

برآورد تخلخل مخزن از راه تحلیل چندنشاندگی در یکی از میادین نفتی خلیج فارس

سالار زحمتکش^۱ و عبدالرحیم جواهریان^{۲*}

^۱شرکت توسعه صنعت نفت و گاز پرفیسا، تهران، ایران

^۲دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۵/۵)

چکیده

همراه‌سازی داده‌های سه‌بعدی لرزه‌ای با اندازه‌گیری‌های پتروفیزیکی حاصل از چاه‌ها راه مناسبی برای دست‌یابی به توصیف مناسب از مخزن است. روش مرسوم برای همراه‌سازی داده‌های لرزه‌ای و داده‌های چاه، وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای است. روش دیگر، برآورد خواص مخزنی از قبیل تخلخل با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای است. در این تحقیق، تبدیل تک‌نشاندگی، چندنشاندگی خطی و تبدیل چندنشاندگی غیرخطی برای برآورد تخلخل در یکی از میادین نفتی ایران در خلیج فارس مورد استفاده قرار گرفته است. این روش بر پایه تعریف رابطه ریاضی بین چند نشانگر لرزه‌ای و خاصیت مخزنی موردنظر، مانند تخلخل است. نشانگرهایی که با خاصیت مخزنی موردنظر (تخلخل) رابطه خطی قابل‌قبولی دارند، در کنار یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند و بهبود قابل‌توجهی در انطباق بین تخلخل پیش‌بینی شده از این روش، با تخلخل واقعی حاصل می‌شود. در انتها مدل سه‌بعدی مخزن تهیه شده است و فضای متخلخل مخزن برای مکعب‌های تخلخل که با استفاده از تبدیل تک‌نشاندگی و چندنشاندگی خطی و غیرخطی به دست آمده‌اند، محاسبه و مقایسه شده است. تبدیل چندنشاندگی خطی با بیشترین میزان همبستگی در برآورد لاگ، صحیح‌ترین فضای متخلخل را پیش‌بینی می‌کند. همبستگی اعتبارسنجی در برآورد تخلخل، تاثیر بسزایی در میزان فضای متخلخل مخزن دارد.

واژه‌های کلیدی: برآورد تخلخل، تبدیل چندنشاندگی، وارون‌سازی لرزه‌ای، فضای متخلخل

Porosity estimation of pore volume in one of the Persian Gulf's hydrocarbon fields use multi-attribute analyses

Salar Zahmatkesh¹ and Abdolrahim Javaherian^{2*}

¹Engineering Department, Persia Oil & Gas Industry Development (POGIDC), Tehran, Iran

²Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 11 September 2013, accepted: 27 July 2014)

Summary

Integration of 3D seismic data with petrophysical measurements gives a better vision to reservoir characterization. The integration of well-logs and seismic data has been a consistent aim of geoscientists which become increasingly important and successful. In recent years, because of the shift from exploration to development of existing fields with a large number of wells penetrating them, improving reservoir study has been the most

*Corresponding author:

javaherian@aut.ac.ir

*نگارنده رابط:

important pre-drilling activity. One type of integration is forward modelling of synthetic seismic data from the logs. A second type of integration is inverse modelling of the logs from the seismic data. It is called seismic inversion. Seismic inversion, in geophysics, is the process of transforming seismic reflection data into a quantitative rock-property description of the reservoir. Another method is to estimate the log properties by seismic attributes. In this study, linear multi-attribute transform, and non-linear multi-attribute transform were used for predicting porosity in one of the Iranian hydrocarbon fields. The analysis data consisted of the target log (in this study, the porosity log) from wells tied with 3D seismic volume. From the 3D seismic volume, a series of sample-based attributes was calculated. The objective was to derive a multi-attribute transform, which was a linear or nonlinear transform between a subset of attributes and target log values. The selected subset was determined by a process of forward stepwise regression, which derived increasingly larger subsets of attributes. In the linear mode, the transform consisted of a series of weights derived by least-squares minimization. These weights are coefficients of the selected attributes in a linear multi-attribute transform. In the nonlinear mode, a neural network was trained using the selected attributes as the input. Two methods of neural network used in this study include probabilistic neural network and multi-layer feed-forward network. The basic idea behind the general regression probabilistic neural network is to use a set of one or more measured values, called independent variables, to predict the value of a single dependent variable. The multi-layer feed-forward network method consists of a set of neurons, arranged into two or more layers. There is always an input layer and an output layer, each containing at least one neuron. Between them, there are one or more 'hidden' layers. The neurons are connected in the following fashion: inputs to neurons in each layer come from outputs of the previous layer, and outputs from these neurons are passed to neurons in the next layer, and each connection represents a weight.

To estimate the reliability of the derived multi-attribute transform, cross-validation was used. In this process, each well was systematically removed from the training set, and the transform was rederived from the remaining wells. Then, the prediction error was calculated for the hidden well. The validation error, which is the average error for all hidden wells, was used as a measure of the likely prediction error when the transform was applied to the seismic volume. There was a continuous improvement in predictive power as it was progressed from a single-attribute regression to a linear multi-attribute prediction. This improvement was evident not only in the training data but, more importantly, in the validation data. In addition, the neural network did not show a significant increase in resolution over that from the linear regression. As a conclusion, the best result of porosity estimation in this field was provided by the linear multi-attribute transform.

Keywords: Porosity estimation, multi-attribute transforms, inversion, pore volume

۱ مقدمه

ساختارهای زمین‌شناسی به دست می‌آید، مدل مقاومت صوتی و نشانگرهای لرزه‌ای اطلاعات ارزشمندی از نوع سنگ‌شناسی منطقه و حضور یا نبود شاره‌های هیدروکربوری را فراهم می‌آورند. از طرف دیگر نمودارهای برداشت‌شده در محل چاه‌ها، درحکم باارزش‌ترین داده‌ها در هرگونه تفسیری باید در اولویت

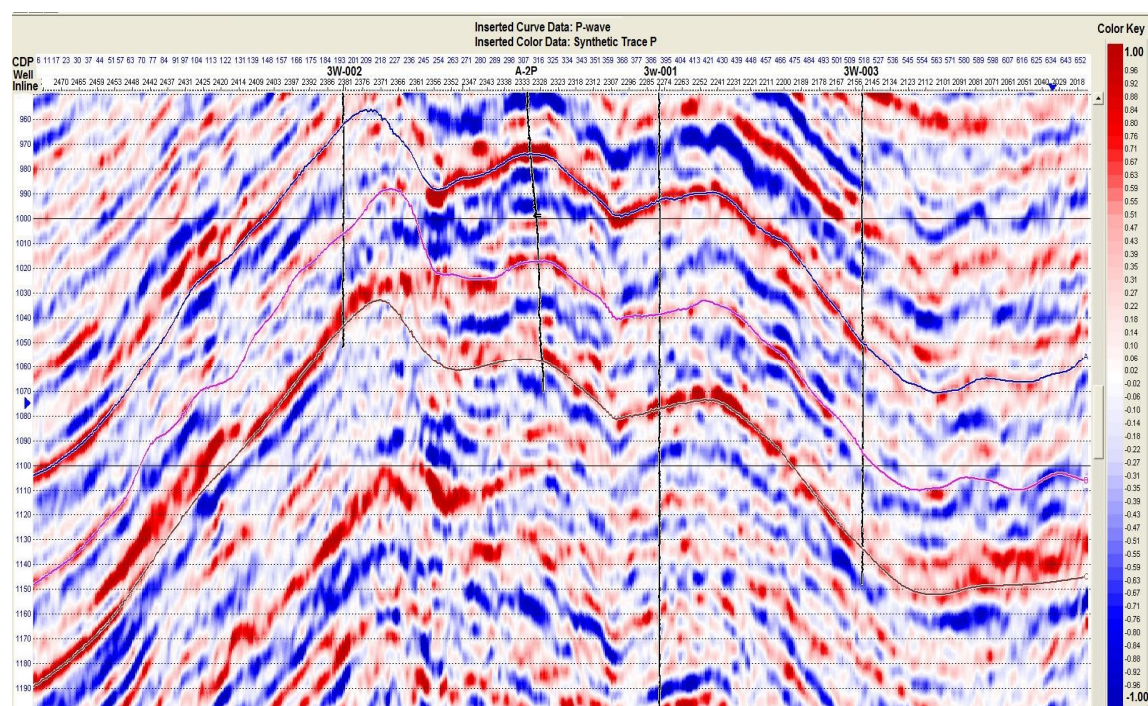
برداشت‌های لرزه‌ای حاوی اطلاعات گسترده‌ای از خصوصیات سنگ و شاره داخل زمین هستند. داده‌های سه‌بعدی لرزه‌ای نمونه متراکم و منظمی از خواص صوتی مخازن را فراهم می‌کنند. علاوه بر اطلاعاتی که با مشاهده ردلرزه‌های متوالی در یک مقطع لرزه‌ای درباره

روش‌های چندنشانه‌گری از تبدیل‌های غیرخطی و عموماً شبکه‌های عصبی نیز استفاده شده است (شولتز و همکاران، ۱۹۹۴b). شبکه‌های عصبی مصنوعی را می‌توان در تعیین تابع غیرخطی که به بهترین صورت این رابطه را منطبق می‌کند، به کار برد. در این تحقیق دو نوع از شبکه‌های عصبی (شبکه عصبی چندلایه با ساختار انتشار رو به جلو و شبکه عصبی احتمالی) استفاده شده است. بعد از برآورد تخلخل در مکعب لرزه‌ای با استفاده از تبدیل چندنشانه‌گری خطی و غیرخطی، با ساخت مدل سه‌بعدی مخزن فضای متخلخل مخزن محاسبه شده است. تفاوت فضای متخلخل محاسبه شده به خاطر تفاوت نتایج اعتبارسنجی میان روش‌های گوناگون است. تفسیر لرزه‌ای و مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Hampson-Russell صورت گرفته است. مدل‌سازی سه‌بعدی مخزن و محاسبه فضای متخلخل با استفاده از نرم‌افزارهای Paradigm به انجام رسیده است.

۲ محیط زمین‌شناسی

ساختار مورد بررسی که در خلیج فارس قرار گرفته است، یک بالآمدگی گنبدنمکی به سمت شمال شرقی است و به فعالیت‌های نمکی در اعماق بیشتر مربوط است. یک شبکه گسل ساختار را تحت تاثیر قرار داده است. داده‌های سه‌بعدی لرزه‌ای با وضوح بالا منطقه‌ای با مساحت ۹۸ کیلومتر مربع را پوشش داده است. وضوح داده‌های لرزه‌ای در مخزن مورد بررسی، نزدیک به ۱۲ متر است. سازند موردنظر که در این مقاله سازند B خوانده می‌شود، شامل یک مخزن کربناته است که هفت لایه مخزنی دولومیتی دارد و در حد فاصل هر لایه مخزنی تا دیگری، یک لایه انیدریت قرار گرفته است. یک پوش سنگ ضخیم انیدریتی (سازند A) در بالای لایه مخزنی اول قرار گرفته است که علاوه بر تامین فشار مخزن، امکان فرار شاره‌های هیدروکربوری را از بین برده است. مهم‌ترین لایه مخزنی

توجه قرار گیرد. آنچه که درباره اطلاعات حاصل از چاه‌ها و برداشت‌های لرزه‌ای مهم است، نحوه ارتباط این دو به یکدیگر است. در بیشتر موارد تغییرات جانبی خواص مخزن را نمی‌توان با چاه‌های جدا از یکدیگر مشخص کرد. همراه‌سازی داده‌های سه‌بعدی لرزه‌ای با اندازه‌گیری‌های پتروفیزیکی حاصل از چاه‌ها، توصیف سه‌بعدی بهتری از مخزن فراهم می‌آورد. روش مرسوم برای همراه‌سازی داده‌های لرزه‌ای و داده‌های چاه، وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای با ساختن یک مدل مصنوعی از روی نمودارهای چگالی و صوتی چاه‌ها است (کُک و اشنايدر، ۱۹۸۳). یکی از روش‌های دیگر برای ایجاد ارتباط بین نمودارهای درون‌چاهی و داده‌های لرزه‌ای، برآورد خواص مخزنی از قبیل تخلخل با استفاده از نشانه‌های لرزه‌ای است. در اوایل دهه ۱۹۹۰ مفهوم استفاده از نشانه‌ها با روابط خطی و غیرخطی مطرح شد که قدرت پیش‌بینی نمودارهای درون‌چاهی را افزایش می‌دهد (شولتز و همکاران، ۱۹۹۴a و ۱۹۹۴b). بعدها روابط ریاضی روش چندنشانه‌گری را راسل و همکاران (۱۹۹۷) نوشتند. این روش بر پایه تعریف رابطه ریاضی میان چند نشانه لرزه‌ای و خاصیت مخزنی موردنظر، مانند تخلخل استوار است. نشانه‌هایی که با خاصیت مخزنی موردنظر (تخلخل) رابطه خطی قابل‌قبولی دارند، در کنار یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند و بهبود قابل‌توجهی در انطباق بین تخلخل پیش‌بینی شده از این روش، با تخلخل واقعی حاصل می‌شود (لیفارت و هارت، ۲۰۰۱). ساده‌ترین مثال این روش استفاده از نتایج وارون‌سازی لرزه‌ای در حکم نشانه لرزه‌ای موردنظر است. طبق یک رابطه همیشگی، با افزایش تخلخل سنگ، مقاومت صوتی کاهش پیدا می‌کند. پس می‌توان از این رابطه برای برآورد تخلخل در مناطقی که مقادیر مقاومت صوتی در اختیار است استفاده کرد (همپسون و همکاران، ۲۰۰۱). در کنار روابط خطی برای پیش‌بینی خواص مخزن در



شکل ۱. یک خط لرزه‌ای گذرا از محل ۴ چاه 3W-001، 3W-002، 3W-003 و A-1P. سه افق تفسیر شده A، B و C با خطوط پیوسته دیده می‌شوند. چاه‌ها با خطوط سیاه و افق‌ها با خطوط رنگی نشان داده شده‌اند.

نشانه‌گرهای لرزه‌ای از راه تبدیل چندنشانه‌گری برای برآورد تخلخل است. در انتها، با ساخت مدل سه‌بُعدی مخزن و استفاده از مکعب‌های تخلخل تهیه شده، حجم فضای متخلخل مخزن برآورد شده است.

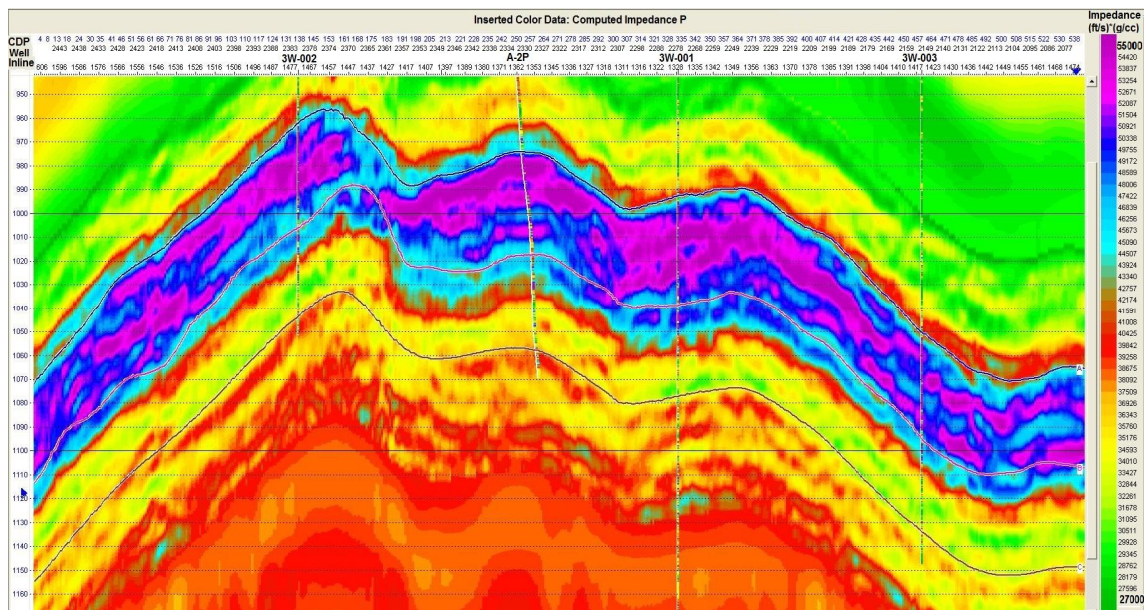
۱-۳ وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای

وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای سه‌بُعدی مکعب مقاومت صوتی را تولید می‌کند. مقاومت صوتی اطلاعاتی درباره سرعت عبور موج صوتی و چگالی سنگ فراهم می‌کند. مقاومت صوتی همچنین نشانگر خوبی از تخلخل است چراکه عموماً با تخلخل رابطه معکوس دارد. روشی که در اینجا برای وارون‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است روش وارون‌سازی براساس مدل است (کک و اشنایدر، ۱۹۸۳). قبل از وارون‌سازی کارهایی از جمله تولید لرزه‌نگار مصنوعی، انطباق چاه و لرزه، استخراج موجک، و ساخت مدل اولیه باید صورت بگیرد و در نهایت

در این میدان، لایه مخزنی سوم (لایه B3) است که در بین لایه انیدریت دوم و لایه انیدریت سوم قرار گرفته است و ضخامت قابل توجهی نیز دارد. چهار چاه در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است که همه آنها دارای لاگ‌های چگالی و صوتی و تخلخل هستند. لایه اصلی تولیدکننده نفت لایه B3 است. در این تحقیق نقشه‌های متفاوتی از این لایه مخزنی تولید شده است.

۳ روش تحقیق

نشانه‌گرهای گوناگونی برای بررسی مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرد که مقاومت صوتی یکی از این نشانه‌گرها است و به‌طور گسترده‌ای برای شناسایی برخی خواص مخزن از قبیل تخلخل، اشباع شاره و محتوی رُس به کار می‌رود. در این مقاله، مقاومت صوتی از وارون‌سازی لرزه‌ای به‌دست آمده است و خود نیز به‌منزله نشانگر لرزه‌ای به کار رفته است. بخش دوم شامل تحلیل



شکل ۲. نتایج مقاومت صوتی در محل خط شکل ۱. سه افق تفسیر شده A ، B و C با خطوط پیوسته دیده می‌شود. مقدار مقاومت صوتی از بالا به پایین کاهش می‌یابد. در سازند اول مقاومت صوتی به رنگ‌های بنفش و آبی است و در سازند پایین که لایه مخزنی در آن وجود دارد با رنگ‌های زرد و سرخ است. در محل چاه‌ها مقاومت صوتی محاسبه شده از نمودارهای صوتی و چگالی قرار داده شده است که انطباق خوبی با نتایج وارون‌سازی دارد.

لرزه‌ای و مکعب مقاومت صوتی به‌دست آمدند برای دست‌یابی به بهترین رابطه برای برآورد تخلخل مورد استفاده قرار گرفتند. فرایندی که در اینجا برای سنجش میزان اعتبار نتایج به‌دست آمده مورد استفاده قرار گرفته است، شامل تقسیم کردن داده‌های موجود به دو گروه داده‌های آزمایش و داده‌های اعتبارسنجی است. با استفاده از داده‌های آزمایش برآورد تخلخل در محل داده‌های اعتبارسنجی صورت پذیرفت و با مقادیر واقعی مقایسه شد. برای داده‌های موجود، داده‌های آزمایش شامل داده‌های لاگ و لرزه در محل ۳ چاه و داده‌های اعتبارسنجی شامل داده‌های لاگ و لرزه در محل چاه دیگر است. هر بار این کار برای یک چاه عملی شد و در نهایت حاصل جمع میزان اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی تخلخل برای ۴ چاه موجود میزان خطا و در نتیجه میزان اعتبار را فراهم کرد.

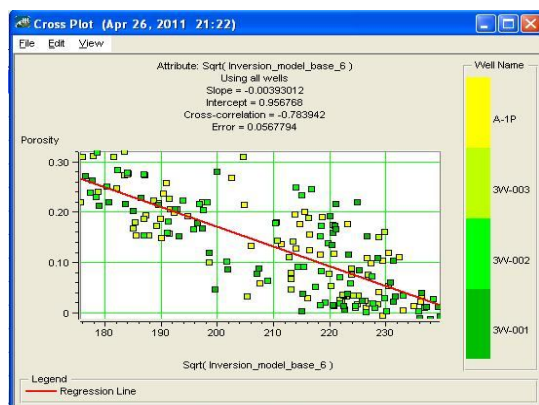
وارون‌سازی لرزه‌ای عملی شود. داده‌های لرزه‌ای یک خط لرزه‌ای که از محل چاه‌های موردنظر گذشته است در شکل ۱ نشان داده شده است. سه افق لرزه‌ای A ، B و C به ترتیب از بالا به پایین در شکل ۱ دیده می‌شود. مسیر حفاری چاه‌های مورد استفاده نیز در این شکل به چشم می‌رسد. شکل ۲ مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی را نشان می‌دهد. در محل چاه‌ها نیز مقاومت صوتی واقعی که از لاگ‌های چگالی و صوتی به‌دست آمده است، دیده می‌شود که انطباق خوبی با نتایج وارون‌سازی دارد. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، مقاومت صوتی در لایه‌های پایین‌تر کاهش می‌یابد و این روند در تمامی چاه‌ها نیز وجود دارد.

۲-۳ برآورد تخلخل

در بخش قبل مکعب مقاومت صوتی از وارون‌سازی براساس مدل به‌دست آمد. مقاومت صوتی در کنار دیگر نشانگرهای لرزه‌ای که به‌طور مستقیم از مکعب داده‌های

دارد. شکل ۳ نمودار لاگ تخلخل در مقابل مقادیر مجذور مقاومت صوتی را نشان می‌دهد. میزان انطباق آنها ۰/۷۸- است.

علامت منفی به علت رابطه معکوس تخلخل و مقاومت صوتی است.



شکل ۳. نمودار تخلخل برحسب نشانگر ریشه دوم مقاومت صوتی. از آنجاکه عملگر مجذور جهت کاهش و یا افزایش عمل‌شونده را تغییر نمی‌دهد، رابطه معکوس مقاومت صوتی و تخلخل همان‌طور که انتظار می‌رود، دیده می‌شود و نقاط با تخلخل زیاد مربوط به کمترین میزان مقاومت صوتی هستند. میزان انطباق این نشانگر و تخلخل ۰/۷۸ است.

۴-۳ وایزش چندنشانگری

برای بهبود توان پیش‌بینی تخلخل به جای یک نشانگر از چندنشانگر استفاده شده است. برای انتخاب بهترین نشانگرها از وایزش مرحله‌ای (دراپر و اسمیت، ۱۹۶۶) استفاده شده است. در این روش، محاسبه ضرایب نشانگرها در رابطه خطی از کمینه کردن میانگین مربعات خطای پیش‌بینی به دست آمده است. همچنین از یک عملگر پیچش برای رفع مشکل اختلاف بسامد لاگ درون‌چاهی و ردلرزه استفاده شده است؛ چراکه فرض بر این است که مقدار لاگ در هر نقطه از چند داده نشانگرهای لرزه‌ای در اطراف خود تاثیر می‌پذیرد (همپسون و همکاران، ۲۰۰۱). در اینجا از یک عملگر به طول ۴ نقطه استفاده شده است. بدین صورت که داده‌های ۴ نقطه از نشانگر لرزه‌ای در اطراف نقطه متناظر با لاگ در

۳-۳ وایزش (رگرسیون) تک‌نشانگری

با وجود یک نشانگر لرزه‌ای، راه مناسب برای رسم رابطه مطلوب بین داده‌های هدف و نشانگرهای لرزه‌ای، رسم آن دو برحسب یکدیگر است (همپسون و همکاران، ۲۰۰۱). با فرض یک رابطه خطی بین نمودار و نشانگر، یک خط مستقیم بین آن دو با وایزش انطباق داده شده است (همپسون و همکاران، ۲۰۰۱).

$$y = a + bx, \quad (1)$$

که ضرایب a و b از کمینه کردن میانگین مربعات خطای پیش‌بینی به دست آمده است:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - a - bx_i)^2, \quad (2)$$

این جمع برای همه نقاط صورت گرفت. خطای پیش‌بینی میزان کیفیت رابطه خطی میان نشانگر موردنظر و لاگ هدف را مشخص می‌سازد. برای تعدادی از نشانگرها میزان همبستگی و خطا در رابطه خطی با لاگ تخلخل در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول دیده می‌شود، بالاترین مقادیر همبستگی مربوط به نشانگرهایی است که از مکعب مقاومت صوتی حاصل شده‌اند. نشانگر اول، نشانگر مجذور مقاومت صوتی است که بیشترین میزان انطباق را در رابطه خطی با لاگ تخلخل

جدول ۱. میزان خطا و میزان همبستگی برای تعدادی از نشانگرها با لاگ تخلخل. کمترین خطا و بیشترین همبستگی مربوط به نشانگرهایی است که از مکعب مقاومت صوتی به دست آمده‌اند. نشانگر اول، نشانگر مجذور مقاومت صوتی است که بیشترین میزان انطباق را در رابطه خطی با لاگ تخلخل دارد.

نشانگر	خطا	همبستگی
ریشه دوم مقاومت صوتی	۰/۰۵۶۷۷۹	-۰/۷۸۳۹۴۲
مقاومت صوتی	۰/۰۵۶۷۹۳	-۰/۷۸۳۸۲۷
لگاریتم مقاومت صوتی	۰/۰۵۶۸۷۱	-۰/۷۸۳۱۴۹
(مقاومت صوتی) ۲	۰/۰۵۶۳۹۴	-۰/۷۸۰۸۴۵
۱/مقاومت صوتی	۰/۰۵۷۱۳۵	-۰/۷۷۸۹۴۲

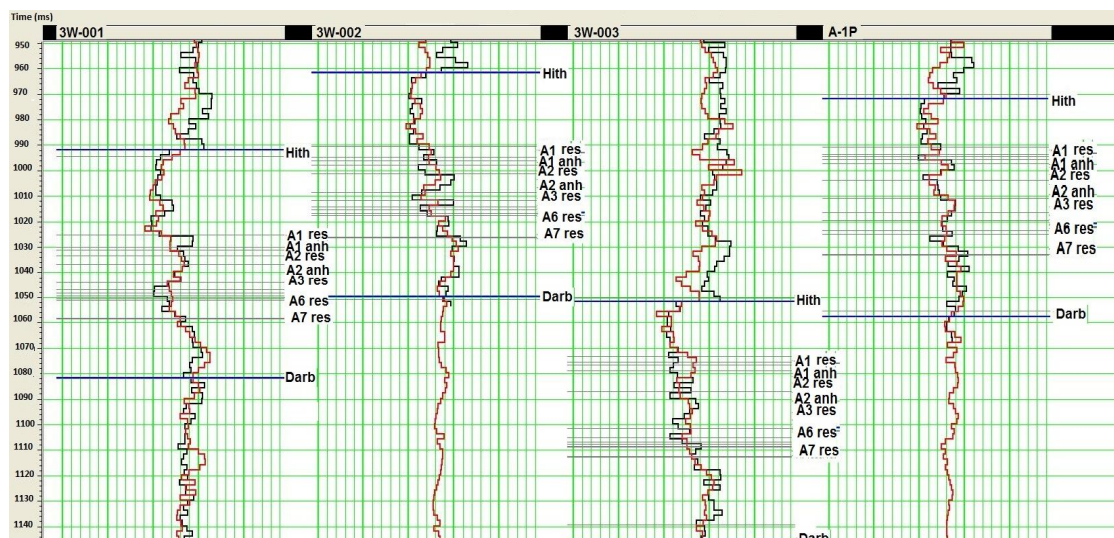
بهبودی در برآورد تخلخل به وجود نیاورد. تعداد نشانگری که کمترین خطا در منحنی خطای انطباق در آن حاصل شود در حکم تعداد بهینه نشانگر انتخاب می شود. نمودار میزان خطای آزمایش و خطای اعتبارسنجی در مقابل تعداد نشانگر به کار رفته، در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود تعداد هفت نشانگر در حکم تعداد بهینه نشانگر انتخاب شده است. بعد از نشانگر هفتم، با آنکه خطای آزمایش کاهش پیدا کرده ولی خطای اعتبارسنجی افزایش یافته است. هفت نشانگر بالای فهرست جدول ۲ در تبدیل چندنشانگری مورد استفاده قرار گرفته است و اعمال رابطه خطی حاصل از آنها بر مکعب داده های لرزه ای، میزان تخلخل در کل مکعب لرزه ای را تولید کرده است. لاگ تخلخل پیش بینی شده در مقابل لاگ تخلخل واقعی در محل چاه ها در شکل ۵ نشان داده شده است. نمودار تخلخل پیش بینی شده در این شکل با استفاده از روش اعتبارسنجی به دست آمده است. نتایج تخلخل برای خط اختیاری شکل ۱ در شکل ۶ نشان داده شده است. تفاوت تخلخل در لایه پوش سنگ (رنگ آبی) و لایه مخزنی (سفید و سرخ) به خوبی در شکل ۶ دیده می شود.



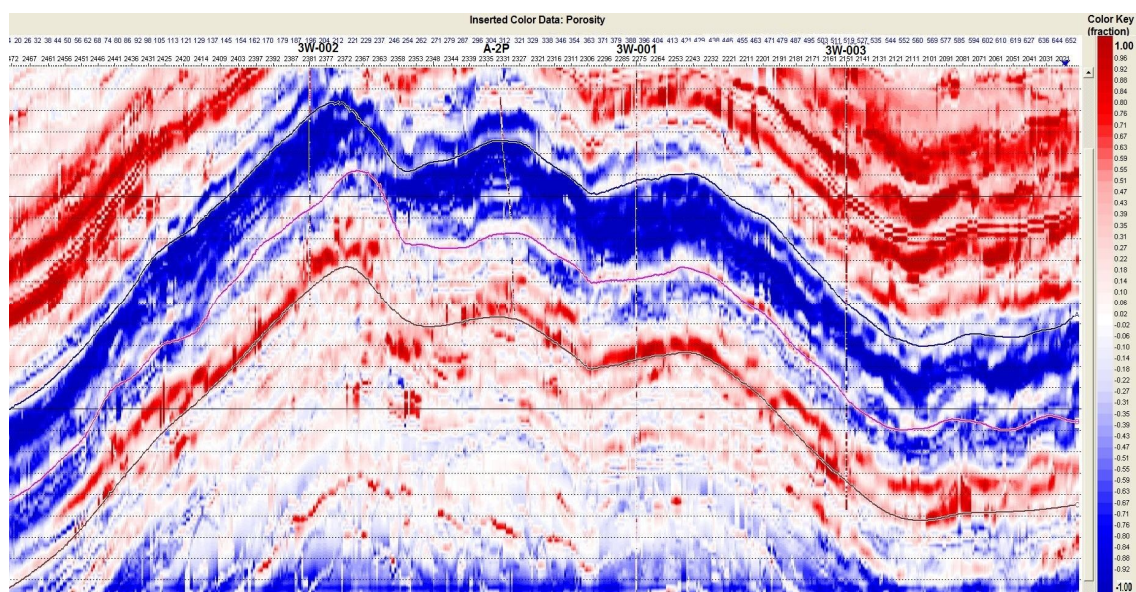
شکل ۴. منحنی خطای میانگین مقادیر پیش بینی شده تخلخل و مقادیر واقعی. استفاده از هفت نشانگر باعث بهبود انطباق رابطه خطی شده است. با وارد کردن نشانگر هشتم به رابطه، با اینکه خطای کل کاهش یافته است (منحنی سیاه) خطای میانگین روش اعتبارسنجی (منحنی سرخ) افزایش یافته است که این نشان دهنده پدیده تکرار بیش از حد است.

رابطه خطی وارد شده است. جدول ۲ نشانگرهایی که کمترین خطا را در رابطه خطی از مقادیر واقعی تولید می کند، نشان می دهد. برای انتخاب تعداد بهینه نشانگرها از نتایج اعتبارسنجی استفاده شده است. با افزایش تعداد نشانگرها در تبدیل چندنشانگری خطای آزمایش که از اطلاعات همه چاه ها برای برآورد تخلخل در محل هر ۴ چاه استفاده شده است، همواره کاهش پیدا کرده است. درحالی که خطای اعتبارسنجی که از اطلاعات ۳ چاه دیگر برای برآورد تخلخل در محل چاه دیگر استفاده شده است، بعد از هفت نشانگر روند افزایشی داشته است. این پدیده آزمایش بیش از حد خوانده می شود و باعث می شود که افزودن تعداد بیشتری نشانگر به رابطه خطی، جدول ۲. فهرست نشانگرهای لرزه ای حاصل از مکعب لرزه ای و مکعب مقاومت صوتی که کمترین خطا و بیشترین همبستگی را با لاگ تخلخل در رابطه خطی ایجاد کرده اند. با زیاد شدن تعداد نشانگرها خطای آزمایش کاهش و همبستگی آزمایش افزایش پیدا کرده است. استفاده از هفت نشانگر در تبدیل چندنشانگری بیشترین همبستگی را ایجاد کرده استریال چراکه خطای اعتبارسنجی فقط تا نشانگر هفتم پوش دامنه (Amplitude envelope) کاهش پیدا کرده است و همبستگی اعتبارسنجی تا این نشانگر افزایش پیدا کرده است.

تعداد نشانگر	نشانگر	خطای آزمایش	خطای اعتبارسنجی	همبستگی آزمایش	همبستگی اعتبارسنجی
۱	پوش دامنه مقاومت صوتی	۵/۳۸٪	۵/۵۹٪	۸۰/۸۱٪	۷۹/۱۵٪
۲	فاز وزن دار دامنه	۵/۱۹٪	۵/۵۶٪	۸۲/۳۱٪	۷۹/۴۹٪
۳	فیلتر ۲۰/۱۵ - ۳۰/۲۵ (مقاومت صوتی)	۴/۹۹٪	۵/۵۶٪	۸۳/۷۷٪	۷۹/۵۴٪
۴	فیلتر ۴۰/۳۵ - ۵۰/۴۵ (مقاومت صوتی)	۴/۷۸٪	۵/۳۷٪	۸۵/۲۵٪	۸۱/۰۱٪
۵	مشق مقاومت صوتی	۴/۶۲٪	۵/۳۰٪	۸۶/۳۰٪	۸۱/۶۰٪
۶	قطبش ظاهری	۴/۴۵٪	۵/۱۵٪	۸۷/۳۸٪	۸۲/۶۵٪
۷	پوش دامنه	۴/۳۱٪	۵/۰۷٪	۸۸/۱۸٪	۸۳/۲۵٪
۸	فیلتر ۵۰/۴۵ - ۶۰/۵۵ (مقاومت صوتی)	۴/۲۰٪	۵/۲۴٪	۸۸/۸۲٪	۸۲/۲۲٪
۹	کسینوس فاز لحظه ای مقاومت صوتی	۴/۱۳٪	۵/۳۳٪	۸۹/۲۱٪	۸۱/۵۹٪



شکل ۵. نتایج اعتبارسنجی با اِعمال هفت نشانگر در رابطه خطی برآورد تخلخل انطباق حدود ۰/۸۳ را نشان می‌دهد. در این روش از اطلاعات خود چاه برای برآورد نمودار موردنظر استفاده نشده است و فقط اطلاعات سه چاه دیگر در آن به کار رفته است.



شکل ۶. نتایج تخلخل حاصل از تبدیل خطی چندنشانگری در محل خط شکل ۱. تخلخل از بالا تا پایین افزایش می‌یابد. در سازند اول تخلخل با رنگ آبی و در سازند پایین که لایه مخزنی نیز در آن هست، با رنگ‌های سفید و سرخ نشان داده شده است. در محل چاه‌ها نمودار تخلخل قرار داده شده است.

۳-۵ شبکه‌های عصبی

(تخلخل) مورد استفاده قرار گرفته است.

شبکه‌های عصبی احتمالی از یک مجموعه که شامل یکی از پارامترهای اندازه‌گیری شده و یا بیشتر است و متغیر مستقل خوانده می‌شوند، برای پیش‌بینی یک متغیر وابسته تنها استفاده می‌کنند. در این روش فرض می‌شود

در این مقاله دو نوع از شبکه‌های عصبی (شبکه عصبی احتمالی و شبکه عصبی چندلایه با ساختار انتشار رو به جلو) برای تولید یک رابطه غیرخطی بین هفت نشانگر لرزه‌ای که در بخش قبل پیدا شدند با لاگ هدف

یک لایه خروجی است. هر لایه گره‌ها و اتصالاتی میان گره‌های لایه‌های اطراف دارد که با وزن‌ها تنظیم می‌شود. تعداد لایه‌ها و گره‌ها و وزن‌های ارتباطی گره‌ها، شبکه عصبی را تعریف می‌کند (همپسون، ۲۰۰۴). در این مقاله تعداد گره در لایه پنهان برابر ۱۵ قرار داده شد. نتایج اعمال این دو شبکه عصبی بر ورودی‌ها (۷ نشانگر و لاگ هدف) برای برآورد تخلخل در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. شکل ۷ نتایج اعتبارسنجی شبکه عصبی احتمالی را نشان می‌دهد. در این روش میزان همبستگی تبدیل چندنشانه‌گری حدود ۰/۸۰ است، درحالی‌که این مقدار با استفاده از اطلاعات همه چاه‌ها برابر ۰/۹۳ است. شکل ۸ نتایج اعتبارسنجی شبکه عصبی چندلایه با ساختار انتشار رو به جلو را در محل چاه‌ها نشان می‌دهد. این روش میزان همبستگی تبدیل چندنشانه‌گری را به حدود ۰/۶۳ کاهش می‌دهد، درحالی‌که این مقدار با استفاده از اطلاعات همه چاه‌ها برابر ۰/۹۴ است. جدول ۳ خلاصه نتایج برآورد تخلخل با استفاده از تبدیل خطی و تبدیل غیرخطی را نشان می‌دهد. در ستون همبستگی آزمایش مشاهده می‌شود که تبدیل چندنشانه‌گری بهبود قابل توجهی (حدود ۱۲ درصد) نسبت به تبدیل تک‌نشانه‌گری ایجاد می‌کند.

تبدیل‌های غیرخطی باز هم میزان این همبستگی را افزایش می‌دهند، به طوری که تبدیل چندنشانه‌گری غیرخطی (شبکه عصبی چندلایه رو به جلو) بالاترین میزان همبستگی را دارد. این همبستگی در حالتی محاسبه شده است که داده‌های هر چاه در برآورد تخلخل در محل همان چاه به کار گرفته شده است. اما از آنجاکه برای برآورد تخلخل در کل مکعب لرزه‌ای داده‌های چاه وجود ندارد، این میزان همبستگی زیاد، نشان‌دهنده همبستگی واقعی تبدیل نیست. از این رو همان‌طور که در پیش‌تر نیز گفته شد، اعتبارسنجی واقعی با حذف داده‌های چاه در برآورد تخلخل همان چاه، میزان همبستگی عملی تبدیل

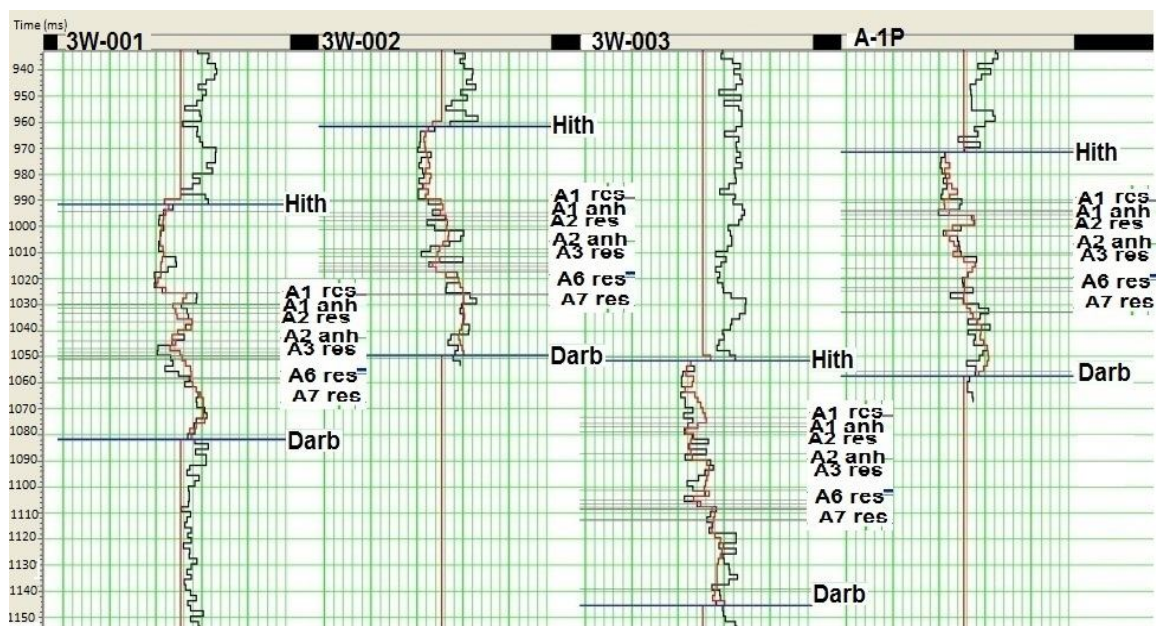
که هر خروجی جدید می‌تواند در حکم یک ترکیب خطی داده‌های آزمایش تلقی شود. هنگامی که یک شبکه احتمالی در حال اعمال است، در حال یافتن یک مجموعه از عامل هموارسازی (سیگما) است که خطای اعتبار را کمینه می‌کند (همپسون، ۲۰۰۴). عامل هموارسازی مقدار مخرج کسری است که فاصله بین داده ورودی و آزمایش را محاسبه می‌کند و برای برآورد مقدار متغیر وابسته (لاگ تخلخل) از این نسبت استفاده می‌کند. روابط ریاضی این شبکه عصبی در ادامه آمده است. در این نوع شبکه عصبی متغیر مستقل را به صورت بردار $x = [x_1, x_2, \dots, x_p]$ و متغیر وابسته به صورت عددی y تعریف می‌کنند. هدف برآورد کردن متغیر وابسته y با دانستن متغیرهای مستقل است. رابطه زیر در این شبکه عصبی برای برآورد مقدار متغیر مستقل داده شده است (تدورو، ۲۰۰۲):

$$y'(x) = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \exp(-D(x, x_i))}{\sum_{i=1}^n \exp(-D(x, x_i))}, \quad (3)$$

که n تعداد نمونه‌های موجود است و $D(x, x_i)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D(x, x_i) = \sum_{j=1}^p \left(\frac{x_j - x_{ij}}{\sigma_j} \right)^2. \quad (4)$$

فاصله عددی بین نقطه‌ای که برآورد می‌شود x ، و نقاط آزمایش x_i است و σ عامل هموارسازی است که این فاصله را مدرج می‌کند. تعیین یک مجموعه از مقادیر برای این عامل و کمینه‌سازی خطای برآورد، روش آزمایش این شبکه عصبی است. برای داده‌های موجود، تعداد سیگماهای مورد استفاده برابر ۲۵ عدد قرار داده شد که در محدوده ۰/۱ تا ۳ تغییر می‌کند. نوع دیگر، شبکه عصبی چندلایه با ساختار انتشار رو به جلو است که یک شبکه عصبی سنتی با یک لایه ورودی، یک لایه پنهان و



شکل ۷. نتایج اعتبارسنجی شبکه عصبی احتمالی با حذف اطلاعات یک چاه و استفاده از اطلاعات چاه‌های دیگر برای تخمین نمودار تخلخل در محل چاه مذکور. این روش میزان همبستگی تبدیل چندنشانی را حدود ۰/۸۰ نشان می‌دهد، درحالی‌که این مقدار با استفاده از اطلاعات همه چاه‌ها برابر ۰/۹۳ است. اختلاف‌های زیاد بین نمودار تخلخل حاصل از پیش‌بینی (خطوط سرخ) و نمودار واقعی تخلخل (خطوط سیاه) دیده می‌شود.

روش تبدیل چندنشانی خطی (حدود ۸۳ درصد) است. بعد از آن، تبدیل چندنشانی با استفاده از شبکه عصبی احتمالی بیشترین همبستگی اعتبارسنجی را فراهم می‌آورد (حدود ۸۰ درصد). نزدیکی این دو مقدار برای این دو روش باعث می‌شود تا نتایج مشابهی نیز از آنها پدید آید.

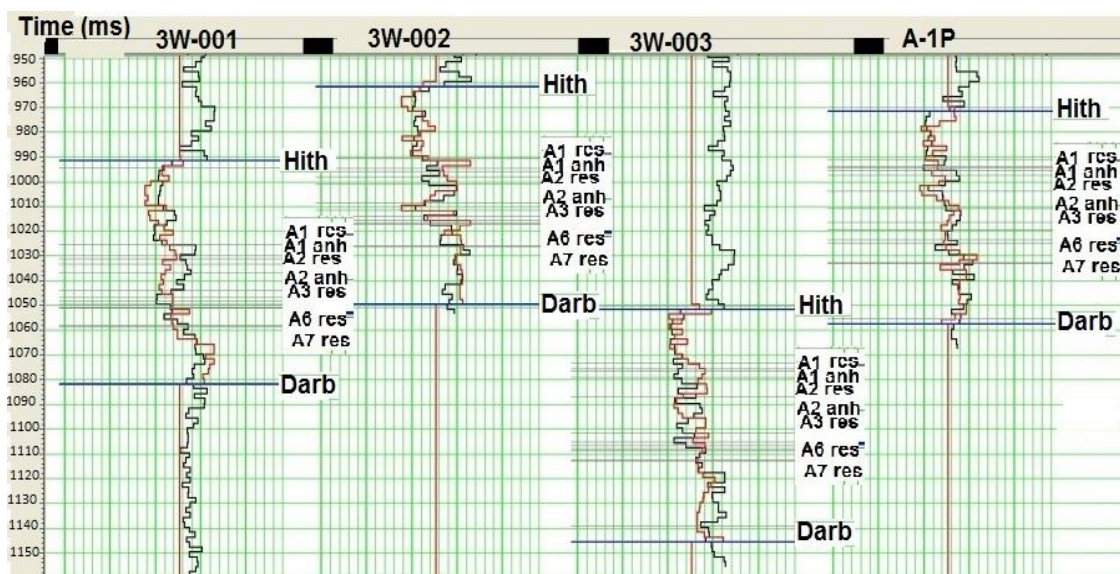
جدول ۳. خلاصه نتایج ضریب همبستگی کل و اعتبارسنجی برای تبدیل تک‌نشانی، چندنشانی خطی و چندنشانی غیرخطی (شبکه عصبی احتمالی و شبکه عصبی چندلایه رو به جلو) با نتایج واقعی در محل چاه‌ها.

خطای اعتبارسنجی	همبستگی اعتبارسنجی	همبستگی آزمایش	روش برآورد تخلخل
۰/۰۵۷	-۰/۷۸	-۰/۷۶	تک‌نشانی
۰/۰۵۱	۰/۸۳	۰/۸۸	چندنشانی خطی
۰/۰۵۵	۰/۸۰	۰/۹۳	چندنشانی غیرخطی شبکه عصبی احتمالی
۰/۰۸۱	۰/۶۳	۰/۹۴	چندنشانی غیرخطی شبکه چندلایه رو به جلو

۳-۶ محاسبه فضای متخلخل مخزن

در این قسمت تاثیر نحوه برآورد تخلخل با استفاده از روش‌های گوناگون تبدیل تک‌نشانی، تبدیل چندنشانی خطی، تبدیل چندنشانی غیرخطی (شبکه عصبی) بر میزان حجم فضای متخلخل مخزن بررسی می‌شود. برای این کار باید یک سطح تماس آب و نفت در مخزن تعریف شود. این سطح در بالای لایه مخزنی هفتم قرار دارد. در نرم‌افزار Paradigm یک مدل سه-بعدی که مخزن را پوشش می‌دهد ساخته شد و شبکه‌بندی‌ها در سه جهت صورت گرفت. مکعب‌های

موردنظر را نشان می‌دهد. مقادیر این نوع از همبستگی در ستون همبستگی اعتبارسنجی آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، بیشترین همبستگی اعتبارسنجی متعلق به



شکل ۸ نتایج اعتبارسنجی شبکه عصبی چندلایه با ساختار رو به جلو با حذف اطلاعات یک چاه و استفاده از اطلاعات چاه‌های دیگر برای برآورد نمودار تخلخل در محل چاه پیش‌گفته. این روش میزان همبستگی تبدیل چندنشانه‌گری این شبکه را به حدود ۰/۶۳ کاهش می‌دهد، درحالی‌که این مقدار با استفاده از اطلاعات همه چاه‌ها برابر ۰/۹۴ است. اختلاف‌های زیادی بین نمودار تخلخل حاصل از پیش‌بینی (خطوط سرخ) و نمودار واقعی تخلخل (خطوط سیاه) دیده می‌شود.

دو راه، هر قدر هم ناچیز، مشاهده کرد. همچنین دیده می‌شود که میزان فضای متخلخل مخزن برای لایه شماره ۱۴ در همه روش‌ها برابر صفر است. چراکه سطح تماس آب و نفت در بالای این لایه قرار گرفته است و لذا اطلاعات لایه‌های پایین‌تر از آن در محاسبه فضای متخلخل وارد نمی‌شود. تفاوت بین تبدیل چندنشانه‌گری (نمودار سرخ) و تبدیل تک‌نشانه‌گری (نمودار آبی) در شکل ۹ دیده می‌شود. از آنجا که تبدیل چندنشانه‌گری خطی انطباق اعتبارسنجی (۰/۸۳) بیشتری نسبت به روش تک‌نشانه‌گری (۰/۷۸) دارد، لذا نتایج فضای متخلخل آن نیز قابل اعتمادتر است. اگرچه پوش سنگ تخلخل کمتری نسبت به لایه مخزنی دارد اما به خاطر ضخامت زیاد این لایه نسبت به لایه‌های مخزنی، فضای متخلخل بسیار بیشتری را پیش‌بینی می‌کند. تبدیل تک‌نشانه‌گری برای پوش سنگ فضای متخلخل بیشتری از تبدیل چندنشانه‌گری ایجاد کرده است، درحالی‌که برای لایه مخزنی اصلی

تخلخل حاصل شده از تبدیل‌های متفاوت گفته شده در بخش‌های قبل، به نرم‌افزار داده شد و برای هر سلول در مدل سه‌بعدی یک مقدار تخلخل از مکعب تخلخل تعیین شد. در انتها با ضرب حجم هر سلول در مقدار تخلخل آن سلول و جمع کردن آنها، مقدار فضای متخلخل برای هر مکعب تخلخل به دست آمد (زحمتکش، ۱۳۹۰).

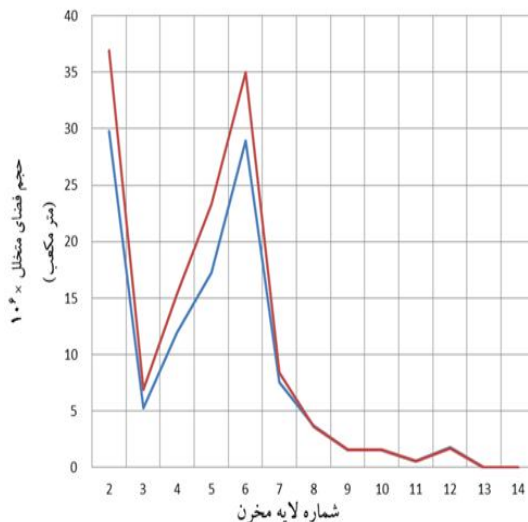
۴ بحث

جدول ۴ شماره لایه‌های متفاوت به همراه نوع آنها (مخزنی یا انیدریتی) و مقدار فضای متخلخل محاسبه شده با روش‌های تبدیل چندنشانه‌گری خطی و تبدیل تک‌نشانه‌گری را نشان می‌دهد. نمودار این مقادیر در شکل ۹ دیده می‌شود. در جدول ۴ دیده می‌شود که نتایج تبدیل چندنشانه‌گری خطی و غیرخطی کاملاً مشابه است چراکه نتایج تخلخل به دست آمده از این دو روش بسیار مشابه هستند. شاید اگر امکان ساخت مدل زمین‌شناسی با سلول‌های کوچک‌تری وجود داشته باشد بتوان تفاوت این

جدول ۴. اطلاعات لایه‌های ساخته شده در مدل مخزن برای نرم‌افزار Paradigm شامل نام و نوع آنها و همچنین مقدار فضای متخلخل هر یک بر حسب مترمکعب با استفاده از سه تخمین تخلخل (تبدیل تک نشانگری، تبدیل چند نشانگری خطی، روش تبدیل چند نشانگری غیرخطی شبکه عصبی احتمالی).

لایه	جنس لایه	تبدیل تک نشانگری	تبدیل چند نشانگری خطی	تبدیل چند نشانگری غیرخطی شبکه عصبی احتمالی
۱	پوش سنگ گ	۲۷۸۰۵۵۴۵	۲۰۳۸۱۲۲۹	۲۰۳۸۱۲۲۹
۲	مخزن ۱	۲۹۷۷۶۱۴۷	۳۶۸۹۸۸۸۵	۳۶۸۹۸۸۸۵
۳	اندریت ۱	۵۲۶۰۰۱۲	۶۹۲۷۸۷۴	۶۹۲۷۸۷۴
۴	مخزن ۲	۱۱۹۲۳۴۱۳	۱۵۳۵۲۶۴۶	۱۵۳۵۲۶۴۶
۵	اندریت ۲	۱۷۲۱۹۷۹۷	۲۳۲۷۲۵۹۰	۲۳۲۷۲۵۹۰
۶	مخزن ۳ (اصلی)	۲۸۹۶۳۵۸۶	۳۵۰۱۵۸۵۸	۳۵۰۱۵۸۵۸
۷	اندریت ۳	۷۵۶۵۲۷۶	۸۴۲۷۰۰۰	۸۴۲۷۰۰۰
۸	مخزن ۴	۳۶۷۱۰۶۶	۳۶۳۳۰۳۷	۳۶۳۳۰۳۷
۹	اندریت ۴	۱۵۲۹۵۰۷	۱۵۴۸۶۹۹	۱۵۴۸۶۹۹
۱۰	مخزن ۵	۱۵۲۴۶۵۰	۱۵۵۷۵۳۸	۱۵۵۷۵۳۸
۱۱	اندریت ۵	۵۳۶۸۵۱	۵۵۶۰۲۴	۵۵۶۰۲۴
۱۲	مخزن ۶	۱۷۶۱۹۳۶	۱۷۰۴۱۷۷	۱۷۰۴۱۷۷
۱۳	اندریت ۶	۱۲۳	۱۱۴	۱۱۴
۱۴	مخزن ۷ (حاوی سطح تماس آب و نفت)	۰	۰	۰

لایه ۶) مقدار فضای متخلخل کمتری از تبدیل چند نشانگری پیش‌بینی کرده است.



شکل ۹. حجم فضای متخلخل در لایه های گوناگون مخزن و پوش سنگ (اندریت). نمودار سرخ متعلق به نتایج تبدیل چند نشانگری خطی و نمودار آبی متعلق به نتایج تبدیل تک نشانگری است.

مقدار اختلاف دو روش در این لایه حدود 6×10^6 مترمکعب است که نشان‌دهنده تاثیر زیاد مقدار همبستگی بر آورد تخلخل در فضای متخلخل پیش‌بینی شده در مخزن است. روش تبدیل چند نشانگری با همبستگی اعتبارسنجی بیشتر (حدود ۵ درصد) نسبت به تبدیل تک نشانگری فضای متخلخل نزدیک تری به مقادیر واقعی ایجاد کرده است. این روش فضای متخلخل پوش سنگ را کمتر و فضای متخلخل لایه مخزن اصلی را بیشتر از تبدیل تک نشانگری پیش‌بینی کرده است. این امر نشان‌دهنده تاثیر مقدار همبستگی اعتبار در بر آورد فضای متخلخل است.

۵ نتیجه‌گیری

وارون‌سازی لرزه‌ای اولین و مهم‌ترین قدم در بررسی هر مخزن است که علاوه بر فراهم آوردن اطلاعات مهم درباره ساختار زمین‌شناسی منطقه، داده‌های اولیه‌ای برای

چندنشاندگری خطی با بیشترین میزان همبستگی در برآورد لاگ تخلخل، صحیح‌ترین فضای متخلخل را پیش‌بینی کند. همبستگی اعتبارسنجی در برآورد تخلخل، تاثیر بسزایی در میزان فضای متخلخل مخزن دارد. لذا تلاش برای یافتن رابطه‌ای برای برآورد تخلخل با همبستگی اعتبارسنجی بیشتر، برای داشتن برآورد دقیق‌تر از فضای متخلخل مخزن ضروری به نظر می‌رسد.

منابع

زحمتکش، س.، ۱۳۹۰، برآورد و ارزیابی نقشه‌های تخلخل در یکی از میادین هیدروکربوری ایران بوسیله داده‌های لرزه‌نگاری و چاه‌نگاری: پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

- Cooke, D. A., and Schneider, W. A., 1983, Generalized linear inversion of reflection seismic data: *Geophysics*, **48**, 665–676.
- Draper, N. R., and Smith, H., 1966, *Applied regression analysis*: John Wiley & Sons, Inc.
- Hampson, D., 2004, *STARTA Guide*, http://www.cggveritas.com/data/1/rec_docs/362_strata_guide.pdf, accessed January 2007.
- Todorov, T., 2002, *Neural Network: theory and practice*, <ftp://ftp.hampson-russell.com/pub/manuals/neuralNetworks.pdf>, accessed February 2002.
- Hampson, D., Schuelke, J., and Quirein, J., 2001, Use of multiattribute transforms to predict log properties from seismic data: *Geophysics*, **66**, 220–236.
- Leiphart, D. J., and Hart, B. S., 2001, Comparison of linear regression and a probabilistic neural network to predict porosity from 3D seismic attributes in Lower Brushy Canyon channeled sandstones, Southeast New Mexico: *Geophysics*, **66**, 1349–1358.
- Russell, B., Hampson, D., Schuelke, J., and Quirein, J., 1997, Multiattribute seismic analysis: *The Leading Edge*, **16**, 1439–1443.
- Schultz, P. S., Ronen, S., Hattori, M., and Corbett, C., 1994a, Seismic guided estimation of log properties: *The Leading Edge*, **13**, 305–310.
- Schultz, P. S., Ronen, S., Hattori, M., and

بررسی‌های دیگر مخزن است. از میان روش‌های گوناگون، وارون‌سازی براساس مدل، نتایج قابل‌قبولی فراهم می‌آورد که همبستگی خوبی با مقادیر مقاومت صوتی در محل‌چاه‌ها دارد. در روش تک‌نشاندگری برای برآورد لاگی مانند تخلخل می‌توان به‌طور مستقیم از خود نتایج مقاومت صوتی و یا نشانگرهای گرفته شده از آن استفاده کرد. بدین صورت که بعد از یافتن ضریب تبدیل میان تخلخل و نشانگر مقاومت صوتی، از رابطه خطی موجود برای برآورد تخلخل در مناطقی که لاگی وجود ندارد استفاده شود. مقاومت صوتی در حکم نشاندگری که بیشترین همبستگی را با لاگ تخلخل در منطقه مورد بررسی دارد، در تبدیل تک‌نشاندگری مورد استفاده قرار گرفت. تبدیل چندنشاندگری تعداد بیشتری نشانگر را در رابطه خطی برای برآورد تخلخل به کار می‌برد. برای داده‌های موجود از هفت نشانگر استفاده می‌شود که به روش وایازش مرحله‌ای انتخاب می‌شوند و تعداد آنها نیز از نتایج اعتبارسنجی به‌دست آمده است (پوش دامنه (مقاومت صوتی)، فاز وزن‌دار دامنه، فیلتر ۲۰/۱۵ – ۳۰/۲۵ (مقاومت صوتی)، فیلتر ۴۰/۳۵ – ۵۰/۴۵ (مقاومت صوتی)، مشتق (مقاومت صوتی)، قطبش ظاهری و پوش دامنه). با استفاده از تبدیل چندنشاندگری همبستگی بیشتری برای برآورد لاگ تخلخل به‌دست می‌آید. شبکه‌های عصبی نیز برای اعمال رابطه غیرخطی بین هفت نشانگر لرزه‌ای و لاگ تخلخل مورد استفاده قرار گرفت که نتوانست بهبودی در میزان همبستگی برای برآورد تخلخل ایجاد کند. تبدیل چندنشاندگری غیرخطی برای دو شبکه عصبی متفاوت، نتایج همبستگی آزمایش خوبی به‌وجود آورد، اما نتایج همبستگی اعتبارسنجی کمتری نسبت به تبدیل خطی آشکار ساخت. در انتها نیز فضای متخلخل مخزن برای مکعب‌های تخلخل که با استفاده از تبدیل تک‌نشاندگری و چندنشاندگری خطی و غیرخطی به‌دست آمده‌اند، محاسبه و مقایسه شد. انتظار می‌رود تبدیل

Corbett, C., 1994b, Seismic guided estimation of log properties: The Leading Edge, **13**, 674–678.