

Fig. 1 Structural model of the studied field.

Electrofacies Analysis

In this study, volume of Shale, Calcite and Dolomite along with porosity as a sample controller have been used as input data for electrofacies analysis. MRGC algorithm has been applied for clustering which has high ability in data clustering. 5 facies has been selected as final facies after resulting from merging the similar ones in 20 clusters. The Facies 1 and 2 which is mainly limestone and dolomitic limestone respectively, have low porosity while three other facies have high porosity which are dolomitic limestone, dolomite and limestone respectively lithological point of view (Figure 2).

Seismic Attributes

Attenuation, Envelope, RMS amplitude, Sweetness and Acoustic impedance attributes have been prepared based on depth domain seismic cube. Thus, all attributes have been merged and converted to trend maps in order to be used for electrofacies distribution (Figure 3)

Electrofaccis and Porosity Modeling

After constructing the structural model for the studied filed, electrofacies and porosity logs have been upscaled and then propagated after setting appropriated variography and using the stochastic methods [2]. The porosity distribution needs to be normalized [3]. Effective porosity (PHIE) 3D model has been generated using scaled up PHIE log into the 3D grid. As mentioned earlier, PHIE has been linked to the electrofacies. Porosity propagation has been done using stochastic method, "Gaussian random function simulation" algorithm for propagating the properties during reservoir modeling yield more reliable results [4, 5] (Figure 4). Seismic acoustic data have been used as secondary variable for porosity distribution via collocated co-kriging.

It has been linked to facies distribution which used the trend maps of seismic for horizontal propagation (Figure 5).

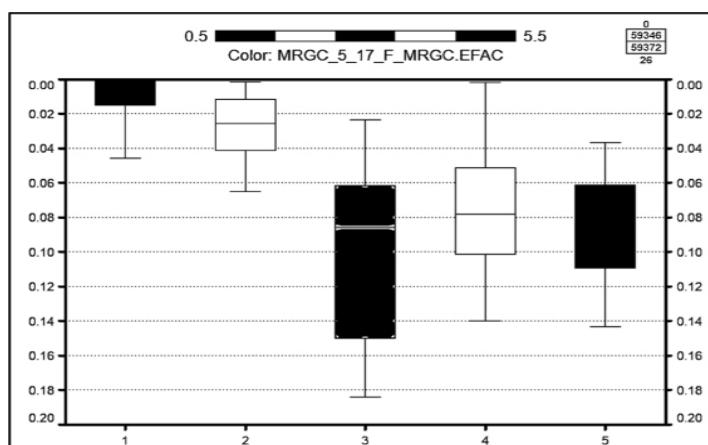


Fig. 2 histogram of porosity in each electrofacies codes.

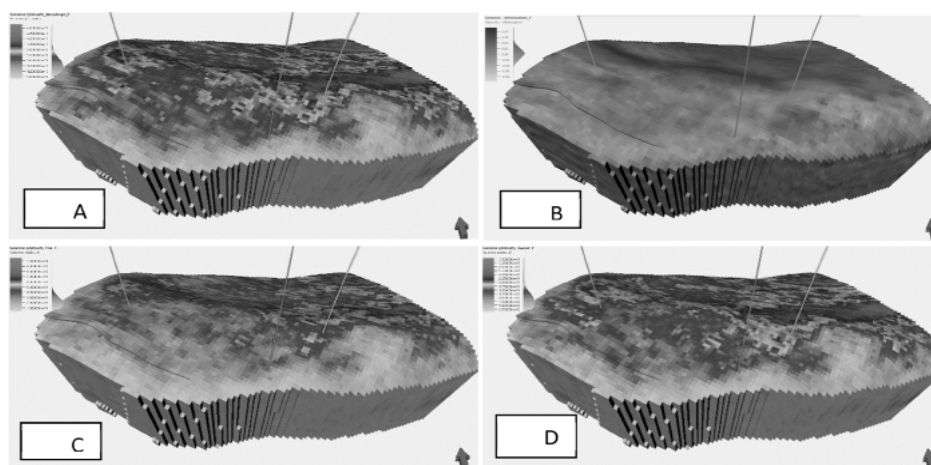


Fig. 3 A: RMS amplitude, B: Attenuation, C: Envelope, and D: Sweetness.

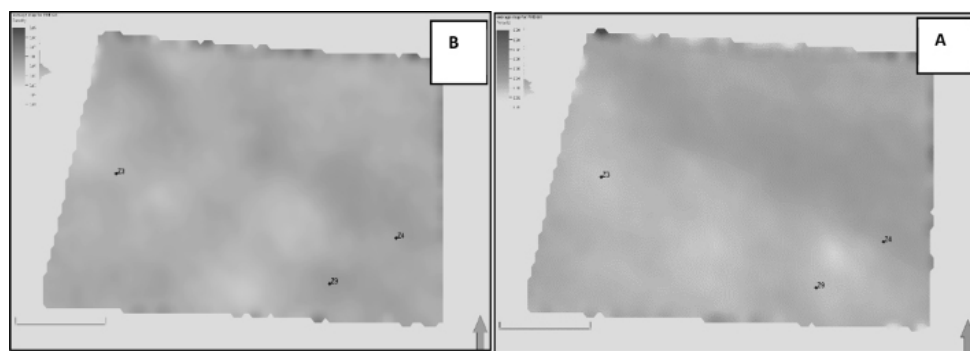


Fig. 5 Final porosity maps for upper (A) and lower Sarvak (B)

Conclusions

Five electrofacies has been determined after applying MRGC algorithm. The Facies 1 and 2 have low porosity while 3 other facies have high porosity. After merging Attenuation, Envelope, RMS amplitude, Sweetness attributes, related trend maps have been prepared for electrofacies propagation. Seismic acoustic data have been used as secondary variable for porosity distribution via collocated co-kriging. The porosity increases from south west to north east in upper Sarvak reservoir, but in Lower Sarvak, any particular porosity distribution is not shown. Generally, the lower Sarvak has much better reservoir quality than upper Sarvak due to developing good reservoir facies.

Acknowledgments

We are thankful to SAED company and also from Mr. Karkooti and Shorab for their cooperation in this study.

References

1. Grader A S, Clark A B S, Al-Dayyani T, Nur A (2009) Computations of porosity and permeability of sparc carbonate using Multi-Scale CT images, International Symposium of the Society of Core Analysts, The Netherlands 27-30 September, SCA2009-Temp Paper#03-10, 10.
2. Kadkhodaie Ilkhchi R, Kadkhodaie A, Rezaee M R, Mehdipour V (2019) Unraveling the reservoir heterogeneity of the tight gas sandstones using the porosity conditioned facies modeling in the Whicher Range field, Perth Basin, Western Australia, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 176: 97-115.
3. Batzle M, Hofmann R, Prasad M, Kumar G, Duranti L, Han D H (2005) Seismic attenuation: observations and mechanisms, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1565-1568.
4. Zhao S, Zhou Y, Wang M, Xin X, Chen F (2014) Thickness, porosity, and permeability prediction: comparative studies and application of the geostatistical modeling in an oil field, *Environmental Research Systems*, 3: 7.
5. Iske A. Randen T (2005) Mathematical methods and modelling in hydrocarbon exploration and production, Springer Berlin Heidelberg New York.

مدل سازی تخلخل با استفاده همزمان نشان گرهای لرزه ای و رخساره های الکتریکی در مخزن سروک در یکی از میادین نفتی ایران

ولی مهدی پور^۱، احمد رضا ربانی^{۱*} و علی کدخدائی^۲

۱- دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تبریز، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۰

چکیده

توزیع مناسب تخلخل مفید در مدل سازی استاتیک مخازن هیدروکربونی اهمیت به سزایی در محاسبات حجم سنجی، نحوه توزیع کیفیت مخزنی، مشخص کردن بخش های تولیدی و غیره دارد. استفاده از داده های ثانویه (به طور مثال داده های لرزه ای) و روش های مناسب توزیع زمین آماری می تواند در بهبود این فرآیند بسیار مهم باشد. در این مطالعه تخلخل مفید مربوط به مخزن ناهمگن سروک در یکی از میادین فروافتادگی دزفول به صورت سه بعدی با استفاده از نرم افزار پترل مدل گردید. بنابراین، ضمن در نظر گرفتن دانش زمین آمار در توزیع تخلخل، نقشه های روندی و مکعب لرزه ای جهت توزیع تخلخل مورد استفاده قرار گرفت. از این رو، نشان گر تضعیف موج لرزه ای، نشان گر پوش، نشان گر نرمی و نشان گر دامنه جذر میانگین مربعات به همراه نشان گر مقاومت صوتی از روی مکعب لرزه ای ساخته شد و سپس براساس آنها نقشه های روندی مناسب جهت توزیع تخلخل تهیه گردید. به منظور کنترل توزیع تخلخل در فضای سه بعدی مخزن، استفاده از روش های خوشه بندی و تعیین رخساره های الکتریکی مورد توجه قرار گرفت. در این مطالعه، رخساره های الکتریکی با داده های ورودی مشخص و استفاده از روش MRGC جهت تشخیص بخش های همگن مخزنی ساخته شد. براساس آنالیز رخساره های الکتریکی تعداد پنج رخساره تشخیص داده شد که از بین آنها دو رخساره دارای کیفیت مخزنی پایین و سه رخساره دارای کیفیت مخزنی نسبتاً خوبی بودند. توزیع سه بعدی تخلخل برای هر کدام از رخساره های الکتریکی متناظر، از طریق واریوگرافی مشروط گردید تا روند تغییرات تخلخل یا توزیع رخساره ها همخوانی داشته باشد. همچنین استفاده از نقشه های روندی تغییرات مقاومت صوتی منجر به توزیع صحیح رخساره های الکتریکی و آن هم به نوبه خود منجر به توزیع بهتر تخلخل گردید. به دلیل همبستگی بالای تخلخل با داده های مقاومت صوتی، از این داده به عنوان داده ثانویه با استفاده از روش کریجینگ همزمان مرتب (collocated co-kriging) جهت توزیع بهتر تخلخل استفاده گردید. براساس این مطالعه، بخش سروک پایینی کیفیت مخزنی بهتری نسبت به بخش سروک بالایی دارد که متاثر از گسترش رخساره های مخزنی با کیفیت مخزنی بالا است. این مطالعه نشان داد که میزان دقت توزیع سه بعدی تخلخل در صورت استفاده همزمان و تلفیقی از داده های لرزه ای و رخساره های الکتریکی همراه با استفاده از روش های زمین آماری مناسب زیاد شده و میزان عدم قطعیت در توزیع تخلخل کاهش می یابد.

کلمات کلیدی: ناهمگنی، تخلخل، رخساره الکتریکی، مقاومت صوتی، مدل سه بعدی

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی rabbani@aut.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4652.3089)

مقدمه

تعیین و تشخیص میزان ناهمگنی و تهیه نقشه‌ها و مدل‌های ناهمگنی مخزنی در مطالعات مخزنی و پیش‌بینی خصوصیات دینامیکی مخزن نقش اساسی دارد. در این مطالعه به دلیل اهمیت تخلخل در مشخصه‌سازی مخزنی، محاسبات حجم سنجی و تعیین کیفیت مخزنی، استفاده از داده‌های لرزه‌ای و آنالیز رخساره‌های الکتریکی جهت توزیع تخلخل مورد بررسی قرار گرفتند. تخمین توزیع فضایی تخلخل در فضای مخزن همیشه مورد توجه محققین مختلف بوده است [۱]. شایان ذکر است، در مدل‌سازی تخلخل، در کنار استفاده از دانش زمین‌آمار، تعیین و تشخیص روند تغییرات آن بسیار حایز اهمیت می‌باشد. مدل‌سازی تخلخل با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف از قبیل پترل، متلب، آر ام اس و غیره توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از این نرم‌افزارها امکان مدل‌سازی ساختارهای پیچیده و نامنظم زمین‌شناسی به همراه توزیع خواص مخزنی در فضای سه‌بعدی (با استفاده از دانش زمین‌آمار) فراهم شده است [۲]. مطالعات صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی تخلخل مشتمل بر استفاده از روش‌های مختلف توزیع و استفاده از الگوریتم‌های مختلف زمین‌آمار است [۳-۶] در تهیه روندهای حاکم بر تغییرات کیفیت مخزنی، داده‌های زمین‌شناسی و لرزه‌ای نقش اساسی دارد. تخلخل یکی از مهم‌ترین پارامترهای پتروفیزیکی است که در شناخت هرچه بهتر یک مخزن هیدروکربنی نقش مؤثری ایفا می‌کند. تخلخل را می‌توان با استفاده از آنالیز نگارهای پتروفیزیکی و مغزه‌ها و همچنین از طریق تلفیق داده‌های لرزه‌نگاری سه‌بعدی با نتایج آنالیزهای نگار و مغزه ارزیابی و محاسبه کرد. توزیع تخلخل تحت تأثیر ناهمگنی مخزن قرار می‌گیرد [۷]. بنابراین، استفاده از روش‌های خوشه‌بندی و تعیین رخساره‌های الکتریکی خاص برای شکستن فضای مخزن به زیرفضاهای همگن، به صورت

گسترده در حوزه علوم زمین مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. استفاده از داده‌های رخساره‌ای و لرزه‌ای در مدل‌سازی تخلخل توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است [۸ و ۹]

به‌طور کلی، رخساره رسوبی عبارت از مجموعه‌ای از لایه‌های سنگ‌های رسوبی است، که تحت شرایط یکسان در محیط رسوبی ته‌نشین شده‌اند و دارای مشخصات سنگ‌شناسی و دیرینه‌شناسی مشابه می‌باشند. رخساره می‌تواند از دیدگاه زمین‌شناسی، ژئوشیمی، لرزه‌ای، دیاژنزی، پتروفیزیکی و... مطرح شود. رخساره الکتریکی^۱ عبارت است از مجموعه‌ای از پاسخ‌های نگار^۲ که مشخص‌کننده یک لایه^۳ و یا به عبارت بهتر چینه^۴ بوده و باعث تشخیص آن از لایه‌های دیگر می‌گردد. روش‌ها و الگوریتم‌های متعددی نظیر MRG^۵، AHC^۶ و SOM^۷ برای خوشه‌بندی وجود دارد. هر کدام از الگوریتم‌ها با استفاده از روش‌های محاسباتی مختص به خود تعداد خوشه‌ها را با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی تعیین و تفکیک می‌کنند. این روش‌ها به خواص پتروفیزیکی مربوط می‌شوند، اما فاقد ارتباط مهم مابین قوانین زمین‌شناسی و فضایی می‌باشند [۸ و ۹]. به‌طور کلی، تعیین خوشه‌های مربوط به رخساره‌های الکتریکی با نظر کاربر و با استفاده از شکل نگارها یا ابر داده‌های اولیه و استفاده از الگوریتم‌های مختلف قابل حصول است [۱۱]. در مدل‌سازی استاتیک مخزنی، وجود داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی و نشان‌گرهای مناسب استخراج شده از آن به عنوان داده‌های ثانویه بسیار حایز اهمیت است. نشان‌گرهای لرزه‌ای توابع ریاضی مشتق شده از داده‌های لرزه‌نگاری هستند که در حوزه‌های زمان و فرکانس از داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌شوند.

1. Electrofacies

2. log

3. Bed

4. Strata

5. Multi Resolution Graph Based Clustering

6. Ascendant Hierarchical Clustering

7. Self Organizing Map

موقعیت میدان مورد مطالعه

میدان مورد مطالعه در بخش شمالی فروافتادگی دزفول قرار دارد. فروافتادگی دزفول از دیدگاه زمین شناسی نفت حائز اهمیت زیادی بوده و بخشی از یک پیش گودال و یک ناحیه ساختمانی در قسمت جنوب غربی تراسست زاگرس است. فروافتادگی دزفول به وسیله گسل بالارود در ناحیه شمال- شمال غرب و جبهه کوهستان در شمال شرق- شرق و گسل اصلی کازرون در شرق- جنوب شرق محدود گشته است. این منطقه دارای سنگ های منشاء فراوان، مخازن بسیار عالی و سنگ پوش مناسب است. در این میدان، سازند سروک مخزن اصلی محسوب می شود. در شکل ۱ موقعیت تقریبی میدان مورد مطالعه نشان داده شده است.

چینه شناسی سازند سروک

سازند سروک مخزن اصلی میدان مورد مطالعه است. این سازند یکی از واحدهای کربناته گروه بنگستان به سن آلبین تا سنومانین به عنوان یکی از مهم ترین سنگ مخزن های کربناته ایران است که در حوضه رسوبی زاگرس تا حوضه خلیج فارس دارای گسترش زیادی است. سازند سروک اولین بار توسط جیمز و وایند در ایران به نام آهک سروک معرفی گردید [۱۷]. نام این سازند از تنگه سروک در کوه بنگستان در ناحیه خوزستان گرفته شده است. حد پایینی این سازند در میدان مورد مطالعه با سازند کژدمی تدریجی و همساز است و مرز بالایی آن با شیل های لافان فرسایشی است. وجود یک ناپیوستگی موازی به سن پس از سنومانین در میان سازند سروک سبب شده تا این سازند به سروک پایینی (سنومانین) و سروک بالایی (تورونین) تقسیم شود [۱۸].

این داده ها شامل زمان، دامنه، فرکانس و جذب هستند. این نشان گر ها ما را در شناخت بهتر خصوصیات یک مخزن همراهی می نمایند. در این مطالعه تعدادی نشان گر مورد استفاده قرار گرفت که به شرح زیر است:

نشان گر وارون سازی لرزه ای^۱ یا برگردان لرزه ای روشی است که باعث می شود براساس مدل های لرزه ای اولیه و موجک های تخمین زده شده، مدل مقاومت صوتی نزدیک به مدل واقعی زمین را تخمین بزند. مقاومت صوتی به عنوان یک نشان گر لرزه ای عمل می کند [۱۲].

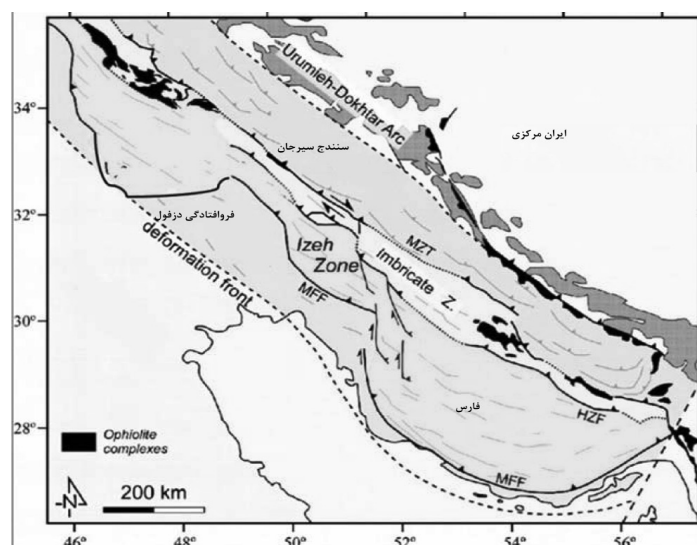
نشان گر تضعیف موج لرزه ای^۲ یک خاصیت ذاتی برای سنگ ها است که باعث اتلاف انرژی موج لرزه ای هنگام عبور از لایه های زیرسطحی و در نتیجه باعث کاهش تضعیف دامنه موج لرزه ای می شود [۱۳]. میزان تضعیف موج لرزه ای معمولاً با اندازه گیری فاکتور کیفیت سنگ^۳ (Q) که عبارت است از نسبت انرژی ذخیره شده به انرژی تلف شده در هر دوره تناوب، محاسبه می شود [۱۴].

نشان گر پوش لرزه ای^۴ از تریس پیچیده سیگنال لرزه ای که برای برجسته سازی ویژگی های لرزه ای استفاده شده، محاسبه می شود. همچنین نشان دهنده انرژی سیگنال است و از نظر بزرگی با ضریب بازتاب متناسب است.

نشان گر دامنه جذر میانگین مربعات^۵ از نشان گر های لرزه ای حجمی بعد از انباشت بر پایه دامنه است و تغییرات چینه شناسی را نشان می دهد. این نشان گر همانند نسخه ملایم شده نیروی بازتابی است و در مواردی نظیر آنومالی های دامنه در داده لرزه ای به کارگیری می شود.

نشان گر نرمی^۶ عبارت است از تقسیم رد لرزه^۷ پوش لرزه ای بر مجذور میانگین فرکانس است. این نشان گر به منظور تشخیص نقاط مطلوب جاهایی که نفت یا گاز حضور دارند و باعث بهبود تصویر توالی های دانه درشت (ماسه سنگ) می شوند طراحی شده است [۱۵].

1. Inversion
2. Seismic – Attenuation
3. Rock Quality Factor
4. Envelope Attribute
5. RMS
6. Sweetness
7. Seismic Trace



شکل ۱ محدوده تقریبی میدان مورد مطالعه در فروافتادگی دزفول شمالی [۱۶]

داده‌های سطوح عمقی تفسیر شده، داده‌های گسل‌های تفسیر شده، داده‌های مکعب لرزه‌ای، نگارهای پتروفیزیکی خام (از قبیل نگارهای پرتو گاما، نوترون، چگالی، صوتی، مقاومت و ...) و تفسیر شده (از قبیل تخلخل مفید، اشباع آب، حجم کانی‌های و ...)، مشخصات چاه‌ها (مختصات سرچاهی، اعماق میز دوار از سطح آزاد دریا، داده‌های انحراف مسیر چاه‌ها)، اعماق سرسازندها و سرزون‌های مربوط به بیست چاه حفاری شده در این میدان استفاده گردید.

ارائه و تحلیل نتایج

تعیین رخساره‌های الکتریکی مخزن مورد مطالعه

در این مطالعه، خوشه‌سازی و تعیین رخساره‌های الکتریکی با استفاده از ماژول FACIMAGE™ نرم‌افزار ژئولاگ انجام گرفت. از این رو، پس از آزمودن روش‌های مختلف در نهایت روش خوشه‌سازی چند تفکیکی بر پایه گراف MRGC برای تعیین تعداد رخساره‌های الکتریکی بهینه انتخاب گردید. در این روش داده‌های ورودی اعم از چندین نگار پتروفیزیکی پس از کنترل کیفی جهت خوشه‌بندی استفاده گردید. به‌طور کلی، خوشه‌سازی براساس MRGC یک روش آماری غیرپارامتریک است و برخلاف سایر روش‌ها، مشکل وابستگی به بعد را از بین می‌برد.

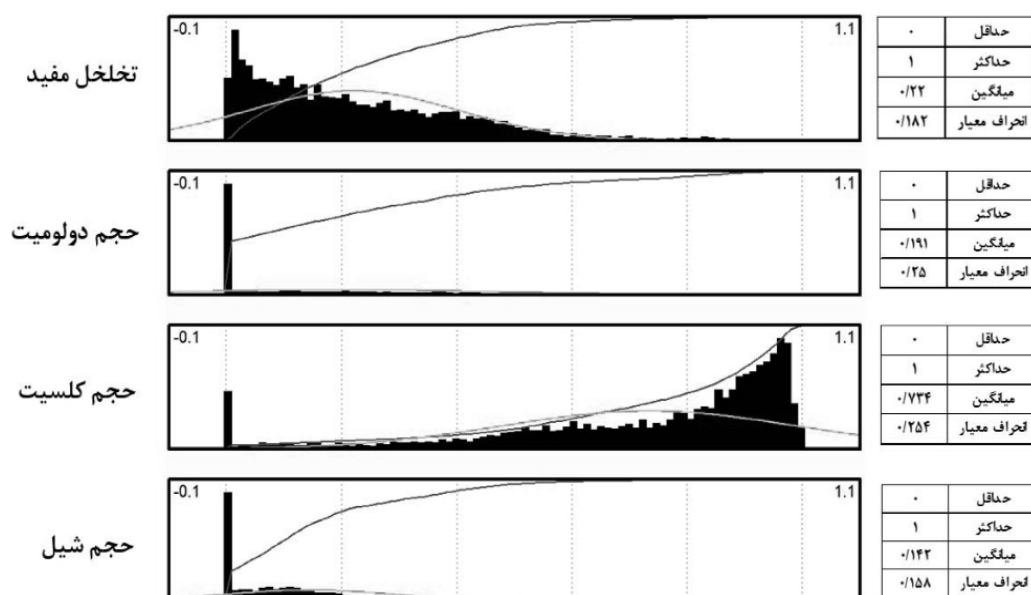
سازند آهکی سروک در زاگرس معمولاً با دو رخساره کم عمق و عمیق مشخص می‌شود. به لحاظ سنی سازند سروک از آلبین تا تورونین گسترش دارد [۱۹]. در میدان مورد مطالعه، این سازند عمدتاً دارای لیتولوژی کربناته است و از توالی آهک‌های نازک لایه تا متوسط لایه، آهک توده‌ای و آهک چرت دار تشکیل شده است. در این میدان، مخزن سروک (با ضخامت حدود ۶۰۴ m) با توجه به قرارگیری بخش شیل احمدی در بخش میانی (با ضخامت حدود ۳۳ m)، به دو بخش سروک بالایی (با ضخامت حدود ۳۰۶ m) و سروک پایینی (با ضخامت حدود ۲۶۵ m) تقسیم شده است.

روش و داده‌های مورد استفاده و مراحل تحقیق

در این مطالعه از نرم‌افزارهای ژئولاگ و پترل استفاده گردید. نخست با استفاده از نرم‌افزار Geolog، آنالیز رخساره‌ای پتروفیزیکی با روش خوشه‌سازی MRGC انجام گردید. سپس رخساره‌های حاصل جهت استفاده در مدل‌سازی رخساره‌ای وارد نرم‌افزار پترل گردید. در این نرم‌افزار با ساخت نشان‌گرهای لرزه‌ای متعدد تلاش گردید توزیع تخلخل به‌عنوان تابعی از تغییرات رخساره‌های الکتریکی و لرزه‌ای انجام گیرد. به‌منظور ساخت مدل استاتیک از

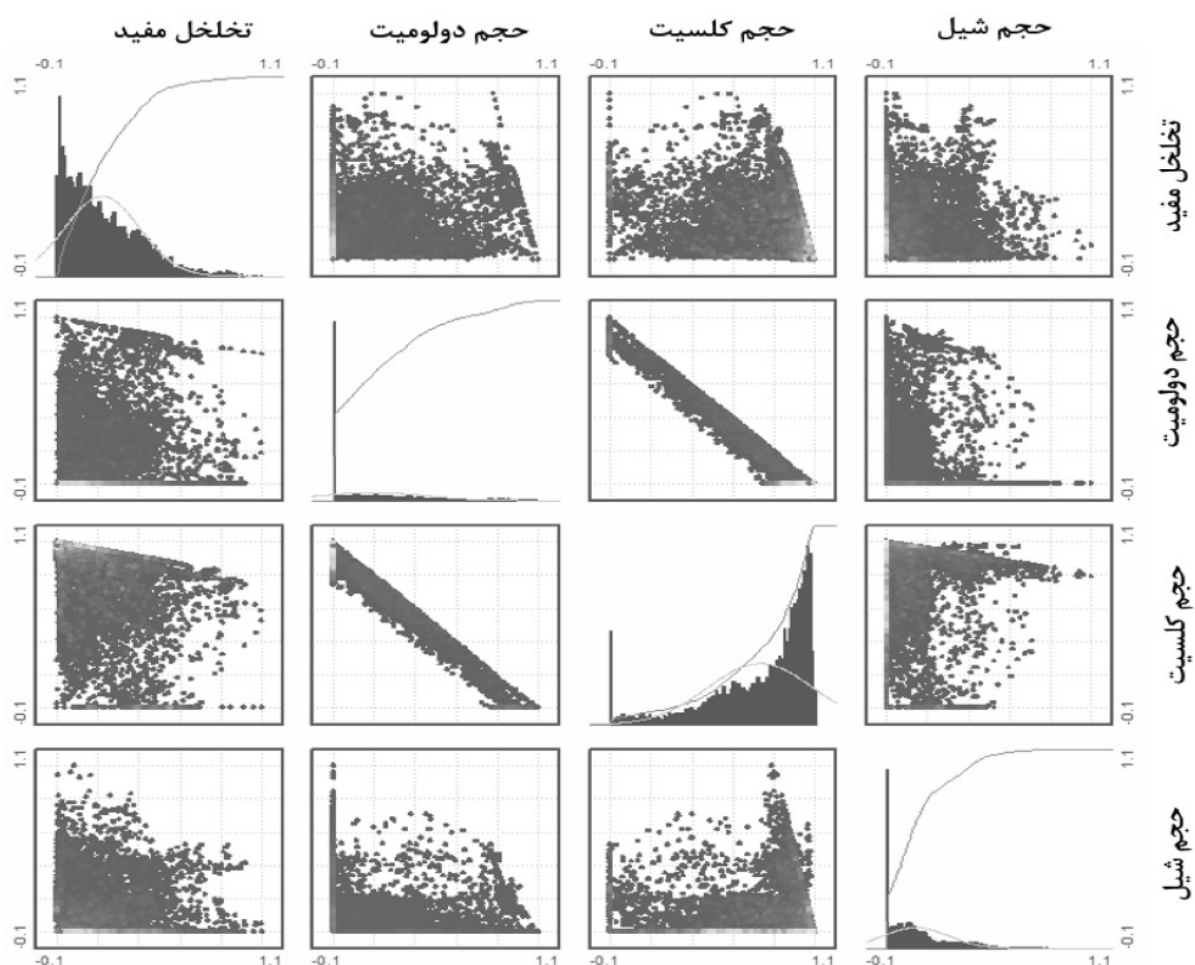
مخزنی سازندها تعیین می شوند [۲۰]. در شکل ۲ هیستوگرام های مربوط به نگارهای پتروفیزیکی تفسیر شده مورد استفاده در خوشه سازی نشان داده شده است. در مرحله بعد، داده های ورودی پس از بررسی و مشاهده نمودارهای مقاطع مربوطه (به منظور بررسی ارتباط داده های ورودی و میزان تفکیک رخساره ها) آموزش داده شدند (شکل ۳). پس از آموزش داده ها با استفاده از روش خوشه بندی تفکیکی گرافیکی MRGC، تعداد خوشه های بهینه مشخص گردید. این روش در مقایسه با سایر الگوریتم های خوشه بندی دارای کیفیت بهتری در تفکیک داده ها است [۲۱]. در این روش تعیین تعداد حداقل و حداکثر خوشه ها الزامی است. بنابراین، حداقل تعداد رخساره ها بر اساس تعداد کانی های حاصل از تفسیر لیتولوژی، سه رخساره (کلسیت، دولومیت، شیل) و حداکثر تعداد آن ۲۰ رخساره انتخاب گردید. بر این اساس، خوشه بندی با تعداد رخساره ۱۷ تایی از بین خوشه بندی های متعدد انتخاب گردید.

و اطلاعات مفیدی در مورد رخساره های زمین شناسی از ساختار خود داده به دست می آورد. این روش برای آنالیز ساختارهای پیچیده و دسته بندی طبیعی گروه های داده ها در شکل ها، اندازه ها و چگالی های متفاوت بسیار مناسب بوده و با شناسایی رخساره های رسوبی در یک توالی مخزنی، دید بهتری نسبت به شکل مخزن، پراکندگی خصوصیات پتروفیزیکی و سنگ شناسی سازند مخزنی و در نهایت، واحدهای جریانی موجود در آن سازند مخزنی پیدا می شود. برای تعیین رخساره های الکتریکی ابتدا داده های ورودی و مبنا انتخاب گردید. نگارهای پتروفیزیکی که بیشترین ارتباط را با خوشه بندی مورد نظر ما داشتند مورد بررسی قرار گرفتند و در نهایت تصمیم بر این شد که نگارهای تفسیر شده تخلخل، حجم شیل، حجم کانی دولومیت و حجم کلسیت به عنوان داده های ورودی انتخاب گردند. شناخت نوع لیتولوژی، محاسبه حجم شیل^۱، میزان تخلخل کل^۲، تخلخل مؤثر^۳، اشباع آب^۴ مهم ترین پارامترهایی هستند که در ارزیابی پتروفیزیکی جهت پی بردن به کیفیت



شکل ۲ هیستوگرام توزیع داده های ورودی نرمال شده با روش MRGC جهت خوشه بندی

1. Shale volume (VSH)
2. Total Porosity (PHIT)
3. Effective Porosity (PHIE)
4. Water Saturation (Sw)



شکل ۳ نمودار متقاطع ماتریسی داده‌های ورودی

بررسی و مقایسه خوشه‌ها نشان داد که امکان تلفیق خوشه‌ها و کاهش آن به ۵ خوشه وجود دارد. بنابراین، پس از بررسی خوشه‌بندی ۱۷ رخساره‌ای، این نتیجه حاصل شد که بعضی از این دسته‌بندی‌ها، از لحاظ سنگ‌شناسی و کیفیت مخزنی بسیار شبیه به هم می‌باشند (شکل ۴).

از این رو دسته‌های مشابه با یکدیگر ترکیب شدند و در نهایت پس از ادغام آنها خوشه‌بندی ۱۷ رخساره‌ای حاصل از روش MRGC به ۵ رخساره تبدیل شد. در شکل ۵ محدوده تغییرات تخلخل در هر رخساره نشان داده شده است. مشخصات پنج رخساره الکتریکی حاصل از روش MRGC به شرح زیر است.

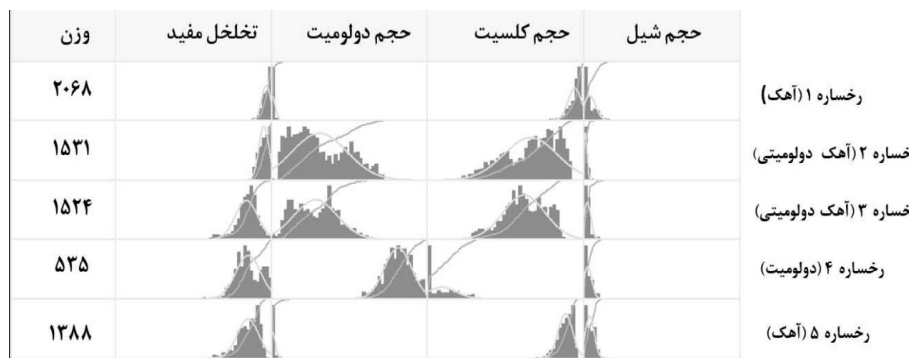
رخساره-۱: این رخساره با درصد گاما و میزان حجم شیل کمتر عمدتاً آهکی بوده و از ادغام ۶

رخساره الکتریکی در خوشه‌بندی ۱۷ تایی حاصل شده است (جدول ۱). رخساره-۱ دارای تخلخل ناچیز و کمتر از حد برش (حدود ۰.۲٪) عملاً فاقد کیفیت مخزنی است.

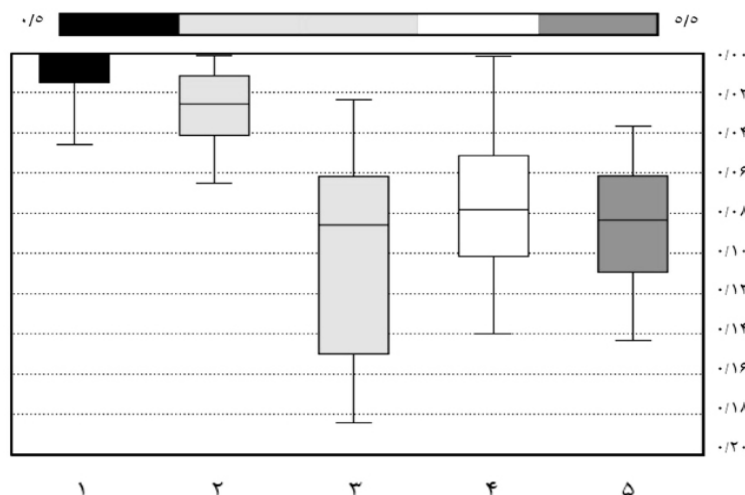
رخساره-۲: این رخساره از جنس آهک دولومیتی بوده و از ادغام سه رخساره در خوشه‌بندی ۱۷ رخساره‌ای حاصل گردید. این رخساره همانند رخساره با میانگین تخلخل ۰.۲٪ و کمتر از حد برش فاقد کیفیت مخزنی می‌باشد و صرفاً به دلیل وجود دولومیت از آن تفکیک شده است (جدول ۱).

رخساره-۳: این رخساره از جنس آهک دولومیتی بوده و از ادغام چهار رخساره در خوشه‌بندی ۱۷ رخساره‌ای حاصل گردیده است. این رخساره با میانگین تخلخل ۰.۸٪ کیفیت مخزنی بالایی داشته و از رخساره ۲ قابل تفکیک می‌باشد (جدول ۱).

بررسی و مقایسه خوشه‌ها نشان داد که امکان تلفیق خوشه‌ها و کاهش آن به ۵ خوشه وجود دارد. بنابراین، پس از بررسی خوشه‌بندی ۱۷ رخساره‌ای، این نتیجه حاصل شد که بعضی از این دسته‌بندی‌ها، از لحاظ سنگ‌شناسی و کیفیت مخزنی بسیار شبیه به هم می‌باشند (شکل ۴).



شکل ۴ هیستوگرام و دامنه تغییرات داده‌های ورودی توزیع داده‌های ورودی با روش MRGC در هر رخساره و روند تلفیق ۱۷ رخساره‌ای به ۵ رخساره‌ای



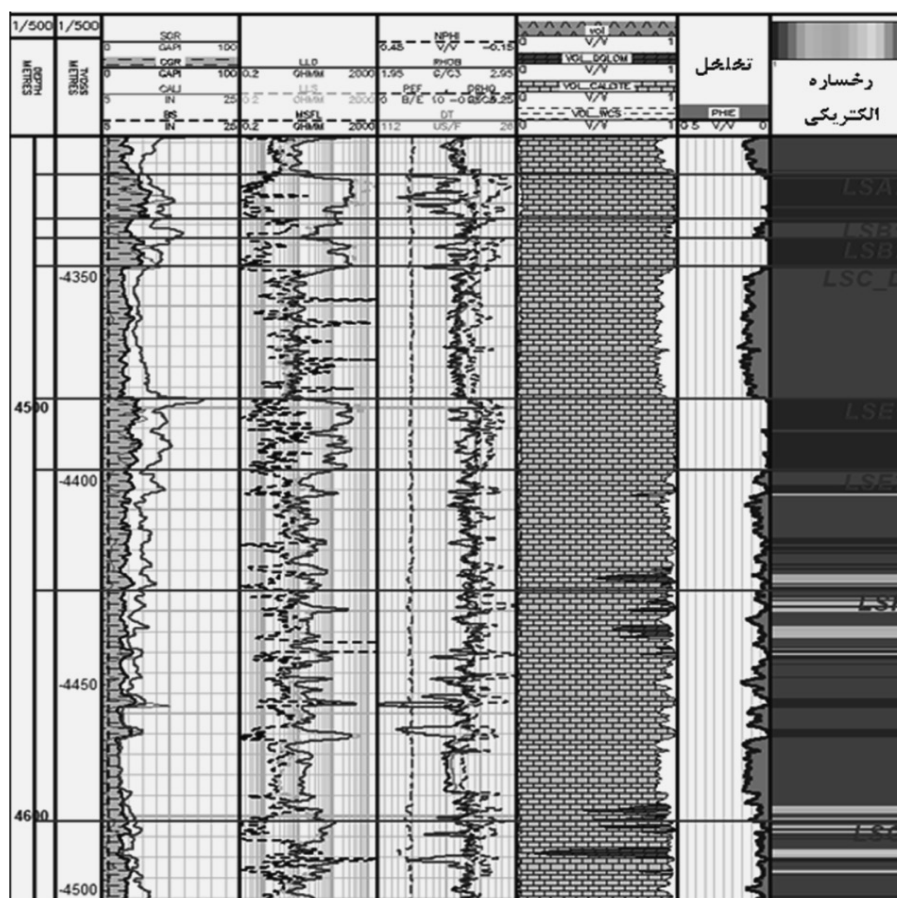
شکل ۵ هیستوگرام جعبه‌ای تغییرات تخلخل در هر رخساره

جدول ۱ میانگین داده‌های ورودی در هر رخساره

رخساره	تخلخل مفید	حجم دولومیت	حجم کلسیت	حجم شیل
رخساره ۱ (آهک کم تخلخل)	۰/۰۲	۰	۰/۹۴	۰/۰۴
رخساره ۲ (آهک دولومیتی کم تخلخل)	۰/۰۲	۰/۳۱	۰/۶۶	۰/۰۱
رخساره ۳ (آهک دولومیتی با تخلخل بالا)	۰/۰۸	۰/۲۸	۰/۶۲	۰/۰۲
رخساره ۴ (دولومیت)	۰/۰۷	۰/۸۱	۰/۰۹	۰/۰۲
رخساره ۵ (آهک با تخلخل بالا)	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۸۸	۰/۰۴

رخساره ۴ تفکیک می‌گردد (جدول ۱). در شکل ۶ رخساره‌های الکتریکی ایجاد شده در یک پنجره چیدمانی^۱ در یکی از چاه‌های میدان به‌همراه داده‌های سنگ‌شناسی، کیفیت مخزنی (تخلخل) نمایش داده شده است.

رخساره-۴: این رخساره دولومیتی است و با میانگین تخلخل (۰/۷) دارای کیفیت مخزنی نسبتاً خوبی است (جدول ۱).
رخساره-۵: این رخساره عمدتاً آهکی بوده و با میانگین تخلخل (۰/۷) دارای کیفیت مخزنی نسبتاً خوبی است و به‌دلیل اختلاف لیتولوژی از



شکل ۶ نمایش رخساره‌های الکتریکی به همراه نگار تخلخل، نگارهای لیتولوژی و نگارهای خام

ساخت نشان گرهای لرزه‌ای

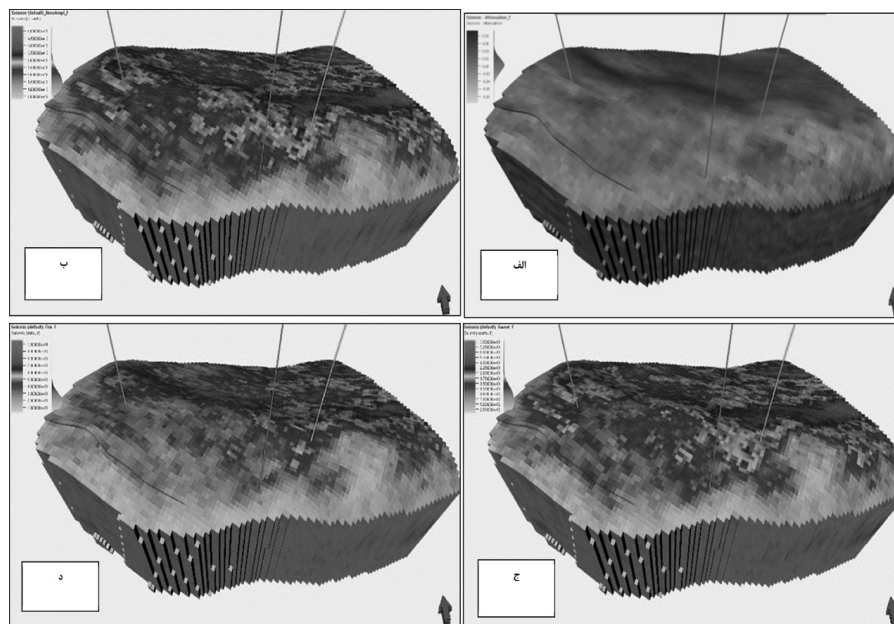
در این مطالعه، نخست با استفاده از نرم‌افزار پترل تعدادی نشان گر لرزه‌ای که به نوعی با توزیع تخلخل ارتباط داشتند از روی داده‌های مکعب لرزه‌ای با استفاده از ماژول ساخت نشان گرهای حجمی^۱ تهیه گردید. نشان گر تضعیف موج لرزه‌ای، نشان گر پوش لرزه‌ای و نشان گر دامنه RMS به همراه نشان گر مقاومت صوتی پس از تهیه توسط شبکه عصبی پترل به یک نشان گر تبدیل شدند تا نشان گر نهایی تلفیقی از اثرات هر کدام از آنها باشد (شکل ۷). ادغام این نشان گرها به یک نشان گر نماینده از طریق شبکه عصبی نرم‌افزار پترل انجام گردید. از مدل حاصل برای هر دو بخش سروک بالایی و سروک پایینی نخست نقشه میانگین تهیه گردید و در نهایت پس از نرمال کردن به نقشه‌های روندی تبدیل گردید. با توجه به رابطه عکس

نشان گر مقاومت صوتی با تخلخل، روند تغییرات این نقشه‌ها ارتباط عکس با روند توزیع تخلخل دارد، به طوری که افزایش آن نشان دهنده کاهش تخلخل و کاهش آن نشان دهنده وجود بخش‌های با کیفیت مخزنی بالا می‌باشد. این نقشه‌های روندی جهت توزیع رخساره‌های الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت.

مدل سازی خواص مخزنی

نرم‌افزارهای مدل سازی استاتیک نظیر پترل یک دید سه بعدی از زمین شناسی و ساختمان مخزن و نیز نحوه توزیع پارامترهای مخزنی به کاربر ارائه داده و امکان محاسبه حجم مخزن را فراهم می‌کند. به طور کلی، مدل سازی استاتیک مخزن شامل ایجاد مدل ساختمانی^۲ و مدل خواص مخزن و نهایتاً حجم سنجی و آنالیز عدم قطعیت است.

1. Volume Attribute
2. Structural Modeling



شکل ۷ نشان گرهای لرزه‌ای (الف) نشان گر تضعیف موج لرزه‌ای، (ب) نشان گر دامنه جذر میانگین مربعات (ج) نشان گر نرمی و (د) نشان گر پوش لرزه‌ای

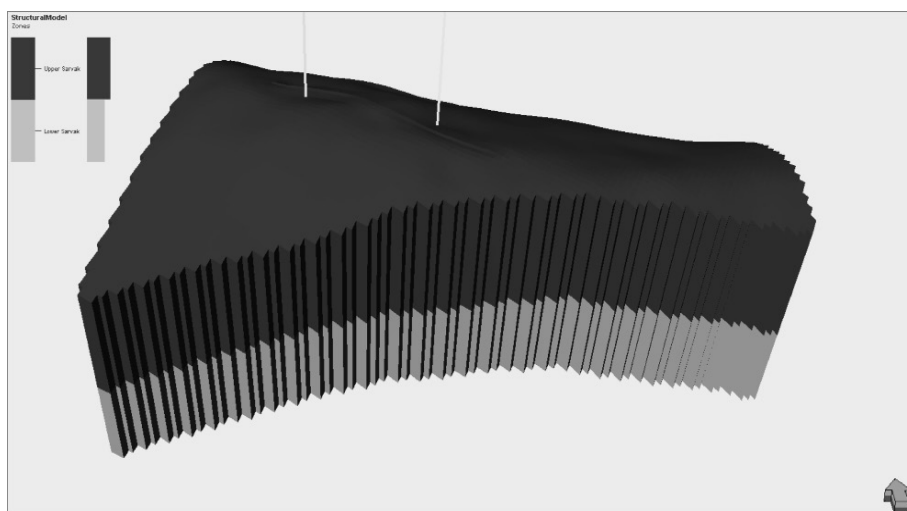
آنها حذف می‌گردد و سپس در سه جهت اصلی، فرعی و عمودی واریوگرافی انجام گردید. واریوگرام، تغییرپذیری داده‌ها را با افزایش فاصله نشان می‌دهد که یک محور آن تغییرپذیری واریانس و محور دیگر فاصله است. در توزیع خواص مخزنی در مخازن هیدروکربنی واریوگرافی به صورت افقی (در دو جهت) و عمودی انجام می‌شود. واریوگرام از مقداری مخالف صفر شروع شده و به اندازه دامنه تاثیر^۶ افزایش می‌یابد و در نهایت به مقدار ثابتی به نام سقف^۷ می‌رسد.

مدل سازی رخساره‌های الکتریکی و تخلخل

مدل سازی رخساره‌ای^۸ پس از ساخت مدل ساختمانی و پیش از مدل سازی خواص پتروفیزیکی انجام می‌گیرد. داده‌های رخساره‌های الکتریکی پیش از مدل سازی برحسب فراوانی رخساره^۹ درشت نمایی شده است.

انجام مدل سازی استاتیک مخزنی معمولاً با آماده کردن داده‌های مختلف با فرمت‌های متناسب و وارد کردن آنها به نرم افزار شروع می‌شود پس از وارد نمودن داده‌های مختلف، ساخت مدل ساختمانی آغاز می‌گردد. فرآیند مدل سازی ساختمانی شامل مراحل مدل سازی گسل، ساخت مدل ژئوسلولار سه بعدی^۱، ساخت افق‌های مخزنی^۲، ساخت زون‌ها^۳ و لایه بندی^۴ است [۲۲]. در این مطالعه، مدل ساختمانی با شبکه بندی 100×100 ساخته شد و مدل سازی افق‌ها با استفاده از نقشه‌های سطوح عمقی انجام گرفت (شکل ۸). پس از ساخت مدل ساختمانی، داده‌های رخساره الکتریکی و تخلخل به اندازه سلول‌های شبکه درشت مقیاس (میانگین گیری) شدند [۲۳]. پس از درشت نمایی این نگارها، آنالیز آماری^۵ داده‌ها صورت می‌گیرد. آنالیز آماری داده‌ها یک مرحله مهم در مدل سازی مخزن است که در کنترل کیفیت داده‌ها، بررسی روند آنها و آماده سازی داده‌های ورودی برای مدل سازی پتروفیزیکی و رخساره‌ها کمک فراوانی می‌نماید. بنابراین داده‌ها ابتدا درون نرم افزار پترل به صورت نرمال درآمده و روند ممکن در

1. Gridding
2. Make Horizon
3. Zonation
4. Layering
5. Data Analysis
6. Range
7. Sill
8. Facies Modelling
9. Most of



شکل ۸ مدل ساختمانی مخزن سروک در میدان مورد مطالعه

هر کدام از زون‌های مخزنی نقشه روندی براساس تغییرات مقاومت صوتی و نشان‌گر حاصل از تجميع ۴ نشان‌گر ساخته شده، تهیه گردید. این روندها برای توزیع هر کدام از رخساره‌ها به صورت سه‌بعدی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین توزیع هر کدام از این رخساره‌ها به تخلخل لینک گردید تا روند تغییرات رخساره‌ها با تخلخل هم‌خوانی داشته باشند. از این رو، هر کدام از کدهای رخساره‌ای به صورت جداگانه مورد آنالیز واریوگرافی قرار گرفت تا بتوان با آنالیز واریوگرافی تخلخل مربوطه امکان تبعیت توزیع تخلخل از توزیع رخساره‌های الکتریکی فراهم گردد (شکل ۹). شایان ذکر است، استفاده از نقشه‌های روندی تغییرات مقاومت صوتی منجر به توزیع صحیح رخساره‌های الکتریکی و آن هم به نوبه خود منجر به توزیع بهتر تخلخل می‌گردد.

مدل‌سازی تخلخل

استفاده از مدل رخساره الکتریکی که با استفاده از نقشه‌های روندی حاصل از مقاومت صوتی تهیه گردیده است.

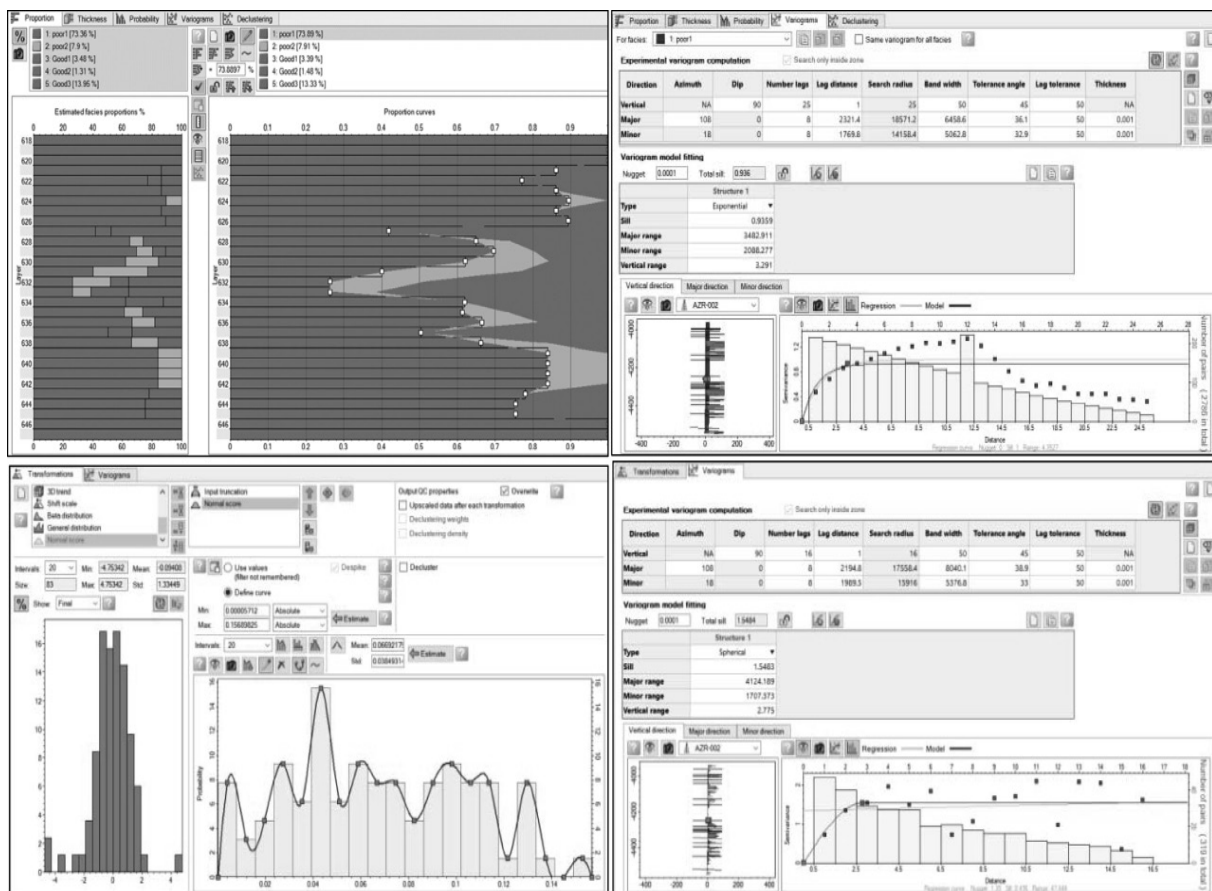
سپس در بخش آنالیز داده‌ها واریوگرافی می‌شوند. در مدل‌سازی رخساره‌ای گسسته، توزیع رخساره‌ها با استفاده از روش‌های زمین آماری قطعی^۱ و تصادفی یا آماری^۲ و یا شبیه‌سازی انجام می‌گیرد. در روش قطعی فقط یک خروجی از مدل‌سازی حاصل می‌گردد، ولی در روش توزیع تصادفی ممکن است برحسب شرایط داده‌ها مدل ایجاد گردد و سپس از آنها میانگین‌گیری شود. از ویژگی‌های روش تصادفی این است که مدل واقعی‌تر از ناهمگنی مخزن ایجاد می‌کند [۲۴]. روش‌های شبیه‌سازی زیادی وجود دارد که می‌توان به شبیه‌سازی شاخص ترتیبی^۳ و شبیه‌سازی گوسین منقطع^۴ اشاره کرد. در این روش‌ها از واریوگرام برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. مدل‌های رخساره‌ای حاصل جهت کنترل توزیع خواص پتروفیزیکی و تاثیر زمین‌شناسی در توزیع زمین آماری آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند. براساس آنالیز رخساره‌های الکتریکی که بیان گردید، رخساره‌های ساخته شده برحسب میزان تغییرات دولومیت و تخلخل به ۵ رخساره تفکیک شدند. از بین آنها ۲ رخساره کیفیت پایین و سه رخساره کیفیت خوبی داشتند. رخساره‌های با تخلخل خوب با مقدار مقاومت صوتی پایین و رخساره‌های بد دارای تخلخل کمتر با مقاومت صوتی بالا تطابق دارند. بنابراین برای

1. Deterministic

2. Stochastic

3. Sequential Indicator Simulation (SIS)

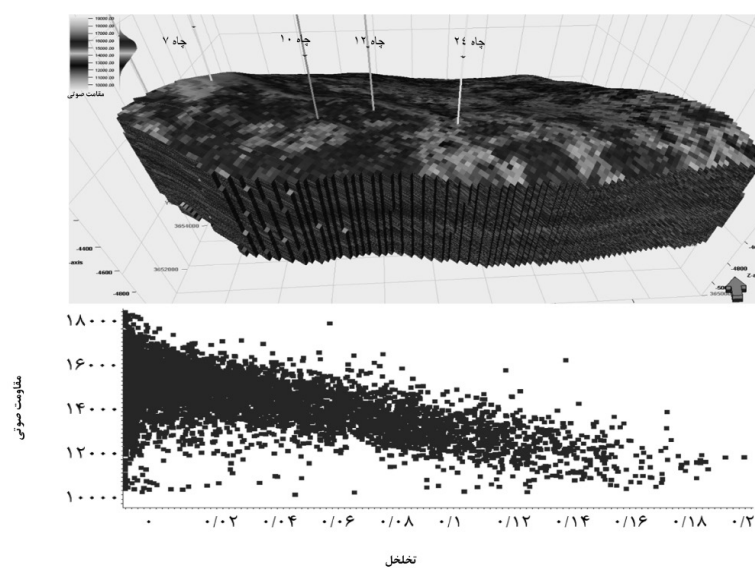
4. Truncated Gaussian Simulation (TGS)



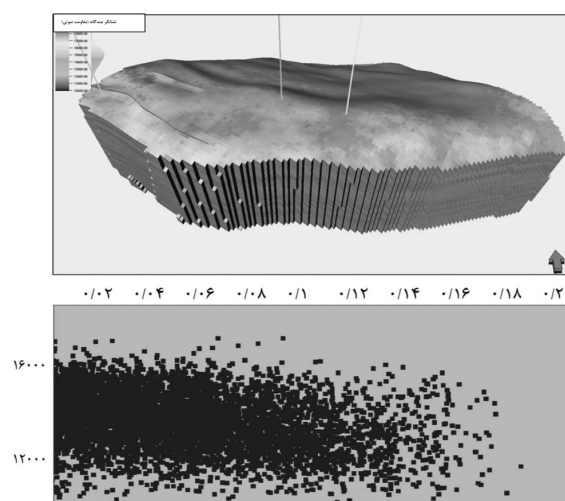
شکل ۹ تنظیمات مربوط به واریوگرافی نگارهای رخساره الکتریکی و تخلخل

مقاومت صوتی که نسبت به داده‌های نگار تخلخل چاه دارای حجم بیشتر اما دقت کمتری می باشد، منجر به توزیع صحیح و قابل اعتماد تخلخل شده و از میران عدم قطعیت توزیع تخلخل می‌کاهد. شایان ذکر است میزان همبستگی تخلخل با نشان‌گر ساخته شده از مجموع نشان‌گرها ۴۵٪ بوده است که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. به‌طور کلی، می‌توان گفت مسیری که برای مدل‌سازی تخلخل استفاده گردید هم به‌صورت افقی از روند تغییرات نشان‌گرهای لرزه‌ای و هم به‌صورت سه‌بعدی از روند تغییرات مقاومت صوتی استفاده می‌کند. نتیجه این روش کاهش مقدار عدم قطعیت در خارج از دامنه واریوگرافی و حصول اطمینان بیشتر از صحت توزیع تخلخل می باشد. مدل تخلخل با استفاده از روش زمین آماری تصادفی GRFS توزیع گردید (شکل ۱۲).

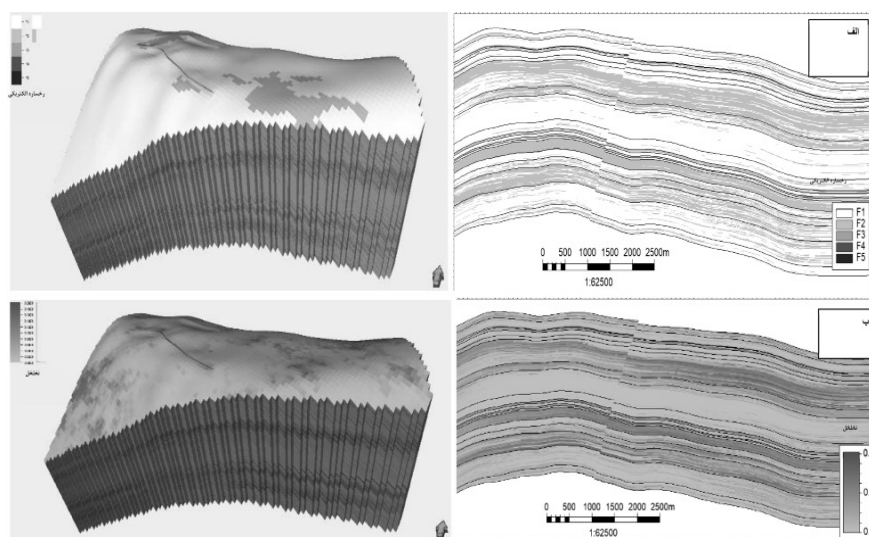
به‌دلیل استفاده هم‌زمان از داده‌های پتروفیزیکی و لرزه‌ای (به‌صورت نقشه‌های روندی) اهمیت فراوانی در کاهش عدم قطعیت مدل تخلخل دارد. در واقع هدف از مدل‌سازی تخلخل این است تا این خاصیت مخزنی را بین چاه‌های موجود طوری توزیع کنیم که ضمن حفظ ناهمگنی مخزن در توافقی با داده‌های چاه باشند. از آنجا که در بخش آنالیز واریوگرافی، توزیع تخلخل متأثر از توزیع رخساره‌های الکتریکی بود، لذا توزیع تخلخل در فضای سه‌بعدی مدل به نوعی متأثر از تغییرات مقاومت صوتی هم بوده است. با توجه به یکسان بودن روند تغییرات نشان‌گرهای لرزه‌ای با مقاومت صوتی و به‌دلیل میزان همبستگی حدود ۶۴٪ تخلخل با داده‌های مقاومت با استفاده از روش کریجینگ هم‌زمان مرتب از داده‌های مقاومت صوتی به‌عنوان داده ثانویه جهت توزیع بهتر تخلخل استفاده گردید (شکل ۱۰). استفاده از داده ثانویه



شکل ۱۰ نمایش مکعب لرزه‌ای مقاومت صوتی به همراه نمودار متقاطع همبستگی نگار مقاومت صوتی با تخلخل مفید (۶۴/)



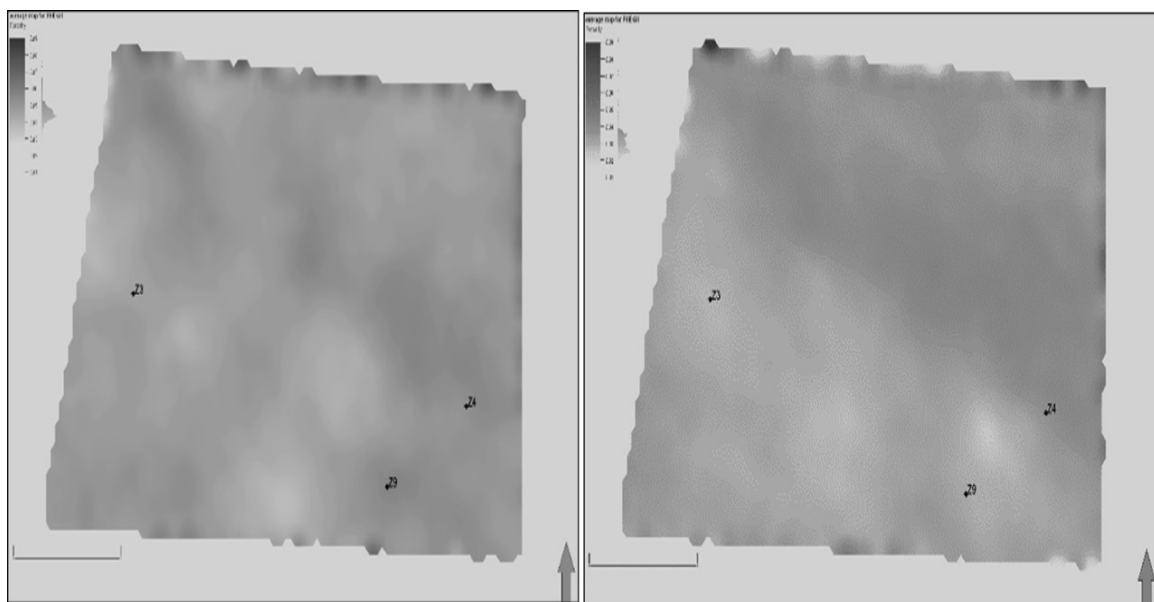
شکل ۱۱ نمایش مکعب لرزه‌ای نشان‌گرهای لرزه‌ای به همراه نمودار متقاطع همبستگی آن با تخلخل مفید (۴۵/)



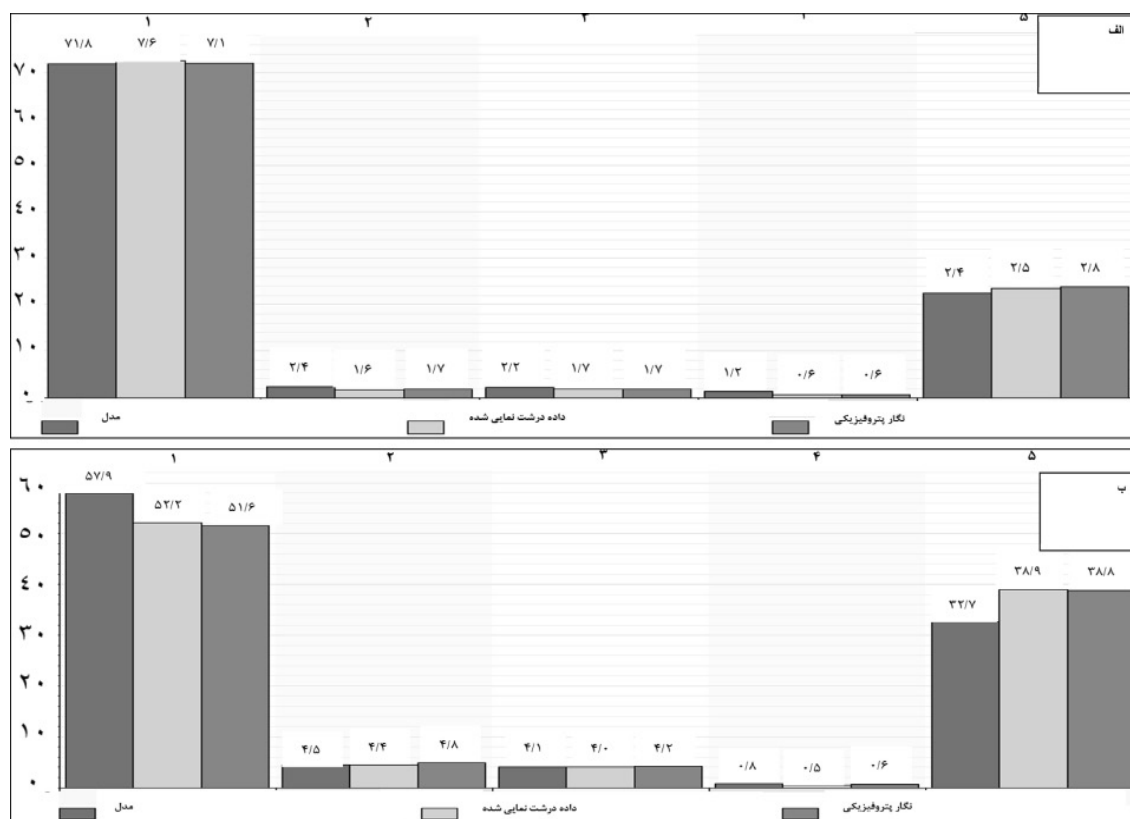
شکل ۱۲ توزیع سه‌بعدی مدل رخساره الکتریکی (الف) و تخلخل (ب)

بهتری نسبت به بخش سروک بالایی دارد. درصد رخساره‌های با کیفیت مخزنی پایین (رخساره ۱ و ۲) در سروک بالایی نسبت به سروک پایینی بیشتر بوده و نسبت رخساره‌های رخساره‌های با کیفیت مخزنی بالا (رخساره‌های ۳، ۴ و ۵) در سروک پایینی نسبت به سروک بالایی بیشتر است (شکل ۱۴). این مطالعه نشان داد از آنجا که مدل تخلخل ساخته شده متأثر از توزیع رخساره‌های الکتریکی، روند تغییرات مقاومت صوتی حاصل از تفسیر لرزه‌ای و نیز استفاده از الگوریتم زمین آماری مناسب است، دارای عدم قطعیت پایینی بوده و می‌توان از آن با اطمینان بیشتر در ادامه مدل‌سازی استاتیک و محاسبات حجم سنجی استفاده کرد.

این روش باعث افزایش دقت توزیع نسبت به‌روش‌های قطعی می‌شود [۲۵]. شایان ذکر است این روش نیاز به نرمال‌سازی استاندارد داده‌های مورد استفاده دارد [۲۶]. پس از ساخت مدل تخلخل، نقشه میانگین تغییرات تخلخل برای سروک بالایی و سروک پایینی تهیه گردید. همان‌طوری‌که در شکل ۱۳ دیده می‌شود در سروک بالایی از جنوب غرب به سمت شمال شرق میزان تخلخل زیاد می‌شود. اما در سروک پایینی روند خاصی ملاحظه نمی‌گردد؛ اگر چه در مرکز میدان و در راستای جنوب شرقی به سمت شمال غربی بر میزان تخلخل افزوده می‌شود (به دلیل عملکرد فرآیندهای دیاژنزی). به‌طور کلی، بخش سروک پایینی کیفیت مخزنی



شکل ۱۳ نقشه توزیع افقی تخلخل در سروک بالایی (الف) و سروک پایینی (ب)



شکل ۱۴ میزان توزیع رخساره ها در سروک بالایی (الف) و سروک پایینی (ب) برای داده های نگار، درشت نمایی شده و مدل شده

نتیجه گیری

نقشه های روندی تهیه شده براساس تغییرات مقاومت صوتی جهت توزیع رخساره های الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت.

* در توزیع سه بعدی تخلخل تلاش گردید هر کدام از رخساره های الکتریکی از طریق آنالیز واریوگرافی به توزیع میزان تخلخل لینک گردد تا روند تغییرات رخساره ها با تخلخل همخوانی داشته باشد. استفاده از نقشه های روندی تغییرات مقاومت صوتی منجر به توزیع صحیح رخساره های الکتریکی و آن هم به نوبه خود منجر به توزیع بهتر تخلخل می گردد.

* به دلیل همبستگی بالای تخلخل با داده های مقاومت صوتی از این داده به عنوان داده ثانویه با استفاده از روش کریجینگ هم زمان مرتب جهت توزیع بهتر تخلخل استفاده گردید.

* در سروک بالایی از جنوب غرب به سمت شمال شرق میزان تخلخل زیاد می شود. اما در سروک

* براساس آنالیز رخساره های الکتریکی با استفاده از روش خوشه بندی MRGC برحسب میزان تغییرات دولومیت و تخلخل پنج رخساره تشخیص داده شد. * رخساره های الکتریکی یک و دو با دارا بودن تخلخل ناچیز و کمتر از حد برش فاقد کیفیت مخزنی می باشند. اما رخساره های سه، چهار و پنج با میانگین تخلخل بالاتر دارای کیفیت مخزنی نسبتاً خوبی بوده و به دلیل اختلاف لیتولوژی (آهک و دولومیت) از همدیگر تفکیک گردیدند.

* نشان گر وارون سازی لرزه ای، تضعیف موج لرزه ای، پوش لرزه ای و دامنه RMS به همراه نشان گر مقاومت صوتی پس از تهیه توسط شبکه عصبی پترل به یک نشان گر تبدیل شدند و سپس براساس آن نقشه های روندی جهت توزیع رخساره های الکتریکی و تخلخل تهیه گردید.

* با توجه به رابطه عکس مقاومت صوتی با تخلخل،

نیز الگوریتم زمین آماری مناسب (GRFS) می توان با اطمینان بیشتر در ادامه مدل سازی استاتیک و محاسبات حجم سنجی استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از شرکت مهندسی و توسعه سروک آذر و زحمات آقای مهندس کرکوتی و آقای مهندس شوراب به دلیل همکاری در تهیه این مقاله تقدیر و قدردانی می شود

پایینی روند خاصی ملاحظه نمی گردد؛ اگر چه در مرکز میدان و در راستای جنوب شرقی به سمت شمال غربی بر میزان تخلخل افزوده می شود. * کیفیت مخزنی سروک پایینی به دلیل گسترش رخساره های مخزنی خوب نسبت به سروک بالایی بیشتر می باشد.

* از مدل تخلخل ساخته شده به دلیل استفاده همزمان و تلفیقی از نقشه های تغییرات مقاومت صوتی، مدل رخساره الکتریکی، کریجینگ همزمان مرتب جهت استفاده از داده ثانویه مقاومت صوتی و

مراجع

- [1]. Kaufmann O, Martin T (2008) 3D Geological Modelling From Boreholes, Cross-Sections And Geological Maps, Application over Former Natural Gas Storages in Coal Mines. Computers and Geosciences 34, 3: 278-290.
- [2]. Costa J F, Zingano A C, KOPPE J C (2000) Simulation—an approach to risk analysis in coal mining, Exploration and Mining Geology, 9, 1, 43-49.
- [3]. Pyrcz M J, Deutsch C V (2014) Geostatistical reservoir modeling, Oxford university press.
- [4]. Ghoghjehbeyglou M (2021) Geostatistical modeling of porosity and evaluating the local and global distribution, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 11, 12: 4227-4241.
- [5]. Evans Annan B, Aidoo A, Ejeh C, Emmanuel A, Ocran D (2019) Mapping of porosity, permeability and thickness distribution: application of geostatistical modeling for the jubilee oilfield in Ghana, Geosciences 9, 2: 27-49.
- [6]. Daly C, Quental S, Novak D, (2010) A faster, more accurate Gaussian simulation. In: proceedings of the geocanada conference, calgary, AB, Canada, 10-14.
- [7]. Grader A S, Clark A B S, Al-Dayyani T, Nur A (2009) Computations of porosity and permeability of sparc carbonate using Multi-Scale CT images, International Symposium of the Society of Core Analysts, The Netherlands 27-30 September, SCA2009-Temp Paper#03-10, 10.
- [8]. Ghoghjehbeyglou M (2021) Geostatistical modeling of porosity and evaluating the local and global distribution, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 11, 12: 4227-4241.
- [9]. Evans Annan B, Aidoo A, Ejeh C, Emmanuel A, Ocran D (2019) Mapping of porosity, permeability and thickness distribution: application of geostatistical modeling for the jubilee oilfield in Ghana, Geosciences, 9, 2: 27-49.
- [10]. Skalinski M, Kenter J A M (2014) Carbonate petrophysical rock typing: integrating geological attributes and petrophysical properties while linking with dynamic behaviour, Geological Society, London, Special Publications, 406: 229-259.
- [11]. Kadkhodaie A, Kadkhodaie R (2018) Review of reservoir rock typing methods in carbonate reservoirs: relation between geological, seismic, and reservoir rock types, Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology, 7, 4: 13-35.
- [12]. Russell B, Hampson D P, Schuelke J S, Quirein J A (1997) Multi-attribute seismic analysis, The leading Edge, 16, 1439-1443.
- [13]. Batzle M, Hofmann R, Prasad M, Kumar G, Duranti L, Han D H (2005) Seismic attenuation: observations and mechanisms, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1565-1568.
- [14]. Raji W, Rietbrock A (2013) Attenuation (1/Q) estimation in reflection seismic records, Journal of Geophysics and Engineering, 10, 4: 045012.
- [15]. Koson S, Chenrai P, Choowong M (2014) Seismic attributes and their applications in seismic geomorphology, Bulletin of Earth Sciences of Thailand, 6, 1: 1-9.
- [16]. Casini G, Gillespie P A, Verges A, Romaine I, Fernandez N, Casciello E, Saura E, Mehl C, Homke S, Embry J C, Aghajari L, Hunt D W (2011) Sub-seismic fractures in foreland fold and thrust belts: insight from the Lurestan Province, Zagros Mountains, Iran, Petroleum Geoscience, 17: 263-282.
- [17]. James G A, Wynd J G (1965) Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area, AAPG Bull, 49: 2182-2245.

- [۱۸]. آقائباتی ع (۱۳۸۳) زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶.
- [۱۹]. مطیعی ه (۱۳۷۲)، زمین شناسی ایران، چینه شناسی زاگرس، سازمان زمین شناسی کشور، طرح تدوین کتاب، تهران، ۵۳۶.
- [20]. Hearst J R, Nelson P H, Paillet F L (2000) Well logging for physical properties: a handbook for geophysicists, geologists, and Engineers, New York, John Wiley and Sons, 483.
- [۲۱]. ادب نژاد پ، کدخدائی ع، نوروزی غ م رستمی اش (۱۳۹۷) مدل سازی سه بعدی واحدهای ژئومکانیکی با استفاده از داده های لرزه ای در یکی از میادین گازی جنوب ایران. پژوهش نفت، ۲۸، (۹۷-۱)، ۸۵-۹۶.
- [۲۲]. مهدی پور و، هاشمیان خ (۱۳۹۳) مقایسه مراحل انجام مدل سازی استاتیک مخازن هیدروکربنی با استفاده از نرم افزارهای RMS و PETREL، سومین کنفرانس مهندسی مخزن، تهران، ایران.
- [23]. Kadkhodaie-Ilkhchi R, Kadkhodaie A, Rezaee M R, Mehdipour V (2019) Unraveling the reservoir heterogeneity of the tight gas sandstones using the porosity conditioned facies modeling in the Whicher Range field, Perth Basin, Western Australia, Journal of Petroleum Science and Engineering, 176: 97-115.
- [24]. Iske A, Randen T (2005) Mathematical methods and modelling in hydrocarbon exploration and production, Springer Berlin Heidelberg New York.
- [25]. Zhao S, Zhou Y, Wang M, Xin X, Chen F (2014) Thickness, porosity, and permeability prediction: comparative studies and application of the geostatistical modeling in an oil field, Environmental Research Systems, 3: 7.
- [26]. Oliver M A (2010) Geostatistical applications for precision agriculture, Springer Science and Business Media.