اهمیت اکتشافی و اقتصادی گوسان (کلاهک آهنی) در محدوده معدنی مس- طلای چهارگنبد، سیرجان

سیدجابر یوسفی [۱*]، علیجان آفتابی [۲] و عباس مرادیان [۳]

[۱] دانشجوی دکترا، بخش زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران
[۲] استاد، بخش زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران
[۳] دانشیار، بخش زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۳/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۲۹

چکیده

گوسان‌ها در محدوده معدنی مس- طلای چهارگنبد از وسعت قابل توجهی برخوردارند. کانی‌شناسی گوسان‌های مورد مطالعه شامل کانی‌های هماتیت (Fe_2O_3)، گوتیت (FeO(OH)) و لیمونیت ($Fe_2O_3.H_2O$) با بافت کلوفرم، کوارتز، کلسیت و کانی‌های رسی می‌باشد. عناصر: Ag= ۱/۰۸، As=۱/۱۹، Bi=۷۰/۱۲، Mn=۴/۱۱، Mo=۲/۳۷، Pb=۱/۵۱، Sb=۱/۷ و Fe=۱/۷۱ نسبت به سنگ‌های کانه‌زا دارای افزودگی و عناصر Au=۰/۹، Cu=۰/۰۳، S=۰/۰۳، Se=۰/۰۴ و Zn=۰/۹۴ دارای کاهیدگی می‌باشند. با بررسی ضرایب همبستگی بین عناصر در گوسان‌های منطقه، چهار گروه از عناصر قابل تفکیک است. گروه اول شامل بیسموت، مس و آنتیموان می‌باشند که با آهن و منگنز همبستگی دارند، همبستگی بین این عناصر احتمالاً ناشی از جذب بیسموت، مس و آنتیموان توسط اکسیدهای آهن و منگنز در گوسان و یا حضور این عناصر در اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن می‌باشد. در گروه دوم سرب و نقره می‌باشد که با بیسموت، مس و آنتیموان همبستگی دارند و فاقد ارتباط معنی‌دار با آهن و منگنز می‌باشند. گروه سوم در بر گیرنده آرسنیک، مولیبدن و روی می‌باشد که در محیط اسیدی گوسان نامحلول هستند. گروه چهارم شامل دو عنصر گوگرد و سلنیم است که در کانی‌های سولفیدی و در طی مراحل تشکیل گوسان و در کانی‌های سولفاتی متمرکز می‌شوند. همبستگی عناصری مانند بیسموت و مس ناشی از همراهی و همبستگی آنها در سنگ‌های کانه‌زا و سولفیدی اولیه می‌باشد. در گوسان‌های منطقه، بیسموت با افزودگی ۳۱۲۳/۹۴ نسبت به کلارک بیانگر ارزش اقتصادی بیسموت در گوسان‌های محدوده‌ی معدنی چهارگنبد می‌باشد و عناصر مس و طلا نیز به ترتیب دارای افزودگی ۱۲/۶۲ و ۴۰۰ برابر نسبت به کلارک می‌باشند. همه عناصر در گوسان‌ها، به ویژه بیسموت می‌تواند به عنوان یک راهنمای اکتشافی مورد ارزیابی قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: گوسان، کانه‌زایی مس- طلا، کانی‌شناسی، ژئوشیمی، روش آماری PCA، عناصر ردیاب اکتشافی.

***نویسنده مسئول:** سید جابر یوسفی
E-mail: sjyousefi2012@gmail.com

۱- پیش‌نوشتار

گوسان توده‌ای غنی از رس و اکسی- هیدروکسیدهای آهن در بالای کانسارهای سولفیدی است که در اثر هوازدگی کانی‌های سولفیدی تشکیل و در برخی موارد شکل کانی‌های سولفیدی در آن حفظ شده است (حیدری و همکاران، ۱۳۸۷). در طی تشکیل گوسان عناصر فرعی به شدت توسط اکسی و هیدروکسیدهای آهن جذب و ته‌نشین می‌شوند (Rose et al., 1979). میزان جذب عناصر فرعی توسط اکسی و هیدروکسیدهای آهن تحت تأثیر pH قرار دارد؛ به طوری که مقدار عناصر جذب شده در حضور محلول‌های اسیدی کاهش می‌یابد (Rose et al., 1979) و در pHهای خنثی، عناصر فرعی همراه با اکسیدهای آهن جذب می‌شوند و رسوب می‌کنند (Atapour & Aftabi, 2007). استفاده از ویژگی‌های ژئوشیمیایی گوسان‌ها تاکنون در زمینه‌های اکتشافی و زیست‌محیطی کانسارهای مس پورفیری توسط سلیمانی (۱۳۸۸) و Atapour & Aftabi (2007) در ایران و اکتشاف کانسارهای نیکل- مس در لاتریت‌های نواحی غربی استرالیا بسیار موفقیت‌آمیز بوده است. سرب، مس و نقره توسط اکسیدهای آهن جذب می‌شوند؛ سلنیم، آرسنیک و مولیبدن نیز که تشکیل کمپلکس‌های آنیونی می‌دهند در شرایط مختلفی توسط اکسیدهای آهن جذب می‌شوند (Nickel, 1979). به جز مطالعه مقدماتی گوسان‌های چهارگنبد توسط Atapour & Aftabi (2007) مطالعات قابل توجهی در ارتباط با پتانسیل اقتصادی گوسان‌ها صورت نگرفته است. در محدوده معدنی چهارگنبد کانه‌زایی مس رگه‌ای در وسعت زیادی رخ داده است و نیز وسعت پراکندگی گوسان‌ها در این منطقه قابل توجه است. در معدن چهارگنبد ذخیره ماده معدنی شامل ۴۳۳۶۱۴۸ تن کانسنگ مس با عیار ۱/۳۳٪ است (فلک‌زاده، ۱۳۸۵) و گوسان‌ها تا ژرفای ۵ تا ۱۰ متر تشکیل شده‌اند. هدف از این مطالعه بررسی کانی‌شناسی، تغییرات ژئوشیمیایی عناصر در گوسان‌های توده معدنی چهارگنبد است.

۲- زمین‌شناسی منطقه چهارگنبد

محدوده معدنی مس- طلای چهارگنبد در بخش جنوب خاوری ایران، حدود ۱۱۰ کیلومتری جنوب باختری کرمان در طول خاوری ´۱۹ °۵۶ و عرض شمالی ´۵۸ °۲۹ جای گرفته است (شکل ۱). واحدهای زمین‌شناسی در منطقه چهارگنبد را می‌توان به ۴ دسته کلی تقسیم کرد؛ ۱) سنگ‌های افیولیتی به سن کرتاسه پایانی؛ ۲) سنگ‌های آتشفشانی ائوسن؛ ۳) توده‌های نفوذی میوسن؛ ۴) سنگ‌های رسوبی به سن الیگوسن و الیگومیوسن (Sjerp et al., 1969). سنگ‌های افیولیتی در منطقه شامل سنگ‌های سرپانتینی شده، گابرو دگرسان شده، سنگ‌های اسپیلیتی با لایه‌های آهک پلاژیک و سنگ‌های توف و رادیولاریت، آگلومرا و دایک‌های دیابازی هستند. سنگ‌های آتشفشانی شامل توف‌های بلوری ریولیتی- ریوداسیتی با رنگ روشن، توف و برش‌های تراکیتی و آندزیتی با میان‌لایه‌هایی از گدازه‌های آندزیتی است. سنگ‌های نفوذی منطقه را می‌توان به دو دسته سنگ‌های گرانیت- گرانودیوریت و کوارتزدیوریت تقسیم کرد (یوسفی شریک‌آباد و همکاران، ۱۳۹۰). واحدهای رسوبی منطقه شامل سنگ‌های آهک پلاژیک، سنگ آهک بلورین، ماسه‌سنگ‌های زرد رنگ، آهک نومولیت‌دار خاکستری رنگ و میکروکنگلومرا و سنگ‌های آهکی با فسیل‌های اسفنج و جلبک هستند.

Archive of SID
www.SID.ir

۳- کانی‌شناسی و شواهد صحرایی گوسان

با بررسی برش‌های عمودی، در امتداد چندین ترانشه ایجاد شده در عرض رگه معدنی چهارگنبد مشخص شد که ژرفای گوسان‌ها میان ۵ تا ۱۰ متر در تغییر است (شکل ۳). کانی‌های سولفیدی در امتداد رگه‌های معدنی در منطقه چهارگنبد تحت تأثیر اکسایش به نسبت شدید قرار گرفته‌اند. گوسان‌های مورد مطالعه دارای کانی‌های هماتیت (Fe_2O_3)، گوتیت (FeO(OH)) و لیمونیت ($Fe_2O_3.H_2O$) هستند (شکل ۴- ب).

از دیگر کانی‌های موجود در گوسان می‌توان به کلسیت، کوارتز، کانی‌های رسی و پیریت اشاره کرد. حضور کلسیت و پیریت و همچنین مس (با مقدار متوسط ۶۹۴/۰۲) نشانگر این است که گوسان از نوع نارس است.

در نمونه‌هایی که از بخش‌های ژرف گوسان برداشت شده‌اند؛ ذرات پیریت در مرکز قرار دارد که توسط هماتیت دربر گرفته شده‌اند و هماتیت در حاشیه بیرونی تبدیل به گوتیت شده است (شکل ۴- ج). از مهم‌ترین بافت‌ها در گوسان‌های منطقه می‌توان به بافت کلوفرم اشاره کرد (شکل ۴- الف). حضور هماتیت و گوتیت در سطح نشان‌دهنده کانی‌زایی سولفیدی در ژرفاست (Benedetti & Boulegue, 1991)، شکل ۳ نشان‌دهنده گوسان‌های هماتیتی روی دگرسانی فیلیک است و کانه‌زایی سولفیدی را نشان می‌دهد. حضور کانی‌های هماتیت و گوتیت به طور گسترده و نبود ژاروسیت در گوسان‌ها نشان‌دهنده محیط اسیدی ضعیف در هنگام هوازدگی سولفیدهاست (Benedetti & Boulegue, 1991).

۴- مواد و روش‌ها

برای بررسی کانی‌شناسی و ژئوشیمی عناصر در گوسان، ۲۰ نمونه گوسان از ترانشه‌ها برداشت شد که محل نمونه‌ها در شکل ۲ ارائه شده است. برای بررسی تغییرات روند ژئوشیمیایی عناصر ۱۸ نمونه از سنگ‌های کانه‌زا و سولفیدی برای مقایسه با ژئوشیمی عناصر در گوسان‌ها برداشت شد (شکل ۲). نمونه‌های برداشت شده، پس از انتقال به آزمایشگاه توسط هاون چینی پودر و در محلول چهار اسید شامل اسید نیتریک ۸۰٪، اسید فلوریک، اسید کلریدریک و اسید پرکلریک حل شدند. نمونه‌های محلول برای تجزیه شیمیایی به روش ICP به آزمایشگاه Labwest استرالیا فرستاده شدند؛ غلظت عناصر نقره، آرسنیک، بیسموت، مس، مولیبدن، سرب، آنتیموان، سلنیم و روی به روش ICP-MS و عناصر آهن، منگنز و گوگرد به روش ICP-OES اندازه‌گیری شد. حد تشخیص برای همه عناصر به جز آهن و گوگرد در محدوده تقریبی ۰/۰۵ تا ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و برای عناصر آهن و گوگرد به ترتیب ppm ۱۰۰ و ppm ۵۰ است. با بررسی مقادیر عناصر در نمونه‌های تکراری و تعیین درصد خطا توسط فرمول $100*(2S/\overline{X})$ مشخص شد که خطای به دست آمده کمتر از ۱۰٪ بوده و بنابراین دقت تجزیه شیمیایی عناصر قابل قبول است. برای پردازش مقادیر عناصر و تحلیل آماری آنها از نرم افزار SPSS.16 در محیط Windows XP استفاده شده است.

۵- داده‌های ژئوشیمیایی عناصر

میانگین عناصر در گوسان‌های برخی از کانسارهای پورفیری در جدول ۱ ارائه شده است. خلاصه بررسی‌های آماری عناصر در گوسان‌ها و سنگ‌های کانه‌زا منطقه مورد مطالعه در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. با توجه به مقادیر میانگین مشخص می‌شود که عناصر Ag، As، Bi، Mn، Mo، Pb، Sb، Fe و Zn در گوسان‌ها نسبت به سنگ‌های کانه‌زا غنی‌شدگی بیشتری و عناصر Cu، S و Se غنی‌شدگی کمتری دارند. برای بررسی توزیع غیرعادی عناصر، مقادیر چولگی مفید است (Rose et al., 1979). بر این اساس عناصر Ag، As، Bi، Pb، S، Se و Zn در گوسان‌ها چولگی کمتری نسبت به سنگ‌های کانه‌زا دارند ولی Cu، Mn، Mo، Sb، Fe در گوسان‌ها چولگی بیشتری نسبت به دیگر عناصر دارند.

برای بررسی مقادیر عناصر در نمونه‌های مورد مطالعه، غلظت عناصر مختلف در گوسان‌های مورد مطالعه و در سنگ‌های کانه‌زا توسط نمودارهای جعبه‌ای در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

توزیع عناصر در واحدهای سنگی و بررسی وابستگی این عناصر با یکدیگر، از مهم‌ترین موارد بررسی‌های ژئوشیمیایی است که با استفاده از آن می‌توان به محیط و فرایندهای مؤثر در پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی پی برد (Barnes, 1997). بدین منظور ارتباط میان عناصر در گوسان و سنگ‌های کانه‌زا و ضرایب همبستگی در شبکه همبستگی این عناصر به دست آمد که نتایج آن در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است. در این پژوهش با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون، ارتباط و همبستگی میان عناصر مختلف در سنگ‌های کانه‌زا و در گوسان‌های مورد مطالعه به دست آمد. در سنگ‌های کانی‌زا با در نظر گرفتن ضریب همبستگی، می‌توان عناصر را به دو گروه اصلی تقسیم کرد. گروه اول شامل عناصر Ag، Bi، Cu، Mn، S، Sb، Se و Fe می‌شوند که با گوگرد همبستگی دارند. با توجه به حضور گوگرد در این گروه مشخص می‌شود که این عناصر تشکیل‌دهنده‌های اصلی کانی‌های سولفیدی در سنگ‌های کانه‌زا هستند. حضور کالکوپیریت و پیریت در سنگ‌های کانه‌زا، مشخص می‌کند که مس، آهن و گوگرد تشکیل‌دهنده‌های اصلی کانی‌های سولفیدی هستند و عناصری مانند نقره، بیسموت و آنتیموان جانشین مس و آهن شده‌اند. سلنیم با توجه به ویژگی‌های ژئوشیمیایی آن که همانند گوگرد است، جانشین گوگرد و منگنز نیز با توجه به همانندی ژئوشیمیایی با آهن احتمالاً جانشین آهن در پیریت و کالکوپیریت شده است. گروه دوم عناصر شامل آرسنیک، منگنز، مولیبدن، سرب و روی می‌شود که گوگرد با آنها همبستگی نشان نمی‌دهد (هر چند که منگنز در گروه پیشین با گوگرد همبستگی دارد). بنابراین مشخص می‌شود که عناصر آرسنیک، مولیبدن، سرب و روی احتمالاً در فاز جداگانه‌ای نسبت به عناصر گروه اول در سنگ‌های کانه‌زا غنی شده‌اند. با بررسی ضرایب همبستگی میان عناصر در گوسان‌های منطقه، چهار گروه از عناصر قابل تفکیک است. گروه اول شامل بیسموت، مس و آنتیموان می‌شود که با آهن و منگنز همبستگی دارند و این می‌تواند ناشی از جذب بیسموت، مس و آنتیموان توسط اکسیدهای آهن و منگنز در گوسان و یا حضور این عناصر در اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن باشد. در گروه دوم سرب و نقره قرار می‌گیرند که با عناصر بیسموت، مس و آنتیموان همبستگی دارند و ارتباط معنی‌داری با آهن و منگنز ندارند. این مورد بیانگر جذب ضعیف سرب و نقره توسط اکسیدهای آهن و منگنز در گوسان‌هاست. برای گروه سوم می‌توان از آرسنیک، مولیبدن و روی نام برد که در محیط اسیدی گوسان نامحلول هستند و همچنین با آهن و منگنز همبستگی ندارند. گروه چهارم شامل دو عنصر گوگرد و سلنیم است که در طی تشکیل گوسان و هوازدگی و اکسایش کانی‌های سولفیدی به‌صورت محلول از محیط گوسان بیرون رفته‌اند و رفتار ژئوشیمیایی یکسانی از خود نشان می‌دهند. به منظور بررسی میزان افزودگی و کاهیدگی این عناصر در گوسان‌های منطقه، نسبت میانگین عناصر در گوسان‌ها به سنگ‌های کانه‌زا در شکل ۷ نشان داده شده است.

در ادامه برای بررسی تغییرات روند ژئوشیمیایی عناصر در طی مراحل تشکیل گوسان به بررسی ژئوشیمی آنها پرداخته خواهد شد:

۵- ۱. نقره

بیشترین مقدار نقره در گوسان‌های مورد مطالعه ppm ۱/۳ است که مربوط به گوسان هماتیتی در بالای توده معدنی چهارگنبد است. با توجه به جدول ۵، همبستگی بالایی میان نقره و سرب وجود دارد. به باور Scott et al. (2001) همبستگی میان نقره و سرب ناشی از حضور نقره به‌صورت جانشینی در گالن به‌جای سرب و همچنین رفتار ژئوشیمیایی یکسان آنها در طی هوازدگی کانی‌های سولفیدی و تشکیل گوسان است.

Archive of SID
www.SID.ir

با توجه به جدول ۴ مشخص می‌شود که در سنگ‌های کانی‌زا، نقره با سرب همبستگی ضعیفی دارد، بنابراین جانشینی نقره به‌جای سرب در گالن کمتر شکل می‌گیرد و با توجه به همبستگی آن با بیسموت، مس، منگنز، گوگرد، آنتیموان، سلنیم و آهن، احتمالاً جانشین آهن، مس و بیسموت در کانی‌های سولفیدی شده است. بنابراین مشخص می‌شود که همبستگی میان نقره با عناصر بیسموت، سرب و آنتیموان ناشی از رفتار ژئوشیمیایی یکسان آنها در طی هوازدگی کانی‌های سولفیدی است.

۵– ۲. آرسنیک

بیشترین مقدار آرسنیک در گوسان‌های مورد مطالعه ppm ۲۴ است و در سنگ‌های کانه‌زا با عناصر مولیبدن، سرب، روی و منگنز همبستگی دارد. به دلیل غنی‌شدگی کم آرسنیک در سنگ‌های سولفیدی، آرسنیک با دیگر عناصر موجود در کانی‌های سولفیدی همبستگی خاصی نشان نمی‌دهد.

۵– ۳. بیسموت

بیشترین مقدار بیسموت در گوسان‌های مورد مطالعه (ppm ۳۷۰۰) تنها مربوط به یک نمونه است که نسبت به بیشترین مقدار بیسموت (ppm ۷۸/۸) در سنگ‌های کانه‌زا و سولفیدی مقدار بسیار بالاتری دارد. بیسموت در سنگ‌های کانه‌زا با عناصر مس، منگنز، گوگرد، آنتیموان، سلنیم و آهن دارای همبستگی است. در کانی‌های سولفیدی بیسموت می‌تواند در پیریت، گالن و بیسموتنیت حضور داشته باشد (Scott et al., 2001). همبستگی میان بیسموت با عناصر یادشده احتمالاً ناشی از حضور آنها در کانی‌های سولفیدی مانند کالکوپیریت است که در آنها منگنز، مس و بیسموت جانشین آهن و عناصر سلنیم و آنتیموان نیز جانشین گوگرد شده‌اند. در گوسان‌های مورد مطالعه بیسموت با مس، منگنز، سرب، آنتیموان و آهن همبستگی مثبتی دارد که ناشی از جذب بیسموت، مس، سرب و آنتیموان توسط اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن و منگنز است.

۵– ۴. مس

بیشترین مقدار مس در گوسان‌های منطقه ppm ۴۴۱۰ است که نسبت به بیشترین مقدار مس در سنگ‌های سولفیدی (ppm ۱۵۱۰۰۰) کاهیدگی نشان می‌دهد. این بیانگر شسته‌شدگی مس توسط اسید سولفوریک در طی هوازدگی کانی‌های سولفیدی و انتقال آن به سطوح پایین‌تر و پهنه برون‌زاد است. در سنگ‌های کانه‌زای سولفیدی همبستگی قابل توجهی میان مس، گوگرد و آهن وجود دارد که نشان‌دهنده حضور این عناصر در کانی‌های سولفیدی مانند پیریت و کلکوپیریت است. در گوسان‌ها، مس با منگنز و آهن نیز همبستگی بالایی نشان می‌دهد که احتمالاً ناشی از جذب سطحی مس توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای عناصر یادشده و یا حضور مس در کانی‌های اکسیدی و هیدروکسید آهن است. به باور Scott et al. (2001) گوتیت میزبان بهتری برای جذب مس نسبت به هماتیت است.

۵– ۵. منگنز

اکسیدهای منگنز در طی مراحل تشکیل گوسان سبب جذب مقادیر قابل توجهی از عناصری مانند سرب، مس و بیسموت می‌شوند (Scott, 1986). بیشترین مقدار منگنز در گوسان‌های منطقه ppm ۳۵۷۰۰ است که نسبت به بیشترین مقدار منگنز در سنگ‌های کانه‌زا (ppm ۹۵۳۶) افزودگی نشان می‌دهد و مشخص می‌کند که در طی تشکیل گوسان این عنصر غنی شده است. با توجه به جدول‌های ۴ و ۵ همبستگی میان منگنز با آهن و گوگرد مشخص کننده جانشینی منگنز به‌جای آهن در کانی‌های سولفیدی مانند پیریت و کالکوپیریت است. در طی هوازدگی سولفیدها، منگنز به‌صورت اکسیدهای منگنز در سطح باقی می‌ماند. در گوسان‌ها، منگنز با آهن و آنتیموان همبستگی بالایی نشان می‌دهد که ناشی از حضور اکسیدها و هیدروکسیدهای منگنز و آهن است.

۵– ۶. مولیبدن

بیشترین مقدار مولیبدن در گوسان‌های منطقه مربوط به گوسان هماتیتی بالای رگه معدنی چهارگنبد است که ppm ۲۴ است که نسبت به بیشترین مقدار آن در سنگ‌های کانه‌زا (ppm ۱۴/۱) تغییر زیادی نشان نمی‌دهد؛ گرچه پس از بیسموت بیشترین غنی‌شدگی را نشان می‌دهد. مولیبدن در سنگ‌های کانه‌زا تنها با آرسنیک همبستگی نشان می‌دهد. البته همبستگی ضعیفی نیز با گوگرد نشان می‌دهد که بیان‌کننده کانی‌زایی ضعیف مولیبدن است.

۵– ۷. سرب

بیشترین مقدار سرب در گوسان‌های مورد مطالعه ppm ۲۶ است که نسبت به بیشترین مقدار سرب در سنگ‌های کانه‌زا (ppm ۲۲) تغییرات زیادی ندارد. سرب در کانسار چهارگنبد بیشتر در رگه‌های کربناتی گرمابی غنی‌شدگی نشان می‌دهد تا در سنگ‌های کانه‌زای سولفیدی. بنابراین، سرب در طی هوازدگی کانی‌های سولفیدی همانند مولیبدن و آرسنیک افزودگی و کاهیدگی خاصی از خود نشان نمی‌دهد. سرب در سنگ‌های کانه‌زا با عناصر آرسنیک، منگنز و روی و در گوسان‌های منطقه با عناصر نقره، بیسموت، مس و آنتیموان همبستگی نشان می‌دهد.

۵– ۸. گوگرد

در کانسارهای گرمابی گوگرد بنیان اصلی کانه‌های سولفیدی است و در طی هوازدگی کانی‌های سولفیدی با تولید اسید سولفوریک نقش بسزایی در تشکیل گوسان و پهنه برون‌زاد دارد. در گوسان‌های محدوده معدنی مس- طلای چهارگنبد بیشترین مقدار گوگرد ppm ۱۹۳۰ است که در مقایسه با بیشترین مقدار گوگرد در سنگ‌های سولفیدی کانسار چهارگنبد (ppm ۱۳۷۰۰۰)، کاهیدگی بالایی را نشان می‌دهد. گوگرد در سنگ‌های کانه‌زا با عناصر نقره، بیسموت، مس، منگنز، آنتیموان، سلنیم و آهن دارای همبستگی است که بیان‌کننده حضور عناصر یادشده در کانی‌های سولفیدی است. سلنیم با گوگرد همبستگی خوبی نشان می‌دهد که بیانگر رفتار ژئوشیمیایی یکسان آنها در طی هوازدگی کانی‌های سولفیدی و تشکیل گوسان است.

۵– ۹. آنتیموان

این عنصر در سنگ‌های کانی‌زای سولفیدی در کانی‌های پیریت، گالن، تترائدریت و تنانتیت توزیع می‌شود (Scott et al., 2001). آنتیموان همچنین در طی هوازدگی کانی‌های سولفیدی جذب اکسیدهای آهن، آلونیت و ژاروسیت می‌شود (Scott et al., 2001). در گوسان‌ها بیشترین مقدار آنتیموان ppm ۱۸ و در سنگ‌های سولفیدی ppm ۱۱/۱ است. مقدار بیشتر آنتیموان در گوسان‌ها نسبت به سنگ‌های کانه‌زا احتمالاً ناشی از انحلال‌پذیری کمتر آنتیموان است. آنتیموان در سنگ‌های سولفیدی با عناصر نقره، بیسموت، مس، منگنز، گوگرد، سلنیم و آهن همبستگی دارد که نشان‌دهنده حضور آن در کانی‌های سولفیدی است. در گوسان‌های منطقه آنتیموان با عناصر نقره، مس، بیسموت، منگنز و آهن همبستگی خوبی دارد و مشخص می‌کند که آنتیموان با عناصر نقره، بیسموت و مس در اکسیدهای آهن و منگنز حضور دارند.

۵– ۱۰. سلنیم

این عنصر با توجه به همانندی ژئوشیمیایی با گوگرد، جانشین گوگرد در کانی‌های سولفیدی می‌شود (Luftus Hills & Solomon, 1967). بیشترین مقدار سلنیم در سنگ‌های کانه‌زا ppm ۹۱/۰۸ و در گوسان‌ها ppm ۰/۵۷ است. این اختلاف بین بیشترین مقدار سلنیم در سنگ‌های کانه‌زا و گوسان‌های منطقه ناشی از انحلال کم سلنیم در طی هوازدگی کانی‌های سولفیدی و بیرون رفتن آن از محیط گوسان است. سلنیم در سنگ‌های کانی‌زا با عناصر نقره، بیسموت، مس، منگنز، گوگرد، آنتیموان و آهن همبستگی نشان می‌دهد که ناشی از جانشینی سلنیم به‌جای گوگرد در کانی‌های سولفیدی است. در گوسان‌های منطقه سلنیم با توجه به رفتار ژئوشیمیایی همانند گوگرد تنها با این عنصر همبستگی خوبی نشان می‌دهد.

۵– ۱۱. روی

بیشترین مقدار روی در سنگ‌های کانی‌زا ppm ۱۳۰/۱ و در گوسان‌ها ppm ۷۲

Archive of SID

www.SID.ir

است. روی در گوسان‌های منطقه هیچگونه همبستگی با سایر عناصر نشان نمی‌دهد این امر ناشی از کمبود روی در کانی‌های سولفیدی و همچنین رفتار ژئوشیمیایی متفاوت آن با عناصر سرب و آرسنیک است.

۵- ۱۲. آهن

بیشترین مقدار آهن در گوسان‌های مورد مطالعه ppm ۴۲۵۰۰۰ و در سنگ‌های کانه‌زا منطقه ppm ۲۰۷۳۰۲ است. این غنی‌شدگی در نتیجه هوازدگی کانی‌های سولفیدی و اکسایش آهن دو ظرفیتی به آهن سه ظرفیتی و تشکیل اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در سطح است. آهن در گوسان‌های منطقه با عناصر بیسموت، مس، منگنز و آنتیموان همبستگی دارد که ناشی از جذب این عناصر توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن است.

برای بررسی روند ژئوشیمیایی عناصر و گروه‌بندی آنها در طی تشکیل گوسان‌ها از سنگ‌های کانه‌زا و سولفیدی، استفاده از آزمون مؤلفه‌های اصلی (Principal Components Analysis) یا PCA مناسب است. روش PCA روشی آماری برای واضح کردن مؤلفه‌های خطی میان متغیرهای (در اینجا عناصر) یک گروه (شامل گوسان‌ها و یا سنگ‌های کانه‌زا) است. در این روش می‌توان همه داده‌ها را در شمار معدودی مؤلفه به‌جای همه عناصر تحلیل کرد (Morrison, 1967). برای این منظور روش 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 بر پایه شاخص کایزر (Kaiser, 1960) تعیین می‌شود. بر این اساس در متغیرهای جدید تنها مواردی که دارای شاخص بزرگ‌تر از یک هستند اهمیت دارند و در تحلیل آماری بررسی می‌شوند. هر کدام از متغیرهای جدید درصد مشخصی از واریانس داده‌ها را شامل می‌شوند که معمولاً مؤلفه اول بیشترین مقدار واریانس را دارد و به تدریج مؤلفه بعدی دارای واریانس کمتری خواهد بود (Khorasanipour & Tangestani, 2011). نتایج آزمون مؤلفه‌های اصلی در سنگ‌های کانه‌زا و گوسان‌های منطقه در جدول‌های ۵ تا ۸ و شکل‌های ۸ و ۹ آورده شده است. در روش آماری PCA مربوط به عناصر، سه مؤلفه اصلی اول دارای شاخص بزرگ‌تر از یک هستند (جدول‌های ۶ و ۸). بنابراین تنها همین سه مؤلفه اصلی در هر کدام از آزمون‌های مؤلفه‌های اصلی مربوط به سنگ‌های کانه‌زا و گوسان‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند. در سنگ‌های کانه‌زا مؤلفه اول ۵۳/۷۰۱ درصد از کل واریانس (تغییرات) را دارد که شامل عناصر نقره، بیسموت، مس، منگنز، گوگرد، آنتیمون، سلنیم و آهن است. با توجه به حضور گوگرد در این گروه مشخص می‌شود که عناصر یادشده در کانی‌های سولفیدی حضور دارند. مؤلفه دوم مربوط به سنگ‌های کانه‌زا، دارای واریانس ۲۵/۰۷۳ درصد است که شامل آرسنیک، سرب و روی است. که این نشان‌دهنده جانشینی آرسنیک به‌جای سولفیدها در سنگ‌های کانه‌زاست. مؤلفه سوم روش آماری PCA مربوط به سنگ‌های کانی‌زا تنها شامل مولیبدن است.

مؤلفه اول دارای واریانس ۵۳/۷۹۱ درصد و شامل عناصر نقره، بیسموت، مس، منگنز، آنتیموان و آهن است. با توجه به حضور منگنز و آهن در این گروه عناصر نقره، بیسموت، مس و آنتیموان احتمالاً جذب اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز موجود در گوسان‌ها شده‌اند. دومین مؤلفه اصلی آزمون مؤلفه‌های اصلی مربوط به گوسان‌های منطقه با واریانس ۲۴/۲۲۰ شامل عناصر آرسنیک، سرب و روی است که همچنین رابطه منفی با گوگرد و سلنیم دارند. سومین مؤلفه اصلی در روش PCA مربوط به گوسان‌های مورد مطالعه با واریانس ۱۰/۲۶۰ و شامل مولیبدن است.

نمودارهای سه‌بعدی روش PCA مربوط به مقادیر عناصر در سنگ‌های کانه‌زا و گوسان‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ آورده شده‌اند. با مقایسه نتایج مربوط به آزمون‌های مؤلفه‌های اصلی می‌توان نتیجه گرفت که در طی تشکیل گوسان تغییر روند ژئوشیمیایی عناصر افزون بر عوامل ترمودینامیکی مانند pH، تحت تأثیر ارتباط ژئوشیمیایی عناصر در کانی‌های سولفیدی نیز است. در سنگ‌های کانی‌زا نقره، بیسموت، مس، منگنز، گوگرد، آنتیمون، سلنیم و آهن در مؤلفه اول آزمون مؤلفه‌های اصلی قرار دارند. حضور گوگرد در این گروه معرف کانی‌های سولفیدی است. به همین ترتیب در مؤلفه دوم، آرسنیک، سرب و روی قرار گرفته‌اند و در این مؤلفه عناصر گوگرد و سلنیم با رابطه‌ای منفی نسبت به آرسنیک، سرب و روی قرار دارند. آرسنیک، سرب و روی در سنگ‌های کانی‌زا نیز در مؤلفه دوم آزمون مؤلفه‌های اصلی با یکدیگر قرار گرفته‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که آرسنیک، سرب و روی در سنگ‌های کانه‌زا ارتباط و همبستگی مثبتی دارند و در گوسان نیز دارای همبستگی مثبت هستند. همچنین در مؤلفه‌های سوم آزمون PCA مربوط به سنگ‌های کانه‌زا و گوسان‌های مورد مطالعه، تنها مولیبدن قرار گرفته است.

مولیبدن در گوسان‌ها همانند سنگ‌های کانی‌زا هیچ گونه همبستگی و ارتباط روشنی با دیگر عناصر ندارد و در گروه جداگانه‌ای قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج آزمون‌های مؤلفه‌های اصلی می‌توان نتیجه گرفت که همبستگی بیسموت و مس که رفتار ژئوشیمیایی متفاوتی در هنگام هوازدگی سولفیدها و تشکیل گوسان دارند؛ ناشی از همراهی و همبستگی آنها در سنگ‌های کانه‌زا و سولفیدی اولیه است. همچنین با توجه به نمودار سه بعدی عناصر در آزمون مؤلفه‌های اصلی نقش مولیبدن به عنوان یک ردیاب اکتشافی همانند بیسموت است. با نمونه‌برداری از گوسان‌ها می‌توان به وجود کانسارهای سولفیدی پنهان پی برد.

۶- ارزیابی پتانسیل اقتصادی گوسان‌های محدوده معدنی چهارگنبد

در محدوده معدنی چهارگنبد گوسان‌ها از گستردگی زیادی برخوردار هستند و در محل‌هایی که فعالیت‌های معدنی در حال انجام است؛ متأسفانه گوسان‌ها به عنوان باطله در نظر گرفته و همراه دیگر مواد باطله در پیرامون معادن ریخته می‌شوند که موجب مشکلات احتمالی زیست‌محیطی می‌شود.

برای ارزیابی پتانسیل اقتصادی گوسان‌های منطقه، میانگین مقادیر عناصر در گوسان‌های منطقه نسبت به مقادیر کلارک و زمینه طبیعی منطقه، یعنی آندزیت سنجیده شد که نتایج آن در جدول ۹ و شکل ۱۰ آورده شده است.

با توجه به جدول ۱۰ و شکل ۱۰ از میان عناصر مورد مطالعه در گوسان‌های منطقه، بیسموت با ۳۱۲۳/۹۴ و ۲۹۵۰/۳۹ برابر و طلا با ۴۰۰ و ۳۰۰ برابر به ترتیب نسبت به کلارک و زمینه‌طبیعی منطقه در میان عناصر فرعی بیشترین غنی‌شدگی را نشان می‌دهد که بیان‌کننده کلید اکتشافی این عنصر در گوسان است.

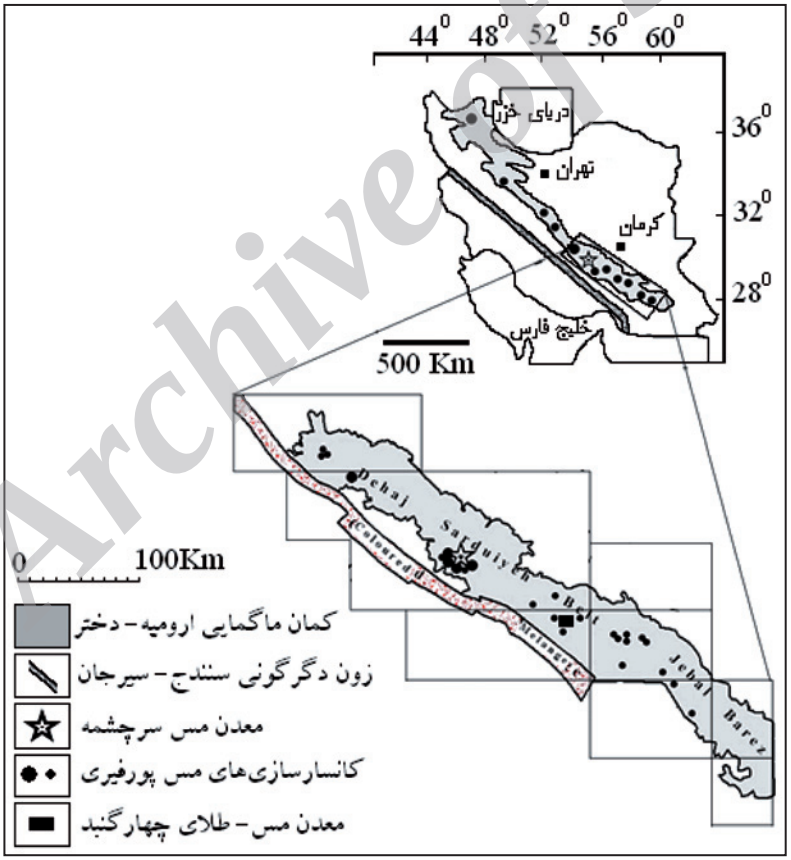
۷- نتیجه‌گیری

گوسان‌ها و رگه‌های کانه‌زای مس- طلا از مهم‌ترین سیماهای زمین‌شناسی در محدوده معدنی مس- طلای چهارگنبد هستند. گوسان‌ها در این منطقه از گسترش قابل توجهی برخوردار هستند و ژرفای گوسان‌ها میان ۵ تا ۱۰ متر در تغییر است. با مطالعات میکروسکوپی مشخص شد که گوسان‌های مورد مطالعه دارای کانی‌های هماتیت (Fe_2O_3)، گوتیت (FeO(OH))، لیمونیت ($Fe_2O_3.H_2O$)، کلسیت، کوارتز و کانی‌های رسی هستند و از مهم‌ترین بافت‌ها در این گوسان‌ها می‌توان به بافت کلوفرم اشاره کرد. عناصر Ag، As، Bi، Mn، Mo، Pb، Sb، Fe و Zn در گوسان‌ها نسبت به سنگ‌های کانه‌زا دارای افزودگی و عناصر Cu، S و Se دارای کاهیدگی هستند. با بررسی ضرایب همبستگی میان عناصر در گوسان‌های منطقه، چهار گروه از عناصر قابل تفکیک است. گروه اول شامل عناصر بیسموت، مس و آنتیموان می‌شوند که با آهن و منگنز همبستگی خوبی دارند. این همبستگی ناشی از جذب بیسموت، مس و آنتیموان توسط اکسیدهای آهن و منگنز در گوسان است. گروه دوم شامل عناصر سرب و نقره است که با عناصر بیسموت، مس و آنتیموان همبستگی دارند و ارتباط معنی‌داری با آهن و منگنز ندارند که نشان‌دهنده جذب کمتر سرب و نقره

Archive of SID

www.SID.ir

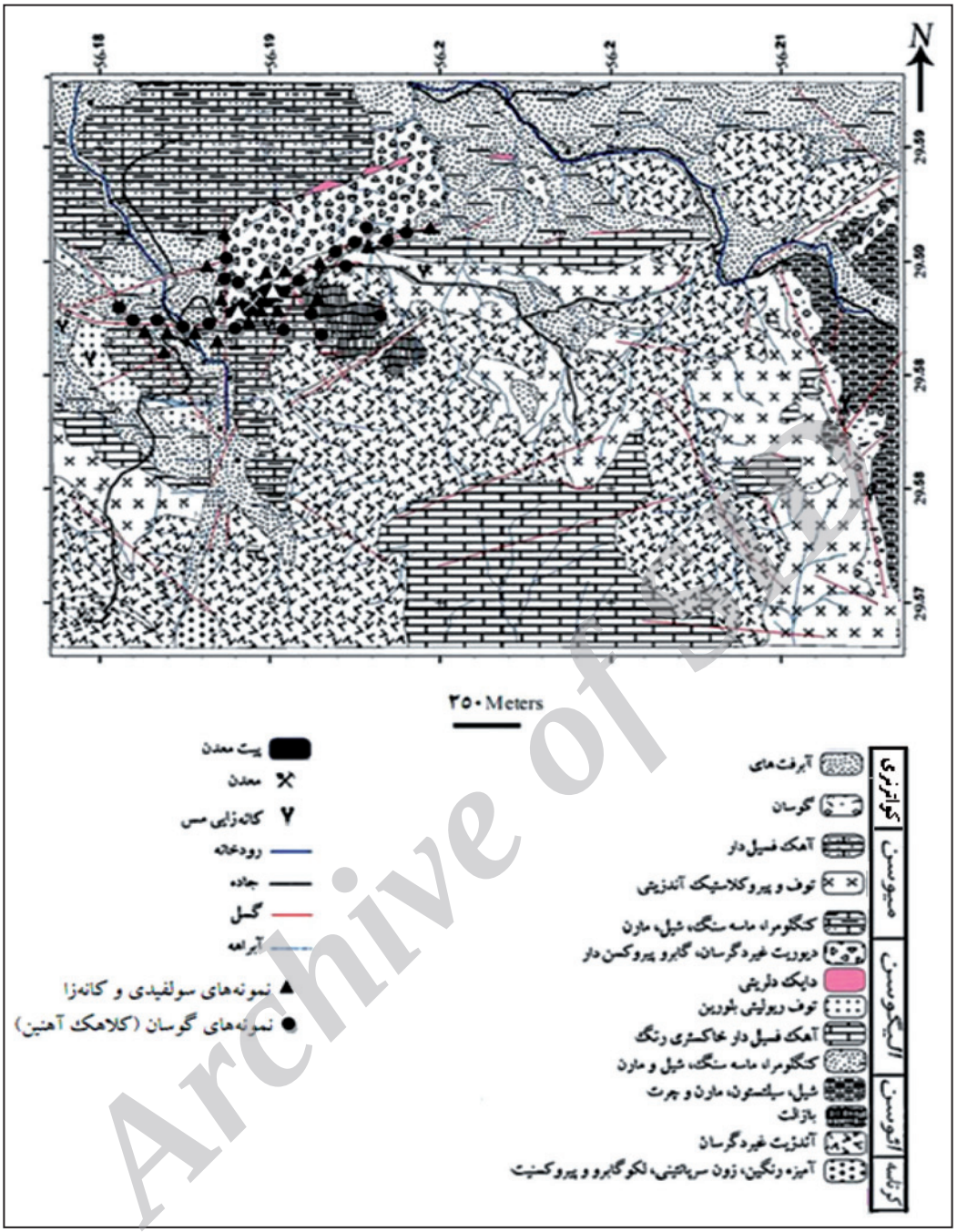
توسط اکسیدهای آهن و منگنز در گوسان‌هاست. گروه سوم شامل عناصر آرسنیک، مولیبدن و روی می‌شوند که در محیط اسیدی گوسان نامحلول هستند و همچنین با آهن و منگنز همبستگی ندارند. گروه چهارم شامل دو عنصر گوگرد و سلنیم است که در کانی‌های سولفیدی متمرکز می‌شوند. در طی مراحل تشکیل گوسان و هوازدگی و اکسایش کانی‌های سولفیدی این عناصر به‌صورت محلول از محیط گوسان بیرون می‌روند. در آزمون مؤلفه‌های اصلی مربوط به مقادیر عناصر در سنگ‌های کانی‌زا و گوسان‌های چهارگنبد، سه مؤلفه اصلی و اول دارای شاخص بزرگ‌تر از یک هستند که اهمیت دارند. در سنگ‌های کانی‌زا مؤلفه اول شامل عناصر نقره، بیسموت، مس، منگنز، گوگرد، آنتیمون، سلنیم و آهن و مؤلفه دوم شامل عناصر آرسنیک، سرب و روی است. مؤلفه سوم روش آماری PCA مربوط به سنگ‌های کانی‌زا تنها شامل مولیبدن است. در آزمون مؤلفه‌های اصلی، مؤلفه اول شامل عناصر نقره، بیسموت، مس، منگنز، آنتیموان و آهن است. دومین مؤلفه اصلی این آزمون نیز مربوط به آرسنیک، سرب و روی است که رابطه منفی با گوگرد و سلنیم دارند. سومین مؤلفه اصلی در روش PCA مربوط به گوسان‌های مورد مطالعه با واریانس ۱۰/۲۶ تنها شامل مولیبدن است. با توجه به نتایج آزمون‌های مؤلفه‌های اصلی مربوط به مقادیر عناصر در گوسان‌ها و سنگ‌های کانی‌زا و سولفیدی می‌توان نتیجه گرفت که همبستگی بیسموت و مس که رفتار ژئوشیمیایی متفاوتی در هنگام هوازدگی سولفیدها و تشکیل گوسان دارند ناشی از همراهی و همبستگی آنها در سنگ‌های کانی‌زا و سولفیدی است. در گوسان‌های منطقه چهارگنبد، بیسموت با افزودگی ۳۱۲۳/۹۴ نسبت به کلارک افزون بر اینکه نشان‌دهنده اهمیت اکتشافی خوب آن است؛ درصورت داشتن ذخایر کافی، می‌تواند با توجه به ماهیت ژئوشیمیایی آن توسط فروشویی قلیایی استحصال شود؛ همچنین پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی دیگر پژوهشگران روی گوسان‌های مرتبط با سامانه‌های کانه‌زایی رگه‌ای گرمابی در پهنه‌های فرورانش (به‌ویژه سامانه‌های رگه‌ای مرتبط با کانسارهای پورفیری) به ژئوشیمی بیسموت توجه ویژه‌ای شود که در صورت غنی‌شدگی و ذخایر کافی در دیگر مناطق، بتوان آن را به عنوان یک الگوی کانه‌زایی ثانویه جدید معرفی کرد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در کمان ماگمایی ارومیه دختر (با تغییرات از Dimitrijevic, 1973).

Archive of SID

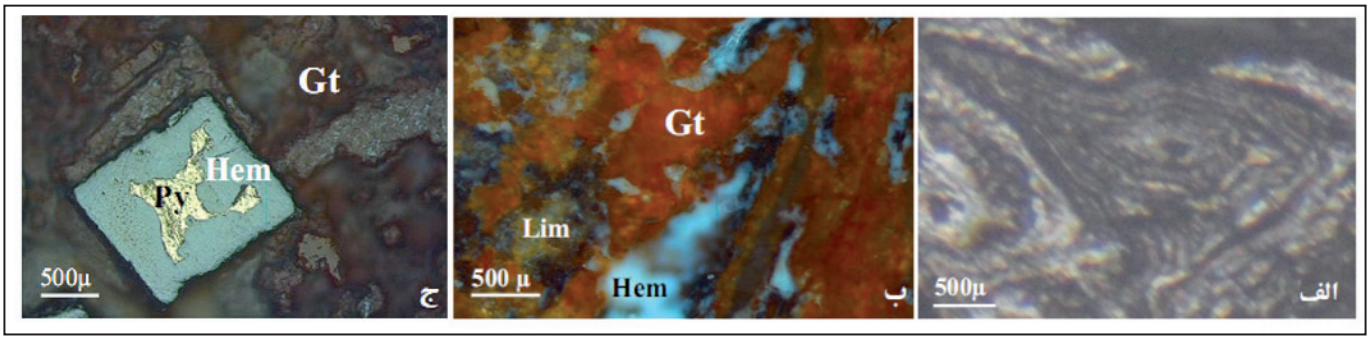
www.SID.ir



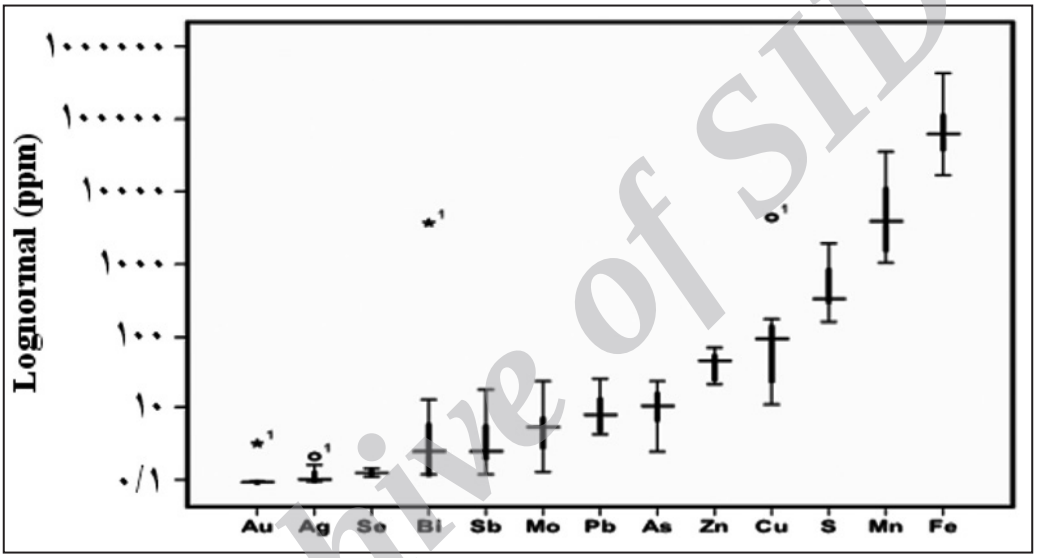
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده معدنی مس- طلا چهارگنبد (با تغییرات از فلک‌زاده، ۱۳۸۵).

شکل ۳- الف) بخشی از گوسان در خاور رگه معدنی چهارگنبد(دید به سوی جنوب)؛ ب) گوسان تشکیل شده بالای دگرسانی فیلیک، خاور رودخانه‌پلنگی (دید به سوی جنوب باختر).

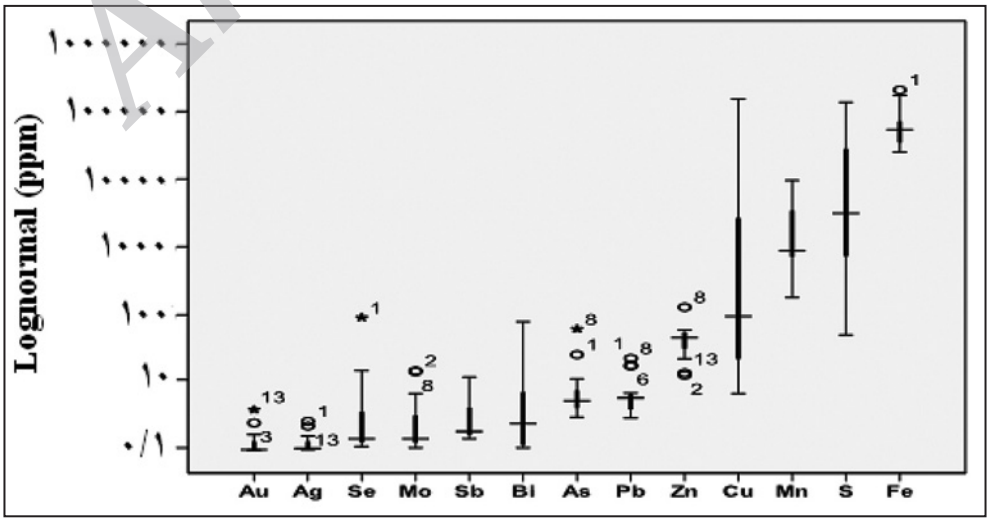
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۴- الف) بافت کلوفرم؛ ب و ج) کانی‌شناسی گوسان‌های محدوده معدنی مس- طلا چهارگنبد (Py: پیریت؛ Hem: هماتیت؛ Gt: گوتیت؛ Lim: لیمونیت).



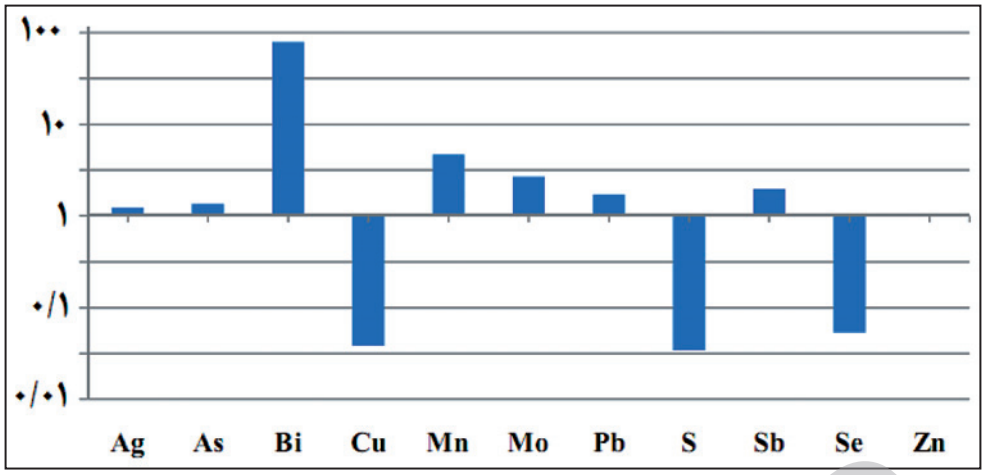
شکل ۵- توزیع مقادیر عناصر مختلف در گوسان‌های چهارگنبد.



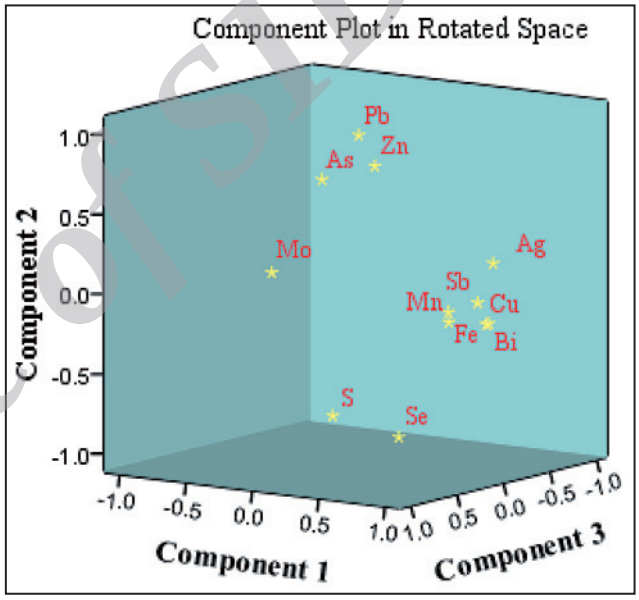
شکل ۶- توزیع مقادیر عناصر مختلف در سنگ‌های کانه‌زای چهارگنبد.

Archive of SID

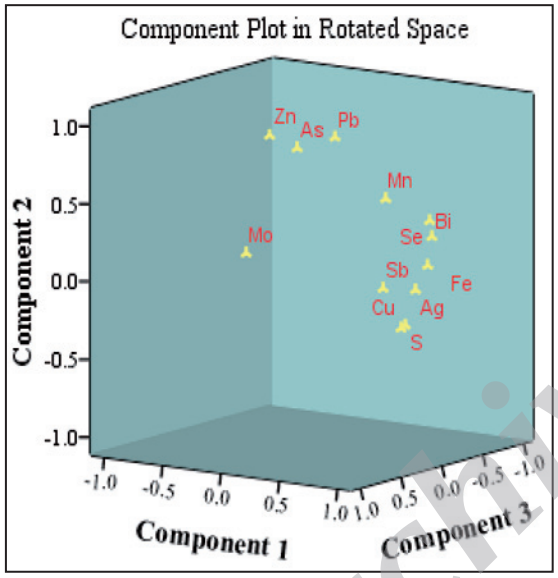
www.SID.ir



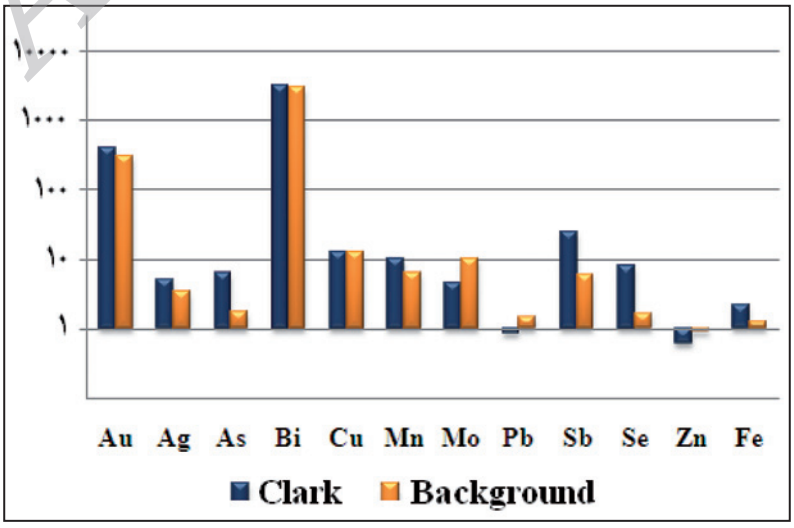
شکل ۷- نمودار افزودگی و کاهیدگی عناصر در گوسان نسبت به سنگ کانه‌زا در منطقه چهارگنبد.



شکل ۸- نمودار سه‌بعدی عناصر در آزمون مؤلفه‌های اصلی در گوسان‌های محدوده معدنی چهارگنبد.



شکل ۹- نمودار سه‌بعدی عناصر در آزمون مؤلفه‌های اصلی محدوده معدنی چهارگنبد.



شکل ۱۰- نمودار افزودگی و کاهیدگی عناصر در گوسان‌های محدوده معدنی چهارگنبد نسبت به کلارک و زمینه طبیعی.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱- میانگین عناصر در گوسان‌های کانسارهای پورفیری (ppm) و برای طلا (ppb) (Wilhelm & Kosakevich, 1979; Atapour & Aftabi, 2007).

	SianBell	La Zarza	Lachabanne	Pradovicioso	Sarcheshmeh
Au	–	–	–	–	۳۵/۴–۵۹/۶
Ag	۰/۱–۱۲	۰/۱–۰/۴۵	۰/۱–۱/۵	۱–۷۵	۰/۹–۲/۶
As	۱۰–۱۲۰	۱۳–۱۳۰۰	۱۵–۴۵۶	۱۴–۱۳۰۰	–
Bi	۵–۹۱	۵	۵–۷	۵–۸۵۲	–
Cu	۱–۱۰۰۰	۵۳–۴۷۰	۱۱–۳۲۸	۱۱۷–۱۳۶۰	۳۶/۷–۱۶۰/۵
Mn	۲۰–۲۵۵	۲۰–۱۸۴	۲۰–۲۷۴۰	۲۰–۱۷۰۷	۴۲۹/۱–۹۴۳/۷
Mo	۱–۱۸۴	۱–۲	۲–۲۱۰	۱–۴۷	۲۱/۵–۴۲/۵
Pb	–	۱۰–۱۰۶	۱–۲۹۹۹۴	۶۶–۱۷۲۰۰	۵۰/۵–۸۸/۶
S	–	–	–	–	۳۴۰۰–۱۱۰۰۰
Sb	۳۰–۲۱۸	۳۰	۲۵–۳۰	۳۰–۲۰۰۰	–
Se	–	–	–	–	–
Zn	۲–۱۴۹	۲–۳۰۰	۲–۳۰۰	۲–۳۰۰	۸۹/۴–۸۲۶/۷
Fe	۲۰۰۰۰–۴۶۱۰۰۰	۱۰۰۰۰–۶۴۱۰۰۰	۲/۴–۵۱۰۰۰۰	۱۹۰۰۰–۶۴۲۰۰۰	۳۸۹۰۰–۶۹۰۰۰

جدول ۲- خلاصه نتایج آماری عناصر در گوسان‌های ناحیه معدنی چهارگنبد (برحسب ppm).

	میانگین	میانه	نما	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	حداقل	حداکثر
Au	۰/۳۶	۰/۰۱۳	۰[a]/۰۰۷	۰/۹۲	۲/۶۴	۶/۹۹	۰/۰۴	۲/۴۷
Ag	۰/۳۵	۰/۱۱	۰[a]/۰۴	۰/۴۸	۱/۶۴	۱/۷۳	۰/۰۴	۱/۳
As	۱۱/۶	۱۰/۴	۱[a]/۷	۷/۵۹	۰/۴۵	−۱/۳۹	۱/۷	۲۴
Bi	۵۳۱/۰۷	۱/۷	۰/۳	۱۳۹۷/۳۷	۲/۶۴	۷	۰/۳	۳۷۰۰
Cu	۶۹۴/۰۲	۹۵/۳	۱۰[a]/۹۰	۱۶۳۹/۶۹	۲/۶۳	۶/۹۷	۱۰/۹	۴۴۱۰
Mn	۹۵۳۴/۲۵	۳۹۲۰/۰	۱۰۵۰[a]	۱۲۴۴۳/۳	۱/۹۶	۴	۱۰۵۰	۳۵۷۰۰
Mo	۶/۸	۴/۸	۰[a]/۴۰	۷/۹۸	۲/۱۱	۴/۹۷	۰/۴	۲۴
Pb	۱۰/۵۱	۷/۶	۳[a]/۶	۸/۴۶	۱/۲۶	۰/۶	۳/۶	۲۶
S	۷۴۰/۵۷	۳۳۹	۱۶۳[a]	۷۴۰/۲۶	۱/۲۱	−۰/۶۵	۱۶۳	۱۹۳۰
Sb	۴/۸	۱/۷	۰[a]/۳	۶/۳۵	۱/۹۱	۳/۵۳	۰/۳	۱۸
Se	۰/۳۹	۰/۳۶	۰[a]/۲۱	۰/۱۴	−۰/۰۲	−۲/۰۷	۰/۲۱	۰/۵۷
Zn	۴۳/۴۱	۴۶/۷	۲۱[a]/۷	۱۹/۱۸	۰/۲۱	−۱/۵	۲۱/۷	۷۲
Fe	۱۲۰۴۷۸	۶۲۵۰۰	۱۶۷۰۰[a]	۱۴۵۷۸۰/۲۴	۱/۹۶	۳/۷۴	۱۶۷۰۰	۴۲۵۰۰۰

a. Multiple modes exist. The smallest value is shown

جدول ۳- خلاصه نتایج آماری عناصر در سنگ‌های کانه‌زای ناحیه معدنی چهارگنبد (برحسب ppm).

	میانگین	میانه	نما	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	حداقل	حداکثر
Au	۰/۴۱	۰/۰۲۸	۰[a]/۰۱	۰/۸۳	۲/۶۱	۶/۹۸	۰/۰۱	۳
Ag	۰/۳۲	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۵۱	۱/۹	۳/۱۸	۰/۰۳	۱/۷
As	۹/۷۲	۴/۴	۴/۴	۱۵/۴	۳/۱	۱۰/۳۸	۲/۱	۶۱/۵
Bi	۷/۵۷	۱/۵	۰/۱	۱۹/۹	۳/۷	۱۴/۲۶	۰/۱	۷۸/۸
Cu	۲۰۵۶۹/۵۴	۹۵/۳	۶[a]	۴۳۹۱۶	۲/۴	۵/۵	۶	۱۵۱۰۰۰
Mn	۲۳۱۸	۸۷۳/۰	۱۸۰[a]	۲۷۸۳/۹۴	۱/۷	۲/۳	۱۸۰	۹۵۳۶
Mo	۲/۸۶	۰/۵	۰/۳	۴/۷	۱/۹	۲/۷۵	۰/۱	۱۴/۱
Pb	۶/۹۶	۵	۵	۶/۲۵	۱/۶	۱/۴۵	۲	۲۲
S	۲۴۳۴۷/۶۶	۳۱۰۰	۵۰	۳۹۷۱۷/۳۵	۲/۱	۴/۳	۵۰	۱۳۷۰۰۰
Sb	۲/۷۶	۰/۹	۰[a]/۶	۳/۵۶	۱/۷	۱/۹۹	۰/۵	۱۱/۱
Se	۸/۳۹	۰/۴۹	۰/۳۸	۲۳/۲۸	۳/۶	۱۳/۷۲	۰/۱۵	۹۱/۰۸
Zn	۴۰/۹۴	۴۵/۳	۱۲[a]	۲۷/۷	۱/۹	۶/۱۵	۱۲	۱۳۰/۱
Fe	۷۰۳۱۳/۲۶	۵۳۲۴۶	۲۴۸۲۷[a]	۵۲۸۵۶	۱/۸	۲/۹۳	۲۴۸۲۷	۲۰۷۳۰۲

a. Multiple modes exist. The smallest value is shown

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۴- شبکه همبستگی میان عناصر در سنگ‌های کانه‌زا در محدوده معدنی مس- طلای چهارگنبد.

	Ag	As	Bi	Cu	Mn	Mo	Pb	S	Sb	Se	Zn	Fe
Ag	1	.218	.798**	.910**	.753**	.216	.191	.903**	.842**	.820**	-.255	.877**
As		1	.243	.030	.729**	.586*	.764**	-.002	.218	.376	.772**	.218
Bi			1	.521*	.723**	-.015	.369	.549*	.724**	.981**	-.085	.752**
Cu				1	.554*	.121	-.005	.979**	.640*	.560*	-.383	.828**
Mn					1	.319	.607*	.537*	.645**	.811**	.264	.702**
Mo						1	.242	.103	.364	.027	.266	-.020
Pb							1	.041	.132	.480	.701**	.281
S								1	.645**	.575*	-.370	.850**
Sb									1	.693**	-.213	.606*
Se										1	.030	.794**
Zn											1	-.081
Fe												1

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed). *. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

جدول ۵- شبکه همبستگی میان عناصر در گوسان‌های محدوده معدنی مس- طلای چهارگنبد.

	Ag	As	Bi	Cu	Mn	Mo	Pb	S	Sb	Se	Zn	Fe
Ag	1	.175	.858*	.852*	.738	-.064	.962**	-.332	.816*	.192	.195	.742
As		1	-.249	-.238	-.114	.325	.149	-.506	-.055	-.590	.156	-.122
Bi			1	.999**	.928**	-.013	.806*	-.187	.915**	.520	.076	.922**
Cu				1	.940**	.012	.798*	-.195	.918**	.524	.072	.933**
Mn					1	.306	.671	-.315	.904**	.482	.072	.986**
Mo						1	-.052	-.330	.002	-.058	.232	.335
Pb							1	-.442	.721	.040	.443	.713
S								1	-.373	.670*	-.696	-.342
Sb									1	.336	-.023	.846*
Se										1	-.592	.446
Zn											1	.205
Fe												1

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed). **. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

جدول ۶- اطلاعات مربوط به آزمون مؤلفه‌های اصلی در گوسان‌های محدوده معدنی چهارگنبد.

Total Variance Explained gossan									
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 %**
1	6.455	53.791	53.791	6.455	53.791	53.197	6.423	53.528	53.528
2	2.906	24.220	78.011	2.906	24.220	78.011	2.870	23.917	77.444
3	1.231	10.062	88.271	1.231	10.260	88.271	1.299	10.826	88.271
4	0.893	7.446	95.716						
5	0.443	3.695	99.412						
6	0.071	0.588	100						

Extraction Method: Principal Component Analysis.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۷- شبکه مؤلفه‌های چرخنده PCA در گوسان‌های محدوده معدنی چهارگنبد.

Rotated Component Matrix[a] gossan			
	Component		
	۱	۲	۳
Ag	۰/۹۰۴	۰/۲۰۸	−۰/۱۸۸
As	−۰/۱۲۰	۰/۶۸۵	۰/۱۹۲
Bi	۰/۹۹۰	−۰/۱۳۴	−۰/۰۱۹
Cu	۰/۹۹۰	−۰/۱۳۴	۰/۰۱۱
Mn	۰/۹۳۳	−۰/۰۸۰	۰/۳۳۱
Mo	۰/۰۳۴	−۰/۲۲۷	۰/۹۵۱
Pb	۰/۳۶۴	۰/۸۶۲	−۰/۲۲۴
S	−۰/۳۰۵	−۰/۸۶۷	−۰/۱۸۸
Sb	۰/۹۳۲	−۰/۰۰۷	۰/۰۱۸
Se	۰/۴۱۰	−۰/۸۸۵	۰/۱۲۳
Zn	۰/۱۵۳	۰/۷۷۲	۰/۰۱۴
Fe	۰/۹۳۱	−۰/۰۱۷	۰/۳۳۳

Extraction Method: Principal Component Analysis.
Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.
a. Rotation converged in 4 iterations.

جدول ۸- اطلاعات مربوط به آزمون مؤلفه‌های اصلی در سنگ‌های کانه‌زای محدوده معدنی چهارگنبد.

Total Variance Explained									
ComponentT	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	۶/۴۴۴	۵۳/۷۰۱	۵۳/۷۰۱	۶/۴۴۴	۵۳/۷۰۱	۵۳/۷۰۱	۶/۱۹۰	۵۱/۵۸۶	۵۱/۵۸۶
۲	۳/۰۰۹	۲۵/۰۷۳	۷۸/۷۷۴	۳/۰۰۹	۲۵/۰۷۳	۷۸/۷۷۴	۳/۱۲۵	۲۶/۰۳۸	۷۷/۶۲۳
۳	۱/۱۸۸	۹/۹۰۱	۸۸/۶۷۵	۱/۱۸۸	۹/۹۰۱	۸۸/۶۷۵	۱/۳۲۶	۱۱/۰۵۲	۸۸/۶۷۵
۴	۰/۶۹۴	۵/۷۸۷	۹۴/۴۶۲						
۵	۰/۲۳۱	۱/۹۲۵	۹۶/۳۸۷						
۶	۰/۱۹۵	۱/۶۲۶	۹۸/۰۱۳						
۷	۰/۱۵۸	۱/۳۱۶	۹۹/۳۲۹						
۸	۰/۰۵۷	۰/۴۷۱	۹۹/۸۰۰						
۹	۰/۰۲۰	۰/۱۶۷	۹۹/۹۶۸						
۱۰	۰/۰۰۳	۰/۰۲۴	۹۹/۹۹۱						
۱۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	۹۹/۹۹۸						
۱۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۱۰۰						

Extraction Method: Principal Component Analysis.

جدول ۹- شبکه مؤلفه‌های چرخنده PCA در سنگ‌های کانه‌زای محدوده معدنی چهارگنبد.

Rotated Component Matrix[a]			
	Component		
	۱	۲	۳
Ag	۰/۹۸۷	۰/۰۱۸	۰/۱۴۲
As	۰/۱۴۷	۰/۸۸۴	۰/۳۹۱
Bi	۰/۸۴۲	۰/۲۸۷	−۰/۲۶۵
Cu	۰/۸۹۱	−۰/۲۲۹	۰/۱۸۳
Mn	۰/۷۳۵	۰/۵۸۱	۰/۱۴۸
Mo	۰/۰۸۳	۰/۲۷۶	۰/۹۲۱
Pb	۰/۱۸۲	۰/۸۹۶	−۰/۰۲۴
S	۰/۸۹۸	−۰/۲۱۵	۰/۱۴۲
Sb	۰/۸۱۴	۰/۰۳۱	۰/۲۹۲
Se	۰/۸۵۲	۰/۳۹۷	−۰/۲۲۴
Zn	−۰/۲۹۴	۰/۸۷۷	۰/۰۹۸
Fe	۰/۹۱۱	۰/۱۲۹	−۰/۱۱۷

Extraction Method: Principal Component Analysis.
Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.
a. Rotation converged in 5 iterations.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱۰- مقادیر عناصر در گوسان‌های محدوده معدنی چهارگنبد (برحسب ppm) و افزودگی و کاهیدگی عناصر نسبت به کلارک و زمینه طبیعی.

عناصر	مقادیر میانگین عناصر در گوسان	کلارک عناصر	زمینه طبیعی منطقه	نسبت مقادیر عناصر به کلارک	نسبت مقادیر عناصر به زمینه طبیعی منطقه
Au	۲/۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	۴۰۰	۳۰۰
Ag	۰/۳۵	۰/۰۷	۰/۱	۵	۳/۵
As	۱۱/۶	۱/۸	۶/۶۹	۶/۴۴	۱/۷۳
Bi	۵۳۱/۰۷	۰/۱۷	۰/۱۸	۳۱۲۳/۹۴	۲۹۵۰/۳۹
Cu	۶۹۴/۰۲	۵۵	۵۵/۷	۱۲/۶۲	۱۲/۴۶
Mn	۹۵۳۴/۲۵	۹۵۰	۱۴۷۳/۳۸	۱۰/۰۴	۶/۴۷
Mo	۶/۸	۱/۵	۰/۶۸	۴/۵۳	۱۰
Pb	۱۰/۵۱	۱۲/۵	۷/۱۶	۰/۸۴	۱/۴۷
Sb	۴/۸	۰/۲	۰/۸۱	۲۴	۵/۹۳
Se	۰/۳۹	۰/۰۵	۰/۲۴	۷/۸	۱/۶۳
Zn	۴۳/۴۱	۷۰	۴۸/۵۹	۰/۶۲	۰/۸۹
Fe	۱۲۰۴۷۸	۵۶۰۰۰	۹۵۰۳۴/۷۵	۲/۱۵	۱/۲۷

کتابنگاری

حیدری، س. م.، اصفهانی‌نژاد، م.، مرادی، م.، محبی، آ.، دلاور، س. ت. و موسوی س. ع.، ۱۳۸۷- مقدمه‌ای بر فرآیندهای کانه‌ساز، ترجمه کتاب Introduction to ore-forming processes نوشته Laurence Robb، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۴ ص.

سلیمانی، س.، ۱۳۸۸- بررسی گوسان‌ها و اهمیت اکتشافی آنها در کمربند کانه‌زایی کرمان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهیدباهنر کرمان، ۴۳۲ ص.

فلک‌زاده، م.، ۱۳۸۵- گزارشات داخلی شرکت معادن چهارگنبد. ۱۲۰ ص.

یوسفی شریک‌آباد، س. ج.، آفتابی، ع.، اسلامی، ا. و اسمعیل‌زاده، ع.، ۱۳۹۰- ژئوشیمی زیست‌محیطی عناصر سمی در خاک‌های اطراف معدن رگه‌ای مس- طلای چهارگنبد، سیرجان. پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ۲۴-۲۳ آذر ۱۳۹۰، دانشگاه تربیت معلم تهران.

References

Atapour, A. & Aftabi, A., 2007- The geochemistry of gossans associated with Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Rafsanjan, Kerman, Iran: Implications for exploration and the environment, Journal of Geochemical Exploration, V. 93, p. 47-65.

Barnes, H. L., 1997- Geochemistry of hydrothermal ore deposits, third edition, New York, John Wiley and Sons, 797p.

Benedetti, V. R. & Boulegue, J., 1991- Mechanism of gold transfer and deposition in supergene environment. Geochim Cosmochim, Acta, 55 pp.1539-1547.

Dimitrijevic, M. D., 1973- Geology of Kerman region: institute for geological and mining exploration and investigation of nuclear and other mineral raw material, Beograd—Yugoslavia, Iran Geol. Survey Rept Yu/52,220p.

Kaiser H. F., 1960- The application of electronic computers to factor analysis, Educ Psychol Meas 20 pp.141–151.

Khorasanipour, M. & Tangestani, M., 2011- 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 pp.1-17.

Loftus Hills, G. & Solomon, M.,1967 - Cobalt, Nickel and selenium in sulphides as indicators of ore genesis. Mineralium Deposita, 2 pp.228-242.

Morrison, D., 1967- Multivariate statistical methods. McGraw Hill, New York.

Nickel, E. H., 1979- Gossan mineralogy viewed in the context of solution chemistry. In: Glover, J.E., Smith, R.E. (Eds.), Pathfinder and Multielement Geochemistry in Mineral Exploration: Geol. Dept. and Ext. Serv. University of Western Australia.

Rose, A. W., Hawkes, H. E. & Web, J. S., 1979- Geochemistry in mineral exploration. Academic Press, 657p.

Scott, K. M., 1986- Elemental partitioning into Mn and Fe oxides derived from dolomitic shale-hosted Pb-Zn deposits northwest Queensland, Australia. Journal of Chemical geology, 57 pp.395-414.

Scott, K. M., Ashley, P. M. & Lawie, D. C., 2001- The geochemistry, mineralogy and maturity of gossans derived from volcanogenic Zn-Pb-Cu deposits of the eastern Lachlan Fold Belt, NSW, Australia. Journal of Geochemical Exploration, 72, pp.169-191.

Sjerp, N., Issakhanian, V. & Brants, A., 1969- The Geological Environment of the ChaharGonbad Copper Mine: A Study in Tertiary Copper Mineralization, Geological Survey of Iran, Report 16, 64p.

Wilhelm, G. & Kozakevich, D., 1979- Utilisation deschapeaux de fer comme guides de prospection. BRGM Bull, Sect.11, V. 2-3. p. 109-140.

Archive of SID

www.SID.ir