

## عوامل اصلی کنترل کننده کیفیت مخزنی سازند عرب در میدان نفت سنگین فردوسی دربخش دور از ساحل خلیج فارس

نوشین فتحی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات تهران

حسین رحیم‌پور بناب، استاد دانشکده زمین شناسی، دانشگاه تهران\*

مهدی دارایی، دانشجوی دکترای رسوب‌شناسی و سنگ شناسی رسوبی، دانشگاه تهران

علی اسعدی، دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی نفت، دانشگاه تهران

### چکیده

بخش بالایی سازند سورمه (معادل سازند عرب) با سن ژوراسیک بالایی، یک توالی کربناته-تبخیری است که میزبان نفت سنگین در میدان فردوسی در بخش دور از ساحل خلیج فارس می‌باشد. این مطالعه نشان داده است که عوامل رسوبی و دیاژنزی، کنترل کننده اصلی کیفیت مخزنی هستند. بر اساس مطالعات سنگ‌شناسی و شناسایی رخساره‌های رسوبی، سازند عرب در یک رمپ کربناته هموکلینال تشکیل شده است که شامل چهار کمربند رخساره‌ای اصلی شامل بالایی جزرومدی، پهنه جزرومدی، لاگون و سدی می‌باشد. مهمترین فرآیندهای دیاژنزی مؤثر انحلال گسترده جوی، میکرایتی شدن، دولومیتی شدن و سیمانی شدن دریایی بوده است. تجزیه و تحلیل پتروفیزیکی و پتروگرافی در میدان فردوسی نشان می‌دهد که کیفیت مخزنی در این توالی عمدتاً توسط محیط رسوبی و برخی از فرآیندهای دیاژنزی کنترل می‌شود. رخساره‌های سدی دارای کیفیت مخزنی مناسب با رخساره‌های لاگونی بسیار متخلخل همراه هستند. این تخلخل بالا در رخساره‌های لاگون عمدتاً به دلیل حفرات رشدی برخی از جلبک‌ها و انحلال جوی می‌باشد. علاوه بر این، سیمان‌های دریایی با ایجاد چارچوب‌های سخت در رخساره‌های دانه غالب، منجر به حفظ تخلخل و تراوایی در طی دیاژنز تدفینی شده‌اند. از طرف دیگر، رسوب تبخیری‌ها در محیط با شوری بالا، منجر به ایجاد سدهای ناتراوای عمودی بین کربنات‌ها و جلوگیری از خارج شدن مایعات سنگ‌های تحت فشار و در نهایت کاهش فشار روباره (به دلیل ازدیاد فشار هیدرواستاتیک) شده است. همچنین این رسوبات به عنوان سنگ پوش مخازن عرب عمل نموده‌اند. **واژه‌های کلیدی:** سازند عرب، میکروفاسیس، مدل رسوبی، دیاژنز، کیفیت مخزنی

## مقدمه

مطالعه حاضر، با هدف درک عوامل رسوبی و دیاژنزی و اهمیت آنها در کنترل کیفیت مخزنی صورت گرفته است. فرآیندهای اولیه رسوبی همراه با فرآیندهای ثانویه دیاژنزی به عنوان یکی از اصلی‌ترین فرآیندهای کنترل‌کننده کیفیت مخزنی در مخازن کربناته محسوب می‌شوند (Ahr 2008). ناهمگنی رخساره‌ای در کنار تغییرات دیاژنزی و شکستگی‌ها از مهمترین عوامل ایجاد ناهمگنی در مخازن کربنانه محسوب می‌شوند. در مقیاس وسیع، محیط رسوبی و هندسه پلاتفرم و در مقیاس کوچک تغییرات لیتولوژی، رخساره‌های رسوبی و فرآیندهای دیاژنزی باعث ایجاد ناهمگنی مخزنی و پتروفیزیکی می‌شوند (Lucia 2007). هدف از این مطالعه، بررسی محیط رسوبی، فرآیندهای دیاژنزی و مطالعه نقش آنها در کنترل کیفیت مخزنی سازند عرب می‌باشد.

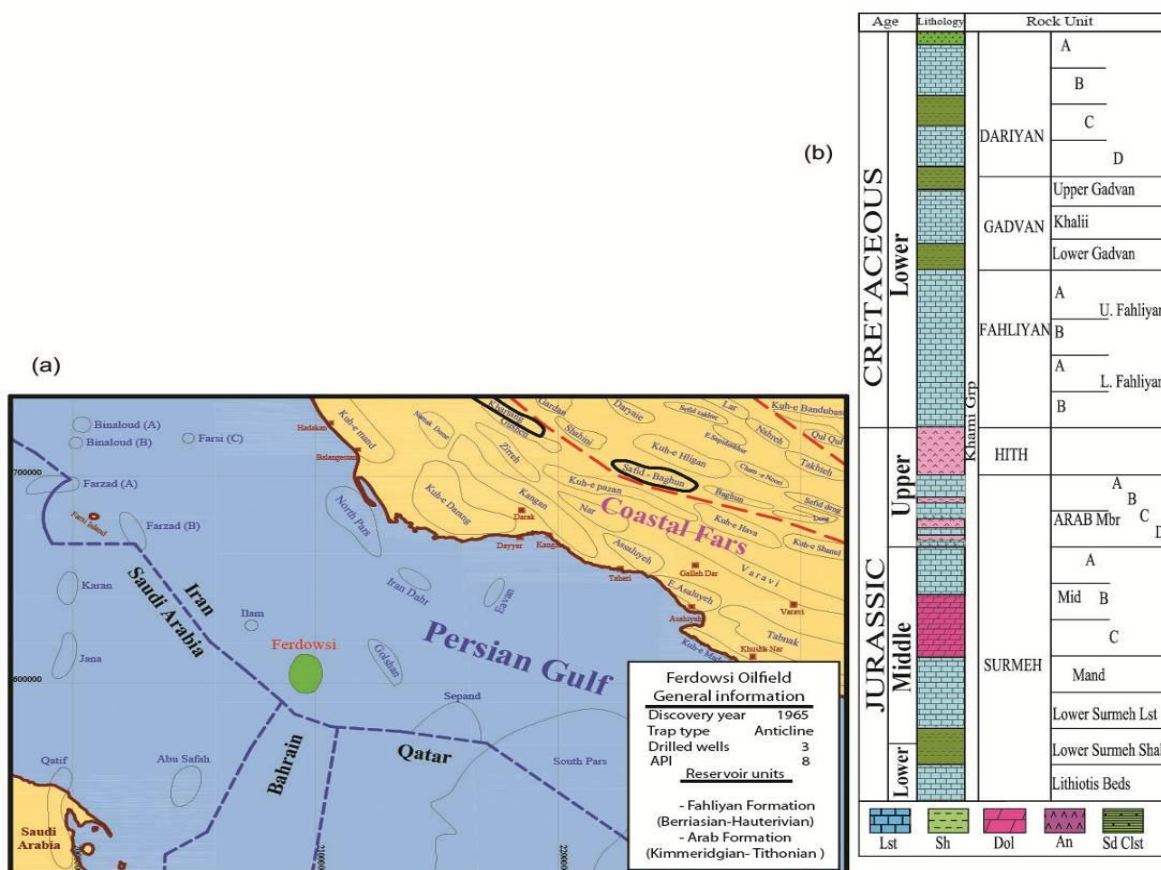
## زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی

پس از ایجاد اقیانوس نئوتتیس در پرموتریاس، در طی ژوراسیک پیشین تا پسین پلتفرم کربناته وسیعی بر روی حاشیه غیرفعال پلیت عربی تشکیل شد که در درون آن برخی حوضه‌های درون شلفی (Intraself Basins) مانند "لرستان"، "غرب ابوظبی" و "گوتنیا" به دلیل فرونشینی تدریجی بستر ایجاد شدند (Murriss 1980; Alsharhan & Nairn 2003). این پلتفرم وسیع کربناته و حوضه‌های درون‌شلفی مربوط به آن، در اثر نوسانات کوچک مقیاس سطح دریا در طی سیستم پیشرونده ژوراسیک، محل رسوب‌گذاری بالا و ایجاد توالی‌های کربناته تبخیری ضخیم و موجب ایجاد مهمترین سیستم نفتی جهان گردیده است (Alsharhan & Nairn 2003). علاوه بر این، در همین زمان، شرایط بی‌اکسیژنی موجود در حوضه‌های درون‌شلفی مکان مناسبی برای تشکیل سنگ منشأ ایجاد کرده است (Murriss 1980; Alsharhan & Kendall 1986). بدین ترتیب در این زمان، در اثر برهم‌کنش حرکات تکتونیکی کنترل‌کننده بستر حوضه، نوسانات سطح دریا و نیز آب و هوای گرم و خشک حاکم بر آن دوره، سیستم‌های نفتی

اهمیت مخزنی سازند عرب با سن ژوراسیک بالایی به عنوان مهمترین سنگ مخزن نفتی دنیا، باعث شده که مطالعات زیادی از دیدگاه زمین‌شناسی و مهندسی بر روی آن انجام شود (Powers 1962; Wilson 1975; Beydoun 1988, 1991; Mitchell et al. 1988; Alsharhan and Whittle 1995; Al-Husseini 1997; Lucia et al 2001; Al-Saad and Sadooni 2001; Cantrell et al. 2004; Cantrell 2006; Lindsay et al. 2006). اگر سیستم هیدروکربوری پالئوزوئیک به عنوان بزرگترین سیستم هیدروکربوری تشکیل‌دهنده گازی دنیا شناخته می‌شود سیستم ژوراسیک نیز بزرگترین سیستم هیدروکربوری نفتی دنیا می‌باشد (Ehrenberg et al. 2007; Pollastro 2003). مقطع نمونه سازند عرب به سن ژوراسیک بالایی در چاه شماره هفت دمام (واقع در میدان دمام در شرق عربستان) با ضخامت ۱۲۷ متر و لیتولوژی آهک، دولومیت و انیدریت قرار دارد (Powers 1968). به طور مرسوم، سازند عرب به چندین چرخه یا عضو تقسیم می‌شود. رایج‌ترین زون‌بندی که در اکثر کشورهای حاشیه خلیج فارس مرسوم بوده این سازند را به چهار عضو شامل D، C، B، A تقسیم، که عضو A جوانترین واحد محسوب می‌شود. در شناسایی و جدایش هر واحد، توالی‌های انیدریتی با گسترش جانبی زیاد که به صورت بین‌لایه‌ای در بین توالی‌های کربناته قرار گرفته و راس هر عضو را تشکیل می‌دهد مهم است. بنابراین به طور کلی نهشت این کربنات‌ها در محیطی به سمت بالا کم عمق شونده، رخ داده است. هر عضو، شامل یک چرخه کم عمق شونده است که با یک توالی کربناته شروع و به یک توالی تبخیری ختم می‌شود. آخرین واحد تبخیری که بر روی عضو آهکی A قرار گرفته است، سازند هیث نام دارد (Powers 1962). با وجود اهمیت مخزنی فراوان سازند عرب در خلیج فارس و کشورهای مجاور، مطالعات صورت گرفته در بخش ایرانی آن اندک است. با هدف درک مناسب از ویژگی‌ها و تغییرات این سازند، میدان فردوسی به عنوان یکی از میادین نفت سنگین که سازند عرب در آن مخزن اصلی است مورد مطالعه قرار گرفته است.

گردید کشف شد (Jamalian et al. 2011). این میدان به دلیل نفت‌های سنگین در زون‌های مخزنی فهلیان و سازند عرب به عنوان یکی از مهمترین میادین نفت سنگین ایران محسوب می‌شود (Ghazban 2007). سازند عرب در میدان فردوسی نیز به چهار عضو A, B, C, D تقسیم می‌شود (Addax 2007). توالی رسوبی سازند عرب در این میدان به عنوان قسمت بالایی سازند سورمه در نظر گرفته شده است که بر روی عضو A میانی سورمه و در زیر سازند هیث قرار دارد (شکل ۱- b)

(سنگ منشأ، مخزن، سنگ پوش) بسیار مناسبی در منطقه ایجاد شد (Handford et al. 2002). خلیج فارس در طول زمان رسوب‌گذاری سازند عرب، بخشی از حاشیه غیر فعال پلیت عربی بوده است (Alsharhan & Nairn 2003; Alavi 2004). میدان فردوسی در بخش‌های مرکزی و کم عمق خلیج فارس و حدود ۱۸۵ کیلومتری جنوب شهر بوشهر، ۳۰ کیلومتری غرب میدان گازی گلشن و ۸۰ کیلومتری جنوب میدان پارس شمالی واقع شده است (شکل ۱- a). گنبدی شکل فردوسی در سال ۱۹۶۵ با حفر چاه فردوسی شماره ۱ که تا سازند سورمه در عمق ۲۳۱۹ متری حفاری



شکل ۱- (a) - نقشه موقعیت جغرافیایی میدان فردوسی در خلیج فارس (b) موقعیت چینه‌شناسی سازند عرب در چاه شماره ۳ میدان فردوسی. این سازند در اینجا به عنوان یک عضو از سازند سورمه در نظر گرفته شده است (Addax.2007).

## داده‌ها و روش مطالعه

در این مطالعه و با هدف تعیین میکروفاسیس‌ها و عوارض دیاژنزی مؤثر بر کیفیت مخزنی سازند عرب در میدان فردوسی، مطالعه پتروگرافی بر روی تعداد ۳۶۵ مقطع نازک گرفته شده از مغزه‌های چاه F3 میدان که در آن سازند عرب ۹۳ متر ضخامت دارد مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور تعیین میکروفاسیس‌ها، مطالعات پتروگرافی جهت تعیین بافت، اجزاء، محتوای فسیلی و سایر عوارض رسوبی بر روی مقاطع در دسترس صورت گرفت. تمام مقاطع نازک به منظور تشخیص کلسیت از دولومیت با محلول آلزارین قرمز-فری سیانید پتاسیم، مطابق روش دیکسون (Dickson 1965) رنگ‌آمیزی گردیده‌اند. علاوه بر این با هدف شناسایی بهتر نوع فضای مغذی و نحوه ارتباط و هندسه آنها، به تعداد ۵۵ نمونه صمغ اپوکسی آبی رنگ (Blue-Dyed Epoxy) تزریق شده است. طبقه‌بندی میکروفاسیس‌ها به روش‌های دانهام (Dunham 1962) و امری و کلوان (Embry & Klovan 1971) انجام شده است. بررسی تخلخل بر اساس سیستم طبقه‌بندی چوکت و پری (Choquette and Pray 1970). فراوانی آلوکم‌ها، ماتریکس و سیمان با استفاده از نمودارهای مقایسه‌ای تعیین و محاسبه شده است. ویژگی‌های رسوب‌شناسی و پتروگرافی چاه F3 که مطالعه مذکور بر روی آن صورت گرفته است، در شکل ۲ نشان داده شده است.

## آنالیز رخساره‌ای و مدل رسوبی

بر اساس مطالعات رخساره‌ای صورت گرفته بر روی توالی سازند عرب در میدان فردوسی ۹ میکروفاسیس شناسایی که در چهار کمر بند رخساره‌ای اصلی شامل بالای جزرومدی، پهنه جزرومدی، لاگون و سدی گنجانده شده است (جدول ۱). بر اساس خصوصیات رسوب‌شناسی هر یک از رخساره‌ها و مقایسه آن با مدل‌های استاندارد، محیط رسوبی هر یک از رخساره‌ها مشخص شده است (Wilson 1975; Flügel 2010). چهار کمر بند رخساره‌ای شناسایی شده با علامت A, B, C, D

مشخص شده‌اند. در زیر به توصیف هر میکروفاسیس پرداخته شده است.

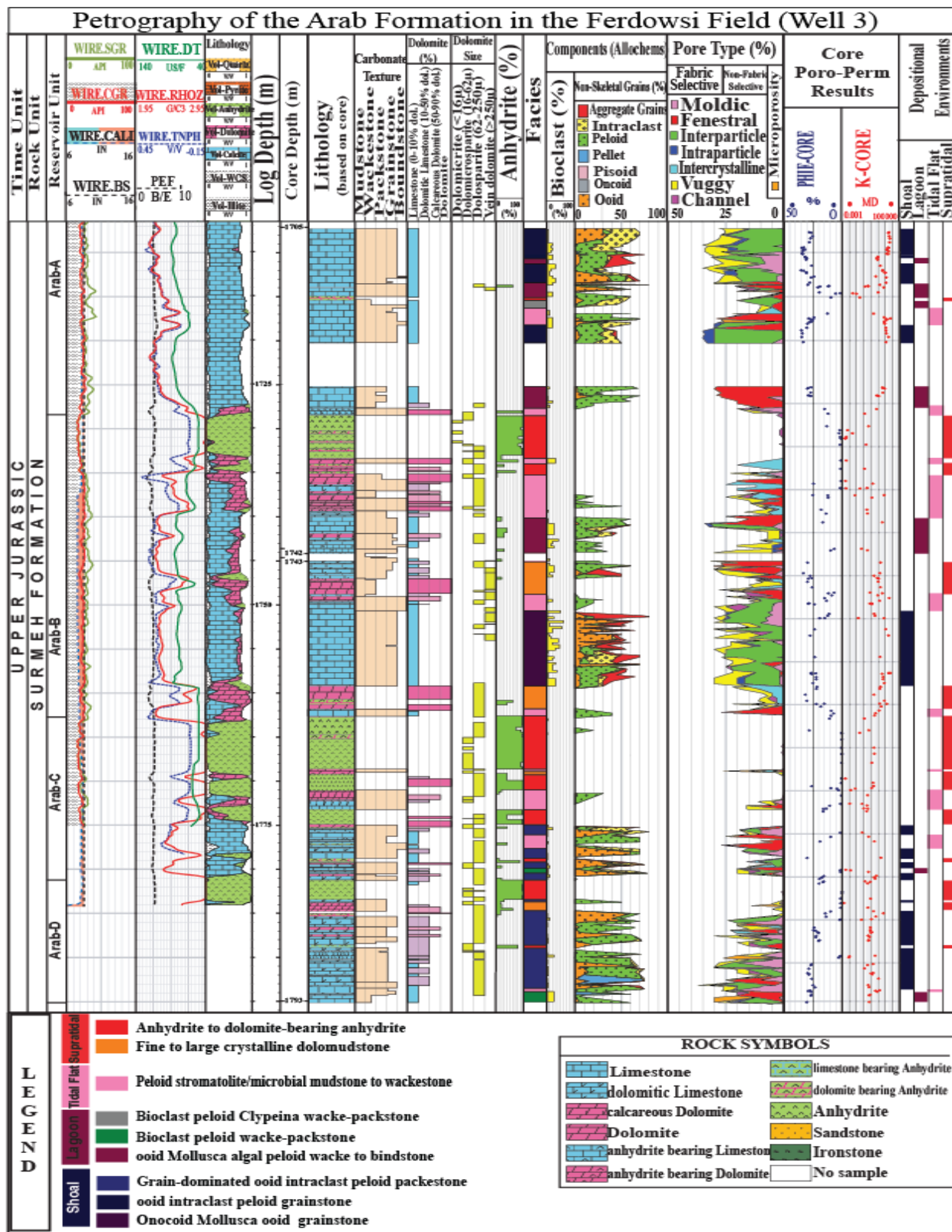
### A: مجموعه رخساره‌ای بالای جزرومدی

#### رخساره A<sub>1</sub>: انیدریت تا انیدریت دولومیت‌دار

تمرکز انیدریت در این رخساره بسیار بالا و بیشتر از ۹۰ درصد این رخساره را تشکیل می‌دهد و دارای تخلخل بسیار پایین می‌باشد. این رخساره یک رخساره تبخیری بوده که در آن ویژگی‌های محیط بالای جزرومدی مانند ساختار قفس پرنده‌ای (شکل ۳-a) مشاهده می‌شود. این رخساره عمدتاً از انیدریت‌های توده‌ای با اشکال مختلف تشکیل شده که در بین آنها رشته‌های دولومیتی با بلورهای ریز تا متوسط و گاهی میکریت دیده می‌شود. در تبخیری‌های سبنا- که در آن میزان تبخیر بیش از بارش و آب ورودی به حوضه است در اثر ایجاد شرایط فوق اشباع، محلول‌های غنی از سولفات، ژپس و انیدریت نهشته می‌شوند (Lucia 2007).

### رخساره A<sub>2</sub>: دولومادستون با بلورهای ریز تا متوسط

این رخساره مربوط به قسمت‌های گلی حاشیه پهنه جزرومدی می‌باشد که دولومیت در حال حاضر جایگزین مادستون شده است. وجود باقی مانده‌های میکرایتی و نیز مقدار زیادی ناخالصی، نشان‌دهنده منشأ جایگزینی برای این دولومیت‌ها است. دولومیت‌ها در اندازه‌های مختلف از ریز بلور تا درشت بلور و نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار وجود دارند (شکل ۳-b) و هیچ‌گونه آثاری از قطعات اسکلتی دیده نمی‌شود. دولومیتی شدن به عنوان یک فرآیند دیاژنزی، نقش مهمی بر روی خصوصیات زمین‌شناسی و پتروفیزیکی این رخساره دارد. دولومیت‌های ریز بلور احتمالاً حاصل دولومیتی شدن اولیه گل‌های آهکی‌اند که در محیط بالای جزرومدی تا پهنه جزرومدی و در طی دیاژنزی اولیه در حوضچه‌های کم عمق به وجود آمده‌اند (Sibley & Gregg 1987).



شکل ۲- ستون چینه‌شناسی و لاگ رسوبی به همراه ویژگی‌های مخزنی سازند عرب در چاه شماره F3 میدان فردوسی

آب‌های شور می‌باشد (Flügel 2010).

#### C: مجموعه رخساره‌ای لاگون

رخساره C<sub>1</sub>: وکستون تا پکستون دارای کلیپه‌انیا، پلوئید و بایوکلاست

در این رخساره جلبک‌های بزرگ کلیپه‌انیا، پلوئید و بایوکلاست اجزای اصلی سنگ ساز هستند (شکل ۳-d). این رخساره از رخساره‌های شناخته شده ژوراسیک در ایران و کشورهای حاشیه خلیج فارس می‌باشد (James & Wynd 1965). وجود فرامینفرهای بنتیک به همراه جلبک سبز نشان‌دهنده رسوب‌گذاری در زیر محیط لاگون است (Adabi 2010; Flügel, 2010). et al. 2010 پیدایش این رخساره در توالی مورد مطالعه محدود به یک افق است و انحلال، اثر شدیدی بر روی این رخساره داشته است. میکریتی شدن از مهمترین فرآیندهای دیاژنزی این رخساره می‌باشد و بسیاری از اجزای بایوکلاستی به شدت میکریتی شده‌اند. اصلی‌ترین نوع تخلخل در این رخساره تخلخل حفره‌ای است.

#### C<sub>2</sub>: رخساره تا پکستون دارای پلوئید و بایوکلاست

این رخساره از نوع گل غالب است که در آن دانه‌های پلوئید همراه با بایوکلاست‌های مربوط به محیط لاگون از قبیل فرامینفرهای بنتیک (میلیولید، فندرینا، دخانیا) از اجزای اصلی می‌باشند و ائیدها به عنوان آلوکم فرعی در بعضی قسمت‌ها دیده می‌شوند که در فضای بین آنها تخلخل بین دانه‌ای مشاهده می‌گردد (شکل ۴-a). دولومیتی شدن، انحلال، میکریتی شدن از جمله فرآیندهای دیاژنزی این رخساره می‌باشند. حضور اجزای اسکلتی مانند فرامینفرهای بنتیک در یک زمینه میکرایتی، نشان دهنده انرژی کم محیط و بخش‌های لاگونی است (Bachmann & Harisch 2006).

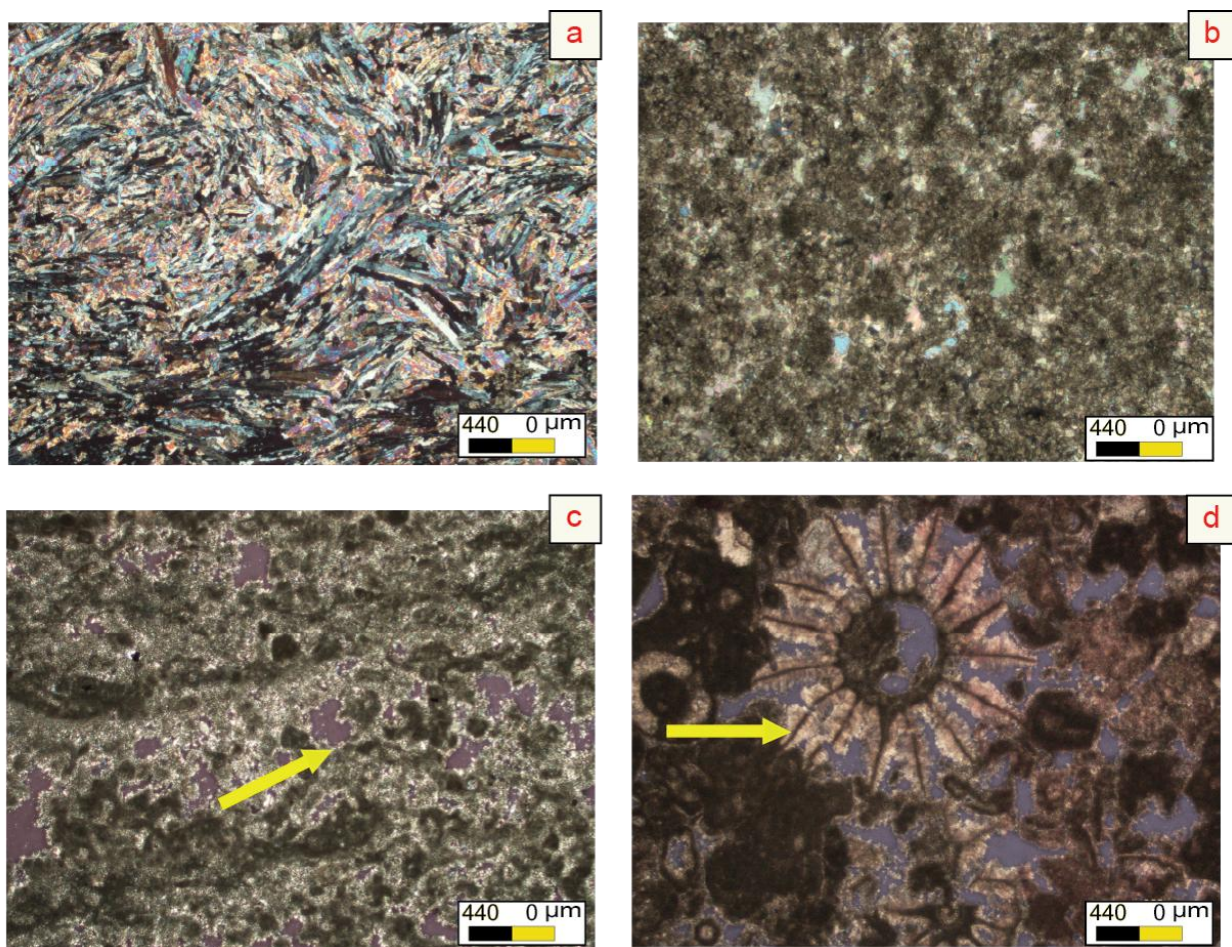
با توجه به فقدان فسیل و فراوانی انیدریت به صورت توده‌ای، کمربند رخساره‌ای بالای جزرومدی برای این رخساره در نظر گرفته شده است. دولومادستون این سازند نیز احتمالاً در قالب یک محیط سابخایی نهشته شده‌اند، به این صورت که با افزایش تبخیر و تشکیل کانی‌های تبخیری، میزان Ca در محیط کاهش و میزان Mg/Ca در محیط بالا می‌رود و دولومادستون تشکیل می‌شوند (Warren 2000).

#### B: مجموعه رخساره‌ای پهنه جزرومدی

رخساره B<sub>1</sub>: استروماتولیت پلوئیدی / مادستون تا وکستون پلوئیدی میکروبی

این رخساره شامل استروماتولیت و گاهی مادستون پلوئیدی میکروبیال می‌باشد که در بین استروماتولیت‌ها تخلخل فنسترال و بین پلوئیدها تخلخل بین دانه‌ای دیده می‌شود. لامیناسیون به وضوح در این رخساره مشاهده می‌شود (شکل ۳-c). اجزای به دام افتاده در بین فرش‌های سیانوباکتریایی شامل پلت‌های مدفوعی، پلوئیدهای میکروبی و در بعضی فواصل همچنین انواع قطعات اسکلتی می‌باشند. استروماتولیت‌ها در اثر فعالیت‌های میکروبی و به تله افتادن رسوبات توسط سیانوباکتری‌های آهک‌ساز در محیط کم انرژی تشکیل می‌شوند (Tucker & Wright 1990).

استروماتولیت‌ها شاخص خوبی برای نهشته‌های کربناته کم عمق بشمار می‌روند (Riding 2006). ساخت استروماتولیتی از نوع مسطح در این زیر رخساره نشان‌دهنده رسوب‌گذاری در محیط‌های کم عمق و شرایط بین جزر و مدی است (Riding 2006; Dupraz et al. 2006). استروماتولیت‌ها در زیر محیط سبخا تا بین جزرومدی تشکیل و حفظ می‌شوند (Walkden & Matos 2000). برخی معتقدند استروماتولیت‌ها در محیط‌های متنوعی زیست می‌کنند، ولی عمدتاً محیط‌زیست آنها در آب‌های کم عمق حاشیه حوضه‌های دریایی و دریاچه‌ای با



شکل ۳- (a): انیدریت تا انیدریت دولومیت‌دار (انیدریت‌های توده‌ای با ساختار قفس پرنده‌ای، XPL)، عمق: ۱۷۲۶/۰۶ متر (b): دولومادستون با بلورهای ریز تا متوسط، تخلخل بین بلوری (مقطع رنگ‌آمیزی شده، XPL)، عمق: ۱۷۳۳/۷۹ متر (c): استروماتولیت پلوئیدی / مادستون‌تا وکستون پلوئیدی میکروبی (تخلخل فسترال با علامت زرد مشخص شده است، XPL)، عمق: ۱۷۱۴/۸۷ متر (d): وکستون‌تا پکستون دارای کلیپه انیا، پلوئید و بایوکلاست (پیکان زرد جلبک کلیپه را نشان می‌دهد، XPL)، عمق: ۱۷۴۰/۴۰ متر.

حالت، این آلوکم‌ها فابریک‌های متفاوتی از وکستون تا پکستون و بعضی اوقات گرین‌استون ایجاد کرده‌اند. پلوئید و نرم‌تنان از اجزای اصلی و انید، ایتراکلاست و دیگر بایوکلاست‌ها از آلوکم‌های فرعی رخساره هستند. تخلخل‌های اصلی در این رخساره به صورت تخلخل بین دانه‌ای (در بافت‌های آلوکمیکال) و رشدی (در بافت باندستونی) می‌باشند. انواع بایوکلاست‌های شاخص لاگونی شناور در ماتریکس گلی، پلت‌های مدفوعی و از طرفی پوشش میکرایتی گسترده بر روی بایوکلاست‌ها، نرخ پایین

رخساره  $C_3$ : وکستون تا باندستون دارای پلوئید، نرم تن و انید اجزای اصلی این رخساره جلبک توماتوپورلا، بایوکلاست‌ها، پلوئید و انید می‌باشد. این جلبک‌ها در ساختارشان دارای حفره‌های زیادی می‌باشند که سبب ایجاد شبکه‌ای از تخلخل چارچوبی در این رخساره شده است (شکل ۴- c و b). بر اساس مطالعات انجام شده مشخص گردید که جلبک‌ها در بعضی قسمت‌ها سبب ایجاد بافت باندستون شده‌اند ولی در بعضی قسمت‌ها به دلیل آشفته‌گی‌های محیطی یا اثرات زیستی، خرد شده و به عنوان آلوکم در توالی دیده می‌شوند که در این

استونی به دلیل وجود ائیدها با جور شدگی خوب و نبود زمینه گلی، نشان‌دهنده تشکیل در یک محیط پر انرژی مانند سد و در بالای خط امواج عادی است (Sim and Lee 2006; Vaziri - Moghaddam et al. 2006). فرآیند انحلال در این رخساره به خوبی دیده می‌شود به طوری که هسته ائیدها و برخی آلوکم‌ها شسته شده است (شکل ۴-۰) از دیگر فرآیندهای دیاژنزی می‌توان به فشردگی اشاره کرد. این رخساره یکی از اجزای اصلی محیط سدی سازند عرب را تشکیل می‌دهد.

#### رخساره D<sub>3</sub>: گرین استون دارای ائید، نرم تن و انکوئید

این رخساره همانند رخساره D<sub>2</sub> می‌باشد، اما یک ویژگی مهم این رخساره، وجود فسیل نرم‌تنان و خرده‌های گاستروپود و بیوالویا در این رخساره می‌باشد. (شکل ۴-۱). مهمترین تخلخل در این رخساره، تخلخل بین دانه‌ای می‌باشد اما مقدار قابل توجهی تخلخل قالبی توسط فرآیند انحلال ائیدها و نرم‌تنان در این رخساره ایجاد شده است.

بافت گرینستون، وجود دانه‌هایی مانند اینتراکلاست، دانه‌های پوشش‌دار و جورشدگی نسبتاً خوب، حاکی از تشکیل در یک محیط پر انرژی مانند سد است (Flügel 2010). ائیدها در این کمر بند رخساره‌ای تشکیل تپه‌های سدی کربناته را داده‌اند. در ریز رخساره‌های D<sub>3</sub> به تدریج تنوع موجودات افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش تدریجی عمق آب و شرایط دریایی است. (Buxton and Pedley 1989; Hottinger 1973) ریز رخساره‌های D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> یک روند تدریجی از بخش رو به لاگون محیط سد (باد پناه سد)، مرکز سد و بخش رو به دریای سد را نشان می‌دهند (Geel 2000).

رسوب‌گذاری و قرارگیری طولانی مدت دانه‌های اسکلتی در شرایط آب‌های آرام و محدود شده نظیر محیط لاگونی را نشان می‌دهد (Tucker & Wright 1990).

در این رخساره‌ها اجزای اسکلتی که در بخش کم انرژی لاگون زندگی می‌کنند مانند گاستروپود، دوکفه‌ای‌های بنتیک، فرامینفرهای بنتیک، جلبک‌های سبز و اجزای غیراسکلتی نظیر پلوئید، اینتراکلاست و آنکوئید نشان‌دهنده رسوب این رخساره‌ها در محیط لاگون هستند (Tucker & wright 1990; Flügel 2010). جلبک‌های سبز در منطقه نفوذ نور در دریا‌های گرم زندگی می‌کنند و در محیط‌های با درجه شوری نزدیک به نرمال در عمق ۳ تا ۵ متر فراوانند (Flügel 2010)

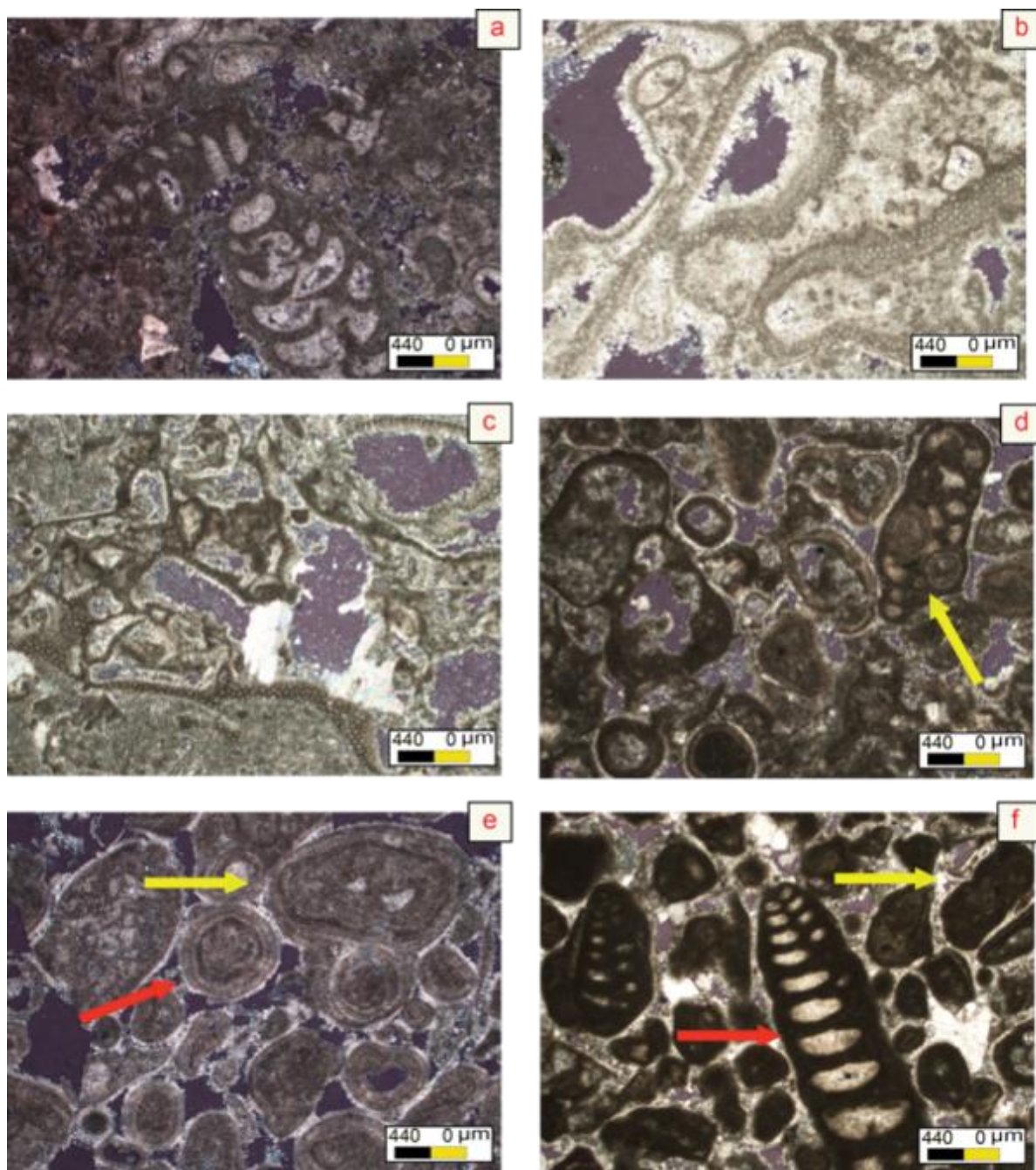
#### D: مجموعه رخساره‌ای سدی

##### رخساره D<sub>1</sub>: پکستون دارای پلوئید، اینتراکلاست، ائید

آلوکم‌های اصلی این رخساره شامل پلوئید، اینتراکلاست، ائید و انکوئید همراه با مقدار کمی بایوکلاست (مانند فرامینفرهای بنتیک، دوکفه‌ای) می‌باشد. این رخساره نسبت به دیگر رخساره‌های محیط سدی کیفیت مخزنی پایین‌تری دارد. دولومیتی‌شدن، انحلال، فشردگی فیزیکی و میکریتی‌شدن از جمله فرآیندهای دیاژنزی می‌باشند. تخلخل بین‌دانه‌ای و قالبی مهمترین تخلخل این رخساره می‌باشد. ماتریکس و آلوکم‌ها توسط بلورهای نیمه شکل‌دار و شکل‌دار دولومیت جایگزین شده‌اند (شکل ۴-۲).

##### رخساره D<sub>2</sub>: گرین استون دارای پلوئید، اینتراکلاست

این رخساره نسبت به رخساره D<sub>1</sub> تقریباً بدون گل می‌باشد و دارای اینتراکلاست، ائیدهای متحدالمرکز با جورشدگی خوب و خرده‌های بایوکلاست است. در این ریز رخساره گرین



شکل ۴- (a): وکستون تا پکستون دارای پلوئید و بایوکلاست (رخساره مربوط به محیط لاگون در زمینه میکریستی، دارای آلیزارین قرمز، XPL)، عمق: ۱۷۲۵/۴۸ متر (c,b): وکستون تا باندستون دارای پلوئید، نرم‌تن، ائید و بایوکلاست، (جلبک توماتوپرالا با بافت باندستون، تخلخل چارچوبی ایجاد کرده است، XPL)، عمق: ۱۷۴۹/۲۹ متر (d): پکستون تا گرین استون دارای پلوئید، اینتراکلاست، ائید و آنکوئید (این رخساره مربوط به حاشیه سدی به طرف لاگون می‌باشد. اینتراکلاست با پیکانزرد نشان داده شده است، XPL)، عمق: ۱۷۷۳/۰۵ متر (e): گرین استون دارای پلوئید، اینتراکلاست، ائید، آنکوئید و بایوکلاست (آنکوئید با پیکان زرد و ائید با قرمز مشخص شده است، XPL)، عمق: ۱۷۱۰/۸۰ متر (f): گرین استون دارای پلوئید تا اینتراکلاست، ائید، نرم‌تن و آنکوئید (رخساره مربوط به حاشیه سدی روبه دریای باز، فرامیفرهای بتیک میکریستی شده با پیکان قرمز و اینتراکلاست با پیکان زرد مشخص شده است، XPL)، عمق: ۱۷۵۰/۹۰ متر.

جدول ۱- آلوکوم‌ها و محیط رسوبی رخساره‌های سازند عرب در میدان فردوسی

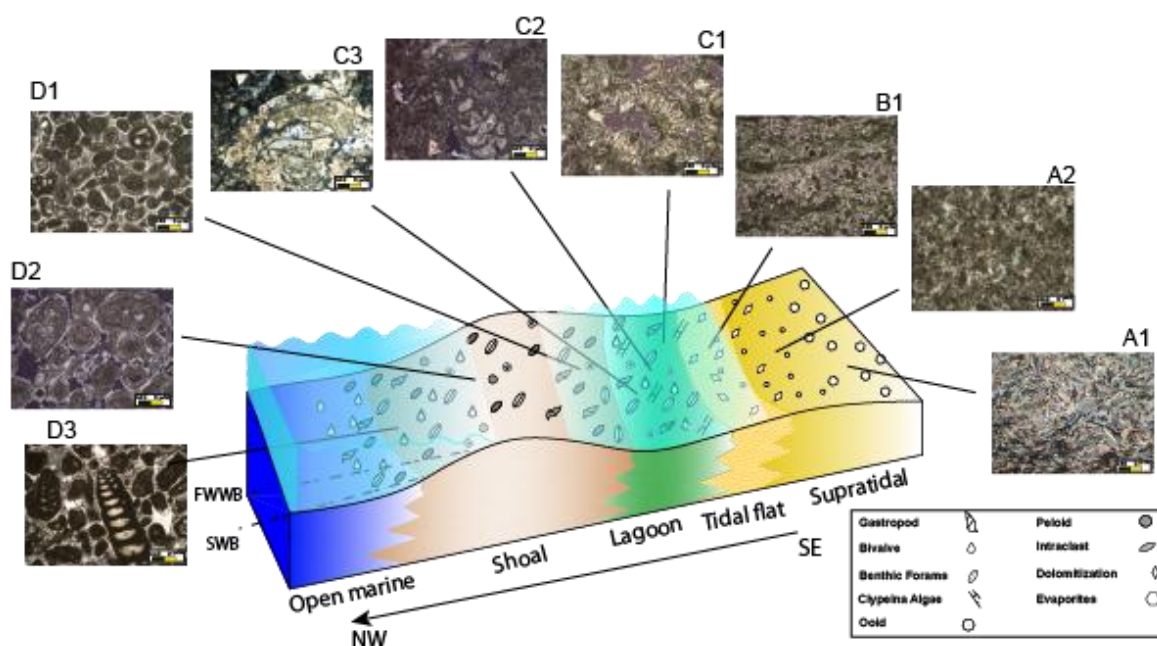
شماره رخساره	نام رخساره‌ها	آلوکوم‌های اصلی	محیط رسوبی
A1	انیدریت تا انیدریت دولومیت‌دار	-	بالای جزرومدی
A2	دولومادستون با بلورهای ریز تا متوسط	-	بالای جزرومدی
B1	استروماتولیت پلوئیدی / مادستون تا وکستون پلوئیدی میکروبی	پلوئید	پهنه جزرومدی
C1	وکستون تا پکستون دارای کلیپیه‌انیا، پلوئید و بایوکلاست	کلیپینا، پلوئید، بایوکلاست	لاگون
C2	وکستون تا پکستون دارای پلوئید و بایوکلاست	پلوئید، فرامیفرهای بتیک	لاگون
C3	وکستون تا باندستون دارای پلوئید، نرم‌تن، انید و بایوکلاست	پلوئید، مولوسکا، آلگا، انید، بایوکلاست	لاگون
D1	پکستون دارای پلوئید، اینتراکلاست، انید	پلوئید، اینتراکلاست، انید، آنکوئید	سد
D2	گرین استون دارای پلوئید، اینتراکلاست	پلوئید، اینتراکلاست، انید، آنکوئید، بایوکلاست	سد
D3	گرین استون دارای انید، نرم‌تن و آنکوئید	پلوئید، اینتراکلاست، انید، مولوسکا، آنکوئید	سد

## محیط رسوبی

در پرمین پسین پلاتفرم اپی ریک بسیار گسترده‌ای از جنوب ایران تا عربستان سعودی گسترش داشته که این پلاتفرم حاصل گسترش نئوتتیس و در نتیجه پیشروی آب دریا از زمان پرمین میانی به بعد بوده است (Pilleuete 1993, Sharland et. al 2001). البته برخی معتقدند که گسترش نئوتتیس از زمان پرمین پیشین آغاز گردیده است (Angiolini et al 2003). از این زمان به بعد در بخش‌های شرقی پلیت عربی و حوضه رسوبی خلیج فارس (جنوب نئوتتیس) رسوب‌گذاری رسوبات دریایی بدون انقطاع قابل توجه تا زمان ترشیاری ادامه داشته است (Sharland et al 2001). بررسی میکروفاسیس‌های سازند عرب نشان می‌دهد که گسترش نهشته‌های این سازند در محیط سدی بیشتر از سایر زیرمحیط‌ها است و شامل رخساره‌های دانه غالب می‌باشد. رمپ مذکور در بخش‌های داخلی‌تر (لاگون) از رخساره‌های وکستون تا پکستون و قسمت پرتاییدال از رخساره‌های مادستون و تبخیری تشکیل شده است. ته‌نشست رسوبات تبخیری در زمان کم عمق شدن یا خارج شدن بخش‌هایی از

این رمپ از زیر آب نشان از آب و هوای گرم و خشک دارد ولی گاهی با مرطوب شدن آب و هوا، انحلال قطعات ناپایدار و ته‌نشست سیمان‌های متئوریک نیز صورت گرفته است. نوسانات سطح آب دریا بر روی رسوبات کم عمق رمپ کربناته تأثیرگذار بوده است بنابراین در طی پایین آمدن سطح آب دریا، رسوبات تبخیری نظیر دولومیت‌ها و انیدریت‌های سابخیایی گسترش یافته‌اند و به عنوان سنگ پوش برای چرخه‌های عمیق شونده عمل کرده‌اند.

باتوجه به تغییر تدریجی بین کمربندهای رخساره‌ای نسبتاً وسیع، تنوع کم رخساره‌ها، عدم گسترش ریف‌های حاشیه‌ای مشخص، وجود فاسیس‌های گرینستونی پارانرژی در سمت روبه خشکی و نبود یک شکست مشخص در شیب پلاتفرم (Wilson 1975; Tucker, 1993; Flügel 2010) نشان می‌دهد که رسوبات سازند عرب بر روی رمپ با شیب کم نهشته شده‌اند که در آن بخش دور از ساحل توسط مجموعه‌های سدی کم عمق، گسترده و کم ارتفاع (توده‌های سدی) از بخش کم عمق جدا می‌شود (جدول ۱) (شکل ۵).



شکل ۵- مدل محیط رسوبی همراه با رخساره‌های شناسایی شده سازند عرب در میدان فردوسی

## دیاژنز

پس از نهشت رسوبات، فرآیندهای ثانویه باعث ایجاد تغییرات عمده در رسوبات می‌شود. فرآیندهای دیاژنزی، به دلیل حساسیت بالای رسوبات کربناته، نقش مهمی در شرایط مخزنی این توالی‌ها داشته و بدون بررسی این فرآیندها و نقش هر کدام، درباره کیفیت مخزنی نمی‌توان اظهار نظر درستی کرد. با توجه به انجام مطالعات پتروگرافی دقیق بر روی مقاطع نازک حاصل از مغزه‌ها، فرآیندهای دیاژنزی مؤثر و مهمترین فرآیندهای دیاژنزی موجود در سازند عرب به ترتیب وقوع حوادث در زیر شرح داده شده است. همچنین، سکانس دیاژنزی و تأثیر آن بر روی تخلخل در جدول ۲ نمایش داده شده است.

## میکریتی شدن

میکریتی شدن بایوکلاست‌ها فرآیند دیاژنزی اولیه رایج بر روی دانه‌های کربناته است و عموماً تحت تأثیر فرآیندهای نزدیک سطح تماس آب-رسوب رخ می‌دهد ( Reid &

Macintyre 2000). میکریتی شدن فرآیند دیاژنزی اولیه شاخص محیط دریایی کم عمق بوده و در محیط‌های کم انرژی توسط میکروارگانسیم‌های میکروسکوپی روی می‌دهد (Wright & Tucker 1990).

حفاری (Boring) توسط میکروارگانسیم‌ها به‌ویژه سیانوباکتری‌ها به عنوان یکی از مهمترین دلیل میکریتی شدن در نظر گرفته می‌شود. این فرآیند در سازند عرب در بیشتر رخساره‌ها و آلوکم‌ها دیده می‌شود. این فرآیند بیشتر در رخساره‌های کم عمق نظیر لاگون، در انیدها و دیواره آلوکم‌های اسکلتی مشاهده می‌شود (شکل ۵-ا).

## سیمانی شدن

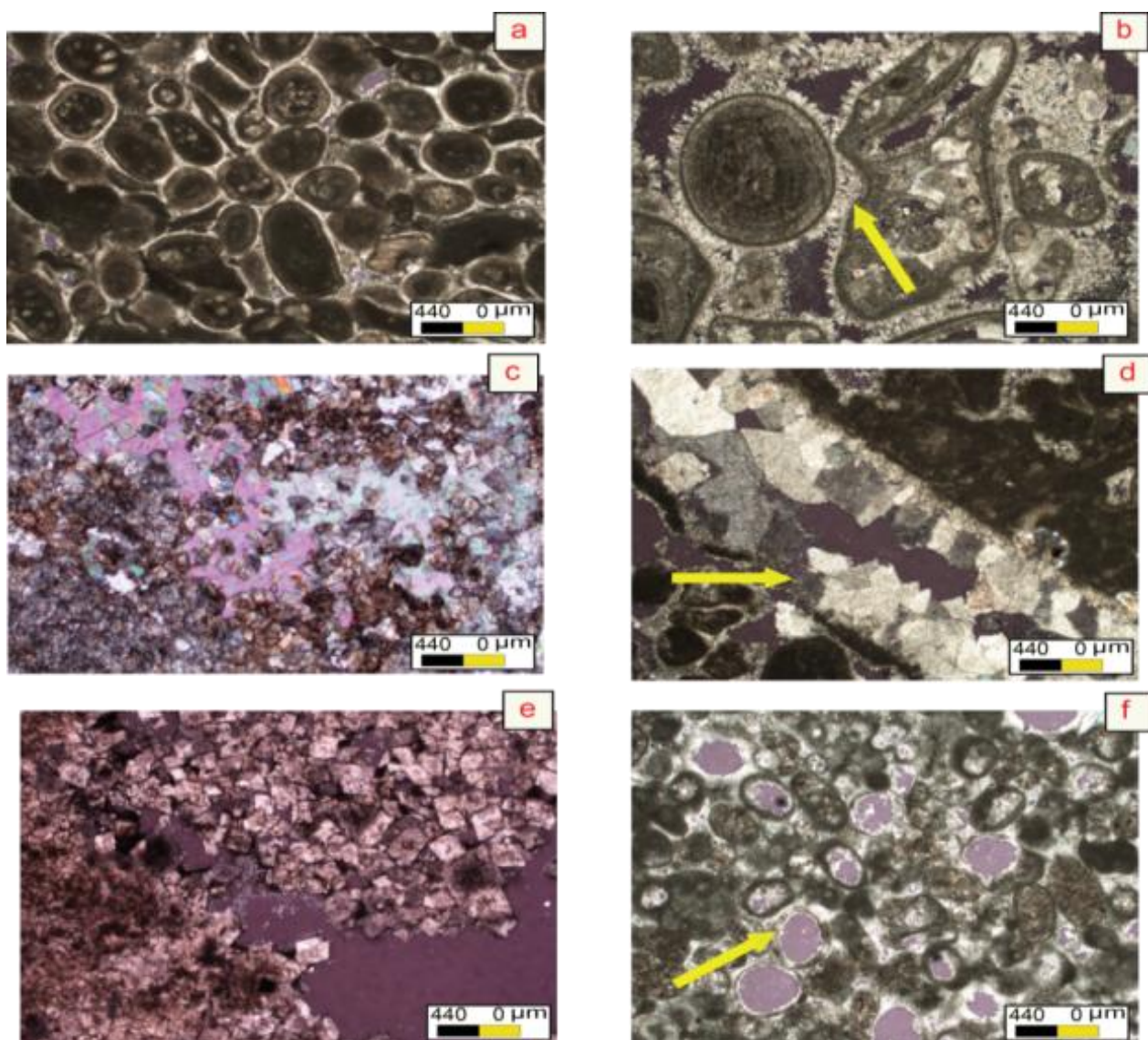
سیمانی شدن یکی از مهمترین فرآیندهای کاهش‌دهنده کیفیت مخزنی در کربنات‌ها است. مهمترین سیمان‌های موجود در توالی مورد مطالعه، سیمان کلسیت رشته‌ای هم ضخامت و تیغه‌ای به همراه مقدار کمی سیمان انیدریتی، کلسیت اسپاری هم بعد و دولومیتی می‌باشد. سیمان‌های فیبری هم بعد و

تیغه‌ای در رخساره‌های سدی در اطراف دانه‌های ائید و برخی آلوکم‌ها مشاهده می‌شوند (شکل ۵-b). به نظر می‌رسد این سیمان شدگی با حجم کم، نقش مهمی در حفظ تخلخل در طی دیاژنز تدفینی داشته است. سیمان‌های تدفینی به دلیل گسترش اندک، اثر مهمی بر کیفیت مخزنی نداشته‌اند. این سیمان‌ها را می‌توان به صورت کلسیت‌های بزرگ اسپاری (شکل ۵-d)، دولومیت و انیدریت‌های پویکیلتوپیک (شکل ۵-c) در بین آلوکم‌ها مشاهده کرد.

### دولومیتی شدن

بهبود کیفیت مخزنی در طی فرآیند دولومیتی شدن، به‌ویژه از طریق افزایش تراوایی با بهتر شدن منافذ ارتباطی و نیز تشکیل شکستگی‌ها که عموماً باز بوده و تراوایی را افزایش می‌دهند، است. تشکیل دولومیت در محیط‌های مختلف، باعث ایجاد خصوصیات متفاوت می‌گردد. شکل، اندازه و نیز ارتباط بلورها با هم عموماً شاخصی برای شناسایی محیط و فرآیند دولومیتی شدن است (Sibley & Gregg 1978). دولومیت‌های ریز بلور عموماً به محیط فوق اشباع مانند سبنا و دولومیت‌های درشت بلور مانند زین‌اسبی اغلب به محیط دفنی نسبت داده می‌شوند (Warren 2000). این دولومیت‌ها در طی مراحل نهایی دیاژنز تشکیل شده‌اند و مربوط به دیاژنز تدفینی هستند که باعث افزایش کیفیت مخزنی این سازند شده است (Tavakoli et al. 2011). دولومیتی شدن در بیشتر رخساره‌های شناسایی شده در توالی مورد مطالعه مشاهده می‌شود. دولومیت‌های اولیه به صورت عمده به قسمت‌های

پایین محیط بالای جزرومدی (دولومیت‌های سابخیایی) محدود می‌باشند که در مراحل اولیه دیاژنز تشکیل شده‌اند و آب دریا یا محلول‌های بین ذره‌ای غنی از Mg احتمالاً عامل دولومیتی شدن می‌باشند (Adabi 2009). همچنین، به دلیل تغییرات سطح آب دریا، هنگام پایین آمدن سطح آب، دولومیت‌های نشتی-برگشتی در رخساره‌های لاگون و سدی ایجاد شده‌اند که از جمله شواهد آن، همراه بودن با تبخیری‌ها نظیر انیدریت‌ها و درشت‌تر بودن اندازه این بلورها نسبت به دولومیت‌های سابخیایی به دلیل کم بودن مکان‌های هسته‌گذاری و همچنین با نزدیک شدن به توالی‌های دریای باز از میزان دولومیتی شدن کاسته شدن است (Warm 2000) (شکل ۶-e). دولومیت‌های سابخیایی از اندازه‌های کوچک تا بزرگ، با مرز غیر مسطح و مسطح باعث ایجاد دولواستون‌ها و دولومادستون‌ها شده‌اند. تاریخچه دیاژنزی سازند عرب و لایه‌های بالایی آن یعنی سازند هیث در جنوب و جنوب غربی خلیج فارس نشان می‌دهد که بیشتر انیدریت‌ها و دولومیت‌های آنها مربوط به دیاژنز سابخیایی می‌باشد (Alsharhan & Whittle 1995). دولومیت‌های ریز بلور حاصل دولومیتی شدن اولیه گل‌های آهکی هستند (Al-Aasm and Packard 2000) که در محیط‌های بالای پهنه جزرومدی تا پهنه جزرومدی حین دیاژنز اولیه در حوضچه‌های کم عمق به وجود می‌آیند (Sibley and Gregg 1987; Khalifa 2004). بلورهای فراگیر دولومیت، از ریز تا متوسط بلور و شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار در تغییر است و باعث افزایش تخلخل بین بلورین شده است.



شکل ۶- (a) میکزیتی شدن آلومهای محیط لاگون به طوری که ساختار اولیه بعضی از آنها مشخص نمی‌باشد، XPL، عمق: ۱۷۴۴/۴۴ متر (b) سیمان فیبری هم ضخامت در اطراف ائید که با علامت زرد مشخص گردیده است، XPL، عمق: ۱۷۴۰/۹۳ متر (c) سیمان انیدریتی پویکیلو تاپیک که فضای بین بلورهای دولومیت را پر کرده است، XPL، عمق: ۱۷۳۶/۲۷ متر (d) سیمان کلسیت اسپارای درشت بلور مربوط به محیط دفنی، با علامت زرد مشخص شده است، عمق: ۱۷۵۰/۹۰ متر XPL (e) بلورهای ریز تا درشت بلور در محیط پهنه جزرومدی که در اثر جانشینی در زمینه گلی ایجاد شده‌اند، بلورهای درشت مربوط به تبلور مجدد می‌باشند، XPL، عمق: ۱۷۵۱/۶۷ متر (f) انحلال قالبی در اثر شسته شدن ائید و پلوئیدها، XPL، عمق: ۱۷۶۶/۹۵ متر.

#### انحلال

یکی از مهمترین فرایندهای دیاژنزی است که می‌تواند هم به صورت انتخاب‌کننده فابریک و هم تخریب‌کننده فابریک عمل کند. تأثیر انحلال بر کیفیت مخزنی، ارتباط مستقیم با تراوایی،

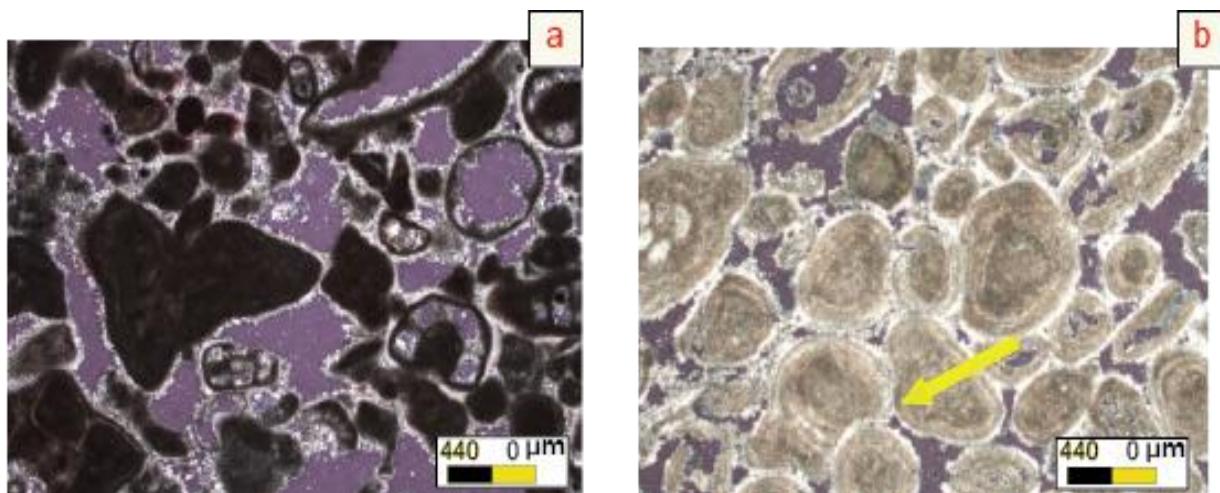
به دلیل تخلخل بالا در عموم تخلخل‌های ایجاد شده در اثر انحلال دارد. اگر انحلال بتواند این منافذ را به هم مرتبط کند شرایط مخزنی بهبود قابل توجهی پیدا می‌کند. فرآیند انحلال مهمترین فرآیند دیاژنزی در توالی مطالعه شده می‌باشد که

بیشترین اثر را بر کیفیت مخزنی داشته است. انحلال منجر به تشکیل انواع تخلخل ثانویه قالبی، حفره‌ای و بین دانه‌ای در رخساره‌های سازند عرب شده است. تأثیر این فرآیند در تمام رخساره‌ها و در کل سازند قابل مشاهده است. این فرآیند، اثر زیادی بر رخساره‌های لاگون و سد داشته است. انحلال انتخابی در رخساره‌های سدی، سبب شسته شدن دانه‌های ائید و پلوئید شده و موجب ایجاد مقداری تخلخل قالبی در این رخساره‌ها شده است (شکل ۶-d). از ویژگی‌های فرآیند شستشوی انتخابی در این توالی‌ها این است که باعث انحلال هسته ائیدها شده است اما حاشیه آنها حفظ شده‌اند. این فرآیند می‌تواند به دلیل وجود کلسیت اولیه در قشر یا کورتکس ائیدها باشد که برخی نویسندگان آن را به دلیل تغییرات کانی‌شناسی اجزای غیراسکلتی در طول زمان دانسته‌اند (MacKenzie and Morse 1992; Hardie 1996). این فرآیند باعث افزایش تخلخل بین دانه‌ای شده و به‌ویژه با اتصال تخلخل‌ها، اثر زیادی بر افزایش کیفیت مخزنی داشته است (شکل ۷-a). در بعضی قسمت‌ها نیز انحلال، تخلخل بین دانه‌ای موجود در میان آلوکوم‌ها را افزایش داده است و باعث بهبود کیفیت مخزنی در لاگون شده است.

### فشردگی

یکی دیگر از فرآیندهای دیاژنزی فشردگی می‌باشد که به صورت نزدیک‌شدن و فشرده‌شدن آلوکوم‌ها به یکدیگر مشخص می‌شود. در مقایسه با دیگر فرآیندهای دیاژنزی، تأثیر این فرآیند تا حد زیادی وابسته به محیط رسوب‌گذاری و فرآیند

دیاژنز سطحی می‌باشد (Machel 2005). در توالی سازند عرب، شکل اولیه ائیدهای شسته شده، همچنان حفظ شده‌اند که نشان می‌دهد مقدار کمی تراکم مکانیکی پس از فرآیند انحلال رخ داده است، علاوه بر این، هیچ سیمانی مشاهده نمی‌شود که تخلخل‌های ثانویه را پر کرده باشد در حالی که تخلخل بین دانه‌ای اولیه با سیمان‌های دریایی و جوی پر شده‌اند (شکل ۷-b). این بررسی‌ها نشان می‌دهد که این سازند در محیط دفنی، فشردگی اندکی تحمل نموده است؛ در حالی که در این اعماق، باید فشردگی فیزیکی اثرات مهمی بر کیفیت مخزنی (کاهش آن) داشته باشند (Machel 2005). وجود سیمان‌های دور دانه در اطراف آلوکوم‌ها یکی از عواملی است که مانع از تراکم زیاد آنها شده، و باعث کاهش اثر تراکم بر روی سنگ‌ها شده است. فرآیند مهم دیگری که باعث کاهش تراکم فیزیکی و فشردگی شده است، حضور و وجود تبخیری‌ها به صورت متناوب با کرنات‌ها بوده است. این تبخیری‌ها به صورت لایه‌هایی ناتراوا مانع از مهاجرت و حرکت سیالات آزاد شده سنگ‌های تحت فشار می‌شده‌اند و این امر باعث تشکیل زون‌های دارای فشار هیدرواستاتیک بیش از اندازه در سازند شده است. این زون‌های دارای فشار بیش از اندازه، مهمترین عامل در اطفای فشار دوباره و کاهش اثر تراکم بر توالی‌ها بوده‌اند. این فرآیند به شدت منجر به حفظ تخلخل و تراوایی اولیه رسوبات سازند عرب شده است. البته در کنار این فرآیند، نقش سیمان‌های دریایی در حفظ تخلخل‌های اولیه نیز قابل توجه است.



شکل ۷- (a)- انحلال فضای بین دانه‌ها را شسته و باعث افزایش تخلخل شده است، XPL، عمق: ۱۷۱۷/۱۰ متر (b): فشردگی فیزیکی باعث در هم فرورفتن انیدها شده که با علامت زرد مشخص شده است، XPL، عمق: ۱۷۷۸/۴۸ متر.

جدول ۲- توالی پاراژنی فرایندهای دیاژنی در سازند عرب در مخزن مورد مطالعه

فرآیندهای دیاژنی	دیاژنز اولیه دریایی	دیاژنز ثانویه دفنی کم عمق	متئوریک
۱- میکریتی شدن	→		
۲- سیمان دریایی دور دانه ای	→		
۳- نهشت تیغه های ژئیس	→		
۴- جانشینی دولومیت های اولیه بدون آهن	→		
۵- سیمان آنیدریتی	→		
۶- فشار بیش از حد به دلیل به دام افتادن مایعات	→	→	
۷- انحلال	→	→	
۸- پایداری کانی شناسی	→	→	
۹- دولومیت های تأخیری جانشینی	→	→	
۱۰- سیمان کلسیتی	→	→	
۱۱- سیمان دولومیتی	→	→	
۱۲- سیمان آنیدریتی پویکلو تاپیک	→	→	
۱۳- ورود هیدروکربن ها به مخزن	→	→	
۱۴- فشردگی فیزیکی	→	→	
۱۵- شکستگی	→	→	

→ حفظ تخلخل  
→ افزایش تخلخل  
→ کاهش تخلخل  
→ بدون اثر

### کیفیت مخزنی

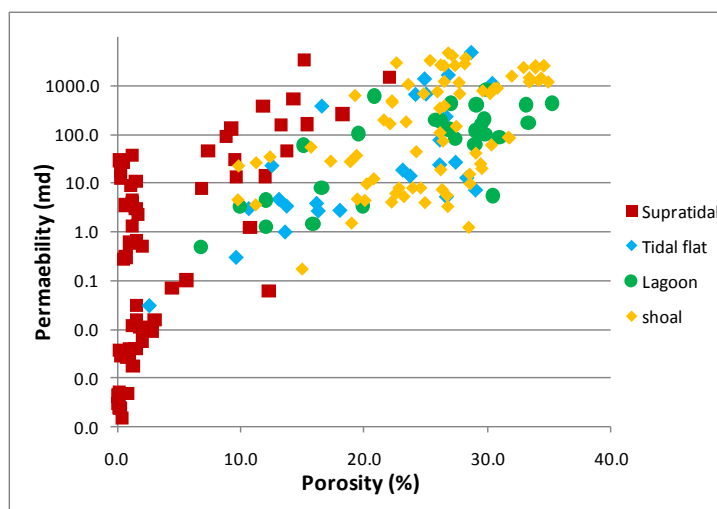
تخلخل، مقدار ظرفیت ذخیره‌سازی سیالات و تراوایی، قابلیت عبور و مرور سیالات را نشان می‌دهد که هر دو پارامتر در تعیین کیفیت مخزنی به کار می‌روند (Ahr 2008). عوامل بسیار

زیادی همانند رخساره‌های رسوبی، تاریخچه دیاژنتیکی، شیب زمین گرمایی و غیره در مقدار تخلخل تأثیر دارند (Ehrenberg et al. 2009) با افزایش عمق و سن رخساره‌ها که همراه با افزایش تدفین و دماست، میزان تأثیر فرایندهای دیاژنی

دیاژنتیکی انحلال، شکستگی و غیره کیفیت مخزنی بهتری کسب کرده و مخازن خوبی را تشکیل می‌دهند. جریان پیوسته آب در این محیط با شستن ذرات ریز رسوبی (گل) ایجاد رخساره‌های گرین‌استونی با تخلخل رسوبی (اولیه) بالا کرده است. معمولاً نهشته‌های لاگون به دلیل غلبه رخساره‌های گل - غالب معمولاً دارای کیفیت مخزنی (تخلخل اولیه) پایینی هستند در حالی که در توالی مورد مطالعه، به دلیل فراوانی جلبک‌های دارای حفرات رشدی فراوان و نیز در اثر فرآیند انحلال ناشی از شورابه‌ها و سیالات جوی، رخساره‌های این محیط در این سازند دارای کیفیت مخزنی بالا بوده و به عنوان رخساره رسوبی مخزنی (دارای تخلخل اولیه بالا) در نظر گرفته می‌شود. نهشته‌های پهنه جزرومدی دارای کیفیت مخزنی نسبتاً خوبی بوده و این امر به علت دولومیتی شدن سبخایی و گسترش تخلخل‌های فنسترال در استروماتولیت‌ها می‌باشد. رخساره‌های بالای جزرومدی به دلیل وجود انیدریت‌های فراوان دارای ساخت قفس پرنده‌ای و با آرایش تنگاتنگ و متراکم نودول‌های انیدریتی دارای تخلخل و تراوایی بسیار اندک بوده و نقش پوش سنگی دارند. برای درک بهتر ارتباط تخلخل با تراوایی، نمودار داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه برای انواع محیط‌ها در این میدان ترسیم شده است (شکل ۸).

افزایش یافته و تخلخل بیشتر کاهش می‌یابد (Ehrenberg et al. 2009). فرآیندهای میکربیتی شدن و برخی سیمان‌های تدفینی نظیر انیدریت‌های پویکلو تاپیک به دلیل گسترش و تأثیر کم آنها بر رخساره‌ها، تأثیر چندانی بر کیفیت مخزنی نداشته‌اند. بعضی از فرآیندهای دیاژنتزی همانند فشردگی فیزیکی و سیمانی شدن، بیشترین تأثیر را در کاهش تخلخل و تراوایی داشته‌اند. سیمان‌های کلسیتی و حجره‌های فسیلی، شکستگی‌ها و تعدادی از استیلولیت‌ها را پر کرده‌اند. به طور کلی سیمانی شدن، موجب مسدود شدن و کاهش اندازه فضای حفرات و در نهایت منجر به کاهش تخلخل می‌شود (Alavi 1994). مهمترین عوامل در افزایش تخلخل و تراوایی در این توالی انحلال است. فرآیند انحلال منجر به تشکیل انواع تخلخل قالبی، بین دانه‌ای و استیلولیتی شده است. حفظ تخلخل‌های اولیه در شرایط دیاژنتزی تدفینی، توسط سیمان‌های دریایی دور دانه‌ای و لایه‌های تبخیری که باعث کاهش تراکم و فشار روباره شده‌اند اهمیت زیادی دارند، زیرا منجر به افزایش کیفیت مخزنی می‌شوند.

در بین چهار محیط شناسایی شده، محیط سدی در این سازند از کیفیت مخزنی خیلی خوب (تخلخل اولیه حفظ شده بالا) به دلیل تشکیل در محیط پر انرژی و غلبه رخساره‌های دانه غالب برخوردار است. همچنین، در اثر فرآیندهای



شکل ۸- نمودار تخلخل و تراوایی حاصل مغزه‌های چاه شماره ۳ در سازند عرب

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از بررسی‌های جامع رخساره‌ای و محیط رسوبی همراه با مطالعات دیاژنزی بر روی توالی کربناته-تبخیری سازند عرب در میدان فردوسی، نتایج زیر حاصل گردید.

۱- بررسی‌های رخساره‌ای منجر به شناسایی ۹ میکروفاسیس در چهار کمر بند رخساره‌ای شامل کمر بند رخساره‌ای بالای جزر و مدی، پهنه جزرومدی، لاگون و سدی گردید. به دلیل عدم وجود ریف‌های سدی، تغییر تدریجی رخساره‌ها و عدم ساختارهای ریزشی، کربنات‌های سازند عرب در یک محیط رمپ کربناته وسیع با شیب کم نهشته شده‌اند.

۲- بالاترین کیفیت مخزنی، مربوط به رخساره‌های دانه غالب محیط سدی نظیر D2، D3 و سپس رخساره C3 لاگون با جلبک‌های فراوان می‌باشد. به طور کلی محیط سدی شامل رخساره‌های مخزنی و محیط سوپراتایدال، رخساره‌های سنگ پوش را در بردارد.

۳- مهمترین فرآیندهای دیاژنزی در این سازند شامل میکریتی شدن، سیمانی شدن دریایی، دولومیتی شدن، و انحلال جوی می‌باشد. با توجه به فراوانی بالای انحلال و جان‌شینی دولومیت‌ها و نیز حضور سیمان‌های دریایی دوره دانه‌ای، دیاژنزی جوی و دریایی دیاژنزی غالب در این مقاطع می‌باشد.

۴- خصوصیات پتروفیزیکی مخزن توسط عامل اولیه یا محیط رسوبی کنترل می‌شود اما فرآیندهای ثانویه نظیر انحلال نیز مؤثر بوده و باعث افزایش تخلخل شده‌اند. انحلال جوی از مهمترین فرآیندهای دیاژنزی بوده است که باعث افزایش تخلخل در رخساره‌ها شده است. این فرآیند با ایجاد تخلخل بین دانه‌ای و قالبی، سبب بهبود کیفیت مخزنی رخساره‌های محیط لاگون شده است. وجود سیمان‌های دریایی دور دانه در اطراف آلوک‌ها به ویژه ائیدها و پلوئیدها باعث شده‌اند در طی

دیاژنزی تدفینی دانه‌ها شکل اولیه خود را حفظ کرده و مانع از تراکم و کاهش تخلخل بین دانه‌ای شوند. تناوب تبخیری‌های ناتراوا با کربنات‌ها در این توالی‌ها نقش مهمی در ایجاد زون‌های دارای فشار هیدرواستاتیک بیش از اندازه داشته است که این پدیده نقش مهمی در کاهش فشار روباره و حفظ تخلخل و تراوایی داشته است.

## References

- Adabi, M.H., 2009, Multistage dolomitization of Upper Jurassic Mozduran Formation, Kopet-Dagh Basin, N.E. Iran: Carbonates and Evaporites, v. 24, no. 1, p. 16 – 32.
- Adabi, M.H., M.A. Salehi, and A. Ghobeishavi, 2010, Depositional environment, sequence stratigraphy and geochemistry of Lower Cretaceous carbonates (Fahliyan Formation), south-west Iran: Journal of Asian Earth Sciences, v. 39, p. 148-160.
- Addax, W.M., 2007, Technical study on Ferdowsi and Golshan fields, NIOC, report, unpublished.
- Ahr, W.M., 2008, Geology of Carbonate Reservoirs. In: John Wiley and Sons, Publication, 296 p.
- Al-Aasm, I.S., and J.J. Packard, 2000, Stabilization of early-formed dolomite: a table of divergence from two Mississippian dolomites: Sedimentary Geology, v. 131, p. 97-108.
- Alavi, M.A., 1994, Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretation, Tectonophysics, v. 229, p. 211-238.
- Alavi, M.A., 2004, Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution: American Journal of Science, v. 304, p. 301-320.
- Al-Husseini, M.I., 1997, Jurassic sequence stratigraphy of the western and southern Arabian Gulf: GeoArabia, v. 2, no. 4, p. 361-382.
- Al-saad, H.A., F.N. Sadooni, 2001, A new depositional model and sequence stratigraphic interpretation for the Upper Jurassic Arab "D" reservoir in Qatar: Journal of Petroleum Geology, v. 24: p. 243-264.
- Alsharhan A. S., and G. L. Whittle, 1995, Carbonate-Evaporite Sequences of the Late Jurassic Southern and Southwestern Arabian Gulf: Marine and Petroleum Geology, U.K., v. 12, no. 6, p. 615-628.

- Simulation of stromatolitemorphospace using 'DLA-CA' growth model': translation of energy in morphology: *Sedimentary Geology*, no. 185, p.185-203
- Ehrenberg, S.N., N.A.H. Pickard, G.V. Laursen, S.Monibi, K.Z. Mossadegh, T.A. Savna, A.A.M. Aqrabi, J.M. MacArthur, and M.F. Therlwall, 2007, Strontium isotope stratigraphy of the Asmari Formation (Oligocene-Miocene), SW Iran, *Jurnal of Petroleum Geology*, v. 30, p. 107-128.
- Ehrenberg, S.N., P.H. Nadeau & n.Ø. Stee, 2009, Petroleum reservoir porosity versus depth: Influence of geological age: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 93, P. 1281-1296.
- Embry, A., J. Klován, 1971, A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, Northwest territories: *Bulletin Canadian Petrology and Geology*, no. 19, p. 730-781.
- Flügel, E., 2010, *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application*. Springer, Berlin –Heidelberg, New York, 144 p.
- Geel, T., 2000, Recognition of stratigraphic sequences in carbonate platform and slope deposits, Empirical model based on microfacies analysis of Paleogene deposits in southeastern Spain: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, no.155, p. 211-238.
- Ghazban, F., 2007, *Petroleum Geology of the Persian Gulf*, Adviser: H. Motiei, University of Tehran press, 707 p.
- Handford, C.R., D.L. Cantrell and T.H. Keith, 2002, Regional facies relationships and sequence stratigraphy of a super-giant reservoir (Arab-D Member), Saudi Arabia. In: J.M. Armentrout (Eds.), *Sequence Stratigraphic Models for Exploration and Production: Evolving Methodology, Emerging Models and Application Histories*, 22nd Annual Bob F. Perkins Research Conference, Gulf Coast Section: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, p. 539-564.
- Hardie, L.A., 1996, Secular variations in seawater chemistry: an explanation for the coupled secular variation in the mineralogies of marine limestones and potash evaporites over the past 600 my: *Geology*, no. 24, p. 279– 283.
- Hottinger, L., 1973, Selected Paleogene larger foraminifera, In: A. Hallam (Eds.), *Atlas of Paleobiogeography*: Elsevier, Amsterdam, p. 443-452.
- Jamalian.M., H.Bahrami, and M. Godarzi, 2011, F-03 Geological Core Study: *Paleontology*, Alsharhan, A.S., and A.E.M. Nairn, 2003, *Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East*: Amsterdam; New York: Elsevier, 843 p.
- Alsharhan, A.S., and C.G.S.C.Kendall, 1986, Precambrian to Jurassic rocks of the Arabian Gulf and adjacent areas: Their facies, depositional setting and hydrocarbon habitat: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 70, p. 977-1002.
- Angiolini, L., M. Balini, E. Garzanti, A. Nicora, A. Tintori, S. Crasquin, and G. Muttoni, 2003, Permian climate and paleogeographic changes in Northern Gondwana: the Khuff Formation of interior Oman: *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, no. 191, p. 269-300
- Bachmann, M., and F. Hirsch, 2006, Lower Cretaceous carbonate platform of the Eastern Levant (Galilee and the Golan Heights): stratigraphy and second-order sea-level change: *Cretaceous Research*, no. 27, p. 487 – 512.
- Beydoun, Z.R., 1988, *The Middle East: regional geology and petroleum resources*. Beaconsfield, Bucks, U.K. : Scientific Press, 291 p.
- Beydoun, Z.R., 1991, Arabian plate hydrocarbon geology and potential- a plate tectonic approach: *American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Okla., U.S.A*, No. 33, 77 P.
- Buxton, M.W.N., and H.M. Pedley, 1989, A standardized model for Tethyan Tertiary carbonates ramps: *J. Geol. Soc. London*, no. 149, p. 746-748.
- Cantrell, D.L., 2006, Cortical fabrics of Upper Jurassic ooids, Arab Formation, Saudi Arabia: Implications for original carbonate mineralogy: *Sedimentary Geology*, no. 186, p. 157–170.
- Cantrell, D.L., R.M., Swarthagerty, 2004, Genesis and characterization of dolomite, Arab-D Reservoir, Ghawar Field, Saudi Arabia: *GeoArabia*, no. 9, p. 11 –36.
- Choquette, P.W., L.C. Pray, 1970, Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 54, p. 207-250.
- Dickson, J.A.D., 1965, A Modified Staining Technique for Carbonates in Thin Section: *Nature*, p. 205-587.
- Dunham, R.J, 1962, Classification of carbonate rocks according to their depositional texture. In: W.E. Ham (Eds.), *Classification of carbonate rocks-a Symposium*: Tulsa, OK, American Association of Petroleum Geologists Memoir1, p.108-121.
- Dupraz, C., R., Patissina and E.P., Verrecchia, 2006,

- Henry, 2003, Assessing undiscovered resources of the Barnett-Paleozoic Total Petroleum System, Bend Arch-Fort Worth Basin Province, Texas: CD-ROM Transactions of the Southwest Section: American Association of Petroleum Geologists Convention, Fort Worth, Texas, American Association of Petroleum Geologists/Datapages, 18 p.
- Powers, R. W., 1968, ArabieSeoudite (excluding Arabian Shield)" *LexiqueStrat. Internat.*, Centre Nat. Rech. Scientifique, Paris, III, Asie, Fasc, 10b, 177 p.
- Powers, R.W., 1962, Arabian Upper Jurassic Carbonate Reservoir Rocks, In: W.E. Ham (Eds.), *Classification of Carbonate Rocks*: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1, p. 122-192.
- Reid, R. P., and I. G. Macintyre, 2000, Microboring versus recrystallization: Further insight into the micritization process: *Journal of Sedimentary Research*, 70, p. 24-28.
- Riding, R. 2006. Cyanobacterial calcification, carbon dioxide concentrating mechanisms, and Proterozoic-Cambrian changes in atmospheric composition: *Geobiology*, no. 4, p. 299-316.
- Sharland, P. R., R. Archer, D. M. Casey, R. B. Davies, S. H. Hall, A. P. Heward, A. D. Horbury, and M. D. Simmons, 2001, Arabian plate sequence stratigraphy: *GeoArabia Special Publication*, no 2, 371 p.
- Sibley, D.F., and J.M. Gregg, 1987, Classification of Dolomite Rock Textures: *Journal of Sedimentary Petrology*, no.57, p. 967-975.
- Sim, M.S., and I.L. Lee, 2006, Sequence stratigraphy of the Middle Cambrian Daegi Formation (Korea), and its bearing on the regional stratigraphic correlation: *Sedimentary Geology*, 191, p. 151-169.
- Tavakoli,V., H., Rahimpour-Bonab, and B., Esrafilidizaji, 2011, Diagenetic controlled reservoir quality of South Pars gas field,an integrated approach: *Geoscience*, no. 343, p.55-71.
- Tucker, M.E., and V.P. Wright, 1990, *Carbonate Sedimentology*: Black well, London, 482 p.
- Tucker, M.E., F., Calvet, D., Hunt, 1993, Sequence stratigraphy of carbonate ramps: systems tracts, models and application to the Muschelkalk carbonate platforms of eastern Spain. In: H.W. Posamentier, C.P. Summerhayes, B.U. Haq and G.P. Allen (Eds.), *Sequence Stratigraphy and Facies Associations*: International Association of Sedimentologists, Special Publications, Sedimentology, Rock Typing & Fracture study, PEDEC, Report, 205 P., unpublished.
- James, G.A., and J.G. Wynd, 1965, Stratigraphic nomenclature of Iranian Oil Consortium Agreement Area: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, no.49, p. 2182-2245.
- Khalifa, M.A., 2004, Lithofacies, diagenesis and cyclicity of the 'Lower Member' of the Khuff Formation (Late Permian), Al Qasim Province, Saudi Arabia: *Journal of Asian Earth Sciences*, p. 1-16.
- Lindsay, R.F., D.L. Cantrell, G.W. Hughes, T.H. Keith, H.W. Mueller III and S.D. Russell , 2006, Ghawar Arab-D reservoir: Widespread porosity in shoaling-upward carbonate cycles, Saudi Arabia, In: P.M. Harris and L.J. Weber (Eds.), *Giant Hydrocarbon Reservoirs of the World: From Rocks to Reservoir Characterization and Modeling*: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 88/SEPM Special Publication, p. 97-137.
- Lucia, F.J., 2007, *Carbonate reservoir characterization*: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 341 p.
- Lucia, J.F., J.W. Jennings Jr, M. Rahnis, F.O. Meyer, 2001, Permeability and rock fabric from wireline logs, Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia: *GeoArabia* 6, no. 4, p. 619-646.
- Machel, H.G., 2005, Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal: *Journal of Geological Society, London, Special Publications*, 235, p. 7-63.
- MacKenzie, F.T., J.W., Morse, 1992, Sedimentary carbonates through Phanerozoic time: *Geochim. Cosmochim. Acta*, no. 56, p.3281-3295.
- Mitchell, J.C., P.J., Lehmann, I.A., Cantrell, I.A., A1-Jallal & M.A.R., A1 Thagafy, 1988, Lithofacies, diagenesis and depositional sequence; Arab-D Member, Ghawar Field, Saudi Arabia. In: A.J., Lomando and P.M., Harris (Eds.), *Society of Economic Pataeontologists and Mineralogists Core Workshop*, No. 12, p. 459-514
- Murriss, R.J., 1980, Middle East: Stratigraphic evolution and oil habitat: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, no. 64, p. 597-618.
- Pilleluit, A., 1993, Les Blocs Exotiques du Sultanatd'Oman. Evolution paleogeographicd'une marge Memoires: *Geologie Lausanne*, no.17, 249p.
- Pollastro, R.M., R.J. Hill, D.M. Jarvie, and M.E.

- Spec. Publ. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, Oklah., p. 37– 52.
- Warren, J.K., 2000, Dolomite, occurrence, evolution and economical important association: *Earth Science Review*, v. 52, p. 1-18.
- Wilson, J.L., 1975, *Carbonate Facies in Geologic History*: Springer-Verlag, New York, 471 p.
- no.18, p. 397–415.
- Vaziri - Moghaddam, H., M. Kimiagari, and A. Taheri, 2006, Depositional environment and sequence stratigraphy of the Oligocene - Miocene Asmari Formation in SW Iran, Lali area: *Facies*, no.52, p. 41-51.
- Walkden, G.M and G.E. Matos, 2000, Tuning high frequency cyclic platform successtions using omission surface: Lower jurassic of the A.U.E and Oman, In: A.S. Alsharhan, R.W. Scott (Eds.), *Middle East Models of Jurassic/Cretaceous Carbonate Systems*, vol. 69.