

کنترل رخساره‌های رسوبی بر توزیع تخلخل و تراوایی در سازندهای دالان بالایی و کنگان در یکی از میادین شرق خلیج فارس

ساناز کرمی^۱، وحید توکلی^{۲*} و حمزه مهربانی^۳

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

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

۳- استادیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

نویسنده مسئول: vtavakoli@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۷/۲ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۱۸

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

توالی‌های رسوبی پرمین-تریاس در خلیج فارس میزبان بزرگ‌ترین ذخایر گازی جهان می‌باشند. توزیع خصوصیات مخزنی در این مخازن به میزان چشمگیری تحت کنترل عوامل رسوبی (اولیه) نظیر تغییرات بافتی، سنگ‌شناختی و رخساره‌ای می‌باشد. مطالعه حاضر، با تلفیق داده‌های مختلف پتروگرافی مغزه و مقاطع نازک همراه با داده‌های تخلخل و تراوایی به دست آمده از آنالیز مغزه‌های حفاری در یک چاه از یکی از میادین ناحیه شرقی خلیج فارس، کنترل این عوامل بر توزیع تخلخل و تراوایی در واحدهای مخزنی K1 تا K3 سازندهای دالان بالایی و کنگان را ارزیابی می‌نماید. مطالعات رخساره‌ای منجر به شناسایی تعداد ۱۳ ریزرخساره گردیده که در پنج کمر بند رخساره‌ای قرار می‌گیرند و معرف یک پلاتفرم رسوبی از نوع رمپ هم‌شیب می‌باشند. تحلیل فراوانی بافت‌های رسوبی، تغییرات سنگ‌شناختی و ریزرخساره‌های رسوبی از دیدگاه توزیع داده‌های تخلخل و تراوایی حاکی از ارتباطات زیادی بین آن‌ها است. بخش قابل‌توجهی از این ارتباطات به دلیل حفظ پتانسیل مخزنی رخساره‌ها طی فرآیندهای دیاژنزی بوده و نیز بسیاری از فرآیندهای دیاژنزی رخ داده در این سازندها، به طور مستقیم یا غیرمستقیم تابع خصوصیات بافتی و رخساره‌ای بوده‌اند. سنگ‌های دولومیتی یا دولومیت‌دار و رخساره شول که تشکیل‌دهنده حدود نیمی از توالی‌های مورد مطالعه هستند، بهترین وضعیت مخزنی را نشان می‌دهند. رخساره‌های دانه‌پشتیبان گریستون حاوی آنکوئید، پلوئید و اجزای اسکلتی محیط پشت شول بهترین وضعیت تخلخل را نشان می‌دهند و حفرات بین‌دانه‌ای و قالبی غالب‌ترین نوع منافذ در این رخساره می‌باشد. بالاترین میزان تراوایی مرتبط با رخساره گل‌پشتیبان دولومادستون می‌باشد که حفرات بین‌بلوری، نوع منفذی غالب در آن است.

واژگان کلیدی: کیفیت مخزنی، محیط رسوبی، پرمین-تریاس، دولومیتی‌شدن، رمپ کربناته

۱- پیشگفتار

شکل و جورشدگی ذرات همراه با نسبت دانه به میکرایت از جمله مهم‌ترین خصوصیات ذاتی سنگ‌های کربناته به شمار می‌روند که سایر خصوصیات پتروفیزیکی سنگ نظیر تخلخل و تراوایی به آن‌ها وابسته می‌باشند (آر، ۲۰۰۸). به منظور به دست آوردن درک درستی از توزیع این پارامترها در درون مخازن، می‌بایست ارتباط بین آن‌ها و نقش کنترل‌کننده رخساره‌های رسوبی در توزیع چنین ویژگی‌هایی موردنظر قرار گیرد (فلوگل، ۲۰۱۰).

سازندهای کربناته-تبخیری دالان بالایی (پرمین فوقانی) و کنگان (تریاس زیرین-میانی) و معادل‌های چین‌شناسی آن‌ها در کشورهای همسایه، میزبان بزرگ‌ترین ذخایر گازی در جهان به شمار می‌روند (بوردنیو، ۲۰۰۸). این

کیفیت مخزنی در سنگ‌های کربناته تحت کنترل سه عامل اصلی رخساره، دیاژنز و شکستگی می‌باشد (آر، ۲۰۰۸). از آنجایی که رخساره‌های رسوبی اولین و مهم‌ترین فاکتور کنترل‌کننده پتانسیل مخزنی در بسیاری از مخازن کربناته دنیا و خاورمیانه به شمار می‌روند، لذا پرداختن به کنترل خصوصیات رخساره‌ای بر توزیع پارامترهایی نظیر تخلخل و تراوایی در این مخازن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نوع حفرات موجود در مخازن، توزیع اندازه حفرات و گلوگاه‌های حفرات همگی تحت کنترل خصوصیات بافت و فابریک سنگ می‌باشند (لوسیا، ۲۰۰۷). تغییرات در سنگ‌شناسی و خصوصیات بافتی رخساره‌ها نظیر اندازه،

خلیج فارس در حاشیه شرقی صفحه عربی، میزبان میداین هیدروکربوری فراوانی با سنگ‌شناسی کربناته است که میدان مورد مطالعه از آن جمله می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از عملیات لرزه‌نگاری دریایی در سال ۱۹۵۹ میلادی در خلیج فارس، نشان داد که توالی‌های مورد مطالعه به صورت یک تاقدیس نامتقارن و کم‌ارتفاع بر فراز یک گنبد نمکی در بخش باختری تاقدیس‌های چپر و چارک و با فاصله ۷۰ کیلومتری از بخش خاوری میدان گازی پارس جنوبی جای گرفته است (شکل ۱).

ضخامت توالی‌های رسوبی خوف از ۸۰ متر در طول سپر عربی تا ۸۰۰ متر در خلیج فارس متغیر می‌باشد (زیگلر، ۲۰۰۱). سازندهای دالان و کنگان طی یک پیشروی منطقه‌ای آب دریا بر روی یک رمپ با شیب بسیار کم و تامین رسوبات تخریبی از حاشیه شبه‌جزیره عربی نهشته شده‌اند (اینسالاکو و همکاران، ۲۰۰۶). کمیته چینه‌نگاری ایران در سال ۱۹۷۶، نام گروه دهرم را از روستایی واقع در جنوب غرب کوه سرمه در جنوب ایران انتخاب کرد. گروه دهرم به سه سازند فراقون، دالان و کنگان تقسیم می‌شود (کشفی، ۱۹۹۲). این گروه شامل مخازن گازی پرمین-تریاس است که بیشتر در ایالت زمین‌شناسی فارس و خلیج فارس واقع شده‌اند (رحیم‌پوربناب، ۲۰۰۷).

سازند دالان با ضخامت بیش از ۶۸۰ متر با مرز تدریجی روی سازند فراقون قرار گرفته است و بر اساس سنگ‌شناسی، به سه عضو کربناته پایینی (K5)، تبخیری نار (انیدریت میانی) و کربناته بالایی (K4 و K3) از پایین به بالا تقسیم می‌شوند (غضبان، ۲۰۰۹). سازند کنگان به صورت هم‌شیب بر روی سازند دالان قرار گرفته و در شرایط نسبتاً مشابه با سازند دالان نهشته شده است (اینسالاکو و همکاران، ۲۰۰۶؛ تقی‌زاده موسن و همکاران، ۲۰۲۳). مرز بین دو سازند منطبق بر ناپیوستگی جهانی مرتبط با مرز پرمین-تریاس می‌باشد که معرف بزرگ‌ترین انقراض گروهی موجودات در تاریخ زمین است. سازند کنگان معادل با خوف بالایی است و در خلیج فارس دارای ضخامتی در حدود ۱۹۳ متر می‌باشد. این سازند شامل دو عضو K2 (آهک و دولومیت) و K1 (دولومیت انیدریتی، آهک و دولومیت) همراه با لایه‌های نازک شیل می‌باشد (آلی و همکاران، ۲۰۰۶؛ صوحی و همکاران، ۲۰۲۴).

در میدان مورد مطالعه، واقع در بخش شرقی خلیج فارس، سازند دالان بالایی بر روی سازند فراقون و در زیر سازند

توالی‌ها در جنوب ایران و در خلیج فارس حدود ۱۸ درصد از منابع گازی جهان را به خود اختصاص داده‌اند (کشفی، ۲۰۰۰). عمده مطالعات قبلی که بر روی سازندهای دالان بالایی و کنگان انجام گرفته است متمرکز بر قسمت مرکزی خلیج فارس و در میدان گازی پارس جنوبی بوده و از جنبه‌های مختلف زمین‌شناسی، مخزنی و پتروفیزیکی این سازندها را مورد بررسی قرار داده‌اند (برای مثال رحیم‌پوربناب و همکاران، ۲۰۱۰؛ توکلی و همکاران، ۲۰۱۱؛ مهرابی و همکاران ۲۰۱۶؛ جعفریان و همکاران، ۲۰۱۷؛ توکلی و جمالیان، ۲۰۱۹؛ کاکم و همکاران، ۲۰۲۳؛ سلیمانی و توکلی، ۲۰۲۴).

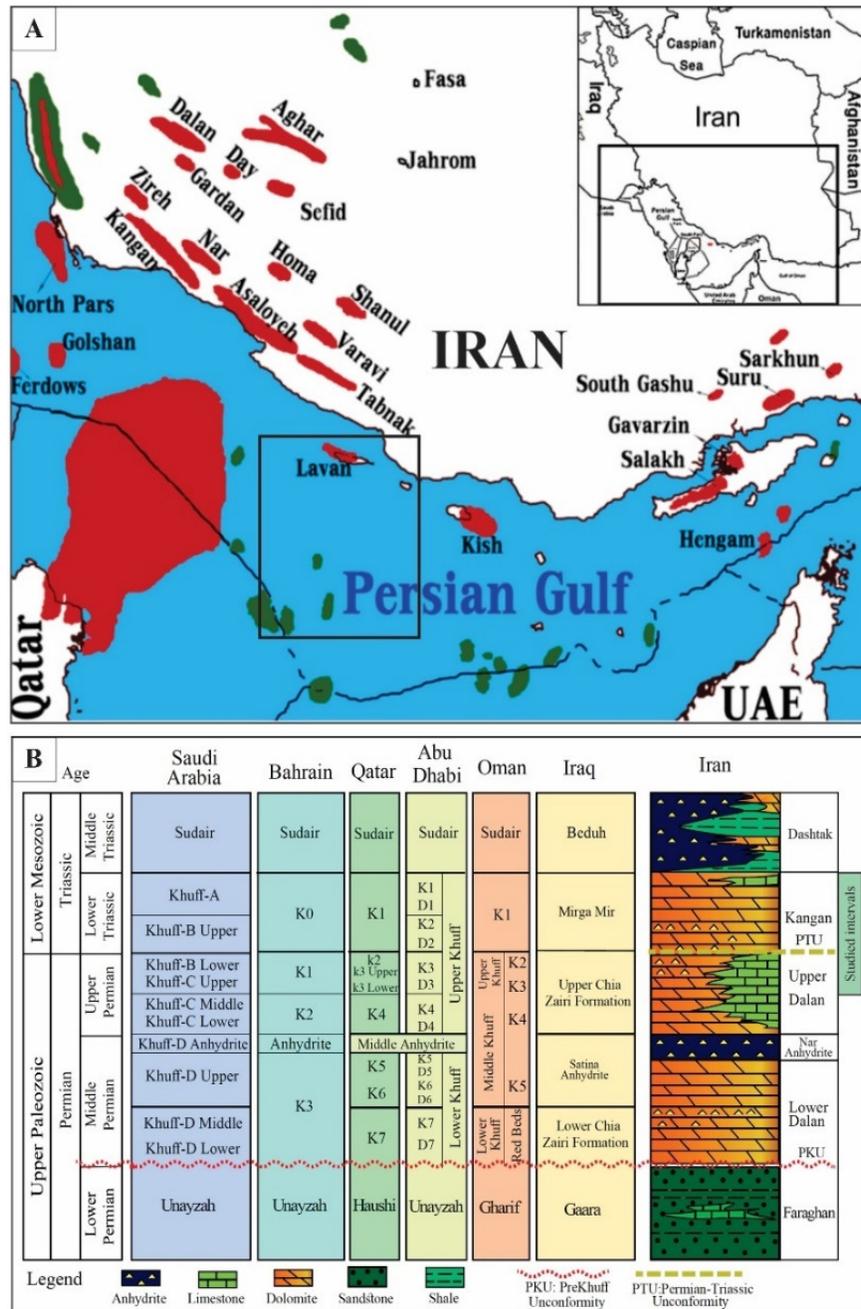
با وجود مطالعاتی که تاکنون انجام شده است، تحقیقات قابل‌ملاحظه‌ای که سازندهای مذکور را در ناحیه شرقی خلیج فارس از دیدگاه کنترل خصوصیات رخساره‌ای بر کیفیت مخزنی مورد بررسی قرار دهد، انجام نگرفته است. این مطالعه با تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، نتایج به دست آمده از مطالعات مغزه و مقاطع میکروسکوپی و تلفیق آن‌ها با داده‌های تخلخل و تراوایی به ارزیابی کنترل خصوصیات رخساره‌ای و تغییرات سنگ‌شناسی بر توزیع تخلخل و تراوایی در مخازن دالان بالایی و کنگان در یکی از میداین شرق خلیج فارس می‌پردازد. نتایج این مطالعه می‌تواند در به دست آوردن درک درستی از خصوصیات مخزنی این توالی‌ها و عوامل کنترل‌کننده آن‌ها در ناحیه شرقی خلیج فارس کمک نماید و به عنوان مبنایی برای مطالعات مخزنی و پتروفیزیکی آینده مورد استفاده قرار گیرد.

۲- زمین‌شناسی و چینه‌شناسی

حوضه رسوبی زاگرس در پی بسته شدن پالئوتتیس در شمال شرق ایران و بازشدن نئوتتیس در جنوب غرب ایران و در امتداد رشته کوه امروزی زاگرس، ایجاد شده است. باز شدن اقیانوس نئوتتیس در انتهای پرمین سبب پیشروی آب دریا در آن زمان شده است. ابتدای این پیشروی با تشکیل حوضه‌های دریایی کم‌عمق و گسترش مناطق بالای جزرومدی همراه بوده است که سبب ته‌نشینی توالی‌های کربناته به همراه تبخیری‌های به سن پرمین میانی تا تریاس پیشین تحت عنوان سازند خوف در سرتاسر خاورمیانه شده است (الشهران، ۲۰۰۶). این واحدها در خلیج فارس و زاگرس، سازندهای دالان (پرمین فوقانی) و کنگان (تریاس زیرین - میانی) نامیده می‌شوند (شکل ۱).

از سازند کنگان با سنگ‌شناسی غالب کربناته (آهک و دولومیت) همراه با میان‌لایه‌های تخییری به عنوان واحدهای مخزنی اصلی شناخته می‌شوند. از دیدگاه چینه‌شناسی، این توالی‌ها را معادل سازند خوف در صفحه عربی در نظر می‌گیرند.

کنگان قرار گرفته است. مرز زیرین این سازند به صورت مشخص و مرز بالایی آن ناپیوسته می‌باشد. بر روی سازند کنگان نیز سازند دشتک قرار گرفته است. در این میدان نیز همانند اغلب میداین خلیج‌فارس، واحدهای مخزنی K3 و K4 از سازند دالان بالایی و واحدهای مخزنی K1 و K2



شکل ۱. A: موقعیت تقریبی میدان مورد مطالعه در شرق خلیج‌فارس. B: ستون چینه‌شناسی سازندهای مورد مطالعه و معادل‌های آن‌ها (توکلی و جمالیان، ۲۰۱۹).

Fig. 1. A: Approximate location of the studied field in the eastern part of the Persian Gulf. B: Stratigraphic column of the studied formations and their equivalents (Tavakoli and Jamalain, 2019).

۳- داده‌ها و روش‌ها

در این مطالعه، به منظور بررسی کنترل رخساره‌های رسوبی بر توزیع پارترهای تخلخل و تراوایی در سازندهای دالان بالایی و کنگان در ناحیه شرقی خلیج فارس، از داده‌های مقاطع نازک میکروسکوپی، مغزه و اطلاعات پتروفیزیکی و همچنین نتایج مطالعات پراش پرتو ایکس یک چاه استفاده شده است. در مطالعه حاضر، واحدهای K1 و K2 از سازند کنگان و واحد K3 از سازند دالان بالایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مغزه‌های این واحد به ضخامت ۲۴۷/۲۵ متر مورد ارزیابی‌های زمین‌شناختی-مخزنی قرار گرفته است. به منظور تعیین خصوصیات مخزنی توالی‌های مورد مطالعه از هر یک متر مغزه تعداد سه پلاگ افقی در امتداد عمود بر محور مغزه و یک پلاگ قائم در امتداد محور مغزه گرفته شده است. تخلخل در نمونه‌های پلاگ تهیه شده با استفاده از قانون بویل و تراوایی آن با استفاده از قانون داری اندازگیری شده است (تیاب و دونالدسون، ۲۰۱۲). از هر نمونه پلاگ یک نمونه مقطع نازک تهیه شده و با میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفته است. در مجموع حدود ۹۶۳ نمونه مقطع نازک مورد مطالعات میکروسکوپی قرار گرفته‌اند. تعداد ۸۴۲ داده تخلخل و ۸۳۶ داده تراوایی نیز جهت ارزیابی‌های مخزنی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه، خصوصیات سنگ‌شناسی، بافت (بر اساس تقسیم‌بندی دانه‌ها، ۱۹۶۲)، رخساره‌های رسوبی و محیط رسوبی (بر اساس مدل‌های استاندارد ویلسون، ۱۹۷۵ و فلوگل، ۲۰۱۰) و انواع فضاهای خالی بر اساس طبقه‌بندی چوکت و پری (۱۹۷۰) تعیین گردیده است. نهایتاً با ترسیم نمودارهای فراوانی و تفسیر کلیه نتایج به دست آمده، تأثیر عوامل مختلف بر خصوصیات مخزنی رخساره‌ها مشخص گردیده است. تحلیل فراوانی سنگ‌شناسی توالی‌های مورد مطالعه بر مبنای مطالعات میکروسکوپی انجام شده است. درصد فراوانی هر نوع سنگ‌شناسی بر مبنای تخمین چشمی تعیین شده است.

۴- نتایج

۴-۱- سنگ‌شناسی

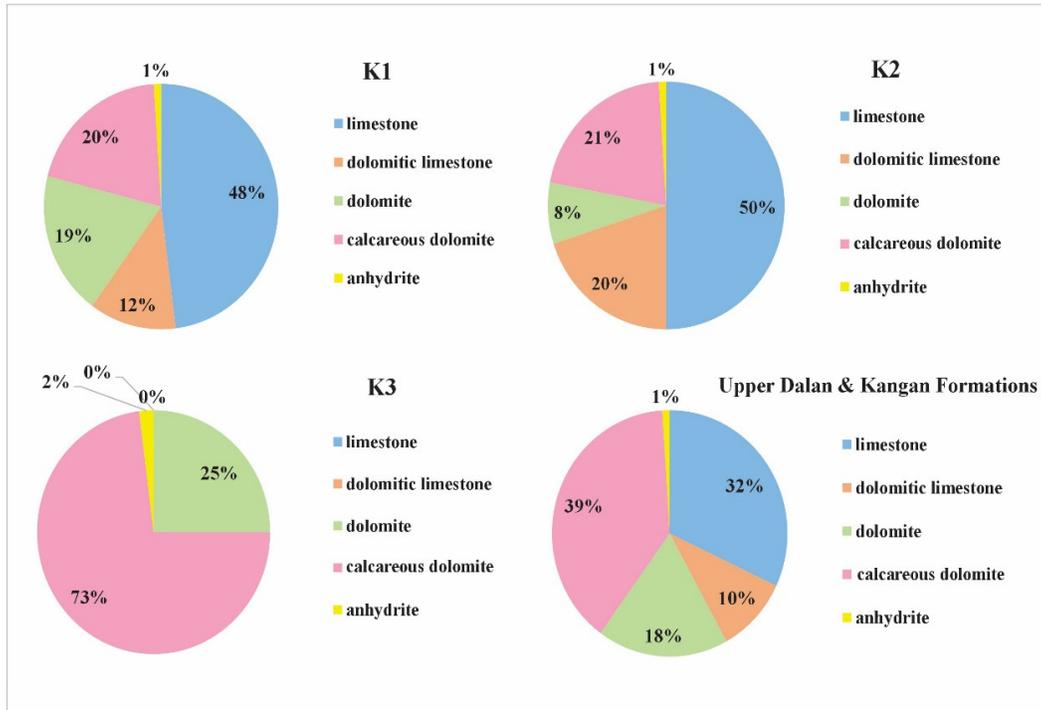
در چاه مورد مطالعه، عضو K3 عمدتاً از دولومیت و آهک دولومیتی تشکیل شده است. سازند کنگان شامل دو عضو K2 (آهک و دولومیت)، K1 (دولومیت انیدریتی، آهک و

دولومیت) و لایه‌های نازک شیل است. سازند دشتک نیز به عنوان پوش‌سنگ این مخزن عمل می‌کند. واحد مخزنی K1 بر اساس سنگ‌شناسی به سه بخش تقسیم می‌شود که شامل واحد دولومیتی در بالا، واحد آهکی در وسط و واحد دولومیتی-انیدریتی در پایین است (شکل ۱). واحد دولومیتی کنگان خود به دو زیر واحد غیرمخزنی در بالا و واحد مخزنی در پایین تقسیم می‌شود. واحد غیرمخزنی عمدتاً از رخساره‌های گل‌پشتیبان تشکیل شده و تناوبی از دولومادستون توده‌ای و لایه‌لایه با گرینستون متوسط تا درشت می‌باشد. اما واحد مخزنی، عمدتاً از رخساره‌های دانه‌پشتیبان با فراوانی پکستون‌هایی که از تخلخل و تراوایی خوبی برخوردار است، تشکیل شده است.

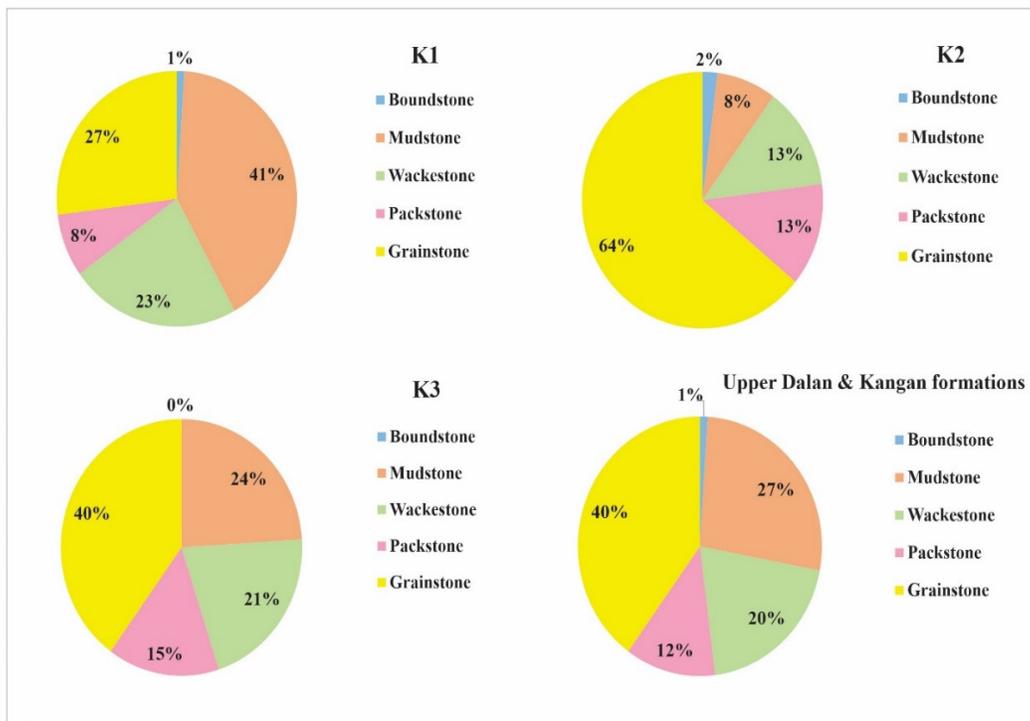
تحلیل فراوانی سنگ‌شناسی: جهت بررسی فراوانی انواع سنگ‌شناسی‌ها در توالی‌های دالان بالایی و کنگان، نمودارهای دایره‌ای با استفاده از نتایج حاصل از مطالعات مقاطع نازک، ترسیم شده است که بر اساس آن‌ها سنگ‌های دولومیتی یا دولومیت‌دار حدود نیمی از توالی‌های مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند. در واحدهای مخزنی K1 و K2 سازند کنگان، سنگ‌های آهکی و دولومیت‌های حاوی آهک به ترتیب دارای بیشترین فراوانی هستند. همچنین در واحد مخزنی K3 سازند دالان بالایی، فراوان‌ترین سنگ‌شناسی به ترتیب مربوط به سنگ‌های دولومیتی حاوی آهک و دولومیت می‌باشد (شکل ۲).

۴-۲- بافت رسوبی

بر اساس مطالعات صورت گرفته، سازندهای دالان بالایی و کنگان از پنج بافت رسوبی باندستون، مادستون، وکستون، پکستون و گرینستون تشکیل شده‌اند. با توجه به نمودارهای ترسیم شده به منظور بررسی فراوانی بافت‌های رسوبی در توالی‌های مورد مطالعه، بافت دانه‌پشتیبان گرینستون دارای بیشترین فراوانی در تمامی توالی دالان بالایی و کنگان می‌باشد. در واحد مخزنی K1 سازند کنگان، بافت گل‌پشتیبان مادستون و در واحد مخزنی K2 سازند کنگان، بافت دانه‌پشتیبان گرینستون دارای فراوانی بیشتری هستند. در واحد مخزنی K3 سازند دالان نیز بافت گرینستون از فراوانی بالاتری برخوردار است. به طور کلی بافت‌های دانه‌پشتیبان پکستون و گرینستون تشکیل‌دهنده حدود نیمی از توالی‌های دالان بالایی و کنگان در چاه مورد مطالعه می‌باشند (شکل ۳).



شکل ۲. نمودارهای فراوانی نسبی سنگ‌شناسی واحدهای مخزنی K1 تا K3 و کل توالی پرمین-تریاس در چاه مورد مطالعه.
 Fig. 2. Relative frequency diagrams of the identified lithologies in the reservoir units of K1 to K3 and the entire Permian-Triassic sequence in the studied well.



شکل ۳. نمودارهای فراوانی نسبی بافت‌های رسوبی واحدهای مخزنی K1 تا K3 و کل توالی پرمین-تریاس در چاه مورد مطالعه.
 Fig. 3. Relative frequency diagrams of the identified sedimentary textures in the reservoir units of K1 to K3 and the entire Permian-Triassic sequence in the studied well.

۳-۴- رخساره‌های رسوبی

در این مطالعه، با استفاده از آنالیزهای پتروگرافی و حذف اثرات دیاژنزی که تغییردهنده بافت و اجزای رسوبی اولیه می‌باشند، اقدام به تعیین رخساره‌های رسوبی در سازندهای دالان بالایی و کنگان شده است. مجموعه شواهد و مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که سازندهای مذکور در میدان مورد مطالعه از تعداد ۱۱ ریزرخساره کربناته (MF) و ۲ رخساره غیرکربناته (انیدریت و رس‌سنگ) تشکیل شده‌اند که در ادامه به معرفی و شرح مختصری از آن‌ها پرداخته می‌شود. تفسیر رخساره‌ها منجر به شناسایی هفت کمر بند رخساره‌ای گردیده که شامل کمر بند رخساره‌ای بالای پهنه جزرومدی، کمر بند رخساره‌ای بین جزرومدی، لاگون، بخش رو به ساحل پشته‌های زیرآبی، بخش مرکزی پشته‌های زیرآبی، بخش رو به دریای پشته‌های زیرآبی و دریای باز می‌باشند (جدول ۱).

۳-۴-۱- کمر بند رخساره‌ای پهنه جزرومدی

انیدریت (MF1): بلورهای انیدریت در زیر میکروسکوپ با اشکال متنوعی از جمله سوزنی، تیغه‌ای و هم‌بعد دیده می‌شوند. در مواردی نیز ممکن است انیدریت‌ها به صورت فیبری، فیبری شعاعی، پویکیلوتوپیک (دربرگیرنده) و آفائیتیک باشند. آرایش بلورهای انیدریت عمدتاً به صورت نامنظم و فاقد جهت‌یافتگی خاصی می‌باشد نظیر انیدریت‌های لانه پرنده‌ای و توده‌ای، در مواردی نیز بلورها به صورت منظم و موازی قرار می‌گیرند که انیدریت‌های لایه‌لایه را تشکیل می‌دهند. همچنین از نظر محتوای کربناته زیستی و غیرزیستی، هیچ‌گونه آلوکم کربناته‌ای در این رخساره دیده نمی‌شود. در این ریزرخساره، فضاهای خالی قابل توجه‌ای نیز مشاهده نمی‌شود.

تفسیر: در شورابه‌های محیط‌های سابخایی به علت ایجاد شرایط فوق‌اشباع، محلول‌های غنی از سولفات در ابتدا به صورت ژیبس اولیه نهشته شده و سپس در مراحل بعدی به انیدریت تبدیل می‌گردند (سرگ، ۲۰۰۱). به طور کلی، این رخساره به صورت متناوب همراه با رخساره‌های مادستونی، دولومادستونی و استروماتولیتی حوالی پهنه بین جزرومدی و گاهی در کنار لاگون فوق‌اشباع قابل مشاهده است و اغلب در سابخاهای گرم و خشک و محیط بالای پهنه جزرومدی تشکیل می‌شود (شکل ۵). اینسالاکو و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعه‌ای که بر روی عضو دالان

بالایی و سازند کنگان بخش زاگرس تا فارس ساحلی انجام داده‌اند، تجمعات انیدریتی با اشکال مختلف را شناسایی کرده‌اند که فاقد ساختارهای رسوبی بوده و اندازه آن‌ها از میکرومتر، تا میلی‌متر و سانتی‌متر متغیر است و به طور کلی دارای خصوصیات مشابه با این رخساره می‌باشند. این رخساره، که کم‌عمق‌ترین رخساره شناسایی شده (از نظر محیط تشکیل) در توالی‌های پرمین-تریاس مورد مطالعه است (اینسالاکو و همکاران، ۲۰۰۶؛ کرر و همکاران، ۲۰۱۰)، فراوانی اندکی دارد و بیشتر در بخش‌های پایینی واحد K3 سازند دالان بالایی مشاهده می‌شود و در سازند کنگان توسعه چندانی ندارد.

رس‌سنگ (MF2): این رخساره در مطالعات میکروسکوپی به صورت یک مادستون آواری فاقد اجزای اسکلتی و غیراسکلتی و بدون ساختمان رسوبی قابل توجه دیده می‌شود (شکل ۵). نتایج مطالعات پراش پرتو ایکس در این رخساره حاکی از فراوانی قابل توجه کانی‌های رسی (به ویژه ایلیت و کائولینیت) می‌باشد (شکل ۴). از این‌رو، رخساره مذکور تحت عنوان رس‌سنگ در نظر گرفته شد. این رخساره در بخش‌های بالایی واحد مخزنی K1 سازند کنگان قابل شناسایی است و به طور کلی به صورت چند میان‌لایه بوده و حجم بسیار ناچیزی از کل توالی مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد. از نظر کیفیت مخزنی نیز فاقد هر گونه کیفیت مخزنی می‌باشد و حتی می‌تواند به عنوان پوش‌سنگ برای واحدهای زیرین در نظر گرفته شود.

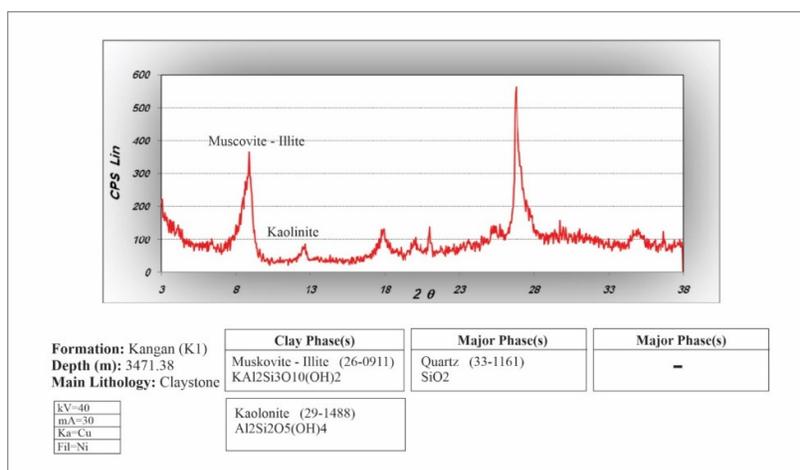
تفسیر: به علت عدم وجود میکروفسیل و همراهی با رخساره‌های بسیار کم‌عمق مانند رخساره‌های گلی و لایه‌های تبخیری، منطقه بالای پهنه جزرومدی به عنوان محیط نهشت این رخساره در نظر گرفته می‌شود.

مادستون حاوی تبخیری (MF3): از نظر سنگ‌شناسی، این رخساره شامل مادستون همراه با دولومیت‌های اولیه ریزبلور، آهک، گرهک‌ها و بلورهای پراکنده انیدریت و ژیبس است (شکل ۵). فابریک فنسترال پر شده با انیدریت از دیگر ویژگی‌های این رخساره است که در مواردی نیز به صورت فضاهای خالی اولیه فنسترال دیده می‌شود. این رخساره در تمام واحدهای مخزنی وجود دارد ولی بیشترین گسترش آن در واحد K1 سازند کنگان می‌باشد و معمولاً همراه با سایر رخساره‌های پهنه بین جزرومدی و بالای جزرومدی دیده می‌شود. به علت گسترش زیاد تبخیری‌ها در این ریزرخساره، کیفیت مخزنی آن به شدت کاهش

حاوی گرهک‌های بزرگ انیدریتی و تیغه‌های ژپیس می‌باشد. همچنین همه‌ی گرهک‌های انیدریتی نیز مربوط به پهنه جزرومدی نیستند و امکان تشکیل آن‌ها در حین دیاژنز تدفینی نیز وجود دارد (وارن و کندال، ۱۹۸۵؛ وارن، ۲۰۰۶). مطالعات عنایتی بیدگلی (۲۰۱۶) در توالی‌های دالان بالایی و کنگان در مرکز و شرق خلیج فارس نشان می‌دهد که در توالی‌های مورد مطالعه این رخساره دارای مقدار بسیار اندکی آلوکم و حفرات فنسترال پر شده توسط انیدریت یا سیمان‌هایی از قبیل دولومیت زین‌اسبی می‌باشد.

یافته است و میانگین تخلخل و تراوایی به ترتیب برابر با ۵/۴۶٪ و ۵/۵۴ میلی‌داری می‌باشد.

تفسیر: تشکیل دولومیت‌های اولیه ریزبلور و گرهک‌ها و بلورهای پراکنده انیدریت و ژپیس نشان‌دهنده تشکیل در محیط‌های کم‌انرژی با شوری بالا در اقلیم گرم و خشک بخش بالای پهنه بین جزرومدی تا فوق جزرومدی می‌باشد (فلوگل، ۲۰۱۰). به علت غلبه اقلیم گرم و خشک و محدودیت گردش آب در حوضه، شرایط فوق‌اشباع از سولفات‌ها ایجاد شده که موجب تشکیل تبخیری‌ها و عدم امکان زیست موجودات پرسلولی مختلف شده است. به همین سبب، این ریزرخساره فاقد موجودات خاصی بوده و



شکل ۴. نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس رخساره رس‌سنگ در سازند کنگان که نشان‌دهنده وجود مقادیر بالای کانی‌های رسی می‌باشد.

Fig. 5. Results of X-ray diffraction analysis of the claystone facies in the Kangan Formation, indicating the presence of high amounts of clay minerals.

جزرومدی، می‌توان انتظار تشکیل آن را در شرایط کم‌انرژی داشت. رخساره‌های دولومادستونی پهنه‌های بالای جزرومدی از سایر نواحی زاگرس و خلیج فارس نیز در سازندهای دالان بالایی و کنگان گزارش شده‌اند (کریمی و همکاران، ۲۰۱۵؛ علی‌پور و همکاران، ۲۰۲۱).

باندستون استروماتولیتی و ترومبولیتی (MF5): این رخساره از نظر سنگ‌شناسی، شامل نهشته‌های دولومیتی-آهکی و در برخی موارد، حاوی انیدریت است. در سازندهای مورد مطالعه باندستون استروماتولیتی شامل لایه‌بندی ظریف همراه با لایه‌های نازک جلبکی و تبخیری‌ها می‌باشد که کاملاً دولومیتی‌شده و در مواردی با پلویید و فضا‌های خالی فنسترال پر شده با انیدریت همراه است (شکل ۵).

دولومادستون (MF4): این رخساره از نظر سنگ‌شناسی یک دولومیت ریزبلور است که به صورت کاملاً همگن، توده‌ای و فاقد هرگونه لایه‌بندی می‌باشد. از دیگر مشخصات آن بافت مادستونی و نبود بقایای فسیلی است (شکل ۵). در این رخساره آثار استیلولیتی شدن، دولومیتی شدن دانه شکری، سیمان‌های انیدریتی و فضا‌های خالی بین‌بلوری مشاهده می‌شود. این رخساره تقریباً در تمام واحد K3 سازند دالان و بخش‌های بالایی و قاعده واحد K1 سازند کنگان دیده می‌شود و میانگین تخلخل و تراوایی در آن به ترتیب برابر با ۱۰/۸۳ درصد و ۴۷/۲۱ میلی‌داری می‌باشد. تفسیر: رخساره دولومادستون از شاخصه‌های مهم پهنه بالای جزرومدی در سازندهای دالان بالایی و کنگان به شمار می‌رود. با توجه به شواهد بافتی و رسوب‌شناسی نظیر بافت گل‌پشتیبان و همراهی با رخساره‌های پهنه بین و بالای

گاستروپود، جلبک‌های سبز و فرامینفرهای کوچک بنتیک از قبیل *Earlandia sp.* و *Hemigordius sp.* هستند که در یک زمینه گل‌پشتیبان قرار دارند. به علت فعالیت میکروبی و میکرایتی شدن توسط جلبک‌های سبز، آلوکم‌ها به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و اکثر ذرات به طور کامل میکرایتی شده‌اند (شکل ۵). سیمان انیدریتی غالب‌ترین نوع سیمان است و آثار فشرده‌گی، رگچه‌های انحلالی، استیلولیتی شدن، زیست‌آشفته‌گی، نوشکلی و دولومیت‌های دانه شکری نیز در آن‌ها قابل مشاهده است. فضاهای خالی قابل ملاحظه‌ای ندارند و گاهاً حفراتی به صورت غیرمرتبط و پراکنده در زمینه دیده می‌شوند که می‌توانند در نتیجه‌ی انحلال پلوییدها یا شسته شدن میکرایت ایجاد شده باشند. در مواردی سیمان انیدریت ثانویه در آن‌ها گسترش پیدا می‌کند و به حدی می‌رسد که به طور کامل جانشین ذرات و ماتریکس سنگ می‌شود. به طور کلی به علت بافت گل‌پشتیبان و جانشینی شدید سیمان انیدریتی، این رخساره کیفیت مخزنی ضعیفی دارد. بیشترین گسترش آن در واحد مخزنی K1 بوده و در واحد K3 به صورت محدود مشاهده می‌شود. میانگین تخلخل و تراوایی نیز به ترتیب برابر با ۴/۷ درصد و ۱/۷۴ میلی‌داری می‌باشد.

تفسیر: بافت رسوبی گل‌پشتیبان حاکی از ته‌نشست این رخساره در زیرمحیط‌های کم‌انرژی می‌باشد (دانهام، ۱۹۶۲). حضور فرامینفرهای بنتیک به همراه جلبک‌های سبز و گاستروپودا نشان‌دهنده ته‌نشست در یک محیط کم‌عمق می‌باشند (فلوگل، ۲۰۱۰). فراوانی پلوییدها و وجود آثار زیست‌آشفته‌گی در کنار موارد فوق و نیز همراهی با رخساره‌های کم‌عمق پهنه جزرومدی حاکی از تشکیل این رخساره در زیرمحیط لاگون می‌باشد.

۴-۳-۲- کمربند رخساره‌ای لاگون
مادستون تا وکستون حاوی اجزای اسکلتی و پلوییدی (MF7): سنگ‌شناسی این رخساره سنگ‌آهک می‌باشد که در بعضی از قسمت‌ها دولومیتی شده است. بافت آن از وکستون تا پکستون متغیر بوده، اما غالباً یک وکستون دانه‌پشتیبان می‌باشد. اجزای اسکلتی از جمله فرامینفرهای بنتیک، گاستروپود، استراکود، جلبک سبز، دوکفه‌ای و اجزای غیرزیستی از قبیل پلویید و اینتراکلت از آلوکم‌های این رخساره هستند (شکل ۵). آثار فشرده‌گی و استیلولیتی شدن، انحلال، نوشکلی، دولومیتی شدن، سیمان‌های انیدریتی و پرکننده در این رخساره قابل مشاهده است. فضاهای خالی موجود بیشتر شامل

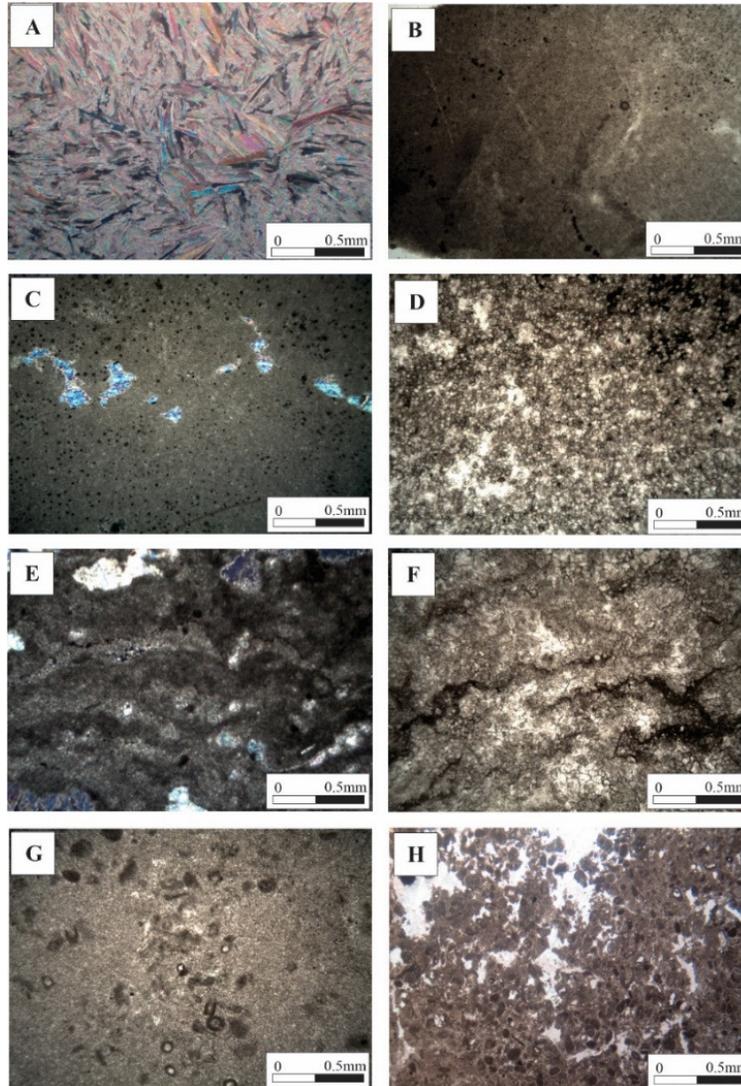
باندستون استروماتولیتی در توالی‌های مورد مطالعه عمدتاً به صورت ساختمان‌های لایه‌ای نسبتاً منظم می‌باشد. هر چند این رخساره فاقد آلوکم‌های مشخص است اما در برخی موارد آلوکم‌هایی مانند ایید و خرده‌های اسکلتی در اثر امواج توفانی یا جزرومد به پهنه بین جزرومدی حمل شده‌اند. آثار فشرده‌گی مکانیکی، استیلولیتی شدن، ترک‌های گلی، سیمان کلسیتی و نوشکلی نیز در این رخساره دیده می‌شود. معمولاً لایه‌بندی‌ها، شاخص نمونه‌های استروماتولیتی هستند، در حالی که انواع ترومبولیتی فاقد لایه‌بندی‌های ظریف بوده و در مقیاس میکروسکوپی بافت اصلی آن‌ها فابریک لخته شده است که از توده‌های میکرایتی مجزا و تیره رنگ تشکیل شده است (شکل ۵). میانگین تخلخل و تراوایی به ترتیب برابر با ۴/۲۶٪ و ۱/۶۵ میلی‌داری می‌باشد. بنابراین بخش زیادی از این رخساره در بخش غیرمخزنی قرار می‌گیرد. همچنین یک رخساره کلیدی برای شناسایی گذر رسوبات پرمین بالایی به تریاس پایینی به ویژه در ابتدای سازند کنگان می‌باشد و در واحدهای مخزنی K1 و K2 گسترش دارد.

تفسیر: رخساره‌های استروماتولیتی-ترومبولیتی حاصل به تله‌افتادن و به هم‌چسبیدن رسوبات و همچنین نهشت آهک توسط مجموعه‌های زیستی جلبکی هستند که توسط سیانوباکتری‌های آهک‌ساز تولید می‌شوند. با توجه به همراهی این رخساره با رخساره‌های محیط بالای جزرومدی، وجود ترک‌های گلی و فابریک فنسترال، استرومالیت و ترومبولیت را عوارض شاخص محیط‌های بین جزرومدی در نظر می‌گیرند. فراوانی رخساره‌های میکروبی در سازند کنگان، از سازند دالان بیشتر است، که ناشی از رخداد انقراض پایان پرمین در حوالی مرز سازندهای دالان و کنگان می‌باشد. این رخساره در طول پیشروی آب دریا با نرخ رسوب‌گذاری کم یا عدم رسوب‌گذاری در یک محیط کم‌انرژی گسترش می‌یابد (مانچینی و همکاران، ۲۰۰۴).

۴-۳-۱- کمربند رخساره‌ای لاگون
مادستون تا وکستون حاوی اجزای اسکلتی و پلوییدی (MF6): این رخساره از نظر سنگ‌شناسی نهشته‌های آهکی و دولومیتی بوده که در محیط نیمه بسته و کم‌انرژی لاگون نهشته شده است. آلوکم‌های سازنده در این رخساره اغلب شامل پلت، پلویید و بایوکلت‌هایی نظیر دوکفه‌ای،

نسبتاً بالایی برخوردار است. همچنین میانگین تخلخل و تراوایی در آن به ترتیب برابر با ۷/۶۷٪ و ۱۴/۶۰ میلی‌داری می‌باشد.

بین‌بلوری، درون‌دانه‌ای و قالبی است و معمولاً آثاری از زیست‌آشفستگی نیز نشان می‌دهد. این رخساره از رخساره‌های فراوان در توالی‌های مورد مطالعه می‌باشد که در تمام واحدهای مخزنی وجود دارد و از کیفیت مخزنی



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی از رخساره‌های مختلف مرتبط با محیط‌های رسوبی پهنه جزرومدی و لاگون. A: رخساره انیدریت (MF1) با بافت تیغه‌ای، عمق ۳۶۷۶ متر، XPL. B: رخساره رس‌سنگ (MF2)، عمق ۳۴۷۱/۲۸ متر، PPL. C: رخساره مادستون حاوی تیخیری (MF3) دارای ساخت فنسترال پر شده با انیدریت ثانویه، عمق ۳۶۳۰/۸۴ متر، XPL. D: رخساره دولومادستون (MF4) به همراه رشد دولومیت‌های ثانویه در زمینه دولومادستونی، عمق ۳۴۵۷/۵۰ متر، PPL. E و F: رخساره باندستون استروماتولیتی و ترومبولیتی (MF5)، E: باندستون استروماتولیتی دارای رشته‌های جلبکی، لایه‌بندی موجی و ساخت فنسترال پر شده با انیدریت ثانویه، عمق ۳۵۶۲/۷۵ متر، XPL و F: باندستون ترومبولیتی با فابریک لخته‌ای به همراه سیمان‌های کلسیتی پراکنده، عمق ۳۶۱۱/۲۰ متر، PPL. G: رخساره مادستون تا وکستون حاوی خرده‌های اسکلتی و پلوییدی (MF6) حاوی قطعات اسکلتی، پلویید و زیست‌آشفستگی که نشان‌دهنده حاکمیت شرایط آرام آب اکسیژن‌دار در بستر است، عمق ۳۶۳۳/۵۳ متر، PPL. H: رخساره وکستون تا پکستون حاوی خرده‌های اسکلتی و پلویید (MF7)، عمق ۳۶۴۶/۰۳ متر، PPL.

Fig. 4. Microscopic images of various facies related to the sedimentary environments of the intertidal zone and lagoon. A: Anhydrite facies (MF1) with bladed texture, depth 3676.79 m, XPL. B: Claystone facies (MF2), depth 3471.28 m, PPL. C: Mudstone facies with evaporites (MF3) with fenestral fabric filled with secondary anhydrite, depth 3630.84 m, XPL. D: Dolomudstone facies (MF4) with secondary dolomite growth in a dolomudstone matrix, depth 3457.50 m, PPL. E and F: Stromatolite and thrombolite boundstone facies (MF5), E: Stromatolite boundstone with algal filaments, wavy lamination, and fenestral fabric filled with secondary anhydrite, depth 3563.75 m, XPL. F: Thrombolite boundstone with clotted fabric and patchy calcite cement, depth 3611.20 m, PPL. G: Peloid skeletal mudstone to wackestone facies (MF6) with skeletal fragments, peloids, and bioturbation, indicating calm, oxygenated water conditions on the sea floor, depth 3633.53 m, PPL. H: Peloid skeletal wackestone to packstone facies (MF7), depth 3646.03 m, PPL.

لاگون و در مجاورت حاشیه پلاتفرم نهشته شده‌اند (هالوک و گلن، ۱۹۸۶). به دلیل قرار گرفتن در پشت شول‌ها، انرژی محیط به نسبت کم می‌باشد، در نتیجه بیشتر آلوکم‌ها یا به طور کامل میکرایتی شده‌اند و یا دارای پوشش میکرایتی هستند (تاگر و رایت، ۱۹۹۰). پلوییدها ممکن است در نتیجه خردشدگی مادستون‌های لاگونی یا میکرایتی شدن آلیدها تشکیل شده باشند؛ بنابراین در این شرایط تمایز آن‌ها از آلیدها آسان نخواهد بود. این رخساره به همراه رخساره‌های لاگون و شول‌های آلییدی دیده می‌شود.

گرینستون حاوی آنکوئید، پلویید و اجزای اسکلتی (MF9): این ریزرخساره دارای بافت دانه‌پشتیبان گرینستونی بوده و آلوکم‌های غیرزیستی آن شامل پلویید، آنکوئید، آلیید و اینتراکلت است و بایوکلت‌هایی نظیر استراکود، گاستروپود، دوکفه‌ای، جلبک سبز، اکینودرم و فرامینیفرهای بنتیک در مقاطع آن دیده می‌شود. اکثر آلوکم‌ها دارای پوشش میکرایتی هستند یا کاملاً میکرایتی شده‌اند (شکل ۶). فضاهای خالی بیشتر قالبی، درون‌دانه‌ای و بین‌دانه‌ای می‌باشد. وجود سیمان حاشیه‌ای هم‌ضخامت در اطراف آلیدها نشان‌دهنده تشکیل آن‌ها در محیط کاملاً دریایی است. آثار فشردگی، انحلال، دولومیت‌های دانه شکر و ریزشکستگی‌ها در این رخساره قابل مشاهده است. همچنین دولومیتی‌شدن باعث افزایش کیفیت مخزنی در آن شده است. این رخساره در تمام واحدها وجود دارد و فراوان‌ترین رخساره شناسایی شده در توالی پرمین-تریاس نواحی مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد، اما در سازند دالان بالایی دارای فراوانی بیشتری نسبت به سازند کنگان است. همچنین میانگین تخلخل و تراوایی در آن به ترتیب برابر با ۲۰/۰۷٪ و ۲۸/۹ میلی‌داری می‌باشد.

تفسیر: وجود بافت دانه‌پشتیبان گرینستون حاکی از ته‌نشست این ریزرخساره در زیرمحیط‌های پارانرژی نظیر پشته‌های زیرآبی (شول) می‌باشد. این ریزرخساره مربوط به محیط رسوبی مرتبط با بخش رو به ساحل پشته‌های زیرآبی است که تنوع آلوکم‌ها نشان‌دهنده نهشت این رخساره در مجاورت قسمت مرکزی شول‌های آلییدی-بایوکلتی می‌باشد (فلوگل، ۲۰۱۰). بر اساس مطالعات اینسالاکو و همکارانش (۲۰۰۶) که بر روی توالی‌های دالان بالایی و کنگان بخش زاگرس تا فارس ساحلی صورت گرفته است، این رخساره شناسایی شده که در مقیاس میکروسکوپی توسط سیمان فیبری حاشیه‌ای درشت و

تفسیر: بافت رسوبی گل‌پشتیبان معرف شرایط کم‌انرژی در زمان ته‌نشست این ریزرخساره می‌باشد. وجود آلوکم‌های پلویید و اینتراکلت در یک زمینه میکرایتی نیز نشان‌دهنده نهشت این رخساره در محیط کم‌انرژی می‌باشد. فرامینیفرهای بنتیک، جلبک سبز، گاستروپودا و استراکودا همگی فسیل‌های شاخص زیرمحیط لاگون می‌باشند (فلوگل، ۲۰۱۰).

۳-۳-۴- کمر بند رخساره‌ای پشته‌های زیرآبی (شول): پکستون تا گرینستون حاوی اجزای اسکلتی، پلویید و آلیید (MF8): این ریزرخساره دارای بافت رسوبی دانه‌پشتیبان (پکستون تا گرینستون) می‌باشد. آلوکم‌ها در این رخساره شامل پلویید، اینتراکلت و آلیدهای ریز تا متوسط (حمل شده از بخش‌های اصلی پشته‌های زیرآبی) و همچنین بایوکلت‌هایی نظیر دوکفه‌ای، گاستروپود، اکینودرم، فرامینیفرهای بنتیک و خرده‌های جلبک سبز می‌باشند (شکل ۶). اغلب آلوکم‌ها یا به طور کامل میکرایتی شده‌اند و یا دارای پوشش میکرایتی هستند. در این رخساره توسعه فضاهای خالی بین‌دانه‌ای در نتیجه گسترش سیمان دریایی اتفاق می‌افتد، زیرا از فشردگی شدن دانه‌ها در طی دیاژنز جلوگیری می‌کند؛ بنابراین فضاهای خالی این رخساره اغلب به صورت بین‌دانه‌ای و قالبی حاصل از انحلال آلیدها و بایوکلت‌ها می‌باشد. دولومیتی‌شدن تأثیر زیادی در افزایش تراوایی و به دنبال آن افزایش کیفیت مخزنی در این رخساره داشته است؛ اما گسترش سیمان انیدریتی و گاهی سیمان کلسیتی در برخی نقاط تراوایی را به شدت کاهش داده است. میانگین تخلخل و تراوایی در این رخساره به ترتیب برابر با ۷/۷۰٪ و ۴۱/۰۷ میلی‌داری می‌باشد.

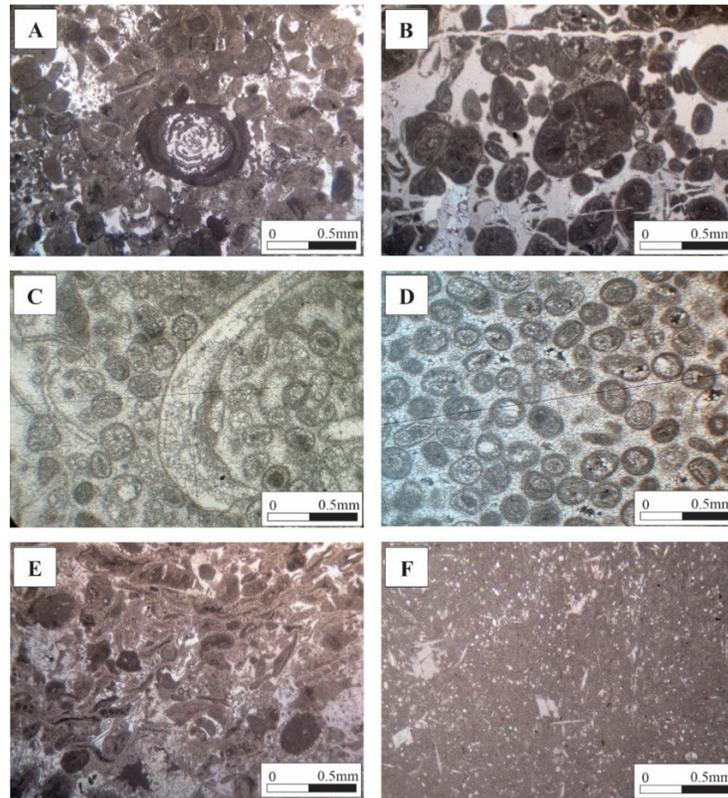
تفسیر: رخساره‌هایی که در قسمت رو به ساحل شول‌های سدی تشکیل می‌شوند معمولاً نشان‌دهنده انرژی متوسط محیط می‌باشند. این رخساره دارای خصوصیات حد واسطی از دو رخساره لاگونی و شولی است، به طوری که نه مانند رخساره لاگونی، گل‌پشتیبان بوده و نه مانند رخساره شولی دارای سیمان‌شدگی (دریایی) گسترده هستند. همچنین مخلوطی از موجودات لاگونی و غیرلاگونی (دریای باز) را نشان می‌دهد (فلوگل، ۲۰۱۰). حضور همزمان بایوکلت‌های دریایی و لاگون همراه با آلیدها نشان‌دهنده این است که رسوبات در قسمت انتهایی

کربنات بالا تشکیل می‌شوند (فلوگل، ۲۰۱۰). همراهی این ریزرخساره با سایر ریزرخساره‌های پراثرژی و دانه‌پشتیبان سازندهای دالان بالایی و کنگان حاکی از نهشت آن در زیرمحیط پشته‌های زیرآبی (شول) می‌باشد. نظیر چنین رخساره‌هایی با فتراوانی بالا از بخش‌های مختلف خلیج فارس و نواحی مجاور در ایران و کشورهای جنوبی حاشیه خلیج فارس نیز گزارش شده‌اند و از دیدگاه مخزنی نیز جزو مهم‌ترین ریزرخساره‌های این توالی‌ها به شمار می‌روند (هاس و آینر، ۲۰۱۳؛ آدام و همکاران، ۲۰۱۸؛ نادری-خوجین و توکلی، ۲۰۲۳).

گرینستون اییدی (MF11): این رخساره دارای سنگ‌شناسی آهکی، دولومیتی و یا دولومیتی آهکی است. ایید، آلوکم اصلی و بایوکلست‌ها حجم بسیار اندکی از آن را تشکیل می‌دهند. ذرات دارای گردشگی و جورشدگی بسیار خوب می‌باشند و معمولاً به علت کانی‌شناسی اولیه ناپایدار (آراگونیت)، ساختار اولیه خود را از دست داده‌اند و تحت تأثیر عوارض دیاژنزی مختلف مانند انحلال، میکرایتی‌شدن، دولومیتی‌شدن و سیمان‌شدگی انیدریتی قرار گرفته‌اند (شکل ۶). همچنین دارای سیمان دریایی هم‌ضخامت و سیمان بلوکی می‌باشد. مهم‌ترین ویژگی این رخساره تخلخل عالی است که به صورت فضاهای خالی بین‌بلوری و قالبی (قالب‌های ایید) مشاهده می‌شود. در این رخساره‌ها دولومیتی‌شدن باعث افزایش کیفیت مخزنی شده، به طوری که کیفیت مخزنی بخش‌هایی که دارای فضاهای خالی قالبی، بین‌بلوری، بین‌دانه‌ای و فضاهای خالی غیرمفید می‌باشند با دولومیتی‌شدن بیشتر افزایش می‌یابد. این رخساره در واحدهای مخزنی K1 و K2 سازند کنگان مشاهده می‌شود و میانگین تخلخل و تراوایی در آن به ترتیب برابر با ۱۴/۶۲٪ و ۲۹/۸۸ میلی‌داری می‌باشد. تفسیر: فراوانی بالای اییدها، بافت بدون گل و جورشدگی خوب در این رخساره نشان‌دهنده شرایط بالای انرژی و رسوب‌گذاری در بالای سطح استهلاک امواج است (تاگر و رایت، ۱۹۹۰؛ فلوگل، ۲۰۱۰؛ اسلوواکیویچ و میکولایفسکی، ۲۰۱۱). عنایتی بیدگلی (۲۰۱۶) نیز این رخساره را در توالی‌های دالان بالایی و کنگان در مرکز و شرق خلیج فارس شناسایی کرده است که به صورت گرینستون‌های اییدی دارای سیمان دریایی هم‌ضخامت دیده می‌شود، اندازه اییدها در حد کالک‌آرنایت بوده و جورشدگی خوبی نشان می‌دهند.

پلوییدهای میکروبی مشخص می‌شود. رخساره‌های شول عمدتاً در اطراف سطح استهلاک امواج (FWWB: Fair-) Weather Wave Base) در بخش‌های درونی پلاتفرم کربناته نهشته می‌شوند (فلوگل، ۲۰۱۰).

گرینستون اییدی حاوی اجزای اسکلتی (MF10): سنگ‌شناسی این رخساره آهک و دولومیت است. در مطالعات میکروسکوپی یک گرینستون حاوی ایید دانه درشت تا متوسط همراه با خرده‌های فسیلی با جورشدگی بسیار خوب و گسترش سیمان دریایی هم‌ضخامت و تیغه‌ای می‌باشد که نشان‌دهنده برتری امواج و جریان‌های پراثرژی در محیط‌های رسوبی مرتبط با پشته‌های کربناته است. در مواردی شورابه‌های دولومیت‌ساز، پوشش‌های میکرایتی را تحت تأثیر قرار داده و گاهی نیز دانه‌های اییدی را به صورت انتخابی دولومیتی کرده است. اجزا فسیلی نظیر جلبک‌های سبز، فرامینیفرهای بنتیک و اکینودرم توسط جریان‌های دریایی از محیط لاگون و حتی دریای باز به محیط پشته‌های کربناته زیرآبی حمل شده‌اند (شکل ۶). فضاهای خالی قالبی، بین‌دانه‌ای و درون‌دانه‌ای مهم‌ترین منافذ آن است. توسعه سیمان دریایی تیغه‌ای در این رخساره از فشردگی دانه‌ها جلوگیری کرده و موجب توسعه فضاهای خالی بین‌دانه‌ای در گرینستون‌ها می‌باشد. در این رخساره حضور سیمان انیدریتی ثانویه و سیمان بلوکی (سیمان کلسیتی جوی) باعث کاهش تراوایی و در نتیجه کاهش کیفیت مخزنی می‌شود. در مواردی دولومیتی‌شدن همراه با فضاهای خالی قالبی باعث افزایش کیفیت مخزنی شده است، اما به دلیل انیدریتی‌شدن و پر شدن فضاهای خالی از سیمان انیدریتی کیفیت مخزنی به شدت کاهش یافته است. به طور کلی از آنجایی که کیفیت مخزنی تحت تأثیر رخساره‌های اولیه می‌باشد، در نتیجه در رخساره‌های مرتبط با شول‌ها انتظار کیفیت مخزنی خوب وجود دارد. این رخساره عمدتاً در واحد K2 و K1 سازند کنگان و به صورت محدود در بخش پایینی واحد K3 سازند دالان مشاهده می‌شود و میانگین تخلخل و تراوایی در آن به ترتیب برابر با ۱۳/۳۱٪ و ۱۰/۵۲ میلی‌داری می‌باشد. تفسیر: وجود بافت دانه‌پشتیبان گرینستون حاکی از ته‌نشست این ریزرخساره در زیرمحیط‌های پراثرژی نظیر پشته‌های زیرآبی (شول) می‌باشد. اییدها به عنوان آلوکم‌های غیراسکلتی رایج در این ریزرخساره معمولاً در زیرمحیط‌های پراثرژی با نرخ گردش سیالات و تأمین



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی از رخساره‌های مختلف مرتبط با محیط‌های رسوبی شول و دریای باز. A: رخساره پکستون تا گرینستون حاوی خرده‌های اسکلتی، پلوئید و ایید (MF8) دارای اجزا اسکلتی، پلوئید، ایید و اینتراکلت، عمق ۳۶۷۷/۴۲ متر، PPL. B: رخساره گرینستون حاوی آنکوئید، پلوئید و خرده‌های اسکلتی (MF9) دارای آنکوئید، ایید، پلوئید، اینتراکلت و خرده‌های اسکلتی که تحت تأثیر شکستگی قرار گرفته‌اند، عمق ۳۴۶۱/۴۲ متر، PPL. C: رخساره گرینستون اییدی حاوی خرده‌های اسکلتی (MF10) که اجزا در حال دولومیتی‌شدن می‌باشند، عمق ۳۴۶۱/۴۲ متر، PPL. D: رخساره گرینستون اییدی (MF11) که اجزا دولومیتی شده‌اند، عمق ۳۴۶۸/۶۲ متر، PPL. E: رخساره پکستون تا گرینستون حاوی اینتراکلت، خرده‌های اسکلتی و پلوئید (MF12) که اجزا میکرایتی شده‌اند، عمق ۳۵۶۱/۷۲ متر، PPL. F: رخساره مادستون/وکستون حاوی خرده‌های اسکلتی (MF13) که در اثر فرآیند فشردگی رگچه انحلالی و استیلولیت تشکیل شده است، عمق ۳۶۶۹/۰۸ متر، PPL.

Fig. 6. Microscopic images of various facies related to the sedimentary environments of the shoal and open marine. A: Ooid peloid skeletal packstone to grainstone facies (MF8) with skeletal, peloidal, ooidal, and intraclast components, depth 3677.42 m, PPL. B: Skeletal peloid oncoid grainstone facies (MF9) featuring oncoids, ooids, peloids, intraclasts, and skeletal fragments that have been affected by fracturing, depth 3594.91 m, PPL. C: Skeletal ooid grainstone facies (MF10) with components undergoing dolomitization, depth 3461.42 m, PPL. D: Ooid grainstone facies (MF11) with dolomitized components, depth 3468.62 m, PPL. E: Peloid skeletal intraclast packstone to grainstone facies (MF12) that are partially micritized, depth 3561.72 m, PPL. F: Skeletal mudstone/wackestone facies (MF13) formed due to compaction processes, dissolution veins, and stylolites, depth 3669.08 m, PPL.

دریا توسعه می‌یابند، در آن به خوبی قابل مشاهده است و دارای سیمان انیدریتی ثانویه می‌باشد. فضاهای خالی بین‌دانه‌ای و قالبی با ارتباط کم از مهم‌ترین منافذ این رخساره است و به طور کلی کیفیت مخزنی آن از ضعیف تا خوب متغیر می‌باشد. این رخساره در واحد K2 و K3 و به میزان کمتر در واحد K1 گسترش دارد و میانگین تخلخل و تراوایی در آن به ترتیب برابر با ۷/۷۸٪ و ۸/۳۵ میلی‌داری می‌باشد.

تفسیر: بافت رسوبی دانه‌پشتیبان همراه با اندازه آلوکم‌ها، وجود موجودات دریایی و تنوع بالای فسیلی نشان‌دهنده رسوب‌گذاری در یک محیط پرانرژی و متصل به دریای آزاد

پکستون تا گرینستون حاوی اینتراکلت و اجزای اسکلتی (MF12): این ریزرخساره به لحاظ بافتی یک گرینستون دانه درشت است که شامل اینتراکلت، قطعات گلی و خرده‌های اسکلتی لاگون می‌باشد (شکل ۶). بلوغ بافتی و گسترش سیمان‌های دریایی به ویژه سیمان حاشیه‌ای هم‌ضخامت نشان‌دهنده رسوب‌گذاری در شرایط پرانرژی با گردش بالای آب است. آلوکم‌های زیستی نظیر جلبک‌سبز، فرامینفر بنتیک، گاستروپود، براکیوپود و اکینودرم به همراه ایید و پلوئید حمل‌شده از پشته‌های زیرآبی کربناته و گاهاً دانه‌های آنکوئید در آن‌ها دیده می‌شود. آثار میکرایتی‌شدن که در زمان آرامش در بستر

شول، فابریک دانه‌پشتیبان و نسبتاً آشفته، این رخساره در قسمت پراثرژی رو به دریای پشته‌های زیرآبی و در مجاورت سطحی پراثرژی مانند سطح استهلاک امواج نهشته شده است (ویلسون، ۱۹۷۵).

است (فلوگل، ۲۰۱۰). این رخساره همراه با رخساره ایید گرینستون‌های محیط شول و در برخی موارد با رخساره‌های مادستونی رمپ میانی نیز دیده می‌شود. با توجه به کمبود موجودات لاگونی، مجاورت با رخساره‌های

جدول ۱. خلاصه‌ای از خصوصیات ریزرخساره‌های شناسایی شده در سازندهای دالان بالایی و کنگان در چاه مورد مطالعه

Table 1. Summary of the characteristics of the identified microfacies in the Upper Dalan and Kangan formations in the studied well

کد رخساره	نام رخساره	سنگ‌شناسی اصلی	آلوکم اصلی		کمر بند رخساره‌ای / زیرمحیط رسوبی
			اسکلتی	غیر اسکلتی	
MF1	اندریت	اندریت	ندارد	ندارد	بالای پهنه جزرومدی
MF2	رس سنگ	رس	ندارد	ندارد	
MF3	مادستون حاوی تبخیری	آهک، دولومیت، اندریت	ندارد	ندارد	
MF4	دولومادستون	آهک، دولومیت	ندارد	ندارد	
MF5	باندستون استروماتولیتی و ترومبولیتی	آهک، دولومیت، اندریت	ندارد	ندارد	پهنه جزرومدی
MF6	مادستون تا وکستون حاوی اجزای اسکلتی و پلوییدی	آهک، دولومیت	دوکفه‌ای، گاستروپود، جلبک سبز، فرامینیفر بنتیک	پلت، پلویید	لاگون
			دوکفه‌ای، گاستروپود، جلبک سبز، فرامینیفر بنتیک، استراکود	پلویید، اینتراکلت	
MF8	پکستون تا گرینستون حاوی اجزای اسکلتی، پلویید و ایید	آهک، دولومیت	دوکفه‌ای، گاستروپود، جلبک سبز، فرامینیفر بنتیک، اکینودرم	پلویید، اینتراکلت، ایید	بخش رو به ساحل پشته‌های زیرآبی
MF9	گرینستون حاوی آنکوئید، پلویید و اجزای اسکلتی	آهک، دولومیت	دوکفه‌ای، گاستروپود، جلبک سبز، فرامینیفر بنتیک، اکینودرم	پلویید، اینتراکلت، ایید، آنکوئید	
MF10	گرینستون اییدی حاوی اجزای اسکلتی	آهک، دولومیت	جلبک سبز، اکینودرم، فرامینیفر بنتیک	ایید	بخش مرکزی پشته‌های زیرآبی (شول)
MF11	گرینستون اییدی	آهک، دولومیت	ندارد	ایید	
MF12	پکستون تا گرینستون حاوی اینتراکلت و اجزای اسکلتی	آهک، دولومیت	گاستروپود، جلبک سبز، فرامینیفر بنتیک، اکینودرم، براکیوپود	پلویید، ایید، آنکوئید	بخش رو به دریای پشته‌های زیرآبی
MF13	مادستون / وکستون حاوی اجزای اسکلتی	آهک، دولومیت	فرامینیفر بنتیک، اسپیکول اسفنج، کراینویید، استراکود	اینتراکلت	دریای باز

بنتیک کوچک می‌باشد (شکل ۶). از دیگر ویژگی‌های این بخش می‌توان به فشردگی، انحلال و استیلولیتی شدن اشاره کرد. در این رخساره تا حدودی فضاهای خالی قالبی قابل مشاهده است ولی از نظر کیفیت مخزنی ضعیف ارزیابی می‌گردد. همچنین میانگین تخلخل و تراوایی به ترتیب برابر با ۴/۹۶ درصد و ۱/۰۶ میلی‌داری می‌باشد.

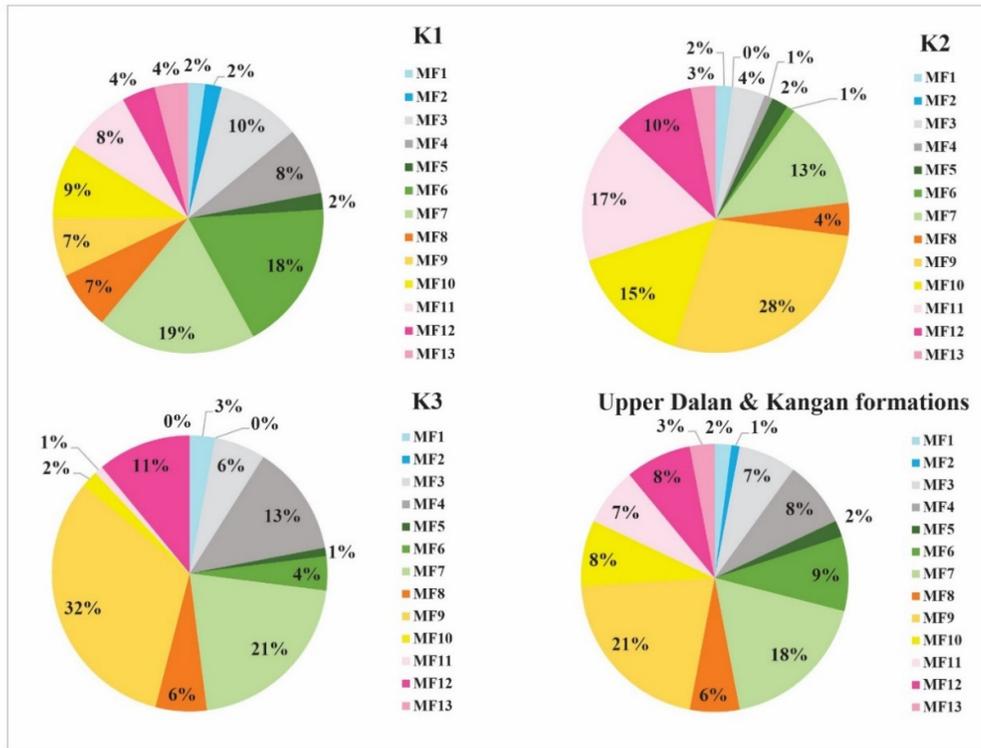
۴-۳-۴- کمر بند رخساره‌های دریای باز

مادستون / وکستون حاوی خرده‌های اسکلتی (MF13):

این رخساره شامل مادستون تا وکستون آهکی و گاهی آهکی دولومیتی همراه با لایه‌بندی ظریف، آثار زیست‌آشفستگی و خرده‌های اسکلتی دانه ریز کراینویید، استراکود، سوزن اسفنج و به مقدار ناچیزی فرامینیفرهای

(۲۰۱۸) نیز در مطالعاتی که بر روی توالی‌های دالان بالایی و کنگان بخش مرکزی خلیج فارس انجام داده است این رخساره را شناسایی نموده که از ویژگی‌های بارز آن سنگ‌شناسی آهکی رسوبات و آثار زیست‌آشفستگی می‌باشد. این رخساره که در میان دیگر رخساره‌های سازنده‌های دالان بالایی و کنگان، به عنوان عمیق‌ترین رخساره شناسایی شده است، در قاعده‌ی واحد K1 و نیز بخش میانی K2 به صورت محدود دیده می‌شود.

تفسیر: وجود سوزن اسفنج، عدم وجود فرامینیفرهای بنتیک دانه درشت، عدم حضور تبخیری‌ها و رنگ تیره ناشی از وجود ماده آلی در شرایط کم‌اکسیژنی به همراه کانی‌های رسی و کانی‌های تیره نشان‌دهنده تشکیل این رخساره در شرایط بی‌اکسیژنی تا کم‌اکسیژنی است که حاکی از یک محیط آرام با گردش محدود آب در زیر سطح اساس توفانی امواج می‌باشد که انتظار می‌رود مربوط به بخش رمپ میانی تا بیرونی باشد (فلوگل، ۲۰۱۰). رضایی

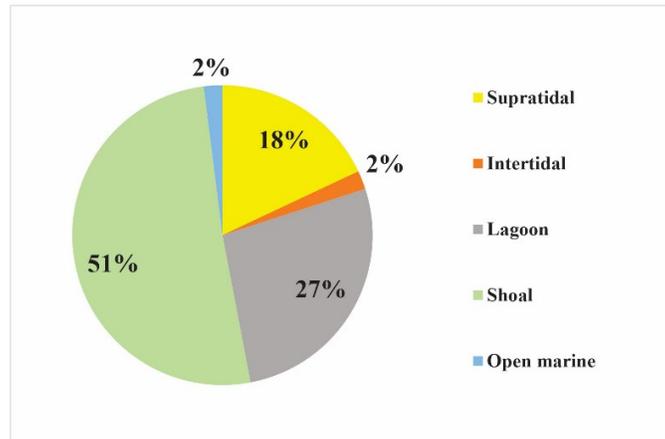


شکل ۷. نمودارهای فراوانی نسبی ریزرخساره‌های شناسایی‌شده در واحدهای مخزنی و کل توالی پرمین-تریاس در چاه مورد مطالعه.
Fig. 7. Relative frequency diagrams of the identified microfacies in the reservoir units and the entire Permian-Triassic sequence in the studied well.

بالایی، رخساره‌های MF7 و MF9 از فراوانی بالاتری برخوردارند. به طور کلی، توالی‌های دالان بالایی و کنگان ناحیه شرقی خلیج فارس دارای رخساره‌های جزرومدی کمتر و رخساره‌های لاگونی و شول بیشتری در مقایسه با بخش مرکزی خلیج فارس و میدان پارس جنوبی هستند (رحیم‌پوریناب و همکاران، ۲۰۰۹). ستون‌های رسوب‌شناسی، توزیع ریزرخساره‌ها و لاگ‌های پتروفیزیکی سازنده‌های دالان بالایی و کنگان در زون‌های مخزنی K1 تا K3 در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است.

۴-۳-۵- فراوانی رخساره‌ها

به منظور بررسی پراکنش رخساره‌ها در توالی‌های مورد مطالعه، فراوانی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است (شکل‌های ۷ و ۸). طبق نمودارها، در تمامی توالی پرمین-تریاس در چاه مورد مطالعه، بیشترین فراوانی رخساره‌ها به ترتیب مربوط به رخساره‌های MF9 و MF7 در محیط‌های پشت شول و لاگون می‌باشد. در واحد مخزنی K1 سازند کنگان، رخساره‌های MF6 و MF7 و در واحد مخزنی K2 سازند کنگان، رخساره‌های MF9 و MF11 دارای فراوانی بیشتری هستند. همچنین در واحد مخزنی K3 سازند دالان



شکل ۸. فراوانی مجموعه‌های رخساره‌ای در سازندهای دالان بالایی و کنگان در چاه مورد مطالعه

Fig. 8. Frequency of facies associations in the Upper Dalan and Kangan formations in the studied well

۵- تفسیر نتایج و بحث

۵-۱- مدل رسوبی

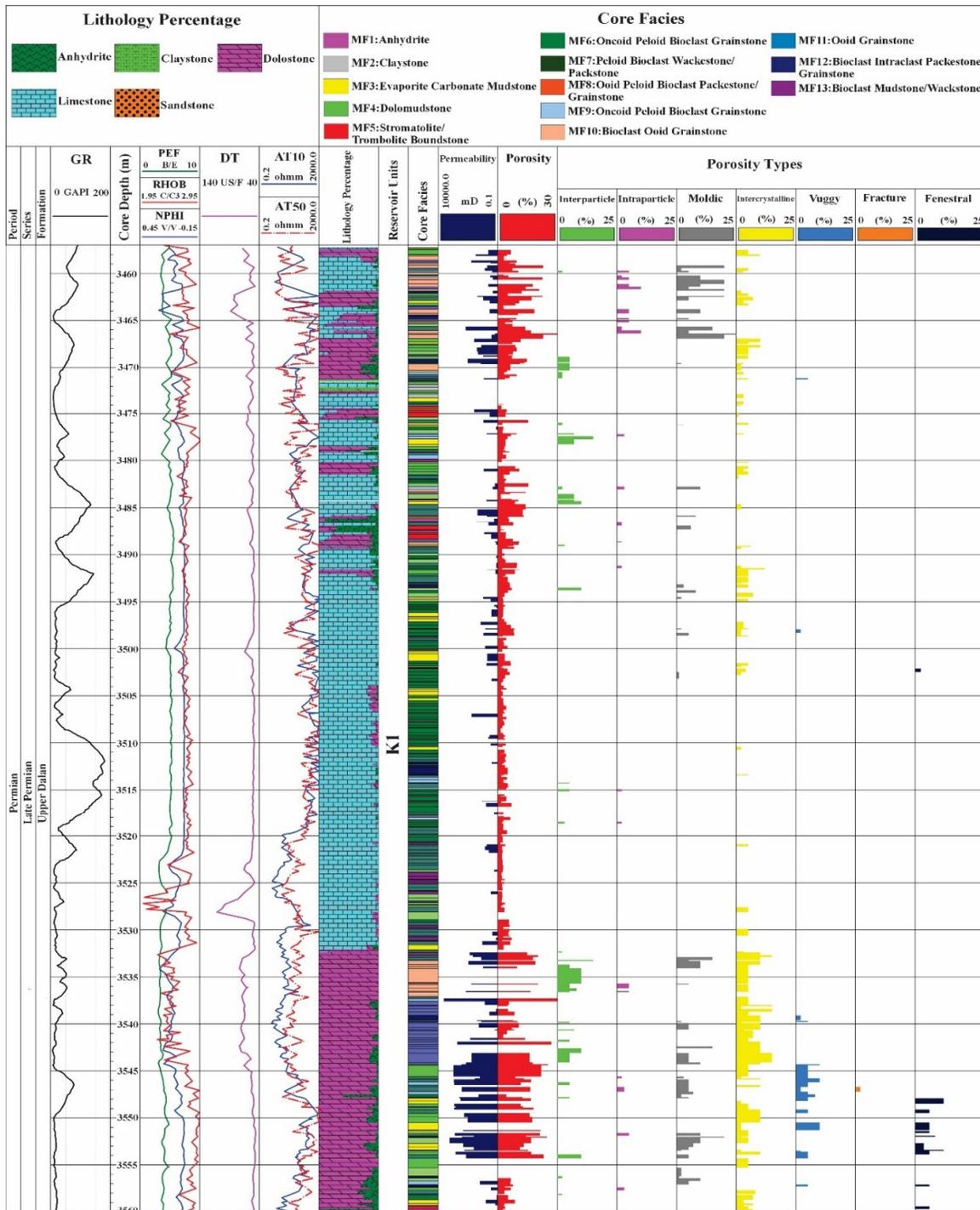
بر اساس تفاسیر رخساره‌ای ارائه شده، کمرندهای رخساره‌ای بالای پهنه جزرومدی، بین جزرومدی، لاگون و پشته‌های زیرآبی کربناته به جز بخش رو به دریای پشته‌های زیرآبی که مربوط به رمپ میانی است، در محدوده رمپ داخلی گسترش یافته‌اند و کمرند رخساره‌ای دریای باز در رمپ میانی و خارجی گسترش یافته است. عدم حضور ساخت‌های بزرگ ریفی و گسترش نسبی پهنه‌های جزرومدی با رخساره‌های سدی اییدی، تنوع کم رخساره‌ای، تبدیل تدریجی ریزرخساره‌ها به یکدیگر، فراوانی بالای رخساره‌های کم‌عمق به ویژه گسترش زیاد سابخا و نبود شاهی بر وجود نقطه شکست در شیب پلاتفرم نشان می‌دهد که سیستم رسوب‌گذاری توالی‌های مذکور در ناحیه شرقی خلیج فارس، به صورت پلاتفرم رمپ کربناته با شیب کم (رمپ هموکلینال) بوده است. جداسدگی بستر دریا و پیشروی آب در انتهای پرمین موجب تشکیل این پلاتفرم شده است که از جنوب ایران تا عربستان سعودی گسترش یافته است (استامفلی، ۲۰۰۰؛ شارلند و همکاران، ۲۰۰۱). در طول این پلاتفرم، شول‌های اییدی-بایوکلاستی گسترش قابل توجهی داشته‌اند که در صورت فراهم شدن شرایط مناسب (همانند وضعیت دیاژنزی و تشکیل تله‌های نفتی) مخازن گازی عظیمی را در خلیج فارس و نواحی مجاور آن تشکیل داده‌اند (رحیم‌پورناب و همکاران، ۲۰۱۰). مدل رسوبی در نظر گرفته شده برای توالی‌های مورد مطالعه در شکل ۱۳

۴-۴- تخلخل - تراوایی

واحد مخزنی K1 از رخساره‌های گل‌پشتیبان تا دانه‌پشتیبان با مقادیر تخلخل و تراوایی خوب تشکیل شده است (شکل ۱۲). بهترین کیفیت مخزنی واحد K1 در قسمت‌های میانی آن مشاهده می‌شود که علت آن فرآیندهای دولومیتی‌شدن گسترده و ارتباط حفرات با یکدیگر به وسیله فضاهای خالی بین‌بلوری در رخساره‌ها است. تخلخل در این قسمت در لایه‌های گرینستونی دولومیتی افزایش می‌یابد. این زون مخزنی به علت داشتن مقادیر قابل توجه فضاهای خالی بین‌بلوری، قالبی و بین‌دانه‌ای و وجود رخساره‌های دانه‌پشتیبان، دارای کیفیت مخزنی بالایی است. واحد مخزنی K2 نیز دارای مقادیر خوب تا عالی تخلخل و تراوایی است (جدول ۲). بخش‌های میانی این واحد که با رخساره‌های دانه‌پشتیبان اییدی و آنکوئیدی مشخص می‌شوند، دارای بالاترین میزان تخلخل هستند. در نتیجه‌ی وجود گسترده انواع فضاهای خالی قالبی، بین‌بلوری، درون‌دانه‌ای و بین‌دانه‌ای، این واحد دارای کیفیت مخزنی بالایی می‌باشد. در واحد مخزنی K3، بخش میانی دارای بهترین کیفیت مخزنی است که بیشتر از رخساره‌های گرینستونی با درصد قابل توجهی تخلخل تشکیل شده است. فضاهای خالی قالبی، بین‌دانه‌ای و بین‌بلوری مهم‌ترین منافذ در این واحد هستند که در نمونه‌های گل‌پشتیبان فضاهای خالی بین‌بلوری بیشتر است. به طور کلی کیفیت مخزنی در این واحد متوسط تا بالا است. نمودار تغییرات تخلخل - تراوایی این واحد مخزنی در شکل ۱۲ ارائه گردیده است.

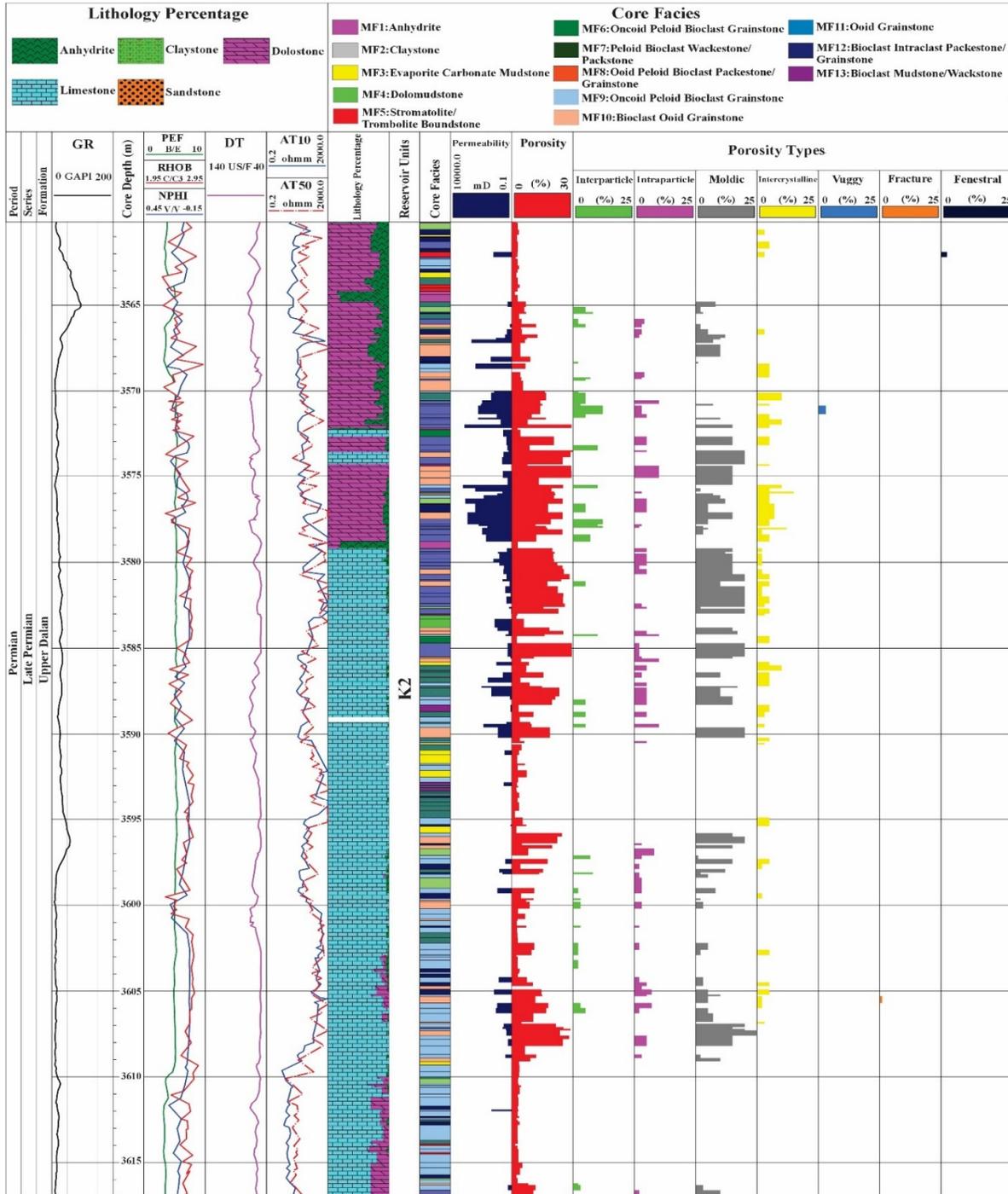
شده است (اینسالاکو و همکاران، ۲۰۰۶؛ جعفریان و همکاران، ۲۰۱۷).

آمده است. نظیر همین مدل رسوب‌گذاری برای توالی‌های پرمین-تریاس در نواحی مرکزی خلیج فارس نیز پیشنهاد



شکل ۹. ستون رسوب‌شناسی، توزیع ریزرخساره‌ها و نمودارهای پتروفیزیکی سازندهای دالان بالایی و کنگان در واحد K1 چاه مورد مطالعه.

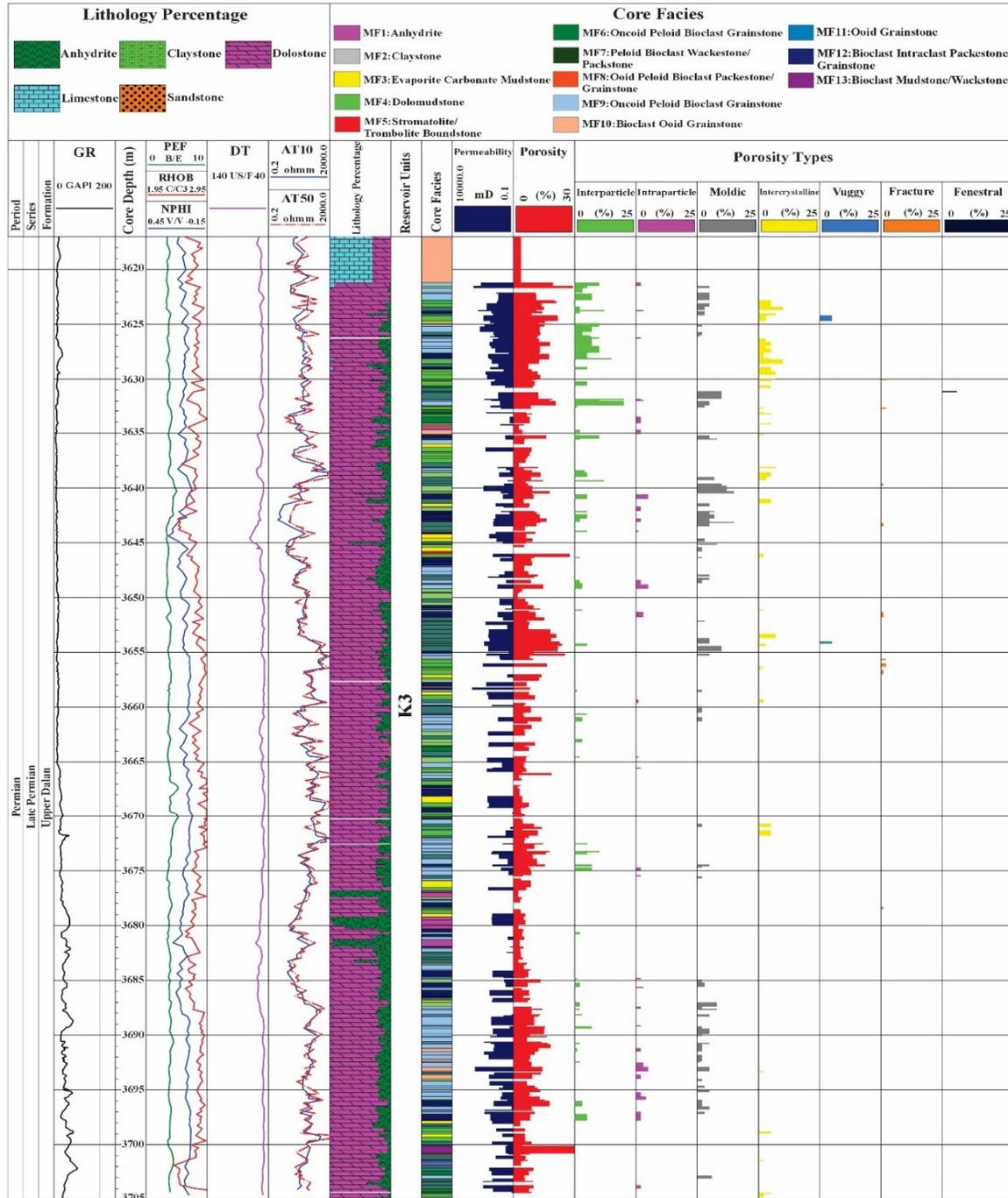
Fig. 9. Sedimentological column, distribution of microfacies, and petrophysical charts of the Upper Dalan and Kangan formations in the K1 unit of the studied well.



شکل ۱۰. ستون رسوب‌شناسی، توزیع ریزر خساره‌ها و نمودارهای پتروفیزیکی سازندهای دالان بالایی و کنگان در واحد K2 چاه مورد مطالعه.
Fig. 10. Sedimentological column, distribution of microfacies, and petrophysical charts of the Upper Dalan and Kangan formations in the K2 unit of the studied well.

چشم‌پوشی شده است. محاسبه میانگین مقادیر تخلخل و تراوایی سنگ‌شناسی‌های شناسایی شده نشان می‌دهد که متخلخل‌ترین و تراواترین سنگ‌شناسی توالی‌های دالان بالایی و کنگان، مربوط به نمونه‌های دولومیتی است (جدول ۳).

۵-۲- کنترل سنگ‌شناسی بر کیفیت مخزن
 بر اساس مشاهدات، سازندهای دالان بالایی و کنگان دارای سنگ‌شناسی‌های مختلفی از جمله سنگ‌آهک، دولومیت، انیدریت و مقداری آواری می‌باشند که در محاسبات به دلیل ناچیز بودن مقادیر سنگ‌شناسی آواری از آن



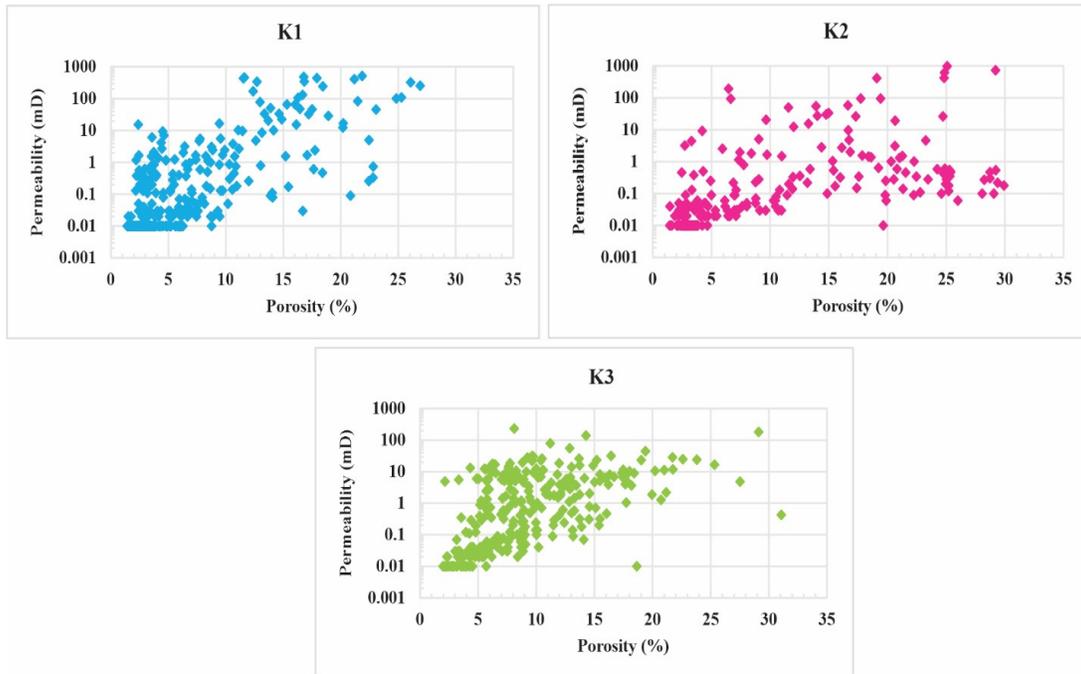
شکل ۱۱. ستون رسوب‌شناسی، توزیع ریزرخساره‌ها و نمودارهای پتروفیزیکی سازندهای دالان بالایی و کنگان در واحد K3 چاه مورد مطالعه.
Fig. 11. Sedimentological column, distribution of microfacies, and petrophysical charts of the Upper Dalan and Kangan formations in the K3 unit of the studied well.

تخلخل-تراوایی نمونه‌های دولومیتی و آهکی در شکل ۱۴ ترسیم شده است. دولومیتی شدن، سبب نزدیک تر شدن ارتباط تخلخل و تراوایی (همگن‌سازی سیستم حفرات) شده است و می‌توان گفت که حداقل بخشی از وضعیت تخلخل و تراوایی در توالی‌های مورد مطالعه تحت تأثیر این

به طور کلی، سنگ‌های دولومیتی یا دولومیت‌دار و رخساره شول که تشکیل‌دهنده حدود نیمی از توالی‌های مورد مطالعه هستند، بهترین وضعیت مخزنی را نیز نشان می‌دهند (شکل ۱۴). به منظور بررسی تأثیر دولومیتی شدن بر کیفیت مخزنی واحدهای مورد مطالعه، نمودار تغییرات

رخساره‌های دانه‌پشتیبان دولومیتی که در آن‌ها سیمان انیدریتی به صورت دربرگیرنده و پرکننده فضاهای خالی عمل کرده است، از کیفیت مخزنی پایینی برخوردار هستند.

فرآیند بوده است. اغلب دولومیت‌های با بافت اولیه دانه‌پشتیبان کیفیت مخزنی خوبی داشته و طبقات مخزنی را ایجاد کرده‌اند. در این رخساره‌ها، دولومیتی شدن آلوکرها سبب حفظ فضاهای خالی بین‌دانه‌ای شده است. از طرفی،



شکل ۱۲. نمودار تغییرات تخلخل - تراوایی توالی‌های دالان بالایی و کنگان بر مبنای واحدهای مخزنی

Fig. 12. Plot of porosity-permeability variations for the Upper Dalan and Kangan sequences based on the reservoir units.

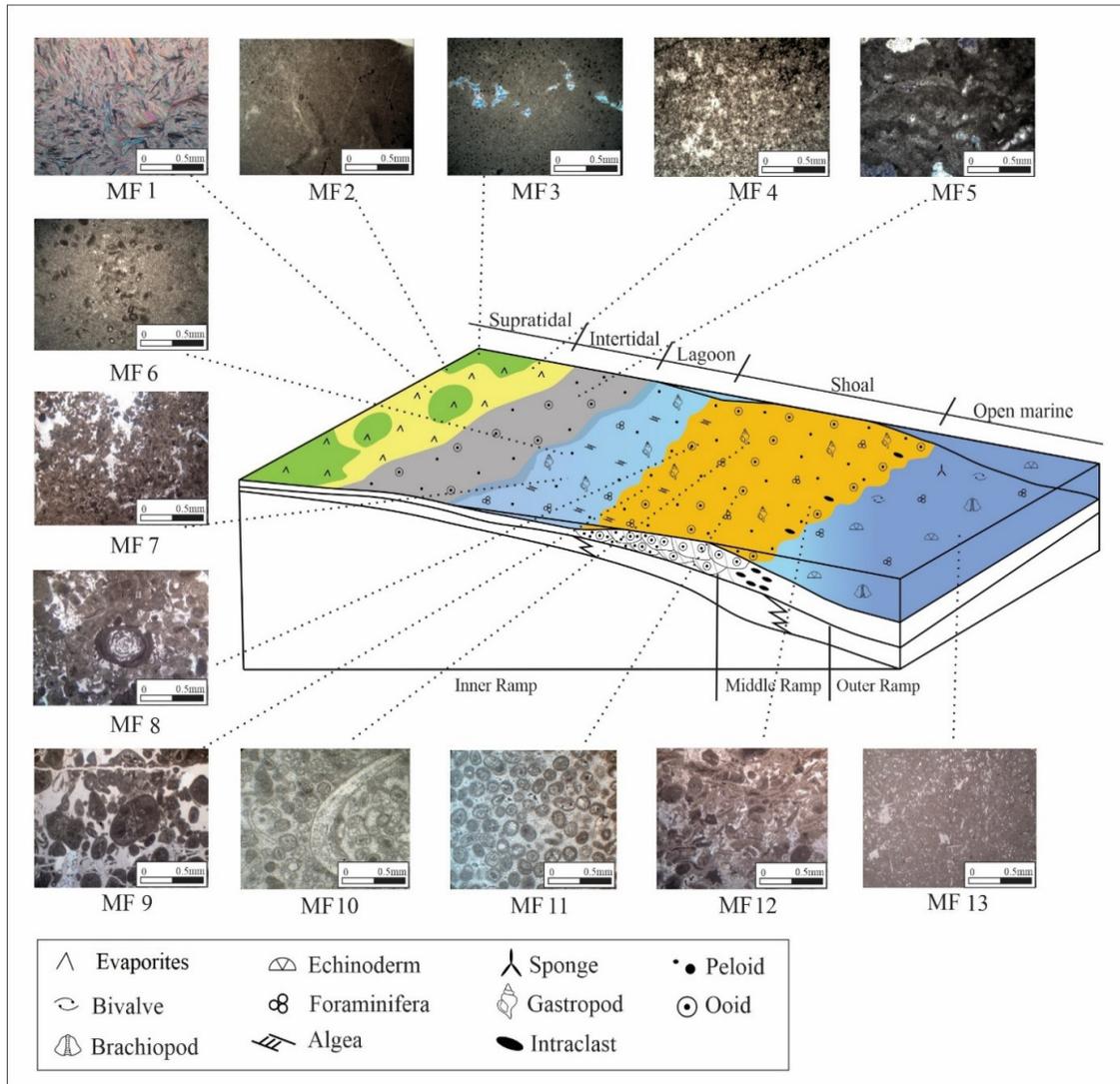
جدول ۲. میانگین حسابی، هندسی و انحراف معیار مقادیر تخلخل و تراوایی واحدهای مخزنی توالی‌های دالان بالایی و کنگان در چاه مورد مطالعه

Table 2. Arithmetic and geometric means as well as standard deviation of porosity and permeability values of the reservoir units in the Upper Dalan and Kangan sequences in the studied well.

واحد مخزنی	میانگین تخلخل (%) (حسابی)	میانگین تخلخل (%) (هندسی)	انحراف معیار تخلخل	میانگین تراوایی (میلی دارسی) (حسابی)	میانگین تراوایی (میلی دارسی) (هندسی)	انحراف معیار تراوایی
K1	۱۲/۹۲	۵/۰۷	۱۱۲/۳۷	۳۱/۱۵	۰/۱۴	۲۰۳/۳۷
K2	۱۰/۱۹	۷/۱۴	۸/۳۵	۱۸/۳۶	۰/۱۴	۹۹/۷۷
K3	۹/۲۷	۷/۹۸	۵/۱۴	۶/۵۲	۰/۶۱	۲۰/۶۴

و کنگان انواع عوارض دیاژنزی نظیر حفرات قالبی، حفره‌ای و انواع سیمان‌های کلسیتی به وضوح قابل مشاهده است و حتی دولومیتی شدن‌های بعدی نیز آن‌ها را به طور کامل محو نکرده‌اند. بنابراین به کمک داده‌های تخلخل و تراوایی نمونه‌های مورد مطالعه از توالی‌های دالان بالایی و کنگان، تأثیر فرآیندهای دیاژنزی بر کیفیت مخزنی کاملاً مشهود است.

در رخساره‌های گل‌پشتیبان، دولومیتی شدن سبب برقراری ارتباط بین فضاهای خالی موجود در زمینه و افزایش تراوایی در آن‌ها شده است و همچنین اثر شکستگی در این نمونه‌ها منجر به افزایش کیفیت مخزنی تا حد مطلوبی شده است. به طور کلی مقادیر تخلخل و تراوایی نمونه‌های دولومیتی بالاتر از نمونه‌های آهکی می‌باشد اما این وضعیت به معنای عدم وقوع رخداد‌های دیاژنزی در نمونه‌های آهکی نیست و در بیشتر بخش‌های آهکی توالی‌های دالان

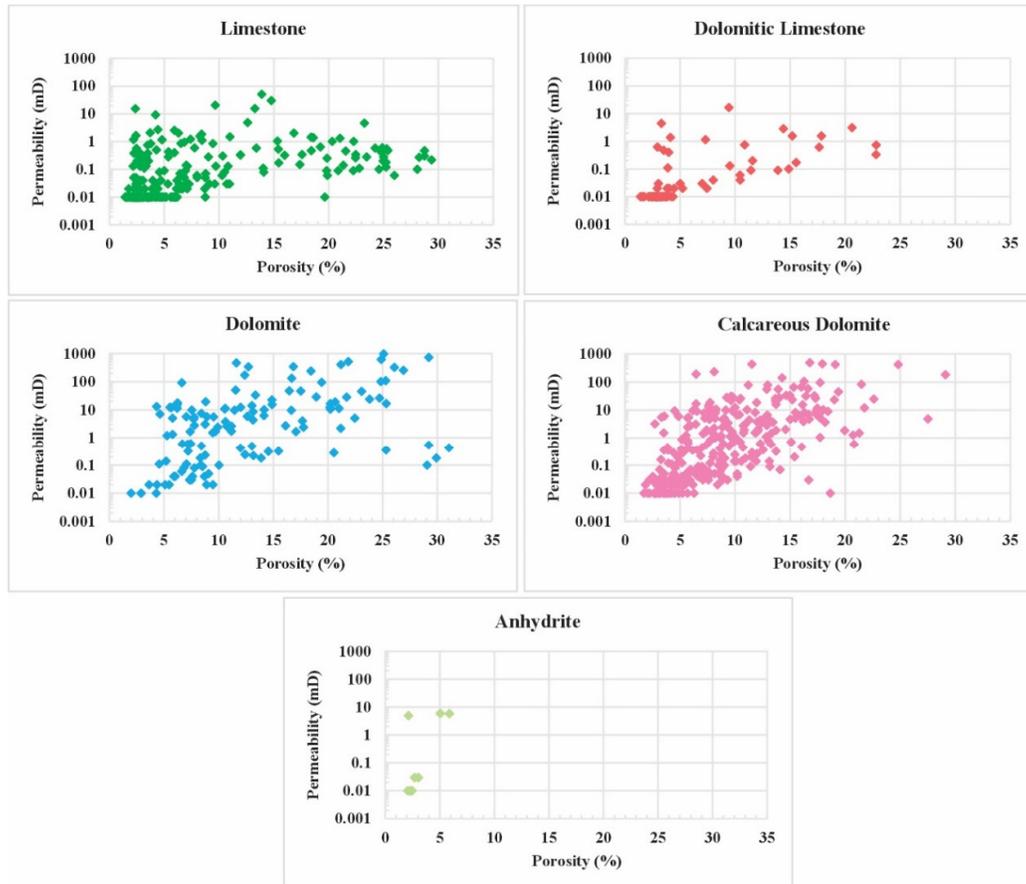


شکل ۱۳. مدل رسوبی مفهومی و چگونگی توزیع رخساره‌های سازند کنگان و بخش بالایی سازند دالان در چاه مورد مطالعه
 Fig. 13. Conceptual sedimentary model and distribution of facies in the Kangan Formation and the Upper Dalan Formation in the studied well.

جدول ۳. میانگین حسابی، هندسی و انحراف از معیار مقادیر تخلخل و تراوایی در سنگ‌شناسی‌های شناسایی شده در توالی‌های دالان بالایی و کنگان

Table 3. Arithmetic and geometric means as well as standard deviation of porosity and permeability values in the lithologies identified in the Upper Dalan and Kangan sequences

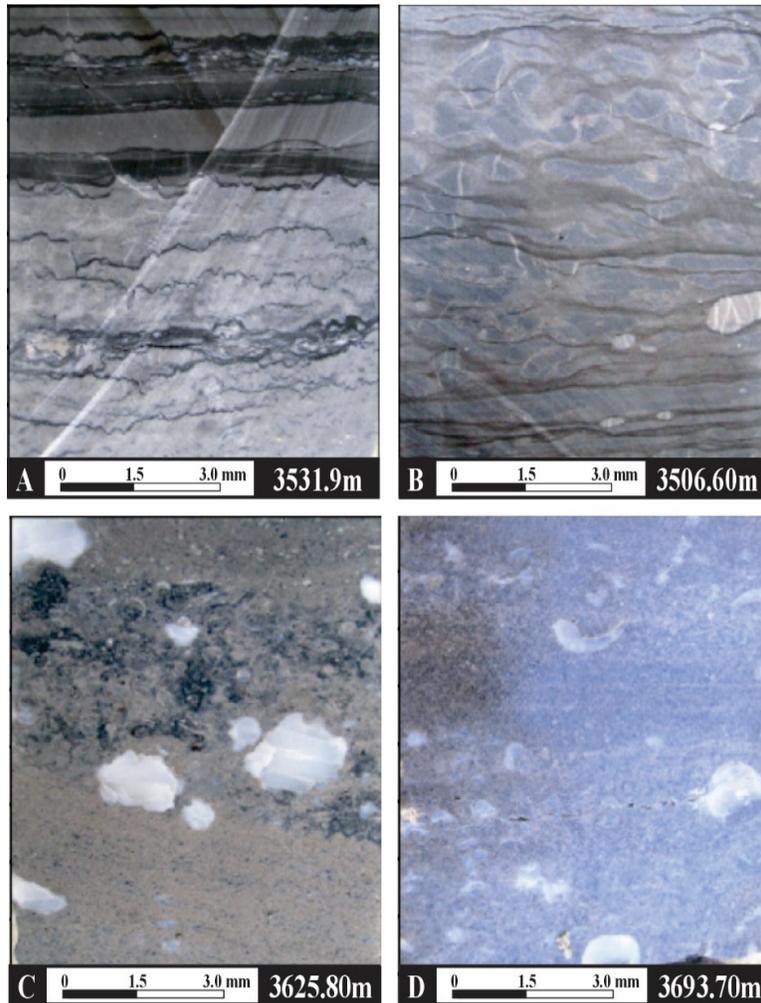
سنگ‌شناسی	میانگین تخلخل (%) (حسابی)	میانگین تخلخل (%) (هندسی)	انحراف معیار تخلخل	میانگین تراوایی (میلی داری) (حسابی)	میانگین تراوایی (میلی داری) (حسابی)	انحراف معیار تراوایی
آهک	۷/۴۰	۵/۰۵	۷/۴۸	۰/۷۶	۰/۰۶	۴/۰۱
آهک دولومیت‌دار	۵/۶۶	۴/۳۰	۵/۰۹	۰/۴۵	۰/۰۳	۱/۹۱
دولومیت آهک‌دار	۸/۹۱	۷/۵۶	۵/۰۹	۱۵/۰۰	۰/۵۰	۵۹/۳۹
دولومیت	۲۸/۱۲	۱۱/۲۷	۱۷۶/۷۷	۸۴/۴۹	۲/۷۴	۳۲۸/۲۷
انیدریت	۳/۲۳	۲/۸۵	۱/۲۶	۱/۴۱	۰/۰۸	۲/۵۹



شکل ۱۴. نمودار تغییرات تخلخل-تراوایی توالی‌های دالان بالایی و کنگان بر مبنای سنگ‌شناسی‌های شناسایی‌شده در چاه مورد مطالعه
Fig. 14. Plot of porosity-permeability variations for the Upper Dalan and Kangan sequences based on the lithologies identified in the studied well

گل‌پشتیبان با بافت مادستون و وکستون که اغلب به کمر بند رخساره‌های پهنه‌های جزرومدی تعلق دارند، دولومیتی‌شدن، فشردگی و سیمانی‌شدن تبخیری از جمله مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی می‌باشند (شکل‌های ۱۵ و ۱۶). در این رخساره‌ها، دولومیتی‌شدن تا حدود زیادی موجب بهبود تراوایی شده است در حالی که فرآیندهایی نظیر فشردگی و سیمانی‌شدن (بصورت انیدریت دربرگیرنده تا گرهک انیدریتی) عموماً، کاهش کیفیت مخزنی را به دنبال داشته‌اند. از آنجایی که پرداختن به کنترل رخدادهای دیاژنزی بر خصوصیات مخزنی سازندهای دالان بالایی و کنگان از اهداف اصلی مطالعه حاضر نبوده است، برای مطالعه بیشتر در این خصوص به مطالعات پیشین ارجاع داده می‌شود (برای مثال رحیم‌پوربناب و همکاران ۲۰۱۰؛ توکلی و همکاران، ۲۰۱۱؛ مهرابی و همکاران ۲۰۱۶؛ فلاح بگتاش و همکاران، ۲۰۲۰).

از دیدگاه ارتباط بین رخساره‌های رسوبی و فرآیندهای دیاژنزی در توالی‌های مورد مطالعه، اغلب فرآیندهای دیاژنزی اثرگذار بر خصوصیات مخزنی سازندهای دالان بالایی و کنگان دارای ارتباطات معناداری با رخساره‌های رسوبی می‌باشند و به عبارت دیگر از آن‌ها تبعیت می‌کنند. این همان دیاژنز تحت کنترل رخساره است (هامر و همکاران، ۲۰۱۰). در رخساره‌های دانه‌پشتیبان با بافت پکستون و گرینستون متعلق به کمر بند رخساره‌ای پشته‌های زیرآبی، فرآیندهای دیاژنزی اثرگذار بر تخلخل و تراوایی به ترتیب اهمیت شامل انحلال (ایجاد منافذ حفره‌ای و قالبی)، دولومیتی‌شدن و سیمانی‌شدن (اغلب از نوع سیمان‌های هم‌ضخامت) می‌باشند (شکل‌های ۱۵ و ۱۶). از میان این فرآیندها، انحلال و دولومیتی‌شدن موجب بهبود کیفیت مخزنی این رخساره‌ها شده‌اند به نحوی که بهترین واحدهای تولیدی این مخازن را در واحد مخزنی K2 در سازند کنگان به وجود آورده‌اند. در رخساره‌های



شکل ۱۵. تصاویر مغزه از مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی شناسایی شده در چاه مورد مطالعه. A: استیلولیتی شدن. B: رگچه‌های انحلالی. C: گرهک‌های انیدریتی. D: سیمانی شدن و شکستگی.

Fig. 15. Core photos of important diagenetic features recorded in the studied well. A: Stylolitization. B: Solution seams. C: Anhydrite nodules. D: Cementation and fracturing.

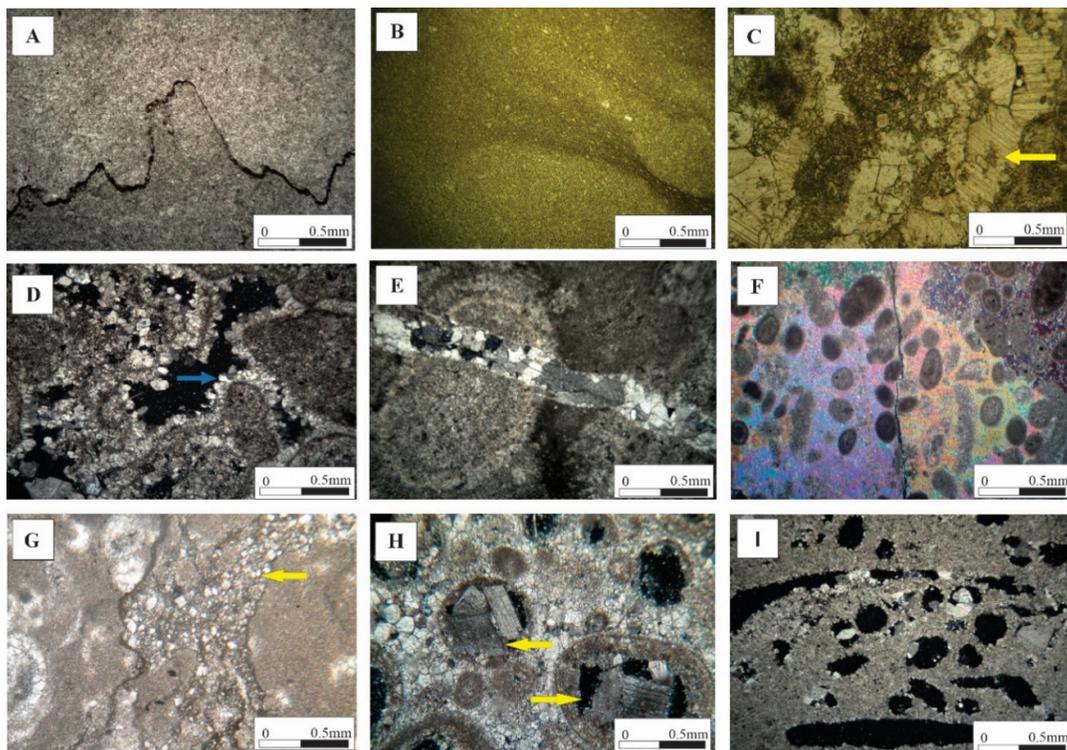
دربرگیرنده دانست که موجب پایین آمدن کیفیت مخزنی شده است. نمونه‌های گرینستونی با تخلخل و تراوایی عالی را می‌توان به حضور فضاهای خالی قالبی و بین‌دانه‌ای و فضاهای خالی ناشی از انحلال دولومیت نسبت داد. همچنین در نمونه‌هایی که به طور کامل دولومیتی شده‌اند و اندازه بلورهای دولومیت در آن‌ها متوسط تا بزرگ می‌باشد در نتیجه‌ی ایجاد فضاهای خالی بین‌بلوری کیفیت مخزنی بالایی وجود دارد (شکل ۱۷). نمونه‌های دارای بافت پکستونی که دارای مقادیر متوسط تا خوب تخلخل و تراوایی هستند تحت تأثیر فرآیندهای شکستگی و خالی ماندن فضاهای خالی بین‌دانه‌ای اولیه در نمونه‌ها هستند و فضاهای خالی قالبی و بین‌دانه‌ای انواع غالب منافذ در آن‌ها می‌باشند (شکل ۱۷). از طرفی نمونه‌های پکستونی که

۵-۳- کنترل بافت رسوبی بر کیفیت مخزن

نمودار تغییرات تخلخل- تراوایی نمونه‌های مورد مطالعه، بر مبنای بافت‌های رسوبی اولیه شناسایی شده (شکل ۱۷) نشان می‌دهد که در یک روند کلی، از مادستون به سمت گرینستون کیفیت مخزنی افزایش واضح یافته است و این روند افزایشی به خوبی در جدول شماره ۴ نیز قابل مشاهده می‌باشد. با این حال، تغییراتی نیز در بافت‌های رسوبی مختلف مشاهده می‌شود که در زیر به تشریح آن‌ها می‌پردازیم. رخساره‌های با بافت گرینستونی دارای مقادیر تخلخل و تراوایی متغیر می‌باشند. نمونه‌های گرینستونی دارای مقادیر پایین تخلخل و تراوایی را می‌توان ناشی از فرآیندهای دیاژنزی سیمانی شدن کلسیتی که منافذ را به طور کامل پوشانده‌اند و همچنین سیمانی شدن انیدریتی

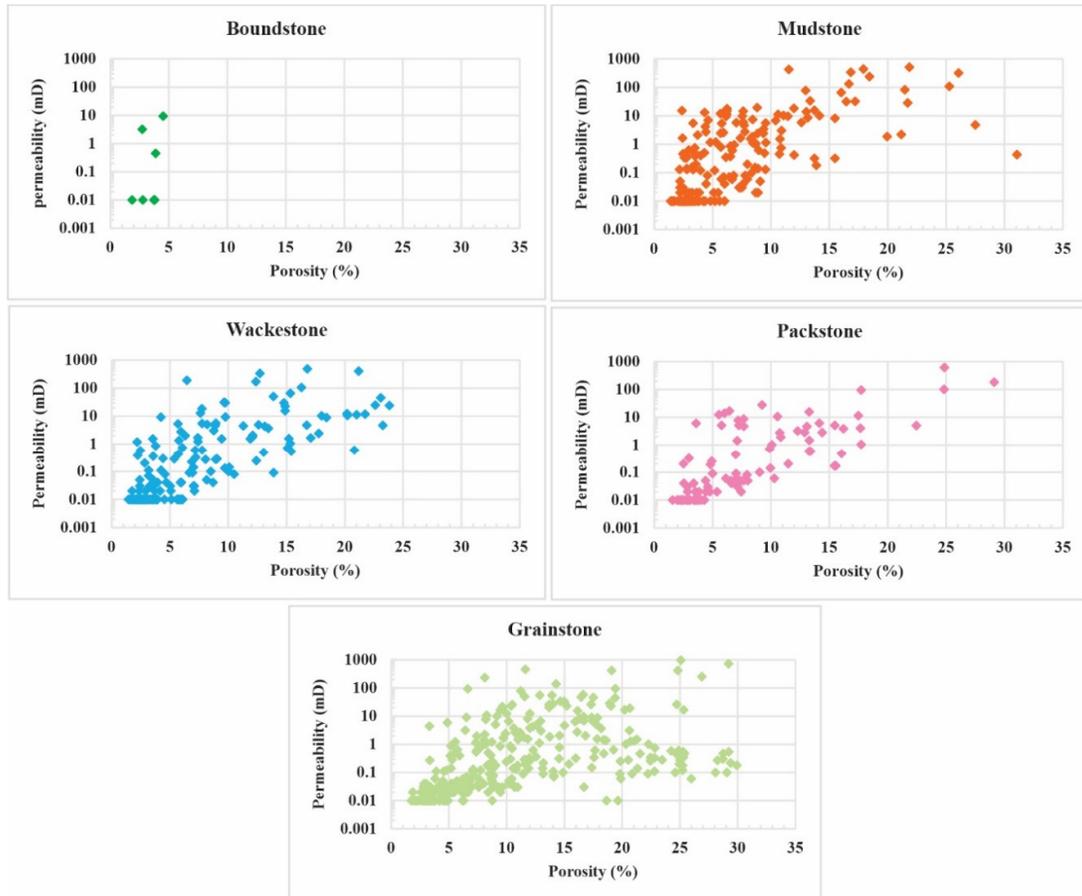
نمونه‌های پکستونی می‌باشد (جدول ۴). در رخساره‌های گل‌پشتیبان مادستون و وکستون توزیع اندازه حفرات تحت کنترل اندازه میکرایت و میزان فضاهای خالی بین‌ذره‌ای در گل است. نمونه‌های وکستونی دارای مقادیر تخلخل متوسط تا خوب را می‌توان به وجود فضاهای خالی بین‌بلوری در آن‌ها نسبت داد. همچنین نمونه‌هایی با تراوایی بالا، تحت تأثیر فرآیند شکستگی قرار گرفته‌اند. در نمونه‌هایی که از مقادیر تخلخل و تراوایی کاسته شده است، افزایش گرهک‌های انیدریتی و استیلولیت‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۱۷). به طور کلی تراوایی اولیه در وکستون‌ها پایین‌تر از پکستون‌ها می‌باشد که این وضعیت می‌تواند ناشی از پتانسیل کمتر گردش سیالات در وکستون‌ها باشد (جدول ۴).

توسط سیمان انیدریت دربرگیرنده احاطه شده‌اند و به طور کلی فرآیندهای دیاژنزی سیمانی شدن کلسیتی و انیدریتی را تحمل کرده‌اند و در نتیجه بسته شدن منافذ، دارای مقادیر پایین‌تری از تخلخل و تراوایی می‌باشند (شکل ۱۷). به طور کلی تراوایی نمونه‌های پکستونی اختلاف چندانی با نمونه‌های با بافت گرینستونی ندارد، اما تخلخل در پکستون‌ها بسیار کمتر از گرینستون‌ها می‌باشد که علت آن را می‌توان ناشی از وجود نمونه‌های پکستونی با تخلخل پایین و تراوایی بالا یا نمونه‌های گرینستونی دارای تخلخل خوب و تراوایی پایین دانست. انحلال در گرینستون‌ها و تشکیل فضاهای خالی قالبی می‌تواند سبب افزایش تخلخل گردد ولی از آنجایی که ارتباط زیادی بین این فضاهای خالی وجود ندارد تراوایی در این نمونه‌ها مشابه تراوایی در



شکل ۱۶. تصاویر میکروسکوپی از فرآیندهای دیاژنزی مختلف. A: استیلولیت در یک رخساره مادستونی، عمق ۳۵۰۰/۵۳ متر، PPL. B: آشفتگی زیستی در یک رخساره دولومادستونی که توسط بخش‌های روشن و تیره‌تر مشخص می‌شود، عمق ۳۶۱۰/۰۸ متر، PPL. C: سیمان کلسیت دربرگیرنده که اجزای کوچک‌تر را در خود جای داده است، عمق ۳۶۱۳/۶۵ متر، PPL. D: سیمان حاشیه‌ای هم‌ضخامت، عمق ۳۴۷۷/۰۹ متر، XPL. E: شکستگی که زمینه و آلوکم‌ها را تحت تأثیر قرار داده و سپس با سیمان کلسیت بلوکی پر شده است، عمق ۳۶۱۴/۳۸ متر، XPL. F: سیمان انیدریت دربرگیرنده که آلوکم‌ها را در خود جای داده است، عمق ۳۶۴۶/۷۲ متر، XPL. G: حضور بلورهای کوچک تا متوسط دولومیت در امتداد استیلولیت، عمق ۳۶۳۹/۴۱ متر، PPL. H: دولومیت‌های زین‌اسبی دارای خاموشی موجی که درون قالب‌های بیدها را پر کرده‌اند، عمق ۳۵۲۷/۲۸ متر، PPL. I: انحلال پوسته دوکفه‌ای‌ها در رخساره بایوکلس وکستون، عمق ۳۵۸۶/۳۷ متر، XPL.

Fig. 16. Microscopic images of various diagenetic processes. A: stylolite in a mudstone facies, depth 3500.53 m, PPL. B: Bioturbation in a dolostone facies highlighted by lighter and darker sections, depth 3610.08 m, PPL. C: Poikilotopic calcite cement enclosing smaller components, depth 3613.65 m, PPL. D: Isopachous rim cement, depth 3477.09 m, XPL. E: Fracture affecting matrix and allochems, filled with blocky calcite cement, depth 3614.38 m, XPL. F: Poikilotopic anhydrite cement enclosing allochems, depth 3646.72 m, XPL. G: Presence of small to medium dolomite crystals along stylolite, depth 3639.41 m, PPL. H: Undulatory extinction in saddle dolomites filling ooid molds, depth 3537.28 m, PPL. I: Dissolution of bivalve shells in a bioclastic wackestone facies, depth 3586.37 m, XPL.



شکل ۱۷. نمودار تغییرات تخلخل-تراوایی توالی‌های دالان بالایی و کنگان بر مبنای بافت‌های رسوبی اولیه شناسایی شده
Fig. 17. Plot of porosity-permeability variations for the Upper Dalan and Kangan sequences based on the identified primary sedimentary textures.

جدول ۴. میانگین حسابی، هندسی و انحراف معیار مقادیر تخلخل و تراوایی بافت‌های رسوبی اولیه شناسایی شده در توالی‌های دالان بالایی و کنگان.

Table 4. Arithmetic and geometric means as well as standard deviation of porosity and permeability values of the primary sedimentary textures identified in the Upper Dalan and Kangan sequences.

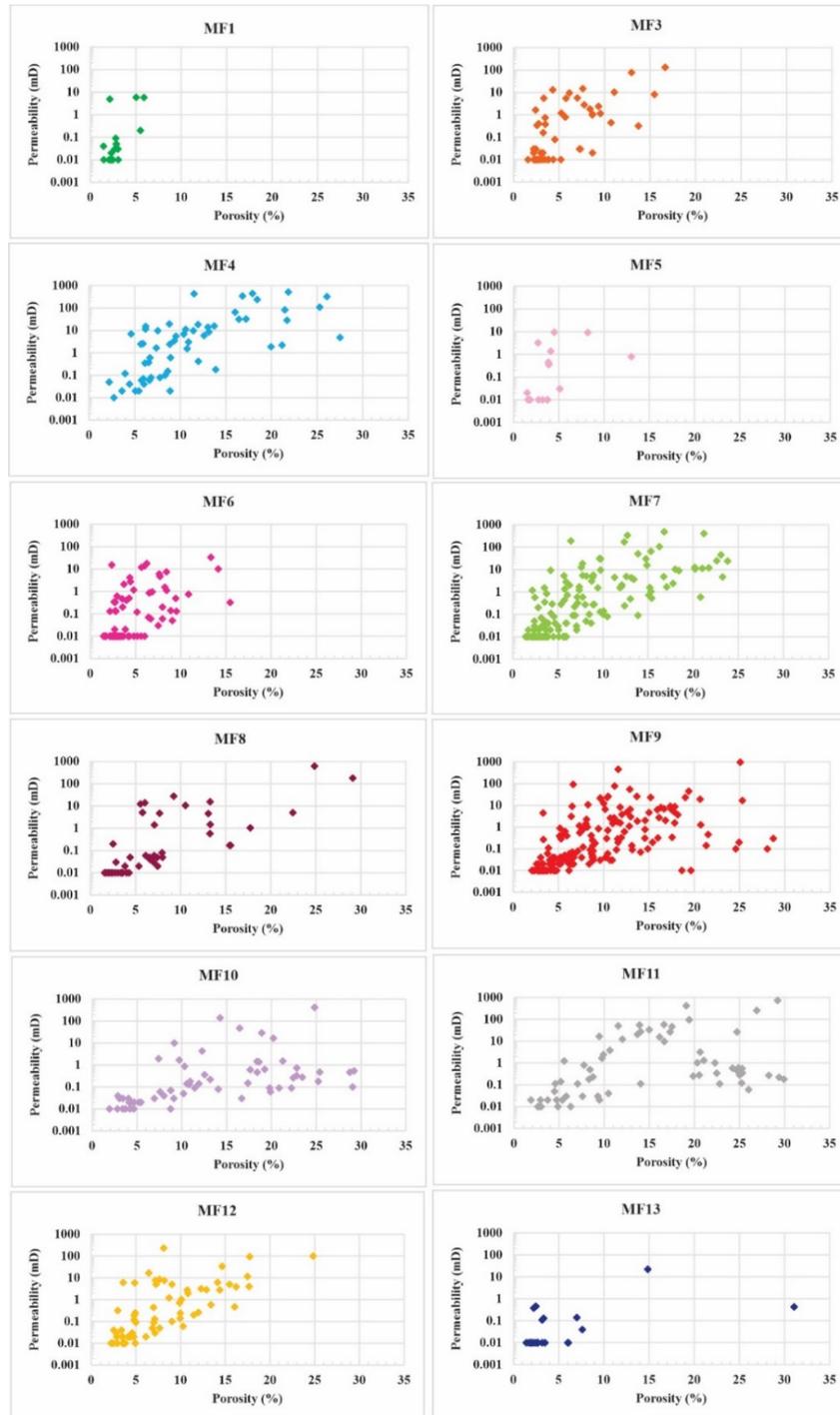
بافت رسوبی	میانگین تخلخل (%) (حسابی)	میانگین تخلخل (%) (هندسی)	انحراف معیار تخلخل	میانگین تراوایی (میلی دارسی) (حسابی)	میانگین تراوایی (میلی دارسی) (هندسی)	انحراف معیار تراوایی
مادستون	۶/۷۶	۵/۲۳	۵/۳۶	۱۵/۸۲	۰/۲۵	۶۷/۱۶
وکستون	۷/۴۴	۵/۶۶	۵/۶۷	۱۳/۶۸	۰/۲۲	۵۹/۴۲
پکستون	۸/۰۹	۶/۳۳	۵/۸۶	۲۳/۹۸	۰/۲۶	۱۳۰/۱۹
گرینستون	۱۶/۸۴	۸/۶۴	۱۱۱/۰۶	۲۴/۵۷	۰/۲۴	۱۹۴/۸۵
باندستون	۳/۳۲	۳/۲۰	۰/۹۰	۱/۸۸	۰/۱۰	۳/۵۴

خالی باقی مانده است. گاهی نیز بلورهای کلسیت و دولومیت توسط انیدریت جانشین می‌شوند (شکل ۱۷). در مادستون‌ها فرآیندهای استیلولیتی شدن و شکستگی از عوامل این افزایش است. همچنین فضاهای خالی بین‌بلوری، غالب‌ترین نوع منافذ در این نمونه‌ها می‌باشد.

رخساره‌هایی با بافت مادستونی به طور کلی فاقد کیفیت مخزنی می‌باشند اما در نمونه‌های مادستونی/ دولومادستونی که تخلخل و تراوایی متوسط تا خوب است، به احتمال زیاد این افزایش ناشی از فرآیند دولومیتی شدن در دولومادستون‌ها می‌باشد که فضاهای به وجود آمده

بین‌بلوری و فنسترال به میزان اندک در آن‌ها قابل مشاهده است. بنابراین نمونه‌های مربوط به این بافت فاقد کیفیت مخزنی می‌باشند.

نمونه‌هایی با بافت باندستونی حجم بسیار ناچیزی از توالی مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند (شکل ۱۷). مقادیر تخلخل و تراوایی در رخساره‌های میکروبی مربوط به این بافت بسیار کم می‌باشد (جدول ۴) و تنها فضاهای خالی



شکل ۱۸. نمودار تغییرات تخلخل-تراوایی توالی‌های دالان بالایی و کنگان بر مبنای رخساره‌های شناسایی‌شده

Fig. 18. Plot of porosity-permeability variations for the Upper Dalan and Kangan sequences based on the identified facies.

۴-۵- کنترل رخساره‌های رسوبی بر کیفیت مخزن

میانگین مقادیر تخلخل و تراوایی رخساره‌های شناسایی شده در توالی‌های دالان بالایی و کنگان چاه مورد مطالعه در منطقه شرق خلیج فارس (جدول ۵) نشان می‌دهد که مطابق با فراوانی بالای رخساره دانه‌پشتیبان گرینستون حاوی آنکوئید، پلویید و اجزای اسکلتی (MF9) محیط پشت شول (شکل ۱۸) بهترین وضعیت تخلخل نیز مرتبط با این رخساره است و فضاهای خالی بین‌دانه‌ای و قالبی غالب‌ترین نوع منافذ در این رخساره می‌باشد.

از طرفی به دلیل فرآیند دولومیتی‌شدن شدید که منجر به ارتباط بهتر گلوگاه‌ها با یکدیگر می‌شود، بالاترین میزان تراوایی مرتبط با رخساره گل‌پشتیبان دولومادستون (MF4) می‌باشد که فضاهای خالی بین‌بلوری، نوع منفذی غالب در آن است. بر اساس نمودار تغییرات تخلخل-تراوایی

توالی‌های دالان بالایی و کنگان، بر مبنای رخساره‌های شناسایی شده (شکل ۱۸)، پراکندگی خیلی زیاد مقادیر تخلخل و تراوایی در رخساره‌های ذاتاً دارای کیفیت مخزنی بالا، مانند رخساره‌های گرینستونی می‌تواند بیانگر تأثیر فرایندهای دیاژنزی (اولیه تا ثانویه و دفنی) مختلف مخرب یا افزایش یافته کیفیت مخزنی بر یک رخساره واحد باشد. گرینستون‌ها مشخصاً دارای یک فابریک دانه‌پشتیبان هستند که در آن‌ها اندازه‌ی دانه، اندازه‌ی فضاهای خالی را کنترل می‌کند. سیمانی‌شدن توسط انیدریت و همچنین سیمان‌های کلسیتی در گرینستون‌های آهکی موجب کاهش کیفیت مخزنی در توالی‌های مورد مطالعه شده است، زیرا پس از انحلال قابل توجه در آلوکم‌ها سیمان‌های کلسیتی درون فضاهای خالی را پر کرده و کیفیت مخزنی را در این رخساره‌ها از بین برده است.

جدول ۵. میانگین حسابی، هندسی و انحراف معیار مقادیر تخلخل و تراوایی رخساره‌های شناسایی شده در توالی‌های دالان بالایی و کنگان.

Table 5. Arithmetic and geometric means as well as standard deviation of porosity and permeability values of the identified facies in the Upper Dalan and Kangan sequences.

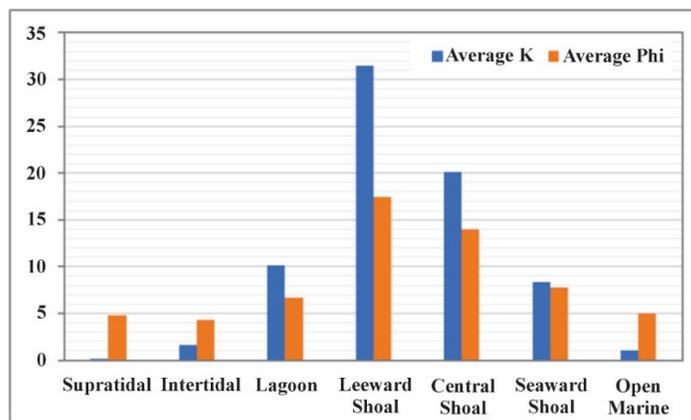
کد رخساره	میانگین تخلخل (%) (حسابی)	میانگین تخلخل (%) (هندسی)	انحراف معیار تخلخل	میانگین تراوایی (میلی دارسی) (حسابی)	میانگین تراوایی (میلی دارسی) (هندسی)	انحراف معیار تراوایی
MF1	۲/۹۱	۲/۷۱	۱/۲۴	۰/۹۰	۰/۰۶	۲/۰۷
MF2	فاقد داده					
MF3	۵/۴۶	۴/۴۹	۴/۶۹	۵/۵۴	۰/۱۸	۲۰/۶۴
MF4	۱۰/۸۴	۹/۱۹	۶/۲۳	۴۷/۲۲	۲/۲۱	۱۱۷/۹۵
MF5	۴/۲۶	۳/۶۱	۲/۸۲	۱/۶۵	۰/۱۳	۳/۲۰
MF6	۴/۷۰	۳/۹۹	۲/۹۶	۱/۷۵	۰/۰۹	۵/۰۲
MF7	۷/۶۷	۵/۸۸	۵/۷۴	۱۴/۶۰	۰/۲۵	۶۱/۶۱
MF8	۷/۷۱	۵/۷۷	۶/۳۳	۴۱/۰۷	۰/۳۰	۱۸۰/۴۴
MF9	۲۰/۰۷	۷/۶۸	۱۴۹/۵۸	۲۸/۹۱	۰/۲۰	۲۵۲/۶۲
MF10	۱۳/۳۲	۱۰/۳۸	۸/۸۶	۱۰/۵۲	۰/۱۸	۵۵/۲۸
MF11	۱۴/۶۳	۱۱/۷۵	۸/۴۵	۲۹/۸۸	۰/۶۶	۱۰۸/۱۲
MF12	۷/۷۸	۶/۴۶	۴/۸۸	۸/۳۵	۰/۲۶	۳۲/۳۹
MF13	۴/۹۶	۳/۴۴	۶/۴۲	۱/۰۶	۰/۰۴	۴/۶۹

نمودار ستونی مقادیر متوسط تخلخل و تراوایی به تفکیک زیرمحیط‌های رسوبی مختلف در سازندهای دالان بالایی و کنگان در چاه مورد مطالعه در شکل ۱۹ آورده شده است. همانگونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، بالاترین میزان تخلخل و تراوایی مرتبط با بخش رو به ساحل شول است که شامل رخساره‌های دانه‌پشتیبان پکستونی تا گرینستونی دارای فضاهای خالی قالبی، بین‌دانه‌ای،

درون‌دانه‌ای و بین‌بلوری می‌باشد. در این منطقه تخلخل‌های بین‌دانه‌ای و بین‌بلوری سبب ارتباط فضاهای خالی قالبی و درون‌دانه‌ای که تقریباً جدا هستند، می‌شود. به طور کلی در رخساره‌های پراورزی و دانه‌پشتیبان کمربند رخساره‌ای شول مقادیر بالای تخلخل و تراوایی مشاهده شده‌اند که در آن‌ها انحلال سبب ایجاد فضاهای خالی حفره‌ای و قالبی شده است. البته این رخساره‌ها ذاتاً از

متوسط تا خوبی برخوردار هستند. از سوی دیگر، رخساره‌های زیست‌آشفته و گل‌پشتیبان لاگونی و دریای باز عموماً کیفیت مخزنی چندانی ندارند.

مقادیر بالایی حفرات بین‌دانه‌ای برخوردار می‌باشند که حاکی از پتانسیل مخزنی خوب آن‌ها است. رخساره‌های دولومیتی‌شده پهنه جزرومدی نیز به واسطه گسترش دولومیت‌ها و بهبود تراوایی ناشی از آن، از کیفیت مخزنی



شکل ۱۹. نمودار ستونی مقادیر متوسط تخلخل و تراوایی در کمربندهای رخساره‌ای شناسایی شده در سازندهای دالان بالایی و کنگان در چاه مورد مطالعه

Fig. 19. Histogram of average porosity and permeability in various facies belts of the upper Dalan and Kangan formations in the studied well

تنوع کم رخساره‌ای، تبدیل تدریجی ریزرخساره‌ها به یکدیگر، فراوانی بالای رخساره‌های کم‌عمق به ویژه گسترش زیاد سابخا و نبود شاهدهی بر وجود نقطه شکست در شیب پلاتفرم نشان می‌دهد که سیستم رسوب‌گذاری توالی‌های مذکور در ناحیه شرقی خلیج فارس، به صورت پلاتفرم رمپ کربناته با شیب کم (رمپ هموکلینال) بوده است.

✓ محاسبه میانگین مقادیر تخلخل و تراوایی سنگ‌شناسی‌های شناسایی‌شده نشان می‌دهد که متخلخل‌ترین و تراواترین سنگ‌شناسی توالی‌های دالان بالایی و کنگان، مربوط به نمونه‌های دولومیتی است. به طور کلی، سنگ‌های دولومیتی یا دولومیت‌دار و رخساره شول که تشکیل‌دهنده حدود نیمی از توالی‌های مورد مطالعه هستند، بهترین وضعیت مخزنی را نیز نشان می‌دهند.

✓ نمودار تغییرات تخلخل - تراوایی نمونه‌های مورد مطالعه، بر مبنای بافت‌های رسوبی اولیه نشان می‌دهد که رخساره‌های با بافت گریستونی دارای مقادیر تخلخل و تراوایی متغیر می‌باشند. نمونه‌های گریستونی دارای مقادیر پایین تخلخل و تراوایی را می‌توان ناشی از فرآیندهای دیاژنزی سیمانی‌شدن

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با تلفیق نتایج مطالعات پتروگرافی و داده‌های تخلخل - تراوایی حاصل از آنالیز مغزه‌های حفاری در یک چاه از یکی از میادین واقع در بخش شرقی خلیج فارس به دنبال ارزیابی کنترل خصوصیات بافتی، سنگ‌شناختی و رخساره‌ای بر توزیع تخلخل و تراوایی در واحدهای مخزنی K1 تا K3 از سازندهای دالان بالایی و کنگان بوده‌ایم. مهم‌ترین نتایج حاصل شده از این مطالعه به شرح زیر می‌باشند:

- ✓ مطالعه رخساره‌های میکروسکوپی در میدان مورد نظر در توالی‌های دالان بالایی و کنگان منجر به شناسایی ۱۱ ریزرخساره کربناته و ۲ رخساره غیرکربناته در قالب پنج کمربند رخساره‌ای گردید که عبارتند از: کمربند رخساره‌ای بالای پهنه جزرومدی، کمربند رخساره‌ای بین جزرومدی، کمربند رخساره‌ای لاگون، کمربند رخساره‌ای پشته‌های زیرآبی کربناته که دارای سه زیر مجموعه بخش رو به ساحل پشته زیرآبی، بخش مرکزی پشته زیرآبی و بخش رو به دریای پشته زیرآبی است، و کمربند رخساره‌ای دریای باز.
- ✓ عدم حضور ساخت‌های بزرگ ریفی و گسترش نسبی پهنه‌های جزرومدی با رخساره‌های سدی الییدی،

- carbonate rocks. John Wiley & Sons, P.277. doi.org/10.1002/9780470370650.
- Alipour, M., Alizadeh, B., Mirzaie, S (2021) Tectono-stratigraphic evolution of the Permo-Triassic succession in the fars platform of Iran: Implications for future exploration of the Paleozoic petroleum system. *Journal of Asian Earth Sciences*, 221: art. no. 104945. doi.org/10.1016/j.jseae.2021.104945.
- Alsharhan, A. S (2006) Sedimentological character and hydrocarbon parameters of the Middle Permian to Early Triassic Khuff Formation, United Arab Emirates. *GeoArabia*, 11 (3): 121-158. doi.org/10.2113/geoarabia1103121.
- Bordenave, M. L (2008) The origin of the Permo-Triassic gas accumulations in the Iranian Zagros fold belt and contiguous offshore area: a review of the Paleozoic petroleum system. *Journal of Petroleum Geology*, 31: 3-42. doi.org/10.1111/j.1747-5457.2008.00405.x.
- Choquette, P. W., Pray, L. C (1970) Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *AAPG bulletin*, 54(2): 207-250.
- Dunham, R. J (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *AAPG, Tulsa*, 108-121. doi.org/10.1306/M1357.
- Enayati-Bidgoli, A (2016) Assessment of the role of diagenetic factors and sequence stratigraphy in controlling reservoir quality of the Upper Dalan-Kangan sequences, central and eastern regions of the Persian Gulf. Ph. D. Dissertation, University of Tehran (In Persian).
- Fallah-Baghtash, R., Jafarian, A., Husinec, A., Adabi, M. H (2020) Diagenetic stabilization of the Upper Permian Dalan Formation, Persian Gulf Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 189: 104144.
- Flügel, E (2010) *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*, second ed. Springer, Berlin, 984 pp. doi.org/10.1007/978-3-642-03796-2.
- Ghazban, F (2009) *Petroleum geology of the Persian Gulf*, second ed. University of Tehran press, 707pp.
- Haase, M. L., Aigner, T (2013) High-resolution anatomy of a grainstone package in Khuff Sequence KS4, Oman Mountains, Sultanate of Oman. *GeoArabia*, 18(4): 17-44. doi.org/10.2113/geoarabia180417.
- Hallock, P., Glenn, E. C (1986) Larger foraminifera: a tool for paleoenvironmental analysis of Cenozoic carbonate depositional facies. *Palaios*, 1: 55-64. doi.org/10.2307/3514459.
- Hammer, E., Mørk, M. B. E., Næss, A (2010) Facies controls on the distribution of diagenesis and compaction in fluvial-deltaic deposits. *Marine and Petroleum Geology*, 27(8): 1737-1751. doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.11.002.
- کلسیتی که منافذ را به طور کامل پوشانده‌اند و همچنین سیمانی شدن انیدریتی دربرگیرنده دانست. نمونه‌های گرینستونی با تخلخل و تراوایی عالی را می‌توان به حضور فضاهای خالی قالبی و بین‌دانه‌ای و فضاهای خالی ناشی از انحلال دولومیت نسبت داد.
- در رخساره‌های گل‌پشتیبان مادستون و وکستون توزیع اندازه حفرات تحت کنترل اندازه میکرایت و میزان فضاهای خالی بین‌ذره‌ای در گل است. نمونه‌های وکستونی دارای مقادیر تخلخل خوب را می‌توان به وجود فضاهای خالی بین‌بلوری در آن‌ها نسبت داد. همچنین نمونه‌هایی با تراوایی بالا، تحت تأثیر فرآیند شکستگی قرار گرفته‌اند.
 - رخساره‌های دانه‌پشتیبان گرینستون حاوی آنکوئید، پلوئید و اجزای اسکلتی (MF9) محیط پشت شول بهترین وضعیت تخلخل را نشان می‌دهند و فضاهای خالی بین‌دانه‌ای و قالبی غالب‌ترین نوع منافذ در این رخساره می‌باشد. بالاترین میزان تراوایی مرتبط با رخساره گل‌پشتیبان دولومادستون (MF4) می‌باشد که فضاهای خالی بین‌بلوری، نوع منفذی غالب در آن است.
- ### ۷- قدردانی
- از دانشگاه تهران برای فراهم کردن امکانات آزمایشگاهی جهت انجام این پژوهش قدردانی می‌شود. از شرکت ملی نفت ایران جهت در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز برای انجام این مطالعه قدردانی می‌شود. همچنین از سردبیر و داوران گرامی مجله رسوب‌شناسی کاربردی جهت ارائه نظرات ارزشمندشان تشکر می‌کنیم.
- ### References
- 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. doi.org/10.1016/j.petrol.2005.12.004.
- Adam, A., Swennen, R., Abdulghani, W., AbdImutalib, A., Hariri, M., Abdulraheem, A (2018) Reservoir heterogeneity and quality of Khuff carbonates in outcrops of central Saudi Arabia. *Marine and Petroleum Geology*, 89: 721-751.
- Ahr, W. M (2008) Geology of carbonate reservoirs: the identification, description and characterization of hydrocarbon reservoirs in

- Insalaco, E., Virgone, A., Courme, B., Gaillot, J., Kamali, M., Moallemi, A., Lotfpour, M., Monibi, S (2006) Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture. *GeoArabia*, 11: 74-176. doi.org/10.2113/geoarabial10275.
- Jafarian, A., Fallah-Baghtash, R., Mattern, F., Heubeck, B (2017) Reservoir quality along a homoclinal carbonate ramp deposit: The Permian Upper Dalan Formation, South Pars Field, Persian Gulf Basin. *Journal of Marine and Petroleum Geology*, 88(2): 587-604. doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.09.002.
- Kakemem, U., Cotton, L. J., Hadavand-Khani, N., Fallah-Baghtash, R., Thibault, N., Anderskov, K (2023) Litho- and biostratigraphy of the early Eocene larger benthic foraminifera-dominated carbonates of the central Tethys domain, Zagros Foreland Basin, SW Iran. *Sedimentary Geology*, 455(10): 106477. doi.org/10.1016/j.sedgeo.2023.106477.
- Karimi, H., Ghadimvand, N. K., Kangazian, A (2015) Sedimentary environment and sequence stratigraphy of the Kangan Formation in Kish Gas Field (Kish well A1 subsurface section). *Indian Journal of Science and Technology*, 8 (7): 655 - 663.
- Kashfi, M (1992) Geology of the Permian "Super-Giant" gas reservoirs in the greater Persian Gulf area. *Journal of Petroleum Geology*, 15(3): 465-480.
- Kashfi, M (2000) Greater Persian Gulf Permian-Triassic stratigraphic nomenclature requires study. *Oil and Gas Journal*, 6: 36-44.
- Koehler, B., Zeller, M., Aigner, T., Poeppelreiter, M., Milroy, P., Forke, H., Al-Kindi, S (2010) Facies and stratigraphic framework of a Khuff outcrop equivalent: Saiq and Mahil Formations, Al Jabal al-Akhdar, Sultanate of Oman. *GeoArabia*, 15(2): 91-156. doi.org/10.2113/geoarabial150291.
- Lucia, F. J (2007) Carbonate Reservoir Characterization. An Integrated Approach, 181-215. doi.org/10.1007/s13202-020-00946-w.
- Mancini, E. A., Blasingame, T. A., Archer, R., Panetta, B. J., Llinás, J. C., Haynes, C. D., Benson, D. J (2004) Improving hydrocarbon recovery from mature oil fields producing from carbonate facies through integrated geoscientific and engineering reservoir characterization and modeling studies, Upper Jurassic Smackover Formation, Womack Hill Field (Eastern Gulf Coast, USA). *AAPG Bulletin*, 88: 1629-1651. doi.org/10.1306/06210404037.
- Mehrabi, H., Mansouri, M., Rahimpour-Bonab, H., Tavakoli, V., Hassanzadeh, M (2016) Chemical compaction features as potential barriers in the Permian-Triassic reservoirs of southern Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 145: 95-113.
- Mehrabi, H., Rahimpour-Bonab, H., Enayati-Bidgoli, A., Esrafil-Dizaji, B (2015) Impact of contrasting paleoclimate on carbonate reservoir architecture: Cases from arid Permo-Triassic and humid Cretaceous platforms in the south and southwestern Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 126(7): 262-283. doi.org/10.1016/j.petrol.2014.12.020.
- Naderi-Khujin, M., Tavakoli, V (2023) Composition, environment, and economic value of the Permian to Cretaceous coated grains from Zagros and the Persian Gulf. *International Journal of Sediment Research*, 38(3): 316-334. doi.org/10.1016/j.ijsrc.2022.12.004.
- Rahimpour-Bonab, H (2007) A procedure for appraisal of a hydrocarbon reservoir continuity and quantification of its heterogeneity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 58(1-2): 1-12. doi.org/10.1016/j.petrol.2006.11.004.
- 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.
- Rahimpour-Bonab, H., Esrafil-Dizaji, B., Tavakoli, V (2010) Dolomitization and anhydrite precipitation in Permo-Triassic carbonates at the South Pars Gas Field, offshore Iran: controls on reservoir quality. *Journal of Petroleum Geology*, 33(1): 43-66. doi.org/10.1111/j.1747-5457.2010.00463.x.
- Rezaei, M (2018) Comparison of permeability estimation methods and influential indicators in the Dalan and Kangan hydrocarbon reservoirs in the central part of the Persian Gulf. Master's Thesis, University of Tehran (In Persian).
- Sabouhi, M., Wood, D. A., Mollajan, A., Naghavi-Azad, M (2024) Tectono-sedimentary evolution of prolific Permo-Triassic petroleum reservoirs offshore Iran: Insights from seismic stratigraphy. *Geoenergy Science and Engineering*, 242: art. no. 213217. doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213217.
- Sarg, J (2001) The sequence stratigraphy, sedimentology, and economic importance of evaporite-carbonate transitions: a review. *Sedimentary Geology*, 140 (1-2): 9-34. doi.org/10.1016/S0037-0738 (00)00170-6.
- Sharland, P., Archer, R., Casey, D., Davies, R., Hall, S. H., Heward, A., Horbury, A., Simmons, M (2001) Arabian plate sequence stratigraphy. *GeoArabia Special Publication*, 2: 371.
- Slowakiewicz, M., Mikolajewski, Z (2011) Upper Permian Main Dolomite microbial carbonates as potential source rocks for hydrocarbons (W Poland). *Marine and Petroleum Geology*, 28(8): 1572-1591.

- Soleimani, A., Tavakoli, V (2024) Deep Dive into the factors influencing acoustic velocity in the Dalan-Kangan formations, the central Persian Gulf. *Journal of Geoenery Science and Engineering*, 235 (3-4): 212739. doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212739.
- Stampfli, G. M (2000) Tethyan oceans. Geological society, London, special publications, 173(1): 1-23. doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.173.01.01.
- Taghizade-Mosenn, M., Dehghanian, M., Masoumi, H (2023) Biostratigraphy of Upper Permian-Lower Triassic Reservoir Units in one of the South Pars Field wells. *Annales de Paleontologie*, 109 (3): art. no. 102630. doi.org/10.1016/j.annpal.2023.102630.
- Tavakoli, V., Jamalian, A (2019) Porosity evolution in dolomitized Permian-Triassic strata of the Persian Gulf, insights into the porosity origin of dolomite reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 181: 106-191. doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106191.
- Tavakoli, V., Rahimpour-Bonab, H., Esrafil-Dizaji, B (2011) Diagenetic controlled reservoir quality of South Pars Gas Field, an integrated approach. *Comptes Rendus Geoscience*, 343(1): 55-71. doi.org/10.1016/j.crte.2010.10.004.
- Tiab, D., Donaldson, E. C (2012) *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*, third ed. Gulf Pub., Houston, ISBN 9780123838483. doi.org/10.1016/C2009-0-64503-7.
- Tucker, M., Wright, V (1990) *Carbonate sediments and limestones: constituents. Carbonate Sedimentology*. Blackwell, Oxford: 1-27. doi.org/10.1002/9781444314175.
- Warren, J. K (2006) *Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons*. Springer Science & Business Media. doi.org/10.1007/3-540-32344-9.
- Warren, J. K., Kendall, C. G. S. C (1985) Comparison of sequences formed in marine sabkha (subaerial) and salina (subaqueous) settings—modern and ancient. *AAPG bulletin*, 69(6): 1013-1023. doi.org/10.1306/AD462B46-16F7-11D7-8645000102C1865D.
- Wilson, J. L (1975) *Carbonate Facies in Geologic History*. Springer-Verlag, 471 pp. doi.org/10.1007/978-1-4612-6383-8.
- Ziegler, M. A (2001) Late Permian to Holocene paleofacies evolution of the Arabian Plate and its hydrocarbon occurrences. *GeoArabia*, 6 (3): 445-504. doi.org/10.2113/geoarabia0603445.

Controls of depositional facies on porosity–permeability distribution in the Upper Dalan and Kangan formations in a field in the eastern Persian Gulf

S. Karami¹, V. Tavakoli^{*2} and H. Mehrabi³

1- M. Sc., student. School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Assoc. Prof., School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Assist. Prof., School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

* vtavakoli@ut.ac.ir

Received: 2024.9.23 Accepted: 2024.12.8

Abstract

The Permian-Triassic sedimentary sequences in the Persian Gulf host some of the world's largest gas reserves. The distribution of reservoir properties in these reservoirs is significantly controlled by sedimentary (primary) factors such as textural, lithological, and facies variations. This study, by integrating various petrographic data from core samples and thin sections, along with porosity and permeability data obtained from core analyses of a well in one of the eastern fields of the Persian Gulf, aims to evaluate the control of these factors on the distribution of porosity and permeability in reservoir units K1 to K3 of the Upper Dalan and Kangan formations. Facies analysis led to the identification of 13 microfacies, which grouped into five facies belts, representing a homoclinal ramp-type carbonate platform. The analysis of sedimentary textures, lithological variations, and sedimentary microfacies from the perspective of porosity and permeability distribution data indicates a close correlation between them. A significant portion of these correlations is due to the preservation of reservoir potential in the facies, and many diagenetic processes are directly or indirectly influenced by textural and facies characteristics. Dolomitic or dolomite-bearing rocks with shoal facies, which made up about half of the studied sequences, exhibit the best reservoir quality. Grain-supported grainstone facies containing ooids, peloids, and skeletal fragments from the back-shoal environment show the best porosity, with intergranular and moldic pores being the dominant types in these facies. The highest permeability is associated with mud-supported dolomudstone facies, where intercrystalline pores are the dominant type.

Keywords: Reservoir quality, Sedimentary environment, Permian-Triassic, Dolomitization, Carbonate Ramp

Introduction

Reservoir quality in carbonate rocks is controlled by three main factors: facies, diagenesis, and fracturing. Since sedimentary facies are considered the primary and most important factor controlling reservoir potential in many carbonate reservoirs worldwide, especially in the Middle East, studying the influence of facies characteristics on the distribution of parameters such as porosity and permeability in these reservoirs is of particular importance. The Upper Dalan (Upper Permian) and Kangan (Lower-Middle Triassic) carbonate-evaporite formations, along with their stratigraphic equivalents in neighboring countries, host the world's largest gas reserves. These sequences in southern Iran and the Persian Gulf account for about 18% of the world's gas resources. Most previous studies on the Upper Dalan and Kangan formations

have focused on the central Persian Gulf, particularly the South Pars gas field, and have examined these formations from various geological, reservoir, and petrophysical aspects. Despite these studies, no comprehensive research has specifically investigated the control of facies characteristics on reservoir quality in the eastern Persian Gulf region. This study aims to integrate geological data, core and thin-section analysis, and porosity and permeability data to evaluate the control of facies characteristics and lithological changes on the distribution of porosity and permeability in the Upper Dalan and Kangan reservoirs in one of the fields in the eastern Persian Gulf. The results of this study can help achieve a better understanding of the reservoir characteristics of these sequences and their controlling factors in the

eastern Persian Gulf, serving as a foundation for future reservoir and petrophysical studies.

Data and Methods

In this study, data from thin-section microscopy, cores, and petrophysical information from a single well were utilized. The K1 and K2 units of the Kangan Formation and the K3 unit of the Upper Dalan Formation were examined. The cores of these units, with a thickness of 247.25 meters, were subjected to geological and reservoir evaluations. To determine the reservoir characteristics of the studied sequences, three horizontal plugs perpendicular to the core axis and one vertical plug along the core axis were taken from each meter of the core. The porosity of the prepared plug samples was measured using Boyle's law, and permeability was measured using Darcy's law. From each plug sample, a thin section was prepared and examined under a polarizing microscope. A total of about 963 thin-section samples were microscopically studied. Additionally, 842 porosity data points and 836 permeability data points were used for reservoir evaluations. In this study, lithological characteristics, texture (based on the Dunham classification, 1962), sedimentary facies and depositional environment (based on the standard models of Wilson, 1975, and Flügel, 2010), and types of porosity (based on the Choquette and Pray classification, 1970) were determined. Finally, by plotting frequency diagrams and interpreting all the results, the impact of various factors on the reservoir characteristics of the facies was identified.

Results and Discussion

1- Facies analysis

The microscopic facies study of the Upper Dalan and Kangan sequences in the field under investigation led to the identification of 11 carbonate microfacies and 2 non-carbonate facies, grouped into five facies belts, which are described and interpreted in detail in the results section:

1. Supratidal facies belt
2. Intertidal facies belt
3. Lagoonal facies belt
4. Carbonate subtidal shoal facies belt, consisting of three subzones: shoreward side of the subtidal shoal, central part of the subtidal shoal, and seaward side of the subtidal shoal.
5. Open marine facies belt

Based on the facies interpretations provided, the first four facies' belts—except for the seaward side of the subtidal shoal, which belongs to the mid-ramp—are developed within the inner ramp. The fifth facies belt is distributed within the mid-ramp and outer ramp. The absence of large reef structures, the relative expansion of tidal flats with oolitic barrier facies, the low diversity of facies, the gradual transition between microfacies, the high abundance of shallow-water facies, especially the extensive development of sabkha, and the lack of evidence for a platform slope break all indicate that the depositional system of these sequences in the eastern Persian Gulf region represents a carbonate ramp with a low slope (homoclinal ramp).

2- Lithological variations

Based on observations, the Upper Dalan and Kangan formations exhibit various lithologies, including limestone, dolomite, anhydrite, and a minor amount of clastics, which have been omitted from the calculations due to their negligible quantity. The calculation of the average porosity and permeability values of the identified lithologies indicates that the most porous and permeable lithology in the Upper Dalan and Kangan sequences is dolomite.

In general, dolomitic or dolomite-bearing rocks with shoal facies, which constitute about half of the studied sequences, exhibit the best reservoir quality. To assess the impact of dolomitization on the reservoir quality of the studied units, a porosity-permeability plot of dolomitic and limestone samples has been created. Dolomitization has resulted in a closer relationship between porosity and permeability (homogenization of the pore system), suggesting that at least part of the porosity and permeability status in the studied sequences has been influenced by this process. Most dolomites with primary grain-supported textures have good reservoir quality and form reservoir layers. In these facies, dolomitization of allochems has preserved intergranular porosity. On the other hand, grain-supported dolomitic facies in which anhydrite cement acts as a pore-filling and enclosing agent have lower reservoir quality.

In mud-supported facies, dolomitization has established connections between existing matrix pores and increased permeability. Additionally, the presence of fractures in these samples has significantly enhanced reservoir quality. Overall, the porosity and permeability

of the dolomitic rock groups are higher than those of the limestone samples. However, this does not mean that diagenetic processes have not occurred in the limestone samples. In many limestone sections of the Dalan and Kangan sequences, various diagenetic features, such as moldic, vuggy pores, and types of calcite cements, are clearly visible, and even subsequent dolomitization has not entirely erased them. Thus, the impact of diagenetic processes on reservoir quality is evident through the porosity and permeability data of the studied samples from the Upper Dalan and Kangan sequences.

3- Depositional texture

The porosity-permeability variation plot for the studied samples, based on identified primary sedimentary textures, reveals that grainstone facies exhibit variable porosity and permeability values. Grainstone samples with low porosity and permeability are primarily influenced by diagenetic processes, such as calcite cementation, which completely filled the pores, and the enclosing anhydrite cement, which significantly reduced reservoir quality. Grainstone samples with high porosity and permeability can be attributed to the presence of moldic and intergranular porosity, as well as dissolution-induced voids created by dolomitization. Additionally, samples that are fully dolomitized and exhibit medium to large dolomite crystals show high reservoir quality due to the formation of intercrystalline porosity. Packstone samples with high porosity and permeability are influenced by fracturing processes and the preservation of primary intergranular porosity. Moldic and intergranular porosity types are dominant in these samples. On the other hand, packstone samples enclosed by anhydrite cement, which have undergone extensive diagenetic calcite and anhydrite cementation, exhibit lower porosity and permeability due to pore closure. In general, the permeability of packstone samples does not differ significantly from that of grainstones, but porosity in packstones is much lower than in grainstones. This is due to the presence of packstone samples with low porosity but high permeability, or grainstone samples with high porosity but low permeability. Dissolution in grainstones, leading to the formation of moldic porosity, can increase porosity. However, since there is limited connectivity between these pores, the permeability in these samples is similar to that

in packstones. In mud-supported wackestone and mudstone facies, pore size distribution is controlled by micrite size and the amount of interparticle porosity in the matrix. Wackestone samples with high porosity can be attributed to the presence of intercrystalline porosity. Samples with high permeability are often affected by fractures. In contrast, samples with reduced porosity and permeability display an increase in anhydrite nodules and stylolites. Initial permeability in wackestones is lower than in packstones, likely due to the reduced potential for fluid circulation in wackestones.

4- Controls of depositional facies on reservoir properties

The average values of porosity and permeability for the identified facies in the Upper Dalan and Kangan formations in the studied field in the eastern part of the Persian Gulf reveal interesting trends. The grain-supported grainstone facies (MF9), which is rich in oncoids, peloids, and skeletal components, represents the back-shoal environment. This facies shows the highest porosity due to the prevalence of intergranular and moldic porosity, making it the best reservoir-quality facies in terms of porosity.

On the other hand, the mud-supported dolomudstone facies (MF4), which has undergone extensive dolomitization, exhibits the highest permeability. This is attributed to the enhanced connectivity between pore throats, with intercrystalline porosity being the dominant type. The porosity-permeability variation graph for the Upper Dalan and Kangan formations, based on the identified facies, indicates a significant spread in porosity and permeability values, especially in facies with inherently high reservoir quality, such as grainstones. This wide distribution reflects the varying effects of diagenetic processes (both primary, secondary, and burial diagenesis) that either improve or degrade the reservoir quality within a single facies.

Grainstones, characterized by a grain-supported fabric, show that grain size directly controls the size of pore spaces. However, cementation by anhydrite and calcite cements in the grainstone facies significantly reduces reservoir quality in the studied sequences. Following the dissolution of allochems, calcite cements filled the pores, further degrading the reservoir potential of these facies.

This study highlights the importance of both depositional and diagenetic controls in

evaluating reservoir quality, especially in complex carbonate systems like the Upper Dalan and Kangan formations, where dolomitization and cementation processes play a crucial role in shaping porosity and permeability distribution.

Conclusions

In this research, we aimed to evaluate the influence of textural, lithological, and facies characteristics on the distribution of porosity and permeability in the reservoir units K1 to K3 of the Upper Dalan and Kangan formations, using a combination of petrographic studies and porosity-permeability data from core analyses of a well in one of the fields located in the eastern part of the Persian Gulf. The key findings of this study are as follows:

- Microfacies Analysis: The study of microscopic facies in the Upper Dalan and Kangan formations led to the identification of 11 carbonate microfacies and 2 non-carbonate facies, categorized into five facies belts: Upper intertidal facies belt, Intertidal facies belt, Lagoonal facies belt, Carbonate submarine ridge facies belt, which has three subunits: shoreward, central, and seaward parts of the ridge, Open marine facies belt.
- Sedimentary System Characteristics: The absence of large reef structures and the relative expansion of intertidal zones with oolitic barrier facies, low facies diversity, gradual transition of microfacies, a high abundance of shallow facies (especially extensive sabkha), and lack of evidence for a break point in the platform slope indicate that the sedimentary system of the studied sequences in the eastern Persian Gulf represents a low-slope carbonate ramp (homoclinal ramp).
- Reservoir Quality: The average porosity and permeability values of the identified lithologies indicate that the most porous and permeable lithology in the Upper Dalan and Kangan

sequences is the dolomitic samples. Generally, dolomitic or dolomite-bearing rocks with shoal facies, constituting about half of the studied sequences, exhibit the best reservoir characteristics.

- Porosity-Permeability Trends: The porosity-permeability variation graph for the studied samples, based on primary sedimentary textures, shows that grainstone facies have variable porosity and permeability values. Samples with low porosity and permeability can be attributed to diagenetic processes, such as calcite cementation that fully occludes pores and anhydrite cementation. In contrast, grainstone samples with high porosity and permeability are likely due to the presence of moldic and intergranular porosity and void spaces resulting from dolomite dissolution.

- Mud-supported Facies Analysis: In the mud-supported marlstone and wackestone facies, the distribution of pore sizes is controlled by the size of micrite and the amount of interparticle porosity in the mud. Wackestone samples with high porosity can be attributed to intercrystalline porosity, while high permeability samples are influenced by fracturing processes.

- Best Reservoir Quality: The grain-supported grainstone facies (MF9), containing oncoids, peloids, and skeletal components, exhibit the best porosity characteristics, with intergranular and moldic porosity being the predominant types. The highest permeability is associated with the mud-supported dolomudstone facies (MF4), where intercrystalline porosity is the dominant type.

These findings emphasize the intricate relationships between depositional environments, diagenetic processes, and the resulting reservoir characteristics within the carbonate formations of the eastern Persian Gulf.