystycznej. Prezentowany algorytm pozwala na redukcję liczby uwzględnianych wektorów pomiarowych oraz określenie liczbowych parametrów podobieństwa układów stratygraficznych.

## Sformułowanie problemu

Rozważany problem można przedstawić w postaci następujących zagadnień, definiujących równocześnie zarys procedury postępowania, która stanowi treść publikacji:

### **Redukcja ilości parametrów wejściowych**

Podstawą procesu wydzielenia warstw modelu symulacyjnego są wyniki pomiarów w odwiertach; zarówno bezpośrednich (pomiaru rdzeniowe), jak i pośrednich (profilowania geofizyczne). Dane te zawierają (pośrednio lub bezpośrednio) informacje opisujące rozkłady z głębokością szeregu parametrów złożowych. Mogą to być parametry petrofizyczne (porowatość, przepuszczalność), litologia (udział poszczególnych typów skał tworzących złożę), nasycenia płynami złożowymi itp.

W zależności od stopnia rozpoznania złoża możemy mieć do dyspozycji od kilku do kilkunastu wielkości pomiarowych (zmiennych pomiarowych). W efekcie w każdym odwiercie otrzymujemy zestaw zmiennych, które nie tylko są ze sobą skorelowane, ale ponadto zawierają bardzo dużą liczbę przypadków (pojedynczych pomiarów wzdłuż głębokości odwiertu). Powoduje to kłopoty związane z ich interpretacją oraz utrudnia wykrycie ich struktury. Niezbędna wydaje się zatem redukcja liczby zmiennych pomiarowych. Proces taki powinien przebiegać dwuetapowo. Pierwszy etap to tzw. „*screening*” danych, polegający na odrzuceniu niewiarygodnych lub niepełnych zmiennych pomiarowych, których uwzględnienie w dalszej analizie mogłoby spowodować zniekształcenia wyników. Drugi etap polega na zastąpieniu oryginalnych zmiennych pomiarowych mniejszą liczbą nowych, reprezentatywnych i nieskorelowanych ze sobą zmiennych (tzw. składowych głównych), zawierających jednak możliwie pełną informację o zależnościach pomiędzy oryginalnymi zmiennymi pomiarowymi.

### **Identyfikacja warstw w odwiercie**

Kolejnym etapem jest wydzielenie na podstawie tych zmiennych jednorodnych grup pomiarów, mogących

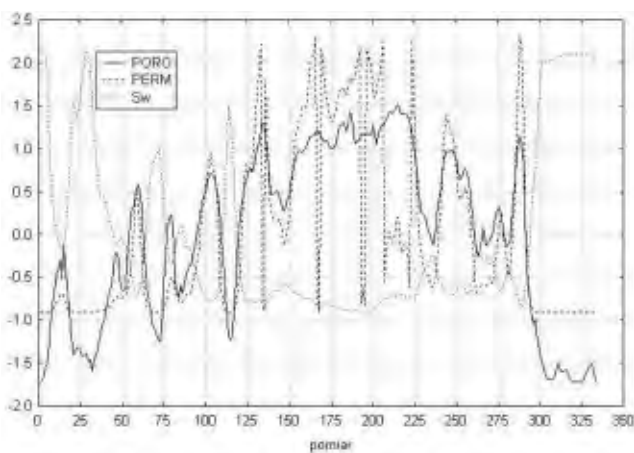
stanowiąc warstwę w sensie modelu symulacyjnego. Technika statystyczną umożliwiającą wynik w takiej postaci jest *Analiza skupień*. Jest to technika służąca grupowaniu dużych zbiorów danych, w sensowne, różniące się między sobą grupy, w taki sposób, aby elementy należące do tej samej grupy były możliwie „podobne”, przy czym możliwe jest uzyskanie różnych wyników w zależności od przyjętego kryterium „podobieństwa”.

### **Reprezentacja układu stratygraficznego**

Efektom zastosowania *Analizy skupień*, dla zestawów składowych głównych w każdym odwiercie, jest podział na jednorodne warstwy, charakteryzujące się liczbą punktów pomiarowych oraz średnią arytmetyczną składowych głównych w warstwie. Dla dalszej analizy konieczne jest wskazanie sposobu reprezentacji tak wyznaczonego układu stratygraficznego w odwiercie. Ma to na celu umożliwienie porównania układów stratygraficznych otrzymanych w różnych odwiertach, niezależnie od wartości parametrów liczbowych charakteryzujących poszczególne warstwy. W publikacji zastosowano technikę rangowania wartości średnich w poszczególnych warstwach.

### **Redukcja ilości zmiennych pomiarowych**

W celu zredukowania liczby zmiennych pomiarowych zastosowano *Analizę Składowych Głównych*. Przykładową analizę przeprowadzono w oparciu o 6 zmiennych pomiarowych (dla 13 odwiertów), które zostały podzielone na dwie grupy. Jako zmienne aktywne przyjęto parametry petrofizyczne (porowatość, przepuszczalność) oraz nasycenie wodą. Drugą grupę zmiennych, uwzględnionych jako zmienne dodatkowe, stanowiły zawartość: anhydrytu, dolomitu oraz ilu. Procedurę wyznaczania zmiennych czynnikowych, po uprzedniej standaryzacji zmiennych (rysunek 1), przeprowadzono dla każdego odwiertu, przy czym jako kryterium wyznaczenia liczby składowych głównych wykorzystano kryterium Kaisera, weryfikowane kryterium procentowym.



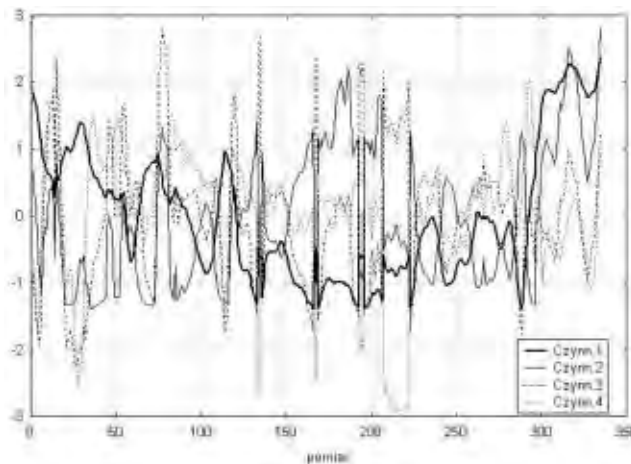
Rys. 1. Standaryzowane zmienne pomiarowe: odwiert W-1

W praktyce oznaczało to, że do dalszej analizy kwalifikowano składowe główne, dla których wartości własne były większe niż 1, o ile wyjaśniały one ponad 70% wariacji zmiennych pomiarowych. Prezentowany algorytm wymaga, aby w sytuacji gdy kryterium Kaisera nie gwarantuje zapewnienia spełnienia kryterium procentowego uwzględnić również składowe główne, dla których wartości własne są mniejsze niż 1.

Przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 2. Zmienną liczbę składowych głównych dla różnych odwiertów należy interpretować następująco:

- jeżeli liczba zmiennych czynnikowych równa się liczbie zmiennych aktywnych (w analizowanym przypadku: 3) oznacza to, że żadna ze zmiennych dodatkowych nie była istotnie skorelowana z otrzymanymi składowymi głównymi (współczynnik korelacji powyżej 0,5),
- w sytuacji gdy liczba składowych głównych jest większa od liczby zmiennych aktywnych, oznacza to, że istniały zmienne dodatkowe, skorelowane

w sposób istotny ze zmiennymi aktywnymi. Ich liczba jest różnicą pomiędzy liczbą składowych głównych, a liczbą składowych aktywnych.



Rys. 2. Zmienne czynnikowe: odwiert W-1

W wyniku zastosowania kryterium Kaisera, weryfikowanego kryterium procentowym, we wszystkich przypadkach uzyskano jedną składową. Tak duża zgodność wyników otrzymaną dla różnych odwiertów należy tłumaczyć faktem, że analiza była prowadzona w oparciu o wyniki profilowań geofizycznych, a więc poszczególne zmienne pomiarowe są ze sobą skorelowane niejako z definicji. Ponadto zaproponowana metoda podziału zmiennych pomiarowych na dwie grupy (zmienne aktywne i zmienne dodatkowe) zmierza do ograniczenia liczby składowych głównych. Fakt ten nie zmienia jednak ogólności proponowanych rozwiązań, gdyż wszelkie procedury obliczeniowe zostały zaimplementowane dla przypadków wielowymiarowych, co pozwala na prowadzenie dalszej analizy niezależnie od liczby składowych głównych.

### Identyfikacja warstw w odwiercie

Identyfikację warstw w odwiercie przeprowadzono w oparciu o zmodyfikowany algorytm hierarchicznej aglomeracji. Konieczność modyfikacji wynika z faktu, że w klasycznej postaci algorytm ten nie uwzględnia uporządkowania zbioru danych pomiarowych. Uporządkowanie zbioru danych pomiarowych oznacza w praktyce, że dozwolone są tylko połączenia pomiędzy sąsiednimi skupieniami pomiarów. Inaczej mówiąc, poszukiwanie odległości aglomeracyjnej polega na przeszukiwaniu wektora, a nie macierzy odległości.

Przeprowadzono szereg testów porównawczych, mających na celu dobór optymalnej dla analizowanego

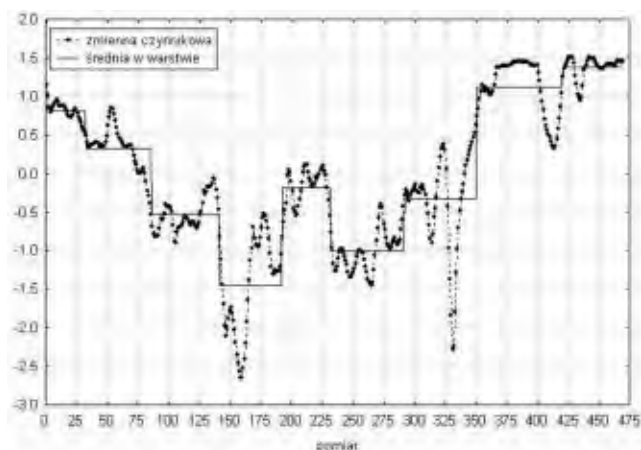
zagadnienia metody aglomeracji oraz miary odległości. W szczególności brano pod uwagę dwie cechy otrzymywanych podziałów: zróżnicowanie wartości średnich składowej głównej oraz równomierność podziału ze względu na liczbę punktów pomiarowych w skupieniu (warstwie).

Analizy porównawcze prowadzono przy arbitralnie przyjętej liczbie warstw. Ostatecznie wytypowano trzy kombinacje metod:

- metodę średnich połączeń ważonych i normę Euklidesa, przy czym jak wagę przyjęto liczbę punktów pomiarowych w klasie,

- metodę średnich połączeń (bez ważenia) i normę Euklidesa,
- metodę Warda.

Wykonane testy wskazują jednoznacznie na pierwszą z wymienionych kombinacji metod (rysunek 3).



Daje ona wyraźne zróżnicowanie pomiędzy średnimi wartościami zmiennej czynnikowej, przy równomiernym rozkładzie liczby punktów pomiarowych w wygenerowanych warstwach. Ponadto metoda ta zdaje się lepiej oddawać zmienność układu stratygraficznego, „wygładzając” zbyt gwałtowne skoki zmiennej czynnikowej. Pozostałe dwie metody spełniają co prawda warunek zróżnicowania średnich wartości w warstwach, lecz powodują powstawanie warstw o zbyt dużym zróżnicowaniu ilości punktów pomiarowych, co w praktyce oznacza duże zróżnicowanie miąższości warstw modelu.

**Rys. 3.** Metoda aglomeracji średnich połączeń ważonych, miara odległości: Euklidesa

### Reprezentacja układów stratygraficznych

Reprezentacja układów stratygraficznych stanowi kolejny poziom ogólności w poszukiwaniu ukrytych struktur danych pomiarowych i ma na celu znalezienie liczbowej miary podobieństwa układów stratygraficznych otrzymanych dla poszczególnych odwiertów. Prezentowana propozycja metody takiej identyfikacji oparta jest na technice rangowania.

Rangowanie polega na uporządkowaniu elementów zbioru danych (np. w kolejności rosnącej) i przyporządkowaniu im wartości rang. Rangi są kolejnymi elementami z zbiorze uporządkowanym. Jeżeli przeprowadzimy rangowanie dla wartości średnich składowej głównej w warstwach, otrzymamy dla każdego odwiertu wektor opisujący jednoznacznie zmienność parametru (średniej arytmetycznej składowej głównej w warstwie), przy czym zmienną niezależną takiego przyporządkowania jest numer warstwy. Przyjęta metoda reprezentacji układów stratygraficznych jest niezależna od rozkładu zmiennej i niewrażliwa na występowanie bardzo dużych wartości

średnich w warstwach. W tabelicy 1 przedstawiono wyniki rangowania wartości średnich składowej głównej dla warstw analizowanych odwiertów.

Powyższe wyniki potwierdzają jednorodność struktur stratygraficznych odwiertów, będących podstawą prezentowanej analizy. Dla wszystkich odwiertów otrzymano wynik charakteryzujący się dużymi wartościami rang w strefach przyspagowej i przystropowej, i niskimi w środku przewierconego interwału.

Powyższe zestawienie może zostać wykorzystane do dalszej analizy, polegającej na próbie wydzielenia grup odwiertów o podobnej strukturze stratygraficznej. Wyniki zastosowania metody hierarchicznej aglomeracji przedstawiono na przykładzie rysunku 4:

**Tabela 1.** Wyniki rangowania średnich

Warstwa	Odwiert												
	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5	W-6	W-7	W-8	W-9	W-10	W-11	W-12	W-13
1	8	9	6	9	6	9	7	6	7	7	7	7	8
2	7	7	3	2	4	6	3	3	1	8	2	6	7
3	6	2	1	4	5	1	1	1	2	3	3	3	3
4	3	3	4	1	1	4	5	2	3	5	1	1	2
5	1	5	8	3	2	3	2	4	5	1	4	5	1
6	2	4	7	6	7	2	8	5	8	2	8	2	4
7	4	1	2	5	3	7	6	8	6	6	6	4	5
8	5	6	5	7	8	5	4	7	4	4	5	8	6
9	9	8	9	8	9	8	9	9	9	9	9	9	9





## Literatura

- [1] Internetowy podręcznik Statystyki, Statsoft Polska, [www.statsoft.pl](http://www.statsoft.pl).
- [2] Kaźmierczuk M.: *Zastosowanie metod statystycznych do wspomaganie geologicznej interpretacji profilowań geofizyki otworowej*. Statsoft Polska, [www.statsoft.pl](http://www.statsoft.pl), czytelnia internetowa.
- [3] Młynarek Z., Tschuschke W., Wierzbicki J., Wołyński W.: *Wykorzystanie statystycznej analizy danych do wydzielenia geotechnicznych warstw podłoża budowlanego*. Geotechnika i Tunelowanie, 2, 2005.



Dr inż. Piotr ŁĘTKOWSKI – absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej; adiunkt w Zakładzie Symulacji Złóż Węglowodorów i Podziemnych Magazynów Gazu INiG Odział Krosno. Zajmuje się między innymi problemami modelowania i symulacji złóż oraz projektowaniem systemów baz danych dla potrzeb górnictwa naftowego.

• Oferta •



**CENTRUM FUNDUSZY EUROPEJSKICH DLA ENERGETYKI**  
 Kierownik: mgr inż. Maria Migdał  
 31-503 Kraków, ul. Lubicz 25 A, tel.: +48 012 370 37 01



Program Operacyjny  
Infrastruktura  
i Środowisko

Jako Instytucja Wdrażająca w Programie Infrastruktura i Środowisko oferujemy pomoc dla przedsiębiorców działających w sektorze energetycznym, ubiegających się o środki Unii Europejskiej na inwestycje związane z:

- rozbudową systemów przesyłowych energii elektrycznej, gazu ziemnego i ropy naftowej,
- budową i przebudową podziemnych magazynów gazu ziemnego,
- budową i modernizacją systemów dystrybucji gazu ziemnego.

Naszym celem jest wsparcie Beneficjentów w procesie ubiegania się o środki z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, począwszy od momentu przygotowania projektu i podpisania umowy o dofinansowanie, aż do zakończenia inwestycji.

**INSTYTUT NAFTY I GAZU**  
 ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków  
 tel.: +48 12 421 00 33 fax: +48 12 430 38 85  
[www.inig.pl](http://www.inig.pl) [office@inig.pl](mailto:office@inig.pl)

KRS 000005478, REGON 000021136, NIP 675-900-12-77