

مدل سازی زمین آماری سنگ رخساره‌ای نهشته‌های کربناته - تبخیری سازند کنگان، بر مبنای آنالیز واریوگرافی و روش شبیه‌سازی شاخص پی‌درپی در یکی از میادین خلیج فارس

مصطفی سبوحی^{۱*}، مارال نقوی آزاد^۲ و پیمان رضائی^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه هرمزگان، ایران

۲- مدیریت مهندسی نفت، شرکت توسعه پتروایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۶/۶

چکیده

بررسی سنگ رخساره‌ها در مراحل اکتشاف و توسعه میادین هیدروکربوری دارای اهمیت فراوانی است. آشنایی با نحوه گسترش سنگ رخساره‌ها چه در مراحل حفاری و چه در شناسایی نواحی مستعد مخزنی می‌تواند برنامه‌های اکتشاف و تولید از مخازن را تحت تاثیر قرار دهد. تاکنون روش‌ها و مطالعات گوناگونی درباره نحوه توزیع خواص مخزنی برپایه دانش زمین‌آمار در میادین هیدروکربوری انجام شده است اما مطالعات محدودی پیرامون نحوه گسترش سنگ‌رخساره‌ها و مدل‌سازی آن‌ها انجام شده است. در این مطالعه داده‌های ۲۱ چاه (شامل نگارهای پتروفیزیکی، خرده‌های حفاری و مغزه) از یکی از میادین هیدروکربوری در خلیج فارس مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. نهشته‌های سازند کنگان در میدان مورد مطالعه با توجه به تفسیر نگارهای پتروفیزیکی و شواهد به‌دست آمده از خرده‌های حفاری و مغزه، به دو بخش الف و ب و زیربخش‌های (الف ۱، الف ۲، الف ۳ و ب ۱، ب ۲، ب ۳) تقسیم‌بندی گردید. جهت مدل‌سازی سنگ رخساره‌ها، شش کد سنگ‌رخساره‌ای معرفی گردید: انیدریت، سنگ‌آهک، دولومیت، شیل، سنگ‌آهک دولومیتی و دولومیت همراه با انیدریت. آنالیز واریوگرافی برای هر یک از بخش‌های تعریف شده براساس حوضه رسوبی نهشته‌های مورد مطالعه انجام و سپس کدهای سنگ رخساره‌ای تعریف شده با استفاده از روش شبیه‌سازی پی‌درپی در فضای شبکه سلولی توزیع گردید. بررسی و نتایج به‌دست آمده در این مطالعه که با حفر چاه‌های جدید نیز مورد تأیید قرار گرفت نشان داد که روش به‌کار رفته دقت بالایی داشته و می‌توان با تکیه بر آن برای توالی‌های مشابه، نحوه گسترش سنگ‌رخساره‌ها و نواحی مستعد مخزنی را پیش‌بینی نمود.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی زمین آماری، سنگ‌رخساره، شبیه‌سازی پی‌درپی، سازند کنگان، خلیج فارس

مقدمه

اکنون مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل روش‌های Object-based، Variogram-based، Multiple point می‌باشند. روش‌های معرفی شده جهت ساخت خصوصیات سنگ رخساره‌ای بر مبنای دانش زمین‌شناسی و بیشتر بر روی رسوبات آواری توسعه پیدا کرده است [۶-۹]. در شرایط رسوب‌گذاری سنگ‌های کربناته به دلیل تغییرات محیط رسوب‌گذاری با تنوع کمتر و در گستره وسیع‌تر چگونگی استفاده از این روش‌ها در حال بازسازی و توسعه است [۱۰].

در این پژوهش، روش‌های زمین‌آماری برای ساخت مدل سنگ رخساره‌ای برای نهشته‌های مخزنی کربناته- تبخیری کنگان مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. با توجه به اهمیت مدل‌های سنگ رخساره‌ای در شناخت بخش‌های مستعد مخزنی، نتایج این مطالعه می‌تواند منجر به انتخاب روش بهینه برای ساخت مدل سنگ رخساره‌ای در محیط ته‌نشینی نهشته‌های کربناته- تبخیری سازند کنگان شده و از این روش به‌عنوان نمونه‌ای برای تخمین تغییرات سنگ رخساره‌ای و کیفیت مخزنی در میدان‌های هیدروکربوری کربناته- تبخیری در جهان استفاده گردد.

ویژگی‌های زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه

بخش‌های شمالی صفحه عربی از دیرباز به دلیل دارا بودن ذخایر عظیم هیدروکربوری مورد توجه بوده است [۱۱]. اکتشاف و توسعه میدانی واقع در خلیج فارس، جنوب و جنوب غرب ایران، مثال‌هایی از این نگاه می‌باشد. میدانی پارس جنوبی، گنبد شمالی قطر و میدانی واقع در خشکی، شامل میدانی کنگان، تابناک، نار و دیگر میدانی جنوبی و جنوب‌غربی ایران مثالی از این ذخایر بزرگ هیدروکربوری می‌باشند.

سرشت‌نمایی سنگ رخساره‌ای^۱ یکی از مراحل مهم و کاربردی در توصیف خصوصیات مخزنی و هتروژنتی مخازن می‌باشد. سنگ رخساره به مجموعه خصوصیات سنگ‌شناسی توالی‌های رسوبی گفته می‌شود که می‌تواند به‌عنوان نماینده‌ای از بخش‌های مختلف مخزن و بازتاب خواص و کیفیت سنگ مخزن باشند. مدل‌های سنگ‌رخساره‌ای می‌توانند مبنای تقسیم‌بندی و بخش‌بندی قسمت‌های مختلف مخزنی بوده و از آن‌جا که نماینده‌ای از محیط رسوب‌گذاری توالی مورد نظر می‌باشند لذا در تحلیل و بررسی‌های مخزنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده حداکثری از تمامی اطلاعات در جهت پیش‌بینی‌های دقیق مناطق با کیفیت مخزنی می‌تواند جهت برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای و اقتصادی میدانی هیدروکربوری مورد استفاده قرار گیرد. فرآیند استفاده و مشارکت حداکثری از اطلاعات زمین‌شناسی نظیر سنگ رخساره‌ها^۲ و رخساره‌های رسوبی^۳ در مدل‌های سه‌بعدی مخزنی، مدل سنگ‌رخساره‌ای نامیده می‌شود. برای توزیع دقیق پراکندگی سنگ رخساره‌ها لازم است تمامی اطلاعاتی که به‌صورت مستقیم (مانند اطلاعات برداشت شده از چاه) و غیرمستقیم (مانند اطلاعات ژئوفیزیکی) برداشت می‌شود جهت توصیف خصوصیات سنگ‌شناسی مخزنی و هتروژنتی مخزن در مدل‌های مخزنی وارد شود. امروزه استفاده از روش‌های زمین‌آماری قطعی و تخمینی در فرآیند ساخت مدل‌های مخزنی رو به گسترش است. هر یک از این روش‌ها می‌توانند به‌صورت کمی و کیفی در سرشت‌نمایی مخازن مورد استفاده قرار گیرند [۱-۵]. هر یک از این روش‌های زمین‌آماری با تکیه بر اصول و قواعد دانش ریاضی و با در نظر گرفتن پدیده‌های زمین‌شناختی سعی در توصیف رفتار یک شبکه‌ای از خصوصیات را دارند. روش‌های زمین‌آماری جهت ساخت مدل‌های سنگ رخساره‌ای مخزن که هم

1. Lithofacies 3D modeling
2. Lithofacies
3. Facies

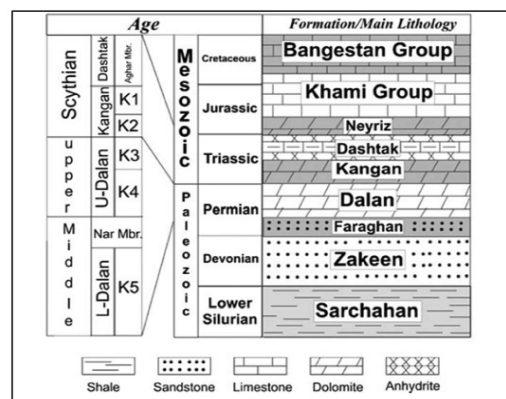
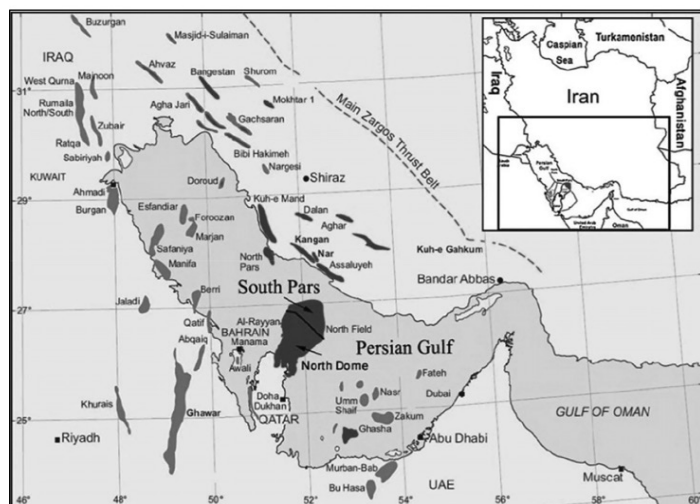
در این حوزه به‌شمار می‌آیند [۱۴]. تاکنون مطالعات گسترده‌ای درباره محیط رسوبی سازند کنگان در میداین جنوب باختری ایران و حوزه خلیج فارس انجام شده است و محیط رسوب گذاری رمپ کربناته هموکلینال برای نهشته‌های فوق پیشنهاد شده است [۱۱، ۱۳، ۱۵ و ۱۶]. نهشته‌های سازند کنگان به سن تریاس زیرین تا میانی یک واحد سنگ چینه‌ای ضخیم کربناته و یکی از سنگ مخزن‌های مهم در میداین خلیج فارس به‌شمار می‌آید. سازند کنگان با سطح تماس پیوسته در زیر واحد شیل آغار و با یک مرز ناپیوسته معادل مرز پرمین-تریاس از سازند دالان جدا می‌شود [۱۴]. نهشته‌های سازند کنگان با خصوصیات سنگ‌شناسی سنگ آهک، دولومیت، انیدریت و مقدار کمی شیل می‌باشد (شکل ۱).

داده‌ها و روش مطالعه

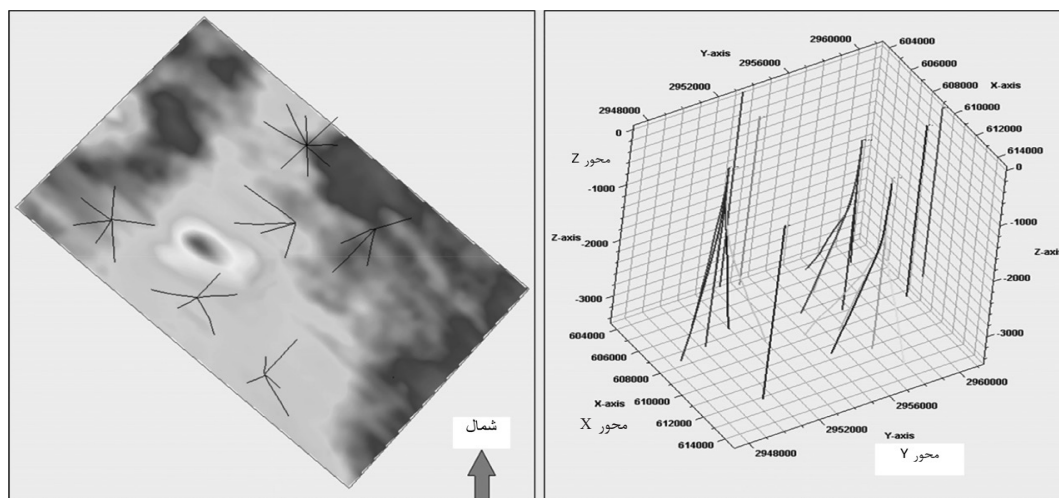
در این تحقیق، داده‌های برگرفته شده از ۲۱ چاه از نهشته‌های مخزنی کربناته-تبخیری سازند کنگان در یکی از میداین‌های گازی حوزه خلیج فارس، برای مدل‌سازی سنگ رخساره‌ای بر مبنای روش‌های زمین‌آماری انتخاب شدند (شکل ۲). سنگ رخساره شامل مجموع خصوصیات سنگ‌شناسی توالی‌های رسوبی می‌باشد.

میدان مورد مطالعه در این تحقیق در بخش مرکزی حوزه خلیج فارس واقع شده است (شکل ۱).

زمین‌شناسی و چینه‌شناسی حوضه رسوب‌گذاری منطقه مورد مطالعه، در برگرفته رسوبات و وقایعی از زمان پرکامبرین پسین تا عهد حاضر است. در زمان پرمین پسین یک مرحله کششی ناشی از ریفت‌زایی و کشیدگی پوسته ایجاد شده که باعث می‌شود ایران مرکزی از بلوک عربی جدا شده و به سمت شمال حرکت کرده و اقیانوس نئوتتیس در میان آن‌ها گسترش یابد [۱۲]. در محدوده مورد مطالعه در زمان پرمین میانی تا پسین، اقلیم به تدریج گرم‌تر و خشک‌تر شده و یک پلتفرم کربناته-تبخیری را به‌وجود آورده است [۱۲]. طی رسوب‌گذاری توالی پرمین-تریاس، جدایش پشت کمانی در انتهای شمالی صفحه عربی دیده می‌شود. در این زمان دریای کم عمق پرمین بر روی حاشیه فعال شمال شرقی پیش‌روی می‌کند. از آنجا که ضخامت کربنات‌ها و تبخیری‌های حاصل در مناطق مختلف متغیر است، این امر نشان دهنده رسوب‌گذاری همزمان با فعالیت‌های تکتونیکی در این حوضه می‌باشد [۱۳]. نهشته‌های سازند دالان (پرمین پسین) و سازند کنگان (تریاس پیشین) با توالی کربناته-تبخیری به‌عنوان اصلی‌ترین مخازن گازی



شکل ۱ نقشه جغرافیایی میداین هیدروکربوری خلیج فارس و توالی چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲ موقعیت ۲۱ چاه از میدان مورد مطالعه بر روی افق سازند کنگان

از کل جامعه به منظور شناخت آن برداشت می‌شوند فاقد اطلاعات موقعیتی در فضا بوده و در نتیجه مقدار اندازه‌گیری شده یک کمیت معین در یک نمونه خاص هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد مقدار همان کمیت در نمونه دیگری به فاصله معین معلوم دربر نخواهد داشت [۱۷]. به عبارت دیگر، نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری نمونه‌ها مستقل از موقعیت فضایی آن‌ها مورد تحلیل قرار می‌گیرند. بنابراین، مقدار یک کمیت در یک نمونه هیچ‌گونه اطلاعاتی درباره مقدار آن کمیت در نمونه‌های دیگر به فواصل مختلف به دست نمی‌دهد. در حالی که در زمین آمار علاوه بر مقدار یک کمیت معین در یک نمونه موقعیت فضایی نمونه نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. بدین ترتیب، می‌توان موقعیت فضایی نمونه‌ها را همراه با مقدار کمیت مورد نظر یک‌جا مورد تحلیل قرار داد. بنابراین، در زمین آمار به بررسی آن دسته از متغیرها پرداخته می‌شود که ساختار فضایی از خود بروز می‌دهند [۱۸ و ۱۹]. دانش زمین آمار با استفاده از ارتباط هندسی بین داده‌ها سعی در توصیف ارتباط فضایی پدیده‌های طبیعی دارد. این دانش بر مبنای ریاضی و با استفاده از رایانه و روش‌های تخمین سعی در ارائه یک مدل در فضای سه‌بعدی جهت نحوه تخمین و قرارگیری هر یک از پدیده‌ها دارد.

این خصوصیات را می‌توان با مشاهده مستقیم خرده‌های حفاری و با استفاده از تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی تفکیک کرد. این داده‌ها مبتنی بر نمودارهای چاه‌پیمایی شامل نگار پرتو گاما (GR)، نگارهای مقاومتی کم عمق و عمیق (LLD & LLS)، چگالی (RHOB)، نوترون (NPHI)، صوتی (DT)، فوتوالکتریک (PEF) و قطرسنجی (CAL)، خرده‌های حفاری، مغزه و نتایج آنالیزهای مغزه (سنگ‌شناسی و خواص مخزنی) هستند. در این پژوهش، ابتدا ارزیابی پتروفیزیکی نگارهای برداشت شده از چاه ۲۱ مورد مطالعه جهت تعیین مقادیر سنگ رخساره‌ها در نرم‌افزار ژئولاگ، با استفاده از ماژول مالتی مین انجام پذیرفت. ستون سنگ رخساره‌های به دست آمده با نمودارهای سرچاهی، خرده‌های حفاری و مغزه بررسی و تصحیحات لازم انجام گرفت. سپس نمودارهای سنگ رخساره‌ای در محل چاه مقیاس گردانی شده و وارد فضای سلول مدل‌سازی گردید. در ادامه بر مبنای روش‌های زمین آماری پیشنهاد شده جهت ساخت مدل‌های سنگ‌رخساره‌ای^۱ با استفاده از نرم‌افزار پترل مورد بررسی قرار گرفت.

بحث و نتایج

مدل‌سازی زمین آماری سنگ رخساره‌ها

در بررسی‌های آمار کلاسیک، اجزاء یا نمونه‌هایی که

1. Lithofacies Modeling

و تخلخل درمحل چاه، استفاده از روش‌های زمین آماری مختلف بررسی و روشی که بیشترین همبستگی را به داده‌های اولیه دارد انتخاب گردید. قبل از ورود به مرحله سرشت‌نمایی مخزن، با توجه به مطالعات گسترده‌ای که درباره محیط رسوب‌گذاری نهشته‌های سازند کنگان انجام شده است، در این مطالعه از نتایج بررسی‌های صورت گرفته، بر روی محیط رسوب‌گذاری این نهشته‌ها جهت آنالیزهای توزیع سنگ رخساره‌ها استفاده شده است [۱۳ و ۱۶]. از آنجا که سازند مورد مطالعه در یک پلتفرم کربناته-تبخیری رمپ در اوایل تریاس برجای گذاشته شده است، سنگ‌شناسی نهشته‌های مورد مطالعه شامل تناوبی از لایه‌های سنگ آهک، دولومیت و انیدریت با میان لایه‌هایی از شیل به مقدار بسیار کم می‌باشد. در این مطالعه نتایج حاصل از تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی با مشاهدات مغزه و خرده‌های حفاری تصحیح گردید. نهشته‌های مورد مطالعه بر مبنای تغییرات سنگ‌شناسی و خصوصیات مخزنی به دو بخش اصلی تقسیم‌بندی گردید (بخش الف و ب). از آنجا که سازند مورد مطالعه در یک پلتفرم کربناته-تبخیری رمپ در اوایل تریاس برجای گذاشته شده است، سنگ‌شناسی نهشته‌های مورد مطالعه شامل تناوبی از لایه‌های سنگ آهک، دولومیت و انیدریت با میان لایه‌هایی از شیل به مقدار بسیار کم می‌باشد. در این مطالعه نتایج حاصل از تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی با مشاهدات مغزه و خرده‌های حفاری تصحیح گردید. نهشته‌های مورد مطالعه بر مبنای تغییرات سنگ‌شناسی و خصوصیات مخزنی به دو بخش اصلی تقسیم‌بندی گردید (بخش الف و ب). بخش الف: سنگ‌شناسی این بخش شامل تناوبی از دولومیت با بخش‌هایی از سنگ آهک و انیدریت می‌باشد. ضخامت میانگین این بخش در محدوده مورد مطالعه m ۱۱۵ است.

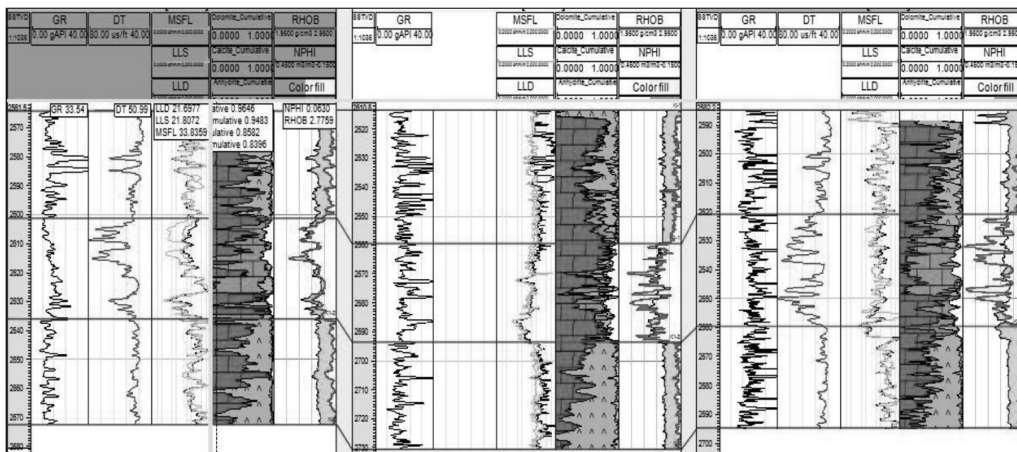
در مدل‌سازی‌های مخزنی استفاده از این دانش می‌تواند به صورت هم‌زمان شرایط خاص مخازن را توصیف و بیان کند. به عنوان مثال قرارگیری یک شکاف با تراوایی بسیار بالا و محدوده‌هایی با مقادیر تراوایی بسیار پایین. بدیهی است یک مدل با دقت بالا علاوه بر استفاده از روش‌های صحیح نیاز به داده‌های کامل و مطمئن نیز دارد که بتواند در مراحل مدل‌سازی مورد استفاده قرار گیرد [۱۸، ۲۰، ۲۱، ۲۲]. اغلب مدل‌های زمین‌آماری مخزن بر مبنای الگوریتم‌های واریوگرافی مانند روش شبیه‌سازی پی‌درپی^۱ برای تخمین داده‌های نقطه‌ای مانند رخساره و سنگ‌رخساره و روش‌های گوسی برای داده‌هایی که به صورت پیوسته هستند (مانند تخلخل) استفاده می‌کنند [۲۳-۲۶].

در فرآیند ساخت مدل‌های سه‌بعدی سنگ‌رخساره‌ای و خصوصیات مخزنی ابتدا ساخت مدل ساختمانی دارای اهمیت می‌باشد [۲۷-۲۹]. در این مطالعه با توجه به اطلاعات ژئوفیزیکی از میدان مورد مطالعه افق‌های مربوط به سرسازندهای مخزنی تفسیر و مدل ساختمانی ساخته شد. پس از ساخت مدل ساختمانی افق‌های مخزنی ناحیه‌بندی گردید. جهت انطباق بیشتر با داده‌های اولیه هر یک از ناحیه‌ها به‌طور میانگین به ضخامت m ۱ لایه‌بندی گردید. از نمودارهای برداشت شده (به صورت خام و تفسیر شده) به همراه نمونه‌های حاصل از خرده‌های حفاری و مغزه، ستون سنگ‌شناسی برای هر یک از چاه‌ها ترسیم گردید. سپس مراحل زیر جهت ورود به ساخت مدل سه‌بعدی سنگ رخساره‌ای به ترتیب انجام پذیرفت:

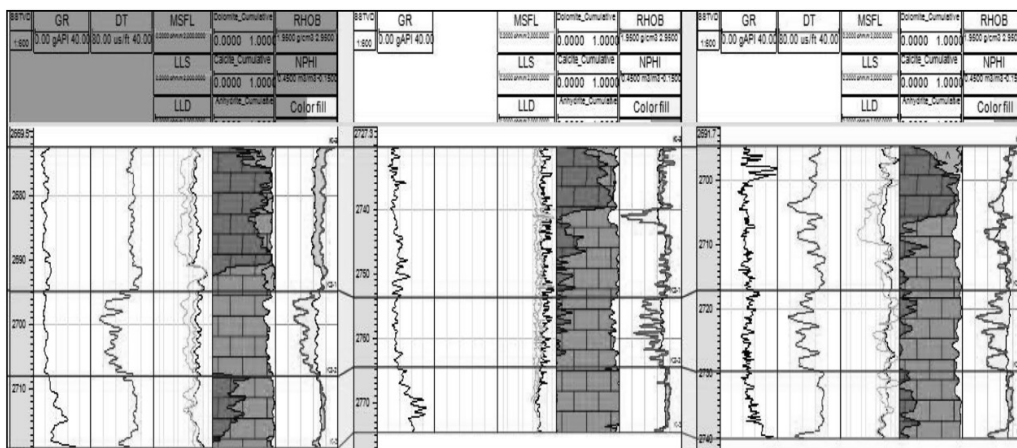
۱. مقیاس گردانی داده‌ها در محل چاه.
 ۲. آنالیز و ترسیم واریوگرام شاخص در جهات افقی و عمودی.
 ۳. انتخاب نقطه شروع تصادفی.
 ۴. بررسی نحوه توزیع سنگ رخساره‌ها و آنالیز داده‌ها قبل و بعد از واریوگرافی.
- در مرحله مقیاس گردانی داده‌های سنگ رخساره‌ای

بر مبنای تغییرات سنگ رخساره‌ای و خصوصیات مخزنی، این بخش خود به سه زیربخش ب-۱، ب-۲ و ب-۳ تقسیم‌بندی گردید (شکل ۴). باتوجه به تغییرات سنگ‌شناسی نهشته‌های مورد مطالعه، جهت تفکیک و رده‌بندی کدهای سنگ رخساره‌ای، از نگارهای پتروفیزیکی، خرده‌های حفاری و مغزه استفاده گردید. بدین منظور، نتایج سنگ‌شناسی حاصل از تفسیر پتروفیزیکی ابتدا با ستون توصیفی خرده‌های حفاری در هر یک از چاه‌ها مقایسه و سپس با مقادیر چگالی دانه^۱ حاصل از آزمایشات معمولی مغزه^۲ تصحیح گردید. کدهای سنگ رخساره‌ای تعیین شده در جدول ۱، و شکل ۵ نشان داده شده است:

با توجه به بررسی نمونه‌های حاصل از مغزه و تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی، قسمت‌های دولومیتی از این بخش دارای مقادیر تخلخل پایین و قسمت‌های کربناته دارای خواص تخلخل خوب می‌باشند. جهت مدل‌سازی سنگ رخساره‌ای، این بخش خود به سه زیربخش الف-۱، الف-۲ و الف-۳ تقسیم‌بندی گردید (شکل ۳). بخش ب: تغییرات سنگ‌شناسی این بخش شامل تناوبی از دولومیت و سنگ آهک می‌باشد. ضخامت میانگین این بخش در محدوده مورد مطالعه ۴۵ m می‌باشد. مقادیر انیدریت و شیل در این بخش بسیار کم می‌باشد. نتایج بررسی و تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی به‌همراه آزمایشات بر روی مغزه، مقادیر با تخلخل خوب در این بخش مشاهده می‌شود.



شکل ۳ تغییرات سنگ‌شناسی بخش الف و سه زیربخش تفکیک شده، الف-۱، الف-۲ و الف-۳

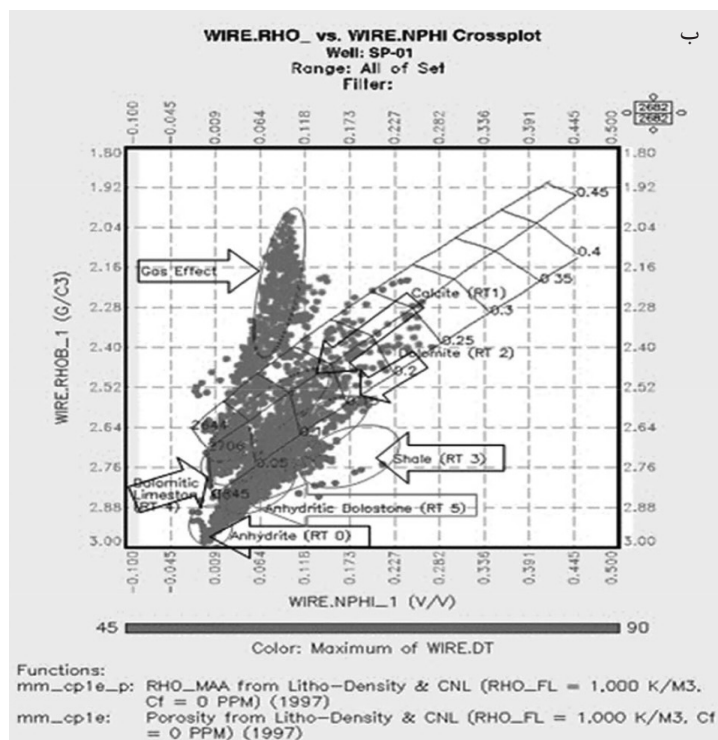
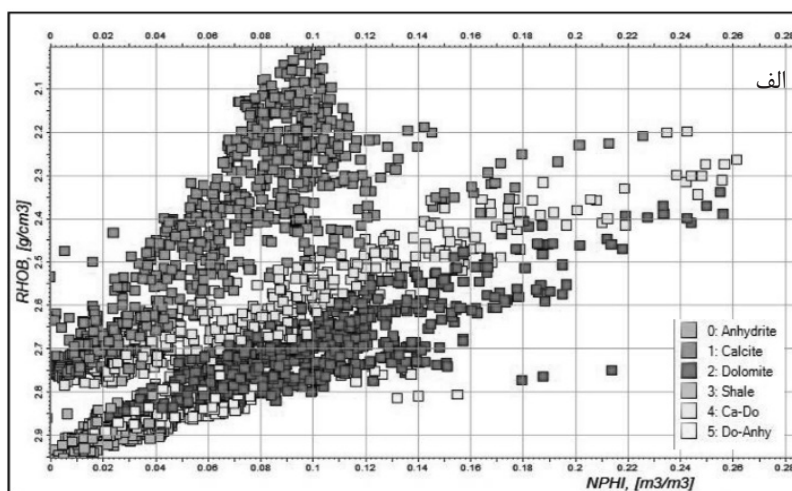


شکل ۴ تغییرات سنگ‌شناسی بخش ب و سه زیربخش تفکیک شده ب-۱، ب-۲ و ب-۳

1. Grain Density
2. CCAL

جدول ۱ کدهای سنگ رخساره‌ای

شماره کد اختصاصی	ترکیب سنگ رخساره
۰	انیدریت
۱	سنگ آهک
۲	دولومیت
۳	شیل
۴	سنگ آهک دولومیتی
۵	دولومیت همراه با انیدریت

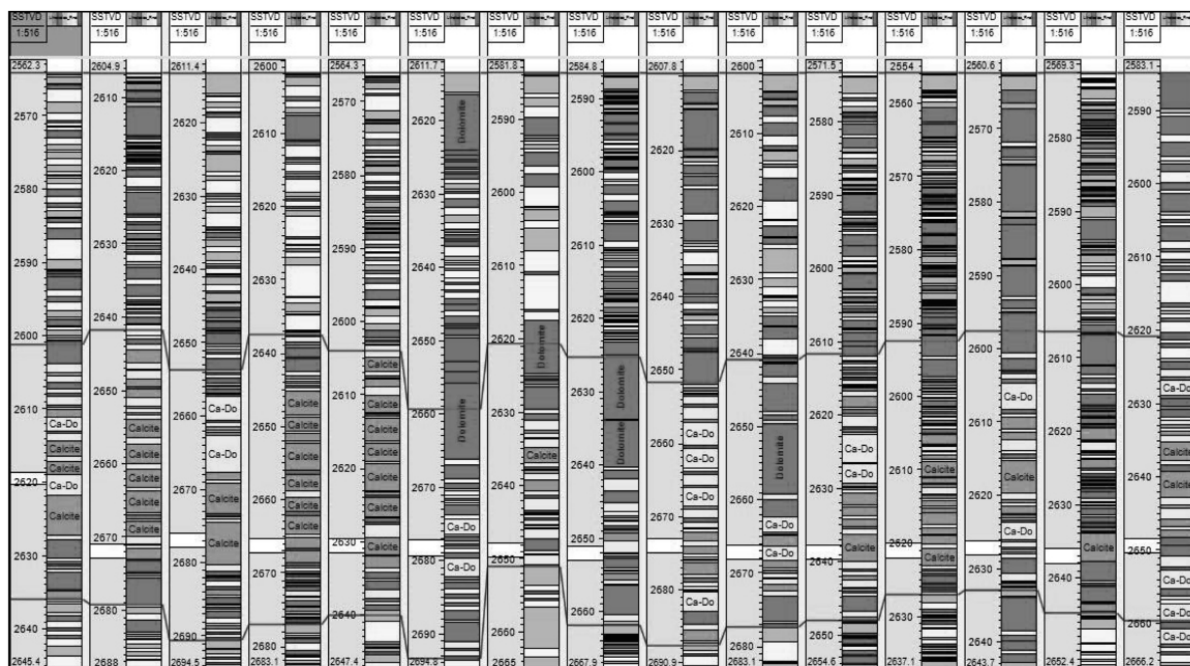


شکل ۵ دسته‌بندی سنگ رخساره‌ها با استفاده از نگار NPHI-RHOB در ۲۱ چاه استفاده شده در این تحقیق - توضیح شماره‌های صفر الی پنج در جدول شماره ۱ آورده شده است

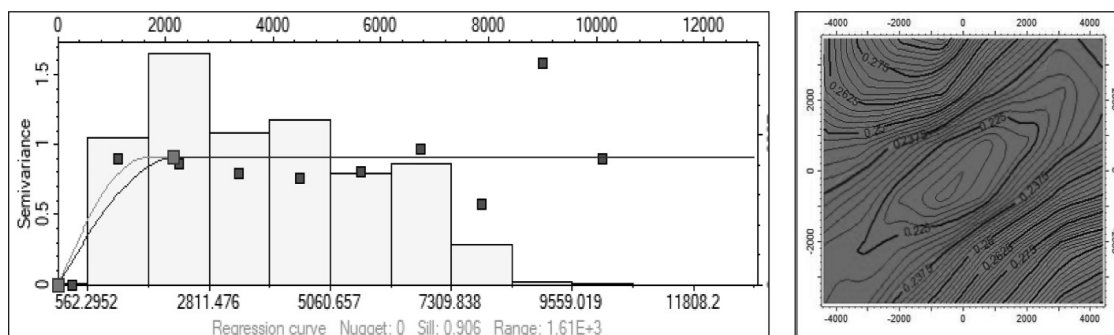
تحلیل داده‌ها و واریوگرافی

هر یک از شش رده تعریف شده (جدول ۱) پس از تصحیحات اولیه در محل چاه مقیاس‌گردانی گردید. در این مرحله با توجه به روش‌های مقیاس‌گردانی اشاره شده در منابع مختلف [۱۸، ۳۰، ۳۱]. جهت داده‌های منقطع مانند سنگ‌رخساره‌ها از روش کدهای سنگ رخساره‌ای در مرحله واریوگرافی پردازش شده و واریوگرام‌ها در سطحی که بیشترین همبستگی بین داده‌ها وجود دارند ترسیم گردید. انتخاب بهینه و صحیح واریوگرافی در روش‌های تخمینی ساخت مدل‌های سه‌بعدی سنگ‌رخساره‌ای دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. استفاده صحیح از واریوگرافی در داده‌های پیوسته نظیر تخلخل و داده‌های منقطع نظیر کدهای سنگ رخساره‌ای می‌تواند در بهبود روش‌های تخمین اثرگذار باشد [۱۸، ۳۲، ۳۳]. در این مطالعه برای دو بخش اصلی (الف-ب) و Most of استفاده گردید. در این روش داده‌های منقطع نظیر هر یک از سلول‌های شبکه مدل‌سازی انتخاب و به آن سلول اختصاص داده خواهد شد (شکل ۶).

زیربخش‌های هر یک از این بخش‌ها آنالیز واریوگرافی انجام پذیرفت (شکل ۷). مقادیر به‌دست آمده جهت آنالیزهای واریوگرافی برای هر یک از بخش‌ها در جدول ۲ اشاره شده است. از آنجا که تغییرات سنگ‌رخساره‌ای با توجه به نوع محیط رسوبی نهشته‌ها در تناوب می‌باشد، در این مرحله شعاع تأثیر در جهات مختلف با در نظر گرفتن حوضه رسوبی نهشته‌های سازند گنگان [۱۳ و ۱۶] در میدان مورد مطالعه تعیین و انتخاب گردید (جدول ۲). در این مطالعه کدهای سنگ رخساره‌ای تعریف شده با استفاده از روش شبیه‌سازی پی‌درپی^۱ در فضای سلول شبکه توزیع گردید. این روش یکی از پرکاربردترین روش‌ها جهت تخمین داده‌های ناپیوسته مانند سنگ رخساره‌ها و رخساره‌های رسوبی می‌باشد که بر مبنای واریوگرام شاخص عمل می‌کند. از آنجا که این روش در داده‌های رسوبات سیلیسی کلاستیک (آواری) تعریف و توسعه پیدا کرده است، در محیط‌های کربناته استفاده از این روش و بهبود نتایج آن در حال توسعه می‌باشد [۳۴ و ۳۵].



شکل ۶ مقیاس‌گردانی کدهای سنگ رخساره‌ای (Lithofacies) در چاه‌های مورد مطالعه



شکل ۷ مدل واریوگرافی تغییرات سنگ رخساره‌ای برای بخش الف-۲، الف منحنی واریوگرام ب، نقشه واریوگرام

جدول ۲ مقادیر شعاع تأثیر هر یک از جهات سه گانه در مدل واریوگرام

بخش	زیر بخش	آزیموت (جهت از شمال) واریوگرام	شعاع تأثیر در جهت اصلی (m)	شعاع تأثیر در جهت فرعی (m)	شعاع تأثیر در مسیر چاه (m)	کد سنگ رخساره‌ای غالب
الف	۱	۲۶	۲۲۹۴	۱۶۸۵/۹	۳۵/۳	۵ و ۴ و ۲ و ۰
	۲	۲۶	۲۶۱۹/۰۵	۲۱۴۶/۸	۱۲/۴	۲ و ۱
	۳	۲۶	۲۶۱۹/۰۵	۱۷۲۱/۸	۱۳/۸	۴ و ۲ و ۰
ب	۱	۲۸	۲۶۲۵	۲۱۴۶/۸	۶/۱	۱ و ۲
	۲	۲۲	۲۶۳۰	۱۸۵۴/۲	۱۳/۸	۱
	۳	۲۶	۲۶۱۹/۰۵	۲۱۴۶/۸	۵/۲	۲ و ۱

که $\Pr\{Z(x) < Z_k\}$ نماینده احتمال تجمعی در روش SIS می‌باشد. مدل‌سازی توالی‌های غیرخطی و ناپیوسته با استفاده از این روابط مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این روش پس از ایجاد شبکه سلولی، برای هر یک از سلول‌ها مقادیر متناظری با استفاده از رابطه بالا تعریف می‌گردد [۳۶ و ۳۷]. در این مطالعه، ۶ مرحله اصلی زیر جهت پردازش داده‌ها توسط روش SIS انجام شده است:

۱. ساخت واریوگرام شاخص برای مسافت موجود بین هر گام در داده‌های سنگ رخساره‌ای بر مبنای رابطه زیر:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} (facies_{(h+i)} - facies_{(h)})^2 \quad (3)$$

که در این رابطه N_h مقادیری از داده‌هایی می‌باشد که در واریوگرام شاخص استفاده شده است. در این رابطه اولویت توزیع بر مبنای تراکم توزیع رخساره‌ها می‌باشد:

$$F(z_i) = \sum_{j=1}^{i-1} P(z_j) \quad (4)$$

در این روش با استفاده از منحنی همبستگی داده‌های منقطع (CDF)، برای هر یک از کدهای تعریف شده مقادیر متناظر با آن بر روی منحنی CDF تعریف می‌شود [۳۲]. پس از کدگذاری داده‌ها بر روی منحنی همبستگی، مقادیر ۰ و ۱ برای هر نمونه اختصاص داده می‌شود. در این مطالعه واریوگرام شاخص با استفاده از رابطه زیر تعریف گردید:

$$I(Z_k; x) = \begin{cases} 0 & \text{if } Z(x) > Z_k \\ 1 & \text{if } Z(x) \leq Z_k \end{cases} \quad (1)$$

در این رابطه $I(Z_k; x)$ یک متغیر تصادفی شاخص است که تابع تصادفی $Z(x)$ برای آستانه مقدار Z_k است. مقادیر مورد انتظار برای متغیر تصادفی $I(Z_k; x)$ مجموع احتمالات تجمعی برای نقطه $\Pr\{Z(x) < Z_k\}$ می‌باشد که با استفاده از رابطه زیر تعریف شده است:

$$E(I(Z_k; x)) = 0 \times \Pr\{Z(x) > Z_k\} + 1 \times \Pr\{Z(x) \leq Z_k\} \quad (2)$$

$$E(I(Z_k; x)) = \Pr\{Z(x) < Z_k\}$$

(شکل ۷). این فاصله که با حرف a نمایش داده شده است فاصله‌ای است که در محدوده آن مقدار متغییر ناحیه‌ای آزادانه تغییر نمی‌کند. بلکه با توجه به مقادیر آن در سایر نقاط این محدوده مقادیری برمی‌گزینند که ساختار فضایی نقض نشود. معادله استفاده شده جهت مدل‌سازی واریوگرام برای هر یک از کد رخساره‌ها به شرح زیر است:

$$\gamma(h) = C \left(\frac{h}{a} - 0.5 \frac{h}{a} \right) \rightarrow h < a \quad (5)$$

که در آن C حد آستانه ای و a دامنه تأثیر است. هر یک از اجزاء واریوگرام برای تخمین صحیح در فضای سلول شبکه مهم و اساسی می‌باشد. برای اینکه مدل نهایی بتواند به واقعیت‌هایی که از داده‌های چاه به دست آمده نزدیک باشد و فرضیات محیط رسوب‌گذاری سنگ رخساره‌ها را اعمال کند تک تک این اجزاء و مؤلفه‌ها می‌تواند در چگونگی تخمین تأثیرگذار باشد. در این مطالعه با استفاده از روابط اشاره شده در بالا سعی گردید فرضیات حضور سنگ رخساره‌ها با توجه به حوضه رسوبی کریناته-تبخیری رمپ، نهشته‌های مورد نظر برای هر یک از بخش‌ها و زیربخش‌ها لحاظ گردد. جدول ۳ مقادیر قبل و بعد از مدل‌سازی سنگ رخساره‌ها را برای هر یک از بخش‌ها و زیر بخش‌ها و به تفکیک برای کدهای سنگ رخساره‌ای نشان می‌دهد. بررسی نتایج به دست آمده (جدول ۳ و شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰) نشان می‌دهد مدل ارائه شده توانایی بسیار خوبی در پیش‌بینی سنگ رخساره‌ها در فضای شبکه داشته و انحراف بسیار کمی نسبت به داده‌های ورودی چاهی دارد.

که $F(z_i)$ نماینده تابع توزیع سنگ‌رخساره و $P(z_j)$ تراکم توزیع هر سنگ‌رخساره می‌باشد. ۲. انتخاب نقاطی که دارای نمونه در فضای شبکه سلولی نمی‌باشد به صورت تصادفی.

۳. انتخاب مقادیر برای نقاطی که در فضای شبکه دارای نمونه نمی‌باشد بر مبنای واریوگرام شاخص تعریف شده در مرحله اول. ۴. انتخاب نماینده به صورت تصادفی برای هر سلول بین مقادیر ۰ و ۱. ۵. اجرای مراحل اشاره شده برای سلول‌های باقی‌مانده در فضای شبکه.

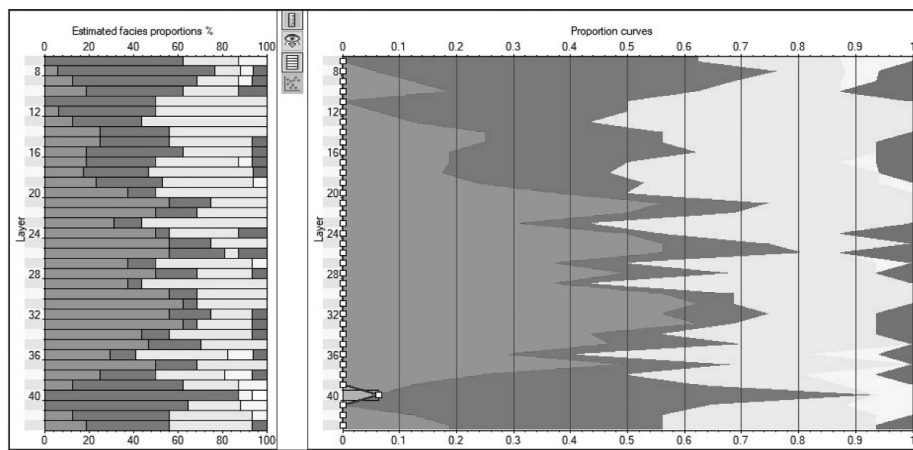
۶. تکرار این مراحل برای رخساره‌های احتمالی متعدد برای تصحیح و انتخاب بهترین رخداد.

پس از انجام مراحل فوق، به جهت بررسی صحت مدل‌های پردازش شده و انتخاب بهترین رخداد، آنالیزهای حساسیت سنجی با استفاده از هیستوگرام و مقادیر آماری محاسبه گردید. بعد از انجام مراحل واریوگرافی و انتخاب بهترین روش واریوگرام، مقادیر انحراف معیار^۱، سقف واریوگرام^۲، اثر قطعه‌ای^۳ و دامنه شعاع تأثیر^۴، برای هر یک از کد رخساره‌ها تعریف و از آن برای تخمین در فضای شبکه سلولی استفاده گردید. همان‌گونه که در شکل ۷ ارائه شده است، از بین مدل‌های تجربی واریوگرام مدل‌های برای هر یک از کد رخساره‌ها استفاده گردید. مدل واریوگرام کروی از مبدأ مختصات شروع شده و در نزدیکی مبدأ، رفتار خطی دارد. با افزایش h منحنی به سرعت به سمت مقادیر بیشتر $\gamma(h)$ صعود می‌کند. آنگاه به تدریج از شیب آن کم می‌شود و در فاصله معینی که دامنه تأثیر نامیده می‌شود، به سقف خود می‌رسد و در همین مقدار باقی‌ماند

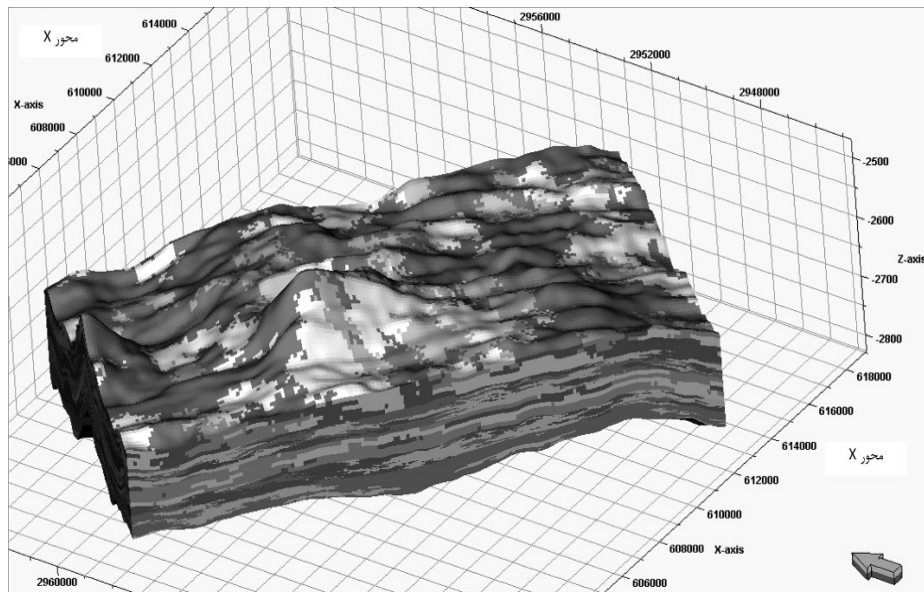
1. Standard Covariance Parameters
2. Sill
3. Nugget
4. Range

جدول ۳ مقادیر درصد فراوانی هر یک از کدهای سنگ رخساره‌ای قبل و بعد از فرآیند مدل‌سازی

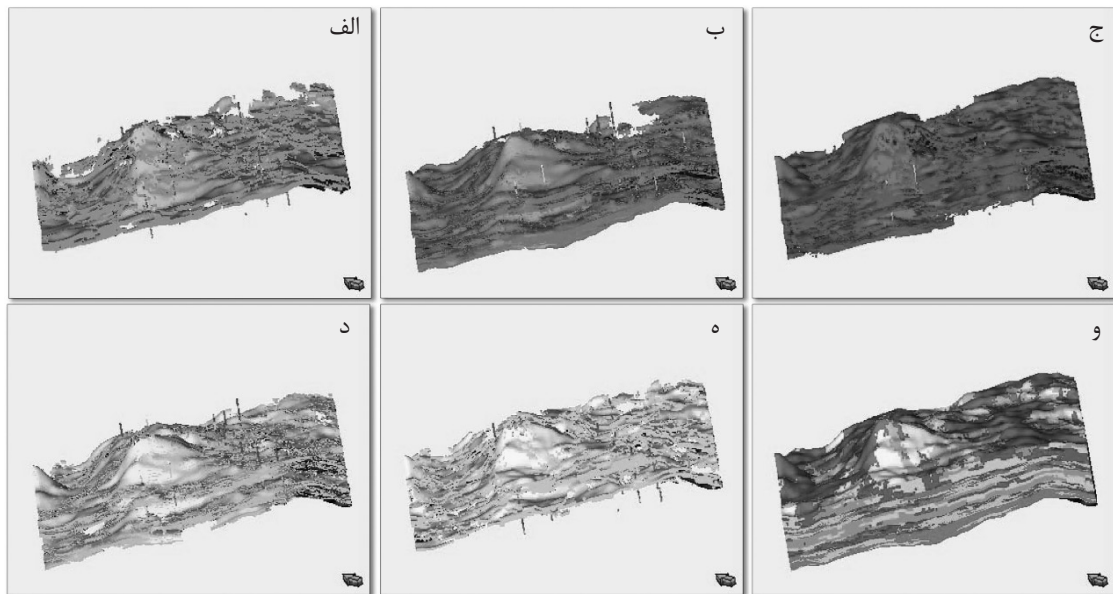
کدهای سنگ رخساره‌ای												تعداد	کلاس
دولومیت به همراه انیدریت ۵		سنگ آهک دولومیتی ۴		شیل ۳		دولومیت ۲		سنگ آهک ۱		انیدریت ۰			
مدل (%)	ورودی (%)	مدل (%)	ورودی (%)	مدل (%)	ورودی (%)	مدل (%)	ورودی (%)	مدل (%)	ورودی (%)	مدل (%)	ورودی (%)		
۳۳/۴	۳۳/۵	-	-	۰/۷	۰/۸	۵۱/۶	۵۱/۲	-	-	۱۴/۳	۱۴/۵	۱	الف
۵/۶	۶	۳۳/۴	۳۳/۱	-	-	۲۹/۸	۳۰/۴	۳۱/۱	۳۰/۳	۰/۱	۰/۲	۲	
۲۴/۷	۲۵	۱/۴	۱/۲	-	-	۱۲/۴	۱۲	-	-	۶۱/۵	۶۱/۸	۳	
۴/۸	۴/۶	۱۹/۳	۱۹/۸	-	-	۴۱/۴	۴۱	۳۲/۹	۳۳/۱	۱/۶	۱/۵	۱	ب
۰/۱	۰/۳	۸/۷	۸/۵	-	-	۰/۸	۰/۶	۹۰/۴	۹۰/۶	-	-	۲	
-	-	۱۷/۵	۱۷/۴	-	-	۳/۱	۲/۸	۷۹/۴	۷۹/۸	-	-	۳	



شکل ۸ مدل واریوگرافی در جهت اصلی- افقی برای کد رخساره‌های تعریف شده



شکل ۹ مدل تخمینی سنگ رخساره‌ها در میدان مورد مطالعه برای بخش الف و ب



شکل ۱۰ مدل گسترش هر یک از کد رخساره‌ها در محدوده میدان مورد مطالعه، الف) توزیع کد رخساره‌ای انیدریت، ب) توزیع کد رخساره‌ای کلسیت، ج) توزیع کد رخساره‌ای دولومیت، د) توزیع کد رخساره‌ای کلسیت- دولومیت، ه) توزیع کد رخساره‌ای دولومیت- انیدریت، و) توزیع تمام کد رخساره‌ها در محدوده مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

مغزه، جهت بخش‌بندی کلاس‌های سنگ‌رخساره‌ای استفاده گردید. شش کلاس سنگ‌رخساره‌ای تعریف شده در این مطالعه پس از بررسی و آنالیزهای واریوگرافی، با استفاده از روش شبیه‌سازی پی در پی در فضای شبکه سلولی توزیع گردید. استفاده از نتایج این مطالعه می‌تواند در مخازن هتروژنی مانند مخازن کربناته که توزیع خواص مخزنی تابعی از سنگ‌شناسی و سنگ‌رخساره‌ای نهشته‌ها می‌باشد، به‌عنوان اساس و پایه تقسیم‌بندی و مدل‌سازی خصوصیات مخزنی (تخلخل و تراوایی) مورد استفاده قرار گیرد. اعتبارسنجی صورت گرفته و مقایسه نتایج به‌دست آمده در این مطالعه که با حفر چاه‌های جدید (تعداد ۳ چاه در محدوده مورد مطالعه) نیز مورد تأیید قرار گرفت، نشان داد که روش اشاره شده در این تحقیق دقت بالایی داشته (ضریب ۰.۸۵٪ در تخمین سنگ‌رخساره‌ها) و می‌توان با تکیه بر آن برای توالی‌های مشابه، نحوه گسترش سنگ‌رخساره‌ها و نواحی مستعد مخزنی را پیش‌بینی نمود.

استفاده از دانش زمین‌آمار به‌دلیل نگاه ترکیبی از دو دانش ریاضی و زمین‌شناسی در ارزیابی و مطالعات مخازن نفت و گاز رو به گسترش می‌باشد. تاکنون مطالعات محدودی در زمینه نحوه گسترش سنگ‌شناسی لایه‌ها با استفاده از دانش زمین‌آمار در مخازن کربناته انجام شده است. ساخت و استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی شده می‌تواند در کاهش ریسک‌های حفاری و اقتصادی در طرح‌های اکتشاف و توسعه میادین هیدروکربوری نقش بسزایی داشته باشد. در این مطالعه، چگونگی گسترش سنگ‌رخساره‌ای نهشته‌های کربناته- تبخیری سازند کنگان در یکی از میادین هیدروکربوری خلیج فارس مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، نگاره‌های پتروفیزیکی، خرده‌های حفاری و مغزه ۲۱ چاه از یکی از میادین هیدروکربوری خلیج فارس برای مدل‌سازی سنگ‌رخساره‌ای با استفاده از روش‌های زمین‌آمار استفاده گردید. پس از تفسیر پتروفیزیکی نگاره‌های چاه‌پیمایی، از اطلاعات تفسیر به‌دست آمده به‌همراه توصیف ماکروسکوپی خرده‌های حفاری و

مراجع

- [1]. Noetinger B. and Zargar G., "Multiscale description and upscaling of fluid flow in subsurface reservoirs," Oil & Gas Science and Technology, Vol. 59, pp. 119–139, 2004.
- [2]. Aziz, K., "Reservoir simulation grids: opportunities and problems," Journal of Petroleum Technology, Vol. 45, pp. 658–663, 1993.
- [3]. Durlofsky L. J., "Upscaling and gridding of fine scale geological models for flow simulation," Paper presented at the 8th International Forum on Reservoir Simulation Iles Borromees, Stresa, Italy, June 20–24, 2005.
- [۴]. امیدوار ا.، کمالی م.، کاظم‌زاده.ع.، "شبیه‌سازی سه‌بعدی استاتیکی و تخمین پارامترهای مخزنی با به‌کارگیری روش‌های زمین‌آماری در یکی از مخازن ایران،" پژوهش نفت، ص. ۴۹، ۱۳۹۲.
- [۵]. رامین ب.، رفیعی ب.، رحیمی ز.، محسنی ح.، ظهرا ب‌زاده م.، "مدل‌سازی سه‌بعدی مخازن کربناته با استفاده از زمین‌آمار: مطالعه موردی برای تخمین تخلخل در میدان A حوضه زاگرس (ایران)،" پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ص. ۱۴۲، ۱۳۸۹.
- [۶]. فردلزر جانی س.، کمالی م.، کدخدایی ع.، صبحی ق.، "مدل‌سازی سه‌بعدی تخلخل با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی در یکی از میدانی نفتی خلیج فارس،" پژوهش نفت، ص. ۸۸، ۱۳۹۵.
- [۷]. سفیداری ا.، دشتی ع.، کدخدایی ع.، اسدی ا.، "مدل‌سازی گروه‌های رخسارهای براساس داده‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی (لاگ‌های چاه‌پیمایی) در میدان گازی پارس جنوبی،" پژوهش نفت، ص. ۸۲، ۱۳۹۴.
- [8]. Watheq J. and Al-Mudhafar., "Geostatistical lithofacies modeling of the upper sandstone member/Zubair formation in south Rumaila oil field, Iraq," Arab. J. Geosc., No. 10, p. 153, 2017.
- [9]. Harris D. G., "The role of geology in reservoir simulation studies," Journal of Petroleum Technology, Vol. 27, Issue 5, pp. 625–632, 1975.
- [10]. Fadi Henri N., "Multi-scale quantitative diagenesis and impacts on heterogeneity of carbonate reservoir rocks," Springer International Publishing AG 2017.
- [11]. Alsharhan A. S. And Nairn A. E. M., "Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East," Elsevier, Netherlands, pp. 934, 1997.
- [12]. Ziegler M., "Late permian to holocene palaeofacies evolution of the Arabian plate and its hydrocarbon occurrences," Geoarabia, Vol. 6, No. 3, pp. 445–504, 2001.
- [13]. Insalaco E., Virgone A., Courme B., Gaillot J., Kamali M., Moallemi A., Lotfpour M. and Monibi S., "Upper danian member and Kangan formation between the Zagros mountains and offshore Fars, Iran: depositional system," Biostratigraphy and Stratigraphic Architecture, Geo-Arabia, Vol. 11, pp. 75–176, 2006.
- [14]. Ghorbani M., "Lithostratigraphy of Iran," 1st ed., Springer Geology, Cham, Switzerland, pp. 1-296, 2019.
- [15]. Alsharhan A. S., "Sedimentological character and hydrocarbon parameters of The Middle Permian to early triassic khuff formation united Arab Emirates," Geo-Arabia, Vol. 11, pp. 121–158, 2006.
- [16]. Rahimpour Bonab H., Esrafil Dizaji B. And Tavakoli V., "Dolomitization and anhydrite precipitation in permo-triassic carbonates at the South Pars Gas field, Offshore Iran: controls on reservoir quality," Journ. Petrol. Geol., Vol. 33, pp. 43–66, 2010.
- [17]. Kenney J. F. and Keeping E. S., "Mathematics of statistics, part 1, chapter linear regression and correlation," 3rd ed. Van Nostrand, Princeton, N.J., pp. 252–285, 1962.
- [18]. Deutsch C. V., Journel A. G., GSLIB. "Geostatistical software library and user's guide," DOI: 10.2307/1270548

New York, 1998.

[19]. Rana N. C. and Joag P. S., "Classical mechanics," Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2001.

[20]. Caers J. and Zhang T., "Multiple-point geostatistics: a quantitative vehicle for integrating geologic analogs into multiple reservoir models," AAPG (American Association of Petroleum Geologists) Memoir, 80, pp. 383-394, 2004.

[21]. Journel A. G., "Geostatistics for reservoir characterization," SPE- 20750-MS, presented at the SPE annual technical conference and exhibition, New Orleans, Louisiana, 1990.

[22]. Liu Y., Harding A., Abriel W. and Strebelle S., "Multiple-point simulation integrating wells, three-dimensional seismic data, and geology," AAPG Bull, Vol. 88, No. 7, pp. 905–921, 2004.

[23]. Bradley C. Wallet, and Hardisty R., "Unsupervised seismic facies using Gaussian mixture models," Interpretation, Vol. 7, Issue 3, pp. SE93–SE111, 2019.

[24]. Sharifi F., Arab-Amiri A. R., Kamkar Rouhani A. and Alipour-Asli M., "Combining a robust PCA of logratio transformed data and geostatistical sequential Gaussian simulation approach for geochemical characterization of orogenic gold deposits: a case study from the Alut area, NW of Iran. Geochemistry," Exploration, Environment, Analysis, 2019.

[25]. Jason W. Rush and Eugene C. Rankey, "Geostatistical facies modeling trends for oolitic tidal sand shoals," AAPG Bulletin, Vol. 101, Issue 8, pp. 1341–1379, 2017.

[26]. Gorain S. Shalivahan, "Application of attribute-based inversion and spectral decomposition with red–green–blue colour blending for visualization of geological features: a case study from the Kalol Field, Cambay Basin, India," Petroleum Geoscience, Vol. 24, No. 1, pp. 102–111, 2017.

[27]. Li Sh., Zhang Y., Zhang X. and Du Ch., "Geologic modeling and fluid-flow simulation of acid gas disposal in western Wyoming," AAPG Bulletin, Vol. 96, No. 4, pp. 635–664, 2012.

[28]. Mehran M. Hassanpour, Michael J. Pyrcz and Clayton V. Deutsch, "Improved geostatistical models of inclined heterolithic strata for McMurray Formation, Alberta, Canada," AAPG Bulletin, Vol. 97, No. 7, pp. 1209–1224, 2013.

[29]. Zagayevskiy Y. and Deutsch C. V., "Grid-free petroleum reservoir characterization with truncated pluri-Gaussian simulation: Hekla case study," Petroleum Geoscience, Vol. 22, No. 3, pp. 241–256, 2016.

[30]. Wackernagel H., "Multivariate Geostatistics," 3rd ed., Springer-Verlag, Berlin, pp. 387, 2003.

[31]. Isaaks E. H. and Srivastava R. M., "an introduction to applied Geostatistics," Oxford University Press, New York, 1989.

[32]. Caers J., "Petroleum geostatistics," Society of Petroleum Engineers, pp. 104, 2005.

[33]. Jacobs Harold R., "Mathematics; a human endeavor," 3rd ed., 1994.

[34]. Journel AG, Alabert FG, "New method for reservoir mapping," J. Pet Techno, Vol. 142, No. 02, pp.212–218, 1990.

[35]. Massonnat G. J., Alabert F. G. and Giudicelli C. B., "Anguilla marine, a deep-sea-fan reservoir offshore Gabon: from geology to stochastic modelling," SPE-24709-MS Paper Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Washington, D.C., 4–7 October 1992.

[36]. Pyrcz M. J. and Deutsch C. V., "Geostatistical reservoir modeling," 2nd ed., Oxford University Press, New York, 2014.

[37]. Goovaerts P., "Geostatistics for natural resources evaluation," Oxford University Press, New York, 1997.



Geostatistical Lithofacies Modeling of Carbonate-Evaporite Succession -Kangan Formation-Based on Variography Analysis and Sequential Indicator Simulation Method in One of the Hydrocarbon Fields of Persian Gulf

Mostafa Sabouhi*¹, Maral Naghavi Azad² and Payman Rezaee¹

1. Geology Department, Faculty of Science, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran

2. Petrolran Development Company, Tehran, Iran

m.sabouhi.phd@hormozgan.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2019.3630.2655

Received: January/29/2019

Accepted: August/28/2019

INTRODUCTION

Spatial lithofacies modeling is a very important step in reservoir characterization because it accurately reflects the stratigraphic reservoir structure and provides clear insight into how the reservoir is subdivided through characterization. A lithofacies model is beneficial because it helps understand individually the description of depositional environment as well as capturing all of the heterogeneity levels and scales which are integrated into the reservoir model [1]. Moreover, the lithofacies model can also serve as a guide to predict reservoir properties in different locations with the same depositional

environment. In addition, the process of integrating all available geological information into the numerical reservoir simulation in terms of 3D lithofacies distribution is called Lithofacies modeling. Moreover, several methods have been used for geostatistical lithofacies modeling including variogram-based methods, object-based modeling, and multiple-point geostatistics. In this research, the geostatistical methods have been done for carbonate-evaporite succession in one of the hydrocarbon fields in Persian Gulf.

GEOLOGICAL SETTING

The studied field is located in the center part

of Persian Gulf area. In the studied area, the succession from pre-Cambrian to recent were deposited. The Permian Dalan and Triassic Kangan carbonate-evaporite successions are the main producer reservoir in the studied area [2]. Based on previous investigation and studies [3], the Kangan Formation were deposited in homocline carbonate ramp. Also, the studied interval, the Triassic formation, rests conformably upon the Permian Dalan formation. It is conformably overlain by the argillaceous Triassic Dashtak Formation. Furthermore, the Kangan succession consists of limestone, dolomite, anhydrite and some shale interlayers.

MATERIAL AND METHODS

In this study, data from 21 wells including: raw and evaluated petrophysical data, core and cutting, were investigated.

RESULTS AND DISCUSSION

The geostatistics knowledge offers a way of describing the spatial continuity of natural phenomena and provides adaptations of classical regression techniques to take advantage of this continuity [4]. Moreover, geostatistics integrates mathematical concepts, computer technology, and stochastic modeling with each other to generate multiple equiprobable realizations that keep the reservoir heterogeneity by honoring all the input data.

Most geostatistical reservoir characterization models are variogram-based algorithms such as sequential indicator simulation for lithofacies modeling and sequential Gaussian simulation for continuous petrophysical parameters.

The most common geostatistical facies modeling is SISIM which is designed for modeling the

spatial distribution of facies based on the indicator variogram. The indicator variogram is used to build up a discrete cumulative density function (CDF) for the individual facies types, and the node is assigned a lithotype, selected at random from this discrete CDF [5].

After encoding facies into elementary samples 0, 1 given threshold values, the indicator variogram then can be formulated as:

$$I(Z_k; x) = \begin{cases} 0 & \text{if } Z(x) > Z_k \\ 1 & \text{if } Z(x) \leq Z_k \end{cases} \quad (1)$$

where $I(Z_k; x)$ is the indicator random variable that is associated with random function $Z(x)$ for a threshold value Z_k . The expected value of the indicator random variable $I(Z_k; x)$ is equal to the cumulative probability:

$$\Pr\{Z(x) < Z_k\} \quad (2)$$

as shown below:

$$E(I(Z_k; x)) = 0 \times \Pr\{Z(x) > Z_k\} + 1 \times \Pr\{Z(x) \leq Z_k\} \quad (3)$$

$$E(I(Z_k; x)) = \Pr\{Z(x) < Z_k\}$$

The first step in building the 3D property model is to construct the structural model that includes grid structure and horizon modeling. The grid structure involves setting the grid system for the reservoir to be considered for all the upcoming geological and reservoir modeling. In the studied filed, the carbonate-evaporite succession has been divided in two zones (A and B) and six sub zones (a1-a2-a3 and b1-b2-b3) based on petrophysical evidences and indications from cutting. Moreover, for modeling lithofacies, six lithofacies codes including anhydrite, limestone, dolomite, shale, dolomitic limestone, dolomite with anhydrite have been presented (Fig.1). After variography analysis, identified codes were propagated based on a sequential indicator simulation method by considering depositional

environment of Kangan Formation (Early Triassic) in the studied area.

For the geostatistical lithofacies modeling, the sequential indicator simulation was adopted to reconstruct a 3D lithofacies distribution for the sector of studied field/main pay. The well lithofacies distributions were upscaled, given each layer prior to starting the 3D geostatistical

lithofacies modeling. The main steps for the implementation procedure of sequential indicator simulation are outlined as follows:

1. Upscale well log data,
2. Construct and fit indicator variogram (Fig.2),
3. Random seed number,
4. Frequency distribution of upscaled data points (Fig.3).

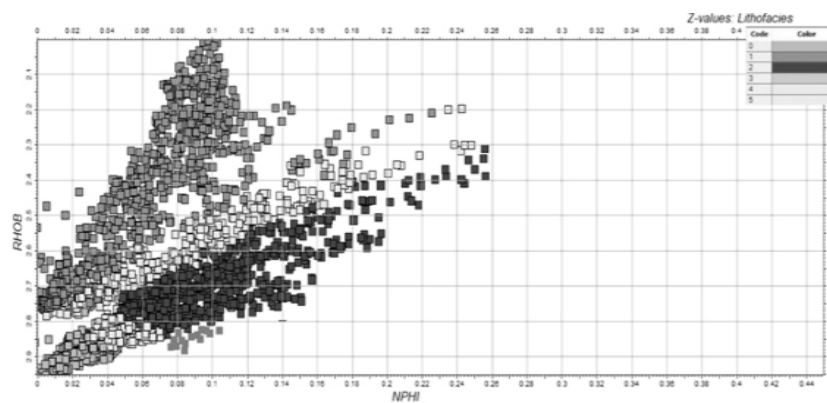


Figure 1: Lithofacies classification to 6 classes in this study.

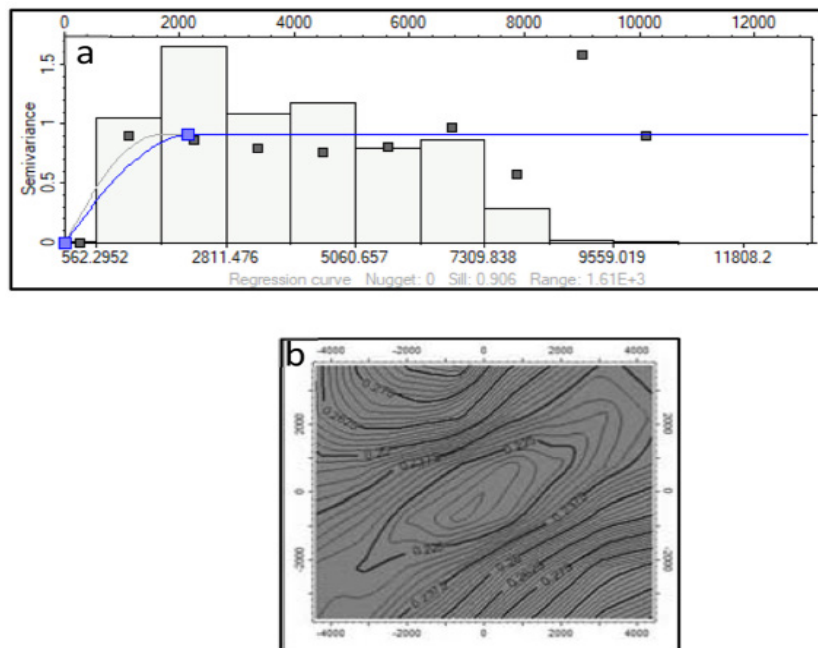


Figure 2: Indicator major variograms for zone a2 (a) and variogram map for zone a2 (b).

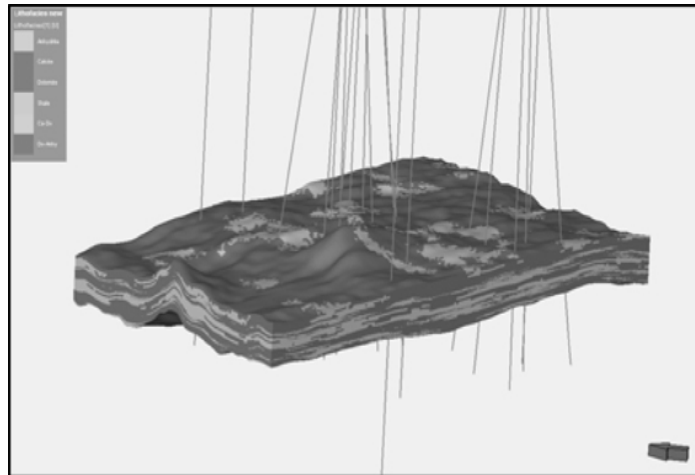


Figure 3: 3D SIS lithofacies distributions in the studied field.

The results of this study, which have been confirmed by new drilling well data, show that this method has a good accuracy and can be used in related sequences to predict the lithofacies and good reservoir properties.

CONCLUSIONS

To capture the most realistic geological model and to preserve the reservoir heterogeneity, the geostatistical model of Sequential Indicator Simulation (SIS) has been adopted for 3D lithofacies reconstruction of the Triassic carbonate-evaporite succession in one of the hydrocarbon fields in Persian Gulf.

In this study, data from 21 wells including petrophysical data (raw and interpreted), core and cutting have been used for lithofacies prediction and geostatistical propagation. Based on this investigation, six lithofacies classes have been defined and propagated based on SIS method.

Finally, the result of 3D lithofacies model can be used as basis for the petrophysical property modeling and heterogeneity of carbonate reservoir.

REFERENCES

[1]. Fadi Henri N., "Multi-scale quantitative diagenesis

and impacts on heterogeneity of carbonate reservoir rocks," Springer International Publishing AG 2017.

[2]. Alsharhan A. S. And Nairn A. E. M., "Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East," Elsevier, Netherlands, pp. 934, 1997.

[3]. Rahimpour Bonab H., Esrafil Dizaji B. And Tavakoli V., "Dolomitization and anhydrite precipitation in permo-triassic carbonates at the South Pars Gas field, Offshore Iran: controls on reservoir quality," Journ. Petrol. Geol., Vol. 33, pp. 43–66, 2010.

[4]. Journel A. G., "Geostatistics for reservoir characterization," SPE- 20750-MS, presented at the SPE annual technical conference and exhibition, New Orleans, Louisiana, 1990.