



مقاله پژوهشی

## مقایسه تأثیر انواع تخلخل بر خواص الکتریکی سازندهای کربناته دالان و کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس

علی اکبر جهان پناه<sup>۱</sup>؛ وحید توکلی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی نفت؛ دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

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

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/ggj.2025.483723.1242

واژگان کلیدی	چکیده
تخلخل، انواع تخلخل، مقاومت الکتریکی، اشباع آب، فرآیندهای دیاژنزی	تخلخل و انواع آن از مهم‌ترین ویژگی‌های مخازن هستند. مقاومت الکتریکی سازند نیز از ویژگی‌های مهم پتروفیزیکی مخازن است که با استفاده از این ویژگی می‌توان اشباع آب و متعاقباً اشباع هیدروکربور را محاسبه کرد. بنابراین بررسی تأثیر نوع تخلخل بر مقاومت الکتریکی به افزایش درک ارتباط بین ویژگی‌های زمین‌شناسی بر ویژگی‌های پتروفیزیکی و ارزیابی مخازن به ویژه مخازن کربناته کمک خواهد نمود. در این مطالعه از مغزه‌ها، پلاگ‌ها، مقاطع نازک میکروسکوپی و نگار مقاومت الکتریکی یک چاه در سازندهای کربناته-تبخیری دالان و کنگان به ضخامت ۳۴۲.۹۲ متر استفاده شده است. از پلاگ‌های تهیه شده در مجموع ۱۳۶۷ مقطع نازک تهیه شده و ویژگی‌های سنگ‌شناسی، بافت‌های رسوبی، انواع تخلخل‌ها و فرآیندهای دیاژنزی مشخص شد. ضرایب آرچی و اشباع آب برای هر نوع تخلخل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و چاه‌پیمایی تعیین و محاسبه شد. سپس با استفاده از داده‌های اشباع آب و مقدار تخلخل آزمایشگاهی به بررسی تأثیر و مقایسه هر نوع تخلخل شناسایی شده بر مقاومت الکتریکی پرداخته شد. نتایج نشان داد که مقدار تخلخل تأثیر قابل توجهی بر مقاومت الکتریکی دارد. با افزایش مقدار تخلخل در همه انواع تخلخل‌ها، مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد اما میزان تغییرات و متوسط مقاومت الکتریکی در منافذ گوناگون متفاوت است. تخلخل‌های حفره‌ای با بیشترین مقدار تخلخل مقاومت الکتریکی کمتری دارند در صورتی که تخلخل‌های غیرقابل مشاهده (ریزتخلخل‌ها) با کمترین مقدار تخلخل متوسط مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به سایر تخلخل‌های شناسایی شده دارند. علاوه بر این اشباع آب نیز نقش مهمی بر مقاومت الکتریکی دارد و با کاهش اشباع آب در همه تخلخل‌های مورد مطالعه مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. فرآیندهای دیاژنزی افزایش یافته تخلخل مانند انحلال در تخلخل‌های قالبی و دولومیتی شدن در تخلخل‌های بین‌بلوری منجر به کاهش مقاومت الکتریکی می‌شود و فرآیندهای کاهش‌دهنده تخلخل مانند سیمان انیدریتی و انیدریتی‌های پرکننده منافذ با کاهش فضای منافذ منجر به افزایش مقاومت الکتریکی می‌شوند.

### ۱. پیش‌گفتار

گسترده‌ای از منافذ و ساختارهای منفذی هستند که منجر به ایجاد خواص پتروفیزیکی متفاوت و افزایش ناهمگنی می‌شوند [۳-۵]. مطالعات گذشته نشان داده است که کیفیت مخازن و ویژگی‌های پتروفیزیکی تحت تأثیر هندسه منافذ و نوع تخلخل است [۶-۸]. خواص جریان‌ی سنگ‌های متخلخل معمولاً با تغییر فضای منافذ در طی دیاژنزی تغییر می‌کند [۹-۱۱]. بنابراین سیستم منافذ و عوامل تغییر دهنده آن نقش مهمی در کنترل توزیع سیالات و ویژگی‌های پتروفیزیکی

مخازن کربناته به دلیل تنوع و پیچیدگی منافذ موجود در آن‌ها، چالش‌های قابل توجهی را در ارزیابی و تولید برای صنایع نفت و گاز ایجاد می‌کنند. این مخازن معمولاً کانی‌شناسی نسبتاً ساده‌ای دارند اما از لحاظ ساختار و ویژگی‌های منافذ بسیار پیچیده و ناهمگن می‌باشند [۱، ۲]. سنگ‌های کربناته به دلیل تغییرات رخساره‌ای، حساسیت به فرآیندهای دیاژنزی و منشأ زیستی متنوع، مستعد ایجاد طیف

دارند. با توجه به وجود پیچیدگی و ناهمگنی در مخازن کربناته استفاده از ضرایب ثابت آرچی در محاسبه اشباع آب معقول نیست و منجر به خطای قابل توجهی در محاسبه اشباع آب می‌شود [۱۳، ۱۲]. براساس مطالعات پیشین تعیین گونه‌سنگی به روش نوع تخلخل از بهترین و دقیق‌ترین روش‌ها برای تعیین ضرایب آرچی و محاسبه اشباع آب می‌باشد [۱۵، ۱۴].

سنگ‌ها و سیالات هیدروکربوری رسانای ضعیف جریان الکتریکی هستند و مقاومت الکتریکی بالایی دارند. بنابراین در سنگ‌های متخلخل جریان الکتریکی از سیالات (آب شور) درون منافذ به وسیله نمک‌های محلول هدایت می‌شوند. مقاومت الکتریکی یک سنگ اشباع از سیال، توانایی سنگ را در برابر جریان الکتریکی نشان می‌دهد که نسبت معکوس با جریان الکتریکی دارد. مقاومت الکتریکی سنگ‌های رسوبی اشباع از سیال عمدتاً توسط ساختار منفذی کنترل می‌شوند. در نتیجه اندازه، شکل، اتصال منافذ و گلوگاه منافذ بر جریان الکتریکی تأثیر می‌گذارند. انواع منافذ جریان سیال و جریان الکتریکی را کنترل می‌کنند، بنابراین برای ارزیابی خصوصیات پتروفیزیکی محیط زیرسطحی و مدل‌سازی مخزن بسیار مهم می‌باشند [۱۶-۱۸]. مطالعات مختلفی در مورد ساختار منافذ و تأثیر آن بر فاکتور مقاومت سازندی و مقاومت الکتریکی سازند انجام شده است [۱۹-۲۴]. این مطالعات اثرات ساختار و هندسه منافذ بر مقاومت الکتریکی را تأیید کردند، با این حال تأثیر انواع مختلف تخلخل بر مقاومت الکتریکی واقعی سازند در مخازن کربناته همراه با داده‌های چاه‌پیمایی، آزمایشگاهی و میکروسکوپی به طور جامع و کامل بررسی نشده است. این مطالعه بر روی سازندهای کربناته دالان و کنگان که از مهم‌ترین مخازن گازی غیرهمراه ایران است، در بخش مرکزی خلیج فارس انجام شد. هدف اصلی این مطالعه بررسی تأثیر انواع تخلخل‌های شناسایی شده بر مقاومت الکتریکی با استفاده از داده‌های اشباع آب، مقدار تخلخل و نگار مقاومت الکتریکی است. نتایج ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند در بهبود ارزیابی مخازن هیدروکربوری، به‌ویژه مخازن کربناته منطقه، مهم باشند. همچنین این مطالعه به‌دلیل تحلیل انواع تخلخل و تأثیر آن‌ها بر مقاومت الکتریکی، همراه با در نظر گرفتن فرآیندهای دیاژنزی، به افزایش درک ارتباط بین ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی کمک

می‌کند. دید چندجانبه این پژوهش به رابطه بین مقاومت الکتریکی و سایر خصوصیات زمین‌شناسی و پتروفیزیکی، از نوآوری‌های آن محسوب می‌گردد. پژوهش حاضر یک مطالعه موردی است و با توجه به ناهمگنی‌های موجود در مخازن کربناته و شرایط مختلف محیطی و دیاژنزی ممکن است اختلافاتی در سایر مخازن مشاهده شود، اما از نتایج و روش‌های این مطالعه می‌توان در سایر چاه‌ها و مخازن نیز استفاده کرد. با پژوهش‌های گسترده‌تر و بررسی تعداد چاه‌های بیشتر می‌توان درک کامل‌تر و بهتری در مورد اثرات نوع تخلخل بر مقاومت الکتریکی ارائه نمود.

## ۲. زمین‌شناسی و چینه‌شناسی

بخش مرکزی خلیج فارس در حاشیه شمال شرقی صفحه عربی واقع شده است. ساختارهای اصلی و عمده صفحه عربی تحت تأثیر دو فاز زمین‌ساختی قرار داشتند [۲۵] که اولین فاز مربوط به برخورد عمار است که در حدود ۶۲۰ تا ۶۴۰ میلیون سال پیش در امتداد شمال-جنوب در صفحه عربی رخ داد و رویداد بعدی مربوط به سیستم ریفتی نجد است که ۵۳۰ تا ۵۷۰ میلیون سال پیش با روند کلی شمال غربی-جنوب شرقی به موازات رشته کوه‌های زاگرس رخ داده است [۲۵]. در دوره پرمین اولین رسوب‌گذاری گسترده بعد از کوهزایی هرسینین شامل رسوبات آواری (رودخانه‌ای تا آبرفتی) کربونیفر میانی-پایانی تا پرمین میانی بوده که در ایران به نام سازند فراقون و در عربستان به نام سازند اوناپزه شناخته می‌شوند. پلاتفرم کربناته پرمین-تریاس که در آن سازندهای دالان و کنگان نهشته شده‌اند نشان‌دهنده یک رویداد عظیم زمین‌ساختی-رسوبی هستند [۲۶]. این رویداد مبین آغاز فرونشینی حرارتی در حاشیه غیرفعال نئوتتیس می‌باشد که همزمان با شروع گسترش بستر اقیانوس نئوتتیس در پرمین میانی بوده است [۲۶-۲۸]. در دوره پرمین-تریاس در بخش شمال شرقی صفحه عربی وضعیت زمین‌ساختی نسبتاً آرامی ایجاد شده و شرایط آب و هوایی به تدریج گرم‌تر و خشک‌تر شده است که این امر موجب نهشت توالی‌های ضخیم کربناته-تخیری سازندهای دالان-کنگان (معادل خوف) شده است [۲۹، ۳۰].

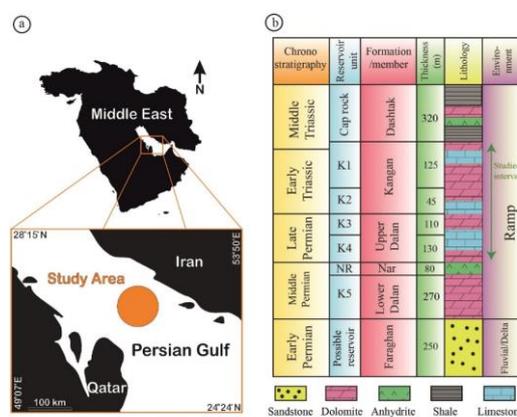
سازند دالان به سن پرمین میانی-پسین به عضوهای کربناته بالایی و پایینی تقسیم می‌شوند که توسط لایه انیدریتی نار

دیکسون [۳۶] رنگ آمیزی شده است. نیمی از نمونه‌ها با اپوکسی رنگ آبی آغشته شدند تا انواع منافذ را نشان دهند. خصوصیات بافتی و دیاژنزی و درصد هر نوع تخلخل در مقاطع نازک با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان، ارزیابی چشمی و با مقایسه نمودارهای استاندارد تعیین شدند. برای تعیین مقاومت واقعی سازند در همان عمق مغزه از نگار مقاومت عمیق (*RLA5*) استفاده شده است. مقاومت آب سازند در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر  $0.0431$  اهم‌متر از آزمایش آب سازندی تعیین شد. ۵۸ پلاگ برای آزمایش فاکتور مقاومت سازندی و ۲۰ پلاگ برای آزمایش شاخص مقاومت سازندی استفاده شد تا ضرایب آرچی ( $a, m, n$ ) برای هر نوع تخلخل تعیین شود. تخلخل با استفاده از گاز هلیوم و قانون بویل اندازه‌گیری شد و از ۱۲۰۴ داده تخلخل استفاده شده است. از طبقه‌بندی چوکت و پری [۳۷] برای تعیین انواع منافذ استفاده شده است، این طبقه‌بندی، منافذ سنگ‌های کربناته را براساس تبعیت یا عدم تبعیت از فابریک سنگ تقسیم‌بندی می‌کند که به دلیل جامعیت و کاربرد گسترده در مطالعات پتروفیزیکی و ارزیابی مخازن مورد استفاده قرار گرفته است. براین اساس تخلخل‌های بین‌دانه‌ای، درون‌دانه‌ای، قالبی، بین‌بلوری و فنسترال از فابریک سنگ تبعیت می‌کنند و تخلخل‌های شکستگی و حفره‌ای از فابریک سنگ تبعیت نمی‌کنند. از طبقه‌بندی دانهام [۳۸] نیز برای تعیین بافت‌های سنگ کربناته استفاده شده است. این طبقه‌بندی براساس متصل و غیرمتصل بودن اجزاء تشکیل‌دهنده سنگ کربناته و نسبت بین دانه‌ها و خمیره (ماتریکس) تقسیم می‌شود که به دلیل کاربرد آسان در مطالعات صحرایی و میکروسکوپی بسیار رایج است. از طبقه‌بندی فلوگل [۳۹] برای بررسی محیط‌ها و کمرندهای رخساره‌ای استفاده شده است. این طبقه‌بندی سنگ‌های کربناته را براساس رخساره‌های میکروسکوپی آن‌ها که نشان‌دهنده محیط‌های رسوبی خاص و مختلفی هستند، تقسیم‌بندی می‌کند. این طبقه‌بندی در توصیف و تفسیر محیط‌های رسوبی و کمرندهای رخساره‌ای بسیار سودمند بوده و کاربرد فراوانی دارد.

### ۱.۳. محاسبه اشباع آب

اشباع آب با استفاده از معادله آرچی [۴۰] که از مهم‌ترین کاربردی‌ترین فرمول‌های محاسبه اشباع آب است، محاسبه شد. میزان اشباع آب با استفاده از ضرایب آرچی برای هر نوع

جدا شده‌اند [۳۱]. بخش پایینی سازند دالان از طریق سطح فرسایشی بر روی سازند فراقون قرار گرفته است. سازند کنگان به سن تریاس اولیه توسط شیل‌ها و انیدریت‌های سازند دشتک به سن تریاس میانی-پسین پوشیده شده است [۳۲]. مرز این دو سازند در مطالعات گوناگون مورد مطالعه قرار گرفته است و عقیده بر آن است که این مرز به صورت کاهش سطح آب دریا با ناپیوستگی فرسایشی مشخص می‌گردد [۳۴، ۳۳]. موقعیت جغرافیایی ناحیه مورد مطالعه و توالی چینه‌شناسی این سازندها در شکل ۱ نشان داده شده است.



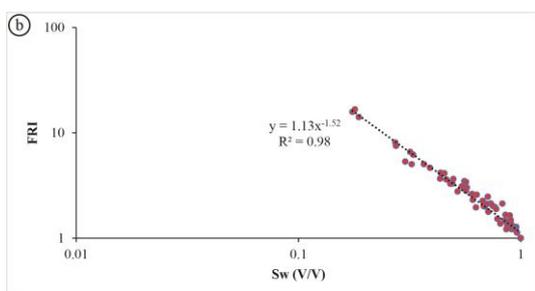
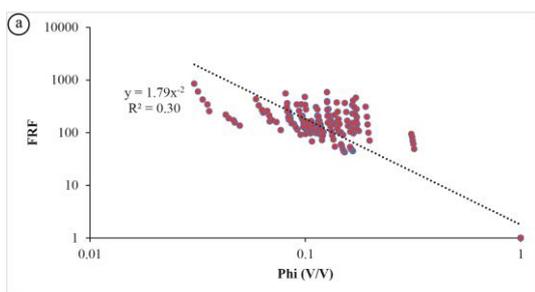
شکل ۱. (a) موقعیت ناحیه مورد مطالعه [۳۵] و (b) ستون چینه‌شناسی در توالی مورد مطالعه [۱۱].

### ۳. مواد و روش‌ها

برای مطالعه پلاگ‌ها و مقاطع میکروسکوپی از مغزه‌های یک چاه به ضخامت ۳۴۲.۹۲ متر استفاده شده است که ضخامت ۱۷۴.۴۶ متر مربوط به سازند دالان و ۱۶۸.۴۶ متر مربوط به سازند کنگان می‌باشد. همچنین از داده‌های چاه‌پیمایی مقاومت الکتریکی عمیق در همان عمق مغزه استفاده شده است. از پلاگ‌های تهیه شده، مقطع نازک گرفته شد که در مجموع از ۱۳۶۷ مقطع نازک از سازندهای دالان و کنگان در یکی از چاه‌های بخش مرکزی خلیج فارس مطالعه میکروسکوپی صورت گرفت (۶۹۴ نمونه از سازند دالان و ۶۷۳ نمونه از سازند کنگان مورد استفاده قرار گرفته است) تا ویژگی‌های پتروگرافی شامل سنگ‌شناسی، بافت‌های رسوبی، تعیین انواع منافذ و فرآیندهای دیاژنزی بررسی شود. برای تشخیص دقیق کلسیت از دولومیت، یک سوم از هر مقطع نازک با محلول آلیزارین قرمز (*Alizarin Red-S*) براساس روش

نیز مربوط به تخلخل‌های بین‌دانه‌ای است.

$$FRF = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad [۴۰] \quad (۱)$$



شکل ۲. *a*) نمودار فاکتور مقاومت سازندی در برابر تخلخل برای تعیین ضریب پیچاپیچی و ضریب سیمان‌شدگی در تخلخل‌های قالبی و *b*) نمودار شاخص مقاومت سازندی در برابر اشباع آب برای تعیین توان اشباع در تخلخل‌های قالبی

#### ۴. نتایج

مطالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع نازک و آنالیزهای معمول و ویژه مغزه، اطلاعات دقیقی در مورد بافت‌های رسوبی، محیط رسوبی، انواع تخلخل، فرآیندهای دیانزنی، مقدار تخلخل و تعیین ضرایب آرچی در سازندهای دالان و کنگان فراهم آورده است.

#### ۱.۴. خصوصیات زمین‌شناسی

سنگ‌شناسی غالب برای نمونه‌ها شامل آهک، دولومیت و انیدریت است. براساس مطالعات میکروسکوپی پنج نوع بافت شامل مادستون، وکستون، پکستون، گرینستون و باندستون شناسایی شدند که در چهار کمر بند رخساره‌ای شامل جزرومدی، لاگون، پشته زیر آبی و دریای باز نهشته شده‌اند. نمونه‌های انیدریت نیز در نواحی بالای جزرومدی یافت

تخلخل محاسبه شده است. با استفاده از فاکتور مقاومت سازندی و شاخص مقاومت سازندی که در روابط ۱ و ۲ نشان داده شده است، اشباع آب محاسبه می‌شود.

$$FRI = \frac{R_t}{R_o} = \frac{1}{S_w^n} \quad [۴۰] \quad (۲)$$

از تلفیق رابطه ۱ و ۲ می‌توان اشباع آب را محاسبه نمود (رابطه ۳).

$$S_w = \left( \frac{aR_w}{\phi^m R_t} \right)^{1/n} \quad [۴۰] \quad (۳)$$

ضریب سیمان‌شدگی برای هر نوع تخلخل از رسم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی داده‌های تخلخل در مقابل داده‌های فاکتور مقاومت سازندی اندازه‌گیری می‌شود، بدین صورت که شیب خط برازش شده به این نقاط ترسیم شده نشانگر ضریب سیمان‌شدگی و محل تقاطع خط برازش شده با محور فاکتور مقاومت سازندی که نشان‌دهنده عرض از مبدأ خط مزبور است، ضریب پیچاپیچی را بیان می‌کند. مقادیر توان اشباع برای هر نوع تخلخل نیز از رسم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی داده‌های اشباع آب در مقابل شاخص مقاومت سازندی و محاسبه شیب خط برازش از نقاط آن‌ها تعیین شد. نمونه‌ای از نمودار لگاریتمی-لگاریتمی تخلخل در برابر فاکتور مقاومت سازندی و اشباع آب در برابر شاخص مقاومت سازندی در شکل ۲ ترسیم شده است. ضرایب آرچی، معادله فاکتور مقاومت سازندی و تخلخل، معادله شاخص مقاومت سازندی و اشباع آب و ضریب همبستگی آن‌ها برای انواع منافذ مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. به علت نبود داده کافی توان اشباع تخلخل شکستگی برابر با توان اشباع کلی مخزن و ضرایب آرچی برای تخلخل فنسترال برابر با ضرایب ثابت در نظر گرفته شد. در همه انواع تخلخل‌ها ضرایب همبستگی ( $R^2$ ) اندازه‌گیری شده بین اشباع آب و شاخص مقاومت سازندی بیشتر از ضرایب همبستگی اندازه‌گیری شده بین تخلخل و فاکتور مقاومت سازندی است (جدول ۱) که این امر نشان‌دهنده پراکندگی بیشتر داده‌های تخلخل و فاکتور مقاومت سازندی است. ضرایب همبستگی بین تخلخل و فاکتور مقاومت سازندی در تخلخل‌های شکستگی و غیرقابل مشاهده بیشتر از سایر تخلخل‌ها است (جدول ۱). کمترین ضریب همبستگی بین اشباع آب و شاخص مقاومت سازندی

نمونه‌هایی با بافت گریستون عمدتاً در پشته زیر آبی نهشته شده‌اند. بافت باندستون مربوط به دو رخساره زیستی استروماتولیت و ترومبولیت است. در اغلب موارد محیط رسوبی رخساره استروماتولیت باندستون را به نواحی جزرومدی نسبت می‌دهند [۴۱]. در حالی که محیط رسوبی رخساره ترمبولیت

می‌شوند. پیش از این تجزیه و تحلیل رخساره‌ها، بافت‌ها و فرآیندهای دیاژنزی سازندهای دالان و کنگان موضوع مطالعات بسیاری بوده است [۴۱-۴۵]. لذا در این مطالعه مهم‌ترین ویژگی‌های این سازندها بیان می‌شود. بافت‌های مادستون و وکستون عمدتاً در کمریندهای رخساره‌ای کم انرژی جزرومدی، لاگون و دریای باز نهشته شده‌اند و نمونه‌هایی با بافت پکستون عمدتاً در محیط لاگون و

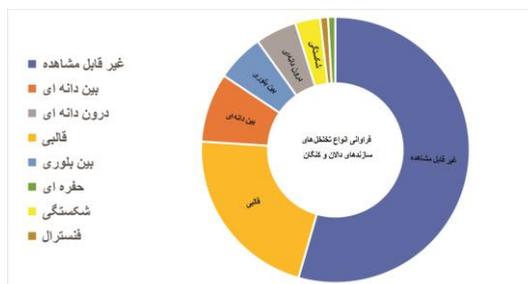
جدول ۱. ضرایب آرچی، معادلات فاکتور مقاومت سازندی و ضریب همبستگی، معادلات شاخص مقاومت سازندی و ضریب همبستگی انواع تخلخل‌های مورد مطالعه

$R^2$	معادله ۲	$R^2$	معادله ۱	$n$	$m$	$a$	انواع تخلخل
۰.۹۸	$FRI = 0.92sw^{-1.97}$	۰.۹۲	$FRF = 2.35\phi^{-1.46}$	۱.۹۷	۱.۴۶	۲.۳۵	غیرقابل مشاهده
۰.۸۶	$FRI = sw^{-1.75}$	۰.۳۲	$FRF = 1.08\phi^{-2.17}$	۱.۷۵	۲.۱۷	۱.۰۸	بین‌دانه‌ای
۰.۹۹	$FRI = 1.03sw^{-1.49}$	۰.۲۸	$FRF = 1.25\phi^{-2.05}$	۱.۴۹	۲.۰۵	۱.۲۵	درون‌دانه‌ای
۰.۹۸	$FRI = 1.13sw^{-1.52}$	۰.۳۰	$FRF = 1.79\phi^{-2}$	۱.۵۲	۲	۱.۷۹	قالبی
۰.۹۹	$FRI = 1.04sw^{-1.55}$	۰.۳۲	$FRF = 0.95\phi^{-2.14}$	۱.۵۵	۲.۱۴	۰.۹۵	بین‌بلوری
۰.۹۸	$FRI = 0.96sw^{-2.34}$	۰.۵۴	$FRF = 0.98\phi^{-2.48}$	۲.۳۴	۲.۴۸	۰.۹۸	حفره‌ای
۰.۹۵	$FRI = sw^{-1.74}$	۰.۹۶	$FRF = 0.96\phi^{-1.94}$	۱.۷۴	۱.۹۴	۰.۹۶	شکستگی
-	-	-	-	۲	۲	۱	فنسترال

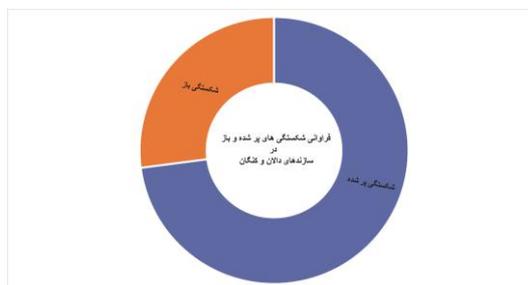
می‌باشد. برخی نمونه‌ها فاقد هر گونه سیمانی بوده و برخی دیگر دارای یک نوع و یا بیش از یک نوع می‌باشند. سیمان‌های انیدریتی رایج‌ترین فرآیند دیاژنزی پس از دولومیتی‌شدن است [۴۸]. سیمان‌های انیدریتی فضاهای منافذ را پر می‌کنند که منجر به کاهش تخلخل می‌شوند در حالی که سیمان‌های هم‌ضخامت منجر به حفظ تخلخل اولیه شده است و بر خلاف سایر انواع سیمان‌ها کلسیتی، سیمان هم‌ضخامت چارچوب محکمی را تشکیل می‌دهد و از سایر فرآیندهای دیاژنزی نظیر تراکم جلوگیری می‌کند [۴۹،۴۲]. تراکم و سیمان‌ها به خصوص سیمان انیدریتی و انیدریت‌های پرکننده منافذ تأثیر منفی بر کیفیت مخزنی داشته است. انیدریت‌ها با پر کردن گسترده فضاهای منافذ و گلوگاه منافذ منجر به کاهش تخلخل و افزایش مقاومت الکتریکی شده‌اند. تخلخل کم و منافذ کوچک به شدت بر ویژگی‌هایی نظیر ضریب سیمان‌شدگی، توان اشباع، ضریب پیچاپیچی و مقاومت الکتریکی تأثیر می‌گذارد. تخلخل‌های مورد مطالعه شامل تخلخل‌های غیرقابل مشاهده،

باندستون در نواحی بین جزرومدی تا زیر جزرومدی و لاگون تفسیر می‌شود [۴۴،۴۳]. مهم‌ترین ویژگی‌های دیاژنزی در سازندهای مورد مطالعه شامل انحلال، دولومیتی‌شدن، سیمانی‌شدن و تراکم می‌باشد. سایر فرآیندهای دیاژنزی مانند نوشکلی، میکرایتی‌شدن و انیدریت‌های پرکننده منافذ نیز مشاهده می‌شوند. انحلال مهم‌ترین عامل در افزایش تخلخل در سازندهای دالان و کنگان است که در نمونه‌های مورد مطالعه عمدتاً باعث تشکیل تخلخل‌های قالبی حاصل از انحلال آئیدها در رخساره‌های گریستونی و افزایش تخلخل می‌شود. انواع دولومیت‌ها براساس اندازه که شامل دولومیت‌های دانه شکری با اندازه‌ای بین ۲۰ تا ۱۲۰ میکرون [۴۶] و دولومیکرایت‌ها یافت می‌شوند. همچنین انواع دولومیت‌ها از نظر شکل مرز بین بلورها [۴۷] که شامل دولومیت‌های مسطح و غیرمسطح است نیز در سازندهای مورد مطالعه یافت می‌شوند. دولومیت‌ها به خصوص دولومیت‌هایی با اندازه بلوری درشت منجر به افزایش تخلخل می‌شوند. انواع سیمان‌ها شامل سیمان‌های هم‌ضخامت، انیدریتی و بلوکی

بین دانه‌ای، درون دانه‌ای، قالبی، بین بلوری، حفره‌ای، شکستگی و فنسترال است. تخلخل‌های غیرقابل مشاهده به عنوان ریزتخلخل در نظر گرفته شده است که روند آن از اختلاف تخلخل آزمایشگاهی و میکروسکوپی تعیین شد. لازم به ذکر است که همیشه تفاوتی بین مشاهدات چشمی و آزمایشگاهی وجود دارد. تخلخل‌های غیرقابل مشاهده و تخلخل‌های قالبی بیشترین فراوانی را در توالی مورد مطالعه دارند و تخلخل‌های حفره‌ای و فنسترال کمترین فراوانی را دارند (شکل ۳). تخلخل‌های بین دانه‌ای، درون دانه‌ای و قالبی به فراوانی در رخساره‌های دانه پشته‌باز (گرینستون و پکستون) و تخلخل‌های غیرقابل مشاهده، بین بلوری، حفره‌ای، شکستگی و فنسترال در رخساره‌های گل پشته‌باز (مادستون و وکستون) یافت می‌شوند. شکستگی فرآیند دیاژنزی اصلی و مهمی در سازندهای مورد مطالعه نیست. تخلخل‌های شکستگی فراوانی و درصد کمی دارند و عمدتاً توسط انیدریت پر شده‌اند (شکل ۳ و ۴). در این مطالعه از تخلخل‌های غالب به عنوان تخلخل اصلی هر نمونه استفاده شده است. ویژگی‌های بافتی و دیاژنزی غالب هر یک از انواع تخلخل‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۳. توزیع فراوانی انواع تخلخل‌های سازندهای دالان و کنگان در چاه مورد مطالعه



شکل ۴. توزیع فراوانی شکستگی‌های پر شده و باز در سازندهای دالان و کنگان در چاه مورد مطالعه

#### ۲.۴. تخلخل

بر اساس داده‌های مغزه مقدار تخلخل اندازه‌گیری شده از ۰.۰۰۲ تا ۳۳.۵۵ درصد با متوسط ۵.۶۲ درصد است (جدول ۲). نمونه‌های دارای تخلخل‌های حفره‌ای و قالبی بیشترین متوسط تخلخل را دارند در حالی که تخلخل‌های غیرقابل مشاهده (ریزتخلخل‌ها) کمترین متوسط تخلخل را دارند.

#### ۳.۴. اشباع آب

بیشترین ضریب پیچاپیچی مربوط به تخلخل‌های غیرقابل مشاهده و کمترین ضریب پیچاپیچی مربوط به تخلخل‌های بین بلوری، شکستگی و حفره‌ای است (جدول ۱). بیشترین ضریب سیمان‌شدگی و توان اشباع نیز مربوط به تخلخل حفره‌ای است و کمترین ضریب سیمان‌شدگی مربوط به تخلخل‌های غیرقابل مشاهده است (جدول ۱). تقریباً چنین روند تغییراتی در تعیین ضرایب پیچاپیچی و به طور کلی در تعیین ضرایب آرچی با مطالعات دیگری نظیر نبوی در سال ۲۰۱۵ [۱۳] و ناظمی و همکاران در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ [۱۴، ۵۰] مطابقت دارد. به دلیل میزان فضاهای خالی و تأثیر فرآیندهای دیاژنزی ممکن است اختلافاتی مشاهده شود. به عنوان مثال در مطالعه ناظمی و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱۴] ضرایب پیچاپیچی تخلخل‌های حفره‌ای، بین دانه‌ای و شکستگی کمتر از تخلخل‌های بین بلوری بود. حداقل و حداکثر و متوسط اشباع آب برای هر نوع تخلخل در جدول ۳ نشان داده شده است. بیشترین و کمترین میزان متوسط اشباع آب به ترتیب در تخلخل‌های حفره‌ای و قالبی است (جدول ۳).

#### ۴.۴. مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی ثبت شده در کل چاه از ۰.۷۱ اهم‌متر تا بی‌نهایت (بیشتر از ۲۰۰۰ اهم‌متر) با متوسط حسابی (*Arithmetic Mean*) ۳۲۸.۶۴ اهم‌متر و متوسط هندسی (*Geometric Mean*) ۹۵.۹۵ اهم‌متر است. حداقل، حداکثر و متوسط مقاومت الکتریکی برای هر نوع تخلخل در جدول ۳ نشان داده شده است. متوسط مقاومت الکتریکی در تخلخل‌های غیرقابل مشاهده بیشتر از سایر تخلخل‌ها است و متوسط مقاومت الکتریکی در تخلخل‌های حفره‌ای کمتر از سایر تخلخل‌ها است (جدول ۳). توزیع فراوانی مقاومت‌های

الکتریکی هر نوع تخلخل نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. در تخلخل‌های غیرقابل مشاهده و شکستگی بیشتر از سایر فراوانی مقاومت‌های بالا (۱۰۰۰ تا بزرگتر از ۲۰۰۰ اهم‌متر) تخلخل‌ها می‌باشد (شکل ۵).

جدول ۲. ویژگی‌های سنگ‌شناسی، بافتی، محیط رسوبی، فرآیندهای دیاژنزی و میانگین تخلخل آزمایشگاهی و میکروسکوپی برای انواع تخلخل‌های مورد مطالعه

انواع تخلخل	سنگ‌شناسی	بافت	محیط رسوبی	فرآیندهای دیاژنزی	میانگین تخلخل آزمایشگاهی (V/V)	میانگین تخلخل میکروسکوپی (V/V)
غیرقابل مشاهده	دولومیت و آهک	گرینستون و مادستون	لاگون و جزرومدی	دولومیتی شدن، نوشکلی، میکرایتی شدن، انیدریت‌های پرکننده منافذ، سیمان انیدریتی و سیمان بلوکی میکرایتی شدن، سیمان هم‌ضخامت،	۰.۰۲	-
بین‌دانه‌ای	آهک و دولومیت	گرینستون	پشته زیر آبی	سیمان انیدریتی و انیدریت‌های پرکننده منافذ میکرایتی شدن، نوشکلی،	۰.۰۹	۰.۰۴
درون‌دانه‌ای	آهک	گرینستون	پشته زیر آبی	سیمان هم‌ضخامت، سیمان انیدریتی و سیمان بلوکی میکرایتی شدن، نوشکلی،	۰.۰۷	۰.۰۳
قالبی	آهک	گرینستون	پشته زیر آبی	سیمان هم‌ضخامت، سیمان بلوکی و انیدریت‌های پرکننده منافذ	۰.۱	۰.۰۸
بین‌بلوری	دولومیت	مادستون	لاگون	دولومیتی شدن، نوشکلی و انیدریت‌های پرکننده منافذ	۰.۰۹	۰.۰۳
حفره‌ای	دولومیت	مادستون	لاگون و جزرومدی	نوشکلی و دولومیتی شدن	۰.۱۱	۰.۰۳
شکستگی	آهک و دولومیت	مادستون	لاگون و دریای باز	نوشکلی، دولومیتی شدن و انیدریت‌های پرکننده منافذ	۰.۰۴	۰.۰۱
فنسترال	دولومیت	مادستون	جزرومدی و لagoon	دولومیتی شدن و انیدریت‌های پرکننده منافذ	۰.۰۸	۰.۰۴

جدول ۳. حداقل، حداکثر و متوسط اشباع آب محاسبه شده و مقاومت الکتریکی انواع تخلخل‌های مورد مطالعه

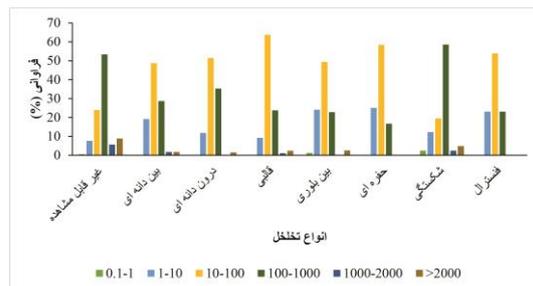
انواع تخلخل	$R_t$ (Geometric Mean) (ohm.m)	$R_t$ (Arithmetic Mean) (ohm.m)	$R_t$ (Max) (ohm.m)	$R_t$ (Min) (ohm.m)	$Sw$ (Mean) (V/V)	$Sw$ (Max) (V/V)	$Sw$ (Min) (V/V)
غیرقابل مشاهده	۱۷۰.۲۸	۴۷۲.۱۵	>۲۰۰۰	۰.۷۱	۰.۵۴	۱	۰.۰۰۸
بین‌دانه‌ای	۴۵.۱۷	۱۵۰.۷۸	>۲۰۰۰	۱.۶۹	۰.۵۶	۱	۰.۰۱
درون‌دانه‌ای	۵۹.۱۴	۱۵۲.۳۵	>۲۰۰۰	۱.۴۳	۰.۵۶	۱	۰.۰۵
قالبی	۴۹.۷۶	۱۴۶.۷۶	>۲۰۰۰	۱.۰۶	۰.۴۹	۱	۰.۰۰۳
بین‌بلوری	۳۱.۶۳	۱۲۹.۱۶	>۲۰۰۰	۰.۸	۰.۵۷	۱	۰.۰۴
حفره‌ای	۲۱.۰۳	۶۸.۶۰	۴۶۰.۴۸	۲.۶۷	۰.۸۱	۱	۰.۲۴

شکستگی	۰.۰۴	۱	۰.۶۲	۰.۹۶	>۲۰۰۰	۳۲۵.۲۷	۱۰۵.۶۳
فنسترال	۰.۲۸	۱	۰.۶۰	۴.۸	۶۹۷.۶۶	۱۱۴.۹۵	۳۹.۴۵

دولومیت منجر به افزایش تخلخل می‌شوند که نتیجه آن کاهش مقاومت الکتریکی است. با افزایش تخلخل و اشباع آب مقاومت الکتریکی کاهش می‌شود (شکل ۶a و ۶b). متوسط مقاومت الکتریکی در تخلخل‌های بین‌دانه‌ای بسیار کمتر از تخلخل‌های غیرقابل مشاهده است (جدول ۳). میزان تخلخل و اشباع آب نیز در این منافذ بیشتر از تخلخل‌های غیرقابل مشاهده است (جدول ۳). پیچیدگی فضای منفذی و ضریب پیچیدگی در این منافذ کمتر از تخلخل‌های غیرقابل مشاهده است. در نمونه‌هایی که سیمان انیدریتی و انیدریتی‌های پرکننده منافذ وجود داشته باشد، منجر به افزایش مقاومت الکتریکی شده است. در تخلخل‌های بین‌دانه‌ای نیز با افزایش تخلخل و اشباع آب مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد (شکل ۶c و ۶d). بیشترین همبستگی ( $R^2$  بالا) بین افزایش اشباع آب و کاهش مقاومت الکتریکی در تخلخل‌های بین‌دانه‌ای مشاهده شده است (شکل ۶d). در نمونه‌هایی که سیمان‌های هم‌ضخامت بیشتری مشاهده می‌شود، به دلیل آن که تخلخل‌های اولیه را حفظ می‌کند منجر می‌شود که جریان الکتریکی به سهولت عبور کند و مقاومت الکتریکی کاهش یابد. با افزایش سیمان بلوکی و سیمان انیدریتی به ویژه در تخلخل‌های غیرقابل مشاهده و بین‌دانه‌ای تخلخل کاهش می‌یابد و منجر به کاهش عبور جریان و افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. در نمونه‌هایی با نرخ تراکم پایین مقدار تخلخل بالا و مقاومت الکتریکی پایین است و با افزایش نرخ تراکم تخلخل کاهش و مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد.

تخلخل‌های درون‌دانه‌ای متوسط مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به تخلخل‌های بین‌دانه‌ای دارند (جدول ۳). در این نوع منافذ نیز با افزایش تخلخل و اشباع آب مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد (شکل ۶e و ۶f). با اینکه متوسط اشباع آب در این نوع منافذ برابر تخلخل‌های بین‌دانه‌ای است (جدول ۳) ولی به دلیل آن که فضاهای خالی درون‌دانه‌ها یافت می‌شوند و مقدار تخلخل کمتری دارند (جدول ۲)، جریان الکتریکی همانند تخلخل‌های بین‌دانه‌ای عبور نمی‌کند و ضریب پیچیدگی نیز در این منافذ بیشتر از تخلخل‌های بین‌دانه‌ای است (جدول ۱). با افزایش سیمان انیدریتی در این منافذ نیز

مقاومت‌های ۱ تا ۱۰ اهم‌تر بیشترین فراوانی را در تخلخل‌های حفره‌ای و بین‌بلوری دارند. به جز تخلخل‌های غیرقابل مشاهده و شکستگی سایر تخلخل‌ها بیشترین فراوانی مقاومت بین ۱۰ تا ۱۰۰ اهم‌تر دارند (شکل ۵).



شکل ۵. توزیع فراوانی مقاومت الکتریکی در محدوده ۰.۱ تا بزرگتر از ۲۰۰۰ اهم‌تر در انواع تخلخل‌های مورد مطالعه

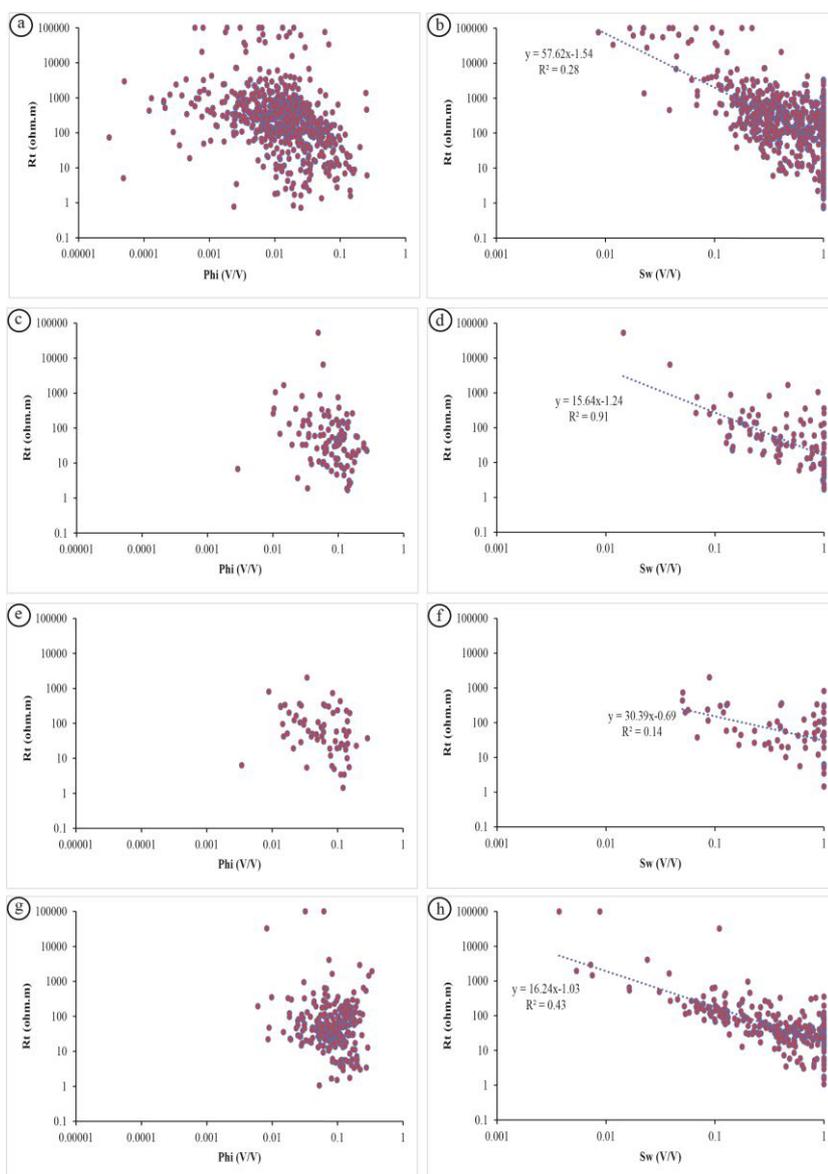
## ۵. بحث

ساختارهای پیچیده منافذ و وجود انواع منافذ مختلف منجر به تغییر ویژگی‌هایی نظیر ضریب سیمان‌شدگی، ضریب پیچیدگی، توان اشباع و در نتیجه تغییر میزان اشباع آب می‌شود. همچنین تغییرات در هندسه و ویژگی‌های منافذ مستقیماً بر ویژگی‌های پتروفیزیکی نظیر مقاومت الکتریکی سازند تأثیر می‌گذارند. ارتباط بین ویژگی‌های زمین‌شناسی و ویژگی مخازن به ارزیابی بهتر مخازن و درک پتانسیلی مخزنی کمک خواهد نمود. مقاومت الکتریکی در سنگ‌های کربناته به شدت متغیر بوده و می‌تواند در محدوده وسیعی از مقادیر قرار گیرد.

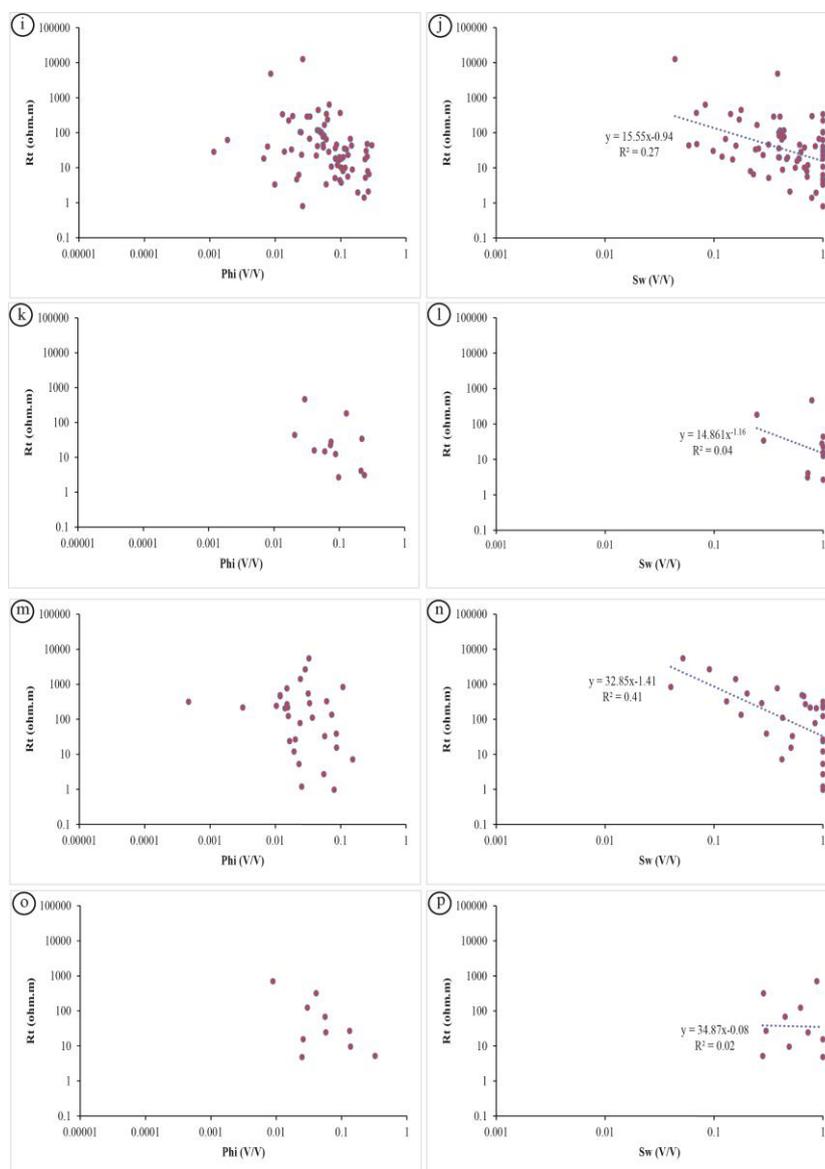
در تخلخل‌های غیرقابل مشاهده یا ریزتخلخل‌ها میزان تخلخل بسیار کم است و فرآیندهایی مانند سیمان‌های انیدریتی و انیدریتی‌های پرکننده منافذ با پر کردن گسترده فضاهای منافذ و بستن گلوگاه منافذ منجر به کاهش تخلخل و در نتیجه کاهش عبور جریان الکتریکی و افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. تراکم نیز باعث تخریب ذرات رسوبی شده و تخلخل را کاهش می‌دهد. تخلخل کم و پیچیدگی فضای منافذ باعث مهار یا کاهش عبور جریان و افزایش مقاومت الکتریکی شده است. دولومیتی‌شدن، نوشکلی و افزایش اندازه بلورهای

تخلخل‌های غیرقابل مشاهده و درون‌دانه‌ای همبستگی بیشتری ( $R^2$  بالاتری) بین کاهش اشباع آب و افزایش مقاومت الکتریکی مشاهده شد (شکل ۶h). سیمان انیدریتی در نمونه‌هایی که دارای تخلخل قالبی غالب دارند، کمتر مشاهده شده است و انحلال در بافت‌های گریستون منجر به افزایش این نوع تخلخل می‌شود (جدول ۲). در نتیجه نمونه‌های دارای تخلخل‌های قالبی دارای تخلخل بالایی هستند که منجر به کاهش مقاومت الکتریکی شده است.

با کاهش تخلخل، مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. در تخلخل‌های قالبی فراوانی مقاومت‌های الکتریکی در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ اهم‌متر بیشتر از سایر تخلخل‌های مورد مطالعه است (شکل ۵). متوسط مقاومت الکتریکی در تخلخل‌های قالبی کمتر از تخلخل‌های غیرقابل مشاهده و درون‌دانه‌ای است (جدول ۳). همانند سایر انواع منافذ قبلی با افزایش مقدار تخلخل مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد (شکل ۶g). با کاهش اشباع آب نیز مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد و نسبت به



شکل ۶. نمودارهای تخلخل و اشباع آب در برابر مقاومت الکتریکی در انواع تخلخل‌های مورد مطالعه. (a, b) تخلخل‌های غیرقابل مشاهده، (c, d) تخلخل‌های بین‌دانه‌ای، (e, f) تخلخل‌های درون‌دانه‌ای، (g, h) تخلخل‌های قالبی



ادامه شکل ۶. نمودارهای تخلخل و اشباع آب در برابر مقاومت الکتریکی در انواع تخلخل‌های مورد مطالعه.  $(i, j)$  تخلخل‌های بین‌بلوری،  $(k, l)$  تخلخل‌های حفره‌ای،  $(m, n)$  تخلخل‌های شکستگی و  $(o, p)$  تخلخل‌های فنسترال

که دارای تخلخل‌های بین‌بلوری غالب هستند کمتر مشاهده شده است. کمترین ضریب پیچایی مربوط به این منافذ است (جدول ۱) و متوسط اشباع آب نیز در این منافذ بیشتر از تخلخل‌های قبلی است (جدول ۳). در این منافذ نیز با افزایش تخلخل و اشباع آب مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد (شکل ۶i و ۶j). کمترین متوسط مقاومت الکتریکی مربوط به تخلخل‌های حفره‌ای است (جدول ۳). تراکم و سیمانی شدن

در تخلخل‌های بین‌بلوری متوسط مقاومت الکتریکی کمتر از تخلخل‌های قبلی است. با اینکه مقدار متوسط تخلخل آزمایشگاهی در نمونه‌های دارای تخلخل‌های بین‌دانه‌ای و بین‌بلوری برابر است اما در تخلخل‌های بین‌بلوری به دلیل دولومیتی شدن فضاهای منفذی و اتصال منافذ بیشتر شده که منجر به کاهش مقاومت الکتریکی و افزایش عبور جریان الکتریکی شده است. سیمان‌های انیدریتی نیز در نمونه‌هایی

دیازنزی افزایشدهنده تخلخل که در توالی مورد مطالعه انحلال و دولومیتی شدن است منجر به کاهش مقاومت الکتریکی شده است (متوسط مقاومت به ترتیب ۲۱.۰۳ اهم متر در تخلخل‌های حفره‌ای و ۳۱.۶۳ اهم متر در بین‌بلوری). فرآیندهای دیازنزی کاهش‌دهنده تخلخل به خصوص سیمان‌های انیدریتی و انیدریت‌های پرکننده منافذ منجر به افزایش مقاومت الکتریکی شده است. تخلخل‌های حفره‌ای و بین‌بلوری مقاومت الکتریکی کمتری نسبت به تخلخل‌های بین‌دانه‌ای و درون‌دانه‌ای دارند (به ترتیب متوسط مقاومت ۴۵.۱۷ اهم متر در بین‌دانه‌ای و ۵۹.۱۴ اهم متر در درون‌دانه‌ای). سیمانی شدن و پر شدن منافذ توسط انیدریت در برخی نمونه‌های دارای تخلخل بین‌دانه‌ای منجر به افزایش مقاومت الکتریکی شده است. گسترش انحلال و افزایش تخلخل در تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای منجر به کاهش مقاومت الکتریکی شده است. تخلخل‌های غیرقابل مشاهده یا ریزتخلخل‌ها به دلیل مقدار بسیار کم تخلخل، مقاومت الکتریکی بالاتری نسبت به سایر تخلخل‌ها دارند. نمونه‌های دارای تخلخل‌های شکستگی نیز به دلیل فراوانی کم و میزان تخلخل پایین که عمدتاً توسط انیدریت پر شده‌اند، مقاومت الکتریکی بالایی دارند. این مطالعه نشان داد که با تلفیق مطالعات زمین‌شناسی و پتروفیزیکی می‌توان به درک دقیق‌تر و عمیق‌تری از مقاومت الکتریکی دست یافت.

## ۷. فهرست نمادها

به ندرت در نمونه‌هایی که دارای تخلخل حفره‌ای هستند مشاهده شد. مقدار تخلخل و اشباع آب در تخلخل‌های حفره‌ای بیشتر از سایر تخلخل‌ها است (جدول ۲ و ۳). افزایش تخلخل و اشباع در این منافذ نیز منجر به کاهش مقاومت الکتریکی شده است (شکل ۶k و ۶l). نمونه‌های دارای تخلخل شکستگی پس از نمونه‌های دارای تخلخل‌های غیرقابل مشاهده بیشترین متوسط مقاومت الکتریکی را دارند (جدول ۳). شکستگی‌ها در سازندهای دالان و کنگان تأثیر قابل توجهی بر افزایش تخلخل ندارند (جدول ۲) همچنین فراوانی و گسترش کمی نیز دارند و عمدتاً توسط انیدریت پر شده‌اند. در صورت گسترش شکستگی‌ها مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. با افزایش تخلخل و اشباع آب همانند سایر تخلخل‌ها مقاومت الکتریکی کاهش می‌شود (شکل ۶m و ۶n). همان‌طور که بیان شد تخلخل‌های شکستگی میزان تخلخل کمتری دارند و عمدتاً توسط سیمان انیدریتی پر شده‌اند، در نتیجه مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به سایر تخلخل‌های قابل مشاهده دارند. تخلخل‌های فنسترال در توالی مورد مطالعه فراوانی بسیار کمی دارند (شکل ۲). در این منافذ نیز با افزایش تخلخل مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد ولی رابطه مشخصی با اشباع آب و مقاومت الکتریکی مشاهده نمی‌شود (شکل ۶o و ۶p). متوسط حسابی مقاومت الکتریکی در نمونه‌های دارای این نوع منافذ پس از تخلخل‌های حفره‌ای کمترین مقدار را دارد (جدول ۳).

## ۶. نتیجه‌گیری

این مطالعه در جهت بررسی و تحلیل تأثیر انواع تخلخل بر مقاومت الکتریکی با در نظر گرفتن فرآیندهای دیازنزی در سازندهای دالان و کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس انجام شد. ضرایب آرچی و اشباع آب برای انواع تخلخل‌های مورد مطالعه تعیین و محاسبه شد. نتایج نشان داد که میزان تخلخل نقش بسیار مهمی در تغییر مقاومت الکتریکی دارد و با افزایش تخلخل و اشباع آب مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. بیشترین و کمترین ضریب همبستگی بین اشباع آب و مقاومت الکتریکی به ترتیب در تخلخل‌های بین‌دانه‌ای با ضریب همبستگی ۰.۹۱ و فنسترال با ضریب همبستگی ۰.۰۲ مشاهده شد. در تخلخل‌های فنسترال رابطه مشخصی بین اشباع آب و مقاومت الکتریکی مشاهده نشد. فرآیندهای

<https://doi.org/10.1007/s13202-023-01714-2>.

[6] Aliakbardoost, E., & Rahimpour-Bonab, H. (2013). Effects of pore geometry and rock properties on water saturation of a carbonate reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 112, 296–309. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.11.018>.

[7] Focke, J., Munn, D. (1987). Cementation exponents in Middle Eastern carbonate reservoirs. *SPE Formation Evaluation*, 2(02), 155–167. <https://doi.org/10.2118/13735-PA>.

[8] Hollis, C., Vahrenkamp, V., Tull, S., Mookerjee, A., Taberner, C., Huang, Y. (2010). Pore system characterisation in heterogeneous carbonates: an alternative approach to widely-used rock-typing methodologies. *Marine and Petroleum Geology*, 27(4), 772–793. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.12.002>.

[9] Bernabe, Y., Mok, U., Evans, B. (2003). Permeability-porosity relationships in rocks subjected to various evolution processes. *Pure and Applied Geophysics*, 160(5), 937–960. <https://doi.org/10.1007/pl00012574>.

[10] Kim, D.C., Manghni, M.H. (1992). Influence of diagenesis on the electrical resistivity and the formation factor of deep-sea carbonate sediments. *Geo-Marine Letters* 12, 14–18. <https://doi.org/10.1007/bf02092103>.

[11] Tavakoli, V. (2021). Permeability's response to dolomitization, clues from Permian–Triassic reservoirs of the central Persian Gulf. *Marine and Petroleum Geology*, 123, 104723. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.10.4723>.

[12] Rezaee, R., Motiei, H., Kazemzadeh, E. (2007). A new method to acquire m exponent and tortuosity factor for microscopically heterogeneous carbonates. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 56(4), 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2006.09.004>.

[13] Nabawy, B. S. (2015). Impacts of the pore- and petro-fabrics on porosity exponent and lithology factor of Archie's equation for carbonate rocks. *Journal of African Earth*

جدول ۴. فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
<b>FRF</b>	-	فاکتور مقاومت سازندی
<b>Ro</b>	<i>ohm.m</i>	مقاومت سنگ کاملاً اشباع از آب شور
<b>Rw</b>	<i>ohm.m</i>	مقاومت آب شور (آب سازندی)
<b>a</b>	-	ضریب پیچایی
$\emptyset$	<i>V/V</i>	تخلخل
<b>m</b>	-	ضریب سیمان‌شدگی
<b>FRI</b>	-	شاخص مقاومت سازندی
<b>Rt</b>	<i>ohm.m</i>	مقاومت واقعی سازند
<b>n</b>	-	توان اشباع
<b>sw</b>	<i>V/V</i>	اشباع آب

## ۸. مراجع

[1] Ahr, W. M. (2008). *Geology of Carbonate Reservoirs: The Identification, Description, and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in Carbonate Rocks*. John Wiley & Sons, 296 pp. <https://doi.org/10.1002/9780470370650>.

[2] Bust, V. K., Oletu, J. U., Worthington, P. F. (2011). The Challenges for Carbonate Petrophysics in Petroleum Resource Estimation. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 14(01), 25–34. <https://doi.org/10.2118/142819-PA>.

[3] Moore, C., Wade, W.J. (2013). *Carbonate Reservoirs: Porosity and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework*, second ed. Elsevier, p. 392.

[4] Fleury, M. (2002). Resistivity in carbonates: new insights. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in San Antonio Texas*. <https://doi.org/10.2118/77719-MS>.

[5] Saadat, K., Rahimpour-Bonab, H., Tavakoli, V., Gholinezhad, J. (2023). Experimental investigation and prediction of saturation exponent in carbonate rocks: the significance of rock-fluid properties. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 14(1), 149–163.

- resistivity in carbonates. AAPG Bulletin, 95(2), 175–190. <https://doi.org/10.1306/06301010047>.
- [21] Bian, H., Guan, J., Mao, Z., Ju, X., Han, G. (2014). Pore structure effect on reservoir electrical properties and well logging evaluation. Applied Geophysics, 11(4), 374–383. <https://doi.org/10.1007/s11770-014-0462-0>.
- [22] Müller-Huber, E., Schön, J., Börner, F. (2015). The effect of a variable pore radius on formation resistivity factor. Journal of Applied Geophysics, 116, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.03.011>.
- [23] Wang, H., Zhang, J. (2019). The effect of various lengths of pores and throats on the formation resistivity factor. Journal of Applied Geophysics, 162, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.01.005>.
- [24] Tian, H., Wang, G. W., Wang, K. W., Feng, Q. f., Wu, H. L., Feng, Z. (2020). Study on the effect of pore structure on resistivity of carbonate reservoirs. Chinese Journal of Geophysics. (In Chinese), 63(11): 4232-4243.
- [25] Al-Husseini, M. I. (2000). Origin of the Arabian plate structures: Amar collision and Najd rift. GeoArabia, 5(4), 527–542. <https://doi.org/10.2113/geoarabia0504527>.
- [26] Insalaco, E., Virgone, A., Courme, B., Gaillot, J., Kamali, M. R., Moallemi, A., Lotfpour, M., Monibi, S. (2006). Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture. GeoArabia, 11(2), 75–176. <https://doi.org/10.2113/geoarabia110275>.
- [27] Pilleveit, A. (1993). Les Blocs Exotiques du Sultanat d'Oman. Evolution paléogéographique d'une marge passive flexurale. Mémoires Geologie Lausanne 17, 249 p.
- [28] Sharland, P. R., Archer, R., Casey, D. M., Davies, R. B., Hall, S. H., Heward, A. P., Horbury, A. D and Simmons, M. D. (2001). Arabian Plate sequence stratigraphy. GeoArabia special publication 2. Gulf Sciences, 108, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.04.014>.
- [14] Nazemi, M., Tavakoli, V., Rahimpour-Bonab, H., Hosseini, M., Sharifi-Yazdi, M. (2018). The effect of carbonate reservoir heterogeneity on Archie's exponents (a and m), an example from Kangan and Dalan gas formations in the central Persian Gulf. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 59, 297–308. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.09.007>.
- [۱۵] غلامی، رضا، توکلی، وحید (۱۴۰۱). مقایسه اشباع آب مغزه با مدل‌های الکتریکی در سازندهای کنگان و دالان بخش مرکزی خلیج فارس، نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هفتم، شماره ۲، ۶۶–۴۷.
- [16] Lucia, F.J. (1995). Rock-Fabric Petrophysical Classification of Carbonate Pore Space for Reservoir Characterization. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 79(9), 1275-1300. <https://doi.org/10.1306/7834d4a4-1721-11d7-8645000102c1865d>.
- [17] Gharechelou, S., Daraei, M., Amini, A. (2016). Pore types distribution and their reservoir properties in the sequence stratigraphic framework: a case study from the Oligo-Miocene Asmari Formation, SW Iran. Arabian Journal of Geosciences, 9(3), 194 art. no. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2141-8>.
- [18] Wang, H. (2019). Determination of pore types in coquinas carbonates and their effects on formation factors and porosity exponents. Geosystem Engineering, 24(1), 31–45. <https://doi.org/10.1080/12269328.2019.1609378>.
- [19] Cerepi, A., Burlot, R., Galaup, S., Barde, J. P., Loisy, C., Humbert, L. (2002). Effects of porous solid structures on the electrical behavior: prediction key of transport properties in sedimentary reservoir rock. In Studies in surface science and catalysis 144:483–490. [https://doi.org/10.1016/s0167-2991\(02\)80171-9](https://doi.org/10.1016/s0167-2991(02)80171-9).
- [20] Verwer, K., Eberli, G. P., Weger, R. J. (2011). Effect of pore structure on electrical

- of porosity in sedimentary carbonates. American Association of petroleum Geologist Bulletin, p. 207-250. <https://doi.org/10.1306/5D25C98B-16C1-11D7-8645000102C1865D>.
- [38] Dunham, R. J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. American Association of Petroleum Geologist Memoir, p. 108-121.
- [39] Flugel, E. (2010). Microfacies of Carbonate Rocks, Analysis, Interpretation and Application. Springer, Berlin, p. 976.
- [40] Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the AIME, 146(54), 54-62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>.
- [41] Esrafil-Dizaji, B., Rahimpour-Bonab, H. (2009). Effects of depositional and diagenetic characteristics on carbonate reservoir quality: a case study from the South Pars gas field in the Persian Gulf. Petroleum Geoscience, 15(4), 325-344. <https://doi.org/10.1144/1354-079309-817>.
- [42] Tavakoli, V., Rahimpour-Bonab, H., Esrafil-Dizaji, B. (2011). Diagenetic controlled reservoir quality of South Pars gas field, an integrated approach. Comptes Rendus Geoscience, 343(1), 55-71. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.10.004>.
- [43] Abdolmaleki, J., Tavakoli, V., Asadi-Eskandar, A. (2016). Sedimentological and diagenetic controls on reservoir properties in the Permian-Triassic successions of Western Persian Gulf, Southern Iran. Journal of Petroleum Science and Engineering, 141, 90-113. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.01.020>.
- [44] Jafarian, A., Javanbakht, M., Koeshidayatullah, A., Pimentel, N., Hersi, O. S., Yahyaei, A., Beigi, M. (2017). Paleoenvironmental, diagenetic, and eustatic controls on the Permo-Triassic carbonate-evaporite reservoir quality, Upper Dalan and Kangan formations, Lavan Gas Field, Zagros Basin. Geological Journal, 53(4), 1442-1457. <https://doi.org/10.1002/gj.2965>.
- [45] Tavakoli, V., Jamalian, A. (2019). Porosity evolution in dolomitized Permian-Triassic strata of the Persian Gulf, insights Petrolink, Bahrain. 371 p.
- [29] Alsharhan, A.S., Nairn, A.E.M. (1997). Sedimentary Basins and Petroleum Geology of the Middle East. Elsevier, Netherlands, pp. 843.
- [30] Ziegler, M, A. (2001). Late Permian to Holocene Paleofacies Evolution of the Arabian Plate and its Hydrocarbon Occurrences. GeoArabia, 6(3), 445-504. <https://doi.org/10.2113/geoarabia0603445>.
- [31] Aali, J., Rahimpour-Bonab, H., Kamali, M.R. (2006). Geochemistry and origin of the world's largest gas field from Persian Gulf, Iran. Journal of Petroleum Science and Engineering, 50, 161-175. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.12.004>.
- [32] Esrafil-Dizaji B., Rahimpour-Bonab H. (2013). A review of Permo-Triassic reservoir rocks in the Zagros area, SW Iran: influence of the Qatar-Fars arch, Journal of Petroleum Geology, 36 (3), 257-279. <https://doi.org/10.1111/jpg.12555>.
- [33] Rahimpour-Bonab, H., Asadi-Eskandar, A., Sonei, R. (2009). Effects of the Permian-Triassic boundary on reservoir characteristics of the South Pars gas field, Persian Gulf. Geological Journal, 44(3), 341-364. <https://doi.org/10.1002/gj.1148>.
- [34] Tavakoli, V. (2015). Chemostratigraphy of the Permian-Triassic Strata of the Offshore Persian Gulf, Iran. Chemostratigraphy: Concepts, Techniques, and Applications 373-393. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-419968-2.00014-5>.
- [35] Kaveh-Ahangar, S., Nozaem, R., & Tavakoli, V. (2022). The effects of planar structures on reservoir quality of Triassic Kangan formation in the central Persian Gulf, an integrated approach. Journal of African Earth Sciences, 197, 104764. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104764>.
- [36] Dickson, J. A. D. (1965). A modified staining technique for carbonate in thin section. Nature, p. 205-587. <https://doi.org/10.1038/205587a0>.
- [37] Choquette, P. W and Pray, L. C. (1970). Geological nomenclature and classification

into the porosity origin of dolomite reservoirs. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 181, 106191. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106191>.

[46] Warren, J. (2000). Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-science Reviews*, 52(1-3), 1-81. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00022-2).

[47] Sibley, D.F., Gregg, J.M. (1987). Classification of dolomite rock textures. *Journal of Sedimentary Research*, 57(6), 967-975. <https://doi.org/10.1306/212F8CBA-2B24-11D7-8648000102C1865D>.

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

[49] Nazemi, M., Tavakoli, V., Rahimpour-Bonab, H., Sharifi-Yazdi, M. (2021). Integrating petrophysical attributes with saturation data in a geological framework, Permian-Triassic reservoirs of the central Persian Gulf. *Journal of African Earth Sciences*, 179, 104203. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104203>.

[50] Nazemi, M., Tavakoli, V., Sharifi-Yazdi, M., Rahimpour-Bonab, H., Hosseini, M. (2019). The impact of micro-to macro-scale geological attributes on Archie's exponents, an example from Permian-Triassic carbonate reservoirs of the central Persian Gulf. *Marine and Petroleum Geology*, 102, 775-785. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.01.040>.