



"مقاله پژوهشی"

مطالعه ریز دماسنجی و بررسی خواص شیمیایی و فیزیکی سیالات درگیر برای تعیین منشاء کانسار باریت آب ترش

حسین کلاترهرمزی^{۱*}، آرمین ملائی^۲، تارا ملائی^۳

^۱مدیریت مهندسی نفت، شرکت مهندسی و توسعه نفت، شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

^۲گروه مهندسی نفت، واحد گچساران، دانشگاه آزاد اسلامی، گچساران، ایران

^۳گروه مهندسی شیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: Email:h.kalantar.h@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲)

چکیده

باریت می‌تواند در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی تشکیل شود، به طوری که در طیف گسترده‌ای از انواع کانسارها یافت می‌شود. برای تعیین منشأ و شرایط فیزیکی و شیمیایی تشکیل کانسار باریت آب ترش، مطالعه جامعی با استفاده از روش‌های پتروگرافی و میانبارهای سیال انجام شد. سیالات درگیر بطور عمده در تعیین ترکیب شیمیایی و شرایط ترمودینامیکی حاکم بر سیالات فعال در فرآیندهای زمین‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. کانی‌سازی باریت در آب ترش به صورت یک رگه چینه کران در واحدهای سنگی کربناتی سنونین رخ می‌دهد. باریت با کوارتز و مقادیر جزئی مالاکیت، کریزوکولا، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز، گالن، آزوریت، فلوریت، پیریت و بورنیت همراه است. کاهیدگی ترموشیمیایی سولفات (TSR) محتمل‌ترین مکانیسم برای تشکیل گوگرد کاهیده در گالن است. محدوده شوری و دمای همگن‌شدگی در میانبارهای سیال با میزبان باریت و کوارتز (به ترتیب ۱۹/۳-۲/۷ درصد وزنی معادل NaCl و ۱۱۰-۲۷۵ °C) نشان می‌دهد که سیالات حوضه‌ای با مشارکت آب‌های جوی منبع محلول‌های کانی‌ساز بوده است. داده‌های میانبارهای سیال نشان می‌دهد که دو اختلاط سیال رخ داده است: یکی بین شوراب‌های حوضه‌ای داغ و آب‌های جوی سرد، و دیگری بین آب‌های جوی گرم و آب‌های جوی سرد. تخمین زده می‌شود که سیالات داغ از عمق حداکثر حدود ۹ کیلومتری مشتق شده‌اند. در این مطالعه، کانسار آب ترش به عنوان یک کانسار باریت وابسته به ساختار (ناپوستگی) طبقه بندی می‌شود. نتیجه آن که گسلش شدید و برشی شدن سنگ‌های میزبان حاصل از نیروهای تکتونیکی فشارشی پس از کرتاسه، احتمالاً مجاری مورد نیاز برای مهاجرت رو به بالای سیالات کانی‌ساز عمیق از منبع شوراب‌های حوضه‌ای را فراهم کرده است. باریت در جایی تشکیل شده است که سیالات گرمابی بالارو داغ و حاوی Ba با آب‌های فسیلی سردتر و حاوی سولفات که در لایه‌های رسوبی سنونین فوقانی محبوس بودند، و یا آب‌های جوی فرورو سرد که سولفات را از واحدهای سنگی دارای تبخیری‌ها کسب کرده‌اند، مواجه شدند. نتایج این تحقیق می‌تواند تا حدود زیادی در تعیین و شناخت کلی انواع کانسارهای باریت ایران و آگاهی از شرایط کانی‌سازی باریت در کشور مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: باریت؛ سیالات درگیر؛ دما؛ کانسار؛ آب ترش

مقدمه

باریت یک کانی است که از سولفات باریم (BaSO_4) تشکیل شده است. نام باریم (barium) از کلمه یونانی باروس (barus) به معنای سنگین گرفته شده است. باریت و ویتريت (BaCO_3) کانی‌های رایج باریم هستند. به دلیل فراوانی بیش‌تر نسبت به ویتريت، باریت کانی اصلی مورد استفاده در صنعت است. باریت در بسیاری از نواحی جهان یافت شده و در کشورهای زیادی استخراج و فرآوری می‌شود. باریت در طبیعت به صورت توده‌های دانه‌ای یا بلوری، ندول‌ها، تجمعات گل مانند و همچنین به صورت لایه‌های نازک تا توده‌ای ریز بلور ظاهر می‌شود. وزن مخصوص، بلوری بودن و رخ آن، باریت را از سایر کانی‌ها متمایز می‌کند. باریت در نهشته‌های مختلفی مانند حفره پرکن، برجای مانده از سنگ‌های آهکی حاوی باریت، و لایه‌ای وجود دارد (۲). کانسنگ‌های باریت در کانسارهای مختلف، عیار متفاوتی دارند. باریت یک کانی باطله رایج در سایر کانسارها مانند سرب و روی، فلوریت، طلا و کانی‌های عناصر نادر خاکی است. باریت در آب نسبتاً نامحلول و از نظر شیمیایی بی‌اثر است. به همین دلیل، و نیز چگالی بالا، باریت یک ماده ایده‌آل برای استفاده در صنایع نفت، اتومبیل‌سازی، رنگ‌سازی، پزشکی و غیره می‌باشد. باریت (BaSO_4) فراوان‌ترین کانی باریم در پوسته زمین است. دارای تقارن اورترومبیک است، بلورهای خوبی را تشکیل می‌دهد و رخ خوبی دارد (در امتداد ۰۰۱ عالی). وزن مخصوص آن در حالت خالص $5/4 \text{ gr/cm}^3$ و سختی آن در مقیاس سختی موس ۳ تا ۳/۵ است. باریت دارای رنگ‌های متنوع شامل زرد، سفید، قهوه-

ای، خاکستری، آبی و بی‌رنگ می‌باشد. رنگ خاکه سفید و جلای شیشه‌ای تا مرواریدی آن نیز شاخص است.

جستجوی انجام شده درباره موضوع این تحقیق نشان می‌دهد که مطالعات زمین‌شناسی اندکی به منظور تعیین منشأ کانسار باریت آب ترش در استان کرمان انجام گرفته است. بر اساس داده‌های صحرایی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی، این کانسار را اپی ژنتیک، اپی ترمال و محصول برخورد سیستم‌های ماگمایی توده‌های گرانیتوئیدی منطقه به درون سنگ‌های دوران اول و دوم دانسته که در طی آن سیستم‌های ماگمایی به عنوان ماشین حرارتی و کانسارسازی و سنگ‌های همبر به عنوان منشأ عناصر نقش مهمی را ایفا نموده‌اند (۳). با این وجود، پاسخ سوالاتی مانند این که کانسار آب ترش دقیقاً از چه نوع کانسارهای باریت است، منشأ محلول‌های تهنشست دهنده باریت چیست و باریم خود را چگونه بدست آورده‌اند، چه عواملی در تهنشست باریت نقش داشته‌اند، و بسیاری سوالات دیگر در خصوص شرایط تشکیل آن کاملاً نامشخص است. مطالعات مورد نظر در این تحقیق می‌تواند به درک شرایط تشکیل و منشأ کانسار باریت آب ترش کمک نماید. این مطالعه بیش‌تر جنبه بنیادی دارد و انجام آن در شناخت منشأ و فرآیندهای مؤثر در تشکیل این نوع کانسارهای باریت و اکتشاف ذخایر بیش‌تری از آن اهمیت ویژه‌ای دارد.

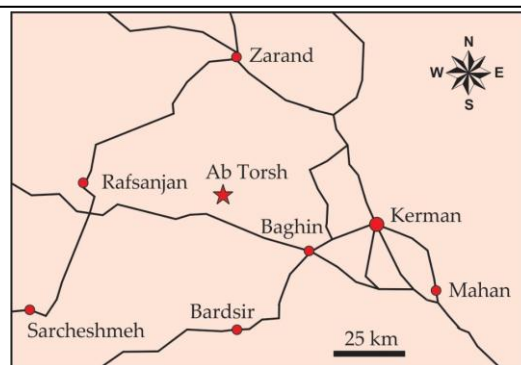
پوشش گیاهی فقیر بوده و گیاهان آن شامل گونه‌های علفی، بوته‌ای و درختچه‌های کوتاه خاردار می‌باشد.

اصول پایه

هنگامی که یک بلور در حضور یک فاز سیال رشد می‌نماید، ممکن است مقداری از سیال به صورت نقص‌هایی در بلور در حال رشد به دام افتد و میان‌بارهای سیال را تشکیل دهد. سیال به دام افتاده ممکن است مایع، بخار، یا سیال فوق بحرانی باشد. ترکیب سیال به دام افتاده ممکن است عمدتاً آب خالص، شوراب‌هایی با شوری مختلف، گاز یا سیالات گازدار، مذاب‌های سیلیکاتی، سولفیدی یا کربناتی، و غیره باشد بیش‌تر محققین اصطلاح میان‌بار سیال (Fluid Inclusion) را تنها برای توصیف ادخال‌هایی (Inclusions) بکار می‌برند که یک سیال را به دام انداخته‌اند و در ضمن سرد شدن تا دماهای محیط، به حالت سیال باقی مانده‌اند (۱۲).

کانسارها ناهنجاری‌های غیرمعمولی در پوسته زمین هستند که واضح‌ترین شواهد در خصوص جریان گذشته محلول‌ها از طریق گسل‌ها، شکستگی‌ها و سنگ‌های متخلخل را برای ما فراهم می‌آورند.

در این فرآیند، فلزات دارای ارزش اقتصادی حل، حمل و نقل و متمرکز می‌گردند. توجه به میان‌بارهای سیال به دام افتاده در رگه‌های گرمابی، یک راه مستقیم برای کسب اطلاعات بیش‌تر درباره ماهیت این سیالات کانی ساز و فرآیندهایی که بوسیله آن‌ها کانسارها تشکیل شده‌اند، است. در این رابطه، طبیعت نیز با فراهم نمودن نمونه موادی ایده‌آل برای تحقیق و بررسی، به ما کمک شایانی کرده است. این مواد عبارتند از کانی‌های دانه درشت، شفاف و دارای میان‌بارهای سیال بزرگ که برای روش‌های جدید

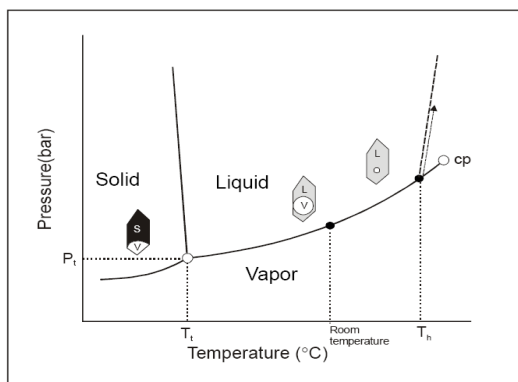


شکل (۱): موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به کانسار باریت آب ترش

جایگاه زمین شناسی

کانسار باریت آب ترش با مختصات جغرافیایی $30^{\circ} 21' 32''$ طول شرقی و $56^{\circ} 35' 07''$ عرض شمالی در ۶۰ کیلومتری غرب شهرستان کرمان و ۲/۵ کیلومتری غرب روستای آب ترش در استان کرمان واقع است (شکل ۱). ناحیه کانسار منطقه‌ای کوهستانی بوده که سیمای آن متشکل از دره‌ها، تپه ماهورهای مرتفع و کوه‌های استپی است. منطقه مورد نظر دارای آب و هوای خشک تا نیمه خشک و سرد می‌باشد (۱). براساس آمار اقلیمی ۱۸ ساله ایستگاه سینوبتیک کرمان در سال‌های ۱۳۷۷ - ۱۳۵۹، میانگین درجه حرارت سالانه ۱۵ درجه سانتی‌گراد بوده که گرم‌ترین ماه سال تیر و سردترین ماه دی است. میانگین حداکثر درجه سالانه ۲۴/۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین حداقل آن ۶/۷ درجه سانتی‌گراد است. میانگین بارش سالیانه طی دوره ۱۸ ساله ۱۴۹/۱ میلی‌متر است که ۵۹ درصد بارندگی سالیانه در زمستان اتفاق می‌افتد. بیش‌ترین بارندگی ماهانه ۴۰ میلی‌متر در اسفند ماه است. بارش اکثراً به صورت باران می‌باشد که در زمستان در بالای ارتفاعات هنگام بروودت هوا برف می‌بارد. ناحیه کانسار از نظر

نمایند. این مسیر دارای چگالی (یا حجم مولار) ثابت، یک ایزوکور (Isochore) نامیده می شود (شکل ۲).



شکل (۲): تکوین P-T یک میانبار سیال آگین که در یک فشار و دما به دام افتاده و سپس در امتداد یک مسیر با چگالی ثابت (یا حجم مولار، یعنی یک ایزوکور) سرد شده است. $S = جامد$ ، $L = مایع$ ، $V = بخار$ ، $T_h = دمای همگن شدگی$ ، $P_i - T_i = فشار و دما در نقطه سه گانه آب$ ، $cp = نقطه بحرانی$.

میانبارهای سیال در بسیاری از کانی های سنگ ساز در بیش تر محیط های زمینی رخ می دهند. از نظر تئوری، تقریباً همه کانی ها را می توان به منظور میانبارهای سیال مطالعه نمود. به هر حال، ممکن است ویژگی هایی مانند رنگ، سختی مکانیکی، رخ و شفافیت، محدودیت هایی را در رابطه با اینکه کدام کانی ها را می توان به طور جامع مورد مطالعه قرار داد، ایجاد نمایند. کانی هایی که میانبارهای سیال در آنها بیش تر گزارش شده است شامل کوارتز، فلوریت، هالیت، کلسیت، آپاتیت، دولومیت، اسفالریت، باریت، توپاز و کاسیتريت می باشد (۵). صرف نظر از هالیت، این کانی ها رایج ترین کانه ها و کانی های باطله همراه با کانسارهای گرمابی هستند و نشان دهنده توجه

ریز دماسنجی (Microthermometry) و تجزیه شیمیایی کلی بسیار مناسب هستند (۱۸).

اعتبار این روش ها به بیش از ۱۵۰ سال قبل و به بنیان گذار تحقیقات میانبارهای سیال، هنری کلیفتون سوربی (Henry Clifton Sorby) باز می گردد. سوربی در مقاله کلاسیک خود (۴). نمونه هایی از کانسارها را که دارای میانبارهای سیال بودند، توصیف نمود و در خصوص تشکیل کانسنگ ها به نتایجی رسید که به مدت چندین سال از نظر علمی بی نظیر باقی ماند. امروزه ما اهمیت ایده هایی که توسط سوربی توسعه یافت را تشخیص داده و این ایده ها پایه بیش تر تحقیقات کنونی در زمینه میانبارهای سیال را تشکیل می دهند (۱۹).

میانبارهای سیال مقادیر کوچکی (اغلب $30 \mu m$ - ۵ در امتداد طول ترین قطر) از سیال (مایع و/یا بخار) هستند که در حفرات عمدتاً کوچک درون کانی ها به دام می افتند (۱۹). دلیل اصلی مطالعه میانبارهای سیال، تعیین عوامل فیزیکوشیمیایی، به خصوص فشار و دما (P-T)، و همچنین شیمی سیال در ضمن به دام افتادن است. به هر حال، ممکن است سنگ مورد مطالعه P-T کاملاً متفاوتی داشته باشد زیرا محتویات میانبار سیال ممکن است تحت تأثیر تغییرات پس از به دام افتادن قرار گرفته باشند. به عنوان مثال، در محیط های رسوبی ممکن است اذخال ها در حین فرآیندهای دیاژنزی تغییر یابند (۱۷). بنابراین، هر مطالعه میانبارهای سیال مستلزم آن است که معلوم شود در طول تکوین P-T سیستم، هیچ گونه نشت، تغییرات حجم یا ترکیب رخ نداده است. لذا میانبارهای سیال می بایست یک مسیر ایزوکور- ایزوپلت تک متغیر را در فضای P-T دنبال

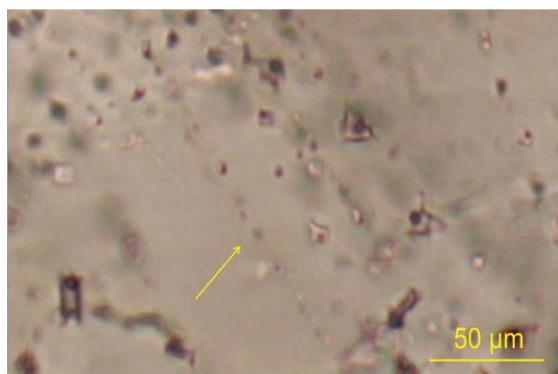
بسیار زیاد پژوهشگران میانبارهای سیال به این کانسارها در چند دهه اخیر می‌باشند.

بررسی توزیع مکانی گروه‌های مختلف میانبارهای سیال در یک دانه کانی، دارای اهمیت زیادی در تعیین توالی پارائزنی آن‌ها نسبت به تشکیل کانی می‌باشد. سه نوع اصلی از میانبارهای سیال قابل تشخیص است: میانبارهای سیال مجزا، دسته‌های میانبارهای سیال و دنباله‌های میانبارهای سیال (۶). معمولاً اعتقاد بر این است که دو نوع اول دارای منشأ اولیه هستند. میانبارهای سیال اولیه در ضمن رشد بلور به دام می‌افتند. این ادخال‌ها در کانی‌هایی رخ می‌دهند که در محیطی با یک فاز سیال آزاد رشد نموده‌اند. نوع سوم نشان دهنده جوش خوردن ریزترک‌ها پس از رشد کانی می‌باشند. این نوع، به ادخال‌های ثانویه تعلق داشته که بوسیله بسته شدن شکستگی‌های پر از سیال درون کانی‌ها تشکیل می‌شوند. دیواره‌های این شکستگی‌ها با هم رشد نموده و توده‌های کوچکی از سیالی را که وارد شکاف‌های باز شده است، احاطه می‌نمایند. ادخال‌های ثانویه در امتداد ترک‌های جوش خورده و پس از تبلور دانه کانی تشکیل می‌شوند، هر چند که در برخی از موارد رشد کانی می‌تواند پس از باز شدن ترک نیز ادامه یابد و ادخال‌های ثانویه دروغین را تولید نماید. معمولاً اعتقاد بر این است که تنها اندکی از نمونه‌ها غنی از میانبارهای سیال اولیه هستند، در صورتی که ادخال‌های ثانویه، ثانویه دروغین و ادخال‌های دارای سن حد واسط در بیش‌تر سیستم‌ها غالب می‌باشند (۱۶). این به آن معنی است که منشأ سیال به دام افتاده، و در بیش‌تر موارد رابطه آن با تشکیل کانی ناشناخته باقی می‌ماند.

در مطالعه کانسارها، اغلب بیش از یک سیال به طور همزمان به دام می‌افتد. این امر این سؤال را مطرح می‌نماید که کدام یک از سیالات، سیال کانی‌ساز است. مشاهداتی از این قبیل، اهمیت بررسی‌های دقیق پتروگرافی نمونه‌هایی را که مورد مطالعات میانبارهای سیال قرار خواهند گرفت، مورد تأکید قرار می‌دهد. این مطالعات مهم است زیرا مشخص می‌سازد که آیا ادخال‌های موجود به منظور پاسخ دادن به سؤالات زمین‌شناسی مورد نظر مناسب هستند یا خیر؟

نمونه‌ها و روش‌ها

رایج‌ترین روش تجزیه‌ای غیر مخرب در مطالعه میانبارهای سیال، ریزدماسنجی است. این روش نسبتاً ارزان بوده و امکان تعیین قابل اعتماد خواص ترکیبی و فیزیکی فازهای به دام افتاده را فراهم می‌آورد. ریزدماسنجی شامل سرمایش و گرمایش ادخال‌ها ضمن مشاهده تغییرات فاز از طریق یک میکروسکوپ نوری می‌باشد که بوسیله آن ترکیب، چگالی و دمای به دام افتادن سیال تعیین می‌گردد. مطالعات میانبارهای سیال بر روی مقاطع نازک دو طرف صیقل (با ضخامت حدود $150\text{ }\mu\text{m}$) تهیه شده از سه نمونه باریت و دو نمونه کوارتز انجام شد. برای مطالعه میانبارهای سیال، یک میکروسکوپ زایس (Zeiss) دارای میز گرمایش و سرمایش THMS-600 لینکام در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران استفاده شد. به منظور سرمایش و گرمایش نمونه‌ها، به ترتیب از نیتروژن مایع و یک رزیستور حرارتی استفاده شد. دستگاه با استفاده از ترکیبات استاندارد (نیترات سزیم و هگزان) کالیبره شد و دقت دستگاه برای اندازه گیری‌های سرمایش



شکل (۳): میانبرهای سیال ثانویه در روندهای خطی در نمونه‌های باریت کانسار آب ترش.

بر اساس نوع فازهای موجود در دمای اتاق و رفتار گرمایشی و سرمایشی، دو نوع میانبار سیال آبگین (aqueous) در نمونه‌های باریت رخ می‌دهد که شامل میانبرهای تک فاز مایع (L) و دو فاز غنی از مایع (L + V) است. یک مایع آبگین (L) تنها فاز موجود در میانبرهای تک فاز است. اندازه این میانبرها ۵ تا ۱۸ μm است. این میانبرها نامنظم، بیضوی و کروی شکل هستند (شکل ۴). میانبرهای دوفاز غنی از مایع (L + V) با یک مایع آبگین غالب (L) و یک حباب بخار (V) مشخص می‌شوند که ۱۵ تا ۳۰ درصد حجمی میانبار را اشغال می‌کنند. اندازه آن‌ها ۸ تا ۲۰ μm است. این میانبرها به اشکال کروی، بیضوی، نامنظم و بلور منفی رخ می‌دهند (شکل ۴). باریک شدگی (necking down) در برخی از این میانبرها مشاهده می‌شود (شکل ۵).

$\pm 0.2^\circ\text{C}$ و برای اندازه‌گیری‌های گرمایش 0.1°C می‌باشد. میانبرهای سیال با میزبان باریت ابتدا تحت اندازه‌گیری‌های گرمایشی و سپس مطالعات سرمایشی قرار گرفتند، در حالی که برای میانبرهای سیال با میزبان کوارتز این اندازه‌گیری‌ها برعکس است. اندازه‌گیری‌های سرمایشی بر روی میانبرهای سیال تا انجماد کامل آن‌ها انجام شد و تبدیلات فازی بلافاصله پس از گرمایش اندازه‌گیری گردید. اندازه‌گیری‌های گرمایشی از طریق حرارت دادن تا رسیدن به دماهای همگن شدگی انجام شد. شوری میانبرهای سیال براساس دماهای ذوب یخ ($T_{m, ice}$) و با استفاده از معادله بودنار (۱۱) محاسبه شد.

نتایج و بحث

پetroگرافی میانبرهای سیال

از نظر زمان به دام افتادن سیال و با استفاده از معیارهای ارائه شده توسط رودر (۶) و شفرود و همکاران (۵)، دو نوع میانبار سیال در نمونه‌های باریت و کوارتز کانسار آب ترش شناسایی شد: اولیه و ثانویه. میانبرهای سیال اولیه به طور تصادفی توزیع شده یا جدا هستند، در حالی که میانبرهای سیال ثانویه معمولاً به صورت ردیفی قرار می‌گیرند (شکل ۳). همه اندازه‌گیری‌ها بر روی میانبرهای سیال اولیه انجام شد، زیرا میانبرهای سیال ثانویه تاریخچه پس از تشکیل کانی‌ها را نشان می‌دهند.

مایع (L) و دوفاز غنی از مایع (L + V) می‌باشند. اندازه میانبرهای تک فاز مایع (L) ۵ تا ۱۵ μm است. آن‌ها نامنظم و بیضی شکل هستند (شکل ۶). حباب بخار ۱۵ تا ۳۵ درصد حجمی از میانبرهای دوفاز غنی از مایع (L + V) را اشغال می‌کند. اندازه آن‌ها از ۱۰ تا ۲۰ μm متغیر است. آن‌ها دارای اشکال نامنظم، بیضی، کروی و بلور منفی هستند (شکل ۶).

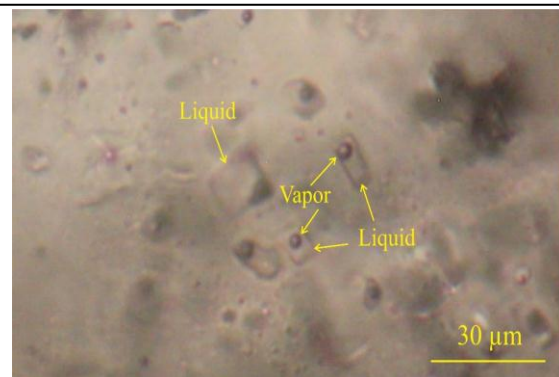
ریزدماسنجی

اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی بر روی میانبرهای سیال دو فازی انجام شد. در مجموع ۷۰ میانبر (۴۲ عدد در نمونه‌های باریت و ۲۸ عدد در نمونه‌های کوارتز) اندازه‌گیری شد. نتایج ریزدماسنجی و مخفف اصطلاحات مورد استفاده در متن در جدول ۱ آورده شده است. میانبرهای سیال در مطالعات گرمایشی تا دمای 100°C تا 110°C سرد شدند تا اطمینان حاصل شود که کاملاً منجمد هستند. همه میانبرهای سیال در طول اندازه‌گیری‌های گرمایشی به فاز مایع همگن شدند.

جدول (۱): خلاصه نتایج ریزدماسنجی میانبرهای سیال در کانسار آب ترش.

Host mineral	T_e ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{m, ice}$ ($^{\circ}\text{C}$)	T_h ($^{\circ}\text{C}$)	Salinity (wt. % NaCl eq.)	N
barite	-27/-24	-15.8/-1.6	110/275	2.74/19.29	42
quartz	-24/-23	-12.4/-2.2	137/268	3.71/16.34	28

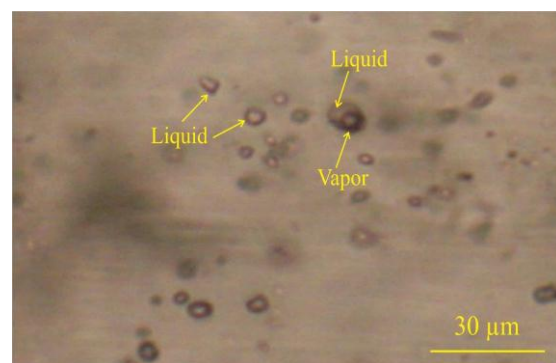
T_e : دمای اولین ذوب یخ؛ $T_{m, ice}$: دمای آخرین ذوب یخ؛ T_h : دمای همگن شدگی به مایع؛ N: تعداد اندازه‌گیری.



شکل (۴): میانبرهای سیال تک فاز مایع (L) و دو فازی غنی از مایع (L+V) در نمونه‌های باریت کانسار آب ترش.



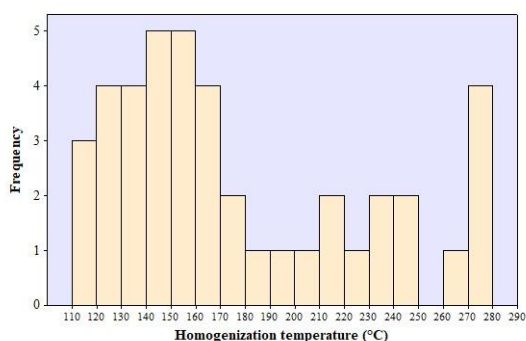
شکل (۵): باریک شدگی (necking down) در میانبرهای سیال دو فازی غنی از مایع (L+V) در نمونه‌های باریت کانسار آب ترش.



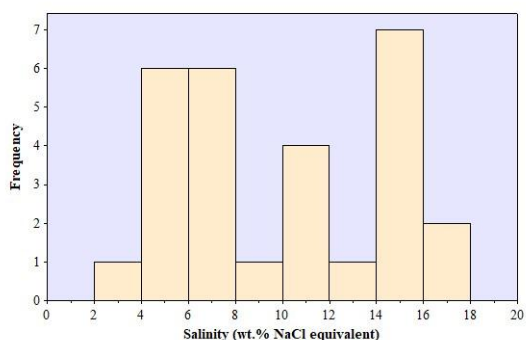
شکل (۶): میانبرهای سیال تک فاز مایع (L) و دو فازی غنی از مایع (L+V) در نمونه‌های کوارتز کانسار آب ترش.

میانبرهای سیال با میزبان کوارتز شبیه آن‌هایی هستند که در باریت رخ می‌دهند و از نوع تک فاز

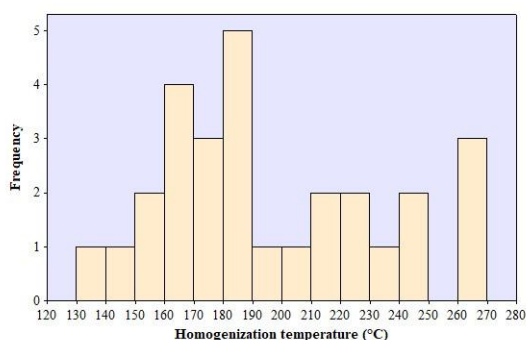
فراوانی در 185°C قرار می‌گیرد (شکل ۱۰). داده-های میانبارهای سیال در کوارتز به خوبی با داده‌های باریت همپوشانی دارند (شکل ۱۱).



شکل (۸): هیستوگرام فراوانی دمای همگن شدگی میانبارهای سیال در نمونه‌های باریت کانسار آب ترش.

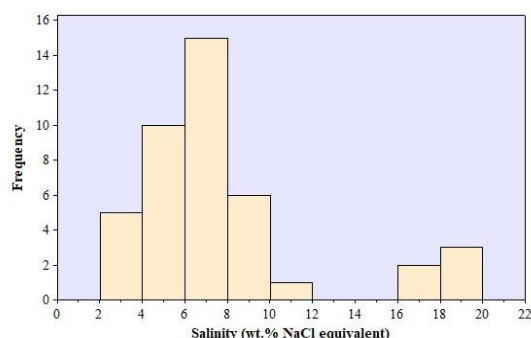


شکل (۹): هیستوگرام فراوانی شوری میانبارهای سیال در نمونه‌های کوارتز کانسار آب ترش.



شکل (۱۰): هیستوگرام فراوانی دمای همگن شدگی میانبارهای سیال در نمونه‌های کوارتز کانسار آب ترش.

در میانبارهای سیال با میزبان باریت، اولین دمای ذوب یخ (T_e) در محدوده 27°C تا 24°C قرار می‌گیرد، که یک سیستم شوراب $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ با کاتیون‌های دو ظرفیتی احتمالی در میانبارها را نشان می‌دهد (۵). مقادیر $T_{m, ice}$ از $15/8^{\circ}\text{C}$ تا $1/6^{\circ}\text{C}$ متغیر است. میزان شوری محاسبه شده براساس مقادیر $T_{m, ice}$ از $2/7$ تا $19/3$ درصد وزنی معادل NaCl ، با بالاترین فراوانی در ۷ درصد وزنی معادل NaCl متغیر است (شکل ۷). دمای همگن شدگی (T_h) محدوده وسیعی از 110°C تا 275°C ، با بالاترین فراوانی در 150°C را اشغال می‌کند (شکل ۸).

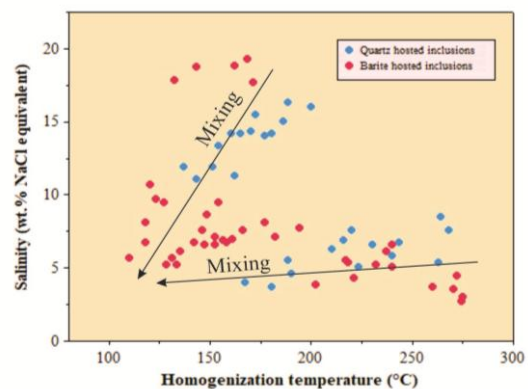


شکل (۷): هیستوگرام فراوانی شوری میانبارهای سیال در نمونه‌های باریت کانسار آب ترش.

در میانبارهای سیال با میزبان کوارتز، مقادیر T_e عبارتند از 24°C و 23°C که یک سیستم شوراب $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ با کاتیون‌های دو ظرفیتی احتمالی در میانبارها را نشان می‌دهد. مقادیر $T_{m, ice}$ در محدوده $12/4^{\circ}\text{C}$ تا $2/2^{\circ}\text{C}$ قرار دارد. مقادیر شوری از $3/7$ تا $16/3$ درصد وزنی معادل NaCl ، با بیش‌ترین فراوانی در ۱۵ درصد وزنی معادل NaCl متغیر است (شکل ۹). دمای همگن شدگی (T_h) محدوده وسیعی از 137°C تا 268°C ، با بالاترین

همگن شدگی میانبارهای سیال با میزبان باریت و کوارتز در محدوده دمایی وسیعی از ۱۱۰ °C تا ۲۷۵ °C رخ می دهد. این تنوع T_h ممکن است دمای واقعی به دام افتادن سیال را در طول رشد کانی‌ها نشان دهد، یا ممکن است به دلیل برخی عوامل از جمله: (الف) نامناسب بودن عملیات نمونه‌برداری، آماده‌سازی نمونه، و به دست آوردن داده‌ها؛ (ب) تعادل مجدد از طریق کشش ناشی از یخ زدگی (freeze stretching) در طول اندازه‌گیری‌های سرمایشی در باریت؛ (ج) تعادل مجدد حرارتی از طریق کشش ناشی از اندازه میانبارها؛ و (د) تعادل مجدد حرارتی به دلیل قرار گرفتن میانبارهای سیال در شرایط فشار و دمای جدید ناشی از بالا آمدگی یا دفن کانی‌های میزبان (۱۵).

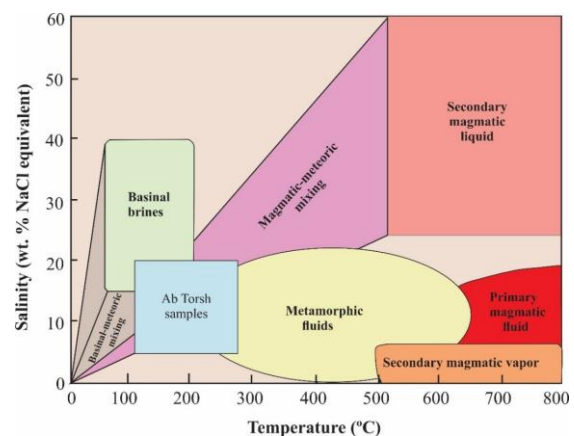
از آنجا که در طول عملیات نمونه‌گیری تا جمع‌آوری داده‌ها، دقت کافی برای جلوگیری از آسیب احتمالی نمونه‌ها و عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها انجام شد، عملکرد نادرست نمی‌تواند دلیل تغییرات T_h باشد. تعادل مجدد ناشی از کشش انجمادی نیز نمی‌تواند باعث تغییرات T_h در میانبارهای سیال با میزبان باریت باشد، زیرا اندازه‌گیری‌های گرمایشی قبل از مطالعات سرمایش انجام شده است. در یک مجموعه میانبارهای سیال، مقادیر T_h اندکی با کاهش اندازه میانبارها کاهش می‌یابد (۸). هیچ ارتباطی بین اندازه میانبارهای سیال و مقدار T_h یافت نشد (ضریب همبستگی $R^2 = 0.04$ برای کوارتز و 0.224 برای باریت). بنابراین، ارتباط دادن تنوع T_h به اندازه میانبارهای سیال نامربوط است (۸). تعادل مجدد حرارتی ناشی از قرار گرفتن در شرایط فشار و دمای جدید پس از به دام افتادن سیال ممکن است باعث



شکل (۱۱): نمودار T_h -شوری برای میانبارهای سیال در نمونه‌های باریت و کوارتز کانسار آب ترش.

منبع سیالات کانی ساز

مطالعات ریزدامسنجی انجام شده بر روی میانبارهای سیال نشان می‌دهد که باریت و کوارتز کانسار آب ترش از سیالات با شوری کم تا نسبتاً بالا (۲/۷-۱۹/۳ درصد وزنی معادل NaCl) ته نشست شده‌اند. شوری زیاد سیالات با شوری شوراب‌های حوضه‌ای مطابقت دارد، در حالی که شوری کم سیالات، رقیق شدگی شوراب توسط آب‌های جوی را اثبات می‌کند (۷) (شکل ۱۲).



شکل (۱۲): داده‌های دمای همگن شدگی و شوری میانبارهای سیال در نمونه‌های باریت و کوارتز کانسار آب ترش در مقایسه با توزیع دما-شوری تقریبی برای محلول‌های گرمایی با منشأهای مختلف (۱۱).

کشیدگی، و یا نشت و پر شدن مجدد شود. نشت و پر شدن مجدد توسط میانبارهای سیالی نشان داده می‌شود که در نمودار T_h -شوری روندهای همگرا نشان می‌دهند، در حالی که کشش باعث ایجاد یک محدوده دمایی گسترده و متناوب در هیستوگرام‌های توزیع T_h با فراوانی‌های کوچک در هر بازه T_h می‌شود (۱۵ و ۱۷). داده‌های میانبارهای سیال در باریت و کوارتز نه روندهای همگرا را در نمودار T_h -شوری نشان می‌دهد (شکل ۱۱)، و نه یک الگوی متناوب در هیستوگرام توزیع T_h (شکل‌های ۸ و ۱۰). این نشان می‌دهد که داده‌های ریزدماسنجی شواهدی برای حمایت از تعادل مجدد حرارتی میانبارهای سیال پس از به دام افتادن آن‌ها از طریق کشش یا نشت و پر شدن مجدد ارائه نمی‌دهند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که دامنه وسیع مقادیر T_h به دلیل تغییرات پس از به دام افتادن میانبارهای سیال نیست، بلکه بازتاب دامنه واقعی دماهایی است که در آن به دام افتاده‌اند. نوسانات فشار در طول رشد کانی‌ها دلیل حداقل بخشی از طیف وسیع مقادیر T_h در نظر گرفته می‌شود (۱۵).

همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، حد پایینی محدوده دماهای همگن شدگی برای میانبارهای سیال با میزبان باریت و کوارتز (110°C - 275°C) با دمای شوراب‌های حوضه‌ای سازگار است، در حالی که حد بالایی آن از محدوده دمایی این سیالات بیشتر است. این واقعیت که دمای همگن شدگی میانبارهای سیال از حد بالایی دمای شوراب-های حوضه‌ای در شکل ۱۲ تجاوز می‌کند، تناقض ایجاد نمی‌کند، زیرا سیالات حوضه‌ای با دمای بیش از 300°C در برخی از حوضه‌های رسوبی یافت

می‌شوند (۹). این دماهای بالا به این واقعیت نسبت داده می‌شود که آن‌ها از اعماق زیاد منشأ می‌گیرند. با در نظر گرفتن حداکثر دمای 275°C ثبت شده در مطالعات میکروترمومتری میانبارهای سیال در کانسار آب ترش و گرادیان حرارتی 30°C/km ، حداکثر عمقی که سیالات داغ از آن مشتق شده‌اند حدود 9 km است. امکان سرد شدن در هنگام صعود سیالات در نظر گرفته نشده است، زیرا اطلاعاتی در مورد آدیاباتیک بودن یا نبودن سیستم سیال وجود ندارد. عمق مورد نیاز برای شسته شدن فلزات از منابع و تشکیل شوراب‌های کانی‌ساز بیش از 6 km - 10 km در نظر گرفته می‌شود که از آن به عنوان پنجره شستشوی حرارتی فلز (metal thermal leaching window) یاد می‌شود (۹). از سوی دیگر، نقاط داده‌ها در شکل ۱۱ دو روند را نشان می‌دهند: یکی با شیب تند مثبت و دیگری تقریباً افقی. روند با شیب تند نشان می‌دهد که یک شوراب حوضه‌ای گرم و شور با یک آب جوی سرد با شوری کم مخلوط شده است، در حالی که روند افقی نشان می‌دهد که یک آب جوی گرم شده با یک آب جوی بسیار سردتر مخلوط شده است. به احتمال زیاد، برخی از آب‌های جوی ابتدا تا قسمت عمیق حوضه فرو رفته، در آنجا داغ شده و سپس به سمت بالا مهاجرت کرده‌اند و با آب‌های جوی سرد فرو رو مخلوط شده‌اند. بنابراین، می‌توان متقاعد شد که سیالات کانی‌سازی از شوراب‌های حوضه‌ای با مشارکت آب‌های جوی منشأ گرفته‌اند.

نتیجه‌گیری

شواهد حاصل از مطالعات صحرایی، از جمله برش‌های سنگ میزبان که بوسیلهٔ باریت سیمان شده‌اند، به وضوح یک منشأ اپی ژنتیک را برای کانی‌سازی باریت در کانسار آب ترش نشان می‌دهد. به علاوه، این نشان دهندهٔ کانی‌سازی همزمان یا پس از گسلش است. پذیرفته شده است که باریت‌های اپی ژنتیک از طریق برهم‌کنش بین تبخیری‌های دریایی و/یا آب‌های دریایی تبخیری مدفون (آب‌های فسیلی) و سیالات غنی از Ba در داخل سنگ میزبان قبلاً رسوب‌شده، ته نشست می‌شوند. در واقع، از آنجا که باریت در آب بسیار کم محلول است (حدود $2/5$ میلی‌گرم در لیتر در دمای 25°C (۱۳)، این ایده که هم Ba و هم سولفات در یک سیال حمل شوند، امکان پذیر نیست، بلکه باید دو محلول، یکی غنی از Ba و تهی از سولفات، و دیگری غنی از سولفات و تهی از Ba، در تشکیل باریت نقش داشته باشند.

داده‌های میانبارهای سیال نشان می‌دهد که شوراب‌های حوضه‌ای، سیالات کانی‌ساز در کانسار باریت آب ترش را تأمین کرده‌اند. از آنجایی که کانی‌سازی باریت از روند گسل‌های اصلی در منطقه پیروی می‌کند، ممکن است که گسلش شدید در تشکیل کانسار باریت در منطقهٔ مورد مطالعه نقش داشته است. می‌توان نتیجه گرفت که حرکات تکتونیکی فشارشی پس از کرتاسه سبب گسلش و برشی شدن سنگ‌های میزبان شده، که مسیرهای مورد نیاز برای مهاجرت رو به بالای سیالات گرمابی عمیق، غنی از Ba و سیلیس از یک منبع شوراب حوضه‌ای غالب را فراهم کرده است. این محلول‌ها همچنین حاوی مقادیر جزئی از فلزات پایه و F بوده

اند. باریت به صورت رگه‌ای در جایی رسوب کرده است که در آنجا سیالات بالارو داغ و دارای Ba با آب‌های سردتر حاوی سولفات محبوس در لایه‌های سنونین فوقانی و یا آب‌های جوی سرد فرورو که سولفات را از سنگ‌های حاوی تبخیری‌های نئوژن پایینی به‌دست آورده‌اند، برخورد می‌کنند. در طول کانی‌سازی، اختلاط بین آب‌های جوی گرم شده بالارو و آب‌های جوی سرد فرورو نیز رخ داده است. ته نشست باریت ظاهراً ترجیحاً در شکستگی‌ها و احتمالاً گسل‌های موجود در سنگ‌های میزبان رخ داده است (۱۰).

محدودهٔ وسیع دمای همگن‌شدگی که توسط میانبارهای سیال در باریت و کوارتز ($110-275^{\circ}\text{C}$) ثبت شده است، از سرد شدن به عنوان سازوکار ته نشست این کانی‌ها حمایت می‌کند. علاوه بر این، همان‌طور که ذکر شد، تغییرات زیاد شوری ($19/3$ – $2/7$ درصد وزنی معادل NaCl) نشان دهنده رقیق شدن سیالات کانی‌ساز با آب‌های جوی است. بنابراین، سرد شدن و اختلاط سیال می‌تواند سازوکارهای اصلی ته نشست باریت و کوارتز (به عنوان کانی‌های اصلی سازندهٔ کانسنگ) در کانسار آب ترش باشد.

از آنجا که کالک آرنایت‌ها و سنگ آهک‌های سنونین، به عنوان سنگ‌های میزبان کانی‌سازی باریت، به طور دگرشیب کنگلومراهای حاشیه‌ای سنومانین را پوشانده‌اند، تماس بین این دو واحد سنگ چینه‌ای به عنوان یک سطح دگرشیبی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، با توجه به طبقه‌بندی پیشنهادی دیل (۱۴) برای کانسارهای باریت، کانسار آب ترش باید در ردهٔ وابسته به ساختار (structure-related) این کانسارها

- [4] Sorby, H.C., 1858. On the microscopic structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 14, 453-500.
- [5] Shepherd, T.J., Ranbin, A.H., Alderton D.H.M., 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Blackie, Glasgow. 239 pp.
- [6] Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy* 12, 644 pp.
- [7] González-Sánchez, F., González-Partida, E., Canet, C., Atudorei, V., Alfonso, P., Morales-Puente, P., Cienfuegos-Alvarado, E., González-Ruiz, L., 2017. Geological setting and genesis of stratabound barite deposits at Múzquiz, Coahuila in northeastern Mexico. *Ore Geology Reviews*, 81, 1184-1192.
- [8] Fall, A., Rimstidt, J. D., Bodnar, R. J., 2009. The effect of fluid inclusion size on determination of homogenization temperature and density of liquid-rich aqueous inclusions. *American Mineralogist*, 94, 1569-1579.
- [9] Kyser, T. K., 2007. Fluids, basin analysis, and mineral deposits. *Geofluids*, 7, 238-257.
- [10] Bodnar, R.J., 1993, Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57, 683-684.
- [11] Bodnar, R.J., 1999, Hydrothermal solutions, in: Marshall, C.P., Fairbridge, R.W. (Eds.), *Encyclopedia of geochemistry*. Kluwer Academic Publishers, Lancaster. pp. 333-337.
- [12] Bodnar, R.J., 2003, Reequilibration of Fluid Inclusions. 32. *Mineralogical Association of Canada Short Course*, pp. 213-231.
- [13] Dunn, K., Daniel, E., Shuler, P. J., Chen, H. J., Tang, Y., Yen, T. F., 1999. Mechanisms of surface precipitation and dissolution of barite: a morphology approach. *Journal of Colloid and Interface Science*, 214, 427-437.
- [14] Dill, H.G., 2010, The 'chessboard' classification scheme of mineral deposits: mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews* 100, 1-420.
- [15] Fall, A., Bodnar, R.J., 2018, How precisely can the temperature of a fluid event be constrained using fluid inclusions? *Economic Geology* 113, 1817-1843.
- [16] Gleeson, S. A., Yardley, B. W. D, Munz, I. A., Boyce, A. J., 2003, Infiltration of basinal fluids into high- grade basement,

در نظر گرفته شود. همراهی مقادیر اندکی گالن و فلوریت با کانی‌سازی باریت نشان‌دهنده تمایل کانسار آب ترش به سمت زیر رده سرب-روی-باریم-فلوریت وابسته به دگرشیمی (رگه‌های کم عمق) است. موارد زیر برای مطالعات بیشتر در آینده پیشنهاد می‌شود:

۱- انجام مطالعات ایزوتوپی Sr و Ba بر روی کانی باریت به منظور بررسی بیشتر منشأ محلول‌های کانی ساز و Ba در باریت، و نیز تعیین سن احتمالی کانی سازی.

۲- انجام مطالعات ایزوتوپی O بر روی کانی کوارتز به منظور بررسی بیشتر منشأ محلول‌های کانی ساز.

۳- بررسی و پی جویی بیشتر در گسل‌ها و شکستگی‌های واحدهای سنگی سنونین در منطقه مورد مطالعه به منظور اکتشاف احتمالی باریت در نواحی دیگر.

سپاس‌گزاری

از همکاری و نظرات کاربردی داوران محترم و اعضای هیات تحریریه مجله کاربرد شیمی در محیط زیست کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

- [۱] حیدری، م.، ۱۳۹۸، گزارش پی‌جویی و تهیه نقشه در مقیاس ۱:۵۰۰۰ محدوده معدنی آب ترش. شرکت صنایع تولید پودر بندر امام. ۷۸ صفحه.
- [۲] قربانی، م.، ۱۳۸۱، دیپاچه‌ای بر زمین شناسی اقتصادی ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، صفحه ۶۹۵.
- [۳] کشفی، س.م.، ۱۳۷۶، ویژگی‌های کانسارسازی و ژئوشیمیایی کانسار باریت آب ترش منطقه باغین کرمان. دانشگاه شهید باهنر کرمان، پایان نامه کارشناسی ارشد.

South Norway: sources and behaviour of waters and brines. *Geofluids*, 3, 33-48.

[17] Goldstein, R.H., 2001, Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems. *Lithos* 55, 159-193.

[18] Van den Kerkhof, A.M., Hein, U.F., 2001, Fluid inclusion petrography. *Lithos* 55, 27-47.

[19] Wilkinson, J.J., 2001, Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55, 229-272.

“Research article”**Microthermometric study and investigation of chemical and physical properties of fluid inclusion to determine the origin of sour water barite deposit****Hossein Kalantar Hormozi^{1*}, Armin Molai², Tara Melai³**¹Petroleum engineering management, Petroleum Engineering & Development Company, National Iranian Oil Company, Tehran, Iran²Petroleum Engineering Department, Gachsaran Branch, Islamic Azad University, Gachsaran, Iran³Chemical Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran

*Corresponding author: h.kalantar.h@gmail.com

(Received: 14 December 2024, Accepted: 12 March 2025)

Abstract

Barite can form in a variety of geological environments, as it occurs in a wide range of mineral deposits. to determine the origin and physicochemical conditions under which the Ab Torsh barite deposit formed, an extensive study was conducted using petrographic and fluid inclusion methods. the fluid inclusion are mainly used in determining the chemical composition and thermodynamic conditions governing active fluids in geological processes. barite mineralization occurs at Ab Torsh as a stratabound vein in the Senonian carbonate rock units. Barite-quartz is accompanied by subordinate malachite, chrysocolla, Fe-Mn oxide-hydroxides, galena, azurite, fluorite, pyrite, and bornite. Thermochemical Sulfate Reduction (TSR) was the most likely mechanism for the formation of the reduced sulfur in galena. The salinity and homogenization temperatures in the aqueous fluid inclusions of barite and quartz (2.7-19.3 wt% NaCl equivalent and 110-275 °C, respectively) indicate that basinal fluids containing a meteoric water component were the source of the mineralizing solutions. the fluid inclusion data demonstrate that two fluid mixing have occurred: one between the hot basinal brines and cold meteoric waters, and another between heated and cold meteoric waters. it is estimated that the hot fluids derived from a maximum depth of about 9 km. The Ab Torsh deposit is classified here as a structure (unconformity)-related barite deposit. it is concluded that intense faulting and brecciation of the host rocks caused by post-Cretaceous compressional tectonics probably provided the channels necessary for the upward migration of deep mineralizing fluids from a basinal brine source. barite formed where these ascending hot, Ba-bearing hydrothermal fluids encountered cooler, sulfate-bearing connate waters trapped in the overlying Senonian strata and/or the descending cold meteoric waters that dissolved evaporite-bearing rock units. the results of this research can be used to a large extent in the determination and general knowledge of the types of barite deposits in Iran and the knowledge of barite mineralization conditions in the country.

Conflict of interest: None declared.**Keywords:** Barite, Fluid inclusion, Temperature, Deposit, Ab torsh