

دیاژنز و تأثیر آن بر کیفیت مخزنی سازند آسماری، میدان نفتی آجاجاری، جنوب باختر ایران

مصطفی مرادی^۱، رضا موسوی حرمی^۲، اسداله محبوبی^۳، محمد خانه‌باد^۴ و علی غیساوی^۵

^۱دانشجوی دکترا، گروه رسوب‌شناسی و سنگ‌شناسی رسوبی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲استاد، گروه رسوب‌شناسی و سنگ‌شناسی رسوبی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳استادیار، گروه رسوب‌شناسی و سنگ‌شناسی رسوبی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۴دکترا، شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۵

چکیده

سازند آسماری سنگ مخزن اصلی میدان نفتی آجاجاری بوده که از حدود ۴۰۰ متر سنگ آهک، دولومیت و میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی تشکیل شده است. مطالعه ۱۲۰۰ متر مغزه حفاری، ۲۸۰۰ برش میکروسکوپی، ۱۲ آنالیز میکروسکوپ الکترونی و ۱۲۵ آزمایش معمولی مغزه‌های حفاری در پنج چاه مغزه‌دار این میدان نشان می‌دهد که سازند آسماری تحت تأثیر فرایندهای دیاژنزی مختلف شامل میکریتی شدن، فشردگی، سیمانی شدن، ایجاد شکستگی، انحلال و دولومیتی شدن قرار گرفته است. بعضی از این فرایندها (مثل انحلال، دولومیتی شدن و شکستگی) تأثیر سازنده بر کیفیت مخزنی داشته و باعث ایجاد طیف وسیعی از انواع تخلخل شامل تخلخل‌های حفره‌ای، بین‌بلوری و کانالی در قسمت‌های بالایی سازند آسماری شده‌اند. فرایندهای دیاژنزی مخرب (مانند میکریتی شدن، فشردگی و سیمانی شدن) سبب تخریب فضاهای خالی شده و قسمت‌های پایینی سازند آسماری (به ویژه زون پنج) را به واحدهای غیر مخزنی تبدیل کرده‌اند. موقعیت داده‌های تخلخل و تراوایی بر روی دیاگرام لوسیا نشان می‌دهد که ماسه‌سنگ‌ها و کربنات‌های دارای تخلخل بین‌دانه‌ای، کیفیت مخزنی بسیار خوبی دارند و همواره در بالای رده‌های سه‌گانه این نمودار قرار می‌گیرند. نمونه‌های دارای شکستگی عمدتاً در بالای رده ۱ نمودار قرار می‌گیرند که نشان می‌دهد شکستگی‌ها تغییر چندانی در تخلخل ایجاد نمی‌کنند، اما باعث افزایش چشمگیر تراوایی می‌شوند. دولومیت‌ها و نمونه‌های دارای تخلخل حفره‌ای نیز در رده‌های ۲ و ۳ نمودار (تخلخل زیاد و تراوایی نسبتاً بالا) قرار گرفته‌اند. توالی پاراژنزی سازند آسماری نشان‌دهنده این است که فرایندهای دیاژنزی همزمان با رسوب‌گذاری در کف دریا، پس از رسوب‌گذاری در طی تدفین کم‌عمق تا عمیق و بالای آمدگی اتفاق افتاده‌اند. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند در شناسایی زون‌های مخزنی، افزایش تولید از سازند آسماری و عملیات ازدیاد برداشت در میدان مؤثر باشد.

کلیدواژه‌ها: دیاژنز، دیاگرام لوسیا، تخلخل، میدان نفتی آجاجاری، حوضه زاگرس.

*نویسنده مسئول: رضا موسوی حرمی

E-mail: Moussavi@um.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

در سنگ‌های کربناته فرایندهای دیاژنزی تأثیر زیادی بر شکل‌گیری، تغییر و یا تخریب فضاهای خالی دارند. بنابراین تشخیص نوع تخلخل می‌تواند به تفسیر فرایندهای دیاژنزی کمک کند و بالعکس با تفسیر توالی پاراژنزی می‌توان کیفیت یک مخزن هیدروکربوری را پیش‌بینی و زون‌های متخلخل را شناسایی کرد (Barbier et al., 2012). سازند آسماری به سن الیگو-میوسن یکی از مهم‌ترین سنگ مخزن‌های هیدروکربوری حوضه زاگرس و خاورمیانه است که از جمله سنگ مخزن اصلی میدان نفتی آجاجاری (جنوب غرب ایران) نیز محسوب می‌شود (Moradi et al., 2017). در این میدان، سازند آسماری حدود ۴۰۰ متر ضخامت دارد و از بالا به پایین به ۵ زون مخزنی تقسیم می‌شود. زون یک به صورت همشیب و با تماس مشخص در زیر سازند تبخیری گچساران قرار می‌گیرد و زون پنج با تماس تدریجی سازند پاینده را می‌پوشاند (قربانی قشقایی، ۱۳۷۹). از آنجا که میدان نفتی آجاجاری در نیمه دوم عمر تولید قرار دارد، می‌توان با استفاده از نتایج این مطالعه به شناسایی زون‌ها و قسمت‌هایی از میدان که کیفیت مخزنی بهتری دارند کمک کرد و گام مؤثری در جهت افزایش تولید، ازدیاد برداشت و بازیافت ثانویه در حفاری‌های آتی میدان برداشت.

۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

از نظر جغرافیایی، میدان نفتی آجاجاری در استان خوزستان، در محدوده طول‌های جغرافیایی ۲۰' ۴۹° تا ۵۰' ۴۹° و عرض‌های جغرافیایی ۳۴' ۳۰° تا ۱۵' ۳۱° قرار دارد (شکل ۱). از نظر ساختمانی این میدان در زون چین‌خورده-رورانده زاگرس و در بزوزون فوئادگی دزفول واقع شده، از شمال توسط میدان کرنج، از جنوب توسط میدان رامشیر، از خاور توسط میدان پازنان و از باختر توسط میدان مارون احاطه شده

است (قربانی قشقایی، ۱۳۷۹) (شکل ۱- الف). مطالعات سطحی و تحت‌الارضی نشان می‌دهد که ستون چینه‌شناسی سنوزوییک زاگرس در میدان آجاجاری روند تقریباً نرمال دارد و سازندهای بختیاری، آجاجاری، گچساران، میشان، آسماری، پاینده، گورپی، ایلام، سروک، داریان، گدوان و فهلیان در این میدان مشاهده شده‌اند (قربانی قشقایی، ۱۳۷۹).

۳- روش پژوهش

به منظور بررسی فرایندهای دیاژنزی و تأثیر آنها بر کیفیت مخزنی سازند آسماری، مغزه‌های حفاری ۵ حلقه چاه (۱۲۰۰ متر مغزه) (شکل ۱- ب) و ۲۸۰۰ برش میکروسکوپی تهیه شده از آنها مورد مطالعه قرار گرفت. برای تشخیص بافت کانی‌های رسی، تفکیک محصولات دیاژنزی اولیه و ثانویه و تشخیص پیریت، ۱۲ نمونه (شامل ۷ نمونه سنگ‌آهک، ۳ نمونه دولومیت و ۲ نمونه ماسه‌سنگ) برای آنالیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Leo 1450VP به آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد ارسال شد. با توجه به نقش چشمگیر دولومیت در کیفیت مخازن کربناته و به منظور تفکیک آن از کلسیت، ۷۰ برش میکروسکوپی توسط محلول آلزایرن قرمز به روش Dickson (1966) رنگ‌آمیزی شد. در نام‌گذاری دولومیت‌ها از طبقه‌بندی Sibly and Gregg (1987) استفاده شد. نام‌گذاری انواع تخلخل نیز بر اساس Choquette and Pray (1970) صورت گرفت و برای تعیین درصد فراوانی هر کدام از تخلخل‌ها در مقاطع میکروسکوپی، از روش شمارش نقطه‌ای در نرم‌افزار توصیف مقاطع بهره گرفته شد. در نهایت، داده‌های ۱۲۵ آزمایش معمولی مغزه‌های حفاری، متعلق به ۷۲ نمونه سنگ‌آهک، ۳۵ نمونه دولومیت و ۱۸ نمونه ماسه‌سنگ، که در آزمایشگاه بر روی پلاگ‌های ۲ تا ۵ سانتی‌متری انجام شده

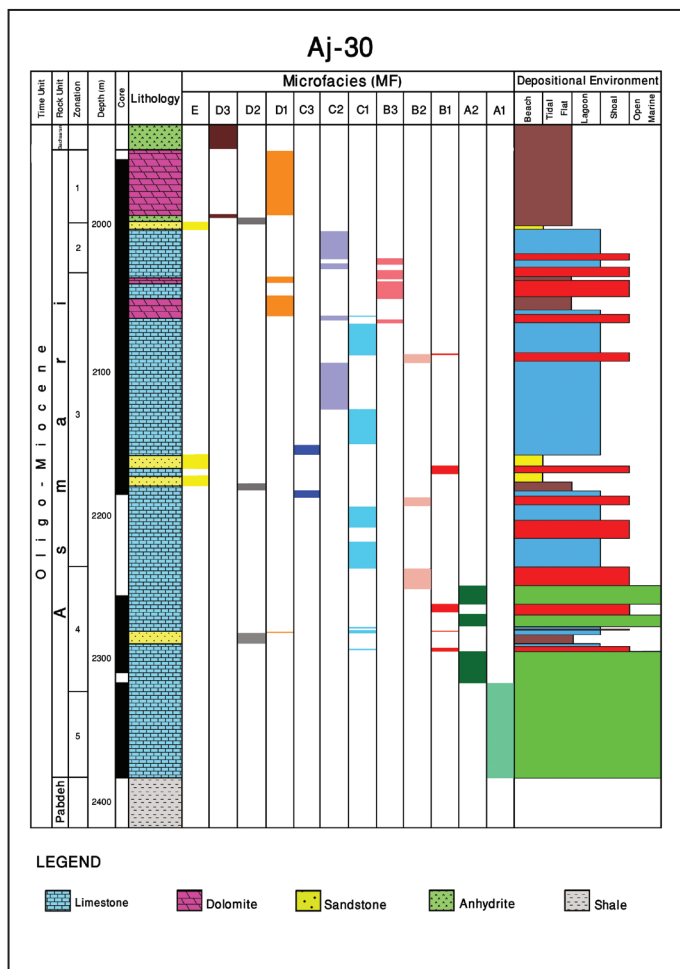
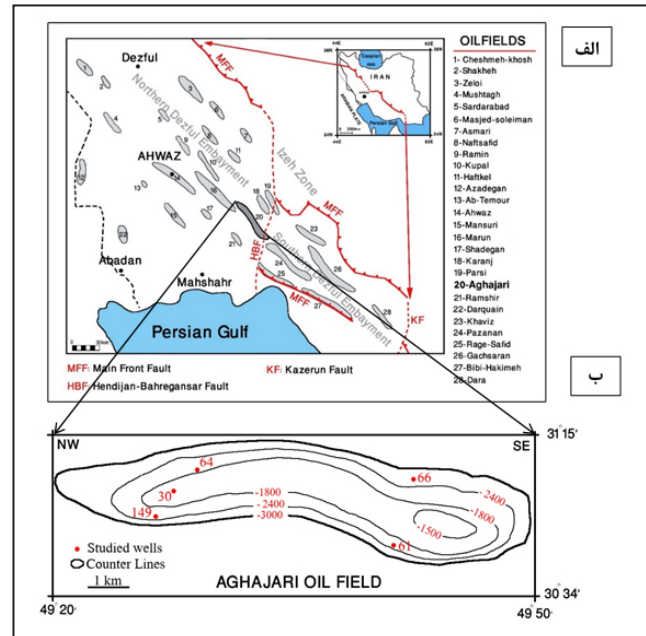
آنجا که عملکرد فرایندهای دیاژنزی بر روی رخساره‌های رسوبی مختلف، متفاوت است، لذا در ابتدا به رخساره‌های رسوبی در سازند مورد مطالعه اشاره می‌شود. بر اساس مطالعه Moradi et al. (2019)، سازند آسماری میدان نفتی آغاچاری در یک رمپ کریناته هموکلینال نهشته شده و ۵ مجموعه رخساره (A-E) شامل ۱۲ رخساره رسوبی (۹ رخساره کریناته، ۲ رخساره آواری و ۱ رخساره تبخیری) در آن قابل تفکیک است (جدول ۱). در شکل ۲، ستون چینه‌شناسی سازند آسماری، زون‌بندی و توزیع رخساره‌های رسوبی در یکی از چاه‌های مورد مطالعه دیده می‌شود.

بود، بر روی دیاگرام Lucia (1995) پلات شد و کیفیت مخزنی آنها در ارتباط با فرایندهای دیاژنتیکی مورد بررسی قرار گرفت. این داده‌ها شامل تخلخل و تراوایی هستند که به ترتیب با استفاده از روش‌های تزریق گاز هلیم (برای اندازه‌گیری تخلخل) و تزریق جیوه (برای اندازه‌گیری تراوایی) به دست آمده‌اند.

۴- رخساره‌های رسوبی

رخساره‌ها و محیط رسوبی تأثیر زیادی بر خصوصیات مخزنی یک سازند دارند و از

شکل ۱- الف) موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی میدان نفتی آغاچاری در حوضه زاگرس؛ ب) نقشه خطوط تراز زیر سطحی میدان نفتی آغاچاری در رأس سازند آسماری همراه با موقعیت چاه‌های مورد مطالعه (با تغییر از Moradi et al., 2017).



شکل ۲- ستون چینه‌شناسی، زون‌های پنج‌گانه سازند آسماری و توزیع رخساره‌های رسوبی در چاه شماره ۳۰ (با تغییر از Moradi et al., 2019).

جدول ۱- رخصاره‌های رسوبی شناسایی شده در سازند آسماری میدان نفتی آغاچاری (Moradi et al., 2019).

نام رخصاره	اختصاصات بافتی	مجموعه رخصاره	موقعیت در رمپ کربناته
وکستون/پکستون حاوی روزنبران کف‌زی بزرگ و روزنبران شناور (A ₁)	خرده‌های فسیلی عموماً زاویه‌دار تا نیمه‌گرد، جورشدگی ضعیف، اندازه ذرات از سیلت تا گرانول	دریای باز (A)	قسمت دورتر رمپ میانی (Distal Middle ramp)
پکستون/وکستون حاوی روزنبران کف‌زی بزرگ و بایوکلست (A ₂)	وجود مجموعه متنوعی از فسیل‌های کامل و شکسته با جورشدگی ضعیف		قسمت نزدیک‌تر رمپ میانی (Proximal Middle ramp)
باندستون مرجانی (B ₁)	مرجان‌ها به صورت منظم و شاخه‌ای و یا با ساختار پیچ و تاب خورده، شعاعی و اسفرولیتی	سد کربناته (B)	رمپ داخلی (Inner ramp)
گرینستون حاوی روزنبران بدون منفذ (B ₂)	تنوع روزنبران بدون منفذ، آلوکم‌ها اغلب نیمه زاویه دار تا گرد، در اندازه ماسه متوسط، جورشدگی متوسط تا خوب		
گرینستون دولومیتی آئیدی-بایوکلستی (B ₃)	آئیدها دارای ساختمان مماسی ساده، بایوکلست‌ها در اندازه ماسه، دارای جورشدگی و گردشدگی خوب		
پکستون/وکستون حاوی دو کفهای و جلبک (C ₁)	آلوکم‌ها در اندازه ماسه متوسط تا درشت، نسبتاً زاویه دار، جورشدگی متوسط تا خوب	لاگون (C)	
پکستون/وکستون حاوی روزنبران بدون منفذ و پلت (C ₂)	تنوع روزنبران بدون منفذ در اندازه ماسه ریز تا متوسط، جورشدگی متوسط، نیمه گرد شده		
مادستون (C ₃)	گل آهکی دانه‌ریز فاقد فسیل		
دولومادستون دارای بافت فنسترال و قالبهای تبخیری (D ₁)	فراوانی نودول‌های انیدریت و قالب‌های تبخیری، فاقد لامیناسیون و آشفنگی زیستی	پهنه جزرومدی (D)	
ماسه‌سنگ میکربیتی (D ₂)	وجود مقادیر مختلفی از کوارتز (بین ۵۰ تا ۷۵ درصد) در زمینه میکربیتی، کوارتزها در اندازه ماسه ریز تا درشت، نیمه‌گرد تا گرد، دارای جورشدگی خوب		
انیدریت (D ₃)	فراوانی بافت‌های شعاعی، توری قفس مرغی، اسفرولیتی و نودولی		
کوارتز آرنایت (E)	ماسه‌ها در اندازه متوسط تا درشت، دارای جورشدگی و گردشدگی خوب، عموماً مونوکریستالین، دارای خاموشی مستقیم تا موجی	ساحل (E)	

۵- فرایندهای دیاژنزی در رخصاره‌های کربناته

مطالعه مغزه‌های حفاری و برش‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که فرایندهای دیاژنزی مختلفی بر روی رخصاره‌های کربناته سازند آسماری اتفاق افتاده و در نتیجه کیفیت مخزنی این سازند را تحت تأثیر قرار داده است که عبارتند از:

۵-۱. میکربیتی شدن

در نمونه‌های مورد مطالعه این فرایند بیشتر در رخصاره‌های محیط‌های لاگون و سد مشاهده می‌شود. در بسیاری از موارد در قسمت‌های میانی سازند آسماری (زون ۳)، در نتیجه کاهش انرژی محیط، فرایند به دام افتادن میکربیت در باندستون‌های مرجانی (B1) اتفاق افتاده و تخلخل آنها را به شدت کاهش داده است (شکل ۳- A). تشکیل حاشیه میکربیتی در اطراف آئیدها در رخصاره گرینستون آئیدی (B3) نیز فرایندی متداول است (شکل ۳- C).

۵-۲. فشردگی

این فرایند در رخصاره‌های زمینه پشتیبان سازند آسماری بیشتر به صورت فشردگی فیزیکی و در رخصاره‌های دانه‌پشتیبان عمدتاً به صورت فشردگی شیمیایی مشاهده می‌شود. آثار فشردگی فیزیکی به صورت خمیدگی فسیل‌ها و شکستگی بیوکلاست‌ها به ویژه صدف دوکفه‌ای‌ها (شکل ۳- B) و تماس نقطه‌ای بین آئیدها (شکل ۳- C) مشاهده می‌شود. آثار فشردگی شیمیایی، به صورت استیلولیتی شدن، تماس مضرس بین دانه‌ها و شکل‌گیری فابریک درهم و تشکیل رگچه‌های انحلالی مشاهده می‌شود (شکل ۳- D).

۵-۳. شکستگی‌ها

شکستگی‌ها با ابعاد مختلف از رگه‌های کوچک با اندازه چند میلی‌متر تا بسیار بزرگ،

به وفور در مطالعه مغزه‌های حفاری (شکل ۳- E) و برش‌های میکروسکوپی مشاهده می‌شوند و ممکن است به صورت باز یا پر شده باشند. شکستگی‌های باز عمدتاً در قسمت‌های میانی سازند آسماری (زون‌های ۲ و ۳) مشاهده می‌شوند. گاهی اوقات شکستگی‌ها توسط سیمان کلسیتی یا انیدریتی پر شده‌اند و گاه نیز دولومیت فضای درون آنها را پر کرده است (شکل ۳- F). شکستگی‌های پر شده بیشتر در زون‌های ۴ و ۵ وجود دارند.

۵-۴. سیمانی شدن

مهمترین سیمان‌های شناسایی شده در سازند آسماری میدان نفتی آغاچاری عبارتند از:

- **سیمان حاشیه‌ای هم‌ضخامت:** سیمان هم‌ضخامت معمولاً به عنوان اولین نسل سیمان در محیط‌های دریایی آرام با نرخ رسوب گذاری پایین در اطراف دانه‌ها و فضاهای خالی تشکیل می‌شود (Zhang et al., 2006). این سیمان عمدتاً به صورت کشیده و عمود بر سطح آئیدها و بایوکلاست‌ها دیده می‌شود (شکل ۳- G). در برخی موارد، این سیمان با اندازه بلورهای بین ۲۰ تا ۴۰ میکرون در حجرات داخلی فسیل‌ها مشاهده می‌شود و در بسیاری از موارد نیز توسط سیمان هم‌بعد ادامه یافته است (شکل ۳- H).
- **سیمان کلسیت دروزی:** سیمان کلسیت دروزی بیشتر به عنوان سیمان نسل دوم، بعد از سیمان‌های هم‌ضخامت در حفرات تشکیل می‌شود و ترکیب کانی‌شناسی آن کلسیت کم‌میزیم است (Zaid, 2012). گاهی اوقات قسمت‌های داخلی پوسته‌های فسیلی از بین رفته بر اثر انحلال، توسط این سیمان پر شده‌اند و همراه با حاشیه میکربیتی باقیمانده مشاهده می‌شوند (شکل ۳- I).

- **سیمان هم‌بعد یا بلوکی:** فراوان‌ترین نوع سیمان و مهم‌ترین عامل پرکننده فضاهای

– **دولومیت‌های متوسط بلور یا دولواسپار:** این نوع دولومیت‌ها که در نمونه‌های مورد مطالعه کمترین فراوانی را دارند عمدتاً از موزائیک‌های هم‌اندازه، نسبتاً درشت، متراکم و دارای مرکز ابری و مرزهای سطح نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل تشکیل شده‌اند. اندازه بلورها بین ۷۰ تا ۲۶۰ میکرون در تغییر است و خاموشی غیر یکنواخت دارند (شکل ۳- R). دولواسپاراها در برخی موارد سبب پر کردن فضاهای خالی درون شکستگی‌ها و گاه نیز باعث تخریب بافت اولیه رسوبی شده‌اند.

۶- فرایندهای دیازنزی در رخساره‌های آواری

فرایندهای دیازنزی در رخساره‌های آواری سازند آسماری، به مراتب دارای نقش کم‌رنگ‌تری نسبت به رخساره‌های کربناته هستند. مهم‌ترین این فرایندها عبارتند از:

۶-۱. فشردگی

در رخساره‌های آواری فرایند فشردگی عمدتاً به‌صورت فیزیکی و غالباً در ماسه‌سنگ‌هایی که در قسمت‌های پایینی سازند آسماری وجود دارند، مشاهده می‌شود. در این حالت دانه‌های کوارتز با تماس نقطه‌ای یا محدب-مقعر در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، در حالی که آثاری از فشردگی شیمیایی در این رخساره‌ها نمی‌شود (شکل ۴- A).

۶-۲. سیمانی شدن

– **سیمان فراگیرنده:** متداول‌ترین نوع سیمان در رخساره‌های آواری بوده که بیشتر در رخساره کوارتز آرنایت، به‌صورت سیمان کلسیت اسپاری درشت‌بلور، چندین دانه کوارتز را در بر گرفته است (شکل ۴- B). این نوع سیمان عمدتاً در ماسه‌سنگ‌های زون چهار سازند آسماری مشاهده می‌شوند. در حالی که ماسه‌سنگ‌هایی که در قسمت‌های بالایی سازند آسماری وجود دارند، به‌صورت خیلی ضعیف سیمانی شده‌اند یا سیمان آنها در مراحل بعدی دیازنز تحت تأثیر انحلال از بین رفته است و بنابراین به‌صورت دانه‌های منفرد کوارتز مشاهده می‌شوند.

– **سیمان اکسیدهای آهن و کانی‌های رسی:** فراوانی اندک سیمان اکسید آهن در نمونه‌های مورد مطالعه به حضور ناچیز کانی‌های تأمین‌کننده و شرایط آب‌وهوایی محیط رسوب‌گذاری و محیط دیازنزی مربوط است (Flügel, 2010). اکسید آهن در اکثر موارد به‌صورت سیمان در رخساره‌های آواری مشاهده می‌شود (شکل ۴- C). کانی‌های رسی نیز بیشتر در رخساره‌های آواری دانه‌ریز همراه با اکسیدهای آهن و گاه همراه با کانی‌های تبخیری مشاهده می‌شوند و تشخیص آنها توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی و آنالیزهای نقطه‌ای (EDX) امکان‌پذیر است. فراوان‌ترین کانی‌های رسی که در بسیاری از موارد سبب تخریب کیفیت مخزنی رخساره‌های آواری شده‌اند، کائولینیت و ایلیت هستند که با بافت‌های کتابی و حالت پرز مانند، فضای بین دانه‌های کوارتز را پر کرده‌اند (شکل‌های ۴- F، E، D، G).

۶-۳. پیریتی شدن

پیریت یکی از محصولات دیازنزی اولیه و خاص محیط‌های احیایی است که تشکیل آن ناشی از عبور اکسید آهن از محیط سولفیدی و واکنش سولفید هیدروژن تولید شده توسط باکترهای احیا کننده است (Barbier et al., 2012). در رخساره‌های کربناته و به ویژه در رخساره‌های محیط لاگون و دریای باز، پیریت عمدتاً به‌صورت جانیشینی درون حجرات فسیل‌ها مشاهده می‌شود. در حالی که در رخساره‌های آواری، این کانی به‌صورت تجمع بلورهای مکعبی و منفرد سبب شکل‌گیری بافت دانه تمشکی (Framboidal) شده است (شکل‌های ۴- H و I). با توجه به اینکه در رخساره‌های آواری، علاوه بر پیریت، کانی‌های سنگین دیگری نظیر زیرکن نیز وجود دارد، به نظر می‌رسد، پیریت‌های موجود در این رخساره‌ها، حاصل فرسایش سنگ مادر بوده که به محیط انتقال یافته‌اند. در حالی که پیریت‌های موجود در رخساره‌های کربناته غالباً به فرم جانیشینی مشاهده می‌شوند و حاصل فعالیت باکتری‌های احیا کننده سولفات در محیط احیایی دیازنز تدفینی هستند (Flügel, 2010).

خالی در کربنات‌های سازند آسماری میدان نفتی آغاچاری فراوانی زیادی ندارد و بیشتر در کربنات‌های دانه‌پشتیبان و رخساره‌های آواری مشاهده می‌شود (شکل ۳- K).
– **سیمان انیدریتی:** یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب کیفیت مخزنی سازند آسماری در میدان نفتی آغاچاری، سیمان انیدریتی است. در بسیاری از موارد، آئیدهای دولومیتی شده توسط این نوع سیمان با اندازه بلورهای بین ۳۰۰ تا ۳۰۰۰ میکرون در بر گرفته شده (شکل ۳- L) و رگه‌ها و شکستگی‌های موجود در رخساره‌های دانه‌ریز عمدتاً توسط این سیمان پر شده‌اند (شکل ۳- F). انیدریت علاوه بر حضور چشمگیر به عنوان سیمان، در قالب فرایند انیدریتی شدن نیز به وفور به مشاهده می‌شود. به‌طوری که در اغلب موارد ساختمان اولیه یک فسیل، کاملاً انیدریتی شده و این موضوع مانع از انحلال آن در مراحل بعدی دیازنز شده است (شکل ۳- M).

۵-۵. انحلال

مهم‌ترین و فراوان‌ترین فرایند دیازنزی که سازند آسماری میدان نفتی آغاچاری را تحت تأثیر قرار داده، انحلال است. انحلال هم در مقیاس ماکروسکوپی (مغزه‌های حفاری) و هم در مقیاس میکروسکوپی به فراوانی مشاهده می‌شود و عمدتاً سبب تخریب ساختمان فسیل‌ها و ایجاد تخلخل قالبی شده است. در چنین مواردی، سیالات تحت اشباع از کربنات کلسیم سبب انحلال قسمت‌های داخلی ناپایدار می‌شوند، اما حاشیه میکربیتی حفظ و سبب شکل‌گیری تخلخل می‌شود (شکل ۳- N). در بعضی موارد، انحلال به بخش خاصی از سنگ محدود نشده و تمام اجزای اصلی آن (زمینه، سیمان و آلوکم‌ها) را تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۳- O).

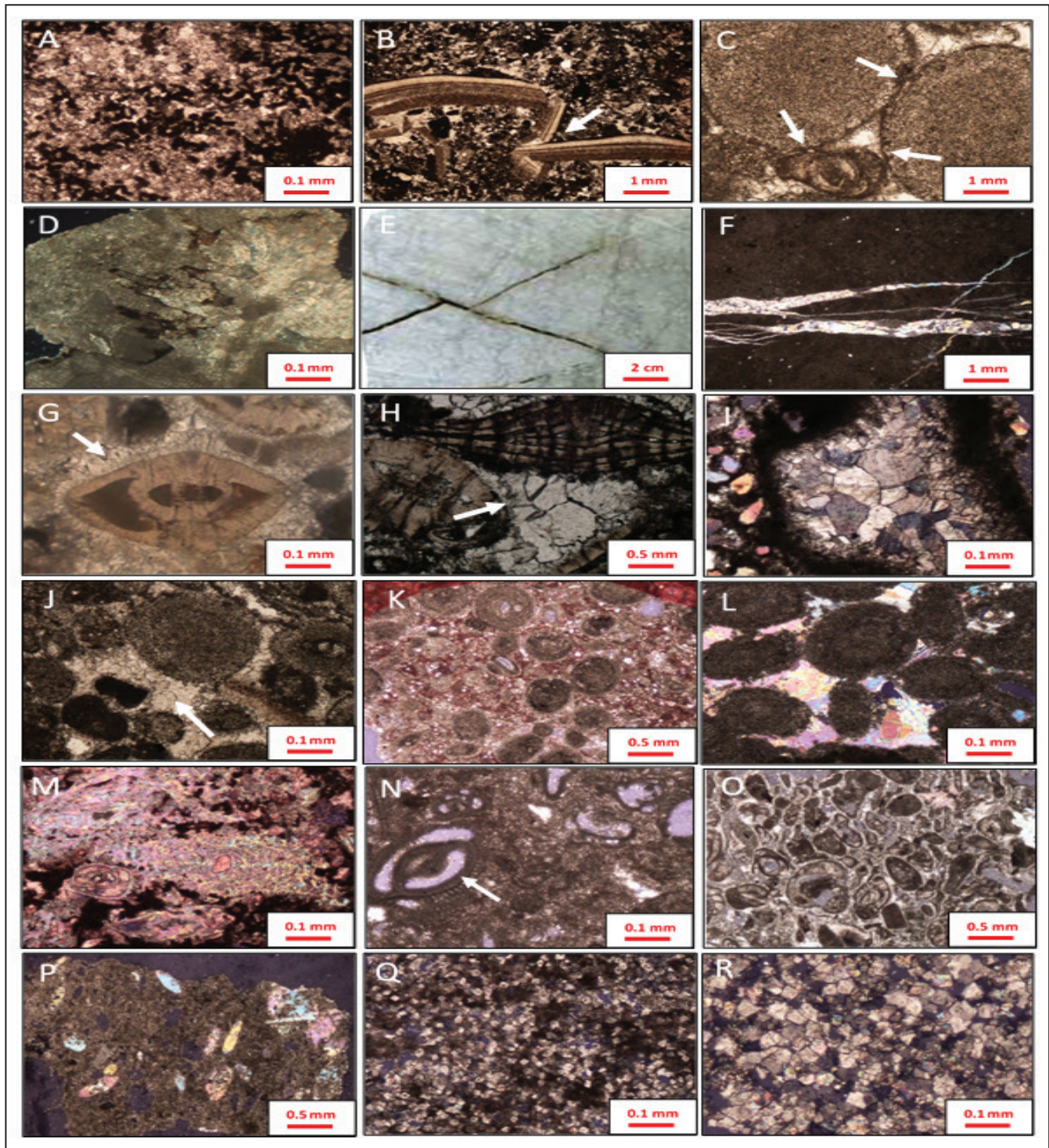
۵-۶. دولومیتی شدن

یکی از مهم‌ترین فرایندهای دیازنزی که نقش بسیار مهمی در ایجاد خواص مخزنی سازند آسماری در کل حوضه زاگرس داشته، دولومیتی شدن است (مرادی و همکاران، ۱۳۹۷؛ Aqrabi et al., 2006). مطالعه پتروگرافی برش‌های میکروسکوپی و رنگ‌آمیزی تعدادی از آنها توسط محلول آلزارین قرمز نشان می‌دهد که بخش‌های زیادی از سازند آسماری میدان نفتی آغاچاری تحت تأثیر این فرایند قرار گرفته‌اند و بیشترین تمرکز دولومیت‌ها در قسمت‌های بالایی سازند آسماری مشاهده می‌شود (شکل ۲). بر اساس اندازه و شکل بلورها و مرزهای بلوری، دولومیت‌های موجود در نمونه‌های مورد مطالعه را می‌توان در سه دسته تقسیم‌بندی کرد (Sibly and Gregg, 1987):

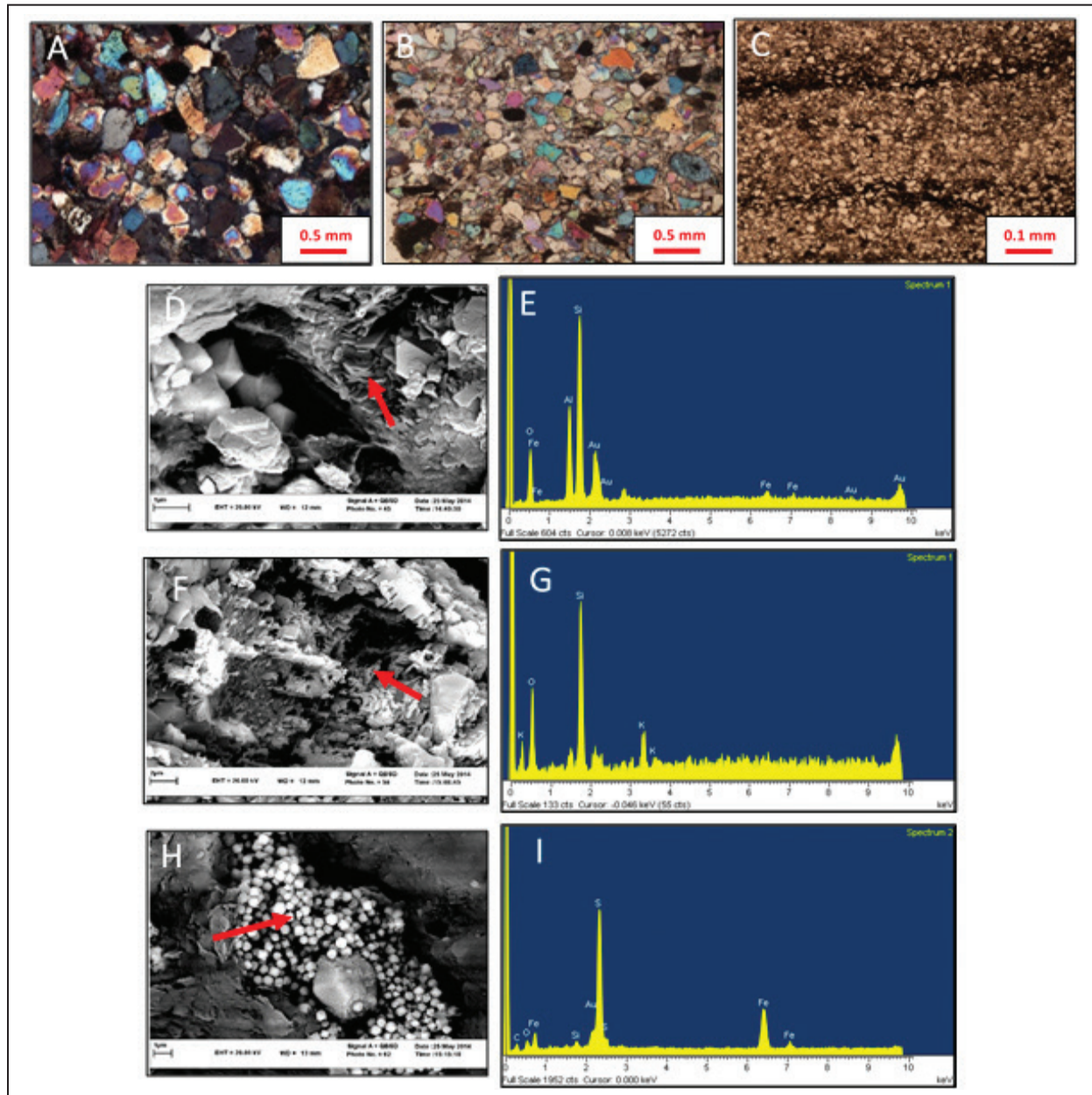
– **دولومیت‌های خیلی ریزبلور یا دولومیکریت:** در این دولومیت‌ها که عمدتاً در قسمت‌های بالایی سازند آسماری وجود دارند، بلورها بسیار ریز (۵ تا ۱۶ میکرون) و دارای اندازه‌های یکسان و مرزهای بلوری بی‌شکل هستند. در بسیاری از موارد دانه‌های آواری کوارتز، قالب‌های تبخیری و پلیوید همراه با آنها مشاهده می‌شود. فابریک فنسترال و نودول‌های انیدریت از ویژگی‌های بارز این دولومیت‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه است (شکل ۳- P).

– **دولومیت‌های ریزبلور یا دولومیکرواسپار:** این گروه، فراوان‌ترین نوع دولومیت‌ها در سازند آسماری میدان نفتی آغاچاری هستند که عمدتاً از بلورهای هم‌اندازه (۱۶ تا ۱۰۰ میکرون)، نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل و دارای مرزهای بین بلوری مستقیم تشکیل شده‌اند. در این نوع دولومیت تخلخل بین بلوری به مقدار فراوان دیده می‌شود. فضاهای بین بلوری عمدتاً خالی بوده و گاه توسط انیدریت یا کلسیت پر شده است (شکل ۳- Q). در برخی موارد این دولومیت‌ها همراه با دولومیکریت‌ها

مشاهده می‌شوند.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی فرایندهای دیاژنزی در رخساره‌های کربناته. (A) به دام افتادن میکربت در حجرات باندستون مرجانی، آغاچاری ۶۴، عمق ۲۳۹۹ متری. نمونه توسط آلیزارین قرمز رنگ آمیزی شده است؛ (B) شکستگی صدف دوکفه‌ای تحت تأثیر فشردگی فیزیکی، آغاچاری ۳۰، عمق ۲۰۸۵ متری؛ (C) ایجاد حاشیه میکربیتی در اطراف آئیدها در نتیجه فرایند میکربیتی شدن و تماس نقطه‌ای آنها با یکدیگر تحت تأثیر فشردگی فیزیکی، آغاچاری ۳۰، عمق ۲۰۳۷ متری؛ (D) تجمع مواد آلی و کانی‌های رسی در امتداد استیلولیت دامنه کوتاه در نتیجه فشردگی شیمیایی، آغاچاری ۶۶، عمق ۲۸۱۰ متری؛ (E) شکستگی‌های مزدوج باز در مغزه‌های حفاری، آغاچاری ۳۰، عمق ۱۹۷۳ متری؛ (F) شکستگی‌های پرشده توسط سیمان انیدریتی، آغاچاری ۶۱، عمق ۲۵۵۲ متری؛ (G) سیمان حاشیه‌ای هم‌ضخامت بر روی دیواره خارجی فسیل روتالیا (فلش)، چاه ۳۰، عمق ۲۰۹۷ متری؛ (H) تشکیل سیمان حاشیه‌ای هم‌ضخامت بر روی دیواره فسیل‌ها و ادامه یافتن آن توسط سیمان هم‌بعد، آغاچاری ۳۰، عمق ۲۲۶۲ متری؛ (I) باقی ماندن حاشیه میکربیتی فسیل انحلال یافته و پر شدن آن توسط سیمان کلسیت دروزی، آغاچاری ۳۰، عمق ۲۱۴۸ متری؛ (J) سیمان هم‌بعد پرکننده فضاهای خالی بین آئیدها (فلش)، آغاچاری ۳۰، عمق ۲۰۲۰ متری؛ (K) سیمان پوریکولوتاپیک در برگیرنده دانه‌های آئید. نمونه توسط آلیزارین قرمز رنگ آمیزی شده است. آغاچاری ۳۰، عمق ۲۰۳۷ متری؛ (L) سیمان انیدریتی بین دانه‌ای در فضای بین آئیدها، آغاچاری ۳۰، عمق ۲۰۲۰ متری؛ (M) حفظ شدگی کامل ساختار فسیل‌های لیدوسیکلینا و میلیولید در اثر فرایند انیدریتی شدن، آغاچاری ۱۴۹، عمق ۲۸۲۰ متری؛ (N) حفظ شدن حاشیه میکربیتی و ایجاد تخلخل قالبی در فسیل میلیولیده در نتیجه فرایند انحلال. آغاچاری ۶۶، عمق ۲۶۷۴ متری؛ (O) انحلال غیر انتخابی فسیل‌ها و سیمان، آغاچاری ۶۱، عمق ۲۶۶۵ متری؛ (P) دولومیت‌های خیلی ریزبلور دارای فابریک فنسترال و قالب‌های تبخیری، آغاچاری ۶۶، عمق ۲۷۱۰ متری؛ (Q) فضاهای بین بلورین در دولومیکرواسپارها، آغاچاری ۱۴۹، عمق ۲۶۶۵ متری؛ (R) بلورهای درشت دولومیت با مراکز ابری و حاشیه‌های شفاف، آغاچاری ۶۱، عمق ۲۵۵۳ متری. تصاویر میکروسکوپی G، H و K و PPL و بقیه در XPL تهیه شده است.



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی فرایندهای دیازنزی در رخساره‌های آواری. (A) تماس محدب-مقعر دانه‌های کوارتز تحت تأثیر فشردگی فیزیکی، پتروفاسیس E، آغاچاری ۱۴۹، عمق ۲۷۳۹ متری؛ (B) سیمان کلسیتی فراگیرنده دربرگیرنده دانه‌های کوارتز، آغاچاری ۱۴۹، عمق ۲۷۱۴ متری؛ (C) سیمان اکسید آهن در رخساره کوارتز آرنایت، آغاچاری ۱۴۹، عمق ۲۷۴۸ متری؛ (D و E) تصویر میکروسکوپ الکترونی همراه با آنالیز نقطه‌ای (محل فلش) از کانی رسی کائولینیت با بافت کتابی در رخساره ماسه سنگ میکربیتی، آغاچاری ۳۰، عمق ۲۲۹۰ متری؛ (F و G) وجود کانی رسی ایلیت با حالت پرمزمانند همراه با آنالیز نقطه‌ای (محل فلش) که باعث پرشدن فضاهای خالی در رخساره ماسه سنگ میکربیتی شده است. آغاچاری ۶۶، عمق ۲۷۱۶ متری؛ (H و I) تصویر میکروسکوپ الکترونی از پیریت‌های دانه تمشکی همراه با آنالیز نقطه‌ای (محل فلش) در رخساره کوارتز آرنایت، آغاچاری ۱۴۹، عمق ۲۷۵۶ متری. تصاویر میکروسکوپی A و B در XPL و تصویر C در PPL تهیه شده است.

۷- توالی پارازنزی

دانه‌ها یا بر روی دیواره داخلی حفرات تشکیل شده است (Leonide et al., 2014). ادامه یافتن سیمان تیغه‌ای هم ضخامت توسط سیمان هم بعد متوریک نشان می‌دهد که رسوبات بعد از رسوب گذاری در محیط دریایی احتمالاً در اثر افت سطح آب دریا و نفوذ سیالات جوی، وارد محیط دیازنز متوریک شده و سپس محیط دفنی را تجربه کرده‌اند. فواصل حفظ شده بین آئیدها، وجود سیمان هم بعد و عدم تراکم آنها نیز نشان می‌دهد که آئیدها قبل از ورود به محیط تدفینی، در محیط جوی سیمانی شده و از تراکم فیزیکی مصون مانده‌اند. از دیگر فرایندهای دیازنزی اتفاق افتاده در محیط دیازنزی متوریک می‌توان به انحلال و تشکیل دولومیکریت‌ها اشاره کرد. گسترش سیمان‌های اکسید آهن و کانی‌های رسی تابع تغییرات نسبی سطح آب دریاست که در این مرحله اتفاق افتاده است

سازند آسماری میدان نفتی آغاچاری تحت تأثیر فرایندهای دیازنزی در محیط‌های دریایی، متوریک و تدفینی طی سه مرحله انورژن، مزورژن و تلورژن قرار گرفته که توالی این فرایندها در شکل ۵ نمایش داده شده است و با توجه به آن می‌توان تا حدودی به تقدم و تأخر وقوع آنها پی برد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشتر فرایندهای دیازنزی در شرایطی به وقوع پیوسته‌اند که محیط دیازنزی متأثر از محیط رسوب گذاری بوده است. به عبارت دیگر بیشتر این فرایندها، انورژنتیک هستند. فرایندهای میکربیتی شدن، سیمانی شدن، انحلال و فشردگی فیزیکی در مرحله انورژن اتفاق افتاده‌اند (Madden and Wilson, 2013). میکربیتی شدن اولین فرایند دیازنز در ابی در مرحله انورژن بوده که همزمان با ته‌نشینی ذرات و در شرایط نرخ رسوب گذاری آرام رخ داده و پس از آن سیمان حاشیه‌ای هم‌ضخامت در اطراف

شده است (Daniel et al., 2008; Choquette and Hiatt, 2008). تشکیل کانی پیریت نیز به تدفین عمیق (مزوژنز) در شرایط احیایی نسبت داده می‌شود (Raiswell et al., 2008). مرحله تلوژنز در ارتباط با فعالیت‌های تکنونیک بوده است که با تشکیل شکستگی‌های بزرگ مقیاس و انحلال سیمان‌های کلسیتی و انیدریتی همزمان با بالا آمدگی رسوبات مشخص می‌شود (Leonide et al., 2014). درزه‌های زیاد پر شده توسط کلسیت اسپاری، انیدریت و دولومیت، نشان‌دهنده این مرحله از دیاژنز هستند. بالا آمدگی سازند آهکی آسماری باعث شده این سنگ‌ها دوباره در سطح زمین در معرض آب‌های جوی قرار گیرند و تخلخل‌های ثانویه در اثر انحلال به وجود آید.

(Vandeginste et al., 2013). گسترش سیمان‌های انیدریتی فراگیر، دروزی و هم‌بعد (به صورت در برگیرنده پوشش‌های میکرایتی یا پرکننده شکستگی‌ها و حفرات انحلالی) می‌تواند نشان‌دهنده محیط دیاژنز دفنی باشد. علاوه بر این، گسترش عوارض فشردگی فیزیکی مانند کج شدگی بایوکلاست‌ها، شکسته شدن صدف دوکفه‌ای‌ها، فابریک‌های درهم، رگچه‌های انحلالی و استیلولیت‌ها دلایل محکمی بر وقوع دیاژنز دفنی هستند که در مرحله مزوژنز اتفاق می‌افتد (Madden and Wilson, 2013). از دیگر فرایندهای دیاژنزی اتفاق افتاده در مرحله مزوژنز، آزاد شدن آب کانی‌های رسی تحت تأثیر تراکم و اشباع شدن سیالات دولومیت‌ساز از منیزیم بوده که منجر به تشکیل دولومیت‌های درشت‌بلور

شکل ۵- توالی پاراژنزی سازند آسماری در میدان نفتی آغاچاری.

Phase of Diagenesis		Eogenesis		Mesogenesis		Telogenesis	
Diagenetic environment		Marine	Meteoric	Burial		Uplift	
				Shallow	Deep		
Diagenetic Processes	Micritization	▶					
	Compaction	Mechanical	▶		- - - - -		
		Chemical			- - - - -	▶	
		Isopachous	▶				
	Cementation	Blocky		▶			
		Poikilotropic			▶		
		Anhydrite	▶		- - - - -		
		Fe		▶			▶
	Clay		▶			- - - - -	
	Dissolution	Dolomiticrite	▶				- - - - -
		Dolomicrospar		▶			
		Dolospar			▶		- - - - -
		Fracturing & Pore filling					▶
	Pyritization				▶		

۸- انواع تخلخل

(زون‌های ۱ تا ۳) مشاهده می‌شود که رسوبات تحت تأثیر فرایند دولومیتی شدن قرار گرفته‌اند. تخلخل بین بلوری حدود ۲۳ درصد از تخلخل‌های سازند آسماری میدان نفتی آغاچاری را شامل می‌شود و همراه با تخلخل‌های بین‌دانه‌ای، حفره‌ای و شکستگی مهم‌ترین نقش را در افزایش کیفیت مخزنی داشته است (شکل ۶).

تخلخل حفره‌ای (Vuggy porosity): تخلخل حفره‌ای معمولاً در اندازه‌های مختلف و با شکل‌های نامنظم بر روی مغزه‌ها نیز به خوبی مشاهده می‌شود (شکل ۷- G). در برخی موارد حضور همزمان این نوع تخلخل و تخلخل بین بلوری در رخساره دولومادستون سبب ایجاد کانال‌هایی برای جریان هیدروکربورها در داخل سنگ شده است (شکل ۷- H). این موضوع سبب تبدیل یک رخساره دانه‌ریز به یک واحد مخزنی با کیفیت بسیار خوب شده است. فراوانی تخلخل حفره‌ای (۲۱ درصد) و سیمانی شدن کمتر آن نسبت به سایر تخلخل‌ها نشان می‌دهد که این نوع تخلخل نقش زیادی در کیفیت مخزنی سازند آسماری دارد.

تخلخل حاصل از شکستگی (Fracture porosity): در میدان نفتی آغاچاری شکستگی‌ها فراوانی زیادی ندارند (حدود ۱۲ درصد) و انواع پر شده علاوه بر اینکه تخلخل‌ها را از بین می‌برند، با ایجاد سد بین گلوگاه‌های تخلخل، ارتباط آنها را قطع می‌کنند و سبب کاهش تراوانی نیز می‌شوند (Lucia, 1995). عرض شکستگی‌ها معمولاً بین ۱ تا ۱/۵ میلی‌متر و طول آنها از کمتر از ۱ میلی‌متر تا بیش از چند

بر اساس طبقه‌بندی Choquette and Pray (1970) تخلخل‌های مشاهده شده در سازند آسماری را می‌توان به دو دسته تحت کنترل فابریک (بین دانه‌ای، بین بلوری، قالبی، شبکه رشدی و فنسترال) و بدون کنترل فابریک (حفره‌ای، شکستگی) تقسیم کرد. در شکل ۶ درصد فراوانی هر کدام از تخلخل‌ها بر اساس شمارش نقطه‌ای آمده است.

تخلخل بین دانه‌ای (Interparticle porosity): مهم‌ترین نوع تخلخل در سازند مورد مطالعه بوده که بیشترین فراوانی را در رخساره‌های آواری و به خصوص در ماسه‌سنگ‌های دارای سیمان سست دارد (شکل‌های A و B). در رخساره‌های کربناته و آواری گاه سیمان‌های کلسیتی و تبخیری قسمتی از تخلخل بین دانه‌ای را پر کرده‌اند (شکل‌های C و D). این نوع تخلخل ۲۶ درصد از مجموع تخلخل سازند سازند آسماری را شامل می‌شود (شکل ۶).

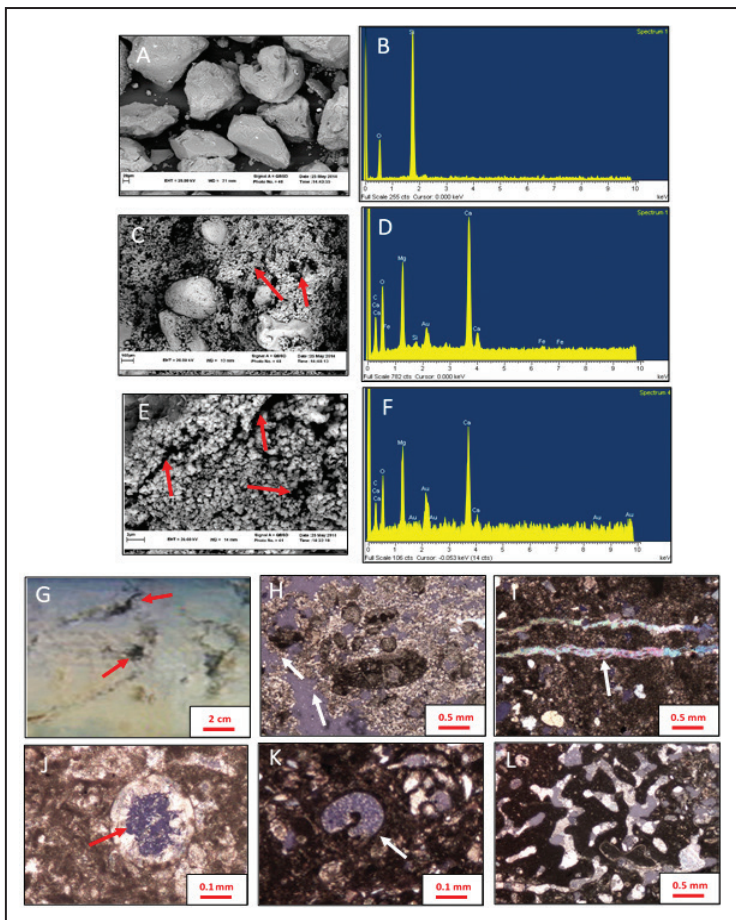
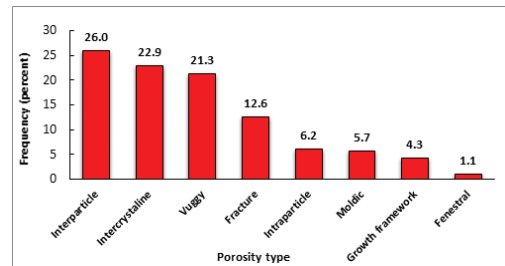
تخلخل بین بلوری (Intercrystalline porosity): این نوع تخلخل در فضای بین بلورهای دولومیت وجود دارد و با اندازه و شکل بلورها نسبت مستقیم دارد. بیشترین فراوانی این نوع تخلخل در دولومیکریت‌ها و دولومیکرواسپارها مشاهده می‌شود. فضاهای خالی معمولاً همگن هستند و اندازه آنها بین ۱۰ میکرون تا ۱ میلی‌متر تغییر می‌کند (شکل‌های E و F). با توجه به اینکه گسترش این نوع تخلخل در ارتباط با فرایند دولومیتی شدن و تبلور مجدد بلورهای دولومیت در مراحل اولیه یا ثانویه دیاژنزی است (Martire et al., 2014)، لذا بیشتر در قسمت‌های بالایی سازند آسماری

دارد و مربوط به حفرات درون صدف روزن بران، گاستروپودها و استراکداست. در بسیاری از موارد این نوع تخلخل به صورت کامل یا بخشی توسط سیمان‌های کلسیتی و انیدریتی پر شده است (شکل ۷- J). تخلخل درون دانه‌ای در مجموع ۶/۲ درصد از کل تخلخل سازند آسماری را شامل می‌شود و به دلیل فراوانی کم و عدم ارتباط فضاهای خالی با یکدیگر، تأثیر چندانی بر تخلخل موثر، تراوایی و در نتیجه کیفیت مخزنی ندارد.

سانتی‌متر تغییر می‌کند (شکل‌های ۳- E و F و ۷- I). مهم‌ترین نقش شکستگی‌ها در افزایش کیفیت مخزن این است که سبب ارتباط تخلخل‌های منفرد می‌شوند و ممکن است با اتصال لایه‌های مخزنی مجزا، موجب افزایش توان تولید مخزن شوند (Gluyas and Swarbrick, 2013).

– **تخلخل درون دانه‌ای (Intraparticle porosity):** تخلخل درون دانه‌ای تنها در رخساره‌های کربناته سازند آسماری (عمدتاً در رخساره‌های محیط لاگون) وجود

شکل ۶- نمودار فراوانی انواع تخلخل‌های موجود در سازند آسماری میدان نفتی آغاچاری.



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی انواع تخلخل. A و B تصویر میکروسکوپ الکترونی همراه با آنالیز نقطه‌ای (محل فلش) از تخلخل بین دانه‌ای در ماسه‌های سست، آغاچاری ۳۰، عمق ۲۱۸۶ متری؛ C و D تخریب بخشی از تخلخل بین دانه‌ای توسط سیمان کلسیتی/ دولومیتی ریزبلور در رخساره ماسه سنگ میکریتی همراه با آنالیز نقطه‌ای (محل فلش)، آغاچاری ۶۱، عمق ۲۵۸۰ متری. E و F تخلخل‌های بین بلوری در دولومیکریت (فلش‌ها) همراه با آنالیز نقطه‌ای، آغاچاری ۶۱، عمق ۲۵۴۳ متری؛ G تخلخل‌های حفره‌ای قابل مشاهده در مغزه‌های حفاری (فلش‌ها)، آغاچاری ۶۱، عمق ۲۵۵۹ متری؛ H ایجاد کانال‌های بزرگ (فلش‌ها) در نتیجه انحلال و اتصال تخلخل‌های حفره‌ای، آغاچاری ۶۴، عمق ۲۱۵۹ متری I تخریب تخلخل حاصل از شکستگی توسط سیمان انیدریتی (فلش)، آغاچاری ۶۱، عمق ۲۵۵۲ متری؛ J تخلخل درون‌دانه‌ای در صدف استراکود (فلش)، آغاچاری ۳۰، عمق ۲۰۷۲ متری؛ K تخلخل قالبی ناشی از انحلال یک فسیل گاستروپود، آغاچاری ۳۰، عمق ۲۰۸۳ متری؛ L ارتباط فضاهای خالی شبکه رشدی و ایجاد کانال برای سیالات مخزن، آغاچاری ۶۴، عمق ۲۲۰۸ متری. کلیه تصاویر میکروسکوپی در XPL تهیه شده است.

شده‌اند (شکل ۷- L). با توجه به اینکه رخساره باندستون مرجانی ضخامت کمی از سازند آسماری میدان نفتی آغاچاری را تشکیل داده است، لذا علیرغم کیفیت مخزنی بالای این رخساره، درصد کمی از تخلخل سازند آسماری را شامل می‌شود (حدود ۴ درصد).

۹- ارتباط دیاژنز و کیفیت مخزنی

نتایج ۱۲۵ آزمایش معمولی مغزه‌های حفاری در چاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که میانگین تخلخل و تراوایی سازند آسماری به ترتیب ۱۲/۵ درصد و ۹۵ میلی‌داری است. به منظور بررسی نقش فرایندهای دیاژنزی در کیفیت مخزنی از نمودار Lucia (1995) استفاده و داده‌های تخلخل و تراوایی بر روی آن پلات شد (شکل ۸). در این نمودار که از عوامل بافتی و دیاژنزی برای بررسی خواص پتروفیزیکی رخساره‌ها استفاده می‌کند، بر اساس ارتباط تخلخل و تراوایی، سه رده یا گروه پتروفیزیکی معرفی شده است. نمونه‌هایی که در زیر این سه رده قرار گیرند کیفیت مخزنی پایینی دارند و در حقیقت به عنوان واحدهای غیر مخزنی

– **تخلخل قالبی (Moldic porosity):** عامل اصلی تشکیل این نوع تخلخل، اختلاف کانی‌شناسی و انحلال‌پذیری متفاوت دانه‌ها، ماتریکس و سیمان است (Amel et al., 2015). در نمونه‌های مورد مطالعه این نوع تخلخل بیشتر از انحلال انتخابی دانه‌های آئید یا صدف فسیل‌ها و باقی ماندن حاشیه میکریتی در اطراف نمونه به وجود آمده است که تحت عنوان اومالدیک و بایومولدیک نامیده می‌شوند (شکل ۷- K). فضاهای خالی عموماً به صورت منفرد بوده و توسط ماتریکس ایزوله شده‌اند و اندازه آنها بین ۰/۲ تا ۱ میلی‌متر تغییر می‌کند. تخلخل حفره‌ای در نمونه‌ها فراوانی کمی دارد و به دلیل عدم ارتباط فضاهای قالبی با یکدیگر، تأثیر چندانی بر کیفیت مخزنی سازند آسماری نخواهد داشت (شکل ۶).

– **تخلخل شبکه رشدی (Growth framework porosity):** این نوع تخلخل که خاص سدهای کربناته است و در نتیجه رشد درجای مرجان‌ها و جلبک‌ها شکل می‌گیرد (Heap et al., 2014)، در قسمت‌های میانی سازند آسماری (بویژون ۳) مشاهده می‌شود. در بسیاری از موارد، فضاهای خالی به یکدیگر متصل هستند و با ایجاد حالت کانالی سبب افزایش کیفیت مخزنی این رخساره

تخریب کیفیت مخزنی نشان می‌دهد.

نمونه‌هایی که تحت تأثیر فرایندهای دولومیتی شدن و انحلال بوده‌اند، عمدتاً در رده‌های ۱ و ۲ نمودار (Lucia (1995) قرار گرفته‌اند، یعنی دارای تخلخل بالا و تراوایی نسبتاً زیادی هستند. نمونه‌هایی که تنها تحت تأثیر فرایند انحلال قرار گرفته باشند بیشتر در رده ۲ قرار می‌گیرند. دولومیکریت‌ها به سبب وجود تخلخل‌های بین بلوری و انحلالی و دولومیکرواسپارها به دلیل وجود تخلخل بین بلوری معمولاً دارای تخلخل و تراوایی بالایی هستند و در قسمت‌های میانی و بالایی رده ۱ نمودار قرار می‌گیرند. در حالی که دولواسپارها به دلیل پر کردن حفرات و شکستگی‌ها و رشد زیاد بلورها معمولاً باعث کاهش مقدار تخلخل و تراوایی می‌شوند و قسمت‌های پایینی رده ۱ نمودار را اشغال می‌کنند. نمونه‌هایی که در آنها ترکیب فرایندهای انحلال و دولومیتی شدن سبب ایجاد کانال‌هایی برای عبور سیال شده است، در قسمت بالای رده‌های سه گانه و در کنار گریستون‌های آئیدی انحلال یافته و ماسه‌سنگ‌های سست قرار می‌گیرند. بنابراین فرایندهای دولومیتی شدن و انحلال نیز نقش بسیار زیادی در افزایش کیفیت مخزنی سازند آسماری داشته‌اند.

۱۰- نتیجه‌گیری

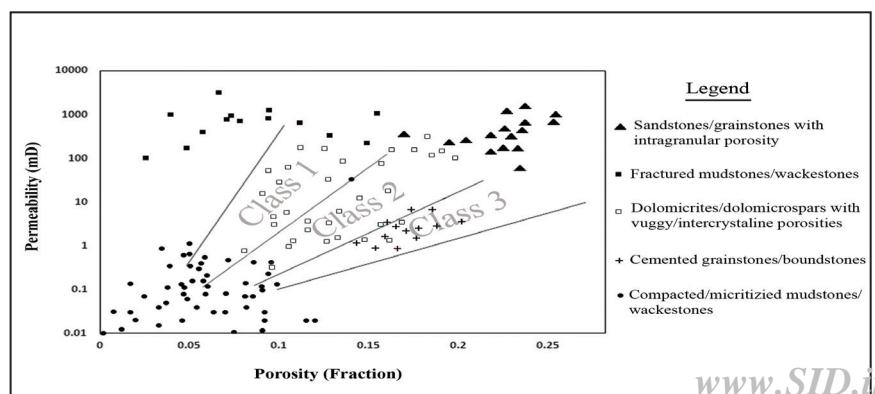
مطالعه برش‌های میکروسکوپی و مغزه‌های حفاری نشان می‌دهد که فرایندهای دیاژنزی مختلفی سازند آسماری میدان نفتی آغاچاری را تحت تأثیر قرار داده‌اند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به انحلال، دولومیتی شدن، سیمانی شدن، میکریتی شدن، فشردگی، ایجاد شکستگی و پیریتی شدن اشاره کرد. بررسی توالی پاراژنزی نشان می‌دهد که این فرایندها همزمان با رسوب‌گذاری در کف دریا، پس از رسوب‌گذاری در طی تدفین کم‌عمق تا عمیق و بالا آمدگی اتفاق افتاده‌اند. فرایندهای انحلال و دولومیتی شدن نقش بسیار مهمی در افزایش تخلخل و تراوایی مخزن داشته‌اند. به طوری که ترکیب این دو فرایند با یکدیگر به رخساره دانه‌ریز دولومادستون خصوصیات پتروفیزیکی مشابه با رخساره‌های دانه پشیمان داده و آنرا به یک واحد مخزنی بسیار خوب تبدیل کرده است. علاوه بر این دو فرایند، شکستگی‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی نیز سبب اتصال منافذ کوچک به یکدیگر شده و علیرغم اینکه تغییر چندانی در مقدار تخلخل ایجاد نکرده، باعث افزایش شدید تراوایی سازند شده‌اند. در مقابل، برخی از فرایندها مانند فشردگی فیزیکی و شیمیایی و میکریتی شدن که عمدتاً زون‌های پایینی سازند آسماری را تحت تأثیر قرار داده‌اند باعث تخریب تخلخل‌های بین دانه‌ای شده و کیفیت مخزن را کاهش داده‌اند. سیمانی شدن نیز در مواردی که سبب قطع ارتباط گلوگاه‌ها شده، کیفیت مخزنی را شدیداً کاهش داده و تخلخل را به نوع ایزوله تبدیل کرده است که این حالت به خوبی در بانداستون‌های مرجانی مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه فرایندهای دیاژنزی سازنده عمدتاً قسمت‌های بالایی سازند آسماری (زون‌های ۱ تا ۳) را تحت تأثیر قرار داده‌اند، لذا بهتر است حفاری‌های آتی میدان به منظور تولید و ازدیاد برداشت، بیشتر بر روی این زون‌ها متمرکز شود.

شناخته می‌شوند. آنهایی که در قسمت بالایی این رده‌ها قرار گیرند هم کیفیت مخزنی بسیار خوبی دارند (Lucia, 1995). همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تعداد زیادی از نمونه‌های مورد مطالعه، در بالای رده‌های سه گانه (Lucia (1995) قرار گرفته‌اند، یعنی دارای تخلخل زیاد و تراوایی بالایی هستند. مطالعه برش‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که این نمونه‌ها عمدتاً ماسه‌سنگ‌های سست (رخساره E) و گریستون‌های آئیدی (رخساره B3) هستند که تخلخل بین دانه‌ای زیادی دارند. در این نمونه‌ها میزان سیمان‌شدگی کم بوده و یا در نتیجه‌ی فرایندهای انحلال و دولومیتی شدن، ارتباط فضاهای بین دانه‌ای به خوبی برقرار شده است. به همین دلیل در برخی از ماسه‌سنگ‌های فاقد سیمان، مقدار تراوایی حتی تا چند داری نیز می‌رسد (شکل ۸). بانداستون‌های مرجانی (رخساره B1) نیز چنانچه تحت تأثیر سیمانی شدن قرار نگرفته باشند در این قسمت از نمودار قرار می‌گیرند. بنابراین، عدم تأثیر فرایندهای دیاژنزی مخرب (بخصوص سیمانی شدن و فشردگی) و انرژی محیط رسوب‌گذاری (ایجاد تخلخل‌های بین دانه‌ای و شبکه رشدی)، عوامل اصلی کیفیت مخزنی بسیار خوب این نمونه‌ها بوده‌اند. در مواردی که سیمان‌اندیریتی به طور کامل گریستون‌های آئیدی و بانداستون‌های مرجانی را تحت تأثیر قرار داده و ارتباط بین گلوگاه‌های حفرات را قطع کرده است، تراوایی نمونه به شدت کاهش می‌یابد. این نمونه‌ها از نظر کیفیت مخزنی ویژگی‌هایی شبیه به نمونه‌های دانه‌ریز دارای تخلخل درون دانه‌ای (مثل رخساره‌های محیط لاگون) نشان می‌دهند و در رده ۳ نمودار (Lucia (1995) پلات می‌شوند. در نتیجه مقدار تخلخل آنها نسبتاً بالاست، اما تراوایی پایینی نشان می‌دهند. بنابراین سیمانی شدن یکی از عوامل تعیین کننده کیفیت مخزنی در نمونه‌های مورد مطالعه بوده است.

نمونه‌هایی که دارای ریزشکستگی هستند و این شکستگی‌ها توسط سیمان پر نشده‌اند، علیرغم تخلخل نسبتاً پایین، تراوایی بسیار بالایی نشان می‌دهند. این نمونه‌ها که عمدتاً دارای بافت دانه‌ریز (رخساره‌های محیط لاگون) هستند، در قسمت بالای رده ۳ دیاگرام (Lucia (1995) قرار گرفته‌اند. این موضوع تأیید کننده آن است که شکستگی‌ها نقش چندانی در افزایش تخلخل سنگ‌های مخزن ندارند، اما باعث افزایش قابل ملاحظه‌ی تراوایی سنگ می‌شوند (Ahr, 1991). بنابراین وجود شکستگی‌ها می‌تواند تراوایی سنگ را به شدت افزایش دهد و حتی رخساره‌های دانه‌ریز را نیز به واحدهای مخزنی تبدیل کند.

تعداد زیادی از نمونه‌های مورد مطالعه دارای تخلخل پایین و تراوایی خیلی کم هستند و در زیر رده‌های سه گانه Lucia (1995) قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها که عمدتاً به مربوط به زون‌های ۴ و ۵ سازند آسماری هستند، غالباً بافت رسوبی دانه‌ریز (مجموعه رخساره دریای باز) دارند و تا حد زیادی تحت تأثیر فرایندهای فشردگی فیزیکی و شیمیایی و میکریتی شدن قرار گرفته‌اند. وجود ماتریکس دانه‌ریز در این نمونه‌ها سبب افزایش تخلخل اولیه آنها می‌شود. هر چند مقداری از این تخلخل تحت تأثیر تراکم و میکریتی شدن از بین می‌رود، اما به علت ریز و مویینه بودن فضاهای خالی، سیال نمی‌تواند از آنها عبور کند و به صورت محبوس در آنها باقی می‌ماند. این موضوع به خوبی نقش مخرب محیط رسوب‌گذاری و فرایندهای دیاژنزی را در

شکل ۸- موقعیت داده‌های تخلخل و تراوایی بر روی دیاگرام Lucia (1995)



کتابنگاری

امینی، ا.، ۱۳۹۱- بررسی شرایط محیطی و دیازنز در کنترل کیفیت مخزنی سازند آسماری میدان نفتی اهواز با نگرش ویژه بر زون M2. شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب. گزارش شماره ۰۲۷۵-۱۱-۸۷ ص. ۲۸۸

قربانی قشقای، ا.، ۱۳۷۹- مطالعه تکمیلی زمین شناسی آسماری میدان آغاچاری، گزارش شماره پ-۴۹۴۰، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، اداره کل زمین شناسی گسترشی، اهواز.
 مرادی، م.، موسوی حرمی، ر.، محبوبی، ا. و خانه‌باد، م.، ۱۳۹۷- انواع دولومیت‌های سازند آسماری در میدان نفتی آغاچاری و تاثیر آنها بر روند نمودارهای تزریق جیوه. نشریه علمی- پژوهشی پژوهش نفت، شماره ۱۰۳، ص. ۵۱ تا ۶۷.

References

- Ahr, W. M., 1991- Pore characteristics as surrogates for permeability in mapping reservoir flow units: Vacuum San Andres field, Lea County, New Mexico. AAPG Bull. (Am. Assoc. Pet. Geol. States) 75.
- Amel, H., Jafarian, A., Husinec, A., Koeshidayatullah, A. and Swennen, R., 2015- Microfacies, depositional environment and diagenetic evolution controls on the reservoir quality of the Permian Upper Dalan Formation, Kish Gas Field, Zagros Basin. Mar. Pet. Geol. 67, 57- 71.
- Aqrawi, A. A. M., Keramati, M., Ehrenberg, S. N., Moallemi, A., Svana, , Darke, G., Dickson, J. A. D., Oxtoby, N. H., 2006- The Origin of Dolomite in the Asmari Formation, Dezful Embayment, SW Iran. J. Pet. Geol. 29, 381- 402.
- Barbier, M., Hamon, Y., Callot, J. P., Floquet, M. and Daniel, J. M., 2012- Sedimentary and diagenetic controls on the multiscale fracturing pattern of a carbonate reservoir: The Madison Formation (Sheep Mountain, Wyoming, USA). Mar. Pet. Geol. 29, 50-67.
- Choquette, P. W. and Hiatt, E. E., 2008- Shallow burial dolomite cement: a major component of many ancient sucrosic dolomites. Sediment. 55, 423- 460.
- Choquette, P. W. and Pray, L. C., 1970- Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 54, 207- 250.
- Daniel, J. M., Nader, F., Callot, J. P. and Hamon, Y., 2008- Asmari Reservoir Modeling Field Scale Study of Gachsaran, Final Report Part1. The international IOR research cooperation for Iranian fields Joint Study Program, Tehran, Iran.
- Dickson, J. A. D., 1966- Carbonate identification and genesis as revealed by staining. J. Sediment. Pet. 36 (2), 491- 505.
- Flügel, E., 2010- Microfacies of carbonate rocks, analysis interpretation and application (2nd edition). Springer, New York, 976 p.
- Gluyas, J. and Swarbrick, R., 2013- Petroleum geoscience. John Wiley & Sons, 376.
- Heap, M. J., Baud, P., Reuschl, T. and Meredith, P. G., 2014- Stylolites in limestones: Barriers to fluid flow? Geol. 42, 51- 54.
- Leonide, P., Fournier, F., Reijmer, J. J. G., Vonhof, H., Borgomano, J., Dijk, J., Rosenthal, M., Van Goethem, M., Cochard, J. and Meulenaars, K., 2014- Diagenetic patterns and pore space distribution along a platform to outer-shelf transect (Urgonian limestone, Barremian-Aptian, SE France). Sediment. Geol. 306, 1- 23.
- Lucia, F. J., 1995- Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 79, 1275- 1300.
- Madden, R. H. C. and Wilson, M. E. J., 2013- Diagenesis of a SE Asian Cenozoic carbonate platform margin and its adjacent basinal deposits. Sediment. Geol. 286, 20- 38.
- Martire, L., Bertok, C., D'atri, A., Perotti, E. and Piana, F., 2014- Selective dolomitization by syntaxial overgrowth around detrital dolomite nuclei: a case from the Jurassic of the Ligurian Brianonnais (Ligurian Alps). J. Sediment. Res. 84, 40- 50.
- Moradi, M., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A. and Khanebad, M., 2019- Relationship between depositional facies and reservoir characteristics of the Oligo-Miocene Asmari Formation, Aghajari Oil field, SW Iran. Geopersia 9 (1), 21- 41.
- Moradi, M., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Khanebad, M. and Ghabeishavi, A., 2017- Rock typing using Geological and Petrophysical data in the Asmari reservoir, Aghajari Oilfield, SW Iran. J. Pet. Sci. Eng. 152, 523- 537.
- Raiswell, R., Newton, R., Bottrell, S. H., Coburn, P. M., Briggs, D. E. G., Bond, D. P. G. and Poulton, S. W., 2008- Turbidite depositional influences on the diagenesis of Beecher's Trilobite Bed and the Hunsreck Slate; sites of soft tissue pyritization. Am. J. Sci. 308, 105- 129.
- Sibley, D. F. and Gregg, J. M., 1987- Classification of dolomite rock textures. J. Sed. Pet., 57, 967- 975.
- Vandeginste, V., John, C. M. and Manning, C., 2013- Interplay between depositional facies, diagenesis and early fractures in the Early Cretaceous Habshan Formation, Jebel Madar, Oman. Mar. Pet. Geol. 43, 489- 503.
- Zaid, S. M., 2012- Provenance, diagenesis, tectonic setting and geochemistry of Rudies sandstone (lower Miocene), Warda Field, Gulf of Suez, Egypt. J. African Earth Sci. 66, 56- 71.
- Zhang, H., Ding, L., Wang, X., Wang, L., Wang, Q. and Xia, G., 2006- Carbonate Diagenesis Controlled by Glacioeustatic Sea-Level Changes: A Case Study from the Carboniferous-Permian Boundary Section at Xikou, China. J. China Univ. Geosci. 17, 103- 114.

Diagenesis and its effect on the reservoir quality of the Asmari Formation, Aghajari oil field, SW Iran

M. Moradi¹, R. Moussavi-Harami^{2*}, A. Mahboubi², M. Khanehbad³ and A. Ghabishavi⁴

¹Ph.D. Student, Department of Sedimentology and Sedimentary Petrology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

²Professor, Department of Sedimentology and Sedimentary Petrology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³Assistance, Department of Sedimentology and Sedimentary Petrology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

⁴Ph.D., National Iranian South Oil Company, Ahwaz, Iran

Received: 2018 March 21

Accepted: 2018 May 26

Abstract

The Asmari Formation is the main reservoir rock for the Aghajari oil field. It is composed of about 400-meter limestone, dolostone and interlayers of sandstones. Study of 1200 meters drilling cores, 2800 microscopic thin sections, 12 SEM analyses along with 125 routine core tests in 5 cored wells indicate that the Asmari Formation was effected by various diagenetic processes such as micritization, compaction, cementation, fracturing, dissolution and dolomitization. Some of these processes (e.g. dissolution, dolomitization and fracturing) have constructive effects on the reservoir quality and created wide variety of porosity types including vuggy, intercrystalline and channel in upper parts of the Asmari Formation. Destructive diagenetic processes (micritization, compaction and cementation) have destroyed pore spaces and make the lower parts of the Asmari (specially zone 5) to a non-reservoir unit. Porosity-permeability plots on the Lucia's diagram show sandstones and carbonates rocks with interparticle porosities have good reservoir qualities and always plot on upper parts of classes 1-3. Samples with fracture porosity mainly plot on upper part of class 1. This shows fractures has no considerable role in promoting the porosity, but they strongly increase permeability. Dolostones and the rocks with vuggy porosity have plotted on classes 2 and 3 (high porosity, relatively high permeability). Paragenetic secession of the Asmari Formation shows the diagenetic processes occurred syn-sedimentary on sea floor, after sedimentation during the low-deep burry and uplift. The results of this study can be useful in detection of reservoir zones, increasing of hydrocarbon production and enhanced recovery of this oilfield.

Keywords: Diagenesis, Lucia's diagram, Porosity, Aghajari oil field, Zagros basin.

For Persian Version see pages 33 to 42

*Corresponding author: R. Moussavi-Harami; E-mail: Moussavi@um.ac.ir