

چینه‌نگاری سکانسی بخش آهکی مَند (ژوراسیک میانی) در جنوب فروافتادگی دزفول، جنوب باختری ایران

علی حسین جلیلیان^{۱*} و محمدعلی کاوسی^۲

۱- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران

۲- اداره اکتشاف شرکت ملی نفت، تهران، ایران

نویسنده مسئول: jalilian@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۵/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۲۰

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

بخش آهکی مَند عنوان غیررسمی یک واحد سنگ‌چینه‌ای شاخص در مناطق مرکزی و خاوری زاگرس است که مرز ژوراسیک میانی-پسین بر انتهای آن منطبق است. به‌منظور آگاهی از شرایط محیطی و سکانس‌های رسوبی این واحد آهکی در جنوب فروافتادگی دزفول، داده‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی حاصل از حفاری دو حلقه چاه از میدان‌های نفتی چهاربیشه و میلان برسی شده است. در این بُرش‌ها، بخش آهکی مَند ۱۲۵ و ۱۴۰ متر ستبرا دارد و از دو واحد کربناته تمیز (پرتوی گامای کم) تشکیل شده است که با یک افق شیلی (رُسی) از هم جدا شده‌اند. سنگ‌نگاری ۸۰ مقطع نازک تهیه شده از خرده‌ها و مغزه‌های حفاری نشان داد که گریستون‌های اینتراکلاستی- آلییدی و پلوییدی ریزرخساره‌های اصلی بخش مَند در این ناحیه هستند که با وکستون‌های اسکلتی (روزنداران، جلبک‌های سبز و اسپیکول اسفنج) و مادستون‌های آهکی همراهی می‌شوند. یافته‌های این تحقیق حاکی است که این مجموعه رسوبی در زیرمحیط‌های مختلف یک رمپ هموکلینال شامل تالاب، شول (سد) آلیتی و دریای باز نهشته شده است. همچنین، تلفیق داده‌های چینه‌نگاری با یافته‌های حاصل از بررسی نمودارهای چاه‌پیمایی (اشعه گاما- صوتی) نشان داد که قسمت زیرین بخش آهکی مَند دسته رخساره‌های تراز بالای سکانس رسوبی رده سومی است که نهشته‌های دریای عمیق سازند سرگلو (باژوسین) تراز پیشرونده آن را ساخته‌اند. به‌همین ترتیب، لایه شیلی و واحد کربناته بالایی نیز دسته رخساره‌های یک سکانس رده سوم هستند که سطح حداکثر پیشروی آن معرف MFS J40 (کالوین میانی) در جنوب ایران است.

واژگان کلیدی: چینه‌نگاری سکانسی، بخش آهکی مَند، فروافتادگی دزفول

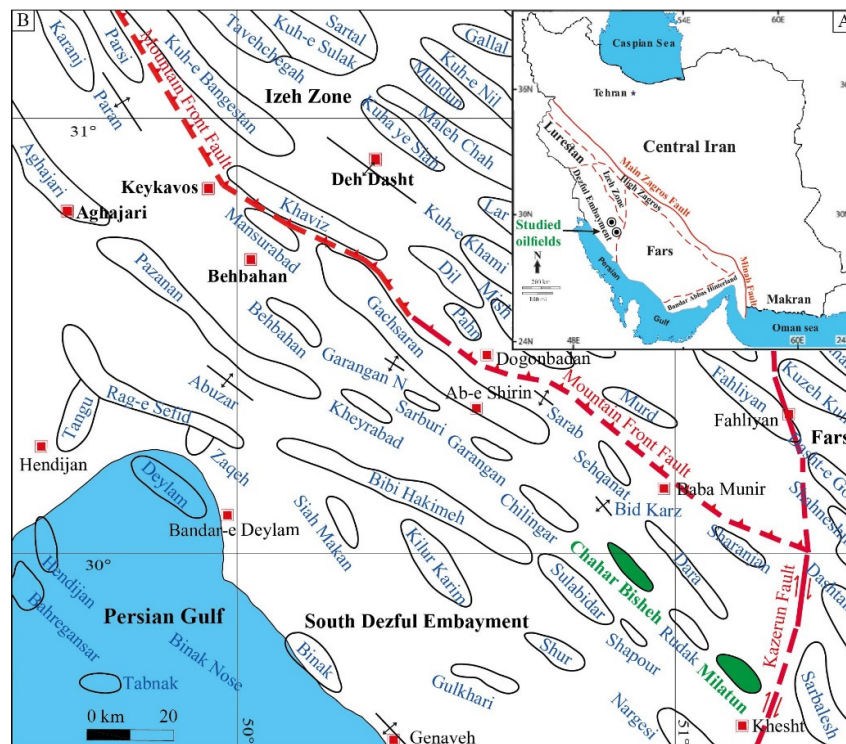
۱- پیشگفتار

یکی از چالش‌های مهم مربوط به مطالعه واحدهای سنگ‌چینه‌ای پیش از کرتاسه در پهنه زاگرس به‌خصوص در مناطق مرکزی آن، کمبود داده‌های مورد نیاز است که از محدودیت رخنمون‌ها و بُرش‌های زیرسطحی قابل دسترسی ناشی می‌شود. در این محدوده نهشته‌سنگ‌های کهن‌تر از کرتاسه تنها در هسته معدودی از تاقدیس‌های دورافتاده و محصور در ارتفاعات سخت‌گذر زاگرس بلند (زون ایزده) از جمله مُنگشت، کی‌نو، میمند و زردکوه رخنمون یافته‌اند. افزون بر این، در حفاری اغلب چاه‌های نفت و گاز زاگرس چین‌خورده و دشت آبادان نیز هدف نهایی رسیدن به مخازن آسماری (الیگو- میوسن) و یا ایلام- سروک (سنومانین- سانتونین) و فهلان (بریاژین-

هوتریون) بوده است. بنابراین، در بیشتر حفاری‌ها هم اطلاعات قابل‌توجهی در این مورد به دست نیامده است. به‌همین خاطر، جنبه‌های مختلف زمین‌شناسی نهشته‌های پیش از کرتاسه در زاگرس مرکزی کمتر بررسی شده و یا نتایج این‌گونه مطالعات چندان منتشر نشده است که در هر صورت یک مسئله قابل تأمل است. در سال‌های اخیر، با تعمیق حفاری بعضی از میدان‌های نفت و گاز منطقه فارس و فروافتادگی دزفول برای رسیدن به مخازن زیرین از جمله خامی (ژوراسیک-کرتاسه) اطلاعات با ارزشی در ارتباط با این ردیف‌ها به‌دست آمده است. این داده‌ها حاکی از وجود واحد کربناته شاخصی در توالی رسوبی ژوراسیک زاگرس است که بخش آهکی مَند معرفی شده است (ستوده‌نیا، ۱۹۷۸). بُرش الگوی غیررسمی این بخش در

از میدان‌های نفتی چهاربیشه و میلان در جنوب فروافتادگی دزفول بحث و بررسی خواهد شد. محیط‌های رسوبی متفاوت نقش‌های متمایزی در ایجاد سنگ‌های منشأ، مخزن و پوشش نفت و گاز ایفا می‌کنند. بنابراین، یافته‌های این تحقیق می‌تواند در درک بهتر شرایط زمین‌شناسی این ناحیه و برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری بهینه از منابع هیدروکربنی آن مفید فایده باشد.

چاه شماره دو میدان نفتی کوه مند در ۶۵ کیلومتری جنوب خاوری بوشهر به ضخامت ۱۰۳ متر اندازه‌گیری شده است. این بخش آهکی، آخرین واحد سنگ‌چینه‌ای ژوراسیک میانی در پهنه ایران جنوبی است که مرز اشکوب‌های دوگر و مالم از انتهای آن می‌گذرد (غضبان، ۲۰۰۷؛ جلیلیان، ۱۳۹۳). در این مقاله محیط رسوب‌گذاری و سکانس‌های رسوبی بخش آهکی مند بر اساس داده‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی حاصل از حفاری دو حلقه چاه



شکل ۱. A: جایگاه زمین‌شناسی و گسترش جغرافیایی زیرپهنه‌های مختلف زاگرس در جنوب و باختر ایران و B: چارچوب ساختاری بخش جنوب خاوری زاگرس مرکزی متشکل از جنوب فروافتادگی دزفول و زون ایذه که با گسل‌های پیشانی کوهستان و کازرون از یکدیگر و پلتفرم فارس جدا شده‌اند. موقعیت میدان‌های نفتی چهاربیشه و میلان با رنگ سبز مشخص شده است (بر اساس داده‌های بربریان، ۱۹۹۵؛ سپهر و کاسگرو، ۲۰۰۴؛ شرکاتی و لتوزی، ۲۰۰۴).

Fig. 1. A: Geological position and geographic expansion of different Zagros domains in the south and western Iran; B: Structural framework of the southeastern part of the central Zagros consisting of the southern Dezful Embayment and the Izeh zone which are separated from each other and the Fars platform by Kazerun and Mountain Front faults. The location of Chahar Bisheh and Milatun oil fields is marked in green (based on Berberian, 1995; Sepehr and Cosgrove, 2004; Sherkati and Letouzey, 2004).

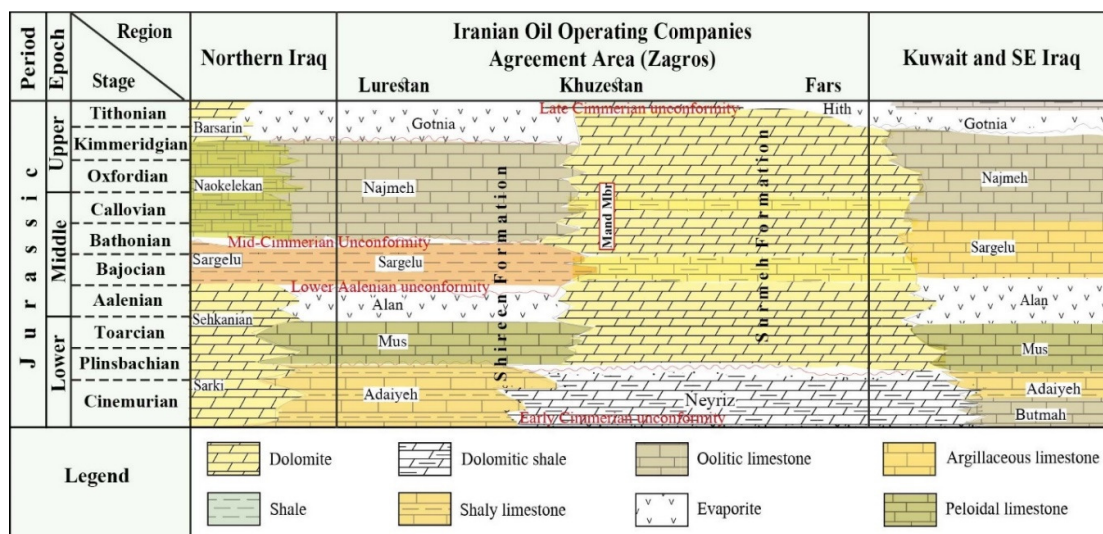
هیدروکربن بالایی دارد و مهم‌ترین میدان‌های نفتی جنوب ایران از جمله آزادگان، آغاجاری، اهواز، گچساران و مارون در آن کشف شده‌اند (بردنیف و هگری، ۲۰۱۰؛ بردنیف، ۲۰۱۴). در حقیقت، فروافتادگی دزفول شامل زمین‌های واقع در بخش میانی زاگرس مرکزی است که از جنوب با دشت آبادان و دشت ساحلی شمال خلیج فارس و در شمال با زون ایذه محصور شده‌اند (شرکاتی و همکاران، ۲۰۰۶؛

۲- زمین‌شناسی و چینه‌نگاری ناحیه مورد مطالعه

میدان‌های نفتی چهاربیشه و میلان در حاشیه جنوب خاوری فروافتادگی دزفول (منطقه خوزستان) قرار دارند (شکل ۱). این فروافتادگی یک عارضه ساختاری مهم در حوضه زاگرس است که کربنات‌های سازند آسماری و نهشته‌های کهن‌تر از آن فاقد رخنمون هستند (بربریان، ۱۹۹۵؛ آقاباتی، ۱۳۸۳). به‌همین خاطر، توان تولید

تغییرات سازندهای ژوراسیک در مناطق شمالی زاگرس (لرستان و عراق) عنوان غیررسمی سازند شیرین برای معرفی آن‌ها پیشنهاد شده است (حیدری، ۲۰۰۸؛ شکل ۲). در چاه‌های شماره یک میدان‌های چهاربیشه و میلان، ردیف نسبتاً کاملی از نهشته‌های عهد حاضر تا ژوراسیک میانی به ترتیب در اعماق ۴۳۷۰ و ۴۰۹۲ متری حفاری شده است. مخازن اصلی این میدان‌ها کربنات‌های گروه خامی و سازند آسماری است که از مخزن اخیر در میدان میلان گاز هم تولید می‌شود (اسرافیلی‌دیزجی و رحیم‌پوربناب، ۲۰۱۹). در بُرش زیرسطحی چهاربیشه، بخش آهکی مَند ۱۲۵ متر (اعماق ۴۰۲۰ تا ۴۱۴۵ متر) و در میدان میلان ۱۴۰ متر (اعماق ۳۵۱۷ تا ۳۶۵۷ متر) ضخامت دارد که به‌طور عمده از سنگ‌های کربناته تشکیل شده است. این بخش متشکل از دو واحد آهکی تمیز است که با یک افق شیلی (آهک رُسی) به ضخامت حدود ۱۰ متر از هم تفکیک شده‌اند. با توجه به این که در نمودارهای درون چاهی پرتو گاما، بخش آهکی مَند رادیواکتیویته طبیعی کمی از خود نشان می‌دهد، آهک تمیز خوانده شده است (مطیعی، ۱۳۷۲؛ غضبان، ۲۰۰۷). مرزهای زیرین و بالایی بخش آهکی مَند با شیل و آهک‌های پلاژیک ژوراسیک میانی (سازند سرگلو) و کربنات‌های ژوراسیک پسین (سازند نجمه) محدود شده است.

آلن و طالبیان، (۲۰۱۱). این سرزمین با عبور گسل‌های کازرون و بالارود از زیرپهنه‌های فارس و لرستان جدا شده است (سپهر و کاسگروو، ۲۰۰۴). تکاپوی این گسل‌ها در دوره‌های مختلف یکی از عوامل اصلی کنترل‌کننده رسوب‌گذاری، تکامل و دگرشکلی‌های گوناگون در فروافتادگی دزفول بوده است (موحد و همکاران، ۲۰۱۴؛ فرحزادی و همکاران، ۲۰۱۹). به‌عنوان نمونه، حوضه درون شلفی کُزدمی (آپتین-آلبین) که تأمین‌کننده اصلی هیدروکربن‌های منطقه است، با عملکرد همین گسل‌ها ایجاد شده است (وینسنت و همکاران، ۲۰۱۰؛ جلیلیان، ۱۴۰۰). ویژگی‌های زمین‌شناسی فروافتادگی دزفول در همه جا یکسان نبوده و رخساره‌ها و ضخامت واحدهای رسوبی آن تا حدودی متفاوت است. بر همین اساس، آن را به دو بخش جنوبی و شمالی تفکیک کرده‌اند که مرز آن‌ها بر گسل هنديجان منطبق است. سیستم ژوراسیک در زاگرس شامل رسوبات دریایی و عمدتاً پلت‌فرمی است که مجموع ضخامت آن‌ها در نواحی جنوبی خوزستان حدود ۱۸۰۰ متر برآورد شده است (مطیعی، ۱۳۷۲). این مجموعه رسوبی شامل سازندهای نیریز، عدايه، موس، علن، سرگلو، نجمه و گوتنیا است که با سازندهای نیریز، سورمه و هیث در منطقه فارس هم‌ارز هستند (الشهران و نیرن، ۲۰۰۲؛ عبدالله و همکاران، ۲۰۱۵). با توجه به تنوع و



شکل ۲. معرفی واحدهای سنگ‌چینه‌نگاری ژوراسیک در مناطق مختلف زاگرس از شمال عراق تا جنوب ایران و مقایسه آن‌ها با بعضی از نواحی پیرامون خلیج فارس از جمله کویت و جنوب خاوری عراق (بر اساس داده‌های جیمز و واینند، ۱۹۶۵؛ ستوده‌نیا، ۱۹۷۸؛ الشهران و نیرن، ۲۰۰۳؛ حیدری، ۲۰۰۸). موقعیت بخش آهکی مَند با مستطیل قرمز مشخص است.

Fig. 2. The overview of Jurassic stratigraphic units in different areas of Zagros from northern Iraq to southern Iran and comparing with some areas around the Persian Gulf, including Kuwait and southeastern Iraq (based on James and Wynd, 1965; Setudehnia, 1978; Alsharhan and Nairn, 2003; Heydari, 2008). The location of the Mand Limestone Member is marked with a red rectangle.

۳- روش مطالعه

این تحقیق بر پایه تجزیه و تحلیل داده‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی حاصل از حفاری چاه‌های شماره یک و میدان‌های نفتی چهاربیشه و میلان در جنوب فروفادگی دزفول انجام شده است. میدان‌های مورد نظر در شمال و شمال باختری شهر خشت از توابع شهرستان کازرون در استان فارس واقع شده‌اند و حدود ۲۰ کیلومتر با هم فاصله دارند. این میدان‌ها در محدوده شرکت نفت و گاز گچساران از زیرمجموعه‌های شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب قرار دارند. در سنگ‌نگاری ۸۰ مقطع نازک تهیه شده از مغزه‌ها و خرده‌های حفاری میدان میلان و ویژگی‌های بافتی، اجزای تشکیل دهنده سنگ‌ها و فراوانی نسبی آلومک‌ها بررسی و براساس طبقه‌بندی دانه‌ها (۱۹۶۲) نام‌گذاری شدند. البته حد بالایی اندازه میکرایت ۶۰ میکرون در نظر گرفته شده است. در بررسی نمودارهای درون چاهی گاما و صوتی، ترکیب کلی سنگ‌ها در دیواره چاه‌ها مشخص و واحدهای سنگی متفاوت (کربناته و شیلی) از هم مشخص گردید. مزیت اصلی این نمودارها نمایش پیوسته ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌ها در توالی مورد مطالعه است، اما در مقایسه با مشاهده مستقیم نمونه‌ها از دقت کمتری برخوردارند. بنابراین، برای اعتبارسنجی آن‌ها با داده‌های پتروگرافی مطابقت و کنترل شده‌اند. یافته‌های حاصل از بررسی مقاطع نازک و نمودارهای چاه‌نگاری به شناخت ریزرخساره‌هایی انجامید که با تحلیل و مقایسه آن‌ها با انواع شناخته شده امروزی از جمله ویلسون (۱۹۷۵) و فلوگل (۲۰۱۰) محیط رسوبی و جغرافیای دیرینه بازسازی شده است. همچنین، با توجه به ارتباط ریزرخساره‌های پیوسته با زیرمحیط‌های کنار هم (اصل والتر^۱) نوع پلت‌فرم کربناته مشخص و در قالب یک مدل رسوبی نشان داده شده است. چیدمان عمودی ریزرخساره‌ها در توالی رسوبی ناشی از جابجایی مکرر زیرمحیط‌ها در گذر زمان و گویای تغییرات نسبی عمق، ایجاد سطوح چین‌های و سکانس‌های رسوبی است. بر اساس موقعیت سطوح چین‌های و الگوی جای‌گیری پاراسکانس‌ها در مدل وان واگنر و همکاران (۱۹۸۸) هر سکانس به دسته‌های رخساره‌ای^۲ (لاسمی، ۱۳۷۹) متفاوت تفکیک شده است. برای آگاهی از وضعیت سطح جهانی آب دریاها در ژوراسیک میانی به داده‌های گلونکا و

کیسلینگ (۲۰۰۲) و حق و القحطانی (۲۰۰۵) استناده شده است. همچنین، با توجه به زون‌های زیستی معرفی شده برای سنگ‌های ژوراسیک در زاگرس از جمله واین (۱۹۶۵)، گلستانه (۱۹۷۴) و ستوده‌نیا (۱۹۷۸) سن توالی مورد مطالعه مشخص و سطوح حداکثر پیشروی^۳ آن با سطوح معادل در منطقه (برای نمونه زیگلر، ۲۰۰۱؛ شارلند و همکاران، ۲۰۰۱) مقایسه شده است.

۴- بحث

۴-۱- تجزیه و تحلیل ریزرخساره‌ها

سنگ‌نگاری مقاطع نازک و بررسی نمودارهای گاما-صوتی چاه‌های مورد مطالعه نشان داد که که کربنات‌ها ترکیب سنگ‌شناسی غالب در بخش مَند هستند که با بین‌لایه‌هایی از شیل و آهک‌های رُسی در میانه توالی همراهی می‌شوند. اینتراکلاست‌ها، آئیدها و پلوییدها اجزای اصلی تشکیل دهنده این سنگ‌های کربناته هستند که در افق‌های مختلف با مقادیر کمتری از بایوکلاست‌ها (عمدتاً روزنداران بنتونیک، جلبک‌های سبز و قطعاتی از خارپوستان) جایگزین شده‌اند. روزنداران پلانکتونیک، اسپیکول اسفنج و کلسی‌سفرها نیز اجزای فرعی این بخش هستند. براساس بافت و ترکیب نمونه‌های این مجموعه رسوبی می‌توان آن را در قالب شش ریزرخساره به شرح زیر تفکیک کرد که به‌طور خلاصه در جدول ۱ معرفی شده‌اند.

۱- ریزرخساره مادستون آهکی (شیل) (MF1)

توصیف: این ریزرخساره معرف افق شیلی میانه بخش آهکی مَند است که عمدتاً از گل کربناته و کمتر از ۱۰٪ آلومک‌های مختلف تشکیل شده است. در نمونه‌های آن اندک روزنداران پلاژیک، کلسی‌سفر، دوکفه‌ای‌های پلانکتونیک (کوچک با پوسته نازک) و اسپیکول اسفنج با اندازه کوچک‌تر از ۰/۵ میلی‌متر در زمینه‌ای از میکرایت پراکنده‌اند (شکل‌های ۳A-B). در اصل گل‌های کربناته و مارن‌هایی هستند که پس از رسوب‌گذاری دچار تغییراتی در بافت و ترکیب شده و با انتظام کانی‌های رُسی متورق شده‌اند. بنابراین، شیلی بودن خاصیت اکتسابی این ریزرخساره و ناشی از اعمال فشارهای حاصل از تدفین (دیاژنز) است (تاگر، ۲۰۰۱؛ باگس، ۲۰۰۹). مادستون‌های

³ Maximum Flooding Surface

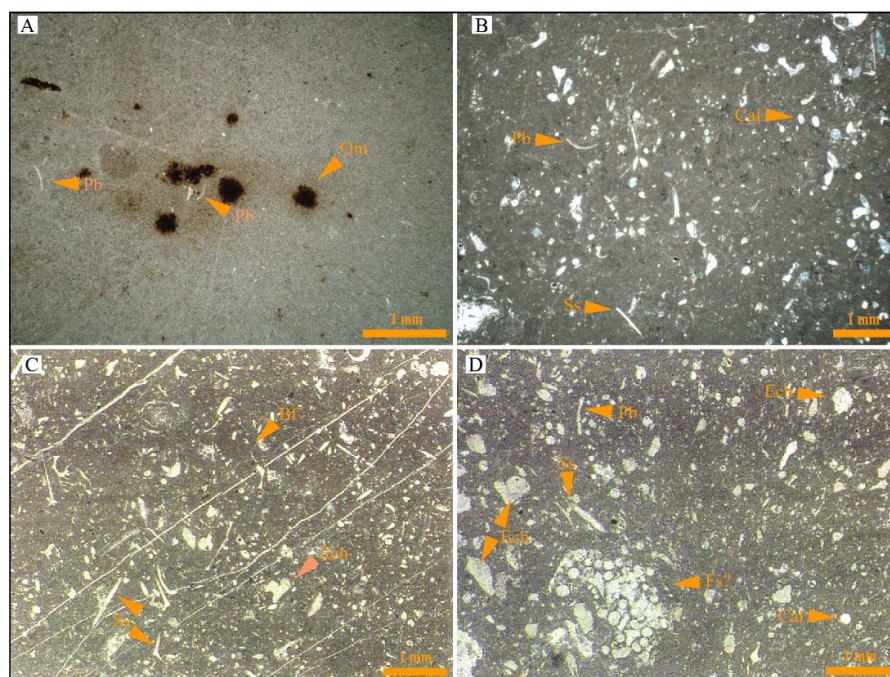
¹ Walther's law

² System Tract

شده‌اند (غیبشای و همکاران، ۲۰۱۰؛ عبدالله و همکاران، ۲۰۱۵). پلاژیک به معنای دریای آزاد و مترادف با نهشته‌های معلق است که در شرایط آرام دور از ساحل رسوب می‌کنند. بنابراین، کمتر تحت تأثیر فرایندهای خشکی قرار می‌گیرند و نرخ رسوب‌گذاری آن‌ها بسیار پایین (۰/۰۱ تا ۰/۰۵ میلی‌متر در سال) است (تاکر و رایت، ۱۹۹۰؛ آلابای، ۲۰۰۸). مادستون آهکی پلاژیک عنوان ریزرخساره استاندارد^۵ شماره ۳ فلوگل (۲۰۱۰) است که شاخص بخش‌های انتهایی دریای آزاد و رمپ خارجی^۶ است است که تحت عنوان کمر بند رخساره‌ای ۳ ویلسون (۱۹۷۵) شناخته شده است.

آهکی کمترین مشارکت نسبی را در توالی رسوبی مورد مطالعه دارند.

تفسیر: حضور پراکنده بقایای بعضی از جانوران پلانکتونیک در مقابل فقدان موجودات آب‌های کم‌عمق، غلبه زمینه میکرایتی و آثار لامیناسیون ظریف در نمونه‌های ریزرخساره مادستون آهکی گویای محیط آرام و کم‌انرژی تشکیل آن است (شوله و آل‌مر-شوله، ۲۰۰۳؛ هانیکه و مولدر، ۲۰۱۱). در بعضی از مقاطع نازک آثار مواد آلی (هیدروکربن) نیز قابل مشاهده است. چنین ویژگی‌هایی از نشانه‌های رسوبات قسمت عمیق و نسبتاً احیایی دریاها (پلاژیک) است که پایین‌تر از قاعده امواج توفانی^۴ تشکیل



شکل ۳. تصاویر ریزرخساره‌های مربوط به زیرمحیط رمپ خارجی (دریای آزاد) بخش آهکی مند در چاه شماره یک میدان نفتی میل‌اتون؛ A و B: مادستون آهکی پلاژیک (شیل) با اندک بقایای دوکفه‌ای‌های پلانکتونیک (Pb)، اسپیکول اسفنج (Ss) و کلسی‌سفرهای (Cal) پراکنده در زمینه‌ای از گل آهکی با آثار مواد آلی (Om)؛ C: وکستون بایوکلاستی دانه‌ریز شامل مخلوطی از اسپیکول اسفنج، خرده‌های خارپوست (Ech) و روزنداران بنتونیک (Bf) و D: وکستون بایوکلاستی با اسپیکول اسفنج، قطعات خارپوست، کلسی‌سفر و احتمالاً قسمتی از یک اسفنج شناور (Fs?) در سمت چپ تصویر (PPL).

Fig. 3. Images of the microfacies related to the outer ramp (open marine) of the Mand Limestone Member in Milatun well No. 1; A and B: pelagic lime mudstone (shale) with few remains of planktonic bivalves (Pb), sponge spicules (Ss) and calcispheres (Cal) scattered in a fine-grained matrix with traces of organic matter (Om); C: fine-grained bioclastic wackestone including a mixture of sponge spicules, echinoderm fragments (Ech) and benthic foraminifera (Bf) and D: bioclastic wackestone with sponge spicules, echinoderm fragments, calcispheres and possibly part of a floating sponge (Fs?) on the left side of the image (PPL).

و روزنداران و اجزای پلانکتونیک (اسپیکول اسفنج و کلسی‌سفر) تشکیل داده‌اند (شکل‌های D-۳C). فراوانی اجزای اسکلتی بین ۱۵ تا ۴۰٪ متغیر است که با یک زمینه میکرایتی تیره احاطه شده‌اند. آلوکم‌ها غالباً

۲- ریزرخساره وکستون بایوکلاستی مختلط (بنتونیک و پلانکتونیک) (MF2)

توصیف: آلوکم‌های این ریزرخساره را مخلوطی از بقایای جانوران بنتونیک از جمله خرده‌های خارپوست، شکم‌پایان

⁶ Distal open marine (outer ramp)

⁴ Storm Wave Base (SWB)

⁵ Standard microfacies

سیمان‌های آهکی دروزی موزائیک تا بلوکی^۶ به هم مستحکم شده‌اند.

تفسیر: گرینستون‌های آهکی اساساً محصول بخش‌های پرانرژی میانه پلت‌فرم‌های کربناته (سدهای زیست‌زاد و شول‌های آلیتی) هستند (آقایی و همکاران، ۲۰۱۲؛ ملایم و همکاران، ۲۰۲۰). این بخش از کارخانه‌های تولید کربنات بین قاعده امواج توفانی و عادی^۷ گسترش دارد و به‌همین دلیل متأثر از انواع جریان‌ها و حرکات قدرتمند دریاهاست (ویلسون، ۱۹۷۵؛ عقروی و همکاران، ۲۰۰۷). گردش پیوسته آب دریا در داخل رسوبات و شستشوی مداوم آن‌ها سبب اصلاح ویژگی‌های بافتی، خروج گل‌های کربناته و تشکیل انواع سیمان شده است. تغییر تنوع آلوکم‌ها در قالب لامینه‌ها و لایه‌های متناوب نیز نشانه تغییرات مکرر انرژی و شرایط رسوبی در این محیط‌هاست (کارانانیت و همکاران، ۲۰۰۰؛ اسدی و همکاران، ۲۰۱۶). گرینستون‌های غیراسکلتی را می‌توان معادل ریزرخساره‌ای استاندارد شماره ۵ فلوگل (۲۰۱۰) در کمر بند رخساره‌ای ۵ ویلسون (۱۹۷۵) معرفی کرد.

۴- ریزرخساره گرینستون اینتراکلاستی آلییدی پلوییدی (MF4)

توصیف: اینتراکلاست‌ها آلوکم اصلی این ریزرخساره (حدود ۴۵٪) هستند که آلیدها و پلویدهایی با فراوانی حدود ۱۵ تا ۲۵٪ آن‌ها را همراهی می‌کنند. مقادیر اندکی جلبک‌های سبز، بقایای خارپوستان و نرم‌تنان نیز در بعضی از مقاطع نازک حضور دارند. میانگین اندازه دانه‌ها در حد ۱ میلی‌متر و جورشدگی آن‌ها ضعیف است (شکل ۴B). سیمان‌های حاشیه‌ای و پوییکیلوتاپیک^۸ اجزای نمونه‌ها را به هم متصل کرده‌اند. گرینستون‌ها (به‌خصوص انواع غیراسکلتی) و پکستون‌ها بافت‌های اصلی واحدهای آهکی بخش مند هستند. به‌همین خاطر، در نمودارهای چاه‌های نفت و گاز شدت پرتوهای گامای طبیعی حاصل از این بخش کم و در اصطلاح آهک تمیز خوانده می‌شود (ارزانی و ندیمی، ۱۳۸۵؛ مگوایر و همکاران، ۲۰۱۹). در رده‌بندی پتروفیزیکی کربنات‌ها، گرینستون‌ها در رده یک قرار می‌گیرند که بالاترین میزان تخلخل، تراوایی و پتانسیل مخزنی را دارد (لوسیا، ۲۰۰۷؛ اهر، ۲۰۰۸).

دانه‌ریزند و ۰/۱ تا ۰/۶ میلی‌متر اندازه دارند. افزون بر این موارد، باید به جورشدگی ضعیف نمونه‌های این ریزرخساره گل‌پشتیبان^۱ و شواهدی از آشفستگی زیستی^۲ در آن هم اشاره کرد.

تفسیر: اختلاط میکروفسیل‌ها و بقایای جانوران بنتونیک و پلانکتونیک یکی از نشانه‌های مهم رسوب‌گذاری در بخش کم‌عمق تر رمپ خارجی^۳ است (گیل، ۲۰۰۰؛ اسفندیاری و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر ترکیب، بافت و کستونی و اندازه کوچک اجزای سازنده این ریزرخساره نیز گواه محیط نسبتاً آرام و عمیق (بیشتر از ۲۵ متر) تشکیل آن است (وان بوخم و همکاران، ۲۰۱۰). در شرایط خاص حاکم بر این زیرمحیط امکان دریافت رسوب و اجزای اسکلتی هم از بخش جلوی سازه‌های آلی یا شول‌های آلیتی^۴ و هم از بخش عمیق‌تر حوضه (پلاژیک) فراهم است. به‌همین خاطر، ترکیب سنگ‌شناسی حاصل از آن شامل تناوبی از آهک‌های رُسی، مارن و گل‌سنگ‌های آلی است. این قسمت از محیط‌های دریایی به حد پایین قاعده امواج توفانی نزدیک و ممکن است تحت تأثیر جریان‌های اقیانوسی و حرکات ناشی از توفان‌های شدید نیز قرار بگیرد (اینسل، ۲۰۰۰؛ هادسن، ۲۰۰۵؛ نویدطلب و همکاران، ۲۰۱۳). کستون‌های بایوکلاستی مختلط معادل ریزرخساره استاندارد شماره ۴ فلوگل (۲۰۱۰) مربوط به کمر بند رخساره‌ای ۴ ویلسون (۱۹۷۵) است.

۳- ریزرخساره گرینستون اینتراکلاستی-پلوییدی با لامیناسیون افقی (MF3)

توصیف: این ریزرخساره با بافت دانه‌پشتیبان^۵ عمدتاً از دانه‌های غیراسکلتی شامل اینتراکلاست (فراوانی حدود ۳۵٪) و پلویید (۴۵٪) تشکیل شده است. همچنین، کمتر از ۵٪ اجزای اسکلتی به‌خصوص خرده‌های خارپوستان در نمونه‌ها مشاهده شد. بایوکلاست‌ها و اینتراکلاست‌های نسبتاً دانه‌درشت‌تر (۰/۵ تا ۰/۷۵ میلی‌متر) و پلوییدهای کوچک‌تر (۰/۲ تا ۰/۴ میلی‌متر) در قالب لامینه‌های ضخیم و لایه‌های نازک افقی انتظام یافته‌اند (شکل ۴A). جورشدگی کلی نمونه‌ها به دلیل تفاوت اندازه آلوکم‌ها نسبتاً بد است، اما در هر یک از لامینه‌ها و لایه‌های مجزا نسبتاً خوب تا خوب توصیف می‌شود. اجزای یادشده با

⁵ Grain-supported texture

⁶ Drusy to blocky sparry calcite cement

⁷ Fair Weather Wave Base (FWWB)

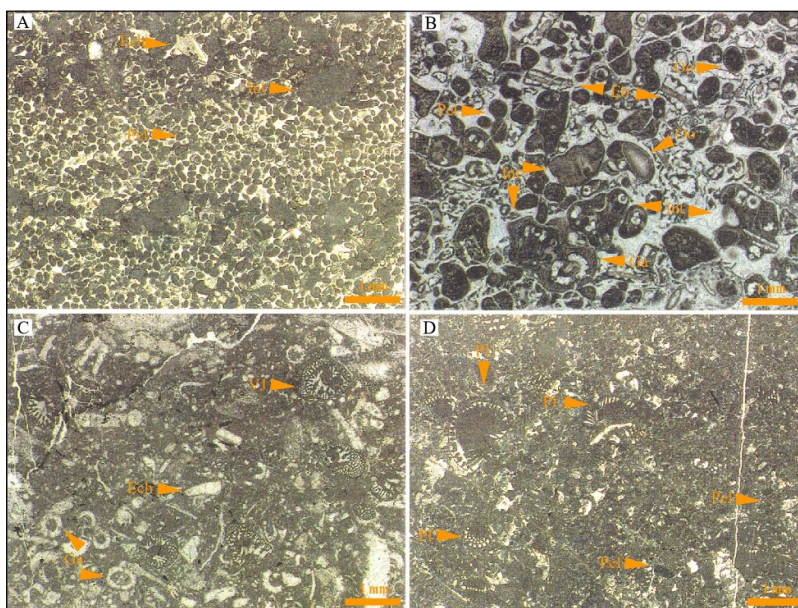
⁸ Poikilotopic

¹ Mud supported

² Bioturbation

³ Proximal open marine (outer ramp)

⁴ Oolitic peloid Shoal



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی از سنگ آهک‌های حاصل از زیرمحیط‌های شول و تالاب مرتبط با آن در ژوراسیک میانی جنوب فروافتادگی دزفول، A: گرینستون لامینه‌ای متشکل از اینتراکلاست (Int) پلویید (Pel) و کمی بقایای خارپوستان (Ech) که با سیمان‌های دروزی و بلوکی متصل شده‌اند؛ B: گرینستون اینتراکلاستی آئیدی پلوییدی با اندک بقایای جلبک‌های سبز (Ga) و آثار سیمان حاشیه‌ای؛ C: وکستون بایوکلاستی با جلبک‌های سبز، خرده‌های خارپوستان و روزنداران بنتونیک *Valvulamina jurassica* (VJ) شاخص ژوراسیک میانی؛ D: وکستون-پکستون بایوکلاستی متشکل از پلوییدها و پوسته روزنداران بنتونیک *Pfenderina* sp. (Pf) شاخص باتونین-کالوین (PPL).

Fig. 4. Microphotographs of limestones from shoal sub-environment and its associated lagoon in the Middle Jurassic of southern Dezful Embayment; A: laminated grainstone consisting of intraclast (Int), peloid (Pel) and some echinoderm remains (Ech) with drusy and blocky cements; B: peloid/ooid/intraclast grainstone with few remains of green algae (Ga) and traces of fringing cement; C: bioclastic wackestone with green algae, echinoderm fragments and the Middle Jurassic foraminifera *Valvulamina jurassica* (VJ); D: bioclastic wackestone-packstone composed of peloids and shells of the Bathonian-Callovian benthic foraminifera, *Pfenderina* sp. (Pf) (PPL).

نرم‌تنان به‌ترتیب مهم‌ترین سازندگان این ریزرخساره هستند (شکل ۴C). درصد آلوک‌ها بین ۲۵ تا ۳۵٪ تخمین زده می‌شود. اندازه دانه‌ها ۰/۵ تا حدود ۱ میلی‌متر است که جورشدگی نسبتاً بد و توزیع نامتوازن دارند. به‌گونه‌ای که، با تمرکز آلوک‌ها در قسمت‌هایی از مقاطع نازک حالت پکستونی از خود نشان می‌دهد. با این حال، زمینه میکرایتی غالب و بافت کلی نمونه‌ها گل‌پشتیبان است.

تفسیر: ترکیب روزنداران بنتونیک پورسلانوز^۲ و جلبک‌های سبز گویای رسوب‌گذاری در بستر روشن (نوردار) بخش داخلی رمپ‌های کربناته است (ژینچنگ و همکاران، ۱۹۹۷؛ غبیشاوی و همکاران، ۲۰۱۰). فقدان میکروفسیل‌های پلاژیک و بافت وکستونی نمونه‌های این ریزرخساره نیز محیط آرام تالاب را تأیید می‌کند. البته بقایای سازندگان زیستی در بعضی از نمونه‌ها نسبتاً متنوع است که نشانه رسوب‌گذاری در قسمت دورتر تالاب است. این قسمت با شول و دریای باز ارتباط مستقیم و مؤثر دارد. در نتیجه، از نظر شوری، دما و اکسیژن در حد متعادلی است (شلاگر،

تفسیر: گرینستون‌های بخش آهکی مند غالباً غیراسکلتی هستند که بیشتر در بخش پراورژی پلت‌فرم‌های بدون حاشیه یا همان رمپ‌های کربناته تشکیل شده‌اند (پومار، ۲۰۰۱؛ کلاوسی و همکاران، ۲۰۰۹). تفاوت اصلی دو نوع گرینستون شناخته شده در فراوانی بیشتر آئیدهای ریزرخساره اخیر و فابریک منظم و جورشدگی بهتر نوع قبلی (MF4) است. با توجه به حضور بیشتر سازندگان غیراسکلتی در ریزرخساره‌های مربوط به رمپ میانی بخش آهکی مند و فقدان بوندستون‌ها^۱ (آهک‌های برجا) می‌توان این قسمت را یک شول آلیتی (دانه‌ای) معرفی کرد (تاکر، ۲۰۰۱؛ صرفی و همکاران، ۲۰۲۳). این نوع شول‌ها یکی از زیرمحیط‌های متعارف اغلب پلت‌فرم‌های شناخته شده در مناطق گرمسیری گذشته محسوب می‌شوند (شلاگر، ۲۰۰۵؛ جیمز و بن، ۲۰۱۱).

۵- ریزرخساره وکستون بایوکلاستی (MF5)

توصیف: جلبک‌های سبز، پوسته روزنداران بنتونیک (*Valvulamina jurassica*)، خرده‌های خارپوستان و

² Porcelaneous

¹ Boundstone

موجودات ریف‌ساز وجود ندارند. در نتیجه، این نوع سکوه‌های شیب‌دار تحت تأثیر انواع جریان‌های دریایی اعم از امواج، توفان و جزرومد قرار می‌گیرند. در رمپ‌ها معمولاً شیب یکنواخت و بدون تغییرات ناگهانی است. البته در معدودی از آن‌ها پایانه پلت‌فرم با افزایش مشخص شیب همراه است که شرایط مناسبی برای فعالیت جریان‌های ثقی و تشکیل کلسی‌توربیدایت‌ها فراهم می‌کند (برای نمونه کاوسی و همکاران، ۲۰۰۹؛ لاسمی و جلیلیان، ۲۰۱۰). فقدان شواهد مربوط به بوندستون‌ها و آهک‌های دوباره نهشته شده در توالی رسوبی بخش آهکی مَند مؤید رسوب‌گذاری آن در یک رمپ هموکلینال^۴ است. براساس تنوع ریزرخساره‌ها، رمپ مورد نظر به سه زیرمحیط بیرونی، میانی و داخلی تفکیک شده است. عمیق‌ترین قسمت پلت‌فرم با حضور میکروفسیل‌های پلانکتونیک و مادستون‌های آهکی دریای باز (MF1) مشخص می‌شود که تدریجاً با بایوکلست‌های مختلط در بخش نزدیک‌تر رمپ خارجی (MF2) جایگزین شده‌اند. رمپ میانی خاستگاه گرینستون‌های غیراسکلتی (MF3-4) است که با مجموعه‌ای از اینتراکلاست، آئید و پلوییدها یک شول (سد) دانه‌ای نسبتاً وسیع و پرانرژی در لبه پلت‌فرم ایجاد کرده‌اند. واحدهای آهکی مَند بیشتر در این قسمت تشکیل شده‌اند. لبه پلت‌فرم قسمت حساس و تعیین کننده آن است، به‌گونه‌ای که با تغییر در اجزای سازنده و یا هندسه این بخش نوع پلت‌فرم نیز تغییر می‌کند (شلاگر، ۲۰۰۵؛ فلوگل، ۲۰۱۰). تالاب قسمت اصلی رمپ داخلی مَند است که در بستر آرام و کم‌عمق آن وکستون تا پکستون‌های بایوکلستی (عمدتاً روزنداران بنتونیک) و پلوییدی (MF5-6) تشکیل شده‌اند. با توجه به نحوه ارتباط تالاب با سایر زیرمحیط‌های پلت‌فرم، این قسمت به دو بخش دور (نسبتاً باز) و نزدیک (محدود) قابل تفکیک است. تغییر رخساره‌های پلاژیک سازند سرگلو به کربنات‌های بخش آهکی مَند نشانه پر شدن دریای عمیق باژوسین و تغییر الگوی رسوبی به پلت‌فرم است. فعالیت این پلت‌فرم بسیار گسترده تا اواخر ژوراسیک ادامه داشته است که در بخش‌های مختلف آن رخساره‌های کربناته و تبخیری‌های سازندهای نجمه، سورمه بالایی، عرب، گوتنیا و هیث پدید آمده‌اند (غضبان، ۲۰۰۷؛ جلیلیان، ۱۳۹۳).

۲۰۰۵؛ گریف، ۲۰۰۵). ریزرخساره اخیر معادل ریزرخساره استاندارد شماره ۸ فلوگل (۲۰۱۰) در کمربند رخساره‌ای ۷ (تالاب باز) ویلسون (۱۹۷۵) محسوب می‌شود.

۶- ریزرخساره وکستون-پکستون بایوکلستی /پلوییدی (MF6)

توصیف: ترکیب این ریزرخساره شامل پلوییدها و پوسته‌های گونه‌ای از روزنداران بنتونیک شاخص به‌نام *Pfenderina* است (شکل ۴D). فراوانی آلوکم‌ها در نمونه‌های مختلف بین ۴۰ تا ۵۵٪ درصد و مقادیر میکروفسیل‌ها و پلوییدها تقریباً برابر است. اندازه میکروفسیل‌ها متغیر و تا ۱/۵ میلی‌متر می‌رسد، اما پلوییدها یکنواخت و حدود ۰/۴ میلی‌متر هستند. آثار ناشی از آشفته‌گی زیستی و به‌هم ریختگی زمینه میکرایتی توسط جانوران گل‌خوار قابل مشاهده است. بنابراین، پلوییدهای موجود غالباً دفعی هستند. بعضی از منافذ ناشی از آشفته‌گی با سیمان آکنده شده که با رنگ روشن‌تر نسبت به زمینه مشخص هستند.

تفسیر: این ریزرخساره زیرمجموعه وکستون‌هایی است که گونه‌های روزنداران بنتونیک در آن‌ها محدود است و در تالاب‌ها تشکیل می‌شوند (اسفندیاری و همکاران، ۲۰۲۳). وفور پلت‌های دفعی و عدم تنوع فونای این رسوبات حاکی از شرایط خاص محیط تشکیل آن‌ها از جمله بستر گلی آرام، محدودیت گردش آب و احتمالاً شوری و دمای بالاست. چنین شرایطی از ویژگی‌های قسمت‌های میانی و نزدیک‌تر تالاب^۵ است که با دریای آزاد ارتباط کمتری دارند (توماسوویچ، ۲۰۰۴؛ اسدی و همکاران، ۲۰۱۶). این ریزرخساره معادل ریزرخساره استاندارد شماره ۹ فلوگل (۲۰۱۰) است که در کمربند رخساره‌ای ۸ (پلت‌فرم محدود) ویلسون (۱۹۷۵) جای دارد.

۴-۲- محیط رسوبی

ترکیب و بافت نمونه‌ها و ارتباط عمودی ریزرخساره‌ها در بخش آهکی مَند نشان داد که این بخش در یک پلت‌فرم کربناته از نوع رمپ تشکیل شده است (شکل ۵). رمپ، پلت‌فرم بدون حاشیه‌ای است که با شیب ملایم (کمتر از یک درجه) به سمت حوضه گسترش دارد (تاکر و رایت، ۱۹۹۰، ریدینگ، ۱۹۹۶؛ بوسنس، ۲۰۰۵). در پلت‌فرم‌های بدون حاشیه یا باز سدهای نسبتاً پیوسته حاصل از فعالیت

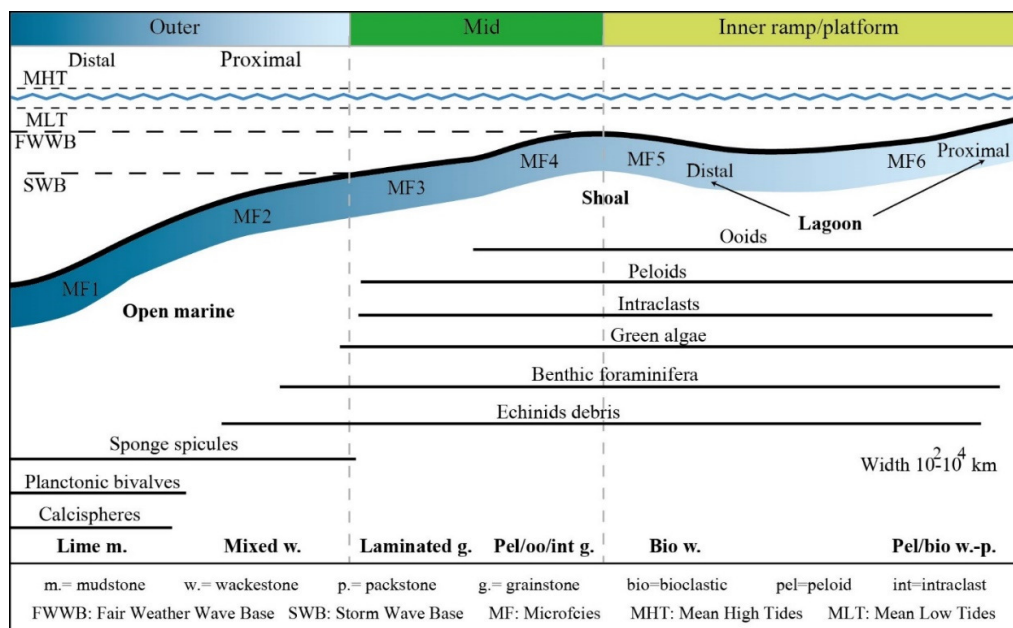
^۴ Homoclinal ramp

^۵ Mid-proximal lagoon

جدول ۱. شرح و تفسیر ریزرخساره‌های شناخته شده در بخش آهکی مند در جنوب فروافتادگی دزفول

Table 1. Description and interpretation of the Mand Limestone Member microfacies in southern Dezful Embayment

Microfacies Code	Microfacies Name	Main Components	Grain size	Energy level	Depositional Environmen
MF1	Lime mudstone/calcareous shale	At least 90% mud grade (<60 μm) carbonate material	Mud	Low	Distal open-marine (Outer ramp)
MF2	Mixed benthic/pelagic bioclastic Wackestone	Sponge spicules, benthic foraminifera, calcispheres and echinoderm debris	Mud-sand	Low-medium	Proximal open-marine (Outer ramp)
MF3	Laminated peloid/intraclast grainstone	Coarse-grained intraclasts, echinids debris and fine-grained peloids	Sand	High	Shoal (mid ramp)
MF4	Peloid/oid/intraclast grainstone	Intraclast, ooid, peloid, green algae and some encrusted bioclasts	Sand-gravel	High	Shoal (mid ramp)
MF5	Bioclastic (green algae, benthic foraminifera) Wackestone	Dominantly green algae, benthic foraminifera (<i>Valvulamina</i>) and echinoid debris	Sand	Medium	Distal lagoon (inner ramp)
MF6	Peloid/bioclastic (benthic foraminifera) Wackestone-packstone	Dominantly benthic foraminifera (<i>Pfenderina</i>) and peloid	Sand	Low-medium	Proximal lagoon (inner ramp)



شکل ۵. مدل رسوبی (رخساره‌ای) و زیرمحیط‌های مختلف پلتفرم کربناته (رمپ هموکلینال) بخش آهکی مند در جنوب فروافتادگی دزفول؛ موقعیت ریزرخساره‌ها و پراکندگی اجزای سازنده این واحد رسوبی نیز نشان داده شده است.

Fig. 5. Sedimentary (facies) model and different sub-environments of the Mand carbonate platform (homoclinal ramp) in southern Dezful Embayment; the position of the microfacies and the distribution of the components of this sedimentary unit are also shown.

۳-۴- چینه‌نگاری سکانسی

تغییرات عمودی ریزرخساره‌ها، داده‌های ژئوفیزیکی و انواع میکروفسیل‌های بخش آهکی مَند در جنوب فروافتادگی دزفول نشان دادند که این بخش قسمتی از سکانس رسوبی رده دوم ژوراسیک زگرس است که حیدری (۲۰۰۸) آن را سوپرسکانس معرفی کرده است. سوپرسکانس‌های رسوبی همزمان با چرخه‌های ۵ تا ۵۰ میلیون ساله نوسان سطح جهانی آب دریاها تشکیل شده‌اند و عمدتاً محصول فعالیت‌های زمین‌ساختی در مقیاس منطقه‌ای هستند (میل، ۲۰۰۰؛ کاتونینو، ۲۰۰۶). در مناطق مختلف زاگرس، واحدهای سنگ‌چینه‌ای مشمول این سوپرسکانس متفاوت هستند (شکل ۲). در ناحیه مورد مطالعه، ایجاد رخساره‌های سدی شروع بخش آهکی مَند روی نهشته‌های پلاژیک سازند سرگلو نشانگر افت سطح نسبی آب دریا و تشکیل دسته رخساره‌های تراز بالا پس از بیشترین پیشروی دریا در بازوسین است. این رویداد با تغییر ناگهانی شکل نمودارهای صوتی و گاما (الگوی کثیف‌شونده^۱ به تمیزشونده^۲) در پایه بخش مَند کاملاً مشخص است (شکل ۶). بازوسین، زمان بیشترین گسترش اقیانوس نئوتتیس و تکه‌تکه شدن پلت‌فرم پیوسته تریاس-ژوراسیک پیشین در جنوب ایران است که منجر به ایجاد حوضه‌های درون شلفی متعدد از جمله پارس، سرگلو و هورامان در مناطق مختلف زاگرس شد (لاسمی و جلیلیان، ۲۰۱۰؛ عبدالله و همکاران، ۲۰۱۵؛ بایت گل و همکاران، ۲۰۲۱). در این حوضه‌ها شیل، آهک‌های پلاژیک و انواع کلسی‌توربیدایت‌ها تشکیل و برجای مانده‌اند. رخساره‌های پلاژیک انتهای سازند سرگلو در چنین شرایطی و همگام با خیزش سریع سطح نسبی آب دریا (دسته رخساره‌های پیشرونده) تشکیل شده‌اند. بنابراین، مرز بالایی این سازند معرف سطح بیشترین پیشروی دریای بازوسین است که با MFS J30 شارلند و همکاران (۲۰۰۱) همخوانی دارد. حضور میکروفسیل‌های شاخص باتونین-کالوین از جمله *Pfenderina* sp. و *Valvulamina jurassica* در نمونه‌های بخش آهکی مَند (شکل‌های ۴C-D) گویای تداوم رسوب‌گذاری این بخش تا پایان ژوراسیک میانی است. سکانس اصلی بخش آهکی مَند شامل افق شیلی و آهک‌های تمیز بالایی در

این زمان تشکیل شده است. بررسی تغییرات سطح جهانی آب دریاها گذشته حاکی از خیزش پیوسته آب دریاها از اواسط باتونین تا اواخر ژوراسیک میانی است (برای نمونه گلونکا و کیسلینگ، ۲۰۰۲؛ حق و القحطانی، ۲۰۰۵). بنابراین، افزایش دوباره فضای رسوب‌گذاری و عمق پلت‌فرم مَند به نهشته‌شدن دسته رخساره‌های پیشرونده (افق شیلی) منجر شده است. مجموعه گرینستون‌های سد و پکستون‌های تالاب روی افق شیلی نتیجه افت سطح نسبی آب در پلت‌فرم و تکمیل سکانس رسوبی مَند با دسته رخساره‌های پیشرونده است. با توجه به محدوده زمانی این سکانس رسوبی می‌توان سطح حداکثر پیشروی آن را با MFS J40 شارلند و همکاران (۲۰۰۱) معادل دانست. در چاه‌های مورد مطالعه، تغییر آهک‌های تمیز به شیل با افزایش شدید و ناگهانی مقدار پرتو گاما و انحراف منحنی صوتی به سمت چپ همراه است که ناشی از افزایش محتوای رُس و کاهش قابل توجه نفوذپذیری سنگ‌هاست (ارزانی و ندیمی، ۱۳۸۵). همگرا شدن روند تغییرات نمودارهای گاما و صوتی در چینه‌نگاری سکانسی معرف بالا آمدن سطح آب دریاست که با دسته رخساره‌های پیشرونده سکانس رسوبی مورد نظر مطابقت می‌کند. در این حالت، موقعیت کمترین فاصله بین دو منحنی به‌عنوان بیشترین پیشروی و عمق حوضه در نظر گرفته می‌شود (یانگ و نیو، ۱۹۹۳؛ مگوایر و همکاران، ۲۰۱۹). سکانس‌های رسوبی دربرگیرنده بخش آهکی مَند با مرزهای سکانسی نوع دوم (پیوستگی معادل^۳) از هم جدا شده‌اند.

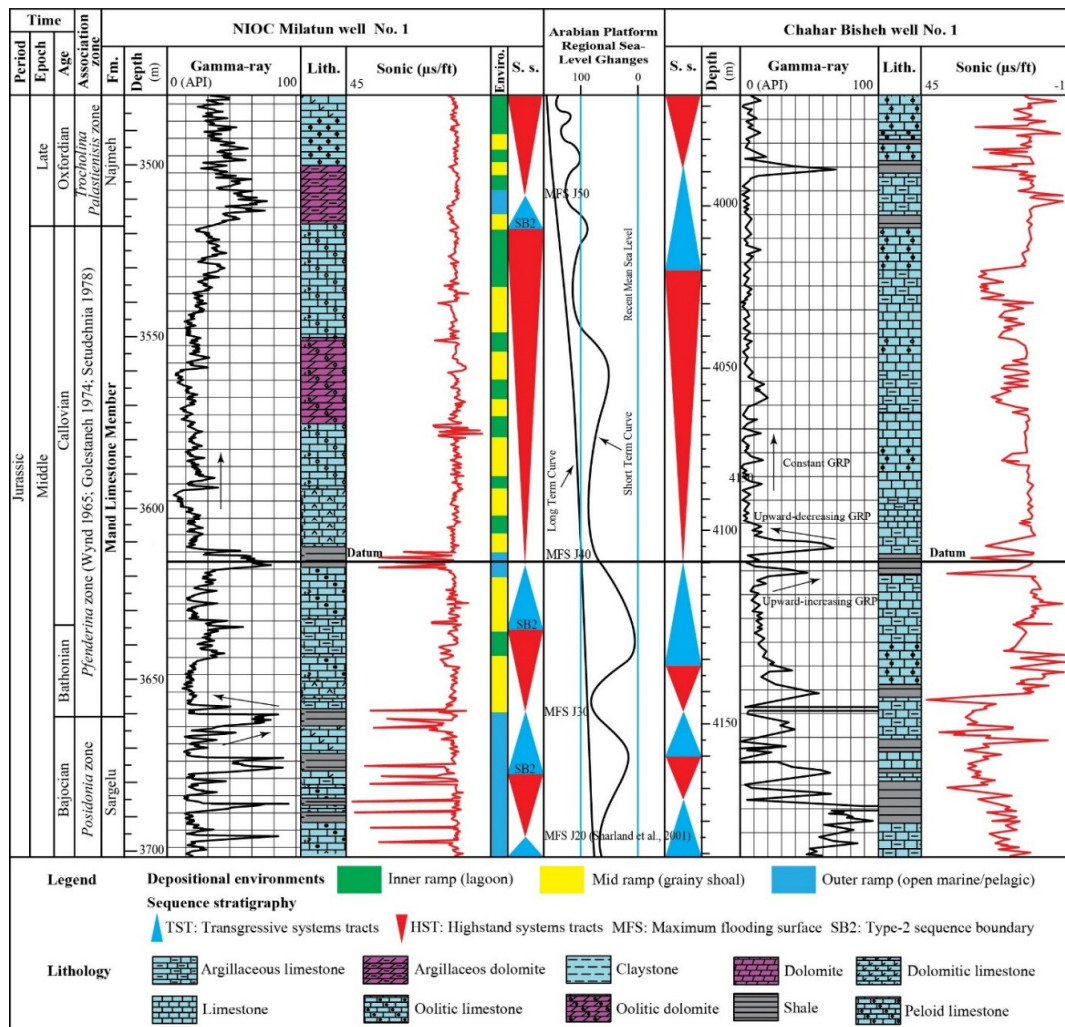
۵- نتیجه‌گیری

بخش آهکی مَند، واحد سنگ‌چینه‌نگاری شاخصی در مناطق جنوبی ایران است که مرز بالایی آن معرف پایان ژوراسیک میانی است. علاوه بر اهمیت زمانی این واحد سنگ‌چینه‌ای، در مطالعات چاه‌نگاری نیز پرتو گامای کمی از خود منتشر می‌کند و با نام واحد آهکی تمیز هم شناخته می‌شود. در چاه‌های شماره یک میدان‌های نفتی چهاربیشه و میلان در جنوب فروافتادگی دزفول این بخش آهکی ۱۲۵ تا ۱۴۰ متر ضخامت دارد. بررسی مقاطع نازک تهیه شده از خرده‌های حفاری و مغزه‌های این چاه‌ها نشان داد

³ Type-2 sequence boundary (SB2)¹ Upward-increasing GRP² Upward-decreasing GRP

از نظر چینه‌نگاری سکانسی، آهک‌های قسمت زیرین، دسته رخساره‌های تراز بالای سکانس رسوبی هستند که شیل و آهک‌های پلاژیک سازند سرگلو (بازوسین) معرف تراز پیشرونده و سطح حداکثر پیشروی آن (MFS J30) است. شیل‌های دریای باز و آهک‌های قسمت بالایی مند هم بخش‌های یک سکانس رسوبی رده سوم به سن کالوویین هستند که سطح بیشترین پیشروی آن با MFS J40 منطقه مطابقت دارد.

که این واحد آهکی تمیز عمدتاً شامل گرینستون‌های حاصل از یک شول آلیتی است که در میانه رمپ کربناته باتونین-کالوویین ایجاد شده است. این سنگ‌ها از تخلخل، تراوایی و کیفیت مخزنی بالایی برخوردارند. گرینستون‌ها با میان لایه‌هایی از وکستون تا پکستون‌های بایوکلستی (تالاب) همراهی می‌شوند که در مجموع با افقی از شیل‌های دریای باز از هم جدا شده‌اند.



شکل ۶. سنگ‌چینه‌نگاری، محیط رسوبی و چینه‌نگاری سکانسی قسمتی از توالی رسوبی ژوراسیک میانی-پسین در جنوب فروافتادگی دزفول که بخش آهکی مند را شامل می‌شود. با توجه به داده‌های پتروگرافی، نمودارهای گاما-صوتی و میکروفسیل‌های مورد مطالعه، آهک‌های تمیز (پرتوی گامای کم) شروع بخش مند مکمل سکانس رسوبی است که با رخساره‌های دریای عمیق بازوسین (سازند سرگلو) شروع شده است. افق شیلی و آهک‌های تمیز بالایی هم یک سکانس رسوبی رده سوم تشکیل داده‌اند که موقعیت بالاترین سطح نسبی دریای آن با سطح حداکثر پیشروی در کالوویین منطقه (MFS J40) مطابقت دارد. منحنی تغییرات سطح نسبی آب دریای ژوراسیک در پلاتفرم عربی از حق و القحطانی (۲۰۰۵) اقتباس شده است.

Fig. 6. Lithostratigraphy, sedimentary environment and sequence stratigraphy of a part of the Middle-Late Jurassic sedimentary sequence in the southern Dezful Embayment, which includes the Mand Limestone Member. According to petrographic data, gamma-sonic wireline logs and studied microfossils, clean limestones (low gamma ray) at the beginning of Mand Member are the complementary part of a sedimentary sequence that started with Bajocian deep marine facies (Sargelu Formation). The shaly horizon and the upper clean limestones also form a 3rd order sedimentary sequence which the position of its maximum flooding surface coincides with the Callovian MFS J40 in the region. The Arabian platform regional sea-level changes in the Jurassic adapted from Haq and Al Qahtani (2005).

۶- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را نسبت به زحمات همکاران ارجمند مجله رسوب‌شناسی کاربردی در پیگیری امور مختلف مربوط به پذیرش و انتشار مقاله و داوران گرامی به خاطر مطالعه پیش‌نویس و بیان نکات ارزنده اعلام می‌نمایند.

References

- Abdula, R. A., Balaky, S. M., Nourmohamadi, M. S., and Piroui, M (2015) Microfacies Analysis and Depositional Environment of the Sargelu Formation (Middle Jurassic) from Kurdistan Region, Northern Iraq. *Donnish Journal of Geology and Mining Research*, 1(1): 1-26. doi: 10.25130/j.v27i1.1245.
- Aganbati, A (2003) Geology of Iran. Geological survey and Mineral Exploration of Iran, 640 p. (in Persian).
- Aghaei, A., Mahboubi, A., and Moussavi-Harami, R (2012) Facies analysis and sequence stratigraphy of an Upper Jurassic carbonate ramp in the Eastern Alborz range and Binalud Mountains, NE Iran. *Facies*, 59: 863-889. doi: 10.1007/s10347-012-0339-8.
- Ahr, W. M (2008) Geology of carbonate reservoirs: John Wiley & Sons Publication, 277p.
- Allaby, M (2008) A Dictionary of Earth Sciences. Oxford University Press, 654p.
- Allen, M. B., and Talebian, M (2011) Structural variation along the Zagros and the nature of the Dezful Embayment. *Geological Magazine*, 148: 911-924. doi: 10.1017/s0016756811000318.
- Alsharhan, A. S., and Nairn, A. E. M (2003) Sedimentary Basins and Petroleum Geology of the Middle East. Elsevier, 878p.
- Aqravi, A. A. M., Goff, G. C., Horbury, A. D., Sadooni, F. N (2010) The Petroleum Geology of Iraq. Scientific Press, 423p.
- Arzani, N., and Nadimi, A (2006) Subsurface Geology. Payame Noor University Press, 297 p. (in Persian).
- Assadi, A., Honarmand, J., Moallemi, S. A., Abdollahie-Fard, I. (2016) Depositional environments and sequence stratigraphy of the Sarvak Formation in an oil field in the Abadan Plain, SW Iran. *Facies*, 62: 26. doi: 10.1007/s10347-016-0477-5.
- Berberian, M (1995) Master "blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, 241: 193-224. doi: 10.1016/0040-1951(94)00185-c.
- Boggs, S (2009) Principles of Sedimentology and Stratigraphy. Fourth Edition, Pearson Prentice Hall, 662p.
- Bordenave, M. L (2014) Petroleum systems and distribution of the oil and gas fields in the Iranian part of the Tethyan region. *AAPG Memoir* 106, 36: 505-540. doi: 10.1306/13431865m1063614.
- Bordenave, M. L., and Hegre, J. A (2010) Current distribution of oil and gas fields in the Zagros Fold Belt of Iran and contiguous offshore as the result of the petroleum systems. *Geological Society London Special Publications*, 330: 291-353. doi: 10.1144/sp330.14.
- Bosence, D (2005) A genetic classification of carbonate platforms based on their basinal and tectonic settings in the Cenozoic. *Sedimentary Geology*, 175: 49-72. doi: 10.1016/j.sedgeo.2004.12.030.
- Catuneanu, O (2006) Principles of sequence stratigraphy. Elsevier, 380p.
- Dunham, R. J (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W.E (Ed) Classification of carbonate rocks, AAPG Memoir 1, 108-121. doi: 10.1306/m1357.
- Einsele, G (2000) Sedimentary Basins Evolution, Facies, and Sediment Budget. Springer, 628 p.
- Farahzadi, E., Alavi, S. A., and Sherkati, S (2019) Variation of subsidence in the Dezful Embayment, SW Iran: influence of reactivated basement structures. *Arabian Journal of Geoscience*, 12: 616. doi: 10.1007/s12517-019-4758-5.
- Flügel, E (2010) Microfacies of carbonate rocks. 2nd Edition, Springer, 984p.
- Ghabeishavi, A., Vaziri-Moghaddam, H., Taheri, A., and Taati, F (2010). Microfacies and depositional environment of the Cenomanian of the Bangestan anticline, SW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37: 275-285. doi: 10.1016/j.jseas.2009.08.014.
- Ghazban, F (2007) Petroleum geology of the Persian Gulf. Tehran University Press, 707p.
- Golestaneh, A (1974) The biostratigraphy of the Khami-group and the Jurassic-Cretaceous boundary in Fars province (southern Iran). *Bulletin of B.R.G.M.*, IV, 3: 165-197.
- Golonka, J., and Kiessling, W (2002) Phanerozoic Time Scale and definition of time slices. *SEPM, Special Publication*, 72: 11-20. doi: 10.2110/pec.02.72.0011.
- Grafe, K. U (2005) Benthic foraminifers and palaeoenvironment in the Lower and Middle Jurassic of the Western Basque-Cantabrian Basin (Northern Spain). *Journal of Iberian Geology*, 31(2): 217-233. doi: 10.1007/s41513-024-00252-y.
- Haq, B. U., and Al-Qahtani, A. M (2005) Phanerozoic cycles of sea-level change on the Arabian Platform. *GeoArabia*, 10(2): 127-160. doi: 10.2113/geoarabia1002127.
- Heydari, E (2008) Tectonics versus eustatic control on supersequences of the Zagros Mountains of

- Dezful embayment of Iran using oil-based-mud imaging techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 121: 23–37. doi: 10.1016/j.petrol.2014.05.019.
- Mülayim, O., Yılmaz, I. O., Ozer, S., Sarı, B., and Taşlı, K (2020) A Cenomanian-Santonian rudist-bearing carbonate platform on the northern Arabian Plate, Turkey: facies and sequence stratigraphy. *Cretac. Res.* 110, 104414. doi: 10.1016/j.cretres.2020.104414.
- Navidtalab, A., Rahimpour-Bonab, H., Nazari-Badii, A., and Sarfi, M (2013) Challenges in deep basin sequence stratigraphy: a case study from the Early–Middle Cretaceous of SW Zagros. *Facies*, 60(1): 195-215. doi: 10.1007/s10347-013-0377-x.
- Pomar, L (2001) Types of carbonate platforms: a genetic approach. *Basin Research*, 13(3): 313–334. doi: 10.1046/j.0950-091x.2001.00152.x.
- Reading, H. G (Ed) (1996) *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Blackwell, 688 p.
- Sarfi, M., Navidtalab, A., Yazdi-Mighadam, M., Eslami, S. A., and Naghousi, M (2022) Litho- and biostratigraphy of the Upper Jurassic Mozduran Formation, Kopet-Dagh, Iran, and its paleoenvironmental implications. *Palaeoworld*, 32(3): 458-469. doi: 10.1016/j.palwor.2022.08.002.
- Schlager, W (2005) *Carbonate Sedimentology and sequence stratigraphy*. Society for Sedimentary Geology, 200 p.
- Scholle, P. A., and Scholle, D. S. U (2003) *A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, textures, porosity, diagenesis*. AAPG Memoir 77, 459p.
- Scholle, P. A., Bebout, D. G., and Moore, C. H (Eds) (1983) *Carbonate depositional environments*. AAPG Memoir 33, 708p.
- Sepehr, M., and Cosgrove, J. W (2004) Structural framework of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 21: 829–843. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2003.07.006.
- Setudehnia, A (1978) The Mesozoic sequence in southwest Iran and adjacent area. *Journal of Petroleum Geology*, 1(1): 3-42. doi: 10.1111/j.1747-5457.1978.tb00599.x.
- Sharland, P. R., Archer, R., Casey, D. M., Davies, R. B., Hall, S. H., Heward, H. P., Horbory, A. D., and Simons, M. D (2001) Arabian plate sequence stratigraphy. *GeoArabia*, Gulf Petrolink, Bahrain, 370p.
- Sherkati, S., and Letouzey, J (2004) Variation of structural style and basin evolution in the central Zagros (Izeh zone and Dezful Embayment), Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 21: 535–554. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2004.01.007.
- Sherkati, S., Letouzey, J., and Frizon de Lamotte, D (2006) Central Zagros fold-thrust belt (Iran): New insights from seismic data, field Iran. *Tectonophysics*, 451: 56–70. doi: 10.1016/j.tecto.2007.11.046.
- Huneker, H., and Mulder, T (2011) *Deep-Sea Sediments*. *Developments in Sedimentology* 63, Elsevier, 849p.
- Jalilian, A. H (2013) Facies, sedimentary environment and sequence stratigraphy of Surmeh Formation (Jurassic) in Fars region. *Journal of Applied Sedimentology*, 2(3): 90–104. (in Persian).
- Jalilian, A. H (2021) Facies, sedimentary environment and sequence stratigraphy of Kazhdumi Formation (Middle Cretaceous) in Central Zagros. *Journal of Applied Sedimentology*, 9(17): 57-72. (in Persian).
- James, G. A., and Wynd, J. G (1965) Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. *AAPG Bulletin*, 49(12): 2182–2245. doi: 10.1306/a663388a-16c0-11d7-8645000102c1865d.
- James, N. P. and Bone, Y (2011) *Neritic Carbonate Sediments in a Temperate Realm*, Southern Australia. Springer, 254p.
- Kavoosi, M. A., Lasemi, Y., Sherkati, S., and Moussavi-Harami, R (2009) Facies analysis and depositional sequences of the the Upper Jurassic Mozduran Formation, A carbonate reservoir in the Kopet Dagh Basin, NE Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 32(3): 235-260. doi: 10.1111/j.1747-5457.2009.00446.x.
- Lasemi, Y (2000) Facies, sedimentary environments and sequence stratigraphy of Upper Precambrian and Paleozoic sedimentary rocks of Iran. Geological and Mineral Exploration Organization of Iran, 180p. (in Persian).
- Lasemi, Y., and Jalilian, A. H (2010) The Middle Jurassic basinal deposits of the Surmeh Formation in the Central Zagros Mountains, southwest Iran: Facies, Stacking pattern and Controls. *Carbonates and Evaporites*, 25: 283–295. doi: 10.1007/s13146-010-0032-3.
- Lucia, F. J (2007) *Carbonate reservoir characterization*. Second Edition, Springer, 336p.
- Maguire, H., Mehrrens, Ch., Kim, J., and Romanowicz, E (2019) Using Gamma Emissions to Identify Cycles in the Lower Cambrian Monkton Formation (NW Vermont): Implications for Identifying Sea Level Variation on the Iapetus Margin. *Open Journal of Geology*, 9: 89-108. doi: 10.4236/ojg.2019.92008.
- Miall, A. D (2000) *Principles of Sedimentary Basin Analysis*. Springer, 616p.
- Motiei, H (1993) *Stratigraphy of Zagros*. Geological survey and Mineral Exploration of Iran, 536 p. (in Persian).
- Movahed, Z., Junin, R., Safarkhanlou, Z., and Akbar, M (2014) Formation evaluation in

- observation, and sandbox modeling. *Tectonics*, 25: 1-27. doi: 10.1029/2004tc001766.
- Tomasovych, A (2004) Microfacies and depositional environment of an upper Triassic intra-platform carbonate basin: the Fatric unit of west Carpathians (Slovakia). *Facies*, 50: 77–105. doi: 10.1007/s10347-004-0004-y.
- Tucker, M. E (2001) *Sedimentary Petrology An introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*. Third edition, Blackwell Science, 262p.
- Tucker, M. E., and Wright, V. P (1990) *Carbonate Sedimentology*. Blackwell, 482p.
- Van Buchem, F. S. P., Baghbani, D., Bulot, L. G., Caron, M., Gaumet, F., Hosseini, A., and Keyvani, F (2010) Barremian–Lower Albian sequence stratigraphy of south- west Iran (Gadvan, Dariyan and Kazhdumi formations) and its comparison with Oman, Qatar and the United Arab Emirates. *GeoArabia Special Publication*, 4: 503–548. doi: 10.3997/2214-4609.20145915.
- Van Wagoner, J. C., Posamentier, H. W., Mitchum, R. M., Vail, P. R., Sarg, J. F., Loutit, T. S., and Hardenbol, J (1988) An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. *Society of Economical Paleontologists and Mineralogists, Special Publication*, 42: 39-45. doi: 10.2110/pec.88.01.0039.
- Vincent, B., van Buchem, F. S. P., Bulot, L. G., Immenhauser, A., Caron, M., Baghbani, D., and Huc, A. Y (2010) Carbon-isotope stratigraphy, biostratigraphy and organic matter distribution in the Aptian–Lower Albian successions of southwest Iran (Dariyan and Kazhdumi formations). *GeoArabia Special Publication*, 4(1): 139-197.
- Wilson, J. L (1975) *Carbonate Facies in Geologic History*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 471p.
- Wynd, J. G (1965) Biofacies of Iranian oil Consortium agreement area. I.O.O.C. report No. 1082, 120p.
- Yang, C. S., and Nio, S. D (1993) Application of high-resolution sequence stratigraphy to the Upper Rotliegend in the Netherlands offshore. *AAPG Memoir*, 58: 285-316. doi: 10.1306/m58581c11.
- Zhicheng, Z., Willems, H., and Binggao, Z (1997) Marine Cretaceous-Paleogene biofacies and ichnofacies in southern Tibet, China and their sedimentary significance. *Mar. Micropaleontol.* 32: 3–29. doi: 10.1016/s0377-8398(97)00011-x
- Ziegler, M. A (2001) Late Permian to Holocene paleofacies evolution of the Arabian Plate and its hydrocarbon occurrences. *GeoArabia*, 6: 445–504. doi: 10.2113/geoarabia0603445.

Sequence stratigraphy analysis of the Middle Jurassic Mand Limestone Member in southern Dezful Embayment, SW Iran

A. H. Jalilian^{*1} and M. Ali Kavoosi²

1- Assist. Prof., Dept., of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

2- National Iranian Oil Company Exploration Directorate, Tehran, Iran

* jalilian@pnu.ac.ir

Received: 2024.8.19 Accepted: 2024.11.10

Abstract

The Mand Limestone Member (MLM) is an informal name of an index lithostratigraphic unit in the central and eastern regions of Zagros fold-thrust belt, where the boundary of Middle-Late Jurassic coincides with the top of this unit. To determine depositional environments and depositional sequences analysis of the MLM in the southern Dezful Embayment, we integrated the geological and geophysical data obtained from two drilled wells in Chahar Bisheh and Milatun oil fields. The MLM in the studied wells is about 125 to 142 m thick and consists of two clean carbonate units (low gamma-ray pick) separated by a shaly horizon. We conducted petrographic investigations on 80 thin sections from cuttings and cored intervals. Our studies indicate an abundance of peloid/intraclast and ooid grainstones as the dominant microfacies accompanied by lime mudstones and skeletal wackestones with common pieces of foraminifera, green algae, and sponge spicules. Our findings are also compatible with the deposition of the Mand Member in different sub-environments on a homoclinal ramp including the oolitic shoal, lagoon, and open marine. The combination of stratigraphic data together with the wireline logs (gamma-ray and sonic) is consistent with a sequence stratigraphic framework, in which the lower part of the MLM comprises the HST of a 3rd order depositional sequence. We placed the TST and maximum flooding surface (MFS) in the Sargelu deep marine facies (Bajocian). Accordingly, the MFS represents the Callovian MFS J40 of southern Iran.

Keywords: Sequence stratigraphy, Mand Member, Dezful Embayment, SW Iran

Introduction

One of the important challenges related to the investigation of the pre-Cretaceous lithostratigraphic units in the Zagros region, especially in its central areas, is the lack of required data, due to limited accessible outcrop sections and sufficient drilled wells. In the study area, lithostratigraphic units older than the Cretaceous, crop out only in the core of a few anticlines in the high altitudes of the High Zagros (Izeh zone) such as Mongasht, Kino, Maimand, and Zardkuh. In addition, drilled wells suggest that most of the oil and gas wells are located in the folded Zagros zone and Abadan Plain. The main pay zones comprise the Asmari Formation (Oligo-Miocene), the Ilam-Sarvak Formations (Cenomanian-Santonian) as well as the Berriasian-Hauterivian Fahliyan Formation. Therefore, a lack of geological data exists for the older Cretaceous succession. As a result, the various geological aspects of the pre-Cretaceous deposits in the central Zagros have been less investigated or the results of limited carried out investigations were not published. In recent

years, drilling exploration wells in the Fars region and Dezful Embayment into the deeper horizons including the Jurassic successions lighted our understanding regarding the Khami Group (Jurassic-Cretaceous).

The Mand Limestone Member (Setudehnia 1978) is a key and index lithostratigraphic unit in the Jurassic succession. The informal type section of Mand Member was measured and introduced at Kuh-e Mand well No. 2, which is located 65 kilometers to the southeastern Bushehr at a depth between 2521 to 2624 meters. The top of the Middle Jurassic in southern Iran has been taken as the top of a clean limestone unit characterized by low radioactivity in the drilled wells.

In current research, we focus on the depositional environments and sequence stratigraphic analysis of the Mand Member investigated based on the geological and geophysical data obtained from the drilling of two wells from the Chahar Bisheh and Milatun oil fields in the southern Dezful Embayment. Different depositional environments and their temporal and spatial distributions play vital roles in the distribution of

source, reservoir, and cap rocks of hydrocarbon systems. Therefore, our findings in the current research shed light on a better understanding of the geological conditions of the area to plan for the optimal exploitation of hydrocarbon resources.

Materials and methods

Geological and wireline well log data were implemented from the Chahar Bisheh and Milatun drilled wells in the southern Dezful Embayment. The mentioned oil fields are located in the north and northwest of Khesht city in the Fars province. The drilled wells are about 20 kilometers away from each other. Petrographic investigations were carried out on 80 thin sections of the cores and cuttings of the Milatun oil field. Meanwhile, textural characteristics, constituents, and the relative abundance of allochems were investigated. Carbonate rocks were nomenclatured based on Dunham's classification (Dunham 1962). Gamma-ray and sonic electrical logs were used for distinguishing different rock units (carbonate and shale). The combination of the petrographic and petrophysical data led to the recognition of several microfacies types. Microfacies analysis was performed to reconstruct depositional environments by comparing them with present-day analogs (e. g. Wilson 1975; Flugel 2010). Moreover, according to the relationship between continuous microfacies with adjacent sub-environments (Walter's Law) the type of carbonate platform was determined.

The vertical stacking pattern of microfacies resulted in the proposal of the depositional model. The vertical grading of the sub-environments through time reflects the relative sea-level changes. Progressive retrogradation and progradation of parasequences through geological time created depositional sequences. Based on the position of stratigraphic surfaces and parasequences stacking patterns each sequence is divided into different systems tracts. To know the state of the global sea level in the Middle Jurassic, the data of Glonka and Kiessling (2002) and Haq and Al-Qahtani (2005) were considered. Based on the biological zonation including Wynd (1965), Golestaneh (1974), and Setudehnia (1978), the age of the studied sequence was determined. The results were compared with equivalent levels in the region.

Discussion and Results

Petrographic investigations of thin sections and the gamma-sonic well logs indicate that

limestone is the dominant lithology in the Mand Member, which grades into shale and argillaceous limestone in the middle part of the succession. They, in turn, grade into pure limestone succession with low-gamma ray readings. Intraclasts, ooids, and peloids are the dominant carbonate grains, and in some intervals, skeletal grains such as benthic forams, green algae, and echinoderms are replaced. Rare planktonic foraminifers, sponge spicules, and calcispheres occur in limestone comprising skeletal components. We identified six microfacies types based on skeletal and non-skeletal grains and fabrics.

Conclusions

The Mand Limestone Member is a lithostratigraphic marker unit in the Zagros fold-thrust belt of Iran, whose upper boundary is compatible with the end of the Middle Jurassic. In addition to the lithostratigraphic point of view, it shows a clean carbonate unit with low gamma-ray readings that can be followed in the drilled wells. The total thickness of the carbonate unit in the Chahar-Bisheh-1 and Milatun-1 wells is 125 and 140 meters, respectively. The units are composed of limestone with subordinate shale interbeds. Our petrographic studies reveal that the Bathonian-Callovian clean carbonates are composed mainly of ooid grainstone related to ooid shoals on a carbonate ramp. Due to a lack of lime muds and sorting of ooid grains, they are considered excellent reservoir pay zones with good pro-perm characteristics. The ooid facies are associated with carbonate interbeds comprising bioclastic wackestone and bioclastic packstone microfacies. Based on the skeletal components and their stratigraphic position, we attribute their deposition to the lagoonal environment. Based on microfacies analysis and the occurrence of rare planktonic foraminifers, sponge spicules, and echinoderms in the shale and argillaceous limestone, they are considered open marine facies, which are in line with transgressive episodes.

We identified a third-order depositional sequence based on microfacies analysis and wireline well logs. The transgressive systems tract (TST) is indicated by pelagic facies. We placed MFS on the argillaceous limestone interval with high gamma-ray values that include planktonic foraminifers. TST comprises the Middle Jurassic Bajocian Sargelu Formation compatible with MFS J30 on the Arabian platform. The shaly interval in the upper Mand Member is Callovian in age and corresponds to MFS J40.