سنگ‌نگاری، کانی‌نگاری و تغییرات مقادیر $\delta^{65}Cu$ در پهنه‌های فروشست، برون‌زاد و درون‌زاد کانسارهای مس پورفیری دره‌زار و پرکام، استان کرمان، جنوب ایران

نرجس فاتحی گلاب [۱*] ، حسن میرنژاد [۲] و رایان متور [۳]

[۱] کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
[۲] دانشیار، گروه زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
[۳] استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه جونیاتا، هونتینگتون، آمریکا.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۴/۱۰

چکیده

کانسارهای دره‌زار و پرکام در استان کرمان، دو نمونه از کانسارهای مس پورفیری در کمان ماگمایی سنوزوییک ارومیه- دختر هستند. سنگ‌های آتشفشانی مناطق مورد مطالعه بیشتر آندزیت، تراکی‌آندزیت و بازالت می‌باشند. استوک کوارتزمونزونیتی دره‌زار از درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، هورنبلند، کوارتز و بیوتیت تشکیل یافته و کانی‌های سازنده دیوریت تا میکرودیوریت پورفیری در پرکام شامل پلاژیوکلاز، فلدسپار قلیایی، آمفیبول، بیوتیت و کوارتز است. ستبرای پهنه اکسیدی در کانسار دره‌زار در حد چند متر بوده و در بسیاری از گمانه‌ها مشاهده نشده است در حالی که ستبرای پهنه فروشست از ۲ تا ۸۰ متر تغییر می‌کند. پهنه برون‌زاد در مرکز این کانسار بیشترین ستبرا (۱۲۰ متر) را دارد. پهنه درون‌زاد کانسار دره‌زار تا ژرفاهای بیش از ۴۰۰ متر گسترش پیدا می‌کند. ستبرای پهنه اکسیدی در کانسار پرکام قابل ملاحظه است و در برخی گمانه‌ها به ۲۰ متر می‌رسد. پهنه فروشست پرکام میانگین ستبرایی حدود ۲۰ متر دارد. ستبرای میانگین پهنه برون‌زاد در این کانسار ۱۵ متر و بیشینه ژرفای آن ۶۴ متر می‌باشد و پهنه درون‌زاد (ژرف‌زاد) نیز در برخی از گمانه‌ها تا ژرفای ۵۰۰ متر ادامه می‌یابد. بررسی نسبت‌های ایزوتوپی مس پهنه‌های فروشست، برون‌زاد و درون‌زاد این دو کانسار نشان می‌دهد که درجه جدایش ایزوتوپی و تمرکز مس، به فرایندهای هوازدگی بستگی دارد. میانگین مقدار $\delta^{65}Cu$ مس در پهنه‌های فروشست، برون‌زاد و درون‌زاد در کانسار دره‌زار به‌ترتیب ‰6.16-، ‰2.52+ و ‰0.79+ و در کانسار پرکام به‌ترتیب ‰4.33-، ‰4.82+ و ‰0.34+ است. بنابراین، هوازدگی کانی‌های سولفیدی مس با تولید کانی‌های بازمانده سبک (از دید ایزوتوپی) و پراکنده شدن ایزوتوپ مس سنگین در آب زیرزمینی همراه بوده است. از این رو، پیش‌بینی می‌شود که نسبت ایزوتوپی مس پهنه فروشست در کانسارهای مختلف، با درجه شستشو و غنی‌شدگی پهنه برون‌زاد مرتبط باشد. مشاهدات میکرسکوپی و مطالعات کانی‌شناسی نشان می‌دهد که فراوانی هماتیت در پهنه فروشست کانسار دره‌زار بیشتر از پرکام است، در حالی که پهنه فروشست کانسار پرکام، گوتیت فراوان‌تری نسبت به دره‌زار دارد. مقدار کالکوسیت و پیریت- کالکوپیریت، به‌ترتیب در پهنه‌های برون‌زاد و درون‌زاد کانسار دره‌زار بیشتر از پرکام است.

کلیدواژه‌ها: ایزوتوپ مس، پرکام، دره‌زار، مس پورفیری، درون‌زاد، برون‌زاد، پوشش فروشست.

***نویسنده مسئول:** نرجس فاتحی گلاب
E-mail: fatehi.narges@gmail.com

۱- پیش‌گفتار

کمربند ماگمایی سنوزوییک ارومیه- دختر، میزبان کانسارهای مس و مس- مولیبدن پورفیری بسیاری است. فعالیت ماگمایی در این کمربند به فرورانش پوسته اقیانوسی نوتتیس به زیر پوسته قاره‌ای ایران در فاصله زمانی تریاس تا میوسن نسبت داده می‌شود (Berberian & King, 1981; Shafiei et al., 2009; Shahabpour & Dourandish, 2008). کانی‌زایی مس نوع پورفیری در کمربند ارومیه- دختر با استوک‌های کوارتزدیوریتی، کوارتزمونزونیتی، گرانودیوریتی و دیوریتی به سن میوسن میانی- پایانی در ارتباط است که به درون سری‌های آتشفشانی پالئوسن- الیگوسن نفوذ کرده‌اند (Shafiei et al., 2009; Alirezaei & Mohammadzadeh, 2009). در این مطالعه، ترکیب ایزوتوپی مس ($\delta^{65}Cu$) پهنه‌های مختلف دو کانسار دره‌زار و پرکام، با هدف کاربرد اکتشافی آن، اندازه‌گیری و همچنین عوامل مؤثر در غنی‌سازی برون‌زاد این دو کانسار بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که از دید نسبت ایزوتوپی مس، کانی‌های اکسیدی موجود در پهنه فروشست، سبک‌تر و کانی‌های سولفیدی ثانویه در پهنه برون‌زاد، مانند کالکوسیت، سنگین‌تر از کالکوپیریت اولیه هستند و میزان تهی‌شدگی یا غنی‌شدگی ایزوتوپی، با گستردگی و شدت شستشو و نهشت دوباره مس در سیستم پورفیری در ارتباط است (Mathur et al., 2009). بدین ترتیب پیش‌بینی می‌شود که مقایسه نسبت‌های ایزوتوپی مس پهنه‌های فروشست و برون‌زاد به‌عنوان وسیله‌ای برای شناخت درجه شستشو و غنی‌شدگی به کار گرفته‌شود.

۲- روش مطالعه

در این پژوهش، با بررسی زمین‌شناسی سطحی کانسارهای دره‌زار و پرکام، گمانه‌های حفاری این دو کانسار به دقت بررسی شد و پس از مطالعات سنگ‌نگاری و کانی‌نگاری، نمونه‌های مناسب دارای کانی‌های اکسیدی (پهنه فروشست) و سولفیدی (پهنه‌های برون‌زاد و درون‌زاد) برای تجزیه انتخاب شد. ویژگی‌های نمونه‌ها در جدول ۱ آمده است. نمونه‌ها در آزمایشگاه آماده‌سازی دانشگاه آریزونای آمریکا تا ۱۵۰ مش خرد شد و سپس در مورد کانی‌های اکسیدی، مقدار ۰/۱ گرم و در مورد کانی‌های سولفیدی، مقدار ۰/۵ گرم نمونه در تیزاب سلطانی در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد حل و محلول به‌دست آمده روی ورقه‌های فلزی با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد خشک و مس موجود در آنها به کمک کروماتوگرافی تبادل یونی (Ion Exchange Chromatography) جدا شد. فرایند بازیابی مس به این روش - برای انجام تجزیه ایزوتوپی- توسط Mathur et al. (2009) توصیف شده است. غلظت مس و نسبت ایزوتوپ‌های $^{65}Cu/^{63}Cu$ محلول توسط دستگاه "Multicollector- ICP-MS" در آزمایشگاه ایزوتوپی دانشگاه آریزونای آمریکا اندازه‌گیری شده است. پهنه فروشست دو کانسار دره‌زار و پرکام، بر پایه فراوانی کانی‌های اکسیدی و پهنه‌های برون‌زاد و درون‌زاد بر پایه فراوانی کانی‌های سولفیدی با یکدیگر مقایسه شده‌اند که شناسایی این کانی‌ها به روش پراش پرتو ایکس (XRD) در دانشگاه جونیاتای آمریکا انجام گرفته است.

۳- زمین‌شناسی

کانسار مس دره‌زار با مختصات جغرافیایی ″۳۵ ′۵۴ °۵۵ طول خاوری و

″۱۰ ′۵۳ °۲۹ عرض شمالی در ۱۰ کیلومتری جنوب معدن مس سرچشمه قرار دارد. دسترسی به این کانسار، از سرچشمه و پاریز امکان‌پذیر است. کانسار مس پرکام در موقعیت ″۲۵ ′۱۰ °۵۵ طول خاوری و ″۴۰ ′۲۵ °۳۰ عرض شمالی در ۳ کیلومتری شمال باختر معدن مس میدوک و ۵۰ کیلومتری شمال شهرستان شهربابک قرار دارد و دسترسی به آن از راه جاده شهربابک به میدوک فراهم است.

کانی‌زایی مس در دره‌زار و پرکام به‌ترتیب با استوک‌های کوارتزمونزونیتی و دیوریتی- میکرودیوریتی الیگومیوسن مرتبط است که در سری‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن دربردارنده توف، ایگنمبریت و آگلومرا نفوذ کرده‌اند (شکل ۱). آگلومرا و لاپیلی‌توف، بخشی از واحدهای ائوسن را در دو منطقه تشکیل داده‌اند. سنگ‌های آتشفشانی دره‌زار به‌طور چیره آندزیت و آندزیت- بازالت است. آندزیت‌ها در امتداد گسل‌ها بیشتر کانی‌زایی و دگرسان شده‌اند. گدازه‌های آندزیت- بازالتی در کناره‌های کانسار گسترش یافته‌اند و گاه دارای شکستگی‌های فراوان هستند (شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۷). سنگ‌های آتشفشانی در پرکام به‌طور چیره دربردارنده آندزیت، تراکی‌آندزیت و بازالت هستند که بخش به نسبت پهناوری را در جنوب این منطقه پوشانده‌اند.

سنگ‌های آذرین درونی در دره‌زار، دربردارنده استوک‌هایی با ترکیب کوارتزمونزونیت، میکرودیوریت- دیوریت و گرانودیوریت است. توده نفوذی اصلی در این کانسار کوارتزمونزونیت است که توسط توده میکرودیوریت- دیوریت دربرگرفته شده است. رخنمونی از یک توده گرانودیوریتی جوان‌تر در مرکز معدن گسترش دارد و به‌شدت گسلیده، خردشده و هوازده است. این واحد نسبت به توده اصلی دره‌زار و توده دیوریتی- میکرودیوریتی جوان‌تر است. دایک‌ها ترکیب دلریتی (دیابازی) و دیوریتی دارند و مربوط به آخرین مراحل فعالیت ماگمایی هستند.

توده‌های نفوذی در پرکام دربردارنده دیوریت با درشت‌بلورهای درشت پلاژیوکلاز، دیوریت- میکرودیوریت پورفیری با درشت‌بلورهای کوچک پلاژیوکلاز و کوارتز- مونزودیوریت پورفیری است که در سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری جایگیر شده‌اند. بیشتر سنگ‌های آتشفشانی را آندزیت تشکیل داده است که با تراکی‌آندزیت، بازالت و برش‌های آتشفشانی همراه می‌شود. توده دیوریت- میکرودیوریت پورفیری با دگرسانی به‌نسبت شدید، بخش زیادی از منطقه را فرا گرفته است و میزبان اصلی کانی‌سازی مس است. شکل ۲ نمایی از توده دیوریت- میکرودیوریت پورفیری را نشان می‌دهد.

۴- سنگ‌نگاری و کانی‌نگاری

در محدوده‌های مورد مطالعه، سنگ‌های آذرآواری با بافت شیشه‌ای و لیتوکلاستیک و بلورهای کوارتز، فلدسپار پتاسیم، پلاژیوکلاز، کلریت، بیوتیت و قطعات سنگی آندزیتی مشخص می‌شوند. کلسیت، کلریت و میکرولیت‌های پلاژیوکلاز از سازنده‌های اصلی زمینه این نوع سنگ‌ها هستند. سنگ‌های آتشفشانی دره‌زار و پرکام بیشتر دربردارنده آندزیت، تراکی‌آندزیت و بازالت است (شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸). آندزیت با بافت هولوکریستالین و پورفیری از کانی‌های پلاژیوکلاز، پیروکسن، هورنبلند، مگنتیت و مقدار کمی ارتوکلاز و بیوتیت تشکیل شده است. پیروکسن در برخی از موارد به اپیدوت و کلریت تبدیل شده است (شکل ۳- الف). مهم‌ترین ویژگی‌های کانی‌شناسی سنگ‌های تراکی‌آندزیتی و آندزیتی، منطقه‌بندی نوسانی در فلدسپار و آمفیبول است.

کانی‌سازی در دره‌زار با استوک کوارتزمونزونیتی مرتبط است. این توده که به پورفیری دره‌زار معروف است، بافت پورفیری دارد، خمیره آن میکروگرانولار است (شکل ۳- ب) و ۵۰ تا ۶۵ درصد درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، هورنبلند، کوارتز و بیوتیت در زمینه‌ای ریزدانه با چیرگی کوارتز- فلدسپار دارد. ترکیب پلاژیوکلازها، آندزین و الیگوکلاز است (معانی‌جو، ۱۳۷۱) و درشت‌بلورهای بیوتیت کاملاً به کلریت و اکسید آهن تبدیل شده‌اند. کانی‌های سازنده دیوریت تا میکرودیوریت پورفیری کانسار پرکام پلاژیوکلاز، فلدسپار قلیایی، آمفیبول، بیوتیت و کوارتز است (شکل ۳- ج). پلاژیوکلاز کانی اصلی سازنده دایک‌هاست و نوع آن در دایک‌های دلریتی، لابرادوریت و در دایک‌های دیوریتی، الیگوکلاز- آندزین (معانی جو، ۱۳۷۱) است. کانی‌های ثانویه موجود در سنگ‌های آذرین دو منطقه مورد مطالعه از نوع دگرسانی و ترکیب کانی‌شناسی سنگ اولیه پیروی می‌کنند.

در سامانه‌های مس پورفیری، سه پهنه مرتبط با کانی‌سازی قابل تشخیص است که از سطح به ژرفا به‌ترتیب شامل پهنه‌های فروشست (شسته‌شده)، برون‌زاد و درون‌زاد است. در بسیاری از این سامانه‌ها، یک پهنه اکسیدی در میان پهنه فروشست و پهنه برون‌زاد، یا گاه همراه با پهنه فروشست و در سطح زمین دیده می‌شود. پهنه فروشست بیشتر با فراوانی اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (گوتیت، هماتیت، لیمونیت) شناسایی می‌شود و به دلیل عیار پایین مس، اقتصادی نیست. اگرچه پهنه‌های فروشست و اکسیدی از فرایندهای برون‌زاد به‌دست می‌آیند ولی در اینجا به دلیل تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی و همچنین کانی‌شناسی، این پهنه‌ها به‌صورت مجزا از پهنه برون‌زاد توضیح داده شده‌اند. واژه "سوپرژن" در کانسارهای مس پورفیری بیشتر به مفهوم "غنی‌سازی برون‌زاد" به‌کار می‌رود که در واقع غنی شدن و افزایش عیار کانسنگ توسط فرایندهای برون‌زاد است.

مانند بسیاری از کانسارهای پورفیری دیگر، پهنه‌های فروشست، برون‌زاد و درون‌زاد در دره‌زار قابل تشخیص است. پهنه اکسیدی نیز در این کانسار وجود دارد، اگرچه ستبرای چندانی ندارد و در بسیاری از گمانه‌ها دیده نشده است. پهنه فروشست به‌خوبی در این کانسار گسترش یافته و ستبرای آن از ۲ تا ۸۰ متر متغیر است (تقی‌زاده زانوقی، ۱۳۷۵). هماتیت، گوتیت، لیمونیت و گاه ژاروسیت که از اکسید شدن و تجزیه پیریت و کالکوپیریت به‌دست می‌آیند، کانی‌های شاخص پهنه فروشست در این کانسار هستند (شکل ۴- الف). پهنه اکسیدی با حضور کانی‌های مالاکیت، آزوریت و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن مشخص می‌شود. پهنه برون‌زاد با ستبرای میانگین ۴۰ متر و هندسه عدسی‌شکل، در زیرکلاهک فروشست کانسار قرار گرفته است. این پهنه در کناره‌های کانسار تشکیل نشده است و در مرکز کانسار بیشترین ستبرا (۱۲۰ متر) را دارد (تقی‌زاده زانوقی، ۱۳۷۵). کالکوسیت و به‌طور فرعی کوولیت، کانی‌های شاخص این پهنه هستند که به‌طور ترجیحی جانشین کالکوپیریت شده‌اند (شکل‌های ۴- ب و ۴- ج). کالکوسیت و کوولیت به‌صورت افشان و همچنین رگچه‌ای وجود دارند. پیریت نیز در بیشتر موارد کانی‌های پهنه برون‌زاد را همراهی می‌کند. گمانه‌های حفرشده در دره‌زار، گسترش پهنه درون‌زاد را تا ژرفاهای بیش از ۴۰۰ متر نشان می‌دهند (شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۷). این پهنه در کانسار دره‌زار بیشتر منطبق بر پهنه‌های دگرسانی پتاسیک و پتاسیک- فیلیک بوده است. کانی‌سازی در قالب رگه- رگچه‌ای و پراکنده صورت گرفته و همبود (پاراژنز) کانی‌شناسی آن دربردارنده پیریت، کالکوپیریت، بورنیت و به‌میزان جزیی مولیبدنیت است. مگنتیت به‌صورت پراکنده و نیز رگچه‌ای همراه با پیریت و کالکوپیریت یافت می‌شود. شکل ۵ یک برش زمین‌شناسی در کانسار دره‌زار را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده پراکندگی پهنه‌های فروشست، برون‌زاد و درون‌زاد در آن است. دگرسانی‌های پتاسیک، فیلیک و پروپلیتیک در دره‌زار به‌خوبی گسترش یافته‌اند و پهنه‌بندی هم‌مرکز به نمایش می‌گذارند. کانی‌زایی مس در پهنه‌های دگرسانی پتاسیک و فیلیک رخ داده است. در پهنه پروپلیتیک، کانی‌زایی ضعیفی به‌صورت رگچه‌ای و پرکننده حفرات دیده می‌شود.

در مغزه‌های حفاری در کانسار پرکام می‌توان پهنه‌های فروشست، اکسیدی، برون‌زاد و درون‌زاد را دنبال کرد. میانگین ستبرای پهنه فروشست در این کانسار ۲۰ متر و کانی‌های شاخص آن اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن مانند گوتیت، ژاروسیت

و هماتیت است (شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۸). پهنه اکسیدی معمولاً با مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا و اکسیدهای آهن و منگنز مشخص می‌شود که ستبرای بسیاری دارد و در برخی از گمانه‌ها تا ۲۰ متر ثبت شده است (شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۸). ژرفای میانگین پهنه برون‌زاد ۲۸ متر و ستبرای میانگین آن ۱۵ متر است (شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۸). کانی‌سازی در این پهنه به‌صورت رگچه‌ای و نیز افشان بوده و با حضور کالکوسیت مشخص می‌شود که به‌طور بخشی یا کامل جانشین کالکوپیریت شده است. این دو کانی بیشتر با پیریت همراهی می‌شوند و مقدار کمی کوولیت، مولیبدنیت، مگنتیت، مالاکیت و گاه آزوریت نیز ممکن است وجود داشته باشد. دیژنیت نیز به‌صورت همبود همراه با کالکوسیت وجود دارد. کانی‌های فلزی به‌صورت رگچه‌ای و نیز دانه‌های پراکنده (افشان) در متن سنگ دیده می‌شوند. بیشترین ژرفای پهنه برون‌زاد ۶۴ متر است و در برخی گمانه‌ها اساساً دیده نشده است (شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۸). کانی‌سازی در پهنه درون‌زاد به‌صورت رگچه‌ای (استوک‌ورک) و نیز دانه‌پراکنده (افشان) رخ داده است. کانی‌های این پهنه پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت، مولیبدنیت و بورنیت است. پهنه درون‌زاد در برخی از گمانه‌ها تا ژرفای ۵۰۰ متر ادامه دارد (شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۸). شکل ۴- د مگنتیت موجود در پهنه درون‌زاد کانسار پرکام را نشان می‌دهد که تحت تأثیر مارتیتی شدن به هماتیت تبدیل شده است. شکل ۶ یک برش زمین‌شناسی از کانسار پرکام را در امتداد شمال خاوری- جنوب باختری نشان می‌دهد. پهنه‌های فروشست، اکسیدی، برون‌زاد و درون‌زاد اصلی‌ترین پهنه‌های کانی‌زایی آن هستند. در محدوده کانسار پرکام دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپیلتیک گسترش دارند. دگرسانی فیلیک، بخش اصلی و مرکزی سامانه دگرسانی پرکام را دربر گرفته است و دگرسانی پتاسیک تنها در بخش کوچکی از مرکز کانسار حضور دارد. دگرسانی آرژیلیک در کناره جنوبی دگرسانی فیلیک گسترش دارد و در دیگر مناطق کمتر دیده می‌شود. دگرسانی پروپیلتیک به‌طور چیره در سنگ‌های آتشفشانی- آذرآواری گسترش دارد.

۵- ژئوشیمی ایزوتوپی مس

عنصر مس افزون بر داشتن شمار زیادی رادیوایزوتوپ که نیمه‌عمر کوتاهی (در حد دقیقه) دارند، دو ایزوتوپ پایدار و طبیعی ^{65}Cu و ^{63}Cu به‌ترتیب با فراوانی های ۳۰/۹۱ و ۶۹/۰۹ درصد دارد. این دو ایزوتوپ تغییراتی را در پهنه‌های فروشست، برون‌زاد و درون‌زاد کانسارهای مس پورفیری نشان می‌دهند. ترکیب ایزوتوپی مس با استفاده از رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$\delta^{65}Cu = \left(\frac{(^{65}Cu / {}^{63}Cu)\ sample}{(^{65}Cu / {}^{63}Cu)\ standard} - 1\right) \times 1000$$

استاندارد جهانی برای تجزیه ایزوتوپی مس، NIST 976 Cu standard است که نسبت $^{65}Cu/^{63}Cu$ آن 0.4746 است (Markle et al., 2006).

هوازدگی کانسارهای مس پورفیری سبب ایجاد محلول‌های اکسیدکننده (Oxidizing) و اسیدی می‌شود که مس را از بخش‌های سطحی کانسار شسته و در ژرفاهای بیشتر و شرایط احیایی در زیر سطح ایستابی رسوب می‌دهد (Alpers & Brimhall, 1989). در طی این فرایند، کالکوپیریت انحلال می‌یابد و مس آن پس از انتقال توسط آب‌های جوی به‌صورت کالکوسیت (Cu_2S) در زیر سطح ایستابی ته‌نشین می‌شود. فرایند اکسایش مخلوطی از اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در کلاهک فروشست (Leached Cap) کانسار ایجاد می‌کند و جدایش شدیدی را در ایزوتوپ‌های مس (‰1>) به‌وجود می‌آورد. میانگین مس موجود در کلاهک فروشست کانسارهای مس پورفیری بسیار کم و در حد 36.7 ppm تا 160.5 است که این مس بیشتر در کانی‌های مالاکیت و کریزوکولا حضور دارد (کاظمی مهرنیا، ۱۳۸۸). اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و کانی‌های اکسیدی مس‌دار ثانویه که در نتیجه اکسایش کانی‌های سولفیدی اولیه مس‌دار ایجاد شده‌اند، نیز به‌میزان کم عنصر مس را در ترکیب خود دارند. یافته‌های تجربی Kimball et al. (2009)، Mathur et al. (2005)، Pokrovsky et al. (2008) و Zhu et al. (2002) نشان می‌دهد که به‌طور میانگین $\delta^{65}Cu$ کانی‌های پهنه درون‌زاد نزدیک به صفر در هزار است. انحلال کانی‌های سولفیدی مس‌دار اولیه مانند کالکوپیریت کانی‌های بازمانده سبک‌تر ($\delta^{65}Cu<0‰$) را در پهنه فروشست به جای می‌گذارد و هماهنگ با آن، سولفیدهای ثانویه سنگین‌تر ($\delta^{65}Cu>0‰$) را در شرایط کاهنده در پهنه غنی‌شده رسوب می‌دهد (Mathur et al., 2005). شکل ۷ ترکیب ایزوتوپی پهنه‌های فروشست، برون‌زاد، و درون‌زاد را در کانسارهای مس پورفیری بیوت (Butte)، سیلوربل (Silver Bell)، چوکی‌کوماتا (Chuquicamata)، اسکوندیدا (Escondida) و السالوادور (El Salvador) در کشورهای شیلی و آمریکا نشان می‌دهد.

نسبت‌های ایزوتوپی مس در کانی‌های اکسیدی و سولفیدی پهنه‌های فروشست (هماتیت، گوتیت، ژاروسیت، مالاکیت)، برون‌زاد (کالکوسیت، پیریت، هماتیت و کالکوپیریت) و درون‌زاد (پیریت، کالکوپیریت) کانسارهای دره‌زار و پرکام در جدول ۲ ارائه شده است. مقدار $\delta^{65}Cu$ پهنه‌های درون‌زاد، برون‌زاد و فروشست در کانسار دره‌زار، به‌ترتیب ‰ ۰/۴۶+ تا ‰ ۱/۱۲+، ‰ ۱/۷۳+ تا ‰ ۴/۰۵+ و ‰ ۱۴/۶۴- تا ‰ ۱/۸- و در کانسار پرکام به‌ترتیب ‰ ۰/۴۹- تا ‰ ۳/۲۴+، ‰ ۱/۵۸+ تا ‰ ۴/۹۷+ و ‰ ۹/۲۲- تا ‰ ۰/۷۸+ است. میانگین مقدار $\delta^{65}Cu$ پهنه درون‌زاد در دره‌زار و پرکام به‌ترتیب ‰ ۰/۷۹ و ‰ ۰/۳۴+ است، در حالی که پهنه برون‌زاد از دید ایزوتوپی سنگین‌تر (‰ ۲/۵۲+ در دره‌زار و ‰ ۴/۸۲+ در پرکام) و پهنه فروشست از دید ایزوتوپی سبک‌تر است (‰ ۶/۱۶- در دره‌زار و ‰ ۴/۳۳- در پرکام). شکل ۸ الگوی تغییرات ایزوتوپی مس را نسبت به ژرفا در نمونه‌های مغزه‌های حفاری گمانه‌های دره‌زار و پرکام نشان می‌دهد.

Mathure et al. (2009) تغییرات ایزوتوپی مس را در پهنه‌های فروشست، برون‌زاد و درون‌زاد در کانسار سیلوربل (Bell Silver) در آمریکا و کانسارهای چوکی‌کوماتا (Chuquicamata)، اسکوندیدا (Escondida) و السالوادور (El Salvador) در شیلی اندازه‌گیری و روند تغییرات آن را مشخص کرده‌اند. Markl et al. (2006) با محاسبه ترکیب ایزوتوپی مس ۷۹ نمونه از کانی‌های اولیه و ثانویه مس‌دار رگه‌های گرمابی محدوده معدنی شوارزوالد (Schwarzwald) در جنوب آلمان، میزان تغییرات $\delta^{65}Cu$ این کانسار را از ‰ ۲/۹۲- تا ‰ ۲/۴۱+ گزارش کرده‌اند که مقادیر منفی مربوط به ژرفاهای کمتر و پهنه فروشست، و مقادیر مثبت مربوط به کانی‌های ثانویه مس در زیر سطح آب زیرزمینی است. تغییرات ایزوتوپی مس در پهنه‌های مختلف دو کانسار دره‌زار و پرکام نیز از این الگو پیروی می‌کند.

رابطه‌ای عمومی میان ترکیب ایزوتوپی مس در پهنه‌های فروشست و برون‌زاد کانسارهای مس پورفیری توسط Mathure et al. (2009) به نمایش گذاشته شده است؛ به این صورت که شستشوی شدیدتر مس در پهنه فروشست به تهی‌شدگی ایزوتوپی بیشتری در این پهنه و غنی‌شدگی ایزوتوپی بزرگ‌تری در پهنه برون‌زاد خواهد انجامید. به بیان دیگر، تهی‌شدگی ایزوتوپی شدید مس در اکسیدهای آهن معرف شستشوی گسترده و طولانی در پهنه فروشست است که عموماً با غنی‌شدگی ایزوتوپی چشمگیری در پهنه برون‌زاد همراه است. در مناطق دره‌زار و پرکام نیز نسبت‌های ایزوتوپی منفی‌تر در کانی‌های اکسیدی پهنه فروشست نشان‌دهنده شستشوی بیشتر عنصر مس است.

۶- نتیجه‌گیری

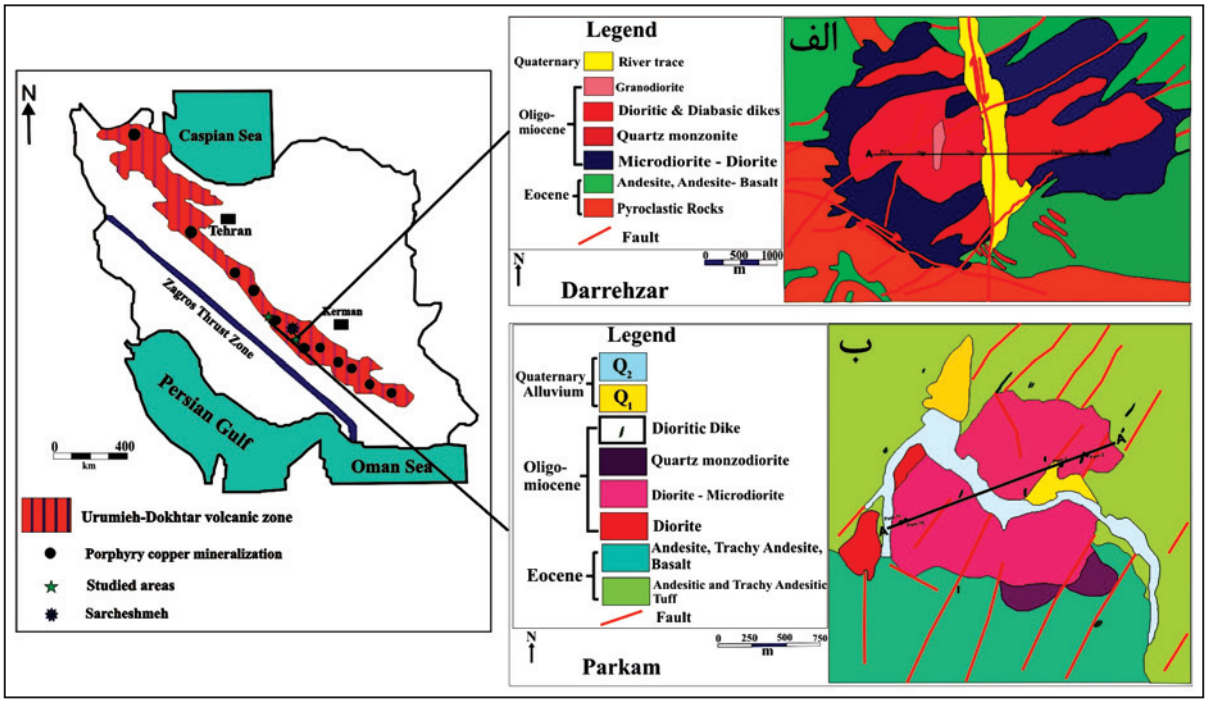
سنگ‌های آتشفشانی مناطق مورد مطالعه بیشتر آندزیت، تراکی‌آندزیت و بازالت هستند. آندزیت با بافت هولوکریستالین و پورفیری از کانی‌های پلاژیوکلاز، پیروکسن، هورنبلند، مگنتیت و مقدار کمی ارتوکلاز و بیوتیت تشکیل شده است.

کانی‌سازی در دره‌زار با استوک کوارتزمونزونیتی مرتبط است که بافت پورفیری و خمیره میکروگرانولار دارد. درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز، هورنبلند، کوارتز و بیوتیت کانی‌های اصلی سازنده این توده هستند. دیوریت تا میکرودیوریت پورفیری توده اصلی کانسارسازی در کانسار پرکام است که کانی‌های سازنده آن پلاژیوکلاز، فلدسپار قلیایی، آمفیبول، بیوتیت و کوارتز است. پهنه‌های فروشست، برون‌زاد و درون‌زاد در دره‌زار به‌خوبی قابل تشخیص هستند. پهنه اکسیدی نیز در کانسار دره‌زار وجود دارد، اما ستبرای آن بیشینه در حد چند متر است و در بسیاری از گمانه‌ها این پهنه دیده نشده است. پهنه فروشست به‌خوبی گسترش یافته و ستبرای آن از ۲ تا ۸۰ متر متغیر است. پهنه برون‌زاد با ستبرای میانگین ۴۰ متر و هندسه عدسی‌شکل، در زیر کلاهک فروشست کانسار قرار گرفته است. این پهنه در کناره‌های کانسار تشکیل نشده است و در مرکز کانسار بیشترین ستبرا (۱۲۰ متر) را دارد. پهنه‌های فروشست، اکسیدی، برون‌زاد و درون‌زاد در کانسار پرکام گسترش یافته‌اند. میانگین ستبرای پهنه فروشست در این کانسار ۲۰ متر است. پهنه اکسیدی معمولاً با اکسید آهن، مالاکیت، آزوریت، کریزوکولا و اکسید منگنز مشخص می‌شود که ستبرای بسیاری دارد و در برخی از گمانه‌ها به ۲۰ متر می‌رسد. ستبرای میانگین پهنه برون‌زاد ۱۵ متر و بیشینه ژرفای آن ۶۴ متر است.

بررسی تغییرات ایزوتوپ‌های مس کانسارهای دره‌زار و پرکام نشان می‌دهد که مقدار $\delta^{65}Cu$ پهنه درون‌زاد در محدوده صفر در هزار (‰0) تغییر می‌کند؛ در حالی که این مقدار در پهنه فروشست کانسار دره‌زار (‰6.16-) کمتر از پرکام (‰4.33-) است. مقادیر $\delta^{65}Cu$ پهنه برون‌زاد در دره‌زار ‰2.52+ و در پرکام ‰4.82+ است. نسبت‌های ایزوتوپی منفی‌تر مس در کانی‌های اکسیدی پهنه فروشست احتمالاً نشان‌دهنده شستشو و حمل بیشتر این عنصر و میزان تغییرات ایزوتوپی مثبت‌تر مس در کانی‌های پهنه برون‌زاد یک کانسار مس پورفیری می‌تواند نشانگر فروشویی بیشتر مس و تجمع آن در پهنه برون‌زاد باشد. فعال بودن عملکرد فروشویی مس باعث تشکیل پهنه غنی‌شده ثانویه (برون‌زاد) با ستبرای زیاد و پهنه فروشست با کانی هماتیت چیره می‌شود. در پهنه فروشست کانسار دره‌زار کانی هماتیت تمرکز بیشتری نسبت به گوتیت دارد؛ در حالی که پهنه فروشست کانسار پرکام، گوتیت و ژاروسیت فراوان‌تری نسبت به هماتیت دارد و این امر نشان‌دهنده فروشویی بیشتر مس از پهنه فروشست کانسار دره‌زار است. پهنه اکسیدی کانسار پرکام با ستبرای به‌نسبت زیاد و دربرداشتن کانی‌های مالاکیت، آزوریت، پیریت اکسیده و کریزوکولا نشان‌دهنده فروشویی اندک مس و تکامل نیافتن پهنه برون‌زاد است، در حالی که پهنه اکسیدی کانسار دره‌زار ستبرای کمی دارد و در بعضی مناطق اصلاً وجود ندارد.

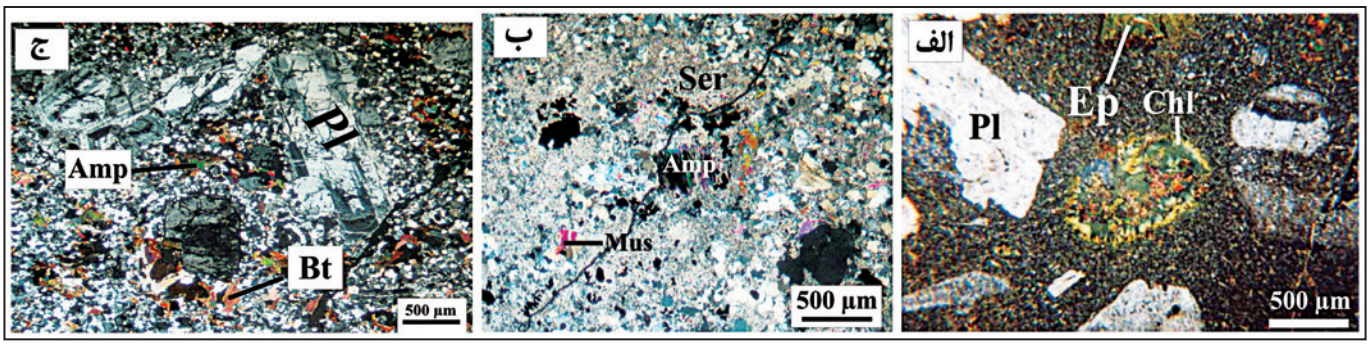
۷- سپاسگزاری

از آقای مهندس تقی‌زاده، مدیر امور اکتشافات معدن مس سرچشمه، به خاطر در اختیار گذاردن امکانات و اطلاعات مفید، تشکر و قدردانی می‌شود.

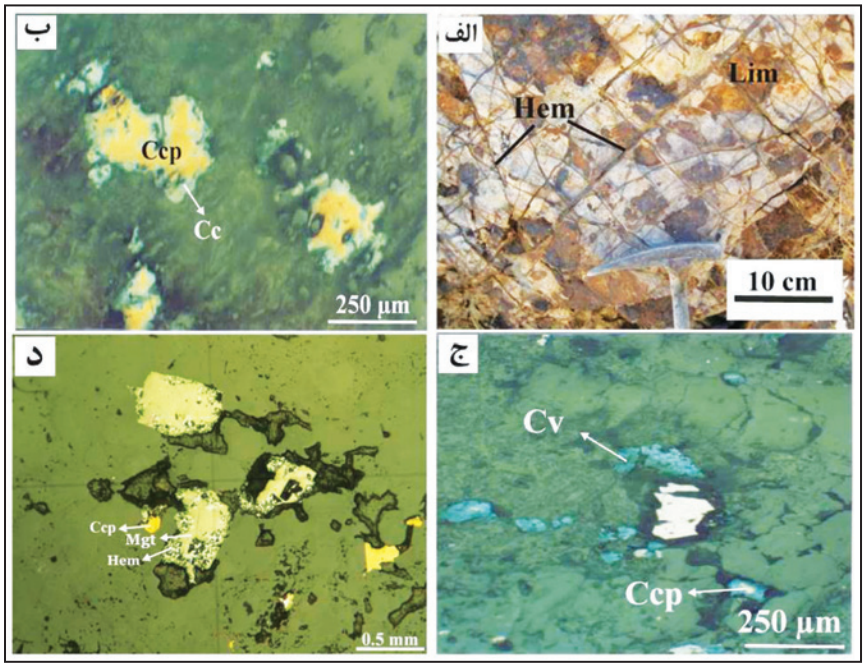


شکل ۱- الف) نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده کانسار دره‌زار (Derakhshani & Abdolzadeh, 2009) و ب) پرکام (شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۸)؛ خط A-A' موقعیت برش‌های زمین‌شناسی در شکل‌های ۵ و ۶ را نشان می‌دهد.

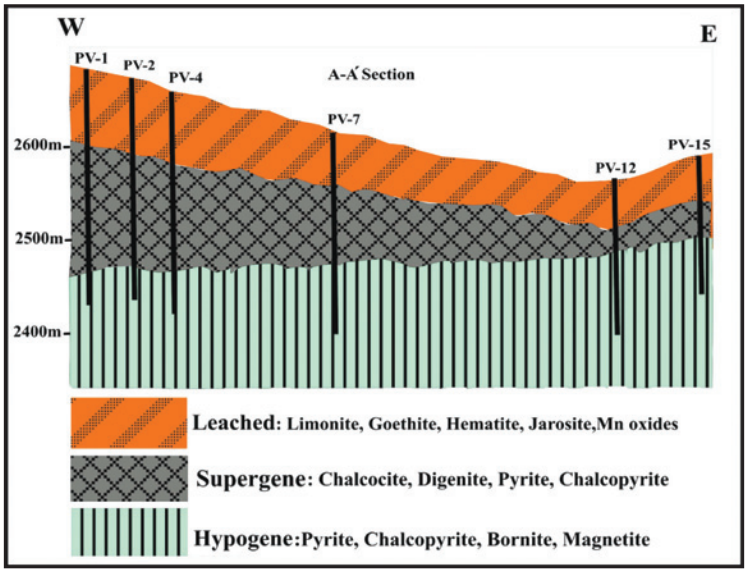
شکل ۲- نمایی از توده دیوریت- میکرودیوریت پورفیری پرکام.



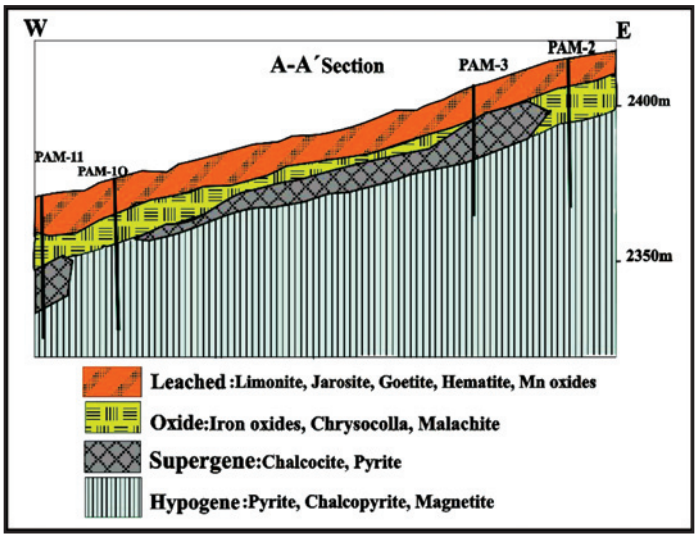
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی معرف بافت و کانی‌شناسی در: الف) آندزیت موجود در دره‌زار با بافت پورفیری، زمینه دانه‌ریز و درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز (Pl) و پیروکسن‌هایی که به اپیدوت (Ep) و کلریت تبدیل شده‌اند؛ ب) حضور کانی‌های آمفیبول (Amp)، مسکوویت (Mus) به‌همراه کانی ثانویه سریسیت (Ser) در توده کوارتزمونزونیت کانسار دره‌زار با بافت پورفیری؛ ج) توده دیوریت تا میکرودیوریتی پرکام با بافت پورفیری که دارای کانی‌های پلاژیوکلاز، بیوتیت (Bt)، آمفیبول (Amp) و کوارتز ریزدانه در زمینه است.



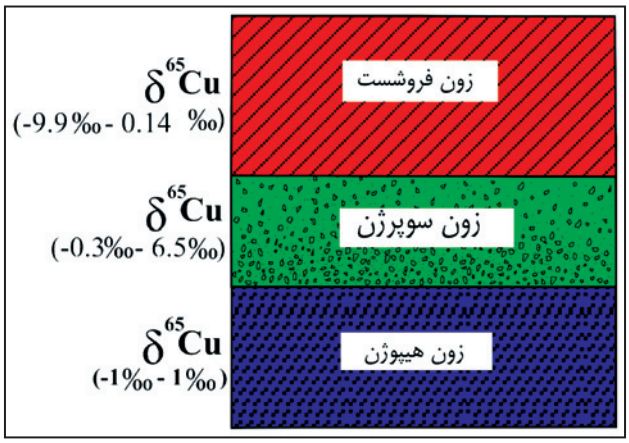
شکل ۴- الف) هیدروکسیدهای آهن (لیمونیت (Lim)) موجود در سطح سنگ‌های پهنه فروشست کانسار دره‌زار به‌همراه درزه‌های متقاطع پرشده از هماتیت (Hem)، هیدروکسیدهای منگنز و سیلیس؛ ب) جانشینی کالکوپیریت (Ccp) توسط کالکوسیت (Cc) در پهنه برون‌زاد کانسار دره‌زار (گمانه PV-12، ژرفای ۲۹/۵ متر)؛ ج) جانشینی کالکوپیریت توسط کوولیت (Cv) در پهنه برون‌زاد کانسار دره‌زار (گمانه PV-15، ژرفای ۳۲ متر)؛ د) مگنتیت (Mgt) همراه با کالکوپیریت در پهنه درون‌زاد کانسار پرکام. پدیده مارتیتی شدن و تبدیل مگنتیت به هماتیت در این نمونه دیده می‌شود (گمانه PAM-4، ژرفای ۲۰۸/۸ متر).



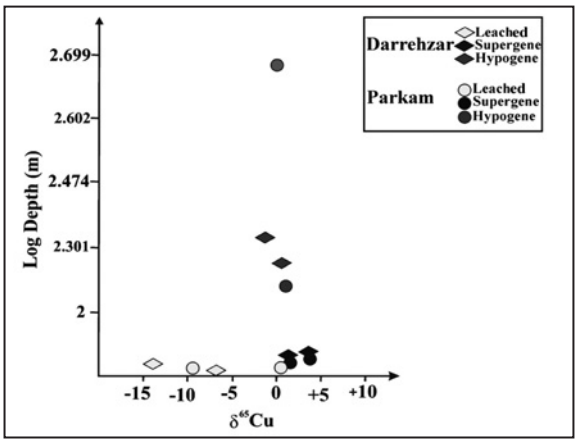
شکل ۵- یک برش زمین‌شناسی در کانسار دره‌زار که پراکندگی پهنه‌های فروشست، برون‌زاد و درون‌زاد را در آن نشان می‌دهد. موقعیت این برش در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۶- یک برش زمین‌شناسی در کانسار پرکام که پراکندگی پهنه‌های فروشست، اکسیدی، برون‌زاد و درون‌زاد را در آن نشان می‌دهد. موقعیت این برش در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۷- میانگین ترکیب ایزوتوپی مس در پهنه‌های فروشست، برون‌زاد و درون‌زاد چند کانسار مس پورفیری در کشورهای شیلی و آمریکا (Mathur et al., 2009).



شکل ۸- الگوی تغییرات مقادیر $\delta^{65}Cu$ بر پایه ژرفا در گمانه‌های دره‌زار و پرکام.

جدول ۱- ویژگی‌های نمونه‌های انتخاب‌شده برای اندازه‌گیری $\delta^{65}Cu$؛ PV: دره‌زار؛ PAM: پرکام.

شماره نمونه (گمانه)	ژرفا (m)	پهنه	کانی‌ها
PV-12	۳	فروشست	هماتیت، گوتیت، پلاژیوکلاز، کوارتز
PV-24	۱۹/۵	فروشست	هماتیت، گوتیت، کانی‌های رسی
PV-18	۳۳	برون‌زاد	پیریت، کالکوسیت، کالکوپیریت، پلاژیوکلاز
PV-24	۳۰	برون‌زاد	کالکوسیت، پیریت، کانی‌های رسی
PV-12	۱۹۲	درون‌زاد	پیریت، کالکوپیریت، پلاژیوکلاز، کوارتز
PV-24	۲۰۶/۳	درون‌زاد	پیریت، بورنیت، کلریت، کوارتز، پلاژیوکلاز
PAM-6	۸/۵	فروشست	گوتیت، هماتیت، لیمونیت، کانی‌های رسی
PAM-8	۹/۵	فروشست	هماتیت، پیریت، پلاژیوکلاز، رگه کوارتزی
PAM-6	۳۰/۵	برون‌زاد	کالکوسیت، پیریت، کلریت، کانی‌های رسی
PAM-8	۲۸	برون‌زاد	پیریت، کالکوسیت، پلاژیوکلاز، کوارتز
PAM-8	۱۵۳	درون‌زاد	پیریت، کالکوپیریت، پلاژیوکلاز، کوارتز
PAM-6	۴۸۲	درون‌زاد	پیریت، کالکوپیریت، پلاژیوکلاز

جدول ۲- داده‌های ایزوتوپی و کانی‌های موجود در پهنه‌های فروشست، برون‌زاد، و درون‌زاد دو کانسار دره‌زار (PV) و پرکام (PAM).

شماره گمانه	ژرفا (m)	پهنه	کانی‌ها	$\delta^{65}Cu$	میانگین $\delta^{65}Cu$
PV-12	۳	فروشست	هماتیت + گوتیت	-۶/۶۸ ‰	-۶/۱۶ ‰
PV-24	۱۹/۵	فروشست	هماتیت + گوتیت	-۱۴/۶۴ ‰	
PV-18	۳۳	برون‌زاد	کالکوسیت + پیریت	+۴/۰۵ ‰	+۲/۵۲ ‰
PV-24	۳۰	برون‌زاد	کالکوسیت + دیژنیت	+۱/۷۴ ‰	
PV-12	۱۹۲	درون‌زاد	کالکوپیریت + پیریت	+۱/۱۲ ‰	+۰/۴۶ ‰
PV-24	۲۰۶/۳۰	درون‌زاد	پیریت + کالکوپیریت	+۰/۴۶ ‰	
PAM-06	۸/۵	فروشست	هماتیت + گوتیت	-۹/۲۲ ‰	-۴/۳۳ ‰
PAM-08	۹/۵	فروشست	گوتیت + هماتیت	+۰/۵۵ ‰	
PAM-06	۳۰/۵	برون‌زاد	کالکوسیت + پیریت	+ ۴/۸۲ ‰	+۴/۸۲ ‰
PAM-08	۲۸	برون‌زاد	کالکوسیت + پیریت	+۱/۵۸ ‰	
PAM-08	۱۵۳	درون‌زاد	کالکوپیریت + پیریت	+۰/۶۴ ‰	+۰/۶۴ ‰
PAM-06	۴۸۲	درون‌زاد	کالکوپیریت + پیریت	+۰/۰۵ ‰	

کتابنگاری

تقی‌زاده زانوقی، ح.، ۱۳۷۵- بررسی ارتباط کانه‌زایی و تکتونیک در شمال شرق پاریز (شمال شرق سیرجان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی،۲۶۱ ص.

شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۷- گزارش شرح نقشه زمین‌شناسی کانسار مس پورفیری دره‌زار، شرکت مهندسی پارس اولنگ، امور اکتشافات، ۱۱۰ ص.

شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۸- گزارش مطالعات زمین‌شناسی و عملیات اکتشافی محدوده پرکام، شرکت مهندسی پارس اولنگ، امور اکتشافات، ۱۲۳ ص.

کاظمی مهرنیا، الف.، ۱۳۸۸- شناخت خصوصیات پوشش شسته‌شده و تکامل غنی‌شدگی سوپرژن کانسارهای مس- مولیبدن پورفیری شمال باختری کمربند کرمان، رساله دکترا، دانشگاه شهید بهشتی، ۳۱۰ ص.

معانی‌جو، م.، ۱۳۷۱- هاله‌های دگرسانی و رابطه آن با مینرالیزاسیون کانسار مس پورفیری دره‌زار و منطقه‌بندی ژئوشیمیایی آن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی،۲۵۳ ص.

References

Alirezaei, S. & Mohammadzadeh, Z., 2009- Hydrothermal alteration-mineralization at Chahfiroozeh porphyry copper deposit, Kerman province, southern Iran. AGU 2009 Joint Assembly, Toronto, GA71A-15.

Alpers, C. & Brimhall, G., 1989- Paleohydrologic evolution and geochemical dynamics of cumulative supergene metal enrichment at La Escondida, Atacama Desert, Northern Chile, Economic Geology, 84: 229-257.

Berberian, M. & King, G. C., 1981- Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Can J Earth Sci 18:210–265.

Derakhshani, R. & Abdolzadeh, M., 2009- Geochemistry, mineralization and alteration zones of Darrehzar porphyry copper deposit, Kerman, Iran. J. *Applied Sci*., 9: 1628-1646.

Kimball, B. E., Mathur, R., Dohnalkova, A. C., Wall, A. J., Runkel, R. L. & Brantley, S. L., 2009- Copper isotope fractionation in acid mine drainage. Geochemica et Cosmochimica Acta, 73: 1247-1263.

Markle, G., Lahaya, Y. & Schwinn, G., 2006- Copper isotopes as monitors of redox processes in hydrothermal mineralization. Geochemica et cosmochiimica Acta, 70: 4215-4228.

Mathur, R., Titley, S. & Barra, F., 2009- Exploration potential of Cu isotope fractionation in porphyry Cu deposits, Journal of Geochemical Exploration, 102: 1-6.

Pokrovsky, O. S., Viers, J., Emnova, E. E., Kompantseva, E. I. & Freydier, R., 2008- Copper isotope fractionation during its interaction with soil and aquatic microorganisms and metal oxy(hydr)oxides; possible structural control, Geochimica et Cosmochimica Acta, 72: 1742-1757.

Shafiei, B., Haschke, M. & Shahabpour, J., 2009- Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita*, 44, 256-283.

Shahabpour, J. & Dourandish, M., 2008- Mine drainage water from the Sarcheshmeh porphyry copper mine, Kerman, IR Iran. Environ. Monit. Assess 141: 105-120.

Zhu, X. K., Guo, Y. & Williams, R. J. P., 2002- Mass fractionation processes of transition metal isotopes. Earth and Plantary Science letters, 200: 47-62.