

کانه‌زایی و ویژگی‌های ژئوشیمیایی سیال‌های کانسنگ‌ساز در منطقه بحر آسمان، جنوب خاور کمر بند ماگمایی کرمان

محمد رضا حسینی^۱، سعید علیرضایی^۲ و جمشید حسن‌زاده^۳

دکتر، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 دانشیار، بخش علوم زمین‌شناسی و سیارات، مؤسسه فناوری کالیفرنیا، کالیفرنیا، آمریکا
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۰۲

چکیده

کمپلکس آتشفشانی-نفوذی بحر آسمان در جنوب خاور کمر بند ماگمایی کرمان قرار دارد. بر خلاف کمر بند ماگمایی کرمان که طی سنوزویک در جایگاه زمین‌ساختی چیره کمان قاره‌ای و پس-برخوردی تشکیل شده؛ کمپلکس بحر آسمان طی کرتاسه پایانی در یک جایگاه کمان اقیانوسی پدید آمده است. این کمپلکس به‌طور چیره از واحدهای آتشفشانی آندزیتی و آندزیت بازالتی و مقادیر کمتری مواد آذرآواری و میان‌لایه‌های رسوبی کربناتی و همچنین توده‌های نفوذی تونالیتی تا کوارتز دیوریتی، کوارتز مونوزودیوریتی و دیوریتی پورفیری تشکیل شده است. کانسارهای رگه‌ای مس، اسکارن آهن و اسکارن مس، نوع‌های اصلی شناخته شده کانه‌زایی در بحر آسمان هستند. کانه اصلی مس در کانسارهای رگه‌ای و اسکارنی کالکوپریت است که در سطح به کانی‌های اکسیدی تبدیل شده است. مگنتیت کانه اصلی آهن است و کانه‌زایی اقتصادی آن در نوع اسکارنی دیده می‌شود. رخنمون‌هایی از توده‌های پورفیری به شدت دگرسان همراه با کانه‌زایی مس در بحر آسمان وجود دارد که از برخی لحاظ قابل مقایسه با کانسارهای مس نوع پورفیری است. داده‌های میانبار سیال، نشانگر ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی متفاوتی برای سیال‌های کانه‌ساز در نوع‌های مختلف کانساری است. در کانسارهای رگه‌ای سیال‌های مرتبط با کانه‌زایی دارای دمای چیره ۱۵۰ تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۵ تا ۱۰ و ۲۵ تا ۳۰ درصد وزنی معادل نمک طعام هستند. برای کانه‌زایی مس نوع اسکارنی، دمای سیال در بازه ۱۷۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و شوری آن در دو بازه ۵ تا ۱۵ و ۲۷ تا ۳۵ درصد وزنی معادل نمک طعام به دست آمده است. ترکیب ایزوتوپی گوگرد در کانسارهای رگه‌ای، از ۳/۹+ تا ۵+ در هزار متغیر است که می‌تواند نشانگر منشأ ماگمایی برای گوگرد (برخاسته از ماگما یا شستشو از سنگ‌های ماگمایی) و احتمالاً فلزات باشد. نسبت ایزوتوپی گوگرد در دو نمونه از کانسار موکا ۴/۳+ و ۷/۱+ در هزار است؛ که نسبت به مقادیر ایزوتوپی شاخص ماگمایی کمی انحراف دارد. نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن در کانسارهای رگه‌ای، که با تجزیه کوارتز و سیال استخراج شده از آن به دست آمده؛ به ترتیب از ۶/۶- تا ۱/۹+ و ۷۹/۴- تا ۵۱/۸+ در هزار متغیر است و می‌تواند نشانگر آمیختگی نسبت‌های مختلف سیال ماگمایی و جوی و/یا ناشی از برهم‌کنش سیال/سنگ در نسبت‌های مختلف باشد. به نظر می‌رسد که ذخایر بزرگ‌تر سهم بیشتری از سیال ماگمایی دارند. با توجه به موقعیت کمان اقیانوسی برای بحر آسمان، نوع‌های کانه‌زایی و همچنین پاراژنر کانیایی دیده شده، احتمال اکتشاف کانسارهای جدید مس و آهن و احتمالاً طلا در این منطقه وجود دارد.

کلیدواژه‌ها: کمر بند ماگمایی کرمان، بحر آسمان، کمان اقیانوسی، مس رگه‌ای، آهن-مس اسکارنی، کانسار مس پورفیری، میانبار سیال، ایزوتوپ پایدار.

Email: mr.hosseini65@gmail.com

*نویسنده مسئول: محمد رضا حسینی

۱- پیش‌نوشتار

کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر میزبان اصلی انواع کانسارها شامل مس[±] مولیبدن[±] طلای نوع پورفیری، فلزات پایه و آهن نوع اسکارن و سامانه‌های اپی‌ترمال فلزات گرانبها و پایه است (Alirezaei et al., 2015; Nedimovic, 1973؛ مدرک، ۱۳۸۸؛ حسینی، ۱۳۹۱؛ میزان، ۱۳۹۲). شمار زیادی از این کانسارها در بخش جنوبی کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر قرار گرفته‌اند (شکل ۱). کمپلکس آتشفشانی-نفوذی بحر آسمان در جنوب خاور کمر بند ماگمایی کرمان جای گرفته است (شکل ۱). اطلاعات زمین‌شناسی موجود برای این کمپلکس، نتیجه مطالعات زمین‌شناسان یوگسلاوی سابق است که به صورت نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در دسترس است (Dimitrijevic, 1973; Nedimovic, 1973). در این نقشه‌ها و گزارش‌های مربوط به آنها سن ائوسن میانی برای کمپلکس بحر آسمان معرفی شده است. مطالعات زمان‌سنجی و سنگ‌شناسی اخیر، سن کرتاسه و موقعیت کمان ماگمایی اقیانوسی را برای بحر آسمان نشان داده است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۴). تاکنون پژوهش‌چندانی در مورد سامانه‌های کانه‌زایی در محدوده بحر آسمان انجام نشده است؛ اطلاعات موجود، بیشتر مربوط به مطالعات زمین‌شناسان یوگسلاوی سابق (Nedimovic, 1973) است که به برخی ذخایر و نشانه‌های معدنی و انواع احتمالی کانه‌زایی اشاره کرده‌اند. ذخایر زمین‌حسین، رمون و جنگا به تازگی توسط بخش خصوصی/دولتی مورد مطالعه نیمه‌تفصیلی یا بهره‌برداری محدود قرار گرفته‌اند. در این نوشتار، با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی و همچنین مطالعه میانبارهای سیال و

ایزوتوپ‌های پایدار، به معرفی انواع کانه‌زایی در محدوده بحر آسمان و مقایسه آن با بخش‌های دیگر در کمر بند ماگمایی کرمان پرداخته می‌شود.

۲- روش مطالعه

به منظور مطالعه زمین‌شناسی و کانه‌زایی در ناحیه بحر آسمان، محدوده‌ای با گسترش حدود ۱۰۰۰ کیلومتر مربع در بخش مرکزی کمپلکس بحر آسمان انتخاب شد (شکل‌های ۱-ب و پ). این محدوده بخشی از سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی مربوط به فعالیت‌های ماگمایی سنوزویک را نیز در کمر بند کرمان دربر می‌گیرد. نمونه‌برداری با هدف مطالعات کانی‌شناسی، میانبارهای سیال، ایزوتوپ‌های پایدار و تجزیه شیمیایی از کانسارهای مختلف انجام شد. برخی از این کانسارها پیش‌تر معرفی شده بودند؛ چند کانسار و نشانه معدنی جدید طی این پژوهش شناسایی و نمونه‌برداری شد. به منظور مطالعه کانه‌زایی، از نمونه‌های معرف کانسنگ در کانسارهایی که در ادامه معرفی می‌شود؛ مقطع نازک-صیقلی تهیه و مطالعه شد. برای آگاهی از توزیع فلزات، سه نمونه معرف از رخنمون‌های طبیعی به روش تکه‌ای از هر کانسار انتخاب و فلزات مس، سرب، روی و نقره، به روش انحلال چهار اسید و اندازه‌گیری با دستگاه ICP-AES در آزمایشگاه ALS شهر گوانگجو، چین، تجزیه شد. همچنین دو نمونه برای طلا به روش عیارسنجی شعله‌ای (fire assay) در این آزمایشگاه تجزیه شد. به منظور مطالعه میانبارهای سیال، ۶ نمونه معرف از کوارتز

و در بخش‌های مرکزی و جنوبی منطقه مورد مطالعه به خوبی رخنمون دارد (شکل ۲). مجموعه فسیلی موجود در این توالی بیانگر سن ائوسن میانی است. همزمان با توالی‌های پیشرونده، مرحله جدیدی از فعالیت ماگمایی سبب تشکیل گدازه‌های آندزیتی و آندزیت بازالتی و مواد آذرآواری در شمال خاور منطقه مورد مطالعه شده است که به عنوان کمپلکس رازک (Dimitrijevic, 1973) شناخته می‌شود (شکل ۱-ب). چهارمین نوع از توده‌های نفوذی با ترکیب گرانیتی تا گرانودیوریتی (واحد Bgd) طی الیگوسن کمپلکس رازک را قطع می‌کند. این توده دارای ویژگی‌های مشابه با گرانیتوئیدهای نوع جبال‌بارز است که توسط (Dimitrijevic (1973 در کمر بند کرمان معرفی شده است.

۴- دگرسانی و کانه‌زایی

کانه‌زایی‌های اصلی شامل مس و آهن است. آثار معدنکاری کهن همچون سرباره ذوب و تونل و چاهک‌های استخراج، به فراوانی دیده می‌شود. چهار نوع اصلی کانه‌زایی شامل مس رگه‌ای، مس اسکارنی، آهن اسکارنی و مس پورفیری قابل تشخیص است (شکل ۲)، که نوع نخست فراوان‌ترین نوع کانی‌سازی است. همچنین تعداد زیادی اندیس و آغشتگی سطحی از مس در سنگ‌های آتشفشانی دیده می‌شود که بر اهمیت مطالعات زمین‌شناسی اقتصادی در این منطقه می‌افزاید. دگرسانی عمومی در منطقه پروپلیتیک است که حاصل دگرسانی واحدهای سنگی منطقه است. دگرسانی‌هایی که در ادامه برای هر کانسار ذکر می‌شود، دگرسانی تشکیل شده در همراهی با کانه‌زایی است. ویژگی‌های کانسارها و اندیس‌های مربوط به هر نوع در جدول ۱ آورده شده است.

کانه‌زایی مس نوع رگه‌ای: کانه‌زایی مس نوع رگه‌ای، کانه‌زایی چیره از نظر تعداد رخداد در منطقه مورد مطالعه است. کانسارهای رمون (شکل ۳-الف) و زمین حسین کانسارهای شاخص این نوع کانه‌زایی هستند (شکل ۲). کالکوپریت کانه فلزی اصلی مس در این رخدادهاست و پیریت و مگنتیت کانی‌های فلزی همراه با آن هستند (شکل ۳-ب). به جز زمین حسین، عیار سرب، روی و طلا برای ذخایر و اندیس‌های رگه‌ای مس، بسیار پایین است (جدول ۱). در این نوع، کانه‌زایی با دگرسانی سیلیسی و به مقدار کمتر دگرسانی‌های کلریتی-اپیدوتی همراه است. در مقاطع نازک از کانسنگ نشانه معدنی A3، افزون بر کوارتز، اندریت نیز به صورت اولیه و در همراهی با کانه‌زایی دیده می‌شود. دگرسانی رسی بیشتر با کانی‌های اکسیدی ثانوی آهن همراه است و به احتمال زیاد منشأ برونزاد دارد. رگه‌های کانه‌دار دارای ابعاد بسیار متفاوت، از چند متر تا چند صد متر طول و چند سانتی‌متر تا چند متر عرض هستند. میزبان اصلی رگه‌های کانه‌دار، گدازه‌های آندزیتی است. کانسنگ در بخش‌های سطحی اکسید شده و در برخی موارد مانند کانسار رمون، مقدار قابل توجهی مالاکیت و آزوریت پدید آمده است. دو روند اصلی N065-075 و N040-045 و یک روند فرعی N010 برای کانه‌زایی رگه‌ای در منطقه شناسایی شده است.

کانه‌زایی مس نوع پورفیری: با وجود فراوانی نسبی کانه‌زایی نوع پورفیری در کمر بند مس کرمان، این نوع کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه محدود است. کانسار مس رضی-آباد در خاور محدوده مورد مطالعه شواهد کانه‌زایی مس نوع پورفیری نشان می‌دهد و در قلمرو سنگ‌های ماگمایی کرمان به سن سنوزویک قرار دارد (علیرضایی و همکاران، ۱۳۸۹). کانی‌سازی در رضی‌آباد (شکل ۳-پ) در ارتباط با یک توده کوارتزادیوریتی تا گرانودیوریتی با بافت پورفیری است که در سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی کهن تر نفوذ کرده است. کانی اصلی مس کالکوپریت است که به صورت افشان در متن سنگ سیلیسی و سیلیسی-بیوتیتی و همچنین در استوک‌ورک‌های کوارتز ± پیریت ± مگنتیت پراکنده است. کانی بورنیت کمیاب است و غنی‌سازی برونزاد اهمیت چندانی ندارد. تفاوت‌های این کانسار با دیگر کانسارهای مس نوع پورفیری در کمر بند مس کرمان عبارتند از گسترش چشمگیر دگرسانی سیلیسی (شکل ۳-پ)، گسترش محدود دگرسانی فلیک، نبود دگرسانی آرتلیک در تراز رخنمون کنونی، فراوانی چشمگیر مگنتیت و فراوانی دایک‌ها و

همزاد با کانه در انواع کانساری مختلف انتخاب شد. سپس مقطع دوبرصیفیل از این نمونه‌ها تهیه و پس از مطالعات سنگ‌نگاری، مطالعات ریزدماسنجی به وسیله دستگاه Linkam-TMS600 که روی میکروسکوپ Zeiss نصب شده است؛ در شرکت مطالعات و پژوهش آذین زمین پویا انجام شد. آزمایش سرمایش به کمک نیتروژن مایع انجام شد و نمونه‌ها تا حدود ۱۰۰- سانتی‌گراد سرد شدند. پس از گرم کردن تدریجی نمونه، دمای ذوب پایانی سیال با هدف محاسبه مقدار شوری ثبت و از نرم‌افزار HOKIEFLINCS_H2O-NACL (Steele-MacInnins et al., 2012) برای محاسبه مقدار شوری استفاده شد.

نمونه‌برداری برای تجزیه‌های ایزوتوپی از کانسارهای مختلف در محدوده، با توجه به انواع مختلف کانه‌زایی، از رگه‌های کوارتز و کانه‌زایی همراه با آن انجام شد. برای تعیین نسبت ایزوتوپی گوگرد و ردیابی منبع آن، ۸ نمونه کالکوپریت و پیریت مورد استفاده قرار گرفت. تجزیه نمونه‌ها در آزمایشگاه ایزوتوپی بخش علوم زمین دانشگاه آریزونا انجام شد. نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد برای گاز SO₂ در یک طیف‌سنج جرمی مدل ThermoQuest Finnigan Delta PlusXL با جریان گاز پیوسته اندازه‌گیری شد. دقت تجزیه‌ها (1σ) ±0.10 است. به منظور مشخص کردن منشأ سیال‌های مؤثر در کانه‌زایی، ۸ نمونه برای اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن، از رگه‌های کوارتز و همچنین دگرسانی سیلیسی همراه کانه‌زایی در کانسارهای گوناگون انتخاب شد. نمونه‌ها برای تجزیه به آزمایشگاه ایزوتوپی در بخش علوم زمین دانشگاه اورگان آمریکا فرستاده و نسبت ایزوتوپی اکسیژن کوارتز، با استفاده از روش laser fluorination تعیین شد؛ روش کامل تجزیه توسط (Bindeman (2008 توضیح داده شده است. دقت و درستی آزمایش‌ها با تجزیه نمونه استاندارد گارنت UOG کنترل شده و در حد ±0.09 در هزار است. برای تجزیه نسبت‌های ایزوتوپی هیدروژن، اندازه‌گیری روی سیال استخراج شده از کوارتز انجام گرفت؛ میانگین دقت تجزیه 2.5 ± δD در هزار است. روش تجزیه برای نسبت‌های ایزوتوپی هیدروژن در (Bindeman et al. (2012 توضیح داده شده است.

۳- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

کهن‌ترین واحدهای رخنمون‌دار در منطقه، یک مجموعه دگرگونی شامل اسلیت، فلیت و کوارتزیت، با سن احتمالی تریاس است (واحد PzI؛ شکل ۲). این مجموعه سنگی با توالی ستبری از آندزیت و آندزیت بازالتی با مقادیر کمتر توف و آگلومرا که به صورت محلی دارای میان‌لاپه‌های آهکی است؛ به شکل دگرشیب پوشیده می‌شود (واحدهای Ku2vp و Ktar؛ شکل ۲). سن این واحدها بر پایه زمان‌سنجی ایزوتوپی اورانیم-سرب زیرکن کرتاسه پایانی تعیین شده است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۴). یک توالی آذرآواری با ترکیب چیره فلسیک تا متوسط، آخرین فاز آتشفشانی کرتاسه در محدوده بحرآسمان است (واحد Ku2py). بر پایه روابط قطع‌کنندگی، کانی‌شناسی و بافت، می‌توان توده‌های نفوذی را به چهار گروه تقسیم کرد. واحد Tqd یک کمپلکس نفوذی با گستره ترکیب از تونالیت تا کوارتزادیوریت و کوارتزومونودیوریت به سن کرتاسه پایانی است که در بخش‌های زیادی از مرکز و شمال منطقه مورد مطالعه گسترش دارد (شکل ۲؛ حسینی و همکاران، ۱۳۹۳). یک توده گرانودیوریتی به صورت مجزا در جنوب خاور منطقه قرار دارد (شکل ۲؛ واحد Gd). داده‌های زمان‌سنجی اخیر توسط (Chiu et al. (2013 و حسینی و همکاران (۱۳۹۴) سن ۷۷ میلیون سال را برای این واحد نشان می‌دهد. سومین نوع از توده‌های نفوذی شامل رخنمون‌هایی از توده‌های پورفیری کم‌رُفا با ترکیب حدواسط تا مافیک در بخش‌های شمالی منطقه است که با کانه‌زایی مس و آهن همراه هستند.

در پالئوسن، منطقه تحت اثر بالآمدگی و فرسایش قرار گرفته و آثار ماگمازایی و رسوب‌گذاری دیده نمی‌شود. در ائوسن آغازی-میانی، توالی‌های پیشرونده دریایی با ستبرای ۱۵ تا ۶۰ متر، سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی کهن تر را به صورت ناپیوستگی آذین‌پی (nonconformity) می‌پوشانند. این توالی شامل کنگلومرای سرخ‌رنگ جور شده تا نیمه جور شده، ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک، سنگ‌آهک ماسه‌ای و مارن است

در همه نمونه‌های BA-33.1 و BA-41، BA-65، BA-93 که از کانسارهای رگه‌ای مس انتخاب شد؛ دو نسل کوارتز بر پایه بافت و کانی‌های فلزی همراه آن شناسایی شد. یک نسل کوارتز ریزدانه و بی‌وجه تا نیمه‌وجه‌دار که تنها با کمی کانه‌زایی همراه است و نسل دیگر کوارتز متوسط تا درشت‌بلور که همزمان با کانه‌زایی اصلی است (شکل ۴- الف). برای اندازه‌گیری سعی شد از میانبرهای شناسایی شده در کوارتزهای نسل دوم استفاده شود. اندازه حدود ۹۰ درصد میانبرهای سیال کمتر از ۵ میکرومتر است؛ بقیه نیز بیشینه ۱۰ میکرومتر هستند. میانبرهای سیال شکل‌های منفی، خودشکل، کروی، بی‌شکل و کشیده دارند. بر پایه تعداد فازهای موجود در دمای اتاق، میانبرهای سیال همراه با کوارتزهای فاز اصلی کانه‌زایی در ۴ گروه متفاوت جای می‌گیرند: (۱) میانبرهای سیال تک‌فازی غنی از مایع (T3)؛ (۲) میانبرهای سیال تک‌فازی غنی از گاز (T2)؛ (۳) میانبرهای سیال دوفازی (مایع-بخار، با چیرگی فاز مایع؛ T1) و (۴) میانبرهای سیال سه‌فازی بخار + مایع + جامد (هالیت، T4) (شکل ۴- ب). در نمونه BA-53 (کانسار اسکارن مس موکا) دو نسل کوارتز تشخیص داده شد؛ نسل اول کوارتزهای درشت‌دانه و خودشکل همراه با کانه‌زایی کم و نسل بعدی، کانی کوارتز همراه با کلیست و مقدار زیادی کانه‌زایی (شکل ۴- پ). اندازه بیش از ۸۵ درصد میانبرهای سیال موجود در این نمونه کوچک‌تر از ۵ میکرون است. میانبرهای سیال دارای شکل‌های منفی، خودشکل، بی‌شکل، کروی و کشیده هستند. چهار نوع اصلی میانبر سیال در این نمونه تشخیص داده شد (جدول ۲؛ شکل ۴- ت). در نمونه ZVK-Q مربوط به کانسار زاورک، که شواهدی مبنی بر کانه‌زایی نوع پورفیری مس نشان می‌دهد؛ دو نسل متفاوت از کوارتز و میانبرهای سیال شناسایی شدند. کوارتزهای نسل اول کوارتزهای ماگمایی بیشتر خودشکل و کوارتزهای نسل دوم دارای منشأ گرمایی و ریزدانه و بیشتر بی‌شکل هستند. اندازه میانبرهای سیال موجود در کوارتزهای گرمایی در بازه ۲ تا ۶ میکرون متغیر است؛ که ۹۵ درصد آنها کوچک‌تر از ۵ میکرون هستند. این میانبرهای سیال به سه نوع اصلی T1، T3، T4 گروه‌بندی شدند. میانبرهای سیال در هر دو نسل کوارتز دارای شکل‌های منفی، خودشکل، نیمه‌شکل‌دار، بی‌شکل، کروی و کشیده هستند. در برخی نمونه‌ها میانبرهای سیال غنی از بخار (T2) و سه‌فازی (T4) همراه یکدیگر دیده شد؛ که شواهدی بر رخداد جوشش و به دام افتادن میانبرها در شرایط فشار لیتوستاتیک پایین یا ژرفاهای به نسبت کم از سطح زمین است. در شکل ۵ پراکنندگی تصویری شوری‌های به دست آمده نشان داده شده است. بیشتر میانبرهای سیال در کانسارهای مس رگه‌ای در محدوده شوری پایین با گستره ۰ تا ۱۰ (wt% NaCl)، شماری در گستره ۱۰ تا ۱۵ (wt% NaCl) و شمار کمی با شوری‌های بالا در گستره ۲۵ تا ۳۵ (wt% NaCl) جانمایی می‌شوند. بیشتر میانبرهای سیال نوع سه‌فازی مربوط به کوارتزهای مرتبط با فاز اصلی کانه‌زایی هستند. فشار به دام افتادن میانبرهای سیال نیز بر پایه دمای همگن‌شدگی و با استفاده از نرم‌افزار HOKIEFLINCS_H₂O-NACL (Steele- MacInnis et al., 2012) به دست آمد (جدول ۲). فشارهای به دست آمده نشان‌دهنده شرایط کم‌فشار هنگام به دام افتادن میانبرهاست و با شواهد جوشش، یعنی رخداد میانبرهای نوع T2 و T4 به‌صورت همراه سازگار است که در برخی نمونه‌ها دیده شد. در نمونه ZVK-Q میانبرهای سیال در دو گستره ۱۵ تا ۲۰ و ۳۰ تا ۳۵ (wt% NaCl) جانمایی می‌شوند. در نمونه BA-53 که مربوط به کانسار اسکارن موکا هست، شوری میانبرهای مطالعه شده در گستره وسیعی از ۵ تا ۱۵ و ۲۵ تا ۳۵ (wt% NaCl) قرار می‌گیرند. سپس آزمایش گرم کردن نمونه‌ها با هدف تعیین دمای همگن‌شدگی، انجام شد (جدول ۲ و شکل ۶). با توجه به فشارهای لیتوستاتیک پایین (جدول ۲) و همچنین وجود شواهد جوشش در برخی نمونه‌ها، دمای به دست آمده برای همگن‌شدگی را می‌توان به عنوان دمای سیال هنگام به دام افتادن در نظر گرفت. دماهای همگن‌شدگی برای تقریباً همه میانبرهای سیال در کانسارهای نوع رگه‌ای مطالعه شده میان ۱۰۰ تا کمتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، با بیشترین فراوانی داده در بازه ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است. (Bodnar et al. (2014) بازه دمایی

توده‌های نفوذی جوان‌تر از کانی‌سازی، که سبب شده‌اند توده کانسنگ پیوسته اولیه به چند بخش جداگانه تفکیک شود. چند رخنمون از توده‌های بسیار دگرسان شده، همراه با سامانه استوک‌ورک و کانه‌زایی مس در منطقه وجود دارد که مطالعه دقیق‌تر آنها نیازمند داده‌های زیرسطحی است (شکل ۳- ت).

کانه‌زایی آهن نوع اسکارن: نمونه‌هایی از کانه‌زایی آهن به‌صورت رخداد و کانسار نوع اسکارن در منطقه وجود دارد (شکل‌های ۳- ث و ج). میزان کانه‌زایی، بیشتر سنگ‌های آذرآواری و کربناتی هستند که همراه با گدازه‌های آندزیتی-بازالتی وجود دارند. مگنتیت کانی اصلی است و کالکوپیریت و پیریت در برخی موارد فراوان هستند. دگرسانی اصلی همراه با این نوع کانه‌زایی، دگرسانی اپیدوتی-کلریتی است که می‌تواند حاصل تخریب کانی‌های کالک‌سیلیکاتی پیشین باشد. در برخی رخدادهای گارنت کانی شاخص همراه با مگنتیت است. کانسار جنگا آشکارترین ذخیره آهن نوع اسکارن در منطقه مورد مطالعه است (شکل‌های ۲ و ۳- ث) و به‌تازگی در دست اکتشاف تفصیلی بوده است.

کانه‌زایی مس نوع اسکارن: تنها مورد شناخته شده از این نوع، کانسار مس موکاست. در پیرامون این کانسار سرباره‌های ذوب فلز وجود دارد که نشان از معدنکاری کهن دارد. عامل اصلی کانه‌زایی یک توده دیوریت پورفیری متوسط تا ریزدانه است (شکل ۳- ج). میزان اصلی کانه‌زایی، توالی آذرآواری دگرگون شده پیرامون توده پورفیری است و کانی‌سازی به‌طور چیره به‌صورت برون‌اسکارن (exoskarn) است. کانه‌های فلزی اصلی شامل کالکوپیریت، مگنتیت و پیریت است و همراه با سیلیسی شدن شدید و همچنین تشکیل اپیدوت، کلیست، ارتوز و مقداری کلریت دیده می‌شود. دانه‌های گارنت قهوه‌ای رنگ با قطر میانگین ۰/۱ تا ۰/۳ میلی‌متر نیز در همراهی با کانه‌زایی دیده می‌شوند؛ ولی تا حدودی اپیدوتی-کلیستی و توسط فاز سیلیسی دربر گرفته شده‌اند (شکل ۳- ح). با توجه به دگرسانی بخشی گارنت‌ها می‌توان بیان کرد که فاز پسرونده که فاز کانه‌زایی نیز هست، شدید و مؤثر عمل نکرده است.

کانه‌زایی مس با نوع نامشخص: شماری رخداد کانه‌زایی مس در منطقه وجود دارد که با توجه به داده‌ها و شواهد موجود، نمی‌توان آنها را به‌سادگی به نوع خاصی از کانه‌زایی مس نسبت داد. برخی از این کانسارها در گذشته به‌صورت محدود استخراج شده‌اند (شکل ۳- خ). کانه‌زایی دیده شده در این رخدادها به‌صورت کانی‌های اکسیدی مس و در سطوح سنگ‌های آذرآواری و گدازه‌های آندزیتی است. دگرسانی‌های اپیدوتی و سیلیسی، مهم‌ترین انواع دگرسانی همراه با این نوع کانه‌زایی است.

در زاورک شبکه‌هایی گسترده از رگچه‌های کوارتز-مگنتیت در سطح و درون یک توده گرانودیوریتی با بافت گرانولار دیده می‌شود. اثر کانه‌زایی مس در زاورک، در رخنمون‌های طبیعی با رخدادهای پراکنده مالاکیت در سنگ‌های سیلیسی و سیلیسی-رسی مشخص می‌شود. در سطح و در مغزه‌های حفاری، زبانه‌هایی از کوارتز دیوریت با بافت پورفیری و کانه‌زایی افشان مس دیده شده است. شبکه رگه‌های کوارتز-مگنتیت در زاورک می‌تواند قابل مقایسه با پهنه دگرسانی پتاسیک در کانسارهای مس پورفیری باشد؛ اما شواهد دیگر برای رخداد دگرسانی پتاسیک و کانی‌سازی مرتبط با آن در سطح رخنمون کنونی ضعیف است. پارائز فلزی در زاورک (همراهی مس و مولیبدن و وجود بی‌هنجاری‌های سرب و روی)، قابل مقایسه با سامانه‌های مس پورفیری است (علیرضایی، ۱۳۹۳).

۵- میانبرهای سیال

پس از مشاهدات صحرائی و بررسی نمونه‌های دستی و میکروسکوپی، ۶ نمونه معرف از کانسارهای گوناگون در محدوده مورد مطالعه، برای مطالعات میانبرهای سیال انتخاب شد (جدول ۲). طی مطالعات سنگ‌نگاری فازهای متفاوتی از کوارتز شناسایی شد؛ با توجه به اینکه هدف شناخت شرایط تشکیل کانسنگ بود؛ مطالعات روی کوارتز رگه‌ای یا کوارتز مرتبط با دگرسانی سیلیسی همراه با کانه‌زایی انجام شد.

نسبت‌های بسیار متغیری از $\delta^{34}\text{S}$ نشان می‌دهند (Shanks, 2014). بنابراین تفسیر داده‌های حاصل از مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار در این کانسارها باید بسته به شرایط محلی برای هر کانسار انجام شود. نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد در کانسارهای رگه‌ای (اپی‌ترمال) مس مورد مطالعه، در گستره‌ای کوچک، یعنی $+3/9$ تا $+5$ در هزار قرار می‌گیرند (به جز نمونه BA-65). با وجود تشکیل کانسارهای رگه‌ای مس در بحرآسمان، به دور از توده‌های نفوذی و درون سنگ میزبان آتشفشانی، نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد در آنها با گستره گزارش شده از $\delta^{34}\text{S}$ با منشأ ماگمایی (Hoefs, 2009) سازگار است. سیال گوگردی ممکن است به‌طور مستقیم از ماگما منشأ گرفته باشد یا گوگرد از شستشوی سنگ‌های آذرین تأمین شده باشد. در مورد اندیس A1، پیریت و کالکوپیریت از یک نمونه (BA-32) و در همراهی با یکدیگر جداسازی شد. سنگین‌تر بودن نسبت ایزوتوپی کالکوپیریت می‌تواند نشان‌دهنده تشکیل آنها در شرایط غیرتعادلی باشد. نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد برای پیریت و کالکوپیریت تشکیل شده طی اسکارن‌زایی (کانسار موکا، BA-53) به ترتیب $+4/3$ و $+7/1$ در هزار است. در انواع مختلفی از کانسارهای اسکارن، مقادیرهای $\delta^{34}\text{S}$ چیره در گستره کوچکی، میان صفر تا $+5$ در هزار قرار می‌گیرند؛ این بازه به روشنی نشان می‌دهد که گوگرد از مواد فرار ماگمایی منشأ گرفته است (Shimazaki and Yamamoto, 1979; Zhao et al., 2003). در برخی موارد، به‌ویژه در اسکارن‌های با فاصله از توده نفوذی (distal skarn)، تأثیر گوگرد از سنگ میزبان/دیواره قابل توجه است (Megaw et al., 1988). در موکا، توده نفوذی پورفیری در دیواره مجاور کانه‌زایی قرار دارد. نسبت‌های به دست آمده برای ایزوتوپ‌های گوگرد در سیال برای این کانسار تا حدودی به گستره گزارش شده برای کانسارهای اسکارن (صفر تا پنج در هزار) نزدیک است. با توجه به دماهای پایین که طی مطالعات میانبارهای سیال برای اسکارن موکا به دست آمد؛ افزون بر سیال ماگمایی، سیال‌های با منشأ دیگر نیز امکان ورود به سامانه را داشته‌اند.

۴-۲. ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن

به‌منظور بررسی ویژگی‌ها و منشأ سیال‌ها با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار، ۸ نمونه کوارتز از برخی کانسارهای منطقه مورد مطالعه انتخاب شد (جدول ۴). نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن سیال مرتبط از رابطه (Méhaut et al., 2007) و همچنین دمای میانبارهای سیال طی مطالعات دماسنجی به دست آمد. گستره تغییرات نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن سیال برای کانسارهای رگه‌ای منطقه مورد مطالعه به ترتیب در بازه $-6/6$ تا $+1/9$ در هزار و $-5/2$ تا $-7/9$ در هزار است (شکل ۸). کانسارهای اپی‌ترمال فلزات گرانبها و پایه، مقدارهای بسیار متغیر از δD و $\delta^{18}\text{O}$ نشان می‌دهند که بیانگر دخالت نسبت‌های متفاوت آب جوی و آب ماگمایی است و به شدت از واکنش میان آب و سنگ میزبان تأثیر می‌پذیرد (Shanks, 2014). این ویژگی در سیال‌های مربوط به کانسارهای مس رگه‌ای مطالعه شده دیده می‌شود. با توجه به روند تغییرات ایزوتوپی برای این کانسارها (شکل ۸) می‌توان گفت که کانسارهای مس رگه‌ای بزرگ‌تر-یعنی رمون و زمین‌حسین- دارای نسبت‌های بیشتری از سیال‌های ماگمایی هستند. دیگر کانسارهای رگه‌ای مطالعه شده، که بیشتر در حد اندیس و کانسار کوچک هستند؛ در پیرامون کانسار رمون جای دارند. به نظر می‌رسد که با افزایش فاصله از این کانسار، میزان دخالت آب جوی بیشتر شده است. بنابراین مطالعه سامان‌مند نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن در کانسارهای رگه‌ای یک منطقه می‌تواند در کنار دیگر مطالعات از جمله منطقه‌بندی توزیع فلز، به عنوان کلید اکتشافی در تعیین مرکز سامانه استفاده شود.

نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن سیال برای اسکارن موکا به ترتیب $+0/93$ و $-7/6$ در هزار است و در میان محدوده سیال‌های جوی و ماگمایی، با نسبت‌های بالاتری از سیال ماگمایی جای می‌گیرد (شکل ۸). در کانسارهای اسکارن، بسته به فاصله کانه‌زایی از توده نفوذی، نسبت سیال‌های درگیر در کانه‌زایی متفاوت است (Shanks, 2014). همچنین طی مراحل مختلف اسکارن‌زایی و با توجه به دمای سامانه (Meinert et al., 2005) سیال‌های با منشأ متفاوت می‌توانند در سامانه گرمایی اسکارن

۱۲۰ تا ۳۱۰ درجه سانتی‌گراد را محدوده دمایی همگن‌شدگی برای ۹۰ درصد از میانبارهای سیال در کانسارهای اپی‌ترمال معرفی می‌کنند. در نمونه ZVK-Q از کانسار زاوروک (با شواهد پورفیری)، میانبارهای سیال مربوط به فاز سیلیسی شدن همراه با کانه‌زایی، در بازه دمایی ۲۰۰ تا ۲۵۰ و ۳۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد جانمایی می‌شوند. در نمونه BA-53 که مربوط به کانسار اسکارن موکاست؛ اندازه‌گیری برای میانبارهای سیال فاز اصلی سیلیسی-شدن همراه با کانه‌زایی گستره دمایی ۱۵۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. داده‌های شوری و دمای همگن‌شدگی برای کانسارهای مختلف در منطقه مورد مطالعه، به منظور تطبیق نوع کانه‌زایی، در نمودار (Wilkinson 2001) جای‌گذاری شد (شکل ۷). میانبارهای نوع T1 و T3 نتایج اندازه‌گیری نزدیکی نشان دادند و هر دو گروه با یک نشانه (T1) در این نمودار نشان داده شده‌اند. همه میانبارهای سیال دوفازی (T1) مربوط به کانسارهای رگه‌ای مس در محدوده اپی‌ترمال قرار می‌گیرند. میانبارهای سیال سه‌فازی (T4) این نوع کانسارها دمایی در محدوده اپی‌ترمال، ولی شوری بالاتر نشان می‌دهند. با توجه به اینکه کانسارهای رگه‌ای مورد مطالعه تنها کانه‌زایی مس دارند و فلز مس در سیال‌های گرمایی به‌طور عام با کمپلکس‌های کلریدی منتقل می‌شود (Haynes, 1986; Ulrich et al., 1999)؛ این مقدار شوری طبیعی است. Bodnar et al. (2014) نشان داده‌اند که بازه شوری برای کانسارهای اپی‌ترمال فلزات گرانبها و پایه بیشتر میان صفر تا ۱۷ wt% NaCl است و همه شوری‌های بزرگ‌تر از حدود ۱۵ تا ۲۰ wt% NaCl مربوط به کانسارهای اپی‌ترمال غنی از فلزات پایه یا اپی‌ترمال سولفید بالای طلا-انارژیت هستند. نتایج مطالعات Crerar and Barnes (1976) شرایط کمپلکس‌سازی کلریدی مس در دماهای میان ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان داده است. ویژگی میانبار سیال مربوط به کانسار موکا، که یک اسکارن مس است؛ تا حد زیادی با محدوده مشخص شده برای اسکارن‌ها توسط (Wilkinson 2001) همخوانی دارد؛ میانبارهای سیال دوفازی آن شوری کمتر نشان می‌دهند. با این وجود Bodnar et al. (2014) بازه دمایی همگن‌شدگی از ۱۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و بازه شوری صفر تا بیش از ۶۰ wt% NaCl را برای اسکارن‌های مس مشخص کرده‌اند. میانبارهای سیال سه‌فازی مربوط به نمونه ZVK.Q که از کانسار زاوروک انتخاب شده است؛ در محدوده کانسارهای نوع پورفیری جانمایی می‌شوند؛ ولی میانبارهای سیال دوفازی آن (T1)، با شوری یکسان، گستره‌ای از دما را نشان می‌دهند که تا حدی خارج از محدوده پورفیری است. همه میانبارهای سیال مطالعه شده برای انواع کانسارها در منطقه، دماهایی در محدوده تیبیک این کانسارها (Wilkinson, 2001; Bodnar et al., 2014) نشان می‌دهند. همچنین تفکیک به نسبت خوبی برای میانبارهای سیال، بسته به نوع کانسار وجود دارد.

۴-۶. ایزوتوپ‌های پایدار

۴-۶-۱. ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد

ویژگی‌های نمونه‌ها و نتایج تجزیه‌های ایزوتوپی گوگرد در جدول ۳ نشان داده شده است. به منظور محاسبه نسبت ایزوتوپی گوگرد سیال مرتبط با تشکیل کالکوپیریت و پیریت، به ترتیب از رابطه‌های (Ohmoto and Rye (1979) و Li and Liu (2006) و همچنین دمای به دست آمده طی مطالعات دماسنجی میانبارهای سیال استفاده شد. گستره تغییر کلی $\delta^{34}\text{S}$ سیال مرتبط با کانه‌زایی سولفیدی در کانسارهای رگه‌ای، به غیر از نمونه BA-65، از $+3/9$ تا $+5$ در هزار متغیر است. در مطالعه سنگ‌نگاری نمونه BA-65 کانی‌اندیریت در رگه کوارتز و همراه با سولفیدها دیده شد. سولفات‌ها به شدت تمایل به جذب انتخابی ایزوتوپ سنگین گوگرد دارند و نتیجه آن غنی شدن سیال باقی‌مانده نسبت به ایزوتوپ سبک‌تر است. دیگر کانی‌های گوگردار که از سیال تشکیل می‌شوند؛ بسته به مقدار سولفات‌ها که تشکیل شده است، نسبت به ایزوتوپ سنگین فقیر هستند. کانسارهای اپی‌ترمال فلزات گرانبها و فلزات پایه با میزبان سنگ‌های آتشفشانی، به دلیل دخالت مقدارهای متفاوت از آب جوی و مواد فرار غنی از آب با منشأ ماگمایی و همچنین برهم‌کنش آب/سنگ میزبان،

پورفیری. ذخایر شناخته شده آهن نوع اسکارنی در بحرآسمان از دید تاژ چندان بزرگ نیستند. کانسار آهن جنگا که هم اکنون در دست اکتشاف تفصیلی است؛ امیدبخش به نظر می‌رسد و بر اهمیت این گونه ذخایر در بحرآسمان می‌افزاید. اهمیت ذخایر رگه‌ای مس در محدوده بحرآسمان مربوط به فروانی رخداد این نوع کانه‌زایی است؛ اگر چه بیشتر ذخایر شناخته شده کوچک هستند. کنترل‌کننده اصلی در این نوع کانه‌زایی ساختارها هستند و همه کانسارهای شناخته شده از این نوع با گسل‌های دارای روند عمومی شمال خاوری (N040 تا N075) همراه هستند. نتایج بررسی میانبارهای سیال، تا حدودی ویژگی‌های متفاوت انواع سیال کانسنگ‌ساز در انواع مختلف کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. کانه‌زایی مس در کانسارهای رگه‌ای توسط سیال‌هایی با دمای چیره ۱۵۰ تا ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۵ تا ۱۰ و ۲۵ تا ۳۰ (wt% NaCl) رخ داده است. تعدادی شوری‌های بالاتر نیز به دست آمد که با توجه به از نوع فلزات پایه بودن کانه‌زایی، طبیعی است. برای کانسار اسکارن موکا دمای سیال در بازه ۱۷۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و شوری سیال‌ها در دو بازه ۵ تا ۱۵ و ۲۷ تا ۳۵ (wt% NaCl) به دست آمد که در مرز پایین بازه دمایی پیشنهاد شده توسط پژوهشگران برای کانه‌زایی اسکارن قرار می‌گیرد. از کانسار زاورک که شواهدی از نوع پورفیری نشان می‌دهد؛ بازه دمایی ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۱۵ تا ۲۰ و ۳۰ تا ۳۵ (wt% NaCl) به دست آمد؛ که با بازه مشخص شده برای کانسارهای پورفیری انطباق دارد.

ترکیب ایزوتوپی گوگرد در کانسارهای رگه‌ای ($^{34}\text{S}\delta = +۳/۹$ تا $+۵$ در هزار) در بازه منشأ ماگمایی برای گوگرد و فلزات قرار می‌گیرد؛ با این وجود به دلیل اینکه توده نفوذی در نزدیکی این رگه‌ها حضور ندارد و میزبان آنها سنگ‌های آندزیتی است؛ شستشوی احتمالی گوگرد از میزبان تغییر محسوسی در ترکیب ایزوتوپی آنها ایجاد نکرده است. ایزوتوپ‌های پایدار گوگرد در کانسار اسکارن مس موکا، با وجود حضور توده عامل کانه‌زایی، نسبت‌های کمی سنگین تر ($^{34}\text{S}\delta = +۴/۳$ و $+۷/۱$ در هزار) از مقادیر ماگمایی نشان می‌دهد. با توجه به رخداد کانه‌زایی در مراحل پسرونده اسکارن و دمای کم آن، تأثیر نفوذ سیال دارای گوگرد با منشأ متفاوت طی کانه‌زایی در اسکارن موکا محتمل است. ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن در کانسارهای رگه‌ای مطالعه شده، طیفی از نسبت‌های مختلف سیال ماگمایی و جوی را نشان می‌دهد. با تطبیق اندازه کانه‌زایی با نسبت مؤثر سیال ماگمایی در کانه‌زایی، دیده می‌شود که کانسارهای بزرگ‌تر سهم بیشتری از سیال ماگمایی دارند. بنابراین نمونه‌برداری و مطالعه سامان‌مند برای ایزوتوپ‌های اکسیژن و هیدروژن در کنار دیگر مطالعات همچون تعیین پارائز کانه‌زایی، می‌تواند به تعیین مرکز و حاشیه سیستم در مقیاس منطقه‌ای کمک کند و به عنوان کلید اکتشافی استفاده شود.

سپاسگزاری

این مطالعه در قالب پروژه دانشجویی و به منظور شناخت بهتر از ویژگی‌های زمین‌شناسی- معدنی کمپلکس بحرآسمان انجام شده است. انجام این مهم بدون حمایت مالی و پشتیبانی بخش تحقیق و توسعه شرکت ملی صنایع مس ایران امکان‌پذیر نبوده است؛ که از ایشان صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

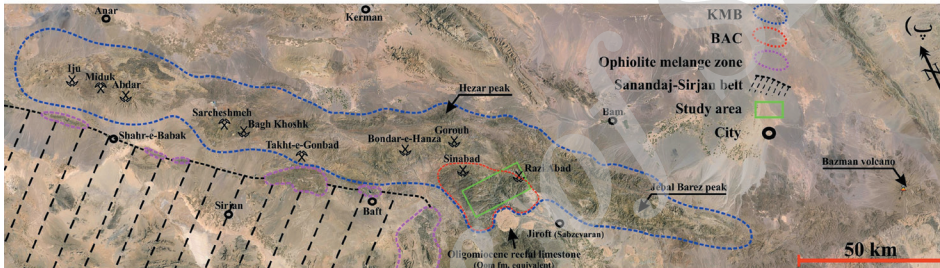
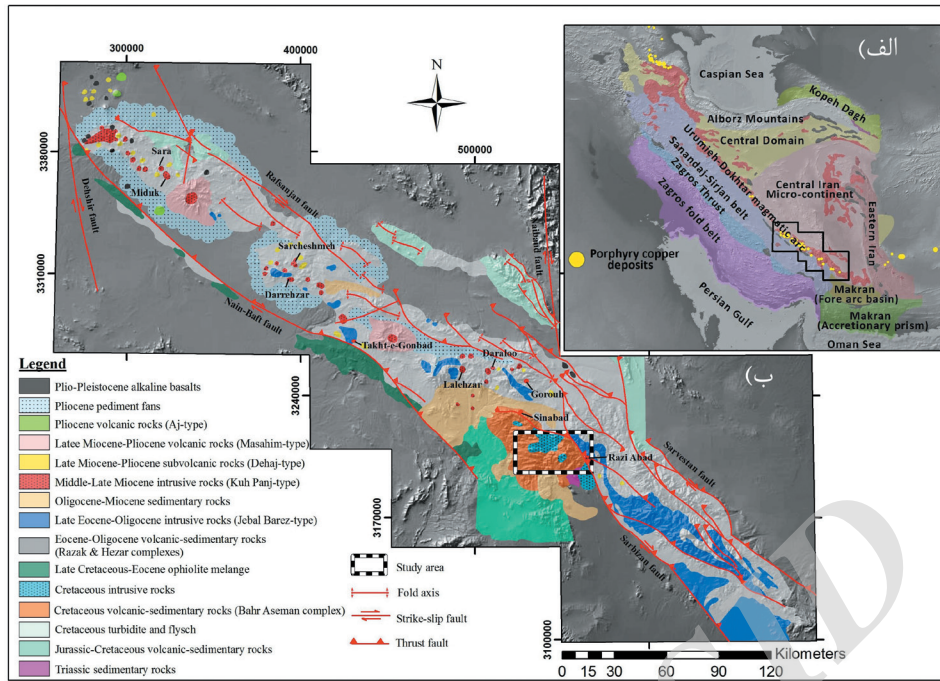
مشارکت داشته باشند. به‌رغم وجود توده نفوذی عامل کانه‌زایی در مجاورت منطقه کانسنگ در موکا، دخالت مقادیری آب با منشأ جوی نیز دیده می‌شود. با توجه به رخداد کانه‌زایی همراه با مراحل پسرونده و همچنین داده‌های میانبارهای سیال که دماهای پایین را برای کانه‌زایی نشان می‌دهند ۱۸۰- تا ۲۳۰-؛ دخالت سیال‌های با منشأ جوی طی مرحله کانه‌زایی بسیار محتمل به نظر می‌رسد. از سوی دیگر با توجه به اینکه تنها یک نمونه مورد مطالعه قرار گرفته است؛ این احتمال وجود دارد که نمونه معرف مرحله اصلی کانه‌زایی نباشد؛ که باید طی مطالعات تکمیلی و با نمونه‌برداری سامان‌مند مشخص شود. در کانسار زاورک، که برخی ویژگی‌های کانسارهای نوع پورفیری را دارد؛ نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن به ترتیب $+۲$ و -۸۰ در هزار است. در کانسارهای پورفیری، سیال‌های با منشأ ماگمایی سهم زیادی در مراحل اصلی کانه‌زایی دارند (Sheppard et al., 1971; Shank, 2014). در نمودار مربوط به انواع سیال‌های گرمایی بر پایه ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن (شکل ۸)، نمونه کانسار زاورک، بیشترین سهم سیال ماگمایی را در میان کانسارهای مطالعه شده نشان می‌دهد. این مطلب را نمی‌توان به عنوان شواهدی برای نسبت دادن نوع خاصی به زاورک در نظر گرفت؛ پاسخ به این پرسش نیازمند داده‌های بیشتر است. با این وجود می‌توان بیان کرد که سیال گرمایی با منشأ ماگمایی سهم اصلی در کانه‌زایی زاورک دارد.

۷- مقایسه کانی‌زایی بحرآسمان با کمر بند کرمان

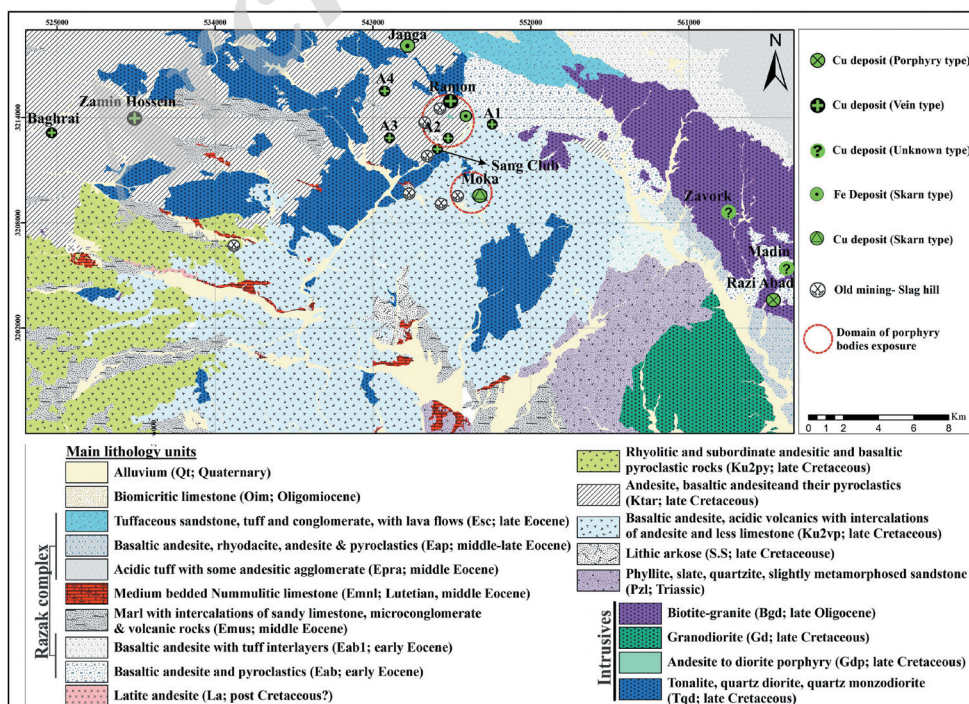
در جدول ۵ ویژگی‌های عمومی کانه‌زایی در بحرآسمان با کمر بند کرمان مقایسه شده است. برخلاف بحرآسمان، کانسارهای مس \pm مولیبدن \pm طلائی نوع پورفیری، کانه‌زایی اصلی در کمر بند ماگمایی سنوزوییک کرمان هستند. دلیل اصلی اختلاف موجود در نوع و حجم ذخیره کانه‌زایی در بحرآسمان و کمر بند ماگمایی سنوزوییک کرمان را می‌توان ویژگی‌های زمین‌شناسی و جایگاه زمین‌ساختی متفاوت آنها دانست. در محیط‌های کمان اقیانوسی طلا از جمله فلزاتی است که در همراهی با انواع مختلف کانساری مرتبط با فعالیت ماگمایی می‌تواند همراه با مس و آهن غنی‌شدگی اقتصادی نشان دهد. از سوی دیگر مولیبدن، سرب و روی معمولاً غنی‌شدگی چندانی نشان نمی‌دهند؛ با این وجود استثنایی وجود دارد (Evans, 1993; Sinclair, 2007). نوع کانسارها و کانسنگ‌شناسایی شده در محدوده بحرآسمان، تا حدودی با شرایط عمومی کانه‌زایی در یک محیط کمان اقیانوسی سازگار است؛ به گونه‌ای که آهن و مس فلزات اصلی حاصل از کانه‌زایی در انواع مختلف معرفی شده هستند و سرب و روی غنی‌شدگی چشمگیری ندارند. با این وجود، در نمونه‌های تجزیه شده (به غیر از زمین حسین)، طلا غنی‌شدگی خاصی نشان نمی‌دهد. با توجه به بی‌هنجاری مثبت طلا در کانسار زمین حسین، افزون بر آهن و مس، طلا نیز می‌تواند از فلزات مورد توجه در بحرآسمان باشد.

۸- نتیجه‌گیری

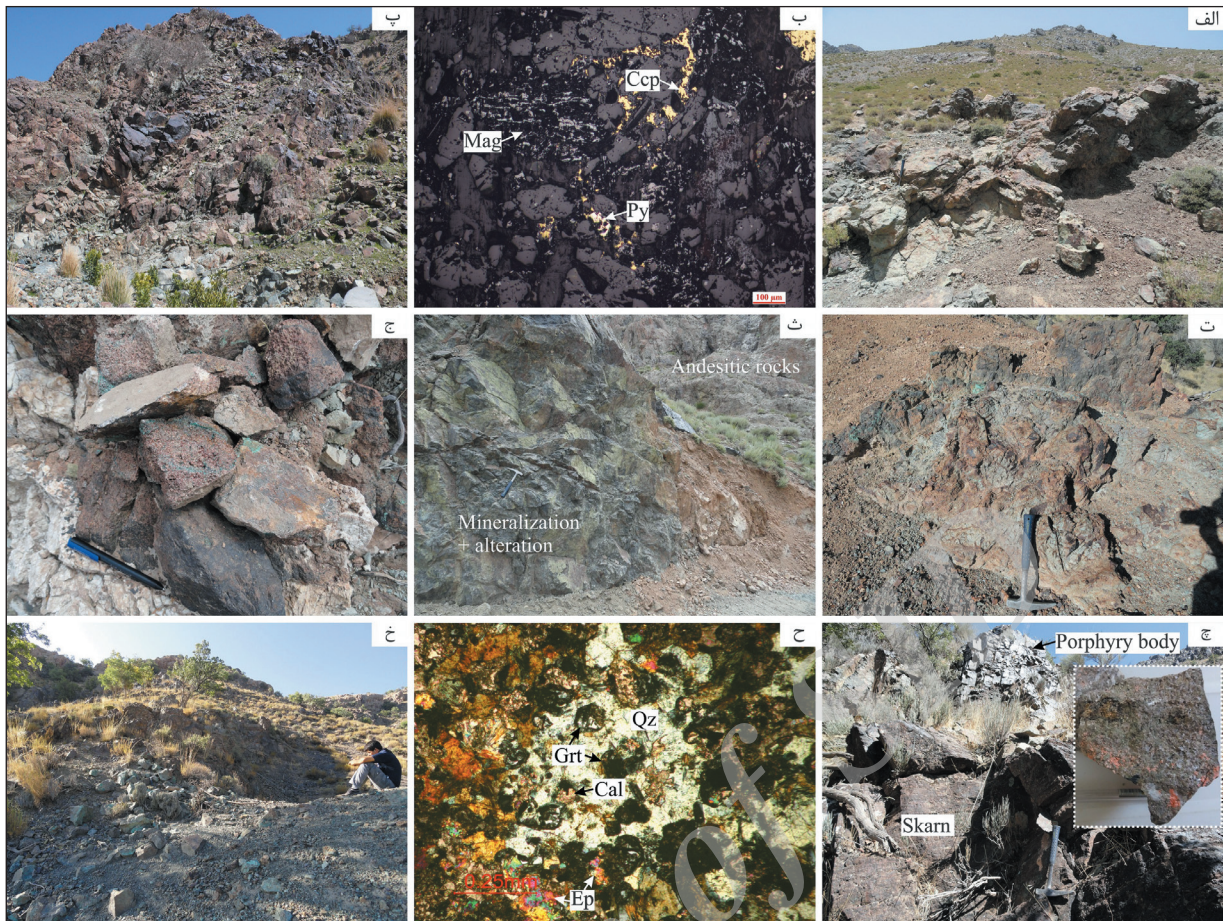
مهم‌ترین کانسارهای شناخته شده در محدوده بحرآسمان، به ترتیب فراوانی و اهمیت عبارتند از کانسارهای رگه‌ای مس، اسکارن آهن، اسکارن مس و شواهدی از مس



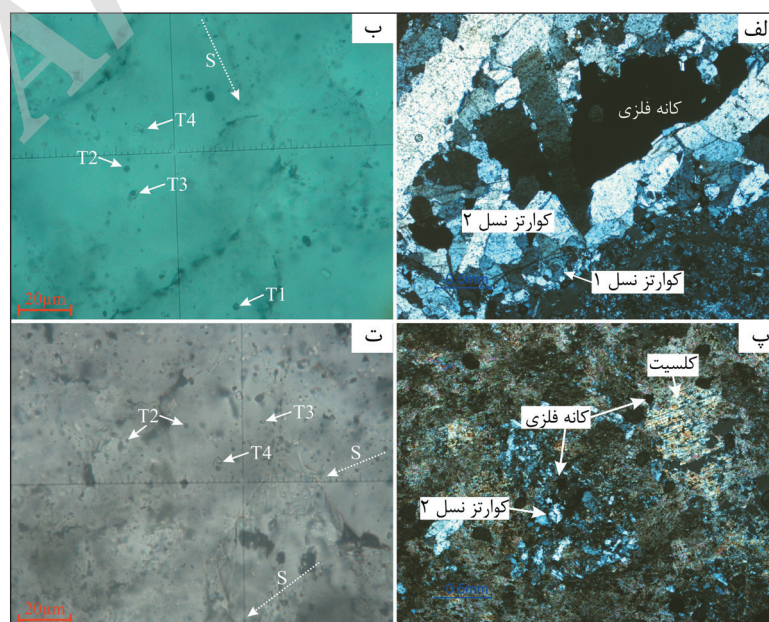
شکل ۱- الف) پهنه‌های ساختاری ایران و موقعیت کمر بند ماگمایی کرمان (با تغییر از (Stocklin (1968)؛ ب) نقشه زمین‌شناسی ساده شده کمر بند ماگمایی کرمان؛ موقعیت منطقه مورد مطالعه و تعدادی از کانسارهای مس پورفیری نشان داده شده است (با تغییر از (Dimitrijevic (1973) و (Shafiei et al. (2009)؛ پ) تصویر Google Earth که در آن موقعیت محدوده مورد مطالعه در کمر بند ماگمایی کرمان و همچنین رخنمون‌های افیولیتی و تعدادی از کانسارهای مس پورفیری نشان داده شده است.



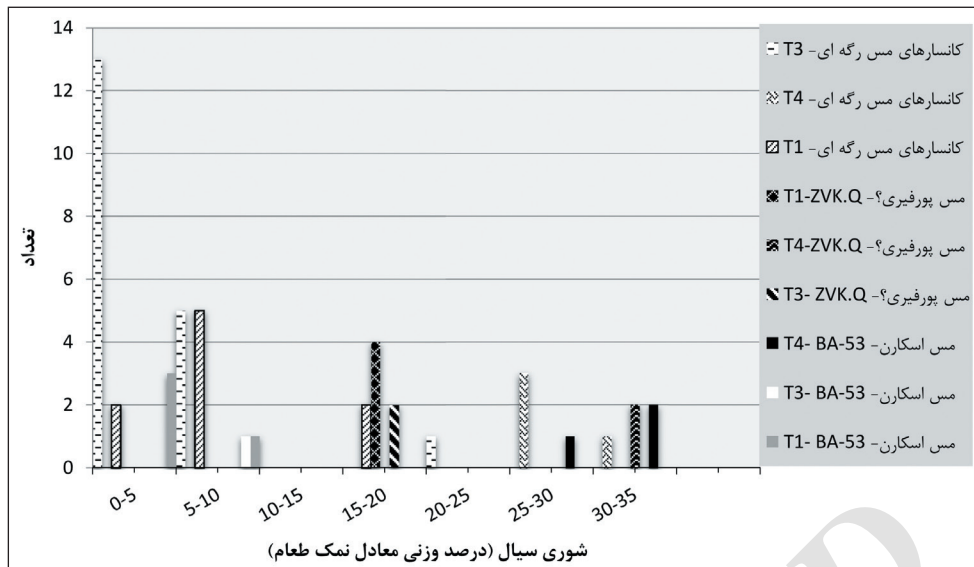
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، با نمایش محل کانسارهایی که در متن به آنها اشاره شده است. موقعیت منطقه در کمر بند ماگمایی کرمان در شکل ۱ نشان داده شده است.



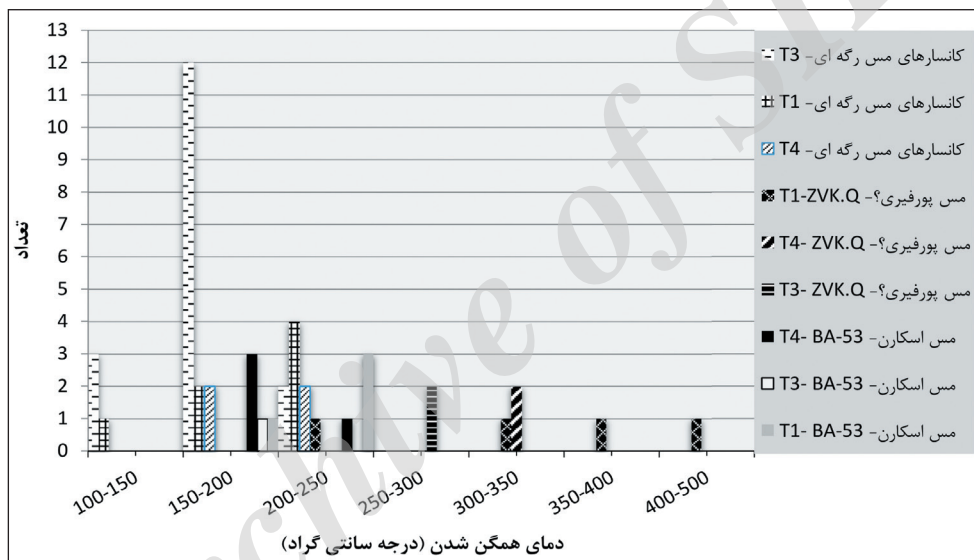
شکل ۳- تصاویر مربوط به کانه‌زایی و دگرسانی در محدوده مورد مطالعه؛ الف) رگه کوارتز کانه‌دار اصلی در کانسار رمون، دید به سوی شمال خاور؛ ب) همراهی کالکوپیریت، پیریت و مگنتیت در رگه کوارتز، مربوط به کانه‌زایی هیپوزن در اندیس A1؛ پ) نمایی از توده پورفیری به شدت سیلیسی شده کانسار مس پورفیری رضی آباد؛ ت) رخنمونی از توده‌های گرانیتوئیدی همراه با کانه‌زایی مس در محدوده بحرآسمان یا دگرسانی شدید سیلیسی، اکسید آهن و رسی؛ ث) کانه‌زایی مگنتیت به همراه دگرسانی شدید اپیدوتی و موقعیت واحد آندزیتی در کنار آن؛ کانسار جنگا؛ ج) کانه‌زایی مگنتیت و مقداری کالکوپیریت همراه با تشکیل گارنت فراوان که به صورت پراکنده در منطقه دیده می‌شود؛ چ) توده پورفیری بارور در مجاورت واحد اسکارنی با کانه‌زایی مس؛ کانسار مس موکا؛ تصویری از کانسنگ پرعیار همراه با دگرسانی ارتوز- کربنات- اپیدوت نیز نشان داده شده است؛ ح) اپیدوتی شدن بخشی گارنت‌ها و در برگرفته شدن گارنت‌ها توسط کوارتز، کانسار موکا، XPL؛ خ) رخداد کانه‌زایی گسترده مس در سطوح درز و شکستگی آندزیت‌ها و آثار استخراج آن در گذشته؛ اطراف روستای سنگ کلاب؛ دید به سوی شمال؛ نشانه‌های اختصاری از Whitney and Evans (2010):
 Ep: epidote؛ Ccp: chalcopyrite؛ Py: pyrite؛ Mag: magnetite ؛ Qz: quartz؛ Grt: garnet؛ Cal: calcite.



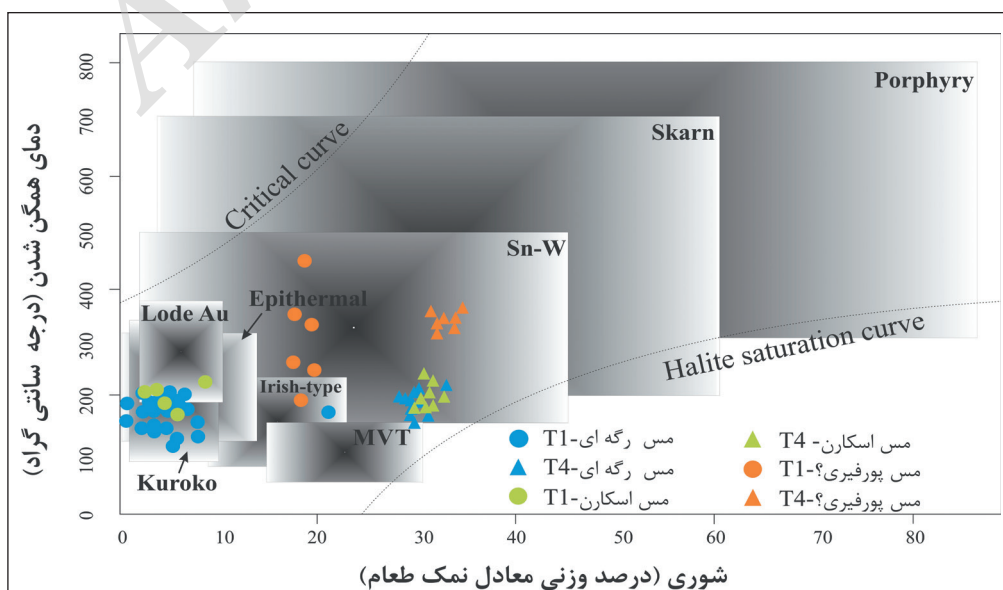
شکل ۴- الف) کوارتز همراه با کانه‌زایی و تصاویر میانبارهای سیال که برای مطالعه انتخاب شد، الف و ب) نشانه معدنی A3؛ پ و ت) اسکارن مس موکا.



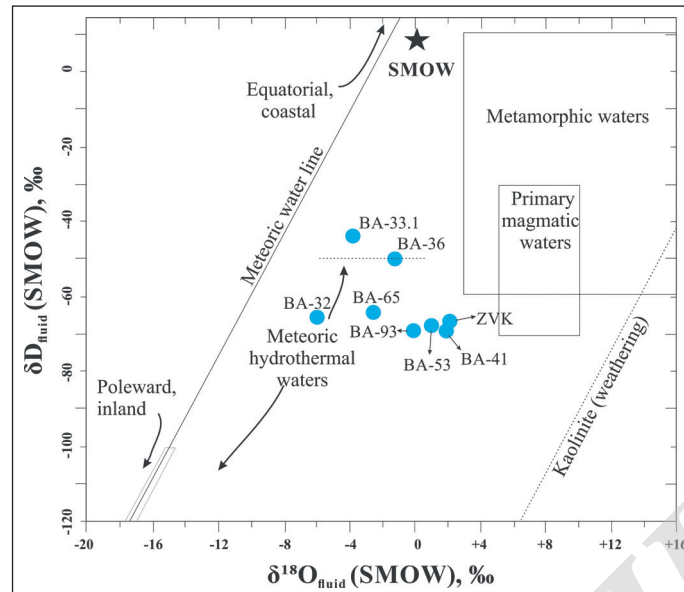
شکل ۵- فراوانی انواع میانبارهای سیال به تفکیک نوع کان‌زایی و درصد شوری برای کانسارهای منطقه مورد مطالعه.



شکل ۶- پراکنده‌گی دمای همگن‌شدگی برای میانبارهای سیال به تفکیک نوع کان‌زایی در کانسارهای منطقه مورد مطالعه.



شکل ۷- نمودار دمای همگن‌شدگی در برابر شوری در کانسارهای مختلف (Wilkinson, ۲۰۰۱) و محدوده قرارگیری میانبارهای سیال کانسارهای محدوده مورد مطالعه.



شکل ۸- نمودار $\delta^{18}\text{O}$ در برابر δD برای سیال‌های مرتبط با کانه‌زایی در کانسارهای محدوده مورد مطالعه. برای رسم محدوده مربوط به آب‌های ماگمایی و دگرگونی از Taylor (1979) و برای خط آب‌های جوی از Craig (1961) استفاده شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های کانسارها و اندیس‌های معدنی در محدوده مورد مطالعه.

کانسار/اندیس	نوع کانه‌زایی	ابعاد	کانه	میزان	دگرسانی همراه کانه‌زایی	نتیجه تجزیه عیار سنجی	توضیحات
رمون	مس رگه‌ای	سه پهنه اصلی کانه‌دار/بزرگ‌ترین رگه: 2×50 متر	کالکوپیریت، پیریت، مگنتیت، مالاکیت، آزوریت	آندزیت واحد Ktar	سیلیسی اپیدوتی کلریتی	-	دارای آثار معدنکاری کهن - امتداد N075/ شیب 50N-NW
زمین حسین	مس رگه‌ای	۱۰ پهنه کانه‌دار/ ۵۰۰-۶۰۰ متر طول و ۰/۵ تا ۱/۵ متر عرض	پیریت، کالکوپیریت، کالکوسیت، کولیت، مالاکیت	آندزیت واحد Ktar	سیلیسی اپیدوتی کلریتی	مس < ۱ درصد، ۴ نمونه مس < ۰/۵ درصد، ۷ نمونه طلا: ۰/۱ تا ۰/۴ گرم در تن ۴ نمونه	کانه‌زایی در ارتباط با رگه‌های سیلیسی رخ داده؛ رگه‌های سیلیسی دارای مقدار کم کانه‌زایی است؛ بیشتر کانه‌زایی درون سنگ میزبان رگه‌ها به صورت جانشینی است - امتداد N050-060/ شیب ۹۰
سنگ کلاب	مس رگه‌ای	یک پهنه کانه‌دار/ 3×50 متر	پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت، مالاکیت	آندزیت واحد Ktar	سیلیسی اپیدوتی کلریتی	-	دارای آثار معدنکاری کهن - امتداد N060/ شیب ۹۰
A1	مس رگه‌ای	یک پهنه کانه‌دار/ 30×1 متر	پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت، مالاکیت	آندزیت واحد Ktar	سیلیسی اپیدوتی کلریتی	-	امتداد N040/ شیب 70-80E
A2	مس رگه‌ای	یک پهنه کانه‌دار/ 1×2 متر	کالکوپیریت، کولیت، پیریت، مگنتیت، مالاکیت	آندزیت واحد Ktar	سیلیسی اپیدوتی کلریتی	مس: ۱/۳۶ درصد سرب: ۰/۰۱ درصد روی: ۰/۰۴ درصد نقره: ۴ پی‌پی‌ام	امتداد N110/ شیب 90
A3	مس رگه‌ای	یک پهنه کانه‌دار/ 2×5 متر	کالکوپیریت، پیریت، مگنتیت، مالاکیت	آندزیت واحد Ktar	سیلیسی اپیدوتی کلریتی ایندریت	مس: ۱/۳۵ درصد سرب: ۰/۰۱ درصد روی: ۰/۰۷۸ درصد نقره: ۳ پی‌پی‌ام طلا: ۰/۰۰۶ پی‌پی‌ام	امتداد N010
A4	مس رگه‌ای	یک محدوده به ابعاد 2×3 متر با کانه‌زایی پراکنده	کانه‌زایی سطحی مالاکیت	آندزیت واحد Ktar	سیلیسی اپیدوتی کلریتی	-	کانه‌زایی در ارتباط با رگه‌های سیلیسی پراکنده با سترای ۱ تا ۲ سانتی‌متر رخ داده و بخشی از کانه‌زایی به سنگ‌های آندزیتی میزبان منتقل شده است.

کانسار/اندیس	نوع کانه‌زایی	ابعاد	کانه	میزبان	دگرسانی همراه کانه‌زایی	نتیجه تجزیه عبارسنجی	توضیحات
رضی آباد	مس پورفیری	---	کالکوپیریت، پیریت، مگنتیت، مولیبدنیت، مالاکیت	توده پورفیری با ترکیب کوارتز-دیوریت تا مونوزودیوریت + کاپرو	پتاسیک سیلیسی فیلیک کلسیک	مس: چندصد پی‌پی‌ام تا ۰/۲۴ و حداکثر تا ۰/۹ درصد مولیبدن: تا ۱۰۰ پی‌پی‌ام (Saric, 1972)	تفاوت‌ها با کانسارهای مس پورفیری در کمربند مس کرمان: گسترش چشمگیر دگرسانی سیلیسی، گسترش محدود دگرسانی سربستی، دگرسانی کلسیک (اکتیولیتی)، فراوانی چشمگیر مگنتیت
جنکا	اسکارن آهن	رخمون کمینه ۱۰۰ × ۲۰۰ متر	مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت	مواد آذرآواری و کربنات‌های Ktar واحد	اپیدوت کلریت	-	توده نفوذی مرتبط با کانه‌زایی در پیرامون این کانسار دیده نشد
موکا	مس اسکارن	رخمون کمینه ۱۰۰ × ۲۰۰ متر	کالکوپیریت، پیریت، مگنتیت، مالاکیت	در مجاورت بلافصل یک توده دیوریت پورفیری ریزدانه، درون توالی Ku2vp	سیلیسی، اپیدوتی کربناتی پتاسیک (ارتوز) کلریتی	مس: ۱/۱۷۵ درصد سرب: ۰/۰۳ درصد روی: ۰/۰۰۶ درصد نقره: ۲ پی‌پی‌ام	دارای آثار معدنکاری کهن
زاورک	مس پورفیری؟؟	رخمون کانه‌زایی در چند محل با ابعاد متفاوت	کالکوپیریت، پیریت، مگنتیت، مالاکیت	درون توده با ترکیب گرانودیوریت Bgd	سیلیسی سربستی، رسی	-	شاهد چندان استواری برای ارتباط با یک سامانه پورفیری در زاورک وجود ندارد (علیرضایی، ۱۳۹۳)

جدول ۲- ویژگی‌های نمونه‌ها و نتایج مطالعه میانبارهای سیال برای شماری از کانسارها در محدوده مورد مطالعه.

Name	Type	Size (μm)	Phases (30°C)	Liquid (%)	Vapor (%)	Halite (%)	Tmi (first) (°C)	Tmi (last) (°C)	Th (V→L) (°C)	Th - Hl (°C)	Salinity (Wt% NaCl)	P homog. (bar)
BA-41 (Cu vein, Ramon deposit)	T3	5	L+V	95	5	-	-40.8	-18.1	180.5	-	21.04	9
	T2	6	V+L	10	90	-	-	-7.6	>400	-	11.20	406
	T3	8	L+V	90	10	-	-41.2	-0.5	197.8	-	0.09	15
	T3	8	L+V	90	10	-	-41	-2.1	199.0	-	3.55	15
	T1	8	L+V	70	30	-	-43.2	-1.3	213.2	-	2.24	20
	T3	11	L+V	90	10	-	-44.3	-2.9	152.2	-	4.80	5
	T1	5	L+V	80	20	-	-	-3.7	192.9	-	6.01	13
BA-65 (Cu vein, A3 showing)	T3	4	L+V	90	10	-	-	-5.1	163.7	-	8.00	6
	T3	6	L+V	90	10	-	-42.3	-2.6	189.4	-	4.34	12
	T3	5	L+V	90	10	-	-	-3.3	170.8	-	5.41	8
	T3	6	L+V	90	10	-	-	-1.7	199.9	-	2.90	15
	T3	5	L+V	90	10	-	-	-1.4	180.7	-	2.41	10
BA-53 (Cu skarn, Moka deposit)	T4	11	L+V+H	85	5	10	-42.1	-	188.9	152.6	29.76	9
	T3	7	L+V	90	10	-	-43.7	-3.5	174.7	-	5.71	9
	T1	5	L+V	70	30	-	-41	-1.5	218.8	-	2.57	22
	T4	7	L+V+H	80	10	10	-45.6	-26.1	191.6	170.0	30.48	10
	T4	7	L+V+H	50	20	30	-45.3	-26.2	203.1	162.4	30.16	12
	T4	5	L+V+H	70	20	10	-43	-25.8	186.5	171.8	30.56	9
	T1	4	L+V	60	40	-	-39.8	-5.6	229.9	-	8.68	25
	T1	6	L+V	85	15	-	-41.2	-2.9	196.2	-	4.80	14
	T2	8	V+L	40	60	-	-	-	>400	-	-	-
T1	5	L+V	70	30	-	-42.5	-2.3	216.1	-	3.87	21	

Name	Type	Size (μm)	Phases (30°C)	Liquid (%)	Vapor (%)	Halite (%)	Tmi (first) (°C)	Tmi (last) (°C)	Th (V→L) (°C)	Th - Hl (°C)	Salinity (Wt% NaCl)	P homog. (bar)
BA-93 (Cu Vein, Zamin Hossein deposit)	T3	8	L+V	95	5	-	-45.5	-2.1	156.1	-	3.55	5
	T1	7	L+V	70	30	-	-40.2	-4.1	211.0	-	6.59	19
	T3	9	L+V	90	10	-	-46.5	-1.2	152.8	-	2.07	5
	T3	7	L+V	90	10	-	-42.2	-0.9	167.7	-	0.16	7
	T4	6	L+V+H	85	10	5	-46.1	-26	206.5	111.3	28.31	14
	T4	11	L+V+H	85	10	5	-45.8	-26.3	199.2	157.1	29.94	11
	T3	9	L+V	90	10	-	-39.1	-3.2	201.8	-	5.26	16
	T3	5	L+V	90	10	-	-42.4	-1.9	197.2	-	3.23	14
	T3	6	L+V	90	10	-	-40.5	-3	185.6	-	4.96	11
	T3	7	L+V	90	10	-	-46.5	-2.1	184.5	-	3.55	11
ZVK.Q (Cu porphyry?, Zavork deposit)	T1	6	L+V	70	30	-	-43.8	-14.5	200.7	-	18.22	14
	T1	7	L+V	60	40	-	-49.9	-13.8	357.2	-	17.61	157
	T4	11	L+V+H	40	20	15	-	-	329.3	235	33.75	93
	T4	10	L+V+H	80	15	5	-46.3	-27.1	322.6	203.6	32.04	87
	T1	8	L+V	75	25	-	-48.9	-15.9	339.1	-	19.37	124
	T1	10	L+V	80	20	-	-46.2	-14.9	>400	-	18.55	368
	T3	9	L+V	90	10	-	-45.1	-16.2	255.3	-	19.60	37
	T3	6	L+V	90	10	-	-42.7	-13.7	269.1	-	17.52	47
BA-33.1 (Cu vein, Sang Club deposit)	T1	6	L+V	80	20	-	-38.1	-4.2	186.0	-	6.74	11
	T3	6	L+V	90	10	-	-37.8	-3.3	120.8	-	5.41	2
	T3	6	L+V	90	10	-	-41.1	-2.1	146.1	-	3.55	4
	T4	7	L+V+H	80	10	10	-	-	162.5	151.5	29.72	5
	T3	5	L+V	90	10	-	-	-3.6	135.6	-	5.86	3
	T3	10	L+V	90	10	-	-40	-2.4	205.8	-	4.03	17
	T1	7	L+V	80	20	-	-38.9	-5.1	137.1	-	8.00	3
	T4	8	L+V+H	75	10	15	-41.3	-	209.3	160.2	30.07	14
	T1	6	L+V	85	15	-	-40	-3.1	216.8	-	5.11	21
	T1	5	L+V	50	50	-	-42.1	-2.7	208.5	-	4.49	18

جدول ۳- ویژگی‌های نمونه‌های سولفید تجزیه شده به منظور تعیین نسبت‌های ایزوتوپی گوگرد در کانسارهای محدوده بحرآسمان؛ نشانه‌های اختصاری از: Qz: quartz؛ Mag: magnetite؛ Ep: epidote؛ Chl: chlorite؛ Whitney and Evans (2010)

شماره نمونه	کانی	کانسار / اندیس	نوع کانه‌زایی	رخداد	کانی‌های همراه	%δ ³⁴ S	1000 lnα	%δ ³⁴ S H ₂ O
BA-32	پیریت	اندیس A1	مس رگه‌ای	در رگه کوارتز	Qz- Mag- Ep- Chl	۴/۳	۰/۰	۴/۳
BA-32	کالکوپیریت	اندیس A1	مس رگه‌ای	در رگه کوارتز	Qz- Mag- Ep- Chl	۴/۹	۰/۲	۴/۷
BA-65	کالکوپیریت	اندیس A3	مس رگه‌ای	در رگه کوارتز	Qz- Mag- Anh- Ep- Chl	-۹/۹	۰/۲	-۱۰/۱
BA-36	کالکوپیریت	اندیس A2	مس رگه‌ای	در رگه کوارتز	Qz- Cct	۳/۳	-۰/۶	۳/۹
BA-53	کالکوپیریت	موکا	مس اسکارن	دانه پراکنده	Mag- Qz- Cal- Chl- Ep	۷/۳	۰/۲	۷/۱
BA-53	پیریت	موکا	مس اسکارن	دانه پراکنده	Mag- Qz- Cal- Chl- Ep	۴/۳	۰/۰	۴/۳
BA-93	کالکوپیریت	زمین حسین	مس رگه‌ای	در رگه کوارتز	Qz- Mag	۵/۱	۰/۲	۵/۰
BA-41	کالکوپیریت	رمون	مس رگه‌ای	در رگه کوارتز	Qz- Ep- Chl- Mag	۴/۸	۰/۱۸	۴/۶

جدول ۴- ویژگی‌های نمونه‌های کوارتز تجزیه شده برای تعیین نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن از کانسارهای مورد مطالعه؛ نشانه‌های اختصاری Chl: chlorite; Ep: epidote; Mag: magnetite; Cct: chalcocite; Ccp: chalcopyrite; Py: pyrite; Anh: anhydrite : Whitney and Evans (2010) از

شماره نمونه	کانسار / اندیس	نوع کانه‌زایی	رخداد	کانی‌های همراه	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$1000 \ln \alpha$	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ H_2O	δD ‰
BA-32	اندیس A1	مس رگه‌ای	رگه کوارتز	Py- Ccp- Mag- Ep- Chl	۶/۶۵۹	۱۳/۳	-۶/۶۴۱	-۷۸/۶
BA-36	اندیس A2	مس رگه‌ای	رگه کوارتز	Py- Ccp- Cct	۱۱/۰۴۹	۱۲/۴	-۱/۳۵۱	-۷۲/۹
ZVK	زاورک	مس پورفیری؟	رگه کوارتز	Py- Mag- Ccp	۶/۶۱	۴/۶	۲/۰۱	-۷۹/۹
BA-93	زمین حسین	مس رگه‌ای	رگه کوارتز	Py- Ccp- Mag	۱۳/۷۴۱	۱۲/۸	۰/۹۴۱	-۶۰/۳
BA-41	رمون	مس رگه‌ای	رگه کوارتز	Py- Ccp- Ep- Chl- Mag	۱۱/۹۴۲	۱۰	۱/۹۴۲	-۷۵/۶
BA-33.1	سنگ کلاب	مس رگه‌ای	رگه کوارتز	Py- Ccp- Ep- Chl- Mag	۱۱/۴۷۲	۱۵/۳	-۳/۸۲۸	-۵۱/۸
BA-65	اندیس A3	مس رگه‌ای	رگه کوارتز	Py- Ccp- Mag- Anh- Ep- Chl	۱۰/۶۳۵	۱۳/۳	-۲/۶۶۵	-۷۹/۴
BA-53	موکا	مس اسکارن	دگرسانی سیلیسی	Mag- Py- Ccp- Cal- Chl- Ep	۱۲/۶۲۹	۱۱/۷	۰/۹۲۹	-۷۶/۲

جدول ۵- مقایسه ویژگی‌های اصلی کانه‌زایی در بحرآسمان با کمر بند ماگمایی کرمان.

مورد مقایسه	بحر آسمان	کمر بند ماگمایی کرمان
محیط زمین‌ساختی	کمان اقیانوسی برای سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی (حسینی و همکاران، ۱۳۹۴)	کمان اقیانوسی برای سنگ‌های آتشفشانی ائوسن (Shahabpour, 2007)؛ کمان حاشیه قاره برای سنگ‌های الیگوسن، و محیط پس از برخورد برای توده‌های نفوذی همراه با کانه‌زایی مس پورفیری (Shafiei et al., 2009)
سن سنگ‌های منطقه	کرتاسه پایانی (حسینی و همکاران، ۱۳۹۴)	ائوسن آغازی تا پلیستوسن (Hassanzadeh, 1993; Chiu et al., 2013)
نوع‌های کانه‌زایی اصلی	- مس نوع رگه‌ای (زمین حسین، رمون، سنگ کلاب) - آهن نوع اسکارن (جنگا) - مس نوع اسکارن (موکا) - مس نوع پورفیری	- مس نوع پورفیری (سرچشمه، میدوک، نوچون، تختگنبد) - آهن نوع اسکارن - مس نوع رگه‌ای (چهارگنبد) - مس نوع مانتو (کشکوئیه) - سرب و روی نوع رگه‌ای (قنات مروان)
ترکیب توده‌های نفوذی مرتبط با کانه‌زایی	توده‌های پورفیری ریزدانه با ترکیب غالب دیوریتی	کوارتز دیوریت تا کوارتز مونوز دیوریت، کوارتز مونوزیت و گرانودیوریت
دگرسانی‌های همراه کانه‌زایی	سیلیسی، ایدوتی، کلریتی	پتاسیک، فلیک، پروپلیتیک، آرژیلیک
سن کانه‌زایی	احتمالاً کرتاسه پایانی	بیشتر در الیگوسن میانی تا میوسن پایانی

کتابنگاری

- حسینی، م. ر.، ۱۳۹۱- کانی شناسی، ژئوشیمی، سیالات در گیر و ژنز کانسار مس تخت گنبد، شمال شرق سیرجان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۷۸ ص.
- حسینی، م. ر.، حسن زاده، ج.، سون، و. و علیرضایی، س.، ۱۳۹۴- زمان سنجی و جایگاه زمین شناسی مجموعه آتشفشانی- نفوذی بحر آسمان، جنوب غرب کمر بند ماگمایی کرمان- سی و چهارمین گردهمایی و دومین کنگره بین المللی تخصصی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- حسینی، م. ر.، علیرضایی، س. و حسن زاده، ج.، ۱۳۹۳- زمین شناسی و دگرسانی - کانه زایی گرمایی در منطقه بحر آسمان، شمال جیرفت، سی و سومین گردهمایی ملی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- علیرضایی، س.، ایمانی، ع. و شیخیان، س.، ۱۳۸۹- ویژگی های زمین شناسی، کانی سازی و دگرسانی در محدوده اکتشافی رضی آباد- مدین، جبال بارز، استان کرمان، نخستین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- علیرضایی، س.، ۱۳۹۳- گزارش بازدید از محدوده اکتشافی زاورک، شرکت پارس اولنگ، گزارش داخلی، ۱۲ ص.
- مدرک، ه.، ۱۳۸۸- ویژگی های کانی سازی، دگرسانی و ماهیت سیال های کانه ساز در ذخیره چند فلزی چاه مسی و ارتباط آن با کانسار مس پورفیری میدوک، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۶۰ ص.
- میزان، م.، ۱۳۹۲- منبع سیال و فلز و چگونگی زایش کانسنگ در کانسار مس چهارگنبد، جنوب ایران، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۲۰ ص.

References

- Alirezaei, S., Einali, M., Jones, P., Hassanpour, S. and Arjmandzadeh, R., 2015- Mineralogy, geochemistry, and evolution of the Mivehrood skarn and the associated pluton, northwest Iran. *International Journal of Earth Sciences* 105, 849-868.
- Bindeman, I. N., 2008- Oxygen isotopes in mantle and crustal magmas as revealed by single crystal analysis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 69, 445-478.
- Bindeman, I. N., Kamenetsky, V. S., Palandri, J. and Vennemann, T., 2012- Hydrogen and oxygen isotope behaviors during variable degrees of upper mantle melting: Example from the basaltic glasses from Macquarie Island, *Chemical Geology* 310-311, 126-136.
- Bodnar, R. J., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada, D. and Steele-MacInnis, M., 2014- Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits, Chapter 13.5, *Treatise on Geochemistry* 2nd edition.
- Chiu, H. Y., Chung, S. L., Zarinkoub, M. H., Mohammadi, S. S., Khatib, M. M. and Iizuka, Y., 2013- Zircon U-Pb age constraints from Iran on the magmatic evolution related to Neotethyan subduction and Zagros orogeny. *Lithos* 162-63, 70-87.
- Craig, H., 1961- Isotopic variations in meteoric waters. *Science* 133: 1702-1703.
- Crerar, D. A. and Barnes, H. L., 1976- Ore solution chemistry V. Solubilities of chalcopyrite and chalcocite assemblages in hydrothermal solution at 200 to 300°C. *Economic Geology* 71, 772-794.
- Dimitrijevic, M. D., 1973- Geology of Kerman region. Geological Survey of Iran, Report no. 52, 334 p.
- Evans, M., 1993- Ore geology and industrial minerals, an introduction, third edition, Blackwell Publishing. 403p.
- Hassanzadeh, J., 1993- Metallogenic and tectono-magmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of Iran (Shahr-e-Babak area, Kerman province), (Ph.D. thesis), University of California, Los Angeles, U.S.A., 204 p.
- Haynes, D. W., 1986- Stratiform copper deposits hosted by low energy sediments; II, nature of source rocks and composition of metal-transporting water. *Economic Geology* 81, 266-280.
- Hoefs, J., 2009- Stable isotope geochemistry, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 6th revised and updated edition. 279p.
- Li, Y. B., Liu, J. M., 2006- Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 1789 - 1795.
- Megaw, P. K. M., Ruiz, J. and Tittle, S. R., 1988- High-temperature, carbonate hosted Ag-Pb-Zn (Cu) deposits of northern Mexico. *Economic Geology* 83, 1856-1885.
- Méheut, M., Lazzari, M., Balan, E. and Mauri, F., 2007- Equilibrium isotopic fractionation in the kaolinite, quartz, water system: Prediction from first-principles density-functional theory. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71, 3170-3181.
- Meinert, L. D., Dipple, G. M. and Nicolescu, S., 2005- World skarn deposits. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, 299-336.
- Nedimovic, R., 1973- Exploration for ore deposits in Kerman region, Beograd-Yugoslavia, Report No. Yu/53, 220 p.
- Ohmoto, H. and Rye, R. O., 1979- Isotope of sulfur and carbon, in Barnes, H.L. Ed., *Geochemistry of Hydrothermal deposits*, John Wiley & Sons, p. 509-567.
- Saric, V., 1972- Report on exploration at Razi Abad – Madin copper mineral occurrence. Report 50/YU, Tehran.
- Shafiei, B., Haschke, M. and Shahabpour, J., 2009- Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita* 44, 265-283.
- Shahabpour, J., 2007- Island-arc affinity of the Central Iranian volcanic belt. *Journal of Asian Earth Sciences* 30, 652-665.
- Shanks, W. P., 2014- Stable Isotope Geochemistry of Mineral Deposits. *Treatise on Geochemistry*, 13-3, 59-85.
- Sheppard, S. M. F., Nielsen, R. L. and Taylor, H. P., Jr., 1971- Hydrogen and oxygen isotope ratios in minerals from porphyry copper deposits. *Economic Geology* 66, 515-542.
- Shimazaki, H. and Yamamoto, M., 1979- Sulfur isotope ratios of some Japanese skarn deposits. *Geochemical Journal* 13, 261-268.
- Sinclair, W. D., 2007- Porphyry deposits. Geological Survey of Canada, No. 5, 223-243.

- Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P. and Bodnar, R. J., 2012- HOKIEFLINCS_H2O-NACL: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H2O-NaCl. *Computers & Geosciences*, 49, 334-337.
- Stöcklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran; a review. *Am Assoc Pet Geol Bull* 52 (7), 1229-1258.
- Taylor, H. P., 1979- Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. In: Barnes, H.L., (Ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 2nd ed., Wiley, New York, pp. 236–277, 798 p.
- Ulrich, T., Guenther, D. and Heinrich, C. A., 1999- Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits. *Nature (London)* 399, 676-679.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W., 2010- Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185-187.
- Wilkinson, J. J., 2001- Fluid inclusion in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55, 229-272.
- Zhao, Y., Dong, Y., Lia, D. and Bi, C., 2003- Geology, mineralogy, geochemistry, and zonation of the Bajiazi dolostone-hosted Zn–Pb–Ag skarn deposit, Liaoning Province, China. *Ore Geology Reviews* 23, 153-182.

Archive of SID

Mineralization and geochemical characteristics of ore-forming fluids in Bahr Aseman area, southeast of Kerman magmatic belt

M. R. Hosseini^{1*}, S. Alirezai² and J. Hassanzadeh³

¹Ph.D., Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

²Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

³Associate Professor, Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, California, USA

Received: 2016 September 27

Accepted: 2017 January 21

Abstract

The Bahr Aseman volcanic-plutonic complex is located to the southeast of the Kerman magmatic belt. Unlike Kerman magmatic belt which formed and evolved during Cenozoic in a dominantly continental arc and post-collision tectonic setting, Bahr Aseman complex formed during Late Cretaceous in an oceanic island-arc setting. The complex is composed of andesitic and andesitic-basaltic lava flows and subordinate pyroclastic materials and carbonate interlayers, as well as abyssal tonalite to quartz-diorite and quartz- monzodiorite intrusive bodies and shallow dioritic intrusions. Vein- type copper deposits, iron skarn and copper skarn are the main ore deposit types in Bahr Aseman. Chalcopyrite is the main ore mineral in vein-type and skarn-type copper deposits; the mineral is converted to oxide copper ores at surface and shallow depths. Magnetite is the main commodity in skarn type iron deposit. Highly altered porphyritic bodies associated with copper oxide ore were identified that are comparable, in some aspects, with porphyry type copper deposits; subsurface data, however, is required for conclusive remarks. The various types of deposits are distinguished by distinct fluid inclusion characteristics. In the vein type copper deposits, fluids in association with mineralization represent dominant homogenization temperature (Th) of 150-220 °C and salinity of 5-10 and 25-30 wt% NaCl. Fluids in the skarn type copper deposits represent 170-250 °C and ranges of 5-15 and 27-35 wt% NaCl as dominant Th and salinity, respectively. The $\delta^{34}\text{S}$ values in the vein-type copper deposits vary between +3.9 and +5‰, suggesting a magmatic origin for sulfur and probably metals (directly derived from magma or leached from magmatic rocks). Sulfur isotope ratios for two samples from Moka are +4.3 and +7.1‰, slightly different from typical magmatic $\delta^{34}\text{S}$ ranges. Oxygen and hydrogen isotope ratios for the vein-type copper deposits, measured on quartz and fluids extracted from inclusions in the mineral, are -6.6 to +1.9‰ and -79.4 to -51.8‰, respectively. This values suggest mixing of magmatic and meteoric fluids and/or fluid-rock interactions at different ratios. It appears that larger deposits have more shares of fluids with magmatic origin. With regards to the island-arc tectonic setting, recognized deposit types and ore minerals paragenesis, finding new copper and iron and probably gold deposits are possible in the Bahr Aseman area.

Keywords: Kerman magmatic belt, Bahr Aseman, Oceanic arc, Vein-type copper, Iron-copper skarn, Porphyry copper deposit, Fluid inclusion, Stable isotopes.

For Persian Version see pages 143 to 156

*Corresponding author: M. R. Hosseini; E-mail: mr.hosseini65@gmail.com