

عوامل موثر بر خصوصیات مخزنی رخساره‌های اووئیدی واحد دالان بالایی در خلیج فارس

زیبا زمانی*، مسعود لطف‌پور، سید علی معلمی

پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده اکتشاف و تولید، واحد زمین شناسی نفت، تهران، ایران

* مسئول مکاتبات- آدرس الکترونیکی: zamaniz@ripi.ir

(دریافت: ۸۵/۳/۳؛ پذیرش: ۸۵/۱۰/۱۷)

چکیده

سازند های دالان و کنگان مهمترین سنگ مخزنهای گازی در جنوب ایران و خلیج فارس بوده و بالغ بر ۱۸ درصد منابع گازی دنیا را در خود جای داده اند. اصلی ترین رخساره مخزنی این سازندها، رخساره های اووئیدی-گرینستونی است. در این مقاله سعی شده است که با بررسی این رخساره ها عوامل موثر بر خصوصیات مخزنی آن شناسایی و تاثیر هر کدام از این عوامل بر خواص مخزنی مشخص گردد. بدین منظور مغزه های واحد دالان بالایی به ضخامت ۲۷۲ متر در برش تحت الارضی خلیج فارس مطالعه گردید. بر اساس مطالعات رسوب شناسی، رخساره مخزنی مورد مطالعه خود شامل سه میکرو فاسیس پلوئید / اووئید گرینستون دانه ریز، اووئید گرینستون دانه متوسط و اینترا کلاست / بایوکلاست اووئید گرینستون دانه درشت می باشد. محیط رسوبگذاری این رخساره از پهنه های کشندی تا تپه های سدی اوولیتی-بایوکلاستی متغیر می باشد. جهت بررسی عوامل مؤثر بر خصوصیات مخزنی، عوامل بافتی و عوامل دیاژنزی به تفکیک مطالعه شده و با ترسیم نمودارهای مربوطه تاثیر هر کدام از این عوامل مشخص گردید. از عوامل بافتی مؤثر بر خصوصیات مخزنی رخساره مورد مطالعه، اندازه، شکل دانه ها، جورشدگی و فابریک سنگ است. پدیده‌های دیاژنزی مهمی که خصوصیات مخزنی رخساره های گرینستونی را متاثر ساخته اند شامل فرایندهای تراکم، سیمانی شدن، انحلال، دولومیتی شدن، انیدریتی شدن و شکستگی می باشند.

واژه‌های کلیدی: رخساره های اوولیتی، خصوصیات مخزنی، دیاژنز، واحد دالان بالایی، خلیج فارس

مقدمه

هم ارز واحد خوف بالایی در پلانفرم عربستان می باشند (Alsharhan 1993, Al-Jallal 1995).

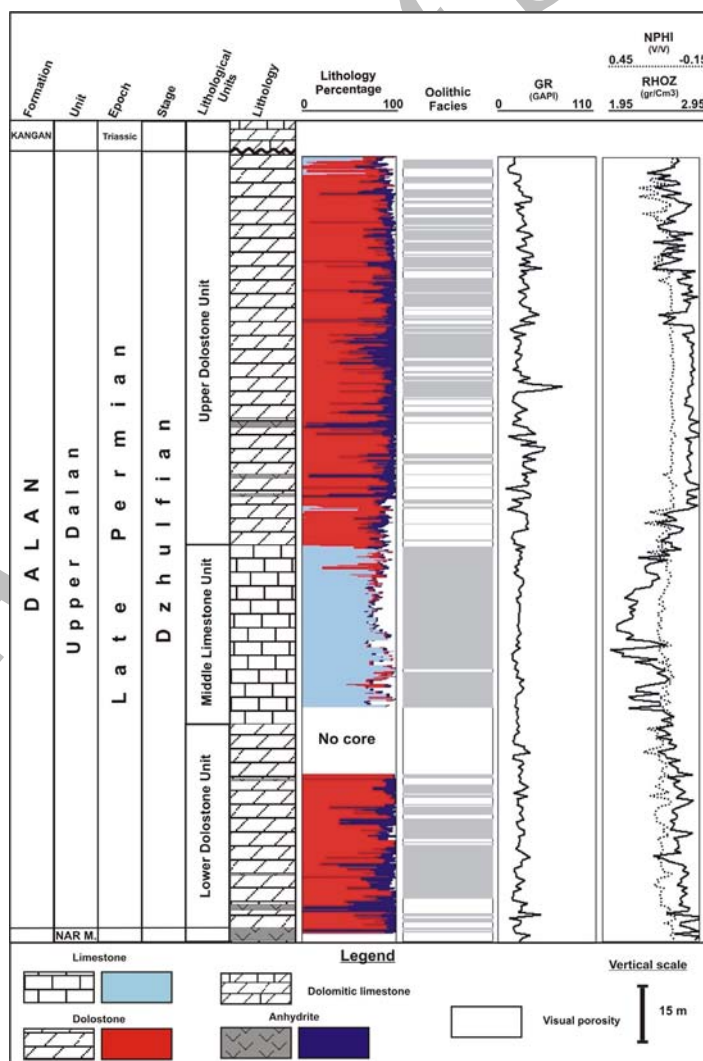
در مقطع مورد مطالعه (شکل ۱)، واحد دالان بالایی شامل ۲۷۲ متر تناوب رسوبات آهکی-دولومیتی و تبخیری است و از نظر لیتولوژی می توان آن را به سه بخش تقسیم کرد (شکل ۲). بخش تحتانی دولومیتی است و در قسمت پائین آن لایه‌های انیدریتی مشاهده می شوند. گرهک‌های انیدریتی (Anhydrite nodules) در این واحد قابل ملاحظه می باشند. ضخامت این واحد حدود ۷۲ متر است و بطور هم شیب بر روی واحد کربناته-تبخیری نار قرار گرفته است.

بخش میانی با لیتولوژی آهکی است که دارای ضخامتی در حدود ۶۴ متر می باشد. این بخش دارای رخساره های اوولیتی (اووئید گرینستون) قابل توجهی است که قسمت اعظم این توالی را به خود اختصاص داده است، بطوری که در حدود ۸۵ درصد این بخش از رخساره اووئیدی-گرینستونی تشکیل شده است. گرهک‌های انیدریتی در این واحد نادر بوده و در صورت وجود بسیار کوچک هستند.

سازندهای دالان و کنگان مخازن اصلی گاز در خاور میانه هستند. این دو سازند در جنوب ایران و در خلیج فارس در حدود ۱۸ درصد از منابع گازی جهان را در خود جای داده‌اند (Kashfi 2000). برای اولین بار، رسوب شناسی و چینه شناسی سازند دالان در زاگرس توسط زابو و خرد پیر (Szabo & Khradpir 1978) مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه، رسوب شناسی، چینه شناسی، بیواستراتیگرافی و پالئوآکولوژی رسوبات پرموتریاس در زاگرس، بررسی شده است. جدیدترین مطالعات منتشر شده رسوب شناسی و چینه شناسی سازند دالان در ناحیه زاگرس توسط لطف پور (۱۳۸۴) و در خلیج فارس توسط Insalaco et al. (2006) انجام شده است. بر اساس مطالعات فوق‌الذکر، سازند دالان بالایی در ۵ کمر بند رخساره ای؛ سبخایی، پهنه های کشندی، لاگونهای محصور، تپه های سدی اووئیدی-بایوکلاستی و دریای باز مربوط به یک پلانفرم بزرگ کربناته از نوع رمپ (Homoclinal carbonate ramp) رسوب کرده است. براساس مطالعات قبلی انجام شده در نواحی مختلف، اصلی ترین رخساره مخزنی سازند دالان، رخساره اووئیدی می باشد (Insalaco et al. 2006, Meyer et al. 2004). از نقطه نظر چینه شناسی، واحد دالان بالایی و سازند کنگان



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی برش تحت الارضی مورد مطالعه.



شکل ۲- ستون چینه شناسی واحد دالان بالایی در برش تحت الارضی مورد مطالعه.

میکروفاسیس و محیطهای رسوبی رخساره اووئیدی-گرینستونی واحد دالان بالایی

ضخامت تجمعی رخساره‌های اووئیدی-گرینستونی واحد دالان بالایی در مقطع مورد مطالعه حدود ۱۴۰ متر است که بیش از ۵۰ درصد ضخامت کل این واحد را شامل می‌شود. بر اساس مطالعات رسوب‌شناسی ماکروسکیپی و میکروسکیپی، رخساره اووئیدی-گرینستونی به سه میکروفاسیس شاخص ذیل تقسیم می‌شود: پلوئید/ اووئید گرینستون دانه ریز (Fine-grained peloid ooid grainstone).

این میکروفاسیس از آلوکم‌های اصلی اووئید و پلوئید تشکیل شده است که در برخی موارد خرده‌های اسکلتی محیط لاگونی، نظیر خرده‌های صدف شکم پایان و جلبکهای سبز نیز در آن دیده می‌شود. فراوانی این میکروفاسیس در واحد دالان بالایی مقطع مورد مطالعه حدود ۱۹ درصد می‌باشد. اندازه اووئیدها در این میکروفاسیس ریز و در حد کوچکتر از ۰/۲۵ میلی‌متر است. ساختمانهای رسوبی مشاهده شده در این میکروفاسیس شامل لایه بندی افقی، مورب (شکل A ۳)، فلاسر (Flaser)، موجی، پشته ای (Hummocky) و همچنین حفره‌های کی استون (Keystone vugs) است (شکل ۴A).

فراوندهای دولومیتی شدن و انیدریتی شدن در این رخساره به فراوانی دیده می‌شوند. انیدریت به صورت سیمان بین آلوکم ها و جایگزینی مشاهده می شود (شکل ۳A و ۳B). شایان ذکر است گرهکهای انیدریت نیز در این رخساره وجود دارند. در برخی از نمونه های مورد مطالعه، دولومیت بطور ثانویه جایگزین اووئیدها و خرده‌های اسکلتی شده است. در بخش‌هایی از توالی واحد دالان بالایی، اووئیدها بطور کامل در اثر انحلال حل شده و تخلخل قالبی قابل ملاحظه‌ای ایجاد کرده است (شکل ۴B). از انواع تخلخل‌های دیگر می‌توان به تخلخل بین دانه‌ای و تخلخل بین بلوری در دولومیتها اشاره نمود. سیمان پرکننده حفرات اکثراً از نوع موزائیکی و هم بعد با بلورهای ریز می‌باشد. میکرایتی شدن آلوکم‌ها به صورت پاکت میکرایتی (Micrite envelope) در این رخساره به فراوانی دیده می‌شود (شکل ۴C و ۴A). حداقل و حداکثر تخلخل و تراوایی در این میکروفاسیس در مقطع مورد مطالعه به ترتیب ۰/۰۳ و ۲۱ درصد و ۰/۰۳ و ۴۷ میلی داری است (شکل ۴A). لایه بندی فلاسر، موجی و حفره‌های کی استون اکثراً در رخساره‌های منطقه بین کشندی دیده می‌شوند (Tucker & Wright 1990).

۳- بخش بالایی به ضخامت ۱۳۶ متر، دولومیتی بوده و حاوی لایه‌ها و گرهک‌های انیدریتی می باشد. فراوانی رخساره اووئیدی-گرینستونی در این واحد چشمگیر نیست. مرز بالایی این بخش با سازند کنگان بوسیله یک ناپیوستگی هم شیب مشخص می گردد و توسط شواهد بیواستراتیگرافی قابل تشخیص است.

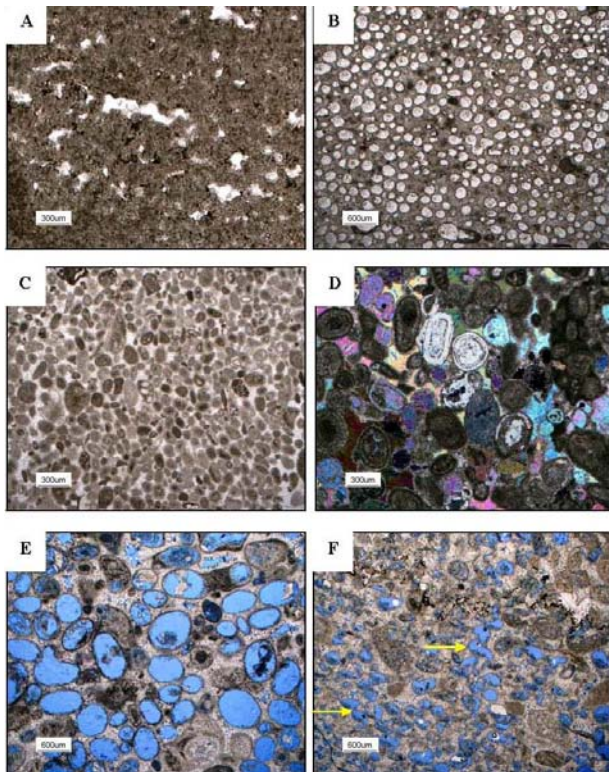
در این مقاله سعی شده است که با بررسی رخساره اووئیدی در برش واحد دالان بالایی در خلیج فارس، عوامل مؤثر بر خصوصیات مخزنی آن شناسایی و تاثیر هر کدام از این عوامل مشخص گردد.

روش مطالعه

به منظور بررسی و مطالعه رخساره‌های اووئیدی-گرینستونی واحد دالان بالایی، مغزه‌های این واحد به ضخامت ۲۷۲ متر در یکی از مقاطع تحت الارضی خلیج فارس مطالعه گردید (شکل ۱). در این راستا اطلاعاتی نظیر لیتولوژی، بافت سنگ، ساختارهای رسوبی، آلوکم‌ها، نوع و مقدار تخلخل‌ها (به روش تخمین چشمی و با استفاده از چارتهای مقایسه ای)، شکستگی‌ها و پدیده‌های دیاژنزی نظیر سیمانی شدن، انحلال مورد بررسی قرار گرفته است.

جهت تعیین خصوصیات مخزنی توالی مورد مطالعه تقریباً از هر یک متر مغزه ۳ پلاگ (Plug) افقی در امتداد عمود بر محور مغزه و یک پلاگ قائم در امتداد محور مغزه گرفته شده است و تخلخل (Helium porosity) و تراوایی (Air permeability) آنها اندازه‌گیری شده است. از کلیه پلاگ‌های افقی مقطع نازک تهیه گردیده و توسط محلول آلزارین رنگ آمیزی شده‌اند (Dickson 1965). جهت بررسی دقیق تر انواع تخلخل به تعدادی از نمونه‌ها با تخلخل و تراوایی بالا نیز اپوکسی آبی (Blue epoxy resin) تزریق گردیده است.

در مجموع حدود ۳۰۰ مقطع نازک از رخساره های اوولیتی، مورد مطالعه قرار گرفته اند. در این مطالعه، بافت (بر اساس تقسیم بندی Dunham 1962)، لیتولوژی، انواع تخلخل، ساختارهای رسوبی، پدیده‌های دیاژنزی نظیر سیمانی شدن، دولومیتی شدن، انحلال، تراکم، جانشینی و ... در آنها تعیین گردیده اند. جهت بررسی دقیق بافت، سیستم تخلخل، کانی‌ها و اجزاء تشکیل دهنده سنگ ۶ نمونه توسط میکروسکوپ الکترونی مورد مطالعه قرار گرفته و از آنها عکس تهیه شده است. نهایتاً با ترسیم نمودارهای مربوطه و تعبیر و تفسیر کلیه نتایج بدست آمده تاثیر عوامل مختلف بر روی خصوصیات مخزنی رخساره مورد مطالعه این واحد مشخص گردیده است.

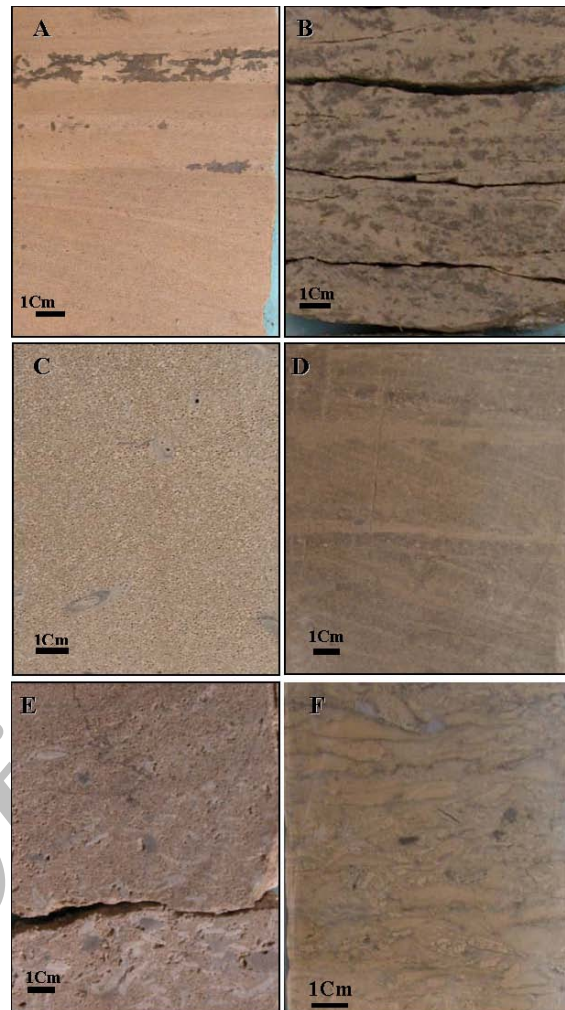


شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی از میکرو فاسیس های مختلف رخساره اووئیدی-گرینستونی واحد دالان بالایی. (A) میکروفاسیس ۱ با اووئیدهای میکربیتی شده و حفره های کی استون، PPL: تخلخل: ۷/۹% ، تراوایی: ۱ md (۵/۴)؛ (B) میکرو فاسیس ۱ با تخلخل فراوان غیر مرتبط قالبی اووئیدها، PPL: تخلخل: ۱۸/۴% ، تراوایی: ۱/۳ md ، (C) میکرو فاسیس ۱ با اووئیدهای میکربیتی شده، PPL: تخلخل: ۵/۸% ، تراوایی: ۰/۱ md (D) میکروفاسیس ۲ با سیمان انیدریتی که بعضی از اووئیدها را نیز تا حدی جایگزین کرده است، XPL: تخلخل: ۲% ، تراوایی: ۰/۱۳ md (E) میکروفاسیس ۲ با تخلخل قالبی اووئید، سیمان حاشیه ای هم ضخامت و سیمان هم بعد، PPL: تخلخل: ۲۰/۳% ، تراوایی: ۰/۹ md (F) میکروفاسیس ۲ با تراکم شیمیایی (استیلولایت) و فیزیکی (اسپاستولایت) که با فلش مشخص شده اند، PPL: تخلخل: ۱۸/۶% ، تراوایی: ۱۰/۷ md.

با توجه به شکل و اندازه یکنواخت و شیخ باقی مانده، در اکثر موارد به نظر می رسد که دانه های پلوئید، همان اووئیدهای میکربیتی شده باشند. البته منشاء این پلوئیدها می تواند از خرده های اینتراکلاست (از محیط کشندی یا لاگونی) نیز باشد.

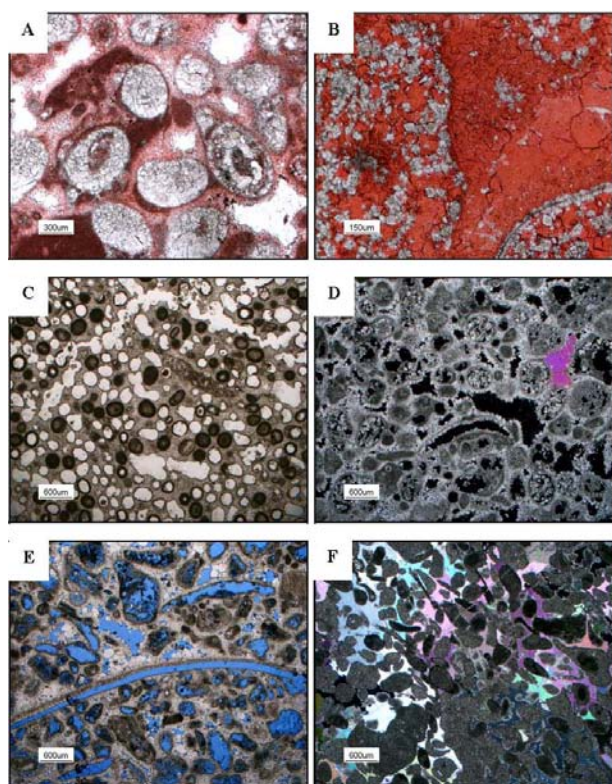
بر اساس مجموعه شواهد فوق الذکر به نظر می رسد که محیط رسوبی این میکروفاسیس حاشیه لاگونی تپه های سدی (Leeward shoal) و ناحیه پائین بین کشندی (Lower intertidal) باشد. شایان ذکر است که انرژی محیط تشکیل این رخساره متوسط تا زیاد بوده است.

اووئیدگرینستون دانه متوسط (Medium-grained ooid grainstone): این میکروفاسیس شامل اووئید گرینستونهای آهکی و یا



شکل ۳- تصاویر ماکروسکوپی از مغزه میکرو فاسیس های مختلف رخساره اووئیدی-گرینستونی واحد دالان بالایی. (A) میکرو فاسیس ۱ با اشکال سوزنی دروغین انیدریت (جایگزین ژیبس) و لایه بندی مورب مسطح در قاعده؛ تخلخل: ۶/۷% ، تراوایی: ۰/۱۱ md (B) میکرو فاسیس ۱ با اشکال دروغین سوزنی شکل انیدریت و جایگزینی آلومنها؛ تخلخل با تخمین چشمی: ۷% ، (C) میکروفاسیس ۲ با تخلخل قالبی اووئیدی فراوان؛ تخلخل: ۱۹/۲% ، تراوایی: ۰/۱ md (D) میکروفاسیس ۲ با لایه بندی مورب مسطح (Tabular)؛ تخلخل: ۳/۴% ، تراوایی: ۰/۱۶ md (E) میکروفاسیس ۳ با تخلخل قالبی و بین دانه ای، خرده های اسکلتی و اینتراکلاستی در زمینه اووئیدی؛ تخلخل: ۲۰% ، تراوایی: ۰/۲۴ md (F) میکروفاسیس ۳ با خرده های درشت اینتراکلاست اووئید گرینستونی؛ تخلخل: ۴% ، تراوایی: ۰/۰۷.

1990). شایان ذکر است که اووئیدهای با بافت متحدالمرکز در مقابل شکستگی مقاومتی مقاومتر از اووئیدها با بافت شعاعی هستند و احتمالاً در محیط پر انرژی تری رسوب کرده اند (Tucker, 1991). دانه بندی درشت شونده به سمت بالا (Coarsening upward) یا دانه بندی تدریجی معکوس بیانگر رسوبگذاری این میکروفاسیس در نواحی مختلف تپه های سدی می باشد (Tucker and Wright, 1990). بر اساس شواهد موجود، محیط رسوبی این رخساره مربوط به بخش های مرکزی تپه های سدی (Ooid shoal) و پشته های ساحلی (Beach ridge) در قسمتهای پائینی محدوده کشندی می باشد. در مورد اخیر تناوب این میکروفاسیس را می توان با رخساره های محیط کشندی در برش مورد مطالعه مشاهده کرد.



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی از میکروفاسیس های مختلف رخساره اووئیدی-گرینستونی واحد دالان بالایی. (A) میکروفاسیس ۲ با دولومیت ثانویه که بطور انتخابی جایگزین اووئیدها شده است، تخلخل بین دانه ای و بین بلوری قابل مشاهده می باشد، PPL: تخلخل: ۶/۸٪، تراوایی: ۱۰/۸ md، (B) بلورهای دولومیتی شکل دار تا نیمه شکل دار با هسته ابری (غبار آلود)، مقطع رنگ آمیزی شده، PPL: تخلخل: ۰/۵٪، تراوایی: ۰/۱ md (C) میکروفاسیس ۲ با تخلخل قالبی غیر مرتبط که بعضی از آنها توسط شکستگی بهم وصل شده اند، PPL: تخلخل: ۳۶/۶٪، تراوایی: ۱/۲ md (D) میکروفاسیس ۳ با تخلخل بین بلوری و قالبی (اووئیدی و اسکلتی) و سیمان حاشیه ای هم ضخامت، XPL: تخلخل: ۱۱/۲٪، تراوایی: ۰/۴ md (E) میکروفاسیس ۳ با خرده های درشت اسکلتی، اینتراکلاستی و تخلخل قالب، PPL: تخلخل: ۱۹/۳٪، تراوایی: ۶/۹ md (F) میکروفاسیس ۳ با دانه های

دولومیتی دانه متوسط می باشد که اندازه دانه های اووئید در آن از ۰/۱ تا ۰/۷ متغیر می باشد ولی اکثراً از ۰/۵ میلی متر کوچکتر است. این رخساره اصلی ترین میکروفاسیس مخزنی در واحد دالان بالایی به شمار می رود. علاوه بر اووئید، آلوکم های دیگری نظیر خرده های اسکلتی، اینتراکلاستی و کمی پلوئید نیز بندرت در این میکروفاسیس دیده می شود. اووئیدها معمولاً دارای بافت متحدالمرکز می باشند (شکل ۴D). در بعضی از نمونه های مورد مطالعه، اووئیدها کاملاً حل شده و تخلخل قالبی قابل توجهی ایجاد کرده اند (شکل ۳C). در مواردی که اووئیدها دارای حاشیه میکرایتی بوده اند، این حاشیه بدون انحلال در اطراف قالب حل شده اووئیدها، باقی مانده است (شکل ۴E و ۴F).

پدیده انحلال باعث شده است که اووئیدها (آراگونیتی یا کلسیت با منیزیم زیاد) و حتی خرده های اسکلت آراگونیتی به صورت کامل انحلال یابند و در برخی موارد نیز فقط هسته اووئیدها حل شده و تخلخل درون دانه ایجاد کند (شکل ۴E). دولومیتی شدن انتخابی در اووئیدها نیز وجود دارد (شکل ۴D). سیمان های موجود در این رخساره شامل سیمان کلسیتی با بافت سیمان حاشیه ای هم ضخامت (Isopachous) (شکل ۵A)، سیمان موزائیکی (شکل ۵B)، هم بعد (شکل ۴E و ۴F) و یا حتی دروزی است. از سیمان های دیگر موجود، سیمان انیدریتی است که تخلخل بین دانه ای را پر کرده و حتی جانشین آلوکم های موجود شده است (شکل ۴D).

مهمترین نوع تخلخل موجود در این میکروفاسیس، تخلخل قالبی و بین دانه ای است. شکستگی های ناشی از تراکم (شکل ۴F) و یا تکتونیک (شکل ۵C) سبب اتصال تخلخل غیر مرتبط قالبی شده و تراوایی را افزایش داده است. مقدار حداقل و حداکثر تخلخل در این میکروفاسیس به ترتیب ۰/۰۱ و ۳۱ درصد و حداقل و حداکثر تراوایی آن به ترتیب ۰/۰۳ و ۱۰۷ میلی داریسی اندازه گیری شده است (شکل ۶B).

فراوانی این رخساره در واحد دالان بالایی مقطع مورد مطالعه حدود ۲۲ درصد می باشد. تشکیل این حجم از اووئیدهای آراگونیتی به تغییرات جهانی سطح آب دریا (Eustatic) و افت نسبی آن در اواخر پرمین نسبت داده می شود (Mial, 1991). بر اساس مطالعات انجام شده توسط لطف پور (۱۳۸۴) بر روی سیکلهای رسوبی سازند دالان، رخساره های گرینستونی بخش های میانی پلاتفرم (Mid-ramp) معرف مراحل ابتدایی فاز رسوبی حداکثر سکون (Early highstand systems tracts) می باشند.

وجود ساختارهای رسوبی نظیر لایه بندی افقی و انواع طبقه بندی مورب بیانگر رسوب این رخساره در محیط پر انرژی با حرکت رفت و برگشت آب تحت تاثیر جزر و مد یا امواج است (Tucker and Wright,

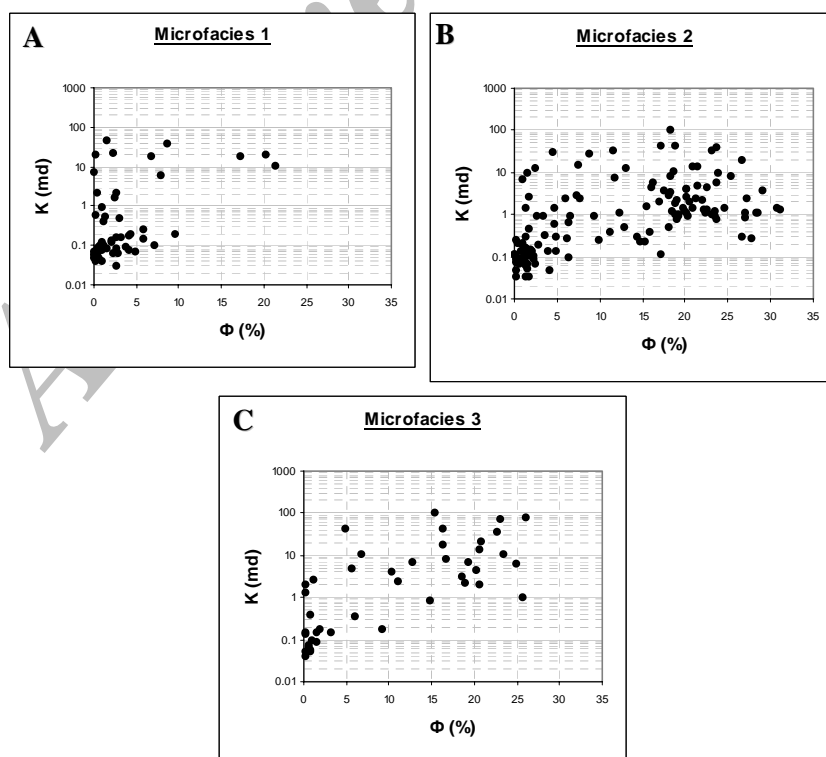
تخلخل‌های فوق‌الذکر از طریق تخلخل بین بلوری میسر شده و تراوایی افزایش یافته است. مقدار حداقل و حداکثر تخلخل و تراوایی اندازه‌گیری شده در این میکروفاسیس به ترتیب ۰/۱۳ و ۲۶ درصد و ۰/۰۴ و ۱۰۳ میلی داریسی است (شکل ۶C).

در این میکروفاسیس لایه بندی مورب دیده می‌شود. بر اساس شواهد موجود، این رخساره در محیط پرانرژی و با توجه به اجزاء تشکیل دهنده آن، در محیط‌های بخش جلویی تپه‌های سدی ماسه‌ای (Seaward shoal) (خرده‌های بریزوآ، اکینودرم، و براکیوپد) یا پشت سدی (Leeward shoal) (خرده‌های درشت صدف شکم پایان، اینتراکلاستهای مادستون لاگونی، آنکوئید و پلوئید) رسوب کرده است. رسوبات تشکیل شده در بخش جلویی تپه‌های سدی بیشتر از بخش پشت سدی هستند و خرده‌های اسکلتی این بخش از حوضه (نظیر شکم پایان) بطور ژنتیکی از نظر اندازه درشت می‌باشند (Tucker & Wright 1990). این رخساره ممکن است در بخش پائینی محیط کسندی نیز تشکیل شده باشد. در مورد اخیر خرده‌های درشت اینتراکلاست پهنه‌های کسندی که بر اثر عمل امواج یا جزر و مد کنده و حمل شده‌اند در این رخساره به فراوانی دیده می‌شوند. اینتراکلاستهای بزرگ و کشیده به وجود آمده از خردشدن رخساره اوولیتی در نزدیک مرز سازندهای دالان و کنگان و همچنین وجود

درشت اینتراکلاست و اووئیدهای میکرایتی شده که کاملاً توسط انیدریت سیمانی شده اند، XPL؛ تخلخل: ۱/۳٪، تراوایی: ۰/۱ md.

۳- اینتراکلاست / بایوکلاست اووئید گرینستون دانه درشت (Coarse-grained intraclast skeletal ooid grainstone)

آلوکم‌های موجود در این رخساره علاوه بر اووئید، شامل خرده‌های درشت اینتراکلاست و خرده‌های اسکلتی می‌باشد (شکل ۳E). خرده‌های اسکلتی شامل خرده‌های درشت دو کفه‌ای، اکینودرم، براکیوپد، گاستروپد و بریزوآ می‌باشند. اندازه اووئیدها در این رخساره که گاهی درصد آن از آلوکم‌های دیگر کمتر می‌شود، معمولاً کوچکتر از ۰/۵ میلی‌متر است. فراوانی این رخساره در واحد دالان بالایی در مقطع مورد مطالعه در حدود ۷ درصد است و بطور کلی نسبت به دو رخساره دیگر درصد کمی را به خود اختصاص می‌دهد. در مرز سازندهای دالان و کنگان، این میکروفاسیس حاوی اینتراکلاستهای بزرگ و کشیده است که از خردشدن رخساره اوولیتی به وجود آمده است (شکل ۳F). از سیمانهای قابل مشاهده در این رخساره، می‌توان به سیمان‌های حاشیه‌ای هم ضخامت (شکل ۵D)، موزائیکی و هم بعد (شکل ۵E) اشاره داشت. از سیمانهای دیگر مشاهده شده در این رخساره، سیمان انیدریتی است که در برخی موارد بطور گسترده ای جانشین آلوکم‌ها نیز شده است (شکل ۵F). مهمترین تخلخل موجود در این رخساره تخلخل قالبی و تخلخل بین دانه ای است (شکل ۵D و ۵E). در مواردی که دولومیتی شدن در این رخساره اتفاق افتاده است، اتصال



شکل ۶- نمودار تخلخل در مقابل تراوایی در میکروفاسیس‌های ۱ (A)، ۲ (B) و ۳ (C) در واحد دالان بالایی.

(Interparticle porosity) در ۷۱ درصد نمونه‌های آهکی و ۲۵ درصد نمونه‌های دولومیتی دیده می‌شود. این تخلخل در اکثر نمونه‌های دولومیتی توسط سیمان، به خصوص سیمان انیدریتی پر شده است. تخلخل بین دانه‌ای به عنوان تخلخل اصلی به صورت تخلخل یکپارچه و متصل (Adhesive porosity) در سنگ دیده می‌شود و به شدت وابسته به بافت سنگ است. این خصوصیات بافتی شامل؛ شکل دانه‌ها (کروییت و گردش‌دگی)، اندازه دانه، جورشدگی و فابریک هستند. در نمونه‌هایی که گردش‌دگی و کروییت خوب باشد، آرایش دانه‌ها متراکم تر بوده که از این رو تخلخل و تراوایی کمتر شده است. شایان ذکر است که هر چه دانه‌ها زاویه‌دارتر باشند، تخلخل اولیه آن بهتر خواهد بود (Chilingar 1964).

در رسوباتی با اندازه ماسه (میکروفاسیس ۱ و ۲)، ارتباطی بین مقدار تخلخل و اندازه دانه‌ها وجود ندارد و درصد تخلخل با تغییر اندازه دانه‌ها ثابت می‌ماند، ولی تراوایی توسط اندازه دانه‌ها کنترل می‌شود، بطوری که هر چه اندازه ذرات کاهش یابد تراوایی نیز کم می‌شود (Chilingar 1964; Pittman 1992). در واقع در گرینستون‌ها، اندازه دانه‌ها، اندازه فضاهای خالی را کنترل می‌نمایند (Lucia 1999).

در رخساره مورد مطالعه، اووئیدها، پلوئیدها، آنکوئیدها و بعضی از اینتراکلاستها به صورت نیمه گرد شده تا خیلی گرد شده در بافت سنگ وجود دارند. برخی از خرده‌های اسکلتی نیز به شکل دیسکی، تیغه‌ای یا میله‌ای و به صورت زاویه دار تا نیمه گرد شده دیده می‌شوند. در گرینستون‌های مورد مطالعه مهمترین عوامل موثر بر تخلخل بین دانه‌ای، اندازه و جورشدگی دانه‌ها است. در میکرو فاسیس ۱، با کوچکتر شدن ذرات، گلوگاه‌های تخلخل هم ریز شده و لذا سیالات به سختی از داخل سنگ عبور می‌کنند.

میزان جور شدگی، تراوایی و تخلخل سنگ را تحت تاثیر قرار می‌دهد، به عنوان مثال، در میکروفاسیس ۳ که دارای جورشدگی ضعیفی است، ذرات ریز دانه (پلوئیدها، اینتراکلاستها و اووئیدهای دانه ریز) فضای بین دانه‌های درشت اصلی را پر می‌کنند، که این مسئله باعث کوچک شدن فضاهای خالی و گلوگاه‌های تخلخل شده و در نتیجه تخلخل و تراوایی را کاهش می‌دهد.

تاثیر اندازه دانه‌ها و جورشدگی بر روی خصوصیات مخزنی متقابل بوده و باید با هم در نظر گرفته شوند. بر اساس توضیحات فوق، بیشترین تخلخل بین دانه‌ای و تراوایی را می‌توان در رسوبات درشت تر و جور شده تر مشاهده کرد. در نمونه‌های مورد مطالعه مربوط به میکروفاسیس ۱، ذرات تشکیل دهنده سنگ ریز دانه و با جورشدگی خوب هستند، در میکروفاسیس ۲ اندازه دانه‌ها در حد متوسط با جورشدگی خوب است و در میکروفاسیس ۳ اندازه ذرات متوسط تا

برشهای انحلالی در این موقعیت، می‌توانند بیانگر یک مرحله خروج از آب در مرز این دو سازند باشند (لطف پور ۱۳۸۴).

عوامل موثر بر خصوصیات مخزنی

تخلخل در سنگهای کربناته، همانند سنگ‌های تخریبی، به دو دسته تخلخل اولیه و ثانویه تقسیم می‌شود که تحت تاثیر فرایندهای رسوبی و دیاژنزی قرار دارد. بافت‌های رسوبی و محصولات دیاژنزی، بافت سنگ را مشخص می‌کنند و بافت سنگ خواص پتروفیزیکی سنگ را کنترل می‌نماید. از طرفی بافت‌های رسوبی و محصولات دیاژنزی به رخساره‌های رسوبی فابریک سنگ که در اثر دیاژنز تغییر یافته‌اند، ارتباط داده می‌شود. توزیع محصولات دیاژنزی تابع لیتولوژی، شرایط ژئوشیمیایی-هیدرولیکی حوضه و به طور غیر مستقیم تحت تاثیر نوع و پراکندگی رخساره‌ها می‌باشد (Lucia 1999). بنابراین جهت بررسی عوامل موثر در خصوصیات مخزنی رخساره مورد مطالعه، دو عامل مهم و اصلی می‌بایست مورد نظر قرار گیرند: ۱- عوامل بافتی که معمولاً تحت تاثیر فرایندهای رسوبی قرار دارند و رخساره رسوبی را مشخص می‌نمایند، ۲- عوامل دیاژنزی که به علت اهمیت آن به عنوان بخشی از فابریک سنگ بطور مجزا مطالعه می‌شوند.

در شکل ۶ نمودار تخلخل در مقابل تراوایی در میکروفاسیس‌های مختلف رسم شده است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌ها در هر میکروفاسیس به دلیل تغییر در اندازه دانه‌ها، جورشدگی، توزیع سیمان و درصد فراوانی آن می‌باشد که در ادامه بحث می‌شوند.

عوامل بافتی

در سنگهای تخریبی تخلخل اولیه تابع مستقیمی از بافت سنگ (اندازه، شکل، جورشدگی دانه‌ها و فابریک سنگ) است که توسط فرایندهای رسوبی محیط رسوبگذاری کنترل می‌شود. اندازه و جور شدگی در سنگ‌های کربناته و مقدار میکرایت، تا اندازه‌ای منعکس کننده انرژی و درجه تلاطم محیط رسوبگذاری است (Tucker 1991). شایان ذکر است محیط‌هایی مانند پهنه‌های ماسه‌ای کشندی و زیر کشندی با تخلخل اولیه بین دانه‌ای را در محیط‌های کربناته و محیط‌های تخریبی می‌توان یافت.

رخساره اووئیدی مورد مطالعه به علت دارا بودن بافت گرینستونی جزو گروه پتروفیزیکی- فابریکی "یک" تقسیم بندی (Lucia 1999) یعنی فابریک دانه افزون (Grain-dominated) قرار می‌گیرد. در رخساره مورد مطالعه تخلخل‌های اولیه شامل تخلخل درون دانه‌ای (به مقدار خیلی کم) و بین دانه‌ای می‌باشند. تخلخل بین دانه‌ای

اندازه فضاهای خالی را کاهش می‌دهد. در اثر تراکم فیزیکی آرایش دانه‌ها مترکم تر شده، تغییر شکل می‌دهند یا می‌شکنند (شکل ۴F) و فضای خالی بین دانه‌ای تا حد زیادی کاهش می‌یابد. از طرفی شکستگی‌های ایجاد شده باعث ارتباط تخلخل‌های مختلف (درون دانه‌ای و قالبی) شده و باعث افزایش تراوایی مخزن می‌شود. در نمونه‌های مورد مطالعه به نظر می‌رسد که شکستگی دانه‌ها (اسپاستولایت-ها) قبل از انحلال رخ داده باشد. شایان ذکر است که در اوئید گرینستون‌هایی که دارای تخلخل قالبی بوده و اطراف اوئیدها سیمان اولیه دریایی حاشیه‌ای هم ضخامت وجود دارد، هیچ شکستگی در اثر تراکم دیده نمی‌شود (شکل ۵D).

انحلال فشاری سبب ایجاد استیلولیت (شکل ۴F) یا رگه‌های انحلالی (Solution seams) در زمینه سنگ یا مرز بین دانه‌ها شده است. به طور کلی فراوانی استیلولیت‌ها در رخساره‌های دانه افزون واحد دالان بالایی کمتر از رخساره‌های گل افزون است که اکثراً در مرز بین دو رخساره تشکیل شده‌اند. کربنات کلسیم حل شده در اثر تراکم شیمیایی، می‌تواند در سنگهای همجوار به صورت سیمان رسوب کرده و باعث کاهش خصوصیات مخزنی گردد.

سیمانی شدن

با توجه به بافت گرینستونی رخساره مورد مطالعه، پدیده سیمانی شدن در کلیه نمونه‌ها قابل مشاهده می‌باشد. سیمانی شدن سبب کاهش تخلخل و اندازه فضاهای خالی بین دانه‌ای می‌شود، لذا بر تراوایی و خصوصیات موئینی سنگ نیز تاثیر دارد. در نمونه‌های مورد مطالعه اکثراً سیمانها دو مرحله‌ای بوده و شامل یک سیمان حاشیه‌ای در اطراف آلوکمه‌ها و یک سیمان پر کننده حفرات می‌باشد (شکل ۵E). از سیمان موجود در رخساره‌های مورد مطالعه، سیمان کلسیتی است که بطور یکنواخت در سنگ توزیع شده و به صورت سیمان حاشیه‌ای هم ضخامت (Isopachous) (شکل ۵A و ۷A)، سیمان هم بعد (Equant) (شکل ۵E و ۷A)، سیمان موزائیکی (Blocky) (شکل ۵B)، سیمان دروزی (Drusy) و سیمان رشدی هم محور (Syntaxial) دیده می‌شوند. سیمان حاشیه‌ای هم ضخامت بطور اولیه در محیط فراتیک دریایی در حاشیه آلوکمه‌ها تشکیل می‌شود. این نوع سیمان از تراکم بعدی دانه‌ها جلوگیری کرده، لذا نقش مثبتی در حفظ تخلخل‌های اولیه دارد. در واقع این سیمان مقاومت موثر سنگ را در مقابل تراکم افزایش می‌دهد. از طرف دیگر این نوع سیمان در نمونه‌های مربوط به محیط کشندی کمتر مشاهده شد.

سیمانهای موجود بیانگر محیطهای دیاژنزی مختلفی نظیر محیط فراتیک دریایی، متئوریک (Meteoric) یا دفنی است (Tucker & Wright 1990, Tucker 1991). سیمان دیگری که تخلخل‌ها را بطور

درشت دانه ولی با جور شدگی کم می‌باشد، لذا به نظر می‌رسد که بهترین خصوصیات مخزنی (بدون در نظر گرفتن محصولات دیاژنزی) در میکروفاسیس ۲ دیده می‌شود، یعنی با وجود خصوصیات بافتی مشابه (شکل و جورشدگی) در صورتی که میکروفاسیس ۱ و ۲ تخلخل یکسان داشته باشند، تراوایی در میکروفاسیس ۲ بیشتر خواهد بود. در میکروفاسیس ۱ و ۲ اکثر ذرات شکل کروی و تقریباً گرد شده دارند در صورتی که در میکروفاسیس ۳ به غیر از اشکال کروی، اشکال دیگری نیز مشاهده می‌شود که این مسئله باعث غیر یکنواخت شدن سیستم تخلخل در این رخساره شده است. با این وجود زمانی که در میکروفاسیس ۳ اکثر ذرات درشت باشند و جور شدگی زیاد باشد، تخلخل و تراوایی خوبی نشان می‌دهند. با توجه به مباحث فوق، بطور غیر مستقیم می‌توان نتیجه گرفت که درصد آلوکمه‌ها نیز بر خواص مخزنی تاثیر داشته است، بطوری که هرچقدر درصد دانه‌های اوئید متوسط دانه در نمونه‌ها بیشتر باشد، خصوصیات مخزنی نیز بهتر خواهد شد. همانگونه که در بخش دیاژنوز بحث خواهد شد، میکروفاسیس ۲ باتوجه به قابلیت نفوذپذیری بیشتر و یکنواخت تر دارای معابر مناسب تری جهت انتقال سیالات (حل کننده یا سیمانی کننده) می‌باشد.

فابریک رسوبات شامل آرایش دانه‌ها (Packing) و جهت یابی آنها است. آرایش دانه‌ها به عواملی مثل فشردگی و سیمانی شدن بستگی دارد (Tucker 1991). جهت یابی دانه‌ها بیشتر بر روی تراوایی سنگ تاثیر می‌گذارد. با توجه به محیط تشکیل رخساره‌های مورد مطالعه، توده‌های گرینستونی به صورت خطوطی به موازات ساحل قرار دارند و آلوکمه‌ها به علت حرکت رفت و برگشت امواج و جزر و مد، عمود بر محور توده‌های ماسه‌ای قرار می‌گیرند، لذا جهت نفوذ پذیری اولیه آنها عمود بر توده‌های ماسه‌ای خواهد بود. در دست داشتن چنین اطلاعاتی در طراحی مدل‌های مخزنی بسیار مهم می‌باشد.

عوامل دیاژنزی

فرایندهای دیاژنزی از جمله عواملی هستند که تخلخل اولیه سنگ و توزیع فضاهای خالی را تغییر می‌دهند و بر تراوایی و ویژگی‌های موئینه تاثیر می‌گذارند. پدیده‌های دیاژنزی مهم و موثر در خصوصیات مخزنی شامل؛ تراکم، سیمانی شدن، انحلال، دولومیتی شدن، انیدریتی شدن و شکستگی می‌باشند. لازم به ذکر است که محصولات تراکم، سیمانی شدن و انحلال (انتخابی) معمولاً قابل ارتباط با بافت رسوبی هستند (Lucia 1999).

تراکم

تراکم سبب کاهش تخلخل و سنگی شدن رسوبات اولیه می‌شود و

تخلخل بین دانه‌های انتظار می‌رود. این وضعیت برای رخساره‌های مورد مطالعه در شکل ۶ دیده می‌شود. نمونه‌هایی که دارای تخلخل بالا هستند (بیش از ۱۵ درصد)، اکثراً تراوایی کمی (بین ۱ الی ۱۰ میلی داری) دارند. در نمونه‌های آهکی بیش از ۷۵ درصد نمونه‌ها دارای تخلخل بالاتر از ۱۵ درصد می‌باشند. در حدود ۱۸ درصد این نمونه‌ها تراوایی کمتر از یک میلی داری دارند، لذا با وجود تخلخل بالایی که در این نمونه‌ها مشاهده می‌شود، به دلیل نوع تخلخل آنها که از نوع قالبی و غیر مرتبط است، تراوایی معمولاً پائین می‌باشد (شکل ۹).

بطور کلی تخلخل قالبی مشاهده شده در میکروفاسیس ۱ کمتر از دو رخساره دیگر است. در این رخساره اکثر اووئیدها، خرده‌های اسکلتی و حتی بایوکلاستها بطور کامل میکرایتی یا دولومیتی شده (تاثیر بافت و محیط رسوبی) و به نظر می‌رسد که ترکیب آنها در برابر انحلال مقاومتی شده اند. همانگونه که در شکل ۶A دیده می‌شود در این رخساره در تخلخل بالا، تراوایی کم، نظیر آنچه در دو رخساره دیگر دیده می‌شود، وجود ندارد. بنابر این، تخلخل قالبی نقش چندانی در افزایش کیفیت مخزنی این رخساره نداشته است و همچنین فرایند سیمانی شدن انیدریتی باعث انسداد کلیه تخلخل‌های بین دانه‌های اکثر نمونه‌های این رخساره شده است.

در ۸۶ درصد نمونه‌های آهکی و ۸ درصد نمونه‌های دولومیتی، تخلخل قالبی دیده می‌شود. علت فراوانی تخلخل قالبی در سنگهای آهکی نسبت به سنگهای دولومیتی ممکن است به علت دولومیتی شدن قبل از تاثیر محلول‌های ایجاد کننده تخلخل قالبی بوده باشد.

دولومیتی شدن

دولومیتی شدن ثانویه در اکثر موارد به عنوان یک فرایند دیاژنزی موثر در افزایش خصوصیات مخزنی در نظر گرفته می‌شود که در اثر این فرایند اندازه بلورها معمولاً درشت تر شده و مقدار تخلخل و اندازه گلوگاهها (Pore throat size) زیاد می‌شود. از طرفی با کم شدن زبری سطوح خلل و فرج (Pore roughness) و صافتر شدن آنها تراوایی افزایش می‌یابد (Sun 1995). با افزایش اندازه بلورها، توزیع اندازه فضاهای خالی در رسوب تغییر می‌کند و اختلافات مهم پتروفیزیکی موجود در بافت‌های رسوبی کم و یکنواخت می‌شود (Lucia 1999). دولومیتها نسبت به آهکها مقاومت بیشتری در برابر تراکم مکانیکی و شیمیایی دارند، لذا با افزایش عمق، تخلخل خود را کمتر از دست می‌دهند. با توجه به اینکه این سنگها شکل پذیری کمتری در برابر استرس دارند، زود شکسته شده و تراوایی آنها افزایش می‌یابد. هر چند فرایند دولومیتی شدن سبب افزایش کیفیت سنگ مخزن می‌گردد، ولی این مسئله در مورد همه دولومیت‌ها صادق نمی‌باشد و به فابریک اولیه رسوب، ماهیت و حجم سیالات دولومیتی کننده و فرایندهای پس

کامل یا به صورت پراکنده (Patchy cement) پر کرده است، سیمان انیدریتی می‌باشد. این سیمان در نمونه‌های دولومیتی اکثراً با بافت پوئیکیلو توپیک (Poikilotopic) یا غربالی و در نمونه‌های آهکی با بافت پراکنده (Patchy) دیده می‌شود (شکل ۵D و ۵F). این سیمان در نمونه‌های دولومیتی فراوان بوده و به شدت بر خصوصیات مخزنی آنها تاثیر دارد (شکل ۸A و ۸B).

انحلال

انحلال مهمترین عامل افزایش تخلخل و تراوایی است که در محیط‌های دیاژنزی مورد مطالعه مشاهده شده است. در توالی مورد مطالعه، پدیده انحلال، در اووئید گریستونهای بخش آهکی میانی بطور گسترده مشاهده می‌شود (شکل ۲). همچنین رخساره‌های موجود در بخش بالایی واحد دالان بالایی، یعنی در مرز سازند دالان و کنگان، دارای تخلخل انحلالی خوبی می‌باشند (شکل ۲). علت این امر را می‌توان به خروج از آب این بخش در اواخر پرمین و تاثیر آبهای جوی بر آن نسبت داد. در اکثر نمونه‌های مورد مطالعه انحلال به صورت انتخابی می‌باشد (اووئیدها، هسته‌های اووئید و خرده‌های اسکلتی). انحلال انتخابی در اثر انحلال آلوکرها یا دانه‌های تشکیل شده از کانی‌های ناپایدار صورت گرفته و موجب تشکیل فضاهای خالی غیر مرتبط شده است.

بر اساس مطالعات انجام شده، از شروع کربونیفر تا اوایل تریاس، بعد از یک دوره یخبندان، در اثر گرمی هوا و آب شدن یخها، سطح آب دریاها بالا آمده و باعث رسوب آراگونیت و کلسیت با منیزیم زیاد شده است (Sandberg 1983)، لذا به نظر می‌رسد که ترکیب اولیه اووئیدهای موجود اکثراً آراگونیتی و کلسیت با منیزیم بالا بوده که نسبت به کلسیت با منیزیم کم انحلال پذیرتر می‌باشند. برخی از محققین اعتقاد دارند که فرایند انحلال گسترده اووئیدهای سازند خوف در اثر خروج از آب ناگهانی حوضه و قرار گرفتن آنها در محیطی که تحت تاثیر آبهای جوی فرورو بوده، بوجود آمده است (Hussein 1992). یون کلسیم و کربناتی که در نتیجه انحلال آراگونیت ناپایدار ایجاد می‌شود، می‌تواند به عنوان سیمان کلسیتی فضای خالی اطراف دانه‌ها و بخش اعظم فضاهای خالی را اشغال نماید، بدین ترتیب در اکثر مواقع پدیده انحلال انتخابی سبب افزایش تخلخل نمی‌شود (Lucia 1999). تخلخل قالبی از راه شبکه فضاهای خالی بین دانه‌های، بین بلوری (شکل ۷B، ۷C و ۷D) و شکستگی‌ها (شکل ۷E و ۷D) با یکدیگر ارتباط دارند. هر چند ایجاد این نوع تخلخل، تخلخل کل را افزایش می‌دهد ولی تاثیر چندانی بر افزایش تراوایی ندارد (Lucia 1983). در واقع وجود حفرات مجزا در آهکها و دولومیتها موجب می‌شود، تراوایی سنگ کمتر از مقداری باشد که در صورت وجود

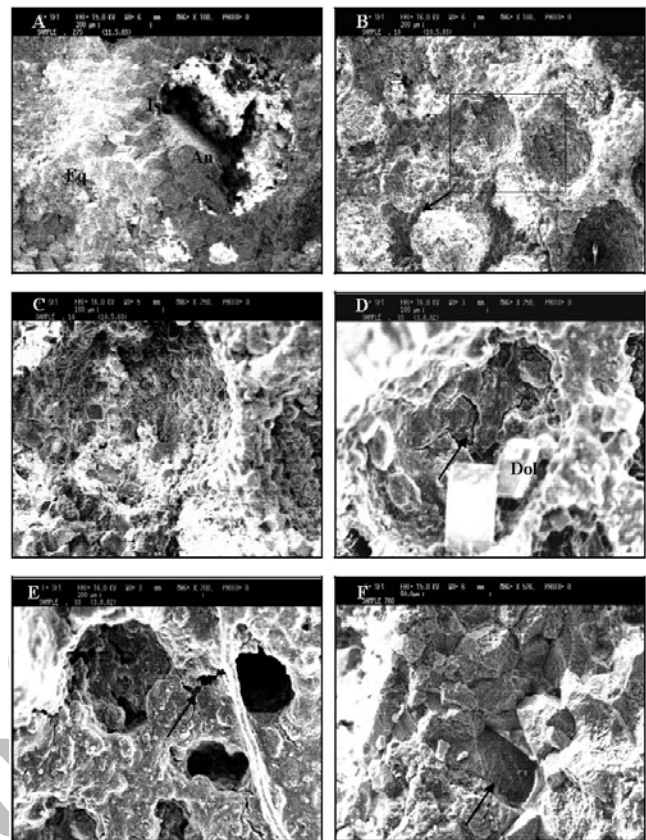
از دولومیتی شدن نیز بستگی دارد (Sun 1995).

دولومیتی شدن را می‌توان در واحد دالان بالایی در نظر گرفت؛ دولومیتی شدن بر اثر اختلاط آبهای جوی و شور (Meteoric mixing) و (zone)، دولومیتی شدن بر اثر نشت و بازگشت (Seepage-reflux) و دولومیتی شدن دفنی (Burial).

بر اساس مطالعات (Sibley & Gregg 1987)، اندازه، شکل، تراکم و بافت بلورهای دولومیت در بعضی موارد به تشخیص محیط رسوبگذاری آنها کمک می‌نماید. اندازه بلورهای دولومیت به نرخ هسته گذاری، رشد بلورها، درجه حرارت و درجه اشباع شدگی محلول دولومیتی کننده بستگی دارد (Sibley & Gregg 1987)، از طرفی اندازه بلورها به بافت اولیه سنگ نیز ارتباط دارد. فابریک دانه افزون، بلورهای دولومیتی بزرگتری نسبت به فابریک گل افزون دارد، حتی اگر متوسط اندازه بلورها با عمق افزایش یابد (Lucia 1999). البته تاثیر نوشکلی افزایشی (Aggrading neomorphism) را در طول زمان (از پرمین تا کنون)، در افزایش اندازه بلورهای دولومیت را می‌بایست در نظر گرفت.

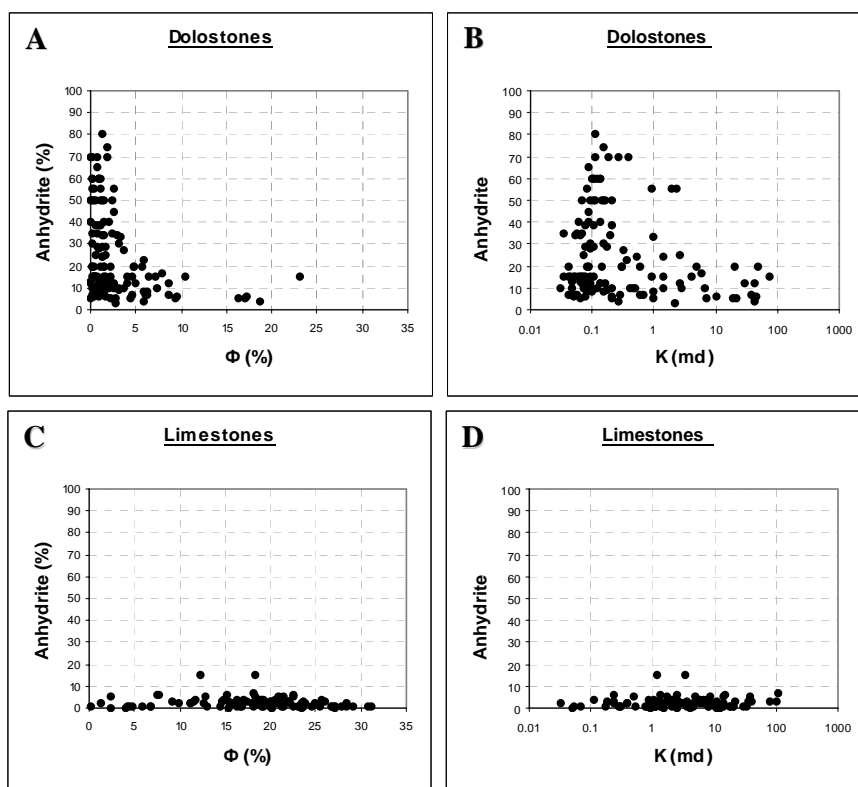
اندازه بلورهای دولومیت در نمونه‌های مورد مطالعه از بسیار ریز (در اووئید گرینستونهای میکرایتی شده، Mimic dolomitization) تا بلورهای متوسط (میلی لیتر < 0.25) تغییر می‌نمایند. به نظر می‌رسد اندازه بلورهای دولومیت در رخساره‌های اووئید گرینستون مورد مطالعه از محیط کشندی به سمت پشته‌های اووئیدی پائین کشندی (Shoal) بیشتر می‌شود. اگر فرض کنیم که آبهای دولومیتی کننده از آبهای خیلی شور و غنی از یون منیزیم پهنه‌های کشندی و لاگون‌های محصور بسیار شور (Hypersaline lagoon) منشاء گرفته باشند، می‌توان مسئله فوق را چنین تفسیر کرد که وقتی آبهای دولومیتی کننده از رخساره‌های حاشیه کشندی به سمت پائین (دریا) جریان پیدا می‌کند، اشباع شدگی آب نسبت به دولومیت کاهش یافته و در نتیجه اندازه بلورهای دولومیت افزایش می‌یابد (Lucia 1999).

در بعضی از نمونه‌ها، اووئیدها بطور انتخابی دولومیتی شده‌اند که به نظر می‌رسد ترکیب کربناته اووئیدها از نوع ناپایدار (آراگونیتی یا کلسیت با منیزیم بالا) بوده و دولومیت بطور انتخابی بر روی آنها هسته گذاری کرده است (شکل ۵A). این نوع دولومیتها از نظر اندازه، متوسط و هم بعد بوده و معمولاً شکل دار تا نیمه شکل‌دار می‌باشند (Planar-s) و می‌توانند در عمق تدفینی کم تا متوسط تشکیل شده باشند. در بعضی از نمونه‌ها بلورهای دولومیت هسته ابری و حاشیه شفاف (Cloudy core and clear rime) نشان می‌دهند (شکل ۵B). این دولومیتها در شرایطی ایجاد می‌شود که محلول دولومیتی کننده از کلسیت اشباع باشد. این نوع دولومیت در زون مخلوط آب متئوریک و دریایی یا در عمق متوسط دفن شدگی ایجاد می‌شوند (Tucker 1991).

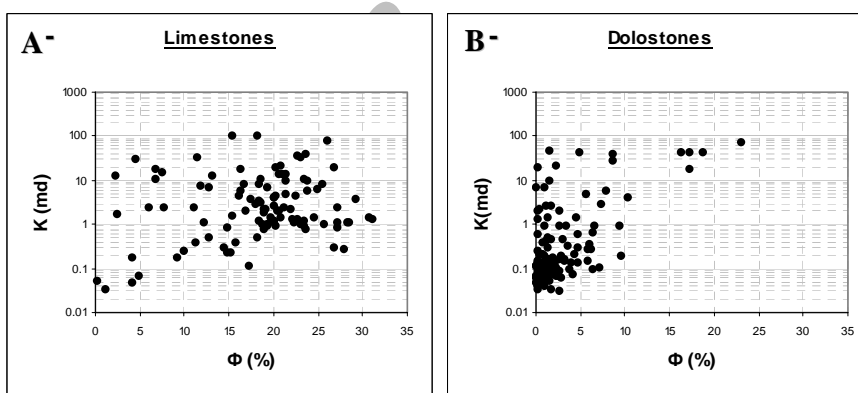


شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی الکترونی از رخساره‌های اووئیدی-گرینستونی واحد دالان بالایی. (A) تخلخل قالبی اووئید که بخشی از آن توسط سیمان انیدریتی پر شده است. بلورهای سیمان حاشیه ای (Is) و هم بعد (Eq) زمینه قابل مشاهده می‌باشند؛ تخلخل: ۲۲/۱٪، تراوایی: ۱۳/۲ md. (B و C) اووئید گرینستون با تخلخل قالبی که توسط ریز تخلخل‌ها و تخلخل‌های بین دانه ای بهم وصل شده اند؛ تخلخل: ۲۹/۱٪، تراوایی: ۴/۹ md. (D) تخلخل قالبی اووئیدی که توسط ریز شکستگیها بهم وصل شده و بخشی از آن توسط بلورهای شکل دار دولومیت پر شده است؛ تخلخل: ۲۳/۵٪، تراوایی: ۱/۷ md. (E) تخلخل قالبی اسکلتی و اووئیدی که توسط ریز شکستگیها (Microfractures) بهم وصل شده اند (فلش)؛ تخلخل: ۲۳/۴۹٪، تراوایی: ۱/۷۰ md. (F) تخلخل قالبی اسکلتی (دوکفه ای) که توسط بلورهای درشت سیمان زمینه محاط و مجزا شده است؛ تخلخل: ۲۱/۴٪، تراوایی: ۵ md.

با توجه به اینکه دو پارامتر اصلی شامل؛ منشاء یون منیزیم و مکانیسم انتقال این یون به محل دولومیتی شدن برای دولومیتی شدن در سنگهای کربناته مورد نیاز است (Folk & Land 1975)، مکانیسم‌های مختلفی می‌توان برای آن در نظر گرفت. با توجه به شواهد پتروگرافی و همچنین توالی رخساره‌های مختلف در مقطع مورد مطالعه (وجود رخساره‌های تبخیری و پهنه‌های کشندی)، سه مکانیسم



شکل ۸- نمودار تخلخل و تراوایی در مقابل درصد انیدریت در نمونه های آهکی (A, B) و دولومیتی (C, D).



شکل ۹- نمودار تخلخل در مقابل تراوایی در نمونه های آهکی (A) و دولومیتی (B) رخساره های اووئیدی-گریستونی واحد دالان بالایی.

که دولومیتی شدن در آنها تاثیر زیادی بر توزیع فضای خالی ندارد، لذا اندازه بلورهای دولومیت تاثیر کمی بر خواص پتروفیزیکی دولوستونهای دانه افزون دارد (Lucia & Major 1994). لذا در نمونه های دولومیتی مورد مطالعه نباید انتظار افزایش تخلخل و تراوایی بیش از آنچه در نمونه های آهکی دیده می شود، داشت. از طرفی دولومیتی شدن بیش از حد (Over dolomitization) سبب کاهش خصوصیات مخزنی (تخلخل و تراوایی) می شود (Lucia & Major 1994). با افزایش دولومیتی شدن از ۵ تا ۷۵ درصد، رشد دولومیت ها با کاهش اندازه منافذ همراه است، لذا خواص مخزنی کاهش می یابد ولی در ۷۵ تا ۸۰ درصد

عامل اصلی ایجاد تخلخل در اثر دولومیتی شدن، انحلال اضافی (در مقابل ته نشست) قسمت های آهکی در یک سنگ آهک در حال دولومیتی شدن است (Tucker 1991). طبق نظر Lucia (1999) و Lucia (1983) شاخص های مهم فابریکی برای طبقه بندی پتروفیزیکی دولومیتها شامل اندازه و جورشدگی دانه های اولیه، اندازه بلورهای دولومیت و تخلخل بین بلوری است. در واقع اندازه بلورهای دولومیت، اندازه دانه ها و جور شدگی، تعیین کننده محدوده تراوایی و تخلخل بین دانه ای و بین بلوری تعیین کننده تراوایی است. گریستونها معمولاً از دانه های خیلی بزرگتر از بلورهای دولومیت تشکیل می شوند، بطوری

انیدریت در نمونه‌های آهکی اکثراً به صورت سیمان پراکنده (Pachy cement) یا پر شدگی بعضی از تخلخل‌های قالبی دیده می‌شود (شکل ۵D). انیدریتی که به این صورت به طور غیر یکنواخت توزیع می‌شود، سبب تشکیل ناهمگونی کوچک مقیاس در سنگ می‌گردد. از آنجا که تراوایی و ویژگی‌های موئینه اساساً تابعی از اندازه فضاهای خالی است، تراوایی و ویژگیهای موئینه در سیمان شدگی غیر یکنواخت کاهش می‌یابد، ولی چنانچه همین مقدار سیمان بطور یکنواخت در سنگ توزیع شود، به طور قابل توجه تری خصوصیات مخزنی را کاهش خواهد داد. لذا اگرچه سیمان پراکنده تخلخل را کاهش می‌دهد، ممکن است تاثیر زیادی بر تراوایی و ویژگی‌های موئینه نداشته باشد (Lucia 1999). گرهک‌های انیدریتی در رخساره‌های مورد مطالعه بسیار کم بوده و معمولاً درصد کمی از حجم توده سنگ را در برمی‌گیرند و در صورت وجود تاثیر آنها در خصوصیات مخزنی همانند سیمان‌های پراکنده می‌باشد.

همانگونه که در شکل ۸A و ۸B دیده می‌شود، درصد انیدریت در نمونه‌های دولومیتی بیشتر از نمونه‌های آهکی بوده و با افزایش درصد انیدریت در دولومیت‌ها، خصوصیات مخزنی (تخلخل و تراوایی) به شدت کاهش می‌یابد. در نمونه‌های آهکی درصد انیدریت موجود در اکثر نمونه‌ها کمتر از ۱۰ درصد بوده و تاثیر آن در خصوصیات مخزنی بسیار ناچیز می‌باشد (شکل ۸C و ۸D). علت این امر به جز کاهش درصد انیدریت، به نحوه توزیع آن در بافت سنگ نیز مرتبط است (پرکننده بخشی از تخلخل قالبی و به صورت سیمان پراکنده).

شکستگی

شکستگی در اثر هر پدیده‌ای که ایجاد گردد، سبب افزایش خواص مخزنی می‌شود. تاثیر شکستگی در افزایش تراوایی مخزن بسیار قابل توجه تر از افزایش تخلخل آن می‌باشد. بطور کلی شکستگی‌ها در واحد دالان بالایی کم بوده و شکستگی‌های موجود اکثراً در بافت‌های دانه افزون دیده می‌شوند. از طرفی اکثر شکستگیهای ثبت شده، بطور کامل توسط سیمان کلسیتی و به خصوص سیمان انیدریتی پر شده‌اند و فقط تعداد کمی از شکستگی‌ها که باز یا نیمه پر شده‌اند، نقش مثبتی در افزایش خصوصیات مخزنی دارند. فراوانی (Frequency) شکستگی‌ها در بخشهای دولومیتی این واحد بیشتر از بخش آهکی است. این مسئله با توجه به شکننده‌تر بودن دولومیتها توجیه پذیر می‌باشد.

با وجود فراوانی کم شکستگی در واحد دالان بالایی، شکستگیهای ریز (Microfractures) موجود در رخساره‌های مورد مطالعه (شکل ۵C، ۵E و ۵D)، نقش مهمی در اتصال تخلخل‌های قالبی و افزایش تراوایی دارد (به و یژه در نمونه‌های آهکی). در شکل ۶، نمونه‌هایی که

دولومیتی شدن، این بلورها تشکیل یک شبکه مستحکم بین بلوری را می‌دهند که در برابر تراکم و کاهش تخلخل مقاومت می‌کند. از ۸۰ درصد دولومیتی شدن به بالا، ادامه رشد بلورها باعث درهم رفتن بلورها (Interlocking) و کاهش تخلخل می‌شود، بطوری که در ۹۵ درصد دولومیت، سنگ کاملاً نا تراوا است (Sun 1995).

همانگونه که در شکل ۹ دیده می‌شود، در حدود ۸۴ درصد نمونه‌های دولومیتی، تخلخل کمتر از ۵ درصد و ۸۰ درصد آنها تراوایی کمتر از یک میلی داری دارند، در صورتی که تخلخل کمتر از ۵ درصد در نمونه‌های آهکی، فقط ۸ درصد نمونه‌ها و تراوایی کمتر از یک میلی داری، ۲۵ درصد از نمونه‌ها را شامل می‌شود. از طرفی تخلخل بین بلوری (Intercrystalline porosity) فقط در ۱۸ درصد از نمونه‌های دولومیتی دیده می‌شود. این بدان معنی است که اکثر نمونه‌های دولومیتی از نظر خصوصیات مخزنی ضعیف (Poor) می‌باشند. با توجه به این که ۴۵ درصد نمونه‌های دولومیتی شده دارای بیش از ۸۰ درصد دولومیت هستند لذا به نظر می‌رسد که اکثر این نمونه‌ها تحت تاثیر پدیده دولومیتی شدن بیش از حد و همچنین سیمانی شدن، مخصوصاً توسط انیدریت، خصوصیات مخزنی خود را از دست داده‌اند (شکل ۹A و ۹B).

انیدریتی شدن ثانویه

به طور کلی ژپیس و انیدریت معمولاً همراه با دولومیت وجود دارند (شکل ۸A و ۸B) و تشکیل آنها مستلزم ورود یون سولفات به سیستم توسط آبهای خیلی شور (Hypersaline waters) است که در اثر تبخیر در محیط (پهنه‌های بالای کشندی، کشندی، حوضچه‌ها و لاگونهای تبخیری همراه آنها) ایجاد می‌شوند و در اثر نیروی ثقل و چگالی زیاد به سمت پائین و در لایه‌های زیرین نشت کرده، سبب دولومیتی شدن و ته نشست ژپیس و انیدریت می‌شوند. انیدریتی شدن بطور گسترده در بخشهای دولومیتی بالایی و زیرین دیده می‌شود. در این بخش‌ها انیدریتی شدن گاهی به حدی است که رخساره را بطور کامل جایگزین کرده است، بطوری که در مطالعه مغزه‌ها در نظر اول این لایه‌ها با لایه‌های انیدریتی اشتباه می‌شوند، ولی با کمی دقت میتوان شبح آلوکمها را در آن مشاهده نمود. انیدریت در نمونه‌های مورد مطالعه به اشکال مختلف دیده می‌شود. در نمونه‌های دولومیتی اکثراً انیدریت به صورت سیمان غربالی (Poikilotropic) تخلخل‌ها را پر کرده (Anhydrite plugging) و سبب کاهش خواص مخزنی شده است. همچنین انیدریت جایگزین آلوکم‌هایی نظیر اوئید و خرده‌های اسکلتی شده است. گاهی در بعضی از نمونه‌ها (به خصوص رخساره‌هایی که در محیط کشندی تشکیل شده‌اند) دیده می‌شود که آلوکم و سیمان بطور کامل توسط انیدریت جایگزین شده‌اند (شکل ۳F).

خواص مخزنی بالایی دارند، دارای تخلخل قالبی بوده که وجود شکستگی ها و تخلخل های بین دانه ای، آنها را به طور موثر به یکدیگر وصل نموده اند.

نتیجه گیری

نتایج ذیل را از مطالعه رخساره های گرینستونی واحد دالان بالایی در ناحیه مورد مطالعه، می توان خلاصه کرد:

رخساره های اووئید-گرینستونی این واحد به سه میکروفاسیس؛ پلوئید / اووئید گرینستون دانه ریز، اووئید گرینستون دانه متوسط و اینترا کلاست / بایوکلاست اووئید گرینستون دانه درشت تقسیم می شوند که رسوبگذاری آنها در پهنه های کشندی تا تپه های سدی اوولیتی- بایوکلاستی صورت گرفته است.

این مطالعه نشان می دهد که عوامل بافتی و فرایندهای دیاژنزی هر دو بر خصوصیات مخزنی رخساره های مورد مطالعه تاثیر به سزایی داشته است.

از عوامل بافتی مؤثر در خصوصیات مخزنی، اندازه دانه، شکل دانه، جورشدگی و فابریک است که توسط فرایندهای رسوبی و محیط رسوبگذاری کنترل می شوند. در این نمونه ها اندازه دانه ها، اندازه فضاهای خالی، در واقع، تراوایی را تحت تاثیر قرار داده، در حالی که جورشدگی، تخلخل و تراوایی را متاثر می سازد. اگر تاثیر دو عامل جورشدگی و اندازه دانه ها را با هم در نظر بگیریم، بهترین خصوصیات مخزنی در میکرو فاسیس ۲ مشاهده می شود.

پدیده های دیاژنزی مهمی که در نمونه های مورد مطالعه دیده می شوند و خصوصیات مخزنی را متاثر نموده اند شامل؛ تراکم، سیمانی شدن، انحلال، دولومیتی شدن، انیدریتی شدن و شکستگی می باشند. تراکم رسوبات سبب کاهش تخلخل اولیه، تغییر شکل دانه های اووئید و شکستن آنها شده و تخلخل های قالبی ایجاد شده را بهم ارتباط می دهد و در نتیجه باعث افزایش تراوایی سنگ می گردد.

سیمانهای کلسیتی موجود در این رخساره شامل؛ سیمان حاشیه ای هم ضخامت، سیمان هم بعد، سیمان موزائیکی، سیمان دروزی و سیمان رشدی هم محور می باشند، که تمام آنها سبب کاهش خواص مخزنی شده اند. سیمان حاشیه ای هم ضخامت از تراکم بعدی رسوبات جلوگیری کرده، لذا نقش مثبتی در حفظ تخلخل دارد. سیمان انیدریتی نیز با بافت غربالی یا پراکنده دیده می شود.

در اکثر نمونه های مورد مطالعه (مخصوصاً در میکرو فاسیس ۲) انحلال به صورت انتخابی در (اووئید ها و برخی از خرده های اسکلتی) دیده می شود که موجب تشکیل فضای خالی غیر مرتبط شده است.

منابع

این نوع تخلخل از راه شبکه تخلخل بین دانه ای، بین بلور-ری و شکستگی با یکدیگر ارتباط می یابند. اگر چه این نوع تخلخل، تخلخل کل را افزایش می دهد، ولی تاثیر چندانی بر افزایش تراوایی آن ندارد، لذا اکثر نمونه هایی که دارای تخلخل بالا هستند، به علت عدم ارتباط این تخلخل ها، تراوایی اندکی نشان می دهند. میزان تخلخل قالبی در نمونه های آهکی بارزتر از نمونه های دولومیتی بوده که علت این امر ممکن است دولومیتی شدن ثانویه این نمونه ها قبل از انحلال باشد.

باتوجه به شواهد پتروگرافی و همچنین توالی محیطهای رسوبی مختلف، سه مکانیسم دولومیتی شدن را در واحد دالان بالایی میتوان در نظر گرفت؛ دولومیتی شدن در اثر الگوهای اختلاط آبهای جوی و شور، نشت و بازگشت و فرایند تدفین. دولومیتی شدن برخی از آلوکرها بطور انتخابی بوده است. با توجه به اینکه گرینستون های مورد مطالعه از دانه های خیلی درشت تر از بلورهای دولومیت تشکیل شده اند، لذا دولومیتی شدن آنها تاثیر زیادی بر توزیع فضاهای خالی ندارد و نباید انتظار افزایش تخلخل و تراوایی را بیش از آنچه در نمونه های آهکی دیده می شود، داشت. از طرفی دولومیتی شدن بیش از حد سبب کاهش خصوصیات مخزنی شده است.

انیدریت در نمونه های دولومیتی به صورت سیمان فراگیر تخلخل ها را پر کرده یا جایگزین آلوکرها شده است. در نمونه های آهکی انیدریت به صورت اندک و تنها به شکل سیمان پراکنده یا پرکننده برخی از تخلخل های قالبی مشاهده شده است. اگرچه این نوع توزیع غیر یکنواخت انیدریت باعث کاهش تخلخل شده است، ولی تاثیر زیادی بر تراوایی و ویژگی های موئینه آن ندارد. درصد انیدریت در نمونه های دولومیتی بیشتر از نمونه های آهکی بوده و با افزایش آن خصوصیات مخزنی بطور چشمگیری کاهش می یابد.

بطور کلی شکستگی در واحد دالان بالایی گسترش زیادی ندارد و اکثر شکستگی های موجود توسط سیمان (انیدریتی و کلسیتی) به طور کامل پر شده اند. اگرچه نقش شکستگی های ریز را در اتصال تخلخل های قالبی مجزا (به خصوص در سنگهای آهکی) نباید از نظر دور داشت.

تشکر و قدردانی

در اینجا لازم می دانیم که از شرکت ملی نفت ایران جهت مجوز انتشار این مقاله تشکر و قدردانی نمائیم. همچنین از آقایان مهندس سعید منیبی و دکتر جلال دورقی نژاد و دیگر همکاران در پژوهشگاه صنعت نفت، که در جهت ارتقای علمی این مقاله ما را یاری نمودند، تشکر فراوان می نمائیم.

دکتری. دانشگاه شهید بهشتی. ۵۰۰ صفحه.

لطف پور، م.، آدابی، م.ح.، صادقی، ع.، معلمی، س.ع. ۱۳۸۴: بررسی محیط های رسوبی و چینه شناسی سکانسی سازند دالان و کنگان در ناحیه زاگرس (نواحی کوه دنا و کوه سورمه). مجله علوم دانشگاه تهران. ۳۱: ۱۹۹-۲۲۸.

- Al-Jalal I.A. 1995: The Khuff Formation: its regional reservoir potential in Saudi Arabia and other Gulf countries; depositional and stratigraphic approach, In: Middle East petroleum Geoscience (ed. By M.I. Al-Hosseini). *GEO'94, Gulf PetroLink Bahrain*. **1**:103-119.
- Alsharhan A.S. 1993: Facies and sedimentary environment of the Permian carbonates (Khuff Formation) in the United Arabia Emirates. *Sed. Geo.* **84**: P. 89.
- Chilingar G. 1964: Relationship between porosity, permeability and grain size distribution of sand and sandstones, In: Deltaic and shallow marine deposits (ed. by L. V. Straaten). New York, Elsevier. 71-75.
- Dickson J.A.D. 1965: A modified staining technique for carbonate in thin section. *Nature* **205**: 587.
- Dunham R.J. 1962: Classification of carbonate rocks. *AAPG Mem.* **1**: 108-121.
- Folk R.L., Land L.S. 1975: Mg/Ca ratio and salinity: Two controls over crystallization of dolomite *AAPG Bul.* **59**: 60-68.
- Husseini, M.I., (1992): Upper Paleozoic tectono-sedimentary evolution of the Arabian and adjacent plates. *Jour. Geo. Societ.* **149**: 419-429.
- Insalaco E., Virgone A., Courme B., Gaillot J., Kamali S.A., Moallemi M.R., Lotfpour M., Monibi S., 2006: Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture. *GeoArabia*. **11**: 75-176.
- Kashfi M.S., 2000: The greater Persian Gulf Permian-Triassic stratigraphic nomenclature requires study. *Oil and Gas Jour., Tulsa, November* **6**: 36-44.
- Lucia F.J., Major R.P. 1994: Porosity evolution through hypersaline reflux dolomitization. In: Dolomites, a volume in honor of Dolomieu, ed. By B.H. Purser, M.E. Tucker, D.H., Zanger, Int. Ass. *sedimentol. Spec. pub.* **21**: 325-34.
- Lucia F.J. 1983: Petrophysical parameters estimated from visual descriptions of carbonate rocks: A field classification of carbonate pore space. *Jour. Tech.* **35**: 629-637.
- Lucia F.J. 1999: Carbonate reservoir characterization. Springer. P. 266.
- Meyer A., Biochard R., Azzam I., Al-Amoudi A., 2004: The Upper Khuff Formation, sedimentology and static core rock type approach comparison of two offshore Abu Dhabi Fields. *SPE Inc. No.* **88794**: 3.
- Mial A.D., 1995: Whiter stratigraphy. *Sed. Geo.* **100**: 5-20.
- Pittman E.D., 1992: Relation of porosity and permeability to various parameters derived from mercury injection-capillary pressure curves of sandstones. *AAPG Bul.* **76**: 191-198.
- Sandberg P.A., 1983: Anoscillating trend in Phanerozoic non-skeletal carbonate mineralogy. *Nature*. 305: 19-22.
- Sibley D.F., Gregg J.M., 1987: Classification of dolomite rock textures. *Jour. Sed. Pet.* **57**: 967-975.
- Sun S.Q., 1995: Dolomite reservoir: porosity evolution and reservoir characterization. *AAPG Bul.* **79**: 186-204.
- Szabo F., Khradpir A. 1978: Permian and Triassic stratigraphy Zagros Basin. Southwest Iran. *Jour. Pet. Geo.* **1**: 57-82.
- Tucker M.E., 1991: Sedimentary petrology. Blackwell scientific publications. P. 260.
- Tucker M.E., Wright V.P. 1990: Carbonate Sedimentology. Blackwell scientific publications. P. 482.