

## شبیه‌سازی مقادیر تراوایی مخزن به کمک داده‌های تخلخل و مقاومت لرزه‌ای

کیوان نجف‌زاده<sup>۱\*</sup>، محمدعلی ریاحی<sup>۲</sup> و محسن سیدعلی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد مهندسی اکتشاف نفت، تهران، ایران

(دریافت: ۸۹/۷/۵، پذیرش نهایی: ۹۱/۴/۱۳)

### چکیده

تراوایی، پارامتری کلیدی در ارتباط با تعیین ویژگی مخزن است. در حقیقت راه‌حل‌های دقیقی برای مسائل مهندسی مخزن بدون دسترسی به اطلاعات دقیق تراوایی وجود ندارد. تاکنون صنعت نفت سعی بر آن داشته است که مقادیر تراوایی را از طریق اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و یا از راه چاه‌آزمایی به دست آورد. اگرچه موارد پیش‌گفته به‌منزله راه‌حل عرضه شده است ولی روش‌هایی کافی و مطمئن برای توصیف مخزن نیستند.

اغلب فرض شده است که به‌خاطر محدودیت در تفکیک‌پذیری داده‌های لرزه‌ای و طبیعت هیدرولیکی پارامتر تراوایی، برآورد مستقیم تراوایی مخزن از داده‌های لرزه‌ای نیز امکان‌پذیر نیست. در بسیاری از حالت‌ها برآورد تراوایی مخزن محدود به مقیاس مغزه و تقریب نگارهای چاه است.

در این مقاله از روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی در حکم ابزاری مطمئن برای برآورد مقادیر تراوایی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و مقادیر تخلخل استفاده شده است. ابتدا به‌کمک داده‌های لرزه‌ای و نمودارهای چاه‌های موجود در محدوده مخزن، یک مدل ساختمانی قابل‌اعتماد در منطقه مورد بررسی (یکی از میادین هیدروکربوری جنوب ایران) ساخته شده است. سپس با استفاده از داده‌های مقاومت لرزه‌ای و به‌کمک روش کوکریجینگ گزینشی برآورد تخلخل مخزن صورت گرفته و با استفاده از روش شبیه‌سازی و مقادیر برآوردی تخلخل، تراوایی در سطوح متفاوت مخزن محاسبه شده است. در نهایت اعتبارسنجی نتایج با استفاده از اعتبارسنجی تقاطعی صورت گرفته است. با توجه به ساختار پیچیده زمین‌شناسی مخزن مورد بررسی و وجود گسل‌های متعدد در منطقه، اعتبارسنجی تقاطعی نشان می‌دهد که برآورد تراوایی حاصل از روش شبیه‌سازی، اعتبار قابل‌قبولی دارد.

واژه‌های کلیدی: روش‌های قطعی و احتمالاتی، کوکریجینگ گزینشی، شبیه‌سازی، برآورد تخلخل، برآورد تراوایی

### Simulation of reservoir permeability using porosity and acoustic impedance data

Najafzadeh, K.<sup>1</sup>, Riahi, M. A.<sup>2</sup> and Seyedali, M.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>3</sup>M.Sc. in Petroleum Engineering (Exploration), Tehran, Iran

(Received: 27 Sep 2010, Accepted: 03 Jul 2012)

### Abstract

Permeability is a key parameter in reservoir characterization. In fact, without accurate information about reservoir permeability, there is no good solution for reservoir engineering problems. Up to now, permeability values of a reservoir have been calculated through laboratory measurements or well testing methods. These methods are useful but they cannot describe a reservoir reliably and precisely. Also, well logs and core analysis

have been used for permeability estimation, but correlation methods also show that, estimation through these methods is not reliable.

Direct prediction of reservoir permeability from seismic data is often supposed impossible due to resolution limitations of seismic data and hydraulic nature of permeability. In many cases reservoir permeability estimation is restricted to core scale and wellbore proximity. Regarding the existing limitations, recent studies have shown that there are some experimental relationships between some petrophysical parameters and permeability.

In recent years, geostatistics and stochastic modeling have made a tremendous impact on scientific investigations. Geostatistics has been an increasingly important factor in the development of petroleum resources. So, a stochastic modeling of geostatistics is a reliable tool for estimating reservoir parameters including porosity and permeability. In geostatistics we suppose that variables have an effect on each other. So, the first concept of geostatistics is related to the variogram of values we want to estimate. It tells about the spatial correlation that exists between values. Distance that variables have an effect on each other and is called range of a variogram and is an important concept because after that distance, variables have no effect on each other. Geostatistical methods are meaningful in the range of variables and outside the range geostatistics is not applicable.

The investigated field is located in the Persian Gulf between Iran and Qatar, 80 km south west of Lavan Island and 40 km south east of south Pars gas field. The study area consists of two reservoir structure including Sarvak and Surmeh. In order to estimate permeability values of the reservoir, first, all data required for this approach should be collected. Needed data are: porosity logs and 3D seismic data of the study area. 3D seismic acquisition of this field has been done by TOTAL FINA ELF in 2000. Total area of investigation is about 96 km<sup>2</sup>. Interpretation of data has been done by TOTAL in 2003 and interpretations of this article have been validated by that. There are twelve wells in the study area of which seven of them have porosity logs.

First, a reliable structural model of study area (which is one of hydrocarbon fields in south of Iran) has been built from seismic data and wells information. Seismic data have been used in interpretation of horizons and characterization of faults in the reservoir. After determination of horizon surfaces in the reservoir, some horizons that have not been seen in seismic data have been determined using wells information by use of well tops. Using all horizons and fault plates we construct a structural model. Distances between horizons are divided into zones. In the model, with attention to importance of each zone, some layers have been defined. It's obvious that zones imbedding in reservoir parts, have more layers in order to increasing the validation of estimation.

After collecting required data and making the model, estimation of reservoir porosity values has been done with the aid of seismic impedance values through Geostatistics. Collocated co-Kriging method has been selected for this geostatistical estimation. In this method there is a secondary variable in addition to main data that improve accuracy of estimation. For starting geostatistical estimation, firstly analysis of data has been carried out. The analysis is based on calculating variograms. Then with the use of variogram values and considering acoustic impedance values as the second parameter in collocated co-Kriging method, porosity of the reservoir has been calculated. There are some anhydrite layers in the reservoir that we put zero value of porosity for them in order to have more control on our results and having more reliable porosity estimation for the reservoir. So the value of reservoir porosities becomes known in all parts of the model. In all parts of the reservoir, porosity values change between 0 to 30 percent.

In the next step, permeability values have been estimated using porosity values. There is a good correlation between porosity and permeability values. First, variography

between permeability values have been done. Then using Sequential Gaussian Simulation (SGS) method as a reliable tool for the estimation, reservoir permeability values from porosity, have been calculated. Estimation has been done in all zones of the reservoir separately.

Again, as we have some anhydrite layers in the reservoir structure, for a better control on estimating permeability values of the reservoir, zero value of permeability has been devoted to anhydrite layers. So we have a better estimation of permeability in total volume of the reservoir. Values of permeability of the reservoir change between 0 to 100md.

Finally, validity of permeability estimation of the reservoir should be investigated. This has been done by cross validation method. Information of one well has been eliminated from the model, and using other wells, permeability estimation has been done. Then a comparison between permeability of the model at well location and well permeability was done and the correlation coefficient has been calculated. This process has been done for well 3W-01 and well 3W-03. Correlation coefficient for well 3W-01 is 0.86 and this coefficient for well 3W-03 is 0.81. Correlation coefficients show that results of permeability estimation are acceptable and Sequential Gaussian Simulation combined with collocated co-Kriging is a capable method in reservoir characterization. Using Sequential Gaussian Simulation alone is not reliable enough in porosity and permeability estimation especially when there is a complicated geological structure, because it uses mathematical calculations only, and its results may have no good compatibility with the truth of the geology. This problem has been solved by combination of acoustic impedance data with permeability values. Importing acoustic impedance values conduct the SGS algorithm and make it more compatible with the reality of the earth model.

**Key words:** Deterministic and Stochastic methods of Geostatistics, Collocated co Kriging, Simulation, Porosity estimation, Permeability estimation

## ۱ مقدمه

مخزن به دست آید. مقادیر تخلخل در محل چاه‌ها به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود. تراوایی معیاری است از توانایی محیط متخلخل در عبور دادن شاره‌ها و یکی از مهم‌ترین خصوصیات سنگ‌های مخزنی به‌شمار می‌رود که در توصیف مخازن نفتی نقش اساسی دارد. برآورد تراوایی در تعیین میزان تولید یک مخزن امری ضروری است. تراوایی را می‌توان از راه آزمایش‌های مغزه یا با استفاده از اطلاعات دینامیکی (که با کمک ابزار آزمون‌کننده سازند و آنالیز فشار گذرا حاصل می‌شوند) تعیین کرد. تراوایی مغزه‌ها در آزمایشگاه معمولاً با استفاده از گاز خشک (هوا، نیتروژن یا هلیوم) در حکم شاره عبوری و به منظور کاهش واکنش سنگ با شاره، صورت می‌گیرد. اگر به دلایلی (از جمله هزینه‌های

پارامترهای پتروفیزیکی مخزن نقش مهمی در شناخت ویژگی‌های مخزن دارند. از آنجاکه هزینه‌های حفاری چاه بسیار زیاد است و تعداد چاه‌ها در محدوده مخزن محدودند، برآورد این پارامترها در مناطق دور از چاه برای ما اهمیت دارد. هرچقدر برآورد ما از مقادیر پتروفیزیکی مقادیر صحیح‌تری باشند، تصمیمات مناسب‌تری در مورد توسعه و بهره‌برداری از مخازن می‌توان گرفت. از آنجاکه سنگ‌های مخازن نفتی بایستی تخلخل و تراوایی داشته باشند، از میان پارامترهای پتروفیزیکی بیشتر به بررسی خواص تخلخل و تراوایی پرداخته می‌شود. در صنعت نفت معمولاً برآورد مقادیر تراوایی به محل چاه‌ها و مناطق اطراف آنها محدود می‌شود و همواره سعی بر این است که برآورد درستی از مقادیر تراوایی در کل محدوده

زیاد و محدودیت‌های زمانی) این اندازه‌گیری‌ها فراهم نباشند، تراوایی به صورت غیرمستقیم با استفاده از خصوصیت سنگ که از نگارهای چاه به دست می‌آید، برآورد می‌شود. شرکت‌های نفتی از هردوی مقادیر دقیق و برآورد شده تراوایی استفاده می‌کنند. در عمل تنها منبع اطلاعات با قابلیت تفکیک زیاد به منظور کمک به برآورد تراوایی، از نگاربرداری حاصل می‌شود. اخیراً به دلیل فراوان بودن اطلاعات مخزن که با استفاده از نگارهای چاه برای هر فوت از سازند به دست می‌آید، ارتباط دادن اطلاعات حاصل شده از نگارهای چاه به تراوایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اما به دلیل پیچیدگی مسئله، روشی که از طرف همگان پذیرفته شده باشد در برآورد تراوایی از نگارهای چاه ایجاد نشده است. به منظور برآورد پارامترهای پتروفیزیکی مخزن در کل محدوده مخزن از روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود. در این میان می‌توان به روش‌های قطعی و احتمالاتی زمین‌آمار شامل روش‌های کریجینگ (Kriging)، کوکریجینگ (co-Kriging) و روش‌های شبیه‌سازی (Simulation) اشاره کرد.

۲ منطقه مورد بررسی و داده‌های مورد نیاز  
میدان نفتی مورد بررسی در خلیج فارس در نزدیکی مرز آبی ایران و قطر در فاصله ۸۰ کیلومتری جنوب غرب جزیره لاوان و ۴۰ کیلومتری جنوب شرق میدان گازی پارس جنوبی قرار دارد. محدوده میدان مورد بررسی عبارت از فواصل جغرافیایی "26° 12' 30" تا "26° 23' 50" عرض شمالی و "52° 27' 50" تا "52° 36' 20" طول شرقی است. میدان از دو مخزن سروک و سورمه تشکیل شده است. به منظور برآورد مقادیر تراوایی، ابتدا بایستی همه داده‌های مورد نیاز جمع‌آوری شود. این داده‌ها شامل داده‌های مربوط به نگار تخلخل و همچنین داده‌های لرزه‌نگاری سه‌بُعدی در محدوده مخزن مورد نظر، است. لرزه‌نگاری سه‌بُعدی میدان مورد بررسی را شرکت

### ۳ برآورد تخلخل با استفاده از داده‌های مقاومت

#### لرزه‌ای

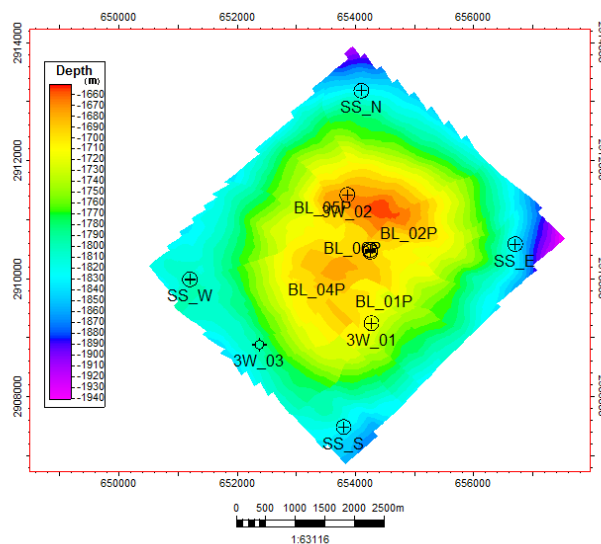
برآورد زمین‌آماري فرایندی است که طی آن می‌توان مقدار یک کمیت در نقاطی با مختصات معلوم را با استفاده از مقدار همان کمیت را در نقاط دیگری با مختصات معلوم به دست آورد. به منظور برآورد تخلخل از روش کوکریجینگ گزینشی استفاده شده است. در این روش علاوه بر داده‌های اصلی داده‌های دیگری نیز در حکم متغیرهای دوم یا بیشتر وجود دارند که باعث می‌شوند دقت برآورد بهبود یابد (حسینی پاک، ۲۰۰۷). در پژوهش حاضر از داده‌های مقاومت لرزه‌ای در حکم متغیر دوم در برآورد تخلخل بهره گرفته شده است. رابطه کوکریجینگ به صورت رابطه (۱) (معادله کوکریجینگ) است، مقادیر

مقاومت لرزه‌ای درحکم پارامتر دوم در روش کوکریجینگ گزینشی، برآورد مقادیر تخلخل در کل محدوده مخزن صورت می‌گیرد. در شکل ۴ داده‌های تخلخل در محل چاه‌ها که وارد مدل شده‌اند، نشان داده شده است و شکل ۵ مقادیر برآورد شده تخلخل در کل محدوده مخزن را نشان می‌دهد. از آنجا که در مخزن تعدادی لایه انیدریتی داریم، مقدار تخلخل آنها را صفر قرار می‌دهیم تا برآورد تخلخل در زون مخزن با دقت بیشتری صورت گیرد. مقادیر تخلخل در محدوده صفر تا ۳۰٪ قرار می‌گیرند. حال قصد داریم مقادیر تراوایی مخزن را به کمک مقادیر برآورد شده تخلخل به دست آوریم.

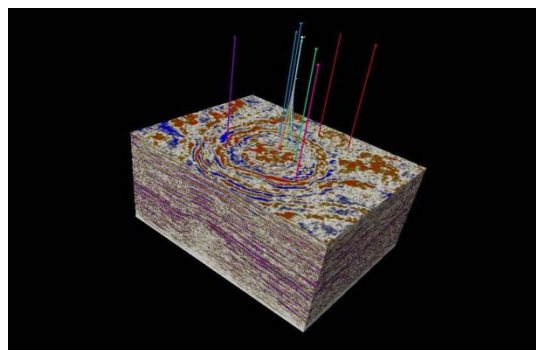
$\lambda$  و  $\mu$  وزن‌های مربوط به متغیرهای اول و دوم هستند که براساس واریوگرام (variogram) تعیین می‌شوند و مقادیر  $Z$  مقادیر کمیت مورد برآورد هستند. در مرحله اول بایستی تحلیل داده‌ها صورت گیرد. بدین منظور با استفاده از مقادیر تخلخل در محل چاه‌ها در هر زون از مخزن به طور جداگانه واریوگرافی صورت می‌گیرد؛ بدین معنی که ارتباط فضایی بین داده‌های تخلخل تعیین می‌شود (هان، ۱۹۸۸). واریوگرام و منطقه جست‌وجوی متناظر با آن برای زون عرب ۴ در شکل ۳ آمده است.

$$Z_{COK}(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_1(X_i) + \sum_{j=1}^m \mu_j Z_2(X_j) \quad (1)$$

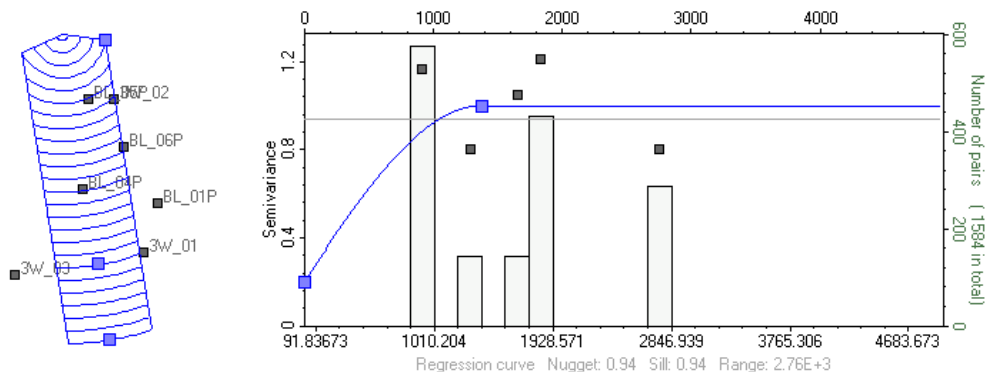
حال با استفاده از مقادیر واریوگرام و در نظر گرفتن مقادیر



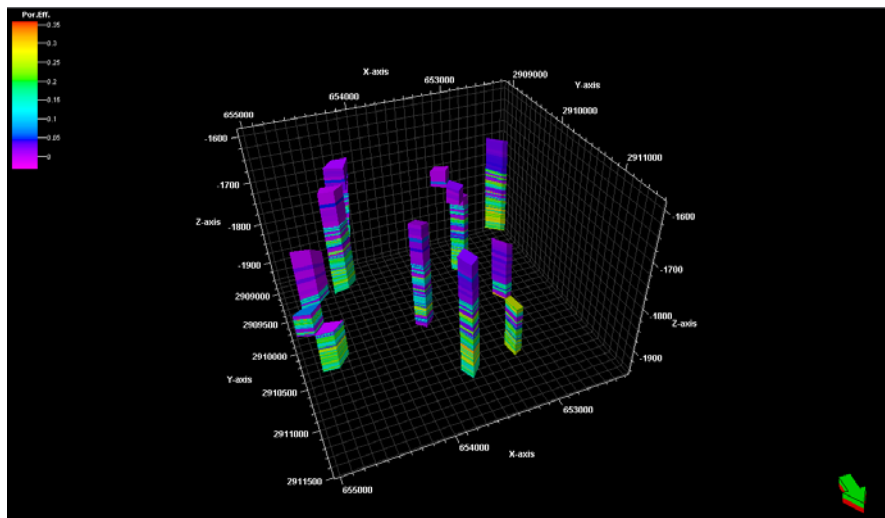
شکل ۱. محل چاه‌ها در نقشه محدوده مخزن مورد بررسی به همراه نقشه تراز افق عرب.



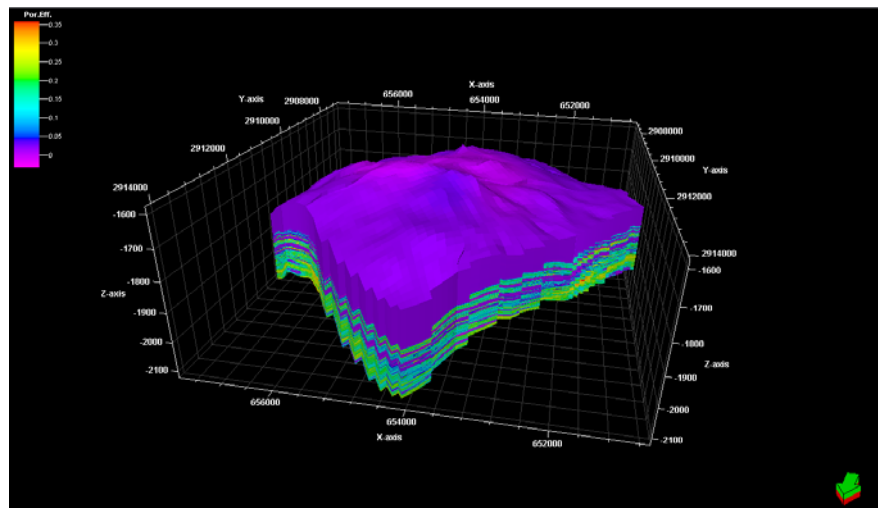
شکل ۲. قسمتی از مکعب لرزه‌ای مورد استفاده برای برآورد و موقعیت چاه‌ها به صورت سه‌بعدی.



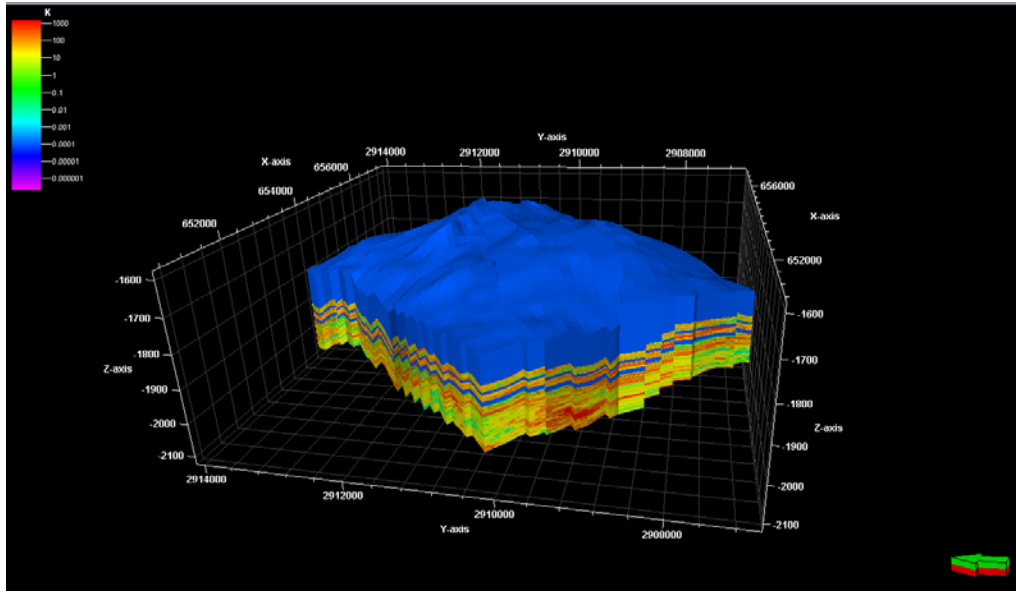
شکل ۳. واریوگرام و منطقه جست‌وجو برای مقادیر تراوایی در زون عرب ۴ از مخزن مورد بررسی.



شکل ۴. داده‌های تخلخل مربوط به نگارهای چاه‌ها، به محل خود در مدل ساختاری مخزن نسبت داده شده‌اند تا در برآورد زمین‌آماري از آنها استفاده شود.



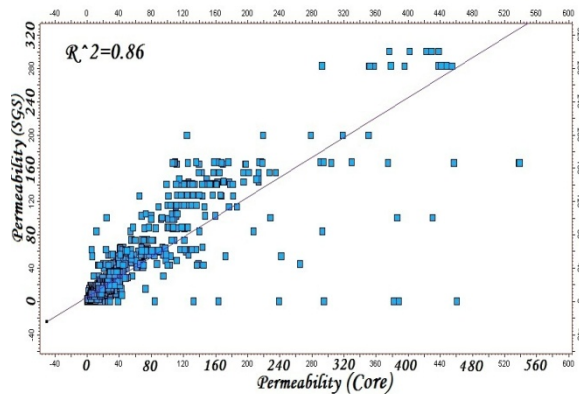
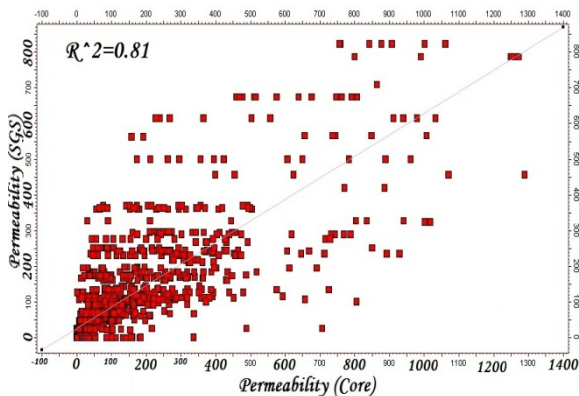
شکل ۵. مقادیر برآورد شده تخلخل در کل محدوده مخزن به کمک مقادیر تخلخل وارد شده در مدل ساختاری (شکل ۴) و مقادیر مقاومت لرزه‌ای با استفاده از روش کوکریجینگ گزینشی.



شکل ۶. مقادیر برآورد زده شده تراوایی برای کل مخزن با روش شبیه‌سازی و به کمک کوکریجینگ گزینشی با استفاده از مقادیر تخلخل.

(نلسون، ۱۹۹۴). نتایج مربوط به شبیه‌سازی مقادیر تراوایی در شکل ۶ نشان داده شده است. مجدداً با توجه به وجود لایه‌های انیدریتی در محدوده مخزن، مقدار تراوایی مربوط به آنها صفر در نظر گرفته شده است تا برآورد تراوایی در مخزن با صحت بیشتری انجام گیرد. نتایج نشان می‌دهند که مقدار تراوایی در ناحیه مخزنی غالباً در محدوده صفر تا 100 md قرار می‌گیرد.

۴ برآورد تراوایی با استفاده از مقادیر تخلخل با توجه به اینکه بین مقادیر تخلخل و تراوایی همبستگی مناسبی وجود دارد، می‌توانیم از داده‌های تخلخل در حکم پارامتر دوم برای برآورد مقادیر تراوایی مخزن استفاده کنیم. ابتدا بین مقادیر تراوایی چاه‌های مخزن واریوگرافی صورت می‌گیرد تا نحوه اثر مقادیر تراوایی بر هم تعیین شود. سپس به کمک روش شبیه‌سازی گاوسی مقادیر تراوایی مخزن برآورد زده می‌شوند



شکل ۷. نتایج اعتبارسنجی مقادیر برآورد شده تراوایی با استفاده از شبیه‌سازی به کمک کوکریجینگ گزینشی، ضریب همبستگی برای چاه (3W-01)  $R^2 = 0.86$  (سمت راست) و ضریب همبستگی چاه (3W-03)  $R^2 = 0.81$  (سمت چپ).

## ۵ اعتبارسنجی برآورد مقادیر تراوایی

پس از برآورد مقادیر تراوایی، بایستی اعتبارسنجی نتایج انجام گیرد. بدین منظور از اعتبارسنجی تقاطعی استفاده میشود. در اعتبار سنجی تقاطعی، اطلاعات یکی از چاهها از مدل حذف می‌شود و به کمک بقیه چاهها برآورد تراوایی در مخزن صورت می‌گیرد. حال مقدار تراوایی برآوردی به کمک روش شبیه‌سازی در محل چاه حذف شده با مقدار واقعی تراوایی در محل چاه مقایسه شده و ضریب همبستگی بین آنها تعیین می‌شود. این کار برای چاه‌های (3W-01) و (3W-03) انجام گرفته است. مقدار ضریب همبستگی پس از اعتبار سنجی تقاطعی در محل چاه (3W-01)، ۰/۸۶ و این مقدار در محل چاه (3W-03)، ۰/۸۱ می‌باشد. ضرایب همبستگی نشان می‌دهند که مقادیر برآوردی تراوایی به کمک روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی تا حد قابل قبولی از اعتبار برخوردار هستند.

## ۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله برآورد مقادیر تراوایی مخزن به کمک داده‌های لرزه‌ای و داده‌های تخلخل صورت گرفته است. از آنجا که روش‌هایی مثل شبیه‌سازی گاوسی متوالی صرفاً از محاسبات ریاضی به منظور برآورد کردن استفاده می‌کنند، نتایج حاصل از آنها ممکن است انطباق مناسبی با واقعیت زمین نداشته باشد (چیلز و دلفینر، ۱۹۹۹). بنابراین با وارد کردن داده‌های دیگری مثل داده‌های لرزه‌ای، به برآورد منطبق با واقعیت کمک می‌شود. مخصوصاً در مواردی که ساختمان زمین‌شناسی پیچیده‌ای داریم و تعداد زیادی گسل در منطقه وجود داشته باشد، این امر ضروری به نظر می‌رسد (دوبرول، ۲۰۰۳). در این مقاله ابتدا مقادیر تخلخل مربوط به نگارهای چاه به محل خود در مدل مخزن وارد می‌شود (شکل ۴)، سپس با توجه به همبستگی بین مقادیر تخلخل و مقاومت لرزه‌ای، به کمک روش

زمین‌آماری کوکریجینگ گزینشی تخلخل در کل محدوده مخزن محاسبه می‌شود (شکل ۵). این امر باعث می‌شود که برآورد صرفاً وابسته به محاسبات ریاضی نباشند و واقعیت‌های زمین‌شناسی هم وارد مراحل برآورد تراوایی شود. در مرحله بعد به کمک مقادیر تراوایی مغزه‌ها و مقادیر برآوردی تخلخل در مرحله قبل، با استفاده از شبیه‌سازی مقادیر تراوایی محاسبه می‌شود (شکل ۶). به منظور بررسی صحت روش مورد بررسی در این مقاله از اعتبارسنجی تقاطعی بهره گرفته شده است. نتایج اعتبارسنجی تقاطعی برای دو عدد از چاه‌های مخزن که دارای اطلاعات تراوایی مغزه بودند، نشان می‌دهند که روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی از کارایی مناسبی در برآورد مقادیر پتروفیزیکی، به‌ویژه در ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی برخوردار است (شکل ۷). ضریب همبستگی برای چاه (3W-01) برابر ۰/۸۶ و برای چاه (3W-03) برابر مقدار ۰/۸۱ است که مقادیر قابل قبولی هستند.

## منابع

- Chiles, J. P. and Delfiner, P., 1999, Geostatistics, modeling spatial uncertainty, Wiley Press, USA.
- Dubrule, O., 2003, Geostatistics for seismic data integration in earth models, Society of Exploration Geophysicists Press, USA.
- Geo-Science Report of Balal Field, 2007, ELF Petroleum IRAN, Tehran, Iran.
- Hasani Pak, A. A., 2007, Geostatistics, 2nd Ed, Univ. of Tehran Press, Tehran, Iran.
- Hohn, M. E., 1988, Geostatistics and petroleum geology, 2<sup>nd</sup> Ed, Kluwer Academic Publication, USA.
- Nelson, P. H., 1994, Permeability-porosity relationships in sedimentary rocks, the log analyst, US Geological Survey, Denver, CO, USA.
- Petrel Workflow tools, Structural Modeling, 2005, Schlumberger Information Solution, Houston, TX, USA.
- Petrel Seismic Visualization and Interpretation Course, 2007, Schlumberger Information Solution, Houston, TX, USA.