مجله زمین‌شناسی اقتصادی
سال ۱۳۹۱، شماره ۱، (جلد ۴)
صفحه ۱۳۵ تا ۱۵۳

Journal of Economic Geology
2012, No. 1 (Vol. 4)
ISSN 2008-7306

الگوی کانه‌زایی کانسار مس- طلا چهارگنبد (سیرجان)، با استفاده از مطالعات کانی‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمیایی و آزمونهای آماری چند متغیره

سیدجابر یوسفی*، عباس مرادیان

گروه زمین‌شناسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۱۶، پذیرش: ۱۳۹۱/۲/۱۱

چکیده

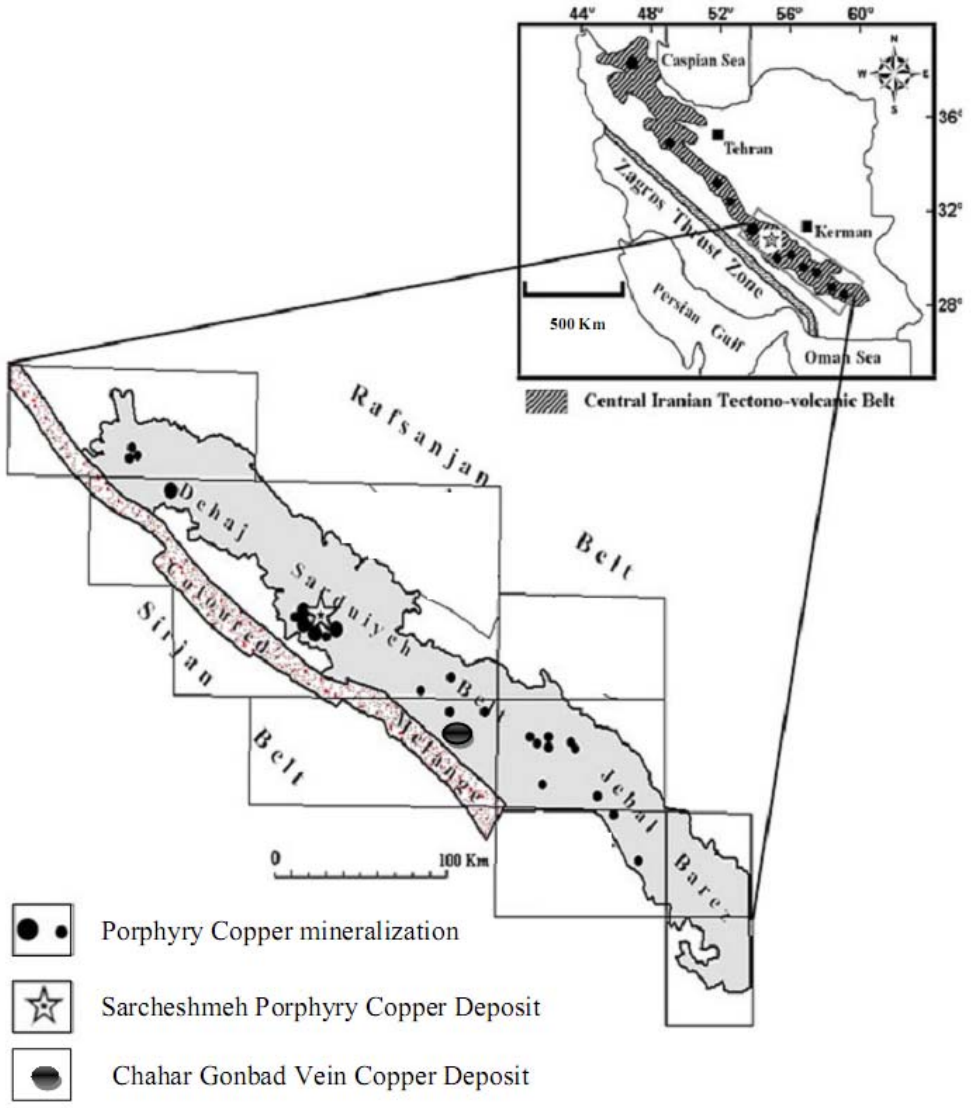
منطقه مورد مطالعه در جنوب‌شرق ایران، حدود ۱۱۰ کیلومتری جنوب‌غربی کرمان قرار گرفته است. واحدهای زمین‌شناسی در منطقه شامل سنگهای افیولیتی، سنگهای آتشفشانی، توده‌های نفوذی و سنگهای رسوبی می‌باشند. کانسارسازی در امتداد گسل چهارگنبد درون سنگهای آندزیتی، آندزیت بازالتی و توف‌های آندزیتی به‌صورت رگه‌ای رخ داده است. کانی‌سازی سولفیدی در سنگهای کانه‌زا به سه صورت انتشاری، رگه‌چه‌ای و رگه‌ای دیده می‌شوند که در این میان، پیریت و کالکوپیریت مهم‌ترین کانه‌های سولفیدی می‌باشند. دگرسانیها در منطقه مورد مطالعه شامل دگرسانیهای آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک می‌باشند. عناصر طلا، بیسموت، مس، گوگرد و سلنیم نسبت به سایر عناصر غنی‌شدگی بالاتری دارند، غنی‌شدگی این عناصر نسبت به زمینه طبیعی منطقه به‌ترتیب ۳۲۱، ۵۰۳، ۳۹۳، ۷۰۳، ۲۰۸ و نسبت به کلارک ۴۰۱، ۲۲۲، ۵۳۲، ۱۰۱ و ۱۵۶ برابر می‌باشد. براساس آزمونهای چند متغیره آماری، سه فاز اصلی کانه‌زایی در کانسار شناسایی شد که در اولین فاز، آرسنیک، کادمیم، سرب، روی و کلسیم در رگه‌های کلسیتی گرمابی غنی شده‌اند؛ در فاز دوم، مس، طلا، نقره، بیسموت، آهن و گوگرد درون رگه‌های سولفیدی غنی‌شدگی نشان می‌دهند و فاز سوم کانه‌زایی شامل غنی‌شدگی نیکل، منگنز، سلنیم و آنتیموان می‌باشد و مبین مرحله حدواسطی بین دو فاز کانه‌زایی قبلی است.

واژه‌های کلیدی: *الگوی کانه‌زایی، کانسار مس- طلا، دگرسانی، ژئوشیمی، چهارگنبد، سیرجان.*

مقدمه

کانه‌زایی رگه‌ای مرتبط با سیستم‌های پورفیری در ایران با توده‌های نفوذی گرانودیوریتی به سن میوسن همراه است که در کمربند آتشفشانی، نفوذی سهند- بزمان واقع شده‌اند (شکل ۱)[۱]. فعالیتهای آتشفشانی، نفوذی و کانه‌زایی در کمربند آتشفشانی، نفوذی سهند- بزمان در ارتباط با فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی در طول گسل رورانده زاگرس است[۲]. بخش جنوب‌شرقی کمربند آتشفشانی، نفوذی سهند- بزمان در استان کرمان قرار دارد و به کمربند فرعی دهج- ساردوئیه معروف است[۳] و یکی از مناطق اصلی کانه‌زایی مس در ایران به شمار می‌رود [۴] که در آن بیش از ۵۰ کانسار و رخداد معدنی پورفیری و رگه‌ای شناسایی شده است[۵]. محدوده معدنی مس- طلا چهارگنبد در بخش جنوب‌شرقی ایران در حدود ۱۱۰ کیلومتری جنوب‌غربی کرمان در طول شرقی و ´۱۹ °۵۶ عرض شمالی ´۵۸ °۲۹ جای گرفته است (شکل ۱). کانسار چهارگنبد در طی عملیات اکتشافی شرکت سهامی کل معادن درسال ۱۳۳۵کشف گردید. با ادامه عملیات اکتشافی این نتیجه حاصل شد که کانسار چهارگنبد وسعت زیادی داشته و مستلزم اکتشاف دقیقی است، بدین منظور درسال ۱۳۴۵ طی قراردادی با مؤسسه ژئوفیزیکی و عملیات زمین‌شناسی یوگسلاوی سابق، مطالعات اکتشافی وسیعی در منطقه صورت گرفت. درسال ۱۳۷۰ شرکت سهامی کل معادن پس از وقفه‌ای ۲۰ ساله، اقدام به راه اندازی و شروع مجدد فعّالیت درکانسار چهارگنبد کرد. بعد از این تاکنون طرحهای اکتشافی متعدّدی در این محدوده صورت گرفته و منجر به استخراج مس به صورت روباز و زیر زمینی شده است[۷]. میانگین مقادیر مس، طلا و نقره در کانسار چهارگنبد به ترتیب ٪ ۱۹/۲۴، ۱۵/۵ppm و ۳۵۵ppm می‌باشد[۸].

*مسؤول مکاتبات: sj_yousefi2010@yahoo.com



شکل۱. موقعیت زمین‌شناسی کانسار چهارگنبد در کمان ماگمایی سهند- بزمان[۶].

با وجود مطالعاتی که تاکنون در محدودهٔ معدنی چهارگنبد صورت گرفته است تاکنون الگوی کانه‌زایی برای این کانسار ارائه نشده است لذا هدف اصلی این پژوهش مشخص نمودن الگوی کانه‌زایی در این کانسار می‌باشد که برای این امر از مطالعات کانی‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی توده‌ی معدنی و آزمونهای آماری چند متغیره استفاده شده است.

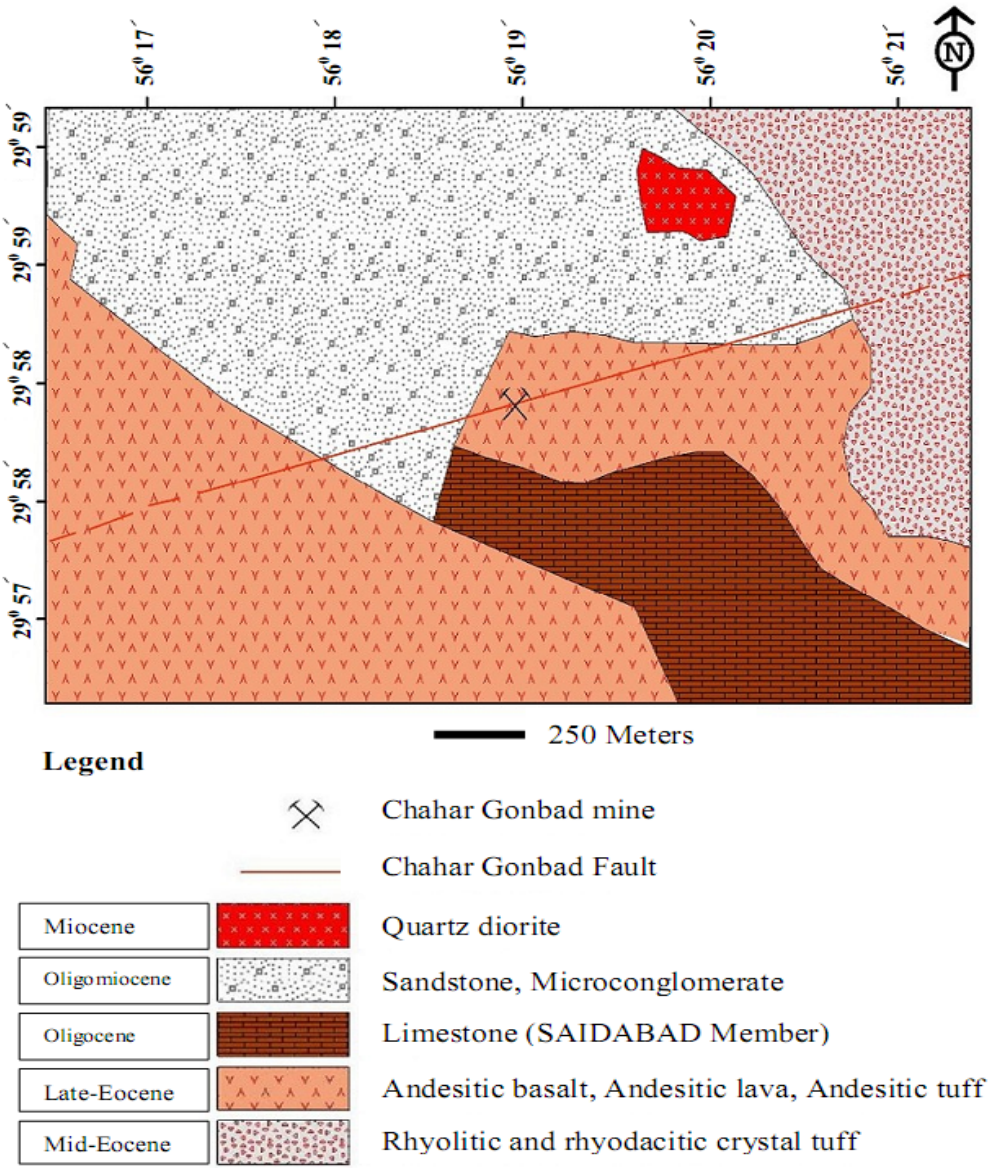
زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

در منطقه چهارگنبد قدیمی‌ترین سنگها که دارای روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق می‌باشند با عنوان آمیزهٔ رنگین شناخته می‌شوند، که از مخلوط ناهمگن سنگهای فوق بازی و چرت (رادیولاریت؟) تشکیل شده‌اند. این سازند با یک ناپیوستگی توسط سنگهای آندزیت ویتروفیر، بازالت‌های الیوین‌دار و توف آندزیتی با سن ائوسن پایانی- الیگوسن آغازین پوشیده شده است که سازند علیمرادی نامیده می‌شود[۸]. غالب‌ترین سیمای چینه‌شناسی در منطقه مورد بررسی آهکها می‌باشند که به طور پیش‌رونده‌ای از غرب تا شرق بر روی سنگهای دگرگونه و سازندهای آمیزهٔ رنگین و علیمرادی قرار گرفته‌اند. این آهکها به عنوان عضو سعیدآباد شناخته می‌شوند. در بالای این عضو یک توالی از ماسه سنگهای دانه درشت و کنگلومرای حاوی قطعات آهکی و یا توالی ضخیم از سنگهای پیروکلاستیک زیردریایی، گریوک،

مارن و آهک نودولی دیده می‌شود که سازند چهارگنبد نامیده می‌شود. سن تعیین شده برای این سازند محدودهٔ بالایی میوسن میانی است[۸]. بعد از میوسن میانی، چین خوردگی و گسلش بر منطقه تأثیر گذاشته‌اند. توده‌های نفوذی دیوریت پورفیری و دلریت سبب دگرگونی مجاورتی ضعیفی شده‌اند. در امتداد ساختارها (زون‌های گسله اصلی) فعّالیت گرمابی باعث کانه‌زایی کالکوپیریت و مقادیر فرعی از اسفالریت و گالن شده است که در محل تقاطع گسل‌ها، کانه‌زایی شدیدتر می‌باشد. در نهایت یک کنگلومرا با سن احتمالی پلیستوسن چین خوردگی چهارگنبد را پوشانده است[۸]. با بررسیهای صحرایی انجام شده، واحدهای زمین‌شناسی در گستره مورد مطالعه را می‌توان به ۴ دسته کلی تقسیم کرد: که شامل ۱- سنگهای افیولیتی، ۲- سنگهای آتشفشانی، ۳- توده‌های نفوذی و ۴- سنگهای رسوبی می‌باشند. سنگهای افیولیتی در منطقه شامل رگه‌های لیسونیتی، سنگهای سرپانتینی شده، گابرو دگرسان شده، سنگهای اسپیلیتی با میان لایه‌های آهک پلاژیک و سنگهای اسپیلیتی همراه با توف و رادیولاریت، آگلومرا (اسپیلیتی- دیابازی) همراه با دایک‌های دیابازی می‌باشند. سنگهای آتشفشانی منطقه شامل توف‌های بلوری ریولیتی- ریوداسیتی با رنگ روشن، توف و برش‌های تراکیتی و آندزیتی با میان لایه‌هایی از گدازه‌های آندزیتی است. سنگهای نفوذی در منطقه را می‌توان به دو دسته سنگهای گرانیت- گرانودیوریت و کوارتز دیوریت تقسیم نمود. واحدهای رسوبی در منطقه شامل سنگهای آهک پلاژیک، سنگ آهک بلورین با لایه‌بندی ضخیم، تناوب ماسه سنگهای زرد رنگ با سنگ آهک نومولیت‌دار خاکستری رنگ با لایه بندی خوب، ماسه سنگ و میکروکنگلومرا و سنگهای آهکی با فسیل‌های اسفنج و جلبک می‌باشد.

روش مطالعه

برای مطالعات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی سنگهای محدودهٔ معدنی چهارگنبد بعد از مطالعات صحرایی تعداد ۱۸ نمونه سنگی برداشت گردید. از نمونه‌های برداشت شده، بعد از انتقال به آزمایشگاه، جهت مطالعات کانی‌شناسی مقاطع نازک و صیقلی تهیه گردید. برای مطالعات ژئوشیمیایی، نمونه‌های سنگی با هاون چینی پودر گردید و بعد از انحلال نمونه‌های پودر شده در محلول چهار اسید شامل اسید نیتریک ٪۸۰، اسید فلوریک، اسید کلریک و اسید پرکلریک، نمونه‌های محلول برای تجزیه شیمیایی به آزمایشگاه Labwest استرالیا ارسال و برای تجزیه عناصر از روش ICP-MS استفاده گردید. برای بررسی دقت اندازه‌گیری، یک نمونه تکراری در بین نمونه‌ها ارسالی قرار داده شد و همراه با سایر نمونه‌ها مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت. با بررسی مقادیر عناصر در نمونه‌های تکراری و تعیین درصد خطا توسط فرمول ($\frac{\sigma}{\bar{x}} \times 1000$) مشخص شد که خطای به دست آمده کمتر از ٪۱۰ بوده و لذا تجزیه شیمیایی عناصر از دقت قابل قبولی برخوردار بوده‌اند. با توجه به نتایج کنترل کیفیت داده‌ها (QC) مشخص شد که داده‌ها دارای صحت مورد قبول نیز می‌باشند. برای پردازش روی مقادیر عناصر و تحلیل آماری آنها از نرم افزار SPSS.16 و Excel در محیط Windows XP استفاده گردید. در این مقاله برای بررسیهای کانی‌شناسی از میکروسکپ نوری Olympus B-12 در آزمایشگاه سنگ‌شناسی دانشگاه شهیدباهنر کرمان استفاده گردید. برای بررسی ژئوشیمیایی نمونه‌های سنگی ابتدا بر طبق جدول خلاصه آماری و نمودارهای فراوانی توزیع آماری عناصر مورد تحلیل قرار گرفت، سپس برای تعیین میزان افزودگی و کاهیدگی عناصر در سنگهای منطقه مقادیر متوسط عناصر نسبت به دو مرجع کلارک و زمینه طبیعی (زمینه طبیعی عبارت از سنگ غیردگرسان و غیر هوازده‌ای می‌باشد که نشان دهندهٔ مقادیر طبیعی عناصر در سنگهای منطقه است) سنجیده شد. برای پی بردن به روابط ژئوشیمیایی بین عناصر مختلف ضریب همبستگی پیرسون (Pearson Correlation) در سطح ٪۹۹/۹۹ و ٪۹۹/۹۵ محاسبه گردید. برای تعیین فازهای مختلف کانه‌زایی از آزمون PCA استفاده شد. آزمون PCA یک روش آماری مناسب برای ارزیابی ارتباط بین متغیرهای آماری (در این جا عناصر) از طریق کاهش پیچیدگی بین مجموعه داده‌هاست. برای این منظور آزمون PCA متغیرهای آماری را در یک قالب جدید با حذف متغیرهای غیرضروری و برجسته کردن متغیرهای با درجه اهمیت بالا، بررسی می‌کند. درجه اهمیت متغیرهای جدید براساس شاخص کایزر [۹] تعیین می‌گردد. براین اساس در متغیرهای جدید تنها مواردی که دارای شاخص بزرگ‌تر از یک هستند دارای اهمیت بوده و در تحلیل آماری بررسی می‌شوند.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده‌ی معدنی چهارگنبد.

هر کدام از متغیرهای جدید درصد مشخصی از واریانس داده‌ها را شامل می‌شوند که معمولاً مؤلفه اول بیشترین مقدار واریانس را داشته و به تدریج مؤلفه‌ی بعدی دارای واریانس کمتری خواهد بود [۱۰]، و همچنین برای دسته عناصر بر اساس روابط ژئوشیمیایی بین آنها، آنالیز خوشه‌ای روی نمونه‌ها انجام شد. در آنالیز خوشه‌ای عناصر و یا متغیرهای آماری براساس میزان همبستگی آماری (ناشی از رفتار ژئوشیمیایی بین عناصر) به خوشه‌ها و یا شاخه‌هایی تقسیم می‌شوند که بیانگر میزان ارتباط آنها با یکدیگر است. در این جا از روش آماری بین گروهی (Within groups) برای رسم نمودارهای خوشه‌ای استفاده شده است و فواصل بین خوشه‌ها نیز با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون (Pearson) مرتب شده‌اند.

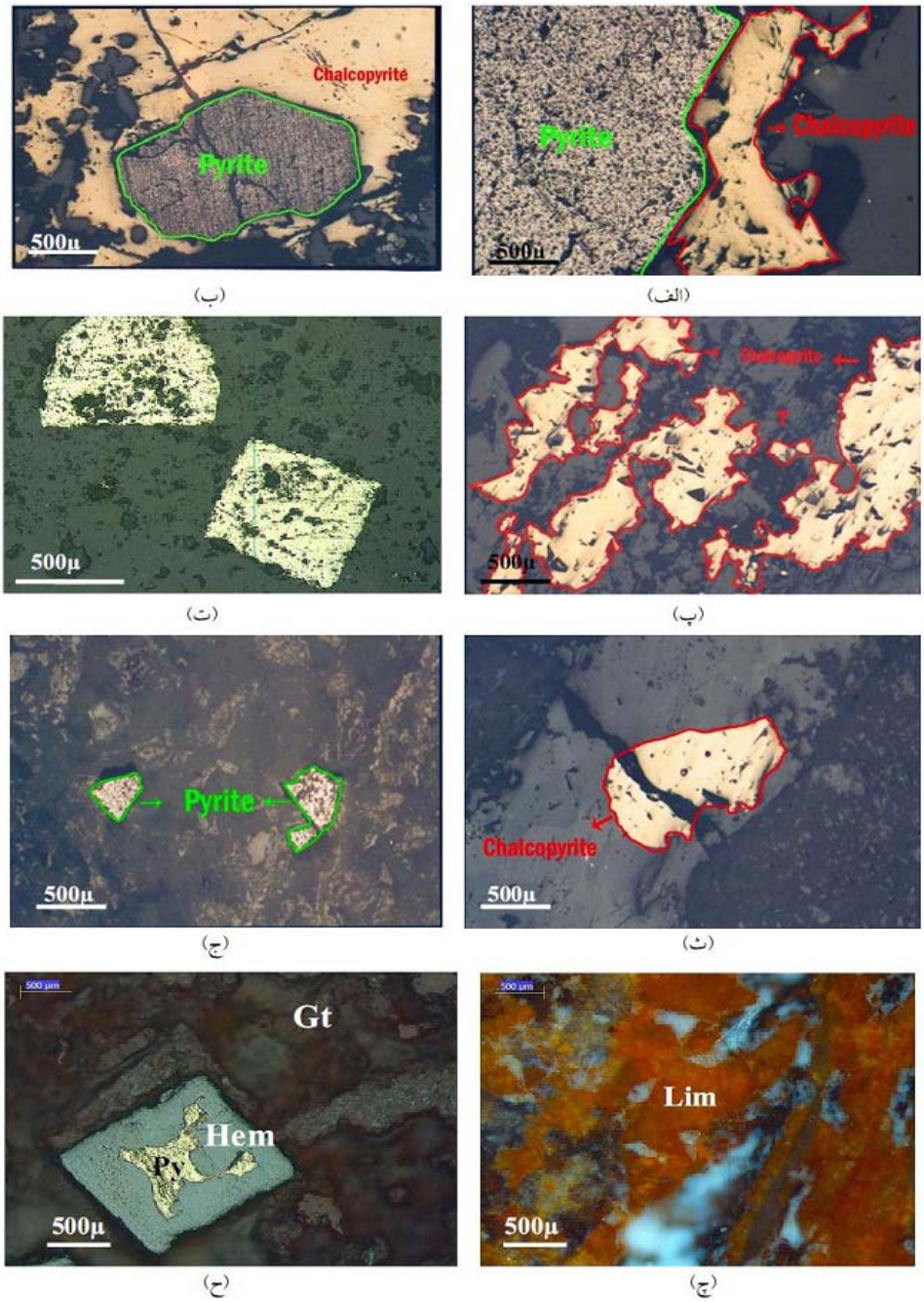
بحث و بررسی

کانه‌زایی در معدن چهارگنبد در اثر عبور سیالات گرمابی در طول سیستم گسلی چهارگنبد و در سنگهای دیواره آندزیتی، آندزیت بازالتی و توف‌ها به وجود آمده است، فرم کانسارسازی به صورت رگه‌ای و عدسی شکل در امتداد شمال‌شرق- جنوب-غرب و با شیب ۷۶ درجه در جهت شمال‌غرب می‌باشد. با

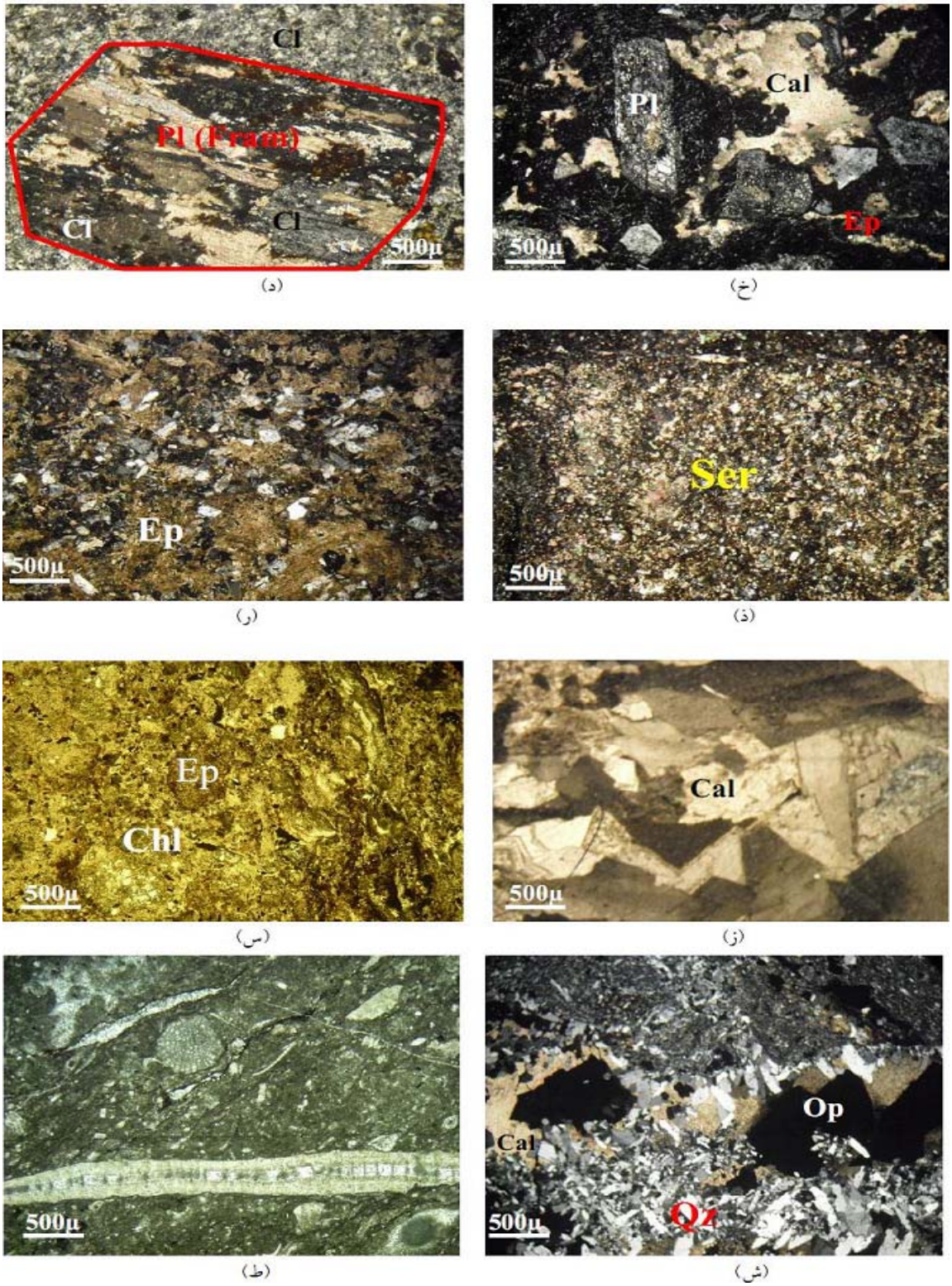
توجه به حضور فسیل لپیدوسکلینا (Lepidocyclina) در لایه‌های آهکی که توسط تودهٔ معدنی قطع گردیده، می‌توان گفت که کانه‌زایی احتمالاً در ائوسن میانی تا میوسن زیرین (اکیتانین) یا بعد از آن اتفاق افتاده است(شکل ۴ ط).

کانی‌شناسی

در محدودهٔ معدنی چهارگنبد کانی‌زایی به دو شکل اولیه و ثانویه و به صورت فلزی و غیر فلزی انجام شده است (شکل ۳و ۴).



شکل ۳. تصاویر میکروسکپی (نور انعکاسی) کانیایی سنگهای کانه‌زا: الف)، ب) و پ) کانی‌سازی پیریت و کالکوپیریت به صورت رگ‌چه‌ای در رگه‌های سیلیسی. ت) و ج) کانه‌زایی پیریت به صورت انتشاری در سنگهای توفی. ث) کالکوپیریت به صورت ادخال در رگه سیلیسی. چ) کانی لیمونیت در اثر اکسیداسیون کانیهای سولفیدی در گوسان. ح) هوازدگی پیریت؛ پیریت در وسط؛ هماتیت در حاشیه پیریت و گوتیت در اطراف هماتیت (Gt گوتیت، Hem هماتیت، Lim لیمونیت، Py پیریت).



شکل ۴. تصاویر میکروسکپی (نور عبوری) کانیهای سنگهای دیواره و اطراف معدن خ) کانی پلاژیوکلاز دگرسان شده، کلسیت ثانویه و اپیدوت) نشان دهندهٔ دگرسانی پروپیلیتیک. (د) کانی رسی در زمینه سنگ و قالب پلاژیوکلاز که در بعضی نقاط تبدیل به کانی رسی شده که مشخص کنندهٔ دگرسانی رسی (آرژیلیک) می‌باشد. (ذ) کانی سرسیت در تمامی مقطع، نشان دهندهٔ دگرسانی فیلیک. ر) و س) کانی اپیدوت و کلریت در زمینه سنگ، ناشی از تأثیر دگرسانی پروپیلیتیک بر سنگهای منطقه. ش) کانی‌سازی گرمابی کوارتز با بافت شانه‌ای و کلسیت همراه با کانیهای اپک (Cal کلسیت، Pl پلاژیوکلاز، Ep اپیدوت، Cl کانی رسی، Ser سرسیت، Chl کلریت، Op کانی اپک، Qz کوارتز).

کانیهای فلزی که شامل کانیهای پیریت و کالکوپیریت می‌باشند به صورت رگه‌ای، رگه‌چه‌ای و انتشاری در سنگ میزبانهای ولکانیکی حضور دارند (شکل ۳ الف تا ج). سایر کانیهای فلزی در منطقه شامل کانیهای ثانویه هماتیت، گوتیت و لیمونیت می‌باشد که در گوسان‌های منطقه حضور دارند (شکل ۳ چ و ح).کانیهای غیرفلزی کوارتز (با بافت شانه‌ای) و کلسیت به صورت رگه‌ای درون سنگهای کانسارسازی شده حضور دارند که احتمالاً توسط محلولهای گرمابی ته نشین شده‌اند (شکل ۴ ش). پیریت با فرمول FeS_2 دارای بیشترین تمرکز در سنگهای کانه‌زا می‌باشد. این کانی به صورت انتشاری در اندازهٔ کمتر از یک میلی‌متر، به شکل رگه‌چه‌ای با ضخامت کمتر از ۱ سانتی‌متر و به حالت رگه‌ای در ضخامت بیش از ۱۰ سانتی‌متر شکل (۶) در سنگهای میزبان حضور دارد. بیشترین درصد پیریت مربوط به رگه‌هایی است که در محل تقاطع گسل چهارگنبد با گسل مضطر وجود دارند که در برخی موارد تا ۷۵ درصد رگه را تشکیل می‌دهند. این کانی به صورت نیمه شکل‌دار همراه با کانیهای کالکوپیریت، کوارتز گرمابی و کلسیت گرمابی دیده می‌شود. بنابراین مشخص می‌شود که پیریت به سه صورت مختلف در سنگهای میزبان منطقه تشکیل شده است. در اولین حالت پیریت به صورت انتشاری در سنگهای توفی (که تحت تأثیر دگرگونی مجاورتی هورنفلسی شده‌اند)، دومین حالت پیریت به صورت رگه‌چه‌ای در رگه‌های کوارتز و کلسیت گرمابی و در سومین حالت پیریت در رگه‌های ضخیم همراه با کالکوپیریت شکل گرفته‌است. کالکوپیریت با فرمول $CuFeS_2$ کانه اصلی مس در معدن چهارگنبد است. این کانی نسبت به پیریت در سنگهای میزبان تمرکز کمتری دارد. کالکوپیریت در سنگهای میزبان منطقه به دو صورت رگ‌چه‌ای و رگه‌ای همراه با پیریت دیده می‌شود (شکل۳ الف تا پ). در مقاطع صیقلی کالکوپیریت به صورت نیمه شکل‌دار است که گاهی تا ۴۰ درصد سنگ را تشکیل می‌دهد. کالکوپیریت در سطح تحت تأثیر هوازدگی تبدیل به مالاکیت و آزوریت شده است که این کانیها از گسترش کمی برخوردار هستند. هماتیت با فرمول Fe_2O_3 در گوسان‌های منطقه بیشترین گسترش را دارد (شکل۳ ح و ۵) بنابراین مشخص می‌شود که این کانی به صورت ثانویه در نتیجه هوازدگی و تخریب کانیهای سولفیدی تشکیل شده است. هماتیت در مقاطع صیقلی در اطراف کانی پیریت دیده می‌شود که نشان دهندهٔ هوازدگی و تخریب پیریت و تبدیل آن به هماتیت است. از دیگر کانیهای ثانویه اکسید آهن می‌توان به کانیهای گوتیت ($FeO(OH)$) و لیمونیت($Fe_2O_3.H_2O$) اشاره کرد (شکل ۳ چ و ح) این کانیها همراه با هماتیت در زون دگرسانی فیلیک که در سطح قرار دارد، دیده می‌شوند و باعث تغییر رنگ آن شده‌اند.کانیهای غیرفلزی شامل کوارتز و کلسیت می‌باشند که از مهمترین کانیهای گانگ در کانسار مورد مطالعه به شمار می‌روند. این کانیها به صورت رگه‌ای و رگه‌چه‌ای در سنگهای کانه‌زا همراه با کانی پیریت دیده می‌شوند (شکل۴ ش) که نشان دهندهٔ ته‌نشست آنها از محلولهای گرمابی همراه با کانی پیریت در طی فرآیندهای کانسارسازی می‌باشد.

شکل ۵. گوسان هماتیتی در دیواره‌های بالایی کانسار چهارگنبد.

دگرسانی

با مطالعات صحرایی و مقاطع نازک سه نوع دگرسانی در ارتباط با فرایندهای کانسارسازی در کانسار چهارگنبد شناسایی شد. این دگرسانیها غالباً در سنگهای میزبان اطراف گسل چهارگنبد دیده می‌شود. در سنگهای دیواره نزدیک زون گسلی دگرسانی آرژیلیک پیشرفته حضور دارد که در نتیجه فرایندهای گرمابی تشکیل شده است. با فاصله گرفتن از زون گسلی،دگرسانی فیلیک جایگزین زون آرژیلیک پیشرفته می‌شود. آخرین دگرسانی زون پیروپیلیتیک می‌باشد که در سنگهای محدوده‌ی بیرونی کانسار گسترش یافته است.

دگرسانی آرژیلیک پیشرفته

دگرسانی آرژیلیک با مجموعه کانیایی کائولینیت- مسکویت[۱۱]، کائولینیت- مونتموریلونیت- کلریت[۱۲]، کائولینیت- دیکیت- پیروفیلیت (آرژیلیک پیشرفته) و کائولینیت- مونت‌موریلونیت+کلریت (آرژیلیک متوسط) [۱۳] مشخص می‌شود. در کانسار رگه‌ای چهارگنبد زون آرژیلیک بر اساس تجزیه‌های XRD غالباً از کانی کائولینیت، دیکیت و پیروفیلیت تشکیل شده است. لذا این زون احتمالاً در نتیجه عبور سیالات گرمابی با pH پایین از میان زون گسلی چهارگنبد تشکیل شده است. در شکل (۴د) تبدیل کانی پلاژیوکلاز به کانیهای رسی دیده می‌شود که به دلیل شدت دگرسانی تنها شکل ایدیومرف پلاژیوکلازها باقی مانده است. این دگرسانی در کانسار چهارگنبد سنگهای آندزیتی و توف‌ها را تحت تأثیر قرار داده و با کانیهای رسی و سرسیت مشخص می‌باشد.

دگرسانی فیلیک

دگرسانی فیلیک یا سریسیت در نتیجه شسته شدن سدیم و کلسیم از کانیهای آلومینوسیلیکاتی و منیزیم‌دار به وجود می‌آید [۱۴] کانیهای شاخص این دگرسانی شامل مجموعه سرسیت، بیوتیت، هیدرومیکا و کلریت [۱۲]، سرسیت- کوارتز [۱۵] و سرسیت، کوارتز- پیریت+کلریت [۱۳] است. این دگرسانی در کانسار چهارگنبد به رنگ خاکستری روشن دیده می‌شود و سنگهای میزبان آندزیتی و پیروکلاستیکی را تحت تأثیر قرار داده است. شکل (۴ د)، تبدیل پلاژیوکلاز به سریست را نشان می‌دهد. به طور کلی اجتماع پیریت، کوارتز، سرسیت همراه با کانیهای رسی ویژگی عمدهٔ این دگرسانی در کانسار چهارگنبد است. پیریت مهمترین کانی سولفیدی در این زون است که به صورت انتشاری و رگه‌ای دیده می‌شود (شکل ۶).

شکل ۶. دگرسانی فیلیک و حضور رگه سولفیدی در آن.

دگرسانی پروپیلیتیک

دگرسانی پروپیلیتیک تحت تأثیر آبهای جوی و ماگمایی تشکیل، و توسط مجموعه کانیایی سریسیت- اپیدوت- کلریت- کلسیت [۱۱] و کلریت- اپیدوت [۱۲] شناخته می‌شود. دگرسانی پروپیلیتیک در کانسار چهارگنبد به صورت زون سبز رنگی در خارجی‌ترین قسمت کانسار دیده می‌شود. آندزیت‌ها که دگرسانی پروپیلیتیک را تحمّل نموده‌اند اغلب دانه ریز بوده و به رنگ سبز همراه با رگه‌های فراوان کوارتز و کلسیت

شناخته می‌شوند. در مقاطع نازک این دگرسانی کانیهای پلاژیوکلاز به سریست، کلسیت، اپیدوت و کلریت تبدیل شده‌اند (شکل۴ خ و س).

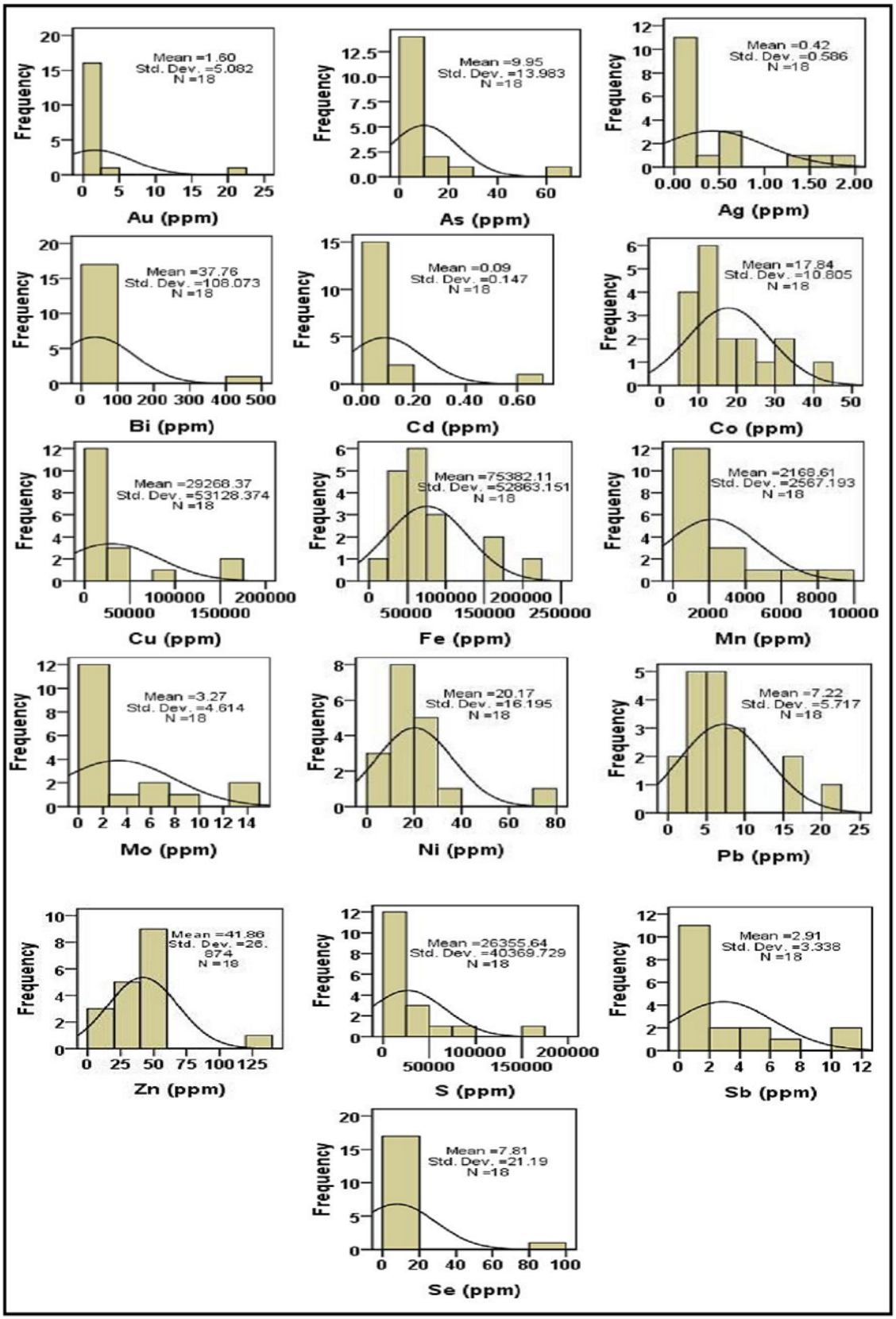
بررسیهای ژئوشیمیایی

بررسی فراوانی و توزیع آماری و ضریب غنی‌شدگی عناصر در سنگهای کانه‌زا

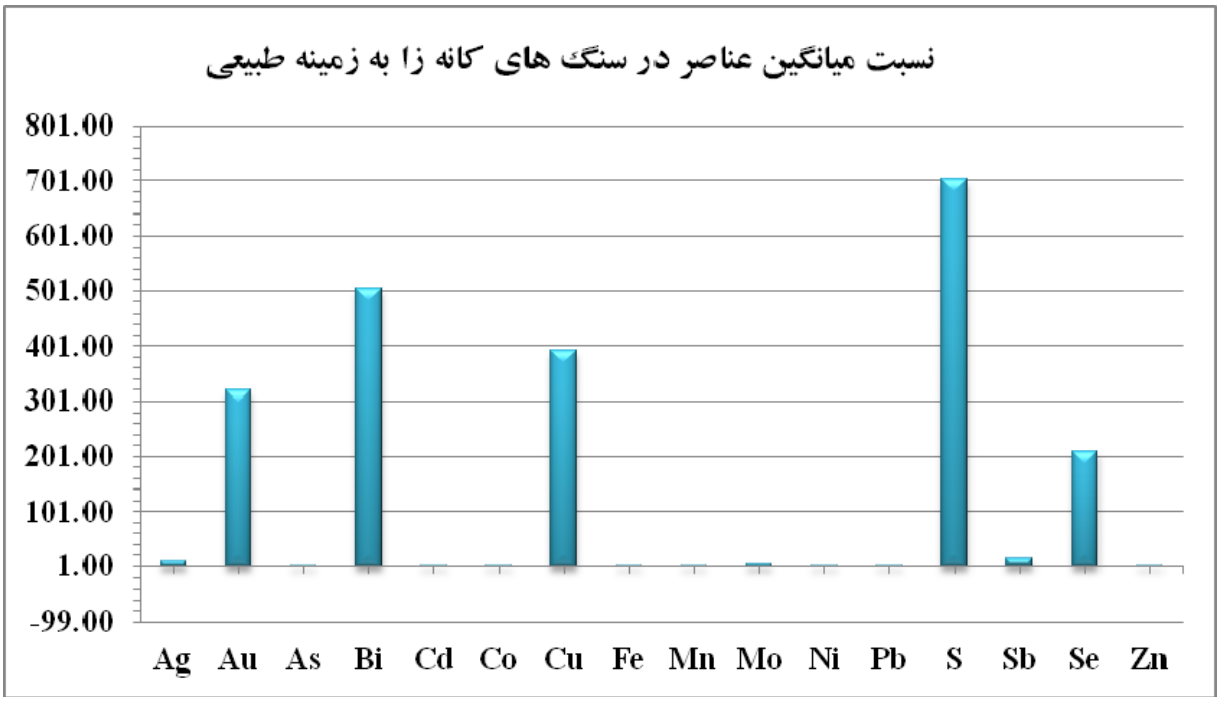
به منظور بررسی ژئوشیمیایی عناصر در سنگهای کانه‌زا منطقه مورد مطالعه، نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی عناصر توسط پارامترهای آماری مختلف مورد تحلیل و تفسیر قرار گرفت. در جدول (۱) و شکل (۷) خلاصه آماری و نمودارهای فراوانی مربوط به عناصر در سنگهای کانه‌زا آورده شده است. با توجه به مقدار چولگی درجدول (۱) و شکل (۷) مشخص می‌شود که توزیع آماری نقره، طلا، آرسنیک، بیسموت، کادمیم، مس، آهن، منگنز، مولیبدن، نیکل، سرب، گوگرد، آنتیموان، سلنیم و روی غیرعادی است؛ و توزیع آماری کبالت نزدیک به عادی می‌باشد. نمودارهای فراوانی طلا، آرسنیک، نقره، بیسموت، کادمیوم، کبالت، مولیبدن، نیکل، روی، گوگرد، آنتیموان و سلنیم بیانگر دو جمعیت، و نمودار فراوانی سرب، آهن، مس، نشان دهندهٔ سه جمعیت و نمودار فراوانی منگنز نمایانگر یک جمعیت در سنگهای کانه‌زا، کانسار چهارگنبد می‌باشند. به منظور بررسی میزان غنی‌شدگی عناصر مذکور در کانسار مورد مطالعه میانگین عناصر نسبت به دو مرجع کلارک و زمینه طبیعی این عناصر در سنگهای منطقه (زمینه طبیعی عبارت از سنگی که در خارج از محدودهٔ کانسارسازی در منطقه بوده و فاقد هر گونه دگرسانی و هوازدگی است، در این پژوهش جنس سنگ آندزیت می‌باشد) و نتایج آن در شکل(۸ و ۹) ارائه شده است. بنابر نمودارهای شکل (۸ و ۹) مشخص می‌شود که عناصر طلا، بیسموت، مس، گوگرد و سلنیم نسبت به بقیه عناصر غنی‌شدگی بالاتری دارند، غنی‌شدگی این عناصر نسبت به زمینه طبیعی منطقه به ترتیب ۳۲۱، ۵۰۳، ۳۹۳، ۷۰۳، ۲۰۸ و نسبت به کلارک ۴۰۱، ۲۲۲، ۵۳۲، ۱۰۱ و ۱۵۶ برابر می‌باشد.

جدول ۱. خلاصه آماری عناصر در سنگهای کانه‌زا کانسار چهارگنبد.

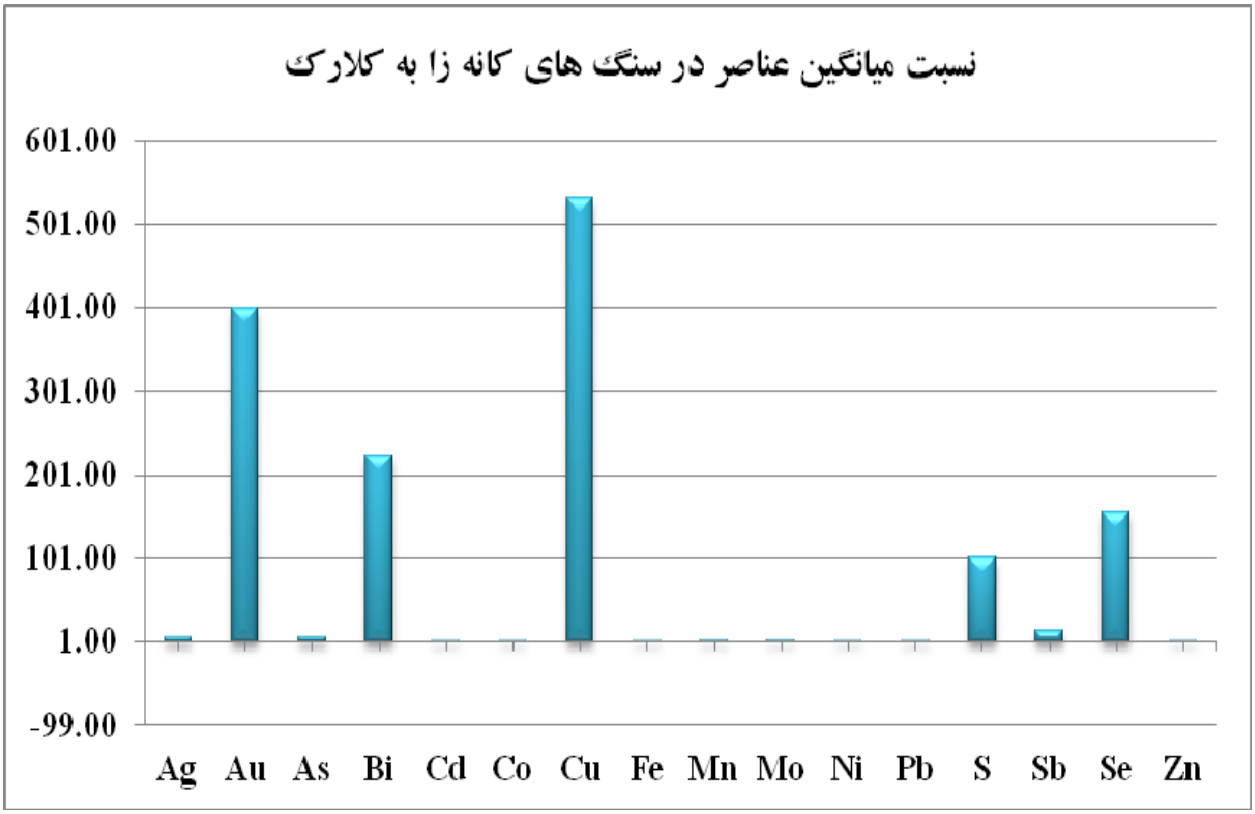
	میانگین	میانه	نما	چولگی	دامنه تغییرات	حداقل	حداکثر
Ag	۰/۴۲	۰/۰۸	۰/۰۳	۱/۵۹	۱/۷۷	۰/۰۳	۱/۸
Au	۱/۶	۰/۰۳	۰/۰۰۵	۴/۰۹	۲۱/۷۲	۰/۰۰۵	۲۱/۷۳
As	۹/۹۵	۵/۴	۴/۴	۳/۳۴	۵۹/۴	۲/۱	۶۱/۵
Bi	۳۷/۷۶	۲	۰/۱	۳/۹۲	۴۵۹/۹	۰/۱	۴۶۰
Cd	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۴	۳/۹۲	۰/۶۲	۰/۰۴	۰/۶۶
Co	۱۷/۸۴	۱۳/۰۵	۶	۰/۹۵	۳۶/۷	۶	۴۲/۷
Cu	۲۹۲۶۸/۳۷	۱۵۵/۱۵	۶	۱/۹۶	۱۶۷۹۹۴	۶	۱۶۸۰۰۰
Fe	۷۵۳۸۲/۱۱	۶۰۷۳۸/۵	۲۴۸۲۷	۱/۵۴	۱۸۲۴۷۵	۲۴۸۲۷	۲۰۷۳۰۲
Mn	۲۱۶۸/۶۱	۸۹۵/۵	۱۸۰	۱/۹۳	۹۳۵۶	۱۸۰	۹۵۳۶
Mo	۳/۲۷	۰/۸۵	۰/۳	۱/۶۱	۱۴	۰/۱	۱۴/۱
Ni	۲۰/۱۷	۱۵	۱۵	۲/۷۴	۷۳	۴	۷۷
Pb	۷/۲۲	۵/۱	۵	۱/۵۸	۲۰	۲	۲۲
S	۲۶۳۵۵/۶۴	۱۱۹۵۰	۳۷/۵	۲/۳۲	۱۵۴۹۶۲/۵	۳۷/۵	۱۵۵۰۰۰
Sb	۲/۹۱	۱	۰/۶	۱/۶	۱۰/۶	۰/۵	۱۱/۱
Se	۷/۸۱	۰/۵۶	۰/۳۸	۳/۹۹	۹۰/۹۳	۰/۱۵	۹۱/۰۸
Zn	۴۱/۸۶	۴۳/۸۵	۱۲	۲/۰۸	۱۱۸/۱	۱۲	۱۳۰/۱



شکل ۷. نمودارهای فراوانی عناصر در سنگهای کانه‌زا کانسار چهارگنبد.



شکل ۸. میزان غنی‌شدگی عناصر در سنگهای کانه‌زا نسبت به زمینه طبیعی منطقه.



شکل ۹. میزان غنی‌شدگی عناصر در سنگهای کانه‌زا نسبت به زمینه طبیعی منطقه.

ضریب همبستگی و ارتباط ژئوشیمیایی بین عناصر

همبستگی عبارت است از سنجشی از شدت وابستگی دو متغیر اندازه‌گیری شده در مجموعه‌ای از داده‌های منفرد [۱۶]. وضعیت توزیع و پراکندگی عناصر مختلف در واحدهای سنگی یک کانسار و بررسی ارتباط و وابستگی این عناصر با یکدیگر، از مهم‌ترین موارد در بررسیهای ژئوشیمیایی است، زیرا با استفاده از آن می‌توان تا حدودی به محیط و فرآیندهای مؤثر در تشکیل کانسار پی برد [۱۷]. در این بخش از تحقیق، به منظور تعیین ارتباط بین عناصر در سنگهای کانه‌زا، ضرایب همبستگی در ماتریس همبستگی این عناصر محاسبه گردید (جدول ۲). بررسی ضرایب همبستگی نتایج زیر را ارائه می‌دهد: ۱. مس، آهن و گوگرد در سطح ۹۹ درصد دارای ضریب همبستگی معنی‌دارند که با حضور کالکوپیریت در مطالعات مینرالوگرافی تطابق دارد و لذا مشخص می‌شود که همبستگی بین این عناصر ناشی از حضور آنها در کانی کالکوپیریت در سنگهای کانه‌زا منطقه می‌باشد. ۲. بیسموت در سطح اطمینان ۹۹ درصد ضریب همبستگی معنی‌دار با مس، آهن و گوگرد دارد که در این میان بیشترین ضریب همبستگی را با گوگرد بعد با مس و آهن دارد، بالا بودن ضریب همبستگی بیسموت با گوگرد و مس احتمالاً ناشی از حضور کانی ویتیچینیت (Wittichenite) به فرمول (Cu_3BiS_3) در رگه‌های سولفیدی است که احتمالاً آهن که ضریب همبستگی معنی‌دار کمتری با این عناصر دارد به صورت فرعی جانشین مس در این کانی شده است. ۳. آرسنیک با کلسیم، کادمیم، مولیبدن، سرب، منگنز، نیکل و روی دارای ضریب همبستگی معنی‌دار در سطح ۹۹ درصد می‌باشد، با توجه به این‌که آرسنیک، کادمیم، سرب و مولیبدن در محیطهای قلیایی به صورت محلول حضور دارند [۱۸] همبستگی بین عناصر مذکور و کلسیم نشان دهندهٔ حمل این عناصر توسط محلولهای گرمابی سرشار از کلسیم با ماهیت قلیایی می‌باشدکه در طی فرآیندهای گرمابی در منطقه همراه با تشکیل رگه‌های کربناتی ته‌نشین شده‌اند. همبستگی معنی‌دار روی، نیکل و منگنز با این عناصر احتمالاً ناشی از ته‌نشست آنها در طی واکنشهای محلولهای گرمابی حاوی آنها با رگه‌های کربناتی بوده است. ۴. نقره در سطح ۹۹ درصد با طلا، بیسموت، مس، آهن، منگنز، نیکل، گوگرد، آنتیموان و سلنیم دارای ضریب همبستگی معنی‌دار است که در این میان بیشترین ضریب همبستگی را با مس، آهن و گوگرد دارد، از این رو مشخص می‌شود که نقره در کانی کالکوپیریت جانشین مس و آهن شده است. ۵. طلا با بیسموت، مس، آهن و گوگرد دارای ضریب همبستگی معنی‌دار در سطح ۹۹ درصد می‌باشد؛ که در این میان بالاترین و پایین‌ترین ضریب همبستگی را به ترتیب با بیسموت و آهن داشته است، لذا احتمالاً طلا در کانیهای بیسموت‌دار نظیر ویتیچینیت جانشین شده است. ۶. آهن در سطح اطمینان ۹۹ درصد با عناصر منگنز، نیکل، گوگرد، آنیتموان و سلنیم دارای ضریب همبستگی معنی‌دار است، که در این میان بیشترین ضریب همبستگی را با گوگرد و سلنیم دارد، که این امر احتمالاً ناشی از جانشینی سلنیم به جای گوگرد در کانیهای سولفیدی نظیر پیریت می‌باشد و همچنین منگنز و نیکل نیز احتمالاً جانشین آهن شده‌اند.

الگوی احتمالی کانسارسازی در منطقه

در منطقه چهارگنبد توالیهای سنگی شامل سنگهای توفی و پیروکلاستیک، سنگهای ولکانیکی آندزیتی و آندزیت بازالتی و سنگهای رسوبی شامل ماسه‌سنگ، آهک‌ماسه‌ای و آهک می‌باشد. همچنین توده‌های نفوذی وسیعی همچون توده نفوذی تخت در منطقه وجود دارد که باعث ایجاد دگرسانیهای وسیعی در منطقه شده‌اند. در محدودهٔ معدنی مس چهارگنبد کانه‌زایی مس- طلا به صورت رگه‌ای در امتداد گسلهای اصلی چهارگنبد و مضطر اتفاق افتاده است. دگرسانیهای موجود در منطقه شامل دگرسانی پروپیلیتیک (در سنگهای محدوده بیرونی معدن)، دگرسانی فیلیک (در سنگهای دیواره معدن) و دگرسانی آرژیلیک پیشرفته (در محل تقاطع گسل چهارگنبد و مضطر) می‌باشد. کانسارسازی در سنگهای کانه‌زا در سه نوع انتشاری (کانیهای سولفیدی ریز با قطر کمتر از ۱ میلی‌متر در سنگهای توفی)، کانسارسازی رگه‌چه‌ای (رگه‌چه‌های کوارتز و کلسیت گرمابی و رگه‌چه‌های کانیهای سولفیدی با ضخامت کمتر از ۱ سانتی‌متر) و کانسارسازی رگه‌ای حاوی کانیهای سولفیدی با ضخامت بیش از ۲۰ سانتی متر، رخ داده است. در مبحث ژئوشیمی عناصر سنگهای کانه‌زا، مشخص شد که عناصر مس، طلا، بیسموت، منگنز، آنتیموان، سلنیم، نقره و نیکل در کانیهای سولفیدی بالاترین تمرکز و غنی‌شدگی را نشان می‌دهند؛ و عناصر آرسنیک، کادمیم، کلسیم، مولیبدن، سرب و روی در سنگهای کانه‌زا حاوی رگه‌چه‌های کلسیتی، سیلیسی و سولفیدی بیشترین تمرکز را دارند.

جدول ۲. ضریب همبستگی بین عناصر در سنگهای کانه‌زا در کانسار چهارگنبد.

	Ag	Au	As	Bi	Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	S	Sb	Se	Zn
Ag	۱	۰/۶۵۱**	۰/۱۵۱	۰/۶۸۵**	۰/۱۰۴	-۰/۰۷۵	۰/۹۴۰**	۰/۸۸۶**	۰/۵۳۱*	۰/۲۶۳	۰/۵۸۴*	۰/۲۱۴	۰/۸۴۳**	۰/۶۷۶**	۰/۶۴۳**	-۰/۳۰۴
Au		۱	-۰/۰۶۲	۰/۹۶۷**	۰/۰۴۰	-۰/۳۰۶	۰/۷۳۴**	۰/۴۷۱*	-۰/۰۴۱	۰/۱۳۰	-۰/۰۵۷	۰/۰۵۲	۰/۷۹۶**	۰/۱۳۷	-۰/۰۰۸	-۰/۲۱۲
As			۱	۰/۰۰۴	۰/۹۵۷**	۰/۱۴۳	-۰/۰۱۱	۰/۱۶۹	۰/۷۱۶**	۰/۵۵۷*	۰/۴۹۷*	۰/۷۴۷**	۰/۰۳۹	۰/۲۳۳	۰/۳۶۸	۰/۷۰۱**
Bi				۱	۰/۰۵۴	-۰/۱۲۸	۰/۶۹۹**	۰/۵۱۳*	۰/۰۳۶	۰/۱۱۱	۰/۰۹۸	۰/۱۶۲	۰/۸۷۴**	۰/۲۰۰	۰/۱۳۵	-۰/۲۰۴
Cd					۱	-۰/۰۱۱	۰/۰۰۵	۰/۱۰۷	۰/۵۹۷**	۰/۵۶۶*	۰/۲۸۸	۰/۷۱۵**	۰/۰۲۸	۰/۱۱۱	۰/۲۱۷	۰/۷۹۶**
Co						۱	-۰/۲۲۰	۰/۱۱۸	۰/۰۴۰	۰/۰۳۵	۰/۲۴۳	۰/۲۸۳	۰/۰۹۰	-۰/۰۰۲	۰/۲۱۲	۰/۰۹۲
Cu							۱	۰/۸۴۱**	۰/۳۴۴	۰/۱۹۴	۰/۳۲۱	۰/۰۶۲	۰/۷۵۶**	۰/۴۷۹*	۰/۴۱۰	-۰/۳۷۳
Fe								۱	۰/۵۸۷*	۰/۰۵۱	۰/۵۹۷**	۰/۲۹۳	۰/۶۸۱**	۰/۵۳۹*	۰/۷۱۴**	-۰/۱۲۸
Mn									۱	۰/۲۲۹	۰/۸۵۶**	۰/۵۷۷*	۰/۲۳۰	۰/۶۲۹**	۰/۸۰۰**	۰/۲۸۷
Mo										۱	۰/۱۳۶	۰/۲۴۹	۰/۳۴۲	۰/۲۷۳	۰/۰۲۴	۰/۱۶۸
Ni											۱	۰/۴۵۰	۰/۳۷۲	۰/۷۶۱**	۰/۹۰۴**	-۰/۰۱۱
Pb												۱	۰/۲۴۷	۰/۱۳۷	۰/۴۷۰*	۰/۶۱۷**
S													۱	۰/۴۸۱*	۰/۴۴۴	-۰/۲۶۲
Sb														۱	۰/۶۵۴**	-۰/۲۳۴
Se															۱	۰/۰۵۲
Zn																۱

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

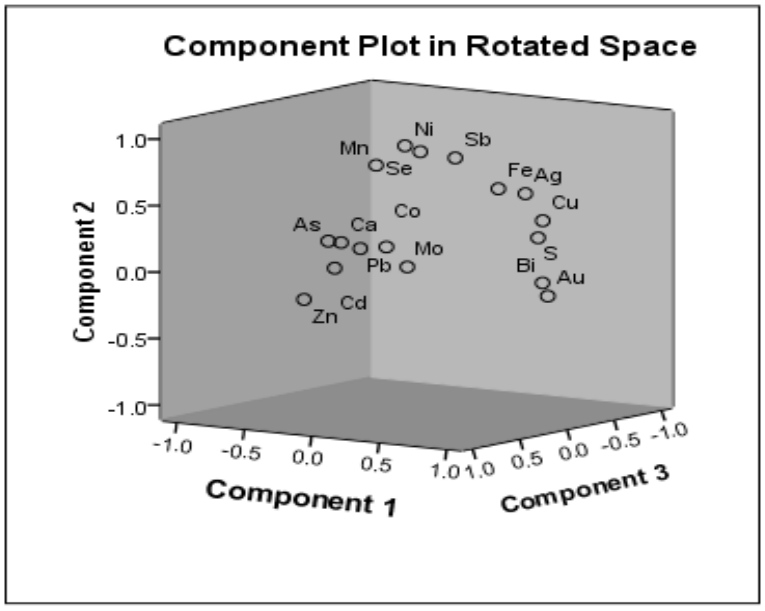
برای درک روابط عناصر مختلف در سنگهای کانه‌زا آزمون مؤلفه‌های اصلی و آنالیز خوشه‌ای انجام گرفت که نتایج آزمون مؤلفه‌های اصلی در جداول (۳ و ۴) و شکل (۱۰) آورده شده است. بر طبق آزمون مؤلفه‌های اصلی عناصر مختلف به پنج دسته اصلی تقسیم شده‌اند؛ با بررسی این عناصر مشخص می‌شود که این عناصر دارای خواص ژئوشیمیایی مختلفی می‌باشند. گروه اول که شامل مؤلفهٔ اول آزمون PCA می‌باشد در بردارندهٔ آهن، مس، طلا، نقره، گوگرد و بیسموت است (که در کانیها و رگه‌های سولفیدی حضور دارند) با توجه به حضور گوگرد در این گروه مشخص می‌شود که محلولهایی که باعث ته نشینی این عناصر شده‌اند سرشار از کمپلکسهای سولفیدی بوده‌اند، بنابراین به شدّت خاصیت اسیدی داشته‌اند. مؤلفهٔ دوم آزمون PCA شامل عناصر آنتیموان، سلنیم، منگنز و نیکل، آهن و نقره می‌باشند. گروه سوم شامل عناصر کلسیم، آرسنیک، سرب، کادمیم و روی است، در این گروه حضور کلسیم نشان دهندهٔ قلیایی بودن محلولهای ته‌نشین کننده این عناصر است و تنها استثنا عنصر روی است که به دلیل این‌که یک عنصر دما پایین می‌باشد احتمالاً با محلولهای دما پایین اسیدی حمل گشته و در مجاورت با رگه‌چه‌های گرمابی کلسیت ته‌نشین شده است. مؤلفهٔ چهارم و پنجم آزمون PCA، به ترتیب شامل عناصر کبالت و مولیبدن است. برای توضیح مراحل تهنشت این گروهها، ابتدا به بررسی دمای محلولهای حمل کننده این عناصر می‌پردازیم. برای تعیین محدودهٔ دمایی محلولهای قلیایی که تشکیل رگه‌چه‌های کلسیتی را داده‌اند بر طبق نظر [۱۹] (ضخامت ماکل‌های کلسیت بیانگر دمای تهنشست آن است) به بررسی ضخامت ماکل‌های کلسیت در سنگهای کانه‌زا حاوی رگه‌چه‌های کلسیتی پرداخته شد. ماکل کلسیت در سنگهای کانه‌زا حاوی رگه‌های کلسیت گرمابی ساده و نازک است (شکل ۴ز) که نشان می‌دهند دمای تشکیل این رگه‌چه‌ها کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است. بنابراین مشخص می‌شود که دمای کانسارسازی در سنگهای حاوی رگ‌چه‌های کلسیتی کمتر از ۲۰۰ درجه [۱۹] می‌باشد. از آن‌جایی که عناصر مس، طلا و بیسموت در دمای بالا حمل و ته‌نشین می‌شوند می‌توان نتیجه گرفت که دمای تشکیل رگه‌های سولفیدی (که حاوی این عناصر می‌باشند) در معدن بالاتر از دمای کانسارسازی در سنگهای است. بنابراین طبق این شواهد می‌توان بیان نمود که مراحل کانسارسازی در معدن مس- طلا چهارگنبد به صورت زیر می‌باشد: در اولین مرحله با نفوذ توده‌های گرانیتی تا گرانودیوریتی به درون توالیهای سنگی در منطقه و تفریق این توده‌های نفوذی و تجمع سیالات و محلولهای گرمابی با انواع کمپلکس‌های حاوی عناصر کالکوفیل در سطوح بالایی این توده‌های نفوذی، فشار بخار زیاد سیالات باعث به حرکت در آمدن این محلولها در امتداد مناطق ضعیفی همچون گسل چهارگنبد و مضطر شده‌اند، با به حرکت در آمدن این محلولهای اسیدی و برخورد آنها با توالیهای سنگی منطقه مانند توالیهای آمیزه رنگین (شامل سنگهای لیسونیتی، آهک، مارن و چرت)، سنگهای ولکانیکی آندزیتی و آندزیت بازالتی و توالیهای رسوبی مانند آهکها و همچنین ترکیب شدن این محلولها با آبهای سطحی، دمای این محلولها به شدّت پایین می‌آید و همچنین ماهیت اسیدی این محلولهای گرمابی به قلیایی بودن تغییر می‌نماید بنابراین این محلولها که دمای آنها (با توجه به ماکل کلسیت) تا زیر ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است شروع به ته‌نشینی عناصر اولیه خود مانند مس و سایر عناصر دما بالا که در محیط اسیدی محلول هستند، نموده و همچنین عناصری مانند آرسنیک و کادمیم را که در محیط قلیایی محلول هستند از توالیهای سنگهایی مانند ولکانیک‌ها شسته و به سطح آورده است و تشکیل رگه‌چه‌های کلسیتی حاوی عناصر آرسنیک، سرب، و کادمیم را داده است. با ادامه عبور محلولهای گرمابی، به دلیل این‌که توالیهای سنگهای منطقه دیگر توان تغییر در pH محلولهای گرمابی را نداشته اند (به دلیل شست‌وشو توسط محلولهای قبلی) و دمای سنگهای مسیر عبور محلولهای گرمابی افزایش یافته است بنابراین در این مرحله محلولهای اسیدی و با دمای بالاتری حضور داشته‌اند، در این زمان محلولهای اسیدی و دما بالا علاوه بر حمل عناصر از توده نفوذی، شروع به شستن عناصری که قبلاً در پی افزایش pH و کاهش دما نهشته شده بودند، می‌نمایند و بنابراین در این مرحله شاهد غلظت بالایی از عناصر در محلولهای گرمابی اسیدی و دما بالا هستیم که با نزدیک شدن به سطح و کاهش فشار شروع به تهنشست این عناصر (مس و طلا و بیسموت) به صورت رگه‌های سولفیدی می‌نماید.

جدول ۳. اطلاعات مربوط به آزمون مؤلفه‌های اصلی در سنگهای کانه‌زا کانسار چهارگنبد.

Total Variance Explained

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
۱	۶/۵۳۹	۳۸/۴۶۴	۳۸/۴۶۴	۶/۵۳۹	۳۸/۴۶۴	۳۸/۴۶۵	۴/۴۹۶	۲۶/۴۴۸	۲۶/۴۴۸
۲	۴/۳۸۵	۲۵/۷۹۶	۶۴/۲۵۹	۴/۳۸۵	۲۵/۷۹۶	۶۴/۲۵۹	۴/۳۸۴	۲۵/۷۸۷	۵۲/۲۳۵
۳	۲/۲۱۶	۱۳/۰۳۷	۷۷/۲۹۶	۲/۲۱۶	۱۳/۰۳۷	۷۷/۲۹۶	۳/۹۴۱	۲۳/۱۸۴	۷۵/۴۱۹
۴	۱/۴۱۰	۸/۲۹۲	۸۵/۵۸۸	۱/۴۱۰	۸/۲۹۲	۸۵/۵۸۸	۱/۴۹۳	۸/۷۸۳	۸۴/۲۰۲
۵	۱/۰۳۲	۶/۰۶۹	۹۱/۶۵۷	۱/۰۳۲	۶/۰۶۹	۹۱/۶۵۷	۱/۲۶۷	۷/۴۵۵	۹۱/۶۵۷
۶	۰/۵۱۹	۳/۰۵۱	۹۴/۷۰۸						
۷	۰/۳۴۲	۲/۰۱۱	۹۶/۷۲۰						
۸	۰/۲۳۶	۱/۳۸۹	۹۸/۱۰۹						
۹	۰/۱۷۳	۱/۰۱۶	۹۹/۱۲۴						
۱۰	۰/۰۸۶	۰/۵۰۶	۹۹/۶۳۰						
۱۱	۰/۰۳۶	۰/۲۱۱	۹۹/۸۴۱						
۱۲	۰/۰۲۰	۰/۱۱۶	۹۹/۹۵۷						
۱۳	۰/۰۰۴	۰/۰۲۴	۹۹/۹۸۱						
۱۴	۰/۰۰۳	۰/۰۱۵	۹۹/۹۹۶						
۱۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۹۹/۹۹۹						
۱۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۱۰۰						

Extraction Method: Principal Component Analysis.

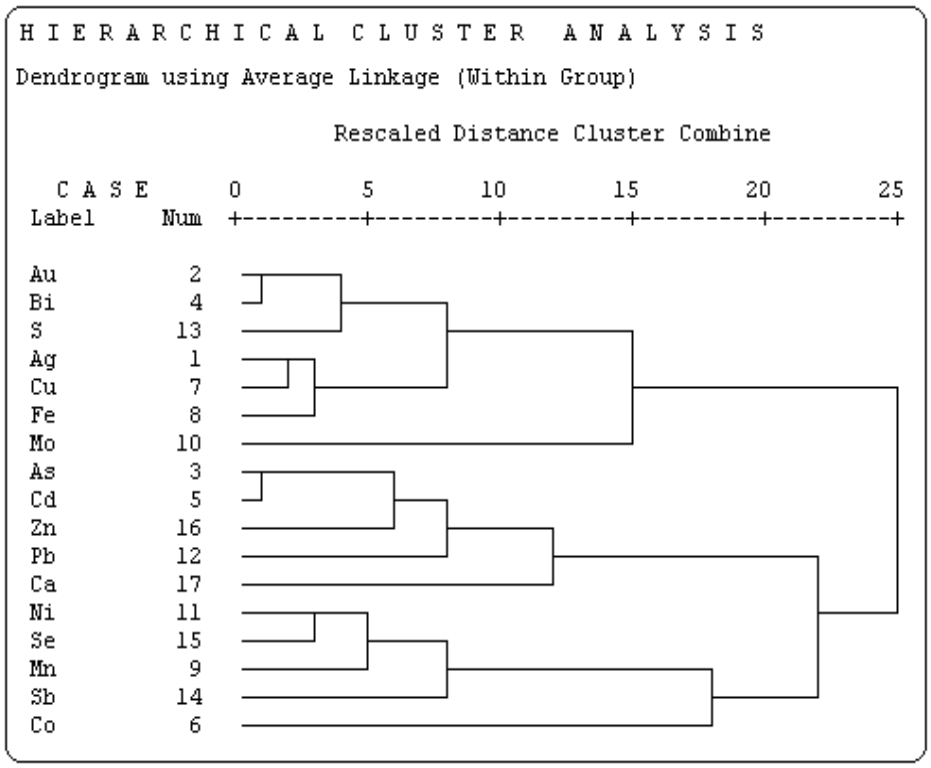


شکل ۱۰ نمودارسه بعدی عناصر در آزمون مؤلفه‌های اصلی.

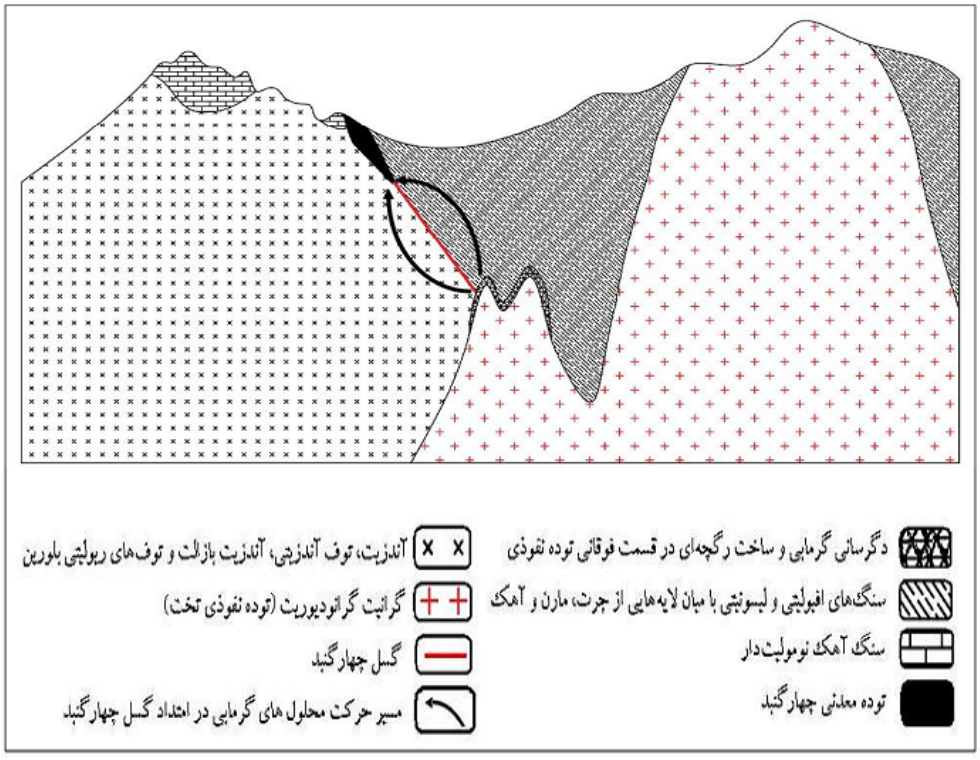
جدول ۴. اطلاعات مربوط به مؤلفه‌های چرخنده در آزمون مؤلفه‌های اصلی در سنگهای کانه‌زا کانسار چهارگنبد.

Rotated Component Matrix[a]					
	Component				
	۱	۲	۳	۴	۵
Ag	۰/۷۶۳	۰/۶۱۰	-۰/۰۶۰	-۰/۰۳۷	/۱۵۰
Au	۰/۹۶۵	-۰/۱۳۳	-۰/۰۱۰	-۰/۱۷۷	۰/۰۳۱
As	-۰/۰۴۲	۰/۳۰۷	۰/۸۷۷	-۰/۰۳۷	۰/۳۲۷
Bi	۰/۹۶۲	-۰/۰۲۷	۰/۰۴۱	-۰/۰۲۳	-۰/۰۱۰
Cd	۰/۰۳۳	۰/۱۱۷	۰/۹۱۷	-۰/۱۳۷	۰/۳۲۳
Co	-۰/۱۴۶	۰/۱۴۲	۰/۱۱۳	۰/۹۲۴	۰/۰۰۹
Cu	۰/۸۲۱	۰/۳۹۸	-۰/۱۶۱	-۰/۱۳۹	۰/۱۰۵
Fe	۰/۶۳۳	۰/۶۴۸	۰/۰۴۰	۰/۱۳۰	-۰/۱۱۲
Mn	۰/۰۴۷	۰/۸۳۱	۰/۴۹۶	-۰/۱۶۵	۰/۰۴۶
Mo	۰/۱۳۷	۰/۰۴۷	۰/۲۹۶	۰/۰۲۲	۰/۹۲۵
Ni	۰/۰۶۰	۰/۹۳۸	۰/۲۱۲	۰/۰۷۷	۰/۰۳۰
Pb	۰/۱۶۰	۰/۲۶۴	۰/۸۲۵	۰/۲۵۶	-۰/۰۴۹
S	۰/۸۸۳	۰/۲۹۵	-۰/۰۲۴	۰/۱۸۱	۰/۱۱۶
Sb	۰/۱۹۸	۰/۸۱۳	-۰/۱۲۴	-۰/۰۵۴	۰/۳۳۱
Se	۰/۱۶۵	۰/۹۰۲	۰/۱۹۷	۰/۱۴۴	-۰/۱۴۶
Zn	-۰/۲۱۴	-۰/۱۴۸	۰/۸۸۸	۰/۰۳۹	-۰/۰۵۷
Ca	-۰/۱۲۸	۰/۲۵۰	۰/۶۱۸	-۰/۶۲۸	-۰/۰۰۴
Extraction Method: Principal Component Analysis. Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.					
a. Rotation converged in 5 iterations.					

تا کنون دو مرحله کانه‌زایی در منطقه تشخیص داده شد: مرحله اول که در اثر محلولهای قلیایی و دما پایین تشکیل شده بود و مرحله دوم توسط محلولهای دما بالا و اسیدی تشکیل شده است، بنابراین یک مرحله بینابین این دو گروه باید وجود داشته باشد. این مرحله توسط عناصر منگنز، نیکل، سلنیم و آنتیموان و تا حدودی آهن و نیکل که در مؤلفهٔ دوم آزمون PCA قرار دارند، شناخته می‌شود. از نظر نوع احتمالی کانسارسازی با توجه به حضور دگرسانیهای آرژیلیک پیشرفته با کانیهای کائولینیت، دیکیت و پیروفیلیت و همچنین کوارتز حفره‌ای در محل برخورد گسل چهارگنبد با گسل مضطر می‌توان گفت که محلولهای گرمابی به شدت اسیدی بوده‌اند اما به دلایلی که در بالا ذکر شد و محلولهای گرمابی در طی عبور از سنگهای کربناتی و قلیایی از اسیدی به قلیایی تغییر نموده‌اند و نتوانسته اند باعث ایجاد دگرسانیهای آرژیلیک پیشرفته همراه با کوارتز حفره‌ای در وسعت زیاد شوند. از نظر ژئوشیمیایی در این کانسار مقدار بیسموت افزودگی ۲۲۲ برابر نسبت به کلارک نشان می‌دهد، که طبق گفته [۲۰] در کانسارهای اپی ترمال با سولفید بالا بر خلاف کانسارهای اپی ترمال با سولفید پایین این عنصر دارای افزودگی است. لذا می‌توان گفت که این کانسار احتمالاً یک کانسار اپی‌ترمال سولفید بالا باشد. به منظور بررسی دقیق نتایج آزمون مؤلفه‌های اصلی، آنالیز خوشه‌ای روی مقادیر عناصر در سنگهای کانه‌زا صورت گرفت که نتایج آن در شکل (۱۱) ارائه شده است. بر اساس این آزمون عناصر به سه دسته تقسیم شده‌اند که خود دلیلی بر سه مرحله مختلف کانه‌زایی در کانسار چهارگنبد است. در اولین دسته عناصر طلا، بیسموت، گوگرد، نقره، مس، آهن و مولیبدن قرار گرفته است. با توجه به حضور گوگرد در این گروه مشخص می‌شود که این عناصر در رگه‌های سولفیدی غنی شده‌اند؛ که با توجه به آزمون PCA مربوط به مراحل آخر کانه‌زایی می‌باشند که محلولهای گرمابی اسیدی بوده‌اند. دسته دوم شامل عناصر آرسنیک، کادمیم، روی، سرب و کلسیم است، که حضور این عناصر با کلسیم در این آزمون نیز تصدیقی بر غنی‌شدگی عناصر مذکور در رگه‌های کلسیتی می‌باشد. با مقایسه این نتایج با آزمون PCA مشخص می‌شود که این عناصر در مراحل اولیه کانه‌زایی که محلولهای گرمابی توسط سنگهای مسیر عبور سیالات گرمابی، خاصیت قلیایی پیدا کرده‌اند حمل شده‌اند و در سطح ته‌نشین گشته‌اند. دسته سوم شامل عناصر نیکل، سلنیم، منگنز، آنتیموان و کبالت می‌باشد. این عناصر به استثنای کبالت در آزمون PCA در مؤلفهٔ دوم قرار دارند و همان طوری که ذکر شد احتمالاً مربوط به یک فاز حدواسط بین محلولهای گرمابی قلیایی اولیه و محلولهای اسیدی فاز آخر کانه‌زایی می‌باشند.



شکل ۱۱. نمودار آنالیز خوشه‌ای عناصر در سنگهای کانه‌زا کانسار چهارگنبد.



شکل ۱۲. ارتباط کانسار چهارگنبد با تودهٔ نفوذی تخت و گسل چهارگنبد.

نتیجه‌گیری

با بررسیهای صحرایی انجام شده، واحدهای زمین‌شناسی در گستره مورد مطالعه شامل سنگهای افیولیتی، سنگهای آتشفشانی، توده‌های نفوذی و سنگهای رسوبی می‌باشند. کانه‌زایی در معدن چهارگنبد در اثر عبور سیالات گرمابی در طول سیستم گسلی چهارگنبد و در سنگهای دیواره به وجود آمده است و فرم کانسارسازی به صورت رگه‌ای و عدسی شکل می باشد.در محدودهٔ معدنی چهارگنبد کانی‌زایی به دو شکل اولیه و ثانویه و به صورت فلزی و غیر فلزی انجام شده است. کانیهای فلزی که شامل کانیهای پیریت و کالکوپیریت می‌باشند به صورت رگه‌ای، رگه‌چه‌ای و انتشاری در سنگ میزبانهای ولکانیکی حضور دارند؛ سایر کانیهای فلزی در منطقه شامل کانیهای ثانویه هماتیت، گوتیت و لیمونیت است که در گوسان‌های منطقه دیده می‌شوند. کانیهای غیرفلزی کوارتز (با بافت شانه‌ای) و کلسیت به صورت رگه‌ای درون سنگهای کانسارسازی شده حضور دارند که احتمالاً توسط محلولهای گرمابی ته نشین شده‌اند. دگرسانیها در منطقه شامل دگرسانیهای آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک می‌باشند، در سنگهای دیواره نزدیک زون گسلی دگرسانی آرژیلیک پیشرفته حضور دارد که در نتیجه فرآیندهای گرمابی تشکیل شده است، زون آرژیلیک بر اساس تجزیه‌های XRD غالباً از کانی کائولینیت، دیکیت و پیروفیلیت تشکیل شده است. با فاصله گرفتن از زون گسلی، دگرسانی فیلیک جایگزین زون آرژیلیک پیشرفته می‌شود و اجتماع پیریت، کوارتز، سرسیت همراه با کانیهای رسی ویژگی عمدهٔ این دگرسانی در کانسار چهارگنبد است. آخرین دگرسانی زون پیروپیلیتیک می‌باشد که به صورت زون سبز رنگی در سنگهای محدودهٔ بیرونی کانسار گسترش یافته است. آندزیت‌ها که دگرسانی پروپیلیتیک را تحمّل نموده‌اند اغلب دانه ریز و به رنگ سبز همراه با رگه‌های فراوان کوارتز و کلسیت شناخته می‌شوند. توزیع آماری نقره، طلا، آرسنیک، بیسموت، کادمیم، مس، آهن، منگنز، مولیبدن، نیکل، سرب، گوگرد، آنتیموان، سلنیم و روی غیرعادی است، و توزیع آماری کبالت نزدیک به عادی می‌باشد. طلا، بیسموت، مس، گوگرد و سلنیم نسبت به سایر عناصر غنی‌شدگی بالاتری دارند، غنی‌شدگی این عناصر نسبت به زمینه طبیعی منطقه به ترتیب ۳۲۱، ۵۰۳، ۳۹۳، ۷۰۳، ۲۰۸ و نسبت به کلارک ۴۰۱، ۲۲۲، ۵۳۲، ۱۰۱ و ۱۵۶ برابر می‌باشد. با توجه به حضور دگرسانی آرژیلیک پیشرفته با کانیهای رسی کائولینیت، دیکیت و پیروفیلیت و همچنین حضور کوارتز حفره‌ای در سنگهای دیواره‌ی این کانسار، احتمالاً نوع کانی سازی آن اپی‌ترمال با سولفید بالاست. بر اساس آزمونهای چند متغیره سه فاز اصلی کانه‌زایی در کانسار شناسایی شد که در اولین فاز آرسنیک، کادمیم، سرب، روی و کلسیم در رگه‌های کلسیتی گرمابی غنی شده‌اند؛ در فاز دوم مس، طلا، نقره، بیسموت، آهن و گوگرد درون رگه‌های سولفیدی غنی‌شدگی نشان می‌دهند و فاز سوم کانه‌زایی شامل غنی‌شدگی نیکل، منگنز، سلنیم و آنتیموان می‌باشد و مبین مرحله حدواسطی بین دو فاز کانه‌زایی قبلی می‌باشد.

منابع

[1] Hassanzadeh J., *"Metallogenic and tectono-magmatic events in SE sector of the Cenozoic active continental margin of center Iran (Shahr e Babak, Kerman province) "*, ph.D thesis, University of California, (1993) 201.

[2] Foester H., *"Mesozoic-Cenozoic metallogenesis in Iran"*, Journal of the Geological Society of London 135 (1978) 443-455.

[3] Berberian M., King G. C. P., *"Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran"*, Canadian Journal of Earth sciences 18 (1981) 210-265.

[4] Aftabi A., Atapour H., *"Regional aspects of shoshonitic volcanism in Iran"*, Episodes, 23 (2000) 119-125.

[۵] تقی‌پور ن.، آفتابی ع.، رمضانی م. ر.، *"بررسی هاله‌های دگرسانی- کانه‌زایی و الگوی پراکندگی مس، مولیبدن، طلا و نقره در کانسار مس پورفیری میدوک، شهربابک، کرمان"*. مجله علوم زمین، شماره ۷۲ (۱۳۸۸) ص ۴۵ تا ۵۴.

[6] Shahabpour J., Kramers J. D., "*Lead isotope data from the Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Iran*" , Mineralium Deposita 22 (1987) 275–281.

[۷] یوسفی شریک‌آباد س. ج.، *"بررسی اثرات زیست‌محیطی عناصر سمی در محدوده‌ی معدنی مس- طلا چهارگنبد، سیرجان"*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد (۱۳۹۰) ۲۸۴ ص.

[8] Sjerp N., Issakhanian V., Brants A., *"The Geological Environment of the ChaharGonbad Copper Mine: A Study in Tertiary Copper*

Mineralization", Geological Survey of Iran, Report 16 (1969) 64.
[9] Kaiser H. F., *"The application of electronic computers to factor analysis",* Education Psychology, 20 (1960) 141-151.
[10] Khorasanipour M., Tangestani M., *"Application of multivariate statistical methods to indicate the origin and geochemical behavior of potentially hazardous elements in sediments around the Sarcheshmeh copper mine, SE Iran,"* Environmental Earth Science, (2011) 1-17.
[11] Gilmour p., *"Grades of the porphyry copper deposits of southwestern North America",* University of Arizona Press (1982) 736.
[12] Lowell J. D., Guilbert J. M., *"Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry ore deposits",* Economical Geology 65 (1970) 373-408.
[13] McMillan W. J., Panteleyev A., *"Porphyry copper deposits, in Roberts, R. G., and Sheahan, P.A., (EDS) ",* Geoscience Canada, 3 (1988) 194.
[14] Beane R. E., Titly S. R., *"porphyry copper deposits: part II: Hydrothermal alteration and mineralization",* Economic Geology, 75 (1981) 214-269.
[15] Sillito R. H., *"the tops and bottoms of porphyry copper deposits"* Economical Geology, 65 (1973) 799-815.
[16] Rollinson H. R., *"Using geochemical data: evolution, presentation",* interpretation, London, UK, (1993) 652.
[17] Barnes H. L., *"Geochemistry of hydrothermal ore deposits"*, third, New York, John Wiley and Sons, (1997) 797.
[18] Eby G. N., *"Principles of Environmental Geochemistry",* University of Massachusettes, Lowel, (2004) 515.
[19] Burkhard M., *"Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review",* Journal of Struatural Geology, 15 (1993) 351-368.
[20] White N. C., Hedenquist J., *"Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration"*, published in SEG Newsltter, 23 (1995) 9-13.