



مطالعه کانی‌سازی و تحول سیال کانی‌ساز در کانسار فلوریت - باریت (\pm سولفید) آتش‌کوه، جنوب دلیجان

سید جواد مقدسی^{1*}، ابراهیم طالع فاضل² و عالیه سادات بنی‌فاطمی¹

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

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

دریافت: 1393/9/12، پذیرش: 1394/2/30

چکیده

کانسار فلوریت- باریت (\pm سولفید) آتش‌کوه در جنوب شهرستان دلیجان، حدود 80 کیلومتری جنوب‌شرقی اراک واقع شده است. کانی‌سازی به‌شکل رگه‌ای با ماهیت دیرزاد، در سنگهای میزبان کربناتی و شیلی سازند شمشک و بادامو به سن ژوراسیک زیرین تا بالای روی داده است. فلوریت و باریت فراوانترین کانیهای سازنده کانسنگ هستند و کانیهای فرعی شامل کوارتز، کلسیت، دولومیت، گالن و کالکوپیریت هستند. شواهد به‌دست آمده از بررسیهای میکروترمومتری نشان می‌دهد، رگه‌های فلوریت- باریت (\pm سولفید) آتش‌کوه در نتیجه اختلاط اعضای انتهایی یک شورابه Na-K(-Mg-Ca) اولیه و شورابه‌های سازندی غنی از کلسیم با شوری کمتر، ناشی از تبدلات سیال- سنگ بعدی شکل گرفته است. چهار مرحله کانی‌سازی در منطقه آتش‌کوه قابل تشخیص است: 1- تحرک شورابه‌های حوضه‌ای غنی از Na-K از افقهای زیرین؛ 2- اختلاط و رقیق‌شدگی شورابه غنی از نمک با سیالات سازندی با شوری کمتر و تشکیل کانی‌سازی فلوریت- باریت؛ 3- رخداد کربن‌زدایی و افزایش میزان CO₂ در محیط و 4- تشکیل بافت‌های حفره‌ای و برشی، ناشی از انحلال سنگهای کربناتی.

واژه‌های کلیدی: کانسار فلوریت آتش‌کوه، میانبار سیال، مراحل کانی‌سازی، تحول سیال کانی‌ساز، دلیجان

مقدمه

کمرمهدی در جنوب‌غربی طبس (Pirouzi et al., 2009)، پیناوند در شمال‌خاوری اصفهان (Gheshlaghi and Moore, 2007)، بزیجان در غرب محلات (Ehya, 2012) و کمربند فلوریت سوادکوه در جنوب قائم‌شهر (Vahabzadeh et al., 2008) اشاره کرد. فلوریت در ایران اغلب به صورت کانی همراه با ذخایر فلزی نظیر سرب و روی و همچنین در توده‌های آذرین یگماتیتهی به صورت رگه‌چه‌ای و یا به‌همراه ذخایر باریت و زغال‌سنگ گزارش شده است (Ghorbani, 2013). موقعیت برخی از معادن فعال فلوریت ایران در شکل 1 نشان داده شده است. کانی‌سازی فلوریت در محدوده شهرستانهای دلیجان و محلات به‌شکل رگه‌ای در چهار معدن بزیجان، باقرآباد، دره‌بادام و آتش‌کوه یافت می‌شود. در این پژوهش، ضمن بررسی کانی‌شناسی، بافت و ساخت ذخیره و ژئومتری رگه‌ها در معدن آتش‌کوه، با استفاده از بررسیهای سنگ‌نگاری، کانه‌نگاری و

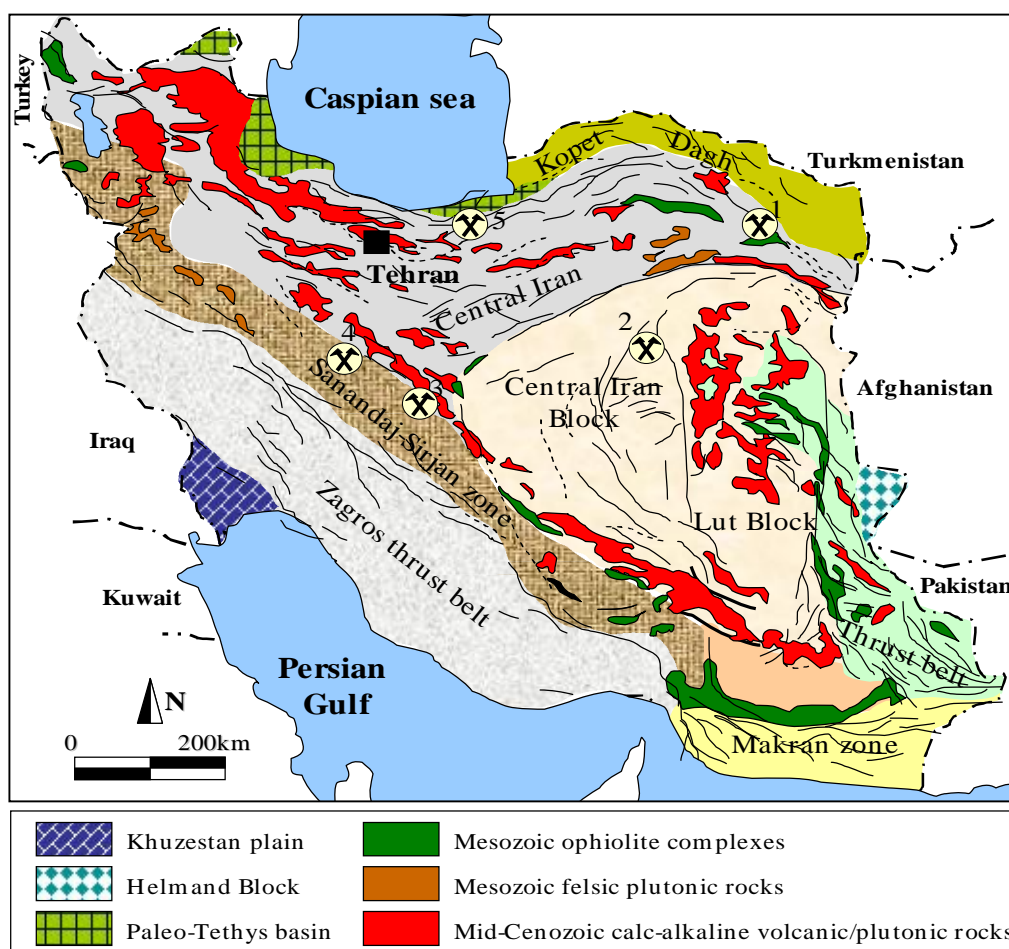
بر اساس جدیدترین نظام‌های رده‌بندی ذخایر معدنی، کانسارهای فلوریت دارای سه منشأ ماگمایی، مرتبط با فعالیتهای ساختاری و رسوبی هستند (Dill, 2010). مهمترین فرآیندهای ماگمایی- گرمایی کنترل‌کننده کانی‌سازی در ذخایر فلوریت شامل موقعیت ژئودینامیکی، شیمی سیال، مجموعه کانی‌شناسی و دگرسانی، نقش سنگ‌میزبان، گرادیان زمین‌گرمایی، محتوای مواد فرار سیال، عمق و زمان است (Hannah and Stein, 1990; Sánchez et al., 2010). تاکنون بیش از 30 ذخیره و منطقه پی‌جویی فلوریت در ایران شناسایی شده که مجموعاً دارای ذخیره 1/35 میلیون تن، معادل 0/6 درصد ذخایر فلوریت دنیاست (Ghorbani, 2013). بیشتر این ذخایر در استانهای خراسان، مازندران، اصفهان، کردستان، مرکزی، یزد، سمنان و کرمان قرار دارند. از جمله این ذخایر می‌توان به کانسار فلوریت

جنوب استان مرکزی قرار گرفته‌اند. این ذخایر در حد فاصل پهنه دگرگونی - ساختاری سنندج- سیرجان در جنوب و پهنه ایران مرکزی در شمال قرار گرفته‌اند (Alavi, 1991) (شکل 1). قدیمی‌ترین واحدهای سنگی منطقه مورد بررسی متعلق به دگرگونیهای پرکامبرین - پالئوزوئیک و یا واحدهای رسوبی مزوزوئیک پیشین هستند؛ که به‌ویژه طی فاز کوهزایی سیمیرین و پدیده‌های دیناموترمال مرتبط با آن، بارها دچار دگرشکلی شده و موجب رخداد کانی‌سازیهایی فلزی و غیرفلزی متعددی شده است (Berberian and King, 1981).

میکروترمومتری میانبارهای سیال، به بررسی شرایط فیزیکوشیمیایی نهشت کانسنگ فلوریت و کانیهای همراه در منطقه مورد بررسی پرداخته می‌شود. همچنین با استفاده از این شواهد نحوه رخداد و مراحل شکل‌گیری کانسار فلوریت- باریت (\pm سولفید) آتش‌کوه مورد بررسی و بحث قرار می‌گیرد.

زمین‌شناسی عمومی

ذخایر رگه‌ای فلوریت- باریت (\pm سولفید) محدوده دلیجان- محلات در 80 کیلومتری جنوب‌شرق شهرستان اراک با مختصات جغرافیایی $50^{\circ} 13'$ تا $50^{\circ} 45'$ طول شرقی و $33^{\circ} 48'$ تا $55'$ عرض شمالی، در محدوده‌ای به وسعت 40 کیلومتر مربع در

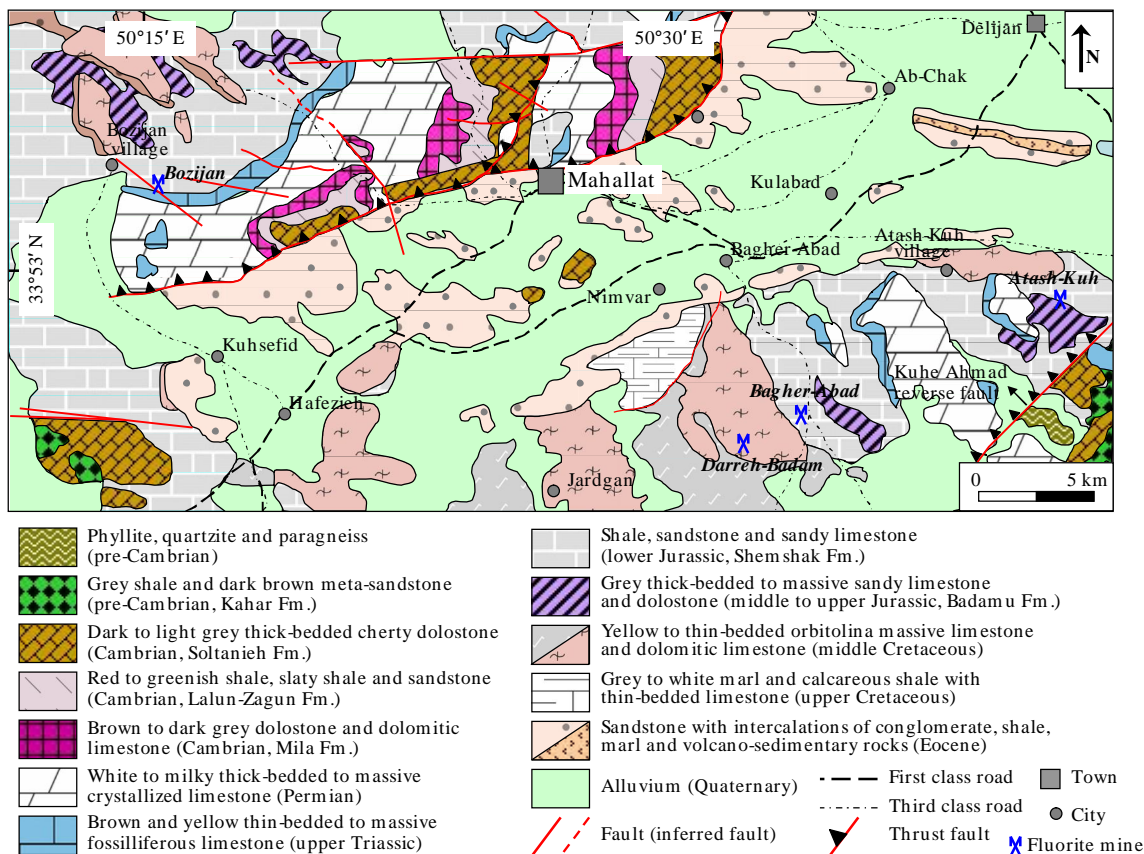


شکل 1. موقعیت برخی از معادن فعال فلوریت در نقشه زمین‌شناسی ایران (با تغییرات از (Alavi, 1991)). این معادن به ترتیب شامل 1- فلوریت جویمند گناباد، 2- فلوریت کمرمهدی طبس، 3- فلوریت پیناوند و کمشچه اصفهان، 4- کمربند فلوریت محلات- دلیجان و 5- کمربند فلوریت کیاسر- پلسفید (شامل منطقه سوادکوه) است.

Fig. 1. Situation of several active fluorite mines on geological map of Iran (modified from Alavi, 1991). 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).

هستند؛ که با ضخامت تقریبی 1500 متر (Sheikhol-Eslami, 2005) در برخی مناطق با یک چین‌خوردگی ضعیف تا مرز زیرین رخساره شیست سبز دگرگون و به اسلیت و فیلیت تبدیل می‌شوند. پس از آن رسوبات کرتاسه تشکیل شده از آهک و دولومیت ضخیم لایه اوربیتولین‌دار به‌همراه میان‌لایه‌هایی از شیل و مارن نهشته می‌شوند؛ که به‌ویژه در شمال روستای آتش‌کوه رخنمون دارند. از مهمترین پدیده‌های ساختاری در منطقه مورد بررسی، می‌توان به گسل معکوس کوه احمد با راستای 40NE در جنوب آتش‌کوه اشاره کرد، که موجب رانده شدن واحدهای دگرگونی - رسوبی پالئوزوئیک بر روی سازندهای ژوراسیک که میزبان کانی‌سازی فلوریت هستند، شده است (شکل 2). شکستگیهای محلی با راستای ESE-WNW و NNE-SSW کنترل کننده‌های اصلی کانی‌سازی رگه‌ای فلوریت در منطقه مورد بررسی هستند.

منطقه مورد بررسی در محدوده نقشه زمین‌شناسی 1:250000 چهارگوش گلپایگان (Thiele et al., 1968a) قرار می‌گیرد که زمین‌شناسی ناحیه‌ای آن نخستین بار توسط تیله و همکاران (Thiele et al., 1968b) و رشیدنژاد عمران و همکاران (Rachidnejad-Omran et al., 2002) بررسی شده است. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی منطقه عمدتاً در جنوب‌شرق روستای آتش‌کوه 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 به‌ترتیب سنگ میزبان اصلی کانی‌سازی فلوریت در منطقه آتش‌کوه



شکل 2. نقشه ساده‌شده زمین‌شناسی منطقه جنوب دلیجان و محلات که در آن موقعیت معادن فلوریت آتش‌کوه، باقرآباد، دره‌بادام و بزيجان به‌ترتیب از شرق به غرب نشان داده شده است (با تغییرات از تیله و همکاران (Thiele et al., 1968a)).

Fig. 2. Simplified geological map of southern parts of Delijan and Mahallat region (modified from Thiele et al., 1968a) showing the situation of Atashkuh, Bagher Abad, Darreh Badam and Bozijan fluorite mines from east to west respectively.

روش مطالعه

برای مطالعه کانی‌سازی فلوریت-باریت (\pm سولفید) در معدن آتش‌کوه، تعداد 40 نمونه سنگی از واحدهای سنگی میزبان، رگه‌های فلوریت و دگرسانیه‌های همراه نمونه‌برداری شد. بررسی‌های کانی‌شناسی، بافت و ساخت ذخیره و توالی پاراژنتیک کانسنگ با استفاده از 25 مقطع نازک، صیقلی و نازک-صیقلی توسط میکروسکپ پلاریزان نور عبوری و بازتابی زایس (مدل Axioplan 2) انجام شد. همچنین، تعداد 10 نمونه پودری از بخش‌های دگرسان کانسنگ و سنگ دیواره برای بررسی تکمیلی کانی‌شناسی به‌وسیله دستگاه پراش‌سنج پرتو ایکس (XRD) مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران¹ تجزیه شد. بررسی سنگ‌نگاری و میکروترمومتری میانبراه‌های سیال نیز پس از انجام بررسی‌های کانی‌شناسی و تعیین موقعیت کانیها در توالی پاراژنتیک کانسار انجام شد. برای این منظور، تعداد 8 مقطع دوبرصیقل با ضخامت متوسط 200 میکرون از کانیهای فلوریت، کوارتز و باریت تهیه شد. طی این بررسیها، بیش از 400 میانبار با ابعاد 5 تا 20 میکرون مورد آزمایش میکروترمومتری قرار گرفت. بررسی میانبراه‌های سیال با استفاده از میکروسکپ پلاریزان نور عبوری زایس (مدل Axioplan 2) و سامانه سرمایش-گرمایش لینکام مدل THM600 با کنترل‌کننده حرارتی TMS94 و سردکننده LNP در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شد. گستره تغییرات دمایی در این دستگاه بین 190°C تا $+600^{\circ}\text{C}$ است و دستگاه توسط میانبراه‌های سنتر شده در دماهای $56/6^{\circ}\text{C}$ ، صفر درجه سانتی‌گراد و $374/1^{\circ}\text{C}$ کالیبره شد. دقت اندازه‌گیری طی عملیات سرمایش در حدود $^{\circ}\text{C}$ $\pm 0/1$ و طی عملیات گرمایش حدود $^{\circ}\text{C}$ ± 2 اندازه‌گیری شد. نسبت عملیات سرمایش و گرمایش به ترتیب 2 تا 3 درجه سانتی‌گراد و 5 تا 8 درجه سانتی‌گراد در دقیقه متغیر بود.

بحث و بررسی

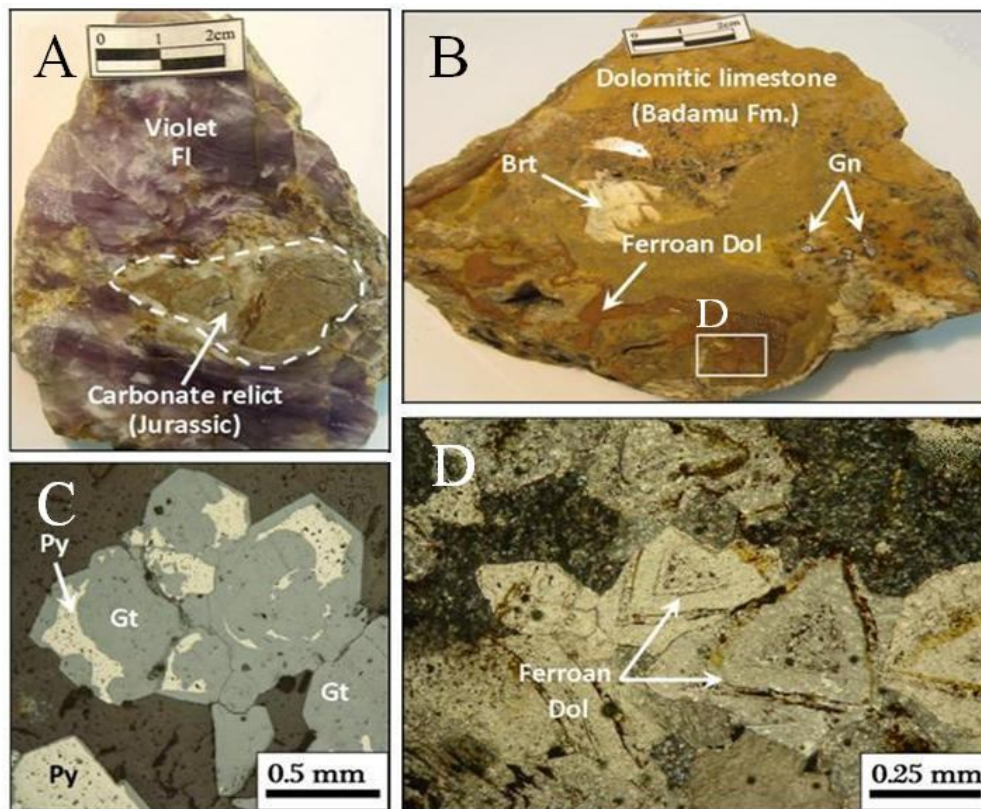
نحوه رخداد و کانی‌شناسی

کانی‌سازی فلوریت-باریت (\pm سولفید) آتش‌کوه به شکل رگه‌های با ماهیت دیرزاد (اپی‌ژنتیک)، به شکل دو رگه اصلی شرقی و غربی با فاصله تقریبی 1 کیلومتر از یکدیگر رخ داده است. سنگ میزبانهای کانی‌سازی فلوریت در منطقه شامل آهک، آهک دولومیتی، شیل و سیلتستون‌های سازند شمشک و بادامو به سن

ژوراسیک زیرین تا میانی هستند؛ که در نتیجه تأثیر درجات پایین دگرگونی (محدوده رخساره شیبست سبز) به اسلیت و فیلیت تبدیل شده‌اند. کانی‌سازی دو رگه شرقی و غربی در ادامه توصیف می‌شوند.

رگه شرقی با طول تقریبی 100 متر، ضخامت 0/5 تا 2 متر، راستای ESE-WNW و شیب تقریبی قائم، در میزبان شیل و ماسه‌سنگهای آهکی سازند شمشک قرار دارد. فلوریت با فراوانی 70 درصد حجمی، کانی اصلی این رگه است که همراه با کانیهای کوارتز، باریت، کلسیت، کالکوپیریت، پیریت و هماتیت مشاهده می‌شود. بررسی‌های میکروسکوپی و پراش‌سنجی پرتو ایکس نشان داد؛ که دگرسانیه‌های سیلیسی و آرژیلیک (با فراوانی ایلیت) مهمترین دگرسانیه‌های مشاهده شده در سنگ‌میزبان رگه شرقی هستند. فلوریت در این رگه، به رنگهای بنفش و بی‌رنگ مشاهده می‌شود. در برخی موارد رگه فلوریت قطعات سنگ‌میزبان کربناتی را نیز در بر گرفته است (شکل 3-A).

رگه غربی دارای طول تقریبی 200 متر، ضخامت 1/5 تا 3 متر، راستای تقریبی شرقی-غربی و شیب 70 درجه به سمت شمال است. سنگ میزبان این رگه متشکل از آهکهای دولومیتی سازند بادامو است؛ که اغلب تبلور مجدد یافته و در نزدیکی رگه متحمل دگرسانیه‌های دولومیتی و سیلیسی شده است (شکل 3-B). دولومیت‌ها اغلب بافت شبه زین‌اسبی داشته و در بخش تاج با افزایش میزان آهن در آنها، دولومیت‌های آهن‌دار تشکیل شده است (شکل 3-D). فراوانترین کانیهای سازنده رگه غربی شامل باریت و فلوریت است؛ که بیش از 60 درصد رگه را تشکیل می‌دهند. سایر کانیها شامل گالن، دولومیت، کلسیت، کلریت، تالک، کالکوپیریت، پیریت، هماتیت، گوتیت و سرروزیت هستند (شکل 3-C). فلوریت‌های موجود در این رگه اغلب دارای ساخت برشی بوده و به رنگهای بنفش تا بی‌رنگ یافت می‌شوند. همچنین فلوریت به‌صورت رگه‌ای و به رنگ خاکستری مشاهده می‌شود. مهمترین ساخت و بافتهای مشاهده شده در کانسار فلوریت آتش‌کوه شامل رگه‌ای، برشی، افشان، پرکننده فضای خالی و حفره‌هاست. با توجه به شواهد صحرایی و بررسی‌های میکروسکوپی و میکروسکوپی بر روی نمونه‌های کانسنگ و سنگ میزبان در منطقه مورد بررسی، توالی پاراژنتیک کانسار فلوریت-باریت (\pm سولفید) آتش‌کوه ترسیم شد (شکل 4).



شکل 3. تصویرهای نمونه دستی و میکروسکوپی از کانی‌سازی در کانسار فلوریت-باریت (±سولفید) آتش‌کوه. A: باقی‌مانده سنگ میزبان کربناتی ژوراسیک در رگه اصلی حاوی کانی فلوریت (Fl)، B: کانی‌سازی پراکنده باریت (Brt) و گالن (Gn) در سنگ میزبان آهک دولومیتی سازند بادامو که در حاشیه آن دولومیت‌های آهن‌دار قرمز دیده می‌شوند، C: جانشینی کانی گوتیت (Gt) در حاشیه پیریت‌های خودشکل (Py) (نور پلاریزه انعکاسی صفحه‌ای) و D: تصویر میکروسکوپی از دولومیت‌های شبه زین‌اسبی آهن‌دار، همراه کانی‌سازی فلوریت-باریت (نور پلاریزه عبوری متقاطع)

Fig. 3. Photomicrographs and specimen mineralization in the Atashkuh fluorite-barite (±sulfide) deposit, A: Jurassic carbonate host rock relict in fluorite (Fl) bearing vein, B: disseminated mineralization of barite (Brt) and galena (Gn) in dolomitic carbonate host rock of Badamu Formation with red coloured ferroan dolomites, C: goethite (Gt) mineral replacing euhedral pyrite (Py) (plane polarized reflected light) and D: Photomicrograph of saddle-like ferroan dolomite associated with fluorite-barite mineralization (cross polarized transmitted light)

بررسی میانبارهای سیال

بررسیهای میانبار سیال یکی از روشهای مفید برای تعیین دمای تشکیل کانسار است؛ که می‌تواند با اطمینان زیادی برای تعیین ترکیب شیمیایی و درجه شوری سیال کانه‌ساز نیز استفاده شود (Wilkinson, 2001). رخداد کانی فلوریت و همراهی آن با کانیهای شفاف مانند باریت و کوارتز در کانسار فلوریت-باریت (±سولفید) آتش‌کوه، امکان بررسی میانبارهای سیال در این کانسار را به‌خوبی فراهم ساخته است.

سنگ‌نگاری میانبارهای سیال

در این پژوهش، رده‌بندی میانبارهای سیال بر اساس ویژگیهای سنگ‌نگاری در دمای اتاق (25°C) و بر اساس معیارهای ارائه

شده توسط رودر، گلداشتاین و رینولدز (Roedder, 1984; Goldstein and Reynolds, 1994) انجام شد. بررسیهای سنگ‌نگاری و میکروترمومتری میانبارهای سیال با استفاده از کانیهای فلوریت بنفش، باریت و کوارتز انجام شد؛ که از دو رگه شرقی و غربی برداشت شده بودند.

اندازه میانبارهای سیال قابل بررسی در کانسار فلوریت آتش‌کوه بین 5 تا 30 میکرون متغیر است. اگرچه میانبارها به شکلهای متنوع مشاهده می‌شوند؛ ولی شکلهای منفی بلور در میانبارهای یافت شده در کانی فلوریت متداول است. میانبارهای کشیده، به‌خصوص در کانیهای باریت و کوارتز نیز دیده می‌شوند. شواهد باریک‌شدگی و نشت نیز در میانبارها دیده می‌شود. میانبارها به سه شکل اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب مشاهده

هالیت (S_H) (شکل B-5) و 3- میانبارهای آبگین- کربنیک حاوی فاز CO_2 (C) متشکل از دو زیرگروه آبگین- کربنیک حاوی کلاتریت (C1) (شکل C-5) و یا آبگین- کربنیک بدون کلاتریت (C2) (شکل D-5). بیشتر میانبارهای سیال منطقه مورد بررسی از نوع دو فازی سرشار از مایع هستند. علاوه بر این، میانبارهای تک فاز مایع (L) و گاز (V) نیز در نمونه‌ها تشخیص داده شد که برای بررسیهای میکروترمومتری مناسب نبودند.

می‌شوند؛ که برای اطمینان از درست بودن نتایج به‌دست آمده، تمام اندازه‌گیریها بر روی میانبارهایی انجام شد که دارای معیارهای لازم برای میانبارهای اولیه (Roedder, 1984) بودند. انواع میانبارهای سیال کانسار فلوریت آتش‌کوه به‌ترتیب فراوانی به شرح زیر است: 1- میانبارهای دو فازی آبگین (LV) تشکیل شده از دو زیر گروه دو فازی آبگین (LV) و دو فازی آبگین حاوی هیدروهالیت (LV_{HH}) (شکل A-5)؛ 2- میانبارهای حاوی فاز جامد

Stages Minerals	East vein (ESE-WNW)		West vein (E-W)	
	Early	Late	Early	Late
Fluorite	██████████	██████████	██████████	██████████
Quartz	██████████	██████████	██████████	██████████
Calcite	██████████	██████████	██████████	██████████
Barite	██████████	██████████	██████████	██████████
Dolomite	██████████	██████████	██████████	██████████
Sulfide minerals	██████████	██████████	██████████	██████████
Hematite	██████████	██████████	██████████	██████████
Goethite	██████████	██████████	██████████	██████████
Cerussite	██████████	██████████	██████████	██████████

شکل 4. توالی پاراژنتیک کانی‌سازی در دو رگه شرقی و غربی کانسار فلوریت- باریت (\pm سولفید) آتش‌کوه

Fig. 4. Paragenetic sequence of mineralization at western and eastern veins from Atashkuh fluorite-barite (\pm sulfide) deposit

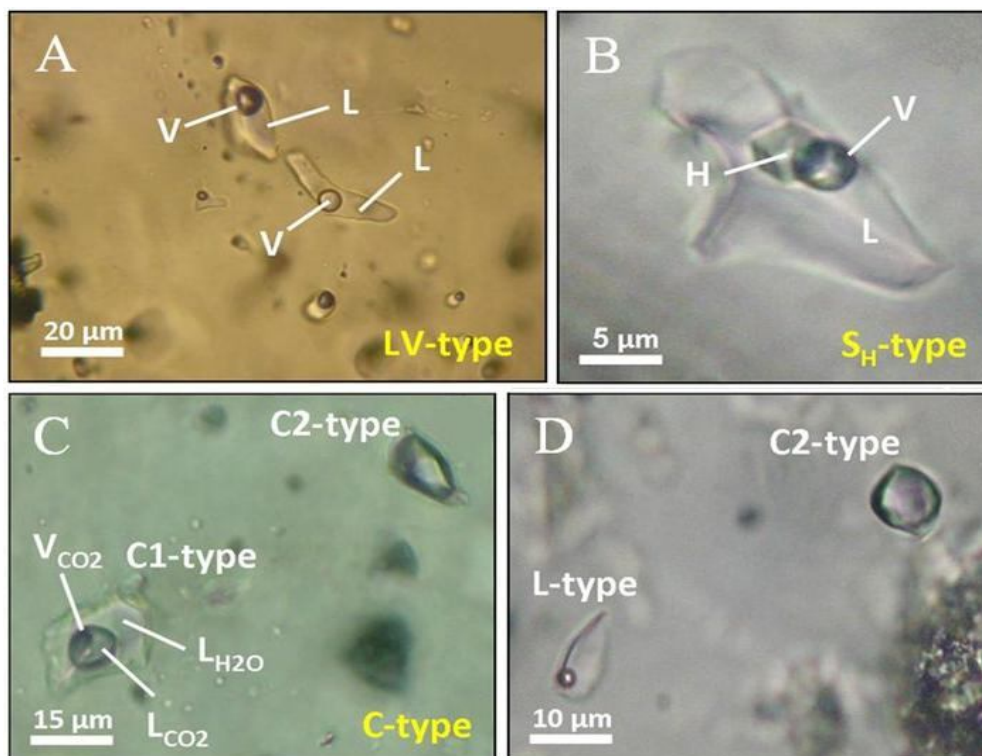
(Hall et al., 1988) و مقایسه با روش استرنر و همکاران (Sterner et al., 1988) انجام شد. محاسبه شوری در میانبارهای حاوی فاز جامد هالیت نیز با استفاده از دمای انحلال فاز هالیت (T_{mNaCl}) و بهره‌گیری از نرم‌افزار SALTY (Bodnar et al., 1989) انجام شد. همچنین در میانبارهای آبگین حاوی فاز نیمه‌پایدار هیدروهالیت، میزان شوری با استفاده از دمای انحلال هیدروهالیت ($T_{mHydrate}$) و استفاده از نرم‌افزار Calcic Brine (Naden, 1996) محاسبه شد. شوری میانبارهای آبگین- کربنیک حاوی کلاتریت (در سیستم H_2O-CO_2-NaCl) نیز با استفاده از دمای ذوب کلاتریت (T_{mClath}) و به‌کارگیری روش باورز و هلگسون (Bowers and Helgeson, 1985) در

میکروترمومتری میانبارهای سیال

بررسیهای میکروترمومتری میانبارهای سیال با استفاده از کانیهای فلوریت بنفش، باریت و کوارتز انجام شد؛ که از دو رگه شرقی و غربی برداشت شده بودند. برای اطمینان از انجماد کامل محتوای میانبارها در حین بررسی میکروترمومتری، میانبارها تا حدود $110^\circ C$ سرد شدند و عملیات گرمایش تا همگن‌شدن کامل فازها ادامه یافت. تعبیر و تفسیر داده‌های میکروترمومتری شامل ترکیب و چگالی (کل و فاز CO_2)، با استفاده از نرم‌افزارهای (Brown, 1989) FLINCOR و (Bakker, FLUIDS) (2003) انجام شد. محاسبه شوری در میانبارهای دوفازی آبگین بدون فاز جامد با دمای یوتکتیک (دمای اولین نقطه ذوب یخ) بیش از $-21/2^\circ C$ با استفاده از دمای آخرین نقطه ذوب یخ

$-7/2^{\circ}\text{C}$ تا $-3/2^{\circ}\text{C}$ و کانی کوارتز از $4/8$ تا -2°C متغیر است که به ترتیب شوری برابر با $7/7$ تا $13/6$ (شکل A-6)، $5/2$ تا $10/7$ (شکل B-6) و $3/2$ تا $7/5$ (شکل C-6) درصد وزنی معادل نمک‌طعام به‌دست می‌دهد. میانبارهای آبگین حاوی هیدروهالیت (LV_{HH}) با دمای یوتکتیک بین 65 تا -45°C در کانیهای فلوریت و باریت به‌ترتیب با شوریهایی بین $18/3$ تا 23 و $4/3$ تا $10/5$ درصد وزنی معادل نمک‌طعام+کلرید کلسیم مشخص می‌شوند (جدول 1 و شکل 6). دمای همگن شدن نهایی $(\text{Th}_{\text{total}})$ در میانبارهای سیال آبگین دو فاز (LV) در کانیهای فلوریت، باریت و کوارتز به‌ترتیب بین 90 تا 205°C (شکل A-6)، 130 تا 270°C (شکل B-6) و 110 تا 193°C (شکل C-6) متغیر است.

نرم‌افزار FLINCOR محاسبه شد. برای ارزیابی فشار نیز از روش قطع خطوط هم‌فشار (ایزوکور) میانبارهای آبگین و آبگین-کربنیک با چگالی‌های مختلف، با استفاده از نرم‌افزار ISOC در بسته FLUIDS (Bakker, 2003) استفاده شد. خلاصه داده‌های میکروترمومتری میانبارهای سیال بررسی شده در کانیهای میزبان فلوریت، باریت و کوارتز کانسار آتش‌کوه در جدول 1 و نمودارهای ستونی دمای همگن‌شدن نهایی $(\text{Th}_{\text{total}})$ و شوری در شکل 6 نشان داده شده‌اند. دمای اولین نقطه ذوب یخ (Te) در میانبارهای آبگین دوفازی نوع LV کانیهای فلوریت، باریت و کوارتز بین 25 تا -22°C متغیر است؛ که نشان از حضور یک سیال چند ترکیبی H_2O - $\text{NaCl}+\text{KCl}$ دارد (Van den Kerkhof and Hein, 2001). دمای آخرین نقطه ذوب یخ (Tm_{ice}) برای میانبارهای سیال موجود در کانی فلوریت از $-9/7$ تا $-4/9^{\circ}\text{C}$ ، کانی باریت از



شکل 5. انواع میانبارهای سیال موجود در رگه‌های فلوریت-باریت (\pm سولفید) کانسار آتش‌کوه. A: میانبارهای سیال دو فاز (LV) غنی از مایع (LV) ، B: میانبار حاوی فاز جامد هالیت (S_{H}) ، C: اجتماع میانبارهای آبگین-کربنیک حاوی کلتریت (C1) و آبگین-کربنیک فاقد کلتریت (C2) در کنار یکدیگر و D: همراهی میانبار آبگین-کربنیک فاقد کلتریت (C2) و میانبار آبگین غنی از مایع (LV) .

Fig. 5. Petrographic photomicrographs of the fluid inclusions in Atashkuh fluorite-barite (\pm sulfide) deposit, A: liquid-rich fluid inclusions (LV), B: halite-bearing fluid inclusions (S_{H}), C: accumulation of aqueous- CO_2 inclusions with clathrate (C1) and without clathrate (C2), and D: aqueous- CO_2 inclusion without clathrate (C2) accompanied with liquid-rich aqueous inclusions (LV).

کربنیک در میزبان فلوریت برای چگالی کل بین $0/78$ تا g/cm^3 $0/93$ محاسبه شد (جدول 1). همان‌طور که در نمودار دوتایی دما ($^{\circ}C$) در مقابل فشار (Mpa) نشان داده شده است (شکل 7)، کانی‌سازی فلوریت مرحله اصلی کانسار آتش‌کوه در فشار Mpa 150 و دمای واقعی $250^{\circ}C$ رخ داده است.

اختلاط و رقیق‌شدگی سیال

اختلاط شورابه‌های غنی از فلز حاوی فلوئور با سیالات جوی یا آبهای سازندی با شوری کم به‌عنوان عاملی مؤثر در شکل‌گیری کمربندهای غنی از فلوریت اروپا نظیر North Pennine (Cann and Banks, 2001) Orefield North German (Lüders et al., 2005) Basin Spanish Central System (Tornos et al., 1991) و منطقه Asturias در شمال اسپانیا (Sanchez et al., 2009) گزارش شده است. بر اساس بررسی‌های بویرون و همکاران (Boiron et al., 2010)، طی رخداد اختلاط دست‌کم دو نوع سیال قابل تشخیص است: 1- شورابه‌هایی که اغلب با ماهیت اولیه ناشی از فشرده‌گی لایه‌ها و عملکرد تکتونیکی - ژئودینامیکی منطقه تشکیل می‌شوند و 2- سیالات رقیقی که توسط تزریق مجدد آبهای جوی (یا دریایی) از سیالات از قبل موجود تشکیل می‌شوند.

با استفاده از نمودار دمای همگن‌شدن نهایی در مقابل شوری (شکل 8) و مقایسه آن با روندهای مختلف تحول سیال (Wilkinson, 2001)، چنین به‌نظر می‌رسد که رگه‌های فلوریت - باریت (\pm سولفید) کانسار آتش‌کوه در نتیجه اختلاط اعضای انتهایی یک شورابه Na-K(-Mg-Ca) اولیه (میانبارهای نوع S_H) و شورابه‌های سازندی غنی از کلسیم (میانبارهای نوع LV_{HH}) با شوری کمتر ناشی از تبادلات سیال - سنگ بعدی، شکل گرفته باشد. پس از این مرحله از کانه‌زایی، تزریق آبهای جوی رقیق‌شده با فشار پایین در نتیجه اختلاف عمق تقریبی 1 کیلومتر (با گرادیان زمین‌گرمایی $30^{\circ}C/km$) با جابه‌جایی در افقهای سنگی زیرین، موجب شکل‌گیری کانه‌زایی مراحل پایانی می‌شود. با توجه به سرگذشت زمین‌شناسی منطقه، به‌نظر می‌رسد، شورابه‌های چندفلزی اولیه از انحلال نهشته‌های نمک مرتبط با افقهای تبخیری محدوده زمانی تریاس بالایی - ژوراسیک زیرین در منطقه منشأ گرفته است (Sheikhol-Eslami, 2005; Ghasemi and Talbot, 2006). با در نظر گرفتن این مدل، می‌توان گفت شورابه‌های اولیه حاوی Mg^{2+} و Fe^{2+} با

دمای انحلال‌هالیت (T_{mNaCl}) در میانبارهای نوع S_H با میزبان فلوریت، بین $185^{\circ}C$ تا $312^{\circ}C$ متغیر است که بر اساس آن شوری سیال بین 31 تا 39 درصد وزنی معادل نمک‌طعام محاسبه شد. همگن‌شدن کامل این نوع میانبار بین $220^{\circ}C$ تا $344^{\circ}C$ رخ می‌دهد. دمای ذوب فاز CO_2 (T_{mCO_2}) در میانبارهای آبگین - کربنیک نوع C1 با میزبان فلوریت و کوارتز از $58/5^{\circ}C$ تا $57/1^{\circ}C$ متغیر و پایین‌تر از دمای ذوب فاز CO_2 برای CO_2 خالص ($56/6^{\circ}C$) است که نشان‌دهنده وجود فاز CH_4 یا N_2 در فاز گازی است (Burruss, 1981). دمای ذوب کلاتریت (T_{mClath}) در این نوع میانبارها از $4/8^{\circ}C$ تا $8/5^{\circ}C$ متغیر است که بر اساس آن، شوری در کانی فلوریت بین $5/3$ تا $9/2$ و در کانی کوارتز بین 3 تا $6/7$ درصد وزنی معادل نمک‌طعام محاسبه می‌شود. دمای همگن‌شدن فاز CO_2 (T_{hCO_2}) در میانبارهای نوع C1 در کانی فلوریت بین $7/4^{\circ}C$ تا $18/8^{\circ}C$ و در کوارتز بین $13/4^{\circ}C$ تا $27/5^{\circ}C$ متغیر است. بر این اساس، چگالی CO_2 بین $0/65$ تا $0/95$ گرم بر سانتی‌متر مکعب در این میانبارها متغیر است. دمای همگن‌شدن نهایی (T_{hTotal}) میانبارهای نوع C1 در کانی فلوریت بین $170^{\circ}C$ تا $210^{\circ}C$ و در کانی کوارتز بین $195^{\circ}C$ تا $280^{\circ}C$ متغیر است. در میانبارهای کربنیک نوع C2، دمای T_{mCO_2} در هر دو کانی میزبان فلوریت و کوارتز کمتر از $58^{\circ}C$ است که می‌تواند دلیلی بر وجود فازهای گازی دیگر مانند CH_4 و N_2 باشد (Burruss, 1981). همچنین دمای همگن‌شدن فاز CO_2 در میانبارهای نوع C2 موجود در کانی فلوریت بین $15/5^{\circ}C$ تا $29^{\circ}C$ و در کانی کوارتز بین $10/5^{\circ}C$ تا $22/7^{\circ}C$ متغیر است (جدول 1 و شکل 6). با توجه به فقدان فاز آبگین در میانبارهای نوع C2، محاسبه شوری مقدور نشد.

از آنجایی که شیب ایزوکوره‌های فشار - دمای به‌دست آمده برای میانبارهایی با ماهیت آبگین (بدون حضور CO_2)، آبگین - کربنیک و کربنیک با یکدیگر متفاوت است، بنابراین روابط متقاطع میان این ایزوکورها می‌تواند ارزیابی مناسبی از شرایط فشار و دمای سیال به دام افتاده در اختیار قرار دهد (Roedder, 1984). قطع ایزوکورها در این روش توسط میانبارهای آبگین و کربنیک موجود در فلوریت و استفاده از میزان کمینه و بیشینه چگالی کل در این میانبارها انجام شده است (جدول 1 و شکل 7). در کانی فلوریت ایزوکورها برای میانبارهای آبگین با استفاده از چگالی کل کمینه تا بیشینه بین $0/96$ تا $1/10$ g/cm^3 ترسیم شده است. همچنین ایزوکورهای متقاطع دیگر برای میانبارهای

سنگهای دربرگیرنده کانی‌سازی در معدن فلوریت بزيجان و الگوی به‌هنجار شده REE آنها (Ehya, 2012)، شورابه‌های سازندی با شوری کمتر را می‌توان منبع محلولهای فلوریددار منطقه مورد بررسی دانست.

چرخش در شکستگیهای سنگ بستر کانی‌سازی، ضمن انجام تبادلات Mg-Ca سیال - سنگ، موجب رخداد دگرسانی دولومیتی‌شدن با حضور دولومیت‌های آهن‌دار¹ و آزاد شدن حجم بالایی از Ca در سیال شده‌اند. با توجه به محتوای فلئورید بالای

جدول 1. خلاصه داده‌های میکروترموتری میانبارهای سیال اولیه در کانیهای میزبان فلوریت، باریت و کوارتز کانسار فلوریت-باریت (±سولفید) آتش‌کوه

Table 1. Micro-thermometric measurements of primary fluid inclusions in fluorite, barite and quartz minerals from Atashkuh fluorite-barite (±sulfide) deposit

Host mineral	Inclusion type	Number (n)	Te (°C)	Tm _{ice} (°C)	Tm _{HH} (°C)	Th _{CO2} (°C)	Th (°C)	Salinity (wt% NaCl)	Density (g/cm ³)
Fluorite	LV	30	-34 to -28	-9.7 to -4.9	-----	-----	90 - 205	7.7 - 13.6	0.96 - 1.10
	LV _{HH}	35	-47 to -34	-23.7 to -15.3	-30.5 to -26	-----	80 - 150	18.3 - 23.0	1.03 - 1.11
	S _H	28	-----	-----	-----	-----	220 - 344	31.0 - 39.0	1.10 - 1.15
	C1	15	-----	-----	-----	7.4 - 18.8	170 - 210	5.3 - 9.2	0.91 - 0.95
	C2	13	-----	-----	-----	15.5 - 29.0	-----	-----	0.78 - 0.93
Barite	LV	33	-47	-7.2 to -3.2	-----	-----	130 - 270	5.2 - 10.7	0.98 - 1.02
	LV _{HH}	30	-----	-22.5 to -18.5	-24.8 to -22.2	-----	90 - 170	4.3 - 10.5	0.99 - 1.03
Quartz	LV	23	-32 to -27	-4.8 to -2.0	-----	-----	110 - 193	3.2 - 7.5	0.95 - 1.07
	C1	20	-----	-----	-----	13.4 - 27.5	195 - 280	3.0 - 6.7	0.96 - 1.01
	C2	11	-----	-----	-----	10.5 - 22.7	-----	-----	0.75 - 0.88

n= number of fluid inclusion measurements

2006) می‌تواند عامل اصلی رخداد متاسوماتیزم منیزیمی و تبادلهای Mg-Ca در سنگ میزبان کانی‌سازی و سنگ بستر منطقه مورد بررسی باشد. در بسیاری از ذخایر فلوریت-باریت مرتبط با ناپیوستگی، وقوع دگرسانی Mg با حضور کانیهای کلریت، تالک و یا کانیهای رسی غنی از Mg مشخص می‌شود (Boiron et al., 2010) که تبلور این کانیها باعث کاهش محتوای Mg سیال می‌شود. وجود کانیهای کلریت، تالک و ایلیت به‌همراه کانی‌سازی فلوریت و وجود سنگ میزبان دولومیتی از شواهد رخداد متاسوماتیزم منیزیمی و کاهش یون Mg²⁺ در ترکیب میانبارهای سیال است. از آن‌جا که شورابه‌های Ca-Mg اغلب حاوی مقداری پتاسیم در ترکیب خود هستند، اغلب وجود

واکنش سیال - سنگ و رخداد دگرسانی

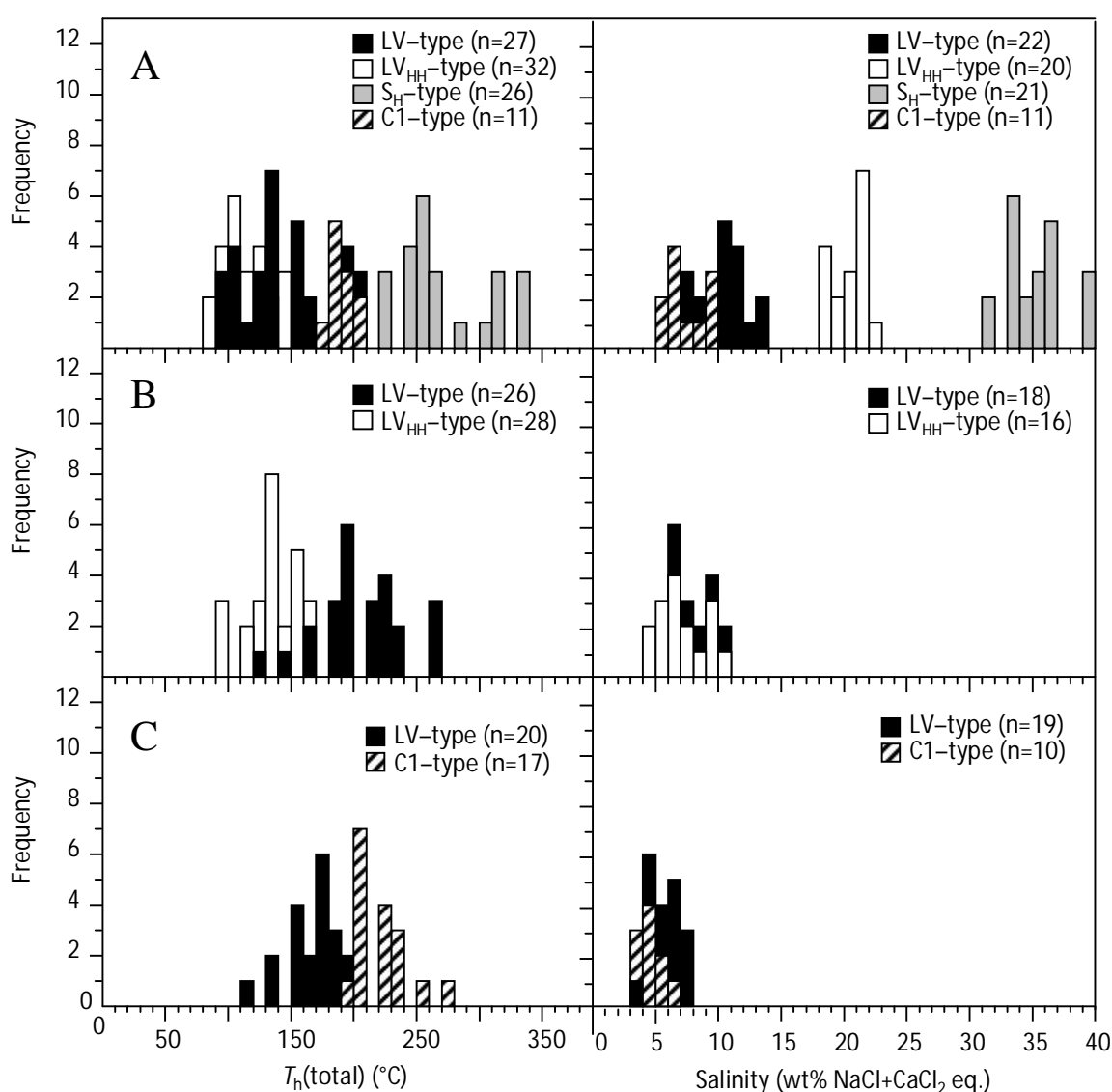
همان‌طور که اشاره شد، با توجه به بررسیهای میکروسکوپی و پراش‌سنجی پرتو ایکس، دگرسانیهای دولومیتی‌شدن و سیلیسی-شدن، مهمترین دگرسانیهای مرتبط با کانی‌سازی در کانسار آتش‌کوه است که در ادامه درباره آنها بحث می‌شود.

دولومیتی‌شدن: افزایش محتوای Ca و کاهش میزان Mg سیال، به‌همراه انحلال بلورهای کلسیت و جانشینی دولومیت به جای آن، از مهمترین شواهد رخداد دگرسانی دولومیتی‌شدن در کانسار آتش‌کوه است. وجود Mg در ترکیب افقهای تبخیری منطقه مورد بررسی، به‌ویژه محدوده زمانی تریاس بالایی - ژوراسیک زیرین (Sheikhol-Eslami, 2005; Ghasemi and Talbot,

دگرسانی سیلیسی همواره به‌عنوان نشانه‌ای از تغییرات دمایی ناشی از رقیق‌شدگی سیال توسط عوامل خارجی محسوب می‌شود و در کانسار آتش‌کوه نیز وقوع پدیده اختلاط غیر هم‌دمای شواریه‌های غنی از فلز و سیالات رقیق‌شده، مؤید این موضوع است. وجود رگه-رگه‌چه‌های متقاطع کوارتز، به‌ویژه طی مراحل پایانی کانی‌سازی و بافت حفره پرکن کوارتز در فضای اطراف فلوریت‌ها ناشی از کاهش تدریجی دمای سیال و فراهم‌شدن شرایط تنش‌ت کوارتز و تشکیل دگرسانی سیلیسی در منطقه است.

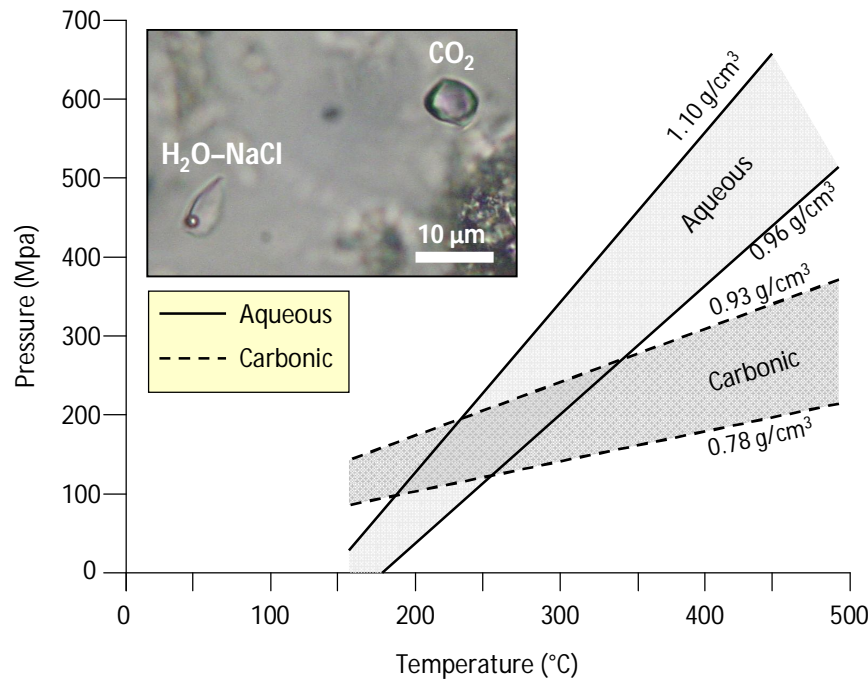
کانیهای حاصل از دگرسانی مانند آدولاریا نیز گزارش شده است (Piqué et al., 2008) که به‌دلیل مشاهده نشدن این کانی در منطقه آتش‌کوه، می‌توان گفت محتوای پتاسیم سیال چندان بالا نبوده است.

سیلیسی‌شدن: حضور زون‌های سیلیسی در یک منطقه گویای صعود سیال و رخداد اختلاط و رقیق‌شدگی آن با آب‌های کم‌دماست. به عقیده کررار و اندرسون (Crerar and Anderson, 1971)، مهمترین عامل تنش‌ینی کوارتز در یک ذخیره کاهش انحلال‌پذیری کوارتز طی کاهش دمای محیط است. رخداد



شکل 6. نمودارهای استونی مقادیر شوری (wt% NaCl+CaCl₂ eq.) و دمای همگن‌شدن نهایی سیال (Th_{total}) در میانبرهای موجود در کانیهای A: فلوریت، B: باریت و C: کوارتز کانسار فلوریت-باریت (±سولفید) آتش‌کوه

Fig. 6. Histograms showing frequency distribution of homogenization temperature (Th) and salinity (wt% NaCl+CaCl₂ eq.) for fluid inclusions in A: fluorite, B: barite and C: quartz from Atashkuh fluorite-barite (±sulfide) deposit



شکل 7. نمودار ارزیابی فشار - دمای سیال در کانی فلوریت با استفاده از روابط متقاطع ایزوکوره‌های میانبارهای آبگین و کربنیک در کانسار آتش‌کوه.

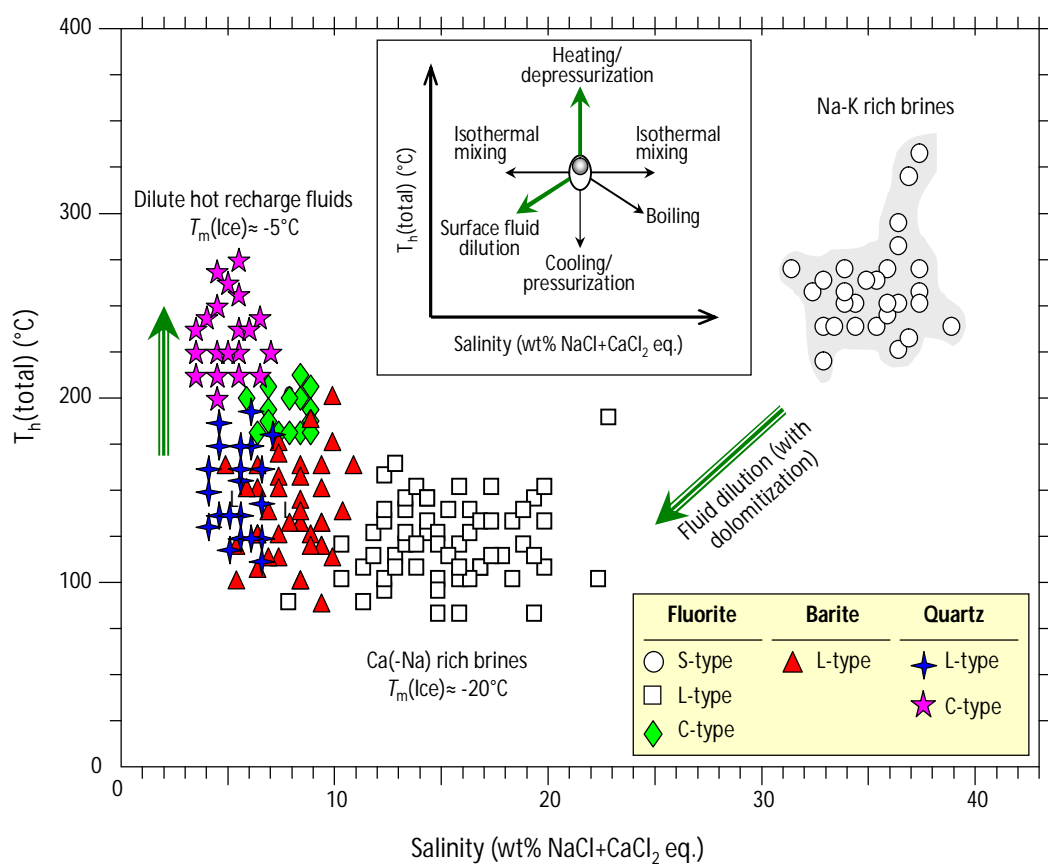
Fig. 7. Estimation of trapping pressure and temperature of the fluorite bearing fluid in Atashkuh deposit using intersecting CO₂ and H₂O isochores for carbonic and aqueous fluid inclusion, respectively

نتیجه‌گیری

ساخت و بافت‌های رگه‌ای، برشی، حفره پرکن (ناشی از انحلال سنگ‌میزبان کربناتی) و جانشینی، همراه با دگرسانیهایی دولومیتی‌شدن و سیلیسی‌شدن مهمترین پدیده‌های کانی‌سازی در کانسار فلوریت - باریت (± سولفید) آتش‌کوه هستند. بر اساس شواهد زمین‌شناسی موجود در منطقه مورد بررسی که شامل موقعیت ژئودینامیکی منطقه، ساخت و بافت کانی‌سازی، مجموعه کانی‌شناسی و شیمی سیال می‌شود، دست‌کم 4 مرحله کانی‌سازی به شرح زیر در منطقه قابل تشخیص است:

مرحله اول: تحرک شورابه‌های حوضه‌ای غنی از Na-K(-Mg-Ca) از افق‌های سنگ بستر زیرین و جابه‌جایی آنها در نتیجه وزن واحدهای بالایی (فشار لیتواستاتیک) با استفاده از شکستگیها و مجراهای گسلی سنگ بستر که به درون سنگ میزبان کانی‌سازی (واحدهای سنگی سازندهای شمشک و بادامو) انجام شده است. حضور میانبارهای حاوی فاز جامد هالیت (نوع S_H) با شوری بیش از 31 درصد وزنی معادل نمک‌طعام و دمای تقریبی 220 تا 350

درجه سانتی‌گراد در کانیهای فلوریت کانسار فلوریت - باریت (± سولفید) آتش‌کوه، طی این مرحله انجام شده است. **مرحله دوم:** طی این مرحله، شکستگیهای ناشی از کاهش فشار (فشارزدایی) واحدهای سنگی بالایی هم‌زمان با وقوع کوه‌زایی سیمرین میانی طی ژوراسیک، موجب می‌شود، تا سیالات غنی از نمک قبلی با آبهای سازندی با شوری کم مخلوط و دچار رقیق‌شدگی شوند و طی آن سیالات غنی از کلرور و سولفور موجب رخداد کانی‌سازی باریت - سولفید شوند. از آن‌جا که این سیالات به‌دلیل سرچشمه گرفتن از سنگ بستر شیلی اغلب حاوی میزان بالایی از یون‌های منیزیم و آهن نیز هستند، در نتیجه رخداد دگرسانی دولومیتی‌شدن که با تشکیل دولومیت‌های زین‌اسبی آهن‌دار همراه است از شواهد این مرحله از کانی‌سازی محسوب می‌شوند. این مرحله به‌خصوص در رگه غربی کانسار آتش‌کوه قابل مشاهده است. رخداد شورابه‌های غنی از کلسیم (- سدیم) در این مرحله با حضور میانبارهای حاوی فاز هیدروهالیت (نوع L_VHH) با دمای آخرین نقطه ذوب یخ حدود 20- درجه سانتی‌گراد تشخیص داده می‌شود (شکل 8).



شکل 8. نمودار دوتایی دمای همگن‌شدن نهایی در مقابل شوری که در آن موقعیت میانبرهای سیال موجود در کانیه‌های فلوریت، باریت و کوارتز مراحل مختلف کانه‌زایی کانسار فلوریت- باریت (\pm سولفید) آتش‌کوه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فرآیندهای اختلاط سیال همراه با تبدلات Ca-Mg در خلال برهم‌کنش سیال - سنگ (ناشی از رخداد دولومیتی‌شدن) و تزریق مجدد آبهای جوی رقیق‌شده در کانسار آتش‌کوه قابل تشخیص است.

Fig. 8. Th-salinity plot for fluid inclusions in fluorite, barite and quartz from different stages of mineralization in Atashkuh fluorite-barite (\pm sulfide) deposit. Fluid mixing accompanying with Ca-Mg exchange (due to dolomitization) during fluid-rock interaction and recharge of diluted meteoric water in Atashkuh deposit are distinguished.

دیگری در فاصله‌های دورتر از منطقه آتش‌کوه، موجب تشکیل ذخیره فلزی شده‌اند.

مرحله سوم: فعالیتهای دگرگونی درجه پایین در منطقه مورد بررسی موجب تحرکات بیشتر سیال و افزایش دمای محیط می‌شود که وجود فازهای غنی از CO_2 در ترکیب میانبرهای سیال موجود در کانیه‌های میزبان فلوریت و کوارتز می‌تواند از نشانه‌های آن و ناشی از پدیده کربن‌زدایی¹ طی مرحله سوم کانی‌سازی باشد. میانبرهای آبگین- کربنیک نوع C1 مربوط به این مرحله با دمای آخرین نقطه ذوب یخ حدود 5- درجه سانتی‌گراد در کانیه‌های میزبان فلوریت و کوارتز تشکیل شده‌اند (شکل 8).

مرحله چهارم: نفوذ آبهای جوی حاوی CO_2 اتمسفری در

اگرچه محتوای کانی‌سازی فلزی این ذخیره ناچیز است و حجم کانی‌سازی سولفیدی آن (گالن، پیریت و کالکوپیریت) تنها کمتر از 5 درصد حجم رگه‌هاست؛ ولی با توجه به شوری بالا و دمای متوسط سیال کانی‌ساز انتظار می‌رود، شورابه‌های غنی از فلز در کانسار آتش‌کوه حضور داشته باشند. به‌نظر می‌رسد احیای سولفات توسط فعالیت باکتری‌ها و عامل حرارتی- شیمیایی که به آزاد شدن میزان ناچیزی H_2S منجر می‌شود، می‌تواند موجب ته‌نشینی سولفید فلزات به‌صورت پراکنده، همراه با کانی‌سازی رگه‌های فلوریت- باریت شود. احتمالاً به دلیل نبود سولفور کافی در سیال کانه‌ساز ذخیره آتش‌کوه، بخش عمده‌ای از فلزات مانند Pb, Zn, Fe, Cu و Mn در فاز سیال باقی مانده و یا در مکان

از مهمترین عوامل رخداد کانی‌سازی در منطقه مورد بررسی هستند.

قدردانی

بدین‌وسیله از مدیریت محترم شرکت صنعتی پودرسازان و آقایان مهندس بیگی و فیضی‌فر که امکان دسترسی به معدن فلوریت آتش‌کوه را فراهم و راهنمایی‌های مفیدی نیز ارائه کردند، تشکر و سپاس‌گزاری می‌شود. همچنین، نویسندگان از دقت نظر و پیشنهادهای سازنده داوران محترم مجله زمین‌شناسی اقتصادی قدردانی می‌نمایند.

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.
- 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., Sterner, S.M. and Hall, D.L., 1989. SALTY: A FORTRAN program to calculate compositions of fluid inclusions in the system NaCl-KCl-H₂O. *Computer Geoscience*, 15(1): 19-41.
- 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. *Computer Geoscience*, 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. *Mineralogical Association of Canada Short Course*, 6(3): 39-74.
- Cann, J.R. and Banks, D.A., 2001. Constraints on the genesis of the mineralization of the Alston Block, Northern Pennine Orefield, northern England. *Proceedings of the Yorkshire Geology Society*, 53(3): 187-196.
- Crerar, D.A. and Anderson, G.M., 1971. Solubility and solvation reactions of quartz in dilute hydrothermal solutions. *Chemical Geology*, 8(2): 107-22.
- 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.
- Genç, Y., 2006. Genesis of the Neogene interstratal karst-type Pöhrenk fluorite-barite (\pm lead) deposit (Kırşehir, Central Anatolia, Turkey). *Ore Geology Reviews*, 29(2): 105-117.
- 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).
- Ghorbani, M., 2013. The economic geology of Iran, mineral deposits and natural resources. Springer Netherlands, 569 pp.
- Lohmann, 1988) می‌شود که تشکیل بافت و ساختهای حفره‌ای و برشی، از شواهد این فرآیند است. حضور کانیهای کربناتی و هیدروکسیدی از قبیل سروزیت، مالاکیت و گوتیت بیانگر عملکرد این فرآیند در مراحل پایانی کانی‌سازی است. این ویژگی در برخی از کانسارهای فلوریت-باریت (سرب-روی) با میزبان کربناتی نیز گزارش شده است (McLemore et al., 1998; Genç, 2006). در مجموع با استفاده از شواهد سنگ‌نگاری و میکروتومتری میانبره‌های سیال و به‌کارگیری نمودارهای دوتایی دمای همگن‌شدن در مقابل شوری (شکل 8) می‌توان گفت فرآیندهای اختلاط سیال، فشارزدایی و خروج CO₂

- Goldstein, R.H. and Reynolds, T.J., 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic materials. Society for Sedimentary Geology. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Short Course 31, 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.
- Hannah, J.L. and Stein, H.J., 1990. Magmatic and hydrothermal processes in ore bearing systems. *Geological Society of America Special Paper*, 246(7): 1-9.
- Lohmann, K.C., 1988. Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems and their application to studies of paleokarst. In: N.P. James and P.W. Choquette (Editors), *Paleokarst*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 58-80.
- Lüders, V., Reutel, C., Hoth, P., Banks, D., Mingram, B. and Pettke, T., 2005. Fluid and gas migration in the North German Basin: fluid inclusion and stable isotope constraints. *International Journal of Earth Science*, 94(5-6): 990-1009.
- McLemore, V.T., Giordano, T.H., Lueth, V.W. and James, C.W.J., 1998. Origin of barite-fluorite-galena deposit in the Rio Grande Rift, New Mexico. 49th Field Conference Guidebook, New Mexico, USA.
- Naden, J., 1996. CalcicBrine: A Microsoft Excel 5.0 Add-in for Calculating Salinities from Microthermometric Data in the System NaCl-CaCl₂-H₂O. 6th PACROFI Symposium, Madison, USA.
- Piqué, A., Canals, A., Grandia, F. and Banks, D.A., 2008. Mesozoic fluorite in NE Spain record regional base metal-rich brine circulation through basin and basements during extensional events. *Chemical Geology*, 257(1-2): 139-152.
- 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).
- Rachidnejad-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.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. Review in *Mineralogy*, Mineralogical Society of America, Washington, D.C., 646 pp.
- 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.
- Sternert, 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.
- 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, 24 pp.
- Tornos, F., Casquet, C., Locutura, J. and Collado, R., 1991. Fluid inclusions and geochemical evidence for fluid mixing in the genesis of Ba-F (Pb-Zn) lodes of the Spanish Central System. *Mineralogical Magazine*, 55(2): 225-34.
- 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 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.



Fluid Evolution During Mineralization of Atashkuh Fluorite-Barite (\pm Sulfide) Deposit, South of Delijan

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

1) Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

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

Submitted: Dec. 3, 2014

Accepted: May 20, 2015

Keywords: *Atashkuh fluorite deposit, fluid inclusion, mineralization stages, fluid processes, Delijan*

Introduction

More than 30 fluorite occurrences with approximately 1.35 million tons of reserves have been recognized in Iran (Ghorbani, 2013). The Atashkuh fluorite-barite (\pm sulfide) deposit is one of four occurrences located south of the city of Delijan in Markazi province, about 80 km SE of Arak city. The Atashkuh deposit occurs between the central Iran structural zone on the north and the Sanandaj-Sirjan structural zone on the south. The geology of the area is dominated by folded and faulted Jurassic carbonates and shales (Thiele et al., 1968). The lower Jurassic shale and calcareous sandstone of the Shemshak Formation and the Middle to Upper Jurassic dolomite of the Badamu Formation are the main host rocks for the fluorite veins.

In this study, 40 samples from fluorite veins and host rocks were collected, from which 25 thin sections and 8 doubly-polished thin sections were prepared. Micro-thermometric studies were conducted on primary fluid inclusions using the Linkam THM600 heating-freezing stage. In addition, 10 samples were analyzed by XRD.

Results

Fluid inclusion data indicate that the Atashkuh fluorite-barite (\pm sulfides) veins were deposited as a result of mixing a primary multi-component Na-K(-Mg-Ca) high-salinity brine (S_H type inclusions) with less saline calcium-rich connate water (LV_{HH} type inclusions) and pressure reduction of ore bearing fluids. Fluid inclusions containing halite in high-salinity brine, and hydrohalite in connate water show suggest a high-

salinity brine and connate water before mixing. The main mineralization stage was followed by circulation of low temperature meteoric water, responsible for the late stage mineralization. The micro-thermometry results suggest that the main fluorite mineralization occurred at 250 °C and 150 Mpa pressure.

Dolomitization and silicification are the main alteration types associated with the Atashkuh mineralization. The occurrence of chlorite, talc, illite and dolomitized host rock all suggest Mg metasomatism associated with the main stage of fluorite mineralization.

As a result of these observations, three stages of mineralization were recognized in the Atashkuh area:

(1) Mobilization of a primary multicomponent Na-K(-Mg-Ca) high-salinity basinal fluid from the underlying rocks and its migration to the upper horizons. This stage is corresponds with the multi-phase S_H inclusions with salinity of 31 wt% NaCl equivalent and 220 to 350 °C temperature.

(2) Mixing and dilution of the basinal saline fluid with low-salinity formation or connate water resulted in deposition of fluorite-barite (\pm sulfide) mineralization and the formation of ferruginous dolomites. This stage contains Ca-Na rich inclusions with hydrohalite (LV_{HH}).

(3) Carbonate dissolution and increase in CO_2 content of solutions due to oxidation of pyrite, formation of sulfuric acid. This stage is supergene oxidation and deposition of supergene minerals.

The dissolution of carbonate rocks by acidified meteoric water produced permeable structures and breccias, by followed by of supergene

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

mineralization in the later stages and formation of cerussite, malachite and goethite.

Discussion

The Atashkuh fluorite-barite (\pm sulfide) mineralization is mainly associated with dolomitized and silicified Jurassic carbonates and shales of Shemshak and Badamu Formation. The mineralization is in the form of two veins about 1 km apart. The epigenetic vein mineralization mainly consists of fluorite and barite with subordinate quartz, calcite, dolomite, galena, chalcopyrite, pyrite, hematite, goethite, malachite and cerussite. The main ore textures are replacements, open-space fillings, breccias and veins. The petrographic studies suggest three paragenetic suites: fluorite/quartz/calcite, barite/dolomite/sulfides and hematite/cerussite/goethite as early, middle and late stages.

Micro-thermometric measurements were carried out on primary fluid inclusions of fluorite, barite and quartz crystals from both mineralized veins of the Atashkuh deposit. Fluid inclusions are of several types: (1) two-phase, liquid-vapor (LV), two-phase aqueous with hydrohalite (LV_{HH}), multiphase (S_H), H_2O - CO_2 with clathrate (C1) and without clathrate (C2) were recognized and analyzed.

The first ice melting temperature (T_e) of fluorite, barite and quartz two-phase aqueous (LV) inclusions varies between -22°C and -25°C , representing a $H_2O \pm NaCl \pm KCl$ multiphase solution (Van den Kerkhof and Hein, 2001). The last ice melting temperatures of three samples ($T_{m_{ice}}$) vary between -4.9°C to -9.7°C , -3.2°C to -7.2°C and -2°C to -4.8°C which indicate salinities of 7.7-13.6, 5.2-10.7 and 3.2-7.5 wt% NaCl

equivalent for fluorite, barite and quartz. The final homogenization temperatures (Th_{total}) of these inclusions vary between 90 and 205°C for fluorite, 130 to 270°C for barite and 110 to 193°C for quartz. The CO_2 melting temperatures ($T_{m_{CO_2}}$) of fluorite and quartz C1 inclusions show ranges of -57.1 to -58.5°C which suggest the presence of CH_4 and/or N_2 impurities (Burruss, 1981). The clathrate melting temperature ($T_{m_{clath}}$) varies between 4.8 and 8.5°C representing a salinity of 5.3 to 9.2 and 3 to 6.7 wt% NaCl equivalent for fluorite and quartz. The CO_2 homogenization temperature (Th_{CO_2}) in these inclusions is 7.4 to 18.8°C for fluorite and 13.4 to 27.5°C for quartz. The homogenization temperature (Th_{total}) for these inclusions is 170 - 210°C for fluorite and 195 - 280°C for quartz.

References

- Burruss, R.C., 1981. Analysis of phase equilibria in C-O-H-S fluid inclusions. Mineralogical Association of Canada Short Course, 6(3): 39-74.
- Ghorbani, M., 2013. The economic geology of Iran, mineral deposits and natural resources. Springer Netherlands, 569 pp.
- 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, 24 pp.
- Van den Kerkhof, A.M. and Hein, U.F., 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1-4): 27-47.