

بررسی کانی‌شناسی، رخداد کانی‌سازی و شرایط دما-فشار کانسار چندفلزی آق‌درق، منطقه فلززایی اهر - ارسباران

حیدر اصغرزاده اصل^{۱*}، بهزاد مهرابی^۱ و ابراهیم طالع فاضل^۲

(۱) گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

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

دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۱۹، پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۰۵

چکیده

منطقه فلززایی اهر- ارسباران (زون قره‌داغ) از دیدگاه کانی‌سازی‌های طلا، مس و مولیبدن دارای اهمیت بالایی است که این کانی‌سازی‌ها اغلب هم‌زمان با رخداد ماگماتیسم در محدوده زمانی ائوسن- الیگوسن شکل گرفته است. منطقه آق‌درق در بخش شرقی توده نفوذی شیورداغ (باتولیت اهر)، متشکل از سنگ‌های رسوبی مزوزوئیک و آذرین نیمه عمیق کالک‌آلکان به سن الیگوسن است. روند اغلب گسل‌ها در این منطقه شمال شرق- جنوب غرب است. کانی‌سازی‌های آق‌درق در سه بخش چوپانلار، آیران‌گلی و گودال با حضور عناصر مس (سطللا-تنگستن) و کانی‌های کالکوپیریت، مگنتیت، روتیل، اسفالریت، شیلیت و طلای آزاد رخ داده است. بافت و ساخت کانی‌سازی شامل رگه- رگه‌چه‌ای، استوک و رک، انتشاری، جانشینی و پرکننده فضای خالی است که آن را دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک و آرژیلیک همراهی می‌کنند. طبق شواهد پتروگرافی میان‌بارها، سه نوع میان‌بار شامل میان‌بارهای آبگین دارای فاز هالیت ($H_2O-NaCl \pm KCl$)، دو فاز آبگین ($H_2O-NaCl \pm CaCl_2$)، و تک فاز مایع و گاز در رگه‌های کوارتز- سولفیدی تشخیص داده شد. طبق شواهد، به نظر می‌رسد سیالات نخستین با شوری ۳۱/۴ تا ۴۴/۵ درصد معادل نمک طعام و دمای ۲۰۱ تا ۴۷۴°C از نفوذی‌های اسیدی تا حدواسط که حاوی کانه‌زایی قلع- تنگستن هستند، از عمق تقریبی ۴ کیلومتر سرچشمه گرفته‌اند. پس از آن، با صعود سیالات به عمق کم و اختلاط با آب‌های سطحی، کانه‌زایی چندفلزی غنی از طلا در منطقه رخ داده است.

واژه‌های کلیدی: میان‌بارهای سیال، مراحل کانی‌سازی، منطقه فلززایی اهر- ارسباران، آق‌درق

مقدمه

ژئوشیمیایی، این مجموعه در دو دسته شوشونیتی و کلسیمی-قلیایی تا کلسیمی-قلیایی پتاسیم بالا قرار می‌گیرند که دسته شوشونیتی اغلب در بخش مرکزی و دسته کلسیمی-قلیایی غالباً در بخش غربی و شرقی آن گسترش دارد (Aghazadeh, 2009). منطقه فلززایی اهر از نظر کانی‌سازی‌های چندفلزی از قبیل فلزات پایه، طلا، نقره و مولیبدن دارای اهمیت بالایی است که تشکیل آنها اغلب مرتبط با رخداد ماگماتیسم ترشیری در منطقه است (Jamali, 2012). کانی‌سازی‌ها در منطقه اغلب شامل طیفی از کانسارهای اسکارن-پسورفیری نظیر کانسارهای مزرعه، سونگون و

محور فلززایی اهر- ارسباران (زون قره‌داغ) در شمال غرب ایران و غرب دریای مازندران، طبق تقسیم‌بندی واحدهای ساختاری ایران توسط نبوی (Nabavi, 1976) در کمربند ماگمایی البرز- آذربایجان قرار می‌گیرد (شکل ۱). مجموعه نفوذی شیورداغ (باتولیت اهر) و سنگ‌های نیمه نفوذی و خروجی همراه آن، با راستای شرقی- غربی و طول تقریبی ۳۰ کیلومتر، در شمال شهرستان اهر رخنمون دارد که از مهمترین رخدادهای ماگمایی ائوسن- الیگوسن در این منطقه به‌شمار می‌رود. از دیدگاه

WNW-ESE و پهنای ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتر، متعلق به بخش غربی این کمربند، پس از گذر از ارمنستان تا کمان پونتايد شرقی در شمال شرق ترکیه ادامه دارد (شکل ۱-۱A). سنگ بستر بلورین این کمربند مربوط به واحدهای پالئوزوئیک و پرکامبرین بالایی (واحد پان افریقا) و متعلق به گندواناست. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی آذرین این زون متعلق به سنگ‌های ولکانیک مافیک تا فلسیک (آندزیت و داسیت) و پلوتون‌های گرانودیوریت و گابرو دیوریت است که تحت تأثیر تحولات تکتونو-ماگمایی تیس در حاشیه اوراسیا در قفقاز کوچک نیز رخمون دارد (Dilek et al., 2010). فعالیت‌های ماگمایی سنوزوئیک در کمربند اهر-ارسباران، با فعالیت‌های ولکانیکی حدواسط تا اسیدی شدید از ائوسن آغاز شده و متعاقباً با جایگیری توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی، طی الیگوسن-میوسن ادامه یافته است (شکل ۱-۱B). این توده‌های درشت تا متوسط بلور، اغلب شامل گرانودیوریت و مونزونیت بوده است که هاله‌های دگرسانی و کانی‌سازی چندفلزی وسیعی را در اطراف خود تشکیل داده‌اند. پس از میوسن، گنبد‌های ولکانیکی اسیدی متعددی، به‌ویژه در جنوب زون اهر-ارسباران تشکیل شدند که از جمله آنها می‌توان به مارانو، خشک‌سرای و بهلول‌داغی اشاره کرد (Moayyed, 2001). پس از آن، طی محدوده زمانی پلیوسن-کواترنر، سنگ‌های تراکی آندزیت و بازالت همه واحدهای قبلی و به‌ویژه منطقه سبلان و اطراف ورزقان را در بر گرفته و همراه آن چشمه‌های آب گرم فراوانی تشکیل شده است. توده‌های نفوذی سنوزوئیک در محدوده اهر-ارسباران از نوع گرانیتوئیدهای نوع I و ماهیت متالومین تا پرآلومین بوده که در نمودار عناصر آلکالی کل ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) در مقابل SiO_2 شامل طیفی از سنگ‌های ساب‌آلکان تا آلکان است. در این میان، پلوتون‌های جوان با جنس کوارتز مونزونیت تا مونزونیت با محتوای عناصر آلکالی بالاتری نسبت به توده‌های نفوذی قدیمی شناخته می‌شوند (Jamali et al., 2009).

زمین‌شناسی منطقه معدنی

مجموعه نفوذی شیورداغ

چنان‌که اشاره شد، رخداد فعالیت‌های ماگمایی گسترده در کمربند

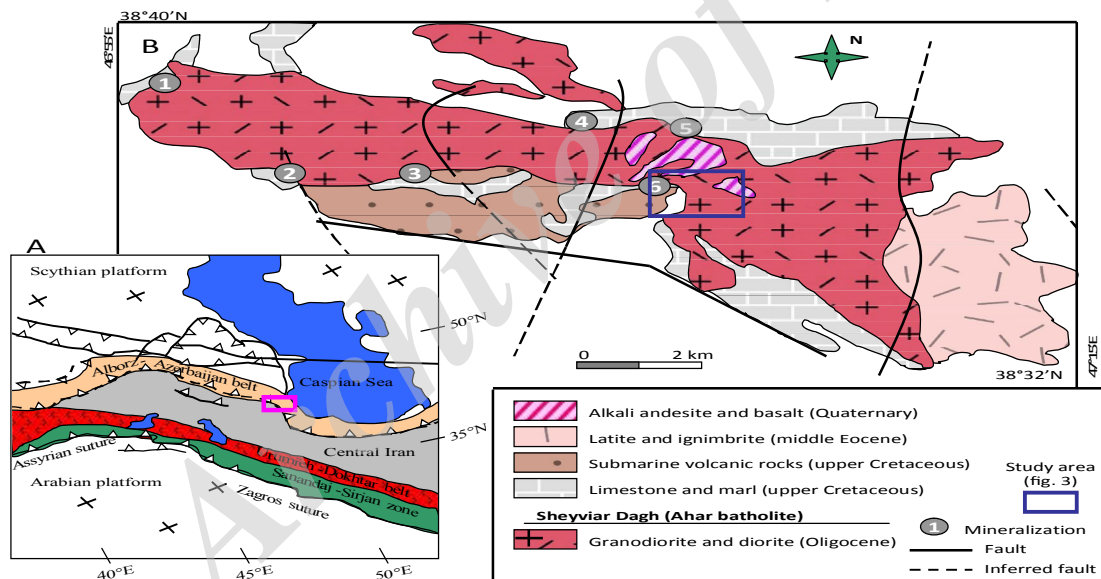
مسجدداغی (Mollai et al., 2009; Asghari and Hezarkhani, 2010)، و یا کانسارهای مرتبط با توده‌های نفوذی مانند کانسار میوه‌رود (Jamali, 1998) و کانسار اپی‌ترمال مانند ذخیره صفی خانلو (Ghadimzade, 2002) است. در اطراف توده نفوذی شیورداغ کانی‌سازی‌های چندفلزی متعددی رخ داده است که از جمله آنها می‌توان به منطقه پی‌جویی آق‌درق واقع در بخش شرقی این توده اشاره کرد (شکل ۱). منطقه معدنی آق‌درق متشکل از سه بخش کانه‌زایی چوپانلار، آیران‌گلی و گودال، با وسعت تقریبی ۳۳ کیلومتر مربع، در فاصله ۱۵ کیلومتری شمال اهر و جنوب شرقی معدن مس مزرعه قرار گرفته است (شکل ۱). منطقه مورد بررسی در جنوب غربی برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کلیبر (Mehrpour and Nazer, 1999) و نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ آرپزان قرار می‌گیرد. در این پژوهش بررسی ویژگی‌های بافتی، شیمی کانی‌ها و بررسی میان‌بارهای سیال در سه منطقه کانه‌زایی منطقه پی‌جویی آق‌درق انجام شده است. این بررسی‌ها به‌منظور دست‌یابی به نحوه رخداد ذخیره، مراحل تکامل ذخیره بر اساس ویژگی‌های P-T-X سیال، تعیین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و سازوکار ته‌نشست فلز و دست‌یابی به مدل زایشی کانسار انجام شده است. دسترسی به این ویژگی‌ها می‌تواند نقشی مؤثر در بررسی نحوه توزیع و مهاجرت فلزات مختلف در منطقه داشته باشد که برای پیشبرد اهداف اکتشافی در منطقه اهر-ارسباران نیز مفید است.

زمین‌شناسی ناحیه‌ای

کمربند ماگمایی البرز به طول تقریبی ۲۳۰۰ کیلومتر و راستای شرقی-غربی از جنوب دریای مازندران آغاز شده و پس از عبور از قفقاز کوچک تا غرب ترکیه ادامه یافته است (شکل ۱-۱A). این کمربند توسط گسل بزرگ رشت-تاکستان به دو بخش شرقی و غربی تفکیک شده که بخش شرقی متشکل از توف‌های بازیک تا اسیدی با ماهیت شوشونیتی تا آلکان بوده (Blourian, 1994) و بخش غربی متشکل از لاواهای آندزیتی تا ریوداسیتی و چندین توده گرانیتوئیدی با ماهیت کالک‌آلکان است (Moayyed, 2001). کمربند ولکانیکی اهر-ارسباران (زون قره‌داغ) با راستای

نقل شده است. در این میان، باتولیت اهر با جنس گرانودیوریت، دیوریت، گابرو و آلکالی سینیت، متشکل از کانی‌های کوارتز (۶ تا ۱۵ درصد)، پلاژیوکلاز (۲۴ تا ۴۳ درصد)، فلدسپارپتاسیم (۲۰ تا ۴۸ درصد، اغلب به رنگ صورتی)، هورنبلند (صفر تا ۱۰ درصد)، بیوتیت (صفر تا ۵ درصد) و کانی‌های فرعی آپاتیت، مگنتیت و تیتانیت (صفر تا ۳ درصد) است (Mollai et al., 2009). بر اساس ویژگی‌های شیمی سنگ کل، باتولیت اهر با ماهیت کالک‌آلکالن و دسته گرانئوئیدی نوع I، در موقعیت توده‌های نفوذی زون‌های فروانش حاشیه فعال قاره‌ای قرار می‌گیرد. با استفاده از شیمی کانی فلدسپار نیز، دمای تشکیل این توده باتولیتی بین ۷۰۰ تا ۷۵۰°C تخمین زده شده است (Mollai et al., 2009).

ولکانیکی اهر- ارسباران، طی مدت زمان کمتر از ۲۰ میلیون سال به تشکیل سنگ‌های ولکانیک، نیمه نفوذی و نفوذی متعددی منجر شده است که بخش عمده توالی‌های چینه- سنگی منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. مجموعه نفوذی شیورداغ^۱ یا باتولیت اهر، با درازای تقریبی ۳۰ کیلومتر و پهنای متغیر ۳ تا ۱۰ کیلومتر و راستای شرقی- غربی از مهمترین پدیده‌های ماگمایی منطقه محسوب می‌شود. این مجموعه شامل توالی‌های رسوبی- آتشفشانی (لاتیت و ایگنمبریت)، سنگ‌های نیمه نفوذی و نفوذی اسیدی- حدواسط بوده، که کانسارها و نشانه‌های معدنی فراوانی در بخش‌های مختلف آن گزارش شده است (شکل ۱- B). فعالیت‌های ماگمایی اهر توسط لسکویرا و ریو (Lescuyer and Riou, 1976) و اوایل الیگوسن و با استفاده از پژوهش‌های هزارخانی (Hezarkhani, 2006) سن ۲۰ میلیون سال (اوایل میوسن)



شکل ۱. A: نقشه زمین‌ساختی کمربند تتیس که در آن موقعیت کمر بند ماگمایی البرز- آذربایجان و واحدهای زمین‌ساختی اصلی نشان داده شده است (Rolland et al., 2009) و B: نقشه زمین‌شناسی ساده شده مجموعه نفوذی شیورداغ (باتولیت اهر) که در آن موقعیت کانه‌زایی‌های مختلف (شماره ۱ تا ۶) نشان داده شده است. مناطق کانه‌زایی شامل، (۱) انجرد، (۲) زند آباد، (۳) جوان شیخ، (۴) مزرعه، (۵) اسکارن گارنت رگه‌ای و (۶) گودال است.

Fig. 1. A: Tectonic map of the Tethys belt showing the Alborz-Azerbaijan belt and main tectonic unites (Rolland et al., 2009), and B: Simplified geological map of the Shyviar Dagh intrusive rock (Ahar batholite) with mineralization locality (1 to 6 no.). Mineralization area including, 1) Anjerd, 2) Zand Abad, 3) Javan Sheikh, 4) Mazraeh, 5) vein-type garnet skarn and 6) Gowdal.

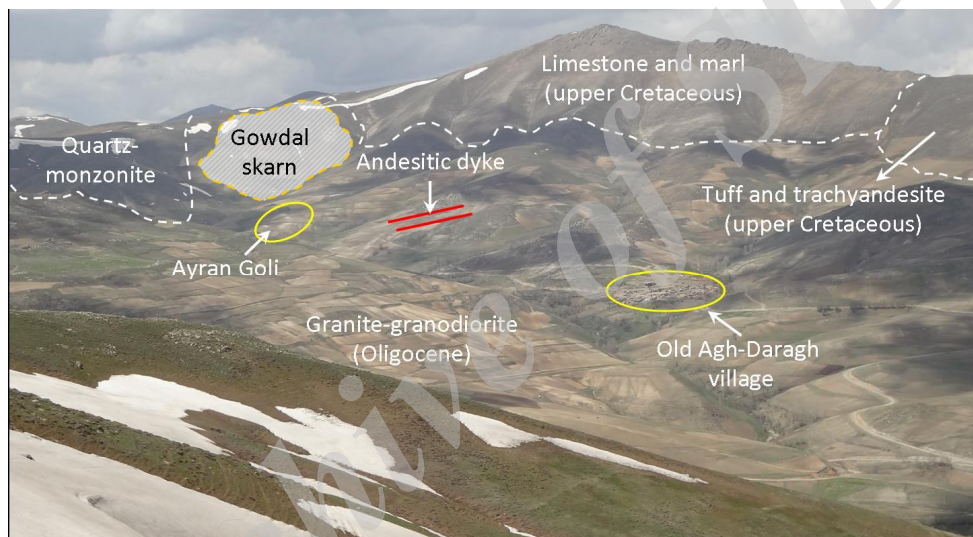
سنگ‌شناسی اصلی شامل سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی- رسوبی (کرتاسه بالایی- پالئوسن) و سنگ‌های آذرین نفوذی (اوسن- الیگوسن) در منطقه کانه‌زایی آق‌درق رخنمون دارند (شکل ۲).

زمین‌شناسی آق‌درق

منطقه معدنی آق‌درق در بخش شرقی مجموعه نفوذی شیورداغ (باتولیت اهر) قرار گرفته است (شکل ۱). به‌طور کلی دو واحد

سن توده نفوذی شیورداغ با استفاده از روش ایزوتوپی U/Pb بر روی زیرکن در حدود ۲۴-۳۲ میلیون سال (الیگوسن) تعیین شده است (Aghazadeh, 2009). در منطقه مورد بررسی، کانه‌زایی‌های چندفلزی مس-آهن-طلا در مناطق معدنی چوپانلار (با میزبان کوارتز مونزونیت)، آیران گلی (در میزبان گرانودیوریت) و کانی‌سازی اسکارن گودال در حد فاصل واحد نفوذی استوک کوارتز مونزونیت (الیگوسن) و سنگ‌های کربناته تبلور مجدد یافته (کرتاسه بالایی) در شمال غرب منطقه آق‌درق تشکیل شده است. ارتباط مکانی مناطق کانه‌زایی آیران گلی و اسکارن گودال در شکل ۲ نمایش داده شده است.

قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه متعلق به محدوده زمانی کرتاسه بالایی-پالئوسن بوده که عمدتاً شامل سنگ‌های نیمه نفوذی تا آتشفشانی-رسوبی زیر دریایی از قبیل توف سبز، گدازه‌های بازالتی، لاتیت پورفیری و تراکی آندزیت (افق زیرین) و مجموعه سنگ‌های رسوبی آهک‌های خاکستری-مارنی (افق بالایی)، هستند. این سنگ‌ها اغلب در شمال و جنوب شرق منطقه آق‌درق رخنمون دارند (شکل ۳). پس از آن، طی الیگوسن، توده نفوذی شیورداغ با جنس گرانیت، مونزودوریت و کوارتز مونزونیت طی چند مرحله در این واحدها نفوذ کرده که بعدها، کل این مجموعه نیز توسط دایک‌هایی با ترکیب اسیدی تا حدواسط قطع شده است.



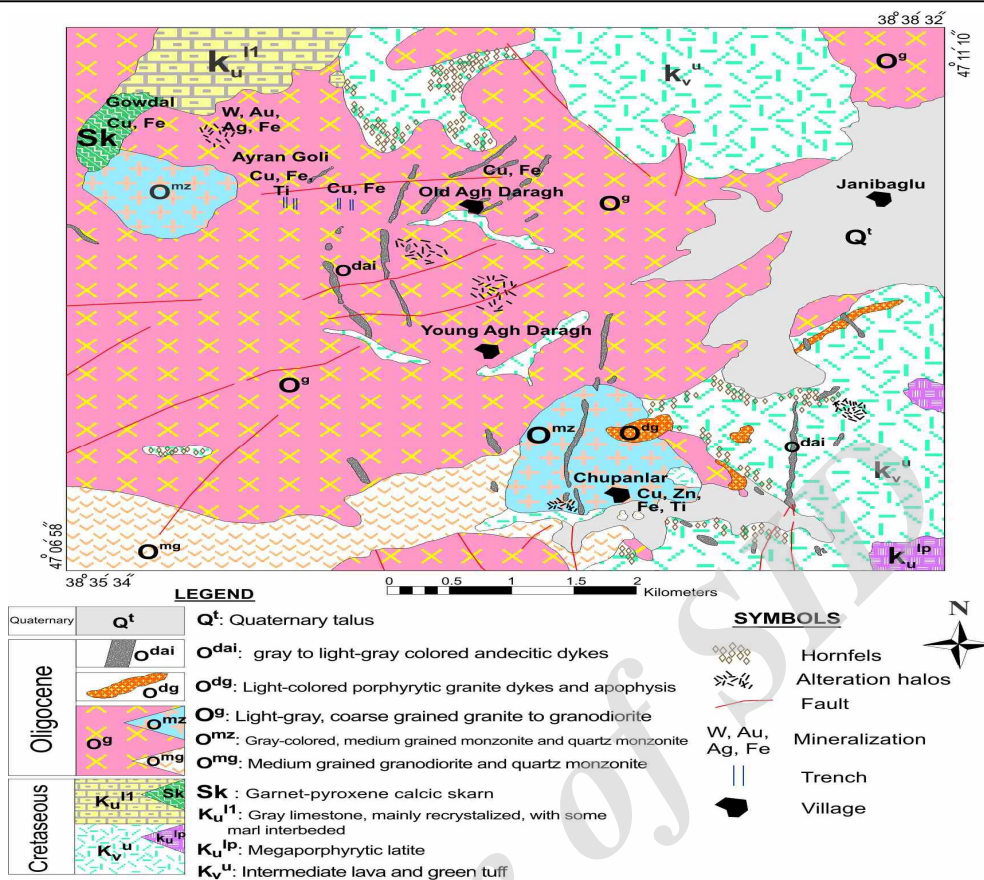
شکل ۲. تصویر دورنما از واحدهای سنگی منطقه معدنی آق‌درق و موقعیت مناطق کانه‌زایی آیران گلی و گودال در آن (دید به سمت شمال)

Fig. 2. Field photograph of lithological units in the Agh-Daragh mine area and situation of the Ayran Goli and Gowdal mineralization (photo is looking north)

و NNW-SSE در باتولیت اهر شکل گرفته که فاصله این درزه‌ها از چند سانتی‌متر تا چند متر متغیر است (Mollai et al., 2009). در درون این درزه‌ها رگه‌های آپلیت، پگماتیت و کوارتز و در مواردی کانی‌سازی مس به صورت مالاکیت نیز مشاهده می‌شود. در منطقه معدنی آق‌درق، پیرو این فعالیت‌های زمین‌ساختی دو روند ساختاری با راستاهای NNE-SSW و NE-SW تشخیص داده شد که دسته اول مرتبط با روند دایک‌های حدواسط تا اسیدی منطقه و دسته دوم در ارتباط با گسل‌های منطقه بوده که کنترل‌کننده کانه‌زایی نیز هستند (شکل ۳).

فعالیت‌های ساختاری

طی اواخر میوسن تا کواترنری منطقه قفقاز کوچک و ناحیه ارسباران تحت تأثیر فعالیت‌های هم‌زمان کششی و فشارشی ناحیه‌ای، ابتدا در راستای N-NW و سپس NNE دچار تغییراتی شدند. فشردگی‌های پوسته‌ای در راستای NNE پس از مدتی توسط فعالیت‌های کششی با راستای WNW دچار گسستگی شده و متعاقب آن فاز جوان ماگماتسیم با ماهیت آلکالن در منطقه شکل گرفته است (Mohajjel and Fergusson, 2000; Dilek et al., 2010). تحت تأثیر این فعالیت‌های کششی-فشارشی پوسته‌ای در مقیاس ناحیه‌ای، دست کم دو دسته درزه با راستاهای NNE-SSW



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه کانه‌زایی آق‌درق در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ (با تغییرات از Jamali, 2013)

Fig. 3. Simplified geological map of the Agh-Daragh mineralization area at 1:25000 scale (modified from Jamali, 2013).

روش مطالعه

نمونه‌برداری و مطالعات کانی‌شناسی

بررسی‌های کانه‌زایی در منطقه بر مبنای برگه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ آق‌درق-چوپانلار (Jamali, 2013) انجام شده است. بر این اساس، تعداد ۵۰ نمونه سنگی از واحدهای سنگ میزبان، کانسنگ و بخش‌های دگرسان مناطق سه‌گانه کانه‌زایی برداشت شد. نمونه‌برداری در بخش کانه‌زایی ایران‌گلی از تعداد ۴ ترانشه به طول مجموع بیش از ۲۵۰ متر برداشت شد. بررسی‌های پتروگرافی، کانی‌شناسی، بافت و ساخت بر روی این واحدها با استفاده از ۴۵ مقطع نازک، نازک-صیقلی و صیقلی توسط میکروسکپ نوری پلاریزان زایس (مدل Axioplan2) با نور عبوری و بازتابی در دانشگاه خوارزمی تهران انجام شد. همچنین، برای تشخیص کانی‌های دگرسان با دستگاه پراش اشعه ایکس^۱، تعداد ۱۰ نمونه پودری از واحدهای دگرسان در مرکز تحقیقات و فرآوری مواد

معدنی ایران مورد تجزیه قرار گرفتند. برای تعیین ترکیب، شناسایی کانی‌های کمیاب و تکمیل بررسی‌های میکروسکپی نوری، به تعداد ۱۲ کانی و ۶۲ نقطه از تجزیه نقطه‌ای به روش ریز کاو الکترونی^۲ استفاده شد. این آزمایش نیز با دستگاه مدل Cameca X100 با جریان ۲۰ میلی آمپر، ولتاژ ۱۵ تا ۲۵ کیلوولت و قطر پرتو ۲ تا ۵ میکرون در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران، انجام شد.

مطالعات میان‌بارهای سیال

پس از انجام بررسی‌های صحرایی و پتروگرافی، توالی پاراژنتیک کانی‌ها تعیین و بر اساس آن نمونه‌های مناسب برای بررسی میان‌بارهای سیال انتخاب شد. بر این اساس، تعداد ۵ مقطع دو برصیقل با ضخامت نسبی ۲۰۰ میکرون از کانی‌سازی رگه‌ای کوارتز-سولفیدی (stage II) مناطق ایران‌گلی و چوپانلار تهیه شد. بررسی‌های پتروگرافی و ریزدماسنجی نیز با استفاده از

1. X-ray Diffraction
2. Electron Micro Probe Analysis

مرتبط با کانی‌سازی استوک‌ورک-انتشاری و رگه‌ای کانسارهای چوپانلار و آیران‌گلی، است. دگرسانی‌های اصلی در منطقه شامل دگرسانی پتاسیک (فلدسپار پتاسیم)، فلیک و آرژیلیک است (شکل ۴) که به‌طور فرعی دگرسانی‌های کلریتی، سیلیسی و آغشتگی‌های اکسید/هیدروکسید آهن نیز آنها را همراهی می‌کند. دگرسانی پتاسیک یا فلدسپار پتاسیم در منطقه با حضور کانی‌های اصلی بیوتیت (به دو صورت اولیه و نئو فرمه)، فلدسپار پتاسیم درشت بلور و کانی‌های فرعی کوارتز، آلپیت و کلریت مشخص می‌شود. کانی‌های فلزی همراه این دگرسانی شامل کالکوپیریت، پیریت، مگنتیت و روتیل هستند. دگرسانی پتاسیک در مناطق کانه‌زایی چوپانلار و آیران‌گلی، به ترتیب همراه با کانی‌سازی استوک‌ورک-انتشاری مس-طلا و میزبان رگه‌چه‌های سانتی‌متری آمفیبول-بیوتیت تشکیل شده است (شکل ۴-۱).

دگرسانی فلیک در منطقه با حضور کانی‌های اصلی کوارتز ریزبلور، سریسیت و پیریت و کانی‌های فرعی آلپیت و کلریت مشخص می‌شود. این دگرسانی به‌ویژه در کانه‌زایی‌های آیران‌گلی و شرق روستای چوپانلار دارای رخنمون وسیعی بوده که در مجاورت زون پتاسیک تشکیل شده است (شکل ۴-۲). در این زون دگرسانی، کانی ثانویه سریسیت اغلب جانشین درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز شده و بلورهای کوارتز با ابعاد کوچکتر از ۰/۲ میلی‌متر در فضای اطراف آنها تشکیل شده است.

دگرسانی آرژیلیک در منطقه با حضور مجموعه کانی‌های مونت موریونیت، آلپیت، پیریت، مسکویت و ژیس قابل تشخیص است. دگرسانی آرژیلیک تقریباً در کل بخش‌های منطقه آق‌درق گسترش دارد؛ ولی بیشترین فراوانی آن در شرق روستای چوپانلار و شمال روستای آق‌درق جدید دیده می‌شود (شکل ۴-۱). بخش عمده این دگرسانی از تجزیه درشت‌بلورهای فلدسپار پتاسیم ایجاد شده و گسترش آن در امتداد زون‌های گسلی و شکستگی‌های محلی منطقه از اهمیت بیشتری برخوردار است. دگرسانی کلریتی، سیلیسی و آغشتگی‌های اکسید آهن نیز به‌طور فرعی در منطقه آق‌درق وجود دارد که در این میان دگرسانی سیلیسی اغلب همراه با زون کانه‌زایی کوارتز-سولفید رگه‌ای در منطقه آیران‌گلی دیده می‌شود. دگرسانی اکسید آهن نیز با حضور کانی‌های گوتیت،

میکروسکپ نوری پلاریزان زایس و صفحه گرم و سردکننده لینکام مدل THM600 با کنترل‌کننده حرارتی TMS94 و سردکننده LNP در دانشگاه خوارزمی تهران انجام شد. گستره تغییرات دمایی در این دستگاه بین ۱۹۰- تا ۶۰۰°C بوده که ترموکوپل دستگاه با استفاده از میان‌بارهای سنتزی در دماهای ۵۶/۶°C-، صفر و ۳۷۴/۱°C تنظیم شد. دقت اندازه‌گیری طی عملیات سرمایش در حدود ۱/۱°C± و طی عملیات گرمایش ۲°C± است. میزان عملیات سردکردن و گرم‌کردن نیز به‌طور تقریبی بین ۲ تا ۸°C در دقیقه متغیر بوده است.

کانی‌سازی

منطقه پی‌جویی آق‌درق واقع در بخش شرقی مجموعه نفوذی شیورداغ، تاکنون مورد توجه شرکت‌های معدنی و اکتشافی متعددی قرار گرفته که از آن عملیات‌های اکتشاف چکشی، حفر ترانشه و چاهک و نمونه‌برداری سطحی نیز انجام شده است. اغلب فعالیت‌های اکتشافی توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در سال ۲۰۱۳ انجام شده که گزارش‌های متعددی نیز از آن منتشر شده است (Jamali, 2013). بر مبنای این گزارش‌ها، سه بخش کانه‌زایی شامل چوپانلار (مس)، آیران‌گلی (مس±طلا±تنگستن) و گودال (آهن±مس) در این منطقه تشخیص داده شد. کانه‌زایی‌های معرفی شده در این منطقه اغلب به دلیل ارتباط با مجموعه نفوذی شیورداغ، شامل طیفی از انواع اسکارن، پورفیری، نوع رگه‌ای، اپی‌ترمال و ذخایر مرتبط با توده‌های نفوذی آن معرفی شده است. در ادامه، ویژگی‌های دگرسانی، نحوه رخداد کانی‌سازی و مراحل زمانی کانی‌سازی در هر سه منطقه کانه‌ساز بحث خواهد شد.

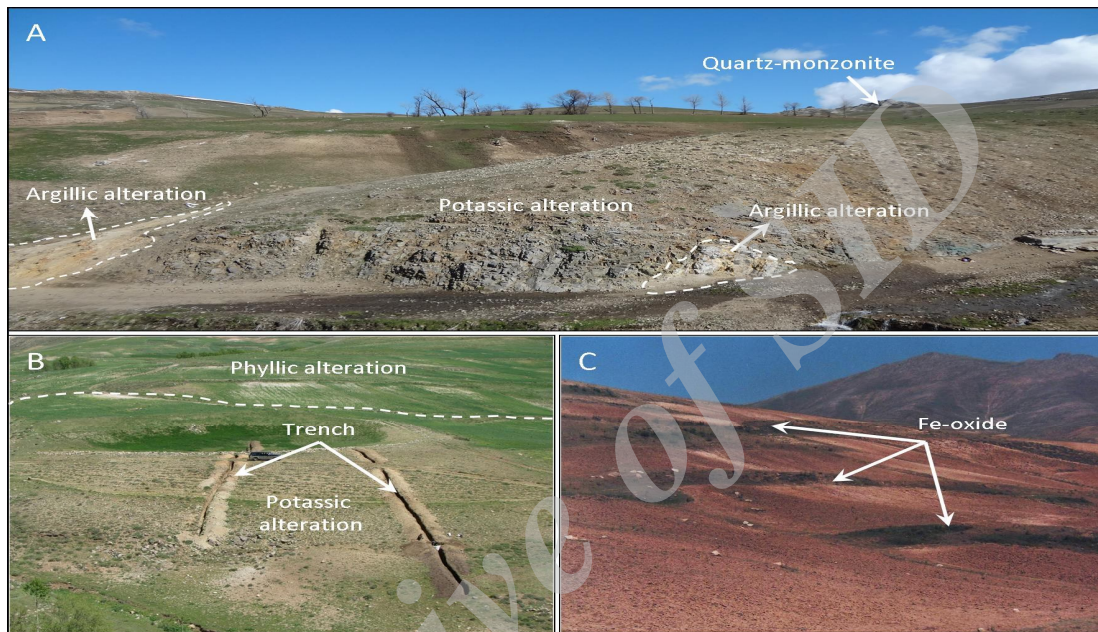
دگرسانی

به دلیل وجود فعالیت‌های ماگماتیسیم چند مرحله‌ای در منطقه، ضربان‌های دوره‌ای سیالات گرمابی ناشی از این توده‌ها به تشکیل هاله‌های دگرسانی متنوع منجر شده است. حاصل این فعالیت‌ها، رخداد دو مجموعه دگرسانی جداگانه یکی در ارتباط با واحد اسکارن‌زایی کانسار گودال (ناشی از واکنش میان توده کوارتز مونزونیت و سنگ آهک) و دیگری دگرسانی‌های اصلی

(شامل گروسولار، آندرادیت، دیوپسید و هیدنبرژیت) تشکیل شده است. پس از آن مجموعه کانی‌های مگنتیت، هماتیت، گوتیت و لیمونیت و سیلیکات‌های بدون آب نظیر ترمولیت-اکتینولیت، اپیدوت، کلسیت، کوارتز و کلریت طی دگرسانی پس‌رونده رخ داده است.

هماتیت، لیمونیت و کوارتز اغلب ناشی از اکسیدشدن سطحی و نوسان سطح آب زیرزمینی منطقه، به‌ویژه در شمال روستای آق‌درق جدید دارای رخنمون است (شکل ۴-۳).

در اسکارن گودال دگرسانی‌های پیش‌رونده و پس‌رونده قابل مشاهده است. طی دگرگونی همبری و نفوذ محلول‌های گرمایی مجموعه کانی‌های کالک سیلیکات بدون آب غنی از کلسیم



شکل ۴. تصاویر رخنمون‌های صحرایی از توزیع دگرسانی‌ها در منطقه آق‌درق شامل، A: رخداد دگرسانی آرژیلیک در میزبان دگرسانی پتاسیک در بخش کانه‌زایی چوپانلار، B: مجاورت دگرسانی‌های پتاسیک و فلیک در منطقه آیران‌گلی که ترانشه‌های اکتشافی در امتداد آنها حفر شده است و C: آغشتگی‌های اکسید/هیدروکسید آهن در شمال روستای آق‌درق جدید

Fig. 4. Outcrop photographs of the alteration distribution in the Agh-Daragh area, A: argillic alteration hosted by potassic alteration at Chupanlar mineralization, B: presence of potassic and phyllic alterations at Ayran Goli area were drilled by exploration trenches, and C: contamination of the Fe-oxide and -hydroxide in the north of young Agh-Daragh village

(Asl, 2014). در این کانی‌سازی کانی‌های سولفیدی کالکوپیریت، اسفالریت و پیریت به‌صورت رگه‌ای (شکل ۵-۱) و کانی‌های اکسیدی روتیل و مگنتیت به‌صورت انتشاری در زمینه مشاهده شدند (شکل ۵-۲). نتایج تجزیه EMPA گویای وجود مقادیر وانادیوم (متوسط $0.2 \text{ wt}\%$) و تیتانیوم (متوسط $0.1 \text{ wt}\%$) در ساختمان این مگنتیت‌هاست.

(۲) کانی‌سازی رگه‌ای در شمال منطقه آق‌درق و به‌ویژه در بخش کانه‌زایی آیران‌گلی، با حضور متوسط عیارهای مس ($0.3 \text{ wt}\%$)، طلا (0.1 g/t)، تنگستن (50 g/t)، نقره (5 g/t) و آهن ($4.6 \text{ wt}\%$)

نحوه رخداد کانی‌سازی و سری پاراژنتیک

رخداد کانی‌سازی در منطقه معدنی آق‌درق، دست کم در سه حالت شامل کانی‌سازی‌های، (۱) استوک‌ورک-انتشاری، (۲) رگه‌ای و (۳) جانیشینی (اسکارنی)، دیده می‌شود. توصیف این کانی‌سازی‌ها به شرح زیر است.

(۱) کانی‌سازی استوک‌ورک-انتشاری همراه با دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک و متوسط عیارهای مس ($0.056 \text{ wt}\%$)، آهن ($3.14 \text{ wt}\%$) و تیتانیوم ($0.27 \text{ wt}\%$) در سنگ میزبان کوارتز مونزونیت منطقه چوپانلار رخ داده است (Asgharzadeh-

گامه نخست) کانی‌سازی اسکارن گودال هم‌زمان با نفوذ استوک کوارتز مونوزونیتی گودال در میزبان سنگ آهک‌های کرتاسه (رخ‌داد دو زیرمرحله شامل، کانی‌سازی مرحله پیش‌رونده، طی نفوذ استوک کوارتز مونوزونیتی و تشکیل کانی‌های کالک سیلیکاته دما بالا (I) و مرحله پس‌رونده با، حضور کانی‌های دگرسان (II) از ویژگی‌های این گامه است؛

گامه دوم) کانی‌سازی رگه‌ای آمفیبول-بیوتیت همراه با کانی‌های پراکنده مگنتیت، روتیل و آپاتیت؛

گامه سوم) کانی‌سازی اصلی مس-طلا با ماهیت استوک‌ورک و رگه‌ای متشکل از سه زیرمرحله کوارتز-تنگستن-طلا (I)، کوارتز-سولفید (II) و سولفید (III)؛

گامه چهارم) پس از کانی‌سازی اصلی با حضور کانی‌های هیدروکسیدی و سوپرژن نظیر کالکوسیت، آزوریت، مالاکیت و گوتیت.

شیمی کانی‌ها

یکی از روش‌های مناسب برای دست‌یابی به ویژگی‌های ژئوشیمی کانسار و شرایط تشکیل کانسنگ و سنگ میزبان، استفاده از شیمی کانی‌هاست که در این پژوهش انجام شده است. با استفاده از تجزیه‌های ریزکار الکترونی (EMPA)، ترکیب شیمی کانی‌های بیوتیت، کلریت، گارنت و مگنتیت مورد بررسی قرار گرفته است و علاوه بر آن کانی‌های کمیاب موناژیت، شیلیت، تتراهدريت نقره‌دار و طلای آزاد نیز در منطقه شناسایی شدند (شکل ۵-E). لازم به ذکر است که به دلیل ترکیب شیمیایی یکنواخت و مشاهده نشدن منطقه‌بندی در کانی‌های یادشده تمامی نقاط تجزیه از بخش مرکزی بلور انجام شده است. نتایج تجزیه‌های انجام شده در جدول‌های ۱ تا ۴ آمده است.

شیمی بیوتیت

برای تعیین ماهیت و ویژگی‌های پتروژنتیکی گرانودیوریت‌های میزبان کانه‌زایی ایران‌گلی، تعداد ۱۲ نقطه از بیوتیت‌های اولیه مورد تجزیه نقطه‌ای قرار گرفتند (جدول ۱). بر این اساس، طبق نمودار سه‌تایی درصد وزنی عناصر FeO , MgO و $Abdel-Al_2O_3$

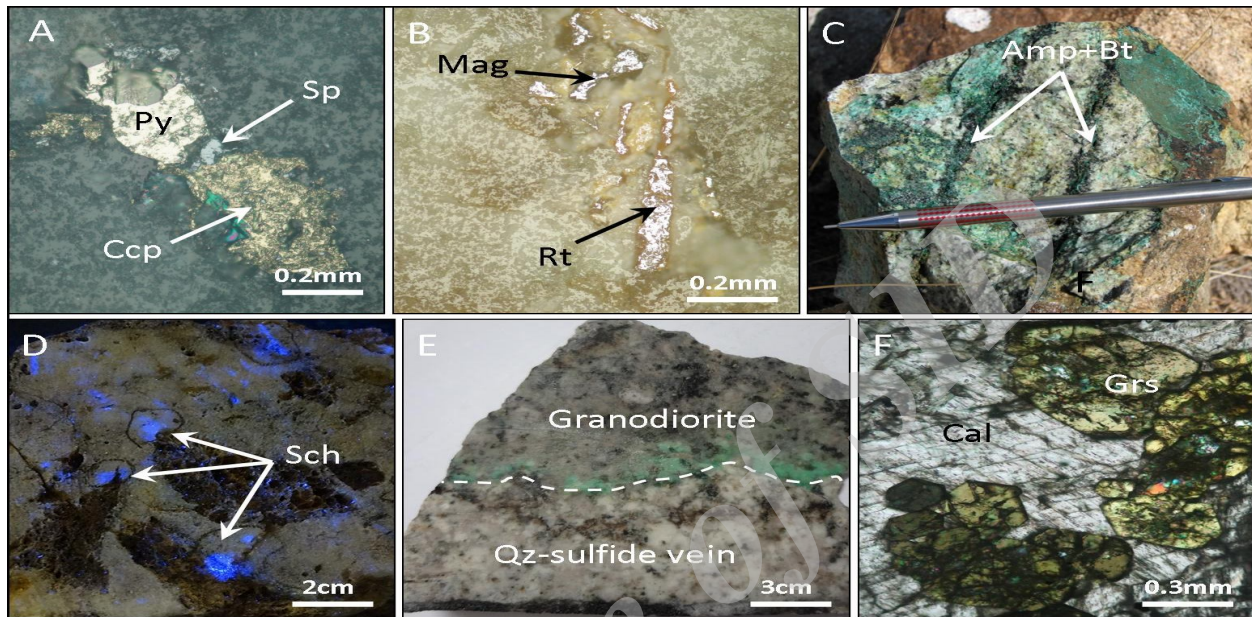
مشخص می‌شود (Asgharzadeh-Asl, 2013). در بخش کانی‌سازی رگه‌ای دست کم چهار نوع رگه به ترتیب زمانی شکل گرفته است: رگه اول) شامل رگه‌چه‌های سانتی‌متری سیاه‌رنگ آمفیبول و بیوتیت در زمینه کانی‌های پراکنده مگنتیت، روتیل، آپاتیت و موناژیت در میزبان گرانودیوریت (شکل ۵-C). رگه دوم) رگه کوارتز-تنگستن-طلا با پهناى تقریبی ۱ متر و طول بیش از ۲۰ متر و حضور کانی‌های شیلیت، پیریت، طلای آزاد (ابعاد تقریبی ۲۰ میکرون با استفاده از بررسی‌های EMPA) و تتراهدريت در مجاورت استوک کوارتز مونوزونیت (شکل ۵-D). رگه سوم) رگه-رگه‌چه‌های میلی‌متری کوارتز-سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت) به صورت غیرممتد و نامنظم در میزبان گرانودیوریت (شکل ۵-E). رگه چهارم) رگه‌چه‌های بدون کوارتز حاوی پیریت با مقادیر ناچیز کالکوپیریت. به جز رگه اول که قابل مقایسه با بخش دگرسانی پتاسیک در مرکز سیستم‌های پورفیری است، سایر رگه‌های یادشده در منطقه ایران‌گلی اغلب در میزبان دگرسانی فلیک و تا حدودی سیلیسی، رخ داده‌اند که آغشتگی‌های اکسید/هیدروکسید آهن نیز در مواردی آنها را همراهی می‌کند.

۳) کانی‌سازی جانشینی (اسکارن) گودال با حضور عناصر آهن (عمس) در حد فاصل واحد نفوذی استوک کوارتز مونوزونیت (الیگوسن) و سنگ‌های کربناته تبلور مجدد یافته (کرتاسه بالایی) در شمال غرب منطقه آق‌درق تشکیل شده است (شکل‌های ۲ و ۳). کانی‌های فلزی در این بخش شامل: مگنتیت، هماتیت، کالکوپیریت، کالکوسیت و بورنیت بوده که متوسط عیار عناصر کانه‌ساز در آنها شامل ۱/۵ درصد وزنی آهن و ۰/۳ درصد وزنی مس است (Asgharzadeh-Asl, 2013). کانی‌های کالک‌سیلیکات اولیه نظیر گروسولار، آندرادیت، دیوپسید و هدنبرژیت (اسکارن کلسیک)، توسط مجموعه کانی‌های دگرسان ثانویه نظیر ترمولیت-اکتینولیت، اپیدوت، کلسیت، کوارتز و کلریت جانشین شده است (شکل ۵-F).

با توجه به مطالب یاد شده، می‌توان دست کم ۴ مرحله کانی‌سازی (با ماهیت اکسیدی، سولفیدی و سیلیکاته) در منطقه آق‌درق تشخیص داد که به شرح زیر است: (مراحل زمانی رخ‌داد کانی‌ها به‌طور شماتیک در گروه پارازنتیک شکل ۶ نشان داده شده است):

ساختاری کانی^۱ در مقابل نسبت $Fe/(Fe+Mg)$ (Deer et al., 1992)، بیوتیت‌های منطقه از سایر کانی‌های فیلسیلیکاته، مثل فلوگوپیت تفکیک شدند (شکل ۷-۸).

(Rahman, 1994)، گرانودیوریت‌های آیران‌گلی با ماهیت کالک‌آلکان در جایگاه زون‌های فرورانش مرتبط با مناطق کوه‌زایی قرار گرفتند (شکل ۷-۸). همچنین با استفاده از نمودار دو محوره مقادیر آلومینیوم کل (TAl) محاسبه شده در فرمول



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی و نمونه دستی از بخش‌های مختلف کانه‌زایی در منطقه آق‌درق شامل، A: کانی‌سازی رگه‌ای با حضور کانی‌های کالکوپیریت، پیریت و اسفالریت در کانی‌سازی چوپانلار، B: بلورهای کشیده روتیل همراه با مگنتیت و آغستگی‌های اکسید آهن با بافت انتشاری، C: رگه‌چه‌های سانتی‌متری آمفیبول و بیوتیت در سنگ میزبان گرانودیوریت، D: آشکارسازی شیلیت (لکه‌های آبی رنگ) در بخش کانی‌سازی کوارتز-تنگستن-طلا با استفاده از لامپ ماورای بنفش، E: رگه کوارتز-سولفید (پیریت-کالکوپیریت) در میزبان گرانودیوریت، F: درهم‌رشدی کانی‌های گراسولار و کلسیت در بخش کانه‌زایی گودال. حروف اختصاری: Ccp= کالکوپیریت، Sp= اسفالریت، Py= پیریت، Mag= مگنتیت، Rt= روتیل، Sch= شیلیت، Qz= کوارتز، Amp= آمفیبول، Bt= بیوتیت، Cal= کلسیت، Grs= گراسولار (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 5. Photomicrographs and specimen of different parts of mineralization in the Agh-Daragh area, A: vein-type mineralization at Chupanlar area with chalcopyrite, pyrite and sphalerite, B: elongated crystals of rutile with disseminated texture of magnetite and Fe-oxide contamination, C: amphibole and biotite veinlets in the granodiorite host rock, D: scheelite detection (blue spots) in the quartz-tungsten-gold mineralization by ultraviolet lamp, E: quartz-sulfide vein (pyrite and chalcopyrite) hosted by granodiorite, and F: intergrowth of grossular and calcite minerals in Gowdal mineralization. Abbreviations: Ccp= chalcopyrite, Sp= sphalerite, Py= pyrite, Mag= magnetite, Rt= rutile, Sch= scheelite, Qz= quartz, Amp= amphibole, Bt= biotite, Cal= calcite, Grs= grossular (Whitney and Evans, 2010)

شیمی کلریت و گارنت

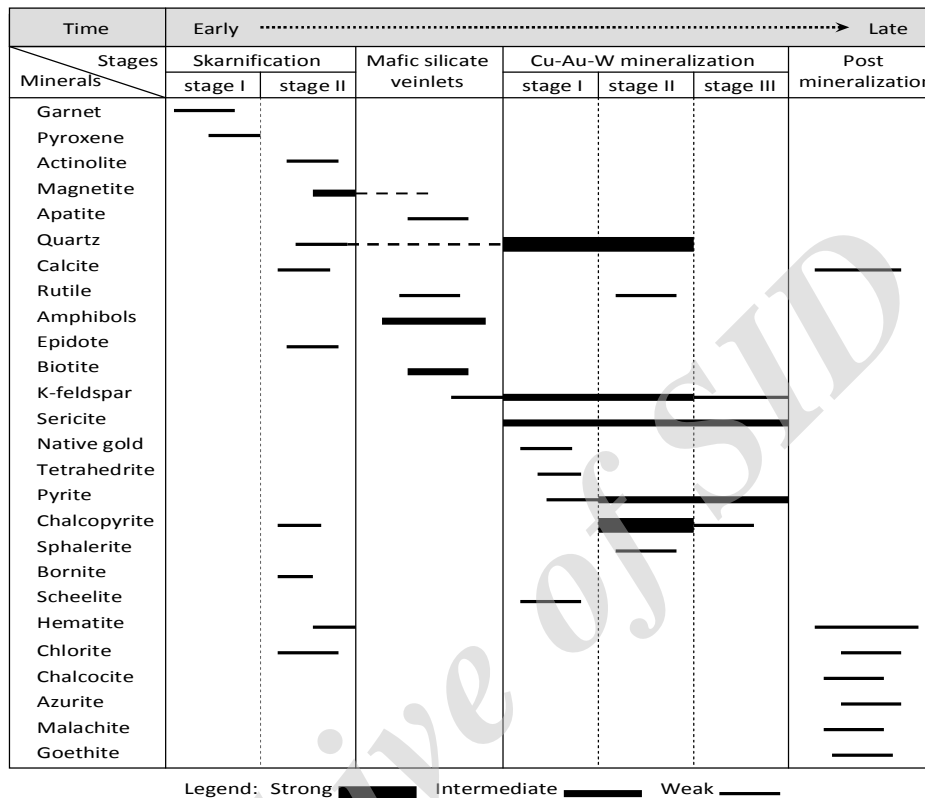
استفاده از نمودار دوتایی سیلیس در فرمول کانی (مقادیر بین ۴/۹۸ تا ۵/۸۴) در مقابل محتوای آهن کل ($Fe^{2+}+Fe^{3+}$)، کلریت‌های منطقه اغلب در حوزه ریپدولیت قرار گرفتند (شکل ۸-۸). همچنین در نمودار دوتایی Al^{VI} در مقابل Al^{IV} به دلیل جانشین نبودن این ظرفیت‌ها به جای یکدیگر، همبستگی منفی ظرفیت‌های مختلف آلومینیوم دیده می‌شود (شکل ۸-۸). علاوه بر این، در نمودارهای $Al/(Al+Mg+Fe)$ در مقابل $Mg/(Mg+Fe)$ و نمودار Al^{IV}

برای بررسی ویژگی‌های شیمیایی کانی‌ها در کانه‌زایی اسکاران گودال، از تجزیه نقطه‌ای کانی‌های گارنت و کلریت استفاده شد. ترکیب شیمیایی این کانی‌ها به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است. در بررسی کلریت‌ها تغییرات مقدار سیلیس در فرمول کانی، محتوای آهن کل ($Fe^{2+}+Fe^{3+}$)، مقادیر Al^{IV} و Al^{VI} و همبستگی یون‌های مختلف با یکدیگر از اهمیت بالایی برخوردار است. با

1. Atomic per formula unit

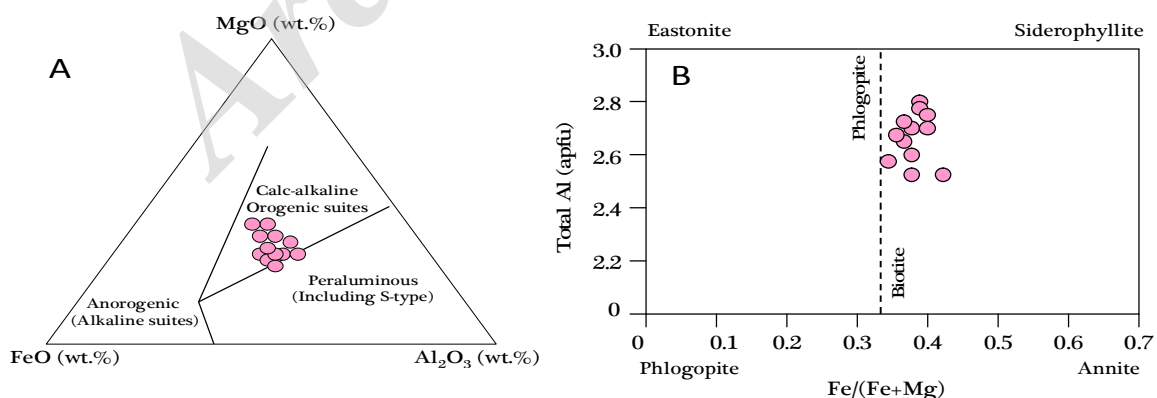
اسکارن گودال، فرمول تجربی آنها مورد محاسبه قرار گرفت. بر این اساس، کانی‌های آلماندین، گراسولار و اسپسارتین از این گروه شناسایی شدند (جدول ۳).

مقابل $Fe/(Fe+Mg)$ ، همبستگی مثبتی میان یون‌های فلزی مختلف در ساختمان کلریت‌ها دیده می‌شود (شکل‌های C-8 و D). همچنین در تجزیه‌های نقطه‌ای انجام شده بر روی کانی گارنت از



شکل ۶. نمایش هم‌یافت و دسته‌بندی پاراژنتیک در مناطق کانه‌زایی ایران‌گلی، چوپانلار و گودال

Fig. 6. Diagram showing relative age relationships of Ayran Goli, Chupanlar and Gowdal mineralizations



شکل ۷. نتایج به‌دست آمده از تجزیه نقطه‌ای بیوتیت‌های موجود در گرانودیوریت‌های ایران‌گلی شامل، A: جایگاه زمین‌ساختی و ماهیت گرانودیوریت‌های منطقه در نمودار سه‌تایی درصد وزنی عناصر MgO ، FeO و Al_2O_3 (Abdel-Rahman, 1994)، B: تفکیک بیوتیت از فلوگوپیت در نمودار دوتایی آلومینیوم کل در فرمول ساختاری کانی (apfu) در مقابل نسبت $Fe/(Fe+Mg)$ (Deer et al., 1992).

Fig. 7. Electron microprobe analysis of the biotite minerals from Ayarn Goli granodiorites including, A: tectonic discrimination of granodiorite using MgO , FeO and Al_2O_3 ternary diagram (Abdel-Rahman, 1994), B: distinguished of biotite and phlogopite in binary diagram of total Al (apfu) vs $Fe/(Fe+Mg)$ ratio (Deer et al., 1992).

جدول ۱. نتایج تجزیه نقطه‌ای EMPA از تعداد ۱۲ نقطه نشان‌دهنده بیوتیت‌های گرانودیوریت منطقه آیران‌گلی (nd= مقادیر ثبت‌نشده)

Table 1. Representative electron microprobe analysis (EMPA) of 12 points of biotite minerals from Ayran Goli granodiorite (nd= not detected)

Points analysis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
wt%												
SiO ₂	35.71	35.45	37.97	37.54	36.36	37.34	37.86	35.32	35.64	37.12	37.00	35.86
TiO ₂	0.10	0.16	nd	0.70	nd	nd	0.20	0.30	nd	nd	0.40	0.20
Al ₂ O ₃	17.47	17.58	21.92	16.87	17.65	17.21	19.21	18.00	16.50	21.65	16.52	17.66
FeO	18.69	18.40	18.48	16.52	17.76	18.10	16.80	18.21	17.65	18.75	16.50	18.30
MnO	0.42	0.45	0.56	0.44	0.41	0.46	0.51	0.52	0.44	0.35	0.46	0.42
MgO	17.48	17.64	15.95	17.22	17.10	17.00	17.12	16.35	16.29	16.00	17.80	16.65
CaO	0.33	0.32	0.42	0.28	0.30	0.25	0.28	0.31	0.30	0.45	0.36	0.26
Na ₂ O	0.05	nd	1.61	0.03	0.08	0.02	nd	0.10	0.05	0.03	1.00	0.09
Li ₂ O	0.70	0.62	1.35	1.22	0.88	1.16	1.31	0.58	0.68	1.10	1.07	0.74
K ₂ O	5.53	5.08	2.03	6.08	4.45	5.01	5.26	6.12	2.68	3.34	5.16	4.60
H ₂ O	4.08	4.06	4.37	4.16	4.08	4.14	4.26	4.05	3.91	4.28	7.663	4.05
Total	100.56	99.77	104.66	101.06	99.07	100.69	102.81	99.86	94.13	103.08	102.93	98.83
Number of cations on the basis of 24 Oxygen												
Si	5.24	5.23	5.21	5.42	5.35	5.41	5.33	5.23	5.47	5.19	0.02	5.31
Ti	0.01	0.02	nd	0.08	nd	nd	0.02	0.03	nd	nd	0.04	0.02
Al ^{iv}	2.76	2.77	2.79	2.58	2.65	2.59	2.67	2.77	2.53	2.81	0.01	2.69
Al ^{vi}	0.27	0.29	0.75	0.29	0.40	0.35	0.52	0.38	0.46	0.77	0.00	0.40
Fe	2.30	2.27	2.12	1.99	2.18	2.19	1.98	2.26	2.27	2.19	nd	2.27
Mn	0.05	0.06	0.07	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06	0.04	nd	0.05
Mg	3.83	3.88	3.26	3.70	3.75	3.67	3.59	3.61	3.73	3.34	0.02	3.68
Ca	0.05	0.05	0.06	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	nd	0.04
Na	0.01	nd	0.43	0.01	0.02	0.01	nd	0.03	0.01	0.01	43.81	0.03
Li	0.41	0.37	0.74	0.71	0.52	0.68	0.74	0.35	0.42	0.62	0.23	0.44
K	1.04	0.96	0.36	1.12	0.83	0.93	0.94	1.16	0.52	0.60	0.12	0.87
OH	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
TOTAL	19.96	19.89	19.78	19.99	19.81	19.92	19.90	19.93	19.51	19.63	47.88	19.79
Al total	3.02	3.06	3.54	2.87	3.06	2.94	3.19	3.14	2.99	3.57	0.01	3.08
Fe/Fe+Mg	0.37	0.37	0.39	0.35	0.37	0.37	0.36	0.38	0.38	0.40	0.34	0.38

به‌طور مشترک در موقعیت ذخایر پورفیری و کایرونا قرار می‌گیرند (شکل ۹).

میان‌بارهای سیال

بررسی‌های میان‌بارهای سیال با هدف دست‌یابی به شرایط P-T-X، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال و سازوکار تشکیل ذخیره انجام شده است. این بررسی‌ها بر روی کانی‌سازی رگه‌ای کوارتز-

شیمی مگنتیت

تجزیه تعداد ۷ نقطه بیانگر مگنتیت‌های بخش انتشاری کانسار چوپانلار برای تعیین ترکیب مگنتیت و بررسی خاستگاه زایشی این ذخیره مورد سنجش دستگاهی EMPA قرار گرفت (جدول ۴). با استفاده از ترسیم نقاط تجزیه در نمودار دو محور Ti/V در مقابل تیتانیم در فرمول ساختاری کانی (pfu)، مگنتیت‌های منطقه چوپانلار

حد امکان بررسی‌ها بر روی میان‌بارهای با ماهیت اولیه انجام شد. میان‌بارهای یادشده با اندازه تقریبی ۵ تا ۳۰ میکرون و شکل ظاهری بلور منفی^۱، بی‌شکل، کروی و دوکی شکل مشاهده شد. علاوه بر این، شواهد باریک‌شدگی و کشیدگی نیز در میان‌بارهای با اندازه بیش از ۲۰ میکرون مشاهده شد که مورد دماسنجی قرار نگرفت.

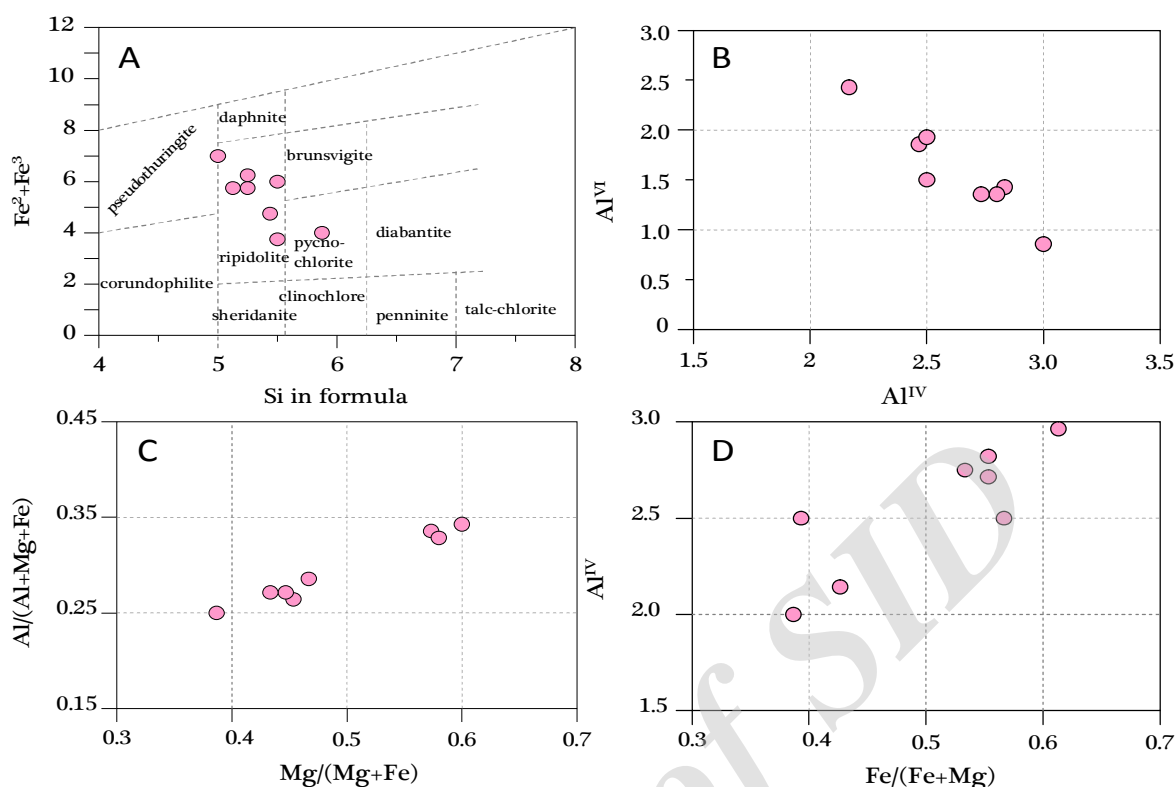
سولفیدی (stage II) مناطق ایران‌گلی و چوپانلار انجام شد. به دلیل ریز بودن میان‌بارهای سیال (کوچکتر از ۵ میکرون) در میزبان گارنت‌های منطقه گودال، امکان بررسی میان‌بارها در این کانی‌سازی میسر نشد. پس از تفکیک میان‌بارها به سه رده اصلی اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب، بر مبنای توزیع آنها نسبت به مرز بلور، تا

جدول ۲. نتایج تجزیه نقطه‌ای EMPA از تعداد ۸ نقطه نشان‌دهنده کلریت‌های اسکارن گودال (nd- مقادیر ثبت‌نشده)

Table 2. Representative electron microprobe analysis (EMPA) of 8 points of chlorite minerals from Gowdal skarn (nd= not detected)

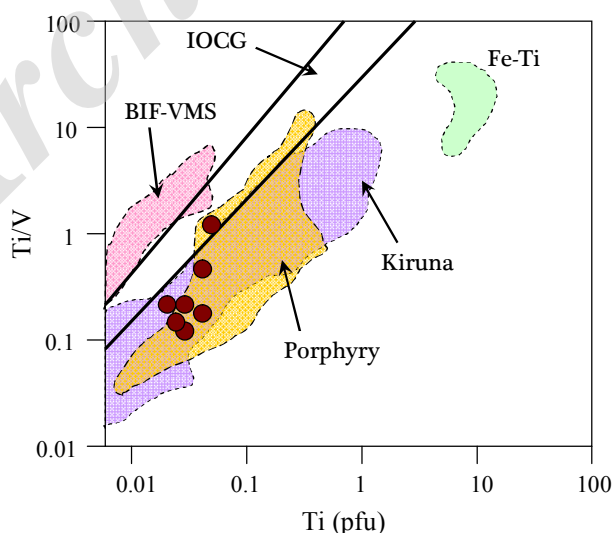
Points analysis wt%	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	26.7	28.02	28.76	28.25	28.44	28.51	27.61	29.76
TiO ₂	2	0.08	0.49	0.04	4.22	nd	0.23	nd
Al ₂ O ₃	16.93	19.27	19.61	18.64	19.05	18.95	18.1	18.07
Fe ₂ O ₃	15.42	14.69	14.92	14.83	14.62	14.75	15.48	15.89
FeO	10.19	9.86	9.96	9.92	9.83	9.88	10.21	10.4
MnO	0.77	0.99	0.96	0.91	0.94	0.93	0.91	0.89
MgO	15.92	18.23	18.74	16.8	17.66	18.13	17.59	17.21
CaO	0.42	0.27	0.3	0.24	0.15	0.1	0.22	0.1
Na ₂ O	0.47	nd	0.1	nd	nd	0.01	0.14	0.04
Cl	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
H ₂ O	11	9	6	10	6	8	9	7
Total	99.94	100.52	99.94	99.74	101.02	99.37	99.59	99.46
O=F,Cl	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
TOTAL	99.92	100.50	99.92	99.72	101.00	99.35	99.57	99.44
Number of cations on the basis of 36 Oxygen								
Si	4.98	5.16	5.23	5.84	5.51	5.18	5.25	5.49
Ti	0.28	0.01	0.07	0.01	0.61	nd	0.03	nd
Al ^{iv}	3.02	2.84	2.77	2.16	2.49	2.82	2.75	2.51
Al ^{vi}	0.82	1.44	1.50	2.39	1.89	1.34	1.39	1.48
Fe ³⁺	0.07	0.05	0.10	0.16	0.37	0.08	0.03	0.10
Fe ²⁺	7.04	6.12	5.77	3.84	3.36	6.43	6.10	6.19
Mn	0.12	0.15	0.15	0.16	0.15	0.14	0.15	0.14
Mg	4.43	5.01	5.08	5.17	5.10	4.91	4.98	4.73
Ca	0.08	0.05	0.06	0.05	0.03	0.02	0.04	0.02
Na	0.34	nd	0.07	nd	nd	0.01	0.10	0.03
Cl	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
OH	15.94	15.94	15.94	15.93	15.93	15.94	15.94	15.94
Total	37.13	36.79	36.69	35.79	35.52	36.85	36.80	36.59
Fe/Fe+Mg	0.61	0.55	0.53	0.44	0.42	0.57	0.55	0.57

1. Negative shape



شکل ۸. نتایج به‌دست آمده از تجزیه نقطه‌ای کلریت‌های اسکارن گودال شامل، A: موقعیت کلریت‌ها در محدوده ریدولیت در نمودار دوتایی سیلیس در فرمول کانی در مقابل مقادیر آهن کل، B: همبستگی منفی ظرفیت‌های مختلف آلومینیوم در نمودار دوتایی Al^{VI} نسبت به Al^{IV} ، C: همبستگی مثبت نسبت $Al/(Al+Mg+Fe)$ در مقابل نسبت $Mg/(Mg+Fe)$ و D: همبستگی مثبتی Al^{IV} در مقابل نسبت $Fe/(Fe+Mg)$ در کلریت‌ها

Fig. 8. Data analysis of chlorite minerals in the Gowdal skarn, A: chlorite composition in the repidolite field in Fe total vs Si in formula, B: negative correlation between various capacity of aluminum in the Al^{VI} vs Al^{IV} diagram, C: positive correlation between $Al/(Al+Mg+Fe)$ and $Mg/(Mg+Fe)$ ratios, and D: positive correlation between Al^{IV} and $Fe/(Fe+Mg)$ ratios



شکل ۹. نتایج تجزیه نقطه‌ای مگنتیت‌های منطقه چوپانلار به‌طور مشترک در موقعیت ذخایر پورفیری و کایرونا (با تغییرات از مونتریو و همکاران (Monteiro et al., 2008))

Fig. 9. Representative magnetite analysis of the Chupanlar area in porphyry and Kiruna type deposits (modified after Monteiro et al., 2008)

جدول ۳. نتایج تجزیه نقطه‌ای EMPA از تعداد ۵ نقطه نشان‌دهنده گارنت‌های اسکارن گودال (nd- مقادیر ثبت‌نشده)

Table 3. Representative electron microprobe analysis (EMPA) of 5 points of garnet minerals from Gowdal skarn (nd= not detected)

Points analysis	1	2	3	4	5
wt%					
SiO ₂	37.89	37.6	37.51	37.46	37.87
TiO ₂	0.52	0.69	0.77	1.61	1.02
Al ₂ O ₃	21.49	21.53	21.1	21.49	21.77
Fe ₂ O ₃	8.77	8.55	8.65	8.46	8.34
FeO	7.2	7.1	7.14	7.06	7.0
MnO	0.2	0.25	0.19	0.62	0.52
MgO	0.0	0.0	0.0	0.02	0.01
CaO	23.61	23.26	23.55	22.96	23.32
Total	99.68	98.98	98.91	99.68	99.85
Number of cations on the basis of 12 Oxygen					
Si	3.13	3.12	3.13	3.08	3.10
Al ^{vi}	2.17	2.18	2.15	2.16	2.18
Al ^{iv}	0.12	0.04	0.02	0.01	0.06
Ti	0.03	0.04	0.05	0.10	0.06
Fe ²⁺	0.44	0.45	0.42	0.45	0.45
Fe ³⁺	0.12	0.08	0.09	0.03	0.02
Mn	0.01	0.02	0.01	0.04	0.04
Ca	2.09	2.06	2.10	2.02	2.04
Total	7.87	7.87	7.86	7.86	7.87
Almandine	17.14	17.68	16.71	17.84	17.67
Grossular	82.31	81.63	82.77	80.35	80.86
Spessartine	0.55	0.69	0.53	1.72	1.43
Al total	2.17	2.18	2.15	2.16	2.18

پتروگرافی میان‌بارها

طبق شواهد پتروگرافی، براساس محتویات فازی دست کم سه نوع میان‌بار سیال در رگه‌های کوارتز-سولفید تشخیص داده شد که به ترتیب فراوانی شامل موارد زیر است:

۱) میان‌بارهای دارای فاز جامد (type 1) با فراوانی نسبی ۵۰ درصد، متشکل از سه زیر گروه هالیت‌دار (S_H-type)، هالیت و سیلویت‌دار (S_S-type) و چندفازی جامد (MS-type) (شکل ۱۰- A و B)

۲) میان‌بارهای دو فازی آبگین (type 2) با فراوانی نسبی ۳۰ درصد، متشکل از دو زیر گروه غنی از مایع (LV-type) با درجه پرشدگی

بیش از ۷۰ درصد حجمی و میان‌بارهای غنی از گاز (VL-type) با

درجه پرشدگی کمتر از ۲۰ درصد حجمی (شکل ۱۰- C و G)

۳) میان‌بارهای تک فاز (type 3) با فراوانی نسبی ۲۰ درصد، شامل میان‌بارهای تک فاز مایع (L-type) و تک فاز گاز (V-type) که

مورد آزمایش ریزدماسنجی قرار نگرفتند.

طبق شواهد، هالیت با ظاهر مکعبی، گوشه‌های زاویه‌دار و ابعاد بزرگتر نسبت به سیلویت با گوشه‌های نسبتاً گردشده، قابل تشخیص است (شکل ۱۰- D و E). علاوه بر حضور هالیت و سیلویت در میان‌بارهای حاوی فاز جامد، کانی‌های تیره از قبیل هماتیت و کالکوپیریت نیز تشخیص داده شد که در آن هماتیت با بیرفرنژانس

(شکل F-۱۰) که ماهیت آنها قابل تشخیص نبود. تصاویر پتروگرافی میان‌بارهای سیال در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

قرمز و کالکوپیریت با ظاهر گوشه‌دار و رنگ تیره قابل تشخیص است (شکل D-۱۰). علاوه بر موارد یاد شده، کانی‌های تیره و شفاف ناشناخته‌ای نیز در میان‌بارهای حاوی فاز جامد مشاهده شد

جدول ۴. نتایج تجزیه نقطه‌ای EMPA از تعداد ۷ نقطه بیانگر مگنتیت‌های منطقه چوپانلار (nd-مقادیر ثبت نشده)

Table 4. Representative electron microprobe analysis (EMPA) of 7 points of magnetite minerals from Chupanlar (nd= not detected).

Points analysis	1	2	3	4	5	6	7
wt%							
SiO ₂	nd	0.01	0.01	0.3	0.31	0.22	0.2
TiO ₂	0.06	0.06	0.11	0.02	0.07	0.17	0.05
Al ₂ O ₃	0.08	0.12	0.1	0.1	0.28	0.04	0.07
Fe ₂ O ₃	63.64	63.77	64.37	61.93	64.27	62.31	65.1
FeO	31.88	31.94	32.21	31.11	32.17	31.28	32.54
MnO	0.06	0.06	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03
CaO	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.05	0.01
ZnO	0.03	0.03	0.02	nd	0.02	nd	nd
V ₂ O ₅	0.44	0.15	0.43	0.01	0.01	0.33	0.18
Number of cations on the basis of 32 Oxygen							
Si	nd	0.01	0.01	0.27	0.27	0.20	0.17
Ti	0.04	0.04	0.07	0.01	0.05	0.04	0.02
Al	0.08	0.13	0.10	0.11	0.29	0.04	0.07
Fe ⁺³	15.53	15.67	15.44	15.30	15.15	15.32	15.48
Fe ⁺²	7.96	7.97	8.02	8.23	8.22	8.11	8.09
Mn	0.04	0.04	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02
Ca	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.05	0.05
Zn	0.02	0.02	0.02	nd	0.02	nd	nd
V	0.31	0.11	0.30	0.02	0.02	0.24	0.10
Ti	0.04	0.04	0.07	0.01	0.05	0.04	0.02
Ti/V	0.13	0.38	0.24	0.63	2.39	0.16	0.19

ریزدماسنجی

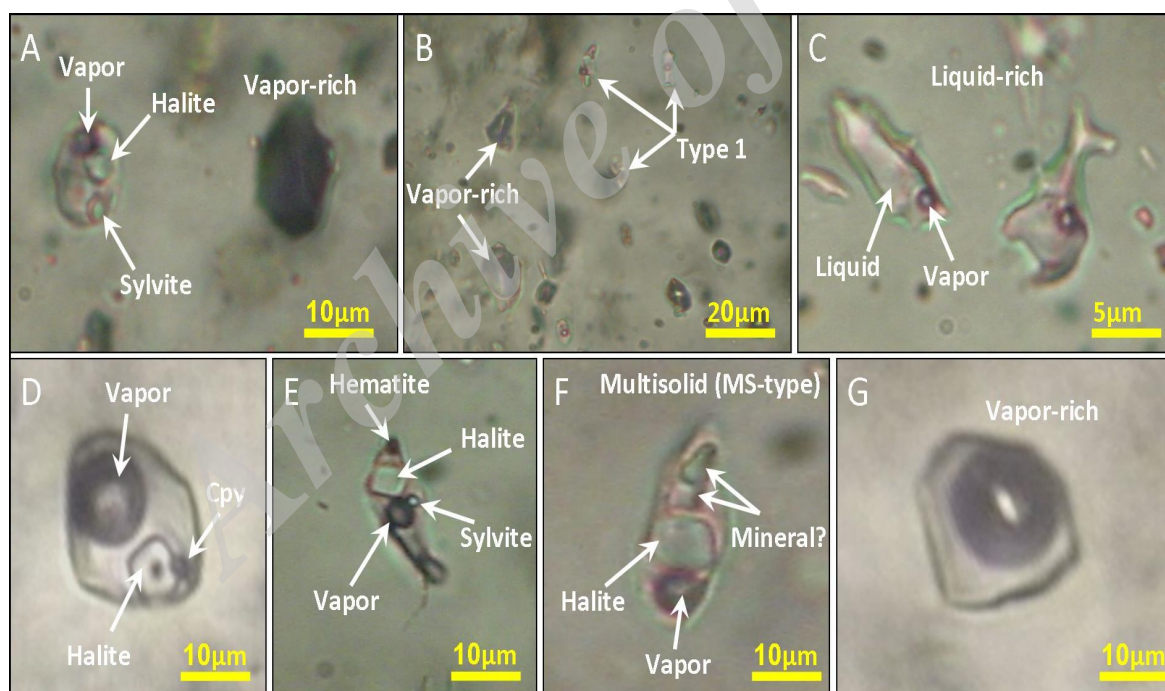
دمای ذوب نهایی یخ ($T_{m_{ice}}$)، مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. دماهای اندازه‌گیری شده محدود به حد بالایی 600°C هستند. تعبیر و تفسیر داده‌های ریزدماسنجی شامل ترکیب میان‌بار، چگالی کل (بر حسب g/cm^3) و فشار با استفاده از نرم‌افزارهای FLINCOR نسخه (Brown, 1989) و (Bakker, 2012) *FLUIDS* مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند.

محاسبه شوری در سیالات آبیگین دوفازی مایع-بخار بدون فاز جامد در سیستم $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ با دمای یوتکتیک بیشتر از $21/2^{\circ}\text{C}$ با

بررسی‌های ریزدماسنجی بر روی کانی‌سازی کوارتز-سولفیدی (stage II) در مناطق کانی‌سازی ایران گلی (تعداد ۳ مقطع و ۷۰ نقطه اندازه‌گیری) و چوپانلار (تعداد ۲ مقطع و ۶۰ نقطه اندازه‌گیری)، انجام شد. این کانی‌سازی در میزبان دگرسانی فلیک رخ داده است. در میان‌بارهای آبیگین دوفازی و سه فازی همراه با فاز جامد، مقادیر دمای یوتکتیک (T_e)، دمای همگن شدن نهایی ($T_{H_{total}}$) و فاز بخار ($T_{H_{v}}$)، دمای انحلال هالیت ($T_{m_{NaCl}}$) و

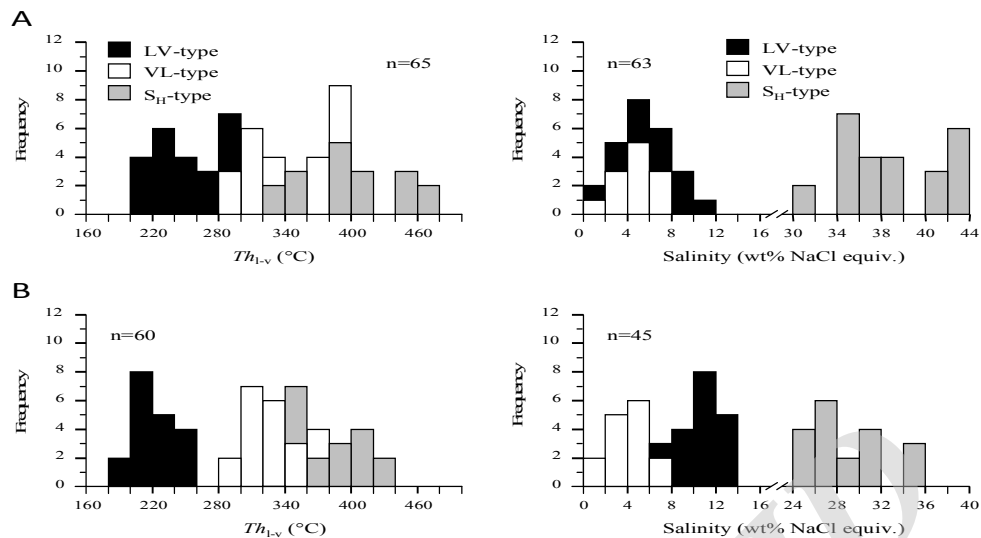
به ترتیب بین 230°C تا 370°C ، 284°C تا 388°C و 201°C تا 474°C به دست آمد. همچنین شوری محاسبه شده در میان‌بارهای نوع LV، VL و SH موجود در رگه‌های کوارتز سولفیدی این منطقه نیز به ترتیب بین $4/3$ تا $5/4$ ، $0/3$ تا $7/5$ و $31/4$ تا $44/5$ درصد معادل نمک طعام به دست آمد (شکل ۱۱-A و جدول ۵). در منطقه چوپانلار نیز مقادیر دمای همگن شدن نهایی (Th_{L-V}) در میان‌بارهای نوع LV، VL و SH به ترتیب بین 300°C تا 435°C ، 330°C تا 460°C و 240°C تا 457°C به دست آمد. با توجه به این، شوری محاسبه شده در میان‌بارهای نوع LV، VL و SH این منطقه نیز به ترتیب بین $6/8$ تا $9/5$ ، $1/2$ تا $6/6$ و $14/0$ تا $50/9$ درصد معادل نمک طعام به دست آمد (شکل ۱۱-B). خلاصه‌ای از داده‌های ریزدماسنجی در جدول ۵ آمده است.

استفاده از دمای نهایی ذوب یخ ($T_{m_{ice}}$) و بهره‌گیری از معادله هال (Hall et al., 1988) انجام شد. محاسبه شوری در سیالات حاوی فاز جامد هالیت-سیلیویت نیز با استفاده از دمای ذوب هالیت ($T_{m_{NaCl}}$) و بهره‌گیری از نرم‌افزار SALTY (Bodnar et al., 1989) انجام شد. لازم به ذکر است، به دلیل سهم ناچیز فاز مایع در میان‌بارهای غنی از فاز بخار با درجه پرشدگی کمتر از ۲۰ درصد حجمی، اندازه‌گیری ریزدماسنجی در این گروه به سختی انجام شد و دمای یوتکتیک برای آنها ثبت نشد. همچنین میان‌بارهای دارای فاز جامد با حجم حباب گاز کمتر از ۵۰ درصد (شکل ۱۱)، طی ریزدماسنجی از طریق انحلال فاز جامد هالیت ($T_{m_{NaCl}}$) یا از بین رفتن فاز حباب گاز (Th_{L-V}) همگی به فاز مایع همگن شدند. طبق شواهد ریزدماسنجی در منطقه آیران‌گلی، مقادیر دمای همگن شدن نهایی (Th_{L-V}) در میان‌بارهای نوع LV، VL و SH



شکل ۱۰. تصاویر پتروگرافی میان‌بارهای سیال در کانی‌سازی کوارتز-سولفید (stage II) مناطق آیران‌گلی و چوپانلار شامل، A و B: همراهی میان‌بارهای حاوی فاز جامد هالیت و سیلیویت (Ss-type) در کنار میان‌بارهای غنی از گاز (vapor-rich)، C: تجمع از میان‌بارهای غنی از فاز مایع (Liquid-rich)، D: میان‌بار دارای فاز جامد هالیت و کانی تیره کالکوپیریت، E: میان‌بار حاوی فاز جامد هالیت و سیلیویت به همراه کانی تیره هماتیت، F: میان‌بار چندفازی جامد (MS-type) همراه با کانی‌های شفاف ناشناخته و G: میان‌بار غنی از گاز به صورت منفرد

Fig. 10. Petrographic photomicrographs of fluid inclusions in the Ayran Goli and Chupanlar quartz-sulfide vein (stage II), A and B: solid-bearing fluid inclusion (Ss-type) accompanied with vapor-rich fluid inclusion, C: accumulation of liquid-rich fluid inclusions, D: halite-bearing fluid inclusion accompanied with chalcopyrite opaque mineral, E: halite- and sylvite-bearing fluid inclusions accompanied with hematite opaque mineral, F: multisolid fluid inclusion accompanied with transparent unidentified minerals, and G: vapor-rich fluid inclusion



شکل ۱۱. نمودارهای ستونی دمای همگن شدن سیال و شوری بر روی کانی‌سازی کوارتز-سولفیدی (stage II) مناطق A: آیران گلی و B: چوپانلار

Fig. 11. Homogenization temperature and salinity histograms in the quartz-sulfide vein (stage II), A: Ayrān Goli and B: Chupanlar

جدول ۵. خلاصه‌ای از داده‌های میکروترمومتری به‌دست آمده از کانی‌سازی کوارتز-سولفیدی مناطق کانی‌سازی آیران گلی و چوپانلار (n- تعداد نقاط اندازه‌گیری)

Table 5. Microthermometric data of Ayrān Goli and Chupanlar quartz-sulfide veins. (n= number of fluid inclusions analysed)

Mineralization	Fluid inclusions type	n	Te (°C)	Tm _{ice} (°C)	Tm _{NaCl} (°C)	Th _{1-v} (°C)	Salinity (wt% NaCl equiv.)
Ayrān Goli	S _H	20	-----	-----	196-380	201-474	31.4 - 44.5
Ayrān Goli	LV	25	-21 to -30	-2.5 to -3.2	-----	230-370	4.3- 5.4
Ayrān Goli	VL	27	-----	-1.3 to -4.5	-----	284-388	0.3-7.5
Chupanlar	S _H	20	-----	-----	220-434	240-457	14-50.9
Chupanlar	LV	20	-22 to -26	-3.5 to -5.2	-----	300-435	6.8-9.5
Chupanlar	VL	22	-----	-0.7 to -0.3	-----	330-460	1.2-6.6

با در نظر گرفتن دمای همگن شدن مایع-بخار (Th_{1-v}) بین ۲۰۱ تا ۴۷۴°C و دمای انحلال هالیت (Tm_{NaCl}) بین ۱۹۶ تا ۴۳۴°C (شوری معادل ۴۸ wt% NaCl) در میان‌بارهای دارای فاز جامد هالیت، کمترین و بیشترین فشار رخداد این مرحله به ترتیب برابر ۰/۴ و ۲/۷ کیلو بار (متوسط ۱/۵ کیلو بار معادل عمق تقریبی ۴ کیلومتر)، زیر شرایط لیتواستاتیک است (شکل ۱۲). این شرایط سازگار با رخداد تشکیل ذخایر مس پورفیری طلا دار معرف شده توسط هدنکوئیست و همکاران (Hedenquist et al, 1998) است. همچنین حضور میان‌بارهای تک فاز گاز (type 3)، غنی از گاز (type 2) و دارای فاز جامد هالیت (type 1) در یک مجموعه

بحث

تعبیر و تفسیر داده‌های میان‌بارهای سیال

چنان‌که اشاره شد مطالعه میان‌بارهای سیال در این پژوهش با هدف دست‌یابی به ترکیب، نحوه تکامل سیال و تخمین شرایط فشار-دما کانی‌سازی انجام شده است. به دلیل مشاهده نشدن میان‌بارهای حاوی فاز CO₂ در نمونه‌ها، استفاده از روابط متقاطع ایزو کورهای دما-فشار برای دست‌یابی به عمق کانی‌سازی میسر نشد؛ لذا در این پژوهش از میان‌بارهای غنی از نمک (type 1) که توسط انحلال فاز جامد هالیت همگن می‌شوند و استفاده از روش بودنار (Bodnar, 1994) برای تخمین عمق دیرینه کانسار استفاده شد.

تحول سیال گرمایی در نمودار P-T-X

حضور میان‌بارهای با شوری بالا^۱ به همراه میان‌بارهای غنی از گاز^۲ با درجه پرشدگی ناچیز از ویژگی‌های رایج رخداد دسته‌ای از میان‌بارها در هر ذخیره مس- طلا پورفیری کم‌عمق است (Beane and Bodnar, 1995). همراهی این میان‌بارها ناشی از به‌دام افتادن جداگانه هریک از میان‌بارهای غنی از بخار و شورابه‌های غنی از نمک در سیال ماگمایی اختلاط ناپذیر است (Fournier, 1999). به عقیده هدنکوئیست و همکاران (Hedenquist et al, 1998)، توزیع فضایی میان‌بارهای غنی از نمک در یک محدوده عمقی خاص تعیین‌کننده مرز بالایی زون پتاسیک است که اغلب با حضور کانی‌های مگنتیت، بیوتیت، فلدسپار پتاسیم مشخص می‌شود. در مجموع با توجه به شواهد فشار- دما و ترکیب میان‌بارهای سیال مورد بررسی، می‌توان روند تحول سیال گرمایی در کانی‌سازی‌های منطقه آق‌درق را طبق شکل ۱۴ به سه مرحله زیر تفکیک کرد:

مرحله اول) سیال ماگمایی تفکیک‌شده از توده سیلیکاته در حال انجماد: طبق بررسی‌های کانی‌سازی و شواهد میان‌بارهای سیال می‌توان گفت سیال ماگمایی در دمای ۴۰۰ تا ۵۰۰°C و عمق تقریبی ۱/۵ کیلوبار (معادل ۴ کیلومتر) از یک توده نفوذی متبلور جدا شده که طی آن به دوفاز گاز و سیال غنی از نمک (شوری ۴۰ تا ۵۰ درصد معادل نمک طعام) تفکیک شده است. در این شرایط هم‌زمان با ورود سیال شور دما بالا به حوضه گاز+مایع+نمک (مسیر A)، میان‌بارهای سیال در دو فاز غنی از گاز (نوع ۳) و غنی از نمک (نوع ۱) با شوری و چگالی متفاوت ظاهر می‌شوند که طی آن میان‌بارهای غنی از نمک توسط انحلال فاز هالیت همگن می‌شوند. این سناریو به‌عنوان فرضیه‌ای قابل قبول برای ترکیب هم‌زمان میان‌بارهای دما بالای مورد مشاهده در کانی‌سازی‌های کوارتز-سولفیدی (stage II) مناطق آیران‌گلی و چوپانلار مطرح است. جدایش فیزیکی فازهای گازی و شورابه به‌صورت‌های مختلفی امکان‌پذیر است که طی آن صعود به سمت بالای فاز گاز (بخار) یا مهاجرت جانبی شورابه‌ها از جمله این سازوکارهاست.

مرحله دوم) مهاجرت سیال گرمایی از شرایط لیتواستاتیک به هیدرواستاتیک: در این مرحله سیال گرمایی با دمای تقریبی بین

۳۰۰ تا ۴۰۰°C و شوری ۵ تا ۲۰ درصد معادل نمک طعام متشکل از میان‌بارهای غنی از فاز مایع (نوع ۲) با درجه پرشدگی بیش از ۷۰ درصد در مراحل بعدی از توده متبلور سیلیکاته سرچشمه گرفته است. این میان‌بارها در حوضه گاز و مایع بدون حضور فاز جامد قرار می‌گیرد که منطبق با مسیر B در شکل ۱۴ است. از آنجایی که در این بخش سیالات از مرز پلاستیک-الاستیک عبور می‌کنند؛ لذا با تغییر شرایط فیزیکی از فشارهای لیتواستاتیک به هیدرواستاتیک شکستگی‌های کششی در سنگ میزبان شکل می‌گیرد. در این شرایط حضور میان‌بارهای سیال با دما و شوری متوسط به‌طور رایج به حضور زون فلیک مرتبط می‌شود که طی آن سیال گرمایی با آب‌های جوی دچار اختلاط می‌شود. اگر چه بر مبنای مدل‌سازی‌های انجام‌شده توسط بودنار (Bodnar, 1998) سیالات دما و شوری متوسط که در میزبان زون‌های فلیک تشکیل می‌شوند، اغلب در نتیجه چگالش^۱ بخارهای ماگمایی در مراحل پایانی تبلور ماگما تشکیل می‌شوند.

مرحله سوم) سیال گرمایی رقیق‌شده مرتبط با سیستم اپی‌ترمال: سیال گرمایی با دمای ۲۱۰ تا ۳۰۰°C و شوری ۲ تا ۱۰ درصد معادل نمک طعام متشکل از میان‌بارهای غنی از فاز مایع (نوع ۲) و تک‌فاز مایع (نوع ۳) در میزبان رگه-رگه‌های تأخیری کوارتز-پیریت-کالکوپیریت-اسفالریت تشکیل شده است. این شرایط دمایی منطبق با آب‌های جوی سرچشمه گرفته از سیستم اپی‌ترمال کم‌عمقی است که از سیال گرمایی در شرایط هیدرواستاتیک به‌دام افتاده است. رخداد دگرسانی‌های سیلیسی در مراحل پایانی کانی‌سازی اغلب مرتبط با این مرحله است. با پیاده کردن دمای همگن شدن این میان‌بارها در نمودار جوشش با شوری متوسط ۶ درصد معادل نمک طعام، کمترین فشار قابل تخمین برای این میان‌بارها تقریباً معادل ۸۰۰ متر به‌دست می‌آید که این ارتفاع نشان‌دهنده عمق دیرینه تشکیل ذخیره و متوسط سطح فرسایش منطقه آق‌درق است.

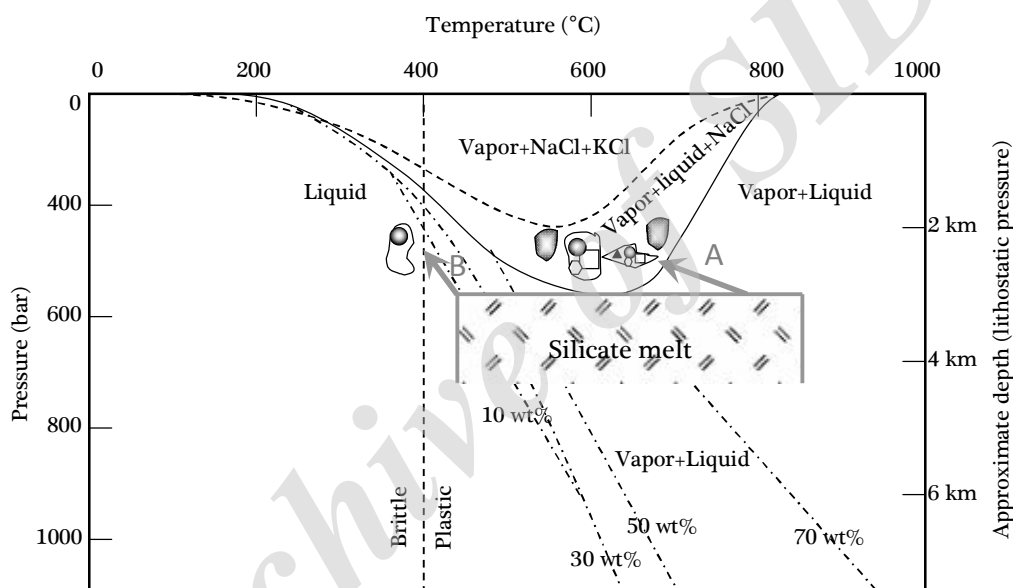
بررسی محتوای کلر سیال، انتقال فلز و سازوکار ته‌نشست ذخیره

فراوانی و تجمع هالوژن‌های کلر و فلوئور در محلول‌های آب‌گین و نقش آنها به‌عنوان لیگاند حمل‌کننده فلزات مس، طلا و سایر عناصر

1. Hypersaline
2. Vapor-rich
3. Condensation

ذخایر مس-طلای پورفیری گزارش شده که در آن ارتباط میان محتوای کلر و نحوه تکامل سیال گرمایی مورد بحث است (Barton and Johnson, 1996; Barton and Johnson, 2000). وجود افق‌های تبخیری به‌عنوان عاملی کلیدی در خاستگاه محتوای کلر، شوری سیال و میزان گوگرد در بسیاری از ذخایر پورفیری و اکسید آهن مس و طلا دار (IOCG) مطرح شده است (Barton and Johnson, 1996; Barton and Johnson, 2000; Hitzman, 2000; Frietsch et al., 1997).

از دیدگاه‌های مختلفی مورد توجه محققان ذخایر معدنی قرار گرفته است. محتوای عناصر هالوژنی در سیلیکات‌های آب‌دار در رابطه با ذخایر مس-طلای پورفیری و سامانه‌های طلای مرتبط با توده‌های نفوذی، مورد بررسی قرار گرفته است که طی آن محلول‌های آبگین غنی از کلر با سرچشمه گرفتن از یک فرآیند فیزیکی عدم امتزاج ناشی از مذاب سیلیکاته در حال تبلور در فشار پایین، مسؤول جدایش بخش عمده‌ای از فلز مس به درون سیال ماگمایی است (Candela and Holland, 1986; Candela, 1989). همچنین حضور سیلیکات‌های آب‌دار غنی از کلر در رابطه با بسیاری از



شکل ۱۴. فرضیه تحول سیال کانه‌ساز در منطقه آق‌درق با استفاده از نمودار دما-فشار. منحنی‌ها با اقتباس از پژوهش‌های فورنیر (Fournier, 1999) و برثویت و همکاران (Brathwaite et al., 2001) رسم شده است. برای توضیحات بیشتر به متن مراجعه شود.

Fig. 14. Scenario of ore-forming fluid evolution in Agh-Daragh area with used of temperature-pressure diagram. Curves are adapted from Fournier (1999) and Brathwaite et al. (2001) See text or more discussion explanations.

(عبارت بیش از ۰/۱ درصد) را در دمای 400°C انتقال دهد (Liu and McPhail, 2005). علاوه بر این، طلا نیز در دمای مشابه ($>350^{\circ}\text{C}$) و محتوای بالای Cl انحلال‌پذیری بالایی خواهد داشت (Henley, 1973). تنش‌ست فلزات در چنین شرایطی مستلزم وقوع کاهش شوری و دمای سیال گرمایی است که بر مبنای آن کاهش مصرف کلر در سیال ناشی از رخداد اختلاط سیال با آب‌های جوی یا مصرف آن در ساختمان کانی‌های آمفیبول، بیوتیت، آپاتیت و اسکاپولیت صورت می‌گیرد. همچنین با بررسی شواهد میان‌بارهای

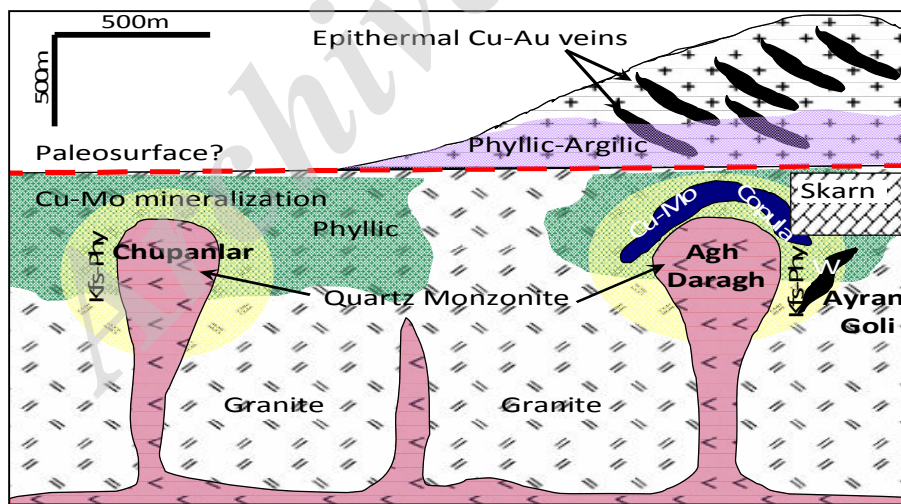
صرف‌نظر از خاستگاه ماگمایی، دمای بالا و سیال شور غنی از کلر که به‌عنوان عوامل اصلی مهاجرت مس به‌صورت کمپلکس کلریدی CuCl_2 در سامانه گرمایی منطقه آق‌درق محسوب می‌شوند، می‌توان وجود یک شرایط اکسیدشدن متوسط با پایداری مگنتیت را برای تشکیل زون پتاسیک با حضور بیوتیت‌های ثنوفرمه تخمین زد. بر این اساس، شورابه‌های غنی از نمک در شرایط خنثی تا کمی اسیدی ($\text{pH} \approx 6.5$) و محیط اکسیدی-احیایی مشابه آنچه در زون پتاسیک به وقوع می‌پیوندد، قادر است مقادیر بالایی مس

ترکیب سنگ‌های منطقه، توده‌های نفوذی منطقه طی چندین مرحله تزریق شدند که فاز جواتر مثل کوارتز مونزونیت‌ها با نفوذ به درون سنگ‌های قدیمی، باعث آزاد شدن سیالات گرمایی در منطقه چوپانلار (هم‌مرز با توده مونزودیوریت) و رخداد کانی‌زایی مس، روی، آهن و تیتان با بافت انتشاری و رگه- رگه‌چهای شده است. مشابه با این توده در غرب آق‌درق قدیم، در محل تماس با آهک‌های کرتاسه کانه‌زایی اسکارنی آهن، مس و طلا در بخش اسکارنی گودال به صورت برون اسکارن و کانی‌زایی مس، آهن، تیتان و تنگستن، طلا و نقره در خود توده هم به صورت انتشاری و رگه- رگه‌چهای رخ داده که به دلیل تشکیل فازهای نظیر مگنتیت، روتیل و هماتیت در مراحل اول، شرایط اکسیدان بودن سیال را نشان می‌دهد. با تغییر شرایط فازهای سولفیدی تشکیل شده و در مرحله سوپرژن هیدروکسیدها جانشین کانه‌های قبلی شدند. مدل شماتیک احتمالی کانه‌زایی گرمایی- رگه‌ای و اسکارنی محدوده معدنی آق‌درق-چوپانلار و ارتباط آنها با توده نفوذی در شکل ۱۵ نمایش داده شده است.

سیال در منطقه، می‌توان نوعی فرآیند کاهش دمای تدریجی سیال در سامانه گرمایی منطقه مشاهده کرد (شکل ۱۳) که ناشی از ورود سیال جوی رقیق هم‌زمان با کاهش فشار ناگهانی طبقات سنگی (انتقال به شرایط هیدرواستاتیک) در منطقه است. با توجه به این شواهد، می‌توان گفت در سیستم گرمایی منطقه آق‌درق هم‌زمان با کاهش تدریجی دما و انتقال شرایط از محلول‌های کلروری به سولفورنی رخداد کانه‌زایی مگنتیت (طی واکنش $12\text{FeO} + \text{H}_2\text{SO}_4 \leftrightarrow 4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\text{S}$) به کاهش محتوای اکسیژن در محیط و تشکیل رگه- رگه‌چهای سولفیدی طلا دار در منطقه منجر شده است.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های صحرائی و آزمایشگاهی انجام شده در سه منطقه معدنی آیران گلی، چوپانلار و گودال، بیانگر وجود ارتباط ژنتیکی میان کانه‌زایی‌های نوع رگه‌ای- رگه‌چهای، انتشاری، اسکارنی چندفازی مس، روی، آهن، تیتان و تنگستن با توده‌های نفوذی الیگوسن واقع در مجموعه آتشفشانی- نفوذی آق‌درق است. با توجه به تنوع



شکل ۱۵. مدل شماتیک کانی‌زایی، دگرسانی و رخداد توده‌های نفوذی در منطقه آق‌درق

Fig. 15. Schematic model of mineralization, alteration and intrusive rocks in Agh-Daragh area.

شده، صمیمانه قدردانی می‌شود. همچنین نویسندگان از داوران محترم مجله زمین‌شناسی اقتصادی نیز کمال تشکر و سپاس‌گزاری را دارند.

قدردانی

تجزیه‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی این پژوهش توسط سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) مورد حمایت مالی قرار گرفته است. بدین وسیله از همکاری‌های انجام

References

- Abdel-Rahman, A.M., 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas. *Journal of Petrology*, 35(2): 525-541.
- Aghazadeh, M., 2009. Petrology and geochemistry of the Anzan-Khan Kandi and Sheivier Dagh granitoids (north and east of Ahar, East of Azerbaijan). PhD thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 493 pp. (in Persian with English abstract)
- Asghari, O., and Hezarkhani, A., 2010. Investigations of alteration zones based on fluid inclusions microthermometry at Sungun porphyry copper deposit, NW Iran. *Mineral Resource Exploration Bulletin*, 140(3): 19-34.
- Asgharzadeh-Asl, H., 2014. Geochemistry and mineralization of the Cu-W Agh-Darragh prospect (north of Ahar). Msc thesis, Kharazmi University, Tehran, Iran, 225 pp (in Persian with English abstract).
- Bakker, R., 2012. Package FLUIDS. part 4: Thermodynamic modeling and purely empirical equations for H₂O-NaCl-KCl solutions. *Mineralogy and petrology*, 105(6): 1-29.
- Barton, M.D. and Johnson, D.A., 1996. Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization. *Geology*, 24(3): 259-262.
- Barton, M.D. and Johnson, D.A., 2000. Alternative brine sources for Fe-oxide (-Cu-Au) systems: implications for hydrothermal alteration and metals. In: T.M. Porter (Editors), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: a Global Perspective*. Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp. 43-60.
- Beane, R.E. and Bodnar, R.J., 1995. Hydrothermal fluids and hydrothermal alteration in porphyry copper deposits. In: F.W. Pierce and J.G. Bohm (Editors), *Porphyry copper deposits of the American Cordillera*. Geological Society Digest, Arizona, pp. 83-93.
- Blourian, G.H., 1994. Petrology of the tertiary volcanic rocks in the northern of Tehran. Msc thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran, 145 pp. (in Persian with English abstract)
- Bodnar, R.J., 1994. Synthetic fluid inclusions: XII: the system H₂O-NaCl. Experimental determination of the halite liquidus and isochores for a 40 wt.% NaCl solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(3): 1053-1063.
- Bodnar, R.J., 1995. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683-684.
- Bodnar, R.J., 1998. A model for the temporal and spatial evolution of magmatic fluid inclusions in porphyry copper deposits. Pan-American conference on research on fluid inclusions, University of Nevada, Las Vegas, Nevada, USA.
- 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.
- Brathwaite, R.L., Simpson, M.P., Faure, K. and Skinner, D.N.B., 2001. Telescoped porphyry Cu-Mo-Au mineralisation, advanced argillic alteration and quartz-sulphide-gold-anhydrite veins in the Thames District, New Zealand. *Mineralium Deposita*, 36(7): 623-640.
- Brown, P.E., 1989. Flnacor: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *American Mineralogist*, 74(11-12): 1390-1393.
- Candela, P.A., 1989. Felsic magmas, volatiles, and metallogenesis. *Reviews in Economic Geology*, 4(2): 223-233
- Candela, P.A. and Holland, H.D., 1986. A mass transfer model for copper and molybdenum in magmatic hydrothermal systems: the origin of porphyry-type ore deposits. *Economic Geology*, 81(32): 1-19.
- Deer, W.A., Howie, A. and Zussman, J., 1992. *An interdictio to rock-forming minerals*. Longman, Harlow, 696 pp.
- 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.
- Fournier, R.O., 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic to brittle rock in the magmatic-epithermal environment. *Economic Geology*, 94(8): 1193-1212.
- Frietsch, R., Tuisku, P., Martinsson, O. and Perdahl, J.A., 1997. Early Proterozoic Cu-(Au) and Fe ore deposits associated with regional Na-Cl metasomatism in northern Fennoscandia. *Ore Geology Reviews*, 12(1): 1-34.
- Ghadimzade, H., 2002. Economic Geology and gold exploration in Safi Khanlo-Naghdooz exploration area (south east of Ahar). Msc thesis, Institute of

- Earth Science, Geological survey, Tehran, Iran 193 pp. (in Persian with English abstract)
- Hall, D.L., Sternert, S.M. and Bodnar, R.J., 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O. *Economic Geology*, 83(1): 197-202.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. and Reynolds, T.J., 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93(4): 374-404.
- Henley, R.W., 1973. Some fluid dynamics and ore genesis. *Transactions Institution of Mining and Metallurgy* 82(795): 1-8.
- Hezarkhani, A., 2006. Petrology of the intrusive rocks within the Sungun porphyry copper deposit, Azerbaijan, Iran. *Journal of Asian Earth Science*, 27(3): 326-340.
- Hitzman, M.W., 2000. Iron oxide-Cu-Au deposits: what, where, when, and why. In: T.M. Porter (Editors), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: a Global Perspective*. Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp. 9-25.
- Jamali, H., 1998. Geology, geochemistry, mineralogy and probable genesis of Mive Rud polymetal gold deposit, East of Azerbaijan. Msc thesis, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran, 194 pp. (in Persian with English abstract)
- Jamali, H., 2012. Metallogenic zoning and tectonomagmatic controls in Ahar-Arasbaran magmatic belt, north west of Iran. PhD thesis, Kharazmi University, Tehran, Iran, 362 pp. (in Persian with English abstract)
- Jamali, H., 2013. Agh-Daragh-Chupanlar (south of Kaleybar). Geological survey of Iran, Tehran, Report 5, 66 pp.
- Jamali, H., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpur, A.M. and Mehrabi, B., 2009. Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar-Arasbaran volcanic belt, northern Iran. *International Geology Review*, 52(7): 608-630.
- Lescuyera, J.L. and Riou, R., 1976. Geologie de la region de Mineh (Azerbaijan): Contribution a l'etude du volcanisme tertiaire de l'Iran. These de 3eme cycle, Grenoble, 234 pp.
- Liu, W. and McPhail, D.C., 2005. Thermodynamic properties of copper chloride complexes and copper transport in magmatic-hydrothermal solutions. *Chemical Geology*, 221(1): 21-39.
- Mehrpour, M. and Nazer, N., 1999. Geological map of Kaleybar, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Moayyed, M., 2001. Geochemistry and petrology of volcano-plutonic bodies in Tarum area. PhD thesis, Tabriz University, Tabriz, Iran, 256 pp. (in Persian with English abstract)
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in late-Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Structural Geology*, 22(8): 1125-1139.
- Mollai, H., Sharma, R. and Pe-Piper, G., 2009. Copper mineralization around the Ahar batholith, north of Ahar (NW Iran): Evidence for fluid evolution and the origin of the skarn ore deposit. *Ore Geology Reviews*, 35(3-4): 401-414.
- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.B., Hitzman, M.W., Juliani, C., de Souza Filho, C.R. and Carvalho, E.R., 2008. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 34(3-4): 317-336.
- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to the Iranian geology. Geological Survey of Iran, Tehran, 110 pp.
- Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. Review in *Mineralogy*, Mineralogical Society of America, United State of America, 646 pp.
- Rolland, Y., Billo, S., Corsini, M., Sosson, M. and Galoyan, G., 2009. Blueschists of the Amassia-Stepanavan Suture Zone (Armenia): Linking Tethys subduction history from E-Turkey to W-Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 98(3): 533-550.



Mineralogy, occurrence of mineralization and temperature-pressure conditions of the Agh-Daragh polymetallic deposit in the Ahar-Arasbaran metallogenic area

Heydar Asgharzadeh Asl^{1*}, Behzad Mehrabi¹ and Ebrahim Tale Fazel²

1) Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

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

Submitted: Feb. 8, 2015

Accepted: Oct. 27, 2015

Keywords: *fluid inclusions, ore forming fluid evolution, porphyry-skarn, Ahar-Arasbaran metallogenic area*

Introduction

The Ahar-Arasbaran metallogenic area (Qara Dagh zone) is located in the northwest of Iran and the western part of the Mazandaran Sea. At the base of the structural classification from Nabavi (1976), this area is situated in the Alborz-Azerbaijan magmatic belt. Sheviar Dagh (Ahar batholite) intrusive suite, subvolcanic and volcanic accompanied rocks with east-west trending and 30 km long serves as the main Eocene-Oligocene magmatic event in the north of the Ahar province. Considering geochemistry, this assemblage includes two shoshonitic and calc-alkaline to high-K calc-alkaline series which are the shoshonitic series in the central part and the calc-alkaline series outcrop in the western and eastern part (Aghazadeh, 2009). Textural characteristic, mineral chemistry and fluid inclusion studies were carried out at the tree part of the Agh-Daragh prospecting area.

Material and methods

A total of 50 samples were collected from the host rocks (including 4 trench and 250 m), ore deposit and altered rocks. Ten altered samples were analyzed for their mineral recognition by X-ray diffraction in the Iran Mineral Process and Research Center (IMPRC). Electron microprobe analyses (EMPA) and backscattered electron (BSE) images of minerals were obtained using a Cameca SX100 electron microprobe in the Iran Mineral Process and Research Center (IMPRC). An accelerating voltage of 15 to 25 kV and beam current of 20 mA was used for all analyses. Typical spot sizes ranged from 2 to 5 μm . A total of 5 double-polish thin sections representative of quartz samples were selected from mineralized veins after petrographic and field

studies. Fluid inclusion microthermometry was conducted using a Linkam THMS600 heating–freezing stage (-190°C to $+600^{\circ}\text{C}$) mounted on a ZEISS Axioplan2 microscope in the fluid inclusion laboratory of the school of Earth Sciences of the Kharazmi University. The heating rate was 5–10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ at higher temperatures ($>100^{\circ}\text{C}$), with a reproducibility of $\pm 1^{\circ}\text{C}$. However, it was reduced to 0.1–0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ near phase transformation, with a reproducibility of $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.

Results

Mineralization that occurs in the area is mainly related to the Sheviar Dagh intrusive rocks and it includes a variety of types of skarn, porphyry- and vein-type, epithermal and intrusion related deposits. Agh Daragh mineralization occurs at least in three states including: 1) stockwork-disseminated, 2) vein-type and 3) replacement (skarn). In order to determine the nature and characteristics of granodiorites hosted Ayran Goli mineralization, the biotites points were analyzed. The Ayran Goli granodiorite with calc-alkaline nature is related to orogenic zones that is associated with subduction zones. To determine the chemical properties of the minerals in Gowdal skarn mineralization, garnet and chlorite have been used for analysis which are often located at repidolite and picnochlorite positions. Electron micro probe analysis (EMPA) of magnetite from the Chupanlar area showed that it belongs to porphyry and Kiruna type deposits. Based on the observations made, three types of aqueous fluid inclusions were distinguished in the quartz-sulfide veins, including halite-saturated aqueous ($\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}\pm\text{KCl}$), aqueous

*Corresponding authors Email: heydarasl@yahoo.com

two-phase ($\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}\pm\text{CaCl}_2$), and monophasic liquid and vapor fluid inclusions.

Discussion

Because of the lack of CO_2 -bearing fluid inclusions phase in the samples, we used a temperature-pressure relationship intersection in order to obtain the depth of mineralization. However, but at this study salt-rich inclusions (type 1) the dissolution of halite homogeneous solid phase (Bodnar, 1994) were used in order to estimate the standing deposit. Considering the temperature of the liquid-vapor homogenization ($T_{h,v}$), temperatures between 201 to 474°C, homogenization halite ($T_{m_{\text{NaCl}}}$) between 196 to 434°C (48 wt% NaCl eq.) in the solid phase inclusions with halite, minimum and the maximum pressure between 4.0 and 7.2, respectively that occur at 0.4 to 2.7 kb (average of 5.1 kb and 4 km depth) under lithostatic pressure. These conditions are consistent with the occurrence of gold porphyry copper deposits introduced by Hedenquist et al., (1998). The presence of gas-phase inclusions (type 3), gas-rich (type 2) and a solid-bearing phase, halite (type 1) in a mixture of fluid inclusions indicates the occurrence of fluid immiscibility (Bodnar, 1995; Fournier, 1999). In such circumstances, homogenization temperature inclusions are trapped as their temperature is taken. Petrographic evidence on the simultaneous presence of these two categories is stored as the initial fluid temperature up 400 to 500°C with boiling and fluid immiscibility.

References

- Aghazadeh, M., 2009. Petrology and geochemistry of the Anzan-Khan Kandi and Sheivier Dagh granitoids (north and east of Ahar, East of Azerbaijan). PhD thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 493 pp. (in Persian with English abstract)
- Bodnar, R.J., 1994. Synthetic fluid inclusions: XII: the system $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$. Experimental determination of the halite liquidus and isochores for a 40 wt.% NaCl solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(3): 1053–1063.
- Bodnar, R.J., 1995. Revised equation and table for determining the freezing point depression of $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683–684.
- Fournier, R.O., 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic to brittle rock in the magmatic-epithermal environment. *Economic Geology*, 94(8): 1193–1212.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. and Reynolds, T.J., 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93(4): 374–404.
- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to the Iranian geology. Geological Survey of Iran, Tehran, 110 pp.