

تعیین کانی‌های رسی سازند مخزنی آسماری در میدان نفتی مارون

شادی محول^۱، گلناز جوزانی کهن^{۱*} و سهیلا اصلانی^۱

^۱گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

وجود کانی‌های رسی از هر نوع با هر میزان و الگوی توزیعی در چاه‌های هیدروکربنی، سبب ایجاد مشکلات عدیده‌ای در ارزیابی کیفی سازندها می‌شوند و بررسی این دسته از کانی‌ها اهمیت بالایی در صنایع بالادستی دارد. در این پژوهش با تلفیق نتایج مطالعات آزمایشگاهی ۱۵ نمونه مغزه سازند آسماری از یک چاه تولیدی واقع در میدان نفتی مارون واقع در جنوب باختر ایران به شناسایی کانی‌های رسی و الگوی توزیع پرداخته شده است. نتایج آنالیزهای پراش پرتوایکس و مطالعات میکروسکوپی نمونه‌ها نشان داد فازهای تشکیل دهنده اصلی شامل کوارتز (۷۲/۲٪-۱۴/۷٪)، کانی‌های کربناته (۶۵/۴٪-۳٪)، کانی‌های فرعی شامل پلاژیوکلاز (۶/۷٪-۰٪) و کانی‌های رسی (۴۴/۵٪-۳/۳٪) هستند. در برخی از نمونه‌ها کانی‌های سولفیدی و آهن‌دار (۲٪-۰٪) نیز شناسایی شد. با بررسی نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی مشخص شد که کانولینیت در محدوده طولی ۶/۵-۰/۷ میکرومتر، ایلیت از ۴/۰ تا ۶/۳ میکرومتر و در مواردی به صورت توفالی شکل با محدوده طولی ۷/۹ میکرومتر دیده شد که با سه الگوی پراکنده، پراکنده و پل‌زنده در طول سازند مخزنی حضور دارند که میزان کانی‌های یادشده از کمترین مقدار ۳/۳٪ تا بیشترین مقدار ۴۴/۵٪ متغیر است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

سازند آسماری

کانی‌های رسی

آنالیز XRD

آنالیز SEM/EDX

۱-پیش‌نویس

در نتیجه ایجاد مشکلات متعددی در عملیات حفاری شوند که از آن جمله می‌توان به ناپایداری دیواره چاه، هرزروی گل حفاری، تنگ شدن چاه، گیر کردن رشته حفاری، ریزش دیواره چاه، سیمان کاری ضعیف، افزایش گشتاور در رشته حفاری و غیره اشاره کرد (Muhammed et al., 2021). به منظور مقابله با این مشکلات که از آنها به نام مشکل رس یاد می‌شود، راهکارهای متعددی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از گل‌های حفاری با ترکیبات مختلف اشاره کرد. گفتنی است تاکنون هیچ کدام از ترکیبات گل نتوانسته‌اند مشکلات مربوط به حفاری زون‌های رسی را به‌طور کامل حل کنند (Vipulanandan and Mohammed et al., 2020).

مسئله شناخت نوع کانی‌های رسی از مسائل مهم و تأثیرگذار بر ارزیابی‌های بعدی از تولید مخازن هیدروکربنی است و در پژوهش‌های فراوانی به اهمیت شناسایی نوع کانی‌های رسی موجود در مخازن از دیدگاه‌های مختلفی مانند تأثیر نوع کانی‌های رسی بر تخلخل و تراوایی مخزن، بالا رفتن درجه اشباع آب کاهش ناپذیر، آسیب‌های سازندی، مشکلات ایجاد شده در حین حفاری، عملیات تزریق آب و ازدیاد برداشت، اشاره شده است (Wanjun, 2000; Jozanikohan, 2017; Ahmad et al., 2018; Kamal et al., 2019; Wang et al., 2020). وجود اغلب کانی‌های رسی در مخازن هیدروکربنی همراه با اثرات منفی بر کیفیت مخزن گزارش شده است، اما در مواردی که کانی رسی از نوع کلریت در مخازن ماسه‌سنگی وجود داشته باشد با ایجاد پوششی به دور دانه‌های کوارتز از تشکیل سیمان کوارتزی مضاعف جلوگیری می‌کند که این امر سبب بهبود کیفیت مخازن

ایران از جمله کشورهای دارای مخازن هیدروکربنی متعدد و متنوع محسوب می‌شود. از لحاظ تعداد مخزن و بدون در نظر گرفتن میزان ذخیره هیدروکربن، حدود ۹۰ درصد مخازن بزرگ ایران سنگ‌شناسی کربناته و ۱۰ درصد مابقی، ماسه‌سنگی می‌باشند که با توجه به پیچیدگی‌های سنگ‌شناسی مخازن کربناته مطالعات این دسته از مخازن با چالش‌های زیادی مواجه است (Nairn and Alsharhan et al., 1997). متغیرهای بسیاری بر خواص پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی تأثیر می‌گذارند که از جمله آنها می‌توان به نوع سیال موجود در حفره‌ها، نوع کانی‌های موجود، خواص پتروفیزیکی رس‌ها، نوع کانی‌های رسی و الگوی توزیع آنها در مخازن اشاره داشت. در میان این عوامل، کانی‌های رسی از هر نوع و هر میزانی با هر نوع الگوی توزیعی می‌توانند بر خواص مکانیکی و پتروفیزیکی مخزن تأثیر چشمگیری بگذارند (جوزانی کهن و همکاران ۱۳۹۶). کانی‌های رسی از نوع سیلیکاته با اندازه کمتر از ۲ میکرومتر با ساختار ورقه‌ای می‌باشند که این تعریف کماکان در منابع جدید کانی‌شناسی به همین صورت حفظ شده است (Viseras et al., 2010; Ihekwe et al., 2020; Zhou et al., 2020). کانی‌های رسی از جمله موادی هستند که در بیشتر سازندهای تخریبی حضور دارند و با شیمی متغیر خود سبب تغییر متغیرهای مخزنی شده و پتانسیل تولید از مخزن را کاهش می‌دهند. وجود کانی‌های رسی در توالی‌های مورد حفاری به دلیل تأثیر برخی عوامل مکانیکی مانند فشار گل حفاری، تنش‌های گرمایی، ضربه زدن و مکش به دلیل حرکت رشته حفاری یا حرکت پلاستیکی رس‌ها و عوامل شیمیایی مانند آپیوشی یا دفع آب نیز می‌تواند باعث تخریب رس‌ها و

متغیرهای مکانیکی همچون قدرت تراکمی تک محوره (UCS)، مدول یانگ (E) و نسبت پواسون و تخلخل و مقدار کانی‌های رسی انتخاب شد و نتیجه گرفتند که مقادیر زیاد کانی‌های رسی موجب کاهش چشم‌گیر مدول یانگ و مقادیر قدرت تراکمی تک‌محوره می‌شوند و افزایش مقدار کانی‌های رسی به مقدار کمی نسبت پواسون را افزایش می‌دهد (Roshan et al., 2018). همچنین تلفیق نتایج آنالیز کانی‌شناسی به روش پراش پرتوی ایکس، آنالیزهای شیمیایی به روش فلورسانس پرتوی ایکس و آنالیز تبدیل فوریه برای شناسایی نوع و میزان کانی‌های رسی در مخزن شوربچه به صورت موفقیت‌آمیز گزارش شده است (Jozanikohan and Nosrati Abarghoeei et al., 2022; Jozanikohan et al., 2016). استفاده از آنالیز XRD برای شناسایی نوع و میزان کانی‌های رسی، آنالیز SEM برای بررسی بافت و زمینه کانی‌های سازنده در دو چاه تولیدی دریایی واقع در خلیج مکرک به منظور شناسایی مکانیزم‌های آسیب چاه انجام شده است. براساس نتایج حاصل، آسیب در یکی از چاه‌های مورد مطالعه به دلیل وجود کانی ناپایدار کائولینیت به همراه سیال سازندی بر پایه آب بوده است که به شدت پایداری چاه را کاهش داده و یا اینکه حرکت ذرات میکروسکوپی رس به دلیل شوری زیاد آب دریا موجب مسدود شدن تخلخل و در نتیجه کاهش تراوایی و تولید در سازند ماسه‌سنگی شده است. در چاه دیگر به دلیل سیال تزریقی، نمک موجود در سیال با ایلیت واکنش داده که منجر به حرکت ایلیت و مسدود شدن گلوگاه‌های سازندی می‌شود که تراوایی عمودی را به شدت کاهش داده است (Radwan, 2020). بررسی تغییرات میزان کانی‌های و میزان آسیب به مخزن پس از عملیات تزریق آب در یک سازند ماسه‌سنگی با درجه تراوایی پایین با دو روش آنالیز XRD برای تعیین میزان کانی‌های رسی و SEM برای بررسی کیفی سازند و آسیب سازندی انجام شده است. با توجه به نتایج حاصل از آنالیز XRD، میزان کانی‌های رسی قبل از عملیات تزریق آب از کمترین میزان ۶/۷۸٪ تا بیشترین مقدار ۱۴/۱۴٪ در ماسه‌سنگ کم‌تراوا و بعد از تزریق تا میزان ۴۹/۷۹٪ افزایش داشت. با بررسی کانی‌های رسی به صورت دقیق‌تر، بیشترین کاهش در کانی‌های ایلیت، کلریت و ایلیت/اسمکتیت و کمترین کاهش در کائولینیت دیده شد و به دلیل ذره‌های درشت کائولینیت، این کانی در حین مهاجرت خود موجب مسدود شدن گلوگاه‌ها شده و در نتیجه پس از تزریق تراوایی سازندی کاهش چشمگیری پیدا می‌کند که در سازندهای سیلت استونی این کاهش تراوایی بسیار جدی گزارش شده است (این متغیر به مقدار ۲۱/۸۷٪- ۳۶/۸۹٪ کاهش یافته است که البته با افزایش تراوایی، شدت کاهش تراوایی و متعاقباً آسیب به سازند پس از عملیات تزریق آب بیشتر است (Zhou et al., 2021)).

با توجه به تاریخچه مطالعات کانی‌های رسی، حضور این کانی‌ها در بیشتر سازندهای نفتی اثبات شده است. تأثیر وجود این دسته از کانی‌ها بر متغیرهای مخزنی، عملیات حفاری و تولید از سازند قابل چشم‌پوشی نیست. شناسایی صحیح و دقیق این دسته از کانی‌ها و پیش‌بینی خطرهای عملیاتی همراه با آن‌ها، گامی عظیم برای پیشبرد عملیات حفاری، مراحل بعدی حفر و تولید از چاه و کاهش ریسک‌های عملیاتی است. در صورت تشخیص ندادن کانی‌های رسی، ممکن است در حین حفاری چاه ریزش کرده و هزینه‌های حفاری به صورت سرسام‌آوری افزایش پیدا کند. در تمامی مراحل عملیات حفاری و تولید از چاه، باید شناسایی صحیح این دسته از کانی‌ها صورت گیرد تا ریسک حفاری و هزینه‌های گزاف عملیات در صورت ریزش سازند کاهش داده شده و تولید هدفمند از چاه صورت گیرد. هدف از این مطالعه، شناسایی دقیق کانی‌های رسی سازند به لحاظ نوع، میزان و الگوی توزیع کانی‌های رسی در طول سازند مخزنی آسماری با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

۲- معرفی منطقه

میدان نفتی مورد مطالعه در این پژوهش میدان نفتی مارون است. این میدان، یکی از بزرگ‌ترین میادین نفتی جنوب ایران در حوضه زاگرس است که با طول و عرض به ترتیب ۶۷ و ۷ کیلومتر در محدوده جغرافیایی ۴۹ و عرض جغرافیایی ۳۱ در شمال

می‌شود (جوزانی کهن و همکاران، ۱۳۹۶). همین امر، لزوم مطالعات شناسایی دقیق نوع کانی‌های رسی را ضروری می‌سازد. مطالعه کمی و نیمه کمی کانی‌های رسی برخلاف تمامی روش‌های آزمایشگاهی و مدرن، همچنان یک چالش بزرگ در صنعت محسوب می‌شود، چون به دلیل ترکیبات مختلف شیمیایی، قابلیت جذب سطحی و ایجاد ساختارهای شیمیایی پیچیده و جهت‌یافتگی ترجیحی این دسته از کانی‌ها، شناسایی آنها امری دشوار است (Zhou et al., 2018). در اکتشاف منابع هیدروکربنی، رس‌ها به عنوان سنگ منشأ نیز عمل می‌کنند. همچنین به دلیل تراوایی ناچیز در مواردی می‌توانند به عنوان سنگ‌پوش عمل کنند و مانع خروج نفت از نفتگیر شوند. افزون بر این، سازندهای رسی گاهی به دلیل داشتن شکستگی می‌توانند نقش سنگ مخزن را نیز ایفا کنند. رس نفتی، سنگ رسوبی بسیار دانه‌ریز با تخلخل غیرمفید بالا و تراوایی کم بوده که دارای مواد آلی از نوع کروژن است (Conrad et al., 2020). از این رو، در یک سامانه نفتی مطالعه رس‌ها از نقطه نظر شناسایی انواع و الگوی توزیع آنها در مخازن حائز اهمیت است. کانی‌های رسی در سازند به سه الگوی ساختاری، نواری و پراکنده توزیع می‌شوند و باعث کاهش تخلخل و تراوایی می‌شوند. این دسته از کانی‌ها تخلخل‌های بزرگ را به ریزتخلخل‌ها تبدیل می‌کنند و موجب ایجاد فشار موینگی و تغییر آن می‌شوند (Zhang et al., 2020). توزیع پراکنده به سه ریخت‌شناسی پرکننده، پوشش‌دهنده و پل‌زننده در سازند توزیع می‌یابد که اگر توزیع پراکنده با ریخت‌شناسی پل‌زننده در سازند باشد بیشترین فشار موینگی و اگر ریخت‌شناسی پرکننده داشته باشد کمترین فشار موینگی دیده می‌شود (Zhang et al., 2020). پژوهشگران بسیاری مشخص کردند که مغزه‌های شامل کانی‌های رسی زمانی که محلول‌های آبی در میان آنها جریان یابند، دچار مقداری اختلالات در نفوذپذیری می‌شوند. این پدیده به عنوان "حساسیت آب" شناخته می‌شود و با حفظ غلظت بالای کاتیون K^+ در محلول‌های آبی، می‌توان از آسیب ناشی از وجود کانی‌های رسی جلوگیری کرد (Wang et al., 2019). در سازندهای دارای کانی‌های رسی سه فرایند موجب کاهش تراوایی و آسیب به سازند می‌شود. اگر کانی‌های رسی از کانی‌های متورم‌شونده باشند، در حین انبساطشان ذرات متصل به این کانی‌ها آزاد شده و با مهاجرت در سازند موجب انسداد منافذ و کاهش تراوایی می‌شوند. همچنین اگر تخلخل در نمونه‌ای کم باشد این کانی‌ها موجب کاهش تخلخل شدیدتری در نمونه می‌شوند. اگر کانی‌های رسی از دسته کانی‌های غیرمتورم باشند، در حین مهاجرت ذرات رسی در سازند منافذ مسدود و تخلخل و تراوایی کاهش می‌یابد. پس کانی‌های رسی با کاهش تراوایی ناشی از کاهش تخلخل و انسداد منافذ به سازند آسیب می‌زنند (Jozanikohan and Nosrati Abarghoeei, 2022). وجود کانی‌های رسی با هشت گروه هیدروکسیل، مانند کائولینیت و کلریت، به شدت بر اندازه‌گیری‌های تخلخل توسط نگار نوترون تأثیرگذار است، به‌طوری که تخلخل ظاهری نگار نوترون را ممکن است تا ۴۰ p.u بالا ببرند. حساسیت بالای نگار نوترون به وجود کانی‌هایی از جنس کلریت، کارایی این نگار در برآورد تخلخل را در حضور این کانی به شدت کاهش می‌دهد (Golab et al., 2010). متغیرهای مهم برای ارزیابی و شناسایی رس‌ها عبارتند از میزان تخلخل، نفوذپذیری، مقدار اشباع آب، کانی‌شناسی، مقدار کل کربن آلی و ویژگی‌های ژئومکانیکی و ژئوشیمیایی که با استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی و آنالیز مغزه قابل ارزیابی هستند (سلیمانی و زبیدی، ۱۳۹۳). بررسی تأثیر تورم کانی‌های رسی بر روی تراوایی مخازن با استفاده از کانی‌های رسی متورم‌شونده مونت‌موریلونیت و کانی‌های رسی غیر تورمی مانند کائولینیت نشان داد که به طور کلی وجود کانی‌های رسی چه از نوع متورم‌شونده چه از نوع غیرمتورم‌شونده، موجب کاهش تراوایی می‌شود. همچنین کانی‌های رسی متورم‌شونده در نمونه‌ای با تخلخل کمتر نسبت به نمونه‌های با تخلخل باعث کاهش تراوایی بیشتری می‌شوند (Aksu et al., 2015). در مطالعه‌ای دیگر، چهار نوع سنگ مختلف ماسه‌سنگی با مقادیر مختلف کانی‌های رسی و تخلخل به منظور بررسی رابطه بین

نمونه پودر شده روش تقسیم‌های متوالی نمونه معرف تهیه شد. شناسایی عمومی کلبه کانی‌های تشکیل‌دهنده و همچنین شناسایی اختصاصی کانی‌های رسی هر ۱۵ نمونه مغزه با استفاده از دستگاه پراش‌سنج پیشرفته Θ -2 مدل D8-Advance ساخت شرکت Bruker axS با تیوب مس با طول موج $K\alpha = 1/54 \text{ \AA}$ و ولتاژ ۴۰ کیلوولت و آمپراژ ۳۰ میلی‌آمپر در آزمایشگاه پرتو ایکس دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران انجام شد. مطالعات XRD در محدوده زاویه 2Θ برابر $40^\circ - 70^\circ$ درجه با سرعت زاویه‌ای $1/2^\circ$ درجه بر دقیقه روی نمونه‌های پودری با اندازه ۷۵ میکرومتر انجام شد که به صورت تصادفی در جانمونه‌ای ریخته شده بودند. نمودارهای حاصل با استفاده از نرم‌افزار Diffraction Plus، تفسیر شد و کانی‌های موجود در نمونه تعیین شد که این مرحله مرتبط با شناسایی عمومی تشکیل‌دهنده‌های موجود در نمونه‌ها انجام شد. برای شدت‌بخشی به پیک‌های ضعیف رس‌ها، ابتدا کلبه کانی‌های غیر رسی با روش‌های فیزیکی یا شیمیایی به شرحی که در ادامه گفته می‌شود، حذف شدند و سپس شناسایی اختصاصی کانی‌های رسی، در محدوده زاویه 2Θ برابر با $40^\circ - 4^\circ$ درجه با سرعت زاویه‌ای $1/2^\circ$ درجه بر دقیقه و مقایسه نمودار متفاوت نرمال، حرارت دیده تا درجه حرارت 550° درجه سانتی‌گراد و اشباع شده از اتیل‌گلیکول، محصول آماده‌سازی‌های مخصوص به شرح زیر روی نمونه‌های پودری (با ابعاد ۲-۳ میلی‌متر) انجام شد. مزیت استفاده از این اندازه برای شناسایی‌های تخصصی کانی‌های رسی، عدم وجود (یا وجود حداقل) کانی‌های مقاوم در برابر روش‌های حذف فیزیکی و شیمیایی در محدوده ابعادی رس‌هاست حذف کانی‌های غیررسی افزون بر شدت‌بخشی به پیک‌های ضعیف رس‌ها، سبب حذف اثرات منفی برخی کانی‌های همراه مانند پهن شدن پیک‌ها، افزایش زمینه، سیمان‌شدگی و عدم تفرق کانی‌های رسی می‌شود (جوزانی‌کهن، ۱۳۹۲). برای حذف مواد آلی و شستن نمونه‌ها از آب اکسیژنه ۳٪ استفاده شد. حذف کانی‌های غیر رسی مقاوم مانند کوارتز، فلدسپارهای قلیایی و پلاژیوکلازها از طریق تعلیق و ته‌نشینی ثقلی بر اساس قانون استوکس به روش فیزیکی و حذف کانی‌هایی مانند انواع کربنات‌ها (کلسیت و دولومیت) و کانی‌های تبخیری (انیدریت) با روش‌های شیمیایی به ترتیب با استفاده از استیک اسید ۲۰٪ و نمک طعام غلیظ (100 g/lit) و سپس شستشوی چندباره نمونه توسط سانتریفیوژ به منظور اطمینان از خروج اسید یا نمک از نمونه، انجام شد. ضرورت حذف انیدریت به این دلیل است که در کلیه مراحل استخراج و آماده‌سازی بخش رس، نمونه در آب ریخته می‌شود که در صورت وجود انیدریت بلافاصله به ژپس در محدوده شناسایی کانی‌های گروه کانولینیت تبدیل می‌شود (Bailey, 1980). اگرچه که نمی‌توان به طور ایده‌آل کلبه کانی‌های غیر رسی را حذف کرد، اما می‌توان درصد آنها را تا حد قابل توجهی کاهش داد. پس از حداقل سازی کانی‌های همراه، متفرق‌سازی رس‌ها که معمولاً به دلیل خاصیت چسبندگی به یکدیگر یا دیگر کانی‌ها صورت می‌گیرد، ضروری است. این کار با استفاده از یک متفرق‌کننده مناسب مانند محلول ۰/۱ درصد وزنی کالگون (سدیم هگزا متافسفات) با فرمول شیمیایی $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$ و قرار دادن نمونه روی صفحه لرزان با زمان‌های طولانی انجام شد. با انجام این دو مرحله (اسیدشویی و ته‌نشست)، بیشتر عناصر مزاحم به حداقل مقادیر خود می‌رسند. کانی‌های رسی (هدف مطالعه) به دلیل دارا بودن ساختار صفحه‌ای، دارای سرعت ته‌نشست بسیار پایینی نسبت به دیگر کانی‌های موجود در نمونه می‌باشند. سپس بخش رس استخراج شده توسط پیپت از بخش ۵ سانتی‌متری بالای استوانه مدرج پس از گذشت زمان مناسب بر اساس قانون استوکس، روی سه لام با ابعاد جا نمونه‌ای دستگاه پراش‌سنج ریخته شد و به آن به مدت ۲۴ ساعت فرصت داده می‌شود تا در محیط ایزوله و بدون گرد و غبار خشک شود. آماده‌سازی‌های ویژه شامل قرار دادن در دسی‌کاتور در دمای محیط، حرارت دادن تا دمای 550° درجه سانتی‌گراد و حمام اتیل‌گلیکول انجام شد (Brown, 1980). برای بررسی نمونه‌ها توسط SEM، با توجه به خروجی‌های حاصل از آنالیز XRD نمونه‌هایی که حاوی بیش از ۳۰٪ کانی‌های رسی بودند در

خاور شهر اهواز و در مجاورت میداین کوپال، آغاجاری، رامین، شادگان و رامشیر واقع است که در سال ۱۳۴۲ خورشیدی به روش لرزه‌نگاری دو بعدی کشف شد (سلیمانی و زبیدی، ۱۳۹۳) و مخزن‌های نفتی این میدان، آسماری، گروه بنگستان و خامی هستند (رحیمی‌پوستین‌دوز و همکاران، ۱۳۹۴).

سازند آسماری مهمترین سنگ مخزن میدان نفتی مارون است که غنی‌ترین مخزن نفتی ایران و یکی از مهمترین مخازن کربناته جهان به‌شمار می‌رود. سن سازند، الیگوسن پسین تا میوسن پیشین است و جوان‌ترین سنگ مخزن پهنه زاگرس به‌شمار می‌آید. سنگ مخزن آسماری، ذخایر نفت و گاز ۶۲ میدان نفتی را تأمین می‌کند که از میان آنها ۱۴ ابرمیدان و ۱۲ میدان عظیم در رده‌بندی جهانی طبقه‌بندی شده‌اند. این سازند به‌طور عمده از سنگ آهک و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. از دیرباز سازند به سه واحد «آسماری پایینی» به سن الیگوسن، «آسماری میانی» به سن میوسن پسین و «آسماری بالایی» به سن میوسن پیشین تقسیم می‌شود که بخش اعظم تخلخل و تروایی آن حاصل از شکستگی، درزه و شکاف سازندی است (علی‌پور، ۱۳۹۵). پهنه اول سازند آسماری به‌طور عمده از سنگ آهک‌های دولومیتی، آهک به همراه مقادیر جزئی انیدریت و در بخش‌هایی رسی و ماسه‌ای با بیشترین تراکم شکستگی است که ستبرای میانگین آن ۷۵-۶۰ متر است (فارسی‌مدان و همکاران، ۱۳۹۴). پهنه دوم شامل دولومیت و آهک‌های دولومیتی همراه با انیدریت است که در بخش‌های زیرین تبدیل به تناوبی از لایه‌های ماسه‌سنگ آهک، آهک‌ماسه‌ای و دولومیت می‌شود و میانگین ستبرای این پهنه ۱۰۰-۷۰ متر برآورد شده است. پهنه بخش پایینی سازند آسماری میانی را شامل شده و سنگ‌شناسی آن بیشتر سنگ آهک، دولومیت و در بخش‌های زیرین ماسه‌سنگی با میان‌لایه‌های آهکی و دولومیت ماسه‌ای و در بخش‌هایی لایه‌های نازک رس را داراست و ستبرای میانگین این پهنه به‌طور میانگین ۱۰۰-۸۰ متر است. پهنه چهارم بخش گسترده‌ای از «آسماری زیرین» را تشکیل می‌دهد و سنگ‌شناسی عمده آن آهک، آهک دولومیتی، ماسه‌سنگ، رس و مارن است که ستبرای میانگین آن ۱۵۰ متر است و پهنه پنجم بخش انتقالی میان سازندهای پابده و آسماری است و به‌طور عمده از آهک‌های رسی فشرده و رس‌های تیره رنگ گلوکونیته و پیریت‌دار تشکیل شده است و ستبرای این پهنه ۷۰-۶۵ متر است (آرین و محمدیان، ۱۳۸۹).

۳- مواد و روش‌های پژوهش

۳-۱- مواد

تعداد ۱۵ نمونه مغزه از بخش‌های کربناته- رسی مخزن آسماری میدان نفتی مارون که از ژرفای حدودی ۳۴۰۰ تا ۳۷۰۰ متری مخزن در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا پس از شستشوی مغزه، ابعاد نمونه‌های سنگی با استفاده از چکش به قطعاتی در ابعاد چند سانتی‌متری کاهش اندازه داده شد و برای مطالعات میکروسکوپ پلاریزان آماده شد و سپس مجدداً با استفاده از چکش زمین‌شناسی به ابعاد حدود چند میلی‌متری کاهش یافت و تا اندازه ۷۵ میکرومتر با دستگاه پولورایزر پودر و برای انجام آنالیز پراش پرتو ایکس آماده‌سازی شد. برای آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز تعداد ۷ نمونه به تصادف انتخاب و تا ۲ الی ۳ میلی‌متر کاهش اندازه یافت.

۳-۲- روش‌های مورد استفاده در پژوهش

در این پژوهش از مطالعه تیغه‌های نازک با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان، آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)، آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM/EDX) استفاده شد. مطالعات تیغه‌های نازک با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان Zeiss در آزمایشگاه کانی‌شناسی نوری دانشکده معدن پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران در دو نور عادی و پلاریزه با بزرگ‌نمایی‌های ۱۰۰ تا ۲۵۰ برابر روی نمونه‌های مغزه انجام شد. پس از عملیات پودر سازی نمونه‌ها، برای مطالعه کانی‌شناسی، از

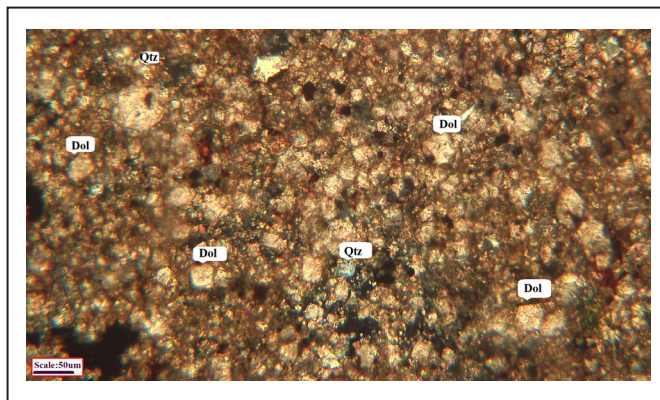
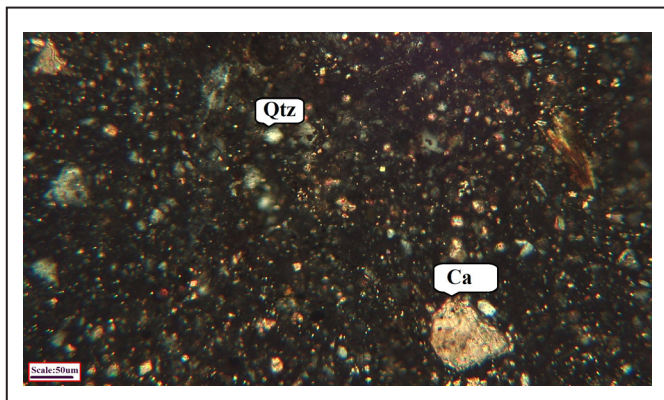
دارای بافت ریزبلورین و حاوی مقادیر بسیار زیادی آلومین می‌باشند. زمینه نمونه‌ها اغلب ریزدانه و از نوع سیلیسی - مارنی و درجه تبلور آن‌ها میکرواسپارایت است. خرده قطعات فسیلی و کوارتز به صورت فراوان در نمونه‌ها وجود داشته و در برخی آثار هیدروکربنی و کانی‌های اکسید آهن دیده می‌شود. حضور کانی‌های فیلسیلیکاته، قطعات بیتومینه، قطعات فسیلی، کانی‌های سیلیسی و کانی‌های کربناته نیز تأیید می‌شود. قطعات آواری سیلیس به صورت کوارتز در اندازه‌های سیلت به شکل پراکنده وجود داشته و بخشی از قطعات فسیلی از نوع فرامینفر به صورت حجره‌های درهم دیده می‌شود. آثار لامیناسیون ضعیف در نمونه‌ها مشهود و آثار هیدروکربوری در برخی بسیار کم دیده می‌شود. لکه‌های نیمه شفاف به دلیل وجود ترکیبات خاکی آهن و قطعات کدر پراکنده از مواد بیتومینه است که البته مقدار کانی‌های یادشده با شمارش آن‌ها در میدان‌های مختلف در حد ۲ الی ۳ درصد یا کمتر تعیین شد. در برخی از نمونه‌ها، به دلیل اختلاف در کانی‌شناسی و وجود فیلسیلیکات‌ها احتمال به وجود مونت‌موریلونیت و ایلیت می‌رود اما به دلیل تخلخل میکرو، وجود ایلیت محتمل‌تر است.

این مرحله از مطالعه برای اطمینان بیشتر از نتایج حاصل از آنالیز مرحله پیش انتخاب و در اندازه ۲ الی ۳ میلی‌متر خردایش شدند. برای شناسایی الگوی توزیع کانی‌های رسی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به آنالیز شیمیایی مدل Camscan-MV2300 ساخت جمهوری چک مستقر در دانشکده مواد، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران استفاده شد. ولتاژ مصرفی دستگاه در زمان تصویربرداری ۲۰ کیلوولت و ژرفای میدان حدود ۱۶/۳-۱۳ میلی‌متر انتخاب شد. نمونه‌ها در پلاک‌هایی به ابعاد $1 \times 1 \text{ cm}^2$ قرار گرفتند و سطح آن‌ها برای رسانا شدن چند راند با بخار طلا - پالادیم پوشش داده شد. در نهایت، به طبقه‌بندی مخزن با نگاه ویژه به نوع، میزان و الگوی کانی‌های رسی و سنگ‌شناسی سازندی پرداخته شد.

۴- نتایج

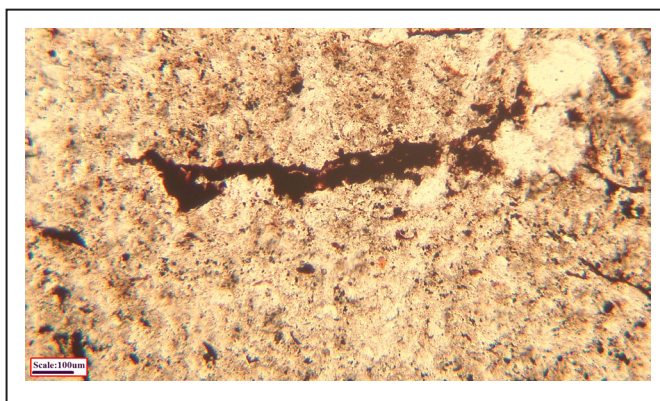
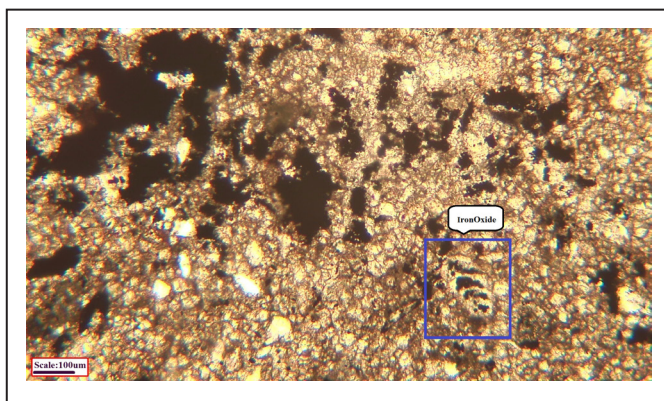
۴-۱- مطالعات تیغه‌های نازک

نتایج مطالعات تیغه‌های نازک (شکل‌های ۱ تا ۵) نشان داد که سنگ‌ها از نوع رسوبی - آواری بوده که با توجه به مطالعه میکروسکوپی، نمونه‌های مورد مطالعه



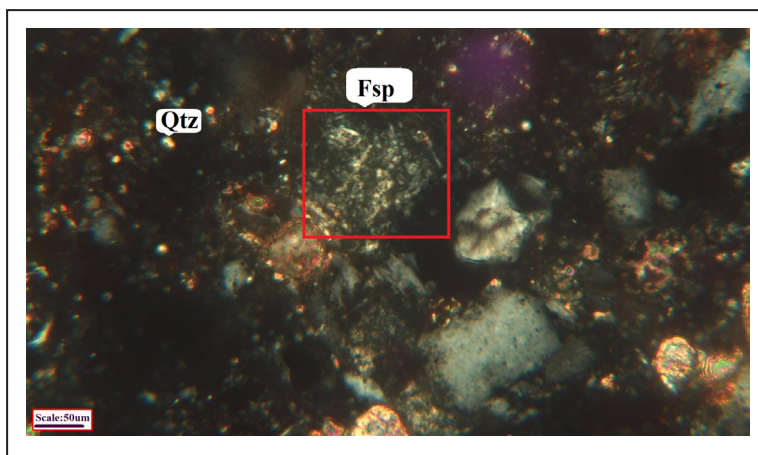
شکل ۲- تصویر گرفته شده از نمونه مخزنی در ژرفای ۳۵۴۳ متری با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر. نمونه حاوی زمینه ریزدانه مارنی - سیلیسی، حاوی کانی‌های رسی و کربناته فراوان به صورت پراکنده، قطعات سیلیسی فراوان و نشانه‌های هیدروکربنی و کانی‌های اکسید آهن در مقادیر پایین دیده می‌شود.

شکل ۱- تصویر گرفته شده از نمونه مخزنی در ژرفای ۳۴۶۶ متری با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر است که نمونه دارای زمینه مارنی - کربناته، قطعات فراوان کربناته، رسی و مقادیر متوسطی سیلیسی است که به صورت پراکنده در زمینه توزیع یافته‌اند.



شکل ۴- تصویر گرفته شده از مطالعه میکروسکوپی نمونه مخزنی با بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر. نمونه دارای زمینه ریزدانه سیلیسی - مارنی و مقادیر فراوان کانی‌های سیلیکاته، رسی و کانی‌های اکسید آهن به صورت پراکنده در زمینه توزیع یافته‌اند.

شکل ۳- تصویر گرفته شده از نمونه مخزنی در ژرفای ۳۴۶۶ متری با بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر. زمینه مارنی - سیلیسی دارای کانی‌های کربناته و سیلیکاته به صورت پراکنده و آثار هیدروکربنی دیده می‌شود.

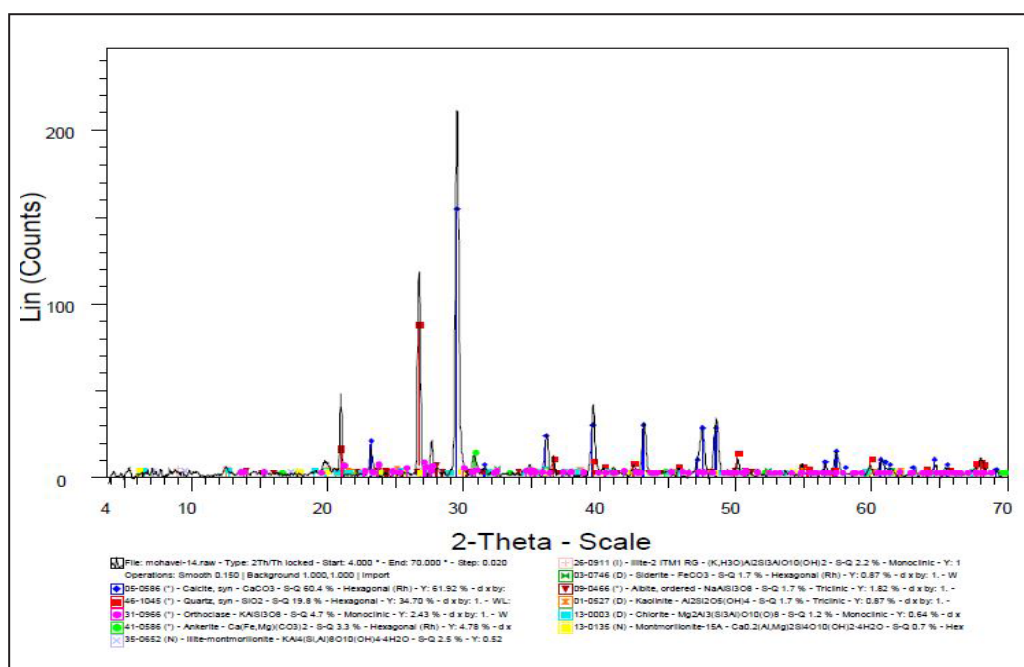


شکل ۵- تصویر گرفته شده از نمونه مخزنی با بزرگ‌نمایی ۵۰۰ برابر. نمونه دارای زمینه ماری، حاوی قطعات فلدسپار آغشته به کانی‌های رسی، قطعات سیلیسی آواری و کانی‌های کربناته است که به صورت پراکنده در زمینه توزیع یافته‌اند.

۲-۴- آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)

نمونه‌های مخزنی از ژرفاهای مختلف وجود کانی‌های سیلیکاته، کربناته، رسی، پلاژیوکلاز و در برخی از نمونه‌ها کانی‌های سولفیدی و آهن‌دار را نتیجه داد. مقادیر کانی‌های رسی اندک و در پیک‌های ضعیفی دیده می‌شوند و بلندترین پیک‌ها اغلب مربوط به کوارتز و دیگر کانی‌های غیر رسی (کانی‌های کربناته) هستند (شکل ۶).

بر طبق آنالیز اعمال شده، نمونه‌های مورد مطالعه شامل فازهای مختلفی مانند کوارتز، کلسیت، ایلیت، کانولینیت، کانی رسی مخلوط لایه، پلاژیوکلازها و در برخی از نمونه‌ها کانی‌های اکسید آهن و سولفیدی هستند. با توجه به آنالیز عمومی نمونه، مقدار کانی‌های رسی در نمونه بسیار پایین است. مطالعات عمومی آنالیز XRD



شکل ۶- آنالیز XRD عمومی از نمونه‌های پودری سازند آسماری.

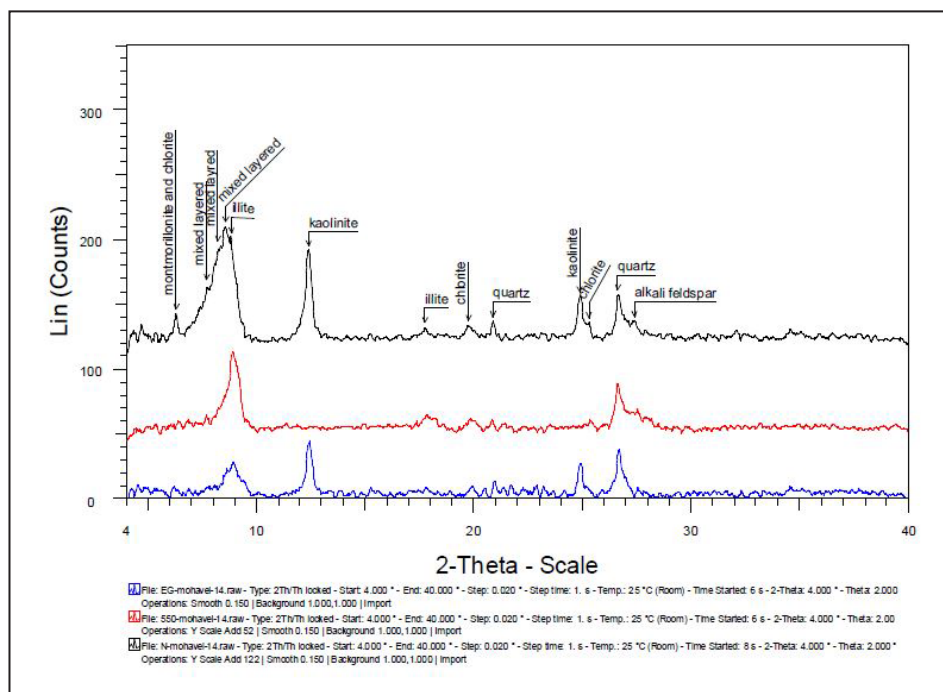
مقدار ۳/۸٪ تا بیشترین مقدار ۴۴/۵٪ متغیر هستند. مقایسه کمی کانی‌های رسی نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار شکل ۸ رسم شده و در جدول ۱ بر اساس تغییرات مجموع کانی‌های رسی و کد نمونه‌ها است.

به منظور مقایسه نتایج حاصل شده از آنالیز XRD و نمودارهای پرتوژی گاما، در ابتدا، بر اساس داده‌های نگار پرتوژی گاما چاه مورد مطالعه، کمترین مقدار پرتوژی گاما به عنوان خط ماسه تمیز (Sand Base Line) و بیشترین مقدار پرتوژی

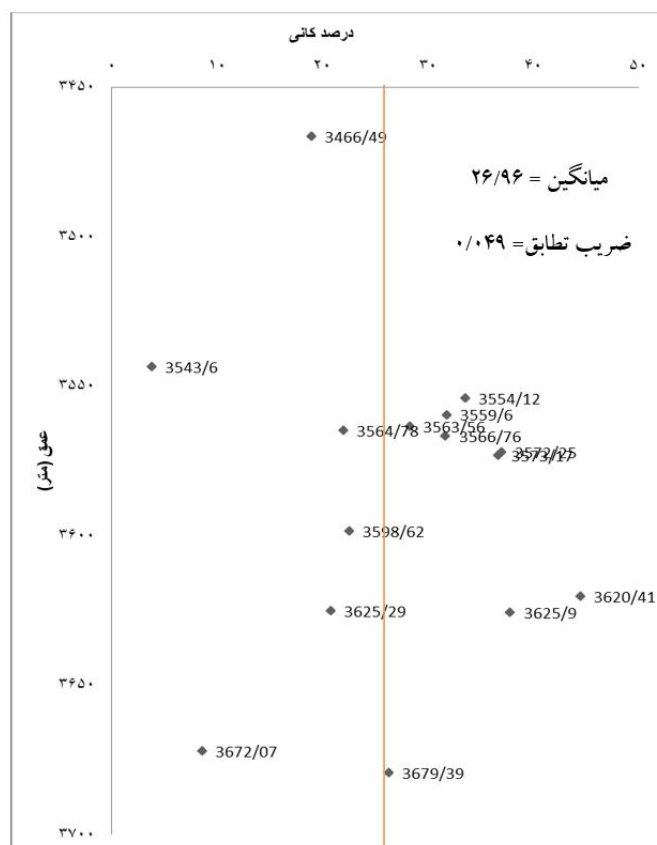
در ادامه برای شناسایی تخصصی کانی‌های رسی، به بررسی نمودارهای نرمال (نمودار مشکی رنگ شکل ۷) برای بررسی بهتر کانی‌های رسی و حداقل سازی کانی‌های غیر رسی، حرارت‌دیده تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد (نمودار قرمز رنگ شکل ۷) برای شناسایی کانولینیت و نمودار اشباع شده از اتیلن گلیکول (نمودار آبی رنگ شکل ۷) برای شناسایی رس‌های منبسط شونده پرداخته شد. نمونه‌های مورد مطالعه حاوی مقادیر متفاوتی از انواع کانی‌های رسی می‌باشند که از کمترین

حجم رس در بخش‌های آتی بررسی شود. با توجه به داده‌های نگار نمودار پرتوایی گاما، متغیر شاخص پرتوایی گاما بر اساس رابطه ۶ برای ۱۵ نمونه محاسبه شد که در آن IGR شاخص پرتوایی گاما، IGR_log قرائت نمودار پرتوایی گاما در هر نقطه، IGR_min کمترین مقدار قرائت شده نمودار پرتوایی گاما و IGR_max بیشترین مقدار قرائت شده نمودار پرتوایی گاما است.

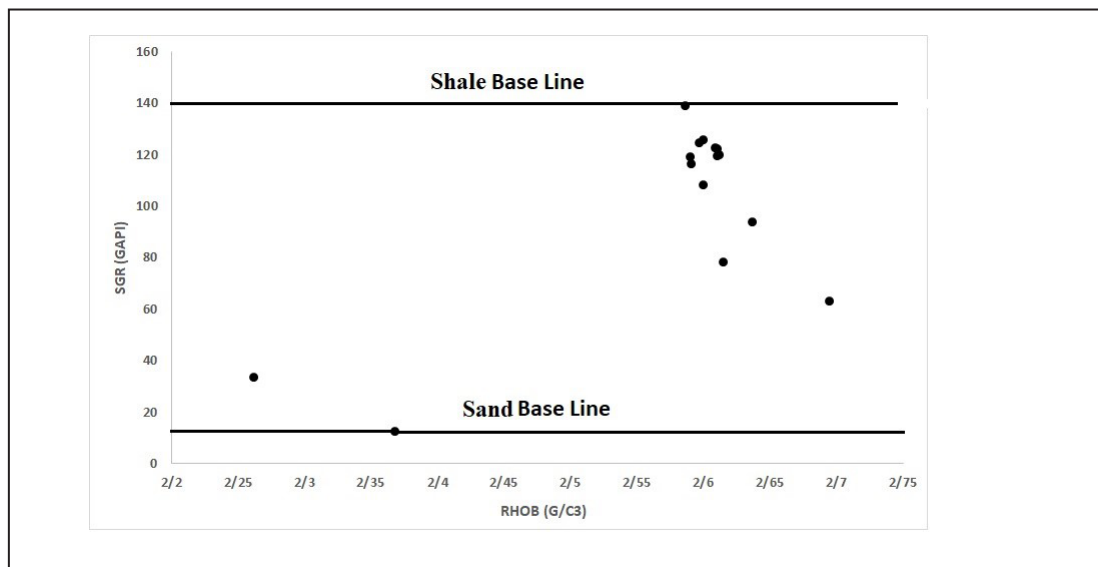
گاما به عنوان خط پایه رس (Shale Base Line) انتخاب شد. شکل ۹ تغییرات نمودار پرتوایی گاما ۱۵ نمونه مغزه مورد مطالعه در برابر چگالی را نشان می‌دهد. بازه نمونه‌های مورد مطالعه با توجه به نمودار ۱۰ به سمت خط پایه رس سوق دارد. با توجه به داده‌های موجود در این پژوهش، دو نمودار پرتوایی SGR و CGR موجود است که باید بستگی داده‌های آزمایشگاهی با هر دو نمودار برای محاسبات



شکل ۷- شناسایی تخصصی رس‌های نمونه پودری از سازند آسماری.



شکل ۸- چگونگی تغییرات درصد وزنی کانی‌های رسی برحسب ژرفا در نمونه‌های مورد مطالعه، حاصل از آنالیز XRD.



شکل ۹- بازه تغییرات نمودارهای گاما - چگالی در نمونه‌های مغزه.

جدول ۱- خلاصه درصد تغییرات کانی‌های رسی در نمونه‌های مورد مطالعه حاصل از آنالیز XRD.

نمونه	مجموع کانی‌های رسی (%)	نمونه	مجموع کانی‌های رسی (%)	نمونه	مجموع کانی‌های رسی (%)
A ₁	۳۶/۷	A ₆	۳۷	A ₁	۲۸/۳
A ₂	۲۶/۳	A ₇	۳۱/۷	A ₂	۳/۸
A ₃	۲۲	A ₈	۲۲/۶	A ₃	۱۹
A ₄	۳۳/۶	A ₉	۳۷/۸	A ₄	۸/۶
A ₅	۲۰/۸	A10 - A15	۳۱/۸	A ₅	۴۴/۵

تعیین شد (جدول ۴) و سپس با توجه به $\Delta 2\theta$ به دست آمده با استفاده از روابط خطی بین داده‌های جدول ۳، درصد ایلیت در کلیه نمونه‌ها برآورد شد. برای تعیین درصد ایلیت در تمامی نمونه‌ها، زاویه‌های نزدیک به دو محدوده از روی مرجع مرتبط پیدا شده و اختلاف دو زاویه (رابطه ۱) محاسبه می‌شود. برای تعیین درصد ایلیت در کانی رسی مخلوط لایه ایلیت/اسمکتیت معادله خط بین نقاط ستون اول (به عنوان متغیر وابسته) و نقاط ستون دوم (به عنوان متغیر مستقل) برقرار شد. مراحل محاسبه برای نمونه A ۶ در معادلات ۱ الی ۵ شرح داده شده است که درصد ایلیت برای این نمونه حدود ۸۶٪ برآورد شد. در جدول ۵ درصد ایلیت برآورد شده در کانی مخلوط لایه ایلیت/اسمکتیت برای تمامی نمونه‌ها تنظیم شده است.

با توجه به خروجی‌های جدول ۵، با افزایش ژرفای نمونه‌ها درصد ایلیت در کانی‌های رسی مخلوط لایه ایلیت/اسمکتیت افزایش می‌یابد که این یافته منطبق بر ژرفای نمونه‌ها (بیش از ۳ کیلومتر) است و با فرایند جهانی ایلیتی شدن (illitization) نیز تطابق دارد. در شکل ۱۱ منحنی تغییرات درصد ایلیت در برابر ژرفای نمونه‌های مورد مطالعه رسم شده است. درصد ایلیت در نمونه‌ها از کمترین مقدار ۷۲/۲٪ تا بیشترین مقدار ۸۸/۱۴٪ در کانی‌های رسی مخلوط لایه ایلیت/اسمکتیت سازنده نمونه‌ها متغیر است. یافته‌ها نشان‌دهنده عملکرد دیاژنزی تدفین در این سازند است.

$$\Delta 2\theta = 17.317 - 9.102 = 8.215$$

رابطه ۱

$$IGR = IGR_{log} - IGR_{min} / IGR_{msx} - IGR_{min}$$

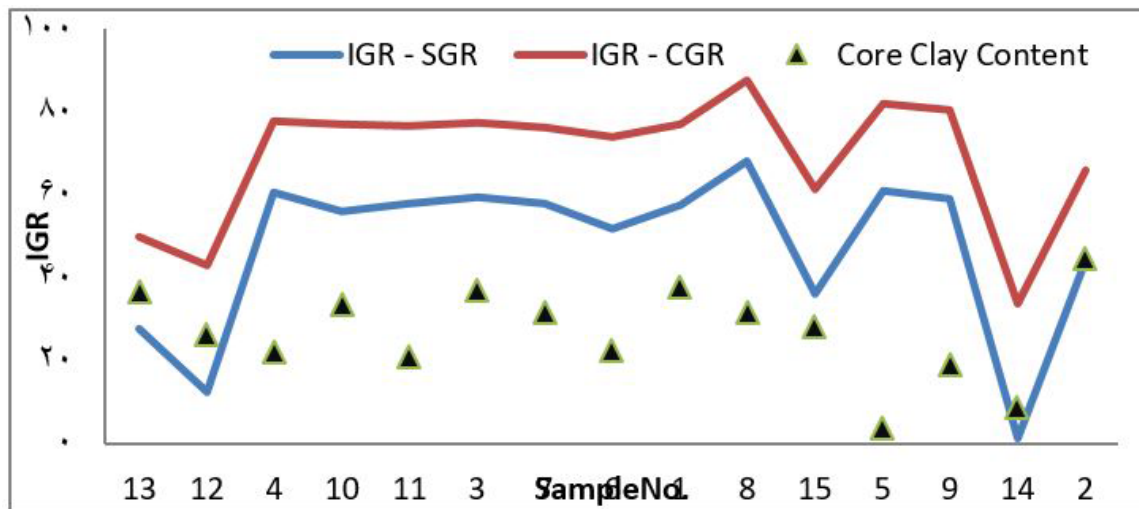
رابطه ۲

$$\text{شیب خط } 90 - 80 = 20/8.38 - 7.88$$

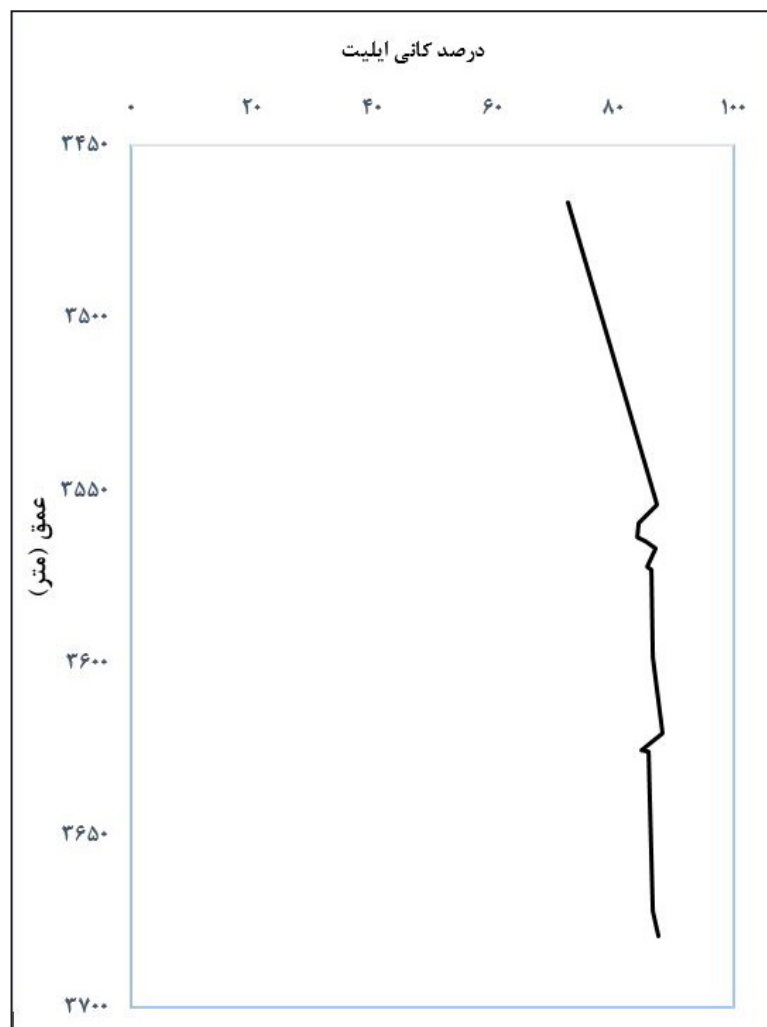
رابطه ۳

با توجه به درصد کانی‌های رسی نمونه‌های مورد مطالعه حاصل از آنالیز آزمایشگاهی XRD و پارامتر پرتوژی رسی محاسبه شده، مطابق شکل ۱۰ نتایج حاصل از آنالیز XRD نمونه‌ها با پارامتر پرتوژی رسی محاسبه شده از نمودار SGR بستگی بیشتری نشان می‌دهد. با توجه به درصد کانی‌های به دست آمده از آنالیز XRD، میانگین، مد، میانه، انحراف معیار، کمترین و بیشترین مقدار کانی‌های سازنده نمونه‌ها در جدول ۲ تنظیم شده است.

تعیین درصد ایلیت در کانی مخلوط لایه ایلیت/اسمکتیت: ایلیت/اسمکتیت فراوان‌ترین، متنوع‌ترین و گسترده‌ترین کانی رسی مخلوط لایه در سنگ‌های رسوبی است و باید در شناسایی آن در مخازن هیدروکربنی دقت کافی داشت. بهترین روش آنالیز این است که الگوهای پراش حاصل از آماده‌سازی با محلول اتیلن گلیکول، حرارت دیده و نرمال مطالعه و با هم مقایسه شوند (جوزانی کهن، ۱۳۹۲). با افزایش ژرفا بر طبق فرایند جهانی ایلیتی شدن (Altaner and Ylagan, 1997)، درصد ایلیت در نمونه‌ها افزایش یافته و به دنبال آن با افزایش درصد ایلیت در نمونه‌ها، تداخل و تراوایی به شدت کاهش می‌یابد که این امر بیانگر پدیده دیاژنز است. در این مرحله از پژوهش، پس از مقایسه داده‌های $\Delta 2\theta$ در مکان‌های بازتاب‌های (۰۰۱) و (۰۰۲) نمودارهای پراش پرتوی ایکس نمونه‌های عمل‌آوری شده با اتیلن گلیکول (جدول ۲) و داده‌های جدول ۳ به نظر می‌رسد، بازه تغییرات درصد ایلیت در کانی مخلوط لایه ایلیت/اسمکتیت بین ۸۰ تا ۹۰ درصد تغییر می‌کند. برای تعیین درصد دقیق ایلیت در تمامی نمونه‌ها، زاویه‌های مرتبط با دو بازتاب (۰۰۱) و (۰۰۲) و همچنین اختلاف آنها



شکل ۱۰- بازه تغییرات پرتوزایی نمونه‌های مورد مطالعه با توجه به دو نمودار پرتوزایی گاما.



شکل ۱۱- منحنی تغییرات درصد ایلیت بر حسب ژرفا در کانی‌های مخلوط لایه ایلیت/اسمکتیت.

جدول ۲- بررسی درصد میانگین و پارمترهای آماری کانی‌های تشکیل دهنده نمونه‌های مورد مطالعه از سازند آسماری.

نوع کانی	مقدار بیشینه	مقدار کمینه	میانگین	مد	میان	انحراف معیار
کانی‌های رسی	۴۴/۵	۳/۸	۲۶/۹	-	۲۸/۳	۱۰/۷
کانی‌های کربناته	۶۵/۴	۳	۲۹/۳	۲۸/۷	۲۷/۴	۱۵/۲
کانی‌های سیلیکاته	۹۱/۲	۱۸/۸	۳۹/۶	۳۸/۹	۳۸/۹	۱۶/۰۴
کانی‌های سولفیدی	۷/۲	۰	۳/۷	۰	۳/۲	۲/۱۳
کانی‌های آهن‌دار	۲	۰	۰/۲	۰	۰	۰/۵۴

جدول ۳- اختلاف داده‌های مکان‌های بازتاب‌های (۰۰۱) و (۰۰۲) نمودارهای پراش پرتوی ایکس نمونه‌های عمل‌آوری شده با اتیلن گلیکول.

جدول ۴- مکان بازتاب‌های مفید (۰۰۱) و (۰۰۲) در نمودار پراش پرتوی ایکس عمل‌آوری شده با اتیلن گلیکول (جوزانی کهن، ۱۳۹۲).

درصد ایلیت	نوع بازتاب	2θ	d (Å)	Δ2θ
۸۰	بازتاب (۰۰۱)	۹/۱۷	۹/۶۴	۷/۸۸
۹۰		۹/۰۱	۹/۸۲	۸/۳۸
۸۰	بازتاب (۰۰۲)	۱۷/۰۵	۵/۲۰	۷/۸۸
۹۰		۱۷/۳۹	۵/۱۰	۸/۳۸

کد اختصاری نمونه	Δ2θ
A ₁₃	۷/۷
A ₄	۸/۲
A ₁₀	۸/۱
A ₁₁	۸/۰۸
A ₃	۸/۱
A ₇	۸/۲
A ₆	۸/۱
A ₁	۸/۲
A ₈	۸/۲
A ₁₅	۸/۳
A ₅	۸/۱
A ₉	۸/۱
A ₁₄	۸/۲
A ₂	۸/۲

جدول ۵- درصد ایلیت برآورد شده در نمونه‌های سازندی مورد مطالعه.

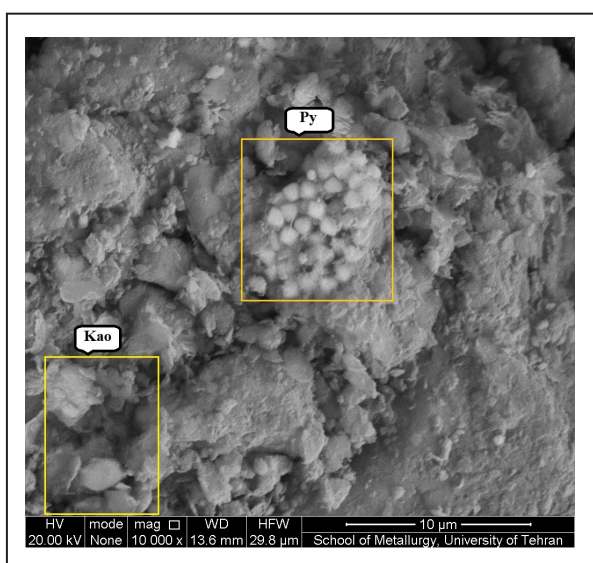
کد اختصاری نمونه	Δ2θ	درصد ایلیت تخمین زده شده	درصد کل کانی‌های رسی	کد اختصاری نمونه	Δ2θ	درصد ایلیت تخمین زده شده	درصد ایلیت تخمین زده شده
A ₁₃	۷/۷	۷۲/۴	۱۹	A ₁	۸/۲	۳۶/۷	۸۶/۳
A ₄	۸/۲	۸۷/۲	۳۳/۶	A ₈	۸/۲	۲۲/۶	۸۶/۷
A ₁₀	۸/۱	۸۴/۳	۳۱/۸	A ₁₅	۸/۳	۴۴/۵	۸۸/۱
A ₁₁	۸/۰۸	۸۴/۱	۳/۲۸	A ₅	۸/۱	۲۰/۸	۸۴/۷
A ₃	۸/۱	۸۵/۵	۲۲	A ₉	۸/۱	۳۷/۸	۸۵/۷
A ₇	۸/۲	۸۷/۱	۳۱/۷	A ₁₄	۸/۲	۸/۶	۸۶/۵
A ₆	۸/۱	۸۵/۶	۳۷	A ₂	۸/۲	۲۶/۳	۸۷/۵

۳-۴- مطالعه و آنالیز رس با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی

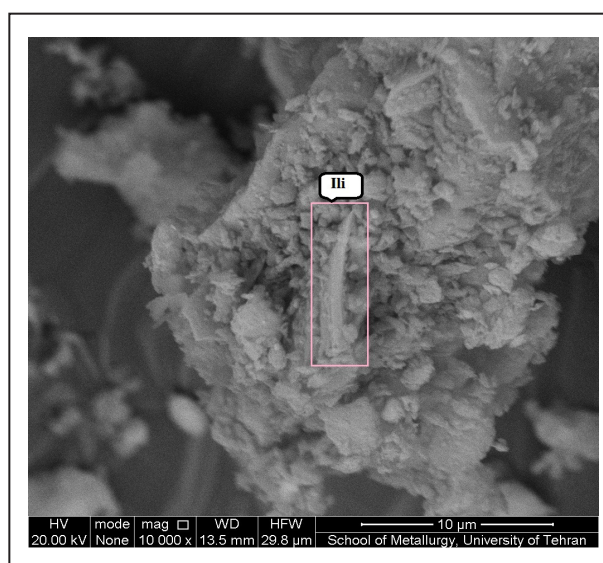
یکی از کاربردهای روش‌ها برای مطالعه دقیق بافت و کانی‌شناسی مغزه‌ها در مقیاس میکروسکوپی استفاده از آنالیز SEM/EDX است. بر اساس مطالعات حاصل از آنالیز SEM الگوهای توزیع کانی‌های رسی به صورت "پرکننده"، "پراکنده" و در مواردی الگوی "پل‌زننده" بین منافذ دیده شد. کانی کائولینیت به صورت صفحه‌ای و در مواردی به صورت کتابی، ایلیت به صورت توفالی و در برخی از نمونه‌ها به صورت مویی شکل و مونت‌موریلونیت به صورت "کنکریون" دیده شد. در شکل ۱۲، با توجه به تصویر گرفته شده از آنالیز SEM نمونه در ژرفای ۳۵۷۲ متری مخزن، ایلیت به صورت "توفالی" با طول ۷/۹ میکرومتر در مرکز شکل دیده می‌شود. همچنین کائولینیت در محدوده طولی ۵/۵-۰/۲ میکرومتر با دو الگوی "پرکننده" و "پراکنده"، پیریت و ایلیت به صورت "پراکنده" در خمیره وجود دارند. به طور کلی وجود ایلیت با الگوی پل‌زننده در هر نمونه مخزنی تخلخل ماکرو را به تخلخل میکرو تبدیل می‌کند که در این نمونه به دلیل وجود ایلیت با الگوی توفالی

و پل‌زننده تخلخل‌های میکرو وجود دارند. در شکل ۱۳، تصویر گرفته شده از آنالیز SEM نمونه مخزنی در عمق ۳۵۶۶/۷ متری از مخزن مورد مطالعه مشاهده می‌شود که تجمع کانی‌های پیریت با الگوی "کنکریون" در محدوده طولی ۵/۱ میکرومتر دیده می‌شود که این مقیاس در نمونه‌های دیگر (دو شکل ۱۴ و ۱۵) به صورت پراکنده در زمینه نمونه مشاهده شده است. در زمینه شکل، کائولینیت در محدوده طولی ۷/۵-۱/۲ میکرومتر و ایلیت با محدوده طولی ۳/۶-۰/۴ میکرومتر نیز به صورت "پراکنده" دیده می‌شود. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، تصاویر SEM گرفته شده از نمونه‌های مخزنی آنالیز مشاهده می‌شود که براساس آنها، نمونه‌ها متشکل از کانی‌های کائولینیت صفحه‌ای و ایلیت پراکنده در دو نمونه مخزنی از ژرفاهای مختلف هستند.

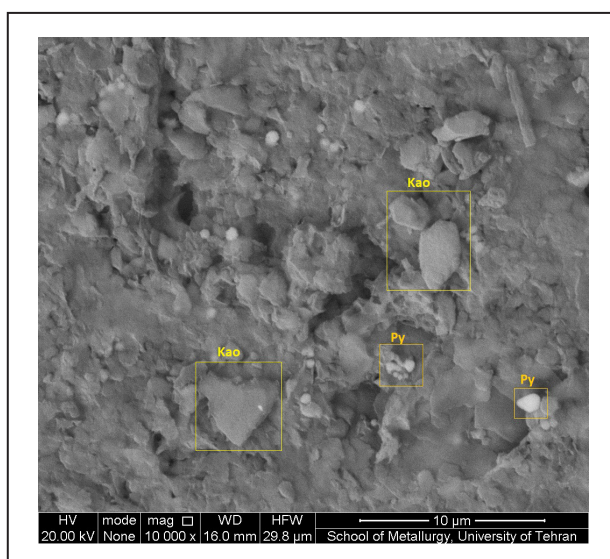
گفتنی است که مقیاس طولی اندازه‌گیری شده در تمامی نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار imageJ نسخه ۱/۵۲ انجام شده و بدیهی است که اعداد به صورت تقریبی همراه با درصدی خطا باشند.



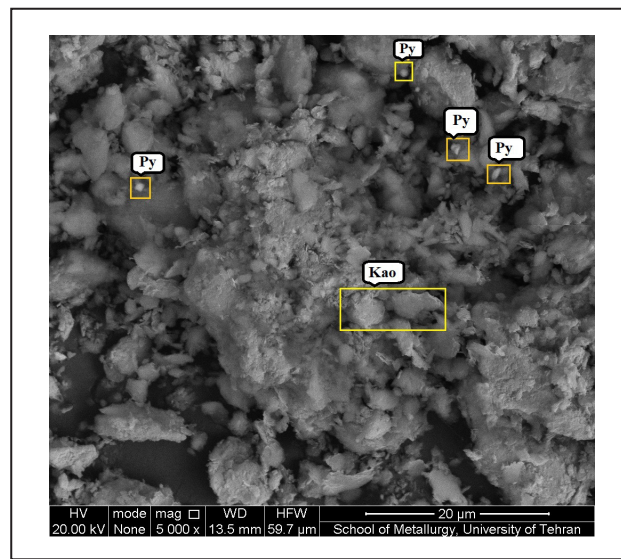
شکل ۱۳- تصویر گرفته شده از آنالیز SEM مخزنی با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر، ولتاژ ۲۰ کیلوولت و ژرفای میدان ۱۳/۶ میلی‌متر متشکل از کانی‌های پیریت با الگوی کنکریون و کائولینیت صفحه‌ای.



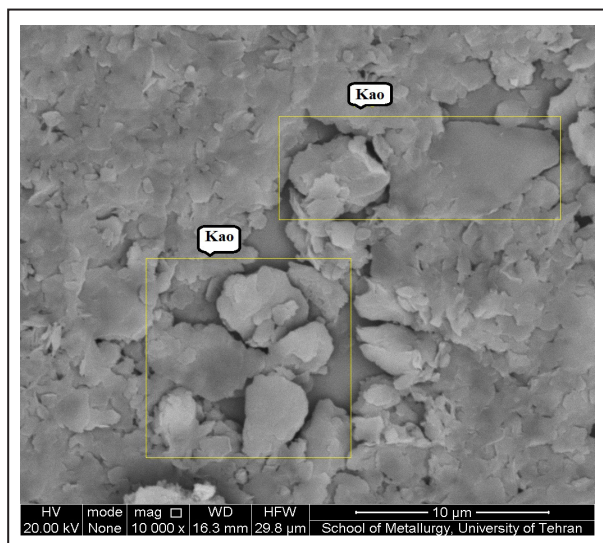
شکل ۱۲- تصویر حاصل از آنالیز SEM نمونه مخزنی با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر، ولتاژ ۲۰ کیلوولت و ژرفای میدان ۱۳/۵ میلی‌متر متشکل از کانی‌های کائولینیت صفحه‌ای و ایلیت توفالی.



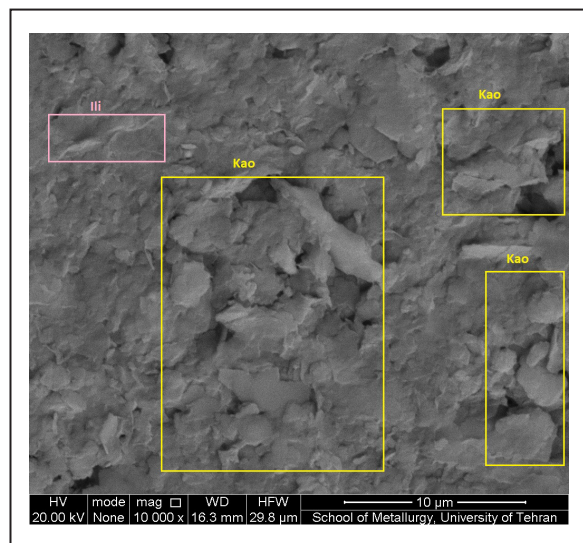
شکل ۱۵- تصویر گرفته شده از آنالیز SEM نمونه مخزنی با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر، ولتاژ ۲۰ کیلوولت و ژرفای میدان ۱۶ میلی‌متر متشکل از کانی‌های کائولینیت صفحه‌ای، ایلیت و پیریت پراکنده.



شکل ۱۴- تصویر گرفته شده از آنالیز SEM نمونه مخزنی با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر، ولتاژ ۲۰ کیلوولت و ژرفای میدان ۱۳/۵ میلی‌متر متشکل از کانی‌های کائولینیت صفحه‌ای، ایلیت و پیریت پراکنده.



شکل ۱۷- تصویر گرفته شده از آنالیز SEM نمونه مخزنی با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر، ولتاژ ۲۰ کیلوولت و ژرفای میدان ۱۶/۳ میلی‌متر متشکل از کانی‌های کانولینیت صفحه‌ای و ایلیت پراکنده.



شکل ۱۶- تصویر گرفته شده از آنالیز SEM نمونه مخزنی با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر، ولتاژ ۲۰ کیلوولت و ژرفای میدان ۱۶/۳ میلی‌متر متشکل از کانی‌های کانولینیت صفحه‌ای و ایلیت پراکنده.

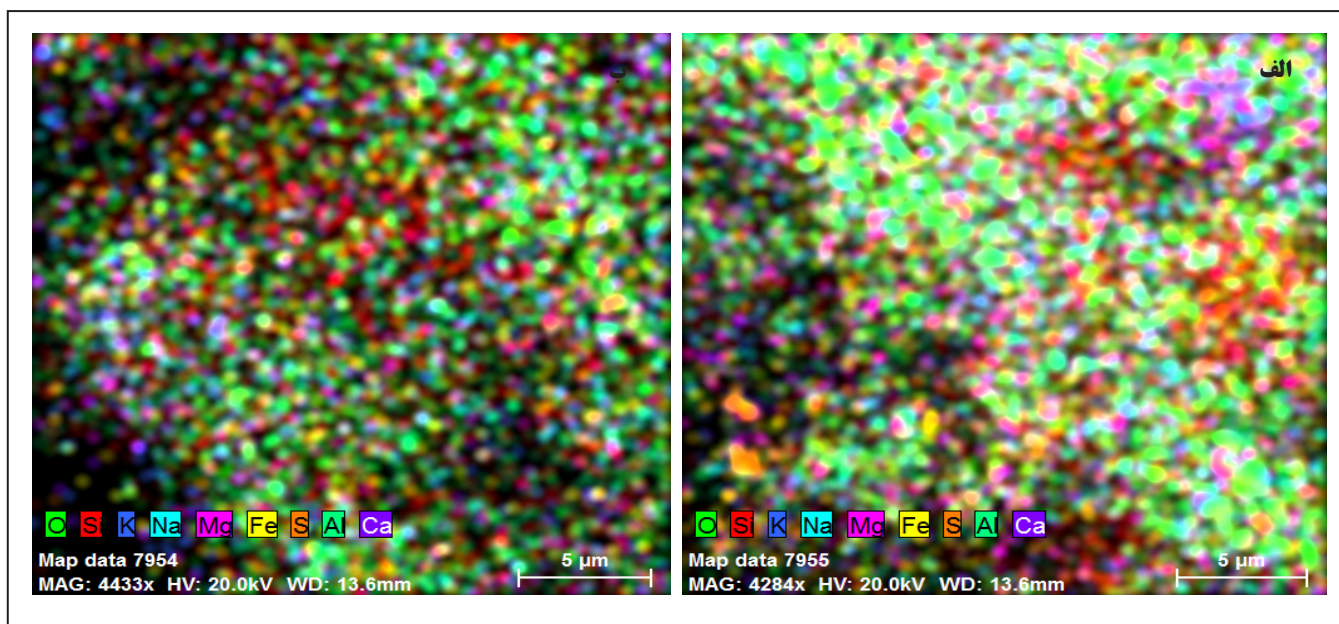
رسی می‌باشد، زیرا با تبدیل کردن تخلخل ماکرو به تخلخل میکرو و مسدود کردن خلل و فرج و کانال‌های ارتباطی، موجب کاهش تخلخل و تراوایی و کیفیت مخزنی می‌شود. همچنین به دلیل قدرت جذب آب توسط رس، درجه اشباع آب در سازند افزایش یافته و حرکت سیال کند می‌شود. این امر سبب تفسیر نادرست از کیفیت و درجه اشباع سیال مخزنی می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت مخزن در ژرفای مغزه‌گیری شده عموماً "نامناسب" است. با توجه به بالا بودن درصد ایلیت در نمونه‌ها نتیجه می‌شود که فرایند "دیاژنز" در مخزن "فعال" است، بنابراین انتظار می‌رود کیفیت مخزن در این ژرفاها کاهش یافته باشد. گفتنی است که در مطالعه میکروسکوپی تیغه‌های نازک نمونه‌ها تخلخل در برخی از نمونه‌ها سیمانی شده است (شکل ۳) که این امر نیز بیانگر پدیده "دیاژنز" و نتایج حاصل از این مرحله را تأیید می‌کند. با توجه به آنالیز عنصری نمونه‌ها، عنصر اکسیژن بیشترین درصد را در تمامی نمونه‌ها به خود اختصاص داده که در نمونه‌ای در ژرفای ۳۵۷۳ متری مخزن بیشترین درصد به چشم می‌خورد که با توجه به نتایج حاصل از آنالیز XRD این نمونه حدود ۴۱٪ کانی‌های سیلیکاته و ۳۷٪ کانی‌های رسی در فازهای سازنده خود دارد. بنابراین، بالا بودن درصد اکسیژن را می‌توان به بالا بودن درصد کانی‌های سیلیکاته و رسی در این نمونه نسبت داد. درصد دو عنصر سیلیسیم و آلومینیم کمتر از اکسیژن است و در رده‌های بعدی قرار دارند. با توجه به بیشتر بودن درصد این عناصر نسبت به دیگر عناصر، می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌ها کانی‌های سیلیکاته فراوان هستند و با توجه به ساختار کانی‌های رسی که از دسته کانی‌های سیلیکاته هستند، می‌تواند مهر تأییدی بر وجود کانی‌های رسی در این نمونه‌ها باشند و تأییدی بر نتایج حاصل از آنالیز XRD می‌باشد. همچنین حضور دو عنصر کلسیم و دولومیت وجود کانی‌های کربناته را اثبات می‌کند که با توجه به آنالیز XRD نمونه‌های مورد مطالعه درصد کل کانی‌های کربناته بیش از ۳۰٪ است.

آنالیز عنصری نیز در این بررسی‌ها برای اعتبارسنجی مشاهدات حاصل از آنالیز SEM، بررسی دقیق فازهای سازنده نمونه‌ها و احتمال رخداد پدیده "جذب سطحی" بر نمونه‌ها اعمال شد. با توجه به نقشه حاصل از آنالیز SEM/EDX نمونه‌ها (شکل‌های ۱۸- الف و ب)، تمامی نمونه‌ها حاوی عنصرهای اکسیژن، سیلیسیم، پتاسیم، منیزیم، آهن، گوگرد، آلومینیم، کلسیم هستند و در دو نمونه عنصر فسفر و سدیم نیز یافت شد.

عناصر سیلیسیم، اکسیژن و آلومینیم به دلیل وجود کانی‌های سیلیکاته، عناصر منیزیم و کلسیم به دلیل حضور کانی‌های کربناته در نمونه‌های تحت بررسی می‌باشد (شکل ۱۸). به دلیل احتراز از چسبندگی رس‌ها به یکدیگر و دیگر کانی‌ها، نمونه‌ها پیش از آنالیز SEM با یک متفرق‌کننده شیمیایی (سدیم هگزامتافسفات) آماده‌سازی شد. از این رو، وجود دو عنصر سدیم و فسفر نیز در آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی (جدول‌های ۶ و ۷)، احتمالاً به دلیل استفاده از همین متفرق‌کننده بوده است. در خروجی‌های حاصل از این آنالیز در بیشتر نمونه‌ها عناصر گوگرد و فسفر (احتمالاً مرتبط با حضور کانی پیریت) مشاهده شد، در حالی که آنالیز XRD به دلیل درصد کم این کانی که زیر حد تشخیص این روش می‌باشد، آن را تشخیص نداد. به طور کلی نتایج حاصل از آنالیز SEM در این پژوهش مکمل نتایج حاصل از آنالیز XRD بود. زیرا آنالیز XRD الگوی توزیع کانی‌ها و درصد‌های کم (کمتر از ۳٪) را تشخیص نمی‌دهد و می‌توان از آنالیز SEM برای اطمینان بیشتر از یافته‌های آنالیز XRD کمک گرفت.

۵- بحث

براساس مشاهدات آنالیز SEM/EDX در نمونه‌های مخزنی مورد مطالعه، کانی‌های رسی با سه الگوی پرکننده، پل‌زننده و پراکنده توزیع یافته‌اند که الگوی پراکنده در تمامی نمونه‌ها دیده شد. این الگو مخرب‌ترین نوع الگوی کانی‌های



شکل ۱۸- الف) آنالیزهای عنصری (EDX) دو میدان از نمونه‌های مخزنی با بزرگ‌نمایی‌های ۴۲۸۴ برابر و ب) ۴۴۳۳ برابر. در هنگام اندازه‌گیری، ولتاژ ۲۰ کیلوولت و ژرفای میدان ۱۳/۶ میلی‌متر انتخاب شده است. آنالیزها نشان می‌دهد نمونه‌ها حاوی عنصرهای اکسیژن، سیلیسیم، پتاسیم، سدیم، منیزیم، آهن، گوگرد، آلومینیم و کلسیم که هریک با رنگ‌های مختلف نشان داده شده‌اند.

جدول ۶- درصد عناصر سازنده نمونه مخزنی در شکل ۱۸ - الف، حاصل از آنالیز EDX.

نوع عنصر	درصد وزنی	نوع عنصر	درصد وزنی
اکسیژن	۴۸/۳۰	کلسیم	۱/۲۵
سیلیسیم	۲۶/۴۶	منیزیم	۰/۹۹
آلومینیم	۱۲/۷۰	گوگرد	۰/۸۵
پتاسیم	۵/۱۹	فسفر	۰/۳۱
آهن	۴/۶۱	سدیم	۰/۱۹

جدول ۷- درصد عناصر سازنده نمونه مخزنی در شکل ۱۸ - ب از آنالیز EDX.

نوع عنصر	درصد وزنی	نوع عنصر	درصد وزنی
اکسیژن	۵۰/۹۶	منیزیم	۱/۳۵
سیلیسیم	۲۳/۵۸	سدیم	۱/۱۶
آلومینیم	۱۴/۸۷	گوگرد	۰/۹۵
پتاسیم	۴/۴۰	کلسیم	۰/۶۱
آهن	۲/۸۱	فسفر	۰/۲۶

۶- نتیجه‌گیری

در هر بخش از مطالعات صورت گرفته نتایجی حاصل شد که مکمل و در تطابق با یکدیگر هستند که با جمع‌بندی تمام نتایج میزان، نوع و الگوی کانی رسی در کنار دیگر کانی‌های حاضر در سازند طبقه‌بندی شد. با بررسی مطالعات میکروسکوپی تیغه‌های نازک تهیه شده از نمونه‌ها نتیجه شد که نمونه‌ها دارای خمیره مارنی - سیلیسی و قطعات فسیلی بسیار زیاد، کانی‌های سیلیکاته و فیلسیلیکاته، کانی‌های کربناته و اکسید آهن و کانی‌های رسی می‌باشند. همچنین، در مواردی آثار هیدروکربنی در آنها دیده شد. بررسی‌های حاصل از آنالیز XRD وجود کانی‌های سیلیکاته، کربناته و رسی را اثبات کرد و براساس طبقه‌بندی حجم رس در این آنالیز، سازند به چهار گروه شامل ماسه‌سنگ، ماسه - شیلی، شیلی - ماسه‌سنگی و شیلی تقسیم‌بندی شد. براساس درصد ایلیت در کانی‌های مخلوط لایه ایلیت/اسمکتیت نتیجه شد که فرایند دیاژنز در سازند فعال است. با بررسی کانی‌های رسی موجود در سازند با توجه ویژه به آنالیز XRD و آنالیز SEM/EDX نتیجه شد که کانی‌های رسی به مقدار زیاد با سه الگوی پراکنده، پرکننده و پل‌زننده در سازند حضور دارند. با تلفیق تمامی نتایج حاصل از مطالعات صورت گرفته در طول مخزنی به طور کلی در ژرفاهای محدودی کیفیت مخزن "پایین" تعیین شده است. به عنوان مثال در ژرفای

۳۶۲۰ الی ۳۶۳۰ متری از مخزن برطبق خروجی‌های آنالیز XRD، کانی‌های کربناته و رسی بیشترین کانی‌های سازنده نمونه‌ها در این ژرفا هستند که کانی‌های رسی با الگوهای "پرکننده"، "پراکنده" و "پل‌زننده" در طول سازند مخزنی توزیع شده‌اند. در چنین شرایطی کیفیت سازندی "پایین" تلقی می‌شود. در ژرفاهای ۳۴۰۰ الی ۳۶۰۰ متری خروجی‌های XRD کانی‌های کربناته و سیلیکاته را با بیشترین درصد بین دیگر کانی‌های سازنده نمونه‌ها معرفی کرده‌اند که البته درصد کانی‌های رسی با الگوهای توزیع "پرکننده" و "پراکنده" قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد اما با توجه به تلفیقی از نتایج کیفیت چاه تولیدی مورد مطالعه در سازند آسماری میدان مارون با کیفیت متوسط تا خوب معرفی می‌شود که سنگ‌شناسی مخزن تلفیقی از ماسه‌سنگ - کربناته - رسی تعیین می‌شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مایلند مراتب سپاس خود را به آزمایشگاه اشعه ایکس، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران به جهت انجام آنالیزهای صحیح و دقیق دستگاهی استفاده شده در این تحقیق ابراز دارند.

کتابنگاری

- آرین، م. و محمدیان، ر.، ۱۳۸۹، تحلیل شکستگی‌های مخزن آسماری میدان نفتی مارون (زاگرس)، نشریه علمی- پژوهشی علوم زمین، دوره ۲۰، شماره ۷۸، ۹۶-۸۷.
- جوزانی کهن، گک.، ۱۳۹۲، شناسایی کانی‌های رسی به روش طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس، مؤسسه انتشارات ستایش، ۱۵۰ ص.
- جوزانی کهن، گک.، نوروزی، غ.ح.، معاریان، ح.، سحابی، ف.، ۱۳۹۶، اهمیت کانی‌های رسی در مخازن هیدروکربنی، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۱۲، شماره ۳۶، ۵۸-۳۵.
- رحیمی پوسین دوز، آ.، خوشبخت، ف.، و نبی‌بهدندی، م.، ۱۳۹۴، ارزیابی پتروفیزیکی و زون‌بندی سازند آسماری در یکی از چاه‌های جنوب غرب ایران، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی، دوره ۴.
- سلیمانی، ب.، و زبیدی، ج.، ۱۳۹۳، بررسی شیل‌های مشکل‌ساز سازندهای پابده و گورپی با استفاده از روش‌های XRD، XRF و NGS در میدان نفتی کارون و ارائه گل بهینه حفاری، مجله ژئوشیمی، دوره دوم، شماره سوم، ۱۵۱-۱۴۲.
- علی‌پور، ر.، ۱۳۹۵، تحلیل شکستگی‌های سنگ مخزن آسماری در میدان نفتی مارون (جنوب باختر ایران)، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۲۰، ۶۲-۵۲.
- فارسی‌مدان، م.، مهدور، م.ر.، و کمالی، ز.، ۱۳۹۴، تحلیل سیستماتیک شکستگی‌های مخزن آسماری در میدان نفتی مارون (بر اساس تفسیر نتایج نمودارهای تصویرگر)، مجله زمین‌شناسی نفت ایران، دوره ۵، شماره ۹، ۲۱-۱.

References

- Ahmad, K. M., Kristály, F., Turzo, Z., and Dócs, R., 2018. Effects of clay mineral and physico-chemical variables on sandstone rock permeability. *J Oil Gas Petrochem Sci*, 1(1), 18-26.
- Aksu, I., Bazilevskaya, E., and Karpyn, Z. T., 2015. Swelling of clay minerals in unconsolidated porous media and its impact on permeability, *GeoResJ*, 7(1), 1-13.
- Altaner, S. P., and Ylagan, R. F., 1997. Comparison of structural models of mixed-layer illite/smectite and reaction mechanisms of smectite illitization. *Clays and Clay Minerals*, 45(4), 517-533.
- Bailey, S. W., 1980. Structures of layer silicates. *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*, 1-123.
- Brown, G., 1980. X-ray diffraction procedures for clay mineral identification. *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*, 305-359.
- Conrad, C. L., Yin, Y. B., Hanna, T., Atkinson, A. J., Alvarez, P. J., Tekavec, T. N., ... and Wong, M. S., 2020. Fit-for-purpose treatment goals for produced waters in shale oil and gas fields. *Water research*, 173, 115467.
- Golab, A. N., Knackstedt, M. A., Averdunk, H., Senden, T., Butcher, A. R., and Jaime, P., 2010. 3D porosity and mineralogy characterization in tight gas sandstones, *The Leading Edge*, 29(12), 1476-1483.
- Ihekwe, G. O., Shondo, J. N., Orisekeh, K. I., Kalu-Uka, G. M., Nwuzor, I. C., and Onwualu, A. P., 2020. Characterization of certain Nigerian clay minerals for water purification and other industrial applications. *Heliyon*, 6(4), e03783.
- Jozanikohan, G., Sahabi, F., Norouzi, G. H., Memarian, H., and Moshiri, B., 2016. Quantitative analysis of the clay minerals in the Shurijeh Reservoir Formation using combined X-ray analytical techniques. *Russian Geology and Geophysics*, 57(7), 1048-1063.
- Jozanikohan, G., 2017. On the development of a non-linear calibration relationship for the purpose of clay content estimation from the natural gamma ray log. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1), 1-18.
- Jozanikohan, G., and Nosrati Abarghoeei, M., 2022. The Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis for the clay mineralogy studies in a clastic reservoir. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 1-14.
- Kamal, M. S., Mahmoud, M., Hanfi, M., Elkatatny, S., and Hussein, I., 2019. Clay minerals damage quantification in sandstone rocks using core flooding and NMR. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9(1), 593-603.
- Nairn, A. E. M., and Alsharhan, A. S., 1997. *Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East*. Elsevier.
- Radwan, A. E., 2020. Effect of clay minerals in oil and gas formation damage problems and production decline: A case study, Gulf of Suez, Egypt. *AAPG/datapages*.
- Roshan, H., Masoumi, H., Zhang, Y., Zarzor, A., Al-Yaseri Iglauer, S., Lebedev, M., and Sarmadivaleh, M., 2018. Microstructural Effects on Mechanical Properties of Shaly Sandstone, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144 (2).
- Vipulanandan, C., and Mohammed, A., 2020. Effect of drilling mud bentonite contents on the fluid loss and filter cake formation on a field clay soil formation compared to the API fluid loss method and characterized using Vipulanandan models. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 189, 107029.
- Viseras, C., Cerezo, P., Sanchez, R., Salcedo, I., and Aguzzi, C., 2010. Current challenges in clay minerals for drug delivery. *Applied Clay Science*, 48(3), 291-295.

- Wang, B., Qin, Y., Shen, J., Wang, G., Zhang, Q., and Liu, M., 2019. Experimental study on water sensitivity and salt sensitivity of lignite reservoir under different pH. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 172, 1202-1214.
- Wang, R., Shi, W., Xie, X., Zhang, W., Qin, S., Liu, K., and Busbey, A. B., 2020. Clay mineral content, type, and their effects on pore throat structure and reservoir properties: Insight from the Permian tight sandstones in the Hangjinqi area, north Ordos Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 115, 104281.
- Wanjun, F., 2000. Influence of clay minerals on sandstone reservoir properties [j]. *Journal of Palaeogeography*, 3.
- Zhang, J., Tang, Y., He, D., Sun, P., and Zou, X., 2020. Full-scale nanopore system and fractal characteristics of clay-rich lacustrine shale combining FE-SEM, nano-CT, gas adsorption and mercury intrusion porosimetry. *Applied Clay Science*, 196, 105758.
- Zhou, G., Gu, Z., Hu, Z., Chang, J., Duan, X., Liu, X., Li, Y. and Zhan, H., 2020. Characterization and interpretation of organic matter, clay minerals, and gas shale rocks with low-field NMR. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195, p.107926.
- Zhou, Y., Yang, W., and Yin, D., 2022. Experimental investigation on reservoir damage caused by clay minerals after water injection in low permeability sandstone reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(4), 915-924.
- Muhammed, N. S., Olayiwola, T., and Elkatatny, S., 2021. A review on clay chemistry, characterization and shale inhibitors for water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 206, 109043.

Original Research Paper

The Clay Minerals Identification of Asmari Reservoir Formation in Maroun Oilfield

Shadi Mohavel¹, Golnaz Jozanikohan^{1*} and Soheila Aslani¹¹Department of oil Engineering, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2021 May 17

Accepted: 2022 April 04

Available online: 2022 December 22

Keywords:

Asmari Formation

Clay Minerals

XRD analysis

SEM/EDX analysis

ABSTRACT

The presence of clay minerals of any type, amount or distribution pattern in hydrocarbon wells causes numerous problems in the formation evaluation. In this research, 15 core samples from Asmari Formation in the Maroun Oilfield were selected in order to study the type and distribution pattern of clay minerals by laboratory investigations. The XRD and microscopic results showed the studied samples consisted mainly of quartz (14.7-72.2%) and carbonate minerals (3.0-65.4%) as main constituent phases; while the plagioclase (0.0-6.7%) and clay minerals (3.3-44.5%) were identified as the main accessory minerals. In some samples, sulfide and ferrous minerals (0.0-2%) were also identified. The calculated percentage of illite in mixed-layer smectite/illite showed the diagenesis has occurred at different depths of reservoir. The SEM/EDX analysis performed on various types of clay minerals showed that kaolinite size varied from 0.7 to 6.5 μm in studied samples. In addition, Illite size ranged in our studied samples from 0.4 to 3.6 μm . Our results indicate that the clays in the Asmari Formation occur in three main patterns as dispersed, pore-bridging and pore-filling with the variation of the total amount of clay minerals, min 3.3% and max 44.5% across the length of Asmari Formation.

* Corresponding author: Golnaz Jozanikohan; E-mail: gjkohan@ut.ac.ir

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/GSJ.2022.200949.1904 dor: 20.1001.1.10237429.1401.32.4.15.1