فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال ۱۸، شماره ۷۱، پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۱۷-۲۹

تعیین خاستگاه و روند تکامل سیال‌های کانه‌زا براساس بررسی میانبارهای سیال در گستره مجیدآباد (شمال‌شرق اهر-شمال‌غرب ایران)

حانیه بابائی[۱]، سید غفور علوی[۲و*] و وارطان سیمونز[۳]

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز
۲. دانشیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز
۳. دانشیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲

چکیده

گستره مجیدآباد در شمال‌غرب ایران، استان آذربایجان شرقی و در ۳۲ کیلومتری شمال‌شرق اهر واقع شده است. این گستره از لحاظ تقسیم‌بندی ساختاری-تکتونیکی ایران، در حوضه البرز-آذربایجان قرار دارد و بخشی از انتهای شمال‌غربی قوس ماگمایی ارومیه-دختر است. واحدهای تشکیل‌دهنده گستره شامل سنگ‌های آذرین و آذرآواری ائوسن با ترکیب آندزیتی، تراکی‌آندزیت تا تراکی‌بازالتی و توده‌های نفوذی الیگوسن با ترکیب مونزودیوریتی و گابرویی می‌باشند. در اثر فرآیندهای گرمابی شکل گرفته از توده نفوذی مونزودیوریتی در واحدهای رسوبی-آتشفشانی ائوسن، دگرسانی‌های گسترده‌ای در این گستره رخ داده است. کانه‌زایی به شکل پراکنده و رگه-رگچه‌ای می‌باشد که در دو مرحله جداگانه درونزاد و برونزاد رخ داده است. کانه‌های درونزاد شامل پیریت و کالکوپیریت هستند که با کانه‌های برونزاد کالکوسیت، کوولیت، دیژنیت، هماتیت، لیمونیت و مالاکیت همراهی می‌شوند. در بررسی میانبارهای سیال پنج نوع میانبار سیال مشاهده می‌شود که شامل تک‌فاز مایع، تک‌فاز بخار، دو فازی غنی از مایع، دو فازی غنی از بخار و چندفازی حاوی فاز جامد در رگچه‌های کوارتزی کانه‌دار می‌باشند. براساس نتایج ریزدماسنجی، دمای همگن‌شدگی و شوری میانبارهای سیال بررسی شده به ترتیب ۱۴۲ تا ۵۶۷ درجه سانتی‌گراد و چهار تا ۵۳ درصد وزنی معادل نمک طعام می‌باشد. لیگاندهای موثر در حمل و نقل فلزات از نوع کلریدی و سولفیدی بوده و پدیده جوشش، سرد شدن و رقیق‌شدگی با سیال‌های جوی عامل اصلی ته‌نشست عناصر فلزی و رخداد کانی‌سازی در گستره مجیدآباد است. بر این اساس، کانی‌سازی در گستره مجیدآباد در شرایط اپی‌ترمال و شاید وابسته به یک سامانه پورفیری صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: اپی‌ترمال، پورفیری، سیال درگیر، کانی‌زایی، مجیدآباد.

* نویسنده مرتبط: ghafour_alavi@tabrizu.ac.ir

مقدمه

استفاده از میانبارهای سیال به‌عنوان ابزاری در بررسی خاستگاه کانسارها به‌ویژه در ۵۰ سال اخیر بسیار متداول بوده است. میانبارهای سیال نمونه‌های واقعی از سیال‌هایی هستند که طی تشکیل کانی‌ها و کانه‌های مختلف، همراه با آنها به دام افتاده‌اند و ازاین‌رو برای شناسایی فرآیندهای زمین‌شناسی گذشته بسیار مهم هستند. عامل اصلی در تشکیل میانبارهای سیال، بی‌نظمی سطوح بلوری هنگام تشکیل آنهاست، به‌طوری‌که در ناهمواری‌های میکروسکوپی سطوح بلوری، بخشی از سیال کانه‌زا جا گرفته و سپس با رشد سطح بعدی، فضاهای کوچک پوشیده می‌شوند و سیال‌ها در این حفره‌ها حبس شده و سرانجام میانبارهای سیال به وجود می‌آیند. البته، شکل‌های متفاوتی از میانبارهای سیال وجود دارد که در این میان، انواع اولیه که هم‌زمان با تشکیل کانی به دام افتاده‌اند بسیار مهم بوده و بیانگر شرایط تشکیل توده‌های معدنی هستند (Randive et al., 2014). بر این اساس، سیالات درگیر به دام افتاده در رگه‌ها و رگچه‌های گرمابی می‌توانند علاوه بر ماهیت و خواص فیزیکوشیمیایی این سیالات، وضعیت سیالات کانه‌ساز و چگونگی تشکیل کانه را مشخص سازند (Wilkinson, 2001). ریزدماسنجی سیالات درگیر به‌طور بالقوه می‌تواند به‌عنوان شاخص محیط فیزیکوشیمیایی کانی‌سازی مس عمل کند (Zarasvandi et al., ۲۰۱۴). پژوهش‌های بسیاری پیرامون میانبارهای سیال رگه‌های کوارتز در پهنه‌های کانه‌سازی شده به‌ویژه طلا، به‌منظور آگاهی از خاستگاه و ویژگی‌های کانه‌زایی در سراسر جهان انجام شده است (Chi and Guha, 2011; Kant et al., 2012; Moncada and Bodnar, 2012; Tun et al., 2014; Hajalilou and Aghazadeh, 2016; Shimizu, 2018; ؛ رادمرد و همکاران، ۱۳۹۶).

گستره مجیدآباد در حوضه ارسباران قرار دارد. کمربند فلززایی ارسباران در شمال‌غربی ایران واقع بوده و شامل گستره‌هایی از جمله اهر، کلیبر، ورزقان، سیه‌رود و بخش‌هایی از شمال و غرب مشکین‌شهر است. برخی زمین‌شناسان این کمربند را ادامه قفقاز کوچک در نظر می‌گیرند که با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق وارد ایران می‌شود (Innocenti et al., 1982). عده‌ای آن را بخشی از نوار ماگمایی‌ارومیه-دختردرنظرمی‌گیرند(Hezarkhani,2006) و عده‌ای دیگر آن را کمربند ماگمایی مجزا در نظر می‌گیرند که از البرز تا شمال‌شرق ترکیه کشیده شده است (Dercourt et al., 1986; Alavi, 2007; Dilek et al., 2010). این کمربند دارای برون‌زدهای گسترده‌ای از رسوبات فلیشی پالئوسن و سنگ‌های آذرین آتشفشانی و درونی ائوسن تا میوسن است. ماگماتیسم سنوزوئیک که از ائوسن آغاز می‌شود بیشتر آتشفشانی بوده و اغلب ماهیت اسیدی و حد واسط دارند. از ائوسن بالایی تا میوسن، فعالیت آذرین بیشتر به شکل توده‌های نفوذی بروز می‌کند که با کانی‌سازی و دگرسانی گسترده‌ای همراه است (Jamali et al., 2010). بخش‌های وسیعی از سنگ‌های ماگمایی به‌ویژه سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری آن دگرسان شده‌اند (Ghorbani, 2013). توالی سنگ‌های مطالعه شده در این پهنه شامل دو بازه اصلی الیگوسن پسین و میوسن پیشین است (Jamali and Mehrabi, 2015). در این کمربند کانه‌زایی‌هایی از جمله مس، مولیبدن، طلا، آهن، سرب، روی، آرسنیک، آنتیموان و جیوه به‌صورت ذخایر پورفیری، اسکارنی و رگه‌ای قابل پی‌جویی است (Simmonds et al., 2015; Simmonds and Moazzen, 2015). از مطالعات اخیر روی ذخایر این پهنه می‌توان به ذخایر پورفیری مس-مولیبدن سونگون (Calagari, 2004)، مس-مولیبدن هفت‌چشمه (محمدی و برنا، ۱۳۸۵؛ زرناب اکتشاف، ۱۳۸۶) و برخی از ذخایر اپی‌ترمال مانند زایلیک-صفیخانلو (Ebrahimi et al., 2011)، شرف‌آباد و مسجد داغی (Alirezaei et al., 2008) اشاره کرد. در این پژوهش سعی شده است که با استفاده از ریزدماسنجی میانبارهای سیال دما، شوری، چگالی، خواص فیزیکوشیمیایی سیال و نوع ذخیره احتمالی بررسی شود.

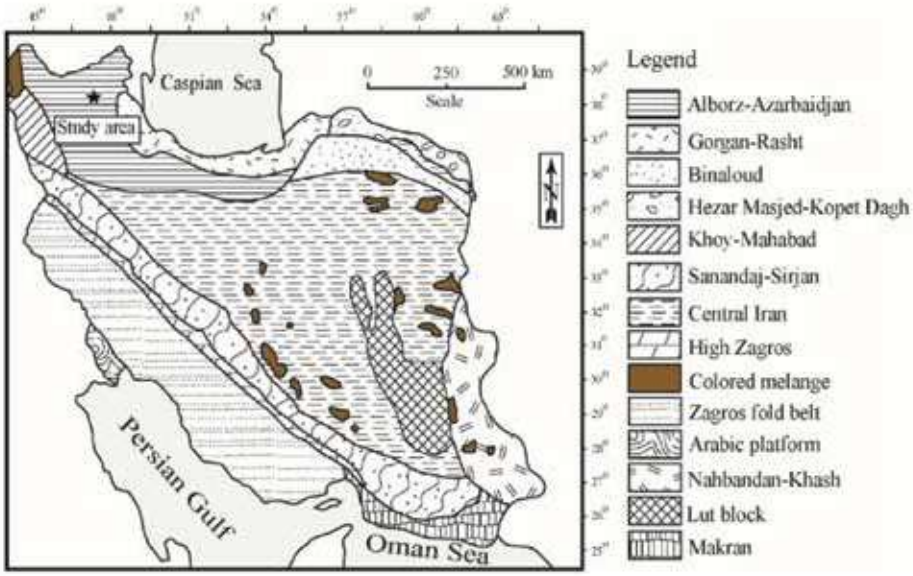
روش مطالعه

بررسی‌ها در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی صورت گرفت. در بخش صحرایی، به‌منظور ارزیابی کلی و بررسی

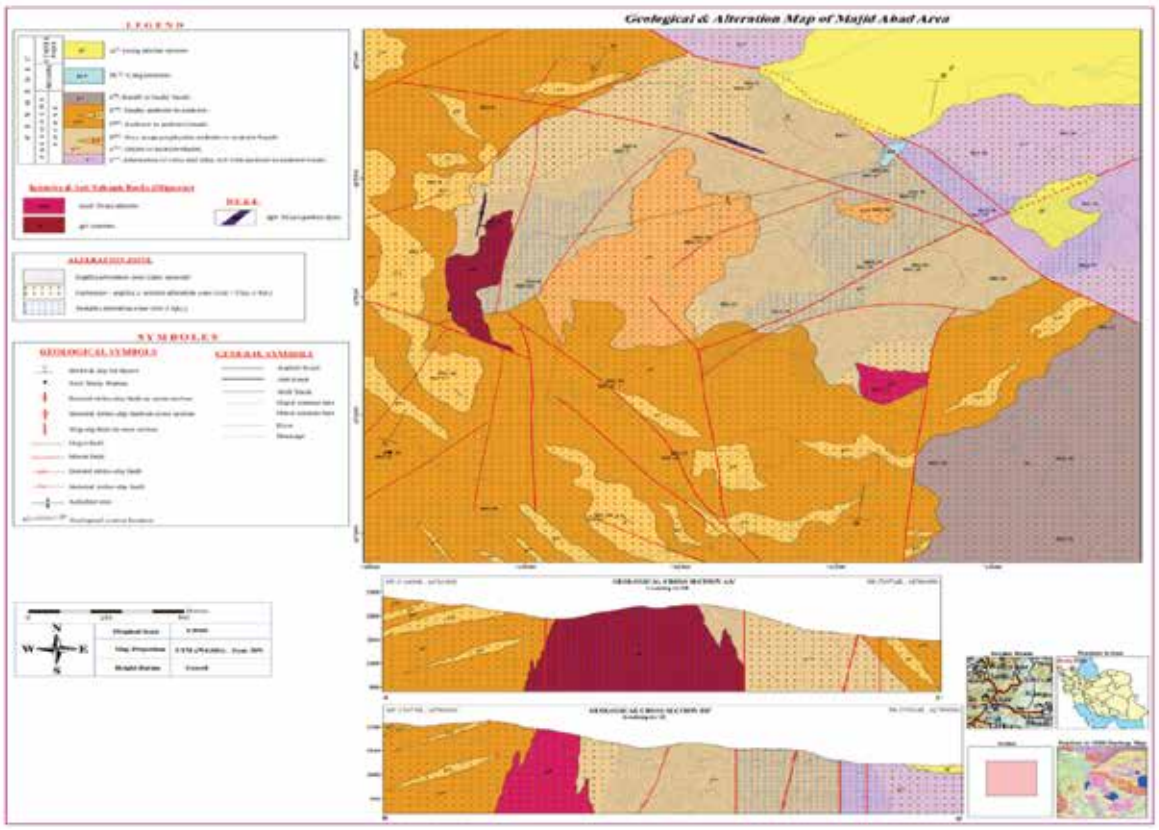
واحدهای سنگی گستره و بررسی روابط واحدها و نمونه‌برداری از آنهـــا از گســـتره بازدید به عمل آمـــد. ۱۵ مقطع نازک از نمونه‌های برداشت شده از سنگ‌های آذرآواری و آتشفشانی برای بررسی سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی و ۲۰ مقطع صیقلی از نمونه‌های برداشت شده از گمانه‌های اکتشافی که در آنها کانه‌زایی سولفیدی وجود داشت، به‌منظور بررسی کانه‌زایی و تعیین توالی پاراژنتیکی تهیه شد و در دانشگاه تبریز مورد بررســـی قرار گرفت. برای مطالعه میانبارهای سیال، تعداد شـــش مقطع دوبر صیقلـــی از رگچه‌هـــای کوارتزی حاوی کانی‌ســـازی از ســـه گمانه با عمق‌های مختلف (گمانه اول عمق ۶۳ و ۱۹۱ متری، گمانه دوم عمق ۲۰۱ و ۲۲۹ متری و گمانه ســـوم عمق ۲۵۹ و ۳۰۸ متری) تهیه شد. در مجموع ۶۶ میانبار سیال از نمونه‌های برداشت شده از گمانه‌ها مورد ریزدماسنجی قرار گرفت. این عملیات توسط استیج لینکام مدل THMS600 نصب شده بر روی میکروسکوپ المپوس مدل BX51، با بازه حرارتی۶۰۰+ تا ۱۹۰- درجه سانتی‌گراد در دانشگاه پیام نور تبریز صورت گرفت. برای تنظیم استیج در حالت گرمایش از پودر نیترات ســـدیم با دمای ذوب ۳۰۷ درجه ســـانتی‌گراد و در حالت سرمایش از ازت مایع با نقطه انجماد ۹۵- درجه سانتی‌گراد استفاده شد. خطای دستگاه در حالت گرمایش ۱± درجه سانتی‌گراد و در حالت سرمایش ۰/۲± درجه سانتی‌گراد بوده است.

زمین‌شناسی

گستره مورد مطالعه به مساحت ۵/۶ کیلومتر مربع، به مختصـــات جغرافیایی ″۳۹ ′۲۴ °۴۷ تا ″۲۵ ′۲۶ °۴۷ طول شرقی و ″۱۹ ′۳۵ °۳۸ الی ″۲۹ ′۳۶ °۳۸ عرض شمالی، در ۳۲ کیلومتری شمال‌شرق شهرستان اهر در استان آذربایجان شرقی، شـــمال‌غرب ایران واقع شده اســـت. این گستره بر اساس تقســـیم‌بندی پهنه‌های ســـاختاری ایران (Nabavi 1976) در پهنـــه البرز-آذربایجـــان قـــرار دارد (شـــکل ۱). واحدهای ســـنگی آتشفشـــانی-آذرآواری تفکیک شـــده در گستره مجیدآباد به ترتیب سنی از قدیم به جدید عبارتند از: تنـــاوب ویتریک-لیتیک توف با گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی (Evta)، گدازه داسیت تا آندزیت-داسیت (Edan)، گدازه‌های آندزیتـــی و آندزیت-بازالتی مگاپورفیری تیره‌رنگ (Eab1)، گدازه‌های آندزیتی تـــا آندزیت-بازالتی (Eab2)، گدازه‌هـــای آندزیتی تا تراکی‌آندزیتـــی (Etan) و گدازه‌های بازالت تا تراکی‌بازالت (Eba) متعلق به ائوســـن. واحدهای ســـنگ‌های آذرین نفوذی و ســـاب‌ولکانیک نیز عبارتند از: گابرو (gb)، مونزودیوریت (mzd) و دایک‌های میکروگابرویی (dgb) به سن الیگوسن (شکل ۲).



شکل ۱. موقعیت گستره مورد بررسی در نقشه تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران (نبوی، ۱۳۵۵)



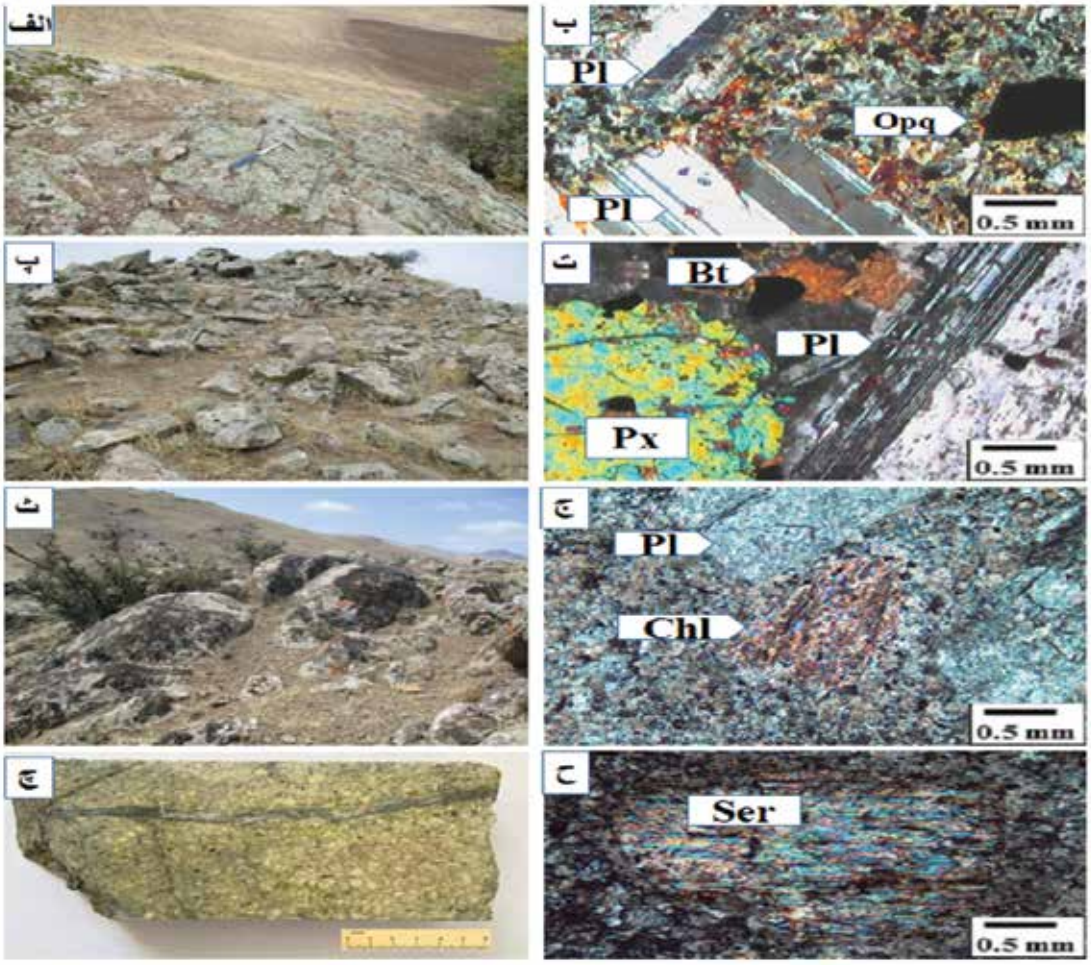
شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ مجیدآباد برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اهر (مهدوی و امینی‌فضل، ۱۳۶۸) و کلیبر (مهرپرتو و ناظر، ۱۳۷۸)

سنگ‌نگاری

در گستره مجیدآباد گسل‌ها و شکستگی‌هایی وجود دارند که واحدهای آتشفشانی آندزیتی-بازالتی ائوسن (شکل ۳-الف) و توده‌های نفوذی را قطع کرده‌اند و محل مناسبی برای تزریق محلول‌های گرمابی به وجود آورده‌اند. عبور سیال‌های گرمابی در راستای شکستگی‌ها و گسل‌ها، افزون بر گسترش دگرسانی، موجب نهشته شدن کانه‌های فلزی در این گستره شده است. از برجسته‌ترین سیماهای زمین‌شناسی اقتصادی گستره مجیدآباد می‌توان به نفوذ توده‌های آذرین درونی گابرویی (شکل ۳-پ) و مونزودیوریتی (شکل ۳-ث) به درون تشکیلات آندزیتی-بازالتی و گسترش یک سامانه دگرسانی گسترده اشاره کرد. سامانه دگرسانی یاد شده از پهنه‌های دگرسانی آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک و سیلیسی تشکیل شده است. از نظر ریخت‌شناسی، توده‌های نفوذی، ارتفاعات متوسط تا خشن گستره را تشکیل می‌دهند. رنگ این مجموعه در بازدیدهای صحرایی و نمونه دستی، خاکستری متوسط تا خاکستری روشن است. مهم‌ترین سنگ‌های میزبان گستره مطالعاتی، سنگ‌های آندزیتی-بازالتی هستند که براساس بررسی‌های میکروسکوپی، کانی اصلی آنها شامل پلاژیوکلاز می‌باشد (شکل ۳-ب). توده نفوذی گابرویی در غرب گستره واقع شده و دارای کانی‌های پلاژیوکلاز و پیروکسن می‌باشد (شکل ۳-ث). توده نفوذی مونزودیوریتی در شرق گستره واقع شده و دارای کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز و فلدسپار آلکالن همراه با کانی‌های ثانویه کلریت (شکل ۳-ج) و سریسیت (شکل ۳-ح) می‌باشد.

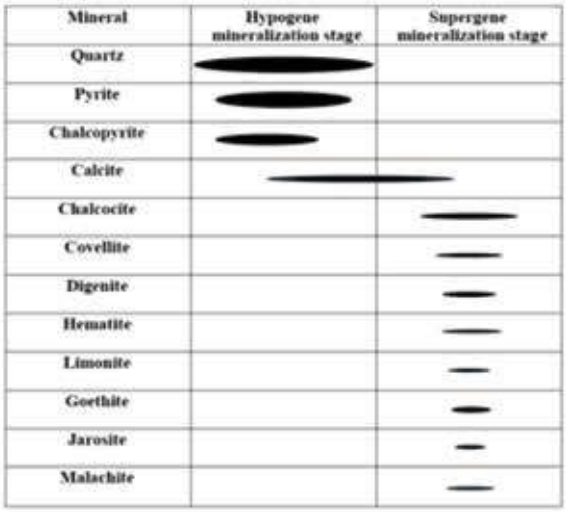
کانه‌زایی

شواهد صحرایی و بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند که نفوذ توده‌های مونزودیوریتی و گابرویی الیگوسن در سنگ‌های آتشفشانی ائوسن همراه با عملکرد گسل‌ها در شکل‌گیری کانی‌سازی موثر بوده است. با توجه به نتایج

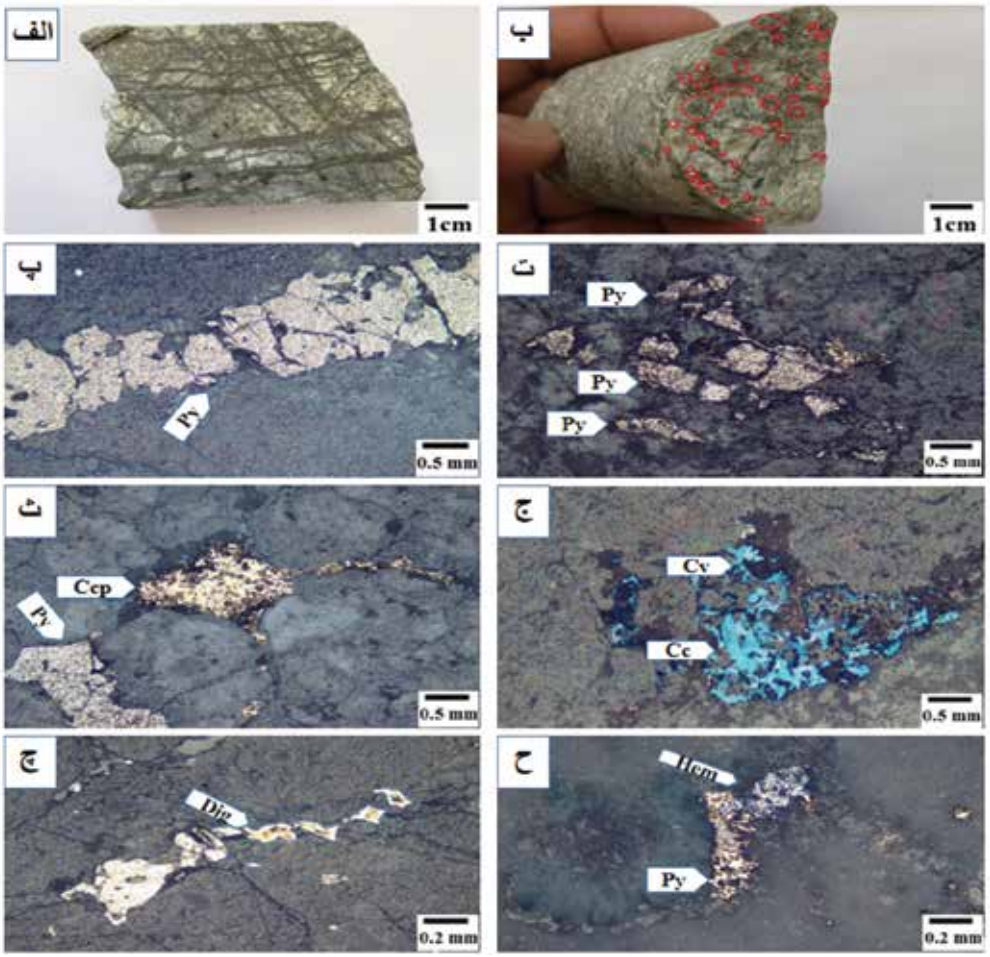


شکل۳. تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از واحدهای سنگی گستره مورد مطالعه، الف) نمایی از رخنمون واحد آندزیتی-بازالتی، ب) پلاژیوکلازهای درشت‌بلور به همراه کانی‌های اپک در زمینه دانه‌ریز متشکل از پلاژیوکلاز در واحدهای آندزیتی-بازالتی، پ) نمایی از رخنمون واحد گابرویی، ت) درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، بیوتیت و پیروکسن در واحد گابرویی، ث) نمایی از رخنمون واحد مونزودیوریتی، ج) بلورهای دگرسان پلاژیوکلاز و تشکیل کانی ثانویه کلریت در متن توده مونزودیوریتی، چ) نمونه دستی از گمانه‌های حفاری مربوط به واحد مونزودیوریتی (عمق ۲۲۹ متری)، ح) تشکیل کانی ثانویه سریسیت در توده مونزودیوریتی. علایم اختصاری کانی‌ها برگرفته از (Whitney and Evans 2010) می‌باشند

سنگ‌نگاری انجام شده بر مقاطع صیقلی تهیه شده از نمونه‌هایی از کانسنگ، توالی تشکیل کانه‌ها در رگه‌های سیلیسی دربردارنده کانه‌های سولفیدی در گستره مجیدآباد را می‌توان به‌صورت شکل ۴ در نظر گرفت. کانه‌زایی در گستره مجیدآباد به‌صورت رگه-رگچه‌ای (شکل ۵-الف) و پراکنده (شکل ۵-ب) به همراه رگه‌های سیلیسی در واحد نفوذی میزبان صورت گرفته است. کانه‌زایی رگه-رگچه‌ای در گسل‌ها، شکستگی‌ها و درزه‌ها رخ داده است و در آن کانی‌های سولفیدی و سیلیس در اثر نهشت مستقیم از سیال‌های گرمابی کانه‌زا تشکیل شده‌اند و کانه‌های سولفیدی حدود هشت تا ۱۰ درصد سنگ را تشکیل می‌دهند. رگه-رگچه‌های کوارتزی در این گستره توسط واحد مونزودیوریتی میزبانی می‌گردند. کانه‌زایی در گستره در دو مرحله درون‌زاد و برون‌زاد رخ داده است. در مرحله درون‌زاد، فعالیت محلول‌های گرمابی سبب تشکیل رگه-رگچه‌های کوارتزی، گسترش پهنه‌های دگرسانی و کانی‌سازی سولفیدی (پیریت و کالکوپیریت) شده است (شکل۵-پ‌وت‌وث). در مرحله برون‌زاد، واکنش سیال‌های جوی فرورو با کانی‌های سولفیدی اولیه سبب تشکیل کانی‌های ثانویه مانند سولفیدهای ثانویه مس (کالکوسیت، کوولیت و دیجنیت) (شکل ۵-ج،چ)، اکسید و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت و لیمونیت) (شکل ۵-ح) و کربنات مس (مالاکیت) شده است.



شکل ۴. توالی پاراژنتیکی تشکیل کانی‌ها در گستره مجیدآباد

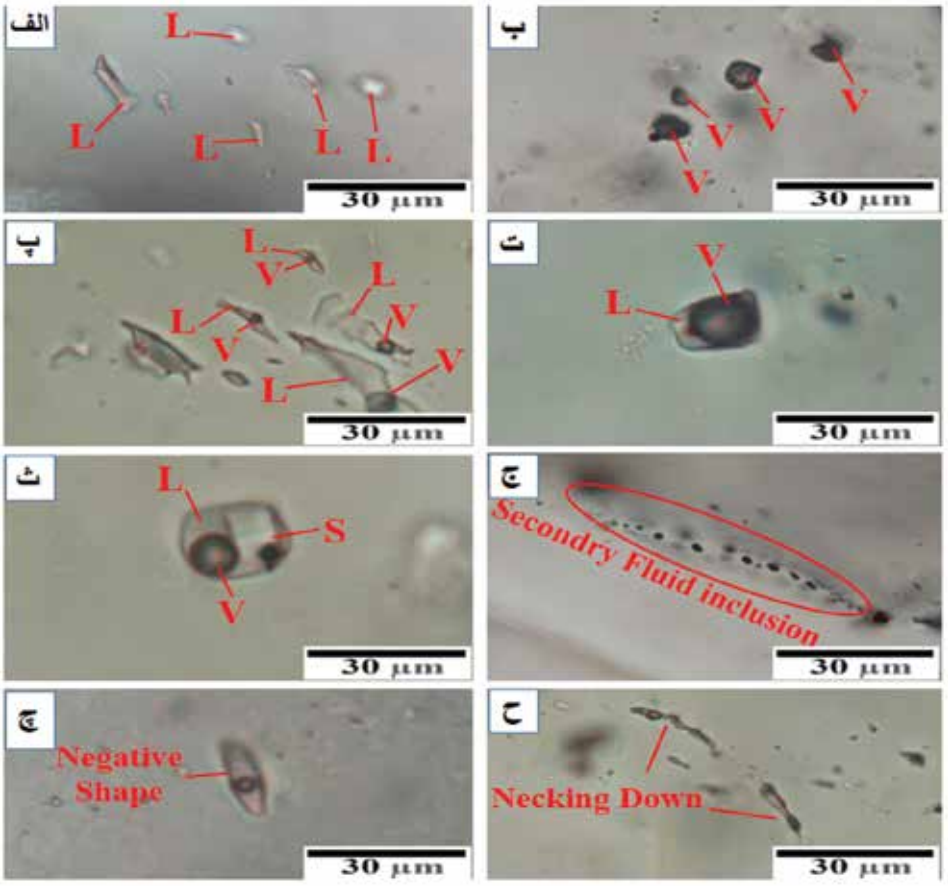


شکل ۵. تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی از کانی‌سازی در گستره مجیدآباد، الف) نمونه دستی از کانی‌زایی سولفیدی پیریت و کالکوپیریت در ارتباط با رگچه‌های استوک‌ورکی کوارتز (عمق ۲۵۹ متری)، ب) نمونه دستی از کانی‌زایی سولفیدی پیریت و کالکوپیریت به‌صورت افشان و پراکنده در توده مونزودیوریتی (عمق ۶۳ متری)، پ) تشکیل پیریت به‌صورت رگه‌ای در امتداد رگه‌های استوک‌ورکی کوارتز، ت) تشکیل پیریت به‌صورت منفرد و پراکنده، ث) بلورهای بی‌شکل پیریت به همراه کالکوپیریت، ج) تشکیل کانی‌های ثانویه مس (کالکوسیت و کوولیت حاصل از دگرسانی کالکوپیریت)، چ) تبدیل کالکوپیریت از حاشیه به کانی ثانویه دیجنیت، ح) تشکیل کانی هماتیت از دگرسانی پیریت. علایم اختصاری کانی‌ها برگرفته از (Whitney and Evans 2010) می‌باشند

میانبارهای سیال

سنگ‌نگاری میانبارهای سیال

میانبارهای سیال در گستره کانی‌سازی مجیدآباد بر روی نمونه‌هایی از رگه-رگچه‌های کوارتزی حاوی کانه‌زایی سولفیدی که نمایانگر نهشت مستقیم کانه‌ها از سیال کانه‌زا هستند، بررسی شدند. این نمونه‌ها شیری رنگ و دربردارنده تعداد زیادی میانبار سیال کوچک هستند. براساس فازهای موجود در میانبارهای سیال در دمای اتاق (Roedder، 1984؛ Sheppard and Harris، 1985)، پنج نوع میانبار سیال شامل تک‌فاز مایع (L)، تک‌فاز غنی از گاز (V)، دو فاز غنی از گاز (V+L)، دو فاز غنی از مایع (L+V) و میانبارهای سه‌فازی (L+V+S) قابل تشخیص هستند. میانبارهای سیال تک‌فاز مایع که تنها از فاز مایع (L) تشکیل شده‌اند، به نسبت کمیاب هستند. اندازه این میانبارها بین پنج تا ۱۰ میکرون متغیر است. این میانبارها به‌صورت منفرد یافت می‌شوند و از نظر شکل اغلب نامنظم هستند (شکل ۶-الف). میانبارهای سیال تک‌فاز گازی تنها از فاز بخار (V) تشکیل شده‌اند و به رنگ تیره هستند. این میانبارها با فراوانی به نسبت زیاد و به‌صورت انباشتی، دنباله‌ای و منفرد در نمونه‌ها دیده می‌شوند. اندازه آنها از چهار تا هفت میکرون متغیر است. این میانبارها به شکل‌های کروی، بیضوی و نامنظم دیده می‌شوند (شکل ۶-ب). میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع (L+V) از یک فاز مایع و یک حباب بخار تشکیل شده‌اند و طی اندازه‌گیری‌های گرمایشی به فاز مایع همگن می‌شوند. حجم فاز بخار در این میانبارها



شکل۶. تصاویر میکروسکوپی از انواع میانبارهای سیال موجود در رگه-رگچه‌های کوارتزی گستره مجیدآباد، الف) میانبارهای سیال تک‌فاز گاز (V)، ب) میانبارهای سیال تک‌فاز مایع (L)، پ) میانبارهای سیال دوفازی غنی از مایع (L+V)، ت) میانبار سیال دوفازی غنی از گاز (V+L)، ث) میانبار سیال سه‌فازی (V+L+S)، ج) میانبارهای سیال ثانویه، چ) میانبار سیال با شکل منفی بلورین کوارتز، ح) میانبارهای سیالی که دچار دم‌بریدگی شده‌اند

۱۰ تا ۳۰ درصد حجم میانبار است. اندازه این میانبارها از پنج تا ۲۵ میکرون متغیر است. این میانبارها دارای شکل‌های نامنظم، کروی، بیضوی و تخت هستند و فراوانی به نسبت زیادی در نمونه‌ها دارند. میانبارهای دوفازی غنی از مایع اغلب به‌صورت منفرد و کمتر انباشتی دیده می‌شوند (شکل۶-پ). میانبارهای سیال دوفازی غنی از گاز (V+L) با فراوانی کمتری نسبت به میانبارهای دوفازی غنی از مایع (L+V) در نمونه‌ها قابل تشخیص هستند. حجم فاز بخار در این میانبارها حدود ۸۰ تا ۹۵ درصد حجم میانبار است. اندازه این میانبارها از پنج تا ۱۵ میکرون متغیر است. این میانبارها بیشتر به شکل‌های نامنظم و منفرد دیده می‌شوند (شکل۶-ت). همراهی میانبارهای سیال تک‌فاز گازی با میانبارهای سیال دوفازی غنی از گاز و غنی از مایع نشان‌دهنده وقوع جوشش سیال در سامانه‌های پورفیری است (White and Hedenquist، 1995؛ Simmons et al.، 2005). میانبارهای سیال سه‌فازی (L+V+S) به نسبت کمیاب بوده و ابعاد آنها کمتر از ۱۵ میکرون می‌باشد. فاز نوزاد آنها اغلب هالیت (شکل ۶-ث) و کانی کدر است.

هالیت به‌صورت مربعی شکل و بی‌رنگ و کانی‌های کدر به رنگ قرمز تا قهوه‌ای (هماتیت، لیمونیت و گوتیت) و سیاه رنگ (پیریت و کالکوپیریت) می‌باشند. حضور هالیت در میانبارهای سیال بررسی شده بیانگر شوری بالای سیال‌های کانی‌ساز در زمان تشکیل رگه-رگچه‌های کوارتزی است که یون کلر لازم برای تشکیل کمپلکس‌های حمل‌کننده فلزات را فراهم می‌کنند. در برخی از میانبارهای سیال اولیه و ثانویه (شکل۶-ج) شکل منفی بلور (شکل۶-چ) و پدیده دم‌بریدگی (شکل۶-ح) مشاهده می‌شود که نشانگر تاثیر تنش‌های تکتونیکی در گستره پس از کانی‌سازی است.

میکروترمومتری میانبارهای سیال

در مجموع ۶۶ میانبار سیال (ردیف یک تا ۱۷مربوط به گمانه اول، ردیف ۱۸ تا ۳۶ مربوط به گمانه دوم و ردیف ۳۷ تا ۶۶ مربوط به گمانه سوم) مورد اندازه‌گیری ریزدماسنجی قرار گرفتند که شامل ۳۹ میانبار سیال از نوع دوفازی غنی از مایع (L+V)، ۱۹ میانبار از نوع دوفازی غنی از گاز (V+L) و هشت میانبار از نوع سه‌فازی (L+V+S) می‌باشند (جدول ۱).

جدول ۱. نتایج ریزدماسنجی میانبارهای سیال در رگه-رگچه‌های کوارتزی گستره مجیدآباد

	نوع میانبار سیال	دما	شوری		نوع میانبار سیال	دما	شوری
۱	L+V	۱۶۵	۸	۳۴	L+V	۲۴۴	۸
۲	L+V	۳۴۷	۲۱	۳۵	L+V	۲۶۸	۷
۳	L+V	۲۰۸	۱۱	۳۶	L+V	۲۸۵	۱۱
۴	L+V	۲۲۵	۹	۳۷	L+V	۲۷۵	۱۱
۵	L+V	۳۵۹	۳۸	۳۸	L+V	۲۳۷	۶
۶	L+V	۴۰۵	۴۶	۳۹	L+V	۲۱۷	۸
۷	L+V	۳۳۱	۳۵	۴۰	L+V	۳۶۲	۱۴
۸	L+V	۳۰۶	۱۶	۴۱	V+L	۴۱۰	۱۶
۹	V+L	۳۹۲	۱۵	۴۲	V+L	۵۳۰	۱۳
۱۰	V+L	۴۱۱	۱۳	۴۳	V+L	۵۳۶	۱۵
۱۱	V+L	۲۸۴	۱۸	۴۴	L+V	۴۰۲	۳۸
۱۲	V+L	۳۱۲	۲۰	۴۵	L+V	۴۵۳	۴۷
۱۳	V+L	۲۷۲	۱۶	۴۶	L+V	۴۶۹	۵۱
۱۴	V+L	۲۳۸	۱۲	۴۷	L+V	۲۸۸	۱۳
۱۵	V+L	۲۹۹	۱۷	۴۸	L+V	۳۰۵	۱۲
۱۶	V+L	۳۴۱	۱۵	۴۹	L+V	۳۳۳	۱۱
۱۷	L+V+S	۳۸۳	۴۲	۵۰	L+V	۴۱۹	۴۶

ادامه جدول ۱.

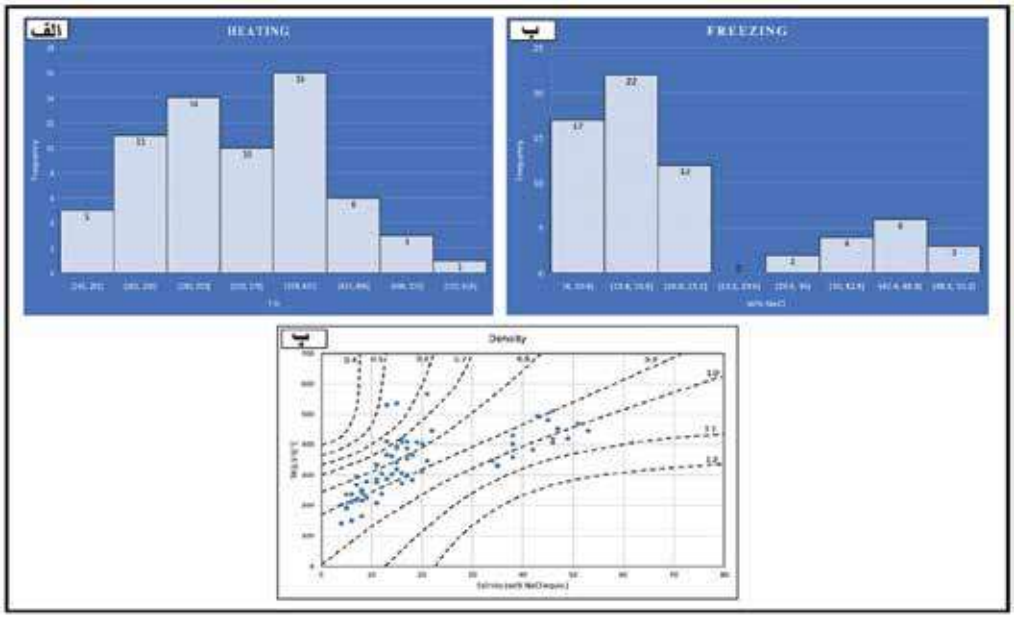
	نوع میانبار سیال	دما	شوری		نوع میانبار سیال	دما	شوری
۱۸	L+V	۲۱۸	۷	۵۱	L+V	۳۰۳	۱۴
۱۹	L+V	۲۷۹	۹	۵۲	L+V	۳۵۵	۱۷
۲۰	L+V	۲۳۶	۵	۵۳	V+L	۵۶۷	۲۱
۲۱	L+V	۱۵۰	۶	۵۴	L+V	۳۹۵	۱۵
۲۲	V+L	۳۸۸	۱۷	۵۵	L+V	۳۸۹	۱۵
۲۳	V+L	۴۰۲	۲۰	۵۶	L+V	۴۱۰	۱۷
۲۴	V+L	۴۲۰	۱۶	۵۷	L+V	۱۴۲	۴
۲۵	V+L	۳۶۶	۱۸	۵۸	L+V	۱۹۲	۵
۲۶	V+L	۳۱۹	۱۵	۵۹	L+V	۲۰۳	۴
۲۷	V+L	۴۴۶	۲۲	۶۰	L+V	۲۹۵	۷
۲۸	L+V+S	۴۸۱	۴۵	۶۱	L+V+S	۳۴۸	۳۴
۲۹	L+V+S	۴۳۰	۳۸	۶۲	L+V+S	۴۴۶	۵۳
۳۰	L+V+S	۴۹۵	۴۳	۶۳	L+V+S	۴۲۱	۴۹
۳۱	L+V	۱۹۱	۵	۶۴	L+V	۳۶۶	۱۳
۳۲	L+V	۲۱۳	۶	۶۵	V+L	۴۰۹	۱۹
۳۳	L+V	۲۵۱	۸	۶۶	L+V+S	۵۱۱	۴۶

دما، شوری و چگالی سیالات درگیر

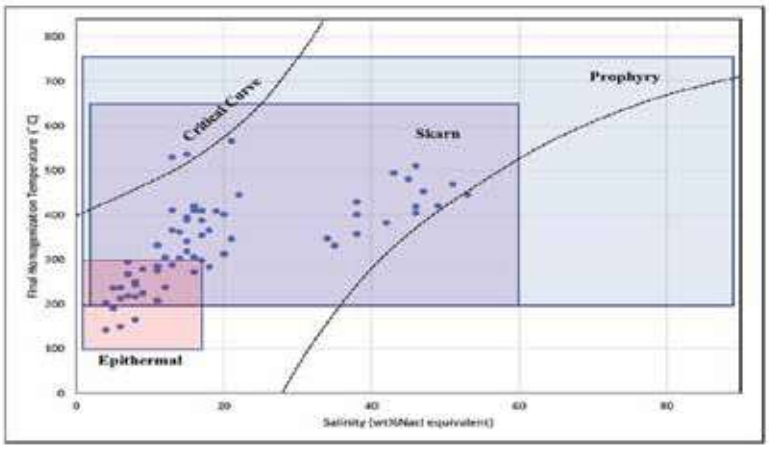
داده‌های ریزدماسنجی میانبارهای سیال نشان می‌دهد که کانی‌سازی در گستره مجیدآباد در گستره دمایی ۱۴۲ تا ۵۶۷ درجه سانتی‌گراد و با بیشترین فراوانی در دمای ۳۷۸ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته است. دو قله حرارتی در بازه ۲۶۰ تا ۳۱۹ و ۳۷۸ تا ۴۳۷ درجه سانتی‌گراد در میانبارهای سیال دیده می‌شود (شکل ۷-الف)، که بازه اول مربوط به فاز کانی‌سازی اپی‌ترمال حرارت بالا و فاز دوم مربوط به فاز کانی‌سازی پورفیری در این گستره است. کانی‌سازی در گستره مجیدآباد با سیال‌هایی با شوری پایین تا به نسبت بالا (چهار تا ۵۳ درصد وزنی معادل نمک طعام) رخ داده است. دو قله شوری در بازه ۱۰/۴ تا ۱۶/۸ و ۴۲/۴ تا ۴۸/۸ درصد وزنی معادل نمک طعام در میانبارهای سیال مشاهده می‌شوند (شکل۷-ب). گستره شوری میانبارهای سیال، حضور دو نوع سیال طی کانی‌سازی را نشان می‌دهد: یکی با شوری بالا (بیش از ۲۰ درصد وزنی معادل NaCl) و دیگری با شوری به نسبت پایین (کمتر از ۲۰ درصد وزنی معادل NaCl). براساس نمودار چگالی (شکل۷-پ)، گستره چگالی میانبارهای سیال بین ۰/۵۵ تا ۱/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. چگالی‌های پایین مربوط به میانبارهای سیال از نوع دوفازی غنی از گاز (V+L) با درجه پرشدگی کمتر از ۵۰ درصد و چگالی‌های بالا مربوط به میانبارهای سیال از نوع سه‌فازی از نوع (L+V+S) با شوری بالا می‌باشند.

خاستگاه و روند تکامل سیال

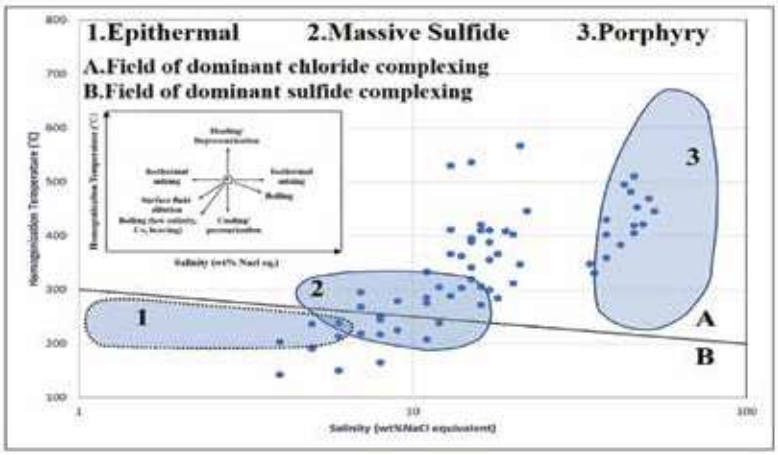
براساس داده‌های میانبارهای سیال، در نمودار دمای همگن‌شدن-شوری (شکل ۸ و ۹)، الگوی کلی کانی‌سازی در این گستره با سیستم‌های پورفیری مطابقت دارد و تعدادی از نمونه‌ها هم در گستره کانسارهای اپی‌ترمال قرار می‌گیرند. لیگاندهای موثر در حمل و نقل فلزات از نوع کلریدی و سولفیدی بوده و پدیده جوشش، سرد شدن و رقیق‌شدگی با سیال‌های جوی عامل اصلی ته‌نشست عناصر فلزی و رخداد کانی‌سازی در گستره مجیدآباد است (شکل۹). سیال مسئول کانی‌سازی در گستره مجیدآباد سیالی مرکب بوده که از آمیختگی آب‌های ماگمایی با آب‌های دگرگونی و دریایی تشکیل شده است (شکل۱۰). چنین فرآیندی در بسیاری از کانسارهای گرمابی در ارتباط با سامانه‌های پورفیری دیده می‌شود (لاجوئی کلاکی و همکاران، ۱۴۰۰؛ رحیمی و همکاران، ۱۴۰۱؛ امینی و معانی‌جو، ۱۴۰۲).



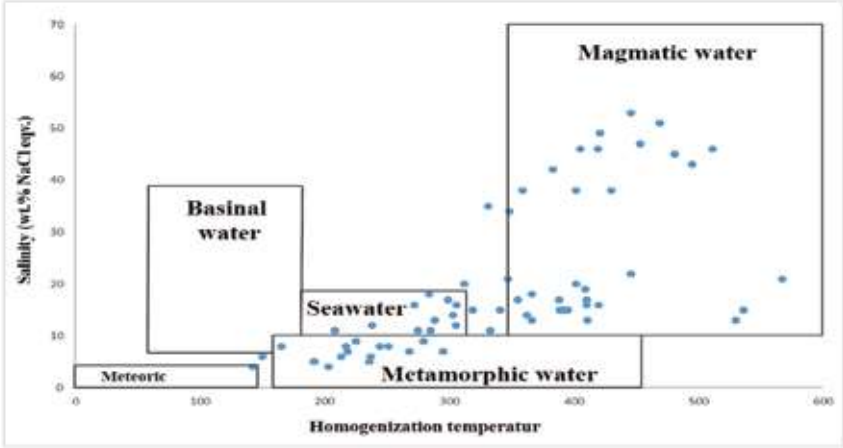
شکل ۷. الف) دمای همگن‌شدن، ب) شوری، پ) چگالی میانبارهای سیال در رگه-رگچه‌های کوارتزی گستره مجیدآباد



شکل ۸. نمودار دمای همگن‌شدگی-شوری در کانسارهای مختلف (Wilkinson، 2001)



شـــکل ۹. نمودار دمای همگن‌شدگی-شوری میانبارهای سیال برای تعیین نوع کمپلکس‌های حمل‌کننده فلزات و موقعیت آنها در کانسارهای مختلف (Pirajno، 2009)



شکل ۱۰. نمودار دمای همگن‌شدگی-شوری برای تعیین خاستگاه سیال‌های کانه‌ساز در گستره مجیدآباد (Kesler، 2005)

نتیجه‌گیری

شواهد صحرایی و بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که نفوذ توده‌های مونزودیوریتی و گابرویی در سنگ‌های آتشفشانی همراه با عملکرد گسل‌ها در شکل‌گیری کانی‌سازی موثر بوده است. کانه‌زایی در گستره مجیدآباد به‌صورت پراکنده و رگه-رگچه‌ای در گسل‌ها، شکستگی‌ها و درزه‌ها رخ داده است و در آن کانی‌های سولفیدی و سیلیس در اثر نهشت مستقیم از سیال‌های گرمابی کانه‌زا تشکیل شده‌اند. با بررسی کانه‌ها در مقاطع صیقلی و نازک‌صیقلی، کانه‌زایی به انواع درونزاد و برونزاد قابل جدا کردن است. کانه‌های درونزاد شامل پیریت و کالکوپیریت هستند که در اثر غنی‌شدگی‌های ثانویه، کانی‌های برونزاد کالکوسیت، کوولیت، هماتیت، لیمونیت، گوتیت و مالاکیت تشکیل شده‌اند. اغلب میانبارهای سیال مورد بررسی، دوفازی غنی از مایع (L+V) بوده و میانبارهای سیال دوفازی غنی از گاز (V+L) با فراوانی کمتری نسبت به میانبارهای دوفازی غنی از مایع (L+V) در نمونه‌ها قابل تشخیص هستند. میانبارهای سیال تک‌فاز گازی و مایع به‌صورت منفرد، پراکنده و دنباله‌دار در بلورهای کوارتز مشاهده می‌شوند. در برخی از میانبارهای سیال فاز نوزاد هالیت مشاهده می‌شود که دلیل بر بالا بودن شوری در سیال است. کانی‌سازی در گستره مجیدآباد توسط سیال‌هایی با شوری پایین تا به نسبت بالا (چهار تا ۵۳ درصد وزنی معادل نمک طعام)، در گستره دمایی ۱۴۲ تا ۵۶۷ درجه سانتی‌گراد و دارای چگالی ۰/۵۵ تا ۱/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب صورت گرفته است. ریزدماسنجی میانبارهای سیال نشان داد که کمپلکس‌های کلریدی و سولفیدی نقش مهمی در حمل فلزات کانسنگی داشته‌اند و فرآیندهای جوشش و رقیق‌شدگی از عوامل موثر در نهشت کانی‌های کانسنگی بوده‌اند. سیال مسئول کانی‌سازی در گستره مجیدآباد سیالی مرکب بوده که از آمیختگی آب‌های ماگمایی با آب‌های دگرگونی و دریایی تشکیل شده است. چنین فرآیندی در بسیاری از کانسارهای گرمابی در ارتباط با سامانه‌های پورفیری دیده می‌شود. این داده‌ها در نمودارهای دمای همگن‌شدگی-شوری، هم‌پوشانی بسیاری با قلمرو کانسارهای اپی‌ترمال تا پورفیری دارند.

منابع

- امینی، ل. و معانی‌جو، م.، ۱۴۰۲. بررسی رخداد جوشش بر مبنای شواهد کانی‌شناسی، بافتی و میان‌بارهای سیال در کانسارهای اپی‌ترمال: مطالعه موردی کانسار چاه مراد، سیستان و بلوچستان، ایران. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳، ۲۰-۱.
- رادمرد، ک.، زمانیان، ح.، حسین زاده، م.ر. و احمدی خلجی، ا.، ۱۳۹۶. بررسی کانی‌سازی، زمین‌شیمی و میانبارهای سیال در رگه‌های کوارتز در ذخیره طلای مزرعه شادی (شمال شرق تبریز). مجله بلورشناسی و

کانی‌شناسی ایران، ۲۵، ۸۴۴-۸۲۳.

- رحیمی، ن.، نیرومند، ش.، لطفی، م. و رحیمی شهید، م.، ۱۴۰۲. زمین شناسی، کانی شناسی و مطالعه میانبارهای سیال در کانسار مس-مولیبدن پورفیری جانجا، پهنه زمین‌درز سیستان، جنوب خاور ایران. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۲، ۳۰-۱۳.

- زرناب اکتشاف (مهندسین مشاور)، ۱۳۸۶. مطالعات زمین‌شناسی و دگرسانی در منطقه هفت‌چشمه. شرکت ملی صنایع مس ایران.

- لاجوئی کلاکی، م.س.، اکبرپور، ا.، تارانتولا، ا.، حسن‌پور، ش.، محمدی، ب. و پشتکوهی، ک.، ۱۴۰۰. سنگ‌نگاری، کانی‌شناسی، لیتوژئوشیمی و مطالعات میانبارهای سیال در کانسار طلا-مس قشلاق میل، شمال باختر ساوه، ایران. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۱، ۲۱۲-۱۹۹.

- محمدی، م. و برنا، ب.، ۱۳۸۵. گزارش زمین‌شناسی و حفاری در منطقه مسجد داغی. شرکت ملی صنایع مس ایران.

- مهدوی، م.ا. و امینی‌فضل، ا.، ۱۳۶۸. نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اهر. سازمان زمین‌شناسی ایران.

- مهرپرتو، م.خ. و ناظر، ن.، ۱۳۷۸. نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کلیبر. سازمان زمین‌شناسی ایران، تهران.

- نبوی، م.ح.، ۱۳۵۵. دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی ایران، ۱۱۰.

- Alavi, M., 2007. Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. American Journal of science, 307(9), 1064-1095.

- Alirezaei, S., Ebrahimi, S. and Pan, Y., 2008. Fluid inclusion characteristics of epithermal precious metal deposits in the Arasbaran metallogenic zone, Northwestern Iran [extended abs.], ACROFI-II, India, 1-4.

- Calagari, A. A., 2004. Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azarbaidjan, Iran. Journal of Asian Earth Science, 23, 179-189.

- Chi, G. and Guha, J., 2011. Microstructural analysis of a subhorizontal gold-quartz vein deposit at Donalda, Abitibi greenstone belt, Canada: Implications for hydrodynamic regime and fluid-structural relationship. Geoscience Frontiers, 2, 529-538.

- Dercourt, J.E, Zonenshain, LP, Ricou, LE, Kazmin, V. G., Le Pichon, X., Knipper, A.L., Grandjacquet, C., Sbortshikov, I.M., Geyssant, J.,Lepvrier, C. and Pechersky, D.H., 1986. Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to the Pamirs since the Lias. Tectonophysics, 123(1-4), 241-315.

- Dilek, Y., Imamverdiyev, N. and Altunkaynak, S., 2010. Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint. International Geology Review, 52(4-6), 536-578.

- Ebrahimi, S., Alirezaei, S. and Pan, Y., 2011. Geological setting, alteration, and fluid inclusion characteristics of Zaglic and Safikhanloo epithermal gold prospects, NW Iran. Geological Society, London, Special Publications, 350(1), 133-147.

- Ghorbani, M., 2013. A summary of geology of Iran, In The Economic Geology of Iran, Springer, Dordrecht, 45-64.

- Hajalilou B. and Aghazadeh M., 2016. Fluid Inclusion Studies on Quartz Veinlets at the Ali Javad Porphyry Copper (Gold) Deposit, Arasbaran, Northwestern Iran. Journal of Geoscience and Environment Protection, 4 (06), 80-91.

- Hezarkhani, A., 2006. Petrology of the intrusive rocks within the Sungun porphyry copper deposit, Azerbaijan, Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 27(3), 326-340.

- Innocenti, F., Mazzuoli, R., Pasquare, G., Radicati di Brozolo, F. and Villari, L., 1982. Tertiary and quaternary volcanism of the Erzurumkars area (Eastern Turkey): geochronological data and geodynamic evolution. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 13, 223-240.

- Jamali, H., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpur, A. and Mehrabi, B., 2010. Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar-

Arasbaran volcanic belt, northern Iran. International Geology Review, 52(4-6), 608-630.

- Jamali, H. and Mehrabi, B., 2015. Relationships between arc maturity and Cu-MO-Au porphyry and related epithermal mineralization at the Cenozoic Arasbaran magmatic belt. Ore Geology Review, 31, 123-138.

- Kant, W., Warmada, I.W., Idrus, A., Setijadji, L.D. and Watanabe, K., 2012. Fluid inclusion study of the polymetallic epithermal quartz veins at Soripesa prospect area, Sumbawa island Indonesia. Asian Applied Geology, 4(2), 77-89.

- Kesler, S.E., 2005. Ore forming fluids. Elements, 1, 13-18.

- Moncada, D. and Bodnar, R. J., 2012. Gangue mineral textures and fluid inclusion characteristics of the Santa Margarita Vein in the Guanajuato Mining District, Mexico. Central European Journal of Geosciences, 4(2), 300-309.

- Pirajno, F., 2009. Hydrothermal processes and mineral systems. Springer Science, New York, 1273.

- Randive, K.R., Hari, K.R., Dora, M.L., Malpe, D.B. and Bhondwe, A.A., 2014. Study of fluid inclusion: methods, techniques and applications. Geological Magazine, 29, 19-28.

- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy. Mineralogical Society of America, Washington, 12, 644.

- Sheppard, S. M. and Harris, C., 1985. Hydrogen and oxygen isotope geochemistry of Ascension Island lavas and granites: variation with crystal fractionation and interaction with sea water. Contributions to Mineralogy and Petrology, 91, 74-81.

- Shimizu, T., 2018. Fluid Inclusion Studies of Comb Quartz and Stibnite at the Hishikari Au-Ag Epithermal Deposit, Japan. Resource Geology, 68(3), 326-335.

- Simmonds, V., Calagari, A.A. and Kyser, K., 2015. Fluid inclusion and stable isotope studies of the Kighal porphyry Cu-Mo prospect, East-Azarbaidjan, NW Iran. Arabian Journal of Geosciences, 8, 473-453.

- Simmonds, V. and Moazzen, M., 2015. Re-Os dating of molybdenites from Oligocene Cu-Mo-Au mineralized veins in the Qarachilar area, Qaradagh batholith (northwest Iran): Implications for understanding Cenozoic mineralization in South Armenia, Nakhchivan, and Iran. International Geology Review, 57, 290-304.

- Simmons, S.F., White, N.C. and John, D.A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. Economic Geology, 100, 485-522.

- Tun, M.M., Warmada, I.W., Idrus, A., Harijoko, A., Verdiansyah, O. and Watanabe, K., 2014. Fluid inclusion studies of the epithermal quartz veins from Sualan prospect, west Java, Indonesia. Journal of SE Asian Applied Geology, 6, 62-67.

- White, N.C. and Hedenquist, J.W., 1995. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. Society of Economic Geologists Newsletter, 23(1), 9-13.

- Whitney, D.W. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock forming minerals. American Mineralogist, 95, 185-187.

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

- Zarasvandi, A., Zaheri, N., Pourkaseb, H., Chrachi, A. and Bagheri, H., 2014. Geochemistry and fluid inclusion micro thermometry of the Farsesh barite deposit, Iran. Geologos, 20, 201-214.