مطالعات کانی‌شناسی سرب و نقره و بررسی‌های ایزوتوپی سرب در معدن آهنگران، ملایر

احمد حسینخانی [۱*] و فاطمه ملاصالحی [۲]

[۱] دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
[۲] کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۸/ ۰۱/ ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: ۰۶/ ۰۵/ ۱۳۹۲

چکیده

معدن آهنگران از معادن سرب و نقره فعال کشور بوده که در پهنه فلززایی سرب و روی اصفهان- ملایر و در شهرستان ملایر استان همدان قرار گرفته است. مطالعات کانه‌نگاری در بخش‌های مختلف آهنگران نشان‌دهنده پهنه‌های مختلف سولفیدی و اکسیدی با کانه‌های اصلی گالن، سروسیت، کالکوپیریت، مگنتیت، پیریت، هماتیت، گوتیت و دیگر کانه‌های فرعی است. در بررسی‌های تجزیه میکروسکوپ الکترونی طی مطالعات SEM و EPMA کانه‌های فرعی سری جوردنیت- لنجنباسیت، کرونادیت و مولیبدات گالن به‌عنوان میزبان سرب و نقره (به‌صورت فرعی) برای نخستین بار در آهنگران شناسایی شدند. همچنین با مطالعات میکروسکوپ الکترونی، کانه‌های فریبرژیت (گروه فهلور) و لنائیت، به عنوان دو کانی فرعی دارای نقره به‌عنوان عنصر اصلی در شبکه کانی معرفی می‌شوند. در طی مطالعات EPMA عنصر نقره افزون بر حضور در کانه‌های فرعی، در شبکه کانی‌های گالن و سروسیت نیز تا میزان ۵۰۰ پی‌پی‌ام اندازه‌گیری شد. مطالعات ایزوتوپی سرب در یک نمونه گالن معدن آهنگران نشان می‌دهد که ترکیب ایزوتوپی سرب آن رادیوژنیک و دارای ویژگی سرب با مخزن کوهزایی است که در آن سرب به میزان زیاد از پوسته بالایی و پایینی منشأ گرفته است. سن مدل سرب بیشتر نشانگر اشتقاق سرب از پی‌سنگ‌های تریاس (۲۴۹ میلیون سال) است و نسبت‌های ایزوتوپی سرب، محیط زمین‌ساختی کمانی را برای معدن آهنگران پیشنهاد می‌کند.

کلیدواژه‌ها: ایزوتوپ سرب، رادیوژنتیک، معدن آهنگران، EPMA، SEM.

***نویسنده مسئول:** احمد حسینخانی
Email: Hosseinkhani.a@gmail.com

۱- پیش‌گفتار

معدن آهنگران از معادن سرب و نقره فعال ایران بوده که در ۲۵ کیلومتری جنوب‌خاوری ملایر، در مسیر جاده اراک- ملایر و ۳ کیلومتر پس از روستای زنگنه واقع شده است (شکل ۱).

منطقه مورد مطالعه از دید جایگاه زمین‌شناسی در پهنه سنندج- سیرجان و پهنه فلززایی سرب و روی ملایر- اصفهان قرار گرفته است. پهنه سنندج- سیرجان نوعی کافت درون‌قاره‌ای است که ماگمازایی و پدیده‌های دگرگونی، عوامل ایجاد نهشته‌های معدنی در آن هستند. بخش جنوبی این پهنه دارای کروم در اسفندقه و فاریاب، آهن در گل‌گهر، هنشک و بافت و سرب- روی- مس در چاه‌گز و قنات مروان با سن پرکامبرین پسین تا کرتاسه پیشین است. در بخش میانی کانی‌سازی اصلی سرب و روی بوده که در مناطق شمس‌آباد- نظام‌آباد، آهنگران و موته دارای بیشترین مقدار است. در بخش شمالی کانی‌سازی آهن (معدن آهن همه‌کسی شمال همدان و شمال سُنقُر)، طلا- آنتیموان (معدن داشکسن) را می‌توان نام برد (آقانباتی، ۱۳۸۳).

ناحیه ملایر- اصفهان بخشی از پهنه ساختمانی سنندج- سیرجان بوده که طی کوهزایی‌های سیمرین و آلپی در معرض نیروهای فشاری با سوی شمال خاوری- جنوب باختری قرار گرفته است. چین‌های فشرده و برگشته و چین‌های قطع‌شده توسط گسل‌های وارون از عوارض ساختاری این ناحیه هستند (Momenzadeh, 1976). کانسارهای این ایالت فلززایی به‌صورت چینه‌کران و بروندمی رسوبی (سین‌ژنتیک) تشکیل شده، همچنین برخی از انواع این کانسارها حاصل تحرک دوباره کانسارهای سین‌ژنتیک بوده که کانسارهای نوع اپی‌ژنتیک را تشکیل داده‌اند (Momenzadeh, 1976).

منطقه مورد مطالعه همچنین در زیرمجموعه دگرگونی همدان- ملایر از پهنه سنندج- سیرجان قرار دارد و دگرگونی آن به دو فاز کوهزایی لارامید و پیرنئن ارتباط داده شده است (Berberian & Alavi-Tehrani, 1977).

۲- زمین‌شناسی

معدن آهنگران از دید زمین‌شناسی در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ ملایر قرار می‌گیرد (شکل ۲) و واحدهای زمین‌شناسی آن به واحدهای مزوزوییک محدود می‌شود. در زیر به تقسیم‌بندی این واحدها پرداخته شده که تا حدی مشابه تقسیم‌بندی Majidi et al. (1997) است؛

۲- ۱. واحد تریاس بالایی- ژوراسیک

سنگ‌های این واحد معادل سازند شمشک در البرز و متشکل از میکاشیست‌هایی است که تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای درجه پایین قرار گرفته‌اند (Momenzadeh, 1976). در منطقه ملایر رخساره‌های دگرگونی شامل اسلیت، شیست، فیلیت، کوارتزیت و گاه پاراگنیس است (Hushmamdzadeh et al., 1972). این واحد توسط رسوبات کرتاسه زیرین با دگرشیبی فرسایشی پوشیده شده است.

۲- ۲. واحد کرتاسه زیرین

این واحد به‌صورت دگرشیب روی میکاشیست‌های تریاس- ژوراسیک قرار دارد و به پیشروی دریای کرتاسه زیرین (بارمین) نسبت داده شده (Seyed Emami et al., 1971)، که قابل تقسیم به زیرمجموعه‌های زیر است؛

– **واحد کنگلومرا، ماسه‌سنگ و دولومیت ماسه‌ای:** به‌طور عمده از جنس ماسه‌سنگ با میان‌لایه‌های شیل است که در بالا به دولومیت سیلیسی، دولومیت آهکی و در پایان آهک دولومیتی می‌رسد.

– **واحد آهک پلیتی (ورقه‌ای):** متشکل از آهک‌های نازک‌لایه با میان‌لایه‌های شیل و مارن به رنگ خاکستری متمایل به زرد است. فسیل‌های اوربیتولینا و رودیست در این واحد گزارش شده‌اند.

– **واحد آهک توده‌ای فاقد اوربیتولین:** متشکل از آهک میکرایتی به رنگ خاکستری تیره بوده که با درزه و شکستگی فراوان مشخص است.

– **واحد پادگانه آبرفتی و واریزه‌های سخت نشده:** شامل رسوبات کواترنری و کنگلومرای سیمان نشده است.

– **واحد دایک آندزیتی:** این دایک با ترکیب آندزیتی واحدهای کرتاسه را قطع کرده است و مرتبط با کانی‌سازی نیست.

کانی‌سازی سرب و نقره وابسته به یک افق اصلی و چند افق فرعی کرتاسه

زیرین تا میانی بوده که به‌صورت عدسی‌های بزرگ و کوچک روی هم قرار گرفته است. در برخی افق‌ها کانی‌سازی مس نیز دیده می‌شود. همچنین در افق‌های بالاتر معدن باندهای ستبر آهن به‌صورت هماتیت و گوتیت دیده می‌شود که به‌طور چیره از اکسیدشدگی کانه‌های اولیه مانند پیریت و مگنتیت تشکیل شده‌اند.

در ارتباط با ژنز معدن آهنگران از نوع کانسارهای بروندمی رسوبی معرفی شده که در چهار مرحله سین‌ژنتیک برونزاد (سوپرژن)، سین‌ژنتیک درونزاد (هیپوژن)، اپی‌ژنتیک برونزاد و اپی‌ژنتیک درونزاد تشکیل یافته است (زمانیان، ۱۳۷۲). همچنین منشأ سیال کانه‌ساز آب دریا و گرمای آن مربوط به فعالیت‌های ماگمایی همزمان است (زمانیان، ۱۳۷۲).

در این مقاله با توجه به اهمیت دو عنصر اصلی سرب و نقره در معدن آهنگران به کانی‌شناسی و به‌ویژه کانی‌شناسی کانی‌های کمیاب و میزبان نقره و همچنین بررسی ترکیب ژئوشیمیایی این کانی‌ها پرداخته شده است. در مطالعات SEM و EPMA افزون بر مشخص کردن کانی‌های ناشناس، جایگاه عنصر باارزش نقره در معدن آهنگران بررسی شده است. همچنین با تجزیه ایزوتوپی سرب به بررسی منشأ، سن مدل و محیط زمین‌ساختی معدن آهنگران پرداخته می‌شود.

۳–کانه‌نگاری

بر پایه مطالعه ۵۵ مقطع صیقلی تهیه شده از بخش‌های مختلف معدن آهنگران کانه‌های فلزی آن به سه دسته قابل تقسیم هستند؛

– **کانی‌های درونزاد:** شامل کانی‌های اصلی گالن، پیریت، مگنتیت، کالکوپیریت و به‌طور فرعی کانی‌های اسفالریت، پیروتیت، مارکاسیت، بورنیت، ایلمنیت، تتراهدریت و فریبرژیت (گروه فهلور)، بورنونیت.

– **کانی‌های برونزاد:** شامل کالکوسیت و به‌طور فرعی کوولیت.

– **کانی‌های پهنه اکسیدان:** دارای فراوانی به‌نسبت بالا بوده و شامل اکسیدهای آهن (گوتیت، هماتیت، لپیدوکروسیت، کروناديت)، کانی‌های ثانویه سرب (سروسیت، آنگلزیت)، کانی‌های کربناتی مس (مالاکیت، آزویت) و اکسیدهای منگنز است. در زیر به کانه‌نگاری مقاطع صیقلی دارای سرب و نقره به دلیل اهمیت آنها در آهنگران پرداخته شده است. در جدول ۱ نیز توالی تشکیل کانی‌های مختلف در آهنگران ارائه شده است.

۳–۱. کانه‌های سرب

فراوان‌ترین کانه سرب در معدن آهنگران گالن است که به‌صورت توده‌ای، افشان، رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی دیده می‌شود. گالن گاهی دارای ادخال‌هایی از کانی‌های سولفیدی و سولفوسالتی مانند پیریت، کالکوپیریت، تتراهدریت و فریبرژیت است. در بخش‌هایی از کانسنگ پیچش‌هایی در رخ‌های مثلثی گالن در اثر پدیده‌های زمین‌ساختی دیده می‌شود. در پهنه‌های اکسیدی معدن، گالن به‌طور چیره به سروسیت و گاهی آنگلزیت تبدیل شده است. میزان تبدیل‌شدگی از گالن با تبدیل‌شدگی جزیی در حاشیه، تا تبدیل‌شدگی کامل به سروسیت متغیر است (شکل ۳- الف). فازهای دیگر سرب‌دار در آهنگران کانی‌های اکسیدی منگنز- سرب مانند کانی کروناديت با فرمول $Pb\ (Mn, Mn)_8O_{16}$ است که در مطالعات میکروسکوپی و همچنین EPMA شناسایی شده است. این کانی با بافت کلوفرم و به شکل همرشدی با گوتیت دیده شد (شکل ۳- ه، مقایسه شود با Pracejus (2008)، ص ۶۹۷). کانی‌های کمیاب سرب نیز در مطالعات SEM شناسایی شدند. در بخش‌هایی از معدن میانبارهایی از کانی‌هایی همچون فریبرژیت و کانه‌های سولفوسالتی به‌همراه گالن دیده می‌شود (شکل ۳- ج).

۳–۲. کانه‌های نقره

میزان عنصر نقره در بخش‌های پرعیار معدن تا ppm ۷۰۰ می‌رسد. کانی‌های میزبان نقره بیشتر در مطالعات SEM و EPMA مشخص شد که به شرح آنها پرداخته شده است.

۳–۳. پهنه اکسیدان آهن

در افق‌های بالایی معدن آهنگران بیشتر اکسیدهای آهن ثانویه مانند هماتیت، گوتیت و گاهی لپیدوکروسیت در حجم وسیع دیده می‌شود. طی مطالعات میکروسکوپی دو منشأ اکسیدشدگی پیریت و مگنتیت برای اکسیدهای آهن ثانویه مشخص شد (شکل‌های ۳- د و و). همچنین کانی‌های کربناتی سرب، اکسیدهای منگنز- سرب و همچنین باریت نیز در این بخش به فراوانی دیده می‌شود.

۳–۴. سولفیدهای مس

سولفیدهای مس به‌طور فراوان در بخشی از معدن، که با نام غار سلیمان شناخته می‌شود، دیده می‌شوند و بیشتر شامل کالکوپیریت و به مقدار کمتر بورنیت بوده که در بخش‌هایی به اکسیدهای آهن و کانی‌های برونزاد مس (کالکوسیت و کوولیت) تبدیل شده‌اند (شکل ۳- ب). به نظر می‌رسد که سولفیدهای مس در ارتباط با مراحل اپی‌ترمال در آهنگران تشکیل شده‌اند.

۴– مطالعات میکروسکوپ الکترونی SEM

در ادامه مطالعات کانی‌شناسی و جایگاه عنصر نقره در کانی‌ها، تجزیه SEM (Scanning Electron Microscope) با مطالعه ۶ مقطع صیقلی و انتخاب ۴ مقطع و روی چهار ناحیه میکروسکوپی انجام شد. این تجزیه‌ها در مرکز متالوژی رازی توسط دستگاه VEGA\TESCAN-XMU با قابلیت تجزیه کیفی و نیمه‌کمی به‌روش EDS و ساخت کشور آمریکا انجام گرفت. نواحی تجزیه‌شده در مطالعات SEM مناطق بسیار کوچک روی کانی‌های مشکوکی بودند که در مطالعات میکروسکوپی تعیین شده بود.

محل برداشت نمونه در مطالعات SEM و همچنین EPMA کارگاه‌های استخراجی و همچنین تونل‌ها بود که در شکل ۷ محل نمونه‌برداری برای مطالعات میکروسکوپ الکترونی روی تصویر Google Earth محدوده معدن نشان داده شده است.

در این مطالعات ۳ کانی مهم و میزبان عنصر نقره در آهنگران شناسایی شد:

از کانی‌های تجزیه‌شده در مطالعات SEM، کانی سفیدرنگ متمایل به خاکستری با انیزوتروپی شدید در مطالعات کانه‌نگاری بود. این کانی در دو ناحیه تجزیه شد و نتایج تجزیه آن در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است عناصر گوگرد (S)، آنتیموان (Sb) و سرب (Pb) عناصر اصلی در شبکه کانی هستند. همچنین درصد وزنی نقره در شبکه کانی ۱/۰۷ درصد است. با تقسیم درصد وزنی عناصر اصلی به عدد جرمی، نسبت مولی S/Pb/Sb در فرمول کانی‌شناسی برابر با 0.59/0.31/0.14 به‌دست آمد. با مقایسه این نسبت‌ها با فرمول کانی‌ها، این کانی مربوط به سری Jordanite-Lengenbachite است. سری جوردنیت- لنجباسیت با فرمول $Pb_{14}(Sb,As)_6S_{23}$ در دولومیت‌های دگرگون‌شده سرب‌دار یافت می‌شود (Pracejus, 2008) و آنتیموان و آرسنیک با مقادیر متفاوت در این کانی جایگزین یکدیگر می‌شوند. نسبت عناصر این کانی در آهنگران با سری جوردنیت- لنجباسیت کاملاً همخوانی دارد و همچنین دولومیت‌های دگرگون‌شده که معرف سنگ میزبان جوردنیت- لنجباسیت است، در آهنگران نیز میزبان این کانی هستند. نقره در این کانی به‌صورت جایگزینی در شبکه بلوری است. عنصر فرعی دیگر اندازه‌گیری‌شده در این کانی مس است.

کانی فرعی دیگر میزبان نقره در آهنگران فریبرژیت است که در مطالعات SEM شناسایی شد. عناصر گوگرد، مس، مولیبدن، نقره و آنتیموان عناصر اصلی اندازه‌گیری‌شده در این کانی هستند (شکل ۵). با محاسبه مقدار مول این عناصر نسبت S/Cu/Mo/Sb/Ag در فرمول این کانی به‌ترتیب برابر با 0.45/0.37/0.16/0.2/0.14 بوده که با فرمول کانی فریبرژیت $(Ag, Cu, Fe)_{12}(Sb,As)_4S_{13}$ همخوانی دارد.

از نکات دارای اهمیت در فریبرژیت میزان نقره بالای آن (۱۴/۷۹درصد) و به‌صورت عنصر اصلی در شبکه بلوری کانی است. عنصر آهن در کانی فریبرژیت به‌صورت فرعی و به میزان ۴/۲۴ درصد اندازه‌گیری شده است (شکل ۵).

کانی شناسایی‌شده دیگر در مطالعات SEM کانی مولیبدات گالن (مولیبدات سرب) بوده که عناصر اصلی این کانی گوگرد، سرب و مولیبدن است. مولیبدات گالن دارای ۱/۳۳ درصد وزنی نقره است. بنابراین این کانی به عنوان یکی دیگر از کانی‌های میزبان نقره در معدن آهنگران معرفی می‌شود.

نسبت عناصر S/Pb/Mo در فرمول این کانی به‌ترتیب 0.15/0.36/0.19 است (شکل ۶).

در مجموع با مطالعات میکروسکوپ الکترونی SEM چنین دریافت می‌شود که بخشی از نقره در آهنگران به‌صورت جایگزینی در کانی‌های فرعی است. گروهی از این کانی‌ها مانند تتراهدریت و فریبرژیت که گروه فهلور نامیده می‌شوند نیز در آهنگران میزبان عنصر نقره هستند. کانی‌های گروه فهلور پیش‌تر نیز در آهنگران گزارش شده‌اند (زمانیان، ۱۳۷۲). در فهلورها با فرمول کلی $(Cu,Ag)_{10}(Fe,Zn)_2(Sb,As)_4S_{13}$ جایگزینی عناصر Ag به جای Cu، Zn به جای Fe و As به جای Sb صورت می‌گیرد (Sack et al., 2005). همچنین فهلورهای مس طی واکنش زیر غنی از نقره می‌شوند (Sack, et al., 2005):

$$1/10Cu_{10}(Zn,Fe)_2Sb_4S_{13}(Cu\text{-}Fahlor)+AgSbS_2+PbS(Galena)=$$
$$CuPbSbS_3(Bournonite)+1/10Ag_{10}(Zn,Fe)_2Sb_4S_{13}(Ag\text{-}Fahlor)$$

در این واکنش کانی بورنونیت نیز تشکیل می‌شود، که این کانی نیز توسط زمانیان (۱۳۷۲) در معدن آهنگران گزارش شده است. این جایگزینی که با نام اثر فهلور (Fahlor Effect) نامیده می‌شود (Robbins et al., 1971) نیز فرایندی مؤثر در غنی شدن کانی‌های فریبرژیت و تتراهدریت از نقره در آهنگران است. فهلورهای غنی از نقره در معادن با مقادیر زیاد گالن محصول مراحل پیشرونده تفریق سیال (Hackbarth & Petersen, 1984) و یا نتیجه واکنش‌های پسرونده با گالن (Sack et al., 2002) هستند.

۵- مطالعات ریزکاوالکترونی (EPMA)

تجزیه EPMA در ۶۰ نقطه بر روی ۴ مقطع صیقلی در مرکز تحقیقات و فراوری مواد معدنی ایران با دستگاه الکترون مایکروپرو مدل SX100 و مجهز به سامانه EDS، ساخت کشور فرانسه انجام شد. این مطالعات به منظور شناسایی کانی میزبان نقره در آهنگران انجام شد. در شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی برخی از کانه‌های مورد آنالیز ارائه شده است.

مطالعات EPMA نشان می‌دهد که کانی‌های گالن و سروسیت دارای مقادیری نقره در شبکه کانی‌شناسی خود هستند. متوسط درصد وزنی سرب در این دو کانی ۸۲/۷ درصد و گوگرد ۱۱/۶ درصد است. عنصر نقره تا بیش از ۵۰۰ پی‌پی‌ام در فازهای سرب‌دار اندازه‌گیری شد. همچنین همبستگی مثبت بین عناصری مانند Sb با Ag در کانی‌های سرب‌دار آهنگران مشخص شد. حضور نقره در کانی گالن در کانسارهای مهم دیگر در دنیا مانند کانسارهای کمربند نقره مکزیک و کانسارهای رگه‌ای پرو نیز گزارش شده است (Lueth et al., 2000; Chutas & Sack, 2004; Hackbarth & Petersen, 1984).

عناصر فرعی دیگر اندازه‌گیری شده در گالن و سروسیت شامل آنتیموان با میانگین ۰/۱ درصد، منگنز با میانگین ۰/۰۲ درصد، مس با میانگین ۰/۰۱ درصد و به مقدار جزیی آرسنیک است.

افزون بر کانی‌های اصلی سرب، کانه‌های اکسیدی و سولفیدی سرب-منگنز نیز در پهنه اکسیدان معدن آهنگران میزبان عنصر نقره هستند. از جمله این کانی‌ها کانی کرونادیت بوده (شکل ۸-ج) که در مطالعات میکروسکوپی به‌صورت همرشدی با گوتیت مشاهده شده است. میانگین مقدار منگنز در کانی کرونادیت ۴۳/۷ و سرب حدود ۲۲ درصد اندازه‌گیری شد. عناصر فرعی اندازه‌گیری‌شده در این کانی به‌صورت میان‌شبکه‌ای Fe، Cu، As و Sb هستند و عنصر نقره تا ppm۲۰۰ در این کانی اندازه‌گیری شد.

کانی مهم دیگر میزبان نقره در آهنگران لنائیت (Lenaite با فرمول $AgFeS_2$) نیز تنها در یک نقطه در مطالعات EPMA شناسایی شد (شکل ۸- د). میانگین عناصر نقره، آهن و گوگرد در کانی لنائیت به‌ترتیب ۴۶٪، ۲۰٪ و ۲۸٪ بوده و نسبت مولی Ag/Fe/S برابر با 0.42/0.35/0.87 است. عناصر Mn، Si و Pb عناصر فرعی اندازه‌گیری‌شده در کانی لنائیت هستند.

۶- مطالعات ایزوتوپی سرب

به دلیل تشابه رفتار ژئوشیمیایی سرب با عناصر دیگر مانند روی، نقره، مس و ...، از ایزوتوپ‌های سرب به‌عنوان ابزاری مهم در راستای شناسایی منشأ فلزات (گوشته‌ای یا پوسته‌ای) در محلول‌های گرمابی غنی از فلزات پایه استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از این ایزوتوپ‌ها می‌توان محیط زمین‌ساختی کانسارها را تعیین کرد.

در این مطالعه به دلایل زیر یک نمونه گالن برای مطالعه ایزوتوپی سرب انتخاب شد:

- ایزوتوپ‌های سرب سنگین هستند و برخلاف ایزوتوپ‌های سبک در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی توسط فرایندهای دما پایین آلی و غیر آلی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند (Doe, 1970; Gulson & Mizon, 1979) و فرایند جدایش ایزوتوپی در آنها رخ نمی‌دهد.
- در کانسارهای غنی از سرب (مانند معدن آهنگران) به دلیل بالا بودن مقدار سرب در مقایسه با ایزوتوپ‌های مادر، واپاشی رادیواکتیو اورانیم و توریم به سرب نمی‌تواند مشخصه‌های ایزوتوپ سرب زمان ته‌نشست کانسنگ را تغییر دهد، بنابراین ترکیب ایزوتوپ سرب کانسار با گذشت زمان و تحت تأثیر عوامل مختلف ثابت مانده و همانند ترکیب ایزوتوپ سرب زمان کانه‌زایی است (Gulson, 1986).
- به‌دلیل مقادیر فراوان سرب در گالن، نسبت‌های ایزوتوپی سرب به آسانی تحت تأثیر آلودگی و خطاهای مرتبط قرار نمی‌گیرند.
- هزینه تجزیه ایزوتوپی سرب به‌نسبت بالاست.

ترکیب ایزوتوپی سرب معدن آهنگران با برداشت یک نمونه گالن برای تجزیه ایزوتوپی سرب مورد بررسی قرار گرفت. برداشت گالن از بخش اصلی پهنه سولفوره کانسنگ انجام گرفت و مقدار ۵ تا ۱۰ میلی‌گرم گالن خالص برای تجزیه جدا شد. اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی سرب گالن توسط دستگاه Isoprobe multicollector- ICP- MS درآزمایشگاه ایزوتوپ‌های رادیوژنیک دانشگاه آلبرتا در کشور کانادا انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

همان‌گونه که در جدول ۱ مشخص است ترکیب ایزوتوپی سرب معدن آهنگران رادیوژنیک بوده و بر پایه نمودار Stacey & Kramers (1975) در بالای منحنی رشد سرب پوسته میانگین (Sk) جای می‌گیرد (شکل ۹- الف). این ویژگی دلیلی بر بالاتر بودن میزان $^{207}Pb/^{204}Pb$ آهنگران نسبت به مقادیر پوسته میانگین بوده و گویای محتوای بالای سرب با ویژگی پوسته قدیمی است. داده‌های ایزوتوپی مربوط به معدن آهنگران در نمودار زمین‌ساختی نسبت‌های سرب (Zartman & Doe, 1981) بین منحنی کوهزایی و پوسته بالایی قرار می‌گیرد (شکل ۹- الف) که بر تأمین سرب به میزان متفاوت از منشأ پوسته‌ای و گوشته‌ای و آمیختگی آنها طی فرایندهای کوهزایی تأکید می‌کند. همچنین بالا بودن مقادیر μ و k نشان‌دهنده مقادیر بالای سرب پوسته بالایی و پایینی و ناچیز بودن سرب گوشته‌ای است. با توجه به اینکه سن مدل سرب (۲۴۹ میلیون سال؛ تریاس) قدیمی‌تر از سنگ میزبان است، بنابراین بر پایه سن مدل چنین به نظر می‌رسد که سرب به میزان زیاد از پی‌سنگ‌های دگرگون‌شده تریاس اشتقاق یافته است.

همان‌گونه که در شکل ۹- الف دیده می‌شود داده ایزوتوپی سرب معدن آهنگران

در محدوده داده‌های ایزوتوپی سرب مربوط به تعدادی از کانسارهای سرب و روی محور ملایر- اصفهان (Mirnejad et al., 2011) قرار می‌گیرد و می‌توان گفت داده‌های به‌دست آمده در این پژوهش با داده‌های ایزوتوپی پیشین گزارش‌شده مربوط به کانسارهای سرب و روی محور ملایر- اصفهان همخوانی دارد. همچنین این امر نشانگر بزرگ بودن مخزن کانه‌زایی در معدن آهنگران و کل منطقه ملایر- اصفهان است. بر پایه مدل زمین‌ساخت سرب (Doe & Zartman, 1979; Zartman & Doe, 1981) یکی از محیط‌های اصلی شکل‌گیری مخزن، کوهزایی در مناطق کمانی بوده که جزو مناطق فعال زمین‌ساختی است. در نمودارهای زمین‌ساخت سرب، داده‌های ایزوتوپی سرب معدن آهنگران به‌همراه دیگر داده‌های پیشین مربوط به کانسارهای سرب و روی کمربند ملایر- اصفهان (Mirnejad et al., 2011) در محدوده کمان بالغ جای می‌گیرند (شکل‌های ۹- ب و ج). بنابراین چنین دریافت می‌شود که محیط زمین‌ساختی تشکیل معدن که محیط کمان بالغ بوده است، به‌دنبال فرورانش پوسته اقیانوسی نوتتیس به زیر پوسته پهنه سنندج- سیرجان تشکیل شده است. این نظریه با نظریات پیشین، که محیط زمین‌ساختی تشکیل سنندج- سیرجان را محیط کمانی معرفی کرده‌اند (Berberian & King, 1981; Berberian, 1983) نیز سازگار است.

با توجه به موقعیت قرارگیری داده‌های ایزوتوپی معدن آهنگران نسبت به منحنی پوسته میانگین (Stacey & Kramers, 1975) و منحنی‌های زمین‌ساخت سرب (Doe & Zartman, 1979) و همچنین رخداد کانه‌زایی در سنگ‌های کربناتی کرتاسه می‌توان از عملکرد رویدادهای زمین‌ساختی پس از کرتاسه بالایی و ستبرشدگی پوسته‌ای در پی آن، به عنوان عوامل تحرک دوباره سرب از منابع کهن‌تر از کرتاسه و کانه‌زایی بعدی در سنگ‌های کربناتی کرتاسه نام برد.

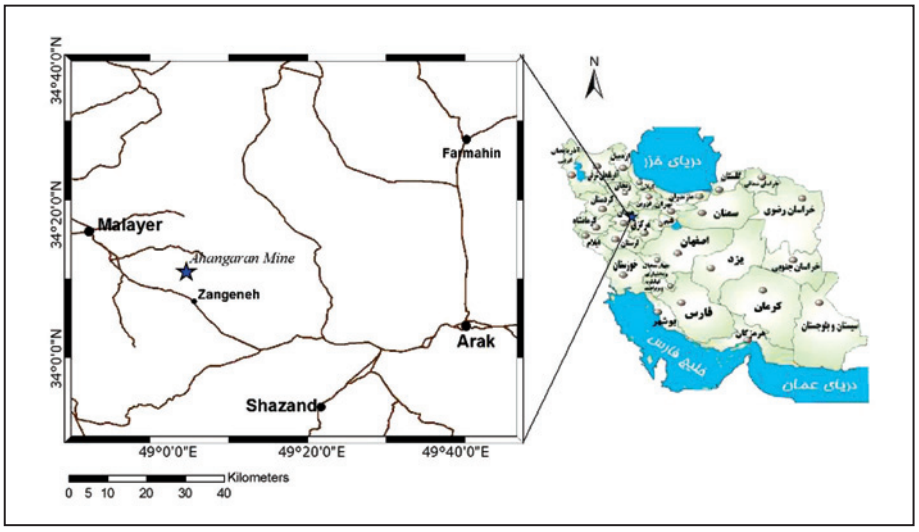
۷- نتیجه‌گیری

مطالعات کانه‌نگاری در معدن آهنگران نشانه روابط بافتی مختلف میان کانه‌های سرب، نقره، آهن، مس و منگنز است. با توجه به اهمیت دو عنصر سرب و نقره به عنوان دو عنصر باارزش در آهنگران، مطالعات تجزیه‌های میکروسکوپ الکترونی روی کانه‌های مختلف انجام گرفت. این مطالعات نشان می‌دهد که گالن دارای مقداری نقره به‌صورت میان‌شبکه‌ای است که پس از تبدیل بخشی به سروسیت، نقره در سروسیت نیز باقی مانده است. افزون بر گالن، کانه‌های فرعی سرب مانند کرونادیت، مولیبدات گالن و سری جوردنیت- لنجنباسیت میزبان سرب و به‌طور فرعی نقره در آهنگران هستند. این کانی‌ها برای نخستین بار در معدن آهنگران گزارش می‌شوند. همچنین کانی‌های فریبرژیت، تتراهدریت (فهلورها) و لنائیت دارای نقره به‌صورت عنصر اصلی در شبکه هستند.

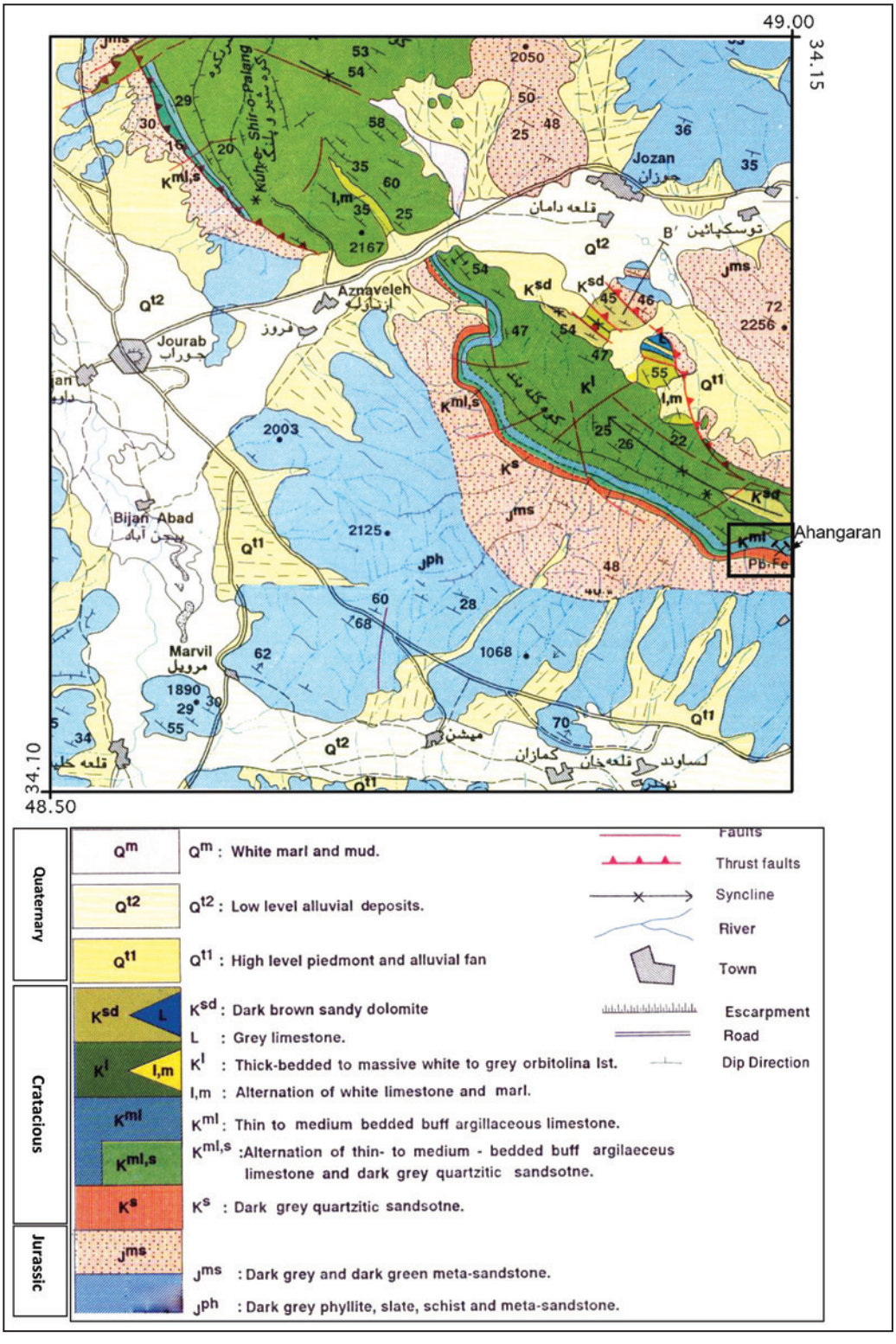
تجزیه ایزوتوپی سرب در یک نمونه گالن کانسار آهنگران نشانگر جدایش سرب از منشأ رادیوژنیک با میزان بالای U/Pb و Th/Pb است. بر پایه سن مدل سرب به نظر می‌رسد که پی‌سنگ‌های کهن و دگرگون شده تریاس نقش مهمی را در تأمین سرب به عهده داشته‌اند و کانه‌زایی پس از کرتاسه در اثر تحرک دوباره سرب از منشأهای کهن‌تر رخ داده است. با توجه به محیط زمین‌ساختی کمانی و اشتقاق سرب از منشأ کوهزایی می‌توان چنین دریافت کرد که فعالیت‌های کوهزایی و زمین‌ساختی پهنه سنندج- سیرجان در زمان مزوزوییک و پس از آن در تحرک دوباره سرب از منشأ کهن و کانه‌زایی در سنگ‌های کربناتی نقش مهمی داشته که معدن آهنگران نمونه آشکاری از این کانی‌سازی است.

سپاسگزاری

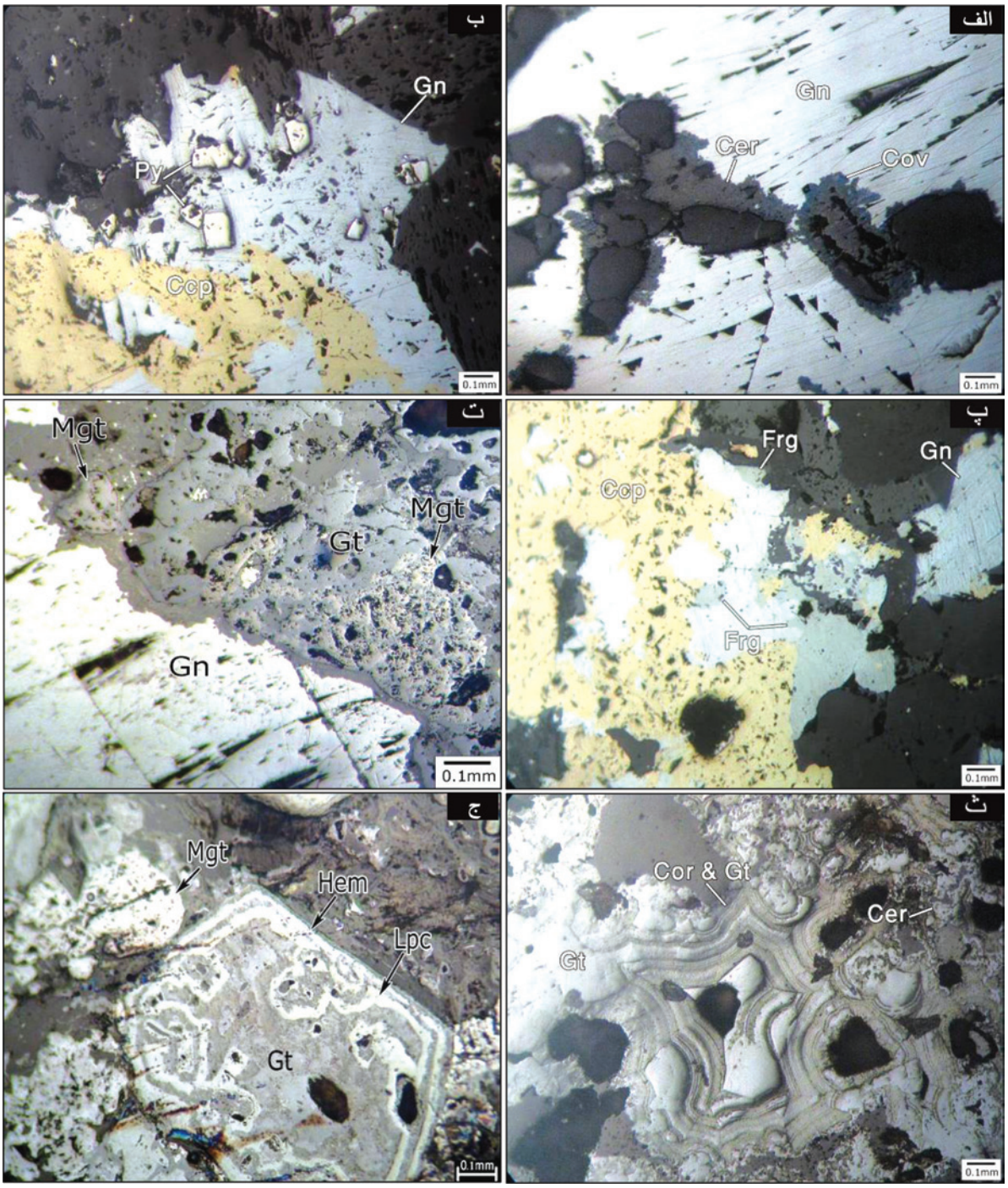
از شرکت معادن سرمک و همچنین آزمایشگاه ایزوتوپ‌های رادیوژنیک دانشگاه آلبرتا سپاسگزاری می‌شود.



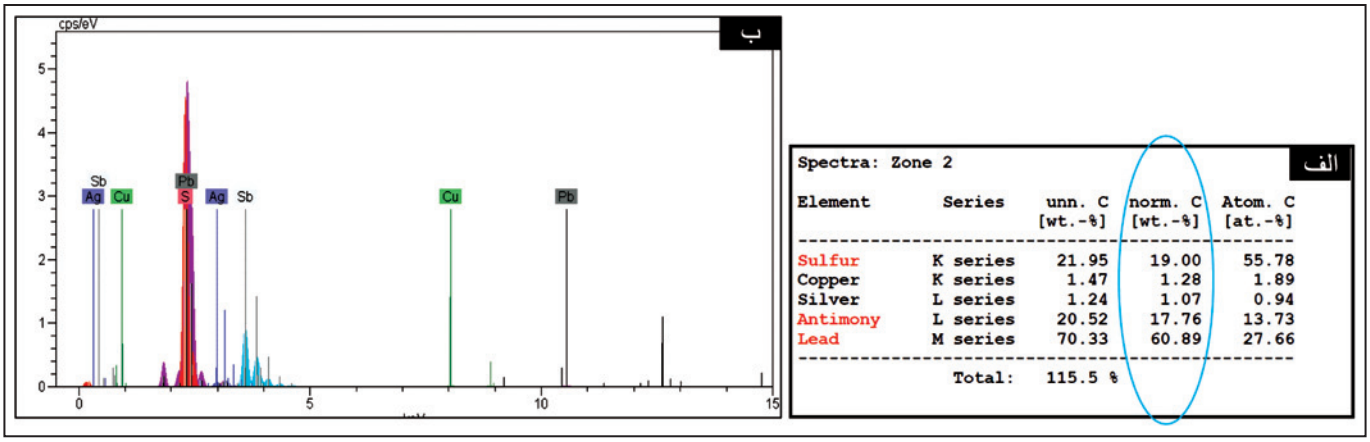
شکل ۱- موقعیت معدن آهنگران و راه‌های دسترسی به آن.



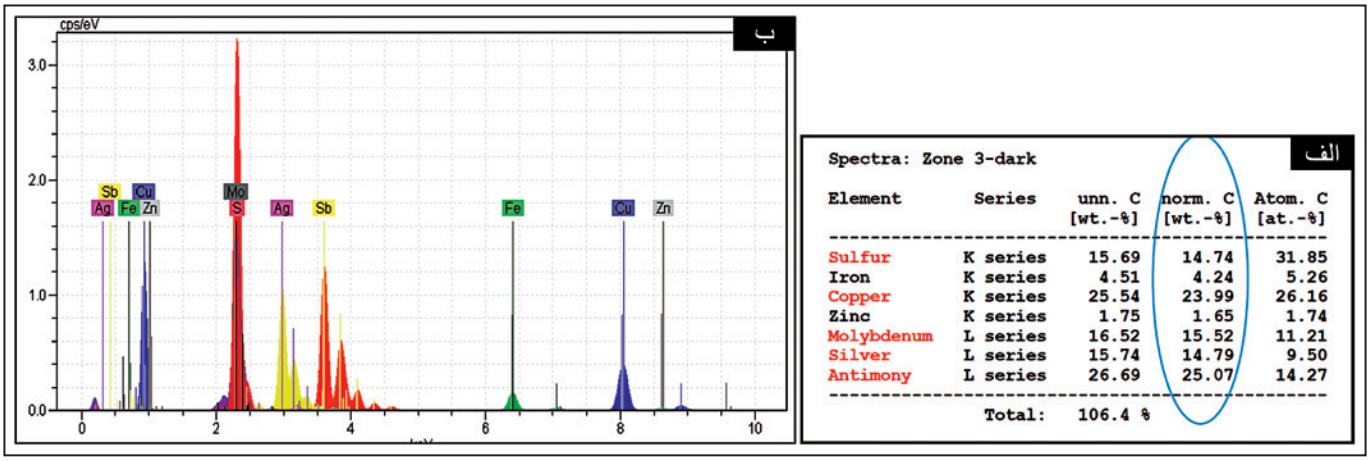
شکل ۲- بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ملایر که موقعیت معدن آهنگران روی آن قرار گرفته است (برگرفته از جعفریان و زمانی‌پدرام، ۱۳۷۸).



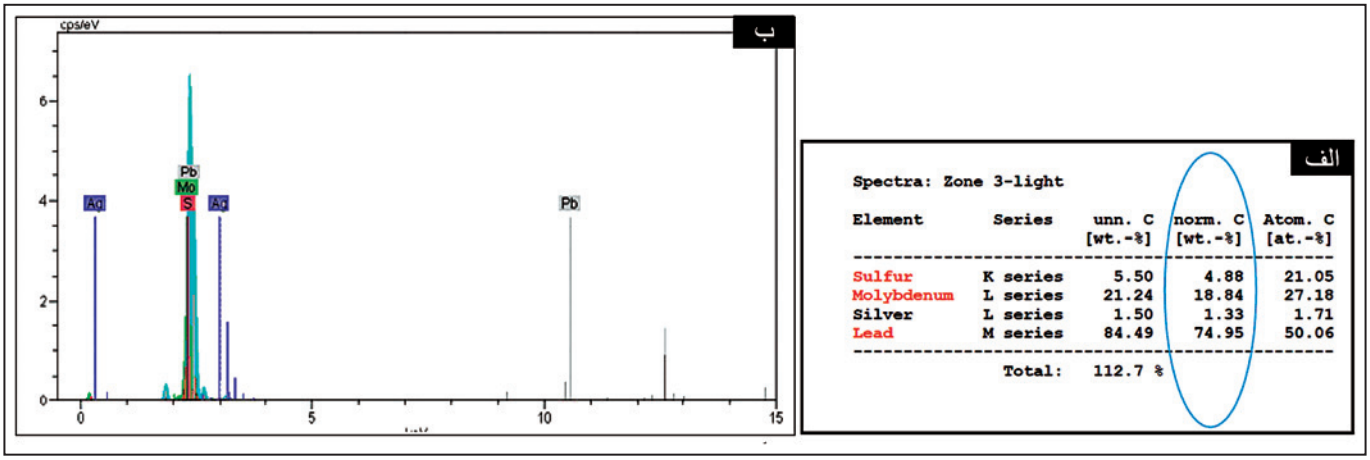
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی کانه‌های معدن آهنگران در نور بازتابی؛ الف) گالن به‌صورت توده‌ای که از حاشیه سروسیتی شده و همچنین کوولیت در حاشیه آن جایگزین شکل همرشدی با فریبرژیت که توسط کالکوپیریت‌شده است؛ ب) گالن که بلورهای پیریت را دربر گرفته و خود توسط رگچه کالکوپیریت قطع شده است؛ پ) گالن به همراه آنها سروسیت نیزطور بخشی به گوتیت تبدیل شده است؛ ث) گوتیت در تناوب با کرونادیت با بافت کلوفرم که به‌قطع شده است؛ ت) بخش‌هایی که مگنتیت به دیده می‌شود؛ ج) قالب بلوری پیریت که به اکسیدهای آهن ثانویه (هماتیت، گوتیت و لپیدوکروسیت) تبدیل و در بالا نیز مگنتیت تا حدی به هماتیت تبدیل شده است. (Gn= Galena, Ccp= Chalcopyrite, Py= Pyrite, Mgt= Magnetite, Cer= Cerussite, Cov= Covellite, Frg= Feribergite, Gt= Goethite, Hem= Hematite, Lpc= Lepidocrosite, Cor= Cronadite).



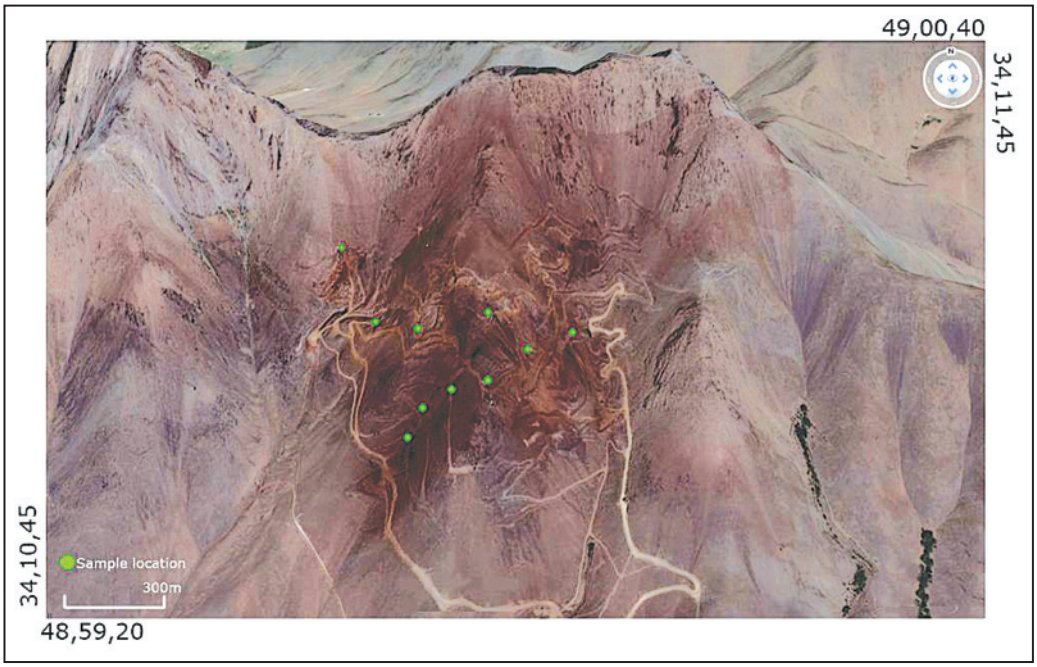
شکل ۴- الف) نتایج تجزیه SEM و عناصر اصلی اندازه‌گیری‌شده روی کانی مربوط به سری جوردنیت- لنجنباسیت؛ ب) طیف عناصر اندازه‌گیری‌شده در کانی سری جوردنیت- لنجنباسیت به‌همراه عناصر اندازه‌گیری‌شده در آن.



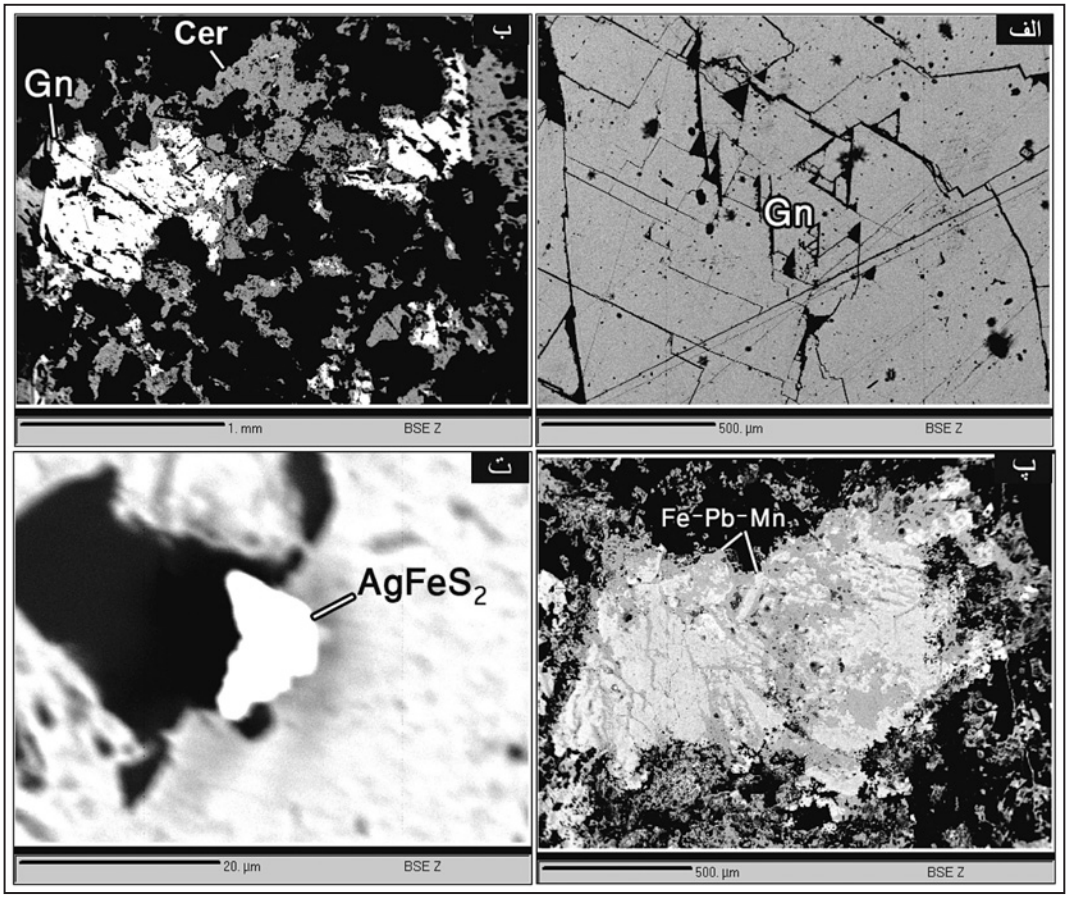
شکل ۵- الف) نتایج تجزیه SEM و عناصر اصلی اندازه‌گیری‌شده در کانی فریبرژیت؛ ب) طیف عناصر اندازه‌گیری‌شده مربوط به فریبرژیت در معدن آهنگران.



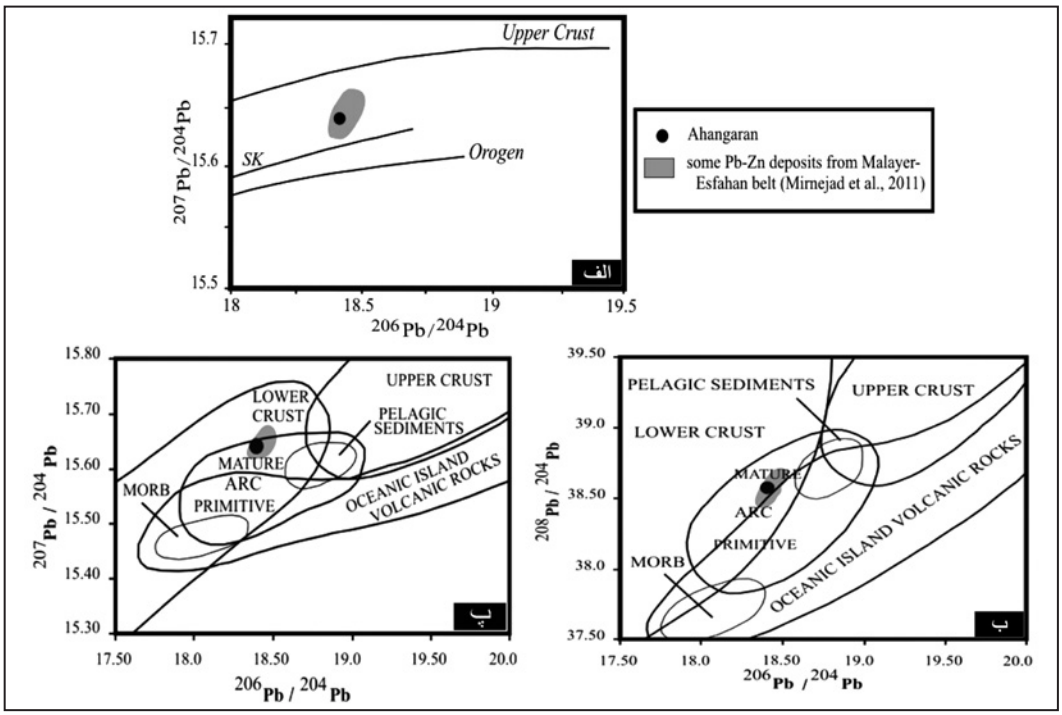
شکل ۶- الف) نتایج تجزیه SEM و عناصر اصلی اندازه‌گیری‌شده در کانی مولیبدات گالن؛ ب) طیف عناصر اندازه‌گیری‌شده مربوط به مولیبدات گالن در معدن آهنگران.



شکل ۷- تصویر ماهواره‌ای معدن آهنگران و موقعیت برداشت نمونه برای مطالعات میکروسکوپ الکترونی (تصویر برگرفته از Google Earth).



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ الکترونی (BSE) از بخش‌های مهم کانی‌سازی سرب- نقره معدن آهنگران که تجزیه نقطه‌ای روی آنها انجام شده است. الف) کانی گالن به‌صورت توده‌ای که میزبان نقره به‌صورت بین شبکه‌ای است؛ ب) گالن (Gn) که به‌طور بخشی به سروسیت (Cer) تبدیل شده است. در هر دو کانی عنصر نقره اندازه‌گیری شده است؛ پ) درهمرشدی کانی‌های سرب- آهن- منگنزدار (Fe-Pb-Mn) میزبان نقره در معدن آهنگران؛ ت) کانی لنائیت ($AgFeS_2$) با رنگ سفید و بازتاب بالا که دارای مقادیر بالای عنصر نقره در ترکیب خود است.



شکل ۹- الف) نمایش داده ایزوتوپی سرب معدن آهنگران نسبت به منحنی سرب پوسته میانگین (Stacey & Kramers, 1975) و منحنی کوهزایی و پوسته بالایی (Doe & Zartman, 1979)؛ ب و پ) نمایش نسبت‌های ایزوتوپ سرب کانسار آهنگران در نمودار زمین‌ساخت سرب (Zartman & Doe, 1981) که در محیط کمان بالغ قرار گرفته است. در این نمودارها موقعیت داده‌های ایزوتوپی معدن آهنگران با موقعیت داده‌های ایزوتوپی گزارش‌شده مربوط به برخی از کانسارهای سرب و روی محور ملایر- اصفهان (Mirnejad et al., 2011) مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۱- توالی تشکیل کانی‌های مختلف در معدن آهنگران.

	نام کانی	مراحل اولیه پاراژنز	مراحل پایانی پاراژنز
کانی‌های فلزی	پیریت		
	کالکوپیریت		
	پیروتیت		
	اسفالریت		
	فریبرژیت، لنائیت		
	مگنتیت		
	بورنیت		
	تتراهدریت		
	گالن		
	جوردنیت- لنجنباسیت		
	مولیبدات گالن		
	کرونادیت		
	کالکوسیت		
	کوولیت		
	کربنات‌های سرب		
	کربنات‌های مس		
	اکسیدهای آهن		
	اکسیدهای منگنز		
کانی‌های غیر فلزی	باریت		
	کلسیت		
	دولومیت		
	کوارتز		
	بیوتیت و کلریت		

جدول ۲- نتایج تجزیه ایزوتوپی سرب نمونه گالن معدن آهنگران.

نسبت ایزوتوپی	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$	Model age (Ma)	μ ($^{238}U/^{204}Pb$)	k ($^{232}Th/^{238}U$)
مقدار	18.407± 0.003	15.641 ± 0.003	38.571 ± 0.011	249	9.858	3.95

کتابنگاری

آقانباتی، س. ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۶۰۶ ص.

جعفریان، م. ب.، و زمانی‌پدرام، م.، ۱۳۷۸- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ملایر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور.

زمانیان، ح.، ۱۳۷۲- کانی‌شناسی، پاراژنز و نحوه تشکیل کانسار نقره و سرب آهنگران، ملایر. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه تربیت معلم، ۲۸۰ص.

References

Berberian, M. & Alavi-Tehrani, N., 1977- Structural analyses of Hamadan metamorphic tectonites: A paleo tectonic discussion. Geological and mining survey of Iran, Report No. 40, 279p.

Berberian, M. & King, G. C. P., 1981- Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Can. J. Earth. Sci, v.18, p.210- 265.

Berberian, M., 1983- The southern Caspian: A compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust. Canadian Journal of Earth Sciences, 20, p.163–183.

Chutas, N. I. & Sack, R. O., 2004- Ore genesis at La Colorada Ag-Zn-Pb deposit in Zacatecas, Mexico. Mineralogical Magazine, 68, 923.937.

Doe, B. R. & Zartman, R. E., 1979- Plumbotectonics I: The Phanerozoic, in Barnes, H.L., ed., Geochemistry of hydrothermal ore deposits, second edition: New York, John Wiley, p.22–70.

Doe, B. R., 1970- Lead Isotopes, Springer, 137 p.

Gulson, B. L. & Mizon, K. J., 1979- Lead isotopes as a tool for gossan assessment in base metal exploration. J. Geochem. Explor., 11: p.299-320.

Gulson, B. L. 1986- Lead Isotopes in Mineral Exploration. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 245p.

Hackbarth, C. J. & Petersen, U., 1984- Systematic compositional variations in argentian tetrahedrite. Economic Geology, 79, 448-460.

Hushmamdzadeh, A., Majidi, B., Alavi-Tehrani, N. & Berberian, M., 1972- The study of Deformation phase and metamorphism in Shahrekord-Sanandaj zone. Geol. Sur. of Iran, Tnternal rep. (Text in persian), 20p.

Lueth, V. W., Megaw, P. K. M., Pingatore, N. E. & Goodell, P. C., 2000- Systematic variation in galena solid solution at Santa Eulalia, Chihuahua, Mexico.Economic Geology, 95, 1673.1687.

Majidi, B., Alavi-Tehrani, N., Anidi, M., & Ghorashi, M., 1997- Geological quadrangle map of Hamadan. Geo. Surv. of Iran.

Mirnejad, H., Simonetti, A. & Molasalehi, F., 2011- Pb isotopic compositions of some Zn–Pb deposits and occurrences from Urumieh–Dokhtar and Sanandaj–Sirjan zones in Iran, Ore geology reviews 39, 181-187.

Momenzadeh, M., 1976- Stratabound lead-zinc ores in the lower cretaceous and jurassic sediments in the Malayer-Esfahan district. Diss. Univ, Haidelberg. 300p.

Pracejus, B., 2008- The ore minerals under the microscope, an optical guid, Atlases in Geoscience 3, 875p.

Robbins, M., Wertheim, G. K., Sherwood, R. C. & Buchanan, D. N. E., 1971- Magnetic properties and site distributions in the system FeCr2O4-Fe3O4 (Fe2+Cr2-xFe+3xO4.Journal of Physics and Chemistry of Solids, 32, 717-729.

Sack, R. O., Fredericks, R., Hardy, L. S. & Ebel, D. S., 2005- Origin of high-Ag fahlores from the Galena Mine, Wallace, Idaho, U.S.A., American Mineralogist, Volume 90, pages 1000-1007.

Sack, R. O., Kuehner, S. M. & Hardy, L. S., 2002- Retrograde Ag-enrichment in fahlores from the Coeur d□Alene mining district, Idaho, USA. Mineralogical Magazine, 66, 215-229.

Seyed Emami, K., Brhts, A. & Bozorgnia, F., 1971- Stratigraphy of the cretaceous rocks southeast of Esfahan. Geo Survey of Iran, Rep. No. 20, p. 5-27.

Stacey, J. S. & Kramers, J. D., 1975- Approximation of terrestrial lead isotop evolution by a two–stage model. Earth and Planetary Science Letters, 26, p.207- 22.

Zartman, R. E. & Doe, B. R., 1981- Plumbotectonics - the model. Tectonophysics, 75:135-162.

Lead and Silver Mineralogical Studies and Lead Isotope Investigations in Ahangaran Mine, Malayer, Iran

A. Hosseinkhani [1*] & F. Molasalehi [2]

[1] Ph.D. Student, Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
[2] M. Sc., Department of Geology, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2013 April 07 Accepted: 2013 July 11

Abstract

Ahangaran is an active Pb-Ag mine of Iran that is located in Malayer town, Hamedan province and situated in the Esfahan-Malayer Pb-Zn Metallogenic Zone. The mineralographical studies of different parts of the Ahangaran mine show different sulfide-oxide zones with major minerals including galena, cerussite, chalcopyrite, magnetite, pyrite, hematite, goethite and others minor minerals. For the first time, the minor minerals including jordanite-lengenbachite series, coronadite and galena molybdate is identified as a host for Pb and Ag using scanning electron microscope (SEM) and electron probe micro-analyzer (EPMA). Freibergite (Fahlore group) and lanaite as two minor minerals containing Ag are reported as major element in the crystalline lattice, as well. In addition to Ag presence in the minor minerals, it is measured up to 500 ppm in galena and cerussite by EPMA studies. Pb isotope study on a galena sample from Ahangaran deposit shows the Pb is radiogenic with orogenic reservoir characteristics in which high amount of Pb originated from the upper and lower crust. In addition, Pb model age shows Pb derivation from Triassic basement (249 Ma), and Pb isotopic ratios suggest a mature arc environment for the Ahangaran deposit.

Keywords: Lead isotope, Radiogenetic, Ahangaran mine, EPMA, SEM.

For Persian Version see pages 359 to 368

*Corresponding author:A. Hosseinkhani; E-mail: Hosseinkhani.a@gmail.com

Created with nitroPDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional