

تلفیق مطالعات پتروگرافی و پتروفیزیکی به منظور ارزیابی کیفیت مخزنی سازند ایلام در یکی از میادین واقع در شرق خلیج فارس

فرزاد نادری قمبوانی^۱، حمزه مهرابی^{۲*} و سیدمحمد زمان‌زاده^۳

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

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

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

نویسنده مسئول: mehrabi.hamze@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۲/۳۰ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۱۰

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

سازند ایلام یکی از مخازن مهم هیدروکربوری در میادین واقع در خلیج فارس به شمار می‌رود. مطالعه‌ی حاضر به ارزیابی عوامل کنترل‌کننده‌ی کیفیت مخزنی این سازند در یکی از میادین واقع در بخش شرقی خلیج فارس پرداخته است. برای این منظور از تلفیق نتایج مطالعات رسوب‌شناسی با تحلیل‌های پتروفیزیکی استفاده شده است. مطالعات پتروگرافی نشان داد که سازند ایلام در میدان مورد مطالعه از هشت ریزرخساره‌ی رسوبی تشکیل شده است که به ترتیب در زیرمحیط‌های درونی، میانی و بیرونی یک پلاتفرم کربناته از نوع رمپ نهشته شده‌اند. فرآیندهای دیاژنزی اثرگذار بر این سازند شامل میکرایتی شدن، سیمانی شدن، زیست آشفستگی، فشردگی مکانیکی و شیمیایی، دولومیتی شدن، نوشکلی و پیریتی شدن می‌باشند که در قلمروهای دریایی و تدفینی کم عمق تا عمیق رخ داده‌اند. انواع منافذ موجود در این سازند در سه مقیاس بزرگ، متوسط و کوچک تفکیک گردیده و مشخص شد که ریزتخلخل‌های قابل مشاهده در تصاویر میکروسکوپ الکترونی نقش بسزایی در بالابردن ظرفیت ذخیره‌ی این سازند، بخصوص در بخش پایینی آن داشته‌اند. تفاسیر چینه‌نگاری سکansı نشان داد که کل توالی سازند ایلام از یک سکانس رده سوم (متشکل از یک سیستم ترک‌ت پیشرونده و یک سیستم ترک‌ت پسرونده) تشکیل شده است. علاوه بر این، ۳ سکانس رده چهارم نیز شناسایی شدند. تحلیل‌های کیفیت مخزنی بر اساس روش تعیین واحدهای جریان‌های هیدرولیکی و زون بندی لورنز به ترتیب منجر به تفکیک ۸ واحد جریان‌ی و ۱۰ زون مخزنی، تله ای و سدی در سازند ایلام شد. این واحدهای جریان‌ی و زون‌های مخزنی در چارچوب چینه‌نگاری سکansı مورد ارزیابی قرار گرفتند و مشخص شد که بخش پایینی سازند ایلام (سیستم ترک‌ت پیشرونده سکانس رده سوم) دارای ظرفیت ذخیره‌ی بالا و ظرفیت جریان پایین بوده و می‌تواند بعنوان یک مخزن نامتعارف از نوع کربنات کم‌تراوا مد نظر قرار گیرد. بخش میانی این سازند (اطراف سطح بیشینه سیلابی) کیفیت مخزنی چندانی ندارد و بخش بالایی این سازند (سیستم ترک‌ت پسرونده) با غلبه‌ی رخساره‌های شول و وقوع انحلال جزئی از کیفیت بالایی برخوردار است.

واژگان کلیدی: سازند ایلام، رخساره، دیاژنز، واحد جریان‌ی، زون بندی مخزنی، خلیج فارس

۱- پیشگفتار

رحیم‌پوربناب و همکاران، ۲۰۱۲ الف و ب؛ مور و واد، ۲۰۱۳). خصوصیات پتروفیزیکی از اهمیت بسزایی در مطالعات مخزنی برخوردارند و در صورت مرتبط شدن به خصوصیات زمین‌شناختی (فابریک سنگی) قابلیت مدل‌سازی سه‌بعدی خواهند داشت (آر، ۲۰۰۸). لذا ضروری است تا ابتدا خصوصیات فابریک سنگ (رخساره، دیاژنز، نوع حفرات) در مخازن مشخص شده و به پارامترهای پتروفیزیکی (لاگ‌ها، تخلخل و تراوایی) مرتبط گردند (لوسیا، ۲۰۰۷). تجمعات ضخیم رسوبات به سن

مطالعات پتروگرافی اولین و ضروری‌ترین قدم در ارزیابی کیفیت مخزنی مخازن هیدروکربوری است (لوسیا، ۲۰۰۷). تمامی ویژگی‌های مخزنی (استاتیک و دینامیک) توالی‌های کربناته برآیندی از عوامل رسوبی و تغییرات بعد از رسوب‌گذاری (دیاژنزی) و شکستگی است (آر، ۲۰۰۸). محیط‌های رسوبی و دیاژنزی مختلف تعیین‌کننده مقدار و نوع تخلخل، هندسه‌ی گلوگاه‌های تخلخل، توزیع اندازه حفرات و تراوایی می‌باشند (گومز و همکاران، ۲۰۰۸؛

که طی سالیان اخیر با انجام حفاری‌ها و مغزه‌گیری‌های جدید، تا حدود زیادی این محدودیت مرتفع گردیده است. مطالعه حاضر دنبال آن است تا با استفاده از داده‌های جدید بدست آمده از مخزن ایلام و با تلفیق نتایج مطالعات پتروگرافی و پتروفیزیکی به ارزیابی توزیع خصوصیات مخزنی در این سازند، در یکی از میداین واقع در بخش شرقی خلیج فارس بپردازد (شکل ۱). نتایج این مطالعه در بدست آوردن درک درستی از عوامل کنترل کننده کیفیت مخزنی سازند ایلام در این ناحیه کمک شایانی خواهد کرد و بعنوان یک مطالعه‌ی پایه برای اهداف آتی بهره‌برداری و توسعه برداشت از این مخزن مورد استفاده خواهد بود.

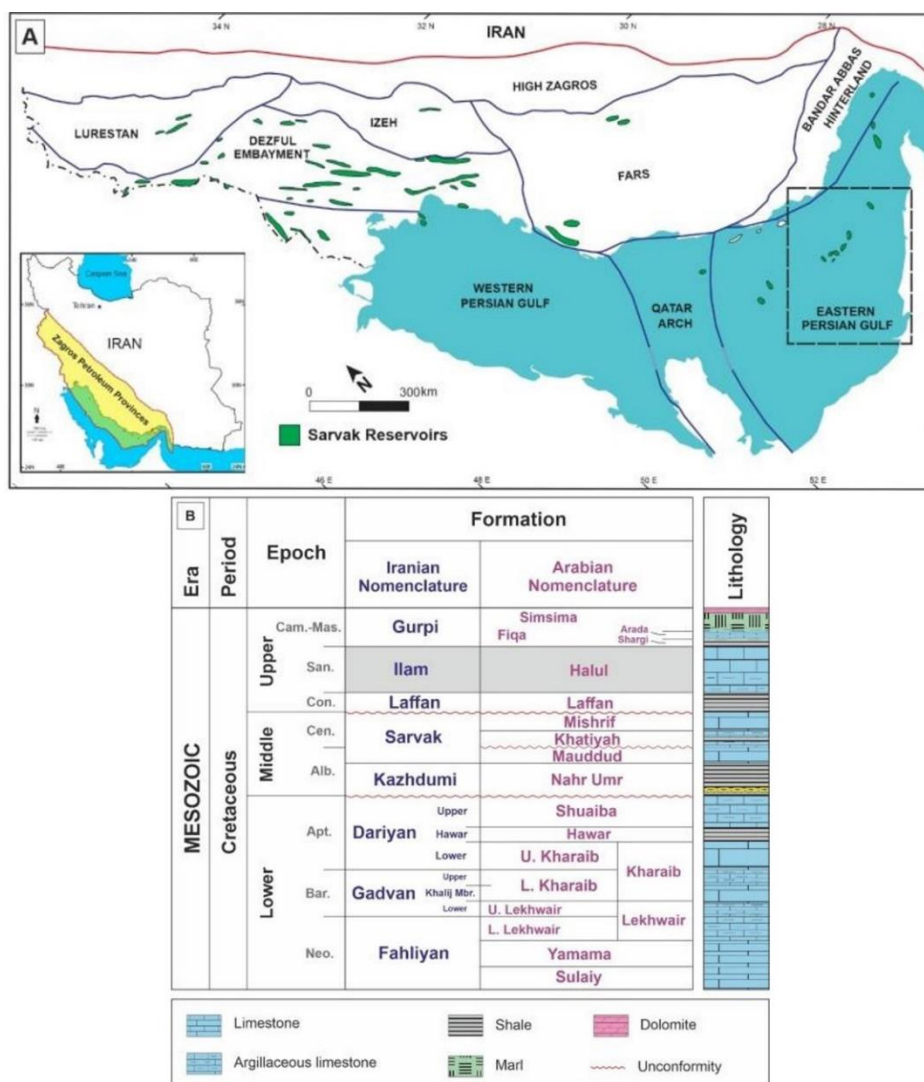
۲- زمین‌شناسی منطقه و چینه‌شناسی

در طول سنومانین- کامپانین، ناحیه زاگرس در حاشیه شمال شرقی صفحه عربی، در عرض جغرافیایی دیرینه استوایی در نیمکره شمالی با یک دیرینه اقلیم گرمسیری و مرطوب قرار داشته است (هوبر و همکاران، ۲۰۰۲؛ هی، ۲۰۰۸). در این زمان، تغییر عمده‌ای در رژیم زمین‌ساختی حاشیه شمال شرقی این صفحه رخ داده است که شامل گذار از حاشیه غیرفعال کششی به حاشیه فعال با رژیم غالب فشارشی است که نشان‌دهنده‌ی فاز اولیه بسته شدن اقیانوس نئوتتیس می‌باشد (علوی، ۲۰۰۴؛ فرضی‌پور ساین و همکاران، ۲۰۰۹؛ معدنی‌پور و همکاران، ۲۰۲۴). این امر منجر به فرورانش، فرارانش و ایجاد حوضه فورلند، فعال شدن مجدد گسل‌های پی سنگی و دی‌پایریسم نمک در نقاط مختلف حوضه‌ی زاگرس شد (علوی، ۲۰۰۴). این تغییر چشمگیر رژیم زمین‌ساختی در اواخر سنومانین رخ داده و تا میوسن ادامه داشته است (علوی، ۲۰۰۴؛ احمدهادی و همکاران، ۲۰۰۷). بر این اساس، ریخت‌شناسی سکوه‌های کربناته کنیاسین- سانتونین (سازند ایلام) توسط اثرات توام با یکدیگر تکتونیک و نوسانات سطح دریا کنترل شده است (ون‌بوخم و همکاران، ۲۰۱۰؛ رحیم‌پوربناب و همکاران، ۲۰۱۲؛ مهرابی و همکاران، ۲۰۱۴). در دوره‌ی کرتاسه سطح آب دریا در بالاترین حالت خود در طول تاریخچه‌ی زمین بوده است، که همین مسئله منجر به گسترش وسیع پلت‌فرم‌های کربناته در حاشیه قاره‌ها (فلات قاره) شده است (نویدطلب و همکاران، ۲۰۱۹). این توالی‌های ضخیم و گسترده‌ی کربناته، مخازن نفتی متعدد و مهمی را در بسیاری از

کرتاسه در پلاتفرم عربی و حوضه زاگرس در برگزیده ذخایر هیدروکربنی فوق‌عظیم و بسیار مهم از نظر اقتصادی است (الشهران، ۲۰۱۴). سازند ایلام (کنیاسین- سانتونین) یکی از مخازن مهم گروه بنگستان می‌باشد که به طور عمده از سنگ‌های کربناته تشکیل شده است (مهرابی و همکاران، ۲۰۱۴). این سازند تاکنون موضوع مطالعات مختلفی در نواحی مختلف زاگرس و خلیج‌فارس بوده است. به طور مثال، باقرپور و همکاران تاثیر تکتونیک و یوستازی را بر محیط رسوبی و توزیع رخساره‌های سازند ایلام را در حوضه زاگرس و منطقه فارس مطالعه کردند (باقرپور و همکاران، ۲۰۲۱). آدابی و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی ریزرخساره‌ها (میکروفاسیس) و ژئوشیمی سازند ایلام در منطقه تنگ رشید ایزه در جنوب غرب ایران پرداختند. مهرابی و همکاران (۲۰۱۴) سازند ایلام را دیدگاه رخساره‌ها، دیاژنز و سکناس در بخش‌های مرکزی و جنوبی فروافتادگی دزفول بررسی کردند. خانجانی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی محیط‌رسوبی، دیاژنز و چینه‌نگاری سکناسی سازند ایلام در میدان نفتی سیری الوند پرداختند. خانجانی و همکاران (۱۳۹۳) با تلفیق خصوصیات رخساره-ای و لرزه‌نگاری به ارزیابی افق‌های مخزنی سازند ایلام در یکی از میداین شرق خلیج‌فارس پرداختند. جهادگر و همکاران (۱۳۹۹) نقش ساختارهای تکتونیک را در چگونگی توزیع هیدروکربن در سازندهای سروک و ایلام با استفاده از منطق فازی در ناحیه بندرعباس مورد مطالعه قرار دادند. این ناحیه به لحاظ پتانسیل اکتشافی در افق‌های مخزنی سروک و ایلام به عنوان یک منطقه با قابلیت نسبتاً ضعیف شناسایی شد. جویباری و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی نقش ریزرخساره‌ها، شرایط ته‌نشینی و دیاژنز بر کیفیت مخزنی سازند ایلام در یکی از میداین جنوب باختری ایران، در فروافتادگی دزفول پرداختند. عباسپور و همکاران (۱۴۰۱) به بازسازی محیط‌رسوبی، تاریخچه دیاژنزی و کیفیت مخزنی سازند ایلام در یکی از میداین نفتی ناحیه لرستان، باختر ایران پرداختند. به طور کلی در منطقه‌ی خلیج‌فارس به خصوص بخش شرقی خلیج‌فارس تا به امروز مطالعات محدودی از دیدگاه‌های مختلف زمین‌شناختی، پتروفیزیکی، ژئوفیزیکی و مخزنی بر روی مخازن مختلف هیدروکربوری انجام گرفته است. دلیل این امر محدودیت داده‌های مغزه از این ناحیه بوده

گروه آروما در کشور عربستان، سازندهای خصیب و موتربیا در کشورهای عراق و کویت و سازندهای لافان و هلول در کشور قطر اشاره کرد (خدایی و همکاران، ۲۰۲۱). سازند ایلام به سن کنیاسین تا کامپانین زیرین می‌باشد که از سنگ‌آهک‌های تمیز تا رسی تشکیل شده است (مهرابی و همکاران، ۲۰۲۳). در بخش شرقی خلیج فارس در چاه مورد مطالعه، این سازند عمدتاً از سنگ‌های آهکی ریز بلور سفید تا خرمایی، تا حدی گچی، دارای فسیل با آثار پیریت و چرت تشکیل شده است. قسمت زیرین سازند ایلام در این میدان توسط شیل لافان از سازند میشریف (بخش بالایی سازند سروک) جدا می‌شود. در قسمت بالای سازند ایلام، سازند گورپی قرار دارد (شکل ۱).

مناطق از جمله کمر بند چین خورده‌ی زاگرس و خلیج فارس ایجاد کرده‌اند (زیگلر، ۲۰۰۱). میدان مورد مطالعه در ناحیه‌ی شرقی خلیج فارس قرار گرفته است و محدوده مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. خلیج فارس یک حوضه پیش‌بوم است که در دوران سنوزوئیک پسین در جلوی کمر بند چین خورده - رانده زاگرس شکل گرفته است (اورنگ و همکاران، ۲۰۱۸). در این ناحیه، توالی‌های رسوبی کرتاسه نظیر سازندهای سروک و ایلام (معروف به مخازن بنگستان)، بخش قابل توجهی از ذخایر هیدروکربوری را در خود جای داده‌اند. نام سازند ایلام از شهرستان ایلام واقع در باختر ایران اقتباس شده است (مطیعی، ۱۹۹۳؛ مهرابی و همکاران، ۲۰۱۴). از معادل‌های این سازند در کشورهای همجوار می‌توان به بخش زیرین



شکل ۱. A) نقشه موقعیت میدان نفتی مورد مطالعه در جنوب شرقی خلیج فارس و B) ستون چینه‌شناسی سنگ‌های رسوبی کرتاسه در جنوب شرقی خلیج فارس.

Fig. 1. A) Location map of the studied field in the SE Persian Gulf. B) Stratigraphic column of Cretaceous strata in the study area.

۳- داده‌ها و روش‌های مطالعه

مطالعه‌ی حاضر بر روی سازند ایلام در یک چاه از یکی از میادین نفتی واقع در جنوب شرق خلیج فارس صورت گرفته است. ضخامت کل سازند ایلام در این چاه ۱۱۲/۵۸ متر بوده و از کل آن مغزه‌گیری انجام شده است. مهم‌ترین داده‌های در دسترس عبارتند از: مقاطع نازک میکروسکوپی، مغزه‌های حفاری، داده‌های لاگ‌های چاه پیمایی، داده‌های تخلخل و تراوایی به دست آمده از آنالیز معمول مغزه و تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM). تعداد ۳۴۰ داده تخلخل و تراوایی مغزه برای تعیین واحدهای جریانی و زون‌بندی مخزنی استفاده شده است. همچنین مطالعات پتروگرافی جهت شناسایی ویژگی‌های رسوبی و دیاژنزی که بر روی مخزن اثرگذار بوده‌اند بر روی تعداد ۳۷۰ مقطع نازک تهیه شده از مغزه‌های حفاری انجام گردید. مطالعات میکروسکوپ الکترونی بر روی ۱۵ نمونه صورت گرفته است. برای نام‌گذاری رخساره‌ها از طبقه‌بندی دانهام (۱۹۶۲)، تقسیم‌بندی ریزرخساره‌ها از طبقه‌بندی فلوگل (۲۰۱۰) و مدل استاندارد فلوگل، برای چینه‌نگاری سکانسی از روش پیشرونده-پسرونده (امری، ۲۰۰۲)، برای تفکیک واحدهای مخزنی و غیرمخزنی از چهار روش برای تعیین گونه‌های سنگی مخزن سازند ایلام در چاه مورد مطالعه استفاده شده است:

گونه‌های سنگی پتروگرافی: از تلفیق نتایج مطالعات رخساره‌ای و دیاژنزی و با در نظر گرفتن نوع غالب حفرات و مقادیر تخلخل و تراوایی، گونه‌های سنگی پتروگرافی تعریف شده‌اند (مهرابی و همکاران، ۲۰۱۹).

واحدهای جریانی هیدرولیکی: برای تعیین واحدهای جریانی هیدرولیکی با استفاده از روش شاخص زون جریانی (FZI) که برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط آمافوله و همکارانش ارائه شد (آمافوله و همکاران، ۱۹۹۳)، استفاده شده است. برای هر داده تخلخل و تراوایی، مقادیر RQI (اندیس کیفیت مخزنی) و FZI (شاخص زون جریانی) با استفاده از روابط (۱) تا (۳) محاسبه می‌شود:

$$FZI = \frac{RQI}{\phi_z} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$RQI = 0.0314 \sqrt{K/\phi_e} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\phi_z = \frac{\phi_e}{1-\phi_e} \quad \text{رابطه ۳}$$

در فرمول‌های ذکر شده، K تراوایی برحسب میلی‌داری و ϕ_e تخلخل مؤثر به صورت کسری است.

در این مطالعه از روش FZI* استفاده شده که در رابطه‌ی (۴) بیان شده است (میرزایی-پيامان و همکاران، ۲۰۱۸):

$$k = 1014 \phi (FZI^*)^2 \quad \text{رابطه ۴}$$

روش اصلاح شده‌ی لورنز بر مبنای چینه‌نگاری: در این مطالعه، مقادیر ظرفیت ذخیره تجمعی و ظرفیت جریانی تجمعی با استفاده از روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌گردند (ماگلیو-جانسون، ۲۰۰۰):

$$Kh_{cum} = K_1(h_1-h_0)/Kh_{total} + K_2(h_2-h_1)/Kh_{total} + \dots + K_n(h_n-h_{n-1})/Kh_{total} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\Phi h_{cum} = \Phi_1(h_1-h_0)/\Phi h_{total} + \Phi_2(h_2-h_1)/\Phi h_{total} + \dots + \Phi_n(h_n-h_{n-1})/\Phi h_{total} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در این معادلات، K تراوایی برحسب میلی‌داری، h عمق نمونه بر حسب متر و ϕ تخلخل به صورت کسری است. در ابتدا نمودار متقاطع دوبعدی درصد ظرفیت جریانی در مقابل درصد ظرفیت ذخیره با استفاده از فرمول‌های بالا رسم می‌گردد. سپس بر پایه نقاط شکست نمودار مرز واحدهای جریانی انتخاب می‌گردد.

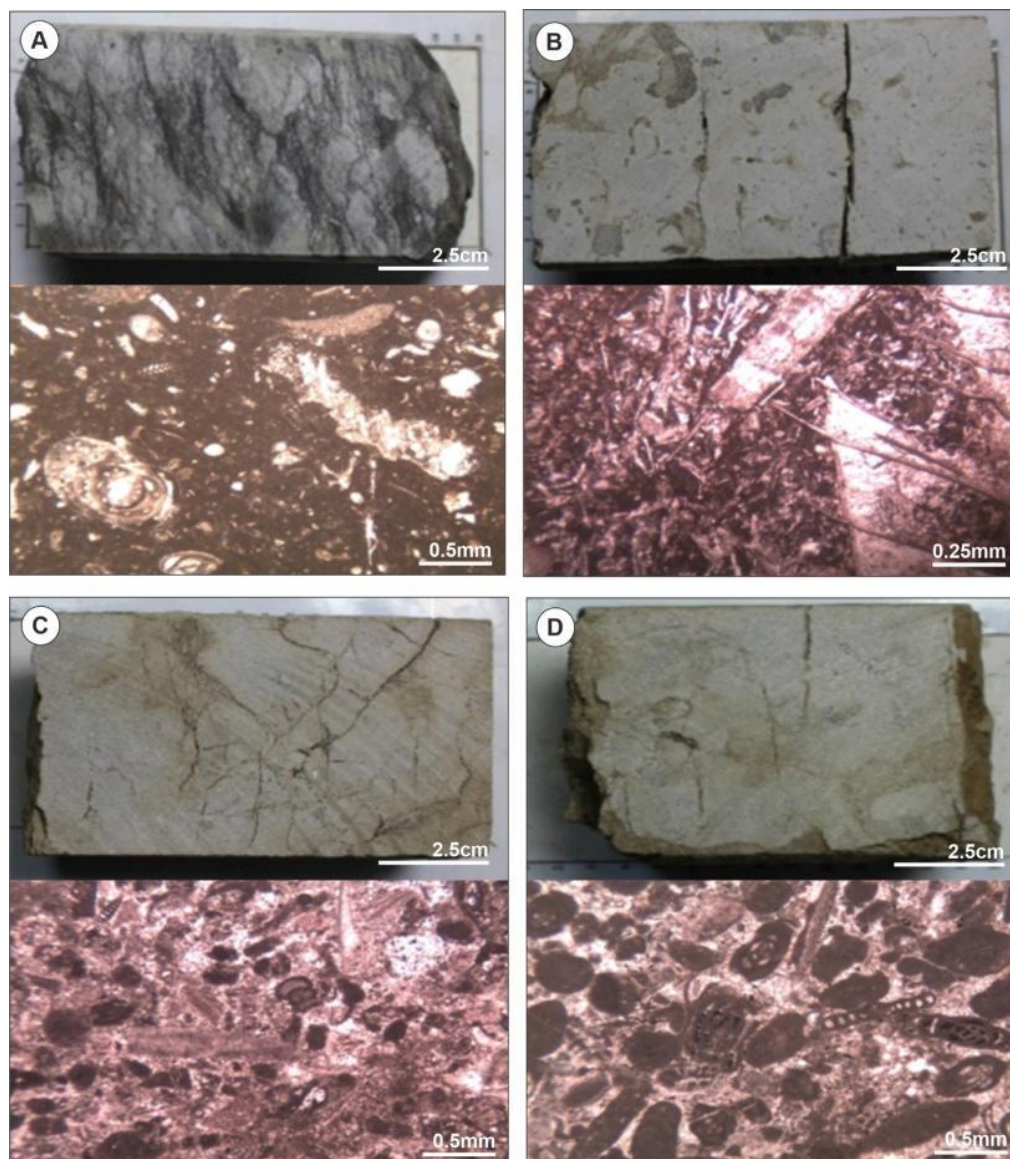
۴- نتایج

۴-۱- رخساره‌ها

براساس مطالعات پتروگرافی، هشت ریزرخساره رسوبی در سازند ایلام شناسایی شده است. این ریزرخساره‌ها براساس ویژگی‌های بافتی، محتوای فسیلی و با کمک گرفتن از مدل‌های استاندارد رخساره‌ای در چهار کمر بند رخساره‌ای شامل رمپ داخلی، رمپ میانی، رمپ بیرونی و حوضه دسته‌بندی شدند. به منظور جلوگیری از تکرار مطالب و کارآمدتر کردن نتایج مطالعه، از توصیف ریزرخساره‌ها چشم‌پوشی شد و رخساره‌های رسوبی در قالب کمر بندهای رخساره‌ای (زیرمحیط‌های رسوبی) بحث شدند. خلاصه اطلاعات مربوط به ریزرخساره‌ها در جدول ۱، تصاویر میکروسکوپی و مغزه آن‌ها در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند. **کمر بند رخساره‌ای رمپ داخلی (لاگون، واریزه‌های ریفی و شول):** این کمر بند رخساره‌ای شامل وکستون تا مادستون حاوی پلویید، روزن‌داران کفزی، بایوکلاست (جلبک) (IMF-1)، رودستون/فلوتستون حاوی بایوکلاست (رودیست، جلبک و مرجان) (IMF-2)، پکستون حاوی پلویید، روزن‌داران کفزی و بایوکلاست (IMF-3)، گرینستون حاوی پلویید و روزن‌داران کفزی (IMF-4) و گرینستون تا پکستون حاوی بایوکلاست (اکینوید)

این رخساره به علت وجود بافت دانه غالب، نبود یا کمبود ماتریکس گلی و پرشدن فضای بین دانه‌ها با سیمان اسپاری و همچنین وجود موجودات قسمت کم عمق دریا بر اساس شواهد موجود، به رمپ داخلی (لاگون، واریزه‌های ریفی و شول) نسبت داده شده‌اند.

(IMF-5) است. دانه‌های اسکلتی شامل جلبک‌ها، دوکفه‌ای‌ها، رودیست، گاستروپودها و روزن‌داران کفزی و ذرات غیراسکلتی شامل پلویید و اینتراکلت می‌باشند. زیست‌آشفستگی، میکرایتی شدن و مقدار کمتر سیمانی شدن از ویژگی‌های رسوبی در این کمر بند رخساره‌ای هستند.



شکل ۲. ریزرخساره‌های شناسایی شده سازند ایلام در چاه مورد مطالعه واقع در بخش شرقی خلیج فارس شامل A- وکستون تا مادستون حاوی پلویید، روزن‌داران کفزی، بایوکلست (جلبک) (IMF-1). B- رودستون / فلوئتستون حاوی بایوکلست (رودیست-جلبک-مرجان) (IMF-2). C- پکستون حاوی پلویید، روزن‌داران کفزی و بایوکلست D- گرینستون حاوی پلویید و روزن‌داران کفزی (IMF-4).

Fig. 2. Microfacies of the Ilam Formation in the studied well in the eastern Persian Gulf. A) IMF-1: benthic foraminifera peloid mudstone to wackestone. B) IMF-2: bioclast rudstone to floatstone. C) IMF-3: bioclast peloid packstone. D) IMF-4: benthic foraminifera peloid grainstone.

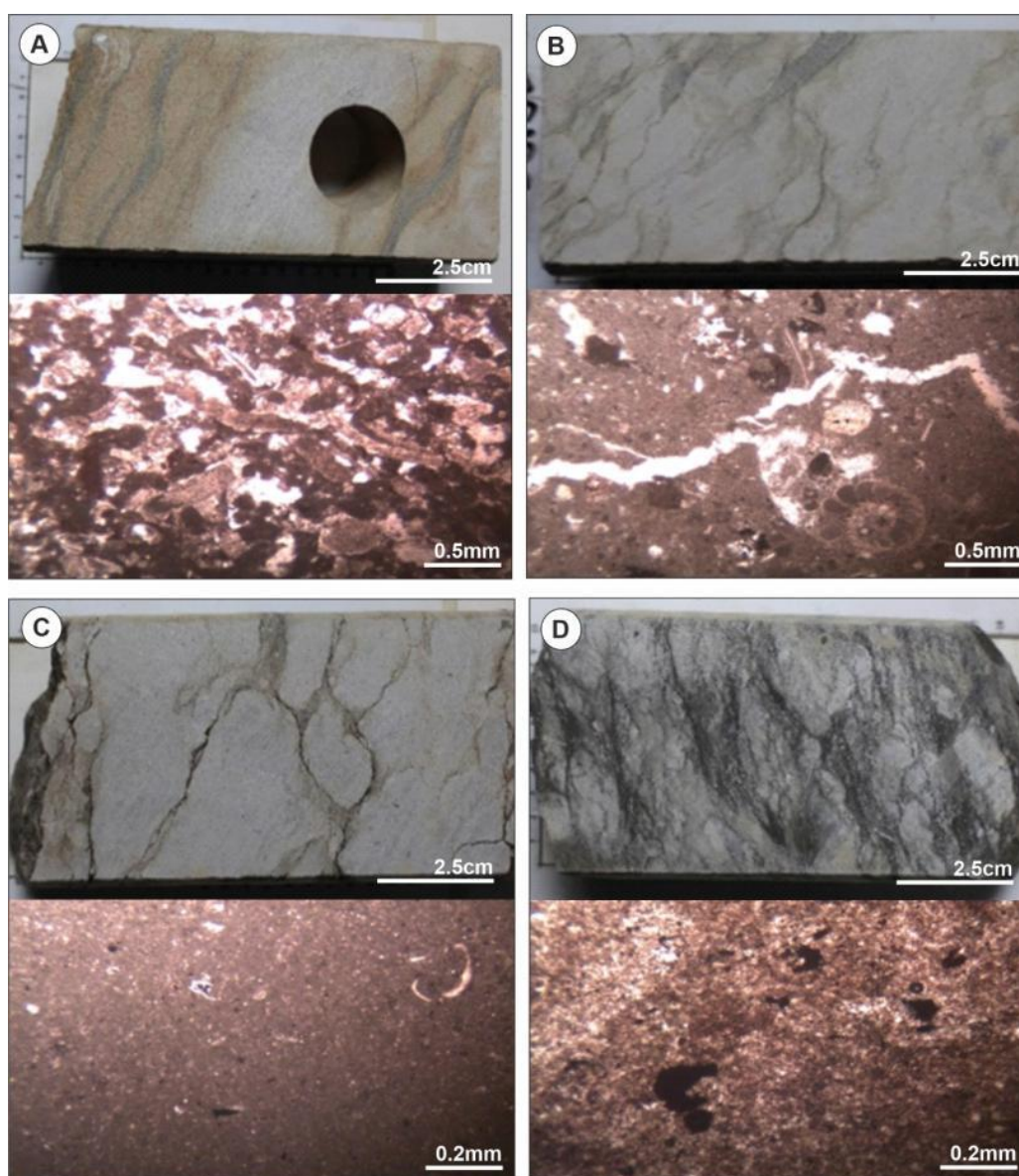
روزن‌داران پلانکتیک، بایوکلست‌ها (شامل قطعات خارپوستان، دوکفه‌ای‌ها و جلبک‌های قرمز) و الیگوستژینیدها است. پلوییدها و اینتراکلت‌های نادر به صورت ذرات غیراسکلتی حضور دارند. این رخساره

کمر بند رخساره ای رمپ میانی: این کمر بند رخساره‌ای شامل وکستون تا مادستون حاوی بایوکلست (اکینوئید) (IMF-6) است. حاوی دانه‌های اسکلتی روزن‌داران کوچک کفزی (به عنوان مثال گونه‌ی *Rotalia*) و برخی

رخساره‌ها، حاوی آلومک‌های اسکلتی عمدتاً بقایای اکتینویدی دانه ریز، سوزن اسفنج و روزن‌داران پلانکتون است و آلومک‌های غیراسکلتی مانند پلوییده‌های ریز و کانی‌های تیره می‌باشد. لامینه‌بندی و زیست‌آشفستگی تنها ساختارهای قابل توجه در این کمر بند رخساره‌ای می‌باشند. حضور موجودات دریای باز مانند روزن‌داران پلانکتون همراه با بافت‌های گل غالب (مادستون و وکستون) نشان می‌دهد این رخساره‌ها به بخش‌های بیرونی پلت‌فرم (حوضه و رمپ خارجی) مربوط هستند.

گل غالب دارای سنگ‌شناسی غالب آهکی است و تنها ویژگی رسوبی قابل توجه آن زیست‌آشفستگی است. با توجه به فراوانی اجزای اسکلتی شاخص دریای باز، بافت‌های دانه غالب و گل غالب و نیز همراهی با رخساره‌های دریای باز، محیط تشکیل این رخساره به بخش‌های میانی پلتفرم کریناته (رمپ میانی) نسبت داده می‌شود.

کمر بند رخساره‌ای حوضه/رمپ خارجی: این کمر بند رخساره‌ای شامل شیل/مارن/مادستون پلاژیک (IMF-8) و میکروبايوکلاست مادستون تا وکستون (IMF-7) است.



شکل ۳. تصاویر مغزه‌های حفاری از رخساره‌های سازند ایلام در چاه مورد مطالعه واقع در بخش شرقی خلیج فارس شامل: A - گریستون تا پکستون حاوی بايوکلاست (اکتینوید) (IMF-5). B - وکستون تا مادستون حاوی بايوکلاست (اکتینوید) (IMF-6). C - میکروبايوکلاست مادستون تا وکستون (IMF-7). D - شیل/مارن/مادستون پلاژیک (IMF-8).

Fig. 3. Core close-up photos of depositional facies of the Ilam Formation in the eastern Persian Gulf. A) IMF-5: bioclast packstone to grainstone. B) IMF-6: bioclast wackestone to mudstone. C) IMF-7: microbioclast mudstone to wackestone. D) IMF-8: pelagic mudstone, marl, shale.

جدول ۱. خلاصه مشخصات ریزرخساره‌های سازند ایلام در چاه مورد مطالعه واقع در ناحیه‌ی شرقی خلیج فارس.

Table 1. Summarized facies characteristics of the Ilam Formation in the studied well, SE Persian Gulf.

کد رخساره	نام رخساره	آلوکم‌ها	محیط رسوبی
IMF-1	وکستون تا مادستون حاوی پلویید، روزن‌داران کفزی، بایوکلاست (جلبک)	جلبک‌های سبز، روزن‌داران بنتیک، پلوییدها، دوکفه‌ای‌ها، گاستروپودها	لاگون
IMF-2	رودستون/فلوتستون حاوی بایوکلاست (رودیست-جلبک-مرجان)	خرده‌های رودیست، جلبک‌ها، مرجان‌ها، روزن‌داران کفزی	واریزه‌های ریف‌های کومه‌ای
IMF-3	پکستون حاوی پلویید، روزن‌داران کفزی و بایوکلاست	دوکفه‌ای‌ها، گاستروپود، روزن‌داران کفزی، قطعات رودیست	بخش رو به خشکی شول
IMF-4	گرینستون حاوی پلویید و روزن‌داران کفزی	روزن‌داران کفزی متنوع، پلوییدها	شول مرکزی
IMF-5	گرینستون تا پکستون حاوی بایوکلاست (اکینوید)	بقایای اکینودرم، دوکفه‌ای، رودیست، جلبک قرمز، بریزوآ	بخش رو به دریای شول
IMF-6	وکستون تا مادستون حاوی بایوکلاست (اکینوید)	خرده‌های اکینودرم، جلبک قرمز، بریزوآ	رمپ میانی
IMF-7	میکروپایوکلاست مادستون تا وکستون	روزن‌داران پلانکتونیک، خرده‌های اکینودرم	رمپ بیرونی
IMF-8	شیل/مارن/مادستون پلاژیک	روزن‌داران پلانکتونیک، کانی‌های اپک	حوضه

بگیرند. بیشتر قطعات رودیست و سایر دوکفه‌ای‌ها به طور انتخابی انحلال گسترده پیدا کرده و با سیمان کلسیتی جایگزین شده‌اند. این سیمان‌ها معمولاً با فرآیندهای دیاژنزی نوشتکی و انحلال گسترده همراه هستند و بوسیله رگچه‌های انحلالی و شکستگی‌ها قطع می‌شوند. شکستگی و سیمانی شدن شکستگی‌ها (توسط کلسیت بلوکی) در مقاطع نازک مشاهده می‌شود.

فشرده‌گی: مطالعه نشان می‌دهد که توالی مورد مطالعه سازند ایلام به شدت تحت تاثیر فشرده‌گی در حین و پس از تدفین (عمق تدفین فعلی ۲/۵ کیلومتر) در چاه مورد مطالعه قرار گرفته است. خصوصیات فشرده‌گی این سازند را می‌توان به دو دسته اصلی طبقه‌بندی کرد (شکل ۴): فشرده‌گی مکانیکی عمدتاً در رخساره‌های دانه‌غالب مجموعه‌های شول، به صورت‌های تغییرشکل و شکستگی دانه‌ها ثبت می‌شود. در فابریک‌های دانه‌پشتیبان، مرزهای محدب-مقعر ایجاد شده‌اند. فشرده‌گی شیمیایی به شکل استیلولیت و درزهای انحلالی ثبت شده است. وجود سیمان‌های دور دانه در اطراف آلوکم‌ها در برخی از رخساره‌های دانه‌پشتیبان پشته‌های سدی و ساحلی از تراکم و فشرده‌گی بیش از حد آن‌ها جلوگیری کرده است. با این حال، درزهای انحلالی رایج‌تر بوده و بیشتر در رخساره‌های گل‌غالب (مادستون و وکستون) ایجاد می‌شوند (شکل ۵). استیلولیت‌ها عمدتاً در رخساره‌های IMF-3، IMF-4 و IMF-5 مشاهده می‌شوند.

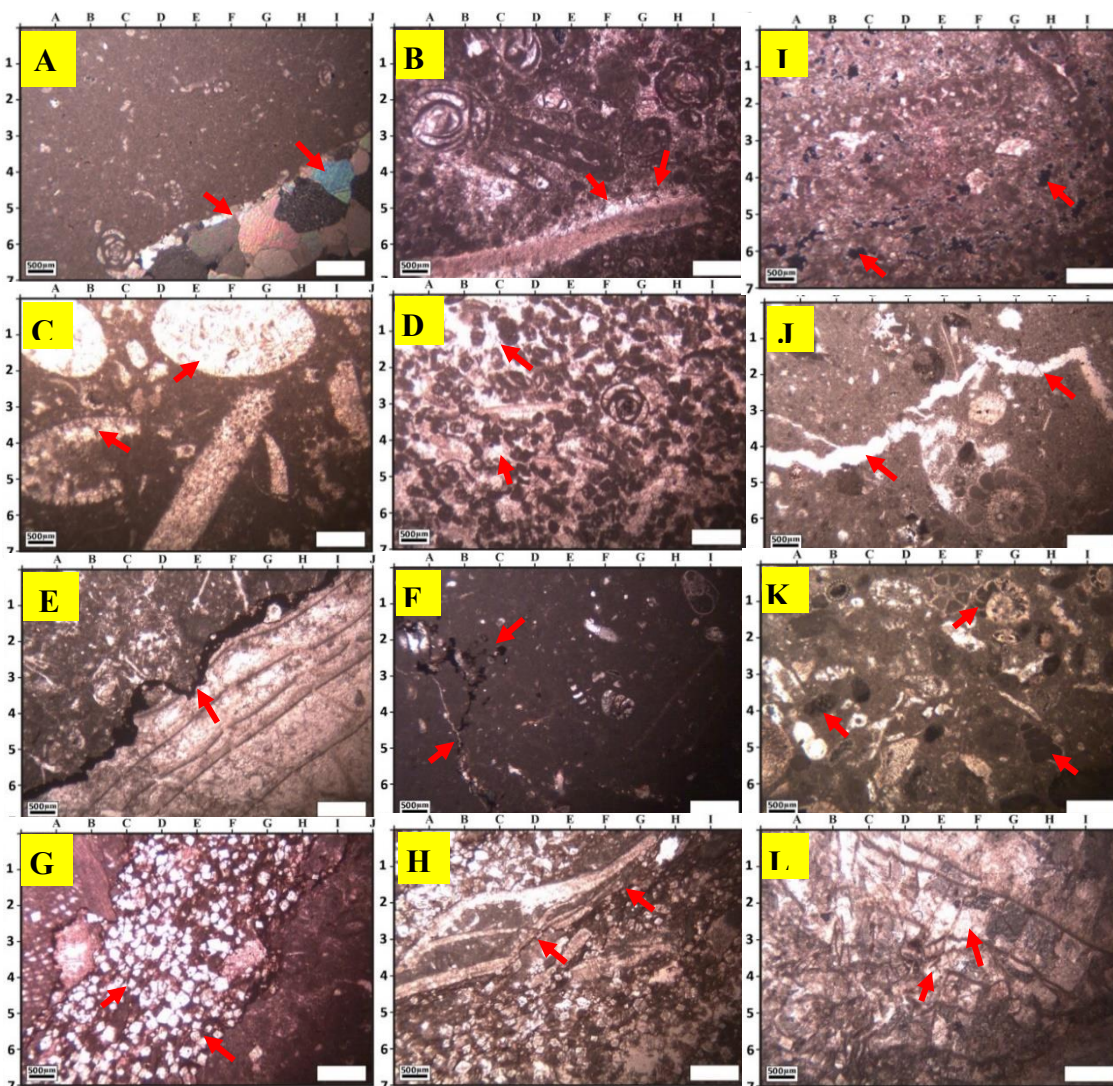
۲-۴- فرآیندهای دیاژنزی

فرآیندهای دیاژنزی مختلف بر فواصل مورد مطالعه سازند ایلام در میدان مورد مطالعه تاثیر گذاشته‌اند که عبارتند از: میکرایتی شدن، زیست‌آشفستگی، نوشتکی (نئومورفیسیم)، سیمانی شدن، فشرده‌گی، دولومیتی‌شدن، انحلال و شکستگی. برخی از این فرآیندهای دیاژنزی پتانسیل مخزن اولیه را در دو جنبه مثبت و منفی تحت تاثیر قرار می‌دهند. مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی اثرگذار بر کیفیت مخزنی سازند ایلام عبارتند از:

۱- فرآیندهای دیاژنتیکی که کیفیت مخزن را افزایش می‌دهند: دولومیتی‌شدن و به میزان کمتر، انحلال و شکستگی.

۲- فرآیندهای دیاژنتیکی که کیفیت مخزن را کاهش می‌دهند: سیمانی‌شدن و فشرده‌گی

سیمانی شدن: این فرآیند یکی از مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی در سازند مورد مطالعه است که منجر به انسداد فضاهای منافذ اولیه و دیاژنزی شده است. منافذ بین‌ذره‌ای، درون اسکلتی، قالبی و شکستگی در بسیاری از موارد به طور کامل یا جزئی توسط سیمان مسدود شده‌اند (شکل ۴). کلسیت فاز اصلی سیمان است، اما دولومیت هم وجود دارد. حداقل چهار نسل سیمان اصلی در سازند ایلام مشاهده شد که شامل سیمان‌های کلسیت بین‌ذره‌ای و درون‌ذره‌ای، سیمان‌های پرکننده قالب و پرکننده شکستگی است. سیمان‌ها به شکل دروزی و بلوکی هستند و ممکن است از چندین محیط دیاژنزی مختلف منشا



شکل ۴. فرآیندهای دیاژنزی سازند ایلام در یکی از میادین شرق خلیج فارس. A- سیمانی شدن کلسیت بلوکی، B- سیمانی شدن کلسیت هم‌محور در اطراف خرده‌های اکینودرم، C- سیمانی شدن کلسیت هم‌بعد در داخل بایوکلسیت‌ها، D- سیمانی شدن هم‌ضخامت در رخساره‌های شول، E- استیلولیتی شدن در اثر فشردگی، F- درزهای انحلالی، G، H- دولومیتی شدن در امتداد خصوصیات فشردگی شیمیایی (استیلولیت‌ها و درزهای انحلالی)، I- انحلال، J- شکستگی، K- میکرایتی شدن، L- نئومورفیسم (نوشکلی).

Fig. 4. Diagenetic features of the Ilam Formation the eastern Persian Gulf. A) blocky calcite cementation. B) syntaxial calcite cement. C) equant calcite cement. D) isopachous sement. E) stylolitization. F) solution seams. G,H) dolomitization. I) dissolution. J) fracturing. K) micritization. L) Neomorphism.

IMF-7) ثبت شده و حجم بالایی (تا ۱۵٪) از تخلخل قالبی میکروسکوپی در قسمت پایینی سازند ایلام ایجاد کرده است. پدیده مشابهی نیز از همین موقعیت چینه‌شناسی در نواحی جنوب‌غربی ایران از جمله تاقدیس بنگستان و فروافتادگی دزفول گزارش شده است (غبیشاوی و همکاران، ۲۰۰۹؛ مهربانی و همکاران، ۲۰۱۴).

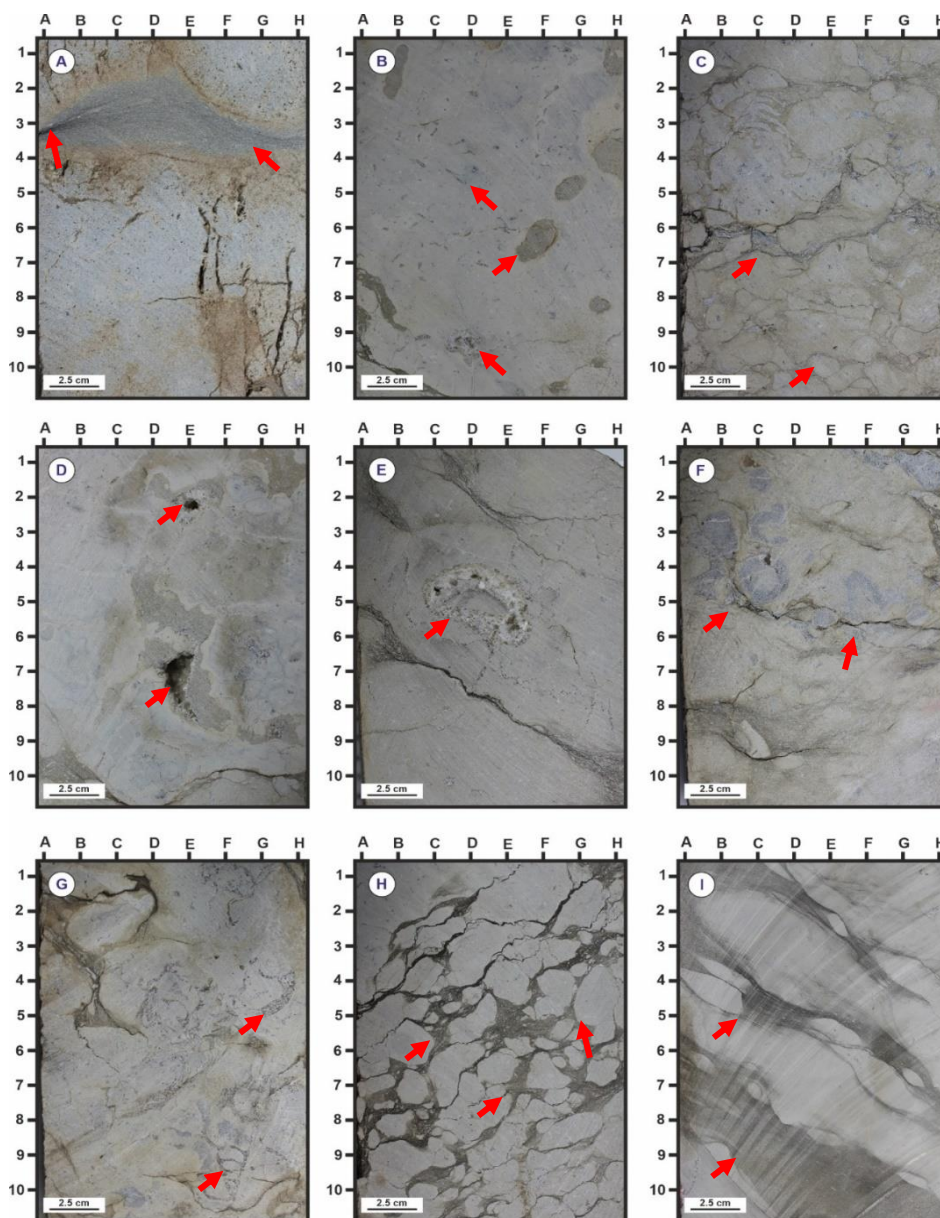
دولومیتی شدن: این فرآیند دیاژنزی عمدتاً در رخساره‌های گل‌غالب رخ می‌دهد، اما رخساره‌های دانه‌پشتیبان مجموعه‌های شول را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. دولومیتی شدن انتخاب کننده فابریک در

انحلال: انحلال در فواصل مورد مطالعه از سازند ایلام چندان رایج نیست. این فرآیند فقط به صورت برخی از حفره‌ها و قالب‌های انحلالی در مقیاس میکروسکوپی مشاهده می‌شود. این حفره‌ها و قالب‌های انحلالی به طور کامل یا جزئی با سیمان‌های کلسیتی بلوکی پر شده‌اند. با این حال، در برخی موارد، آن‌ها پر نشده باقی مانده‌اند (شکل ۴). این خصوصیات نشان می‌دهد که توالی‌های کربناته سازند ایلام دیاژنز جوی گسترده‌ای را تجربه نکرده است. انحلال بخش‌های مرکزی اولیگوستژینیدها نیز در رخساره‌های غنی از اولیگوستژینید سازند ایلام (یعنی

می‌شوند. در برخی موارد، شکستگی‌ها (به طور کامل یا جزئی) توسط سیمان‌های کلسیتی پر شده بودند. همچنین شکستگی‌های باز نیز در برخی رخساره‌های سازند ایلام وجود دارند. شکستگی‌های ریز در مطالعات مقطع نازک مشاهده می‌شوند (شکل ۴). حضور شکستگی‌های باز می‌تواند در بهبود تراوایی بخصوص در رخساره‌های گل‌غالب و ریز تخلخل‌دار سازند ایلام تاثیر داشته باشد (شکل ۶).

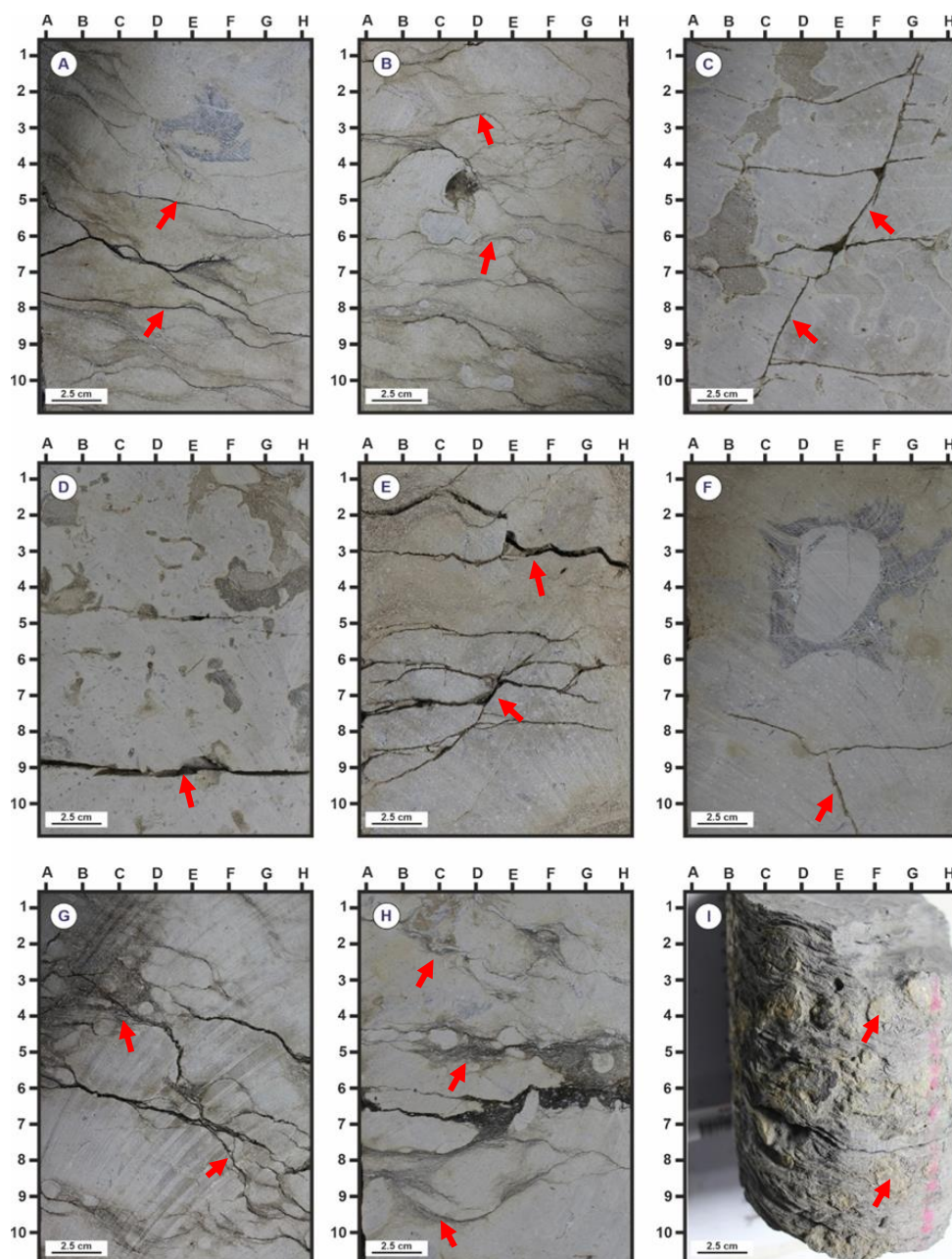
رخساره‌های دولومیتی سازند ایلام رایج است. در بیشتر نمونه‌های دولومیتی‌شده، دولومیتی‌شدن عمدتاً روی زمینه‌ی سنگ تأثیر گذاشته است (شکل ۴). اغلب دولومیت‌های سازند ایلام در امتداد عوارض فشردگی شیمیایی (استیلولیت‌ها و رگچه‌های انحلالی) تمرکز یافته‌اند.

شکستگی: شکستگی‌ها به عنوان ویژگی‌های پس از رسوب‌گذاری در سازند ایلام در چاه مورد مطالعه مشاهده



شکل ۵. عکس‌های نمای نزدیک مغزه‌ها از دگرسانی‌های مهم دیاژنزی سازند ایلام در یکی از میداین شرق خلیج فارس. A: مجموعه‌ای از درزهای انحلالی (ردیف ۳) همراه با شکستگی، B: زیست‌آشفتگی، C: فابریک استیلو-ندولار در نتیجه فشردگی شیمیایی شدید، D: حفره‌های انحلالی، E: بلورهای درشت سیمان کلسیتی در قالب یک بایوکلست، F: زیست‌آشفتگی و استیلولیتی‌شدن (ردیف ۵)، G: سیمانی‌شدن در قالب‌های بایوکلست، H: فابریک استیلو-ندولار در نتیجه فشردگی شیمیایی شدید، I: زیست‌آشفتگی و درزهای انحلالی.

Fig. 5. Core close-up photos of diagenetic alterations of the Ilam Formation in the eastern Persian Gulf. A) solution seams and fracturing. B) bioturbation. C) stylo-nodular fabric. D) Dissolution vugs. E) blocky calcite cement in a bioclast mold. F) bioturbation and stylolization. G) cementation. H) stylo-nodular fabric. I) bioturbation and solution seams.



شکل ۶. عکس‌های نمای نزدیک مغزه‌ها از دگرسانی‌های مهم دیازنزی سازند ایلام در یکی از میداین شرق خلیج فارس. A, B: درزه‌های انحلالی و میکرواستیلولیت‌ها، C-F: شکستگی‌های باز، G, H: درزه‌های انحلالی و استیلولیت، I: پیریتی شدن.

Fig. 6. Core close-up photos of diagenetic features of the Ilam Formation in the eastern Persian Gulf. A, B) solution seams and micro-stylolites. C-F) open fractures. G, H) solution seams and stylolite. I) pyritization.

تشریح سیستم ترک‌های سکناس رده سازند ایلام می پردازیم:

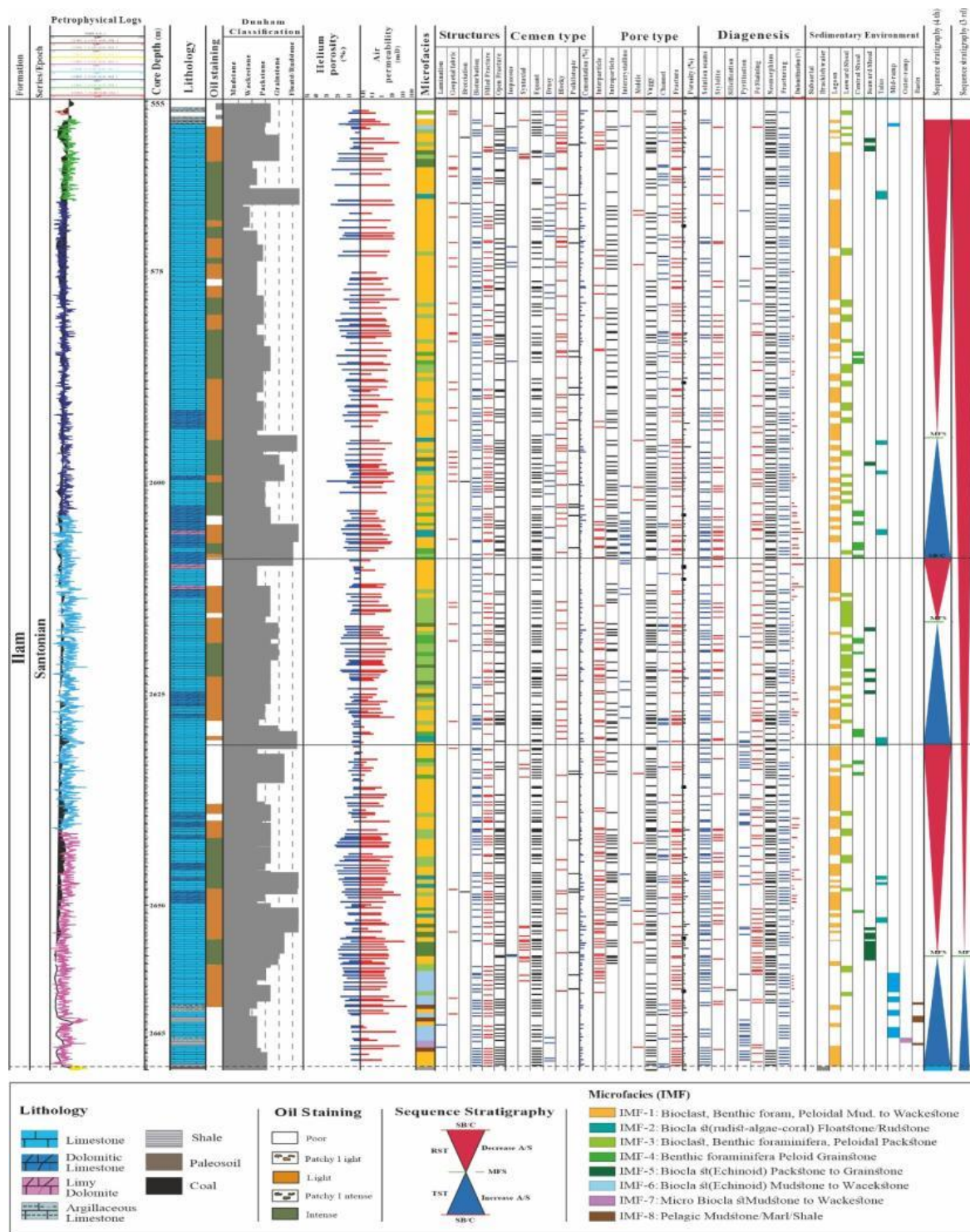
سیستم ترکت پیشرونده (TST): بر اساس نقشه‌ها و تفاسیر جغرافیای دیرینه، یک افزایش عمده و گسترده در سطح دریا و پیشروی در اوایل سانتونین در سراسر حاشیه شمال شرقی صفحه عربستان رخ داده است (شارلند و همکاران، ۲۰۰۱؛ ون‌بوخم و همکاران، ۲۰۱۰). این رویداد منجر به استقرار مجدد پلت‌فرم‌های کربناته پس از قرار

۳-۴- چینه‌نگاری سکناسی

سازند ایلام با سن سانتونین-کامپانین است در نواحی مختلف زاگرس و خاورمیانه از یک سکناس رسوبی رده سوم تشکیل شده است که شامل دو سیستم ترکت پیشرونده (TST) و پسرونده (RST) می‌باشد (شکل ۷). در چاه مورد مطالعه نیز این سکناس رسوبی رده سوم تفکیک شده است. علاوه بر این، در این مطالعه سه سکناس رسوبی رده چهارم نیز در سازند ایلام شناسایی شده است (شکل ۷). در زیر به

می‌شود (رخساره‌های حوضه، رمپ بیرونی تا میانی) (غیباشوی و همکاران، ۲۰۰۹؛ مهرابی و همکاران، ۲۰۱۴). ریزرخساره‌های IMF-6، IMF-7 و IMF-8 در این بخش قرار می‌گیرند. اینها را می‌توان به عنوان سیستم ترکرت پیشرونده (TST) از سکانس رسوبی سانتونین در نظر گرفت (شکل ۷).

گرفتن در رخنمون تحت‌الجوی طولانی مدت پس از سازند میشریف شده است (هولیس، ۲۰۱۱). این مرحله پیشروی با توسعه رخساره‌های کرناته پلاژیک در اوایل سانتونین، در بخش پایینی سازند ایلام (و معادل‌های چینه‌شناسی آن) در ناحیه زاگرس ایران و کشورهای مجاور مشخص می‌شود که رخساره‌های ریز متخلخل گل غالب را شامل



شکل ۷. ستون رسوب‌شناسی سازند ایلام در چاه مورد مطالعه از ناحیه‌ی شرقی خلیج فارس.
Fig. 7. Sedimentological log of the Ilam Formation in the studied well, SE Persian Gulf.

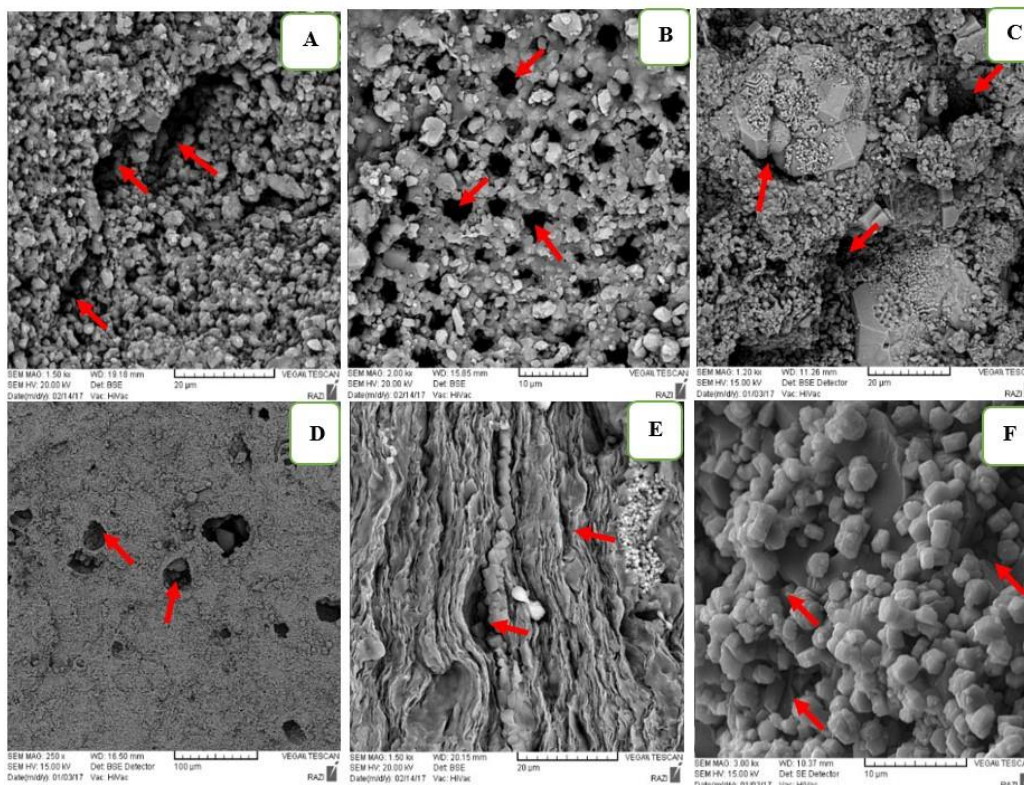
با میانگین اندازه‌ی ۴ تا ۲۵۶ میلی‌متر در سازند ایلام شناسایی شده است:

ریز تخلخل‌ها: ریزتخلخل‌ها در سازند ایلام شامل منافذ بین ذره‌ای مثل فضای بین ذرات میکرایت، درون ذره‌ای مثل فضای درون حجره روزن‌داران و یا قسمت‌های مرکزی الیگوستژینا و کوکولیتوفرها، بین‌بلوری مثل فضای بین بلورهای دولومیت و سیمان می‌باشند (شکل ۸). ویژگی ریزتخلخل‌ها این است که تخلخل کل سنگ را بالا می‌برد و از آنجایی که ریزتخلخل‌ها ارتباط چندانی به هم ندارند لذا تراوایی سنگ افزایش چندانی پیدا نمی‌کند. بنابراین افق‌های ریز تخلخل‌دار از تراوایی کمی برخوردار هستند و به این گونه مخازن، مخازن کربناته کم‌تراوا^۴ گویند که نیمه‌ی پایینی سازند ایلام از این ویژگی برخوردار می‌باشند. رخساره‌های موجود در این قسمت گل‌غالب دریای باز می‌باشند و دارای بافت مادستون، وکستون، به ندرت پکستون است و حاوی روزن‌داران پلانکتون، الیگوستژینا و کوکولیتوفرها هستند.

سیستم ترک‌ت پسرونده (RST): به سمت بالای سازند ایلام، رخساره‌های رمپ بیرونی به تدریج به رخساره‌های رمپ میانی و رخساره‌های پراثرژی مجموعه‌های شول، لاگون و واریزه‌های ریفی تبدیل می‌شوند که نشان‌دهنده یک کم عمق‌شدگی به سمت بالا هستند. رخساره‌های درشت متخلخل دانه غالب در قسمت فوقانی سازند ایلام قرار می‌گیرند. ریزرخساره‌های IMF-1 تا IMF-5 در این بخش غلبه دارند و آن‌ها را می‌توان به عنوان سیستم ترک‌ت پسرونده از سکانس رسوبی سانتونین در نظر گرفت (شکل ۷).

۴-۴- گونه‌های منفذی

سیستم حفرات سازند ایلام دارای تنوع و تغییرات زیادی در توزیع اندازه می‌باشد. بر اساس اندازه و بر مبنای طبقه‌بندی‌های استاندارد موجود (نظیر چوکت و پری، ۱۹۷۰؛ مازولو، ۱۹۹۲)، سه رده حفرات شامل ریزتخلخل^۱ با میانگین اندازه‌ی ۰/۰۶ میلی‌متر، تخلخل‌های متوسط^۲ با میانگین اندازه‌ی ۰/۰۶ تا ۴ میلی‌متر و درشت تخلخل‌ها^۳



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از انواع ریزتخلخل‌های سازند ایلام در چاه مورد مطالعه. A-تخلخل حفره‌ای. B-تخلخل درون‌دانه‌ای. C-تخلخل حفره‌ای و بین‌بلوری. D-تخلخل حفره‌ای در زمینه میکرایت. E-تخلخل حفره‌ای ناشی از انحلال فشاری. F-تخلخل بین‌بلوری.

Fig. 8. Scanning electron microscopic images from various micro-pore types of the Ilam Formation. A) vuggy pore. B) intraparticle pore. C) vuggy and intercrystalline pores. D) vuggy pore in micrite. E) vuggy pore. F) intercrystalline pore.

³ Macropores

⁴ tight carbonate reservoir

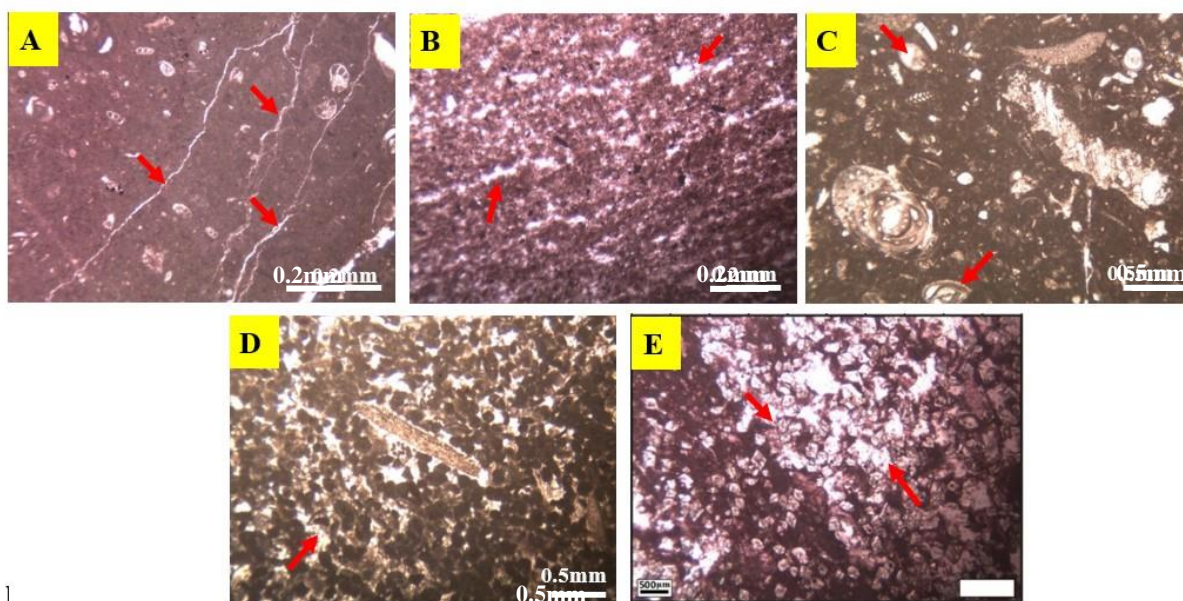
¹ Micropores

² Mesopores

می‌باشند می‌توانند تا مقیاس میلی‌متری و یا سانتی‌متری گسترش یابند. این نوع تخلخل‌ها در مقیاس مغزه قابل مشاهده هستند. در سازند ایلام تخلخل‌های بزرگ مقیاس شامل حفره‌ها، شکستگی‌ها و قالب‌های انحلالی می‌باشند. هرچند تخلخل‌های بزرگ مقیاس با افزایش تخلخل و تراوایی مخزن به ذخیره و جریان سیال کمک زیادی می‌کنند ولی اهمیت و فراوانی کمتری نسبت به دو گروه قبلی دارند و در سازند ایلام در برخی موارد بر روی مغزه‌های حفاری دیده شده‌اند (شکل ۱۰).

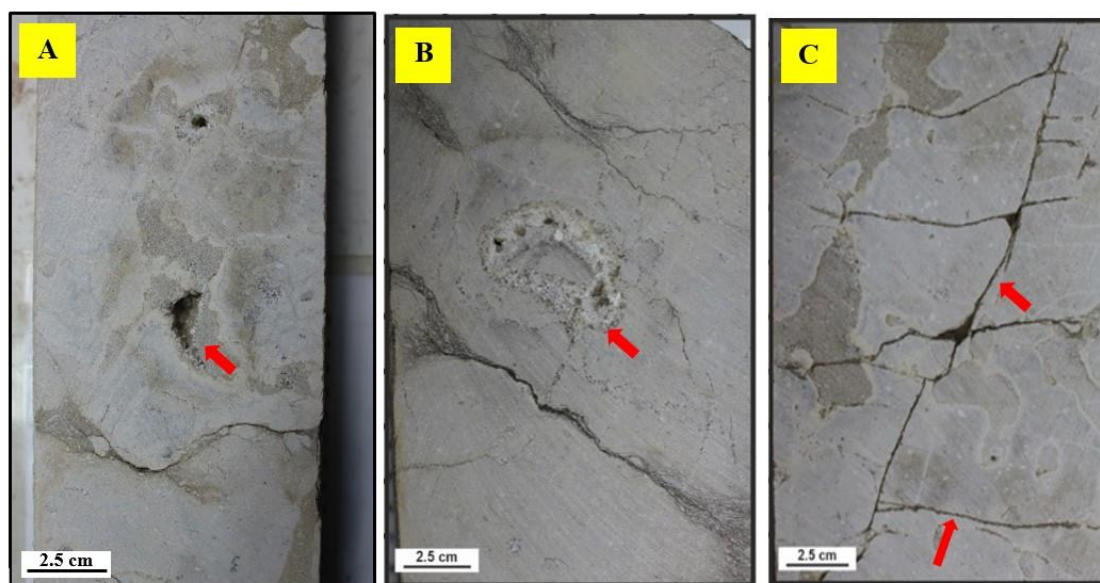
تخلخل‌های متوسط مقیاس: این نوع تخلخل‌ها که در مقیاس مطالعات مقاطع نازک میکروسکوپی قابل مشاهده می‌باشند، در سازند ایلام به صورت منافذ بین‌دانه‌ای، بین‌بلوری، قالبی، حفره‌ای و شکستگی وجود دارند. تخلخل‌های متوسط مقیاس پتانسیل ذخیره‌سازی و جریان سیال را دارند از این رو می‌توانند به تخلخل کل و تراوایی مخزن کمک نمایند (شکل ۹).

تخلخل‌های بزرگ مقیاس: آن دسته از تخلخل‌هایی که اندازه منافذ آن‌ها معمولاً بزرگ‌تر از ۵۰ میکرومتر



شکل ۹. تصاویر مقاطع نازک از انواع متوسط تخلخل‌های سازند ایلام در چاه مورد مطالعه. A-تخلخل شکستگی. B-تخلخل حفره‌ای. C-تخلخل قالبی. D-تخلخل بین‌دانه‌ای. E-تخلخل بین‌بلوری. تمام تصاویر در نور معمولی گرفته شده‌اند.

Fig. 9. Photomicrographs of various pore-types of the Ilam Formation. A) fracture pore. B) vuggy pore. C) moldic pore. D) interparticle pore. E) intercrystalline pore. All photos in PPL.



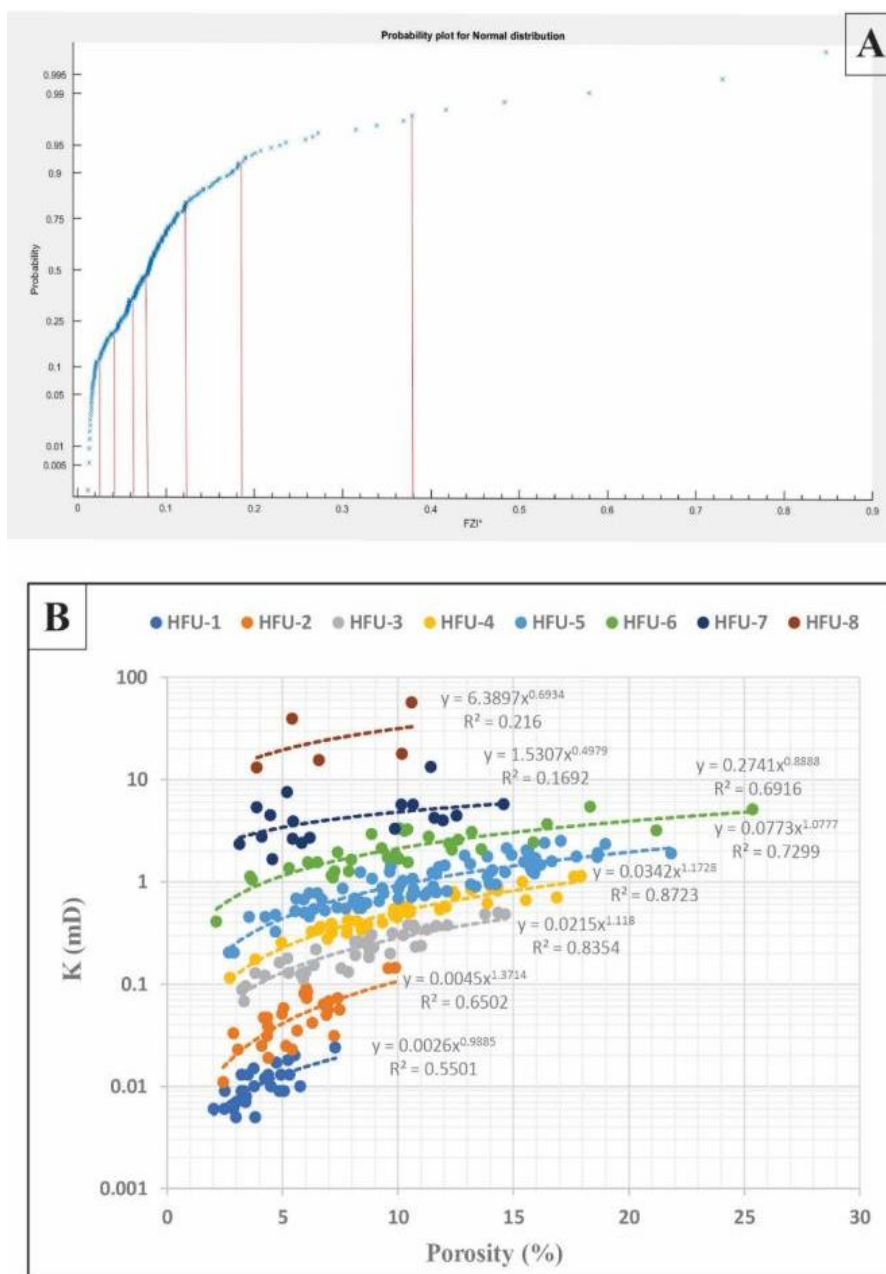
شکل ۱۰. تصاویر مغزه از انواع تخلخل‌های بزرگ مقیاس سازند ایلام. A-تخلخل حفره‌ای. B-تخلخل قالبی. C-تخلخل شکستگی.

Fig. 10. Core close-up photos of macro-pore types of the Ilam Formation. A) vuggy pore. B) moldic pore. C) fracture pore.

۴-۵- واحدهای جریان هیدرولیکی

ترسیم نمودار تجمعی احتمال نرمال برای مقادیر نشانگر زون جریان (FZI) نشان داد که سازند ایلام در چاه مورد مطالعه از هشت واحد جریان هیدرولیکی (HFU) تشکیل شده است (شکل ۱۱A) که از واحد جریانی شماره یک (HFU-1) به سمت واحد جریانی شماره هشت (HFU-8) کیفیت مخزنی افزایش می‌یابد (جدول ۲). نمودار متقاطع

تخلخل در برابر تراوایی به تفکیک واحدهای جریانی هیدرولیکی نیز ترسیم گردیده است (شکل ۱۱B). همانگونه که در این نمودار مشخص است، تفکیک بسیار خوبی در بین واحدهای جریانی هیدرولیکی تعیین شده وجود دارد که توسط مقادیر بالای ضریب همبستگی (R^2) در هر واحد جریانی مشخص می‌باشد.



شکل ۱۱. A- نمودار تجمعی احتمال نرمال و واحدهای جریان هیدرولیکی مشخص شده از روش FZI^* ، B- نمودار تخلخل در برابر تراوایی به تفکیک واحدهای جریانی هیدرولیکی برای سازند ایلام در چاه مورد مطالعه.

Fig. 11. A) probability plot of FZI values calculated for the Ilam Formation. According to this plot, eight HFUs are defined. B) porosity versus permeability plot of defined hydraulic flow units in the Ilam Formation.

جدول ۲. خلاصه‌ی اطلاعات واحدهای جریان‌ی هیدرولیکی تعیین شده برای سازند ایلام در چاه مورد مطالعه.

Table 2. summarized characteristics of hydraulic flow units defined in the Ilam Formation.

شماره‌های HFU	متوسط تخلخل	متوسط تراوایی	متوسط FZI*	کد ریزرخساره	دیاژنز	نوع حفرات
HFU-1	۳/۸۸	۰/۰۱	۰/۰۲	۱	سیمانی شدن، فشردگی	ریزتخلخل
HFU-2	۵/۴۰	۰/۰۵	۰/۰۳	۱	سیمانی شدن، فشردگی، نئومورفیسم (نوشکلی)	ریزتخلخل
HFU-3	۷/۷۹	۰/۲۱	۰/۰۵	۳، ۲، ۱	دولومیتی شدن، سیمانی شدن	بین‌دانه‌ای، بین‌بلوری
HFU-4	۹/۷۴	۰/۴۹	۰/۰۷	۴، ۳	دولومیتی شدن، سیمانی شدن، انحلال	بین‌دانه‌ای، بین‌بلوری، حفره‌ای
HFU-5	۱۰/۱۹	۰/۹۴	۰/۱۰	۵، ۴، ۳	انحلال، میکرایتی شدن، نئومورفیسم (نوشکلی)	بین‌دانه‌ای، درون‌دانه‌ای، حفره‌ای
HFU-6	۹/۲۸	۱/۹۹	۰/۱۵	۵، ۴	انحلال، نئومورفیسم (نوشکلی)، سیمانی شدن	بین‌دانه‌ای، درون‌دانه‌ای، حفره‌ای
HFU-7	۷/۰۳	۴/۰۴	۰/۲۴	۴، ۳	انحلال، نئومورفیسم (نوشکلی)، سیمانی شدن	بین‌دانه‌ای، درون‌دانه‌ای، حفره‌ای
HFU-8	۶/۸۴	۲۴/۲۵	۰/۵۹	۵، ۱	انحلال، شکستگی	حفره‌ای، شکستگی

۴-۶- زون بندی مخزنی

نمودار ظرفیت تجمعی جریان (KH) در برابر ظرفیت تجمعی ذخیره (PhiH) برای سازند ایلام در چاه مورد مطالعه ترسیم شد (شکل ۱۲). پس از ترسیم نمودار مذکور در یک نظم چینه‌شناسی، بخش‌هایی از نمودار با شیب‌های متفاوت، ظرفیت ذخیره و جریان متفاوتی را نشان می‌دهند و بر این اساس با تعیین محل شکست یا همان نقاط عطف می‌توان واحدهای مخزنی^۱، تله‌ای^۲، سدی^۳ و زون‌های سرعت^۴ را در ضخامت‌های مختلف به روش لورنز تفکیک کرد. با توجه به تعداد نقاط شکست موجود در نمودار لورنز، ۱۰ زون مختلف در سازند ایلام شناسایی و تفکیک شده‌اند که از میان آن‌ها، تعداد ۵ زون مخزنی با مقادیر بالای ظرفیت ذخیره و ظرفیت جریان وجود دارند. همچنین دو زون سدی، دو زون بافل و یک زون سرعت نیز در این سازند شناسایی شده است. خلاصه‌ی اطلاعات مربوط به زون‌های مخزنی سازند ایلام بر اساس روش لورنز، در جدول ۳ آورده شده است.

۵- بحث و تفسیر

۵-۱- مدل رسوبی

نقشه‌های دیرینه جغرافیایی برای توالی‌های کنیاسین - سانتونین نواحی زاگرس و خلیج فارس در شکل ۱۳ به تصویر کشیده شده‌اند. همانگونه که مشخص است، توالی‌های کربناته کرتاسه بالایی بر روی پلتفرم‌های

کربناته رمپ مانند در اطراف حوضه‌ها/ فرورفتگی‌های درون شلفی در بخش‌های مختلف جنوب و جنوب‌غربی ایران نهشته شده‌اند (ون‌بوخم و همکاران، ۲۰۰۶؛ رحیم‌پور بناب و همکاران، ۲۰۱۲ الف؛ مهرابی و همکاران، ۲۰۱۴). پیشنهاد شده است که در طی این مدت، یک پلاتفرم رسوبی از نوع رمپ ایجاد شده و به تدریج اکثر بخش‌های خاورمیانه را در پاسخ به بالا آمدن سطح آب دریاها احاطه کرده است (موریس، ۱۹۸۰؛ شارلند و همکاران، ۲۰۰۱). در این رمپ کربناته، ریف‌های پراکنده و مجزای رودیستی در بخش‌های کم عمق (رمپ درونی) گسترش داشته و به دلیل ناپایداری، اغلب به صورت واریزه‌های ریفی در برخی افق‌های این سازند تشکیل داده‌اند. مدل رسوبی ناحیه‌ای سازند ایلام توسط ون‌بوخم و همکاران (۲۰۰۶) برای حوضه‌ی زاگرس (شکل ۱۴A) ارایه شده است (شکل ۱۴A). این مدل رمپ مانند توسط محققان دیگری از نقاط مختلف منطقه زاگرس نیز ارایه شده است (پیریایی و همکاران، ۲۰۱۰؛ مهرابی و همکاران، ۲۰۱۴؛ خدایی و همکاران، ۲۰۲۱). نتایج مطالعات رخساره‌ای در پژوهش حاضر نیز نشانگر آنست که پلاتفرم کربناته سازند ایلام فاقد رخساره‌های ریفی گسترده، مرتفع و پایدار بوده و تغییرات تدریجی رخساره‌ها به همراه عدم حضور رخساره‌های واریزه‌ای متعلق به سرایش پلاتفرم همگی حاکی از نهشت این سازند در یک پلاتفرم کربناته از نوع رمپ می‌باشند. همانگونه که در بخش تحلیل رخساره‌ها عنوان شد، این

³ barrier

⁴ speed zone

¹ reservoir

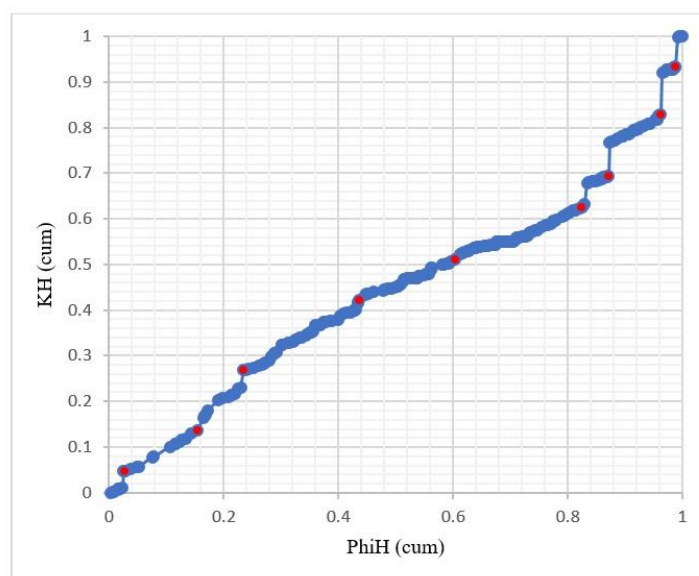
² baffle

دانه‌غالب تا گل‌غالب با مخلوطی از فونای دریای باز و محدود شده قابل مشاهده می‌باشند (IMF-6). رخساره‌های عمیق و بیرونی رمپ شامل رخساره‌های عمدتاً گل‌غالبی هستند که سرشار از فرامینیفرای پلانکتون و الیگوسترینا می‌باشند (IMFs 7-8) (شکل ۱۴B).

رمپ کربناته را می‌توان به سه بخش درونی، میانی و بیرونی تقسیم کرد که در بخش درونی آن، رخساره‌های لاگونی (IMF-1)، رخساره‌های پراثری شول (IMFs 3-5) و رخساره‌های واریزه‌های ریفی (IMF-2) نهشته شده‌اند. در بخش میانی این رمپ کربناته، طیفی از رخساره‌های

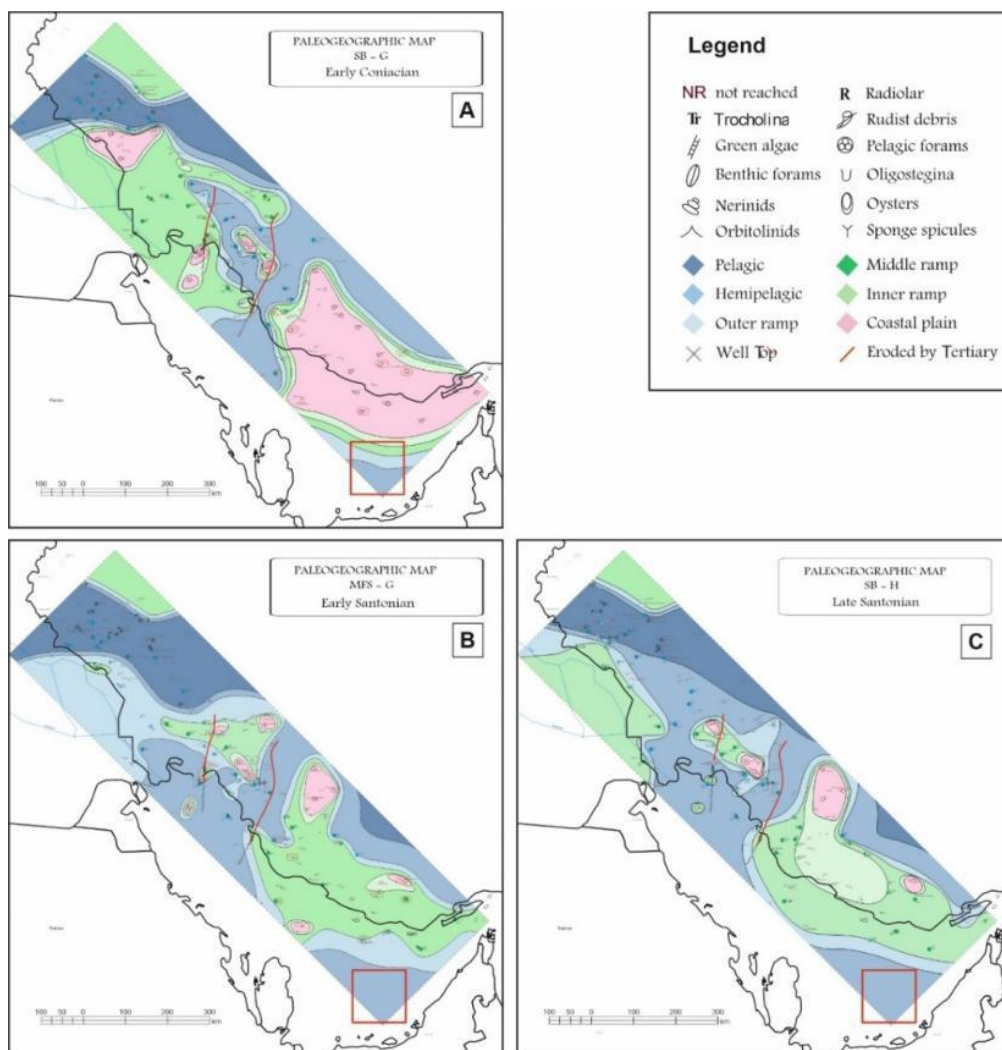
جدول ۳. خلاصه‌ی اطلاعات زون‌بندی مخزنی روش لورنز برای سازند ایلام در چاه مورد مطالعه.
Table 3. Summarized characteristics of Lorenz zones defined in the Ilam Formation.

کد زون‌ها	ظرفیت جریان	ظرفیت ذخیره	کد ریزرخساره	ویبلند گونه سنگی	واحد جریان هیدرولیکی	سیستم فشار	دانه‌ها س	نوع زون
زون ۱	۴/۷۴	۲/۷۵	۵, ۱	۲, ۱	۳, ۲, ۱	ریزتخلخل، بین‌دانه‌ای	سیمانی‌شدن، فشردگی، نوشکلی	زون بافل
زون ۲	۸/۹۰	۱۲/۸۰	۱	۳	۶, ۵	بین‌دانه‌ای، حفره‌ای، قالبی	انحلال، میکرایتی‌شدن، نوشکلی	زون مخزنی
زون ۳	۱۲/۰۸	۷/۹۶	۱	۶	۸	شکستگی	سیمانی‌شدن، شکستگی	زون مخزنی
زون ۴	۱۵/۳۰	۲۰/۱۰	۳, ۱	۵, ۴	۶, ۵, ۳	بین‌دانه‌ای، حفره‌ای، شکستگی	فشردگی، دولومیتی‌شدن، انحلال	زون مخزنی
زون ۵	۹/۰۴	۱۶/۸۸	۵, ۴	۶, ۵	۷, ۶	بین‌دانه‌ای، حفره‌ای، قالبی، بین‌بلوری	دولومیتی‌شدن، انحلال، نوشکلی	زون مخزنی
زون ۶	۱۱/۴۴	۲۲/۰۲	۵, ۴	۶, ۵, ۴	۷, ۶, ۵	بین‌دانه‌ای، حفره‌ای، قالبی	انحلال، نوشکلی، دولومیتی‌شدن	زون مخزنی
زون ۷	۶/۸۴	۴/۵۸	۱	۳, ۲	۳, ۲	بین‌دانه‌ای	سیمانی‌شدن، فشردگی، دولومیتی‌شدن	زون تله‌ای
زون ۸	۱۲/۳۹	۹/۱۴	۶, ۵	۴, ۳	۶, ۵	بین‌دانه‌ای، حفره‌ای، شکستگی	انحلال، شکستگی، نوشکلی	زون سدی
زون ۹	۱۰/۴۶	۲/۵۲	۶	۲, ۱	۳, ۲, ۱	شکستگی، ریزتخلخل	فشردگی، انحلال، شکستگی	زون سرعت
زون ۱۰	۶/۸۲	۱/۲۵	۲, ۱	۲	۳, ۲	ریزتخلخل	سیمانی‌شدن، فشردگی	زون سدی



شکل ۱۲. نمودار ظرفیت تجمعی جریان (KH) در برابر ظرفیت تجمعی ذخیره (PhiH) و زون‌بندی مخزنی به روش لورنز بر پایه نقاط شکست در منحنی برای سازند ایلام در ناحیه‌ی مورد مطالعه.

Fig. 12. Cross plot of storage capacity (PhiH) versus flow capacity (KH) and reservoir zonation of the Ilam Formation in the studied well. According to this plot, ten zones were defined.



شکل ۱۳. نقشه‌های دیرینه جغرافیایی توالی‌های کنیاسین-سانتونین سازند لافان-ایلام (ون بوخم و همکاران، ۲۰۰۶). موقعیت میدان مورد مطالعه به صورت مستطیل قرمز روی نقشه‌ها مشخص شده است.

Fig. 13. Paleogeographic maps of the Zagros Basin and the Persian Gulf during Coniacian – Santonian (after van Buchem et al., 2006). The study area is marked by red rectangle.

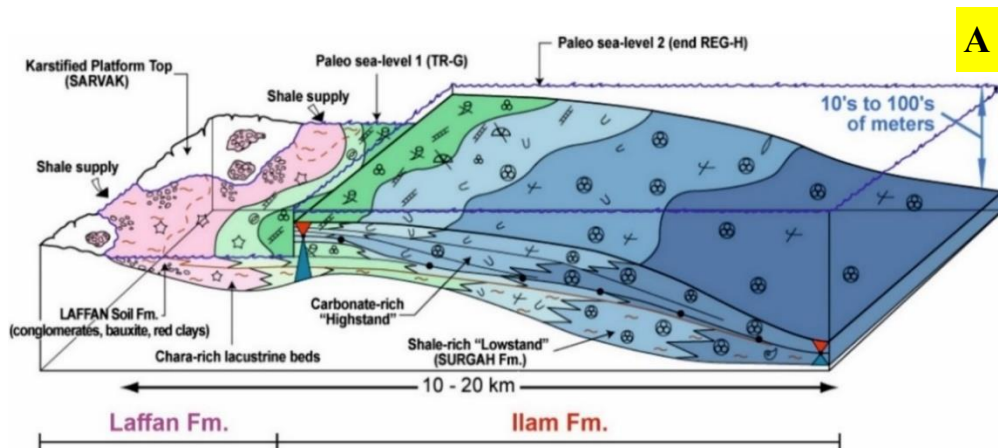
و خلیج فارس، در مقایسه با سازند سروک، دگرسانی‌های دیاژنزی متفاوت و ساده‌تری را تجربه کرده است. این تفاوت عمدتاً ناشی از فقدان رخنمون دیرینه و ویژگی‌های دیاژنزی مرتبط با آن‌ها (مانند انحلال جوی گسترده، برشی شدن و سیمانی شدن جوی) در سازند ایلام است (خدایی و همکاران، ۲۰۲۱). بر این اساس، تاریخچه دیاژنزی سازند ایلام شامل دیاژنزی دریایی (میکرایتی شدن، زیست‌آشفستگی و سیمانی شدن هم‌ضخامت) و دیاژنزی دفنی گسترده کم‌عمق تا عمیق (فشرده‌گی مکانیکی و شیمیایی، سیمانی شدن کلسیتی، دولومیتی شدن، انحلال، شکستگی و تبلور مجدد) است. نظیر همین تاریخچه دیاژنزی توسط سایر محققین از سازند ایلام در دیگر نواحی زاگرس و خلیج فارس نیز گزارش شده است (خانجانی و همکاران،

۵-۲- تاریخچه دیاژنزی

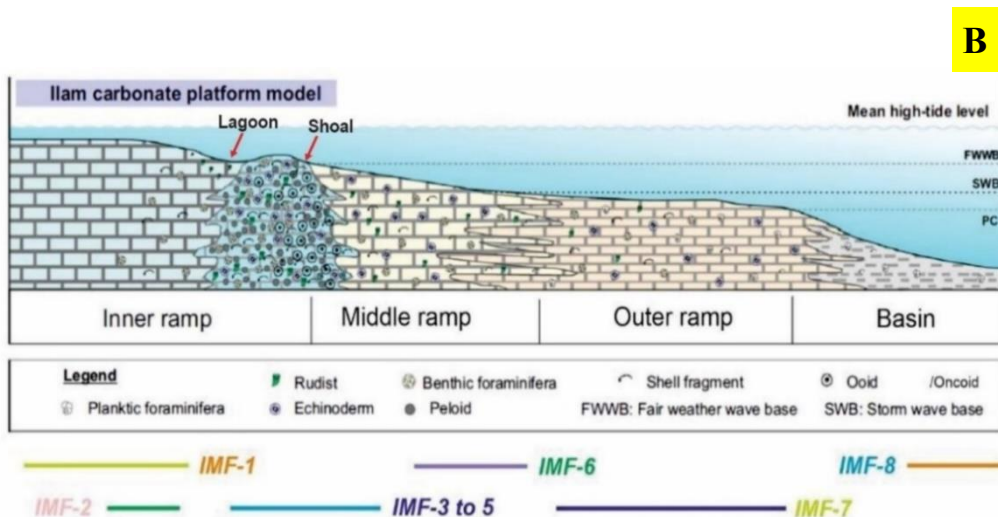
برای بررسی شکل‌گیری مخزن ایلام و تکامل آن در طول رویدادهای پس از رسوبگذاری، از نتایج مطالعات پتروگرافی استفاده شده است. در نتیجه، فازهای دیاژنزی متوالی که کربنات‌های سازند ایلام را تحت تاثیر قرار داده‌اند، مورد مطالعه قرار گرفتند. فرآیندهای اصلی دیاژنزی شامل سیمانی شدن، دولومیتی شدن، فشرده‌گی مکانیکی و شیمیایی (استیلولیتی شدن)، تبلور مجدد، میکرایتی شدن، انحلال و شکستگی می‌باشند. تفسیر قلمروهای دیاژنزی این فرآیندها در میدان مورد مطالعه به همراه مروری بر مطالعات رسوب‌شناسی قبلی بر روی این سازند در مناطق همجوار برای بازسازی توالی پاراژنزی سازند ایلام استفاده شده است (شکل ۱۵). سازند ایلام در اغلب نواحی زاگرس

دریایی و جوی از فراوانی و اهمیت کمتری در این سازند برخوردارند. از دیدگاه تاثیر بر کیفیت مخزنی نیز، فرآیندهای دیاژنزی دفنی نظیر فشردگی، سیمانی شدن، دولومیتی شدن، انحلال دفنی و شکستگی بیشترین اهمیت را دارند (خدایی و همکاران، ۲۰۲۱؛ قلیزاده و همکاران، ۲۰۲۲).

۲۰۱۵؛ عنایتی بیدگلی و همکاران، ۲۰۲۰؛ خدایی و همکاران، ۲۰۲۱؛ قلیزاده و همکاران، ۲۰۲۲؛ احمدی نبی و همکاران، ۲۰۲۲؛ مهرابی و توکلی، ۲۰۲۴). بر اساس این مطالعات نیز عمده‌ی تاریخچه دیاژنزی سازند ایلام در قلمروهای دور از سطح یعنی در قلمرو تدفینی سپری شده است و فرآیندهای دیاژنزی نزدیک به سطح نظیر دیاژنزی

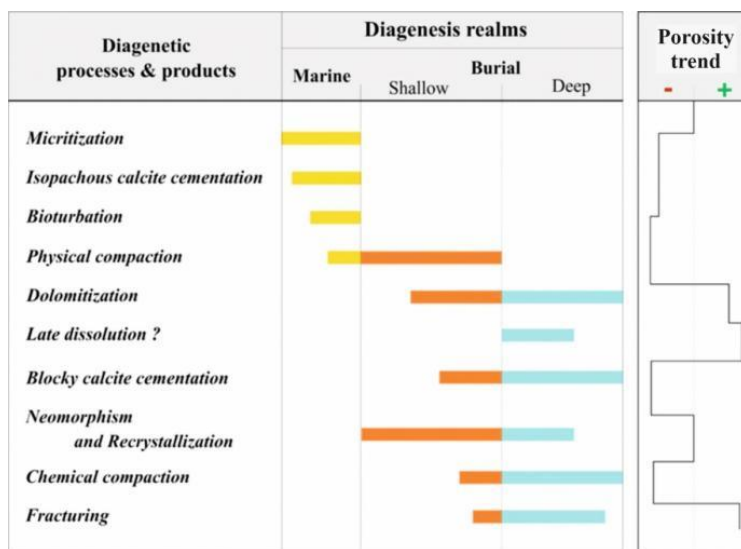


GEOMETRIES	Low-angle slope (1-5m / km)
MAIN PRODUCERS	Inner / mid ramp : algae, benthic forams, rudists, echinoderms Outer ramp / basin : planctonic forams, oligosteginids, bivalves
OTHER CHARACTERS	Detrital carbonate clasts (proximal setting) - high clay supply ("Lowstand")
SEDIMENTATION RATES	9 - 36 m / Ma
COMMENTS	Evidences of karst development Areas with thick "lacustrine" deposits



شکل ۱۴. A: مدل رسوبی مرجع سازند ایلام در حوضه زاگرس (ون بوخه و همکاران، ۲۰۰۱). B: مدل رسوبی پیشنهادی برای سازند ایلام در چاه مورد مطالعه از بخش شرقی خلیج فارس (اقتباس شده با تغییراتی از مهرابی و همکاران، ۲۰۱۵).

Fig. 14. A) Regional depositional model of the Ilam Formation in the Zagros Basin (van Buchem et al., 2001). B) Conceptual depositional model of the Ilam Formation in the SE Persian Gulf (with some modifications from Mehrabi et al., 2015).



شکل ۱۵. توالی پاراژنی سازند ایلام در میدان مورد مطالعه.

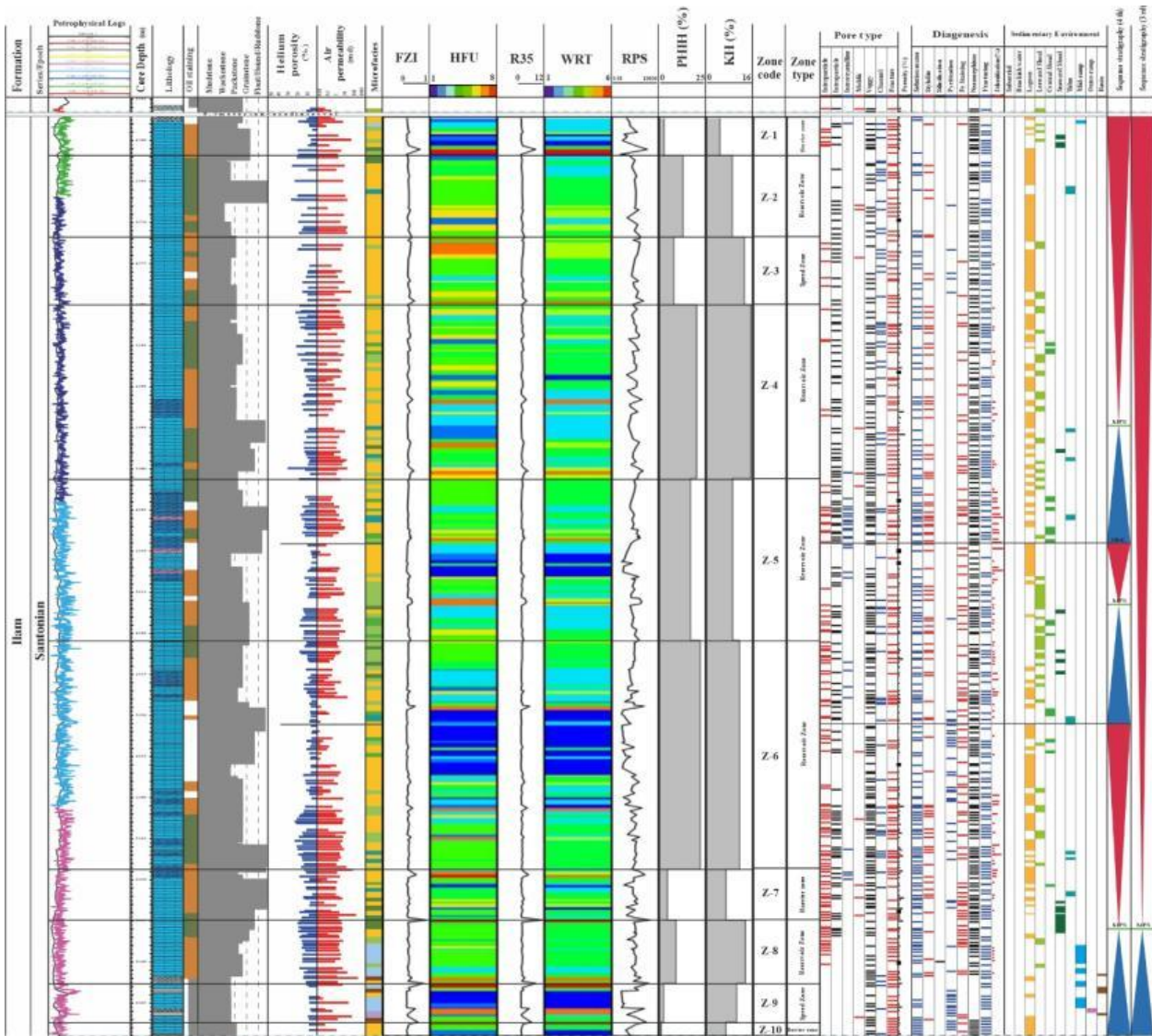
Fig. 15. Paragenetic sequence of the Ilam Formation in the studied field.

با سیستم ترکرت پیشرونده سکانس رده سوم سازند ایلام مطابقت می‌کنند. بالاترین و پایین بخش سازند ایلام با گسترش دو زون سدی^۱ مشخص شده است (زون‌های ۱ و ۱۰ در شکل ۱۶). رخساره‌های متراکم و سیمانی شده‌ی لاگونی با بافت گل غالب موجب پایین بودن تخلخل و تراوایی در این بخش‌ها شده‌اند. نظیر همین روندهای کلی تغییرات مخزنی در سازند ایلام از سایر نواحی زاگرس و خلیج فارس نیز گزارش شده‌اند (خانجانی و همکاران، ۲۰۱۵؛ خدایی و همکاران، ۲۰۲۱؛ احمدی‌نبی و همکاران، ۲۰۲۲). به طور کلی، در اغلب نقاط زاگرس، سازند ایلام در بخش قاعده‌ای خود از رخساره‌های گل غالب دریای باز تشکیل شده است که در آن‌ها، غلبه‌ی ریزتخلخل‌ها منجر به تشکیل واحدهای با ظرفیت ذخیره‌ی بالا و ظرفیت جریان پایین شده است. این واحدها بر اساس تقسیم‌بندی لورنز به عنوان زون‌های تله‌ای معرفی می‌شوند که در صورت اعمال روش‌های ازدیاد برداشت می‌توانند هیدروکربور قابل توجهی تولید نمایند. بخش بالایی سازند ایلام در اغلب نواحی زاگرس از رخساره‌های کم عمق و دانه غالب متعلق به کمربندهای رخساره‌ای شول و واریزه‌های ریفی تشکیل شده است که بطور متناوب با رخساره‌های لاگون گسترش یافته‌اند. این رخساره‌ها اغلب دارای پتانسیل مخزنی متوسط تا بالایی می‌باشند و زون‌های مخزنی با کیفیتی را در این بخش از سازند ایلام به وجود آورده‌اند.

۵-۳- کیفیت مخزنی در چهارچوب سکانس‌های رسوبی

نتایج مجموعه مطالعات رسوب‌شناسی و کیفیت مخزنی در سازند ایلام در قالب ستون جامع کیفیت مخزنی در شکل ۱۶ نشان داده شده است. بر اساس روش لورنز، سازند ایلام به ۱۰ زون تقسیم گردیده که از این تعداد، پنج زون مخزنی، دو زون سدی، دو زون تله‌ای و یک زون سرعت شناسایی شده است. همانگونه که مشخص است، تمرکز اصلی زون‌های مخزنی در این سازند (زون‌های شماره ۲، ۴، ۵ و ۶) در سیستم ترکرت پیشرونده سکانس رده سوم ثبت شده است. در این سیستم ترکرت، غلبه‌ی رخساره‌های دانه غالب متعلق به کمربندهای رخساره‌ای شول و واریزه‌های ریفی در کنار وقوع فرآیندهای دیاژنزی نظیر انحلال و دولومیتی شدن، منجر به بهبود خصوصیات پتروفیزیکی (تخلخل و تراوایی) شده است. غلبه‌ی رخساره‌های گل غالب (مادستون و وکستون) متعلق به زیرمحیط‌های رمپ بیرونی با محتوای قابل توجه (تا ۱۵ درصد) از ریزتخلخل‌ها و گسترش ریزشکستگی در این رخساره‌ها منجر به ایجاد افق‌های مخزنی نسبتاً با کیفیت در بخش‌هایی از نیمه‌ی پایینی سازند ایلام شده است. بالا رفتن تراوایی در اثر شکستگی (و تا حدودی دولومیتی شدن) موجب گسترش زون‌های سرعت در قاعده‌ی سازند ایلام شده است (زون‌های ۷ تا ۹ در شکل ۱۶). این زون‌ها

¹ barrier zone



شکل ۱۶. ستون جامع کیفیت مخزنی سازند ایلام در چاه مورد مطالعه از بخش شرقی خلیج فارس.

Fig. 16. Comprehensive reservoir quality evaluation log of the Ilam Formation in SE Persian Gulf.

۶- نتیجه‌گیری

فرآیندهای دیاژنزی اثرگذار بر این سازند شامل میکربیتی شدن، سیمانی شدن، زیست‌آشفتنگی، انحلال، فشردگی مکانیکی و شیمیایی، دولومیتی شدن، نوشکلی و پیریتی شدن می‌باشند که در قلمروهای دریایی، جوی و تدفینی کم عمق تا عمیق رخ داده‌اند. در این میان، اهمیت فرآیندهای دیاژنزی تدفینی در کنترل خصوصیات مخزنی و سیستم حفرات سازند ایلام بسیار چشمگیرتر از سایر فرآیندها بوده است. دولومیتی شدن و انحلال میکروسکوپی به همراه ریزشکستگی‌ها سبب بهبود کیفیت مخزنی برخی افق‌های سازند ایلام شده‌اند.

تفسیر چینه‌نگاری سکانسی نشان داد که سازند ایلام از یک سکانس رسوبی پیشرونده-پسرونده رده سوم تشکیل شده

تلفیق نتایج مطالعات رسوب‌شناسی و ارزیابی خصوصیات مخزنی سازند ایلام در یکی از چاه‌های واقع در بخش شرقی خلیج فارس با هدف بررسی عوامل کنترل‌کننده کیفیت مخزنی این سازند انجام گرفت. مهم‌ترین نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشند:

تحلیل ریزرخساره‌های رسوبی و بازسازی مدل رسوبی سازند ایلام با استفاده از نتایج مطالعات پتروگرافی بر روی مغزه‌های حفاری و مقاطع نازک میکروسکوپی نشان داد که این سازند از ۸ ریزرخساره رسوبی تشکیل شده است. تفسیر این ریزرخساره‌ها بر مبنای مدل‌های استاندارد رخساره‌ای حاکی از نهشته شدن آن‌ها در بخش‌های درونی، میانی و بیرونی یک پلاتفرم کربناته از نوع رمپ می‌باشند.

- Alavi, M (2004) Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science*, 304: 1–20.
- Alsharhan, A. S., & Nairn, A. E. M (1988) A review of the Cretaceous formations in the Arabian Peninsula and gulf, part II, mid-Cretaceous (Wasia Group), stratigraphy and paleontology, *Journal of Petroleum Geology*, 11: 89-112. doi.org/10.1111/j.1747-5457.1986.tb00400.x.
- Alsharhan, A. S., & Nairn, A. E. M (1997) Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East. Elsevier, Amsterdam, p 843.
- Amaefule, J. O., Altnubay, M., Tiab, D., Kersey, D. G., Keeland, D. K (1993) Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in un-cored intervals/wells. *Society of Petroleum Engineers, SPE*, 26436: 1–16. doi.org/10.2118/26436-MS.
- Bagherpour, B., Mehrabi, H., Faghih, A., Vaziri-Moghaddam, H., Omidvar, M (2021) Tectono-eustatic controls on depositional setting and spatial facies distribution of Coniacian–Santonian sequences of the Zagros Basin in Fars area, S. Iran. *Marine and Petroleum Geology* 129: 105072.
- Dunham, R. J (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: *Classification of carbonate rocks* (Ed. W. E. Ham), AAPG Memoir, 1: 108-121.
- Embry, A. F (2002) Transgressive-Regressive (T-R) Sequence Stratigraphy. *SEPM Society for Sedimentary Geology*. doi.org/10.5724/gcs.02.22.
- Enayati-Bidgoli, A. H., Rahimpour-Bonab, H., Navidtalab, A (2020) Coated grains in the Upper Cretaceous Ilam Formation: implication for paleoclimatic reconstruction. *Geopersia*, 10 (2): 227-243.
- Farzipour-Saein, A., Yassaghi, A., Sherkati, S., & Koyi H (2009) Basin evolution of the Lurestan region in the Zagros fold-and-thrust belt, Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 32: 5–19.
- Flügel, E (2010) *Microfacies of Carbonate Rocks, Analysis, Interpretation and Application*. Springer-Verlag, Berlin, 976 p.
- Ghabeishavi, A., Vaziri-Moghaddam, H., Taheri, A (2009) Facies distribution and sequence stratigraphy of the Coniacian-Santonian succession of the Bangestan palaeo-high in the Bangestan Anticline, SW Iran. *Facies*, 55: 243-257. doi.org/10.1007/s10347-008-0171-3.
- Gholizadeh, M., Adabi, M. H., Sadeghi, A., Moradi, M (2022) Sedimentary Environment, Diagenesis, Sequence Stratigraphy, and Reservoir Quality of the Ilam Formation in Dezful Embayment and Abadan Plain in South-West Iran. doi.org/10.48550/arXiv.2210.05930.
- است که سیستم ترکت پیشرونده‌ی آن با غلبه‌ی رخساره‌های پلاژیک دریای باز (مادستون، وکستون و پکستون‌های حاوی الیگوستژینا و فرامینیفرای پلانکتون) و سیستم ترکت پسرونده با غلبه‌ی رخساره‌های رمپ درونی و میانی شامل رخساره‌های لاگون، واریزه‌های ریفی و شول مشخص می‌باشند.
- سیستم حفرات سازند ایلام متشکل از منافذ اولیه (رسوبی)، ثانویه (دیاژنزی) و شکستگی‌ها در سه مقیاس بزرگ (مغزه‌های حفاری)، متوسط (مقاطع نازک میکروسکوپی) و ریز (تصاویر میکروسکوپ الکترونی) تفکیک گردید و مشخص شد که ریزتخلخل‌های موجود در ریزرخساره‌های دریای باز در سیستم ترکت پیشرونده نقش بسزایی در بالابردن ظرفیت ذخیره در بخش پایینی این سازند داشته‌اند. از سوی دیگر، حفرات متوسط تا بزرگ مقیاس عمدتاً در بخش بالایی سازند ایلام و در ریزرخساره‌های متعلق به پشته‌های زیرآبی (شول) و واریزه‌های ریفی غلبه دارند.
- تعداد ۸ واحد جریان‌ی هیدرولیکی و ۱۰ زون مخزنی، تله‌ای و سدی در سازند ایلام تفکیک شده است و ارتباط آن‌ها با خصوصیات رخساره‌ای و عوارض دیاژنزی در چارچوب چینه‌نگاری سکانسی مورد بررسی قرار گرفته است.

References

- Adabi, M. H., Asadi Mehmandosti, E (2008) Microfacies and geochemistry of the Ilam Formation in the Tang-E Rashid area, Izeh, SW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33: 267–277. doi.org/10.1016/j.jseaes.2008.01.002.
- Aghanabati, A (2006) *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran, Tehran, 586. (In Persian).
- Ahmadhadi, F., Lacombe, O., & Daniel, J. M (2007) Early reactivation of basement faults in Central Zagros (SW Iran): evidence from pre-folding fracture populations in Asmari Formation and lower Tertiary paleogeography. In: Lacombe, O. (Ed.), *Thrust Belts and Foreland Basins: from Fold Kinematics to Hydrocarbon Systems*. *Frontiers in Earth Sciences Series*. Springer, Berlin, 205–228. doi.org/10.1007/978-3-540-69426-7_11.
- Ahmadi Nabi, M., Jahani, D., Soleimani, B (2022) Microfacies, Sedimentary Environment and Diagenetic Processes Analysis of Ilam Formation in Gachsaran Oil Field, Zagros Basin Gachsaran Oil Field, Zagros Basin. *Journal of Petroleum Research*, 32 (125): 60-76. doi.org/10.22078/PR.2022.4456.3016.
- Ahr, W. M (2008) *Geology of carbonate reservoirs*. John Wiley and Sons, Chichester, 296 p.

- Maglio-Johnson, T (2000) Petrophysical Definition of Flow Units in a Deep-Water Sandstone, Lewis Shale, Wyoming. AAPG Search and Discovery, Article #90909.
- Mehrabi, H., Rahimpour-Bonab, H (2014) Paleoclimate and tectonic controls on the depositional and diagenetic history of the Cenomanian-early Turonian carbonate reservoirs, Dezful Embayment, SW Iran. *Facies*, 60: 147–167. doi.org/10.1007/s10347-013-0374-0.
- Mehrabi, H., Rahimpour-Bonab, H., Enayati-Bidgoli, A.H., Navidtalab, A (2014) Depositional environment and sequence stratigraphy of the Upper Cretaceous Ilam Formation in central and southern parts of the Dezful Embayment, SW Iran. *Carbonates Evaporites*, 29: 263–278. doi.org/10.1007/s13146-013-0168-z.
- Mehrabi, H., Rahimpour-Bonab, H., Hajikazemi, E., Jamalian, A (2015) Controls on depositional facies in Upper Cretaceous carbonate reservoirs in the Zagros area and the Persian Gulf, Iran. *Facies*, 61 (23): doi.org/10.1007/s10347-015-0450-8.
- Mehrabi, H., Ranjbar-Karami, R., & Roshani-Nejad, M (2019) Reservoir rock typing and zonation in sequence stratigraphic framework of the Cretaceous Dariyan Formation, Persian Gulf. *Carbonates and Evaporites*, 34(4): 1833-1853. doi.org/10.1007/s13146-019-00530-2.
- Mehrabi, H., Omidvar, M., Hajikazemi, E., Ahmadi, Y (2023) Paleoenvironmental reconstruction, bio- and sequence stratigraphy of Upper Cretaceous (Cenomanian–Santonian) strata in the Persian Gulf, Iran (pp. 363–412). doi.org/10.1016/bs.sats.2023.08.003.
- Mehrabi, H., & Tavakoli, V (2024) Deposition, Diagenesis, and Geochemistry of Carbonate Sequences. MDPI. doi.org/10.3390/books978-3-7258-0687-4.
- Mirzaei-Paiaman, A., Ostadhassan, M., Rezaee, R., Saboorian-Jooybari, H., Chen, Z (2018) A new approach in petrophysical rock typing, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 166: 445–464. doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.075.
- Moore, C. H. & Wade, W. J (2013) Carbonate reservoirs: porosity, evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework: Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework, Second edition. Elsevier, 369 p.
- Motiei, H (1993) Stratigraphy of Zagros. Geological Survey of Iran Publication, Tehran, 536 p (In Persian).
- Murris, R. J (1980) Middle East: stratigraphic evolution and oil habitat. *American Association Petroleum Geologists Bulletin*, 64: 597–618.
- Navidtalab, A., Sarfi, M., Enayati-Bidgoli, A. H., Yazdi-Moghadam, M (2019) Syn-depositional
- Gomes, J. S., Ribeiro, M. T., Strohmenger, C. J., Naghban, S., Kalam M. Z (2008) Carbonate reservoir rock typing-the link between geology and SCAL. Paper SPE- 118284, presented at SPE Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE, 3-6 November. doi.org/10.2118/118284-MS.
- Hay, W. W (2008) Evolving ideas about the Cretaceous climate and ocean circulation. *Cretaceous Research*, 29: 725–753. doi.org/10.1016/j.cretres.2008.05.025.
- Hollis, C (2011) Diagenetic controls on reservoir properties of carbonate successions within the Albian-Turonian of the Arabian Plate. *Petroleum Geoscience*, 17: 223-241. doi.org/10.1144/1354-079310-032.
- Huber, B. T., Norris, R. D., MacLeod, K. G (2002) Deep-sea paleotemperature record of extreme warmth during the Cretaceous, *Geology*, 30: 123-126.
- Jahadgar, F., Maleki, Z., Solgi, A., Arian, M., Sorbi, A (2020) Evaluation of the role of structures in the distribution of hydrocarbons in Sarvak and Ilam Formations using fuzzy logic in the Bandar Abbas hinterland. *Tectonics Journal*, 4 (15): 100-115 (In Persian). doi.org/10.22077/JT.2021.1680.
- Jooybari, A., Rezaee, P., Mehdipour, M (2022) Investigating the role of microfacies, depositional conditions and diagenesis on the quality of the reservoir section, Ilam Formation (Santonian-Campanian) in one of the fields in southwestern Iran, Dezful Embayment. *Iranian Journal of Petroleum Geology*, 21: 16-32 (In Persian).
- Khanjani, M., Moussavi Harami, R., Rahimpour-Bonab, H., Kamali, M., Chehrizi, A (2015) Determination of the Reservoir Layers of Ilam Formation on the Basis of Facies and Seismic Studies in the Southeastern Persian Gulf. *Petroleum Research Volume 25*, 85-1 - Serial Number, 85: 113-127 (In Persian). doi.org/10.22078/PR.2016.584.
- Khodaei, N., Rezaee, P., Honarmand, J., Fard, I. A (2021) Controls of depositional facies and diagenetic processes on reservoir quality of the Santonian carbonate sequences (Ilam Formation) in the Abadan Plain, Iran. 36: 19. doi.org/10.1007/s13146-021-00676-y.
- Lucia, F. J (2007) Carbonate reservoir characterization: an integrated approach. Springer-Verlag, Berlin, 341p. doi.org/10.1007/978-3-540-72742-2.
- Madanipour, S., Najafi, M., Nozaem, R., Vergés, J., Yassaghi, A., Heydari, I., Khodaparast, S., Soudmand, Z., Aghajari, L (2024) The Arabia – Eurasia collision zone in Iran: tectonostratigraphic and structural synthesis. *Journal of Petroleum Geology*, 47(2): 123–171. doi.org/10.1111/jpg.12854.

- nomenclature. *Petrol. Geosci.*, 17: 211–222. doi.org/10.1144/1354-079310-061.
- Ziegler, M (2001) Late Permian to Holocene paleofacies evolution of the Arabian Plate and its hydrocarbon occurrences. *GeoArabia*, 6: 445–504. doi.org/10.2113/geoarabia0603445.
- continental rifting of the Southeastern Neo-Tethys margin during the Albian–Cenomanian: evidence from stratigraphic correlation. *Int. Geol. Rev.*
- Orang, K., Motamedi, H., Azadikhah, A., Royatvand, M (2018) Structural framework and tectono-stratigraphic evolution of the eastern Persian Gulf, offshore Iran, *Marine and Petroleum Geology*.
- Piryaei, A., Reijmer, J. J. G., Van Buchem, F. S. P., Yazdi-Moghadam, M., Sadooni, J., Danelian, T (2010) The influence of Late Cretaceous tectonic processes on sedimentation patterns along the northeastern Arabian plate margin (Fars Province, SW Iran). In: Leturmy P, Robin C (eds.) *Tectonic and stratigraphic evolution of Zagros and Makran during the Mesozoic–Cenozoic*. *Geol. Soc. Lond., Special publication*, 330: 211–251. doi.org/10.1144/SP330.11.
- Rahimpour-Bonab, H., Mehrabi, H., Enayati-Bidgoli, A. H., Omidvar, M (2012a) Coupled imprints of tropical climate and recurring emersions on reservoir evolution of a mid-Cretaceous carbonate ramp, Zagros Basin, SW Iran. *Cretaceous Researches*, 37: 15–34. doi.org/10.1016/j.cretres.2012.02.012.
- Rahimpour-Bonab, H., Mehrabi, H., Navidtalab, A., Izadi-Mazidi, E (2012b) Flow unit distribution and reservoir modelling in cretaceous carbonates of the Sarvak Formation, Abteymour Oilfield, Dezful Embayment, SW Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 17(3): 213–236.
- Sharland, P. R., Archer, R., Casey, D. M., Davies, R. B., Hall, S. H., Heward, A. P., Horbury, A. D., Simmons M. D (2001) Arabian Plate sequence stratigraphy. *Gulf PetroLink (Bahrain)*, *GeoArabia*, 2 (Special Publication), 371pp. doi.org/10.2113/geoarabia1204101.
- Van Buchem, F. S. P., Gaumet, F., Vedrenne, V., Vincent, B (2006) Middle East Cretaceous sequence stratigraphy. Unpublished report, NIOC-IFP, 167 p.
- Van Buchem, F. S. P., Letouzey, J., Gaumet, F., Rudkiewicz, J. L., Mengus, J. M., Baghbani, D., Sherkati, Sh., Asillian, H., Keyvani, F., Ashrafzadeh, R., Ehsani, M. H (2001) The petroleum systems of the Dezful Embayment and Northern Fars (south-west Iran). NIOC Internal Report No 55.7291.
- Van Buchem, F. S. P., Simmons, M. D., Droste, H. J., Davies, R. B (2010) Late Aptian to Turonian stratigraphy of the eastern Arabian Plate—depositional sequences and lithostratigraphic

Petrographic and petrophysical data integration for reservoir quality evaluation of the Ilam Formation in a field located in the eastern Persian Gulf

F. Naderi Ghombavani¹, H. Mehrabi^{2*} and S. M. Zamanzadeh³

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

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

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

* mehrabi.hamze@ut.ac.ir

Received: 2024.5.19 Accepted: 2024.6.30

Abstract

The present study evaluates the factors controlling the reservoir quality of this formation in one of the fields located in the eastern part of the Persian Gulf. For this purpose, the integration of sedimentological studies with petrophysical analyses has been utilized. Petrographic studies revealed that the Ilam Formation in the studied field is composed of eight sedimentary microfacies, which are deposited in inner, middle, and outer sub-environments of a ramp-like carbonate platform. The diagenetic processes affecting this formation include micritization, cementation, bioturbation, dissolution, mechanical and chemical compaction, dolomitization, neomorphism, and pyritization, occurring in marine, meteoric, and shallow to deep burial realms. The types of pores present in this formation have been classified into three scales: macro, medium, and micro, and it was found that the micropores observable in electron microscope images significantly enhance the storage capacity of this formation, especially in its lower part. Sequence stratigraphy interpretations indicated that the entire sequence of the Ilam Formation consists of a third-order sequence (comprising a transgressive systems tract and a regressive systems tract). Additionally, three fourth-order sequences were also identified. Reservoir quality analyses based on the determination of hydraulic flow units and Lorenz zonation resulted in the differentiation of 8 flow units and 10 reservoir, baffle, and barrier zones in the Ilam Formation. These flow units and reservoir zones were evaluated within the sequence stratigraphic framework, and it was found that the lower part of the Ilam Formation (the transgressive systems tract of the third-order sequence) has high storage capacity and low flow capacity, and can be considered an unconventional reservoir of the tight carbonate type. The middle part of this formation (around the maximum flooding surface) does not have significant reservoir quality, while the upper part of this formation (the regressive systems tract) with the dominance of shoal facies and partial dissolution, has high quality.

Keywords: Ilam Formation, facies, diagenetic, Flow unit, Reservoir zonation, Persian Gulf

Introduction

All reservoir characteristics (static and dynamic) of carbonate sequences result from sedimentary factors and post-depositional changes (diagenesis) and fracturing. Different sedimentary and diagenetic environments determine the amount and type of porosity, the geometry of pore throats, the distribution of pore sizes, and permeability. Despite their significant importance in reservoir studies, petrophysical properties are considered one-dimensional data lacking three-dimensional (spatial) information about the reservoir volume and can only be three-dimensionally modeled when correlated with geological characteristics (rock fabric). Therefore, it is essential first to determine the rock fabric

properties (facies, diagenesis, pore types) in the reservoirs and correlate them with petrophysical parameters (logs, porosity, and permeability).

Thick Cretaceous sediment accumulations in the Arabian platform and the Zagros Basin contain extremely large and economically significant hydrocarbon reserves. The Ilam Formation (Coniacian–Santonian) is one of the important reservoirs of the Bangestan Group, primarily composed of carbonate rocks. In general, limited studies from various geological, petrophysical, geophysical, and reservoir perspectives have been conducted on different hydrocarbon reservoirs in the Persian Gulf region, particularly the eastern Persian Gulf. This limitation was due to the scarcity of

core data from this area, which has been somewhat alleviated in recent years with new drilling and coring. The present study aims to use new data obtained from the Ilam reservoir and integrate the results of petrographic and petrophysical studies to evaluate the distribution of reservoir properties in this formation in one of the fields located in the eastern Persian Gulf. The results of this study will greatly aid in understanding the factors controlling the reservoir quality of the Ilam Formation in this area and will serve as a foundational study for future exploitation and development goals of this reservoir.

Data and Methods

The present study was conducted on the Ilam Formation in a well from one of the oil fields located in the southeast of the Persian Gulf. The most important available data include thin sections, drilling cores, well log data, porosity and permeability data obtained from routine core analysis, X-ray diffraction (XRD) analysis data, and scanning electron microscope (SEM) images. A total of 340 core porosity–permeability data points were used for determining flow units and reservoir zonation. Additionally, petrographic studies were conducted to identify sedimentary and diagenetic features affecting the reservoir on 370 thin sections prepared from 112.58 meters of drilling cores. SEM studies were performed on 15 samples, and XRD analysis was conducted on 12 samples.

For facies nomenclature, the Dunham (1962) classification was used, for microfacies classification, the Flugel (2010) classification and standard model were applied, for sequence stratigraphy, the Embry (2002) transgressive-regressive method was employed, and for differentiating reservoir and non-reservoir units, four methods were used to determine the rock types of the Ilam Formation in the studied well: petrographic rock typing, hydraulic flow units determination, and stratigraphic modified Lorenz plot.

Results and Discussion

Based on petrographic studies, eight sedimentary microfacies have been identified in the Ilam Formation. These microfacies, according to their textural characteristics, fossil content, and with the help of standard facies models, have been categorized into four facies

belts: inner ramp, middle ramp, outer ramp, and basin.

Inner Ramp (Lagoon, Talus, and Shoal):

This facies belt includes wackestone to mudstone containing peloids, benthic foraminifera, bioclasts (algae) (IMF-1), rudstone/floatstone containing bioclasts (rudists, algae, and corals) (IMF-2), packstone containing peloids, benthic foraminifera, and bioclasts (IMF-3), grainstone containing peloids and benthic foraminifera (IMF-4), and grainstone to packstone containing bioclasts (echinoids) (IMF-5). The skeletal grains include algae, bivalves, rudists, gastropods, and benthic foraminifera, while the non-skeletal grains include peloids and intraclasts. Bioturbation, micritization, and lesser cementation are notable sedimentary features in this facies belt. Due to the presence of a dominant grain texture, the absence or scarcity of clay matrix, filling of intergranular spaces with sparry cement, and the presence of shallow marine organisms, this facies belt is attributed to the inner ramp (lagoon, reef talus, and shoal) based on existing evidence.

Middle Ramp: This facies belt includes wackestone to mudstone containing bioclasts (echinoids) (IMF-6). It contains skeletal grains such as small benthic foraminifera (e.g., the *Rotalia* sp.) and some planktonic foraminifera, bioclasts (including fragments of echinoderms, bivalves, and red algae), and oligosteginids. Peloids and rare intraclasts are present as non-skeletal particles. This mud-dominated facies has a predominantly limestone lithology, with bioturbation being the only notable sedimentary feature. Considering the abundance of skeletal components indicative of open marine environments, dominant grain and mud textures, and association with open marine facies, this facies belt is attributed to the middle parts of the carbonate platform (middle ramp).

Basin/Outer Ramp: This facies belt includes pelagic shale/marl/mudstone (IMF-8) and microbial bioclast mudstone to wackestone (IMF-7). The facies contain skeletal allochems, mainly fine-grained echinoid remains, sponge spicules, and planktonic foraminifera, along with non-skeletal allochems like fine peloids and dark minerals. Laminations and bioturbation are the only notable structures in this facies belt. The presence of open marine organisms such as planktonic foraminifera, along with mud-dominated textures (mudstone

and wackestone), indicates that these facies are related to the outer parts of the platform (basin and outer ramp).

Various diagenetic processes have affected the intervals studied in the Ilam Formation in the studied field, which include: micritization, bioturbation, neomorphism, cementation, compaction, dolomitization, dissolution, and fracturing. Some of these diagenetic processes impact the primary reservoir potential in both positive and negative aspects. The most significant diagenetic processes affecting the reservoir quality of the Ilam Formation are:

- Diagenetic processes that enhance reservoir quality: dissolution, dolomitization, and fracturing
- Diagenetic processes that diminish reservoir quality: cementation and compaction

The Ilam Formation, dating to the Santonian-Campanian age, in various regions of the Zagros and the Middle East, consists of a third-order depositional sequence that includes two systems tracts: Transgressive Systems Tract (TST) and Regressive Systems Tract (RST). In the studied well, this third-order depositional sequence has also been differentiated. Additionally, in this study, three fourth-order depositional sequences have been identified in the Ilam Formation. Below, we describe the systems tracts of the third-order sequence in the Ilam Formation:

Transgressive Systems Tract (TST):

According to paleogeographic maps and interpretations, a significant and extensive sea-level rise and transgression occurred in the early Santonian across the northeastern margin of the Arabian Plate. This event led to the reestablishment of carbonate platforms after a prolonged subaerial exposure following the Mishrif Formation. This transgressive phase is characterized by the development of pelagic carbonate facies in the early Santonian in the lower part of the Ilam Formation (and its stratigraphic equivalents) in the Zagros region of Iran and neighboring countries, which include mud-dominated microfacies with microporous characteristics (basin, outer ramp to middle ramp facies). Microfacies IMF-6, IMF-7, and IMF-8 fall within this section. These can be considered as the Transgressive Systems Tract (TST) of the Santonian depositional sequence.

Regressive Systems Tract (RST): Towards the upper part of the Ilam Formation, the outer ramp facies gradually transition into middle

ramp facies and high-energy facies of shoal, lagoon, and reef talus complexes, indicating a shallowing upward trend. Coarse-grained, grain-dominated facies with significant porosity are located in the upper part of the Ilam Formation. Microfacies IMF-1 to IMF-5 dominate this section and can be considered as the Regressive Systems Tract (RST) of the Santonian depositional sequence.

The pore system of the Ilam Formation exhibits considerable diversity and variation in size distribution. Based on size, three categories of pores have been identified in the Ilam Formation:

- Micropores with an average size of 0.06 millimeters
- Mesopores with an average size of 0.06 to 4 millimeters
- Macropores with an average size of 4 to 256 millimeters

This classification follows the schemes proposed by Choquette and Pray (1970) and Mazzullo (1992).

The cumulative probability plot for the Flow Zone Indicator (FZI) values showed that the Ilam Formation in the studied well consists of eight hydraulic flow units (HFU). From hydraulic flow unit one (HFU-1) to hydraulic flow unit eight (HFU-8), the reservoir quality increases. The cumulative flow capacity (KH) versus cumulative storage capacity (PhiH) plot for the Ilam Formation in the studied well was drawn. After plotting this graph in a stratigraphic order, sections of the plot with different slopes indicate varying storage and flow capacities. By determining the breakpoints or inflection points, reservoir units, baffles, barriers, and speed zones can be distinguished at different thicknesses using the Lorenz method. Based on the number of breakpoints present in the Lorenz plot, 10 different zones have been identified and differentiated in the Ilam Formation. Among them, five reservoir zones with high storage and flow capacities have been identified. Additionally, two barrier zones, two baffle zones, and one speed zone have also been recognized in this formation.

The dominance of mudstone and wackestone facies belonging to the outer ramp environments with significant content (up to 15%) of micropores and the extension of fractures in these facies have led to the creation of relatively high-quality reservoir horizons in parts of the lower half of the Ilam Formation.

The significant increase in permeability due to fracturing (and to some extent dolomitization) has resulted in the expansion of speed zones at the base of the Ilam Formation (zones 7 to 9). These zones correspond to the prograding system of the third-order sequence of the Ilam Formation. The uppermost and lowermost parts of the Ilam Formation are characterized by the expansion of two barrier zones (zones 1 and 10). Dense and cemented lagoonal facies with dominant mud content have resulted in low porosity and permeability in these sections.

Conclusion

The integration of sedimentological study results and the evaluation of reservoir characteristics of the Ilam Formation in one of the wells located in the eastern part of the Persian Gulf was conducted with the aim of investigating the factors controlling the reservoir quality of this formation. The most important results obtained are as follows:

- Analysis of sedimentary microfacies and reconstruction of the sedimentary model of the Ilam Formation, using petrographic studies on drilling cores and thin microscopic sections, showed that this formation consists of 8 sedimentary microfacies. The interpretation of these microfacies based on standard facies models indicates their deposition in the inner, middle, and outer parts of a carbonate platform of the ramp type.
- The diagenetic processes affecting this formation include micritization, cementation, bioturbation, dissolution, mechanical and chemical compaction, dolomitization, neomorphism, and pyritization, occurring in marine, meteoric, and shallow to deep burial realms. Among these, the importance of burial

diagenetic processes in controlling the reservoir characteristics and pore systems of the Ilam Formation has been significantly more notable than other processes. Dolomitization and microscopic dissolution, along with microfractures, have improved the reservoir quality of certain horizons of the Ilam Formation.

- Sequence stratigraphy interpretations indicated that the Ilam Formation consists of a third-order regressive-transgressive sedimentary sequence, where its transgressive systems tract is dominated by open marine pelagic facies (mudstone, wackestone, and packstone containing oligostegina and planktonic foraminifera), and the regressive systems tract is dominated by inner and middle ramp facies, including lagoon facies, reef talus, and shoals.

- The pore system of the Ilam Formation comprises primary (sedimentary) pores, secondary (diagenetic) pores, and fractures, categorized into three scales: large (drilling cores), medium (thin sections), and small (scanning electron microscope images). It was found that the microporosity present in the open marine microfacies in the transgressive systems tract played a significant role in increasing the storage capacity in the lower part of this formation. On the other hand, medium to large scale pores predominantly exist in the upper part of the Ilam Formation and in microfacies related to shoals and reef talus facies.

- A total of 8 hydraulic flow units and 10 reservoir, baffle, and barrier zones were identified in the Ilam Formation, and their relationships with facies characteristics and diagenetic features were examined within the framework of sequence stratigraphy.