

مقاله پژوهشی

نقش محیط رسوبی، ریزرخساره‌ها و دیاژنز در تغییرات مقاومت الکتریکی:
توالی پرمین - تریاس، مرکز خلیج فارس

سجاد عمرانی^۱؛ وحید توکلی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2024.462337.1234

چکیده

درک تغییرات هدایت الکتریکی محیط متخلخل در بسیاری از زمینه‌ها از جمله زمین‌شناسی، مهندسی نفت و شیمی کاربرد دارد. تغییرات در مقاومت الکتریکی سنگ‌ها می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات در خصوصیات ژئومکانیکی آن‌ها باشد. هدایت الکتریکی در سنگ‌ها را می‌توان به‌عنوان نشانه‌ای از روابط هندسی منافذ بین نمونه‌های سنگ دانست که خود توسط محیط رسوبی، ریزرخساره‌ها و در انتها فرایندهای دیاژنزی کنترل می‌شوند. بنابراین مطالعه‌ی جامع و دقیق ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی و ارتباط آن‌ها با تغییرات مقاومت الکتریکی، می‌تواند نقش حیاتی در شناسایی و توسعه میادین هیدروکربنی ایفا کند. از این رو، در این پژوهش برای اولین بار به بررسی تأثیر محیط رسوبی، ریزرخساره‌ها، فرایندهای دیاژنزی و عوامل پتروفیزیکی بر تغییرات مقاومت الکتریکی سنگ‌ها پرداخته شد. مجموعه‌ی داده‌ی استفاده شده جهت رسیدن به اهداف این مطالعه، شامل ۲۹۳ متر مغزه، ۷۲۰ داده‌ی تخلخل و تراوایی، ۹۲۱ تصویر مقطع نازک و ۲۵۱ متر لاگ‌های مختلف چاه‌پیمایی هستند. این داده‌ها از یک چاه اکتشافی در مرکز خلیج فارس جمع‌آوری شدند. در این پژوهش، پس از شناسایی و تعیین ریزرخساره‌ها، محیط رسوبی و بررسی فرایندهای دیاژنزی، به کمک مطالعات میکروسکوپی و ماکروسکوپی، از طریق لاگ مقاومت الکتریکی عمیق سازند، هدایت الکتریکی در محیط‌های رسوبی و ریزرخساره‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج، نمونه‌های متعلق به محیط رسوبی مردابی دارای مقاومت الکتریکی پایین‌تر و تراوایی بیشتری هستند، درحالی‌که نمونه‌های مرتبط با محیط‌های دریایی باز دارای مقاومت الکتریکی بالاتر و تراوایی کمتری هستند. محیط رسوبی سیخا به دلیل گسترش فراوان سیمان انیدریتی دارای بالاترین مقاومت الکتریکی است. فرایندهای دیاژنزی مانند دولومیتی شدن و سیمان کلسیتی هم‌ضخامت به‌ترتیب با بهبود اتصال منافذ و حفظ تخلخل اولیه منجر به کاهش مقاومت الکتریکی در نمونه‌های مورد مطالعه شده‌اند. در مقابل سیمان انیدریتی و سیمان کلسیتی بلوکی با مسدود کردن حفرات و گلوگاه حفرات با افزایش مقاومت الکتریکی در سنگ‌ها همراه بودند.

واژگان کلیدی

مقاومت الکتریکی، ریزرخساره، فرایندهای دیاژنزی، خصوصیات پتروفیزیکی، گلوگاه منافذ، سیمان کلسیتی

۱. پیش‌گفتار

اندازه‌گیری و درک تغییرات هدایت الکتریکی محیط متخلخل در بسیاری از زمینه‌های علم و فناوری از جمله زمین‌شناسی، مهندسی نفت و شیمی، آب‌شناسی، ژئوفیزیک و علوم خاک کاربرد دارد [۱-۷]. مطالعه‌ی خواص الکتریکی مخازن هیدروکربنی برای شناسایی، نظارت و مدیریت مؤثر این مخازن بسیار مهم است که در نهایت منجر به بهبود کارایی و بهره‌وری در بخش نفت و گاز می‌شود [۸-۱۰]. تغییرات در

مقاومت الکتریکی می‌تواند منعکس‌کننده‌ی تغییرات در خواص ژئومکانیکی مانند استحکام سنگ، سفتی و توزیع تنش باشد. همچنین با تجزیه و تحلیل داده‌های مقاومت در کنار مدل‌های ژئومکانیکی، مهندسان می‌توانند پایداری مخزن را ارزیابی کنند.

نمونه‌های سنگ مخزن دارای یک فاز رسانا و یک یا چند فاز نارسانای الکتریکی هستند. فاز رسانای الکتریکی در سراسر حجم سنگ در شبکه‌ای پیچیده از منافذ و گلوگاه حفرات

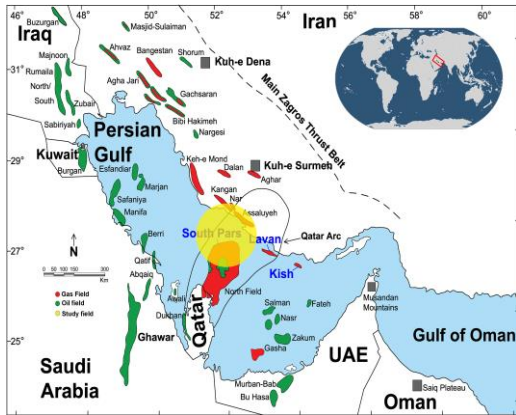
توزیع می‌شود. هدایت الکتریکی در سنگ را می‌توان نشانه‌ای از روابط هندسی منافذ بین نمونه‌های سنگ در نظر گرفت، که خود توسط محیط رسوبی، ریزرخساره‌ها و فرایندهای دیاژنزی کنترل می‌شوند [۱۱، ۱۲]. بنابراین مطالعه‌ی جامع و دقیق ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی، از جمله ریزرخساره‌ها، محیط رسوبی و تغییرات مقاومت الکتریکی می‌تواند نقش حیاتی در شناسایی و توسعه‌ی میدانی هیدروکربونی ایفا می‌کنند [۱۳].

یکی از ویژگی‌های مهم سازندهای کربناته ناهمگن بودن آن‌ها است [14]. پیش‌بینی تغییرات مخزنی سازندهای کربناته‌ی دالان و کنگان به دلیل ناهمگنی بالا در مقیاس‌های مختلف، با پیچیدگی‌های فراوانی همراه است [۱۵]. ویژگی‌ها و تغییرات در خواص مخزنی سازندهای کربناته به‌طور کلی در ارتباط با خصوصیات ریزرخساره‌های رسوبی و فرایندهای دیاژنزی است [۱۱، ۱۲، ۱۶]. ریزرخساره‌های رسوبی به صورت اولیه توزیع ویژگی‌های مخزنی را کنترل می‌کنند. در نتیجه، با مطالعه‌ی ویژگی‌های زمین‌شناسی مانند ریزرخساره، محیط رسوبی و دیاژنز، ویژگی‌های پتروفیزیکی مانند تخلخل و تراوایی و بررسی تأثیر و ارتباط آن‌ها با رسانایی الکتریکی سنگ‌ها، ما را قادر می‌سازد تا به درک جامعی از عوامل کنترل‌کننده‌ی مخزن دست پیدا کنیم. یکی از مهم‌ترین کاربردها اندازه‌گیری رسانایی الکتریکی در صنعت نفت و گاز، محاسبه ذخیره‌ی درجای هیدروکربن است [۱۷].

تاکنون پژوهش‌های مختلفی، از جنبه‌های مختلف به بررسی رفتار و مدل‌سازی رسانایی الکتریکی در سنگ‌ها پرداخته‌اند. گارینگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۸]، تأثیر هندسه‌ی سه بعدی شبکه‌ی منافذ، بر روی خواص الکتریکی و جریان را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که ناهمگنی در مقیاس متر تا سانتیمتر به شدت بر پارامترهای الکتریکی ماکروسکوپی اندازه‌گیری شده تأثیر می‌گذارد. نی و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۹]، خواص الکتریکی سنگ مخزن شیل‌های گازی را بررسی و مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند که سنگ مخزن شیل‌های گازی دارای رسانایی الکتریکی ناهمسانگرد

قوی است. رامبرت و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۲۰]، مدل جدیدی مبتنی بر اصول فیزیک، برای تخمین رسانایی الکتریکی ایجاد کردند. آن‌ها نشان دادند که تراوایی را می‌توان به هدایت الکتریکی پیش‌بینی شده مرتبط کرد. هو و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۲۱]، با استفاده از شبیه‌سازی‌های رسانایی بر روی مدل‌های سنگ دیجیتال سه‌بعدی با تخلخل‌های مختلف، نشان دادند که فاکتور مقاومت سازند^۱ عمدتاً تحت تأثیر شکل و ساختار منافذ است. عمرانی و توکلی در سال ۲۰۲۴ [۷]، کارایی روش‌های مختلف گونه‌های سنگی الکتریکی را در مدیریت ناهمگنی مخازن بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که در نظر گرفتن هدایت الکتریکی در طبقه‌بندی سنگ‌ها به‌طور مؤثری می‌تواند به پیش‌بینی دقیق اشباع آب منجر شود. با وجود مطالعات متعدد، تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی مانند ریزرخساره‌ها، محیط رسوبی و فرایندهای دیاژنزی به عنوان عوامل اصلی کنترل‌کننده‌ی اولیه‌ی کیفیت مخزنی، بر هدایت الکتریکی کماکان روشن نیست. هدف این مقاله، بررسی جامع تأثیر عوامل زمین‌شناسی بر هدایت الکتریکی سنگ‌ها است. این مطالعه تلاش می‌کند تا ارتباط بین محیط رسوبی، ریزرخساره‌ها و فرایندهای دیاژنزی با تغییرات هدایت الکتریکی سنگ‌های مخزنی را شفاف‌سازی کند. به‌طور خاص، این پژوهش به بررسی این موضوع می‌پردازد که چگونه محیط‌های رسوبی و فرایندهای دیاژنزی مانند دولومیتی‌شدن، سیمان‌گذاری انیدریتی و کلسیتی‌باعث تغییر در هدایت الکتریکی و در نتیجه ویژگی‌های مخزنی می‌شوند. این پژوهش با تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی و پتروگرافی به دست آمده از مغزه و لاگ‌های چاه‌نگاری در یک میدان گازی در خلیج فارس، سعی دارد به درک عمیق‌تری از نحوه تأثیر این عوامل بر رسانایی الکتریکی سنگ‌ها دست یابد.

¹ Formation resistivity factor



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه، واقع در مرکز خلیج فارس (دایره‌ی زرد). میادین عمده‌ی گازی (رنگ قرمز) و نفتی (سبز) واقع در خلیج فارسی و مناطق اطراف قابل مشاهده هستند (گرفته شده با تغییرات از [25]).

| Series | Formy | Units | Erath. | System | Formation/Main Lithology |
|--------------|---------|----------|----------------|------------|--------------------------|
| Lower-Middle | Kangan | Dashtak | MESOZOIC | Cretaceous | Bangestan Group |
| | | K1 | | Jurassic | Khami Group |
| Upper | U-Dalan | K2 | | Triassic | Neyriz |
| | | K3 | | Permian | Dashtak |
| Middle | L-Dalan | K4 | | Paleozoic | Permian |
| | | K5 | Permian | | Dalan |
| | | Nar Mbr. | Devonian | | Faraghan |
| | | | Lower Silurian | Zakeen | |
| | | | | | Sarchahan |

Shale Sandstone Limestone Dolomite Anhydrite

Form.: Formation Erath.: Erathem

شکل ۲. ستون چین‌شناسی توالی‌های مورد مطالعه در مرکز خلیج فارس (گرفته شده از [32]).

۲. زمین‌شناسی و چین‌شناسی

مطالعه‌ی حاضر بر روی سازندهای دالان و کنگان به سن پرمین-پسین-تریاس پیشین در یکی از میادین گازی واقع در مرکز خلیج فارس صورت گرفته است (شکل ۱). خلیج فارس یک حوضه رسوبی کم‌عمق و حاشیه‌ای در جنوب ایران است [۲۲]. پرمین-پسین با تشکیل اقیانوس نئوتتیس^۱ در امتداد زمین‌درز زاگرس همراه بود. به دنبال تشکیل اقیانوس نئوتتیس رسوبات کربناته و تبخیری (انیدریت) ته‌نشین شده‌اند [۲۳]. این رسوبات به سن پرمین-پسین-تریاس پیشین در عربستان به نام سازند خوف^۲ و در ایران به نام سازندهای دالان و کنگان شناخته می‌شوند [۲۴،۲۵]. این رسوبات در محیط‌های دریایی کم‌عمق تا جزرومدی با آب و هوای گرم و خشک رسوب کردند [۲۳،۲۵].

در جنوب ایران رسوبات پرمین-تریاس به نام گروه دهرم شناخته می‌شوند. گروه دهرم در سال ۱۹۷۶ توسط کمیته چین‌نگاری ایران به رسوبات دوره‌ی پرمین-تریاس اطلاق شد. گروه دهرم از قدیم به جدید شامل سازندهای فراقون، دالان و کنگان می‌باشد. افق‌های مخزنی گروه جهرم، سازندهای کنگان و دالان بالایی هستند. این افق‌ها جزء غنی‌ترین افق‌های ذخیره هیدروکربوری در جهان می‌باشند [۲۶،۲۷]. سازند دالان بر روی سازند آواری فراقون قرار گرفته و به ترتیب از پایین به بالا به ۳ عضو دالان پایین، نار و دالان بالایی تقسیم می‌شود. دالان پایینی معادل واحد مخزنی K5 و دالان بالایی به واحدهای مخزنی K4 و K3 تقسیم می‌شود (شکل ۲). سازند کنگان به واحد مخزنی K1 و K2 تقسیم می‌شود [۲۸]. سازند کنگان با یک ناپیوستگی روی سازند دالان قرار دارد [۲۹-۳۱]. سازندهای دالان و کنگان به دلیل اتصال هیدرولیکی که دارند به عنوان یک مخزن پیوسته در نظر گرفته می‌شوند [۲۳].

² Khuff formation

¹ Neotethys

۳. مواد و روش‌ها

مجموعه داده‌ی انتخاب شده به منظور پی‌بردن به اهداف این مطالعه، شامل ۲۹۳ متر مغزه، ۷۲۰ داده تخلخل و تراوایی، ۹۲۱ مقطع نازک و ۲۵۱ متر از لاگ‌های چاه‌پیمایی شامل لاگ‌های گاما، نوترون، چگالی، مقاومت و صوتی هستند. این داده‌ها از یک چاه اکتشافی در یک میدان گازی واقع در مرکز خلیج فارس انتخاب شدند. برای تشخیص کلسیت از دولومیت، یک‌سوم مقاطع نازک با آلپزارین قرمز-اس^۱ رنگ‌آمیزی شدند. به منظور پی‌بردن به انواع و اندازه‌ی منافذ، نیمی از نمونه‌ها با اپوکسی آبی‌رنگ آغشته شدند. بافت و درصد انواع منافذ مختلف هر یک از نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان و مقایسه با نمودارهای استاندارد تعیین شدند.

جهت اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی، ابتدا پلاگ‌ها با روش سوسکوله^۲ تمیز و خشک شدند. سپس با استفاده از قوانین بویل و دارسی^۳ به ترتیب تخلخل و تراوایی آن‌ها اندازه‌گیری شد. داده‌های چاه‌پیمایی، به منظور بهبود تفسیر جامع، با داده‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی ادغام شدند. مقاطع نازک به‌عنوان داده‌های معتبر، برای تعیین سنگ‌شناسی بافت، انواع تخلخل، ریزرخساره‌ها و محیط رسوب‌گذاری استفاده شدند. از داده‌های لاگ مقاومت عمیق سازند^۴، به منظور بررسی تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی بر رسانایی الکتریکی سنگ‌ها استفاده شدند. در این مطالعه از لاگ $HLRA5^5$ ، که یک لاگ مقاومت الکتریکی است، برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سازند استفاده شد. این نوع لاگ با دقت بالا توانایی ارائه اطلاعات دقیق در مورد لایه‌های نازک و مخازن ناهمگن را دارد. این لاگ توسط شرکت شلمبرجر^۶ اندازه‌گیری شده است.

۴. نتایج

۵. ریزرخساره‌ها

در این مطالعه جهت نامگذاری ریزرخساره‌های توالی‌های مورد مطالعه، مطابق روش دانهام [۳۳] و امری‌کلوان [۳۴] صورت گرفت. برای توصیف ریزرخساره‌ها از مدل استاندارد فلوگل [۳۵]، استفاده شده است. به دلیل کوچک بودن مقیاس مطالعه‌ی ریزرخساره‌ها، دنبال‌کردن آن‌ها در فواصل بین چاه‌ها، توزیع جانبی و عمودی جهت مدل‌سازی سه‌بعدی و پیداکردن محل اهداف بعدی حفاری، طبقه‌بندی ریزرخساره‌ها در قالب کمربندهای ریزرخساره‌ای صورت گرفت.

در کل بر اساس مطالعات صورت‌گرفته، دوازده ریزرخساره در قالب چهار کمربند ریزرخساره‌ای در میدان مورد مطالعه تعیین شد. تصاویر میکروسکوپی ریزرخساره‌های شناسی شده در توالی‌های مورد مطالعه در شکل ۳، قابل مشاهده هستند. ریزرخساره‌ها بر اساس مشخصات سنگ‌شناسی، بافت، اندازه‌ی ذرات، شکل هندسی، ساخت‌های رسوبی، طرح جریان دیرینه و فسیل‌های معین تشکیل‌دهنده از یکدیگر شناسایی شده‌اند (جدول ۱). لازم به ذکر است به دلیل شباهت ریزرخساره‌های دالان و کنگان (به‌جز ریزرخساره‌های $F4$)، ریزرخساره‌های شناسایی شده را می‌توان در هر دو سازند استفاده کرد. ریزرخساره‌ی $F4$ فقط متعلق به سازند کنگان است. در میدان مورد مطالعه ریزرخساره‌های دانه‌پشتیبان (۷، ۸، ۹، ۱۰)، دارای فراوانی بیشتری نسبت به دیگر ریزرخساره‌ها هستند (شکل ۴).

ریزرخساره‌های مرتبط با محیط رسوبی مردابی با بافت گل‌پشتیبان در مرتبه بعدی از لحاظ فراوانی قرار دارند (شکل ۴). توالی پاراژنتیکی سازنده‌های دالان و کنگان در توالی‌های مورد مطالعه واقع در مرکز خلیج فارس در شکل ۵، ارائه شده است. بررسی فرایندهای دیاژنزی در این مطالعه نشان می‌دهد که فرآیندهایی مانند دولومیتی‌شدن، سیمان انیدریتی، سیمان کلسیتی و انحلال نقش مهمی در تغییر خصوصیات ریزرخساره‌های سازنده‌های دالان و کنگان داشته‌اند.

¹ Alizarin Red S

² Soxhlet extraction method

³ Boyle's and Darcy's laws

⁴ Deep resistivity

⁵ High-Resolution Laterolog Array

⁶ Schlumberger

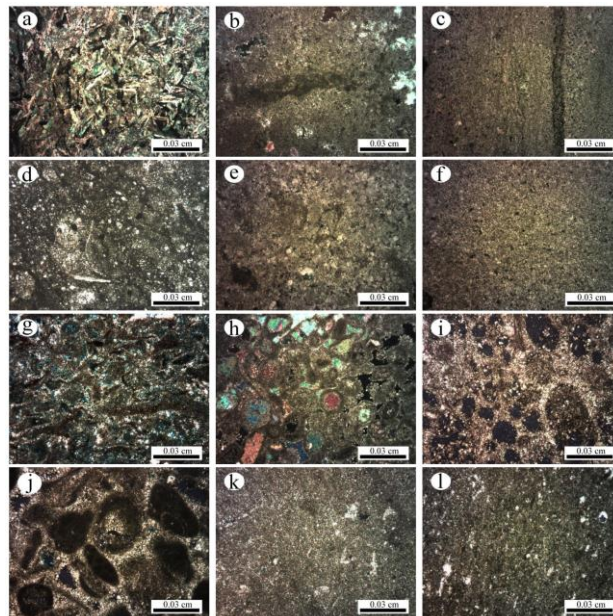
کمک کرده است. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده تأثیر مستقیم دیاژنز بر ویژگی‌های مخزنی در میدان مطالعه است.

دولومیتی‌شدن با بهبود تخلخل و تراوایی، به‌ویژه در ریزرخساره‌های $F5$ و $F6$ شده است. در مقابل، سیمان انیدریتی در ریزرخساره‌هایی مانند $F1$ و $F3$ با مسدود کردن گلوگاه‌های حفرات، منجر به کاهش تخلخل و تراوایی و افزایش مقاومت الکتریکی شده است. سیمان کلسیتی در برخی ریزرخساره‌ها مانند $F8$ و $F9$ به حفظ تخلخل اولیه

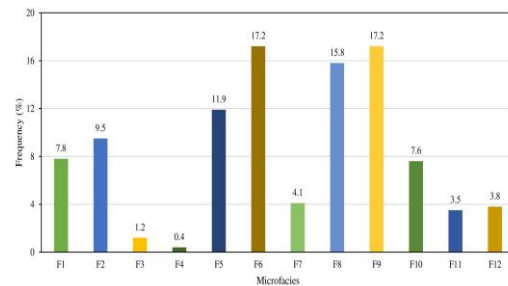
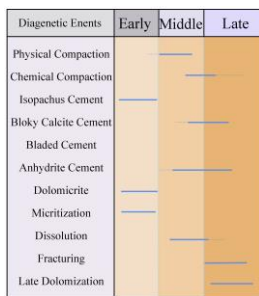
جدول ۱. مشخصات کلی بافت، دیاژنز و کانی‌شناسی ریزرخساره‌های مشاهده شده در میدان مورد مطالعه

| کد ریزرخساره | نام ریزرخساره | شواهد بافتی و کانی‌شناسی | فرایندهای دیاژنزی غالب | انرژی محیط رسوب‌گذاری | محیط رسوب‌گذاری |
|--------------|---|--|---|-----------------------|------------------------|
| $F1$ | انیدریت لایه‌ای تا توده‌ای | انیدریت لایه‌ای تا توده‌ای | سیمان انیدریتی | کم | سبغا |
| $F2$ | مادستون/دولومادست ون همراه با ساخت چشم پرنده‌ای | گل‌پشتیبان با ساخت چشم پرنده‌ای، آهک و دولومیت | دولومیتی‌شدن، سیمان انیدریتی، انحلال فشاری و رگچه‌های انحلالی | کم | پهنه‌ی جزرومدی |
| $F3$ | باندستون استروماتولیتی | تناوب لایه‌های تیره و روشن، دولومیت | دولومیتی‌شدن و سیمان انیدریتی | کم | پهنه‌ی جزرومدی |
| $F4$ | باندستون ترومبولیتی | بافت لخته‌ای و توده‌ای، آهک و دولومیت | تبلور مجدد، انحلال فشاری | کم | پهنه‌ی جزرومدی (کنگان) |
| $F5$ | وکستون تا پکستون حاوی خرده‌های اسکلتی، پلوئیدی | گل‌پشتیبان، آهک و دولومیت | میکرایتی‌شدن، زیست‌آشفگی و دولومیتی‌شدن | متوسط | مردابی |
| $F6$ | مادستون/دولومادست ون | گل‌پشتیبان، دولومیت و آهک | دولومیتی‌شدن، زیست‌آشفگی | کم | مردابی |
| $F7$ | گرینستون حاوی خرده‌های اسکلتی، اینتراکلسیتی | دانه‌پشتیبان، آهک و دولومیت | میکرایتی‌شدن، سیمان انیدریتی و کلسیتی هم‌ضخامت | زیاد | پشته‌های سدی |
| $F8$ | گرینستون آئیدی | دانه‌پشتیبان، دولومیت و آهک | انحلال، سیمان انیدریتی، کلسیتی هم‌ضخامت و بلوکی | زیاد | پشته‌های سدی |
| $F9$ | گرینستون آئیدی پلوئیدی | دانه‌پشتیبان، آهک و دولومیت | انحلال، سیمان هم‌ضخامت و سیمان انیدریتی | زیاد | پشته‌های سدی |
| $F10$ | گرینستون حاوی خرده‌های اسکلتی | دانه‌پشتیبان، آهک | میکرایتی‌شدن، سیمان هم‌ضخامت و | زیاد | پشته‌های سدی |

| بلوکی | | | | | |
|-----------|----|---|----------------|--|------------|
| دریای باز | کم | شکستگی، زیست آشفتگی، انحلال فشاری، رگچه‌های انحلالی و تبلور مجدد | گل‌پشتیان، آهک | وکستون همراه با خرده‌های اسکلتی | F11 |
| دریای باز | کم | تبلور مجدد، شکستگی، زیست آشفتگی | گل‌پشتیان، آهک | مادستون تا وکستون همراه با خرده‌های اسکلتی | F12 |



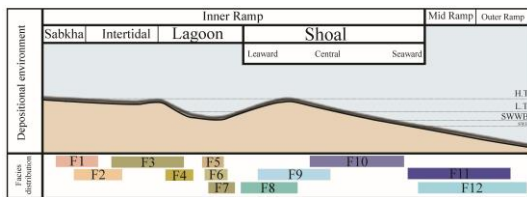
شکل ۳. تصاویر مقاطع نازک ریزرخساره‌های شناسی شده در توالی‌های مورد مطالعه، گرفته شده زیر میکروسکوپ پلاریزان. (a) انیدریت لایه‌ای تا توده‌ای، (b) مادستون/دولومادستون همراه با ساخت چشم پرنده‌ای، (c) باندستون استروماتولیتی، (d) باندستون ترومبولیتی، (e) وکستون تا پکستون حاوی خرده‌های اسکلتی، پلوییدی، (f) مادستون/دولومادستون، (g) گرینستون حاوی خرده‌های اسکلتی، اینتراکلتی، (h) گرینستون آئیدی، (i) گرینستون آئیدی پلوییدی، (j) گرینستون حاوی خرده‌های اسکلتی، (k) وکستون همراه با خرده‌های اسکلتی، (l) مادستون تا وکستون همراه با خرده‌های اسکلتی. همه‌ی تصاویر مقاطع نازک در نور XPL گرفته شده‌اند.



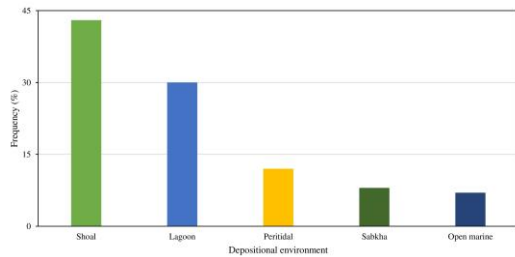
شکل ۵. توالی پارژنتیکی سازنده‌های دالان و کنگان در توالی‌های مورد مطالعه واقع در مرکز خلیج فارس

شکل ۴. نمودار فراوانی ریزرخساره‌های شناسایی شده در میدان مورد مطالعه، بر اساس این نمودار ریزرخساره‌های **F6** و **F9** فراوان‌ترین ریزرخساره‌ها در میدان مورد مطالعه هستند.

مدل رسوبی رمپ کربناته با شیب کم و یکنواخت شناسایی شد که با مطالعات قبلی مطابقت دارد [۳۷-۴۰]. تغییرات ریزرخساره‌ها، محیط رسوبی، بافت رسوبی، انواع منافذ، تخلخل و تراوایی، فرآیندهای دیاژنزی و لاگ‌های چاه‌پیمایی مختلف توالی‌های مورد مطالعه، در شکل ۸ قابل مشاهده هستند. تصاویر مقاطع نازک فرایندهای مختلف دیاژنزی مشاهده شده در توالی‌های مورد مطالعه در شکل ۱۰ قابل مشاهده هستند.



شکل ۶. مدل محیط رسوبی به همراه زیررخساره‌های شناسایی شده در توالی‌های مورد مطالعه (بدون مقیاس)



شکل ۷. نمودار فراوانی محیط‌های رسوبی مختلف در میدان مورد مطالعه، محیط رسوبی مرتبط با پشته‌های سدی بیشترین فراوانی را در میدان مورد دارند.

جدول ۳. میانگین مقادیر مقاومت عمیق سازند (Rt)، تخلخل (\emptyset) و تراوایی (K) در محیط‌های رسوبی مختلف

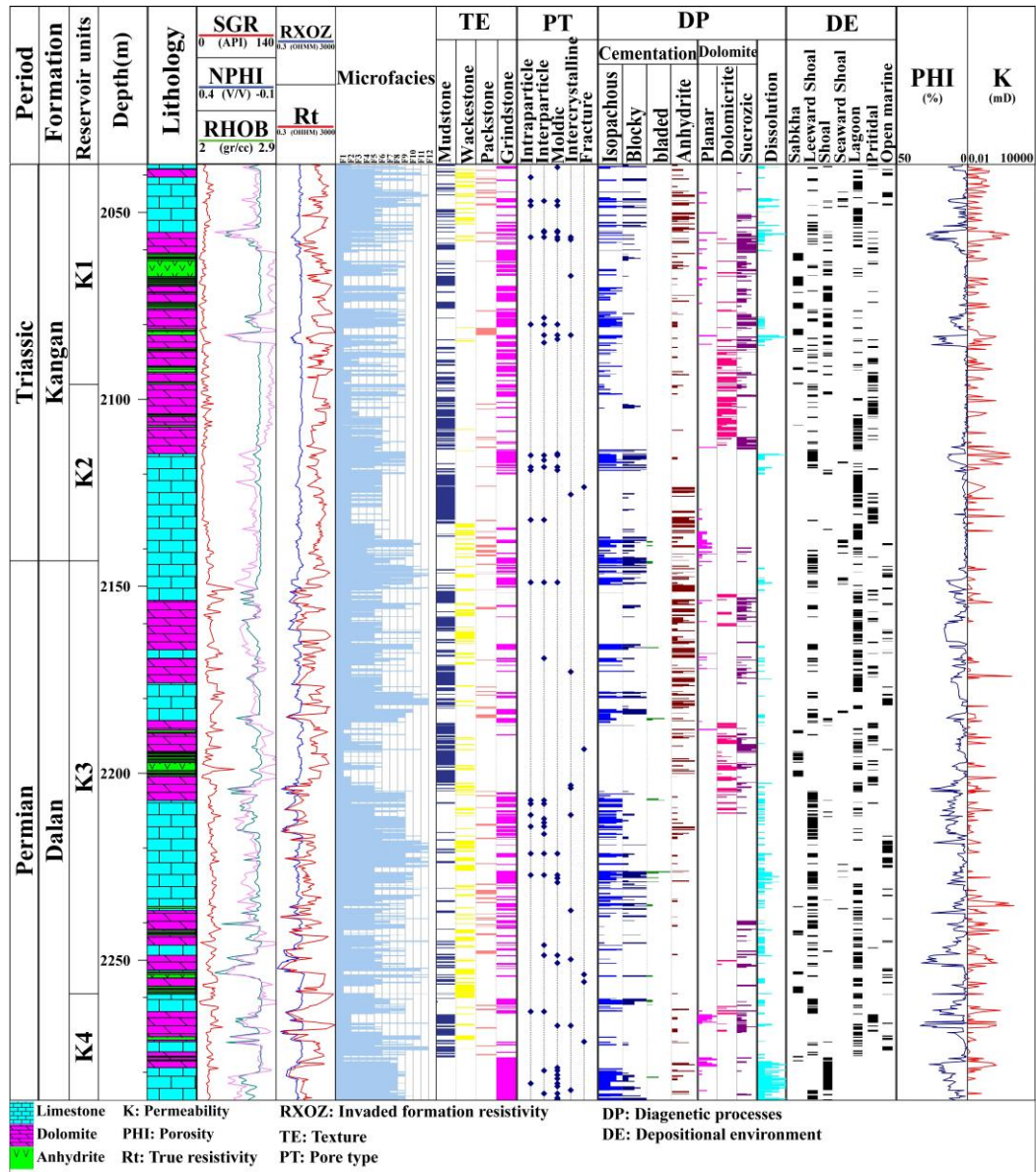
| Depositional environment | Rt ($\Omega.m$) | \emptyset (%) | K (mD) |
|--------------------------|-------------------|-----------------|--------|
| Lagoon | ۳۴۱.۸۶ | ۶.۱۸ | ۷.۰۸ |
| Shoal | ۴۵۸.۶ | ۷.۰۸ | ۶.۷۷ |
| Open marine | ۷۷۶.۷۷۸ | ۲.۴۵ | ۱.۸۵ |
| Peritidal | ۸۷۴.۷۳ | ۱.۹ | ۱.۷۷ |
| Sabkha | ۹۶۴.۶۷ | ۱.۲ | ۰.۶ |

جدول ۲. میانگین مقادیر مقاومت عمیق سازند (Rt)، تخلخل (\emptyset) و تراوایی (K) در ریزرخساره‌های مختلف

| Facies | \emptyset (%) | K (mD) | Rt ($\Omega.m$) |
|--------|-----------------|--------|-------------------|
| F1 | ۱.۲ | ۰.۶ | ۹۶۴.۶۷ |
| F2 | ۳.۹۸ | ۵.۰۱ | ۳۸۵.۶۸ |
| F3 | ۰.۳۹ | ۰.۲۴ | ۸۵۶.۴۹ |
| F4 | ۱.۳۳ | ۰.۰۷ | ۱۳۸۲.۰۳ |
| F5 | ۶.۱۵ | ۹.۳۰ | ۲۷۰.۷۱ |
| F6 | ۶.۲ | ۴.۸۶ | ۴۱۳.۰۱ |
| F7 | ۷.۵ | ۱۴.۳۹ | ۲۰۷.۸ |
| F8 | ۸.۲۴ | ۳.۴ | ۶۶۷.۲۵ |
| F9 | ۶.۸۶ | ۴.۰۳ | ۶۰۳.۵۴ |
| F10 | ۵.۷۰ | ۵.۲۷ | ۳۵۵.۷۹ |
| F11 | ۲.۳۳ | ۱.۹۴ | ۷۵۹.۹۷ |
| F12 | ۲.۵۶ | ۱.۷۶ | ۷۹۳.۵۸ |

۶. محیط رسوبی

بر اساس مطالعات رسوبی (میکروسکوپی و ماکروسکوپی) بر روی مقاطع نازک و مغزه، منجر به شناسایی دوازده ریزرخساره‌ی رسوبی شده است که مربوط به چهار محیط رسوبی پهنه‌ی جزرومدی، مردابی، پشته‌های سدی و دریای باز هستند. محیط‌های رسوبی ذکر شده، بخش‌های مختلف یک سیستم رمپ کربناته با شیب کم و یکنواخت هستند [۳۶]. مدل محیط رسوبی و پراکندگی ریزرخساره‌ها در محیط‌های رسوبی مختلف در شکل ۶، قابل مشاهده هستند. نمونه‌های متعلق به محیط‌های رسوبی پشته‌های سدی و دریای باز به ترتیب بیشترین و کمترین فراوانی را در توالی‌های مورد مطالعه دارند (شکل ۷). میانگین مقاومت الکتریکی، تخلخل و تراوایی در نمونه‌های هریک از محیط‌های رسوبی شناسایی شده در جدول ۳، قابل مشاهده هستند. با بررسی تغییرات عمودی و جانبی ریزرخساره‌ها و بررسی ارتباط آن‌ها بر اساس کمربند ریزرخساره‌ای ارائه شده توسط فلوگل [۳۵] و نبود ساخت‌های ریزشی، برای سازندهای دالان و کنگان



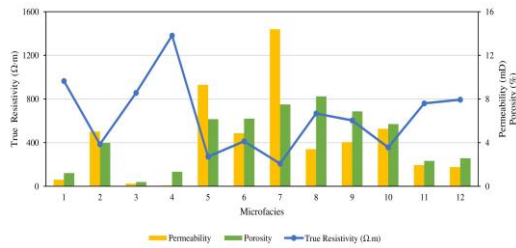
شکل ۸. لاگ رسوب شناسی سازند دالان و کنگان در مرکز خلیج فارس. تغییرات انواع ریزخساره‌ها، محیط رسوبی، بافت‌های رسوبی، انواع منافذ پتروگرافی، پروفیل‌های تخلخل-تراوایی، فرآیندهای دیاژنزی و لاگ‌های چاه‌پیمایی در توالی‌های مورد مطالعه قابل مشاهده است.

۷. بحث

۸. تغییرات مقاومت الکتریکی در ریزخساره‌ها

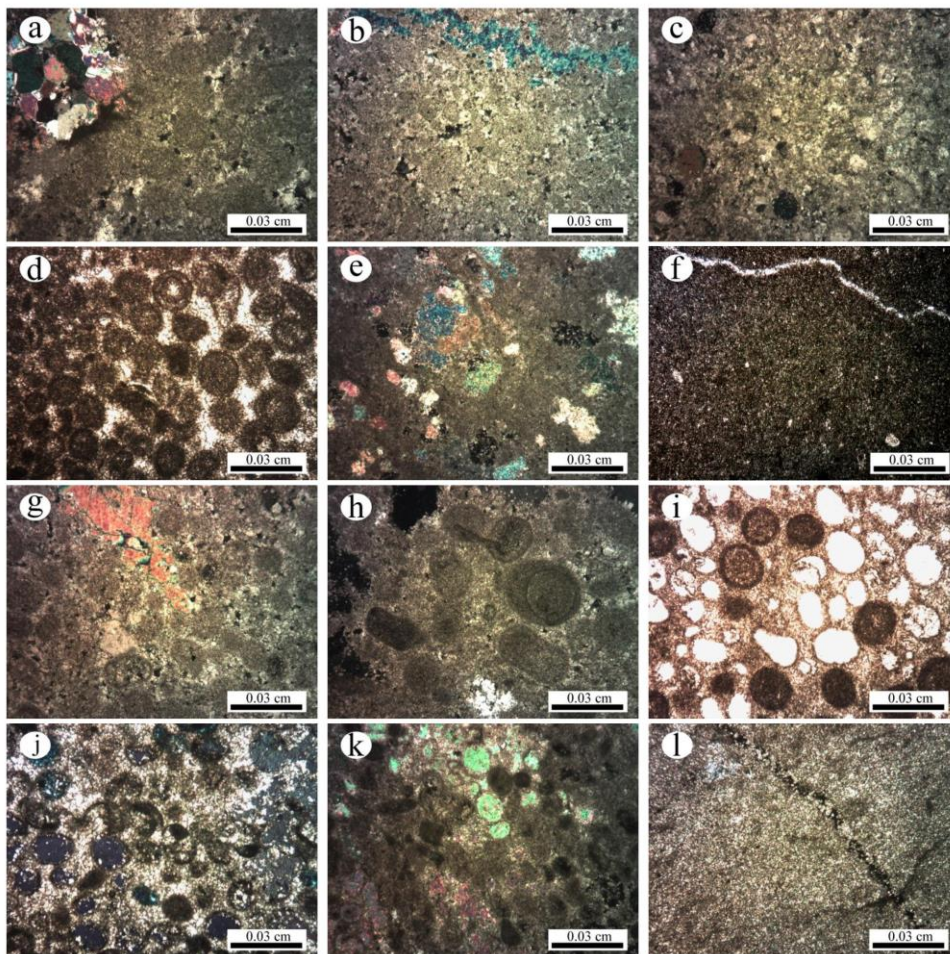
ریزخساره‌های دیگر (به‌جز ریزخساره‌ی $F3$) همراه بوده است (شکل ۹). تراوایی کم در نتیجه‌ی انسداد گلوگاه حفرات منجر به افزایش مقاومت الکتریکی در این ریزخساره نسبت به ریزخساره‌های دیگر شده است. ریزخساره‌ی $F2$ ، با سنگ‌شناسی گل‌سنگ و دولومیت‌های ریزبلور در یک محیط رسوبی جزرومدی تشکیل شده است. تشکیل سیمان انیدریتی و دولومیتی شدن اولیه از مهم‌ترین فرایندهای دیاژنزی مؤثر بر

ریزخساره‌ی $F1$ ، در یک محیط رسوبی سبنا ته‌نشین و عمدتاً از سنگ‌شناسی انیدریتی به‌صورت لایه‌ای تا توده‌ای تشکیل شده است (جدول ۱). تخلخل‌ها در این ریزخساره به‌طور گسترده توسط سیمان انیدریتی پر شده‌اند. این موضوع با کاهش قابل تخلخل و تراوایی در این ریزخساره نسبت به



شکل ۹. نمودار تغییرات تخلخل، تراوایی و مقاومت الکتریکی در ریزرخساره‌های مختلف، ریزرخساره‌ی F7. دارای بیشترین تراوایی و کمترین مقاومت الکتریکی در مقایسه با سایر ریزرخساره‌ها است.

این ریزرخساره هستند. با وجود کیفیت مخزنی اولیه‌ی پایین (تخلخل و تراوایی کم) این ریزرخساره، انحلال انیدریت در مراحل ثانویه‌ی دیاژنز و دولومیتی شدن به ترتیب با بهبود تخلخل و اتصال منافذ به یکدیگر، باعث بهبود کیفیت مخزنی و کاهش مقاومت الکتریکی در این ریزرخساره نسبت به ریزرخساره‌ی F1 شده است. آثار زیست آشفستگی ناشی از فعالیت موجودات زنده و لایه‌بندی به صورت بسیار محدود، رگچه‌های انحلالی و ساخت انحلال فشاری از دیگر ساخت‌های مشاهده شده در این ریزرخساره هستند.



شکل ۱۰. مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی مشاهده شده روی تصاویر مقاطع نازک سازندهای دالان و کنگان، گرفته شده زیر میکروسکوپ پلاریزان. (a) سیمان انیدریتی، (b) سیمان کلسیت تیغه‌ای، (c) سیمان کلسیت بلوکی، (d) سیمان کلسیتی، (e) دولومیت زیربلور، (f) شکستگی پر شده توسط سیمان انیدریتی، (g) سیمان کلسیت هم‌ضخامت، (h) میکرایتی شدن، (i-j) انحلال و تشکیل تخلخل قالبی، (k) تبلور مجدد، (l) استیلولیت. تصاویر d و i در نور PPL و بقیه‌ی تصاویر مقاطع نازک در نور XPL گرفته شده‌اند.

و گل‌سنگ است. این ریزرخساره به دلیل وجود لایه‌بندی

سنگ‌شناسی غالب ریزرخساره‌ی F3، دولومیت‌های دانه‌ریز

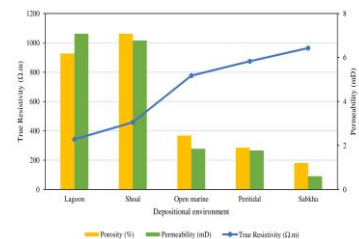
منافذ به یکدیگر شده است. این موضوع با افزایش تخلخل و تراوایی در ریزرخساره‌های نسبت به ریزرخساره‌های متعلق به محیط‌ها رسوبی سبک و جزرومدی شده است. افزایش تراوایی در ریزرخساره‌ها $F5$ و $F6$ ، با کاهش مقاومت الکتریکی در این ریزرخساره‌ها به ترتیب، به حدود ۲۷۰ و ۴۱۳ اهم‌متر شده است. ریزرخساره‌ی $F7$ ، با سنگ‌شناسی آهک و دولومیت به پشته‌های سدی تعلق دارد. سیمان انیدریتی (به صورت نودول و پرکننده حفرات) و سیمان کلسیتی (به صورت هم‌ضخامت) سیمان غالب این ریزرخساره است. تخلخل قالبی، بین‌دانه‌ای و درون‌دانه‌ای به ترتیب فراوان‌ترین انواع تخلخل‌های مشاهده شده در این ریزرخساره هستند. دولومیتی‌شدن گسترده، انحلال دانه‌های ناپایدار و تشکیل سیمان اولیه (سیمان کلسیتی هم‌ضخامت) که باعث حفظ تخلخل اولیه و اتصال منافذ به یکدیگر شده، مهم‌ترین عوامل مؤثر در افزایش تراوایی در این ریزرخساره هستند. دولومیتی‌شدن در این ریزرخساره با بهبود اتصال منافذ و کاهش مقاومت الکتریکی همراه بوده است. مقاومت الکتریکی این ریزرخساره ۲۰۷.۸ اهم‌متر اندازه‌گیری شده که در مقایسه با سایر ریزرخساره‌ها کمترین مقدار را دارد. ریزرخساره‌های $F8$ ، $F9$ و $F10$ ، متعلق به محیط رسوبی پشته‌های سدی، کاهش تخلخل و افزایش تراوایی را به ترتیب از $F8$ تا $F10$ نشان می‌دهند. این موضوع به دلیل افزایش انواع تخلخل متصل (بین‌دانه‌ای و بین‌بلوری) و کاهش تخلخل غیرمتصل (قالبی) از ریزرخساره‌ی $F8$ به ریزرخساره‌ی $F10$ است. افزایش انواع تخلخل متصل با بهبود اتصال منافذ به یکدیگر و کاهش مقاومت الکتریکی از ۶۶۷.۲۵ اهم در $F8$ به ۳۳۵.۷۹ در $F10$ شده است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی این است که مقاومت الکتریکی دارای رابطه‌ی معکوس با تراوایی می‌باشد. ریزرخساره‌های $F11$ و $F12$ ، با سنگ‌شناسی آهکی به محیط رسوبی دریای باز تعلق دارند. بلوغ بافتی ضعیف (حضور خمیره‌ی گل، گردش‌گی و جور شدگی بد) و همچنین عملکرد ضعیف فرایند دولومیتی‌شدن باعث شده که تخلخل و تراوایی این ریزرخساره‌ها پایین باشد. اتصال ضعیف منافذ به یکدیگر، با افزایش مقاومت الکتریکی در این ریزرخساره‌ها همراه بوده است.

آشکار در مقاطع نازک و روی مغزه قابل تشخیص است. به دلیل وجود ساخت‌های رسوبی چشم پرنده‌ای، نودول‌های انیدریتی و تناوب لایه‌های تیره و روشن این ریزرخساره به محیط رسوبی بین جزرومدی تا بالای جزرومدی نسبت داده می‌شود [35,41]. ریزرخساره‌ی باندستون استروماتولیتی در بیشتر توالی‌ها بررسی شده، به دلیل عملکرد فرآیند دولومیتی‌شدن به صورت کامل دولومیتی (دولومیت‌ریزبلور) شده‌اند. این ریزرخساره با میانگین تخلخل ۰.۳۹ درصد و تراوایی ۰.۲۴ میلی‌داری، پس از ریزرخساره‌ی $F4$ ، دارای کمترین تخلخل در بین ریزرخساره‌های شناسایی شده در این مطالعه است (جدول ۲). عدم اتصال منافذ به یکدیگر با کاهش تراوایی و افزایش مقاومت الکتریکی تا حدود 856 اهم‌متر در این ریزرخساره شده است. ریزرخساره‌ی $F4$ ، بر خلاف ریزرخساره‌ی $F3$ که دارای لایه‌بندی و حالت موجی شکل است، فاقد لایه‌بندی و بافت لخته‌ای تا توده‌ای دارد. از تجمع کلونی‌های کوچک میکروبی، باکتری و جلبک‌ها همراه با خرده‌های اسکلتی تشکیل شده است. افق‌های ترومبولیتی نشان‌دهنده‌ی شرایط ویژه‌ی بعد از رخداد‌های بزرگ جهانی (مانند انقراض بزرگ جانداران) و به‌عنوان شروع پیشروی‌های بزرگ دریا به طور مثال بعد از انقراض بزرگ جانداران در مرز پرمین - تریاس هستند [۴۲]. به همین دلیل مشاهده‌ی این ریزرخساره در قاعده‌ی واحد مخزنی $K2$ ، نشان دهنده‌ی مرز پرمین-تریاس در توالی‌های مورد مطالعه است. این ریزرخساره کمترین تراوایی را در بین ریزرخساره‌های شناسایی شده دارد. این ریزرخساره به دلیل تراوایی و تخلخل بسیار پایین، به عنوان یک لایه‌ی سدی و نفوذناپذیر درون سازندی در توالی‌های مورد مطالعه عمل می‌کند. ریزرخساره‌ی باندستون ترومبولیتی با تراوایی ۰.۰۷ میلی‌داری بالاترین مقاومت الکتریکی (۱۳۸۲.۰۳ اهم‌متر) در بین سایر ریزرخساره‌ها است. عدم اتصال منافذ به یکدیگر و اندازه‌ی گلوگاه‌های حفرات بسیار کوچک، از عوامل اصلی تراوایی پایین و مقاومت الکتریکی بالا در این ریزرخساره می‌باشند.

ریزرخساره‌های $F5$ و $F6$ ، متعلق به محیط رسوبی مردابی دارای سنگ‌شناسی گل‌سنگ و دولومیت هستند. بلورهای دولومیت در این ریزرخساره برخلاف ریزرخساره‌های $F3$ و $F4$ ، اندازه‌ی بلورها رشد پیدا کرده و منجر به بهبود اتصال

۹. محیط رسوبی

در نمونه‌های قرار گرفته در محیط رسوبی مردابی، تراوایی با ۷۰۰۸ میلی داری و تخلخل با ۶۱۸ درصد به ترتیب در مرتبه اول و مرتبه دوم (پس از محیط رسوبی پشته‌های سدی)، در بین سایر محیط‌های رسوبی قرار دارد (جدول ۳). نمونه‌های مطالعه شده در این محیط رسوبی به‌طور کلی در طی مراحل اولیه و ثانویه دیانژی دولومیتی شده‌اند. دولومیتی‌شدن با بهبود اتصال منافذ همراه بوده و عامل اصلی میانگین مقاومت الکتریکی کمتر (۳۴۱۸۶ اهم‌متر) نمونه‌های متعلق به این محیط رسوبی در مقایسه با سایر محیط‌های رسوبی است (شکل ۱۱). نمونه‌های متعلق به محیط رسوبی پشته‌های سدی با ۷۰۰۸ درصد تخلخل دارای بیشترین تخلخل نسبت به دیگر محیط‌های رسوبی است. اما تراوایی در این محیط رسوبی به دلیل اتصال کمتر منافذ (فراوان‌تر بودن تخلخل قالبی) با مقدار ۶۷۷ میلی داری کمتر از محیط رسوبی مردابی است. تشکیل سیمان کلسیتی هم‌ضخامت در طی مراحل اولیه دیانژی (باعث حفظ تخلخل اولیه) و دولومیتی‌شدن ثانویه عوامل اصلی افزایش قطر گلوگاه منافذ و اتصال آن‌ها به یکدیگر شده‌اند. همه‌ی این عوامل با بهبود هدایت الکتریکی در نمونه‌ها و کاهش مقاومت الکتریکی همراه بوده‌اند.



شکل ۱۱. نمودار تغییرات مقاومت عمیق سازند، تخلخل و تراوایی در محیط‌های رسوبی مختلف، با توجه به این نمودار محیط رسوبی لاگون و سیخا، به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقاومت الکتریکی در مقایسه با سایر محیط‌های رسوبی دیگر هستند.

بافت گل‌پشتیبان، دولومیتی‌شدن جزئی و گسترش سیمان انیدریتی با مسدود کردن گلوگاه حفرات نمونه‌های متعلق به محیط‌های رسوبی دریای باز و جزرومدی، عوامل اصلی تخلخل و تراوایی کم‌تر، نسبت به محیط‌های رسوبی پشته‌های سدی و مردابی هستند. در نتیجه، شاهد افزایش

مقاومت الکتریکی در این محیط‌های رسوبی هستیم. گسترش سیمان انیدریتی در نمونه‌های محیط رسوبی سیخا با مسدود کردن تخلخل و گلوگاه حفرات، باعث شده که این ریزرخساره نسبت به سایر محیط‌های رسوبی، کمترین تخلخل (۱۰۲ درصد)، تراوایی (۰۰۶ میلی داری) و بیشترین مقاومت الکتریکی را داشته باشد.

۱۰. نتیجه‌گیری

تحلیل و بررسی ریزرخساره‌های موجود در میدان مورد مطالعه نشان می‌دهد که تفاوت‌های چشمگیری در مشخصات سنگ‌شناسی، بافت، و دیانژی بین این ریزرخساره‌ها وجود دارد. این تفاوت‌ها نه تنها نتیجه محیط رسوبی مختلفی که هر ریزرخساره در آن تشکیل شده است، بلکه نتیجه عملکرد شدید فرایندهای دیانژی مختلف است.

بر اساس نتایج، نمونه‌های متعلق به محیط رسوبی مردابی دارای مقاومت الکتریکی کمتر و تراوایی بیشتر هستند، در حالی که نمونه‌های مرتبط با محیط‌های دریایی باز دارای مقاومت الکتریکی بالاتر و تراوایی کمتری نسبت به سایر محیط‌های رسوبی هستند. محیط رسوبی سیخا به دلیل گسترش فراوان سیمان انیدریتی دارای بالاترین مقاومت الکتریکی در بین سایر محیط‌های رسوبی است.

ریزرخساره‌های $F5$ ، $F7$ و $F10$ دارای کمترین مقاومت الکتریکی و بیشترین تراوایی هستند که این امر به دلیل دولومیتی‌شدن و بهبود اتصال منافذ به یکدیگر در این ریزرخساره‌ها مربوط می‌شود. ریزرخساره‌های $F1$ ، $F3$ و $F4$ به ترتیب دارای بیشترین مقاومت الکتریکی و کمترین تراوایی هستند. گسترش سیمان انیدریتی، سیمان کلسیتی بلوکی و ریزبودن بلورهای دولومیت از مهم‌ترین عوامل مقاومت بالا در این ریزرخساره‌ها هستند.

بر اساس یافته‌های این مطالعه تراوایی دارای رابطه‌ی معکوسی با مقاومت الکتریکی دارد. اما تغییرات تخلخل هیچ ارتباط مشخصی با تغییرات مقاومت الکتریکی نشان نداد. نتایج این مطالعه نشان دادند که، فرایندهای دیانژی مانند دولومیتی‌شدن و تشکیل سیمان کلسیتی هم‌ضخامت، منجر به بهبود اتصال منافذ و افزایش هدایت الکتریکی می‌شوند. در مقابل گسترش سیمان کلسیتی بلوکی، سیمان انیدریتی

Tomography Application in Oil and Gas Reservoirs for Development Dynamic Monitoring. Processes 2023;11:2950. <https://doi.org/10.3390/pr11102950>.

[9] Slater L. Near surface electrical characterization of hydraulic conductivity: From petrophysical properties to aquifer geometries - A review. Surv Geophys 2007;28:169-97. <https://doi.org/10.1007/s10712-007-9022-y>.

[10] Kolah-kaj P, Kord S, Soleymanzadeh A. Application of electrical rock typing for quantification of pore network geometry and cementation factor assessment. J Pet Sci Eng 2022;208.

<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109426>.

[11] Ahr WM. Geology of Carbonate Reservoirs: The Identification, Description, and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in Carbonate Rocks. 2008.

<https://doi.org/10.1002/9780470370650>.

[12] Lucia FJ. Carbonate Reservoir Characterization An Integrated Approach, Second Edition. vol. 55. 2007.

[۱۳] Omrani S, Tavakoli V. Influences of Geological and Petrophysical Attributes on Electrical Resistivity-Based Reserve Evaluation: Enhancing Carbonate Reservoir Classification, Permian-Triassic Reservoirs of Southern Iran. SPE J 2024;29:5352-71.

<https://doi.org/10.2118/223075-PA>.

[14] Tavakoli V. Carbonate Reservoir Heterogeneity. Cham: Springer International Publishing; 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34773-4>.

[15] Omrani S, Tavakoli V. Exploring comparative heterogeneity management for precise water saturation assessment in carbonate formations: Dean-Stark measurements and beyond. Geoenergy Sci Eng 2024;243:213398. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213398>.

[16] Tiab D, Donaldson EC. Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties: Fourth Edition. Elsevier; 2015.

<https://doi.org/10.1016/C2014-0-03707-0>.

[17] Glover PWJ, Ransford TJ, Auger G. A simple method for solving the Bussian equation for electrical conduction in rocks. Solid Earth 2010;1:85-91. <https://doi.org/10.5194/se-1-85-2010>.

[18] Garing C, Luquot L, Pezard PA, Gouze P. Electrical and flow properties of highly heterogeneous carbonate rocks. Am Assoc Pet

و فراوان تر بودن تخلخل‌های جدا افتاده در سنگ‌ها از عوامل اصلی افزایش مقاومت الکتریکی هستند. این مطالعه نشان داد که مقاومت الکتریکی می‌تواند به‌عنوان یک نشانگر مفید برای ارزیابی خصوصیات دیاژنزی، محیط رسوبی و ریزرخساره‌ها مورد استفاده قرار بگیرد.

۱۱. مراجع

[1] Meng H, Shi Q, Liu T, Liu F, Chen P. The Percolation Properties of Electrical Conductivity and Permeability for Fractal Porous Media. Energies 2019;12:1085. <https://doi.org/10.3390/en12061085>.

[2] Cai J, Wei W, Hu X, Wood DA. Electrical conductivity models in saturated porous media: A review. Earth-Science Rev 2017;171:419-33.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.013>.

[3] Nghia N Van, Hung NM, Thanh LD. A Model for Electrical Conductivity of Porous Materials under Saturated Conditions. VNU J Sci Math - Phys 2021;37.

[https://doi.org/10.25073/2588-](https://doi.org/10.25073/2588-1124/vnumap.4573)

[1124/vnumap.4573](https://doi.org/10.25073/2588-1124/vnumap.4573).

[4] Binley A, Hubbard SS, Huisman JA, Revil A, Robinson DA, Singha K, et al. The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales. Water Resour Res 2015;51:3837-66.

<https://doi.org/10.1002/2015WR017016>.

[5] Lech M, Skutnik Z, Bajda M, Markowska-Lech K. Applications of electrical resistivity surveys in solving selected geotechnical and environmental problems. Appl Sci 2020;10.

<https://doi.org/10.3390/app10072263>.

[6] Lesmes DP, Friedman SP. Relationships between the Electrical and Hydrogeological Properties of Rocks and Soils, 2005, p. 87-128. https://doi.org/10.1007/1-4020-3102-5_4.

[7] Omrani, S., & Tavakoli, V. (2024). Examining Key Factors Influencing the Accuracy of Water Saturation Calculations in Carbonate Reservoirs: A Case Study of Kangan and Dalan Formations in the Western Persian Gulf. Journal of Petroleum Geomechanics, 7(1), 12-24. doi: 10.22107/jpg.2024.427939.1221.

[8] Shi W, Yin G, Wang M, Tao L, Wu M, Yang Z, et al. Progress of Electrical Resistance

- Dariyan formations, the central Persian Gulf. *J Nat Gas Sci Eng* 2018;52:155–65. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.01.028>.
- [29] Tavakoli V. Chemostratigraphy of the Permian-Triassic Strata of the Offshore Persian Gulf, Iran. *Chemostratigraphy Concepts, Tech. Appl.*, 2015, p. 373–93. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-419968-2.00014-5>.
- [30] Esrafil-Dizaji B, Rahimpour-Bonab H. Effects of depositional and diagenetic characteristics on carbonate reservoir quality: A case study from the South Pars gas field in the Persian Gulf. *Pet Geosci* 2009;15:325–44. <https://doi.org/10.1144/1354-079309-817>.
- [31] Kashfi MS. GEOLOGY OF THE PERMIAN “SUPER-GIANT” GAS RESERVOIRS IN THE GREATER PERSIAN GULF AREA. *J Pet Geol* 1992;15:465–80. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1992.tb01046.x>.
- [32] Tavakoli V, Naderi-Khujin M, Seyedmehdi Z. The end-Permian regression in the western Tethys: sedimentological and geochemical evidence from offshore the Persian Gulf, Iran. *Geo-Marine Lett* 2018;38:179–92. <https://doi.org/10.1007/s00367-017-0520-8>.
- [33] Dunham RJ. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Textures. *Classif Carbonate Rocks--A Symp* 1962:108–21.
- [34] Embry AF, Klovan JE. A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, NWT. *Bull Can Pet Geol* 1971;19:730–81.
- [35] Flügel E. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2010. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03796-2>.
- [36] Tavakoli V, Rahimpour-Bonab H, Esrafil-Dizaji B. Diagenetic controlled reservoir quality of South Pars gas field, an integrated approach. *Comptes Rendus Geosci* 2011;343:55–71. <https://doi.org/10.1016/J.CRTE.2010.10.004>.
- [37] Jafarian A, Fallah-Baghtash R, Mattern F, Heubeck C. Reservoir quality along a homoclinal carbonate ramp deposit: The Permian Upper Dalan Formation, South Pars Field, Persian Gulf Basin. *Mar Pet Geol* 2017;88:587–604. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.09.002>
- Geol Bull* 2014;98:49–66. <https://doi.org/10.1306/05221312134>.
- [19] Nie X, Zou C, Li Z, Meng X, Qi X. Numerical simulation of the electrical properties of shale gas reservoir rock based on digital core. *J Geophys Eng* 2016;13:481–90. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/13/4/481>.
- [20] Rembert F, Jougnot D, Guarracino L. A fractal model for the electrical conductivity of water-saturated porous media during mineral precipitation-dissolution processes. *Adv Water Resour* 2020;145. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103742>.
- [21] Hou Y, Liu D, Zhao T, Zhou J, Tian L, Kou X, et al. Numerical Simulation of Electrical Properties of Carbonate Reservoirs Using Digital Rocks. *Processes* 2023;11:2214. <https://doi.org/10.3390/pr11072214>.
- [22] Lak R. Sea Level Changes in Northern Part of the Persian Gulf During Holocene. *Procedia - Soc Behav Sci* 2014;120:757–63. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.02.159>.
- [23] Konert G, Afifi AM, Al-Hajri SA, Droste HJ. Paleozoic stratigraphy and hydrocarbon habitat of the Arabian plate. *GeoArabia* 2001;6:407–42. <https://doi.org/10.2113/geoarabia0603407>.
- [24] Szabo F, Kheradpir A. Permian and Triassic Stratigraphy, Zagros Basin, South-West Iran. *J Pet Geol* 1978;1:57–82. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1978.tb00611.x>.
- [25] Insalaco E, Virgone A, Courme B, Gaillot J, Kamali MR, Moallemi A, et al. Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: Depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture. *GeoArabia* 2006;11:75–176. <https://doi.org/10.2113/geoarabia110275>.
- [26] Kashfi MS. A SOURCE BED STUDY OF THE OLIGO-MIOCENE ASMARI LIMESTONE IN SW IRAN. *J Pet Geol* 1984;7:419–28. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1984.tb00886.x>.
- [27] Ehrenberg SN, Nadeau PH, Agrawi AAM. A comparison of Khuff and Arab reservoir potential throughout the Middle East. *Am Assoc Pet Geol Bull* 2007;91:275–86. <https://doi.org/10.1306/09140606054>.
- [28] Tavakoli V, Jamalain A. Microporosity evolution in Iranian reservoirs, Dalan and

- [38] Abdolmaleki J, Tavakoli V, Asadi-Eskandar A. Sedimentological and diagenetic controls on reservoir properties in the Permian-Triassic successions of Western Persian Gulf, Southern Iran. *J Pet Sci Eng* 2016;141:90–113. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.01.020>.
- [39] Alsharhan AS. Sedimentological character and hydrocarbon parameters of the Middle permian to Early Triassic Khuff formation United Arab Emirates. *GeoArabia* 2006;11:121–58. <https://doi.org/10.2113/geoarabia1103121>.
- [40] Sharland PR, Casey DM, Davies RB, Simmons MD, Sutcliffe OE. Arabian plate sequence stratigraphy - Revisions to SP2. *GeoArabia* 2004;9:199–214. <https://doi.org/10.2113/geoarabia0901199>.
- [41] Tucker ME. Sedimentary petrology. An introduction to the origin of sedimentary rocks. vol. 2nd Ed. 2001.
- [42] Tavakoli V, Rahimpour-Bonab H. Uranium depletion across Permian-Triassic Boundary in Persian Gulf and its implications for paleoceanic conditions. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 2012;350–352:101–13. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.06.019>.