

ارزیابی محتوای رس سازند مخزنی شوربجه با استفاده از تجزیه‌های دستگاهی مغزه در میدان گازی گنبدلی، خاور کپه‌داغ

گلناز جوزانی کهن^{۱*}، فریدون سعابی^۲، غلامحسین نوروزی^۳ و حسین معاریان^۳

^۱ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استاد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۶

چکیده

انواع مختلف کانی‌های رسی به شیوه‌های گوناگون موجب کاهش کیفیت مخازن هیدروکربنی، اختلال در عملیات حفاری و همچنین سبب ایجاد مشکلاتی در امر تفسیر لاگ‌های چاه‌نگاری می‌شوند. از این رو، شناسایی و تفکیک آنها در صنعت بالادستی نفت اولویت و اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش، نوع، میزان و نحوه توزیع هریک از انواع کانی‌های رسی در ۷۶ نمونه مغزه دو چاه تولیدی و خشک در سنگ مخزن ماسه‌سنگی شوربجه، به سن کرتاسه آغازی، با استفاده از شش روش تجزیه دستگاهی یعنی روش‌های طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)، طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF)، مطالعات میکروسکوپی تیغه‌های نازک، تجزیه‌های حرارتی (DTA-TGA)، تجزیه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) تعیین شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که کانی‌های رسی چیره در این دو چاه به ترتیب فراوانی ایلیت، کلریت منیزیم‌دار و کائولینیت است که میزان متوسط هریک در چاه خشک به مراتب بیشتر از چاه تولیدی است. مقدار اندکی گلوکونیت (در هر دو چاه)، مونت‌موریلونیت (فقط در چاه تولیدی) و کانی‌های رسی مخلوط لایه از انواع ایلیت-مونت‌موریلونیت و کلریت-مونت‌موریلونیت (فقط در چاه خشک) وجود دارد. با طبقه‌بندی میزان رس در ۵ گروه (کمتر از ۱۰ درصد، ۱۰ تا ۱۵ درصد، ۱۵ تا ۲۰ درصد، ۲۰ تا ۲۵ درصد و بیش از ۲۵ درصد)، بر اساس درصد جمعی در هر گروه، چاه تولیدی از نوع تمیز و چاه خشک در گروه ماسه شیلی قرار می‌گیرد. روند افزایشی کانی‌های ایلیت، گلوکونیت و روند کاهش کائولینیت و همین‌طور افزایش درصد ایلیت و کلریت در کانی‌های مخلوط لایه با افزایش ژرفا و به تبع آن افزایش دما بیانگر عملکرد فرایند دیاژنزی تدفینی در این سازند است. بیشترین میزان همبستگی کانی‌های رسی با درصد عناصر آهن، آلومینیم، پتاسیم و منیزیم به دست آمد. منشأ رس‌های سازند شوربجه عمدتاً ثانوی و حاصل دگرسانی خرده‌سنگ‌ها، پلاژیو کلازها و فلدسپارهای قلیایی است و در مواردی نیز منشأ رس به صورت جریان‌یابی با توزیع لایه‌ای از خارج است. الگوی توزیع رس‌های اتوزن به صورت پرکننده، پوشش دهنده و پل‌زننده میان منافذ است که تخلخل و تراوایی سازند را کاهش می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: کانی‌های رسی، طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)، طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF)، تجزیه‌های حرارتی (DTA-TGA)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، سازند شوربجه، میدان گنبدلی.

*نویسنده مسئول: گلناز جوزانی کهن

E-mail: gjkohan@ut.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

ژلاتینی از هیدروکسیدهای آهن می‌شود که مجاری و فضاهای خالی به ویژه گلوگاه منافذ را مسدود می‌کند. کانی‌های رسی انبساط‌پذیر مانند خانواده اسمکتیت‌ها در حین عملیات تزریق آب به چاه یا به طور کلی حفاری مشکلات زیادی از قبیل کاهش قطر چاه، گیر کردن سرتمه و لوله و غیره را ایجاد می‌کنند که موجب افزایش هزینه‌های حفاری می‌شود. افزون بر این وجود اسمکتیت‌ها هدایت الکتریکی سنگ‌ها را بالا می‌برد. تغییرات دیاژنزی تبدیل اسمکتیت‌ها به ایلیت نیز می‌تواند شاخص پتانسیل تولید نفت و گاز طبیعی به شمار آید (Ellis & Singer, 2008).

سازند ماسه‌سنگی شوربجه به سن کرتاسه آغازی، سنگ مخزن میدان گنبدلی در کپه‌داغ خاوری است و تاکنون مطالعات زیادی روی ویژگی‌های مختلف آن توسط پژوهشگران انجام شده است که از آن جمله می‌توان از پژوهش‌های اولیه موسوی حرمی (۱۳۶۶) روی محیط رسوبی سازند شوربجه در خاور کپه‌داغ، تعیین تاریخچه دیاژنزی و ویژگی‌های مخزنی سازند شوربجه (Moussavi-Harami & Brenner, 1993) نام برد. نجفی و کوسرخ (۱۳۷۷) مطالعه رخساره‌های سنگی مختلف و تفسیر محیط رسوب‌گذاری سازند شوربجه را در منطقه چشمه گیلان-بی‌جیرک در شمال باختری مشهد انجام دادند. نجفی و همکاران (۱۳۷۸) مطالعه ویژگی‌های رخساره‌های میکروسکوپی و میکروفسیل‌های شاخص سازند شوربجه را در مقطع رادکان-بارو و مقایسه آن با مقاطع چشمه گیلان، دره‌خور و گردنه مزدوران از نظر تغییرات ستبر و سنگ‌شناسی انجام داده‌اند. اخوان و همکاران (۱۳۸۰) شناسایی سکانس‌های شیل-ماسه‌ای سازند شوربجه را

ویژگی‌های منحصربه‌فرد کانی‌های رسی مانند اندازه بسیار کوچک (کمتر از ۲ میکرون)، شکل صفحه‌ای، سطح ویژه بزرگ و فعال، ظرفیت تبادل یونی بالا، جذب سطحی بالا، خواص کاتالیستی و رفتار پلاستیکی در حالت مرطوب، در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی مسائل و مشکلات خاصی را به وجود می‌آورد (Moore & Reynolds, 1989). معمولاً مخازن ماسه‌سنگی، تمیز (بدون رس) نیستند و همواره مقادیر مختلفی از انواع کانی‌های رسی وجود دارد (Fertl, 1986). یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر کیفیت مخازن ماسه‌سنگی مسئله وجود کانی‌های رسی، مقدار و نحوه توزیع آنها است. کانی‌های رسی به ویژه با توزیع نواری، تراوایی قائم را شدیداً کاهش می‌دهند و از این رو سبب کاهش کیفیت مخازن می‌شوند. لایه‌بندی یا تورم آنها نیز سبب کاهش نفوذپذیری و تزریق‌پذیری می‌شود و در صورت مهاجرت ذرات ژلاتینی موجبات انسداد مجاری و منافذ سنگ مخزن را فراهم می‌آورد. تورم یا شکستن تجمعات رسی نیز سبب آسیب سازند می‌شود (Worden & Morad, 2003). همچنین مشکلات عدیده چاه‌نگاری و تفسیر لاگ‌ها و خطای تفسیر به‌ویژه در مورد اشباع آب و تخلخل از دیگر تأثیرات منفی وجود کانی‌های رسی در مخزن است. افزون بر این تغییرات توزیع فراوانی رس‌ها در میان طبقات دیگر روی بازتاب‌های صوتی سازندها در یک توالی حفاری شده نیز تأثیرگذار است. در حضور کانی‌های رسی، پایداری چاه یکی از چالش‌های اصلی حفاری به شمار می‌رود (Slatt, 2007). رس‌های مختلف تأثیرات متفاوتی روی عملیات حفاری و روی لاگ‌ها دارند. مثلاً وجود کلریت در حین اسیدکاری مخازن، سبب تشکیل رسوبی

C₁ و C₂، B و A تقسیم‌بندی شده است (جدول ۱). در جدول ۱، لیتولوگ یکی از چاه‌های تولیدی - چاه (A) توسط شرکت نفتکاو (۱۳۸۵) که با استفاده از نرم افزار Geolog نسخه ۶/۶ تهیه شده است - نیز نشان داده شده است. این طبقه‌بندی مبنای مطالعات تحت‌الارضی سازند شورپیچ در این منطقه است و زیربخش D₁ در میدان گنبدلی دارای گاز است.

۳- مواد و روش‌ها

برای شناسایی نوع کانی‌های رسی و تعیین مقدار دقیق آنها، ۷۶ نمونه از مجموعاً ۴ مغزه دو چاه منتخب میدان گنبدلی که یکی خشک و دیگری تولیدی به‌شمار می‌آید، با فواصل مناسب (به طور متوسط هر ۰/۵ متر، یک نمونه) برداشت شد. نمونه‌برداری به تعداد ۱۰، ۵ و ۵ نمونه به ترتیب از زیربخش‌های D₁، C₂ و B سازند شورپیچ در چاه تولیدی (A) و به تعداد ۳۸ و ۱۸ نمونه از زیربخش‌های D₁ و C₂ سازند شورپیچ در چاه خشک (B) انجام شد. سپس نمونه‌های برداشت شده پس از خردایش در ۲ سایز ۷۵ میکرون و ۲ تا ۳ میلی متر، توسط شش روش تجزیه دستگاهی مختلف به منظور شناسایی نوع، مقدار و نحوه توزیع کانی‌های رسی بررسی شدند.

۳-۱. طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)

شناسایی عمومی همه کانی‌های تشکیل دهنده و شناسایی تخصصی کانی‌های رسی هر ۷۶ نمونه مغزه با استفاده از دستگاه پراش‌سنج پیشرفته 2θ-θ مدل D8-Advance ساخت شرکت Bruker axS با تشعشع آند مس با طول موج $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ در آزمایشگاه اشعه ایکس دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران انجام شد. مطالعات XRD عمومی در محدوده زاویه 2θ برابر با ۴ تا ۷۰ درجه با سرعت زاویه‌ای ۱/۲ درجه بر دقیقه روی نمونه‌های پودری با اندازه ۷۵ میکرون انجام شد. برای تعیین درصد دقیق کانی‌های رسی و دیگر کانی‌های همراه از نتایج تجزیه عنصری طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) همراه با کالیبراسیون توسط منحنی‌های شدت - مقدار نمونه‌های حاصل از اختلاط نمونه‌های استاندارد همه کانی‌های شناسایی شده در محدوده گسترده‌ای از درصد‌های معلوم استفاده شد. برای هر کانی با استفاده از قوی‌ترین پیکی که تداخل با فازهای دیگر نداشته باشد و شیب بهترین خط برازش، درصد به طور دقیق تعیین شد و این درصد با نتایج تجزیه عنصری (XRF) تطبیق داده شد.

با توجه به نتایج آزمایش‌های عمومی XRD مشخص شد که مقدار کانی‌های رسی در نمونه‌های مخزنی سازند شورپیچ بسیار کم است. بنابراین به منظور شدت‌بخشی به پیک‌های ضعیف رس‌ها (شکل ۲)، همه کانی‌های غیر رسی توسط روش‌های فیزیکی یا گاه شیمیایی حذف شدند و شناسایی اختصاصی کانی‌های رسی، در محدوده زاویه 2θ برابر با ۴ تا ۴۰ درجه با سرعت زاویه‌ای ۱/۲ درجه بر دقیقه با مطالعه ۴ طیف با آماده‌سازی‌های ویژه به شرح زیر روی نمونه پودری با ابعاد ۲ تا ۳ میلی‌متر انجام شد. مزیت استفاده از این اندازه برای شناسایی‌های تخصصی کانی‌های رسی، عدم وجود (یا وجود حداقلی) کانی‌های مقاوم در مقابل روش‌های حذف فیزیکی و شیمیایی در محدوده ابعادی رس‌ها است. حذف کانی‌های غیر رسی افزون بر شدت‌بخشی به پیک‌های ضعیف رس‌ها، سبب حذف اثرات منفی برخی کانی‌های همراه از قبیل پهن شدن پیک‌ها، افزایش زمینه، سیمان‌شدگی و عدم تفرق کانی‌های رسی می‌شود (جوزانی کهن، ۱۳۹۲). حذف مواد آلی ناچیز نمونه‌ها به علت احتمال خطر اکسید شدن آهن در مکان‌های هشت‌وجهی کانی‌های رسی و تغییر بار لایه‌ها در اثر استفاده از عوامل اکسیدان (مثلاً آب اکسیژنه)، ضروری تشخیص داده نشد. حذف کانی‌های غیر رسی مانند کوارتز، فلدسپارها و پلاژیوکلازها از طریق ته‌نشینی ثقلی براساس قانون استوکس به روش فیزیکی و کانی‌هایی مانند انواع کربنات‌ها (کلسیت و دولومیت)، کانی تخییری (انیدریت) با روش‌های شیمیایی به ترتیب با استفاده از اسید استیک ۲۰ درصد و نمک طعام غلیظ (۱۰۰ g/lit) و

با دقت خوبی توسط نمودار نسبت پواسون انجام داده‌اند. جمالی و همکاران (۱۳۹۰) رخساره‌ها و محیط رسوبی سازند شورپیچ در برش حمام قلعه مطالعه کرده‌اند و یک مدل رسوبی ارائه کرده‌اند. جمالی و همکاران (۱۳۹۱) میکروفسیل‌ها، سه زیست‌زون و سن سازند شورپیچ را در برش حمام قلعه تعیین کرده‌اند. باقری و همکاران (۱۳۹۲) ویژگی‌های فیزیکی- مکانیکی سازند شورپیچ را با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری سه محوری، آزمایش تخلخل (با اشباع آب و گاز هلیوم) و شاخص سایش سرشار را روی نمونه‌های مغزه مطالعه کرده‌اند. مرتضوی و همکاران (۱۳۹۱) سه دسته از خاک‌های دیرینه (پالئوسل) شامل هیستوسل‌ها، اکسی‌سول‌ها و کلسی‌سول‌ها را به همراه ویژگی‌های آنها در سازند شورپیچ و همچنین ژئوشیمی شیل‌های سازند شورپیچ را از نظر منشأ، تاریخچه هوازگی و محیط دیرینه مطالعه کرده‌اند. طباطبایی و همکاران (۱۳۹۲) بررسی رخساره‌ها و محیط‌های رسوبی سازند شورپیچ را در برش سطحی قرقره بر پایه بررسی‌های صحرائی و میکروسکوپی و در برش زیرسطحی خانگیران بر پایه پلاک‌های نازک خرده‌های حاصل از حفاری همراه با نمودارهای چاه‌پیمایی (پرتو گاما و صوتی) انجام داده‌اند. گل‌افشانی و همکاران (۱۳۹۲) الف و ب، سنگ‌نگاری و پراختگاه ماسه‌سنگ‌های سازند شورپیچ واقع در روستای آبگرم را براساس داده‌های ژئوشیمی عناصر اصلی مطالعه کرده‌اند. ولی تاکنون پژوهشی با اهداف شناسایی کانی‌های رسی سازند شورپیچ انجام نشده است. در این پژوهش برای تعیین نوع، مقدار و الگوی توزیع کانی‌های رسی در سازند ماسه‌سنگی شورپیچ از شش روش تجزیه دستگاهی مختلف (طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)، طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF)، مطالعات میکروسکوپ پلاریزان و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، تجزیه‌های حرارتی (DTA-TGA) و اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)) استفاده شد. نتایج شناسایی کانی‌های رسی سازند شورپیچ می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های پیشگیرانه آبی استفاده شود و سبب افزایش بهره‌وری و کاستن از بروز خسارات شود.

۲- منطقه مورد مطالعه

حوضه رسوبی کپه‌داغ در شمال خاوری ایران میان طول‌های جغرافیایی ۵۴° ۰۰' تا ۱۳° ۶۱' خاوری و عرض‌های جغرافیایی ۳۵° ۳۰' تا ۱۵° ۳۸' شمالی با گستردگی در حدود ۵۵۰۰۰ کیلومتر مربع یعنی تقریباً ۳/۳ درصد مساحت کل کشور قرار گرفته است. این حوضه در کشورهای ایران، ترکمنستان و افغانستان امتداد دارد و در هر سه کشور میدان‌های عظیم گازی در آن کشف شده است (افشار حرب، ۱۳۷۳). میدان گنبدلی در حد فاصل ۲۵ کیلومتری جنوب باختری شهرستان سرخس و در نزدیکی مرز ترکمنستان در منطقه‌ای با گستردگی حدود ۲۶۸ کیلومتر مربع در برکه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ سرخس واقع شده است. به دلیل مشترک بودن این میدان با کشور همسایه، اهمیت شناخت و بهره‌برداری صحیح و بهینه از این میدان دوچندان می‌شود. در میدان گنبدلی در مجموع ۱۱ حلقه چاه به طور متوسط تا ژرفای ۳۵۱۴ متر (سازند مزدوران) حفاری شده است که ۴ حلقه از آنها تولیدی و دیگر چاه‌ها اکتشافی یا تحدیدی به‌شمار می‌آیند. سازند ماسه‌سنگی شورپیچ به سن کرتاسه آغازی، سنگ مخزن میدان گنبدلی در کپه‌داغ خاوری است و ستبرای متوسط آن در این میدان ۲۲۴/۳۵ متر است (شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۶۶). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی ۹ حلقه از چاه‌های میدان گنبدلی که با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۹/۳ رسم شده است را نشان می‌دهد. سازند شورپیچ از نظر سنگ‌شناسی مخلوطی بسیار ناهمگن از شیل، ماسه‌سنگ، سیلتستون و کانی‌های تخییری مانند انیدریت است و بر اساس گزارش تکمیلی چاه‌های میدان گنبدلی، توسط مهندسی حقیقی از مهندسان شاغل در شرکت ملی نفت ایران، بر اساس ویژگی‌های سنگ‌شناسی به زیربخش‌های D₁، D₂، D₃، D₄ و D₅،

۳-۴. تجزیه‌های حرارتی (DTA-TGA)

تجزیه حرارتی افتراقی (DTA) و تجزیه توزین حرارتی (TGA) تا دمای 1200°C با سرعت گرمایش 30°C در دقیقه در اتمسفر هوا روی ۲ و ۲ نمونه به ترتیب از زیربخش‌های D_1 و B سازند شوریجه در چاه تولیدی (A) و تعداد ۴ و ۲ نمونه از زیربخش‌های D_1 و C_2 سازند شوریجه در چاه خشک (B) با استفاده از دستگاه مدل STA 409 PC Luxx ساخت شرکت NETZSCH در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شد. از هر نمونه، حدود $1/5 \pm 0.5/5$ میلی‌گرم پودر با اندازه ۷۵ میکرون تحت تجزیه حرارتی قرار گرفت. بر اساس نتایج کمی طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)، درصد کانی‌های رسی در نمونه‌های انتخاب شده از ۵ تا ۲۱ درصد متغیر است و از آنجا که تعدادی از نمونه‌ها از یک سنگ مخزن گازدار برداشت شده است، احتمال آغشتگی به مواد آلی در برخی نمونه‌ها وجود دارد.

۳-۵. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای تشخیص نوع کانی‌های رسی و وضعیت سیمان‌شدگی دانه‌ها، تعداد ۳، ۳ و ۵ نمونه به ترتیب از زیربخش‌های D_1 ، C_2 و B سازند شوریجه در چاه تولیدی (A) و تعداد ۵ و ۱ نمونه از زیربخش‌های D_1 و C_2 سازند شوریجه در چاه خشک (B) با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل JSM-840 Scanning Microscope ساخت شرکت JEOL ژاپن در آزمایشگاه متالورژی جهاد شریف و دستگاه SEM مدل LEO 1450 VP در آزمایشگاه کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران مطالعه شد. ولتاژ مصرفی دستگاه در زمان تصویربرداری ۱۲ تا ۲۰ کیلو ولت و ژرفای میدان ۱۱ تا ۲۳ 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 طلا پوشش داده شد.

۳-۶. اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)

تعداد ۳، ۲ و ۵ نمونه به ترتیب از زیربخش‌های D_1 ، C_2 و B سازند شوریجه در چاه تولیدی (A) و تعداد ۶ و ۴ نمونه از زیربخش‌های D_1 و C_2 سازند شوریجه در چاه خشک (B)، برای اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور (Bower) انتخاب شد. آزمایش‌ها در آزمایشگاه علوم خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران انجام شد. وزن نمونه‌ها تقریباً ۵ گرم برای خاک‌های ریزدانه و متوسط و ۶ گرم برای خاک‌های درشت‌دانه انتخاب و با ترازوی دقیق با دقت ۱ درصد توزین شد. با تعویض ظرفیت‌های موجود با کاتیون سدیم و سپس خروج تمام کاتیون‌ها به صورت الکلات و اشباع نمونه با یونهای سدیم در محل‌های تعویضی، تمام سدیم‌های جذب شده توسط یون‌های آمونیم تبادل شد و در نهایت مقدار سدیم آزاد شده در محلول یعنی CEC، توسط فلیم فتومتر دیجیتال اندازه‌گیری شد.

۴-۴. نتایج

۴-۱. طیف سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)

مطالعات عمومی طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس، وجود کوآرتز و پلاژیوکلازاها را به عنوان فازهای تشکیل‌دهنده اصلی و کانی‌های رسی، انیدریت، کربنات‌ها (کلسیت و دولومیت) و فلدسپارهای قلیایی را به عنوان تشکیل‌دهنده‌های فرعی در زیربخش‌های مختلف سازند شوریجه در هر دو چاه مشخص کرد (شکل ۴). در تعداد کمی از نمونه‌های هر دو چاه، هماتیت، روتیل، هالیت و میکا نیز به میزان کم وجود دارد. آزمایش‌های شناسایی اختصاصی نوع رس به روش طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس روی ۷۶ نمونه مغزه از سازند شوریجه از دو چاه در میدان گنبدلی نشان داد که کانی‌های رسی غالب در این دو چاه به ترتیب فراوانی ایلیت، کلریت، کائولینیت و گلوکونیت هستند که مقدار هر یک در چاه خشک (B) به مراتب از چاه تولیدی (A) بیشتر است (شکل ۴). در زیربخش B چاه تولیدی وجود مونت‌موریلونیت و در زیربخش C_2 چاه خشک، وجود کانی‌های رسی مخلوط‌لایه از انواع

سپس شستشوی چندباره نمونه توسط سانتریفوژ به منظور اطمینان از خروج اسید یا نمک از نمونه، انجام شد. لزوم حذف انیدریت، از آن‌جا ناشی می‌شود که در همه مراحل استخراج و آماده‌سازی بخش رس، نمونه در آب ریخته می‌شود که در صورت وجود انیدریت بلافاصله به زئیس با پیک‌های شدید در محدوده شناسایی کانی‌های رسی گروه کائولینیت، تبدیل می‌شود (Bailey, 1980). گرچه نمی‌توان به طور ایده‌آل همه کانی‌های متفرقه را حذف کرد، ولی می‌توان درصد آنها را تا حد قابل توجهی کاهش داد. با اجرای روند فوق درصد کانی مقاوم کوآرتز به طور متوسط در چاه‌های تولیدی (A) و خشک (B) به طور متوسط ۱۳ و ۱۰ برابر کاهش یافت. بیشترین میزان کاهش کوآرتز به میزان ۲۵ تا ۲۷ برابر در نمونه‌های هر دو چاه بود که این امر سبب تقویت پیک کانی‌های رسی به طرز قابل توجهی شد (شکل ۲). پس از حذف کانی‌های همراه، متفرق‌سازی رس‌ها که معمولاً به دلیل خاصیت چسبندگی به یکدیگر و دیگر کانی‌ها چسبیده‌اند، ضروری است. این کار با استفاده از یک متفرق‌کننده مناسب مانند محلول ۰/۱ درصد وزنی کالگون (سدیم هگزافلورا فسفات $(\text{NaPO}_3)_6$) و قرار دادن نمونه در شیکر با زمان‌های طولانی انجام شد. بخش رس استخراج شده از ۵ سانتی‌متر بالای استوانه مدرج پس از گذشت زمان مناسب بر اساس قانون استوکس (Moore & Reynolds, 1989)، روی سه لام با ابعاد جا نمونه‌ای دستگاه پراش سنج ریخته شد و آماده‌سازی‌های ویژه شامل قرار دادن نمونه در معرض بخار اشباع اتیلن گلیکول به مدت حداقل ۸ ساعت در دسی کاتور با دمای 60°C درجه سانتی‌گراد (برای شناسایی رس‌های انبساط پذیر)، حرارت دادن به مدت نیم ساعت در دمای 550°C درجه سانتی‌گراد (ساختار بلوری کائولینیت نابود و کلریت بدون تغییر باقی می‌ماند) و در صورت احتمال وجود توآمان کلریت و کائولینیت، جوشاندن ۲ ساعته بخش رس نمونه در اسید هیدروکلریک ۱ نرمال و سپس اسید شویی (Brown & Brindley, 1980) انجام شد. از نمونه‌های خشک شده در هوا (نرمال)، اشباع شده با بخار اتیلن گلیکول و حرارت داده شده در دمای 550°C درجه سانتی‌گراد، در محدوده زاویه ۲۰ برابر با ۴ تا 40° درجه طیف تهیه شد (شکل ۳) و با مقایسه تغییرات فاصله میان صفحات در طیف‌های تهیه شده (Moore & Reynolds, 1989)، نوع کانی‌های رسی تعیین شد.

۳-۲. طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF)

تجزیه عنصری ۷۶ نمونه مغزه زیربخش‌های مختلف سازند شوریجه در دو چاه تولیدی و خشک، توسط دستگاه طیف‌سنج فلورسانس مدل Magix Pro ساخت شرکت فیلیپس در آزمایشگاه شیمی مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شد. همزمان میزان افت حرارتی (L.O.I) هر نمونه نیز توسط کوره مدل VAF 16/5s ساخت شرکت Lenton در همان آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برای اطمینان از درستی اندازه‌گیری‌ها، ۴ نمونه به طور تصادفی از مجموعه ۷۶ نمونه انتخاب و توسط آزمایشگاه مرتبط در شرکت تحقیقات مواد معدنی کانساران بینالود با دستگاه طیف‌سنج فلورسانس مدل PW1480 ساخت شرکت فیلیپس دوباره تجزیه XRF شد. همچنین ۵ نمونه دیگر نیز به طور تصادفی انتخاب و با دستگاه جذب اتمی مدل ۲۰ ساخت شرکت Varian در آزمایشگاه ژئوشیمی دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران برای تعدادی از عناصر تجزیه شد که نتایج، انطباق قابل قبولی با نتایج تجزیه عنصری اولیه نشان داد.

۳-۳. مطالعات میکروسکوپی تیغه‌های نازک با میکروسکوپ پلاریزان

تعداد ۱۰، ۵ و ۲ نمونه به ترتیب از زیربخش‌های D_1 ، C_2 و B سازند شوریجه در چاه تولیدی (A) و تعداد ۱۶ و ۹ نمونه از زیربخش‌های D_1 و C_2 سازند شوریجه در چاه خشک (B) برای تهیه تیغه نازک و مطالعات میکروسکوپ پلاریزان انتخاب شد. تیغه‌ها از نمونه‌های مغزه خرد نشده در دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران تهیه و با استفاده از میکروسکوپ نوری پلاریزان Zeiss مدل Axioplan2 مطالعه شد.

در چاه تولیدی (شکل ۷-ب)، نشان داد که تشکیل دهنده‌ها از نظر نوع و میزان تا حد زیادی مشابه زیربخش D₁ هستند، ولی میزان عوامل سیمان‌ساز ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش یافته است. همچنین از لحاظ ویژگی‌های بافتی و فرایندهای غیر رسوبی (دیاژنزی) این زیربخش با زیربخش مخزنی تفاوت دارد. به گونه‌ای که دانه‌ها زاویه‌دار تا نیمه گرد شده با جورشدگی ضعیف هستند و خمیره به میزان زیاد از نوع رسی (خمیره حقیقی) و میکایی (خمیره کاذب) وجود دارد. درجه بلوغ بافتی و مینرالوژیکی بسیار پایین است. میزان تخلخل به علت سیمان‌شدگی شدید توسط کانی‌های تبخیری (انیدریت) و کربناتی (کلسیت و دولومیت)، بسیار اندک است. میزان رس متوسط و منشأ آن دوگانه است؛ یکی از منشأ خارجی با توزیع لایه‌ای و دیگری از منشأ ثانوی حاصل دگرسانی فلدسپارها، پلاژیو کلازها و خرده‌سنگ‌ها است. از نظر سنگ‌شناسی بر مبنای طبقه‌بندی فولک، نمونه‌ها بیشتر در دسته وک‌ها (لیتیک، فلدسپاتیک و گری وک) و تعدادی در دسته لیتیک آروکوز قرار می‌گیرند. نوع و مقدار تشکیل‌دهنده‌های زیربخش B سازند شوربچه در چاه تولیدی (شکل ۷-پ)، مشابه زیربخش‌های D₁ و C₂ هستند، ولی دانه‌ها زاویه‌دار تا نیمه زاویه‌دار با جورشدگی بسیار ضعیف هستند. خمیره حقیقی از نوع رسی و کاذب از نوع میکایی به میزان خیلی کم وجود دارد. نمونه‌ها از لحاظ بافتی و مینرالوژیکی نابالغ هستند. میزان تخلخل اندک است و سیمان‌ها بیشتر کربناتی از جنس کلسیت هستند، ولی سیمان‌های تبخیری و سیلیسی نیز دیده می‌شوند. میزان رس متوسط است و منشأ آن از دگرسانی فلدسپارها، پلاژیو کلازها و خرده‌سنگ‌ها است. از نظر سنگ‌شناسی بر مبنای طبقه‌بندی فولک هر دو نمونه کوارتز آرنایت هستند. با مطالعه ۱۶ نمونه از بخش D₁ چاه خشک (شکل ۷-ت)، مشخص شد که جنس دانه‌ها مشابه چاه تولیدی است، ولی مقدار کانی‌ها تفاوت قابل توجهی را نشان می‌دهد. به طوری که میزان کوارتز کمتر از چاه تولیدی (۵۰ درصد) است و مقدار عوامل سیمان‌ساز (کانی‌های تبخیری و کربناتی) و میزان خمیره مجموعاً (۲۵ تا ۳۰ درصد) به مراتب بیشتر از چاه تولیدی است. دانه‌ها عمدتاً زاویه‌دار تا نیمه گرد شده با جورشدگی ضعیف هستند و از نظر اندازه در ژرفای مختلف محدوده‌های ابعادی گسترده‌ای از اندازه‌های بسیار ریزدانه (رس و سیلت) تا ماسه‌های درشت دانه را پوشش می‌دهند. در برخی نمونه‌ها بافت دوگانه به چشم می‌خورد. خمیره نمونه عمدتاً از جنس رسی (خمیره حقیقی) و میکایی (خمیره کاذب) به میزان زیاد می‌باشد. همه نمونه‌های این زیربخش از نظر بافتی و مینرالوژیکی نابالغ به‌شمار می‌آیند و با توجه به در نظر گرفتن تخلخل پایین آنها، می‌توان گفت کیفیت مخزنی ندارند. فضاهای میان دانه‌ای با سیمان‌های انیدریتی و کربناتی (کلسیت و دولومیت) پوشیده شده‌اند که این سیمان‌ها در مواردی آغشتگی شدید به ترکیبات اکسید آهن‌دار دارند. از نظر سنگ‌شناسی بر مبنای طبقه‌بندی فولک، نمونه‌های این بخش در محدوده فلدسپاتیک لیت آرنایت تا لیتیک آروکوز، ساب لیت آرنایت و در مواردی (فلدسپاتیک یا لیتیک) وک تغییر می‌کند. منشأ رس که مقادیر آن در این بخش بالا است، در مواردی که خمیره به شمار می‌آید منشأ خارجی و با توزیع جریان‌ی، لایه‌ای است و در مواردی که سیمان اتوژن رسی به شمار می‌آید، منشأ آن ثانوی و حاصل دگرسانی فلدسپارها، پلاژیو کلازها و خرده‌سنگ‌های آذرین است. مطالعات میکروسکوپی نمونه‌های زیربخش C₂ سازند شوربچه در چاه خشک (شکل ۷-ث)، نشان داد که تشکیل دهنده‌ها، نوع خمیره، درجه بلوغ بافتی و کانی‌شناختی، تخلخل، نوع سیمان، میزان و منشأ رس تفاوتی با زیربخش D₁ ندارند و فقط گردش‌دهی و جورشدگی نسبتاً بهتری دارند. میزان کوارتز (۳۵ درصد) کمتر و میزان خمیره نمونه‌های این زیربخش (۳۵ تا ۴۰ درصد) به مراتب بیشتر از زیربخش D₁ همین چاه است، به طوری که از نظر سنگ‌شناسی بر مبنای طبقه‌بندی فولک نمونه‌ها بیشتر در دسته وک‌ها (لیتیک، فلدسپاتیک و گری وک) قرار می‌گیرند.

ایلیت - مونت‌موریلونیت و کلریت - مونت‌موریلونیت نیز به میزان بسیار اندک تأیید شد. روند افزایشی کانی ایلیت و روند کاهش کانیولینیت با افزایش ژرفای و افزایش دما بیانگر عملکرد فرایند دیاژنزی تدفینی در این سازند است. با توجه به داده‌های شکل ۴، می‌توان گفت عوامل سیمان‌کننده (کربنات‌ها، انیدریت و کانی‌های رسی) که سبب افت کیفیت مخزنی سازند هستند، در چاه خشک به مراتب بیشتر از چاه تولیدی هستند. با تحلیل آماری میزان رس در ۵ کلاس کمتر از ۱۰ درصد، ۱۰ تا ۱۵ درصد، ۱۵ تا ۲۰ درصد، ۲۰ تا ۲۵ درصد و بیشتر از ۲۵ درصد مشخص شد که چاه تولیدی در رده ماسه تمیز و چاه خشک ماسه شیلی به شمار می‌آید (جدول ۲). با توجه به عدم وجود رابطه خطی میان میزان رس و فلدسپارهای قلیایی - پلاژیو کلازها می‌توان نتیجه گرفت که تنها منشأ ایجاد رس در این سازند دگرسانی فلدسپارها نبوده است و رس از منشأ خارجی نیز به داخل سازند وارد شده است.

۴-۲. طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

شکل ۵ میزان اکسیدهای اصلی و افت حرارتی را در نمونه‌های هر دو چاه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵، دوباره تأیید می‌شود کیفیت مخزنی سازند شوربچه در چاه تولیدی به علت بالا بودن میزان SiO₂ و پایین بودن درصد عوامل سیمان‌ساز (CaO, MgO, SO₃, LOI)، بهتر از چاه خشک است. در ادامه میزان همبستگی مقدار رس حاصل از نتایج XRD با درصد عناصر مختلف سنجیده شد (جدول ۳) که بر این اساس، بیشترین میزان همبستگی رس با درصد عناصر آهن، آلومینیم، پتاسیم و منیزیم به دست آمد. با توجه به این که عناصر یادشده سازنده‌های اصلی کانی‌های رسی هستند، این نتیجه‌گیری می‌تواند تأییدی دیگر بر درستی نتایج XRF باشد. در صورت وجود داده‌های تجزیه عنصری چه از طریق لاگ ECS و چه از طریق نتایج XRF، برآورد مقدار رس در ژرفایی که مغزه‌گیری نشده است با استفاده از رابطه‌ای خطی میان مقدار رس به دست آمده (از آزمایش XRD) و فرم کانی‌شناسی ساخته شده از نتایج تجزیه عنصری که از حذف کانی‌های غیر رسی به دست می‌آید، انجام می‌شود. در این منطقه، بالاترین ضریب همبستگی خطی (۰/۶) میان میزان رس (نتایج XRD) با فرم کانی‌شناسی ساخته شده (رابطه ۱) براساس داده‌های تجزیه عنصری (نتایج XRF) بیان می‌شود. شکل ۶ افزایش ضریب همبستگی میزان رس از سمت چپ به راست را با کاهش کانی‌های غیر رسی نشان می‌دهد.

رابطه ۱) $CaCO_3 - 5Na - Ca, Mg (CO_3)_2 - 100 - SiO_2 - CaSO_4$

۴-۳. مطالعات میکروسکوپی تیغه‌های نازک با میکروسکوپ پلاریزان

نتایج مطالعات و شمارش کانی‌ها در میدان‌های مختلف نمونه‌های زیربخش D₁ چاه تولیدی (شکل ۷-الف)، نشان داد که تشکیل‌دهنده‌های غالب کوارتز (۶۵ تا ۷۰ درصد)، خرده‌سنگ از انواع آذرین، دگرگونی درجه پایین و در برخی موارد از نوع چرت (۲۰ درصد) هستند. دیگر کانی‌ها مانند پلاژیو کلاز (لابرادوریت تا آندزین)، فلدسپارهای قلیایی (میکروکلین و ارتو کلاز)، کانی‌های رسی و در موارد معدودی میکا در مجموع ۲۰ تا ۲۵ درصد هستند. عوامل سیمان‌ساز به میزان اندک (حدوداً ۵ درصد) از جنس کانی‌های تبخیری (انیدریت) و کانی‌های کربناتی (کلسیت و دولومیت) وجود دارد. در بیشتر موارد خمیره وجود ندارد یا به میزان بسیار اندک از جنس کانی‌های رسی به صورت خمیره حقیقی است. دانه‌ها عمدتاً گرد شده تا نیمه گرد شده با جورشدگی متوسط تا خیلی خوب هستند و از نظر اندازه در محدوده ماسه‌های درشت دانه قرار می‌گیرند. همه نمونه‌های این زیربخش از نظر بافتی و مینرالوژیکی بالغ به‌شمار می‌آیند و با توجه به در نظر گرفتن تخلخل میان‌دانه‌ای بالا، می‌توان گفت از کیفیت مخزنی خوبی برخوردارند. از لحاظ سنگ‌شناسی بر مبنای طبقه‌بندی فولک، نمونه‌های این بخش در محدوده لیت آرنایت، فلدسپاتیک لیت آرنایت تا لیتیک آروکوز تغییر می‌کنند. منشأ رس که مقدار آن در این بخش بسیار کم است، ثانوی و حاصل دگرسانی فلدسپارها، پلاژیو کلازها و خرده‌سنگ‌های آذرین است (سیمان اتوژن رسی). مطالعات نمونه‌های زیربخش C₂ سازند شوربچه

۴-۴. تجزیه‌های حرارتی (DTA-TGA)

استاندارد و انجام تجزیه نقطه‌ای EDX در موارد مشکوک و ناشناس انجام شد. نمونه‌های چاه تولیدی (A) با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل JSM-840 Scanning Microscope ساخت شرکت JEOL ژاپن (شکل‌های ۹ - الف، ب، پ و ت) و نمونه‌های چاه خشک (B) با دستگاه SEM مدل LEO 1450 VP (شکل‌های ۹ - ث، ج، چ و ح) مطالعه شدند. نتایج مطالعات وجود کانی‌های رسی برجا از نوع کائولینیت، کلریت‌های غنی از منیزیم، اسمکتیت (۱ مورد) و ایلیت را که به صورت پراکنده، پوشش دهنده و پل زنده میان منافذ بودند اثبات کرد. تخلخل‌های چاه تولیدی بزرگ و منافذ عمدتاً تمیز (بدون رس) بودند، در حالی که بیشتر تخلخل‌های مشاهده شده چاه خشک از نوع میکرو تخلخل با قطر کمتر از ۲ میکرومتر بود.

۴-۶. اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)

ظرفیت تبادل کاتیونی CEC کانی‌های رسی برحسب نوع متفاوت است. جدول ۵ ظرفیت تبادل کاتیونی کانی‌های رسی را بر اساس مراجع مختلف نشان می‌دهد. مقادیر گزارش شده توسط منابع مختلف تقریباً مشابه بوده فقط در برخی موارد، این مقادیر تا حدودی با هم همپوشانی دارند، ولی کماکان، می‌توان نمونه‌ها را با توجه به کانی یا کانی‌های رسی چیره طبقه‌بندی کرد.

با به دست آوردن پارامتر ظرفیت تبادل کاتیونی ۲۰ نمونه از نمونه‌های زیربخش‌های مختلف ساند شورجیه در چاه‌های تولیدی و خشک (جدول ۶)، کانی‌های رسی نمونه‌ها کائولینیت، کلریت، ایلیت، گلوکونیت و در پاره‌ای موارد اسمکتیت تشخیص داده شد که این شناسایی‌ها کاملاً با نتایج تجزیه XRD منطبق است.

۵-۵. بحث و نتیجه‌گیری

سازند شورجیه مخلوطی ناهمگن از کوارتز مونوکریستالین (تشکیل دهنده چیره)، پلاژیوکلازهای عمدتاً حد واسط (لابرادوریت تا آندزین)، خرده‌سنگ‌های آذرین، دگرگونی درجه پایین و بعضاً چرت، کانی‌های رسی، انیدریت، کربنات (کلسیت و دولومیت)، فلدسپارهای قلیایی (میکروکلین و ارتوکلاز) و در برخی موارد هماتیت، هالیت، روتیل و میکاست. دانه‌ها در چاه تولیدی گردشگری بیشتر و جورشدگی بهتری نسبت به چاه خشک دارند و از لحاظ اندازه چاه تولیدی در رده ماسه‌های درشت‌دانه و چاه خشک در رده ابعادی گسترده‌ای از اندازه‌های بسیار ریزدانه (رس و سیلت) تا ماسه‌های درشت دانه قرار می‌گیرد. خرده‌سنگ‌ها، پلاژیوکلازها و فلدسپارهای قلیایی اکثراً دگرسان شده یا در حال دگرسانی به کانی‌های رسی هستند. کانی‌های رسی چیره در این دو چاه به ترتیب فراوانی ایلیت، کلریت منیزیم‌دار، کائولینیت و گلوکونیت هستند که مقدار هر یک در چاه خشک B به مراتب از چاه تولیدی A بیشتر است. مونت‌موریلونیت در زیربخش B چاه تولیدی و کانی‌های رسی مخلوط‌لايه از نوع ایلیت - مونت‌موریلونیت و کلریت - مونت‌موریلونیت در زیربخش C2 چاه خشک با میزان رس بالا به میزان اندک وجود دارد. روند افزایشی کانی ایلیت و روند کاهش کائولینیت با افزایش ژرفا و افزایش دما بیانگر عملکرد فرایند دیاژنز تدفینی در این سازند است. با توجه به نتایج کمی میزان رس، چاه تولیدی ماسه تمیز و چاه خشک در رده ماسه شیلی قرار می‌گیرد. خمیره حقیقی رسی و خمیره کاذب میکایی در برخی نمونه‌ها وجود دارد. منشأ رس در برخی نمونه‌ها خارجی با توزیع لایه‌ای است و در بیشتر نمونه‌ها به صورت برجا حاصل دگرسانی است. رس‌های برجا با الگوی توزیع پراکنده به صورت پراکنده، پوشش دهنده و پل زنده میان منافذ وجود دارند. تخلخل از نوع میان‌دانه‌ای و حفره‌ای است که در چاه تولیدی نسبتاً بالا و در چاه خشک به علت سیمان‌شدگی شدید پایین از نوع میکرو تخلخل با قطر کمتر از ۲ میکرومتر است. سیمان‌ها در هر دو چاه از جنس کربناتی (کلسیت و دولومیت) و تبخیری (انیدریت) هستند. در چاه خشک، سیمان‌ها آغشته

در تجزیه‌های حرارتی (DTA) و (TGA) کائولینیت در دمای کمتر از ۳۰۰°C، آب بسیار کمی از دست می‌دهند. کائولینیت با پیک گرم‌گیر تیزی میان دماهای ۵۵۰°C تا ۶۰۰°C و پیک تیز گرم‌زای تشکیل مولایت $g-Al_2O_3$ در دمای بیش از ۹۵۰°C شناسایی می‌شود. ایلیت پیک‌های گرم‌زایی در میان دماهای ۱۰۰°C تا ۲۵۰°C، ۵۰۰°C تا ۶۵۰°C و در حدود ۹۰۰°C دارد و یک پیک گرم‌زای بلافاصله پس از سومین پیک گرم‌گیر دارد (Langier-Kuzniarowa, 1998). مونت‌موریلونیت در مکان‌های مشابه ایلیت پیک می‌دهد با این تفاوت که پیک اول بزرگ‌تر (مابین دماهای ۲۰۰°C - ۹۰) است و پیک گرم‌گیر دوم در حدود ۲۰۰°C تا ۲۶۰°C قرار دارد. پیک اول به دلیل از دست دادن آب میان لایه‌ای رخ می‌دهد و پیک دوم نشان دهنده از دست دادن آب همراه با کاتیون قابل تعویض کلسیم Ca^{2+} است. در هر دو کانی با افزایش میزان آهن، پیک گرم‌زای آخر در دماهای پایین‌تری قرار خواهد گرفت. کانی‌های رسی سه لایه‌ای (ایلیت و مونت‌موریلونیت) پس از دمای دومین پیک گرم‌گیر کاملاً آبگیری شده‌اند و هیدروکسیل‌ها نیز از میان رفته‌اند، ولی شکست نهایی شبکه تا دمای ۹۰۰°C رخ نخواهد داد که پیک گرم‌گیر دمای ۹۰۰°C مشخصه کانی‌های رسی سه لایه‌ای هستند و در کانی‌های رسی دو لایه‌ای گزارش نشده‌اند. کانی‌های رسی سه لایه‌ای انبساط‌پذیر (مونت‌موریلونیت)، پیک گرم‌گیری میان دماهای ۶۰۰°C تا ۷۰۰°C دارند، در حالی که کانی‌های رسی سه لایه‌ای غیر انبساط‌پذیر (ایلیت)، پیک گرم‌گیری میان دماهای ۵۰۰°C تا ۶۰۰°C نشان می‌دهند. ایلیت و کائولینیت، هر دو پیک‌های گرم‌گیری میان دماهای ۵۰۰°C تا ۶۵۰°C نشان می‌دهند که شدت این پیک گرم‌گیر در کائولینیت، ۱۰ برابر شدت پیک مشابه در ایلیت است. در صورت وجود همزمان هر دو کانی در نمونه، اگر مقاومت دستگاه در حین اندازه‌گیری تغییر داده نشود، احتمال عدم تشخیص ایلیت براساس منحنی‌های تجزیه حرارتی وجود دارد. دلیل اصلی شدت بالای این پیک در کائولینیت به درستی مشخص نیست، ولی شاید بتوان آن را به این صورت توجیه کرد که شبکه‌های دو لایه‌ای آب و هیدروکسیل بیشتری از شبکه‌های سه لایه‌ای در این دما از دست می‌دهند و به طور کامل تخریب می‌شوند، در حالی که تخریب نهایی شبکه‌های سه لایه‌ای در دماهای بالاتر (حدود ۹۰۰°C) رخ می‌دهد. الگوی حرارتی ایلیت خالص نسبت به کائولینیت خالص، نامنظم‌تر و با تغییرات بیشتری است که این مطلب بدین دلیل است که ایلیت معرف گروهی از کانی‌های رسی است و نه یک تک کانی (Vaculíková & Plevová, 2005). کلریت‌ها پیک گرم‌گیری در دمای حدود ۴۰۰°C تا ۴۵۰°C دارند. کلریت‌های غنی از آهن فریک، گروه‌های هیدروکسیلی را در دمای کمتری (۶۱۰°C) نسبت به کلریت‌های منیزیم‌دار (دمای ۷۲۰°C) از دست می‌دهند. پیک گرم‌زای کلریت‌ها به علت تشکیل الومین، در دمای حدود ۸۳۰°C یا حدود ۹۲۵°C قرار دارد. در صورت آغشتگی به مواد آلی، ترموگرام‌ها در محدوده دمایی ۲۵۰°C تا ۴۵۰°C تغییراتی نشان می‌دهند (Martin, 1954).

با تفسیر پیک‌های گرم‌زای و گرم‌گیر نمودارهای DTA و تفسیر کاهش وزن‌های شدید و بزرگ نمودارهای TGA، ۱۰ نمونه از زیربخش‌های مختلف سازند شورجیه (شکل ۸) دماهای مرتبط استخراج شدند و کانی‌های رسی نمونه‌ها کائولینیت، کلریت منیزیم‌دار، ایلیت، گلوکونیت و در پاره‌ای موارد اسمکتیت تشخیص داده شد (جدول ۴) که این شناسایی‌ها کاملاً با نتایج تجزیه XRD منطبق است. آغشتگی به مواد آلی در نمونه‌های چاه تولیدی زیاد و در نمونه‌های چاه خشک کم و ناچیز است.

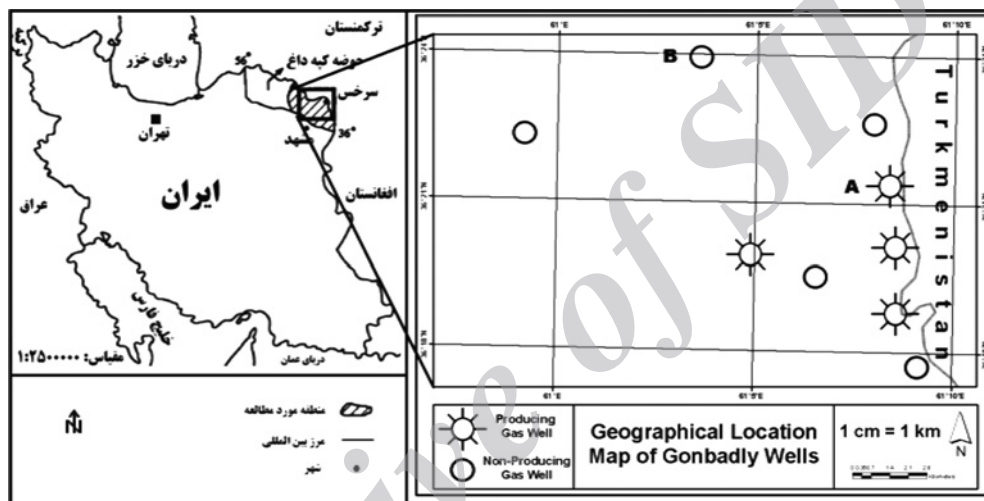
۴-۵. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

شناسایی جنس کانی‌های رسی ۱۷ نمونه انتخابی از زیربخش‌های مختلف سازند شورجیه توسط SEM با مقایسه تصاویر به دست آمده با تصاویر نمونه‌های

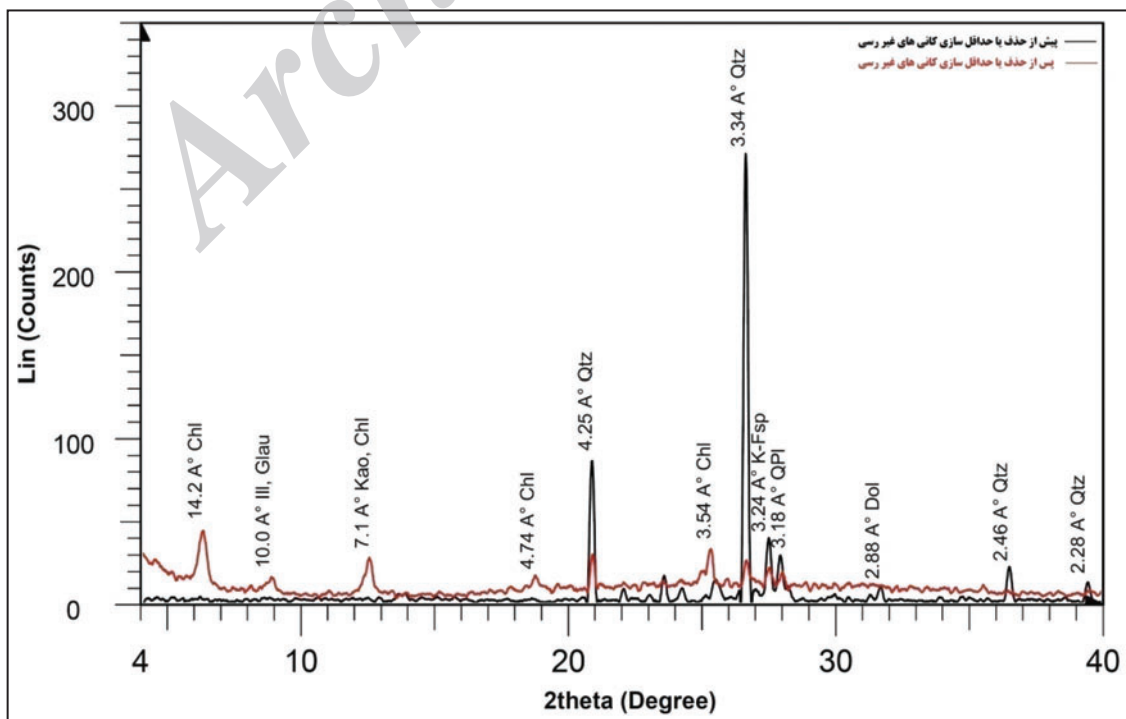
پلاریزان امکان‌پذیر است. استفاده از تجزیه‌های حرارتی برای تشخیص نوع کلریت (آهن‌دار یا منیزیم‌دار) بسیار مؤثر است، ولی برای شناسایی و تفکیک کانی‌های رسی سه لایه‌ای از نوع ایلیت و مونت‌موریلونیت نیاز به داشتن اطلاعات تکمیلی دیگر روش‌ها است. همچنین اگر مقاومت دستگاه حین تجزیه تغییر نکند، در صورت وجود همزمان کانی‌های رسی از نوع کائولینیت و ایلیت، پیک‌های مربوط به ایلیت با شدت بسیار کمی ظاهر می‌شود که موجب عدم تشخیص ایلیت خواهد شد. اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی برای شناسایی کانی‌های رسی انبساط‌پذیر (گروه اسمکتیت) بسیار کارآمد است ولی این روش قادر به تفکیک کلریت از ایلیت به علت داشتن حدود یکسان CEC نیست. همچنین در مواردی که درصد کائولینیت و کلریت برابر یا نزدیک به هم است، شناسایی همراه با خطا خواهد بود و بهتر است از اطلاعات روش‌های دیگر مانند XRD استفاده شود.

به ترکیبات اکسید آهن هستند. در هر دو چاه آثار آغشتگی به ترکیبات هیدروکربنی به صورت رنگ‌آمیزی دور دانه‌ها دیده شد. در مجموع، ماسه‌سنگ بخش مخزنی از لحاظ مینرالوژیکی و بافتی در چاه تولیدی (چاه A) بالغ و ماسه سنگ چاه خشک (چاه B) نابالغ است و کیفیت مخزنی پایینی دارد.

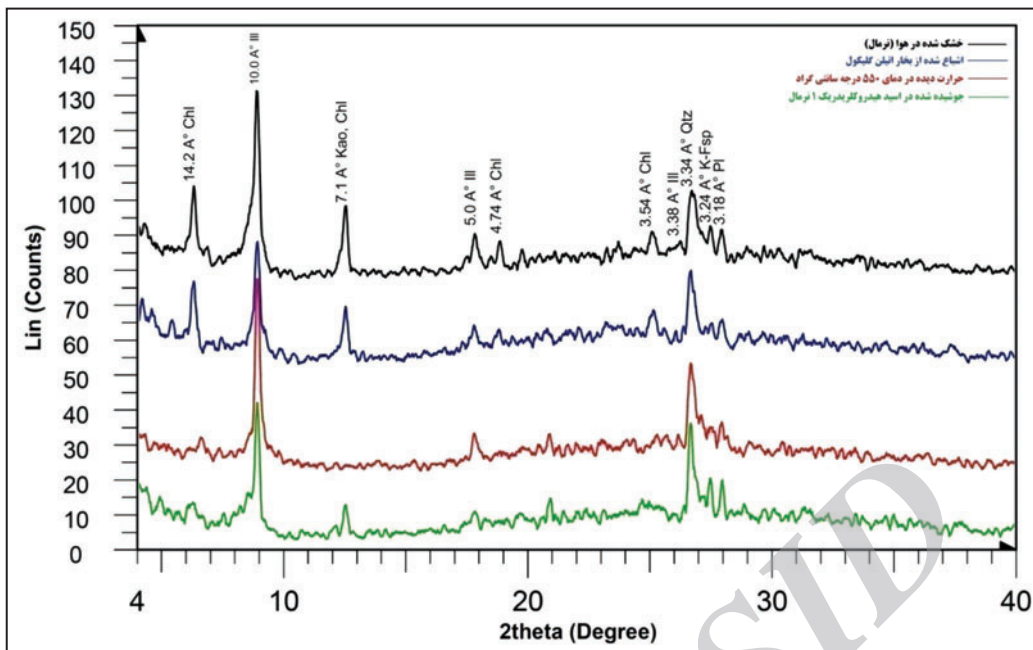
روش طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD) در صورت حذف و حداقل‌سازی کانی‌های غیر رسی نمونه و اجرای صحیح آماده‌سازی‌های ویژه شناسایی کانی‌های رسی، بهترین و متداول‌ترین روش شناسایی رس‌ها به‌شمار می‌آید. در صورت موجود بودن نتایج تجزیه عنصری (XRF) به همراه کالیبراسیون نمودارهای XRD توسط نمونه‌های استاندارد تشکیل‌دهنده‌ها، می‌توان نتایج تعیین نوع کانی‌های رسی را با دقت خوبی کمی کرد. تعیین نحوه توزیع کانی‌های رسی در سازند و تشخیص منشأ تشکیل آنها با انجام مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ



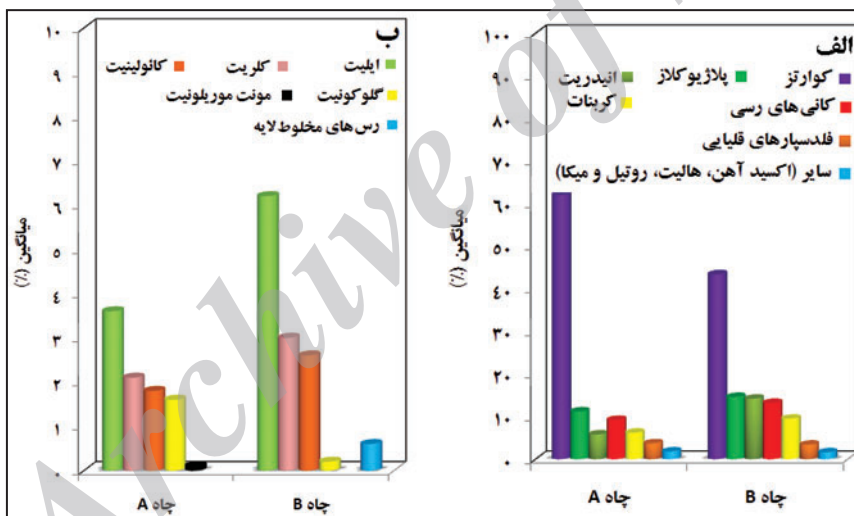
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و محل چاه‌های مورد مطالعه در خاور کپه داغ، رسم شده در نرم افزار ArcGIS نسخه ۹/۳.



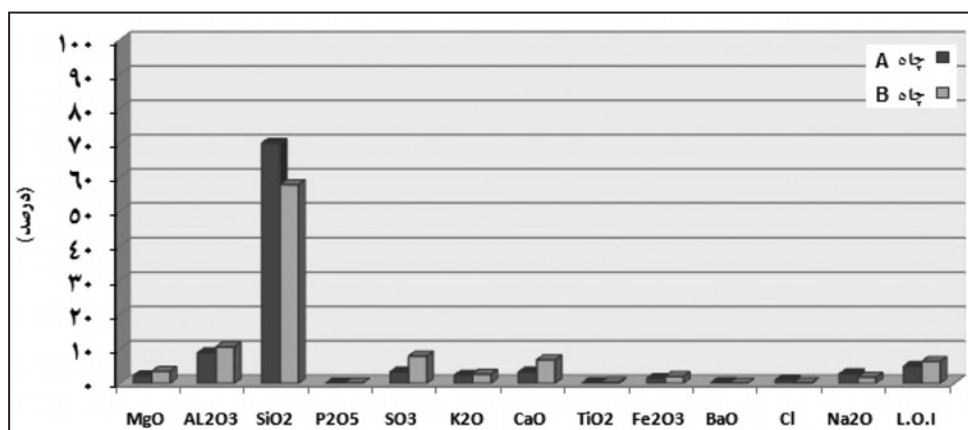
شکل ۲- مقایسه طیف پراش پرتو ایکس پیش و پس از حذف کانی‌های همراه در یک نمونه از چاه تولیدی (میزان کاهش کوآرتز: ۱/۵ برابر).



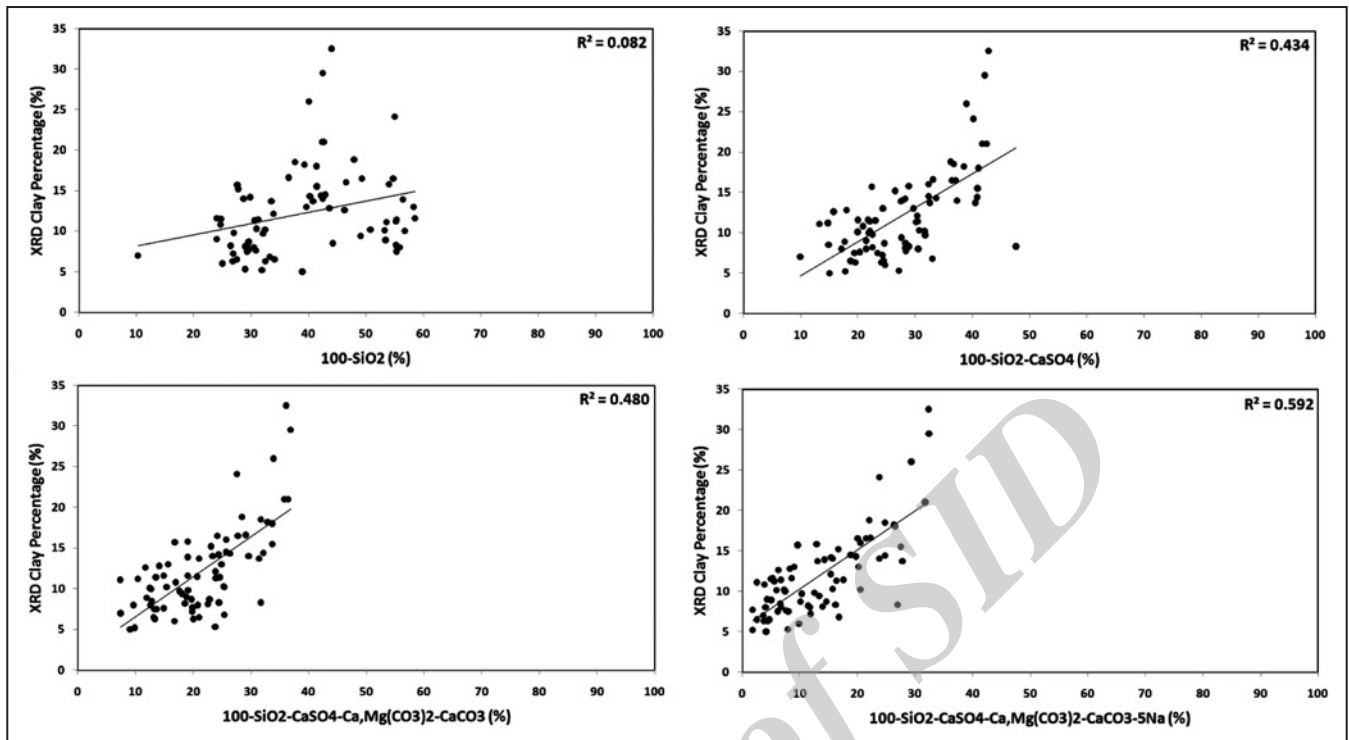
شکل ۳ - طیف‌های پراش پرتو ایکس پس از آماده‌سازی‌های ویژه روی بخش رس و شناسایی انواع کانی‌های رسی در یکی از نمونه‌های چاه خشک.



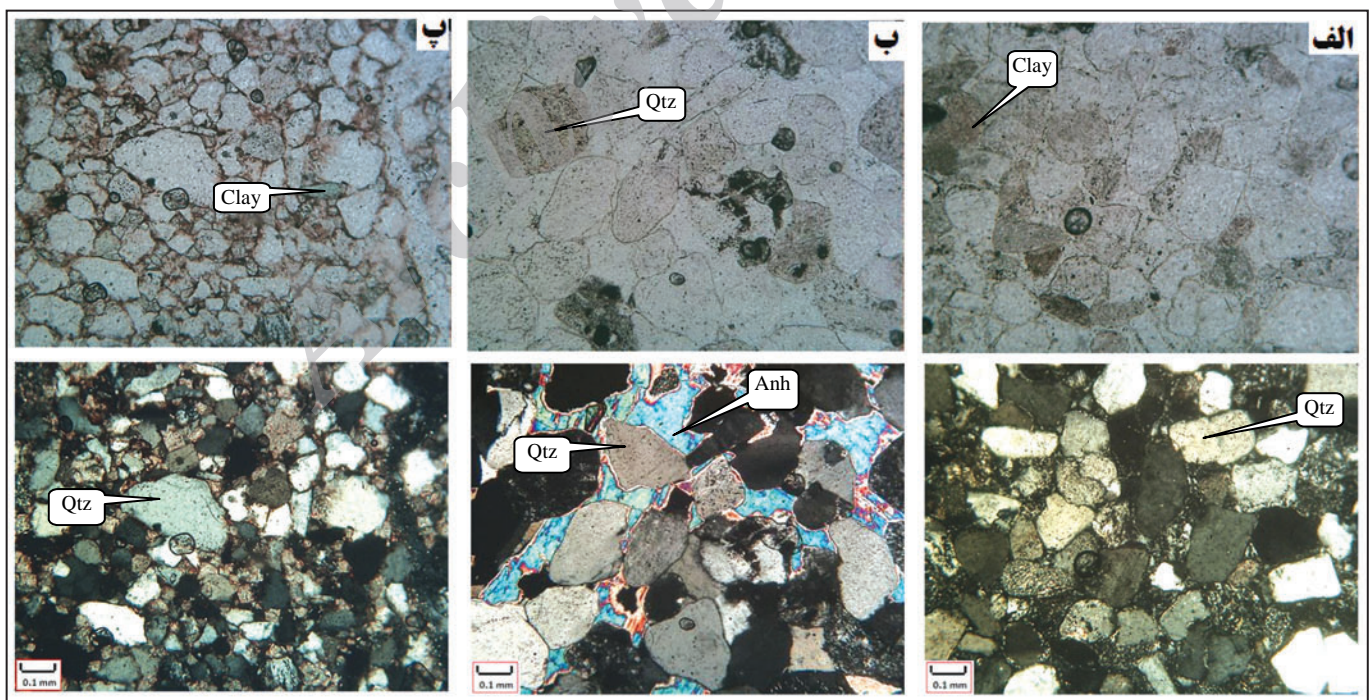
شکل ۴ - میانگین (الف) کانی‌های مختلف (ب) انواع کانی‌های رسی سازند شورپیچ در دو چاه تولیدی (A) و خشک (B) در میدان گنبدلی، نتایج آزمایش XRD.



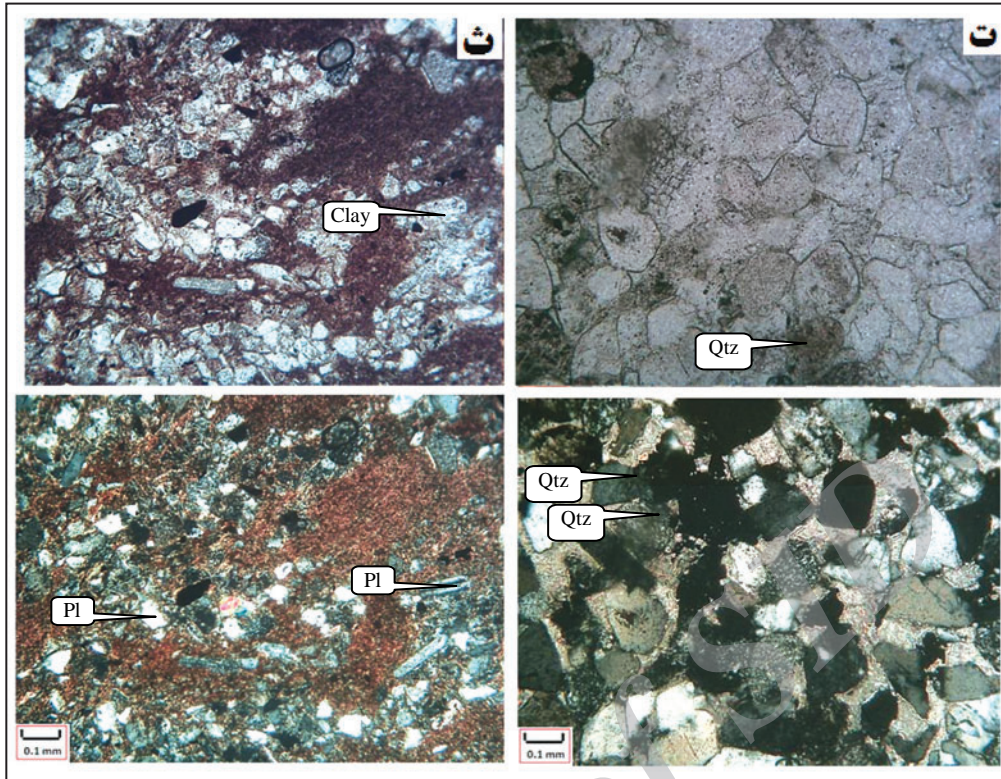
شکل ۵ - مقدار متوسط اکسیدهای اصلی سازند شورپیچ در دو چاه تولیدی (A) و خشک (B) در میدان گنبدلی، نتایج آزمایش XRF.



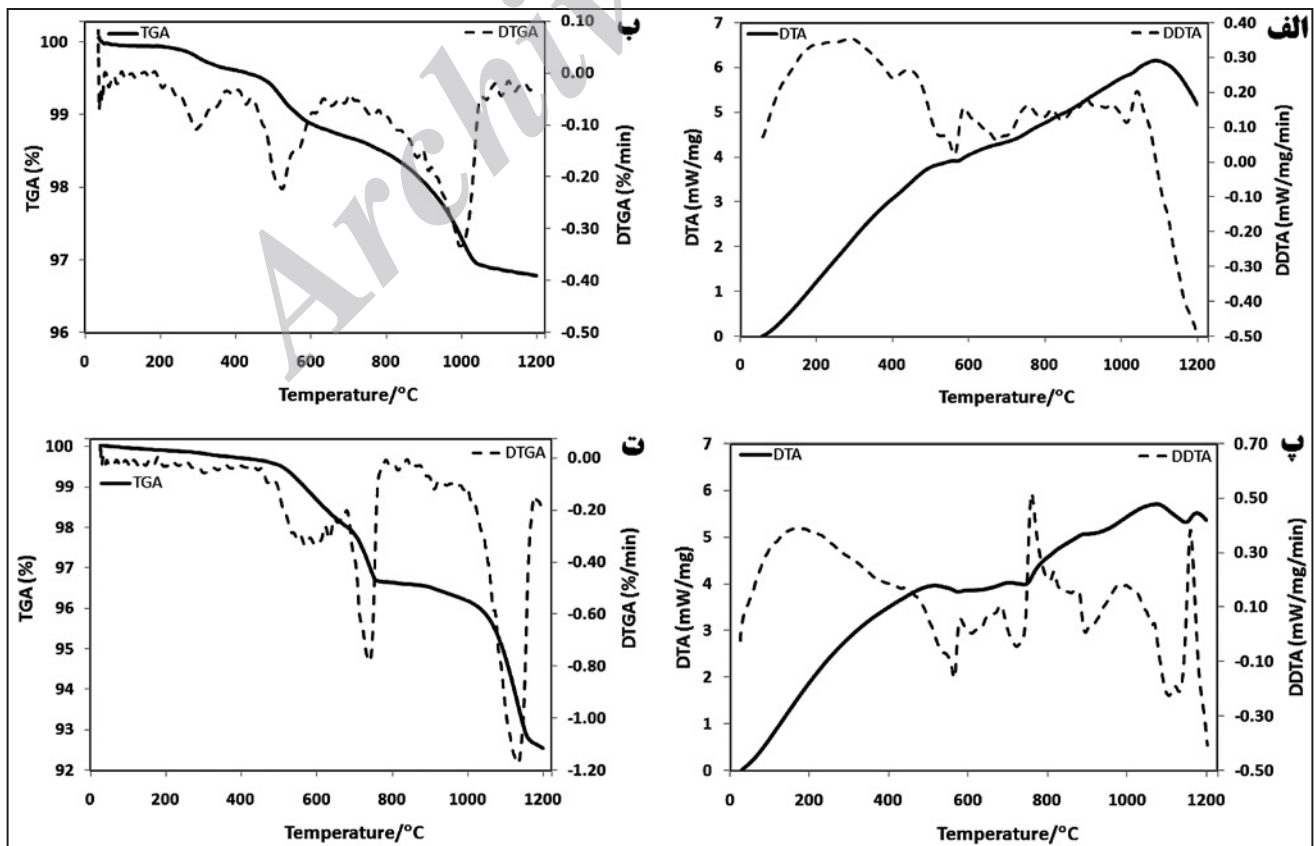
شکل ۶- افزایش ضریب همبستگی میزان رس از سمت چپ به راست با کاهش کانی‌های مختلف ساخته شده از نتایج تجزیه عنصری XRF.



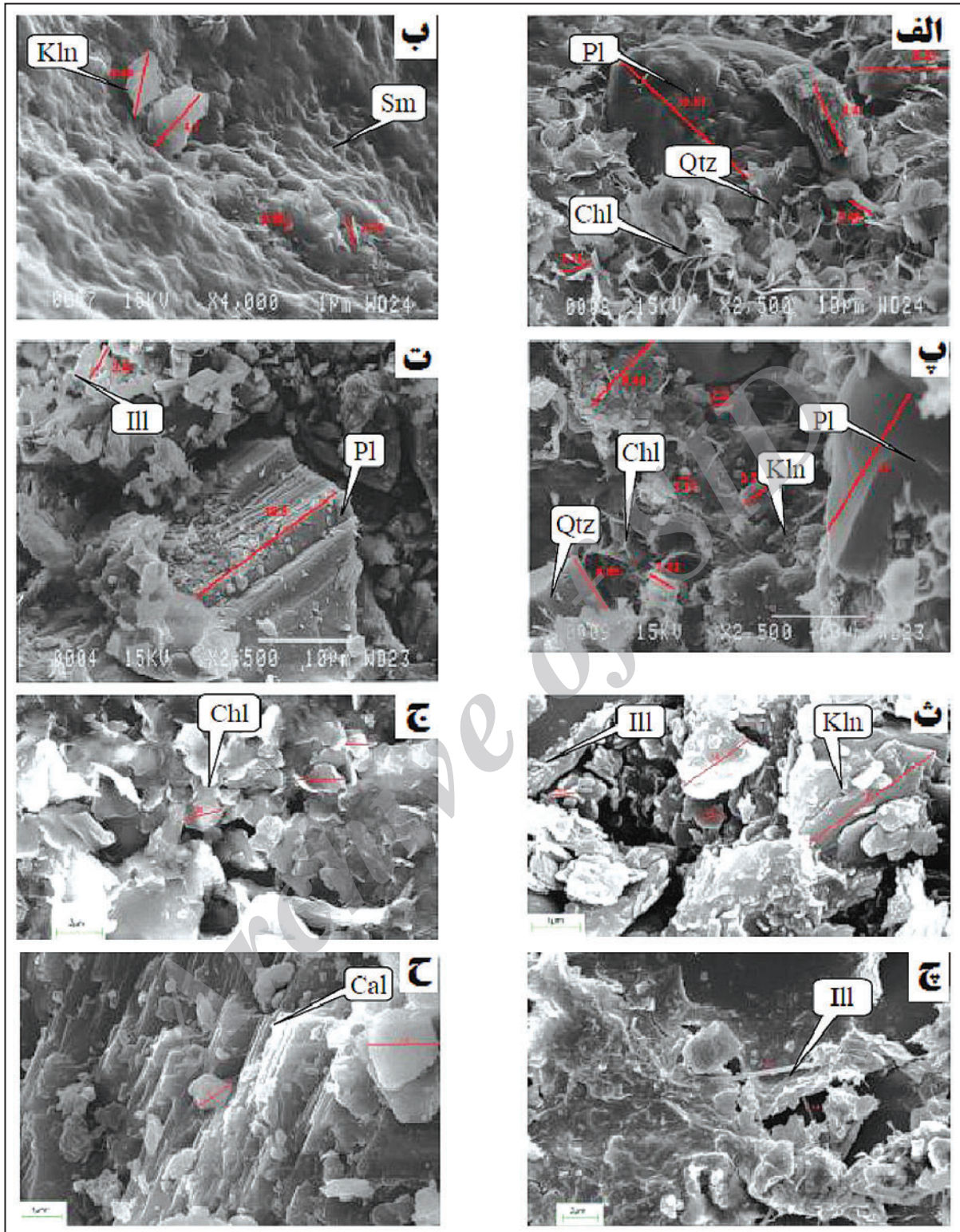
شکل ۷- الف) درجه بلوغ کانی‌شناختی و بافتی زیربخش مخزنی D₁ سازند شورپیچ در یکی از نمونه‌های چاه تولیدی A (بالا: نور انعکاسی PPL، پایین: نور عبوری XPL)، ب) سیمان شدگی شدید فضاهای خالی زیربخش C₂ سازند شورپیچ توسط کانی‌های تبخیری (انیدریت) در یکی از نمونه‌های چاه تولیدی A (بالا: نور انعکاسی PPL، پایین: نور عبوری XPL)، پ) دانه‌های زاویه‌دار تا نیمه زاویه‌دار زیربخش B سازند شورپیچ با جورشدگی بسیار ضعیف و آغشته به هیدروکربن در یکی از نمونه‌های چاه تولیدی A (بالا: نور انعکاسی PPL، پایین: نور عبوری XPL).



شکل ۷-ت) جورشدگی متوسط دانه‌های کوارتز و سیمان‌شدگی فضاهای میان دانه‌ای توسط سیمان کربناتی (بیشتر کلسیتی) در زیربخش D_1 سازند شوربچه در یکی از نمونه‌های مغزه چاه خشک B (بالا: نور انعکاسی PPL، پایین: نور عبوری XPL)، ث) ماتریکس حقیقی از جنس رسی با توزیع جریانی در یکی از نمونه‌های مغزه چاه خشک B در زیربخش C_2 سازند شوربچه (بالا: نور انعکاسی PPL، پایین: نور عبوری XPL).

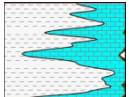
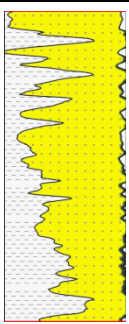
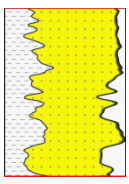
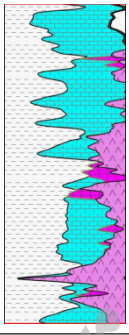
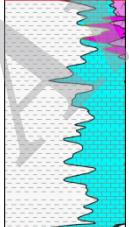
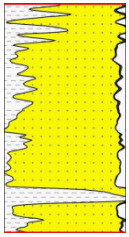
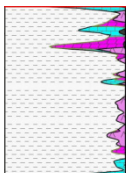


شکل ۸- نمودارهای TGA-DTGA و DTA-DDTA یک نمونه از چاه تولیدی (الف و ب) و یک نمونه از چاه خشک (ب و ت).



شکل ۹- الف) دانه پلاژیوکلاز با ابعاد حدوداً ۱۹ میکرون سیمان شده توسط کلریت منیزیم‌دار با ابعاد ۳ میکرون، بزرگنمایی ۲۵۰۰ برابر، ژرفای میدان ۲۳ میلی‌متر؛ ب) اسمکتیت و کانولینیت با ابعاد ۴/۵ میکرون، بزرگنمایی ۴۰۰۰ برابر، ژرفای میدان ۲۳ میلی‌متر؛ پ) سیمان رسی شامل کلریت با ابعاد تقریبی ۳ میکرون، کانولینیت با ابعاد ۴ میکرون لایه لایه دانه‌های کوارتز با ابعاد ۶/۵ میکرون و پلاژیوکلازها با ابعاد ۱۹ میکرون، بزرگنمایی ۲۳ میلی‌متر؛ ت) پلاژیوکلاز با ابعاد تقریبی ۱۹ میکرون پوشیده شده با سیمان رسی و ایلیت‌های توفالی شکل با ابعاد ۴ میکرون و پرکننده فضای بین دانه‌ها، بزرگنمایی ۲۵۰۰ برابر، ژرفای میدان ۲۳ میلی‌متر؛ ث) کانولینیت کتابی با ابعاد ۳۰/۵ میکرون و ایلیت با ابعاد ۵ میکرون، بزرگنمایی ۱۵۰۰ برابر، ژرفای میدان ۱۳ میلی‌متر؛ ج) کلریت‌های غنی از منیزیم با ابعاد ۲ میکرون، بزرگنمایی ۷۰۰۰ برابر، ژرفای میدان ۱۲ میلی‌متر؛ چ) ایلیت پل زنده با ابعاد ۵/۵ میکرون، بزرگنمایی ۵۵۰۰ برابر، ژرفای میدان ۱۱ میلی‌متر؛ ح) سیمان کربناتی، بزرگنمایی ۱۲۰۰۰ برابر، ژرفای میدان ۱۳ میلی‌متر.

جدول ۱- بخش‌های مختلف سازند شوربیجه براساس ویژگی‌های سنگ‌شناسی (شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۶۶).

متوسط ستبرای در یکی از چاه‌های تولیدی میدان (متر)		لیتولوژی	سنگ‌شناسی	بخش‌های سازند	
۱۲/۹۷			رس و سیلت، حاوی دانه‌های انیدریت به همراه لایه‌های بسیار نازک ماسه‌سنگ دانه‌ریز گلوکونیت و اکسید آهن دار	E	بخش فوقانی
۴۴/۸۷	۶۹/۶		لایه‌های ماسه سنگی دانه‌ریز تا متوسط دانه با سیمان آهکی حاوی گلوکونیت و اکسیدهای آهن به همراه تناوبی از لایه‌های رسی و سیلتی	D ₂	
۲۴/۷۳			ماسه‌سنگ متوسط دانه تا درشت دانه، کوارتزی و گلوکونیتی و نیز لایه‌های ماسه سنگ ریزدانه تا متوسط دانه کوارتزی حاوی اکسیدهای آهن با تناوب گاه و بی‌گاه لایه‌های رسی و سیلتی	D ₁	
۴۶/۳۵	۸۰/۴		عمدتاً رس و سیلت به همراه لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و یکی دو لایه انیدریت نازک	C ₂	بخش میانی
۳۴/۰۵				C ₁	
۳۳/۱۱			ماسه سنگ متوسط تا درشت دانه، گاهی کنگلومرای، کوارتزی و لایه‌های نازکی از رس و سیلت	B	بخش تحتانی
۲۵/۹۲			رس و سیلت	A	

جدول ۲ - طبقه‌بندی درصد کانی‌های رسی در دو چاه.

فراوانی	چاه A		چاه B	
	درصد تجمعی	فراوانی	درصد تجمعی	
ماسه تمیز	کمتر از ۱۰٪	۱۳	۶۵	۱۸
ماسه شیلی	۱۰-۱۵٪	۵	۹۰	۲۲
	۱۵-۲۰٪	۱	۹۵	۱۱
	۲۰-۲۵٪	۱	۱۰۰	۲
	بیشتر از ۲۵٪	۰	۰	۳

جدول ۳ - ضریب همبستگی میزان رس با عناصر مختلف.

عناصر	چاه A	چاه B
منیزیم	۰/۴۹۴	۰/۴۲۵
آلومینیم	۰/۸۲۷	۰/۸۲۲
سیلیسیم	-۰/۴۳۸	-۰/۱۰۲
فسفر	۰/۷۲۴	۰/۵۸۲
گوگرد	-۰/۳۷۵	-۰/۲۸۶
پتاسیم	۰/۶۸۸	۰/۷۹۷
کلسیم	-۰/۲۶۰	-۰/۴۲۹
تیتانیم	۰/۸۱۲	۰/۷۱۰
منگنز	-۰/۲۶۴	-
آهن	۰/۹۰۹	۰/۸۶۹
استرانسیم	-۰/۲۲۸	-۰/۰۵۷
زیرکونیم	-	۰/۱۹۹
باریم	-۰/۲۶۴	-
کلر	-۰/۳۸۵	-۰/۳۸۷
سدیم	-۰/۳۱۳	-۰/۴۷۵
میزان افت حرارتی (L.O.I)	-۰/۰۲۸	۰/۰۱۹

جدول ۴ - شناسایی کانی‌های رسی براساس داده‌های آزمایش تجزیه حرارتی نمونه‌ها.

شماره نمونه	آغستگی به مواد آلی	نوع کانی رسی
چاه تولیدی	۱	شدید
	۲	شدید
	۳	-
	۴	کم
چاه خشک	۵	کم
	۶	کم
	۷	کم
	۸	-
	۹	کم
	۱۰	-

جدول ۵ - ظرفیت تبادل کاتیونی کانی‌های رسی بر اساس مراجع مختلف.

نام کانی	فرمول شیمیایی (Serra, 1984)	CEC (meq/100g)		
		(Serra, 1984)	(Carroll, 1959)	(Triantafilis & Buchanan, 2007)
کانولینیت	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$	۳-۲۵	۳-۱۵	۳-۱۵
هالوزیت	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 \cdot 2H_2O$	۳-۲۵	۵-۱۰	-
هالوزیت با دو مولکول آب	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 \cdot 4H_2O$		۴۰-۵۰	-
مونت‌موریلونیت	$(Ca,Na)_7(Al,Mg,Fe)_4(Si,Al)_8O_{20}(OH)_4(H_2O)_n$	۸۰-۱۵۰	۷۰-۱۰۰	۸۰-۱۵۰
ایلیت	$K_1-1.5Al_4(Si_7-6.5Al_1-1.5)O_{20}(OH)_4$	۱۰-۴۰	۱۰-۴۰	۱۰-۴۰
ورمیکولیت	$(Mg,Fe,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$	۱۰۰-۲۶۰	۱۰۰-۱۵۰	۱۰۰-۱۵۰
کلریت	$(Mg,Fe,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$	۱۰-۴۰	۱۰-۴۰	۱۰-۴۰

جدول ۶ - مقادیر اندازه‌گیری شده ظرفیت تبادل کاتیونی نمونه‌های چاه‌های خشک و تولیدی.

شماره نمونه	ظرفیت تبادل کاتیونی	نوع کانی رسی
چاه تولیدی	۱	ایلیت و کلریت
	۲	ایلیت و کلریت
	۳	ایلیت و کلریت
	۴	ایلیت و کلریت
	۵	ایلیت و کلریت
	۶	کانولینیت
	۷	کانولینیت
	۸	مونت‌موریلونیت
	۹	مونت‌موریلونیت، ایلیت و کلریت
	۱۰	ایلیت و کلریت
چاه خشک	۱۱	ایلیت و کلریت
	۱۲	ایلیت و کلریت
	۱۳	ایلیت و کلریت
	۱۴	ایلیت و کلریت
	۱۵	ایلیت و کلریت
	۱۶	مونت‌موریلونیت، ایلیت و کلریت
	۱۷	مونت‌موریلونیت
	۱۸	مونت‌موریلونیت، ایلیت و کلریت
	۱۹	مونت‌موریلونیت
	۲۰	مونت‌موریلونیت

کتابکاری

- اخوان، ح.، رضایی، م.، ر.، اخروی، ر. و موسوی حرمی، س. ر.، ۱۳۸۰- تعیین لیتولوژی سیالات منفذی سازند شوربچه توسط داده‌های رقومی (خام و ارزیابی شده) نمودارهای ژئوفیزیکی و کاربرد آن در داده‌های لرزه‌ای بازتابی، مجموعه مقالات پنجمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تهران.
- افشار حرب، ع.، ۱۳۷۳- زمین‌شناسی ایران: زمین‌شناسی کپه‌داغ، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۲۷۵ صفحه.
- باقری، ح.، طباطبایی رئیس، س. ه.، فضل‌لی، ل. و دولتی ارده‌جانی، ف.، ۱۳۹۲- بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ مخزن شوربچه در یکی از چاه‌های واقع در حوضه کپه‌داغ (شمال خاور ایران)، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال نهم، شماره دوم: ۸۷-۹۹.
- جمالی، ا. م.، صادقی، ع. شمیرانی، ا. و باغبانی، د.، ۱۳۹۱- بایواستراتیگرافی سازند شوربچه در برش چینه‌شناسی حمام قلعه، جنوب کلات نادری، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، سال بیست و هشتم، شماره پیاپی چهل و ششم، شماره اول: ۹۵-۱۱۲.
- جمالی، ا. م.، صادقی، ع. و آدابی، م. ح.، ۱۳۹۰- رخساره‌ها و محیط‌های رسوبی سازند شوربچه در برش چینه‌شناسی حمام قلعه و جنوب کلات نادری، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال پنجم، شماره هفدهم: ۸۷-۱۰۲.
- جوزانی کهن، گ.، ۱۳۹۲- شناسایی کانی‌های رسی به روش طیف سنجی پراش پرتو ایکس، چاپ اول، موسسه انتشارات ستایش، تهران، ۱۵۰ صفحه.
- شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۶۶- گزارش تکمیلی چاه‌های میدان گنبدلی، ۲۳ صفحه.
- طباطبایی، پ.، لاسمی، ی.، جهانی، د. و اصلیلان مهابادی، ح.، ۱۳۹۲- رخساره‌ها و محیط‌های رسوبی سازند شوربچه در برش‌های قرقره و خانگیران، خاور حوضه رسوبی کپه‌داغ، ماهنامه علمی- ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، دوره ۱۳۹۲، شماره ۱۰۴: ۷۸-۷۲.
- گل افشانی، ط.، خانه باد، م.، موسوی حرمی، س. ر. و محبوبی، ا.، ۱۳۹۲ الف- برخاستگاه ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه (کرتاسه تحتانی) واقع در ناحیه آبگرم، خاور حوضه کپه‌داغ بر اساس داده‌های ژئوشیمی عناصر اصلی، اولین همایش زمین‌شناسی کاربردی ایران، دانشگاه دامغان.
- گل افشانی، ط.، خانه باد، م.، موسوی حرمی، س. ر. و محبوبی، ا.، ۱۳۹۲ ب- پتروگرافی و برخاستگاه ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه واقع در روستای آبگرم، خاور حوضه کپه‌داغ، هفدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه شهید بهشتی.
- مرتضوی، س. م.، موسوی حرمی، س. ر.، محبوبی، ا. و نجفی، م.، ۱۳۹۱- خاک‌های دیرینه (پالئوسل)، انواع و ویژگی‌های آن در سازند شوربچه (ژوراسیک پسین- کرتاسه پیشین)، حوضه رسوبی کپه‌داغ، شمال خاور ایران، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، سال بیست و هشتم، شماره پیاپی چهل و ششم، شماره اول: ۳۲-۱.
- موسوی حرمی، س. ر.، ۱۳۶۶- تفسیر محیط رسوبی سازند شوربچه (کرتاسه تحتانی) در شرق حوضه کپه‌داغ، مجموع مقالات پنجمین گردهمایی علوم زمین.
- نجفی، م. و کوسرخ، ع.، ۱۳۷۷- بررسی‌های سنگ‌چینه‌ای و سنگ‌شناسی سازند شوربچه در منطقه چشمه گیلان- بی‌جیرک در شمال باختری مشهد، فصلنامه علمی- پژوهشی علوم زمین، سال هفتم، شماره ۳۰-۲۹: ۱۰۳-۸۶.
- نجفی، م.، نداف، ر. و موسوی حرمی، س. ر.، ۱۳۷۸- مطالعه سنگ‌چینه‌ای سازند شوربچه در مقطع رادکان-بارو، جنوب خاور قوچان و مقایسه آن با مقاطع چشمه گیلان، دره‌خور و گردنه مزدوران، مجموعه مقالات سومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه شیراز.
- نفتکاو، ۱۳۸۵- پروژه مطالعه جامع میدان گنبدلی، کارفرما: شرکت ملی نفت مناطق مرکزی.

References

- Bailey, S. W., 1980- Structures of layer silicates, Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification, Mineralogical Society, London, Vol. 5, pp. 1-123.
- Brown, G. & Brindley, G. W., 1980- X-Ray diffraction procedures for clay mineral identification, Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification, Mineralogical Society, London, Vol. 5, pp. 305-359.
- Carroll, D., 1959- Ion exchange in clays and other minerals, Geological Society of America Bulletin 70 (6), pp. 749-780
- Ellis, D. V. & Singer, J. M., 2008- Well logging for earth scientist, Springer 2nd edition, p. 692.
- Fertl, W. H., 1986- Clay typing based on well logs, Annual Technical Meeting of the Petroleum Society of CIM, Calgary, Canada, pp. 257-272.
- Langier-Kuzniarowa, A., 1998- Some remarks on the methodology of thermal analysis of clay minerals, Journal of Thermal Analysis, Vol. 53, pp.375-381.
- Martin, R. T., 1954- Reference chlorite characterization for chlorite identification in soil clays, Clays and Clay Minerals, Vol. 3, issue 1, pp. 117-145.
- Moore, D. M. & Reynolds, Jr, R. C., 1989- X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals, Oxford University Press (OUP), p. 332.
- Moussavi-Harami, R. & Brenner, R. L., 1993- Diagenesis of non-marine petroleum reservoirs: the neocomian (lower cretaceous) Shurijeh Formation, Kopet-Dagh basin, NE Iran, Journal of Petroleum Geology, Vol. 16 (1), pp. 55-72.
- Serra, O., 1984- Fundamental of Well-Log Interpretation - The Acquisition of Logging Data, Netherlands: Elsevier science Publishers, p. 423.
- Slatt, R. M., 2007- Handbook of Petroleum Exploration and Production-Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists, Geophysicists, and Engineers, Elsevier, p. 492.
- Triantafyllis, J. & Buchanan, S., 2007- [Online]. Available:http://www.terraGIS.bees.unsw.edu.au/terraGIS_soil/sp_cation_exchange_capacity.html.
- Vaculíková, L. & Plevová, E., 2005- Identification of clay minerals and micas in sedimentary rocks, Acta Geodyn. Geometer, Vol.2 , No.2 (138), pp.167-175.
- Wooden, R. H. & Morad, S., 2003- Clay minerals in sandstones: controls on formation, distribution and evolution, Blackwell Publishing, p. 509.