



مطالعه کانی‌سازی، میان‌بارهای سیال و شرایط رخداد کانسارهای فلوریت باقرآباد و دره‌بادام، جنوب‌شرق محلات

سیدجواد مقدسی^{۱*}، ابراهیم طالع‌فاضل^۲ و عالیه‌سادات بنی‌فاطمی^۱

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

(۲) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۱، پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۵

چکیده

کانسارهای فلوریت باقرآباد و دره‌بادام در جنوب‌شرق محلات (استان مرکزی)، نمونه‌ای از ذخایر اپی‌ژنتیک در ایران محسوب می‌شوند. کانی‌سازی به‌صورت رگه‌هایی با شیب تقریبی قائم و در ارتباط با شکستگی‌های محلی با راستای شرقی-غربی در سنگ میزبان کربناتی-شیلی با گستره زمانی ژوراسیک زیرین تا میانی شکل گرفته است. ساخت و بافت‌های پرکننده فضای خالی، برشی و حفره‌ای همراه با دگرسانی‌های دماپایین سرسیتی، سیلیسی و آرژیلیک در این ذخایر دیده می‌شوند. طبق شواهد به‌دست آمده، میان‌بارهای سیال بر مبنای فازهای تشکیل‌دهنده، به‌ترتیب فراوانی شامل سه نوع: ۱- میان‌بارهای دوفازی آبگین غنی از مایع (L+V)، ۲- میان‌بارهای تک‌فاز مایع (L) و گاز (V) و ۳- میان‌بارهای آبگین-کربنیک حاوی فاز $(L_1+L_2+V) CO_2$ ، در کانی‌های فلوریت، باریت و کلسیت هستند. با استفاده از تقاطع منحنی‌های هم‌چگال در میان‌بارهای آبگین و آبگین-کربنیک، کانی‌سازی فلوریت در کانسار باقرآباد در فشار تقریبی ۱ تا ۲ کیلوبار و دمای ۱۸۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده است. در کانسارهای باقرآباد و دره‌بادام سیالات گرمایی H_2O+CO_2 بالاآمده از سنگ بستر دگرسان‌شده، شرایطی مناسب برای افزایش انحلال‌پذیری فلزات و تشکیل کمپلکس‌های هالیدی (F^- و Cl^-) فراهم کرده‌اند. شوره‌های یادشده طی واکنش با سنگ دیواره و کاهش دمای تدریجی سیال ناشی از رقیق‌شدگی با آب‌های جوی، کانی‌سازی رگه‌ای فلوریت در فضای مناسب را ایجاد کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی: کانسار فلوریت، میان‌بار سیال، کانی‌سازی، باقرآباد، دره‌بادام، محلات

مقدمه

(Masoudi et al., 2016; McRae, 2015). کانسارهای

فلوریت در دنیا از نظر خاستگاه در سه رده ماگمایی مرتبط با فعالیت‌های ساختاری و رسوبی قرار می‌گیرند (Dill, 2010) و عوامل متعددی شامل موقعیت ژئودینامیکی، شیمی سیال، مجموعه کانی‌شناسی و دگرسانی، سنگ‌میزبان، گرادیان زمین‌گرمایی، محتوای مواد فرار سیال و عمق، بر نحوه تشکیل آنها مؤثر هستند (Hanna and Stein, 1990; Sánchez et al., 2010).

بررسی‌های سازمان زمین‌شناسی و وزارت دفاع آمریکا و همچنین اتحادیه اروپا طی سال‌های اخیر نشان می‌دهد، فلورسپار (نام تجاری فلوریت) به‌عنوان یک کانی حیاتی و استراتژیک در جهان به‌دلیل کاربردهای وسیع در صنایع تولید فولاد، آلومینیم، هیدروفلورکربن‌ها، تفلون، فلوریدریک اسید، تهیه الیاف شیشه‌ای و انرژی‌های نو از اهمیت اقتصادی و اکتشافی بالایی برخوردار است

زمین‌شناسی

کانسار فلوریت دلیجان- محلات در ۸۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان اراک با مختصات جغرافیایی $50^{\circ}13'$ تا $50^{\circ}45'$ طول شرقی و $48^{\circ}33'$ تا $45^{\circ}33'$ عرض شمالی، در محدوده‌ای به وسعت ۴۰ کیلومتر مربع در جنوب استان مرکزی، رخنمون دارند. این ذخایر در حد فاصل پهنه دگرگونی- ساختمانی سنندج- سیرجان در جنوب و پهنه ایران مرکزی در شمال قرار دارند (Alavi, 1991) (شکل ۱). قدیمی‌ترین واحدهای سنگی منطقه مورد بررسی متعلق به دگرگونی‌های پرکامبرین- پالئوزوئیک و یا واحدهای رسوبی مزوزوئیک پیشین بوده که به‌ویژه طی فاز کوه‌زایی سیمین و پدیده‌های دیناموترمال مرتبط با آن، بارها دچار دگرشکلی شده و رخداد کانی‌سازی‌های فلزی و غیرفلزی متعددی را موجب شده است (Berberian and King, 1981).

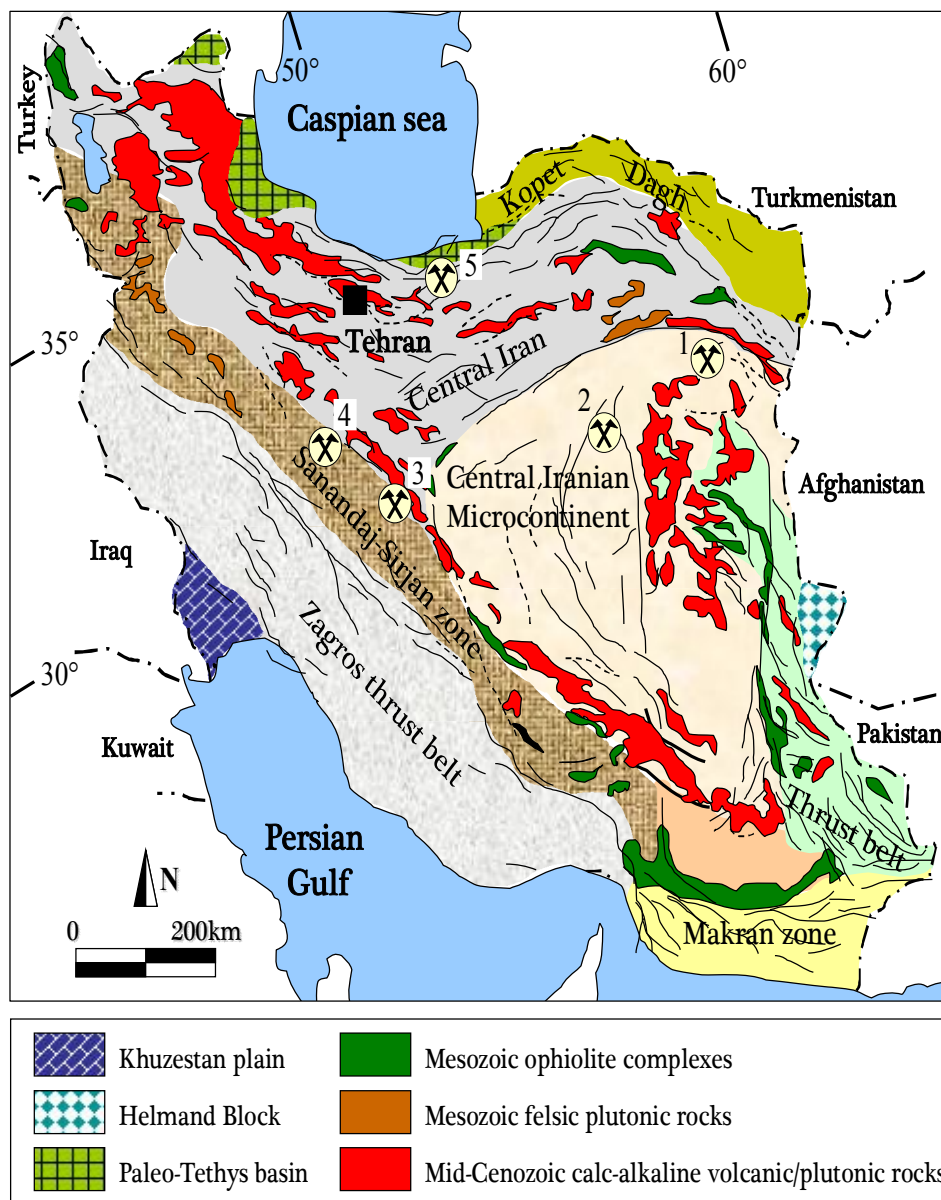
منطقه مورد بررسی در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهار گوش گلپایگان (Thiele et al., 1968a) قرار می‌گیرد که زمین‌شناسی ناحیه‌ای آن نخستین بار توسط تیل و همکاران (Thiele et al., 1968b) و رشیدنژاد عمران و همکاران (Rashidnejad et al., 2002) بررسی شده است. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی منطقه اغلب در جنوب شرق روستای آتش کوه رخنمون دارند که شامل سازندهای کهر، سلطانیه، لالون- زاگون و آهک‌های دولومیتی پرموتریاس است. بر روی این سازندها، آهک‌های ضخیم لایه قهوه‌ای تا زردرنگ تریاس پایینی تا میانی قرار می‌گیرد که خود به‌طور ناپیوسته توسط شیل و ماسه‌سنگ‌های آهکی سازند شمشک (ژوراسیک زیرین) و واحد آهک دولومیتی ضخیم لایه سازند بادامو (ژوراسیک میانی تا بالایی) پوشیده می‌شوند. سازندهای شمشک و بادامو سنگ میزبان اصلی کانسارهای فلوریت باقرآباد و دره‌بادام هستند که با ضخامت تقریبی ۱۵۰۰ متر (Sheikhol-Eslami, 2005) در برخی مناطق با تحمل یک چین خوردگی ضعیف تا مرز زیرین رخساره شیبست سبز دگرگون و به اسلیت و فلیت تبدیل می‌شوند. پس از آن رسوبات کرتاسه متشکل از آهک و دولومیت ضخیم لایه اوریتولین دار به‌همراه میان‌لایه‌هایی از شیل و مارن نهشته می‌شوند که به‌ویژه در

تاکنون بیش از ۳۰ ذخیره و رخداد فلوریت در ایران شناسایی شده است که در مجموع حاوی ۱/۴ میلیون تن ذخیره، معادل ۰/۶ درصد ذخایر فلوریت دنیاست (Miller, 2014). تولید فلوریت در ایران در سال ۲۰۱۴ حدود ۷۰ هزار تن تخمین زده شده است (McRae, 2015). کانسار فلوریت پیناوند در شمال‌خاوری اصفهان (Gheslghi and Moore, 2007)، کمرند فلوریت کیاسر- پل سفید متشکل از پنج ذخیره در جنوب قائم‌شهر (Vahabzadeh et al., 2008; Mehraban et al., 2016; Nabiloo et al., 2017)، کانسار فلوریت کمرمهدی در جنوب‌باختری طبس (Pirouzi et al., 2009; Tadayon et al., 2015)، کمرند فلوریت محلات- دلیجان متشکل از چهار ذخیره در جنوب استان مرکزی (Ehya, 2012; Moghaddasi et al., 2016; Tale Fazel, 2016) و کانسار فلوریت قهرآباد در جنوب‌خاوری سقز از مهم‌ترین مناطق حاوی فلوریت در ایران هستند (شکل ۱).

کانسارهای فلوریت در جنوب شرق استان مرکزی و حدفاصل شهرستان‌های دلیجان و محلات اغلب با ماهیت اپی‌ژنتیک (دیرزاد) و ساخت رگه‌ای در چهار معدن بُزیجان، باقرآباد، دره‌بادام و آتش کوه تشکیل شده‌اند (شکل ۱). این ذخایر توسط شرکت صنعتی و معدنی پودرسازان مورد استخراج قرار گرفته و در حال حاضر به‌صورت متروک هستند. تاکنون بررسی‌های زمین‌شناختی، زمین‌شیمیایی و ژئوترموتری بر روی کانسارهای فلوریت آتش کوه و بُزیجان انجام شده است (Ehya, 2012; Tale Fazel, 2014; Moghaddasi et al., 2016)؛ اما پژوهش جامعی بر روی کانسارهای فلوریت باقرآباد و دره‌بادام انجام نشده است. در این پژوهش ضمن بررسی کانی‌شناسی، بافت و ساخت و ژئومتری رگه‌ها در معدن فلوریت باقرآباد و دره‌بادام با استفاده از بررسی‌های سنگ‌نگاری، کانه‌نگاری و میکروترموتری میان‌بارهای سیال به بررسی شرایط فیزیکوشیمیایی نهشت کانسنگ فلوریت و کانی‌های همراه در مناطق مورد بررسی پرداخته می‌شود. همچنین با استفاده از شواهد به‌دست آمده، نحوه رخداد و مراحل شکل‌گیری کانسارهای فلوریت باقرآباد و دره‌بادام مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

بررسی نیز در آن قرار می‌گیرند، مرتبط با رخداد یک ریفت پشت کمائی ناقص در این ناحیه است که دارای آثار ناچیزی از سنگ‌های ماگمایی (از قبیل تراکی آندزیت و آندزیت‌بازالت) بوده و رسوب‌گذاری آن تا اواخر کرتاسه ادامه داشته است.

شمال روستای آتش‌کوه رخنمون دارند. به عقیده محجل و فرگوسن (Mohajjel and Fergusson, 2014) و قاسمی و تالبوت (Ghasemi and Talbot, 2006)، رسوبات ضخیم‌لایه مزوزوئیک در بخش شمالی پهنه سندج-سیرجان که مناطق مورد

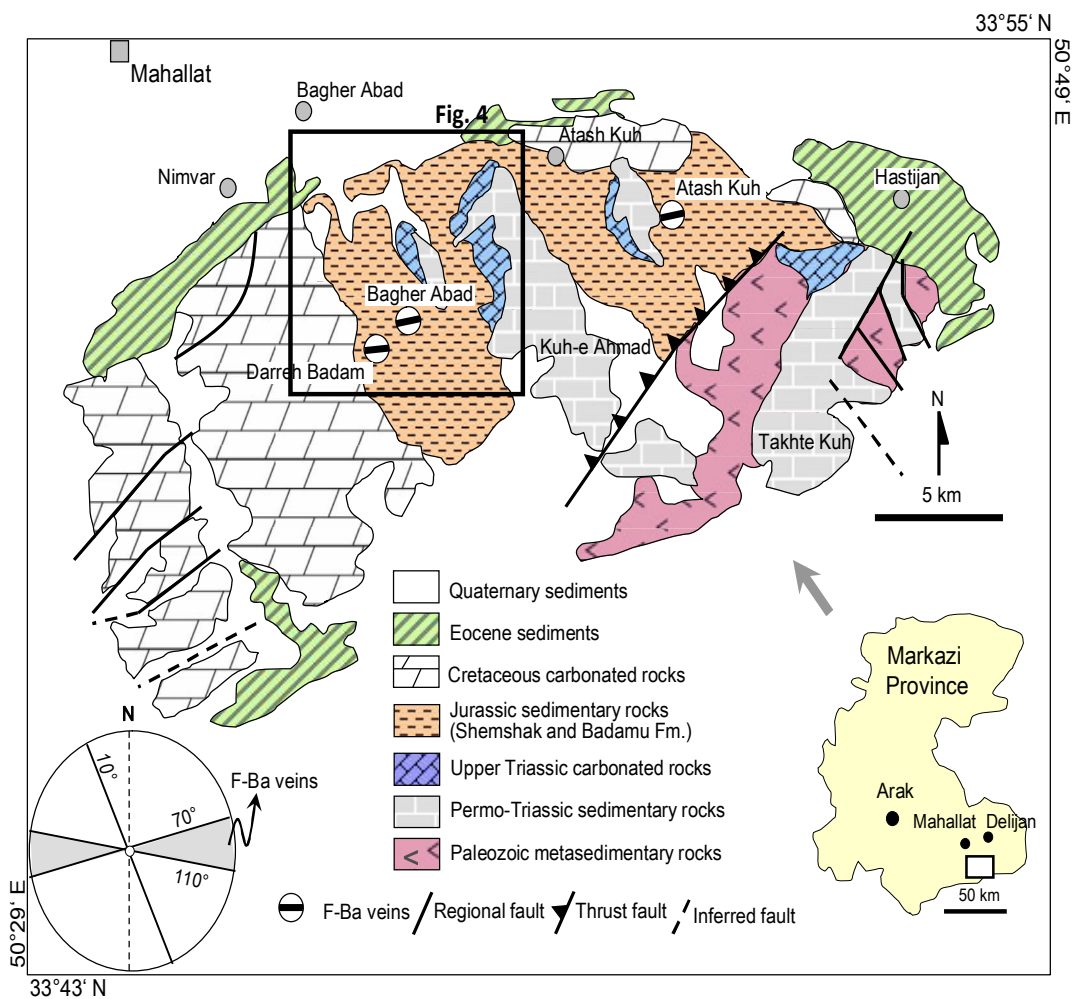


شکل ۱. موقعیت برخی از معادن فعال فلوریت در نقشه پهنه‌های ساختاری ایران. این معادن به‌ترتیب شامل: ۱- فلوریت جویمند گناباد، ۲- فلوریت کمرمهدی طیس، ۳- فلوریت پیناوند و کمشچه اصفهان، ۴- کمریند فلوریت محلات-دلیجان و ۵- کمریند فلوریت کیاسر-پل سفید (شامل منطقه سوادکوه) است. (موقعیت زون‌های زمین‌ساختی از علوی (Alavi, 1991))

Fig. 1. Situation of several active fluorite mines on structural map of Iran. The fluorite mines including: 1. Joimand, Gonabad, 2. Kamar Mehdi, Tabas, 3. Pinavand and Komshejeh, Esfahan, 4. Mahllat-Delijan fluorite belt, 5. Kiasar-Pole Sefid fluorite belt (including Savadkuh area) (Tectonic zones after Alavi, 1991)

ساختاری در منطقه مورد بررسی می‌توان به گسل معکوس کوه احمد با راستای 40NE در جنوب آتش کوه اشاره کرد که موجب رانده‌شدن واحدهای دگرگونی- رسوبی پالئوزوئیک بر روی سازندهای ژوراسیک که میزان کانی‌سازی فلوریت هستند، شده است (شکل‌های ۲ و ۳).

در اوایل ترشیری با بسته‌شدن این ریفت پشت کمائی، توده‌های نفوذی گرانیت، آلکالی‌سینیت و گابرو به سن میوسن- پلیوسن همراه با واحدهای آتشفشانی- رسوبی با فاصله بیش از ۵۰ کیلومتر در غرب و جنوب غرب منطقه مورد بررسی، واقع در شمال خمین رخ داده‌اند که شواهدی مبنی بر ارتباط آنها با کانی‌سازی فلوریت در منطقه باقرآباد و دره‌بادام وجود ندارد. از مهم‌ترین پدیده‌های



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده منطقه جنوب محلات (با تغییرات از تیله و همکاران (Thiele et al., 1968a)) که در آن موقعیت معادن فلوریت باقرآباد و دره‌بادام نشان داده شده است.

Fig. 2. Simplified geological map of southern Mahallat (modified from Thiele et al., 1968a) showing the situation of Bagher Abad and Darreh Badam fluorite mines.

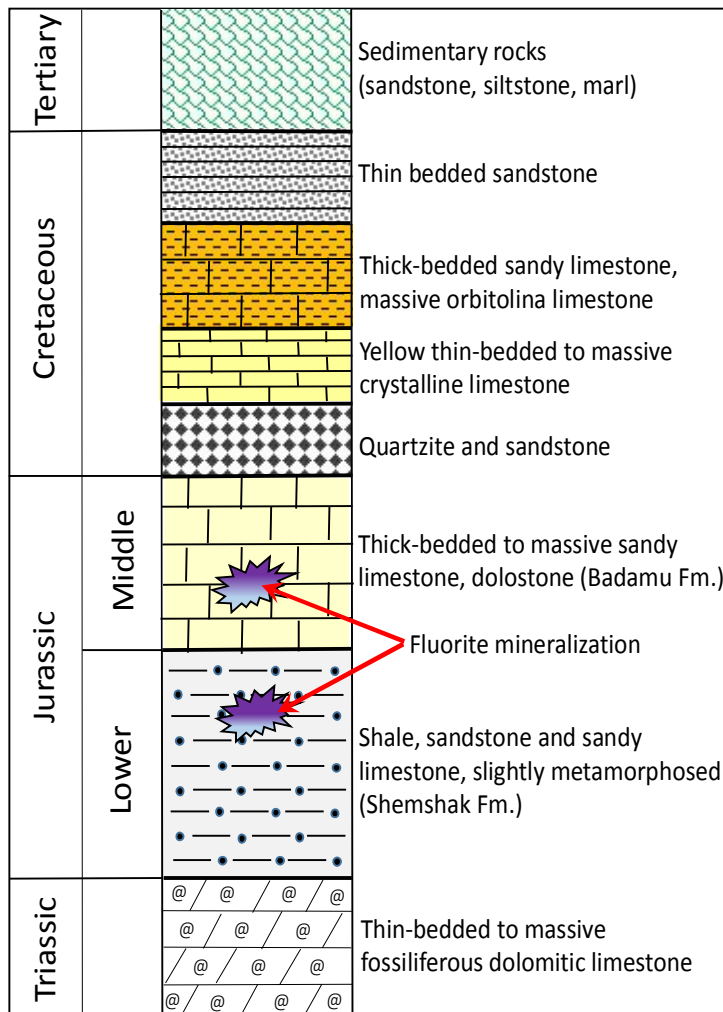
۷۰ نمونه سنگی از واحدهای سنگی میزبان، رگه‌های فلوریت و دگرسانی‌های همراه نمونه‌برداری شد. بررسی‌های کانی‌شناسی،

روش مطالعه

برای بررسی کانی‌سازی فلوریت در معادن باقرآباد و دره‌بادام، تعداد

منظور، تعداد ۸ مقطع دوبرصیقل با ضخامت ۱۵۰ تا ۲۰۰ میکرون از کانی‌های فلوریت، کلسیت و باریت تهیه‌شد. طی این بررسی‌ها، حدود ۲۰۰ میان‌بار با ابعاد ۱۰ تا بیش از ۳۰ میکرون مورد آزمایش میکروترموتری قرارگرفت. بررسی میان‌بارهای سیال با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان نور عبوری زایس (مدل Axioplan2) و سامانه سرمایش- گرمایش لینکام مدل THM600 با کنترل‌کننده حرارتی TMS94 و سردکننده LNP در مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران انجام‌شد.

بافت و ساخت ذخیره و توالی پاراژنتیک کانسنگ با استفاده از ۲۷ مقطع نازک و نازک- صیقلی توسط میکروسکوپ پلاریزان نور عبوری و بازتابی زایس (مدل Axioplan2) انجام‌شد. همچنین تعداد ۶ نمونه پودری از بخش‌های دگرسان کانسنگ و سنگ دیواره برای بررسی‌های تکمیلی کانی‌شناسی توسط دستگاه پراش سنج پرتو ایکس^۱ در مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران^۲ تجزیه‌شد. بررسی‌های سنگ‌نگاری و میکروترموتری میان‌بارهای سیال پس از انجام مطالعات کانی‌شناسی و تعیین موقعیت کانی‌ها در توالی پاراژنتیک کانسار انجام‌شد. برای این



شکل ۳. ستون چینه‌شناسی منطقه جنوب محلات که در آن موقعیت کانی‌سازی‌های فلوریت نشان داده شده است.
Fig. 3. Stratigraphic column of southern Mahallat area with situation of fluorite mineralization.

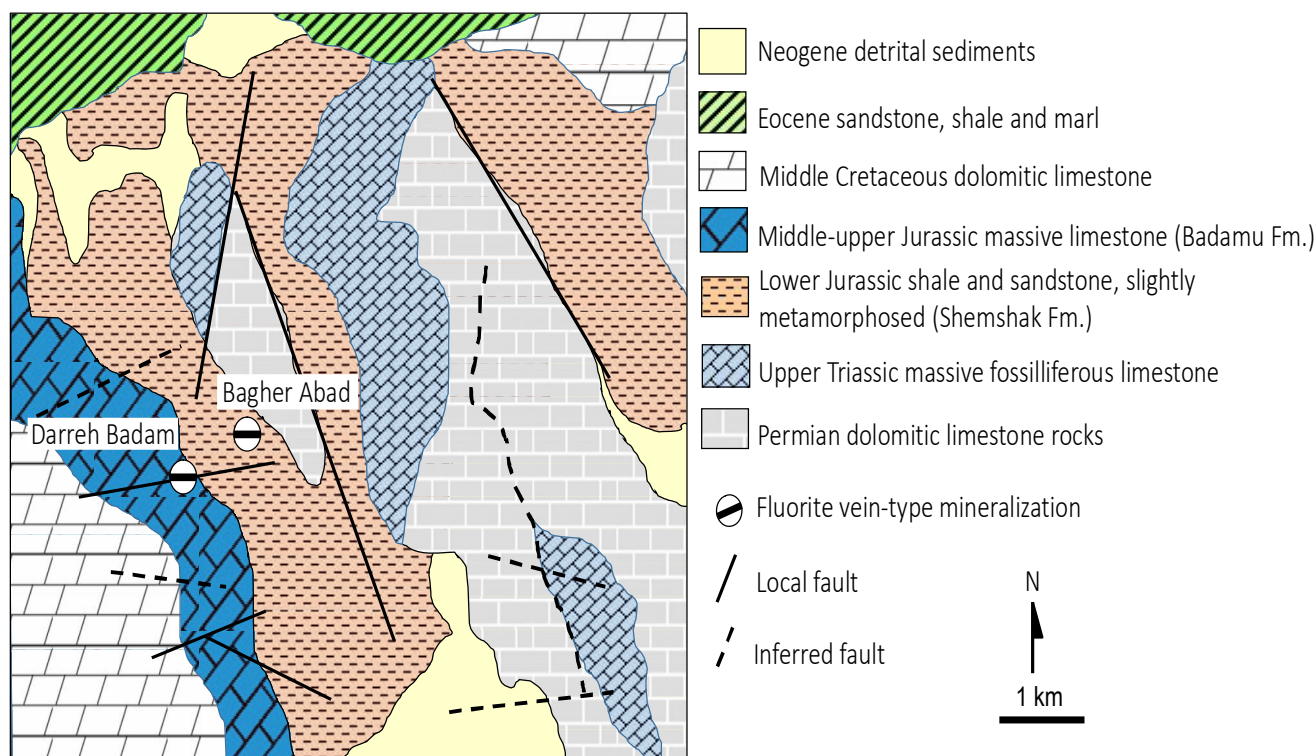
1. X-Ray Diffraction
 2. Iran Mineral Processing Research Center

است. کانی‌شناسی رگه به‌ترتیب شامل فلوریت، کوارتز، کلسیت، اکسیدهای آهن و مقادیر ناچیز گالن، پیریت، اکسید منگنز و مالاکیت بوده که رخداد فلوریت در آنها با رنگ‌های سفید، بی‌رنگ، بنفش کم رنگ و تیره به دو صورت توده‌ای (اولیه) و پرکننده حفرات (ثانویه) انجام شده است (Ehya, 2012). کانسار فلوریت-باریت \pm سولفید آتش‌کوه نیز با ساخت و بافت‌های پرکننده فضای خالی، برشی و حفره‌ای در سنگ میزبان کربناته-شیلی با گستره زمانی ژوراسیک زیرین تا میانی شکل گرفته است. در منطقه آتش‌کوه، کانی‌سازی در ارتباط با شکستگی‌های محلی با راستای ESE-WNW و NNE-SSW تشکیل شده است که همراه با دگرسانی‌های دولومیتی، سیلیسی و آرژلیک هستند. علاوه بر این، مقادیر ناچیزی از کانی‌های سولفیدی گالن، پیریت و کالکوپیریت در رگه‌ها دیده شد. ویژگی‌های کانی‌سازی کانسارهای فلوریت باقرآباد و دره بادام در ادامه شرح داده شده و نقشه زمین‌شناسی ساده شده این مناطق در شکل ۴ آمده است.

گستره تغییرات دمایی در این دستگاه بین ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد است و دستگاه توسط میان‌بارهای سنتز شده در دماهای ۵۶/۶-، صفر و ۳۷۴/۱+ درجه سانتی‌گراد کالبره شد. دقت اندازه‌گیری طی عملیات سرمایه‌ش در حدود ± 0.1 درجه سانتی‌گراد و طی عملیات گرمایش حدود ± 2 درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. نرخ عملیات سرمایه‌ش بین ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد در دقیقه و نرخ عملیات گرمایش بین ۵ تا ۸ درجه سانتی‌گراد در دقیقه متغیر بود.

بحث

چنان‌که اشاره شد کانسارهای فلوریت در جنوب استان مرکزی و حدفاصل شهرستان‌های دلجان و محلات در چهار معدن بُزِجان، آتش‌کوه، باقرآباد و دره بادام تشکیل شده‌اند. کانسار بُزِجان به صورت رگه‌ای با درازای ۵۰۰ متر، ضخامت ۱ تا ۴ متر و راستای شرقی- غربی در میزبان شیست‌های ژوراسیک زیرین تشکیل شده



شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی ساده شده از موقعیت رگه‌های فلوریت مناطق باقرآباد و دره بادام

Fig. 4. Simplified geological map of the Bagher Abad and Darreh Badam vein-type fluorite mineralizations

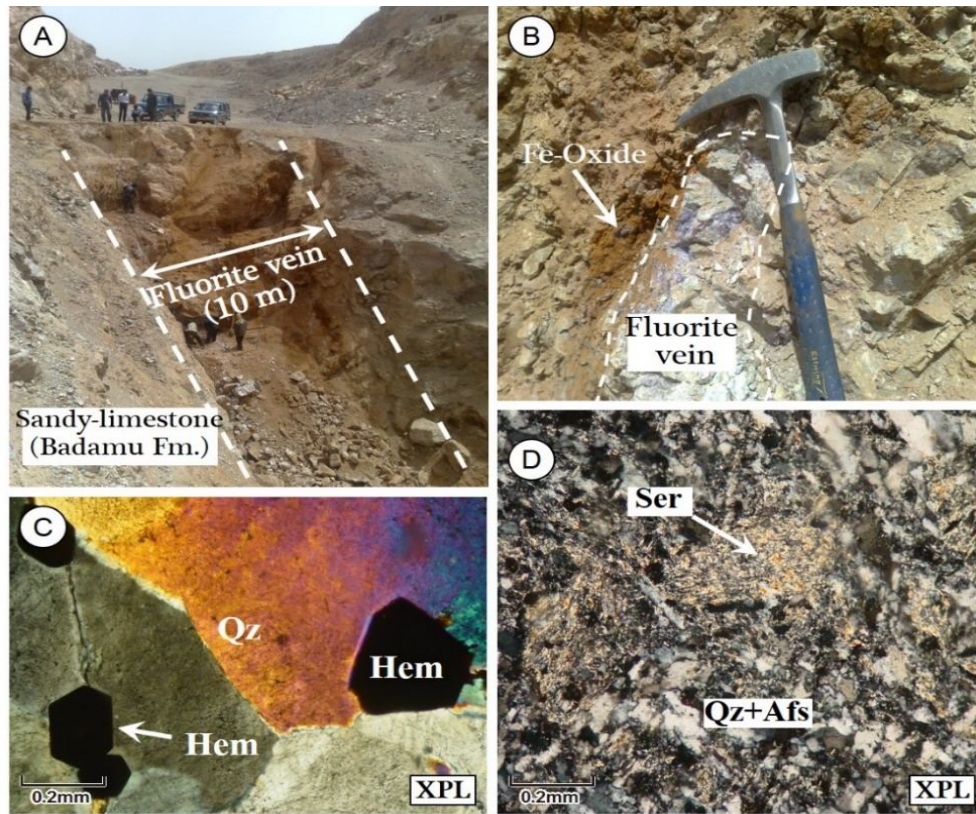
کانه‌زایی در منطقه باقرآباد

کانی‌سازی فلوریت در کانسار باقرآباد به شکل رگه‌ای در واحدهای سنگی اسلیت و فیلیت سازند شمشک و ماسه‌سنگ‌های آهکی (میکریتی) سازند بادامو به سن ژوراسیک زیرین تا میانی رخ داده است (شکل‌های ۳ و ۴). طبق شواهد صحرایی، کانه‌زایی رگه‌ای شیستوزیته سنگ‌های دگرگونه درجه ضعیف سازند شمشک را قطع کرده است. کانی‌سازی در رگه‌ای به طول تقریبی ۱۰۰ تا ۴۰۰ متر، با راستای شرقی-غربی و شیب ۷۰ تا ۸۵ درجه به سمت شمال شکل گرفته است (شکل A-۵). علاوه بر رگه اصلی، کانی‌سازی در رگه‌ها و رگه‌چه‌های کوچک متعددی نیز در جهات مختلف رخ داده است که اغلب از رگه اصلی منشعب می‌شوند. ضخامت رگه اصلی بین ۳ تا ۱۰ متر متغیر بوده (شکل A-۵) و رگه‌های فرعی دارای ضخامت کمتر از ۵۰ سانتی‌متر هستند. کانی‌سازی فلوریت که در منطقه مورد بررسی به رنگ‌های بنفش و بی‌رنگ یافت می‌شود (شکل B-۵)، بیش از ۷۰ درصد رگه‌ها را تشکیل می‌دهد و کانی‌های کلسیت و کوارتز مهم‌ترین کانی‌های فرعی هستند. این تذکر لازم است که بررسی میان‌بارهای سیال بر روی کانی‌های فلوریت بنفش و کلسیت در منطقه باقرآباد انجام شده است. باریت، هماتیت، گوتیت، پیریت و کالکوپیریت از کانی‌های فرعی دیگر در کانسار فلوریت باقرآباد هستند (شکل C-۵). طبق بررسی‌های میکروسکوپی و نتایج آزمون XRD، دگرسانی‌های دولومیتی و سرسیتی مهم‌ترین دگرسانی‌های کانسار باقرآباد هستند (شکل D-۵). دگرسانی دولومیتی با حضور دولومیت‌های ریز تا متوسط بلور همراه با کانی‌های کوارتز، کلسیت و کانی‌های رسی در مجاورت رگه‌های فلوریت تشکیل شده است. دگرسانی سرسیتی نیز با حضور مسکویت‌های ریز بلور، کوارتز و آلکالی‌فلدسپار در سنگ میزبان ماسه‌سنگ تشکیل شده است. ساخت‌ها و بافت‌های مشاهده‌شده در کانسار فلوریت باقرآباد شامل رگه‌ای، برشی و حفره پرکن است.

کانه‌زایی در منطقه دره‌بادام

کانی‌سازی فلوریت در کانسار دره‌بادام نیز مانند کانی‌سازی فلوریت در کانسار باقرآباد به صورت رگه‌ای یافت می‌شود. کانی‌سازی در

این کانسار به شکل رگه‌ای به طول تقریبی ۳۰۰ متر در راستای دره‌ای گسلی شرقی-غربی با شیب ۸۰ تا ۹۰ درجه و در میزبان اسلیت‌ها و فیلیت‌های سازند شمشک به سن ژوراسیک زیرین تا میانی رخ داده است (شکل A-۶). همانند کانسار باقرآباد، رگه‌های فلوریت در این کانسار شیستوزیته سنگ میزبان سازند شمشک را قطع کرده‌اند. گسل اصلی کنترل‌کننده کانی‌سازی، گسلی امتداد لغز با راستای شرقی-غربی و طول تقریبی ۱ کیلومتر است که دارای شیب قائم بوده و کانی‌سازی اغلب در درز و شکاف‌های فرعی آن شکل گرفته است. در این کانسار علاوه بر رگه اصلی که حاوی کانی‌سازی فلوریت با رنگ بنفش است، رگه‌چه‌های حاوی باریت (\pm کوارتز) فراوانی دیده می‌شود (شکل B-۶) که در جهات مختلف واحدهای اسلیتی و فیلیتی و همچنین رگه اصلی فلوریت را قطع می‌کنند. بررسی میان‌بارهای سیال بر روی این کانی‌های باریت و فلوریت در منطقه دره‌بادام انجام شده است. بلورهای باریت با بافت شعاعی در میزبان فلوریت قابل مشاهده است (شکل C-۶). ساخت رگه‌ای و بافت‌های پرکننده فضای باز و افشان از مهم‌ترین ساخت و بافت‌های دیده‌شده در کانسار فلوریت دره‌بادام هستند. بلورهای خودشکل کوارتز به صورت متناوب همراه با بلورهای فلوریت تشکیل شده است (شکل D-۶). طبق مشاهدات صحرایی و میکروسکوپی، می‌توان دست کم سه مرحله کانی‌سازی در رگه‌های فلوریت مناطق باقرآباد و دره‌بادام تشخیص داد که در توالی پاراژنتیک شکل ۷، این مراحل نشان داده شده است. مرحله نخست به‌عنوان مرحله اصلی کانی‌سازی، از کانی‌های فلوریت تشکیل شده است. کانی‌سازی مرحله دوم با حضور کانی‌های کوارتز، باریت و مقادیر ناچیز دولومیت رخ داده است. در این مرحله رگه‌ها و رگه‌چه‌های کوارتز و باریت، رگه‌های فلوریت مرحله نخست و سنگ میزبان اسلیتی را قطع کرده است (شکل B-۶). کانی‌سازی مرحله سوم متشکل از کانی‌های کلسیت، پیریت، هماتیت و گوتیت تشکیل شده است. کانی‌سازی سولفیدی پیریت در این مرحله اغلب به صورت پراکنده در میزبان فلوریت مرحله نخست دیده می‌شود. با توجه به شواهد صحرایی و بررسی‌های آزمایشگاهی، توالی پاراژنتیک کانسارهای دره‌بادام و باقرآباد در شکل ۷ آمده است.



شکل ۵. تصاویر صحرایی و میکروسکوپی کانه‌زایی در منطقه باقرآباد. A: رگه اصلی فلوریت با راستای شرقی- غربی و در میزبان آهک ماسه‌ای سازند بادامو، B: کانی‌سازی رگه‌ای (-رگچه‌ای) فلوریت همراه با اکسید آهن در میزبان اسلیت سازند شمشک، C: بلورهای خودشکل هماتیت در میزبان کوارتز و دگرسانی سرسیتی در ماسه‌سنگ‌های میزبان کانی‌سازی فلوریت. علایم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده‌اند. تصاویر C و D در نور عبوری پلاریزه متقاطع گرفته شده‌اند. Hem: هماتیت، Ser: سرسیت، Qz: کوارتز، Afs: آلکالی فلدسپار، XPL: نور پلاریزه متقاطع

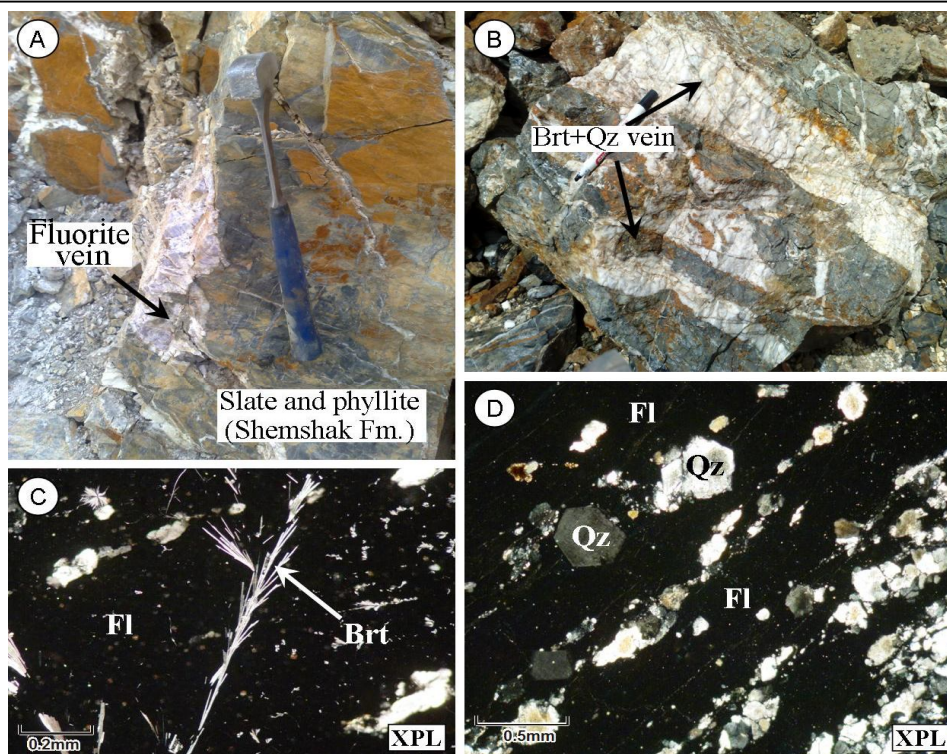
Fig. 5. Field and microscopic photographs of mineralization in Bagher Abad fluorite deposit, A: major east-west fluorite vein in sandy-limestone host rock of Badamu Formation, B: fluorite vein (-veinlet) mineralization along with Fe-oxide in slate host rock of Shemshak Formation, C: photomicrograph of euhedral hematite in quartz host, and D: photomicrograph of sericitic alteration in sandstone host rocks of fluorite mineralization. Abbreviation of minerals from Whitney and Evans (2010). Photomicrographs C and D are taken under cross polarized transmitted light. Hem: hematite, Ser: sericite, Qz: quartz, Afs: alkali feldspar, XPL: cross polarized light

سنگ‌نگاری

رده‌بندی میان‌بارهای سیال بر اساس ویژگی‌های سنگ‌نگاری در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) و بر اساس معیارهای ارائه‌شده توسط رودر (Roedder, 1984) و گلداشتاین و رینولد (Goldstein and Reynolds, 1994) انجام شد. طبق مشاهدات سنگ‌نگاری، میان‌بارهای سیال کانسارهای باقرآباد و دره‌بادام از ویژگی‌های مشترکی برخوردار هستند؛ لذا ویژگی‌های سنگ‌نگاری آنها به‌طور مشترک مورد بررسی قرار می‌گیرند.

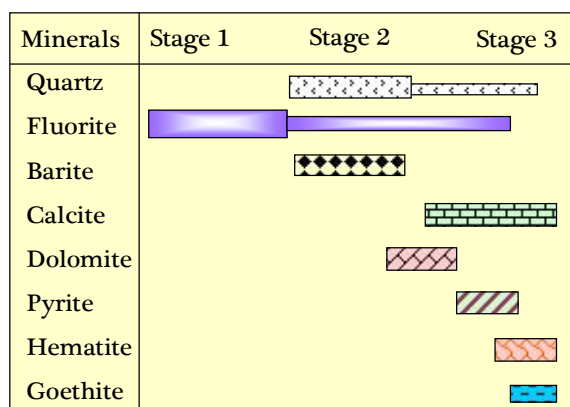
مطالعه میان‌بارهای سیال

بررسی میان‌بارهای سیال از روش‌های کارآمد در دستیابی به شرایط دما- فشار، ویژگی‌های شیمی سیال و تحول سیستم گرمایی در ذخایر معدنی و محیط‌های مختلف زمین‌شناسی محسوب می‌شود (Ridley, 2013). بررسی میان‌بارهای سیال در منطقه مورد بررسی شامل دو بخش سنگ‌نگاری و ریزدماسنجی بر روی کانی‌های فلوریت بنفش و کلسیت در کانسار باقرآباد و کانی‌های فلوریت و باریت در کانسار دره‌بادام انجام شد.



شکل ۶. تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از کانه‌زایی منطقه دره‌بادام. A: نمایی از رگه-رگه‌چه‌های فلوریت در سنگ میزبان اسلیتی سازند شمشک، B: رگه‌های باریت-کوارتز در میزبان اسلیت سازند شمشک، C: تصویر میکروسکوپی از بلورهای باریت سوزنی با بافت شعاعی در میزبان فلوریت و D: تصویر میکروسکوپی از بلورهای خودشکل کوارتز به‌همراه فلوریت. علایم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده‌اند. تصاویر C و D در نور عبوری پلاریزه متقاطع گرفته شده‌اند. Brt: باریت، Fl: فلوریت، Qz: کوارتز، XPL: نور پلاریزه متقاطع

Fig. 6. Field and microscopic photographs of mineralization in Darreh Badam fluorite deposit, A: View of fluorite veins (-veinlets) in slate host rock of Shemshak Formation, B: barite-quartz veins in slate host rock of Shemshak Formation, C: photomicrograph of acicular radial barite in fluorite host, and D: photomicrograph of euhedral crystals of quartz intergrown with fluorite. Abbreviation of minerals from Whitney and Evans (2010). Photomicrographs C and D are taken under cross polarized transmitted light. Brt: barite, Fl: fluorite, Qz: quartz, XPL: cross polarized light

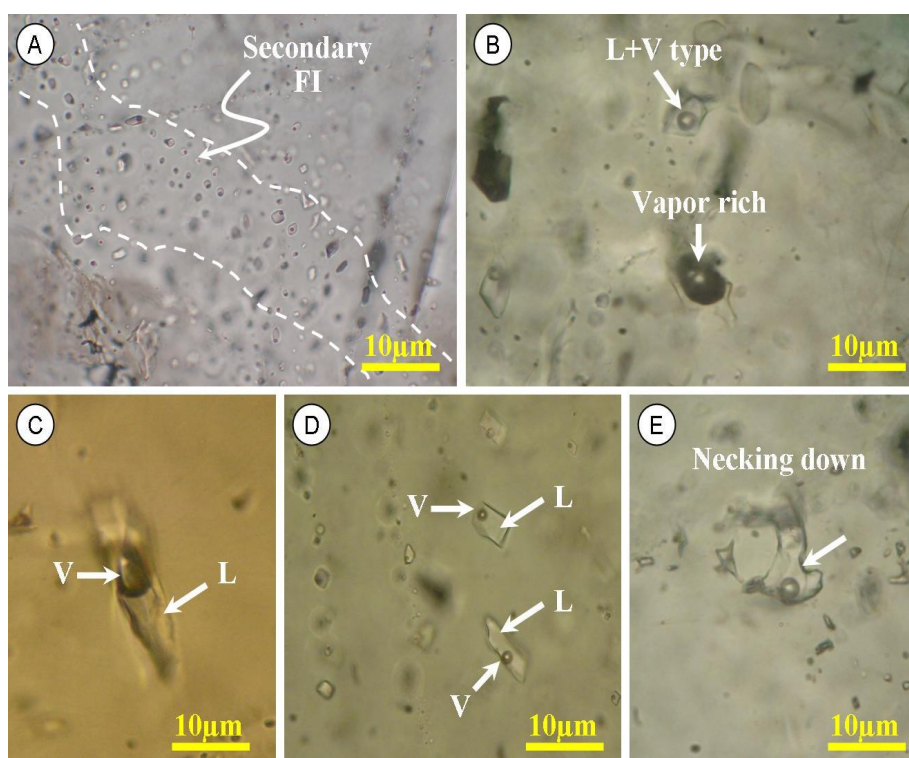


شکل ۷. توالی پاراژنتیک کانی‌سازی در کانسارهای فلوریت باقرآباد و دره‌بادام. ضخامت خطوط نشان‌دهنده فراوانی نسبی کانی‌هاست.

Fig. 7. Paragenetic sequence of mineralization at Bagher Abad and Darreh Badam fluorite ore deposits. Relative frequency of minerals shown by line thickness.

میان‌بارهای اولیه (شکل ۸-B، C و D) انجام شد. میان‌بارهای سیال از نظر ریخت‌شناسی به شکل‌های متنوع نامنظم، بلورمندی، کشیده و دوکی شکل دیده شدند. همچنین، شواهد باریک‌شدگی و نشت نیز در برخی از میان‌بارها دیده شد (شکل ۸-E) که طی بررسی‌های ریزدماسنجی از آنها استفاده نشد.

ابعاد میان‌بارهای سیال در این مناطق از کوچک‌تر از ۲ میکرون تا حداکثر ۳۰ میکرون متغیر است (شکل ۸). طبق معیارهای رودر (Roedder, 1984)، از لحاظ ژنتیکی میان‌بارها به سه شکل اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب مشاهده شدند (شکل ۸-A، B، C و D) که برای اطمینان از درستی داده‌ها، اغلب اندازه‌گیری‌ها بر روی



شکل ۸. تصاویر سنگ‌نگاری میان‌بارهای سیال در میزبان فلوریت کانسارهای باقرآباد و دره بادام. A: ردیفی از میان‌بارهای ثانویه، B: همراهی میان‌بارهای دوفازی غنی از مایع و گاز، C و D: میان‌بارهای دوفازی L+V. پدیده باریک‌شدگی در میان‌بارهای دوفازی L+V

Fig. 8. Petrographic photomicrographs of the fluid inclusions in fluorite of the Bagher Abad and Darreh Badam deposits, A: rows of secondary fluid inclusions, B: liquid-rich (L+V type) aqueous inclusions accompanied with vapor-rich inclusions, C and D: liquid-rich aqueous inclusions, and E: necking down in liquid-rich aqueous inclusions (L+V)

بنفش و کلسیت انجام شده است. میان‌بارهای سیال بر مبنای فازهای تشکیل‌دهنده، از نظر فراوانی شامل: ۱- میان‌بارهای دوفازی آبگین (LV)، ۲- میان‌بارهای تک‌فاز مایع (L) و گاز (V) و ۳- میان‌بارهای آبگین-کربنیک حاوی فاز CO_2 (C) متشکل از دو زیرگروه آبگین-کربنیک حاوی کلاتریت (C1) و آبگین-کربنیک بدون کلاتریت (C2) هستند (شکل ۸). میان‌بارهای نوع C2 در نمونه‌های تهیه‌شده از کانسار دره‌بادام مشاهده نشد. از دیدگاه سنگ‌نگاری،

بر اساس شواهد سنگ‌نگاری و بهره‌گیری از معیارهای فان‌دن‌کرکوف و هاین (Van den Kerkhof and Hein, 2001) و بودنار و همکاران (Bodnar et al., 2014) دست‌کم سه نوع میان‌بار در کانی‌های فلوریت، کلسیت و باریت کانسارهای باقرآباد و دره‌بادام تشخیص داده شد. چنان‌که در بخش کانه‌زایی اشاره شد، بررسی میان‌بارهای سیال در منطقه دره‌بادام بر روی کانی‌های باریت و فلوریت و در منطقه باقرآباد بر روی فلوریت‌های

سیال، از روش قطع خطوط هم‌چگال (ایزوکور) میان‌بارهای آبگین و آبگین - کربنیک با چگالی‌های مختلف، از نرم‌افزار ISOC در بسته FLUIDS (Bakker, 2003) استفاده شد.

میان‌بارهای سیال آبگین دوفازی نوع LV: بر اساس بررسی‌های ریزدماسنجی، دمای اولین نقطه ذوب یخ (Te) در میان‌بارهای آبگین دوفازی نوع LV میزبان کانی‌های فلوریت، کلسیت و باریت کانسارهای باقرآباد و دره‌بادام به ترتیب بین ۳۲- تا ۱۵- و ۳۵- تا ۲۴- درجه سانتی‌گراد متغیر است که نشان‌دهنده وجود سیالی چند ترکیبی $H_2O-NaCl \pm KCl$ در منطقه است (Van den Kerkhof and Hein, 2001). دمای آخرین نقطه ذوب یخ (T_{mice}) برای میان‌بارهای سیال موجود در کانی‌های بررسی شده از کانسارهای باقرآباد و دره‌بادام به ترتیب بین ۱۰/۵- تا ۲/۳- و ۱۲/۰- تا ۵/۶- درجه سانتی‌گراد متغیر است که به ترتیب شوری برابر با ۵/۶ تا ۱۴/۷ (شکل ۷) و ۸/۳ تا ۱۵/۲ (شکل ۱۰) درصد وزنی معادل نمک طعام به دست می‌دهد. دمای همگن شدن نهایی (T_{total}) میان‌بارهای سیال آبگین دوفازی (LV) در کانی‌های فلوریت، کلسیت و باریت کانسارهای باقرآباد و دره‌بادام نیز به ترتیب بین ۱۲۷ تا ۱۸۸ درجه سانتی‌گراد (شکل ۹) و ۱۷۶ تا ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۱۰) متغیر است.

میان‌بارهای سیال آبگین - کربنیک (نوع C): دمای ذوب فاز CO_2 (T_{mCO_2}) در میان‌بارهای آبگین - کربنیک (نوع C) کانی‌های فلوریت، کلسیت و باریت کانسارهای باقرآباد و دره‌بادام به ترتیب بین ۵۸/۳- تا ۵۶/۶- درجه سانتی‌گراد متغیر و اغلب پایین‌تر از دمای ذوب فاز CO_2 برای CO_2 خالص ($56/6^\circ C$) است که نشان‌دهنده وجود فازهای CH_4 یا N_2 در فاز گازی سیال کانی‌ساز است (Burruss, 1981). دمای ذوب کلاتریت (T_{mClath}) در این نوع میان‌بارها برای هر دو کانسار باقرآباد و دره‌بادام نیز از ۶- تا ۱+ درجه سانتی‌گراد متغیر است که بر اساس آن، شوری سیال کانی‌ساز در هر دو کانسار بین ۵/۵ تا ۱۸/۲ درصد وزنی معادل نمک طعام به دست آمد. دمای همگن شدن فاز CO_2 (T_{mCO_2}) در میان‌بارهای نوع C کانسارهای باقرآباد و دره‌بادام

میان‌بارهای دوفازی آبگین که فراوان‌ترین میان‌بارها در کانی‌ها هستند، اغلب به صورت خوشه‌ای^۱ و اجتماعی از میان‌بار^۲ مشاهده شدند که در مواردی میان‌بارهای تک فاز آبگین و گاز نیز آنها را همراهی می‌کرد. میان‌بارهای تک فازی مایع اغلب به صورت قطع‌کننده مرز بلور^۳ که بیانگر ثانویه بودن این میان‌بارهاست نیز مشاهده شد. همچنین، میان‌بارهای آبگین - کربنیک اغلب به صورت درون بلوری^۴ کشیده و اجتماعی از میان‌بارها، اغلب همراه با یکدیگر مشاهده شدند. شواهد ثانویه یا ثانویه کاذب در میان‌بارهای آبگین - کربنیک دیده نشد که از این نظر ماهیت اولیه بودن این میان‌بارها را می‌رساند. تصاویر سنگ‌نگاری میان‌بارها در شکل ۸ نشان‌دهنده شده است.

ریزدماسنجی

چنان‌که اشاره شد، بررسی‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال بر روی کانی‌های فلوریت بنفش و کلسیت در کانسار باقرآباد و کانی‌های فلوریت و باریت در کانسار دره‌بادام انجام شد. طی مرحله سرمایه‌ش، برای اطمینان از انجماد کامل محتوای میان‌بارها، تا حدود ۱۲۰- درجه سانتی‌گراد سرد شدند و عملیات گرمایش تا همگن شدن کلیه فازهای قابل انحلال ادامه یافت. تفسیر داده‌های ریزدماسنجی شامل شوری و چگالی (چگالی‌های کل و فاز CO_2)، با استفاده از نرم‌افزارهای FLINCOR (Brown, 1989) و FLUIDS (Bakker, 2003) محاسبه شوری در میان‌بارهای دوفازی آبگین بدون فاز جامد با دمای یوتکتیک (دمای اولین نقطه ذوب یخ) بیش از ۲۱/۲- درجه سانتی‌گراد، با استفاده از دمای نهایی ذوب یخ (T_{mice}) و بهره‌گیری از معادله هال و همکاران (Hall et al., 1988) و مقایسه با روش استرنر و همکاران (Sterner et al., 1988) انجام شد. شوری در میان‌بارهای آبگین - کربنیک حاوی کلاتریت (در سیستم H_2O-CO_2-NaCl) نیز با استفاده از دمای ذوب کلاتریت (T_{mClath}) و به کارگیری روش باورز و هلگسون (Bowers and Helgeson, 1985) در نرم‌افزار FLINCOR محاسبه شد. برای تخمین فشار

1. Cluster
2. Fluid Inclusion Association
3. Transgrain
4. Intragrain

خلاصه داده‌های ریزدماسنجی میان‌بارهای سیال مورد بررسی در کانی‌های میزبان فلوریت بنفش و کلسیت (در کانسار باقرآباد) و کانی‌های فلوریت و باریت (در کانسار دره‌بادام)، در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است. علاوه‌بر این، نمودارهای ستونی دمای همگن‌شدن نهایی (Th_{total}) و شوری این میان‌بارها نیز در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

به ترتیب بین ۱۷/۳ تا ۳۱/۴ و ۱۷/۴ تا ۲۹/۴ درجه سانتی‌گراد متغیر است. بر این اساس، چگالی CO_2 سیال کانی‌ساز در این میان‌بارها بین ۰/۸۷ تا ۰/۹۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر است. دمای همگن‌شدن نهایی (Th_{total}) میان‌بارهای نوع C در کانسارهای باقرآباد و دره‌بادام نیز به ترتیب بین ۱۵۵ تا ۲۱۲ و ۱۴۰ تا ۲۴۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است. با توجه به نبود فاز آبگین در میان‌بارهای نوع C2، محاسبه شوری مقدور نشد.

جدول ۱. خلاصه داده‌های میکروترمومتری میان‌بارهای سیال در کانی‌های میزبان فلوریت بنفش و کلسیت در کانسار باقرآباد

Table 1. Summary of micro-thermometric measurements of fluid inclusions in violet fluorite and calcite minerals from Bagher Abad deposit.

Host mineral	Inclusion type	Number (n)	T_e (°C)	T_{mice} (°C)	T_{mCO_2} (°C)	T_{mclath} (°C)	Th_{CO_2} (°C)	Th (°C)	Salinity (wt.% NaCl eq.)	Density (g/cm ³)
Fluorite	LV	4	-25 to -30	-7.5 to -9.3	-----	-----	-----	135-142	11.1-13.2	1.01
	LV	3	-23 to -25	-5.5 to -6.2	-----	-----	-----	145-150	8.5-9.5	0.98
	LV	5	-----	-6.8	-----	-----	-----	137-141	10.2	1.00
	LV	4	-26 to -30	-6.0 to -10.5	-----	-----	-----	127-133	9.2-14.7	1.01
	LV	4	-----	-7.3 to -9.2	-----	-----	-----	132-145	11.0-13.1	1.02
	C1	6	-----	-----	-56.6	-2 to -1	26.0-27.1	172-198	10.3-13.7	0.88
	C1	6	-----	-----	-56.8	-3 to -2	25.5-26.2	155-185	11.1-13.4	0.89
	C1	5	-----	-----	-57.1	0 to +1	27.0-27.8	198-212	8.2-10.3	0.90
	C1	4	-----	-----	-----	-2 to +1	-----	195-200	12.2-15.7	0.88
	C2	5	-----	-----	-58.3	-----	19.2-25.1	167-202	-----	0.81
	C2	4	-----	-----	-----	-----	22.3-24.0	167-202	-----	0.77
	C2	4	-----	-----	-59.2	-----	17.3-25.1	167-202	-----	0.79
	C2	4	-----	-----	-57.3	-----	22.2-28.3	167-202	-----	0.75
Calcite	LV	5	-17 to -20	-4.1 to -5.8	-----	-----	-----	143-167	6.6-9.0	1.03
	LV	7	-15 to -21	-2.7 to -5.4	-----	-----	-----	145-178	5.9-8.4	0.98
	LV	5	-20 to -24	-2.3 to -4.5	-----	-----	-----	133-160	5.6-7.2	1.01
	LV	4	-----	-5.6 to -7.8	-----	-----	-----	165-188	8.7-11.5	0.96
	C1	7	-----	-----	-57.4	-2 to +3	29.5-30	176-180	10.3-16.2	0.98
	C1	5	-----	-----	-----	-1 to +2	29.2-29.8	163-175	7.4-12.8	0.87
	C1	4	-----	-----	-56.6	-4	-----	157-186	14.2-18.2	0.83
	C1	5	-----	-----	-56.9	0 to +2	-----	185-190	5.5-13.3	0.94

n= number of fluid inclusion measurements

جدول ۲. خلاصه داده‌های میکروترمومتری میان‌بارهای سیال در کانی‌های میزبان فلوریت و باریت در کانسار دره‌بادام

Table 2. Summary of micro-thermometric measurements of fluid inclusions in fluorite and barite minerals from Darreh Badam fluorite

Host mineral	Inclusion type	Number (n)	Te (°C)	T _{mice} (°C)	T _{mCO2} (°C)	T _{mclath} (°C)	Th _{CO2} (°C)	Th (°C)	Salinity (wt.% NaCl eq.)	Density (g/cm ³)
Fluorite	LV	5	-28 to -30	-8.5 to -9.4	-----	-----	-----	241-262	12.3-13.3	0.93
	LV	4	-----	-7.0 to -9.3	-----	-----	-----	244-270	10.5-13.2	0.97
	LV	6	-27 to -33	-6.5 to -8.8	-----	-----	-----	230-255	9.9-12.6	1.02
	LV	4	-25 to -28	-9.2 to -10.5	-----	-----	-----	245-256	13.1-14.5	1.12
	C1	5	-----	-----	-56.7	-5 to +2	18.0-21.2	198-225	12.4-13.5	0.87
	C1	4	-----	-----	-56.8	-3 to -1	19.2-22.7	176-233	11.0-13.2	0.92
	C1	4	-----	-----	-58.2	-6 to -0.8	17.4-19.6	155-170	10.4-12.3	0.97
	C1	5	-----	-----	-----	-2 to +2	21.5-24.2	223-245	12.5-14.5	0.90
	C1	3	-----	-----	-56.7	-4 to 0.4	18.8-22.1	190-201	11.2-13.5	0.87
	Barite	LV	5	-29 to -35	-10.1 to -12	-----	-----	-----	176-205	10.3-13.2
LV		4	-27 to -31	-6.8 to -9.5	-----	-----	-----	186-210	9.3-14.2	0.89
LV		6	-24 to -33	-----	-----	-----	-----	195-230	8.3-10.3	0.92
LV		4	-----	-5.6 to -8.8	-----	-----	-----	188-220	12.5-15.2	0.96
LV		4	-----	-10.2 to -9.8	-----	-----	-----	196-222	11.3-14.5	0.86
C1		7	-----	-----	-57.3	-5 to +1	27.0-29.4	162-200	7.2-12.3	0.85
C1		7	-----	-----	-56.8	-4 to 0.8	24.2-28.1	176-210	8.6-12.3	0.94
C1		6	-----	-----	-57.1	-2	22.1	140-187	9.5-11.3	0.90

n= number of fluid inclusion measurements

طریق حضور هم‌زمان اجتماعی از میان‌بارهای اولیه با ماهیت آبگین و آبگین-کرنیک، امکان‌پذیر است (Roedder and Bodnar, 1980). در سامانه H₂O-CO₂-NaCl از آنجا که شیب منحنی‌های

بحث و نتیجه‌گیری

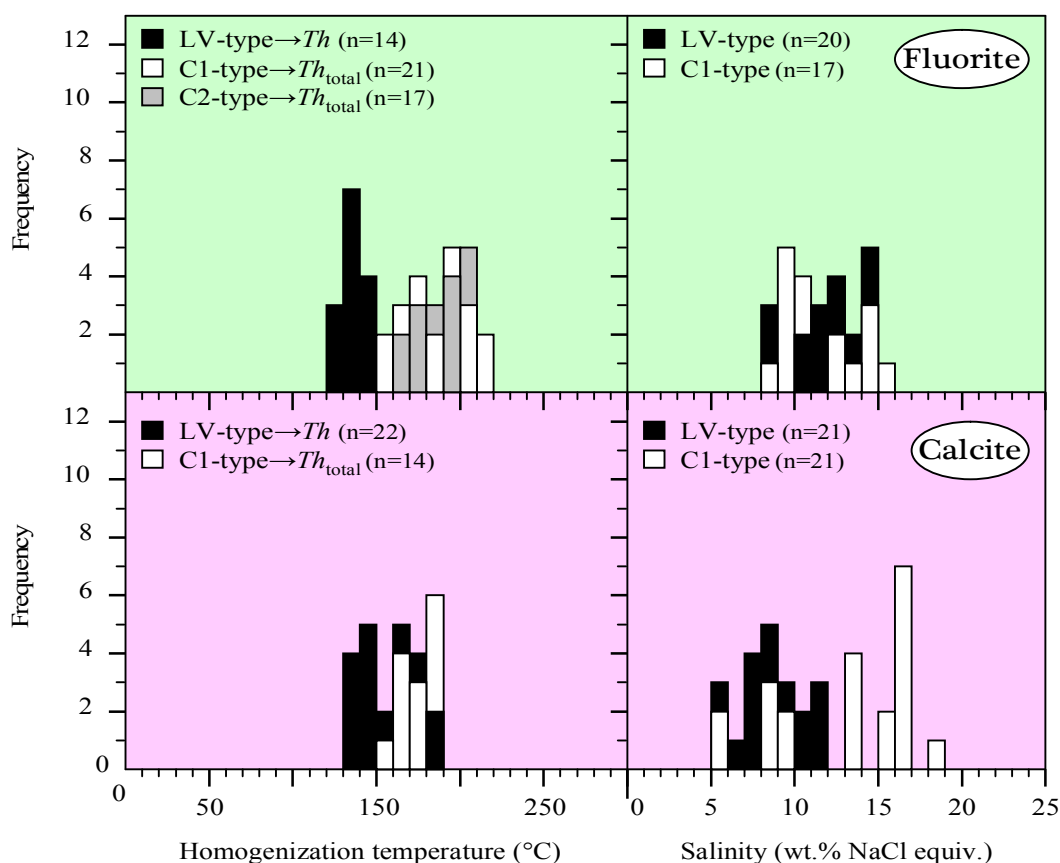
تعیین شرایط فشار-دما

دستیابی به شرایط فشار-دمای واقعی و تخمین عمق دیرینه کانسار از

مقاطع دیگر برای میان‌بارهای آبگین-کرنیک و کرنیک این کانسار، به ترتیب برای چگالی‌های کل بین ۰/۸ تا ۰/۹۱ g/cm³ و ۰/۷۵ تا ۰/۸۱ g/cm³ توسط نرم‌افزار FLINCOR محاسبه شد (جدول ۱ و شکل ۱۱). محاسبات یادشده با استفاده از منحنی‌های هم‌چگال در میان‌بارهای آبگین و آبگین-کرنیک فلوریت‌های کانسار دره بادام نیز انجام شد که به دلیل عدم تقاطع منحنی‌های هم‌چگال، تخمین فشار و دمای واقعی برای این ذخیره امکان‌پذیر نشد. در مجموع، چنان‌که در نمودار دوتایی دما (°C) در مقابل فشار (kbar) نشان‌داده شده است (شکل ۱۱)، کانی‌سازی فلوریت در کانسار باقرآباد در فشار تقریبی ۱ تا ۲ کیلو بار و دمای واقعی ۱۸۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده است.

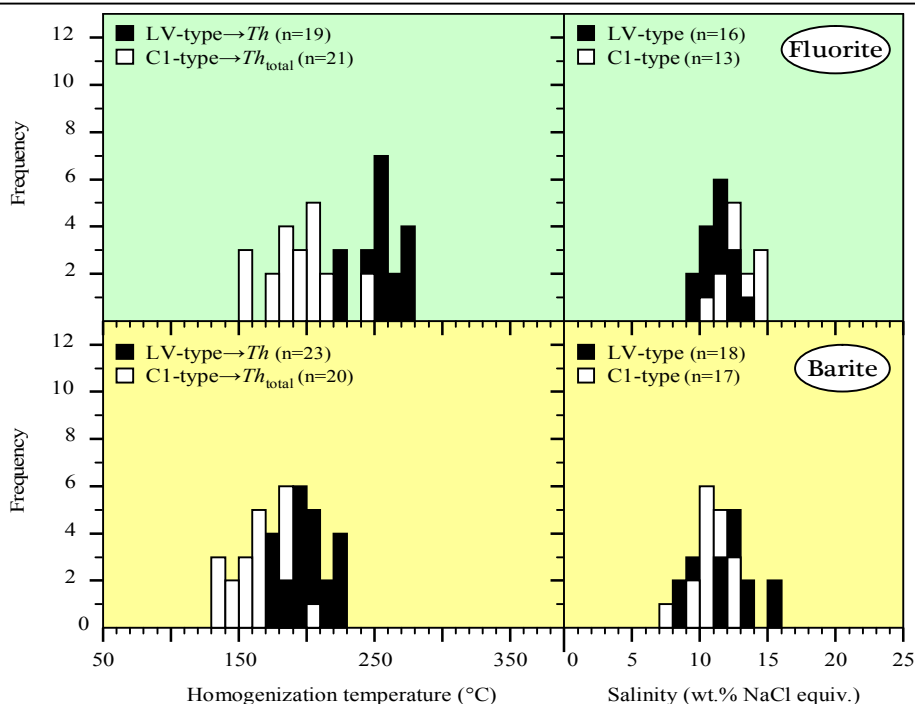
هم‌چگال (ایزوکور) به دست آمده برای میان‌بارهایی با ماهیت آبگین (بدون حضور CO₂)، آبگین-کرنیک و کرنیک در نمودار فشار-دما با یکدیگر متفاوت است؛ لذا روابط مقاطع میان منحنی‌های هم‌چگال می‌تواند تخمینی مناسب از شرایط فشار و دمای واقعی سیال به‌دام افتاده در اختیار گذارد.

تقاطع منحنی‌های هم‌چگال در این روش، با استفاده از مقادیر کمینه و بیشینه چگالی کل در میان‌بارهای آبگین (شامل LV) و آبگین-کرنیک (شامل C1) فلوریت‌های کانسار باقرآباد و دره بادام انجام شد (جدول‌های ۱ و ۲). در فلوریت‌های کانسار باقرآباد منحنی‌های هم‌چگال برای میان‌بارهای آبگین نوع LV به ترتیب با کمینه تا بیشینه بین ۰/۹۷ تا ۱/۰۲ g/cm³ به دست آمد. همچنین، منحنی‌های هم‌چگال



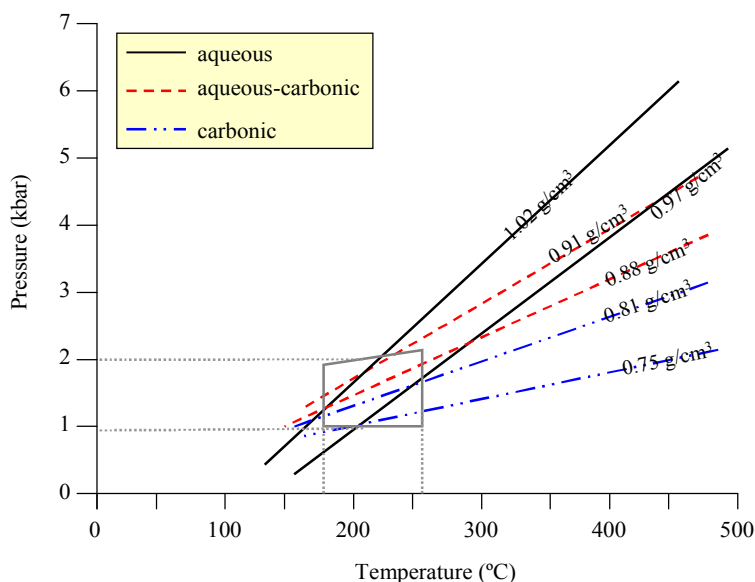
شکل ۹. نمودارهای ستونی مقادیر شوری (wt.% NaCl eq.) و دمای همگن‌شدن نهایی سیال (Th_{total}) در میان‌بارهای موجود در کانی‌های فلوریت بنفش (بالا) و کلسیت (پایین) کانسار باقرآباد

Fig. 9. Histograms showing frequency distribution of homogenization temperature (Th) and salinity (wt.% NaCl eq.) for fluid inclusions in violet fluorite (top) and calcite (bottom) from Bagher Abad deposit



شکل ۱۰. نمودارهای ستونی مقادیر شوری (wt.% NaCl eq.) و دمای همگن شدن نهایی سیال (Th_{total}) در میان‌بارهای موجود در کانی‌های فلوریت (بالا) و باریت (پایین) کانسار دره‌بادام

Fig. 10. Histograms showing frequency distribution of homogenization temperature (Th) and salinity (wt.% NaCl eq.) for fluid inclusions in fluorite (top) and barite (bottom) from Darreh Badam deposit.



شکل ۱۱. نمودار تخمین فشار-دمای سیال با استفاده از تقاطع منحنی‌های هم‌چگال میان‌بارهای آبگین، آبگین-کربنیک و کربنیک در فلوریت‌های کانسار باقرآباد. چنان‌که مشاهده می‌شود، رخداد فلوریت در فشار تقریبی ۱ تا ۲ کیلو بار و دمای ۱۸۰ تا ۲۶۰ سانتی‌گراد تشکیل شده است.

Fig. 11. Estimation of trapping pressure-temperature of the mineralizing fluid in Bagher Abad fluorite deposit using intersecting CO_2 and H_2O isochors for aqueous, aqueous-carbonic and carbonic fluid inclusions. As shown in the diagram, fluorite mineralization occurred at 180-260°C and 1-2 kbar pressure.

فرایندهای مؤثر در نهشت ذخیره

طبق بررسی‌ها، می‌توان دست‌کم چهار منشأ برای سیالات گرمایی حاوی فلز در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی در نظر گرفت که شامل موارد زیر است:

۱- سیالات گرمایی منشأگرفته از توده‌های گرانیتیوئیدی عمیق (Bodnar, 1995)، ۲- سیالات منشأگرفته از آب دریا (Hanor, 1994)، ۳- انحلال هالیت و سیالات به‌دام افتاده در افق‌های سنگی زیرین (Fontes and Matray, 1993) و ۴- سیالات ناشی از آب‌زدایی کانی‌ها طی واکنش‌های دگرگونی (Markl et al., 1998; Svensen et al., 1999). طبق شواهد میکروترمومتری، مقادیر دما و شوری میان‌بارهای سیال در ذخایر فلوریت باقرآباد و دره بادام قابل مقایسه با ذخایر نوع اپی‌ترمال، ایرلندی و MVT است. با این وجود به نظر می‌رسد هیچ‌یک از سیالات اشاره‌شده به‌تنهایی منطبق با کانسارهای باقرآباد و دره بادام نیستند. ویژگی‌های شیمی سیال دیده‌شده در کانسارهای مورد بررسی نشان می‌دهد که سیالات مختلفی با منشأ، دما و شوری متفاوت در شکل‌گیری ذخایر فلوریت منطقه نقش داشته‌اند که برای تعیین دقیق منشأ سیال، آزمایش‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن ضروری است.

طبق پژوهش بویرون و همکاران (Boiron et al., 2010)، وقوع فرایندهای اختلاط و کاهش دمای ناشی از رقیق‌شدگی سیال، کاهش ناگهانی فشار (ناشی از رخداد گسلش یا کاهش فشار افق‌های سنگی بالایی) و رخداد جوشش، شرایطی مناسب برای ناپایداری کمپلکس‌های فلزی به‌ویژه کلریدهای سرب، مس و اورانیوم فراهم می‌کند که در نتیجه آن ته‌نشینی عناصر فلزی مختلف بستگی به محتوای فلزی و حضور بنیان سولفوری در محیط دارد. با استفاده از نمودار دمای همگن‌شدن نهایی در مقابل شوری و مقایسه آن با روندهای مختلف تحول سیال (Wilkinson, 2001)، چنین به‌نظر می‌رسد که رگه‌های فلوریت-کلسیت کانسار باقرآباد در نتیجه اختلاط و کاهش دمای تدریجی سیال ناشی از رقیق‌شدگی با آب‌های جوی شکل‌گرفته است (شکل ۱۲). طبق نمودار دمای همگن‌شدن در مقابل شوری، به‌نظر می‌رسد رگه‌های فلوریت-باریت کانسار دره بادام در نتیجه کاهش فشار ناشی از رخداد هم‌زمان با گسلش و در پی آن رقیق‌شدگی با

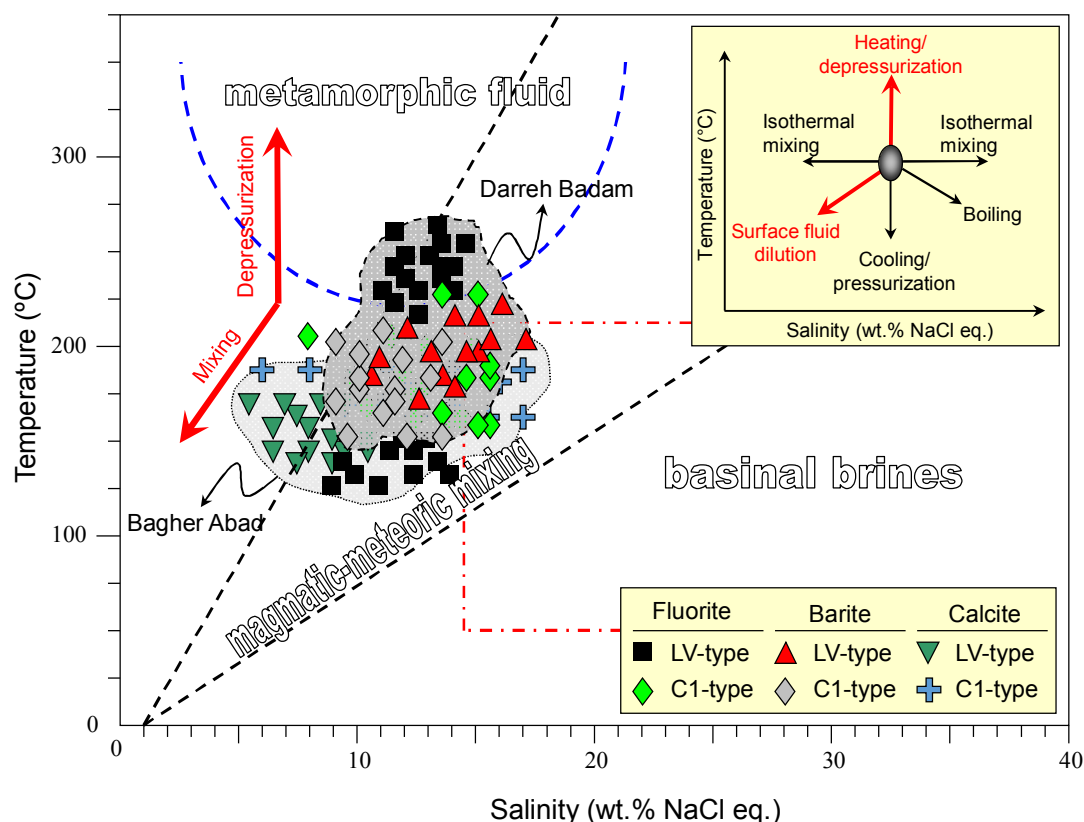
آب‌های جوی شکل‌گرفته است (شکل ۱۲). با توجه به سرگذشت زمین‌شناختی-زمین‌ساختی منطقه دره‌بادام و وجود گسل امتداد لغز یک کیلومتری با راستای شرقی-غربی به‌عنوان عامل اصلی کنترل‌کننده کانی‌سازی، وقوع پدیده بالا دور از انتظار نیست. چنان‌که قبلاً اشاره‌شد، محتوای کانی‌سازی فلزی در کانسارهای فلوریت باقرآباد و دره بادام ناچیز بوده است و در مجموع حجم کانی‌سازی سولفیدی (نظیر پیریت و کالکوپیریت) تنها کمتر از ۵ درصد رگه را شامل می‌شود. حضور سولفور در محیط‌های رسوبی-دیاژنتیکی طی دو فرایند اصلی احیای سولفات توسط باکتری‌ها در دمای پایین (۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد) و عامل حرارتی-شیمیایی با دمای نسبتاً بالا (۱۰۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد) اتفاق می‌افتد (Machel, 2001). بر این اساس، به‌نظر می‌رسد، حضور مواد آلی به‌طور محلی در بخش‌هایی از سازندهای منطقه به احیای سولفات توسط فعالیت باکتری‌ها و عامل حرارتی-شیمیایی منجر شده که طی آن با آزاد شدن مقادیر ناچیز H_2S ، ته‌نشینی فلزات سولفیدی به‌صورت پراکنده همراه با کانی‌سازی رگه‌ای فلوریت رخ داده است. انجام بررسی‌های ایزوتوپی برای تعیین منشأ سولفور در منطقه مورد بررسی پیشنهاد می‌شود.

منشأ عناصر کانه‌ساز و رخداد فلوریت

چنان‌که در بخش زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی اشاره‌شد، اسلیت و فلیت‌های سازند شمشک (ژوراسیک زیرین) و واحد ماسه‌سنگ آهکی و آهک دولومیتی سازند بادامو (ژوراسیک میانی تا بالایی) سنگ میزبان‌های اصلی کانه‌زایی فلوریت در کانسارهای باقرآباد و دره‌بادام هستند. واحدهای سنگی اشاره‌شده به‌دلیل عملکرد فاز کوه‌زایی سیمین پیشین به‌طور ناپیوسته روی آهک‌های ضخیم لایه تریاس میانی نهشته شده‌اند. همچنین عملکرد رویداد سیمین پسین با شکل‌گیری کلیواژ در رسوبات سازند شمشک و ناپیوستگی زاویه‌دار بین سنگ‌های کرتاسه زیرین و میانی با قاعده پیش‌رونده ماسه‌سنگی و سنگ‌های سازند شمشک مشخص می‌شود. طبق پژوهش‌های سانچز و همکاران (Sanchez et al., 2009) و هایجلن و همکاران (Heijlen et al., 2001) به‌نظر می‌رسد وجود سطوح فرسایش‌یافته و هوازده به ضخامت چندین متر در زیر افق‌های ناپیوستگی به‌عنوان عاملی کلیدی

سیلیکات ورقه‌ای و آلکالی فلدسپارهای واحدهای پالئوزوئیک زیرین و استحصال فلز از ساختمان آنها می‌شود.

برای تأمین فلز از افق‌های زیرین محسوب می‌شود. طبق این شواهد، پس از رخداد فرسایش، عملکرد فرایندهای برون‌زاد در افق‌های هوازده رخنمون‌یافته موجب واکنش‌های شیمیایی گسترده‌ای بر روی کانی‌های



شکل ۱۲. نمودار دوتایی دما در مقابل شوری و نمایش موقعیت میان‌بارهای سیال مشاهده‌شده در کانی‌های فلوریت، باریت و کلسیت کانسارهای فلوریت باقرآباد و دره بادام. نمودار پایه از بین (Beane, 1983) اقتباس شده است.

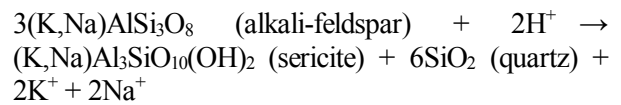
Fig. 12. Th-salinity plot for fluid inclusions in fluorite, barite and calcite minerals from Bagher Abad and Darreh Badam fluorite deposits. The reference areas are from Beane (1983).

این پدیده است. طبق شواهد و بررسی‌های زمین‌شناسی در منطقه محلات-دلیجان، به‌نظر می‌رسد منشأ اصلی یون‌های F^- در کانسارهای فلوریت باقرآباد و دره بادام احتمالاً توسط واحدهای گرانیت-پگماتیت پالئوزوئیک تأمین شده است (Ehya, 2012; Tale Fazel, 2016) که در منطقه مورد بررسی رخنمون ندارد. درنهایت آزادشدن یون کلسیم در محیط موجب می‌شود تا یون‌های F^- آزادشده در شرایط دمایی و توانایی شیمیایی مناسب، طبق واکنش ۳ کانی فلوریت را تشکیل دهند.

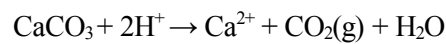
این واکنش‌ها اغلب در حضور یون H^+ و بافری کردن سیال کانه‌ساز و سنگ دربرگیرنده رخ می‌دهد که محصولات جدید این واکنش تشکیل سرسیت در سنگ میزبان و آزادشدن یون‌های Na^+ و K^+ در محیط است (واکنش ۱). علاوه بر این، تحت تأثیر بافری کردن H^+ و برهم کنش میان سیال/سنگ، سنگ میزبان آهکی دچار تجزیه شده و مقدار زیادی دی‌اکسید کربن در محیط آزاد می‌شود (واکنش ۲). وجود میان‌بارهای آبگین-کرنیک حاوی فاز CO_2 در کانی‌های فلوریت، باریت و کلسیت کانسارهای مورد بررسی از شواهد رخداد

شماتیک ارائه‌شده برای کانسارهای باقرآباد و دره بادام (شکل ۱۳) نشان می‌دهد که شورابه‌های بالاآمده از سنگ بستر دگرسان‌شده، شرایطی مناسب برای افزایش انحلال‌پذیری فلزات و تشکیل کمپلکس‌های هالیدی (F^- و Cl^-) فراهم کرده‌اند. شورابه‌های یادشده طی واکنش با سنگ دیواره و فراهم‌شدن شرایط نهشت، به رخداد کانی‌سازی در فضای مناسب منجر می‌شوند. با توجه به محتوای بالای شوری در کانسار فلوریت آتش‌کوه که در فاصله ۱۵ کیلومتری شرق کانسارهای باقرآباد و دره بادام قرار دارد، احتمالاً به‌نظر می‌رسد توده نفوذی غنی از عناصر آلکالن در فاصله نزدیک‌تری نسبت به کانسار آتش‌کوه قرار گرفته باشد. کانی‌سازی در میزبان سنگ‌های آهک دولومیتی و اسلیت‌های سازند شمشک و بادامو با گستره زمانی ژوراسیک زیرین تا میانی در یک افق ناپیوسته شکل گرفته است. شکستگی‌هایی که در چهارچوب زمین‌ساخت ناحیه‌ای منطقه تشکیل شده‌اند، مجاری حمل سیال‌کانه‌زا هستند. سیالات کانه‌دار مواد معدنی را در شرایط دما، فشار و شوری مشخص حمل کرده و در داخل شکستگی‌ها رسوب داده‌اند. عناصر کانه‌ساز از شست‌وشوی سنگ میزبان غنی از فلور و در واکنش با سنگ‌های آهکی-دولومیتی به‌عنوان منبع Ca تشکیل شده و تحت شرایط عنوان‌شده در بالا، کانی‌سازی فلوریت-باریت شکل گرفته است (شکل ۱۳).

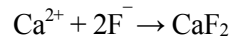
واکنش ۱:



واکنش ۲:

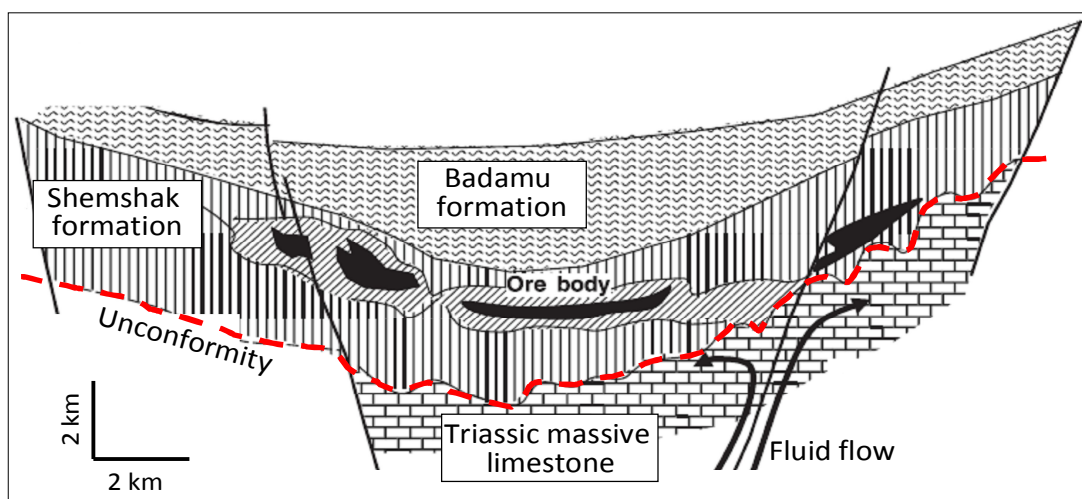


واکنش ۳:



طبق بررسی‌های بویرون و همکاران (Boiron et al., 2010) رخداد واکنش‌های هم‌زمان آب‌کافت (اضافه‌شدن یون H^+) و آب‌پوشی (ترکیب با H_2O) در دمای متوسط تا پایین، اغلب به تشکیل کانی‌های رسی (از جمله کاتولینیت) و آزاد شدن مقادیر بالای فلور و باریم در افق‌های زیرین ناپیوستگی منجر می‌شود. در پی آن، در اثر وجود گسل‌ها و مجراهای مناسب، این عناصر قادر خواهند بود به قسمت‌های بالایی ناپیوستگی هدایت شوند و تحت‌تأثیر فرایندهای فیزیکوشیمیایی تله-منشأ^۱ (Barnes, 1997)، از قبیل جوشش، اختلاط با آب‌های سرد، تغییرات ناگهانی pH و نظایر آن در محیط نهشته شوند.

وجود سیالات آبگین حاوی NaCl و محتوای کلرینته سیال می‌تواند به‌عنوان عامل محرک، موجب تسریع این واکنش‌ها و در نتیجه استحصال هرچه بیشتر فلز از ساختمان کانی‌های مختلف شود. مدل



شکل ۱۳. تصویر شماتیک از نحوه مهاجرت سیال و رخداد افق‌های غنی از فلوریت در منطقه جنوب‌شرق محلات (برای اطلاعات بیشتر به متن مراجعه شود).

Fig. 13. Schematic view of the mode of fluid migration and the occurrence of fluorite-rich horizons in southeastern Mahallat (see text for more explanation).

1. Source-trapping

قدردانی

معادن فلوریت باقرآباد و دره‌بادام را فراهم کردند، از مدیریت محترم سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) برای حمایت مالی از این پژوهش و همچنین از دقت نظر و پیشنهادهای سازنده داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی قدردانی می‌نمایند.

این مقاله مستخرج از پژوهشی است که با حمایت مالی دانشگاه پیام‌نور انجام شده است؛ لذا از تمامی افرادی که به نحوی در تصویب و اجرای آن نقش داشته‌اند، تشکر می‌شود. نویسندگان از مدیریت محترم شرکت صنعتی پودرسازان که امکان دسترسی به

References

- Alavi, M., 1991. Tectonic map of the Middle East, scale 1:5,000,000. Geological Survey of Iran.
- Bakker, R.J., 2003. Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, 194(1-3): 3-23.
- Barati, M., Tale Fazel, E., Akbarpour, A., Talaei, B. and Moslehi, M., 2017. Study of genesis in Qahr-Abad fluorite deposit using fluid inclusion, southeast of Saqqez, the Kurdistan province. *Journal of Economic Geology*, 9(1): 235-248. (in Persian with English abstract)
- Barnes, H.L., 1997. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. John Wiley & Sons, New York, 972 pp.
- Beane, R.E., 1983. The magmatic-metamorphic transition. In: C. Davis (Editor), *The role of heat in the development of energy and mineral resources in the northern Basin and Range Province*. Geothermal Resources Council, California, pp. 245-253.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2): 210-265.
- Bodnar, R.J., 1995. Fluid inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits. In: J.F.H. Thompson (Editor), *Magma, fluids, and ore deposits*. Mineralogical Association of Canada Short Course Series, Ontario, pp. 139-152.
- Bodnar, R.J., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada, D. and Steele-MacInnis, M., 2014. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. In: H.D. Holland and K.K. Turekian (Editors), *Treatise on geochemistry*. Elsevier, Oxford, pp. 119-142.
- Boiron, M.C., Cathelineau, M. and Richard, A., 2010. Fluid flows and metal deposition near basement/cover unconformity: lessons and analogies from Pb-Zn-F-Ba systems for the understanding of Proterozoic U deposits. *Geofluids*, 10(3): 270-292.
- Bowers, T.S. and Helgeson, H.C., 1985. FORTRAN programs for generating fluid inclusion isochores and fugacity coefficients for the system H₂O-CO₂-NaCl at high pressures and temperatures. *Computers and Geosciences*, 11(2): 203-213.
- Brown, P.E., 1989. FLINCOR: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *American Mineralogist*, 74(11-12): 1390-1393.
- Burruss, R.C., 1981. Analysis of phase equilibria in C-O-H-S fluid inclusions. In: L.S. Hollister and M.L. Crawford (Editors), *Fluid inclusions: applications to petrology*. Mineralogical Association of Canada Short Course Series, Ontario, pp. 39-74.
- Dill, H.G., 2010. The chessboard classification scheme of mineral deposits: mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*, 100(1): 1-420.
- Ehya, F., 2012. Variation of mineralizing fluids and fractionation of REE during the emplacement of the vein-type fluorite deposit at Bozijan, Markazi Province, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 112(1): 93-106.
- Fontes, J.C. and Matray, J.M., 1993. Geochemistry and origin of formation brines from the Paris Basin, France: 1. Brines associated with Triassic salts. *Chemical Geology*, 109(1-4): 149-175.
- Ghasemi, A. and Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone

- (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(6): 683–693.
- Gheshlaghi, A. and Moore, F., 2007. Recognition of Pinavand fluorite mines occurrence based on geothermometry and REE data. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 14(2): 325–338. (in Persian with English abstract)
- Goldstein, R.H. and Reynolds, T.J., 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. Society for Sedimentary Geology, Oklahoma, 199 pp.
- Hall, D.L., Sternert, S.M. and Bodnar, R.J., 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O. *Economic Geology*, 83(1): 197–202.
- Hanna, J.L. and Stein, H.J., 1990. Magmatic and hydrothermal processes in ore bearing systems. In: H.J. Stein and J.L. Hanna (Editors), *Ore bearing granite systems; petrogenesis and mineralizing processes*. Geological Society of America Special Paper, Boulder, Colorado, pp. 1–10.
- Hanor, J.S., 1994. Origin of saline fluids in sedimentary basins. In: J. Parnell (Editor), *Geofluids: Origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins*. Geological Society of London Special Publication, London, pp. 151–174.
- Heijlen, W., Muchez, P. and Banks, D.A., 2001. Origin and evolution of high-salinity, Zn-Pb mineralising fluids in the Variscides of Belgium. *Mineralium Deposita*, 36(2): 165–176.
- Machel, H.G., 2001. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings-old and new insights. *Sedimentary Geology*, 140(1): 143–175.
- Markl, G., Ferry, J. and Bucher, E.K., 1998. Formation of saline brines and salt in the lower crust by hydration reactions in partially retrogressed granulites from the Lofoten Islands, Norway. *American Journal of Science*, 298(8): 705–757.
- Masoudi, S.M., Ezzati, E. and Rashidnejad Omran, N., 2016. Investigations on methods for assessment of critical and strategic minerals and elements with a special focus on geoeconomics of fluorspar in Iran. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 25(100): 121–130. (in Persian with English abstract)
- McRae, M.E., 2015. Fluorspar. In: S.M. Kimball (Editor), *Mineral commodity summaries 2015*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, pp. 56–57.
- Mehraban, Z., Shafiei Bafti, B. and Shamanian, G.H., 2016. Rare earths in fluorite deposits of Elika Formation (East of Mazandaran Province). *Journal of Economic Geology*, 8(1): 201–221. (in Persian with English abstract)
- Miller, M.M., 2014. Fluorspar. In: S.M. Kimball (Editor), *Mineral commodity summaries 2014*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, pp. 56–57.
- Moghaddasi, S.J., Tale fazel, E. and Banifatemi, A., 2016. Fluid evolution during mineralization of Atashkuh fluorite-barite (\pm sulfide) deposit, south of Delijan. *Journal of Economic Geology*, 8(1): 167–180. (in Persian with English abstract)
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2014. Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran. *International Geology Review*, 56: 263–287.
- Nabiloo, F., Shafiei Bafti, B. and Amini, A., 2017. Diagenetic and post-diagenetic fabrics in the Kamarposht fluorite mine (east of Mazandaran province): Explainaton and genetic interpretation. *Journal of Economic Geology*, 9(2): 483–507. (in Persian with English abstract)
- Pirouzi, M., Ghaderi, M., Rashidnejad-Omran, N. and Rastad, M., 2009. New evidences on mineralization, diagenesis and fluid inclusions at Kamar-Mehdi stratabound fluorite deposit, southwest Tabas. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 17(1): 83–94. (in Persian with English abstract)
- Rashidnejad-Omran, N., Emami, M.H., Sabzehei, M., Rastad, E., Bellon, H. and Piqué, A., 2002. Lithostratigraphie et histoire paléozoïque à paléocène des complexes métamorphiques de la région de Muteh, zone de Sanandaj-Sirjan (Iran méridional). *Comptes Rendus Geoscience*, 334(2): 1185–1191.
- Ridley, J., 2013. *Ore deposit geology*. Cambridge University Press, New York, 398 pp.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. Review in *Mineralogy*, Mineralogical Society of America, Washington, D.C., 646 pp.
- Roedder, E. and Bodnar, R.J., 1980. Geologic pressure determination from fluid inclusion studies. *Annual*

- Review of Earth and Planetary Sciences, 8(2): 263–301.
- Sánchez, V., Cardellach, E., Corbella, M., Vindel, E., Martín-Crespo, T. and Boyce, A.J., 2010. Variability in fluid sources in the fluorite deposits from Asturias (N Spain): further evidences from REE, radiogenic (Sr, Sm, Nd) and stable (S, C, O) isotope data. *Ore Geology Reviews*, 37(2): 87–100.
- Sanchez, V., Vindel, E., Martin-Crespo, M., Corbella, M., Cardellach, E. and Banks, D.A., 2009. Sources and composition of fluids associated with fluorite deposits of Asturias (N Spain). *Geofluids*, 9(4): 338–355.
- Sheikhol-Eslami, M.R., 2005. Geological map of the Mahallat quadrangle, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Sterner, S.M., Hall, D.L. and Bodnar, R.J., 1988. Synthetic fluid inclusions V: solubility relations in the system NaCl-KCl-H₂O under vaporsaturated conditions. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 52(5): 989–1005.
- Svensen, H., Jamtveit, B., Yardley, B., Engvik, A.K., Austrheim, H. and Broman, C., 1999. Lead and bromine enrichment in eclogite-facies fluids: extreme fractionation during lower-crustal hydration. *Geology*, 27(5): 467–470.
- Tadayon, M., Nakini, A., Mohajjel, M. and Rachidnejad-Omran, N., 2015. Structural analysis and its role in Mazandaran fluorite mines, case study of Kamarposht and Shesh Rudbar fluorite mines. *Journal of Advanced Applied Geology*, 5(16): 12–22. (in Persian with English abstract)
- Tale Fazel, E., 2014. Rare earth element geochemistry and dolomite composition of the epigenetic Atash Kuh fluorite deposit (south of Delijan). *Geochemistry, Islamic Azad University Zarand Branch*, 3(3): 213–224. (in Persian with English abstract)
- Tale Fazel, E., 2016. The roles of basinal brines and fluid-rock interaction associated with unconformity-related Atash Kuh F–Ba±Sulfide deposit, South of Delijan. *Kharazmi Journal of Earth Sciences*, 2(1): 81–104. (in Persian with English abstract)
- Thiele, O., Alavi, M., Assefi, R., Hushmandzadeh, A., Seyed-Emami, K. and Zahedi, M., 1968a. Geological map of the Golpaygan quadrangle, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Thiele, O., Alavi, M., Assefi, R., Hushmandzadeh, A., Seyed-Emami, K. and Zahedi, M., 1968b. Explanatory text of the Golpaygan quadrangle map, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran, Geological quadrangle E7, Tehran, 24 pp.
- Vahabzadeh, G., Khakzad, A., Rasa, I. and Mousavi, M.R., 2008. The study of sulfur isotopes of galena and barite in fluorite ore deposits of Savad Kouh region. *Journal of Basic Sciences, Islamic Azad University*, 18(69): 99–108. (in Persian with English abstract)
- Van den Kerkhof, A.M. and Hein, U.F., 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1–4): 27–47.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1–4): 229–272.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.



Mineralization, fluid inclusions and genesis of the Bagher Abad and Darreh Badam fluorite ore deposit, southeast of Mahallat

Seyed Javad Moghaddasi^{1*}, Ebrahim Tale Fazel² and Aliyeh Sadat Banifatemi¹

1) Department of Geology, Payame Noor University, Iran

2) Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Submitted: Jan. 20, 2017

Accepted: Oct. 17, 2017

Keywords: Fluorite ore deposit, fluid inclusion, mineralization, Bagher Abad, Darreh Badam, Mahallat

Introduction

Fluorite ore deposits are classified into three main groups: (1) magmatic deposits, (2) structures related deposits, and (3) sedimentary deposits (Dill, 2010). More than 30 fluorite occurrences with approximately 1.35 million tons of reserves have been recognized in Iran (Miller, 2014). Bagher Abad and Darreh Badam fluorite ore deposits, located in the southeast of Delijan (Markazi province) occur between the central Iran structural zone from the north and the Sanandaj-Sirjan structural zone from the south. The geology of the area is dominated by folded and faulted structures of Jurassic carbonates and shales (Thiele et al., 1968). The main host rocks for fluorite mineralization in the studied area are the Lower-Upper Jurassic carbonates and shales of Shemshak and Badamu Formations.

Materials and Methods

In this study, 70 samples from the various rock types including fluorite veins, host rocks and related alterations were collected. 25 thin- and polished thin-sections were prepared and studied to explain the mineralogy and paragenetic sequence of the ore body. Eight double-polished sections were also prepared for micro-thermometric analysis. The micro-thermometric analyses were conducted on primary fluid inclusions using Linkam THM600 heating-freezing stage connected to a TMS94 temperature controller and a liquid nitrogen pump (LNP) cooling system.

Results

The main host rocks for fluorite mineralization in the studied area are composed of the lower Jurassic slate and phyllite (Shemshak Formation) and the Middle to Upper Jurassic dolomitic limestone and calcareous sandstone (Badamu Formation). The main alterations associated with fluorite mineralization are sericitization, silicification and argillization.

According to the fluid inclusions data, fluorite mineralization in Bagher Abad and Darreh Badam deposits were precipitated because of pressure reduction of ore bearing fluids and mixing of a primary moderate-salinity brine with less saline meteoric water. Estimation of trapping pressure-temperature of the mineralizing fluid in Bagher Abad fluorite deposit using the intersecting CO₂ and H₂O isochors for aqueous, aqueous-carbonic and carbonic fluid inclusions indicated that fluorite mineralization occurred at 180-260°C and 1-2 kbar pressure.

According to the present study, circulation and upward flow of hydrothermal fluids (containing H₂O and CO₂) that originated from underlying altered bedrock provided appropriate conditions for increasing the solubility of metals and formation of halide (Cl⁻ and F⁻) metal complexes. Reaction with wallrock and gradual decrease in temperature due to mixing and dilution of the above-mentioned fluids with low-salinity meteoric water resulted in fluorite

*Corresponding authors Email: sjmoghad@pnu.ac.ir

mineralization in favorable structures such as veins.

Discussion

Bagher Abad and Darreh Badam fluorite ore deposits are examples of epigenetic mineralizations which are not related to igneous activities in Iran. The mineralization is formed in nearly vertical veins, which are relevant to local fractures hosted in the Lower-Upper Jurassic carbonates and shales with east-west trend. The main ore textures are open-space fillings, breccias, veins and cavities associated with sericitic, silicic and argillic alterations.

Micro-thermometric measurements were carried out on primary fluid inclusions in fluorite, calcite and barite minerals from both Bagher Abad and Darreh Badam deposits. Three types of fluid inclusions were distinguished: (1) two phase aqueous fluid inclusions (LV), (2) liquid (L) or vapor (V) mono phase inclusions, and (3) aqueous-carbonic (L_1+L_2+V) fluid inclusions.

The first ice melting temperatures (T_e) of two phase aqueous inclusions (LV) in fluorite, calcite and barite from Bagher Abad and Darreh Badam deposits vary between -32 to -15°C and -35 to -24°C , respectively, which represents a $\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}\pm\text{KCl}$ multiphase fluid (Van den Kerkhof and Hein, 2001). The last ice melting temperatures ($T_{m_{ice}}$) vary between -10.5 to -2.3°C and -12.0 to -5.6°C which are equal to salinities of 5.6-14.7 and 8.3-15.2 wt% NaCl equivalent for Bagher Abad and Darreh Badam deposits, respectively. The final homogenization temperatures ($T_{h_{total}}$) vary between 127 to 188 $^\circ\text{C}$ and 176 to 270 $^\circ\text{C}$ for Bagher Abad and Darreh

Badam deposits, respectively. The CO_2 melting temperatures ($T_{m_{\text{CO}_2}}$) of aqueous-carbonic inclusions in fluorite, calcite and barite show a range of -58.3 to -56.6°C which suggests CH_4 and/or N_2 impurities (Burruss, 1981). The clathrate melting temperatures ($T_{m_{\text{clath}}}$) ranging from -6.0 to $+1.0^\circ\text{C}$ represent salinities between 5.5 to 18.2 wt% NaCl equivalent for both Bagher Abad and Darreh Badam fluorite deposits.

References

- Burruss, R.C., 1981. Analysis of phase equilibria in C–O–H–S fluid inclusions. In: L.S. Hollister and M.L. Crawford (Editors), Fluid inclusions: applications to petrology. Mineralogical Association of Canada Short Course Series, Ontario, pp. 39–74.
- Dill, H.G., 2010. The chessboard classification scheme of mineral deposits: mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*, 100(1): 1–420.
- Miller, M.M., 2014. Fluorspar. In: S.M. Kimball (Editor), Mineral commodity summaries 2014. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, pp. 56–57.
- Thiele, O., Alavi, M., Assefi, R., Hushmandzadeh, A., Seyed-Emami, K. and Zahedi, M., 1968. Explanatory text of the Golpaygan quadrangle map, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran, Geological quadrangle E7, Tehran, 24 pp.
- Van den Kerkhof, A.M. and Hein, U.F., 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1–4): 27–47.