

بررسی و مدل‌سازی سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی سازند داریان با استفاده از زمین‌آمار در میدان نفتی رشادت

اله‌ام اسدی مهماندوستی*، سعید میرزایی؛ دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی
سید علی معلمی؛ شرکت ملی نفت ایران، پژوهشکده ازدیاد برداشت مخازن نفت و گاز
بی‌تا ارباب؛ شرکت نفت فلات قاره

پذیرش ۹۶/۰۶/۱۹

دریافت ۹۵/۱۲/۲۵

چکیده

در نبود پژوهش‌های پتروگرافی یا محدودیت آن، تعیین رخساره‌های الکتریکی و مدل‌سازی سه‌بعدی مخازن کربناته می‌تواند نقشی مهم در ارزیابی پارامترهای پتروفیزیکی نظیر تخلخل و تراوایی داشته باشد. بررسی نمودارهای گاما و چگالی سازند داریان در ۲۷ حلقه چاه میدان نفتی رشادت واقع در خلیج فارس که زون‌های کربناته محدود دارند، منجر به شناسایی ۱۲ رخساره الکتریکی بر اساس روش خوشه‌بندی زمین‌آمار شد. مقایسه رخساره‌های الکتریکی شناسایی شده با داده‌های مغزه موجود نشان داد که رخساره الکتریکی ۱ بهترین و رخساره‌های الکتریکی ۱۱ و ۱۲ کم‌ترین کیفیت مخزنی را در سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده دارند. با استفاده از رابطه تخلخل و تراوایی در هر یک از زون‌های سازند داریان و جای‌گذاری تخلخل مؤثر به جای تخلخل مغزه، نمودار تخمین تراوایی ترسیم شد. همچنین مدل‌سازی ساختمانی نشان داد که میدان نفتی رشادت تاقدیسی با روند شمال شرق- جنوب غرب است که دارای ساختار گنبدی ملایم با شیب ۱ الی ۳ درجه در دامنه‌ها است و قله این گنبد در لایه‌های مخزنی بسیار هموار است. مدل‌سازی سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی شناسایی شده مخزن داریان با استفاده از روش شبیه‌سازی شاخص متوالی نشان داد که زون ۱ را به دلیل فراوانی زیاد رخساره‌های الکتریکی ۱۱ و ۱۲، اشباع آب فراوان، پیریتی بودن و تخلخل و تراوایی اندک می‌توان به‌عنوان یک زون غیرمخزنی در نظر گرفت. در حالی که زون ۲ به دلیل فراوانی زیاد رخساره‌های الکتریکی با کیفیت مخزنی بیشتر، تخلخل و تراوایی زیاد و اشباع آب اندک بهترین کیفیت مخزنی را دارد. زون ۳ سازند داریان دارای رخساره‌های الکتریکی با گامای زیاد است که کیفیت مخزنی کمی نیز دارد، ولی نسبت به زون ۱ کیفیت مخزنی بهتری دارد. قسمت‌های بالایی زون ۳ نیز اشباع آب کمی دارند. فراوانی رخساره‌های الکتریکی با کیفیت مخزنی زیاد در زون ۴ نسبت به زون ۲ کم‌تر است، ولی کیفیت مخزنی بیش‌تری نسبت به زون ۱ و ۳ دارد. با این حال اشباع آب در بیش‌تر بخش‌های زون ۴ زیاد است.

واژه‌های کلیدی: رخساره‌های الکتریکی، مدل‌سازی سه‌بعدی، سازند داریان، زمین‌آمار، کیفیت مخزنی

مقدمه

در خلیج فارس، سازند داریان معادل سازند شعیبا^۱ در کشورهای عربی و بخشی از گروه خامی است [۱۳]. سازند داریان و معادل آن در جنوب خلیج فارس، یک واحد تولیدکننده هیدروکربور است. این سنگ آهک‌ها مخازن مهم

تولیدکننده نفت در چندین میدان در شرق عربستان سعودی، امارات متحده عربی، عمان و مناطق دور از ساحل ایران و قطر هستند. این سازند، تولیدکننده هیدروکربور در جنوب خلیج فارس تا شرق فارس/کمان قطر (میادین بلال و رشادت) است [۱۳].

با توجه به این که در سال‌های گذشته بحث گسترش میادین و اکتشافات جدید مخازن فرعی در صنعت نفت قوت گرفته است؛ به‌ویژه این که گروه خامی یکی از اهداف اصلی این پروژه‌ها است [۵]، از این رو، بررسی دقیق نهشته‌های آهکی سازند داریان از دیدگاه رخساره‌های لاگ و نقش آن‌ها به‌عنوان عوامل کنترل‌کننده کیفیت مخزنی و توزیع سه بعدی آن‌ها، در این خصوص اهمیت دارد.

تا کنون محققان بر اساس مفاهیم مختلف ریاضی و آمار به بررسی رخساره‌های الکتریکی مخازن کربناته ایران پرداخته‌اند (به‌عنوان مثال توکلی ۱۳۸۴، رحیمی بهار و همکاران ۱۳۹۱، سفیداری و همکاران ۱۳۹۳، فرازانی و همکاران ۱۳۹۴، اقبال کیانی و همکاران ۱۳۹۵)، اما بررسی‌هایی روی رخساره‌های الکتریکی و مدل‌سازی سازند داریان بر اساس زمین آمار انجام نشده است. بر این اساس در این مقاله، سازند داریان در ۲۷ حلقه چاه به‌عنوان مهم‌ترین افق مخزنی میدان نفتی رشادت واقع در خلیج فارس به‌منظور بررسی انتخاب شد. از نقطه‌نظر ویژگی‌های مخزنی، سازند داریان در میدان نفتی رشادت با تخلخل خیلی خوب تا عالی و مقدار نسبتاً خوب هیدروکربور مشخص می‌شود. بر اساس داده‌های مغزه و لاگ موجود، سازند داریان متشکل از سنگ آهک و آهک‌های آرژیلیتی است. سازند داریان در میدان نفتی رشادت دارای چهار زون است که به سادگی با سنگ‌شناسی قابل تفکیک هستند. زون ۲ خود به چهار زیرزون (2A 2B, 2C, 2D) و زون ۳ نیز به دو زیرزون (3A, 3B) تقسیم می‌شوند. زون‌های ۱ و ۳ شامل سنگ آهک‌های آرژیلیتی هستند، در حالی که زون‌های ۲ و ۴ عمدتاً سنگ آهک هستند. بر اساس گزارش‌های حاصل از توصیف مغزه و خرده‌های حفاری، زون ۱ سازند داریان کم و بیش پیریتی است (گزارشات داخلی شرکت نفت فلات قاره، ۱۳۸۷). با توجه به این که سازند داریان در میدان نفتی رشادت دارای مقاطع نازک کربناته و پژوهش‌های ریزرخساره‌ای بسیار محدود است، هدف از این مقاله ۱. تعیین رخساره‌های الکتریکی سازند داریان در ۲۷ حلقه چاه با استفاده از روش بدون ناظر و خوشه‌بندی^۱ MRGC، ۲. بررسی کیفیت مخزنی رخساره‌های الکتریکی با استفاده از داده‌های مغزه، ۳. مدل‌سازی ساختمانی سه‌بعدی و استفاده از روش زمین‌آماری شبیه‌سازی شاخص متوالی و ۴. مدل‌سازی سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی شناسایی شده با استفاده از داده‌های لاگ، مغزه و نقشه‌های تراز زیرسطحی در میدان نفتی رشادت است.

موقعیت زمین‌شناسی و چینه‌شناسی منطقه بررسی شده

میدان نفتی رشادت در سال ۱۹۶۶ به‌وسیله شرکت ایمینوکو^۲ کشف شد. این میدان در خلیج فارس در حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب- جنوب‌شرق جزیره لاوان واقع شده است. میدان نفتی رشادت از میادین مهم خلیج فارس از نظر ذخایر نفت و گاز به‌شمار می‌آید. در این میدان تولید نفت از سه سازند مخزنی سروک (میشریف)، داریان و سورمه (عرب) تولید می‌شود و سازند داریان مهم‌ترین افق مخزنی آن است [۱۳]. سازندهای حفاری شده در میدان نفتی

1. Multi Regression Graph Base Clustering
2. IMINOCO

رشادت و ویژگی آن‌ها بر اساس توصیف مغزه و خرده‌های حفاری چاه R32 در جدول ۱ به‌عنوان نمونه نشان داده شده است.

از نظر تکنونیک‌های میدان نفتی رشادت در شرق خلیج فارس واقع شده است. حوضه غنی از هیدروکربن خلیج فارس بخشی از ورقه عربی است که در حاشیه شرقی ورقه عربی میان عرض‌های جغرافیایی ۲۰ تا ۳۰ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۷ تا ۵۷ درجه شرقی جای گرفته است. در طول فانروزویک این حوضه بخشی از حاشیه غیرفعال قاره‌های گندوانا بوده است که رو به سوی اقیانوس پالئوتتیس در زمان پالئوزویک و نئوتتیس در زمان مزوزویک گسترش داشته است [۱]. طی برخورد خشکی عربی و ایران مرکزی (مزوزویک-سنوزویک)، پیش‌گودال مزوپوتامین-خلیج فارس در میان زاگرس چین‌خورده و شلف عربی تشکیل شد. فرونشست پیوسته و به‌نسبت پایدار و شرایط اقلیمی حاکم در طول زمان زمین‌شناسی سبب تشکیل توالی‌های ستبر کربناتی و تبخیری (کم‌تر ماسه‌سنگی) در این حوضه شده است [۱۲]، [۱۷]، [۱۸]. این حوضه چهار دوره تکاملی زمین‌شناسی را تجربه کرده است که شامل الف) کامبرین تا کربونیفر (حاشیه غیرفعال)، ب) پرموتریاس (کافت)، ج) ژوراسیک تا کرتاسه پیشین (حاشیه غیرفعال) و د) کرتاسه پسین تا حال (برخورد قاره‌ای) است [۲۱].

داده‌ها و روش بررسی

در این پژوهش برای بررسی رخساره‌های الکتریکی، کیفیت مخزنی، وضعیت ساختمانی و مدل‌سازی سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی و توزیع آن‌ها از نمودارهای پتروفیزیکی، داده‌های مغزه و داده‌های زیرسطحی سازند داریان در میدان نفتی رشادت استفاده شد. داده‌های در دسترس از چاه‌های بررسی شده در میدان نفتی رشادت را شرکت نفتی فلات قاره، در جدول ۲ به اختصار نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲ تنها لاگ‌های گاما و چگالی سازند کربناته داریان در اکثر چاه‌های میدان نفتی رشادت (۲۷ چاه) موجود است و از این رو، لاگ‌های گاما و چگالی برای تعیین رخساره‌های الکتریکی سازند داریان برای ورود به نرم‌افزار Geolog 7 انتخاب شدند. به‌منظور تعیین رخساره‌های الکتریکی سازند داریان از روش خوشه‌بندی MRGC که تلفیقی از هوش مصنوعی و خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی است (مدنی و همکاران، ۱۳۹۴)، استفاده شد. هم‌چنین با توجه به نداشتن قطعیت‌های تطابق عمقی داده‌های مغزه و لاگ در میدان نفتی رشادت و وجود نداشتن پژوهش‌های پتروگرافی به‌دلیل محدود بودن مقاطع نازک (فلات قاره، ۱۳۸۷)، به‌منظور تعیین رخساره‌های الکتریکی سازند داریان از روش بدون ناظر^۱ استفاده شد.

روش خوشه‌بندی MRGC یکی از معدود روش‌های مناسب و غیرپارامتریک برای بررسی و تحلیل خوشه‌های داده‌های حاصل از چاه‌نگارها و مغزه‌های حفاری است. در این روش سعی می‌شود تا داده‌ها به خوشه‌هایی تقسیم شوند تا شباهت داده‌های درون خوشه حداکثر و شباهت بین داده‌های هر خوشه با خوشه دیگر حداقل باشد. مزیت این روش عبارت از نیاز نداشتن به دانش اولیه از مجموعه داده‌ها، کم بودن پارامترها و نبود حساسیت به تغییرات آن‌ها، پایدار بودن نتیجه با تغییر مقدار پارامترها، دارا بودن محدودیت در تعیین تعداد ابعاد نقاط و خوشه و تولید خودکار تعداد بهینه خوشه‌ها بدون دخالت ناظر است [۲۰]. تفاوت اصلی روش خوشه‌بندی MRGC با سایر روش‌های خوشه‌بندی

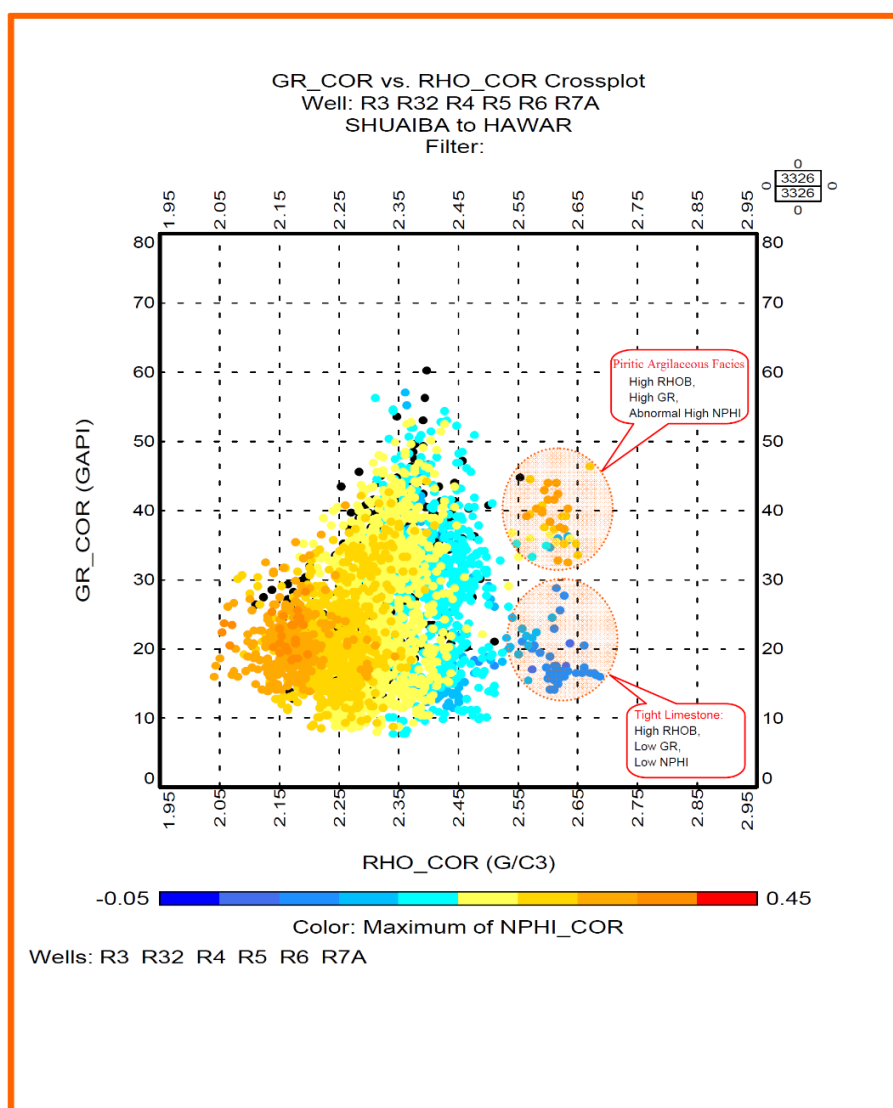
در این است که در این روش نرم‌افزار تعداد خوشه‌های مشخصی را به‌عنوان خروجی به کاربر معرفی می‌کند و کاربر با در نظر گرفتن پیش‌زمینه علمی و مطالعاتی در این راستا، بهترین خوشه را انتخاب می‌کند [۶].

با انتخاب این روش، تعداد حداقل و حداکثر خوشه‌ها و تعداد مدل‌هایی که لازم است ساخته شوند، باید مشخص شود که در این قسمت، چندین بار با شرایط مختلف به‌منظور انتخاب مدل برتر، مدل رخساره‌های الکتریکی ساخته شده و با یکدیگر مقایسه شدند. بعد از تعیین رخساره‌های الکتریکی، کیفیت مخزنی هر یک از طریق نمودارهای جعبه و خط داده‌های مغزه بررسی شد. در مرحله بعدی با استفاده از نرم‌افزار پترل و اطلاعات موجود، مدل ساختمانی میدان، شبکه‌بندی مخزن، لایه‌بندی و زون‌های سازند داریان در میدان نفتی رشادت ساخته شد و متعاقب آن مدل سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی در هر یک از زون‌ها با انتخاب واریوگرام‌های مناسب و روش زمین‌آماری شبیه‌سازی شاخص متوالی که امروزه به‌صورت متداولی برای مدل‌سازی سه‌بعدی رخساره‌ها استفاده می‌شود، ایجاد شد [۱۴]، [۱۵]، [۲۳].

تعیین رخساره‌های الکتریکی سازند داریان

به‌منظور تعیین رخساره‌های الکتریکی سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده، ۶ چاه که دارای اطلاعات کامل تری بودند به‌عنوان چاه‌های مدل انتخاب شدند. بعد از تعیین چاه‌ها و لاگ‌های مدل و اینتروال مطالعاتی (سازند داریان)، آموزش داده‌ها^۱ انجام شد که نتایج آن رسم هیستوگرام نمودارهای مدل و کراس‌پلات آن‌ها در مقابل یکدیگر است. کراس پلات‌های ایجاد شده در تعیین الکتروفاسیس‌ها و پیش‌بینی گونه‌های سنگی سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده استفاده شدند. در شکل ۱ نمودار گاما در مقابل نمودار چگالی در چاه‌های مدل ترسیم شده است که رنگ‌ها در این شکل نشان‌دهنده مقادیر نمودار نوترون هستند. ترسیم داده‌های لاگ گاما در مقابل لاگ چگالی مخزن داریان در چاه تحقیقاتی، سه دسته مجموعه داده را نشان می‌دهد. دو دسته کوچک مشخص شده در شکل ۱، با توجه به لیتولوژی سازند (اطلاعات توصیف مغزه که سازند داریان را متشکل از سنگ آهک تا آهک‌های آرژیلیتی و گاه سنگ آهک آرژیلیتی پیریتی نشان می‌دهد) (گزارش داخلی شرکت نفت فلات قاره، ۱۳۸۷) و اطلاعات لاگ، مرتبط با سنگ آهک‌های آرژیلیتی و سنگ آهک‌های کم‌تخلخل (tight) است. آهک‌های کم‌تخلخل با مقادیر خیلی کم نمودارهای نوترون (تخلخل اندک) و گاما (تمیزی سازند) و چگالی زیاد (منعکس‌کننده تخلخل کم) مشخص می‌شوند، در حالی که آهک‌های آرژیلیتی پیریتی با مقادیر خیلی زیاد لاگ چگالی مشخص می‌شوند. زیاد بودن مقدار نمودار گاما و نوترون در رخساره پیریت‌دار به دلیل آرژیلیتی بودن این رخساره است. زیرا وجود کانی‌های رسی سبب افزایش مقدار نمودار گاما و نوترون می‌شوند.

سپس با روش MRGC ده مدل (تعداد مدل تولیدی اختیاری است) با تعداد خوشه‌های بین ۶ تا ۳۶ از قبیل مدل‌های ۶، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۹، ۲۱، ۲۵، ۲۸، ۳۰ و ۳۶ خوشه‌ای ایجاد شد. با توجه به جزئیات و خوشه‌بندی ریزتر، مدل ۳۶ خوشه‌ای به‌منظور بررسی‌های بیش‌تر انتخاب شد و با بررسی خوشه‌ها (رخساره‌های الکتریکی)، خوشه‌های دارای ویژگی‌های نزدیک به هم با یکدیگر ادغام شدند. در نهایت مدل اولیه دارای ۳۶ رخساره الکتریکی به ۱۲ رخساره الکتریکی تبدیل شد. شکل ۲، مدل نهایی رخساره‌های الکتریکی سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱. ترسیم نمودار گاما در مقابل نمودار چگالی سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده. رنگ‌ها در این شکل نشان‌دهنده مقادیر نمودار نوترون است

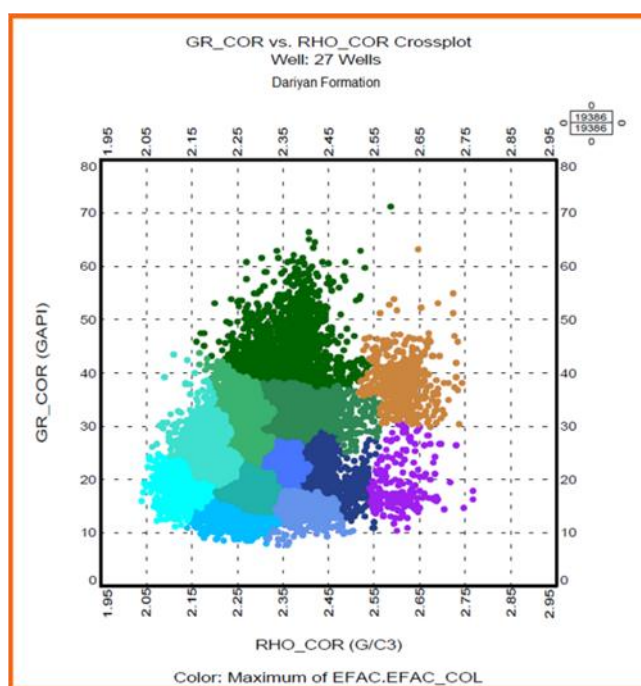
در شکل ۳، کراس پلات نمودار گاما در مقابل نمودار چگالی نشان داده شده است که رنگ‌ها در این شکل نشان‌دهنده انواع رخساره‌های الکتریکی سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده هستند. این شکل نشان می‌دهد که رخساره‌های الکتریکی ۱ تا ۱۰ شامل سنگ آهک تا آهک‌های آرژیلیتی است در حالی که رخساره الکتریکی ۱۱ شامل سنگ آهک کم تخلخل و رخساره الکتریکی ۱۲ معرف رخساره آهک آرژیلیتی پیریتی است.

بررسی کیفیت مخزنی رخساره‌های الکتریکی

برای بررسی وضعیت آماری و کیفیت مخزنی آن‌ها رخساره‌های الکتریکی می‌توان از نمودارهای جعبه‌ای، به دلیل کاربرد زیاد در نمایش داده‌ها و تفسیر آسان آن، استفاده کرد. تخلخل به‌عنوان فاکتور کنترل‌کننده میزان گنجایش سنگ مخزن در ذخیره هیدروکربور و تراوایی به‌عنوان عامل کنترل‌کننده جریان سیال، نقشی کلیدی در بررسی کیفیت

	NAME	COL	PAT	WEIGHT	RHO_COR	GR_COR
1	FACIES_1			211		
2	FACIES_2			370		
3	FACIES_3			324		
4	FACIES_4			575		
5	FACIES_5			373		
6	FACIES_6			188		
7	FACIES_7			124		
8	FACIES_8			171		
9	FACIES_9			598		
10	FACIES_10			306		
11	FACIES_11			47		
12	FACIES_12			39		

شکل ۲. مدل نهایی رخساره‌های الکتریکی سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده واقع در خلیج فارس



شکل ۳. ترسیم نمودار گاما مقابل نمودار چگالی. رنگ‌ها نشان‌دهنده رخساره‌های الکتریکی سازند داریان هستند

مخزنی رخساره‌های الکتریکی سازند بررسی شده دارند [۲۲]. شکل‌های ۴، ۵ و ۶ به ترتیب نمودارهای جعبه‌ای تخلخل مؤثر، تخلخل مغزه و تراوایی افقی مغزه را برای رخساره‌های الکتریکی شناسایی شده سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده نشان می‌دهند. بر اساس نمودارهای جعبه‌ای تخلخل مؤثر، تخلخل مغزه و تراوایی افقی مغزه به‌طور کلی به جز چند مورد، از رخساره الکتریکی ۱ به سمت رخساره الکتریکی ۱۲ کاهش می‌یابند و رخساره‌های الکتریکی ۱، ۲ و ۳ بالاترین تخلخل مؤثر، تخلخل و تراوایی افقی مغزه را دارند. در حالی که رخساره‌های الکتریکی ۱۱ و ۱۲ کم‌ترین تخلخل مؤثر را دارند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که عمدتاً کیفیت مخزنی به جز چند مورد، از رخساره الکتریکی ۱ به سمت رخساره الکتریکی ۱۲ کاهش می‌یابد و در این بین رخساره‌های الکتریکی ۱، ۲ و ۳ بالاترین و رخساره‌های الکتریکی ۱۱ و ۱۲ کم‌ترین کیفیت مخزنی را در سازند داریان میدان نفتی بررسی شده دارند. کراس پلات تخلخل و

تراوایی در زون‌های سازند داریان و رخساره‌های الکتریکی شناسایی شده در میدان نفتی بررسی شده در شکل ۷ نشان داده شده است. با جای‌گذاری تخلخل مؤثر به جای تخلخل مغزه در روابط به‌دست آمده از داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه، این روابط به‌دست آمد که با استفاده از این روابط، نمودار تخمین تراوایی ایجاد شد:

$$\begin{aligned} \text{Zone 1} \quad PERM &= 10^{**}(-1.32 + 8.31*(PHIE)) \\ \text{Zone 2} \quad PERM &= 10^{**}(-1.57 + 7.83*(PHIE)) \\ \text{Zone 3} \quad PERM &= 10^{**}(-1.83 + 9.20*(PHIE)) \\ \text{Zone 4} \quad PERM &= 10^{**}(-1.57 + 8.67*(PHIE)) \end{aligned}$$

بررسی وضعیت پتروفیزیکی، توزیع رخساره‌های الکتریکی و نمودار تخمین تراوایی در چاه‌هایی با اطلاعات مغزه کامل‌تر (AR-12 و AR-16) در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. بر مبنای شکل‌های مذکور می‌توان دریافت که زون یک سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده کم و بیش پیریتی است. در زون‌های ۱ و ۳ مقدار نمودار گاما افزایش یافته که حاکی از آرژیلیتی بودن این زون‌هاست. در حالی که، زون‌های ۲ و ۴ دارای گامای اندکی هستند. بین زون‌های سازند داریان، زون ۴ دارای گامای کم‌تری است که با نتایج توصیف مغزه (تمیزترین زون سازند داریان) مطابقت خوبی دارد.

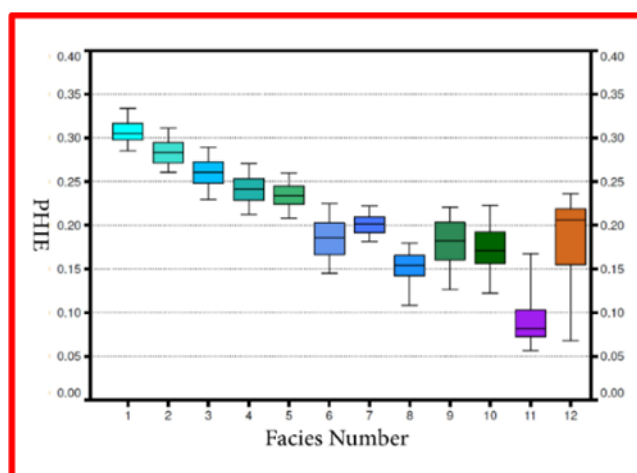
از نظر اشباع آب طبق روش آرچی، زون ۲ سازند داریان اشباع آب بسیار کمی دارد که در نتیجه اشباع هیدروکربور بیش‌تری دارد. زون ۱، میانگین اشباع آب بیش از ۵۰ درصد دارد و از نظر تخلخل مؤثر نیز زون ۱ نسبت به سایر زون‌ها مقادیر کم‌تری دارد. از نظر تخلخل و تراوایی مغزه و نمودار تخمین تراوایی نیز زون ۱ نسبت به سایر زون‌ها مقادیر کم‌تری دارد. از این رو زون ۱ اهمیت مخزنی چندانی ندارد. در تعدادی از چاه‌ها، قسمت‌های بالایی زون ۳ اشباع آب کمی دارد که می‌تواند نقش تولیدکننده هیدروکربور داشته باشد، ولی عمدتاً این زون اشباع آب زیادی دارد. بنا براین نسبت به زون ۲ اهمیت مخزنی به مراتب کم‌تری دارد. زون ۴ سازند داریان که در برگیرنده تمیزترین سنگ آهک‌های سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده است، اشباع آب بالایی نشان می‌دهد. از طرفی قسمت‌های پایینی زون ۴، مقادیر اندکی از تخلخل مغزه، تخلخل مؤثر، تراوایی، نمودار تخمین تراوایی و گاما دارند که نشان از سنگ آهک‌های کم تخلخل دارد. این زون در بعضی از قسمت‌ها دارای اشباع آب کم و کیفیت مخزنی مناسب است. توزیع رخساره‌های الکتریکی نیز مطابقت خوبی با بررسی‌های پتروفیزیکی زون‌های سازند داریان دارد. توزیع زیاد رخساره‌های الکتریکی ۱۱ و ۱۲ در زون یک نشان‌دهنده کیفیت مخزنی کم این زون است در حالی که توزیع بالای رخساره‌های الکتریکی ۱، ۲ و ۳ در زون ۲ نشان‌گر کیفیت مخزنی بیش‌تر این زون هستند. نمودار تخمین تراوایی نیز تطابق مناسبی با توزیع رخساره‌های الکتریکی دارد. به‌منظور درک بهتر کیفیت مخزنی، مدل‌سازی سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی سازند داریان در میدان نفتی رشادت انجام شد.

مدل‌سازی ساختمانی میدان نفتی بررسی شده

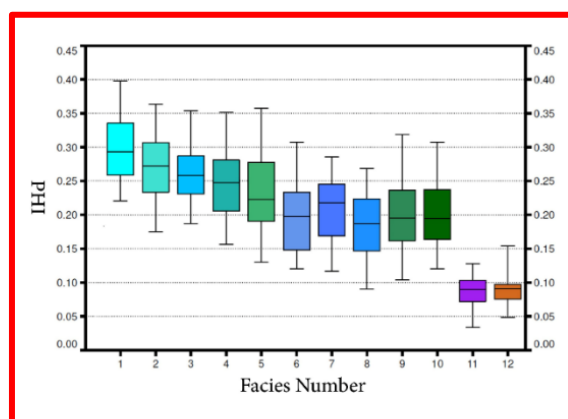
ساخت مدل ساختمانی میدان بررسی شده به‌منظور تعیین چارچوبی برای ساخت مدل سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی الزامی است.

۱. شکل هندسی ساختار میدان نفتی بررسی شده

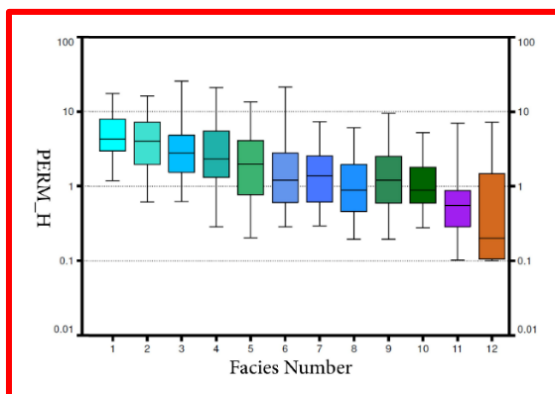
ساختار میدان نفتی بررسی شده، تاقدیسی با روند شمال شرق - جنوب غرب با حدود ۱۵ کیلومتر طول در امتداد محور خود است که حدوداً ۱۰ کیلومتر عرض در بزرگ‌ترین واحد مخزنی خود یعنی سازند داریان دارد. این میدان، ساختاری گنبدی ملایم با شیب ۱ الی ۳ درجه در دامنه‌هاست و قله این گنبد در لایه‌های مخزنی بسیار هموار است. نقشه‌های تراز زیرسطحی که از تفسیر داده‌های لرزه‌ای حاصل شدند به خوبی نشان‌دهنده شکل هندسی ساختار است (شکل ۱۱). چنان‌که شکل ۱۱ نشان می‌دهد، تاقدیس میدان نفتی بررسی شده، گسترده، ملایم و تا حدودی کشیده با روند شمال - شمال شرق است که شیب دامنه شرقی آن نسبتاً تندتر است.



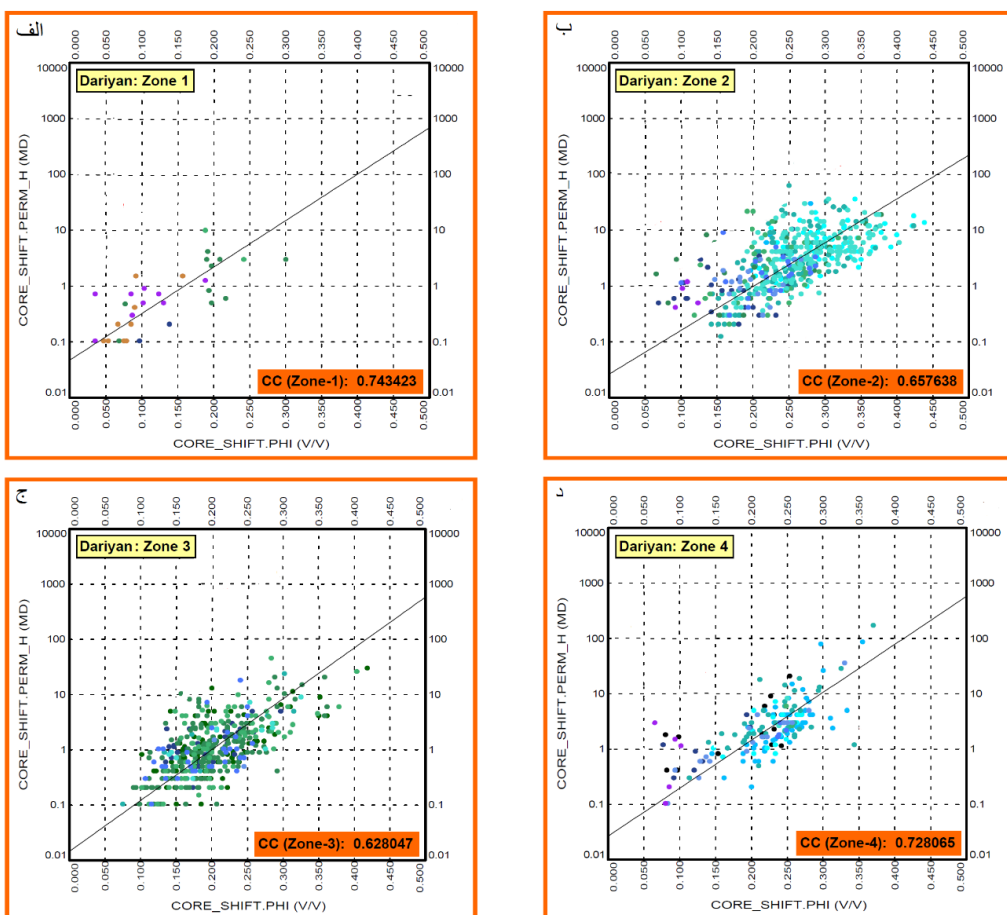
شکل ۴. نمودار جعبه‌ای تخلخل مؤثر برای رخساره‌های الکتریکی سازند داریان



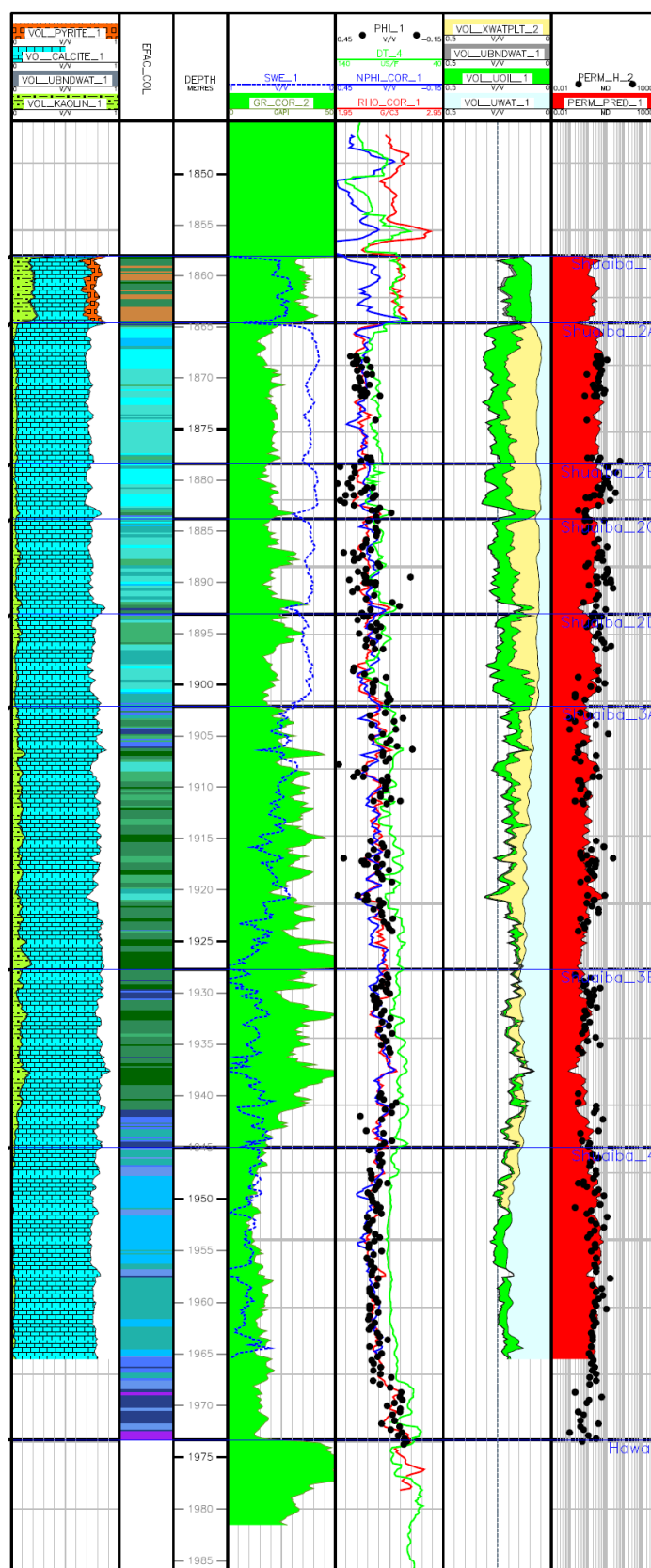
شکل ۵. نمودار جعبه‌ای تخلخل مغزه برای رخساره‌های الکتریکی سازند داریان



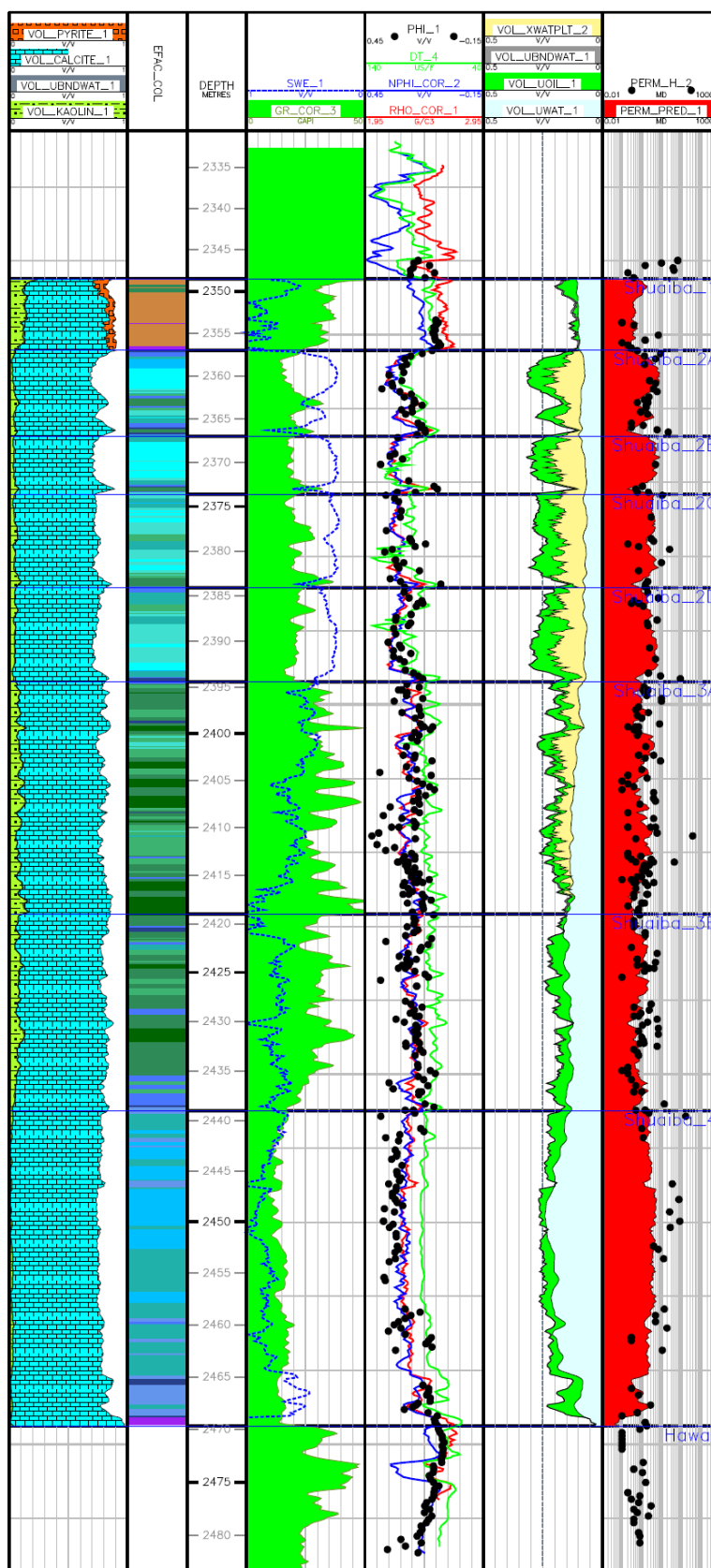
شکل ۶. نمودار جعبه‌ای تراوایی افقی مغزه برای رخساره‌های الکتریکی سازند داریان



شکل ۷. رابطه تخلخل و تراوایی همراه با ضریب رگرسیون در هر یک از زون‌های سازند داریان. رنگ‌ها نشان‌دهنده رخساره‌های الکتریکی شناسایی شده هستند. الف) رابطه تخلخل و تراوایی در زون ۱، ب) رابطه تخلخل و تراوایی در زون ۲، ج) رابطه تخلخل و تراوایی در زون ۳ و د) رابطه تخلخل و تراوایی در زون ۴ است



شکل ۸. وضعیت پتروفیزیکی، توزیع رخساره‌های الکتریکی و نمودار تخمین تراوایی در چاه AR-12



شکل ۹. وضعیت پتروفیزیکی، توزیع رخساره‌های الکتریکی و نمودار تخمین تراوایی در چاه AR-16

۲. گسل‌های میدان نفتی بررسی شده

بر اساس تفسیر لرزه‌نگاری، دو گسل اصلی با روند شمال شرقی- جنوب غربی در ساختمان تاقدیسی میدان نفتی بررسی شده شناسایی شده است. گسل ۱. گسلی نرمال با طول حدود ۱۳ کیلومتر است که در جنوب غرب ساختار تاقدیسی میدان قرار گرفته است. این گسل دارای امتداد و شیب N146, 68 S – SW است و حداکثر افت قائم ناشی از این گسل ۳۳ متر است. گسل ۲. گسلی نرمال با حدود ۱۱ کیلومتر طول است که در فاصله ۱ الی ۲ کیلومتری غرب گسل ۱ قرار دارد. این گسل دارای امتداد و شیب N150, 79 N – NE است (گزارش داخلی شرکت نفت فلات قاره، ۱۳۸۷). مدل گسل‌های سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده با کمک نرم‌افزار پترل ایجاد شد (شکل ۱۱). سطح تماس آب و نفت میدان نفتی بررسی شده در عمق ۱۵۲۸ متری و در طول میدان ثابت در نظر گرفته شده است. (گزارش داخلی شرکت نفت فلات قاره، ۱۳۸۷). این سطح را می‌توان با نرم‌افزار پترل در عمق مورد نظر ایجاد کرد (شکل ۱۰).

مدل سازی رخساره‌ای

بعد از ساخت مدل ساختمانی مخزن، مخزن در جهت‌های افقی X و Y شبکه‌بندی شد. ابعاد هر یک از این سلول‌ها با توجه به ابعاد مخزن تعیین می‌شود. بعد از شبکه‌بندی در جهت‌های افقی باید مخزن در جهت عمودی نیز تفکیک شود. با توجه به این که قدرت تفکیک اطلاعات عمودی از اطلاعات جانبی مخزن بیشتر است، باید تقسیم‌بندی مخزن در جهت عمودی کوچک‌تر باشد. در این مرحله با وارد کردن نقشه‌های تراز زیرسطحی هر زون مخزنی، زون‌های مخزنی نیز ساخته می‌شوند، تا برای مدل‌سازی رخساره‌ای هر زون استفاده شوند. در این پژوهش، مخزن در جهت افقی به صورت سلول‌های ۵۰ در ۵۰ و در جهت عمودی به صورت یک متری لایه‌بندی شد. حاصل این کار، تقسیم بندی مخزن به صورت سلول‌هایی با طول و عرض ۵۰ متر و ارتفاع ۱ متر است. با توجه به این که معمولاً اندازه سلول‌های مخزن در جهت عمودی بزرگ‌تر از بازه اندازه‌گیری ابزارهای نمودارگیری است، ممکن است یک سلول در جهت عمودی دارای چندین مقدار اندازه‌گیری پارامتر مورد نظر باشد، حال آن که هر سلول باید فقط یک مقدار مشخص از پارامتر مورد نظر را داشته باشد. از این رو، اطلاعات رخساره‌های الکتریکی باید درشت‌نمایی^۱ شوند تا برای هر سلول فقط یک مقدار از پارامتر مورد نظر تخصیص داده شود. بعد از درشت‌نمایی داده‌ها، مدل‌های واریوگرافی رخساره‌ها بر هر یک زون‌ها در دو جهت افقی و جهت عمودی در نرم‌افزار پترل مشخص شدند.

نتایج تعیین واریوگرام‌های رخساره‌های الکتریکی سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده در جدول ۳ نشان داده شده است. در این جدول مشخصات واریوگرام‌های تعیین شده در سه جهت فضایی به صورت مختصر بیان شده است. واریوگرام‌های تعیین شده دارای اثر قطعه‌ای بسیار پایینی هستند که نشان‌دهنده مدل‌های واریوگرافی مناسب است، زیرا استفاده از مدل‌های واریوگرافی با اثر قطعه‌ای بالا باعث می‌شود رخساره‌های الکتریکی شبیه‌سازی شده و ویژگی‌های آن‌ها، دارای خطای زیاد باشند. اثر قطعه‌ای بیان‌کننده تغییرات نسبتاً شدید متغیر در فواصل کوچک، تغییرپذیری در مقیاس فضایی کوچک‌تر از مقیاس نمونه‌برداری و یا دقت کم در اندازه‌گیری متغیر است [۲۳].

1. Scale up

بعد از تحلیل داده‌ها و تعیین مدل‌های واریوگرافی، باید از یکی از روش‌های زمین‌آماری برای مدل‌سازی سه‌بعدی رخساره‌های لاگ استفاده شود. در نرم‌افزار پترل روش‌های مختلف قطعی و احتمالی برای مدل‌سازی متغیرهای گسسته (از قبیل رخساره‌ها) تعبیه شده است. در این پژوهش از روش احتمالی شبیه‌سازی شاخص متوالی^۱ SIS استفاده شد. به‌بیانی دیگر، در مدل‌سازی رخساره بهتر است از روش‌های احتمالی استفاده شود که در بین روش‌های احتمالی، روش SIS معروف‌ترین روش توزیع رخساره‌هاست [۲]. منظور از روش‌های احتمالی بدین معنی است که با هر بار اجرا کردن مدل با پارامترهای یک‌سان (ولی Seed متفاوت) آن‌چه ساخته می‌شود با دیگری متفاوت است و هر نتیجه یک تحقق^۲ نامیده می‌شود. هرچه یک مدل به تعداد بیش‌تری ساخته شود، می‌توان آن‌ها را با هم مقایسه کرده و محتمل‌ترین مدل را که به تعداد بیش‌تر تولید شده است به‌عنوان بهترین مدل انتخاب کرد [۲].

شکل ۱۱ الف، مدل سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی زون ۱ سازند داریان در میدان نفتی بررسی‌شده را نشان می‌دهد. بر مبنای مدل، این زون دارای رخساره‌های الکتریکی ۱۲، ۱۱، ۱۰ و ۹ است که رخساره الکتریکی ۱۲ بیش‌ترین فراوانی را دارد. چنان‌که قبلاً در مورد کیفیت مخزنی رخساره‌های الکتریکی گفته شد، رخساره‌های الکتریکی ۱۲ و ۱۱ با کم‌ترین کیفیت مخزنی، گسترش زیادی در این زون دارند. از این‌رو، این زون کم‌ترین کیفیت مخزنی را دارد به‌گونه‌ای که می‌توان این زون را یک زون غیرمخزنی قلمداد کرد. رخساره الکتریکی ۱۲ تنها در این زون دیده شده و معرف سنگ آهک‌های آرژیلیتی پیریتی است. رخساره الکتریکی ۱۰ چنان‌که قبلاً بیان شد، معرف سنگ آهک‌های تمیز کم‌تخلخل است. رخساره‌های الکتریکی ۱۰ و ۹ نیز دارای میزان گامای زیاد هستند که معرف سنگ آهک‌های آرژیلیتی هستند.

شکل ۱۱ ب، مدل سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی زون ۲ سازند داریان در میدان نفتی بررسی‌شده را نشان می‌دهد. بر اساس این مدل، این زون دارای رخساره‌های الکتریکی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۸ است. رخساره‌های الکتریکی ۱، ۲ و ۳ دارای بیش‌ترین کیفیت مخزنی هستند که گسترش زیادی در این زون دارند. از این‌رو، این زون دارای کیفیت مخزنی بالایی است. چنان‌که قبلاً بیان شد، بر مبنای اطلاعات توصیف مغزه این زون شامل سنگ آهک‌های تمیز است که تطابق مناسبی با رخساره‌های الکتریکی این زون دارد (رخساره‌های الکتریکی این زون دارای گامای بسیار کمی هستند).

شکل ۱۱ ج، مدل سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی زون ۳ سازند داریان را نشان می‌دهد. بر اساس این مدل، این زون دارای رخساره‌های الکتریکی ۴، ۵، ۸، ۹ و ۱۰ است. رخساره الکتریکی ۹ بیش‌ترین فراوانی را در این زون دارد. این رخساره الکتریکی دارای مقدار نسبتاً زیادی از اشعه گاما است و کیفیت مخزنی کمی دارد. بنابر اطلاعات توصیف مغزه، این زون شامل سنگ آهک‌های آرژیلیتی است، که گسترش کتروفاسیس‌های ۹ و ۱۰ مؤید این امر است. هر چند رخساره‌های الکتریکی ۴ و ۵ که گامای کمی دارند نیز به‌مقدار کم در این زون وجود دارند. این زون از نظر کیفیت مخزنی شرایط مناسب‌تری نسبت به زون ۱ دارد ولی کیفیت مخزنی کم‌تری نسبت به زون ۲ دارد.

شکل ۱۱ د، مدل سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی زون ۴ سازند داریان در میدان نفتی بررسی‌شده را نشان می‌دهد. بر اساس این مدل، این زون دارای رخساره‌های الکتریکی ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۱۱ است. رخساره‌های ۳، ۴، ۶ و ۷

1. Sequential Indicator Simulation
2. Realization

بیشترین گسترش را در این زون دارند. توزیع رخساره‌های الکتریکی با بیشترین کیفیت مخزنی (۱، ۲ و ۳) در این زون نسبت به زون ۲ کم‌تر است. از این‌رو، این زون کیفیت مخزنی کم‌تری نسبت به زون ۲ و کیفیت مخزنی بیش‌تری نسبت به زون‌های ۱ و ۳ دارد. بر مبنای اطلاعات توصیف مغزه، این زون شامل تمیزترین سنگ آهک‌های سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده است که توزیع رخساره‌های الکتریکی دارای گامای پایین آن را تأیید می‌کند.

جدول ۱. سازندها و ترکیب سنگ‌شناسی آن‌ها در چاه R-32 میدان نفتی رشادت [۱۳]

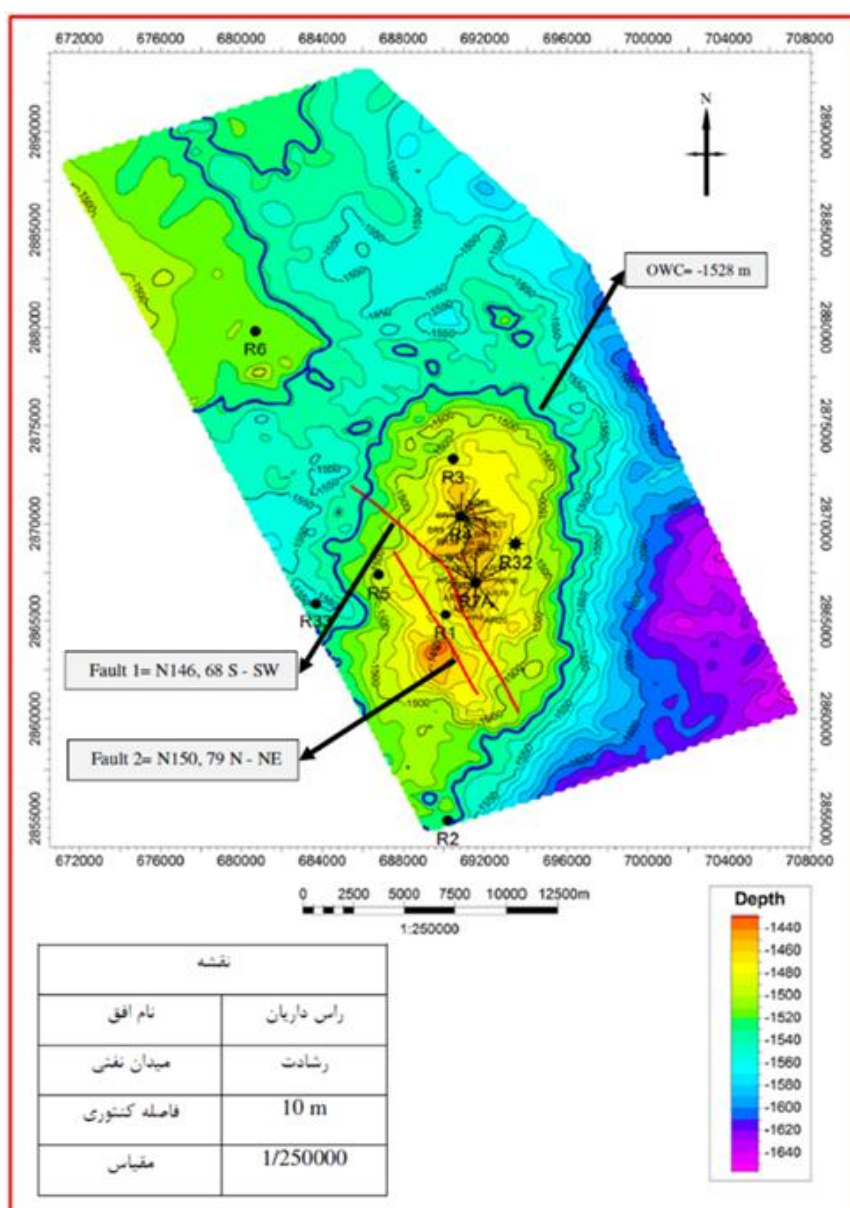
سازند	سنگ شناسی	ضخامت (متر)
آسماری	دولوستون‌های درشت‌بلور به‌همراه فسیل <i>Elphidium sp.</i>	۷۵
چهرم	دولوستون با نشانه‌هایی از انیدریت	۶۰۵
گورپی	شیل و شیل آهکی به‌همراه فسیل <i>Heterohelix</i>	۴۶
ایلام	شیل آهکی میکرایتی به‌همراه فسیل <i>Rotalia skourensis</i>	۱۰۰
لافان	شیل با رخساره قاره‌ای	۲۴
سروک	سنگ‌آهک به‌همراه خرده‌های رودیست	۱۸۷
کژدمی	شیل به‌همراه گلاکونیت و فسیل اربیتولینا	۶۵
داریان	سنگ‌آهک میکرایتی، مادستون تا وکستون و سنگ آهک اربیتولین‌دار	۱۳۷
گدوان	سنگ‌آهک میکرایتی رسی با بخش خلیج	۴۹
فهلپان	دولوستون، سنگ آهک دولومیتی همراه با اکتینوئید	۳۵۲
هیث	انیدریت	۷۴
سورمه	سنگ‌آهک	۷۴۴
نیریز	شیل با دولوستون و اینتروال‌های آهکی	۱۷
دشتک	شیل آغار همراه با تبخیری	۳۴۶
کنگان	دولوستون همراه با شیل در قسمت‌های بالایی	۱۷۰
دالان	دولوستون‌های آهکی با انیدریت در قاعده	۳۵۴

جدول ۲. داده‌های موجود در چاه‌های در دسترس از سازند داریان در میدان نفتی رشادت

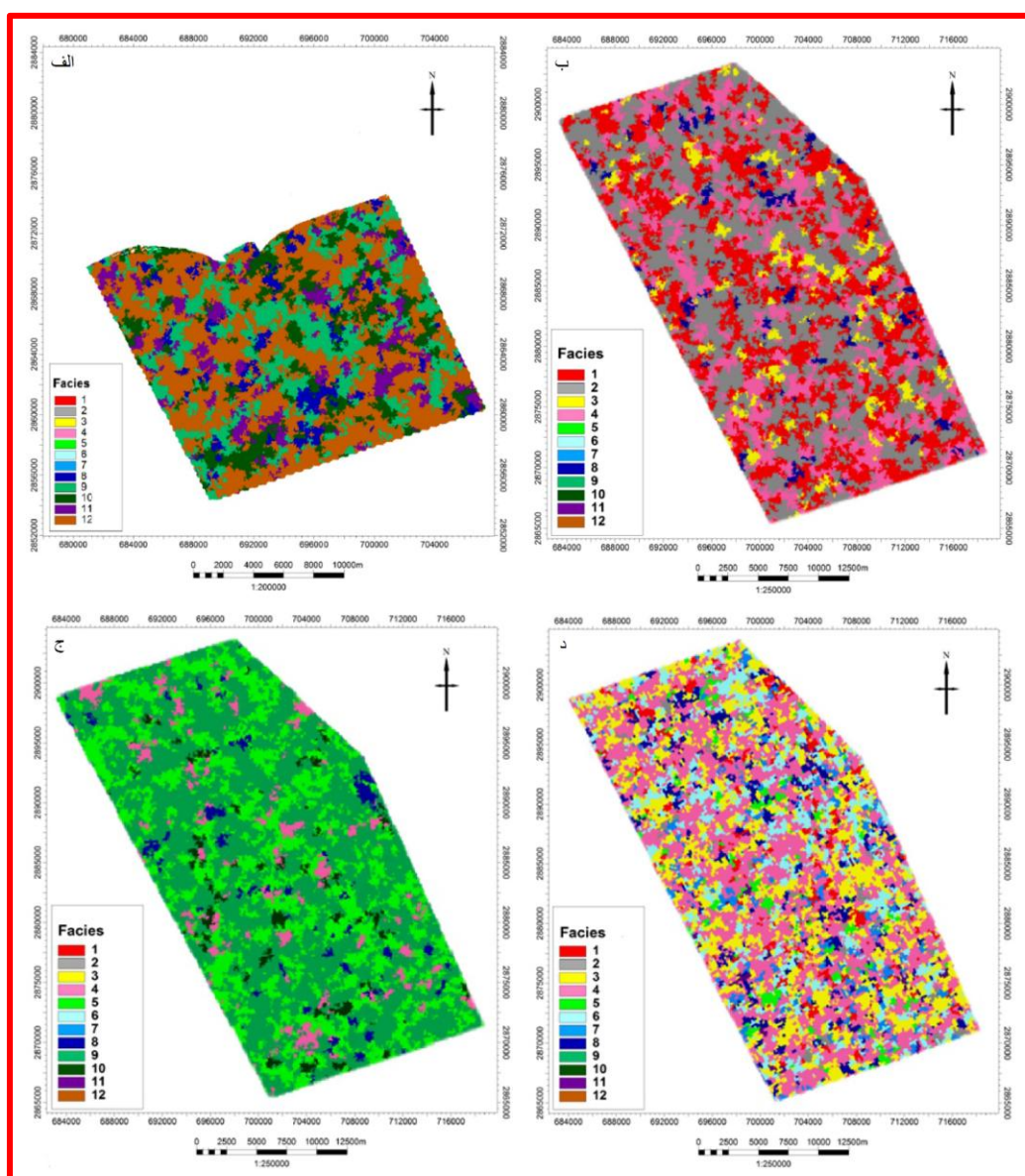
No.	Well	Caliber log	GR-log	Sonic log	Density log	Neutron log	Resistivity log	Core
1	R-1	CALI	GR	DT	Unavailable	NEUT	ILD/LL7/MIL	★
2	R-2	CALI	GR	Unavailable	Unavailable	NEUT	LL7/MIL	★
3	R-3	CALI	GR	DT	RHOB	NEUT	LL7/MIL	★
4	R-4	CALI	GR	Unavailable	RHOB	NEUT	ILD/LL7/MIL	★
5	R-5	CALI	GR	DT	RHOB	NEUT	ILD/LL7/MIL	★
6	R-6	CALI	GR	DT	RHOB	NEUT	ILD/LL7/MIL	★
7	R-32	CALI	GR	DT	RHOB	Unavailable	ILD	
8	R-33	Unavailable	Unavailable	Unavailable	Unavailable	Unavailable	Unavailable	
9	R-7a	CALI	GR	Unavailable	RHOB	NEUT	ILD/LL7/MIL	
10	AR-8	Unavailable	GR	Unavailable	Unavailable	NEUT	ILD	★
11	AR-10	CALI	GR	DT	RHOB	SNP	LL7/MIL	★
12	AR-12	CALI	GR	DT	RHOB	SNP	ILD/LL7/MIL	★
13	AR-14	CALI	GR	Unavailable	RHOB	Unavailable	ILD	
14	AR-16	CALI	GR	DT	RHOB	SNP	ILD/LL7/MIL	★
15	AR-18	CALI	GR	Unavailable	RHOB	Unavailable	ILD	
16	AR-20	CALI	GR	DT	RHOB	SNP	LL7/MIL	★
17	AR-22	CALI	GR	Unavailable	RHOB	Unavailable	ILD	
18	AR-24	CALI	GR	Unavailable	RHOB	Unavailable	ILD	
19	AR-26	CALI	GR	Unavailable	RHOB	Unavailable	ILD	
20	AR-28	CALI	GR	Unavailable	RHOB	Unavailable	ILD	
21	BR-9	Unavailable	GR	Unavailable	RHOB	NEUT	ILD	
22	BR-11	CALI	GR	DT	RHOB	SNP	ILD/LL7/MIL	★
23	BR-13	CALI	GR	DT	RHOB	SNP	ILD/LL7/MIL	★
24	BR-15	CALI	GR	Unavailable	RHOB	Unavailable	ILD	
25	BR-17	CALI	GR	Unavailable	RHOB	Unavailable	ILD	
26	BR-19	CALI	GR	DT	RHOB	SNP	ILD/LL7/MIL	
27	BR-21	CALI	GR	Unavailable	RHOB	Unavailable	ILD	
28	BR-23	CALI	GR	Unavailable	RHOB	Unavailable	ILD	
29	BR-25	CALI	GR	Unavailable	RHOB	Unavailable	ILD	
30	BR-27	CALI	GR	Unavailable	RHOB	Unavailable	ILD	
31	BR-29	CALI	GR	Unavailable	RHOB	Unavailable	ILD	

جدول ۳. ویژگی‌های واریوگرام‌های تعیین شده برای هر یک از زون‌های سازند داریان

متغیر	نام زون	زاویه	مدل	Major Range	Minor Range	Vertical Range	Nugget	Sill
رخساره الکتریکی	زون ۱ داریان	35.7	کروی	4326	3154	6.5	0.01	1
	زون ۲ داریان	59.1	کروی	3648	2764	6.3	0	1
	زون ۳ داریان	67.2	کروی	3858	2940	8	0.025	1
	زون ۴ داریان	43.7	کروی	4250	3523	5.1	0.015	1



شکل ۱۰. وضعیت ساختمانی میدان نفتی بررسی شده به همراه سطح آب و نفت و موقعیت چاه‌ها



شکل ۱۱. مدل‌های سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی. الف) مدل سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی زون ۱ داریان در میدان نفتی رشادت، ب) مدل سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی زون ۲ داریان در میدان نفتی رشادت، ج) مدل سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی زون ۳ داریان در میدان نفتی رشادت، د) مدل سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی زون ۴ داریان در میدان نفتی رشادت

نتیجه‌گیری

با توجه به محدودیت بسیار زیاد تحقیقات پتروگرافی سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده، شناسایی و مدل‌سازی سه‌بعدی رخساره‌های الکتریکی کمک شایانی در بررسی کیفیت مخزنی و مدل‌سازی مخزنی می‌کند. نتایج حاصل بدین شرح است:

۱۲ رخساره الکتریکی به‌روش MRGC در سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده شناسایی شد که در آن‌ها

به‌طور کلی از رخساره الکتریکی ۱ به سمت رخساره الکتریکی ۱۲ کیفیت مخزنی کاهش می‌یابد. مدل‌سازی ساختار میدان نفتی بررسی شده بیان‌گر تاق‌دیزی با روند شمال شرق- جنوب غرب با ساختاری گنبدی ملایم با شیب ۱ الی ۳ درجه بوده و قلّه این گنبد در لایه‌های مخزنی بسیار هموار است. بررسی‌های پتروفیزیکی سازند داریان در تعدادی از چاه‌های بررسی شده نشان می‌دهد که زون ۱ به دلیل تخلخل و تراوایی کم، اشباع آب زیاد و توزیع رخساره‌های الکتریکی با کیفیت مخزنی کم، اهمیت مخزنی چدانی ندارد. در حالی که زون ۲ به دلیل اشباع آب کم، تخلخل و تراوایی بیشتر نسبت به سایر زون‌ها، مهم‌ترین زون مخزنی سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده است. قسمت‌های بالایی زون ۳ و بعضی از قسمت‌های زون ۴ نیز اهمیت مخزنی زیادی دارند. مدل‌های سه‌بعدی ساخته شده، نشان می‌دهد که رخساره الکتریکی ۱۲ تنها در زون یک وجود دارد. از این رو این رخساره الکتریکی معرف سنگ آهک‌های آرژیلیتی پیریتی است. رخساره‌های الکتریکی ۱۰، ۱۱ و ۸ نیز در زون یک وجود دارند. به دلیل وجود رخساره‌های الکتریکی با کیفیت مخزنی اندک در این زون، می‌توان این زون را یک زون غیرمخزنی در نظر گرفت. توزیع رخساره‌های الکتریکی با کیفیت مخزنی بالا (۱، ۲ و ۳) عمدتاً در زون ۲ مشاهده می‌شود، از این رو می‌توان زون ۲ مخزن داریان را مهم‌ترین افق مخزنی سازند داریان در میدان نفتی بررسی شده دانست. توزیع رخساره‌های الکتریکی در زون ۳ سازند داریان بیش‌تر شامل رخساره‌های الکتریکی با مقدار گامای زیاد است که کیفیت مخزنی کمی دارد اما نسبت به زون ۱ کیفیت مخزنی بیش‌تری دارد. توزیع رخساره‌های الکتریکی زون ۴ شامل رخساره‌های الکتریکی با کیفیت مخزنی زیاد است، اما فراوانی آن‌ها نسبت به زون ۲ کم‌تر است ولی کیفیت مخزنی بالاتری نسبت به زون‌های ۱ و ۳ دارد. مدل‌های سه‌بعدی ساخته شده نیز با نتایج بررسی‌های پتروفیزیکی زون‌های سازند داریان مطابقت بیش‌تری دارد و نشان می‌دهد رخساره‌های الکتریکی می‌توانند نقش شایانی در سرشت نمایی مخازن ایفا کنند.

منابع

۱. آقائاتی ع.، "زمین‌شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران (۱۳۸۳)، ۵۲۰.
۲. امین‌زاده ع.، میرجدوی ن.، نوری طالقانی م.، "مدل‌سازی استاتیک مخازن نفت و گاز و تفسیر سائیزمیک با استفاده از نرم‌افزار پترل"، انتشارات آزاده، تهران (۱۳۹۲)، ۳۰۴.
۳. توکلی و.، "تجزیه و تحلیل رخساره‌های الکتریکی سازند آسماری در میدان مارون"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران (۱۳۸۴).
۴. رحیمی بهار ع. ا.، حسین پورصیامی ح.، "تفکیک زون‌های مختلف مخزن هیدروکربنی با کمک رخساره‌های الکتریکی"، پژوهش نفت، سال بیست و دوم، ۷۲ (۱۳۹۱) ۱۵۳-۱۴۴.
۵. رضایی پرتو ک.، رحیم‌پوربناب ح.، کدخدایی ع.، آرین م.، حاجی‌کاظمی، ا.، "بررسی رخساره‌های میکروسکوپی، محیط رسوبی و فرایندهای دیازنز مخزن داریان در میدان نفتی سلمان"، علوم زمین، سال بیست و پنجم، شماره ۹۷ (۱۳۹۴) ۲۶۷-۲۷۸.
۶. رهسپار ا.، کدخدایی ع.، بنی‌بیدهدی م.، "تعیین رخساره‌های الکتریکی مخزنی با استفاده از روش‌های خوشه‌سازی (MRGC, AHC SOM, DYNCLUST) در بخش عرب در چاه 05 - 2S میدان نفتی سلمان"، پژوهش نفت، سال

بیست و پنجم، شماره ۸۷ (۱۳۹۳) ۱۱۷-۱۰۷.

۷. سفیداری ا.، دشتی ع.، کدخدایی ع.، اسدی‌اسکندر ا.، "مدل‌سازی گروه‌های رخساره‌ای بر اساس داده‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی (لاگ‌های چاه‌پیمایی) در میدان گازی پارس جنوبی"، پژوهش نفت، سال بیست و پنجم، شماره ۸۳ (۱۳۹۳) ۹۵-۸۳.

۸. فرازانی ن.، خوشبخت ف.، توکلی و.، "بهبود تعیین نوع رخساره الکتریکی با تلفیق لاگ‌های چاه‌پیمایی و تصویرگر در سازند آسماری با استفاده از روش خوشه‌بندی گرافیک MRGC"، نشریه پژوهش نفت، دوره ۲۵، شماره ۸۳، (۱۳۹۴) ۱۸۶-۱۹۴.

۹. اقبال‌کیانی ز.، گلی ط.، جلیلیان ع.، کدخدائی ر.، "تجزیه و تحلیل رخساره‌های الکتریکی سازند سروک (کرتاسه میانی) با روش MRGC و مطابقت با ریزرخساره‌های رسوبی در یکی از میداین نفتی جنوب غرب"، زمین‌شناسی نفت ایران. سال ششم، شماره ۱۱ (۱۳۹۵) ۱-۲۱.

۱۰. گزارشات داخلی شرکت نفت فلات قاره (۱۳۸۷).

۱۱. مدنی آ.، کمری م.، رستمیان ع.، "مدل‌سازی الکتروفاسیس و پیش‌بینی لاگ با استفاده از نرم‌افزار ژئولاگ"، کتاب آوا، ۲۵۵ (۱۳۹۴).

12. Edgell H. S., "Basment Tectonics of Saudi Arabi as Related to Oil Field Structures", Eds., Dordrecht: Kluver Acad. Publ., v.9 (1992) 169-193.
13. Ghazban F., "Petroleum Geology of the Persian Gulf. Tehran University and National Iranian Oil Company", Tehran (2007) 707.
14. Jamshidnezhad M., "Experimental design in petroleum reservoir studies", Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, NewYork (2015) 175.
15. Kelkar M., Perez D., "Applied Geostatistics for Reservoir Characterization" Society of Petroleum Engineers (2002) 264.
16. Lee, S. H., Kharghoria A., Datta-Gupta A., "Electrofacies characterization and permeability predictions in complex reservoirs", SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 5 (2002) 237-248.
17. Murriss R. J., "Middle East stratigraphic evolution and oil habitat: American Association of Petroleum Geologists Bulletin", v. 64 (1980) 597-618.
18. Nairn A. E. M., Alsharhan A. S., "Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East. Elsevier, Amsterdam (1997) 843.
19. Perez H. H., Datta-Gupta A., Mishra S., "The role of electrofacies, lithofacies, and hydraulic flow units in permeability predictions from well logs: a comparative analysis using classification trees. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, v. 8, No. 02 (2005) 143-155.
20. Rabiller Ph., Ye S. J., "New tools for electrofacies analysis: multi-resolution graph-based clustering", SP-WLA 41st Annual Logging Symposium Transaction (2000) 4-7.
21. Sepehr M., Cosgrove J. W., "Structural framework of the Zagros fold-thrust belt, Iran",

- Marine and Petroleum geology. v. 21 (2004) 829-843.
22. Tiab D., Donaldson E. C., "Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties", Fourth Edition, Gulf Professional Publishing (2015) 918.
23. Zou F., "Geologic and Engineering Modeling. Developments in Petroleum Science. 61, (2013) 621-656.