

روش مناسب ساخت رخساره‌های الکتریکی دیاژنزی و مدل‌سازی سه‌بعدی فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی، عضو دالان بالایی و سازند کنگان، بخش مرکزی خلیج فارس

فرحناز صفی و وحید توکلی*

دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳

چکیده

مطالعات اندکی بر روی مدل‌سازی فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی (دولومیتی‌شدن، سیمانی‌شدن انیدریتی و انحلال)، به‌دست آوردن روند جانبی - قائم و تفسیر زمین‌شناسی علل پیدایش و روند رخداد آنان، انجام شده است. در این مطالعه که بر روی سازندهای کربناته دالان (بخش بالایی) و کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس صورت گرفته است، پس از مشاهده و بررسی داده‌های چاه‌پیمایی مربوط به دوازده چاه، با استفاده از نگارهای چگالی، جدایش نوترون-چگالی، نسبت امواج صوتی فشاری به امواج صوتی برشی، انحراف سرعت و تخلخل ثانویه، اقدام به ساخت رخساره‌های الکتریکی نشانگر فرآیندهای دیاژنزی دولومیتی‌شدن، سیمان انیدریتی و انحلال براساس روش خوشه‌بندی چندتفکیکی بر پایه گراف گردید. سپس با اجرای روش تخمین زمین‌آماری کریجینگ بر روی داده‌های رخساره الکتریکی، مدل‌های سه‌بعدی فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی ساخته شد و علل به‌وجود آمدن انواع روندهای مشاهده شده از فرآیندهای دولومیتی‌شدن، انیدریتی‌شدن و انحلال در برش‌های افقی و قائم از مدل‌های سه‌بعدی تفسیر شد. نتایج نشان داد در برش‌های افقی، با توجه به مدل رسوبی رمپ کربناته پرمین-تریاس و مدل دولومیتی‌شدن نشی-بازگشتی، بیشترین تمرکز نواحی دولومیتی‌شده و انیدریتی‌شده در بخش‌های جنوبی تا میانی میدان است. با توجه به تغییرات سطح آب دریا، بیشترین تأثیر عملکرد فرآیند انحلال نیز در همین بخش‌ها قابل مشاهده است. در برش‌های قائم، با توجه به سطوحی که کمترین ارتفاع سطح آب دریا را در خود ثبت کرده‌اند (K4 میانی، K3 پایینی، K2 بالایی، K1 بالایی)، عمده قسمت‌های دولومیتی‌شده در K1 بالایی، K2 بالایی و K3 پایینی، عمده قسمت‌های انیدریتی در K1 بالایی، K2 میانی و K3 پایینی تا بالای مرز K4 و بیشتر نواحی تأثیر گرفته از پدیده انحلال، منطبق بر K1 بالایی، K2 بالایی و K3 پایینی است.

کلمات کلیدی: دالان بالایی و کنگان، دولومیتی‌شدن، انیدریتی‌شدن، خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه گراف

مقدمه

سازندهای دالان و کنگان به ترتیب با سن پرمین-تریاس همراه با سازند معادل آنان در حوضه خلیج فارس، بزرگترین سنگ مخزنهای گازی جهان هستند. سنگشناسی عمومی این سازندها شامل سنگ آهک، دولومیت و انیدریت بوده که در یک رمپ کربناته نهشته شده‌اند [۱]. باتوجه به دارا بودن سنگشناسی کربناته، این سازندها بسیار مستعد تغییر در اثر فرآیندهای بعد از رسوبگذاری (فرآیندهای دیاژنزی) هستند. دیاژنز کربنات‌ها در ارتباط با فرآیندهای مختلفی است که در محیطهای نزدیک سطح دریا، جوی و به طرف پایین تا محیط دفن عمیق صورت می‌گیرد [۲]. اصلی‌ترین فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی، دولومیتی‌شدن، انیدریتی‌شدن و انحلال هستند. فرآیند انحلال به نوبه خود منجر به ایجاد تخلخل قالبی و حفره‌ای می‌شود. برای توصیف سنگشناسی و تخلخل در اکثر چاههای مورد مطالعه، نگارهای معمول و در دسترس، نگار پرتوگاما (GR)، نوترون (NPHI)، چگالی (RHOB) زمان عبور صوت (DT) و مقاومت (RT) است که در برخی موارد نگار فتوالکتریک (PEF) نیز همراه آنها وجود دارد [۳]. برخی از نگارهای چاهپیمایی به صورت مصنوعی (Synthetic) و بر پایه انجام محاسبات ریاضی، از تلفیق نگارهای معمول چاهپیمایی به دست می‌آیند (مانند نگارهای انحراف سرعت (VDL) و جدایش نوترون-چگالی (NDS)). لاگ انحراف سرعت که به صورت مصنوعی از ترکیب نگارهای صوتی و چگالی-نوترون به دست می‌آید، ابزاری مهم برای تشخیص انواع تخلخل در سنگهای کربناته است [۴]. لاگ جدایش نوترون-چگالی یکی دیگر از لاگهای مصنوعی است که از ترکیب لاگهای تخلخل چگالی و نوترون حاصل می‌شود [۵] و در واقع یک نوع ترسیم گرافیکی از فاصله‌ای است که میان نگارهای نوترون و چگالی وجود دارد [۶]. نگارهای چاهپیمایی، نشان‌دهنده

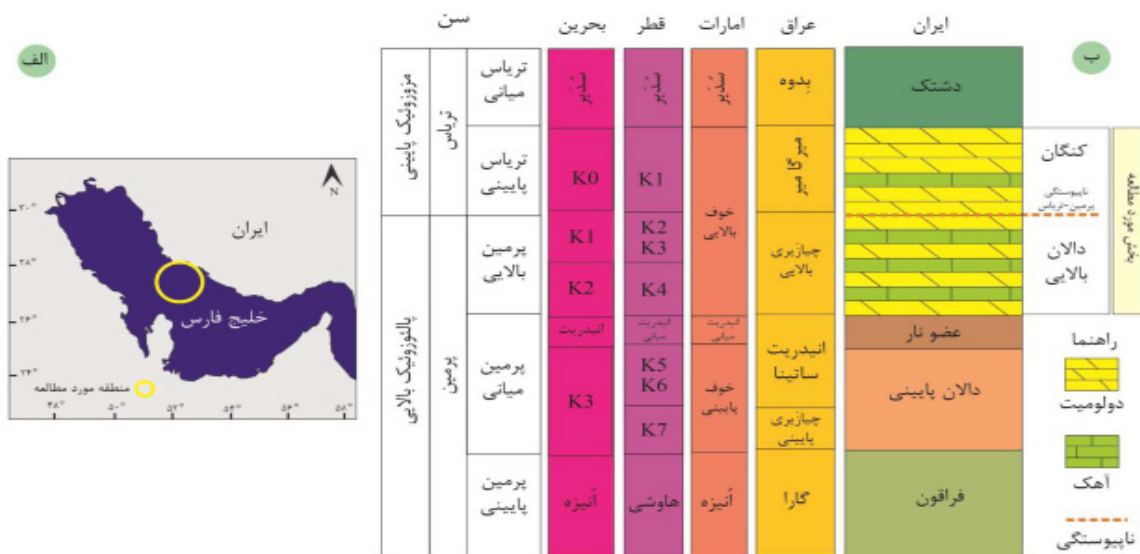
طیف وسیعی از اطلاعات در زمینه‌های متنوعی از قبیل کانی‌شناسی، سنگشناسی و تخلخل هستند. با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی (Clustering) اطلاعات مشابه در پاسخ نمودارهای چاهپیمایی در یک دسته یا خوشه قرار می‌گیرند [۷]. به مجموعه خوشه‌های تعیین شده براساس پاسخهای یک یا چند نگار چاهپیمایی، رخساره الکتریکی گفته می‌شود [۸]. یکی از روش‌های خوشه‌سازی، خوشه‌بندی چندتفکیکی برپایه گراف (MRGC) است. الگوریتم خوشه‌بندی چندتفکیکی بر پایه گراف از پارامترهایی به نام شاخص معرف کرنل (KRI) و شاخص همسایگی (NI) استفاده می‌کند. در این روش برای شناسایی خوشه‌ها در مجموعه داده‌ها، برای هر مشاهده، اندیس همسایگی را محاسبه می‌کند. در ادامه، گروه‌های طبیعی کوچکی از نقاط که دسته‌های جذب (attraction set) نامیده می‌شوند، بر مبنای استفاده از اندیس همسایگی، تشکیل می‌شوند. مستقل از تشکیل گروه‌های طبیعی، تعداد بهینه خوشه‌ها بر مبنای اندیس شاخص معرف کرنل و دقت تعیین شده توسط کاربر، محاسبه می‌شود. در نهایت، بر مبنای داده‌های محاسبه شده از مراحل قبل، با ادغام دسته‌های جذب، خوشه‌های نهایی تشکیل می‌شوند [۹]. با استفاده از مدل‌سازی زمین‌شناسی که فرآیند ساخت مدل ریاضی از پارامترهای زمین‌شناسی لایه‌های زمین است، هر لایه زمین‌شناسی بعنوان یک شی جسمی سه بعدی فرض شده و مدل ریاضی آن به کمک روش‌های زمین‌آماری در رایانه ایجاد می‌شود [۱۰]. زمین‌آمار که گستره‌ای از روش‌های متنوع برای تخمین و شبیه‌سازی خصوصیات زیرسطحی اعم از خصوصیات پیوسته (پارامترهای پتروفیزیکی تخلخل و تراوایی) و ناپیوسته (رخساره‌ها و گونه‌های سنگی) است، با ایجاد ارتباط میان داده‌هایی که در مقیاس‌های متفاوت و با کیفیت‌های مختلف اندازه‌گیری شده‌اند، امکان مدل‌سازی شکلی زیرسطحی یا کیفی مخزن را فراهم می‌سازد [۱۱].

رخساره‌های الکتریکی تعیین‌کننده فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی ساخته شد. سپس داده‌های مدل‌های رخساره الکتریکی فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی، در جهت ساخت مدل‌های سه‌بعدی زمین آماری در مقیاس میدان به کار گرفته شد تا در نهایت درک روشنی از روند رخداد جانبی و قائم فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی و علل رخداد آن‌ها در مقیاس میدان پدید آید.

زمین‌شناسی و چینه‌شناسی

یکی از ثروتمندترین مناطق دنیا از لحاظ میزان دارایی تجمعات نفت و گاز، حوضه خلیج فارس است که از لحاظ موقعیت ساختاری در محل برخورد سپر عربی با بلوک قاره‌ای ایران قرار داد [۱۳]. بخش بالایی سازند دالان و سازند کنگان از بخش ایرانی به‌همراه معادل چینه‌شناسی آنان در سایر کشورهای عربی همسایه، تشکیل‌دهندگان اصلی مخازن گازی خلیج فارس هستند (شکل ۱). این توالی‌ها عمدتاً از آهک، دولومیت و تبخیری‌ها همراه با مقدار کمی از نهشته‌های سیلیسی-آواری تشکیل شده‌اند [۱۵-۱۹].

برای مثال الگوریتم‌های کریجینگ (Kriging) که به‌طور گسترده‌ای در تخمین استفاده می‌شوند، وسیله‌ای آماری برای برآورد کمیت موردنظر در بخش مخزنی با استفاده از معادلات خطی از داده‌های موجود در داخل بخش مخزنی و یا در نزدیکی آن، هستند [۱۲]. در این تحقیق سعی بر این است که از میان فرآیندهای دیاژنزی معمول همچون سیمانی‌شدن کلسیتی، نوشکلی و دولومیتی‌شدن، درک بهتری از گسترش مکانی و زمانی فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی همچون انحلال (فرآیند انحلال موجب ایجاد تخلخل قالبی و حفره‌ای می‌شود)، دولومیتی‌شدن و انیدریتی‌شدن در مقیاس میدان با استفاده از مدل‌سازی ایجاد شود. همچنین، علل احتمالی روندهای افقی و قائم مشاهده‌ای در مدل‌های سه‌بعدی نشانگر فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی، براساس اصول زمین‌شناسی بیان می‌گردد. به این منظور، با استفاده از نتایج مطالعات پیشین درخصوص ارزیابی جنبه‌های مثبت و منفی انواع نگارهای چاه‌پیمایی، توجه به شناخت ساختار عملکردی نگارهای موجود و نگارهای مصنوعی ساخته شده از طریق فرمول‌های ارائه‌شده و تلفیق بهینه نگارها،



شکل ۱ الف) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه ب) ستون چینه‌شناسی سازند دالان، کنگان و سازندهای معادلشان در سایر کشورهای همسایه [۱۴]

کیفیت مخزنی عضو دالان بالایی و سازند کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس، از $5546/76$ m داده‌های چاه‌پیمایی از دوازده چاه و داده‌های پتروگرافی متعلق به 1575 مقطع نازک برگرفته از $402/63$ m مغزه‌های یک چاه کلیدی استفاده شده است (شکل ۱). نگارهای چاه‌پیمایی در دسترس از ۱۲ چاه منطقه مورد مطالعه شامل نگار پرتوگاما، نوترون، چگالی، زمان عبور صوت، مقاومت و نگار فتوالکتریک بودند. در چاه کلیدی، مغزه و نگار نسبت امواج صوتی فشاری به برشی (Vp/Vs) موجود بود.

گام‌های اصلی که در مسیر انجام این تحقیق برداشته شد، عبارت است از:

- ۱) مطالعه و بررسی مقاطع نازک حاصل از مغزه‌های چاه کلیدی به منظور تعیین نوع، میزان و عمق رخداد فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی
- ۲) بررسی نگارهای چاه‌پیمایی در دسترس، ساخت نگارهای جدید و اعمال روش خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه گراف بر روی نگارهای منتخب
- ۳) ساخت رخساره‌های الکتریکی تعیین‌کننده فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی
- ۴) مدل‌سازی سه‌بعدی فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی و تفسیر زمین‌شناسی برش‌های مدل

نتایج

ساخت رخساره‌های الکتریکی نشانگر دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی

از آنجا که فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی مدنظر در این تحقیق، فرآیندهای دولومیتی‌شدن، سیمانی‌شدن انیدریتی‌شدن و انحلال هستند و فرآیند انحلال عمدتاً منجر به ایجاد تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای می‌شود، پس نیاز به ساخت دو رخساره الکتریکی برای نشان دادن این فرآیندها بود. یک رخساره الکتریکی تحت عنوان سنگ‌شناسی ایجاد گردید که نشانگر سه سنگ‌شناسی اصلی دولومیت، انیدریت و آهک در چاه‌های مورد مطالعه

مطالعات متنوعی بر روی رخساره‌ها و محیط‌های رسوبی، دیاژنزی و کیفیت مخزنی بخش بالایی سازند دالان و سازند کنگان انجام شده است [۲۳، ۱۸-۲۰]. تشکیل سیستم رسوبی پرمین-تریاس، در حاشیه دریای نئوتتیس با سن تریاس پسین-سنونین، نشان‌دهنده رخداد یک حادثه ائوستازی-زمین‌ساختی اصلی، مرتبط با فرونشست حرارتی سریع در مجاورت حاشیه غیرفعال دریای نئوتتیس، در قسمت‌های جنوب‌ایران تا صفحه‌عربی بوده است. در اواخر پرمین، در اثر گسترش کف دریا، پیشروی سطح دریا و فرونشست حرارتی، سکو فلات قاره از نوع اپیریک (Epicric)، از جنوب ایران تا عربستان صعودی گسترده شده است. جغرافیای دیرینه کلی این منطقه در زمان پرمین-تریاس، نشان‌دهنده وجود یک فلات قاره در حاشیه دریای نئوتتیس به همراه یک سکوداخلی (Inner platform) خیلی پهن رمپ مانند است که دارای توپوگرافی هموار به همراه فروافتادگی‌های محلی است. بیشترین رسوب‌گذاری رخساره‌های مخزنی و گسترش آن‌ها در نواحی داخلی این سکو بزرگ، در مناطق کم‌انرژی و با عمق کم، رخ داده است [۲۴]. در خلیج فارس عضو دالان بالایی و سازند کنگان در ژرفای زمین قرار دارند و فاقد رخنمون در این حدود هستند. دالان بالایی در زیر زمین به واحدهای مخزنی K3 و K4 تقسیم می‌شود، در حالی که سازند کنگان شامل مخازن K1 و K2 است (شکل ۱) [۲۴]. واحد K4 با 154 m ضخامت، عمیق‌ترین واحد مخزنی است که بر روی عضو انیدریتی نار قرار دارد. واحد K3 با 114 m ضخامت روی واحد K4 قرار دارد. واحد K2 با ضخامت تقریبی 44 m بر روی واحد K3 و واحد K1 با ضخامت تقریبی 91 m بر روی واحد K2 قرار دارد (شکل ۱).

داده‌ها و روش‌ها

در این مطالعه، برای ساخت رخساره‌های الکتریکی و مدل‌سازی سه‌بعدی فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر

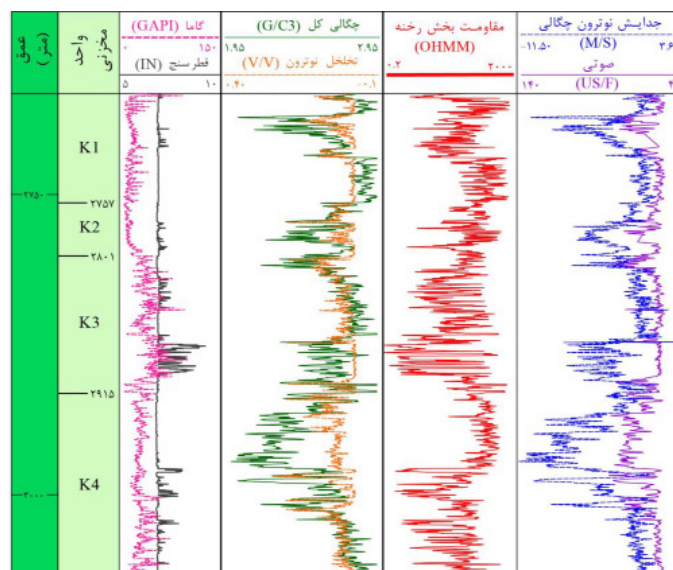
ساخت مدل رخساره الکتریکی نشانگر سنگ‌شناسی دولومیت، انیدریت و آهک، نیاز به نگاره‌هایی بود که حساسیت پایینی به تخلخل داشته باشند و در عوض در تشخیص نوع و درصد سنگ‌شناسی قابل اعتماد باشند چرا که حساسیت زیاد به تخلخل، سبب تخمین اشتباه درصد حجم اجزای جامد سنگ می‌شود که آن نیز به نوبه خود باعث تشخیص نادرست در میزان و نوع سنگ‌شناسی می‌گردد. از همین رو در ساخت مدل رخساره الکتریکی نشانگر سنگ‌شناسی از نگاره‌های چگالی، جدایش نوترون-چگالی و نسبت امواج صوتی فشاری به برشی استفاده گردید. نگار جدایش نوترون-چگالی که حساسیت پایینی به تخلخل دارد، از رابطه ۱ محاسبه شد (شکل ۲) [۲۵]:

$$\text{RhoB} = \text{Nphi} \text{ نگار نوترون}$$

$$NDS = \left[\left(\frac{\text{RhoB} - 1.95}{0.05} \right) \right] - \left[\left(\frac{0.45 - \text{Nphi}}{0.03} \right) \right] \quad (1)$$

در ساخت مدل رخساره الکتریکی سنگ‌شناسی، برای چاه کلیدی از نگار نسبت امواج صوتی فشاری به برشی به جای نگار صوتی که حساسیت کمتری به تخلخل داشت، استفاده شد ولی برای سایر چاه‌ها که نگار نسبت امواج صوتی فشاری به برشی موجود نبود، از همان نگار صوتی استفاده گردید [۳].

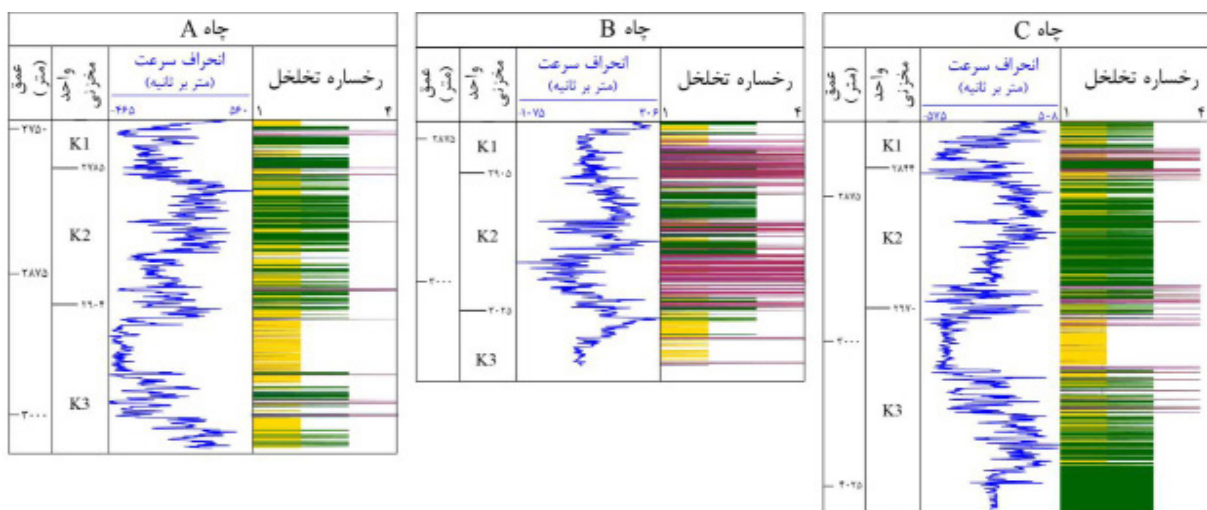
می‌باشد. رخساره الکتریکی دوم با نام انواع تخلخل و برای تشخیص مناطقی از چاه‌های مورد مطالعه که تحت تأثیر فرآیند انحلال قرار گرفته‌اند، ساخته شد. در این رخساره، علاوه بر تخلخل‌های ثانویه قالبی و حفره‌ای، سایر تخلخل‌ها از قبیل تخلخل‌های بهم متصل (Connected porosity) و قسمت‌های بدون تخلخل (Tight) مشخص می‌باشد و در نتیجه می‌توان نواحی دارای تخلخل قالبی و حفره‌ای را از سایر تخلخل‌ها مشخص کرده و آن‌ها را به رخداد فرآیند انحلال نسبت داد. از همین رو رخساره الکتریکی انواع تخلخل، می‌تواند نشانگر فرآیند دیاژنزی انحلال باشد. بر روی داده‌های چاه‌پیمایی در دسترس از دوازده چاه شامل نگاره‌های پرتوگاما، نوترون، چگالی، زمان عبور صوت، نگار مقاومت (شکل ۲) به منظور انتخاب نگاره‌های مناسب برای ساخت رخساره الکتریکی نشانگر سنگ‌شناسی و انواع تخلخل، بررسی‌های لازم صورت گرفت. در مجموعه نگاره‌های چاه‌پیمایی از چاه کلیدی نگار نسبت امواج صوتی فشاری به برشی موجود بود. معیار ارزیابی صحت نتیجه حاصل از ساخت رخساره الکتریکی نشانگر سنگ‌شناسی و انواع تخلخل در جهت تعیین نوع، میزان و عمق رخداد فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی، مقایسه نتایج به دست آمده از ساخت رخساره‌های الکتریکی با نتایج پتروگرافی چاه کلیدی بود. برای



شکل ۲ مجموعه نگاره‌های معمول (Full set) چاه کلیدی

چارچوبی دارند، همانند تخلخل قالبی یا درون فسیلی، همچنین این نواحی تراوایی کمی را نشان می‌دهند. در نواحی دارای انحراف منفی ($VDL < 500$) که سرعت‌های پایینی را نشان می‌دهند ولی تراوایی بالایی دارند، علل انحراف منفی می‌توانند فاکتورهای دیگری به غیر از سنگ‌شناسی همانند شکستگی‌های کوچک یا بزرگ مقیاس، محتوای گاز آزاد و ریزش دیواره چاه باشند [۲۶ و ۲۷]. در شکل ۳ به‌عنوان نمونه نمودار انحراف سرعت به‌همراه رخساره الکتریکی نشانگر انواع تخلخل (فرآیند انحلال) ساخته شده مربوط به سازندهای دالان (بخش بالایی) و کنگان برای سه چاه به نام‌های A, B, C که فاصله چاه A با چاه B ۱۸ کیلومتر و فاصله چاه B با چاه C ۹ کیلومتر است، متعلق به بخش مرکزی خلیج فارس نشان داده شده‌است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، تطابق خوبی میان نواحی که دارای افزایش مقدار لاگ انحراف سرعت هست با مناطقی که عمدتاً دارای تخلخل حفره‌ای هستند، وجود دارد، از طرفی در اکثر نواحی که مقدار لاگ انحراف سرعت کاش یافته، تخلخل‌های بهم متصل و نواحی بدون تخلخل دیده می‌شود. به‌علاوه نگار تخلخل ثانویه (SPI)، ساخته شد تا در صورت وجود کاستی‌هایی در هر یک از نگارهای به‌دست آمده، تشخیص نگار دیگر تصحیح گردد.

در ساخت رخساره الکتریکی نشانگر فرآیند انحلال، برای تشخیص نواحی دارای تخلخل ثانویه، استفاده از نگارهای اصلی در دسترس نتیجه خوبی نمی‌داد، چون نگارهای تخلخل، مثل نگار نوترون و چگالی، تخلخل کل و نگار صوتی، تخلخل اولیه و بهم مرتبط را نشان می‌دهند و نگار دیگری هم که عملکرد بهتری نسبت به این سه نگار یاد شده در تشخیص تخلخل‌های ثانویه داشته باشد، در اختیار نبود. یکی از نگارهایی که معمولاً در کربنات‌ها برای تعیین نوع تخلخل (عموماً تخلخل ثانویه مانند تخلخل قالبی و حفره‌ای) کاربرد دارد، نگار انحراف سرعت می‌باشد. نگار انحراف سرعت اختلاف سرعت ناشی از دو نوع نمودار تخلخل به‌ترتیب نمودار تخلخل صوتی و نمودار تخلخل نوترون و چگالی را ارائه می‌دهد که عددی منفی یا مثبت است. براساس تحقیقاتی که درخصوص نمودار انحراف سرعت به انجام رسیده است، سه نوع انحراف شامل انحراف صفر، انحراف مثبت و انحراف منفی در این نمودار قابل تشخیص است. نواحی دارای انحراف صفر ($500 < VDL < 5000$) سرعت اندکی دارند و اغلب بیانگر تخلخل بین ذره‌ای، بین‌بلوریو ریزتخلخل‌ها هستند. نواحی دارای انحراف مثبت ($VDL > 5000$) نشان‌دهنده سرعت‌های به نسبت بالایی هستند و توسط تخلخل‌هایی به‌وجود می‌آیند که فابریک



شکل ۳ مقایسه نگار انحراف سرعت و رخساره الکتریکی نشانگر انواع تخلخل (فرآیند انحلال) به‌ترتیب از چپ به راست برای چاه‌های A, B, C

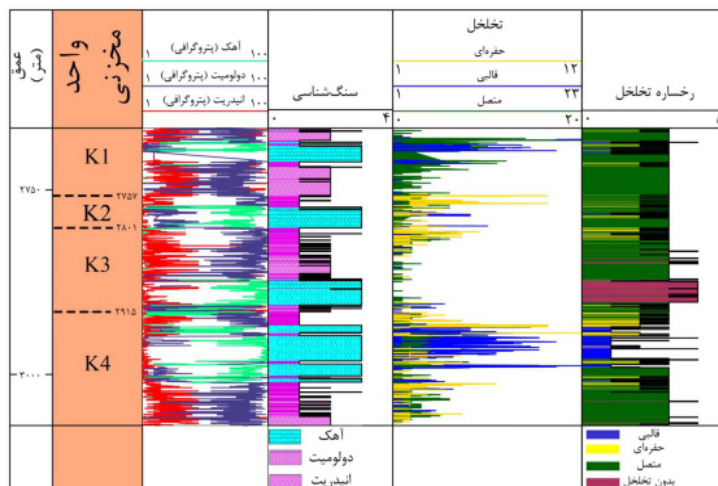
نتیجه حاصل از ساخت رخساره‌های الکتریکی که برای چاه کلیدی ترسیم شده **شکل ۴**، مقایسه گردید. ستون پتروگرافی براساس داده‌های مغزه رسم شده و درصد کانی‌ها را نشان می‌دهد اما ستون لیتوفاسیس بر مبنای فرمول‌های ارائه شده در مقاله رسم شده است و لیتولوژی غالب را نشان می‌دهد. به همین سبب، در برخی موارد در مقابل انیدریت در ستون لیتوفاسیس، تخلخل مشاهده می‌گردد. به همین ترتیب، ستون انواع تخلخل براساس مطالعات پتروگرافی و رخساره تخلخل براساس محاسبات رسم شده است. تطابق مناسبی میان مشاهدات حاصل از پتروگرافی با نتایج حاصل از ساخت رخساره‌های الکتریکی مشاهده می‌شود. البته در انطباق نتایج حاصل از رخساره‌های الکتریکی ساخته شده نسبت به نتایج پتروگرافی، درصدی از خطا دیده می‌شود که آن هم با توجه به موفقیت‌آمیز بودن مدل‌ها در پیش‌بینی واقعیت موجود (نتایج پتروگرافی) بیشتر نواحی عمقی چاه کلیدی، قابل چشم‌پوشی است (**شکل ۴**). پس از مشاهده عملکرد مناسب روش‌های به‌کاربرده شده در ساخت رخساره‌های الکتریکی نشانگر سنگ‌شناسی و انواع تخلخل برای چاه کلیدی، این روش مجدداً بر روی نگاره‌های منتخب مشابه از سایر چاه‌ها استفاده شد تا رخساره‌های الکتریکی نشانگر فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی برای دوازده چاه دیگر نیز به‌دست آید.

در ساخت نگار انحراف سرعت، مطابق با رابطه ۲ و ۳ [۲۸]، در اولین مرحله، نگار مدت زمان عبور موج صوتی از اعماق مختلف سازند به نگار سرعت عبور موج صوتی تبدیل شد. سپس مدت زمان عبور موج صوتی از ماتریکس و نهایتاً سرعت عبور موج صوتی از ماتریکس و سرعت عبور موج صوتی از کل سنگ به‌دست آمد. اختلاف سرعت عبور موج صوتی و سرعت عبور موج صوتی از سنگ، نگار انحراف سرعت را به‌دست می‌داد [۲۵].

$$\left(\frac{1}{V_{rock}}\right) = \left(\left(\frac{1-\phi}{V_{matrix}}\right) + \left(\frac{\phi}{V_{fluid}}\right)\right) \quad (2)$$

$$VDL = V_{rock} - V_{DT} \quad (3)$$

V_{Rock} = سرعت عبور موج صوتی از سنگ، V_{matrix} = سرعت عبور موج صوتی از ماتریکس، V_{fluid} = سرعت عبور موج صوتی از سیال و V_{DT} = سرعت عبور موج صوتی نگار تخلخل ثانویه، پس از محاسبه تخلخل صوتی، از طریق محاسبه تخلخل با استفاده از نگاره‌های نوترون و چگالی در قسمت تخمین قطعی (Deterministic) نرم‌افزار ژئولاگ، محاسبه گردید [۲۸]. برای سنجش میزان اعتبار مدل‌های رخساره الکتریکی نشانگر سنگ‌شناسی و انحلال به‌دست آمده برای پیش‌بینی واقعیت موجود در زیر سطح زمین، نواحی دولومیتی، انیدریتی، آهکی شناسایی شده و تخلخل قالبی، حفره‌ای، بهم مرتبط و بدون تخلخل در نتایج پتروگرافی چاه کلیدی، با

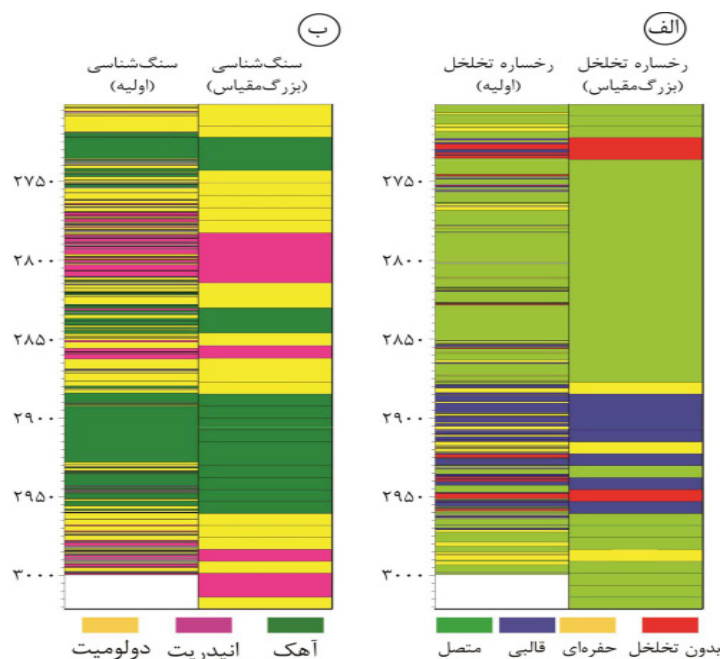


شکل ۴ مدل رخساره‌های الکتریکی ساخته شده به‌همراه مقایسه آن‌ها با مشاهدات پتروگرافی مغزه‌های چاه کلیدی

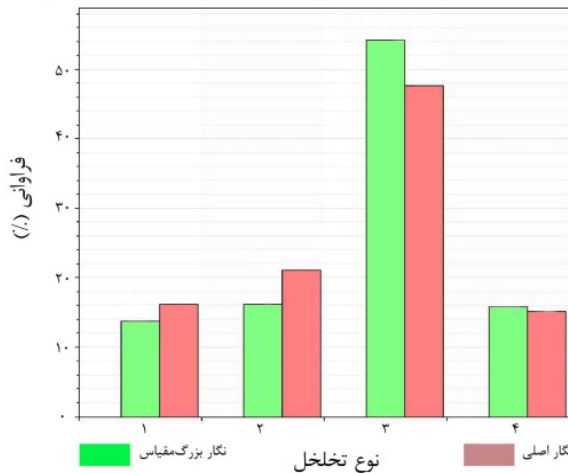
مدل‌سازی سه‌بعدی دیاژنز مؤثر بر کیفیت مخزنی

با استفاده از نتایج حاصل در قسمت ساخت رخساره‌های الکتریکی، اقدام به مدل‌سازی سه‌بعدی سنگ‌شناسی و انحلال در نرم‌افزار پترل شد. رخساره‌های الکتریکی ساخته شده در کل حجم مخزن با انجام فرآیندهای ساخت شبکه سه‌بعدی، افق‌بندی، بخش‌بندی و لایه‌بندی توزیع گردید تا بتوان نحوه تغییرات جانبی و عمودی آن‌ها را دنبال کرد. سپس در فرآیند بزرگ مقیاس کردن نگارها، بر خلاف نگار اصلی که به‌ازای هر ۱۵ cm یک مقدار داشت، نگاری ایجاد گردید که به‌ازای هر یک متر یک مقدار داشت. پس از انجام این مرحله، هم نگارهای عادی و هم بزرگ مقیاس شده برای مدل‌های سنگ‌شناسی و انواع تخلخل، در کنار هم و یا روی هم در پنجره مقطع چاه نمایش داده شده و کیفیت نتیجه فرآیند یاد شده، کنترل گردید (شکل ۵). مطابق با شکل ۵، برای هر دوازده چاه، مقایسه نگار اصلی با نگار بزرگ مقیاس شده برای هر دو رخساره الکتریکی ساخته شد. نتایج، هم‌پوشانی

خوبی را از نظر تشخیص نواحی انواع سنگ‌شناسی و انحلال مورد نظر، نشان می‌دادند (در اینجا فقط نگار اصلی و نگار بزرگ مقیاس شده یک چاه برای هر دو رخساره الکتریکی به‌عنوان مثال آورده شده است). جهت کنترل نهایی درستی نتیجه به‌دست آمده در مرحله بزرگ مقیاس کردن نگارها، هیستوگرام فراوانی نحوه توزیع مقادیر نگار اصلی و بزرگ مقیاس شده، با هم مقایسه گردید. از آنجاکه در اینجا هم شباهت خوبی میان درصد فراوانی تشخیص داده‌شده برای نواحی مشخص شده برای انواع سنگ‌شناسی و انواع تخلخل در میله‌های هیستوگرام مربوط به نگار اصلی و نگار بزرگ مقیاس شده مشاهده شد، پس نتایج حاصل از بزرگ مقیاس کردن نگارها برای ساخت مدل‌ها، مورد پذیرش واقع گردید و از آن‌ها در مرحله بعدی ساخت مدل‌ها استفاده شد (شکل ۶ و ۷). در فرآیند مدل‌سازی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار پترل، در قسمت آنالیز داده‌ها، واریوگرام داده‌ها ساخته شد و از نتایج آن در ساخت مدل‌های رخساره الکتریکی، استفاده گردید.

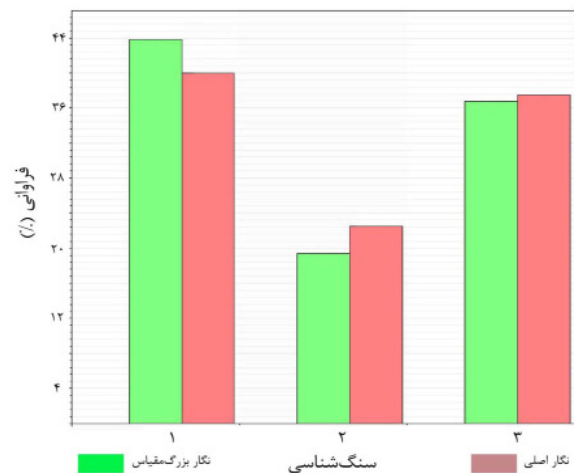


شکل ۵ نمایش نگارهای عادی و بزرگ مقیاس شده در کنار هم برای مدل‌های سنگ‌شناسی (الف) سمت چپ، رخساره الکتریکی سنگ‌شناسی و سمت راست، نگار بزرگ مقیاس شده رخساره الکتریکی سنگ‌شناسی است. تصویر (ب) سمت چپ، رخساره الکتریکی انواع تخلخل و سمت راست، نگار بزرگ مقیاس شده رخساره الکتریکی انواع تخلخل نمایش داده شده است



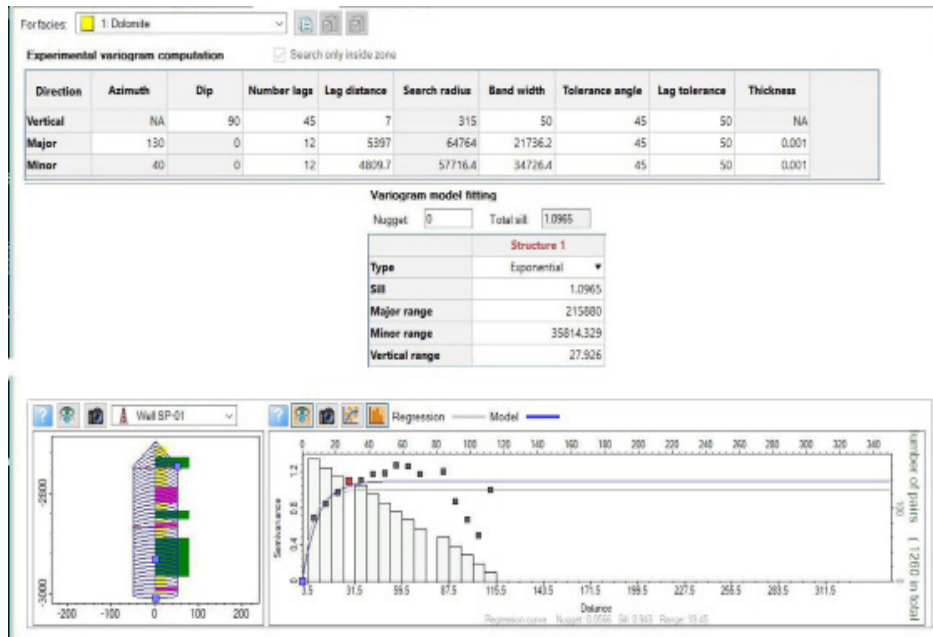
شکل ۷ نمایش هیستوگرام‌های فراوانی نگار اصلی و نگار بزرگ مقیاس شده در کنار هم برای کنترل کیفیت مدل ساخته شده انواع تخلخل در مرحله بزرگ مقیاس کردن نگار انواع تخلخل

ارتباط دارد، در ابتدا تعداد لگ طوری تعیین شد که ضخامت هر لایه را پوشش دهد. بعد کم کم مقدار آن زیادتر شد تا جایی که واریوگرام آن بخش، حالت پایدار داشته باشد. شعاع جستجوی واریوگرام عمودی از نصف ضخامت بخش مورد مطالعه بیشتر گرفته نشد. فاصله لگ هم بزرگتر از نصف ضخامت در نظر گرفته نشد. برای محاسبه واریوگرام تجربی در جهات اصلی و فرعی (منظور از واریوگرام در جهات اصلی و فرعی در اینجا، همان واریوگرام افقی است) (شکل‌های ۱۳-۱۰)، به منظور تعیین توزیع افقی داده‌ها، از اطلاعاتی که در برگه محاسبه واریوگرام تجربی بود، استفاده شد، با این تفاوت که کشیدن منحنی واریوگرام برای هر برگه به طور جداگانه و عموماً دستی کشیده شد و تعیین شعاع جستجو داده مخروط هم برای جهات اصلی و فرعی با توجه به تحت پوشش قراردادن حداکثری داده‌ها و رعایت نکات گفته شده، در هر جهت به طور جداگانه و دستی صورت گرفت [۱۰]. در شکل‌های ۱۳-۱۰، نمونه‌ای از نمودار واریوگرام داده‌ها دیده می‌شود. پس از انجام مرحله آنالیز داده‌ها نوبت به اجرای الگوریتم زمین‌آماری مناسب بر روی داده‌های رخساره‌های الکتریکی ساخته شده می‌رسد.

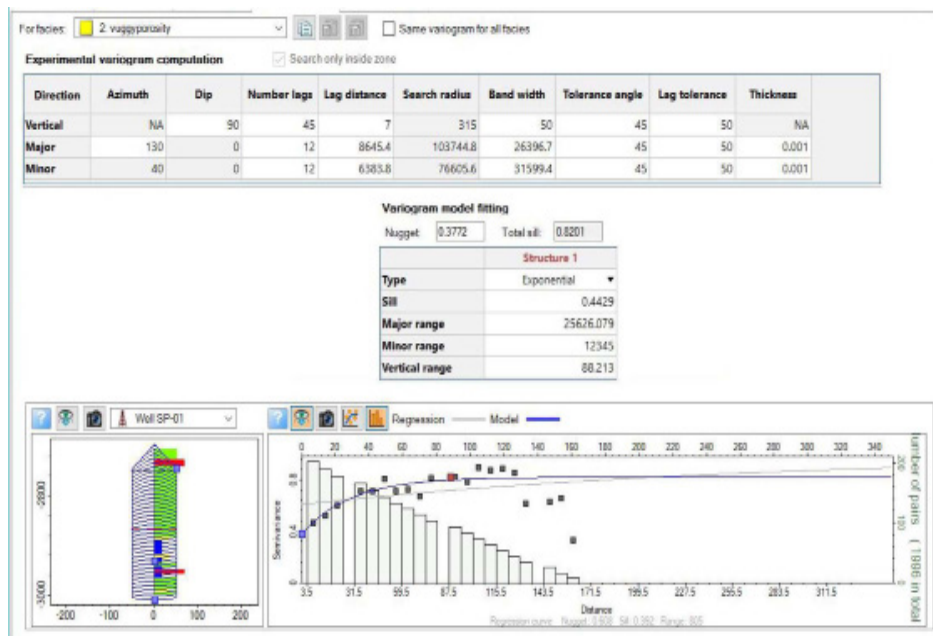


شکل ۶ نمایش هیستوگرام‌های فراوانی نگار اصلی و نگار بزرگ مقیاس شده در کنار هم برای کنترل کیفیت مدل ساخته شده سنگ‌شناسی در مرحله بزرگ مقیاس کردن نگار سنگ‌شناسی

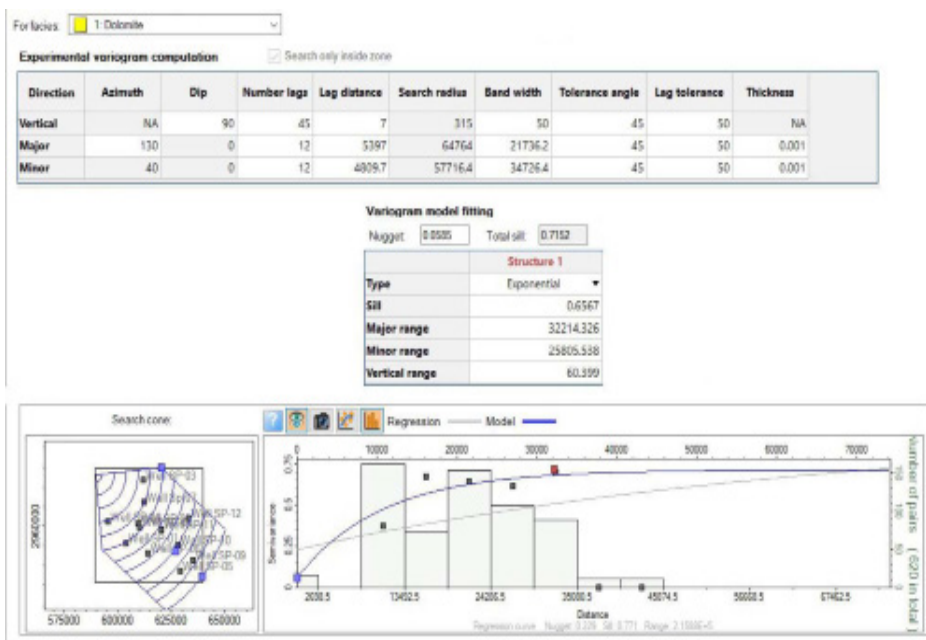
به طور کلی در قسمت محاسبه واریوگرام تجربی (شکل‌های ۹ و ۸)، از آنجاکه تعداد لگ، به تعداد چاه موجود در جهت آنالیز بستگی دارد و در اینجا ۱۲ چاه در آن راستا هستند، پس باید شماره لگ ۱۲ در نظر گرفته می‌شود. شعاع جستجو مخروط (search radius cone) را از زیاد به کم، تا نزدیک محدوده تغییر داده و رفتار واریوگرام، مورد بررسی قرار گرفت. با وجود ناهمگنی مخزن، چون هدف مدل‌سازی رخساره‌های الکتریکی ساخته شده برای مخزن بود و باید پوشش حداکثری تمام اطلاعات موجود اتفاق می‌افتاد، زاویه تغییر (Tol- ereznce angle) حدود 45° در نظر گرفته شد. پهنای باند، به علت وجود انیزوتروپی و زیاد بودن تعداد چاه‌ها، بین یک تا سه برابر فاصله لگ‌ها تعیین شده است. برای تعیین تغییر لگ، قاعده کلی این است که اگر داده‌ها زیاد و شبکه هم یکنواخت باشد، باید ۲۵٪ فاصله لگ در نظر گرفته شود، اما چون داده‌ها کمتر از قاعده کلی بود، امکان افزایش این مقدار تا ۷۰٪ بود. در چاه‌های عمودی، پهنای باند و زاویه تغییر باید کمتر می‌شد، و گرنه تغییرات شدید می‌شدند، پس زاویه 7° انتخاب گردید. در مورد برگه واریوگرام عمودی (شکل‌های ۹ و ۸)، از آنجاکه فاصله جفت داده‌ها به ناهمگنی مخزن



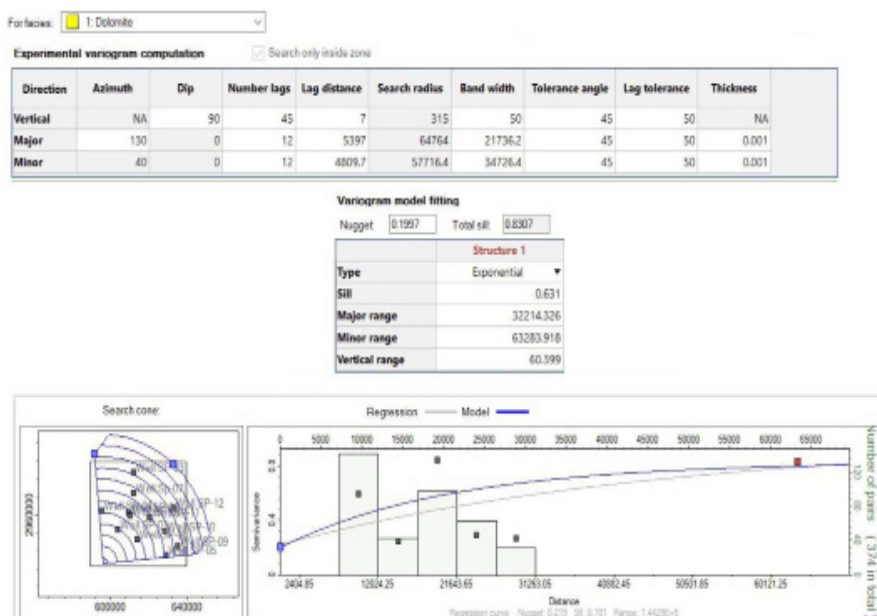
شکل ۸ نمونه واریوگرام عمودی در پنجره آنالیز داده‌ها برای ساخت مدل سنگ‌شناسی



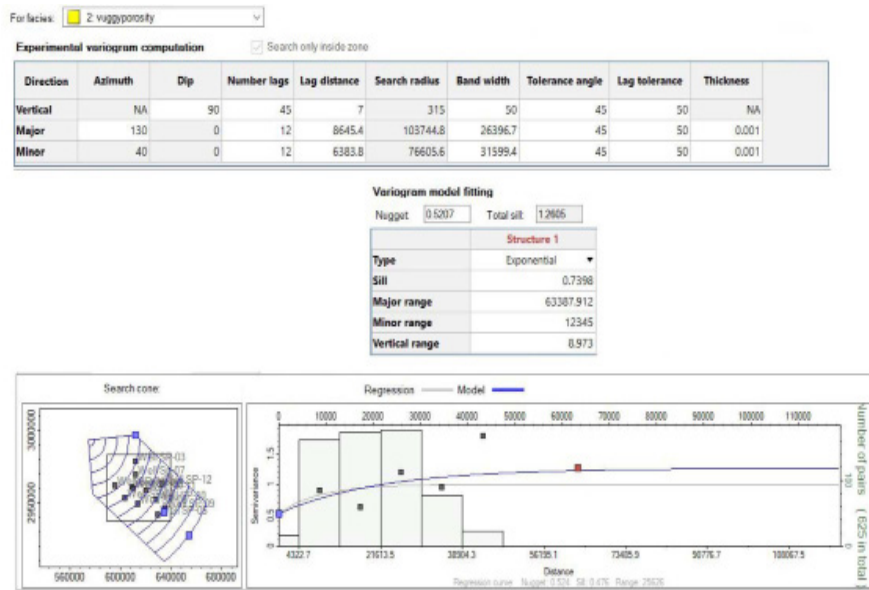
شکل ۹ نمونه واریوگرام عمودی در پنجره آنالیز داده‌ها برای ساخت مدل انواع تخلخل



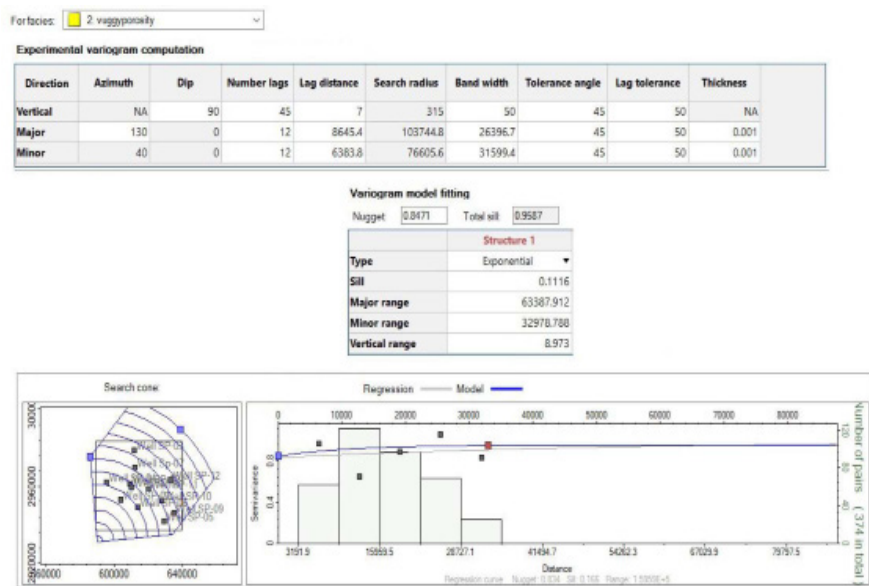
شکل ۱۰ نمونه واریوگرام افقی در جهت اصلی در پنجره آنالیز داده‌ها برای ساخت مدل سنگ‌شناسی



شکل ۱۱ نمونه واریوگرام افقی در جهت فرعی در پنجره آنالیز داده‌ها برای ساخت مدل سنگ‌شناسی



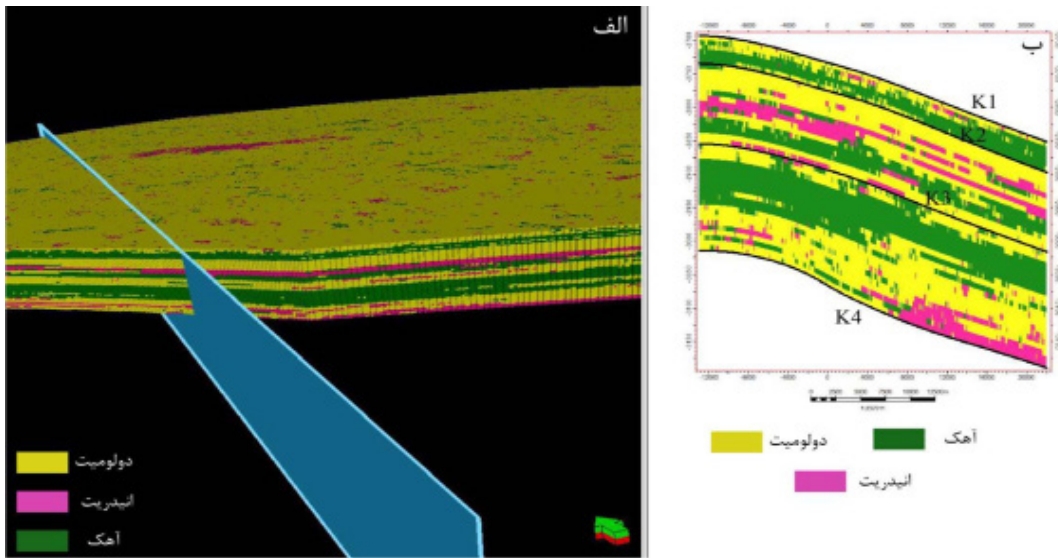
شکل ۱۲ نمونه واریوگرام افقی در جهت اصلی در پنجره آنالیز داده‌ها برای ساخت مدل انواع تخلخل



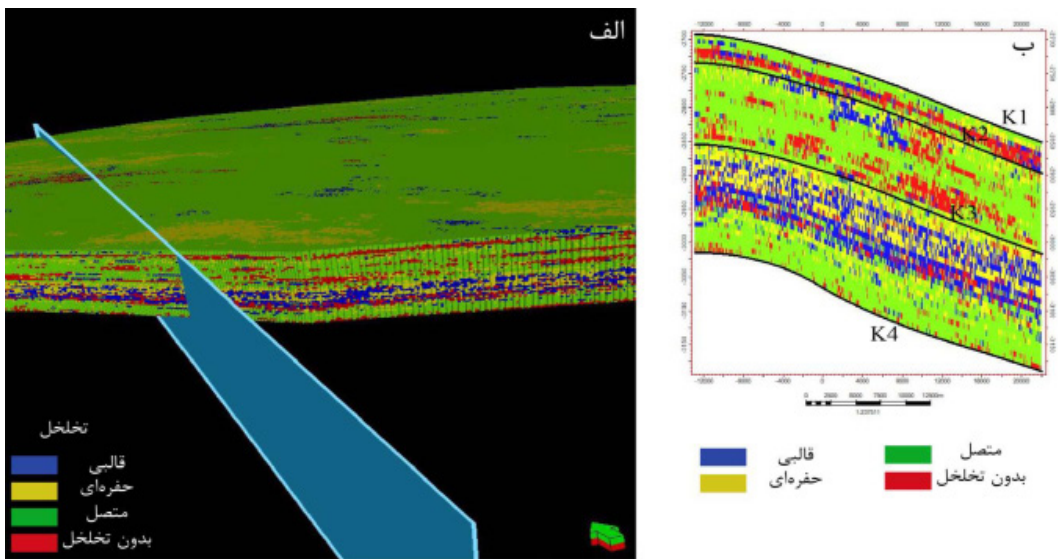
شکل ۱۳ نمونه واریوگرام افقی در جهت فرعی در پنجره آنالیز داده‌ها برای ساخت مدل انواع تخلخل

این روش هر رخساره الکتریکی به‌طور مجزا مورد بررسی قرار گرفته و از آنجا که مقادیر رخساره الکتریکی، ناپیوسته هستند، درصد آن بخش به بخش و جدا از بقیه مقادیر محاسبه و توزیع گردید. در نهایت مدل‌های سه‌بعدی نشانگر سنگ‌شناسی و انحلال، برای سازندهای دالان (بخش بالایی) و کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس، ساخته شد (شکل‌های ۱۵ و ۱۴).

به این ترتیب که مقادیر بلوک‌های معلوم با کمک روش تخمین زمین‌آماري کریجینگ در سرتاسر ناحیه مورد مطالعه توزیع گردید، به طوری که همه سلول‌ها، دارای مقادیر عددی نزدیک به واقعیت، متناسب با نوع فرآیندهای دیاژنی مؤثر بر کیفیت مخزنی، شدند. در واقع از روش شبیه‌سازی شاخص ترتیبی (Sequential indicator simulation) برای مدل‌سازی سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی استفاده گردید [۱۰]. در



شکل ۱۴ برش قائم از مدل الف) برای عضو بالایی سازند دالان و سازند کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس و دید جانبی آن (ب) از مدل سه‌بعدی سنگ‌شناسی شامل بخش‌های مخزنی (به ترتیب از سمت بالا به پایین تصویر) K1, K2, K3 به همراه جایگاه سر بخش‌های مخزنی (به ترتیب از سمت بالا به پایین تصویر شامل سر بخش‌های مخزنی K1, K2, K3, K4)



شکل ۱۵ برش قائم از مدل الف) برای عضو بالایی سازند دالان و سازند کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس و جایگاه آن در دید جانبی (ب) از مدل سه‌بعدی انواع تخلخل شامل بخش‌های مخزنی (به ترتیب از سمت بالا به پایین تصویر) K1, K2, K3 به همراه جایگاه سر بخش‌های مخزنی (به ترتیب از سمت بالا به پایین تصویر شامل سر بخش‌های مخزنی K1, K2, K3, K4)

نشود. از طرفی مدل‌های ساخته شده در مقیاس ناحیه مورد مطالعه، شامل ۴۲ برش افقی می‌شوند که برش‌های شماره ۱ تا شماره ۶ متعلق به واحد مخزنی K1، برش‌های شماره ۷ تا شماره ۲۱ متعلق به واحد مخزنی K2 و برش‌های شماره ۲۲ تا ۴۲ متعلق به واحد مخزنی K3 هستند.

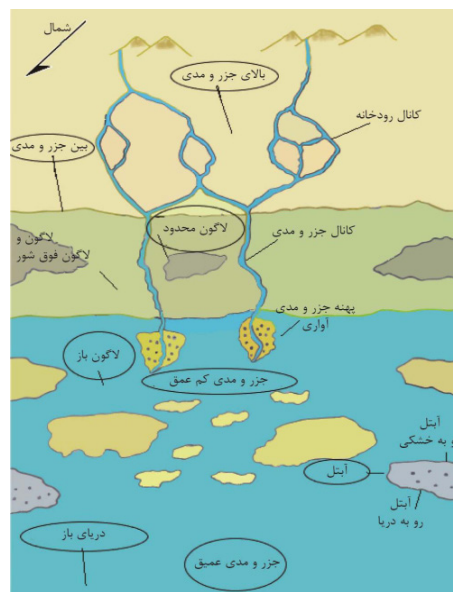
شایان ذکر است که به‌علت در دست نبودن داده عمقی از سرعضو نار برای دوازده چاه مورد مطالعه در میدان مورد تحقیق (داده عمقی از سرعضو نار تنها برای چاه کلیدی موجود بود)، مدل‌های سه‌بعدی تنها برای سه بخش مخزنی K1, K2, K3 ساخته شد و مدل‌سازی واحد K4 انجام

به سمت شمال قرار داشته‌اند **شکل ۱۶**، پس از جنوب به سمت شمال برش‌های افقی مدل‌ها، عمق زیادتر می‌شود (**شکل ۱۶**). با توجه به مدل دولومیتی شدن نشتی-بازگشتی [۱۹] و اینکه عمده فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی (دولومیتی شدن، انیدریتی شدن و انحلال) رمپ کربناته پرمین-تریاس خلیج فارس، متأثر از محیط رسوبی و فرآیندهای هم‌زمان با رسوب‌گذاری بوده‌اند [۱۹]، دولومیتی شدن، باید در قسمت‌های جنوبی و میانی برش‌های افقی، بیشتر از قسمت‌های شمالی باشد (**شکل ۱۷**). همچنین از آنجا که انیدریت هم با توجه به مدل نشتی-بازگشتی دولومیتی شدن، عمدتاً در امتداد با رخداد دولومیت به وجود می‌آمده است، بنابراین در بخش جنوبی و میانی برش‌های افقی مدل‌ها، حضور انیدریت محتمل‌تر از قسمت‌های شمالی است (**شکل ۱۸**). پدیده دیاژنزی انحلال هم که منجر به تشکیل تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای شده‌است، عمدتاً در زمانی که ارتفاع سطح آب دریا پایین بوده، رخ داده‌است. پس احتمال رخداد پدیده انحلال، تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای در قسمت‌های جنوبی و میانی برش‌های افقی، بیشتر از قسمت‌های شمالی میدان است (**شکل ۱۷**). پایین‌ترین ارتفاع سطح آب دریا، در K4 میانی، K3 پایینی، K2 بالایی، پایین‌تر بودن ارتفاع سطح آب دریا، مطابق با مدل نشتی-بازگشتی [۱۹]، در زیر محیط‌های سابخا، قبل جزرومدی و لاگون، عمده فرآیندهای انیدریتی شدن و دولومیتی شدن رخ می‌دهد. فرآیند انحلال هم بیشتر در قسمت‌هایی که خارج از آب و در معرض هوا قرار گرفتند، به وقوع می‌پیوندد [۳۱ و ۲۴]. در نتیجه بیشتر تخلخل قالبی و حفره‌ای هم باید در بخش‌هایی از توالی قائم دیده شود که در زمان پرمین-تریاس، کمترین ارتفاع سطح آب دریا را در خود ثبت کرده‌اند. بنابراین بیشترین قسمت‌های دولومیتی شده در K1 بالایی، K2 بالایی و K3 پایینی است.

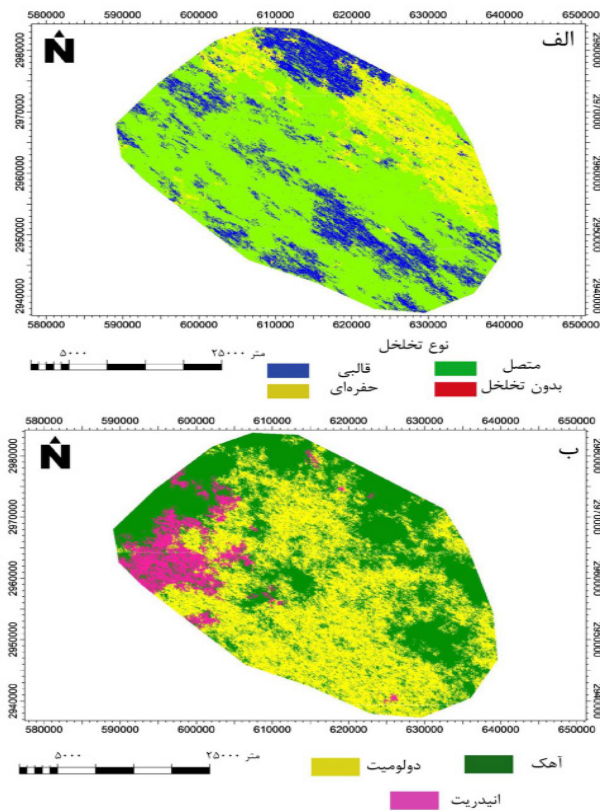
به ترتیب برش شماره ۱ مربوط به سرسازند K1، برش شماره ۷ مربوط به سرسازند K2، برش شماره ۲۲ مربوط به سرسازند K3 و برش شماره ۴۲ مربوط به سرسازند K4 است.

بحث و نتایج

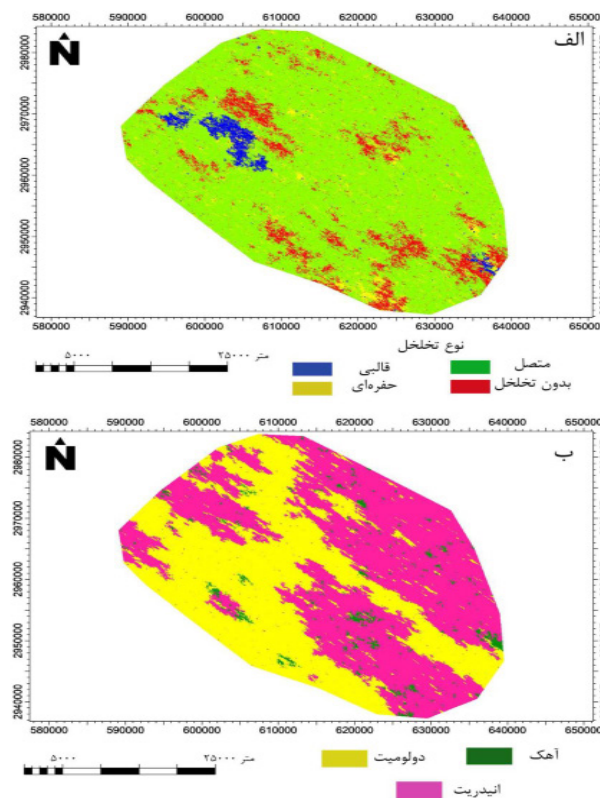
برای ارزیابی میزان اعتبار مدل‌های سه‌بعدی ساخته شده برای پیش‌بینی واقعیت موجود از روند افقی-قائم رخداد فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی، تغییرات فرآیندهای ذکر شده بر مبنای مطالعات زمین‌شناسی پیشین [۱۸-۲۳] و نتایج حاصل از این مطالعه تفسیر شده است. ریزرخساره‌های مربوط به زیر محیط‌های رسوبی بالای جزرومدی، لاگون و آبتل (Shoal) [۱] تشکیل‌دهنده محیط رسوبی رمپ کربناته پرمین-تریاس خلیج فارس هستند [۳۰، ۲۹ و ۲۴] (**شکل ۱۶**).



شکل ۱۶ در کنار هم قرارگیری زیر محیط‌های رمپ کربناته قبل جزرومدی، لاگون و آبتل مربوط به سازندهای دالان (بخش بالایی) و کنگان، بخش مرکزی خلیج فارس با توجه به جهت قرارگیری زیر محیط‌های رسوبی رمپ کربناته پرمین-تریاس خلیج فارس نسبت به شمال جغرافیایی **شکل ۱۶**، از آنجا که زیر محیط‌های قبل جزرومدی، لاگون و آبتل به ترتیب از جنوب



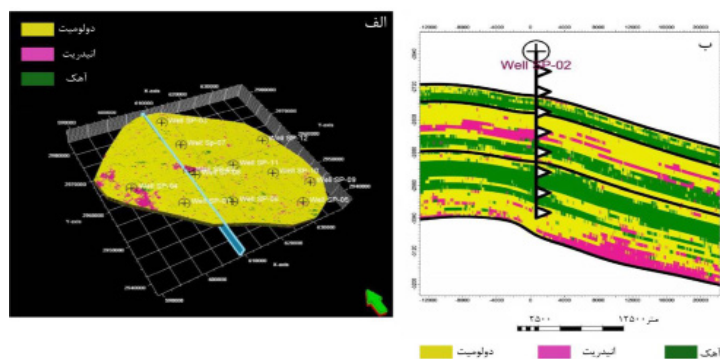
شکل ۱۷ برش افقی شماره ۲ از مدل‌های سه‌بعدی انواع تخلخل و سنگ‌شناسی. برش افقی برگرفته از مدل انواع تخلخل (الف) و برش افقی برگرفته از مدل سنگ‌شناسی (ب)



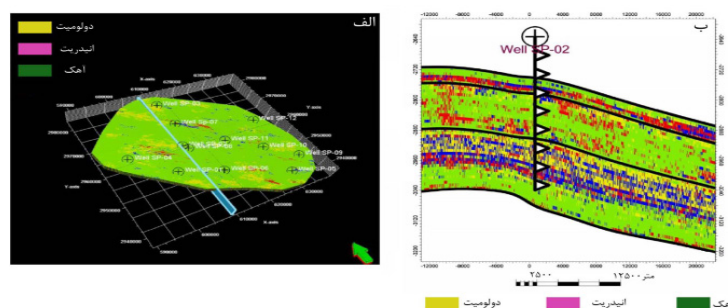
شکل ۱۸ برش افقی شماره ۱۰ از مدل‌های سه‌بعدی انواع تخلخل (الف) و سنگ‌شناسی (ب)

مثال می‌توان به رخداد بخشی از این فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی در محیط دیاژنزی دفنی، مانند دولومیتی‌شدن ثانویه نواحی آهکی، یا حرکت انیدریت و جابه‌جایی مداوم آن در بخش‌های عمقی مختلف، به‌خاطر چگالی پایین آن، و به‌وجود آمدن ثانویه انیدریت در زمان‌های نزدیک به اکنون اشاره نمود. این موضوع به نوبه خود تحت تأثیر تجزیه کانی‌های گوگردار (مانند خود گوگرد یا پیریت) توسط باکتری‌های غیرهوازی در عمق‌های کم است. بخشی از این روندها نیز به‌وجود همیشگی درصدی از خطا در روند ساخت مدل برای بازسازی فرآیندهای پیچیده دیاژنزی باز می‌گردد. با توجه به موارد ذکر شده مورد سؤال در نتایج حاصل از مدل‌ها، نیاز به منابع اطلاعاتی بسیار بیشتری نسبت به منابع مطالعاتی این تحقیق، برای ساخت دقیق‌تر مدل‌ها و تجزیه و تحلیل علل رخداد و روند رخداد مشاهده‌ای از فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی در زیر سطح زمین و اثبات دلایل است.

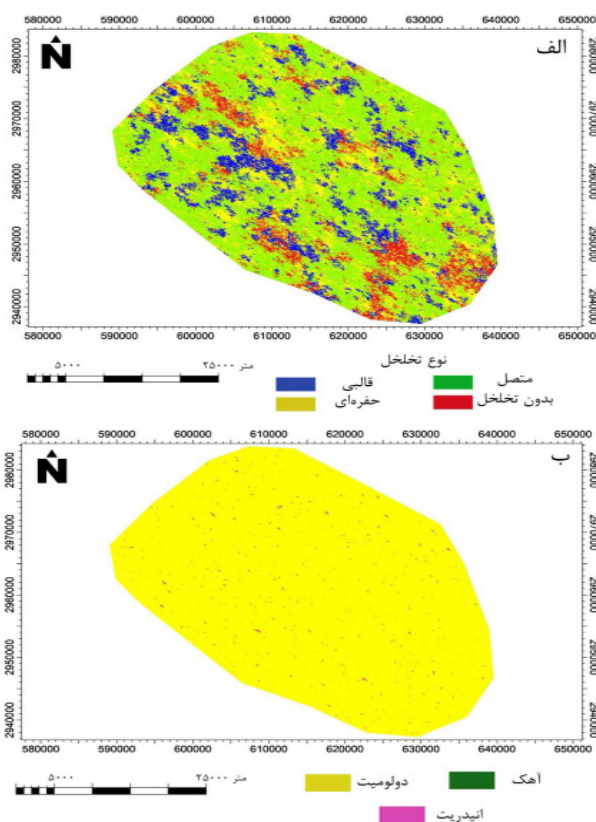
بیشترین قسمت‌های انیدریتی‌شده در K1 بالایی، K2 میانی و K3 پایینی تا بالای مرز K4 است (شکل ۱۹). بیشترین محل رخداد تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای منطبق بر K1 بالایی، K2 بالایی و K3 پایینی است (شکل ۲۰). با وجود این که نتایج تحقیق انجام شده، نشان داد که ترکیب ارائه شده از نگارهای اندازه‌گیری شده و ساخته‌شده، مدل‌های سه‌بعدی مناسبی را جهت پیش‌بینی تغییرات دیاژنزی میدان فراهم کرده است، با توجه به محیط رسوبی بخش مورد مطالعه شکل ۱۶، در برخی از برش‌های افقی، روندهای مشاهده‌ای از رخداد فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی، قابل تفسیر نیست. برای مثال برخی از برش‌ها کاملاً دولومیتی‌شده شکل ۲۱ یا کاملاً آهکی شده است شکل ۲۲، یا در برخی از برش‌ها، قسمت‌های آهکی منطبق بر قسمت‌های بدون تخلخل است (شکل ۲۳). بخشی از این روندها، به‌علت عدم تابعیت رخداد فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی از محیط رسوبی اولیه است [۳۲-۳۴]. برای



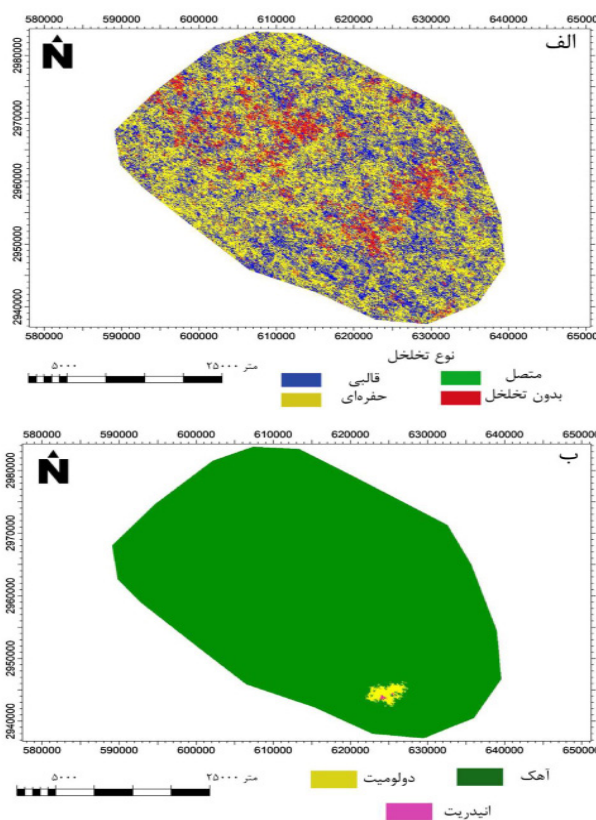
شکل ۱۹ محل برش قائم الف) به‌همراه برش قائم ب) از مدل سه بعدی سنگ‌شناسی



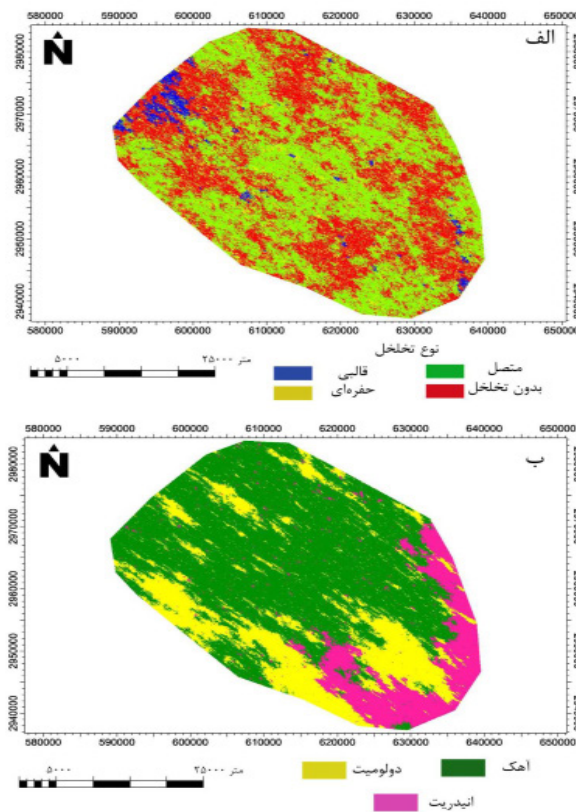
شکل ۲۰ محل برش قائم الف) به‌همراه برش قائم ب) از مدل سه بعدی انواع تخلخل



شکل ۲۱ برش افقی شماره ۸ از مدل‌های سه‌بعدی انواع تخلخل (الف) و سنگ‌شناسی (ب)



شکل ۲۲ برش افقی شماره ۲۶ از مدل‌های سه‌بعدی انواع تخلخل (الف) و سنگ‌شناسی (ب)



شکل ۲۳ برش افقی شماره ۱۷ از مدل های سه بعدی انواع تخلخل الف) و سنگ شناسی ب)

نتیجه گیری

مطالعه رخساره‌ها، فرآیندهای دیاژنزی و مدل سازی سه بعدی رخساره‌های الکتریکی دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی در مخازن پرمین-تریاس خلیج فارس نشان می‌دهد: - استفاده از نگاره‌های جدایش نوترون-چگالی، نسبت امواج صوتی فشاری به برشی و چگالی برای ساخت رخساره الکتریکی نشانگر سنگ شناسی و نگاره‌های انحراف سرعت و تخلخل ثانویه برای ساخت رخساره الکتریکی نشانگر انحلال براساس روش خوشه بندی چندتفکیکی بر پایه گراف، موفقیت آمیز بود. - استفاده از نگاره‌های ساخته شده از تلفیق نگاره‌های اصلی) همانند جدایش نوترون-چگالی، انحراف سرعت و تخلخل ثانویه) برای ساخت رخساره‌های الکتریکی نشانگر سنگ شناسی و انحلال، می‌تواند در مواردی که تنها نگاره‌های معمول و ابتدایی چاه پیمایی در دسترس هستند، راهکار مناسبی در جهت حل مشکل مدل سازی فرآیندهای دیاژنزی

مؤثر بر کیفیت مخزنی باشد.

- اعمال روش تخمین زمین آماری کریجینگ با رعایت اصول زمین آماری، برای ساخت مدل سه بعدی سنگ شناسی و انحلال از روی داده‌های رخساره‌های الکتریکی ساخته شده متعلق به دوازده چاه، برای ناحیه مورد مطالعه در مقیاس میدان، سودمند واقع گردید. - زیر محیط‌های سابخا، قبل جزرومدی و لاگون در زمان پرمین-تریاس، در بخش جنوبی مدل واقع بوده‌اند. - روند رخداد فرآیندهای دیاژنزی دولومیتی شدن و انیدریتی شدن عمدتاً از سمت جنوب (منظور جهات جغرافیایی است) به سمت شمال برش‌های افقی حاصل از میدان است. - بیشترین تمرکز رخداد فرآیندهای دیاژنزی دولومیتی شدن و انیدریتی شدن، در قسمت‌های جنوبی و میانی است تا قسمت‌های شمالی.

- مطابق با مشاهدات حاصل از برش‌های عمودی مدل‌های ساخته شده برای میدان، از آنجاکه پایین‌ترین ارتفاع سطح آب دریا تقریباً در K4 میانی، K3 پایینی، K2 بالایی، K2 میانی و K1 بالایی است، عمده قسمت‌های دولومیتی‌شده در K1 بالایی، K2 بالایی و K3 پایینی است. عمده قسمت‌های انیدریتی در K1 بالایی، K2 میانی و K3 پایینی تا بالای مرز K4 است. قسمت‌های آهکی در K1 پایینی، قسمت‌هایی از K2 پایینی و K3 بالایی است.

- از روی مدل‌های سه‌بعدی سنگ‌شناسی و انحلال، روند تغییرات جانبی فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی مشخص گردید که می‌تواند در مراحل بعدی، راهنمای خوبی برای انتخاب محل چاه‌های جدید باشد.

- روند رخداد فرآیند دیاژنزی انحلال عمدتاً از سمت جنوبی به سمت شمالی برش‌های افقی میدان است.

- بیشترین تمرکز تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای در قسمت‌های جنوبی تا میانی برش‌های افقی است.

- علت رخداد روند جنوبی-شمالی فرآیندهای دولومیتی‌شدن، انیدریتی‌شدن و انحلال در برش‌های افقی از میدان مورد مطالعه، رخداد هم‌زمان با رسوب‌گذاری فرآیندهای یادشده در محیط‌های سابخا، قبل جزرومدی و لاگون است.

- فرآیندهای دولومیتی‌شدن و انیدریتی‌شدن عمدتاً به شکل اولیه و هم‌زمان با رسوب‌گذاری (مطابق با مدل دولومیتی‌شدن نشتی-بازگشتی) و در محیط دیاژنز دریایی و جوی رخ داده و بخش اندکی از آن نیز در محیط دیاژنز دفنی به‌وقوع پیوسته است.

مراجع

- [1]. Tavakoli, V., & Jamalian, A. (2019). Porosity evolution in dolomitized Permian-Triassic strata of the Persian Gulf, insights into the porosity origin of dolomite reservoirs, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 181, 106191, doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106191.
- [2]. Tavakoli, V., Rahimpour-Bonab, H., & Esrafil-Dizaji, B. (2011). Diagenetic controlled reservoir quality of South Pars gas field, an integrated approach, *Comptes Rendus Geoscience*, 343(1), 55-71, doi.org/10.1016/j.crte.2010.10.004.
- [۳]. رابیلر، فیلیپ. (۱۳۹۸). اصول رخساره‌های الکتریکی، ترجمه رحیمی بهار و پورصیامی، چاپ اول، تهران، انتشارات ستایش، ۷۳-۷۵.
- [4]. Anselmetti, F. S., & Eberli, G. P. (1999). The velocity-deviation log: a tool to predict pore type and permeability trends in carbonate drill holes from sonic and porosity or density logs, *AAPG Bulletin*, 83(3), 450-466, doi.org/10.1306/00AA9BCE-1730-11D7-8645000102C1865D.
- [5]. Ohen, H. A., Ajufo, A. O., & Enwere, P. M. (1996, May). Laboratory NMR relaxation measurements for the acquisition of calibration data for NMR logging tools, In *SPE Western Regional Meeting*, SPE-35683, doi.org/10.2118/35683-MS.
- [6]. Paradigm B.V., *Electrofacies Analysis Using Facimage in Geolog 8 Paradigm®* 17, 2017, 6-2.
- [7]. Perez, H. H., Datta-Gupta, A., & Mishra, S. (2005). The role of electrofacies, lithofacies, and hydraulic flow units in permeability prediction from well logs: a comparative analysis using classification trees, *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 8(02), 143-155, doi.org/10.2118/84301-PA.
- [8]. Serra, O. (1984). *Fundamentals microscanner image interpretation*, Schlumberger Educational Services, Houston, Texas, 115.
- [۹]. مدنی، آ.، کمری، م. و رستمیان، ع. (۱۳۹۲). فصل‌های دوم و سوم، مدل‌سازی رخساره‌الکتریکی و پیش‌بینی نگار با استفاده از نرم‌افزار ژئولاگ، چاپ اول، تهران، انتشارات کتاب آوا.
- [۱۰]. امین‌زاده، ع.، میرجردوی، ا. و نوری طالقانی، م. (۱۳۹۲). فصل‌های سوم، دهم، دوازدهم و سیزدهم، مدل‌سازی استاتیک مخازن نفت و گاز و تفسیر سائیزمیک با استفاده از نرم‌افزار Petrel، چاپ اول، تهران، انتشارات آژاده.
- [11]. Ren, S., Yao, G., & Zhang, Y. (2019). High-resolution geostatistical modeling of an intensively drilled heavy

oil reservoir, the BQ 10 block, Biyang Sag, Nanxiang Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 104, 404-422, doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.03.026.

[۱۲]. حسنی پاک، ع. و شرف‌الدین، م. (۱۳۸۰). تحلیل داده‌های اکتشافی، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.

[13]. Konyuhov, A. I., & Maleki, B. (2006). The Persian Gulf Basin: Geological history, sedimentary formations, and petroleum potential, *Lithology and Mineral Resources*, 41, 344-361.

[14]. Jamaljan, A., & Tavakoli, V. (2022). Toward the standardization of heterogeneity evaluation in carbonate reservoirs: a case study of the central Persian Gulf, *Arabian Journal of Geosciences*, 15(6), 495.

[15]. Kashfi, M. S. (1992). Geology of the Permian "Super-Giant" gas reservoirs in the greater Persian Gulf area, *Journal of Petroleum Geology*, 15(3), 465-480, doi.org/10.1111/j.1747-5457.1992.tb00720.x.

[16]. Alsharhan, A.S., Nairn, A.E.M. (1997). *Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East*, 20, Elsevier, 1376 AP, Technology & Engineering, 878.

[17]. Ehrenberg, S. N., Nadeau, P. H., & Aqrabi, A. A. M. (2007). A comparison of Khuff and Arab reservoir potential throughout the Middle East, *AAPG bulletin*, 91(3), 275-286, doi.org/10.1306/09140606054.

[18]. Esrafil-Dizaji, B., & Rahimpour-Bonab, H. (2009). Effects of depositional and diagenetic characteristics on carbonate reservoir quality: a case study from the South Pars gas field in the Persian Gulf, *Petroleum Geoscience*, 15(4), 325-344, doi.org/10.1144/1354-079309-817.

[19]. Rahimpour-Bonab, H., Esrafil-Dizaji, B., & Tavakoli, V. (2010). Dolomitization and anhydrite precipitation in permo-triassic carbonates at the South Pars gasfield, offshore Iran: controls on reservoir quality, *Journal of Petroleum Geology*, 33(1), 43-66, doi.org/10.1111/j.1747-5457.2010.00463.x.

[20]. Tavakoli, V. (2015). Chemostratigraphy of the Permian-Triassic strata of the Offshore Persian Gulf, Iran, In: Ram Kumar, M., (Ed.), *Chemostratigraphy: Concepts, Techniques, and Applications* Elsevier 373-393, doi.org/10.1016/B978-0-12-419968-2.00014-5.

[21]. Nazemi, M., Tavakoli, V., Rahimpour-Bonab, H., Hosseini, M., & Sharifi-Yazdi, M. (2018). The effect of carbonate reservoir heterogeneity on Archie's exponents (a and m), an example from Kangan and Dalan gas formations in the central Persian Gulf, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 59, 297-308, doi.org/10.1016/j.jngse.2018.09.007.

[22]. Tavakoli, V., & Jamaljan, A. (2018). Microporosity evolution in Iranian reservoirs, Dalan and Dariyan formations, the central Persian Gulf, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 52, 155-165, doi.org/10.1016/j.jngse.2018.01.028.

[23]. Nazari, M. H., Tavakoli, V., Rahimpour-Bonab, H., & Sharifi-Yazdi, M. (2019). Investigation of factors influencing geological heterogeneity in tight gas carbonates, Permian reservoir of the Persian Gulf, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 183, 106341, doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106341.

[24]. Insalaco, E., Virgone, A., Courme, B., Gaillot, J., Kamali, M., Moallemi, A., Lotfpour, M., Monibi, S. (2006). Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture. *GeoArabia*, 11, 2.

[۲۵]. مدنی، آ.، کمبری، م. و رستمیان، ع. (۱۳۹۲). فصل‌های دوم و سوم، مدل‌سازی رخساره‌الکتریکی و

پیش‌بینی نگار با استفاده از نرم‌افزار ژئولاگ، چاپ اول، تهران، انتشارات کتاب آوا.

[26]. Amraei, H., Falahat, R. (2021). Improved ST FZI method for permeability estimation to include the impact of porosity type and lithology, *Petroleum Exploration and Production Technology*, 11, 109-115.

[۲۷]. کدخدایی، ع. (۱۳۹۷). ارزیابی سازندهای نفت‌دار، چاپ اول، تهران، انتشارات دایره دانش، ۲۷۶.

[۲۸]. مقصودی‌اکبری، م.، هاشمیان، خ. و احمدی، ا. (۱۳۹۷). فصل هفتم، مرجع کامل و کاربردی نرم‌افزار

GEOLOG، چاپ اول، تهران، انتشارات مثبت.

[29]. Al-Aswad, A. A. (1997). Stratigraphy, sedimentary environment and depositional evolution of the Khuff Formation in south-central Saudi Arabia, *Journal of Petroleum Geology*, 20(3), 307-326, doi.org/10.1111/j.1747-5457.1997.tb00638.x.

[30]. Alsharhan, A. S., & Kendall, C. S. C. (2003). Holocene coastal carbonates and evaporites of the southern Arabian Gulf and their ancient analogues, *Earth-Science Reviews*, 61(3-4), 191-243, doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00110-1.

[31]. Tavakoli, V. (2017). Application of gamma deviation log (GDL) in sequence stratigraphy of carbonate strata, an example from offshore Persian Gulf, Iran, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 156, 868-876, doi.org/10.1016/j.petrol.2017.06.069.

[۳۲]. خوشبخت، ف. (۱۳۹۲). تعیین سیستم تخلخل سه‌گانه در یک مخزن کربناته با استفاده از لاگ تصویرگر

و لاگ‌های چاه‌پیمایی، پژوهش نفت، ۲۳ (۷۵)، ۷۸-۸۸.

- [۳۳]. مرادی، م.، موسوی حرمی، ر.، محبوبی، ا. و خانه‌باد، م. (۱۳۹۷). انواع دولومیت‌های سازند آسماری در میدان نفتی آغاچاری و تاثیر آنها بر روند نمودارهای تزریق جیوه، پژوهش نفت، ۲۸ (۱۰۳)، ۶۷-۵۱.
- [۳۴]. صرفی، م. و اسعدی، ع. (۱۳۹۶). ویژگی‌های مخزنی توالی‌های دولومیتی سازند عرب، مطالعه موردی در یکی از میداین هیدروکربنی خلیج‌فارس، پژوهش نفت، ۲۷ (۹۷)، ۸۷-۷۳.



A Proper Method for Constructing Electrofacies and Three-dimensional Modeling of Diagenetic Processes Effective on Reservoir Quality, Upper Dalan Member and Kangan Formation in the Central Part of the Persian Gulf

Farahnaz Safi and Vahid Tavakoli*

School of Geology, College of Science, University of Tehran, Iran

vtavakoli@ut.ac.ir

DOI:10.22078/pr.2023.5033.3248

Received: July/04/2023

Accepted: November/14/2023

Introduction

The diagenetic processes have various impacts on porosity, permeability, and lithology, resulting in zones with different reservoir properties and consequently exhibiting different petrophysical behaviors [1]. Petrophysical properties such as effective porosity, total porosity, permeability, pore throat size and distribution are influenced by the type and intensity of diagenetic processes. Therefore, carbonate reservoirs that are strongly affected by diagenetic processes can be subdivided into smaller compartments, showcasing diverse petrophysical and geological characteristics even at very small scales [2]. Hence, addressing the determination and recognition of comparable diagenetic units from a petrophysical and geological perspective can be useful in solving some key challenges encountered in exploration and production from carbonate reservoirs [3]. This study aims to gain a better understanding of the spatial and temporal extent of diagenetic processes that significantly affect reservoir quality, such as, dolomitization, anhydrite cements and dissolution. By modeling these processes on a field scale, it is possible to investigate the mechanisms behind horizontal and vertical trends observed in diagenetic processes impacting reservoir quality based on geological principles. The potential causes for these trends can be explained. Furthermore, by analyzing the results obtained from this study, a comprehensive perspective can be developed

regarding how to determine the distribution patterns of horizontal and vertical diagenetic processes affecting reservoir quality at a field scale.

Materials and Methods

The Dalan and Kangan formations, along with their equivalent formations in the Persian Gulf Basin, are the largest gas reservoirs in the world, dating back to the Permian-Triassic period [4]. In this study, well log's data from twelve wells, along with petrographic data from the cores of a key well, were used to construct electrofacies and three-dimensional models representing diagenetic processes affecting reservoir quality on a field scale in the central Persian Gulf Basin. These data include information obtained from the petrographic analysis of 1575 thin sections from 402.63 m core samples (from the key well) and an average of 462.23 m well log data points from twelve wells. The various stages of this research are as follows:

- 1) Geological studies and interpretations (petrographic analysis of thin sections obtained from cores)
- 2) Petrophysical studies and interpretations on available logs
- 3) Construction of electrofacies as indicators of diagenetic processes affecting reservoir quality using Multi-Resolution Graph-based Clustering to identify and determine the extent of these processes at different depths for the twelve wells under investigation

- 4) Three-dimensional modeling of diagenetic processes influencing reservoir quality at a field scale
- 5) Interpretation of geological models

Results and Discussion

The electrofacies, which serve as indicators of diagenetic processes affecting reservoir quality, were constructed using Multi-Resolution Graph-based Clustering in the GeoLog software. The neutron-density separation log, density log, and pressure sonic-to-shear sonic wave ratio were used to construct the electrofacies representing lithology (dolomitization and anhydrite cementation), while the velocity deviation log and secondary porosity were utilized to construct the electrofacies indicating dissolution processes (various types of porosity). To construct a three-dimensional model of diagenetic processes influencing reservoir quality at the field scale, the geostatistical estimation method of kriging was implemented on discontinuous data of electrofacies related to lithology and dissolution (Fig. 1 and 2).

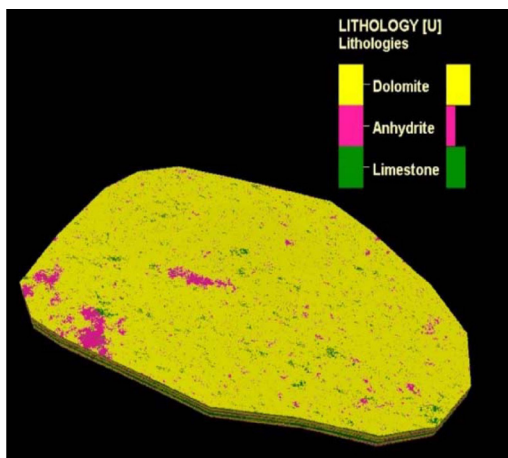


Fig. 1 The final three-dimensional model of lithology was constructed using the PETREL software for the Upper Dalan Member and Kangan Formation in the Central Persian Gulf region.

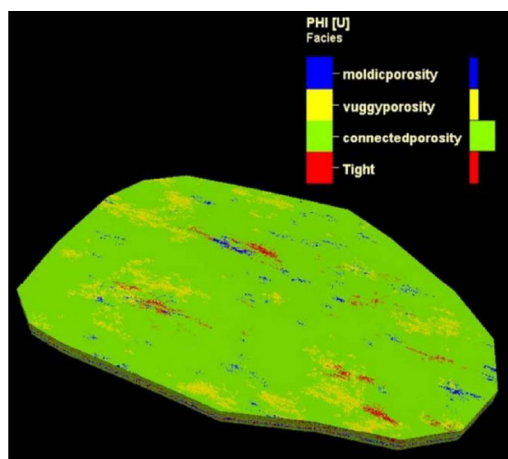


Fig. 2 The final three-dimensional model of porosity types was constructed using the PETREL software for the Upper Dalan Member and Kangan Formation in the Central Persian Gulf region.

Member and Kangan Formation in the Central Persian Gulf region

The most significant geological interpretations regarding the occurrence and trends of diagenetic processes affecting reservoir quality in both horizontal and vertical sections are as follows:

In horizontal sections, the trend of dolomitization, anhydrite cementation, and dissolution occurs geographically from south to north. The highest occurrences of dolomitization, anhydrite cementation, and dissolution are found in the southern and central parts of the horizontal sections (Fig. 3).

In the vertical sections, the highest occurrences of dolomitization are found in the Upper K1, Upper K2, and Lower K3 intervals. The greatest occurrences of anhydrite cementation are observed in the Upper K1, Middle K2, and Lower K3 intervals up to the top of the boundary with K4. The most prevalent dissolution events coincide with the Upper K1, Upper K2, and Lower K3 intervals (Fig. 4).

The results obtained from this study have demonstrated that electrofacies and the constructed three-dimensional models are capable of accurately predicting the occurrence and trends of diagenetic processes influencing reservoir quality in subsurface areas with an acceptable ratio.

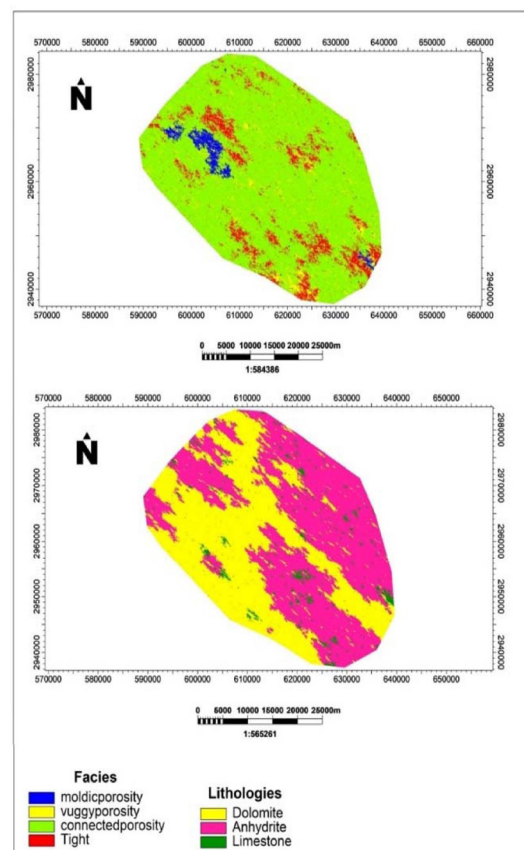


Fig. 3 Horizontal section number 10 of the constructed models.

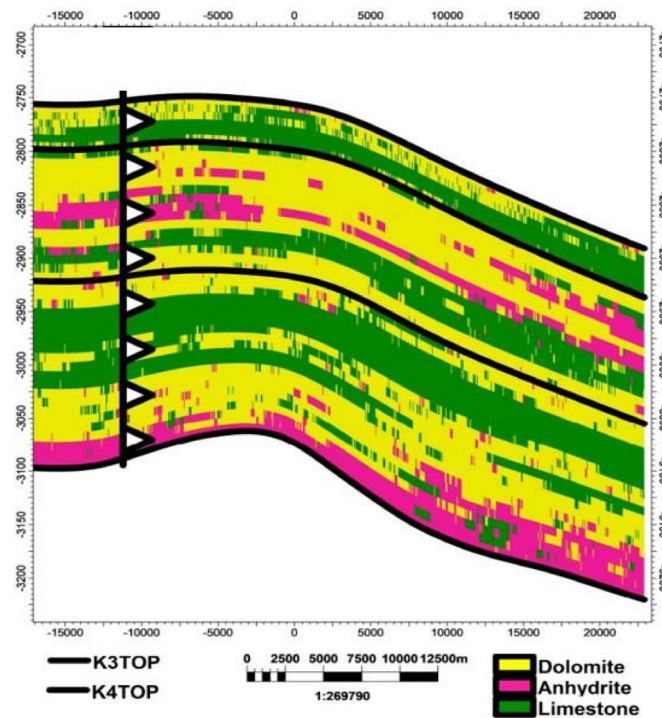


Fig. 4 Vertical section number 5 of the Lithology model.

Conclusions

- The successful utilization of neutron-density separation, sonic-to-shear sonic wave ratio, and density logs for constructing electrofacies as indicators of lithology, as well as velocity deviation and secondary porosity logs for constructing electrofacies as dissolution indicators based on a Multi Resolution Graph Clustering.
- The use of composite logs created by integrating primary logs (such as neutron-density separation, velocity deviation, and secondary porosity) can be a suitable solution in cases where only conventional and basic well logs are available. This approach can help address the challenges associated with modeling diagenetic processes that significantly impact reservoir quality.
- The application of geostatistical kriging estimation method, while adhering to the principles of geostatistics, proved beneficial for creating a three-dimensional geological and dissolution model based on the constructed electrofacies data from twelve wells. This approach was found to be advantageous for the study area at the field scale.
- From the three-dimensional lithology and dissolution models, the lateral variations in the trends of diagenetic processes that significantly affect reservoir quality

were identified. This information can serve as a useful guide for selecting new well locations in subsequent stages.

References

1. Ehrenberg, S. N., Nadeau, P. H., & Aqrabi, A. A. M. (2007). A comparison of Khuff and Arab reservoir potential throughout the Middle East, AAPG bulletin, 91(3), 275-286, doi.org/10.1306/09140606054.
2. Tavakoli, V., Rahimpour-Bonab, H., & Esrafil-Dizaji, B. (2011). Diagenetic controlled reservoir quality of South Pars gas field, an integrated approach, Comptes Rendus Geoscience, 343(1), 55-71, doi.org/10.1016/j.crte.2010.10.004.
3. Al-Aswad, A. A. (1997). Stratigraphy, sedimentary environment and depositional evolution of the Khuff Formation in south-central Saudi Arabia, Journal of Petroleum Geology, 20(3), 307-326, doi.org/10.1111/j.1747-5457.1997.tb00638.x.
4. Tavakoli, V., & Jamalian, A. (2018). Microporosity evolution in Iranian reservoirs, Dalan and Dariyan formations, the central Persian Gulf, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 52, 155-165, doi.org/10.1016/j.jngse.2018.01.028