



مقاله پژوهشی

بررسی شواهد کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی برای ارزیابی پتانسیل اقتصادی باطله‌های برجا در معدن روی و سرب انگوران

محمد فلاح^۱، قاسم نباتیان^{۱*} و سعیده قدیمی^۲

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(۲) معدن انگوران، زنجان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

چکیده

معدن روی-سرب انگوران در غرب استان زنجان و شمال‌غربی پهنه ماگمایی-دگرگونی سندانج-سیرجان قرار گرفته است. در این پژوهش از کانی پلی‌مورف و رتزیت، به عنوان کانی معرف و ردیاب برای شناسایی مکان‌های مستعد غنی‌شده از عناصر فلزی کمیاب استفاده شد. بر اساس این پژوهش، تمرکز اقتصادی عناصر فلزی در معدن انگوران را می‌توان به دو بخش سولفیدی دارای غنی‌شدگی از عناصر نقره، کادمیم و سلنیوم (بالتر از عیار حد خود) و باطله‌های کربناته دارای غنی‌شدگی از عنصر آرسنیک تقسیم کرد. تمرکز برخی از عناصر فرودیواره شایست این معدن (مانند آهن و به مقادیر کم آرسنیک، کبالت، مس و آنتیموان) در ارتباط با کانی‌زایی سولفیدی در آنهاست. نتایج به دست آمده از تجزیه ژئوشیمیایی در این پژوهش نشان‌دهنده آن است که تمرکز بالای عناصر فلزی (نقره، کادمیم، سلنیوم، قلع، ایندیم، کبالت و غیره) در بخش سولفیدی معدن انگوران است که تأییدی در ارتباط با تشکیل کانی‌های اسفالریت و رتزیت به صورت همزیست در نتیجه غنی‌شدگی از عناصر فلزی کمیاب است. انباشت اصولی عناصر فلزی موجود در باطله‌ها و سایر بخش‌های معدنی بر اساس نوع و میزان غنی‌شدگی، نه تنها موجب به حداقل رساندن مخاطرات زیست‌محیطی می‌شود؛ بلکه می‌تواند قدمی برای استخراج و بهره‌برداری این عناصر به صورت محصول جانبی باشد.

واژه‌های کلیدی: باطله‌های معدنی، رتزیت، عناصر کمیاب، پهنه سندانج-سیرجان، انگوران، زنجان

مقدمه

کشورهای در حال توسعه مانند کشور ایران، با فعالیت‌های بیشتر استخراج معادن و در نتیجه ایجاد حجم عظیمی از باطله‌های معدنی روبه‌رو شوند. ایجاد زمینه و راه کارهای اقتصادی برای

افزایش نیازمندی به مواد معدنی با توجه به رشد اقتصادی و کسب جایگاه مناسب در جامعه جهانی سبب شده است تا

می‌تواند از لحاظ اقتصادی سودمند و قابل بازفرآوری باشند. با توجه به احتمال حضور عناصر بالقوه اقتصادی از جمله نقره، کادمیم، سلیوم، آرسنیک، نیکل، کبالت و غیره در باطله‌های این معدن، بررسی پراکندگی و تمرکز عناصر کمیاب در باطله‌های معدن انگوران می‌تواند به‌عنوان کمکی برای توسعه اقتصاد معدن انگوران و آگاهی از میزان و پراکندگی عناصر سمی در محدوده معدنی در نظر گرفته شود؛ زیرا راه‌سازی باطله‌های حاصل از معدن کاری که حاوی غلظت‌های بالایی از فلزات سمی مانند آرسنیک، کادمیم و سلیوم هستند که می‌تواند برای روستاییان ساکن در محدوده معدنی به‌شدت خطرناک باشد.

معدن روی-سرب انگوران از آن دسته معادنی است که باطله‌های معدنی بدون نظم و تنها با در نظر گرفتن اولین و نزدیک‌ترین مکان از لحاظ دسترسی، به صورت کوه‌هایی از انواع باطله با تنوع وسیع عناصر کمیاب انباشته شده است. نفوذپذیری بالای شیت‌ها (با توجه به اینکه شکستگی‌های زیاد در این واحد و همچنین در اثر معدن کاری، بخش زیادی از این سنگ‌ها در معرض هوا قرار گرفته‌اند) می‌تواند زمینه لازم برای تحرک سیالات و شسته شدن عناصر را در این معدن فراهم کند. هوازدگی کانی‌های موجود در بخش‌های انباشت باطله همچون آنچه که در معدن انگوران وجود دارد، موجب آزاد شدن عناصر کمیاب می‌شود که می‌تواند موجب آلودگی شدید خاک‌ها و آب‌های اطراف با توجه به نزدیکی معدن به روستاهای موجود در منطقه شود. طبق بررسی‌های انجام شده، در معدن انگوران سه عنصر کمیاب یعنی آرسنیک، سلیوم و کادمیم که هر کدام به نوبه خود از عناصر اصلی در بروز بیماری‌های زمین‌زاد هستند، تجمع بالایی را به‌خود اختصاص می‌دهند.

زمین‌شناسی

کهن‌ترین واحد شناخته شده در منطقه مورد بررسی شامل سنگ‌های دگرگونی میکاشیست و کوارتزیت به رنگ سبز-خاکستری است که در زیر یک افق ۵۰ تا ۱۰۰ متری آهک و

بهره‌برداری مواد معدنی از این باطله‌ها با توجه به امکانات موجود، می‌تواند زمینه‌ساز و کمک حال اقتصادی کشور برای توسعه و رشد بیش از پیش شوند. از این رو، با توجه به تغییر موقعیت جهانی یادشده، باطله‌هایی که بی‌ارزش قلمداد می‌شدند، می‌توانند در زمینه‌هایی همچون بهبود فداوری، ایجاد بازار مناسب برای کسب درآمد، ایجاد زمینه شغلی و از همه مهم‌تر، افزایش قیمت فلزات در نتیجه بازفرآوری از باطله‌ها، ارزشمند به‌شمار آیند.

کانسار روی-سرب انگوران بر طبق گزارش‌های ارائه شده در دسته کانسارهای دماپایین قرار می‌گیرد که در غرب استان زنجان و بخش شمال غربی ایران قرار دارد (Sadeghi Bojd and Moore, 200). در این منطقه کانه‌زایی‌های مختلفی از جمله آهن، کرومیت و طلا روی داده است (Maanijou and Salemi, 2015; Maanijou and Khodaei, 2018; Ahrabian Fard, 2019).

منطقه مورد بررسی از لحاظ تقسیمات پهنه زمین‌شناسی-ساختمانی ایران، در بخش شمال غرب پهنه دگرگونی-ماگمایی سهندج-سیرجان که در ارتباط با کوه‌زاد زاگرس است، قرار گرفته است. روند کانی‌سازی در کانسار انگوران را می‌توان به دو بخش کانسنگ هیوژن (سولفید-کربنات) و کانسنگ سوپرژن (کربنات) طبقه‌بندی کرد (Daliran et al., 2013).

در این پژوهش از کانی پلی‌مورف ورتزیت، به‌عنوان کانی معرف و ردیاب برای شناسایی مکان‌های مستعد غنی شده از عناصر فلزی کمیاب استفاده شد. ورتزیت یکی از پلی‌مورف‌های اصلی اسفالریت به‌شمار می‌رود و می‌تواند غنی‌شدگی نسبت به برخی از عناصر کمیاب داشته باشد. در واقع پلی‌مورف ورتزیت زمانی تشکیل خواهد شد که غنی‌شدگی قابل توجهی از عناصر کادمیم، گالیم، ژرمانیوم، آهن در محیط حضور داشته باشد (Ueno et al., 1996; Bonnet et al., 2016). با توجه به وجود این پلی‌مورف ورتزیت در کانسار انگوران، در این پژوهش از این کانی به‌عنوان کانی معرف استفاده شده است. به دلیل فعالیت‌های معدن کاری در معدن انگوران، مقدار زیادی باطله در این معدن تولید می‌شود که

دولومیت مرمری شده (مرمر جانگوتاران) و در هسته طاقدیس کوه لعل کان و کوه گورگور نمایان شده‌اند (Pirkharrati and Farhadi, 2014). این واحدهای شیستی بخش فرودیواره معدن را تشکیل می‌دهند که هم‌ارز سازند کهر به سن نئوپروتروزوئیک هستند (Babakhani and Ghalamghash, 1990). واحدهای شیستی اغلب تحت‌اثر فرایندهای زمین‌ساختی موجود در منطقه قرار گرفته‌اند. در برخی از مناطق، در داخل این واحدها کانی‌زایی به صورت رگه‌های سولفیدی رخ داده است که اغلب هم‌جهت شیستوزیته هستند.

یک واحد سبتر مرمر و دولومیت متبلور خاکستری روشن تا خاکستری تیره بر روی سنگ‌های دگرگونی میکاشیست و اولترابازیک‌های دگرگون‌شده، با لایه‌بندی متوسط تا ضخیم ۵۰ تا ۳۰۰ متر رانده شده که در منطقه با عنوان مرمر جانگوتاران نام‌گذاری شده است (Pirkharrati and Farhadi, 2014). این واحد بخش فرادیواره معدن روی و سرب انگوران را تشکیل می‌دهد که حجم اصلی کانی‌زایی کربناته به صورت اسمیت‌زونیت، در این واحد دگرگونی تشکیل شده است (شکل‌های ۱ و ۲-A).

بیشترین تنوع لیتولوژی و فراوان‌ترین سنگ‌ها و سازندهای منطقه، مربوط به دوران سنوزوئیک است. سنگ‌های مرتبط با این بازه زمانی، معمولاً بر روی سازندهای قدیمی‌تر به صورت دگرشیبی زاویه‌دار قرار گرفته‌اند (شکل ۲-B). از نظر گسترش و نوع سازندها در این منطقه، گسترش وسیعی از پوشش توده‌های رسوبی، آذرین و آذرآواری دیده می‌شود که در زمان الیگوسن و میوسن شکل گرفته‌اند (Pirkharrati and Farhadi, 2014).

سنگ‌های فراگیر محدوده معدنی انگوران را سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین پسین-کامبرین پیشین تشکیل می‌دهند که در پاره‌ای نقاط توف‌های سفید و آهک مربوط به سازند قم، آنها را پوشانده‌اند. در داخل سنگ‌های یاد شده استوک‌ها و دایک‌هایی با ترکیب آندزیت‌بازالت با سن میوسن-پلیوسن نفوذ کرده است (Ghorbani, 2008). اغلب واحدهای سنگی

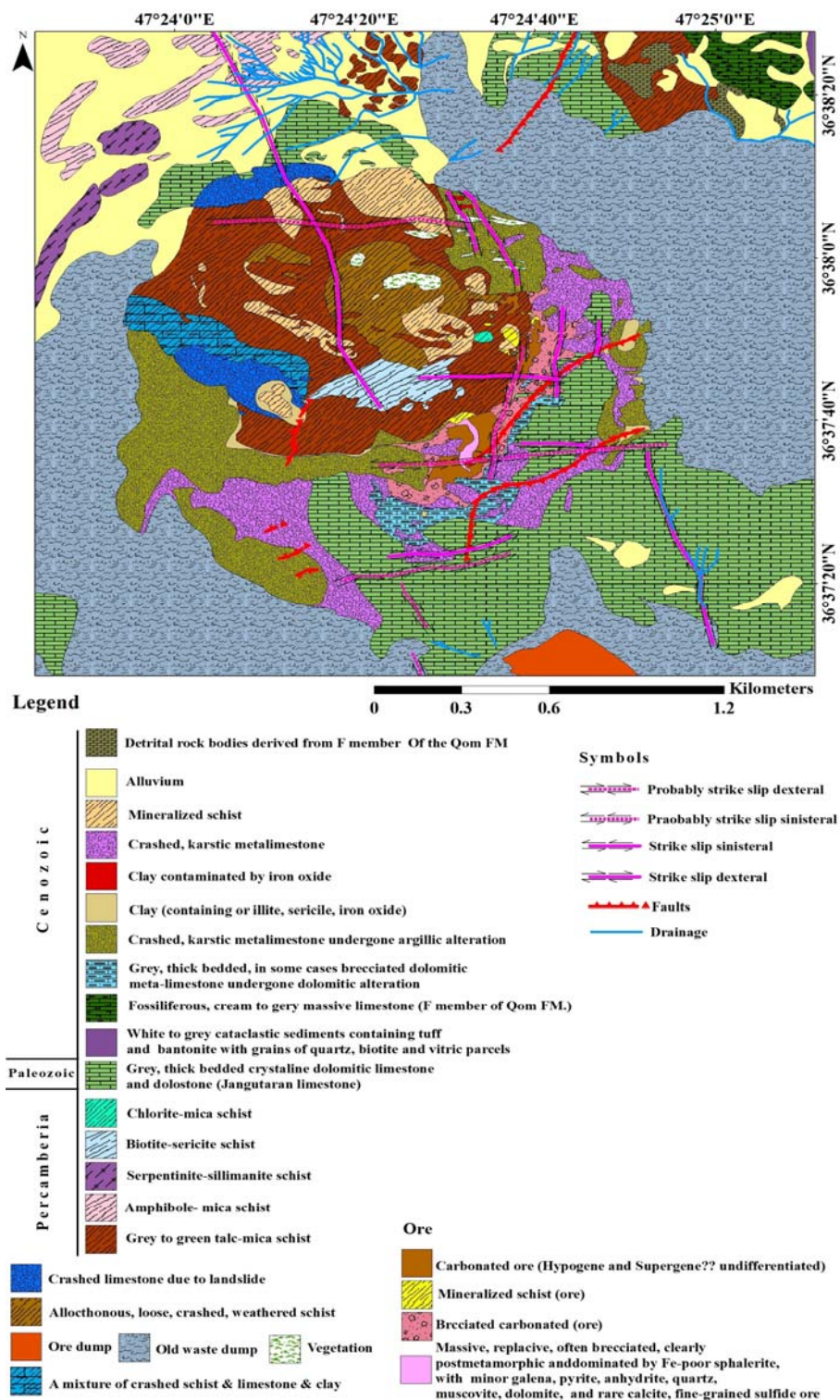
آتشفشانی الیگومیوسن، بر روی واحدهای آهکی و پد کنگلومرایی و ماسه‌سنگ سازند قرمز زیرین قرار گرفته‌اند. برش‌های هیالوکلاستی به رنگ سبز-خاکستری دارای قطعاتی از گدازه‌های آندزیتی به اندازه ۰/۱ تا ۲ متر و دارای ساخت بالشی هستند (Pirkharrati and Farhadi, 2014) که در مناطق واقع در حدود ۵ کیلومتری ورودی معدن قابل مشاهده هستند. بخش‌های برشی این واحد در اثر فرسایش به صورت ستون‌های بلند ایگنیمبریت همانند دودکش نمایان است.

بخش جنوبی معدن انگوران مجموعه‌ای از سیل و دایک‌ها با ترکیب بازالت-دیاباز، به صورت گدازه‌های منشوری رخنمون دارد که در داخل واحدهای توفی نفوذ کرده و اغلب باعث قطع‌شدگی این واحدها شده است (شکل ۲-C). این گدازه‌های منشوری اغلب متشکل از پلاژیو و کلاز و پیروکسن با بافت ساب‌افیتیک هستند. از نهشته‌های منسوب به دوره کواترنری نیز می‌توان پادگانه‌های آبرفتی قدیمی و جوان، مخروط‌افکنه و رسوبات آبرفتی جوان رودخانه‌ای اشاره کرد. افزون بر این موارد، نهشته‌های گسترده‌ای از تراورتن در منطقه دیده می‌شود که حاصل از فعالیت چشمه‌های آهک‌ساز در زمان کواترنری هستند (Pirkharrati and Farhadi, 2014).

رسوبات کربناته چشمه‌های آهک‌ساز، به رنگ سفید تا شیری و زرد بوده و ضخامت آنها به بیش از ۱۰۰ متر نیز می‌رسد که در بخش‌های جنوب‌شرقی معدن در محدوده شهرک انگوران رخنمون دارد. در حوالی ۸ کیلومتری ورودی به معدن، نشانه‌هایی از فعالیت معدنی برای استخراج تراورتن مشاهده می‌شود (شکل ۲-D).

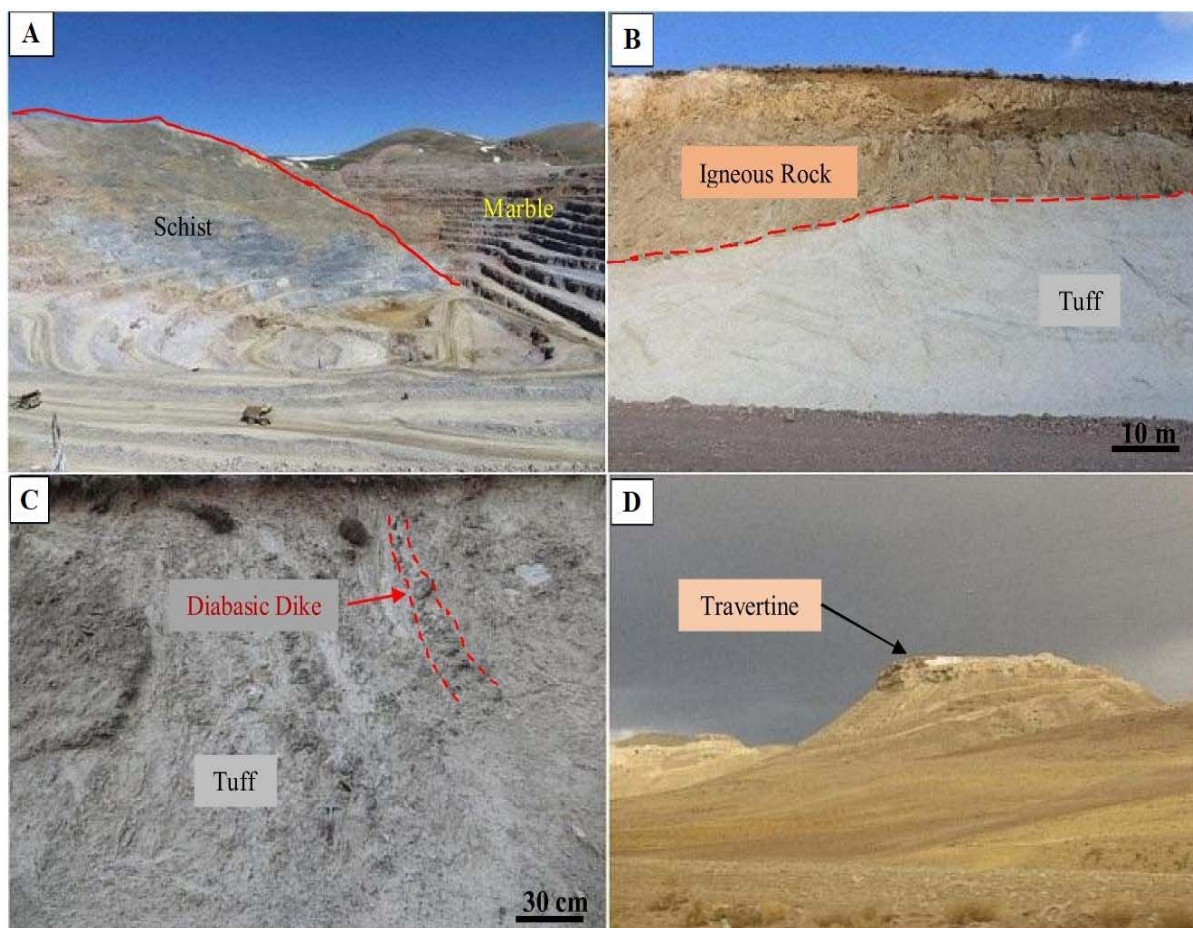
نمونه‌برداری و روش‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، ضمن بازدید صحرایی از بخش روباز معدن انگوران، با رسم هفت مقطع عرضی و عمود بر کانه‌زایی به گونه‌ای که دربرگیرنده تمامی بخش‌های محدوده روباز معدنی باشد، تعداد ۳۰ نمونه شامل تمامی بخش‌های روباز معدنی اعم از شیست‌های فرودیواره، بخش کانه‌زایی و فرادیواره کربناته (مرمر) نمونه‌برداری شد (شکل ۳).



شکل ۱. نقشه زمین شناسی معدن روی و سرب انگوران با تغییرات جزئی از رحیمی (Rahimi, 2016)

Fig. 1. Geological map of the Angouran Zn-Pb mine (modified after Rahimi, 2016)



شکل ۲. تصاویر مربوط به واحدهای سنگی موجود در منطقه معدنی انگوران. A: دورنمایی از بخش روباز معدن انگوران و فرودیواره شیست و فرادیواره مرمر (جهت دید شمال غرب)، B: واحد توف سفید رنگ قرار گرفته در زیر سنگ‌های آتشفشانی الیگومیوسن، C: توف‌های سنوزوئیک که توسط دایک‌های دیابازی قطع شده‌اند و D: نهشته‌های تراورتن به سن کواترنری در ۸ کیلومتری ورودی معدن انگوران (جهت دید شمال غرب)

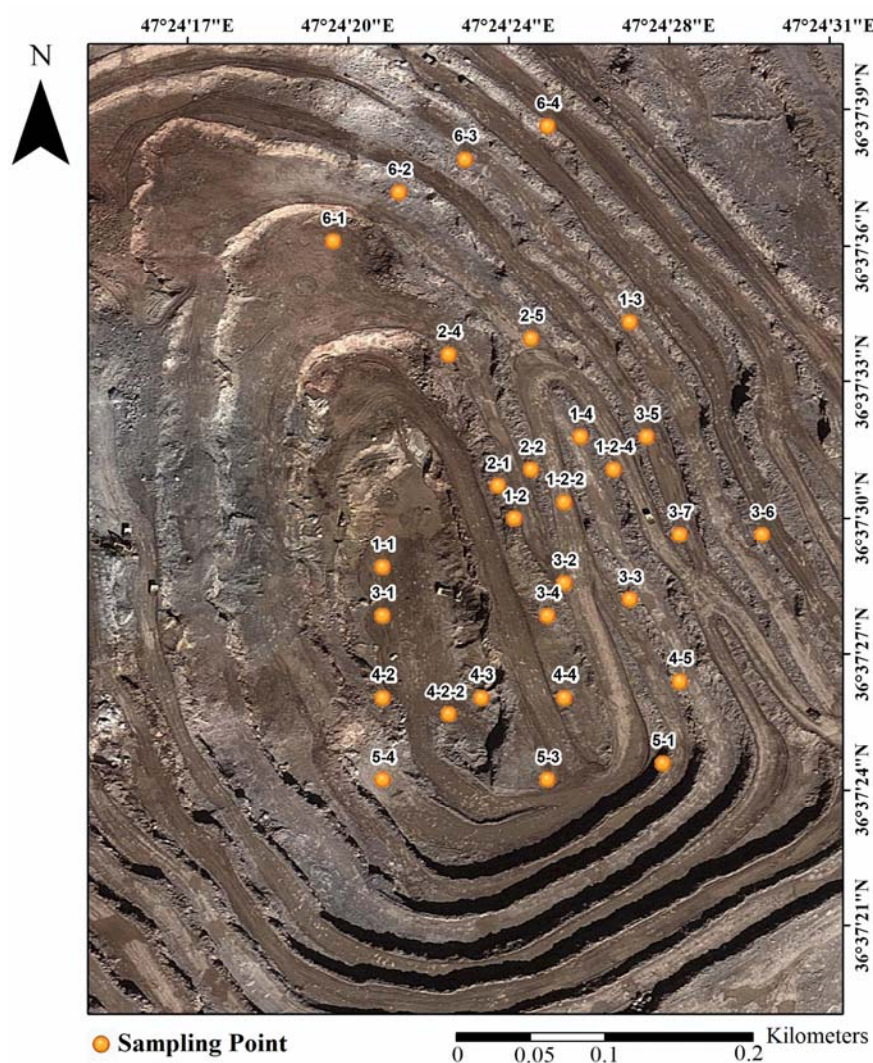
Fig. 2. Images of rock units in the Angouran area. A: The prospect from open-pit part of the Angouran mine with foot-wall schist and hanging-wall marble (View direction to NW), B: The white tuff unit is located under the Oligo-Miocene volcanic rocks, C: The Cenozoic tuffs which are cross-cut by diabase dikes, and D: Travertine deposits with Quaternary age at the 8 km to the entrance of Angouran mine (View direction to NW)

انجام شده است. در این روش، نمونه‌ها با فلاکس متا و تترابورات (ذوب قلیایی) در بوتله‌های پلاتین مخلوط شده و سپس در کوره تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شوند. سپس نمونه‌های ذوب‌شده در محلول اسیدی اسید نیتریک قرار می‌گیرند و محلول به‌دست آمده توسط دستگاه ICP-OES خوانش می‌شود. برای تجزیه ژئوشیمیایی عناصر کمیاب و نادر خاکی، نمونه‌ها پس از توزین در لوله‌های تفلونی قرارداده شده و سپس

پس از تهیه نمونه‌های میکروسکوپی از نمونه‌های برداشت‌شده، تمامی ۳۰ نمونه پس از خردایش و نرمایش برای انجام تجزیه ICP-OES و ICP-MS به آزمایشگاه زرآزما و یک نمونه برای انجام طیف‌سنج XRD به آزمایشگاه دانشگاه زنجان ارسال شد. زاویه پراش دستگاه XRF در زمان مطالعه ۱۰ تا ۸۰ درجه و مدت زمان کانت آن برابر با ۵/۰۲ بوده است. تجزیه ژئوشیمیایی اکسیدهای اصلی با استفاده از دستگاه ICP-OES

از ۱ درصد تا حداکثر ۵ درصد بوده است. برای تفسیر داده‌های ICP-MS و رسم نقشه‌های پراکندگی و شبکه‌بندی Kriging از نرم‌افزارهای ArcGIS، Geosoft، X'pert high score و plus Excel استفاده شد.

توسط چهار اسید (هیدروکلریدریک، پرکلریدریک، نیتریک و هیدروکلریدریک) هضم می‌شوند. هضم نمونه‌ها در محفظه Hot Box در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت چهار ساعت انجام می‌شود. میزان خطای دستگاهی در این روش کمتر



شکل ۳. تصویر مربوط به جای مکان نمونه‌برداری انجام شده از بخش روباز معدن انگوران است.

Fig. 3. The location of sampling points in the open-pit part of the Angouran mine.

فردایواره مرمر و فرودایواره شیست تشکیل شده است. کانی‌زایی در این معدن از شیست‌های دگرسان شده تا واحدهای مرمر

کانه‌زایی

کانسار انگوران به صورت ساختاری برشی در مرز بین راندگی

رانده شده، ادامه دارد. چنان‌که ذکر شد، کانه‌زایی در کانسار انگوران در طی دو مرحله هیپوژن و سوپرژن تشکیل شده است (شکل ۲-A). کانی‌زایی هیپوژن در کانسار انگوران به صورت فازهای متوالی سولفیدی و کربناته روی‌داده است. کانی‌زایی در ابتدا به صورت پیریت‌های نسل اول با بافت رگه-رگچه‌ای و اغلب به صورت قطع‌کننده روند شیستوزیت در داخل سنگ‌میزبان کوارتز شیست‌ها تشکیل شده است. روند کانی‌زایی با تشکیل حجم عظیمی از کانی‌های سولفیدی ادامه یافته است که به دلیل ایجاد فشار هیدرولیکی، موجب برشی شدن سنگ‌میزبان شده و به صورت قطعاتی در داخل بخش سولفیدی قرار گرفته‌اند (شکل ۴-A و B).

روند کانی‌زایی هیپوژن به صورت سیالات کربنات‌دار ادامه یافته است. این سیالات با کانی‌زایی اسمیت‌زونیت با بافت توده‌ای و رگه-رگچه‌ای موجب قطع و برشی شدن کانی‌زایی سولفیدی و سنگ‌میزبان شیست و کربناته فرادیواره شده است (شکل ۴-A و B). در مراحل پایانی کانه‌زایی هیپوژن، رگه-رگچه‌های کوارتز و کلسیت نیز مشاهده می‌شود که موجب قطع شدن کانه‌زایی (بخش‌های سولفیدی و کربناته)، سنگ‌میزبان شیستی و گاهی سنگ‌میزبان کربناته شده‌اند. فاز کانی‌زایی سوپرژن با تجزیه اکسیداتیو اسفالریت‌ها و تشکیل اسمیت‌زونیت‌های ناخالص صورتی‌رنگ غنی از Fe-oxyhydroxides با ساخت توده‌ای و کلوفرم است که بعد از کانی‌زایی هیپوژن، به صورت پوشش بر روی این بخش قرار گرفته است (شکل ۴-C). در ادامه روند کانی‌زایی سوپرژن، اسمیت‌زونیت‌های خالص و سفید رنگ کم‌عیار تا قهوه‌ای رنگ پر عیار با ساخت‌های توده‌ای، کلوفرم و جعبه‌ای اغلب همراه با کانی‌های همی‌مورفیت، میمیتیت و سروزیت تشکیل شده است (شکل ۴-D). این اسمیت‌زونیت‌ها در ارتباط با فرادیواره کربناته بوده که بالاترین عیار روی در این بخش از کانسار واقع شده است.

از جمله کانی‌هایی تشکیل شده در مرحله هیپوژن می‌توان به کانی‌های سولفیدی همچون اسفالریت‌های نسل اول و نسل دوم به همراه پلی‌مورف ورتزیت با بافت توده‌ای، کلوفرم و رگه‌ای،

پیریت‌های نسل دوم و سوم با بافت توده‌ای و دانه پراکنده، گالن‌های نسل اول به صورت بافت توده‌ای و دانه پراکنده و نسل دوم با بافت رگچه‌ای و دانه پراکنده و همچنین کانی آرسنوپیریت که اغلب به صورت توده‌ای است و کانی‌های کربناته همچون اسمیت‌زونیت با بافت شانه‌ای و کلسیت و همچنین تشکیل کانی کوارتز اشاره کرد (شکل ۵-A، B، C، D، E و F). یک گروه رگچه‌های پیریت در مراحل پایانی کانه‌زایی در این کانسار تشکیل شده است (Marangi, 2017). از جمله کانی‌های تشکیل شده در بخش سوپرژن معدن انگوران نیز می‌توان به دو نسل متفاوت از اسمیت‌زونیت‌ها اشاره کرد. آن دسته از اسمیت‌زونیت‌هایی صورتی‌رنگ که حاوی ناخالصی Fe-oxyhydroxides هستند، در مقاطع میکروسکوپی به صورت بلورهای دانه‌درشت و خوش‌وجه، با بافت توده‌ای (شکل ۵-G) و اسمیت‌زونیت‌های خالص و سفید تا قهوه‌ای‌رنگ در مقاطع میکروسکوپی با بافت توده‌ای، اغلب ریز تا متوسط بلور قابل مشاهده هستند (شکل ۵-H).

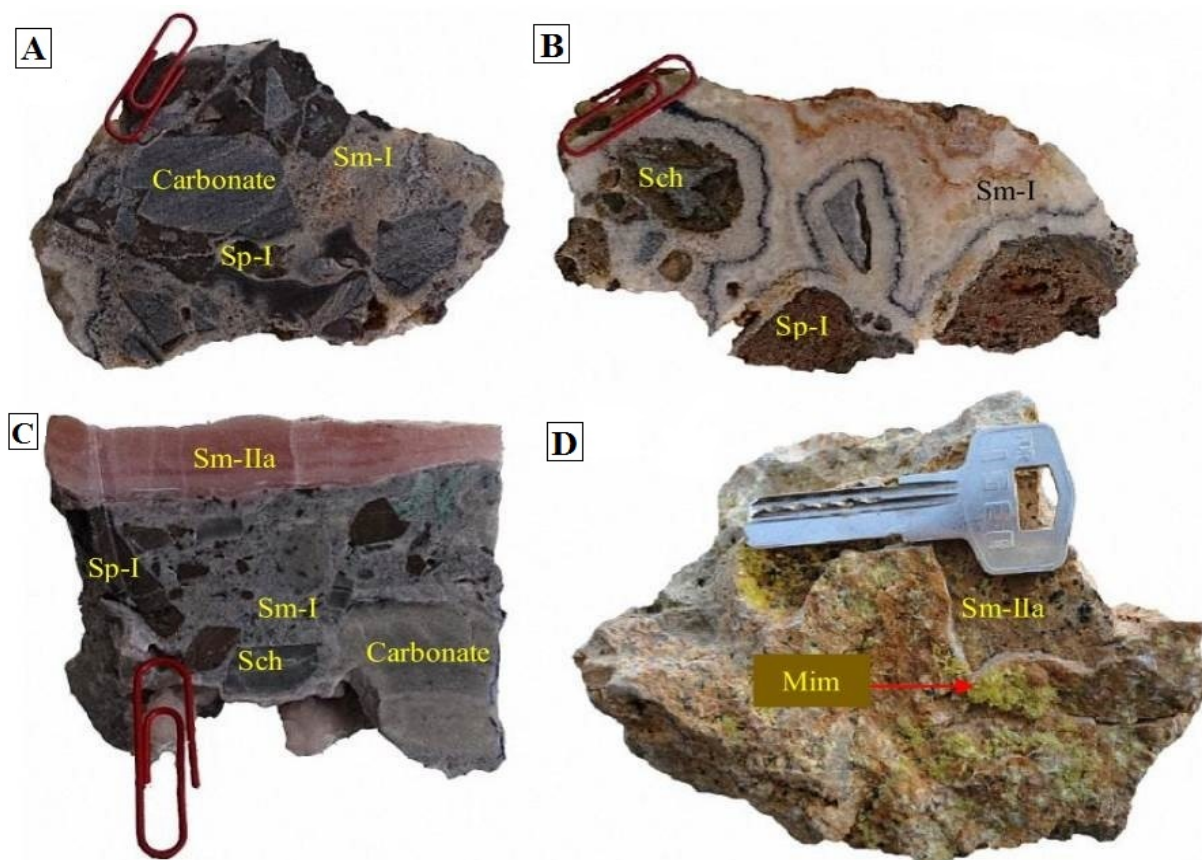
از دیگر کانی‌های تشکیل شده در بخش کانسنگ سوپرژن می‌توان به کانی همی‌مورفیت با ساخت جعبه‌ای و در مواردی به صورت توده‌ای، کانی میمیتیت به صورت تجمع‌ی از بلورهای سوزنی زرد رنگ و کانی سروزیت به صورت بلورهای سوزنی اشاره کرد. در نهایت، مخلوطی از کانی‌های به شدت اکسید شده کربنات روی از جمله کانی‌های اسمیت‌زونیت و همی‌مورفیت، موجب تشکیل کالامین‌های نرم و سفید رنگ با بافت توده‌ای، در بالاترین بخش کانسار انگوران شده است.

ژئوشیمی

برای بررسی روند توزیع و پراکندگی عناصر اصلی و فرعی در بخش روباز معدنی و درک درست از تغییرات عناصر، با رسم هفت مقطع عرضی و عمود بر کانه‌زایی به گونه‌ای که دربرگیرنده تمامی بخش‌های محدوده روباز معدنی باشد (باطله و ماده معدنی)، به صورت برجانه نمونه‌برداری انجام شد که اطلاعات نمونه‌های برداشت شده در جدول ۱ و موقعیت

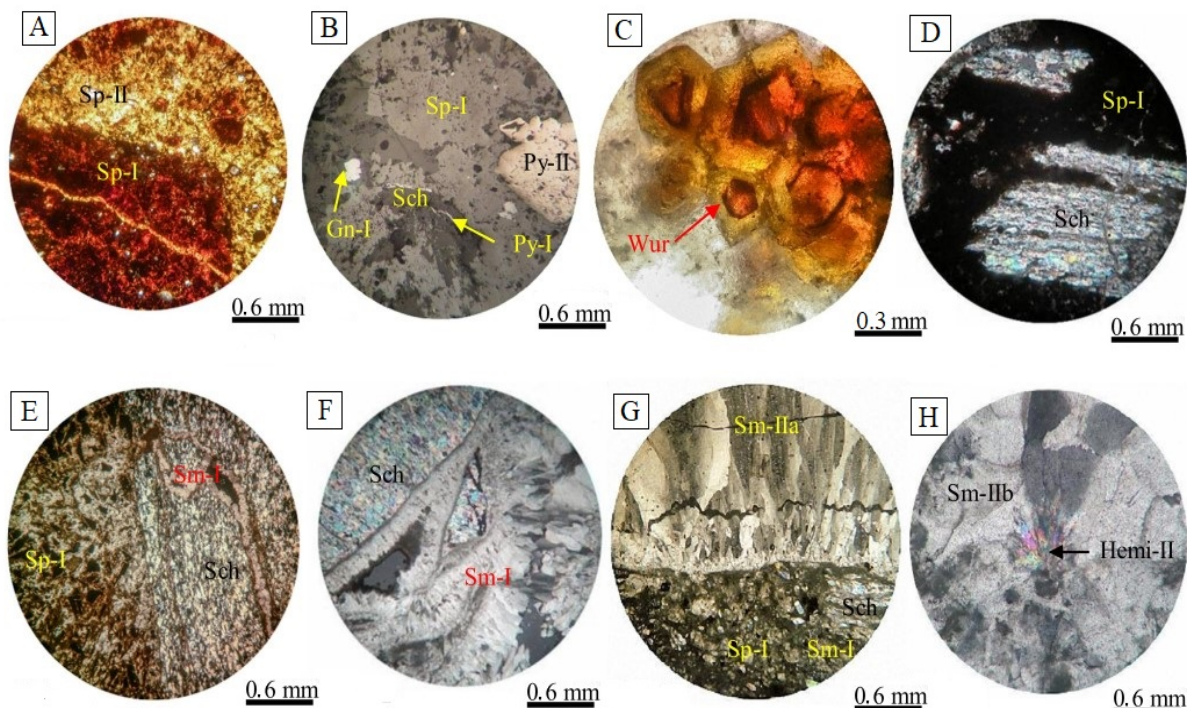
اسفالریت‌های فقیر از مس و سرب (نمونه ۳-۴) و گروه دوم شامل اسفالریت‌های غنی از مس که در عین حال غنی از سرب (نمونه T-01) هستند (شکل ۶ و جدول ۲).

نمونه‌برداری انجام‌شده از بخش روباز معدن انگوران در شکل ۳ قابل مشاهده است. طبق نتایج به‌دست آمده از تجزیه ژئوشیمیایی ICP-MS، دو گروه متفاوت از اسفالریت‌ها در کانسنگ سولفیدی معدن انگوران شناسایی شد. گروه اول شامل



شکل ۴. تصاویر مربوط به نمونه دستی کانی‌زایی بخش هیپوژن و سوپرژن معدن انگوران. A: نمونه دستی مربوط به کانه‌زایی سولفید هیپوژن که موجب قطع و برشی شدن کربنات فرادیواره شده و در ادامه کانه‌زایی هیپوژن کربناته به صورت اسمیت‌زونیت موجب قطع شدن کانی‌زایی سولفید پیش از خود و کربنات فرادیواره شده است، B: نمونه دستی مربوط به کانه‌زایی هیپوژن اسمیت‌زونیت که موجب قطع و برشی شدن کانه‌زایی سولفید پیش از خود و شیت فرادیواره شده است، C: نمونه دستی اسمیت‌زونیت ناخالص صورتی رنگ که به صورت پوشش بر روی بخش کانه‌زایی هیپوژن قرار گرفته است و D: تصویر مربوط به تجمع بلورهای زرد رنگ میمیتیت و همراهی آن با اسمیت‌زونیت خالص پر عیار. اختصار کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Sp: اسفالریت، Sm: اسمیت‌زونیت، Mim: میمیتیت، Sch: شیت).

Fig. 4. Images of hand specimen of hypogene and supergene mineralization in the Angouran mine. A: Hand specimen of hypogene sulfide mineralization (Sp-I) which cross- cutted and brecciated the hanging- wall carbonate rocks and in the following of mineralization, carbonate hypogene mineralization as smithsonite (Sm-I) cross- cutted the early sulfide mineralization and hanging- wall carbonate, B: Hand specimen of hypogene smithsonite (Sm-I) mineralization which cross- cutted the early stage sulfide mineralization and foot- wall schist, C: Hand specimen of impure pink supergene smithsonite (Sm-IIa) which occurred as cap on top of the hypogene ore, and D: The image of the accumulation of yellow mimetite crystals and their accompaniment with high grade pure smithsonite. Abbreviation after Whitney and Evans (2010) (Sp: Sphalerite, Sm: Smithsonite, Mim: Mimetite, Sch: Schist).



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی مربوط به کانه‌زایی هیپوژن و سوپرژن در معدن انگوران. A: قطع شدن اسفالریت نسل اول توسط نسل جوان‌تر اسفالریت، B: کانه‌زایی نسل اول پیریت به صورت رگه-رگچه در شیست فرودیواره و همراهی نسل دوم پیریت و گالن نسل اول با اسفالریت‌های نسل اول، C: بلورهای هگزاگونال ورتزیت، D: برشی شدن سنگ‌میزبان شیست در نتیجه کانه‌زایی اسفالریت نسل اول، E: کانه‌زایی اسمیت‌زونیت هیپوژن که موجب قطع شدن و برشی شدن سنگ‌میزبان شیست و کانه‌زایی سولفیدی شده است، F: بافت شانه‌ای اسمیت‌زونیت هیپوژن، G: بلورهای درشت و خوش‌وجه اسمیت‌زونیت سوپرژن که به صورت پوششی بر روی کانسنگ هیپوژن تشکیل شده است و H: همراهی اسمیت‌زونیت با بلور شعاعی همی مورفیت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Sp: اسفالریت، Py: پیریت، Sch: شیست، Gn: گالن، Wur: ورتزیت، Sm: اسمیت‌زونیت، Hemi: همی مورفیت).

Fig. 5. Photomicrographs of hypogene and supergene mineralization in the Angouran mine. A: Cross-cutting of first-generation sphalerite by the younger generation of sphalerite, B: The mineralization of first-generation pyrite as vein-veinlet in the foot-wall schist. The second generation of pyrite and first-generation of galena are associated with first-generation of sphalerite, C: Hexagonal crystals of wurtzite, D: Brecciated foot-wall schist due to the first-generation sphalerite mineralization, E: The mineralization of hypogene smithsonite which cross-cut and brecciated the foot-wall schist and sulfide mineralization, F: Comb texture of hypogene smithsonite, G: The coarse-grained of supergene smithsonite which occurred as cap on top of the hypogene ore, and H: Coexist of smithsonite with radial hemimorphite crystal. Abbreviation after Whitney and Evans (2010) (Sp: Sphalerite, Py: Pyrite, Sch: schist, Gn: Galena, Wur: Wurtzite, Sm: Smithsonite, Hemi: Hemimorphite).

نقره

نقره در نمونه اسفالریت فقیر از مس و سرب (نمونه ۳-۴ که دارای پلی مورف ورتزیت است) در مقابل تجمع کم نقره در نمونه اسفالریت غنی از کانی‌های سرب همچون میمیتیت و گالن (نمونه T-01) می‌تواند بیانگر آن باشد که برخلاف بررسی‌های

بر اساس تجزیه‌های انجام‌شده در معدن انگوران، نقره دارای تمرکز بالای ۲۵۸/۸ ppm در نمونه‌های غنی از اسفالریت (دارای پلی مورف ورتزیت) است (شکل ۷-A). تجمع بالای

انجام‌شده پیشین، حجم اصلی نقره به جای همراهی با سولفوسالت‌ها و کانی گالن (Daliran et al., 2013)، به همراه سایر عناصر فرعی همچون قلع (Sn) و ایندیم (In) از طریق جانشینی نقره با عنصر روی (Zn) بوده و وارد شبکه بلوری اسفالریت (و یا ورتزیت) شده است (Beaudoin, 2000; Bonnet et al., 2016).

عیار معمولی نقره در کانسنگ‌های قابل استخراج، ۰/۰۱ درصد وزنی معادل ۱۰۰ ppm در نظر گرفته شده است (Gocht et al., 1988; Ridley, 2014) که طبق نتایج به‌دست آمده (شکل ۷-۷)، نمونه اسفالریت فقیر از سرب در معدن روی-سرب انگوران تمرکزی حدود سه برابر عیار حد عنصر نقره را به خود اختصاص داده است. عنصر نقره در باطله‌های کربناته و شیبست‌های فرودیواره معدن انگوران دارای حداقل تمرکز است. از شواهد تأییدکننده مطالب ذکرشده در ارتباط با جانشینی نقره با عنصر روی (Zn) و وارد شدن به شبکه اسفالریت (و یا ورتزیت)، می‌توان به دو عنصر ایندیم و قلع که دارای بالاترین

حد تمرکز خود در نمونه سولفیدی اسفالریت (نمونه ۴-۳) هستند (شکل ۷-B و C) و همچنین، تشکیل پلی‌مورف دما بالای ورتزیت در معدن انگوران اشاره کرد (شکل ۸). گذار اسفالریت به پلی‌مورف هگزگونال ورتزیت در دمای بالای ۱۰۲۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد (Allen et al., 1912). در صورتی که در معدن انگوران، کانی ورتزیت به صورت همزیست با اسفالریت‌ها یافت می‌شود. تشکیل این پلی‌مورف در کانسارهای دما پایین همچون انگوران با دمای تشکیل ۱۵۵ تا ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد (Sadeghi Bojd and Moore, 2005) می‌تواند در نتیجه شرایط احیایی و فوگاسیته پایین گوگرد و غنی‌شدگی از عناصر فلزی کمیاب همچون نقره (Ag)، گالیوم (Ga)، ژرمانیوم (Ge)، ایندیم (In)، قلع (Sn)، کادمیم (Cd) و کبالت (Co) مرتبط باشد (Fallah et al., 2019). در پژوهش صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2017) وجود ورتزیت در این کانسار به اثبات رسیده است.

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های برداشت‌شده از بخش رویاز معدن روی-سرب انگوران (S: کانه‌زایی سولفید، Sm: اسمیت‌زونیت (کانه‌زایی کربناته)، Sch: شیبست (فرودیواره)، Crb: کربنات (فرادیواره))

Table 1. Characteristic of samples which taken from open-pit part of the Angouran mine. (S: Sulfide mineralization, Sm: Smithsonite (carbonate mineralization), Sch: Schist (foot-wall), Crb: Carbonate (hanging-wall))

Sample No.	1-1	1-2	1-2-2	1-2-4	1-3	1-4	2-1	2-2	2-4	2-5
Composition	Sch	Sm+S	Crb	Crb	Crb+Sm	Crb	Sch	Crb+Sm	Sm+Crb	Sm+Crb
Sample No.	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	4-2	4-2-2	4-3
Composition	Sch	Sm	Crb	S	Crb	Crb	Sm	Crb+Calamine	Sm+S	Sm
Sample No.	4-4	4-5	5-1	5-3	5-4	6-1	6-2	6-3	6-4	T-01
Composition	S	Crb	Crb	Crb	Sm+S	Sch	Sch	S+Sm	Crb	S

جدول ۲. تجزیه دستگاهی ICP-MS مربوط به نمونه‌های برداشت‌شده از بخش روباز معدن روی-سرب انگوران. نتایج آنالیزها بر اساس ppm است (DI: Detection limit).

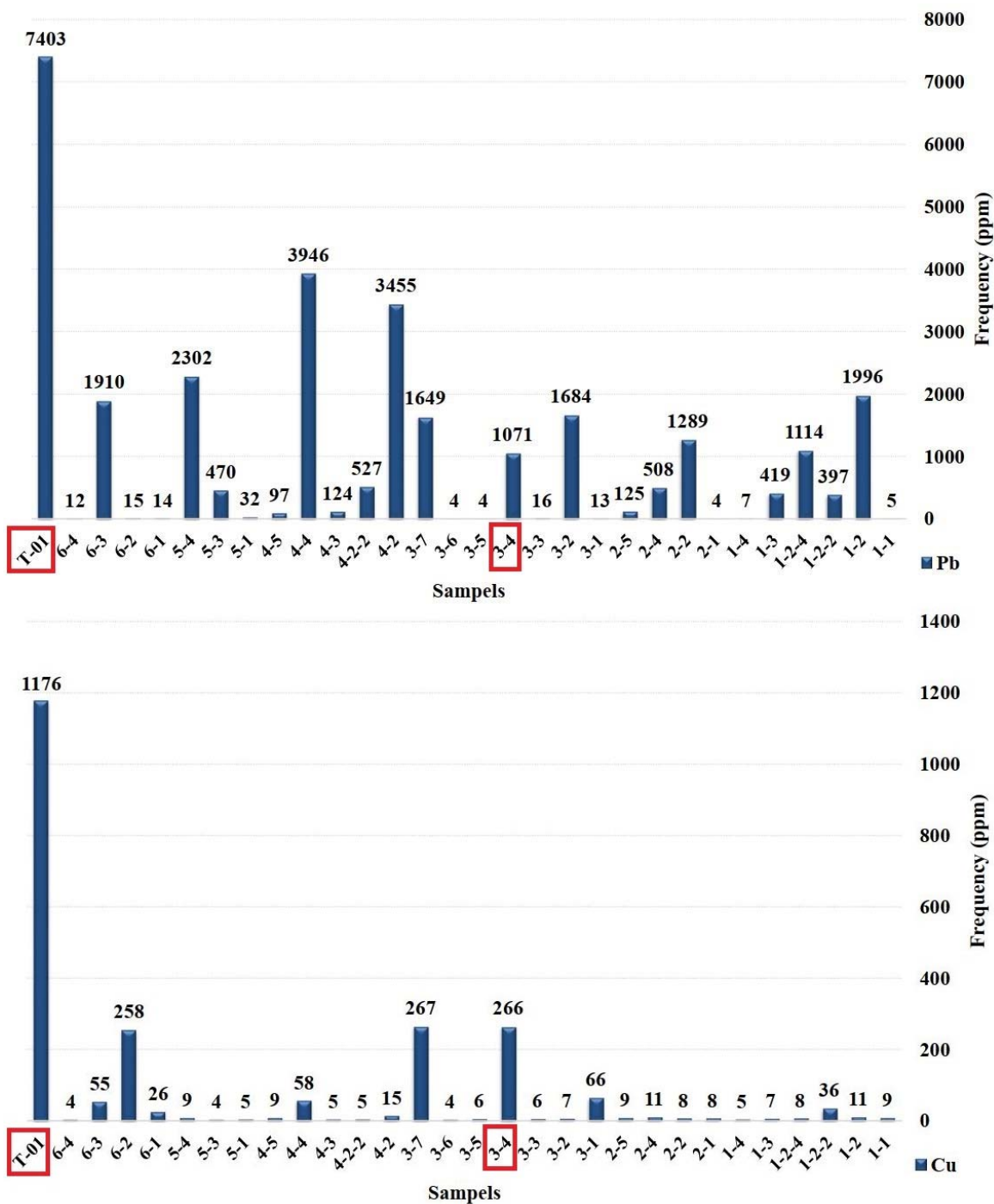
Table 2. ICP-MS analysis data of samples which taken from open- pit part of the Angouran mine. The result of data are in ppm (DI: Detection limit).

Sample No.	DI	1-1	1-2	1-2-2	1-2-4	1-3	1-4	2-1	2-2	2-4	2-5
Ag	0.1	<0.1	1.3	1.6	1.4	0.2	<0.1	<0.1	0.6	0.1	0.2
As	0.1	2.2	>100	48.9	82.5	>100	2.3	15.8	>100	>100	69.8
Cd	0.1	0.2	972.6	4.7	134.4	58.6	0.8	0.3	169	1413.8	1021.1
Co	1	18.1	245.4	12.3	1.6	<1	<1	6.2	17.2	216.9	167.6
Cu	1	9	11	36	8	7	5	8	8	11	9
Fe	100	37337	5448	4706	449	156	1666	20545	1967	4499	3811
In	0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Mg	100	>2%	428	3072	2282	2697	2927	>2%	1642	1998	2029
Mn	6	459	410	375	8	<5	123	2175	784	382	665
Sample No.	DI	1-1	1-2	1-2-2	1-2-4	1-3	1-4	2-1	2-2	2-4	2-5
Pb	0.05	5	1996	397	1114	419	7	4	1289	508	125
Sb	0.5	0.7	30.9	9.4	0.7	<0.5	0.5	0.8	2.9	16.7	6.6
Se	0.5	1.6	90.81	0.73	<0.5	1.29	<0.5	1.01	0.56	94.89	29.51
K	100	6715	<100	1261	<100	<100	195	14039	423	<100	<100
Al	100	70400	609	4856	232	118	1952	42526	1519	390	1557
S	50	381	115	2266	117	82	97	183	123	89	65
Ni	1	82	25	9	16	12	5	20	43	173	266
Zn	1	228	>3%	601	65	4798	108	79	2457	>3%	>3%
Sample No.	DI	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	4-2	4-2-2	4-3
Ag	0.1	<0.1	0.9	0.1	285.8	0.7	0.1	97.5	3.6	0.7	1.5
As	0.1	4	>100	0.9	76	0.4	<0.1	>100	>100	63.6	>100
Cd	0.1	2.9	46.3	0.9	3127.1	8.1	1.6	537.6	87	18.5	13.4
Co	1	31.6	76.1	<1	296.9	<1	<1	11.3	6.3	1.4	5.3
Cu	1	66	7	6	266	6	4	267	15	5	5
Fe	100	29191	2752	358	36677	854	451	7798	8180	1942	2715
In	0.5	<0.5	<0.5	<0.5	7.67	<0.5	<0.5	1.89	<0.5	<0.5	<0.5
Mg	100	19305	1681	2649	807	3159	3330	504	2502	2851	1820
Mn	6	916	397	66	171	34	71	380	456	355	119
Pb	0.05	13	1684	16	1071	4	4	1649	3455	527	124
Sb	0.5	<0.5	9.9	1	>100	0.6	<0.5	5.3	14.3	8	5.3
Se	0.5	1.19	7.32	<0.5	105.08	1.44	0.69	2.58	1.18	2.05	2.24
K	100	5039	<100	<100	668	<100	<100	<100	116	<100	<100
Al	100	47124	350	226	2084	945	357	560	1311	299	570
S	50	1705	1011	136	>3%	784	281	180	739	382	2044
Ni	1	281	179	4	28	8	3	10	13	10	10
Zn	1	210	>3%	58	>3%	204	253	9340	2563	625	5774

ادامه جدول ۲. تجزیه دستگاهی ICP-MS مربوط به نمونه‌های برداشت‌شده از بخش روباز معدن روی-سرب انگوران. نتایج آنالیزها بر اساس ppm است (DL: Detection limit).

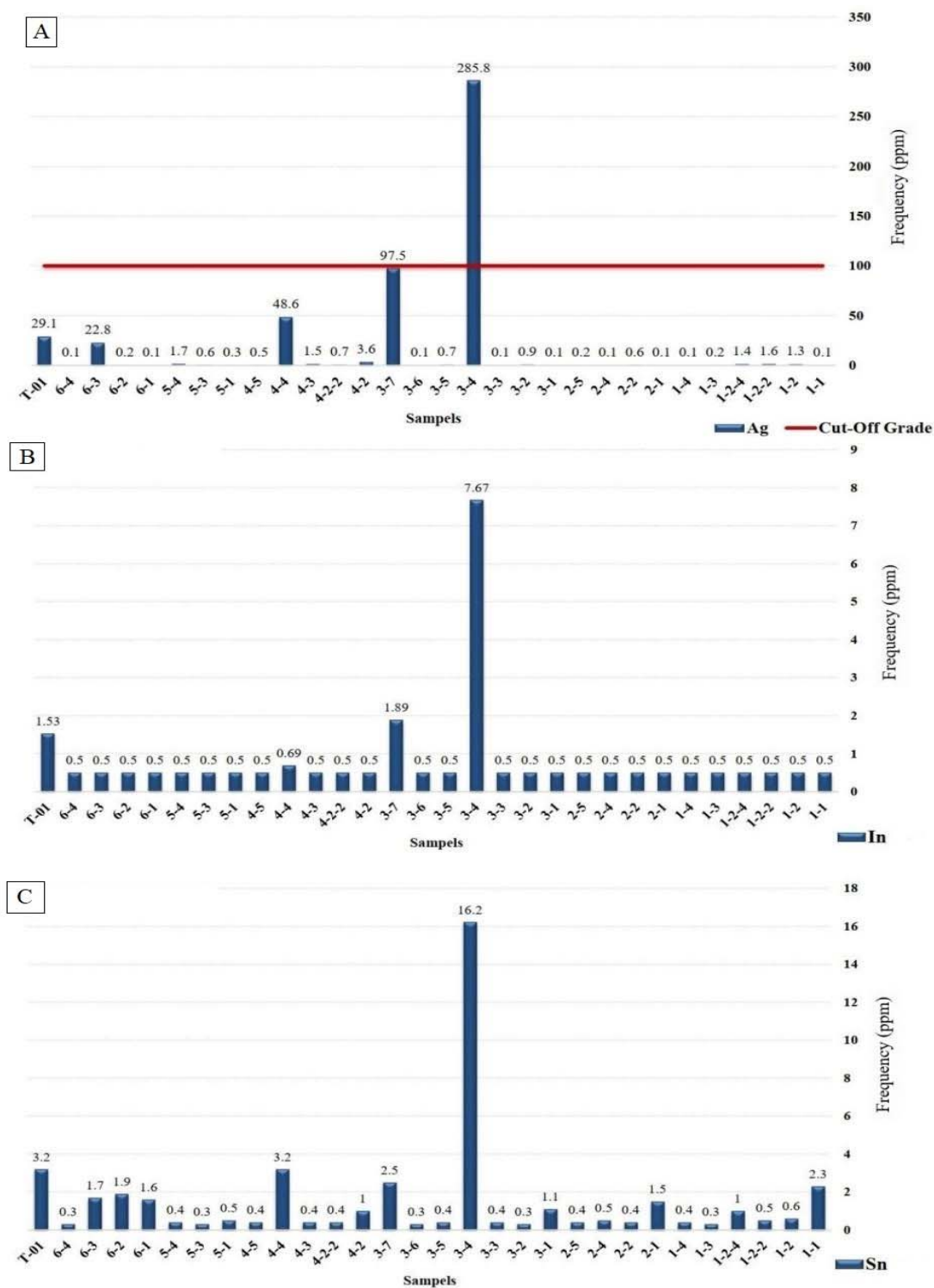
Table 2 (Continued). ICP-MS analysis data of samples which taken from open- pit part of the Angouran mine. The result of data are in ppm (DL: Detection limit).

Sample No.	DL	4-4	4-5	5-1	5-3	5-4	6-1	6-2	6-3	6-4	T-01
Ag	0.1	48.6	0.5	0.3	0.6	1.7	<0.1	0.2	22.8	0.1	29.1
As	0.1	>100	4.1	85.3	6.2	>100	4.1	7	>100	0.5	>100
Cd	0.1	613.9	14	1.1	0.9	58.8	0.9	0.8	467.6	1.6	2325.2
Co	1	252.9	1.4	5.1	<1	52.7	9.9	20.9	70.4	<1	366.1
Cu	1	58	9	5	4	9	26	258	55	4	1176
Fe	100	9890	1334	4931	646	6577	19822	34515	7225	917	9409
In	0.5	0.69	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	1.53
Mg	100	872	2101	11353	2648	922	8270	>2%	3183	3779	563
Mn	6	390	355	371	138	419	142	1061	757	65	371
Pb	0.05	3946	97	32	470	2302	14	15	1910	12	7403
Sb	0.5	30	2.5	1.8	8	>100	1	1.2	8.6	0.7	>100
Se	0.5	53.71	0.59	0.74	<0.5	6.82	0.61	2.37	16.63	<0.5	83.89
K	100	4008	<100	2056	<100	<100	12595	6943	<100	200	197
Al	100	20818	1197	7448	571	401	32641	46575	2069	1133	1211
S	50	2762	126	4297	195	175	679	13974	94	611	>3%
Ni	1	73	4	7	2	120	25	64	87	5	176
Zn	1	>3%	194	187	79	>3%	177	525	>3%	48	>3%



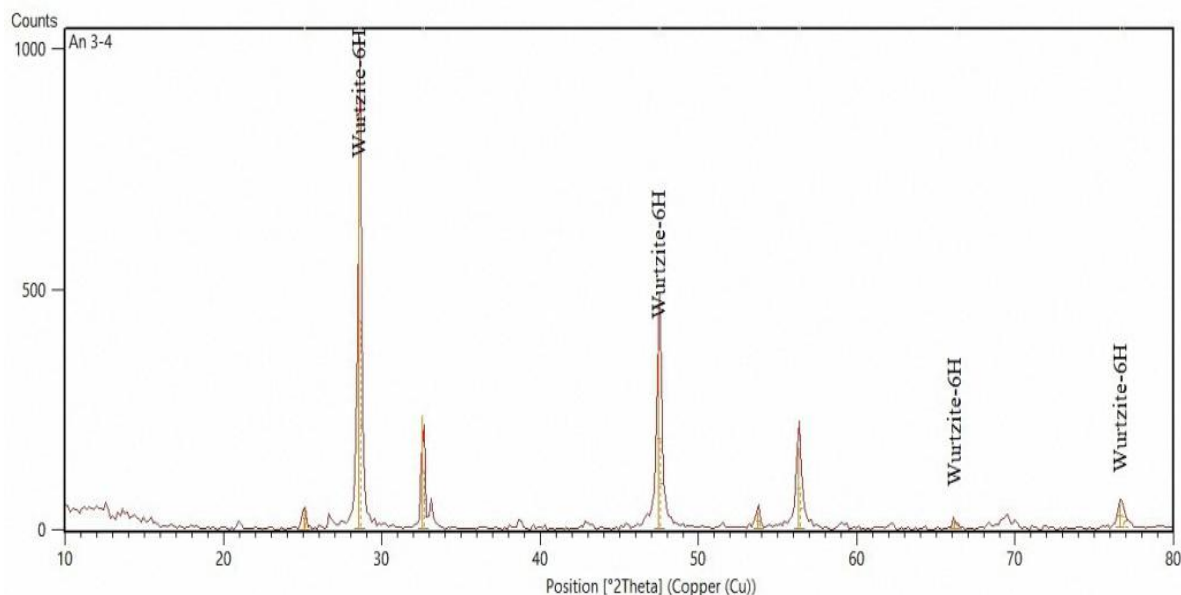
شکل ۶ تصویر مربوط به نتایج تجزیه ژئوشیمیایی نمونه‌ها در معدن انگوران که دو نوع متفاوت از اسفالریت در آن شناسایی شده است. اسفالریت نوع اول (نمونه ۳-۴) فقیر از عناصر سرب و مس و اسفالریت نوع دوم (نمونه T-01) غنی از عناصر مس و سرب است.

Fig. 6. The image of geochemistry analysis in the Angouran mine which shows two different types of sphalerite. The first type (sample 3-4) is poor in two elements of copper and lead, and the second type (sample T-01) is rich in two elements of copper and lead.



شکل ۷. A، B و C: تصاویر به ترتیب نشان‌دهنده تمرکز سه عنصر نقره، ایندیم و قلع در نمونه ۳-۴ در معدن انگوران است.

Fig. 7. A, B, and C: images indicate the concentration of the three elements of silver, indium and tin in the sample 4-3, respectively in the Angouran mine.



شکل ۸. تصویر مربوط به نتیجه به دست آمده از طیف‌سنج XRD بر روی نمونه ۳-۴ در معدن انگوران که نشان‌دهنده تشکیل پلی‌مورف ورتزیت در این نمونه است.

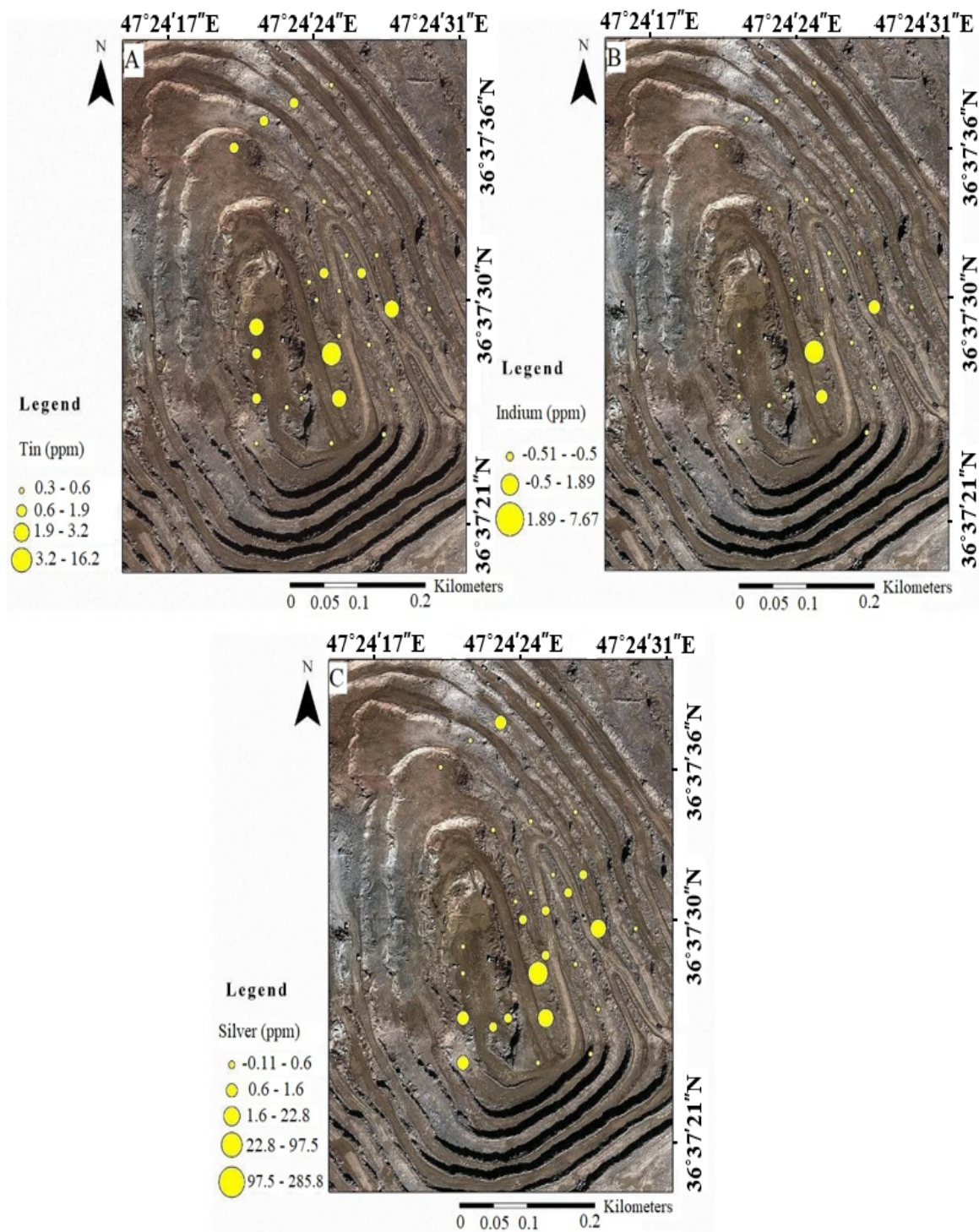
Fig. 8. The image of XRD result from sample 3-4 in the Angouran mine which shows formation of Wurtzite polymorph in this sample.

(شکل ۱۱-A) نشان‌دهنده همبستگی خطی بسیار قوی (بالای ۰/۹) در معدن انگوران است. نتیجه به دست آمده از این همبستگی بیانگر این موضوع است که عنصر نقره، به همراه دو عنصر ایندیم و قلع تحت تأثیر جانشینی دوگانه در شبکه اسفالریت، به صورت $Ag^+ + Sn^{3+} \leftrightarrow 2Zn^{2+} + Ag^+$ و $2Zn^{2+} \leftrightarrow In^{3+}$ جای گرفته است (Bauer et al., 2018; Cook et al., 2009). برخلاف جانشینی ارائه شده در پژوهش‌های پیشین $In^{3+} + Cu^+ \leftrightarrow 2Zn^{2+}$ یا $(Zn^{2+}, Fe^{2+}) \leftrightarrow (Cu^+, In^{3+})$ (Marangi, 2017) و با توجه به عدم همبستگی بین دو عنصر ایندیم و مس (شکل ۱۱-B)، جانشینی ایندیم در ساختار اسفالریت مختص به حضور عنصر مس نبوده و عنصر ایندیم می‌تواند در نمونه‌های غنی از نقره و فقیر از مس توسط جانشینی دوگانه $2Zn^{2+} \leftrightarrow Ag^+ + In^{3+}$ نیز در شبکه اسفالریت شرکت کند.

علاوه بر شواهد ذکر شده در بالا، طبق نتایج به دست آمده از نقشه پراکندگی (شکل ۹-A، B و C) و شبکه‌بندی Kriging (شکل ۱۰-A، B و C)، دو عنصر ایندیم و قلع دارای پراکندگی و جای مکان مشابهی با نقره در بخش روباز معدن انگوران هستند.

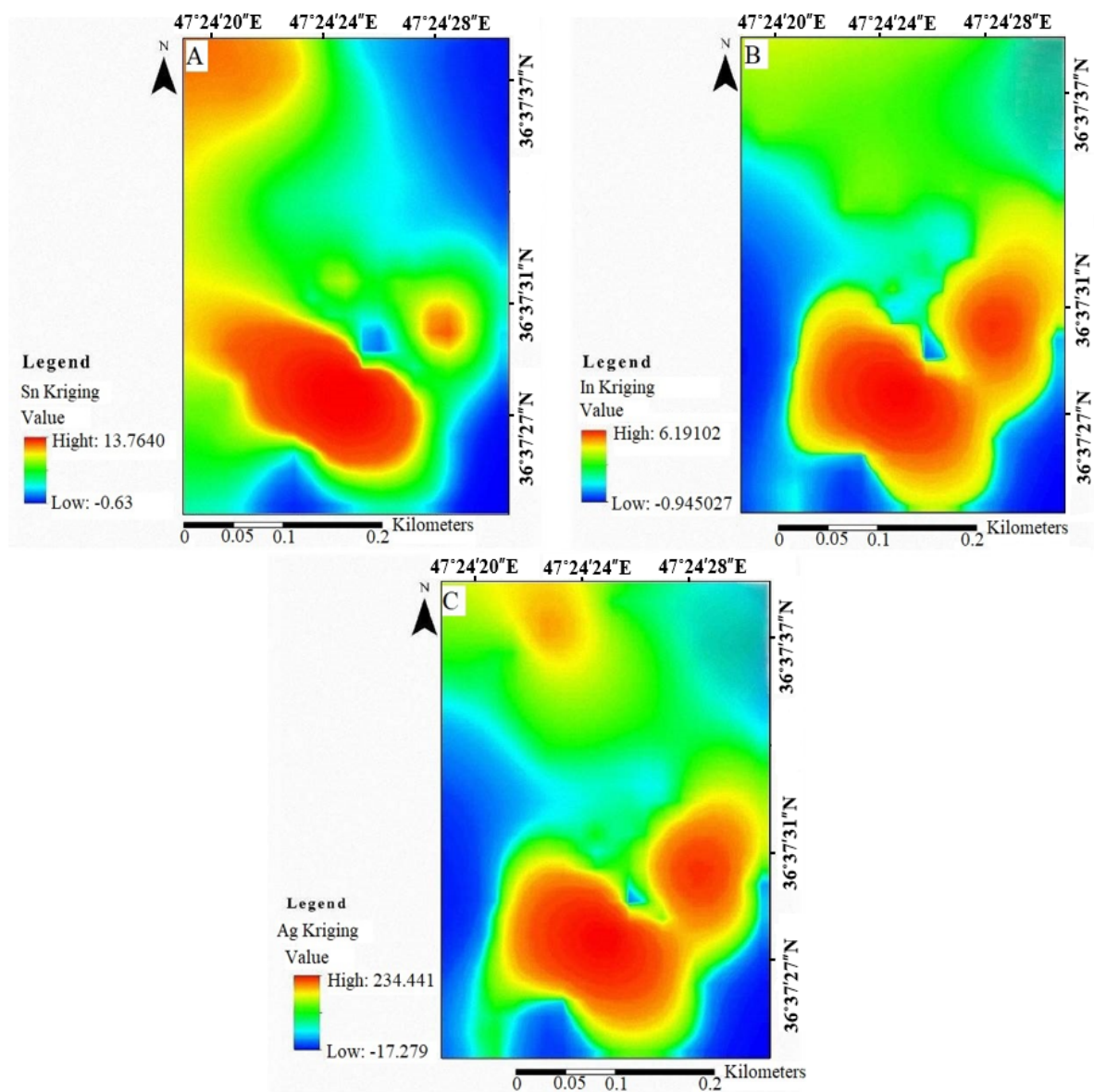
نکته قابل توجه این است که نمونه ۳-۴ دارای میزان سرب بسیار پایینی نسبت به سایر نمونه‌های سولفیدی خود است (شکل ۶)؛ بنابراین، علاوه بر پژوهش‌های انجام شده پیشین (Daliran et al., 2013)، عنصر اقتصادی نقره، تنها به صورت $Ag^+ + (Bi, Sb)^{3+}$ یا به صورت جانشینی دوگانه $2Pb^{2+} \leftrightarrow$ در شبکه گالن رخ‌نداده است و مختص به این کانی‌ها نیست (George et al., 2015; Wang et al., 2018).

نمودارهای همبستگی دو متغیره $Ag-Sn$ ، $Ag-In$ و $Sn-In$



شکل ۹. A، B و C: تصاویر به ترتیب نشان‌دهنده نقشه پراکندگی سه عنصر قلع، ایندیم و نقره در بخش روباز معدن انگوران است.

Fig. 9. A, B, and C: images represent the dispersion maps of three elements of tin, indium and silver in the open-pit of the Angouran mine, respectively.



شکل ۱۰. A، B و C: تصاویر نشان‌دهنده جای‌مکان مشابه به‌دست آمده از پهنه‌بندی Kriging به ترتیب برای سه عنصر قلع، ایندیم و نقره در بخش روباز معدن انگوران است.

Fig. 10. A, B, and C: images represent the similar locations of the kriging zoning of three elements of tin, indium and silver in the open-pit part of the Angouran mine, respectively.

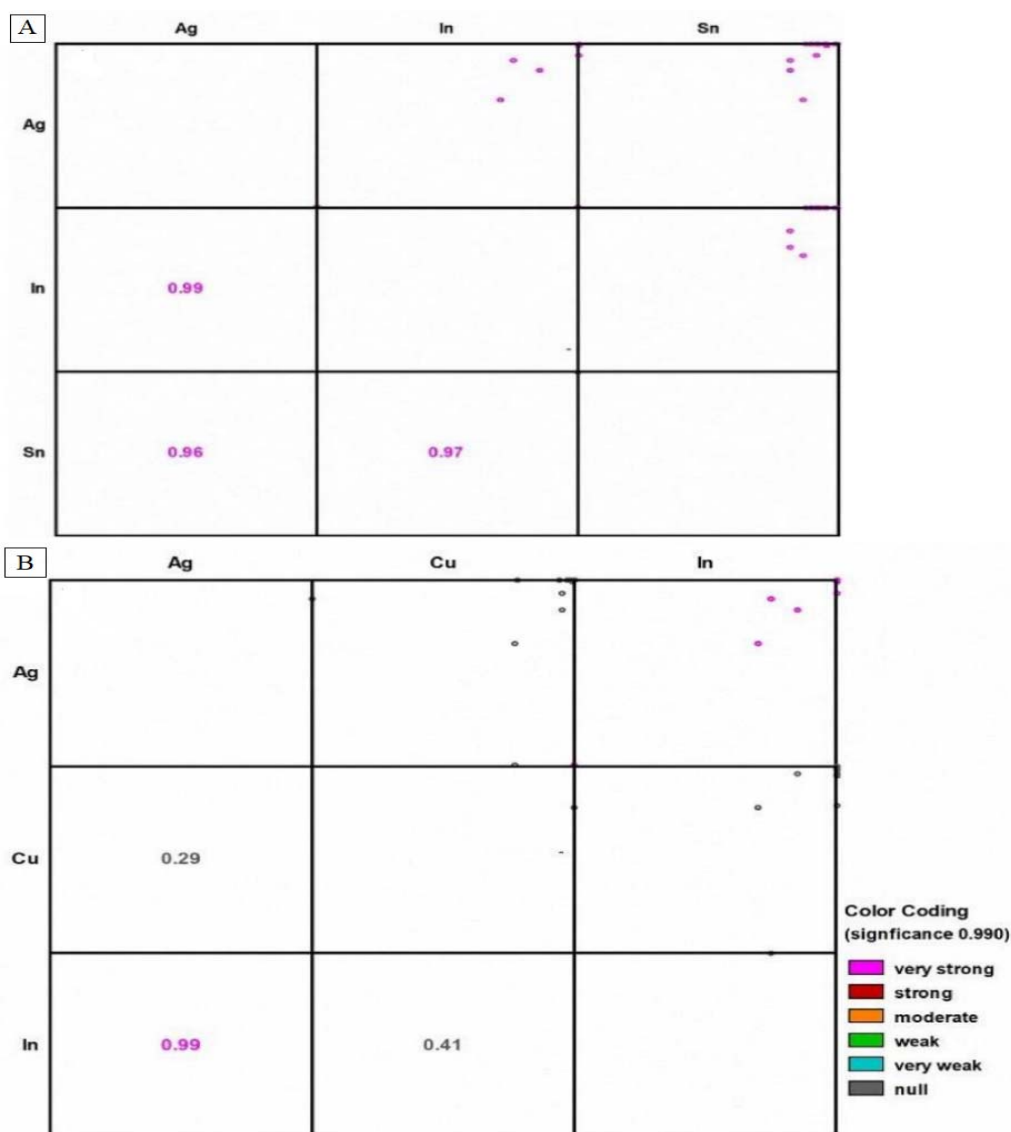
کادمیم و کبالت

میانگین این عناصر به ترتیب شامل ۱۵۰۵ ppm و ۱۸/۹ ppm است (شکل ۱۲-A و B) که نشان‌دهنده تجمع بالای آن در بخش‌های مرکزی منطقه کانه‌زایی و در ارتباط با کانسننگ

مقادیر عنصر کادمیم و کبالت در نمونه‌های سولفیدی معدن انگوران، به ترتیب ۳۱۲۷/۱ ppm و ۳۶۶/۱ ppm است (مقدار

روی در این محدود قرار می‌گیرد (Butterman and Plachy, 2004c). کادمیم از دیگر عناصری است که در بخش روباز معدن روی-سرب انگوران تجمع اقتصادی قابل توجهی را در نمونه سولفیدی فقیر از سرب به خود اختصاص می‌دهد.

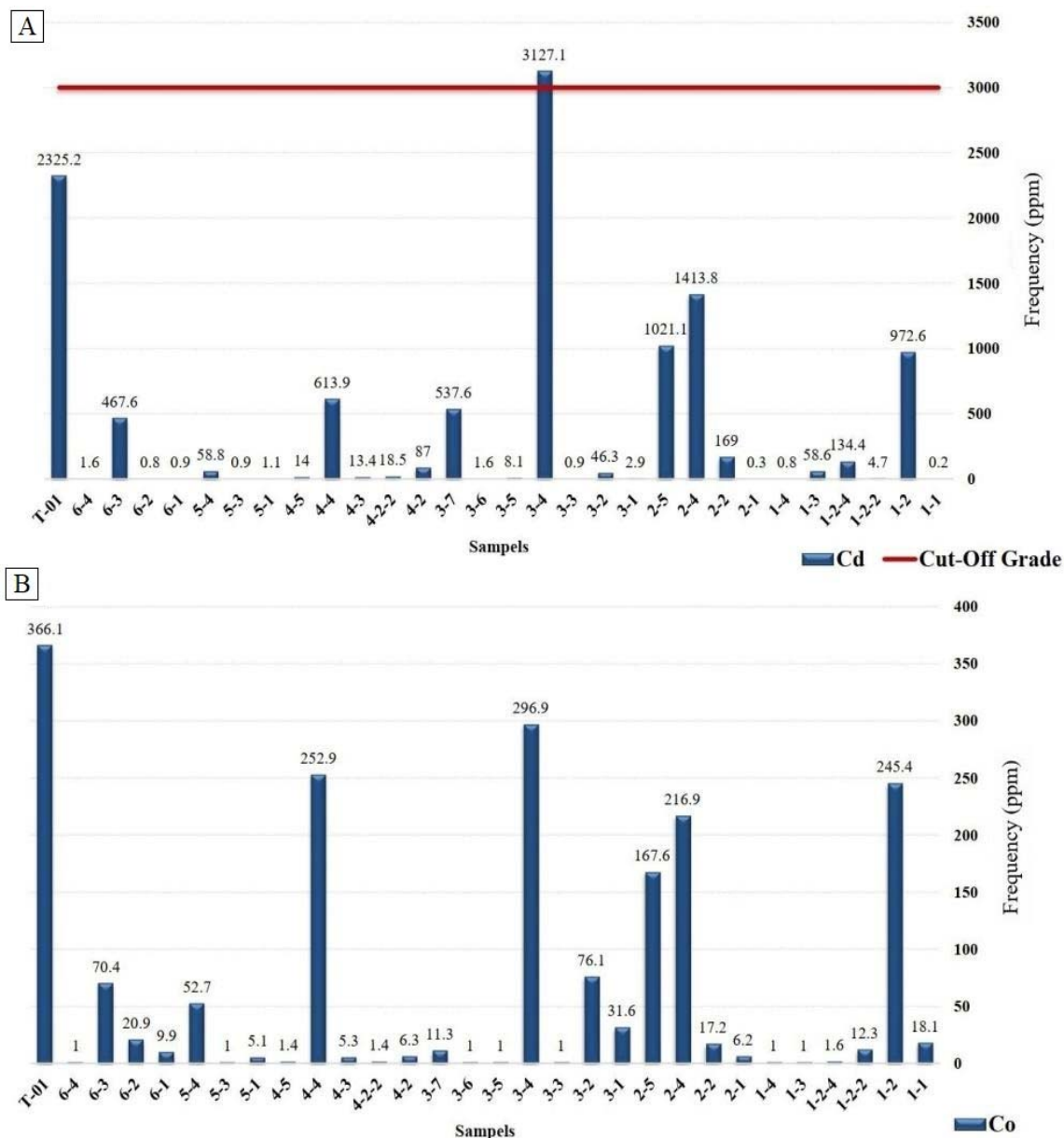
سولفیدی است. محتوای کادمیم در کانسنگ‌های روی می‌تواند تا حد بالای ۱/۳ درصد نیز تشکیل شود؛ اما عیار حد این عنصر به طور معمول در کانسنگ‌های سولفید روی در حدود ۰/۲ تا ۰/۳ درصد معادل ۲۰۰۰ ppm تا ۳۰۰۰ ppm در نظر گرفته می‌شود که میانگین کادمیم گزارش شده حاصل از کنسانتره‌های



شکل ۱۱. A: تصویر مربوط به مقایسه همبستگی Ag-In، Ag-Sn و Sn-In در معدن انگوران که نشان‌دهنده همبستگی بسیار قوی این سه عنصر است و

B: تصویر مربوط به عدم همبستگی معنادار بین دو عنصر ایندیم و مس در معدن انگوران

Fig. 11. A: The image relates to the correlation between Ag-In, Ag-Sn and Sn-In in the Angouran mine, which shows a strong correlation between these three elements, and B: The image of the lack of significant correlation between the two elements of indium and copper in the Angouran mine

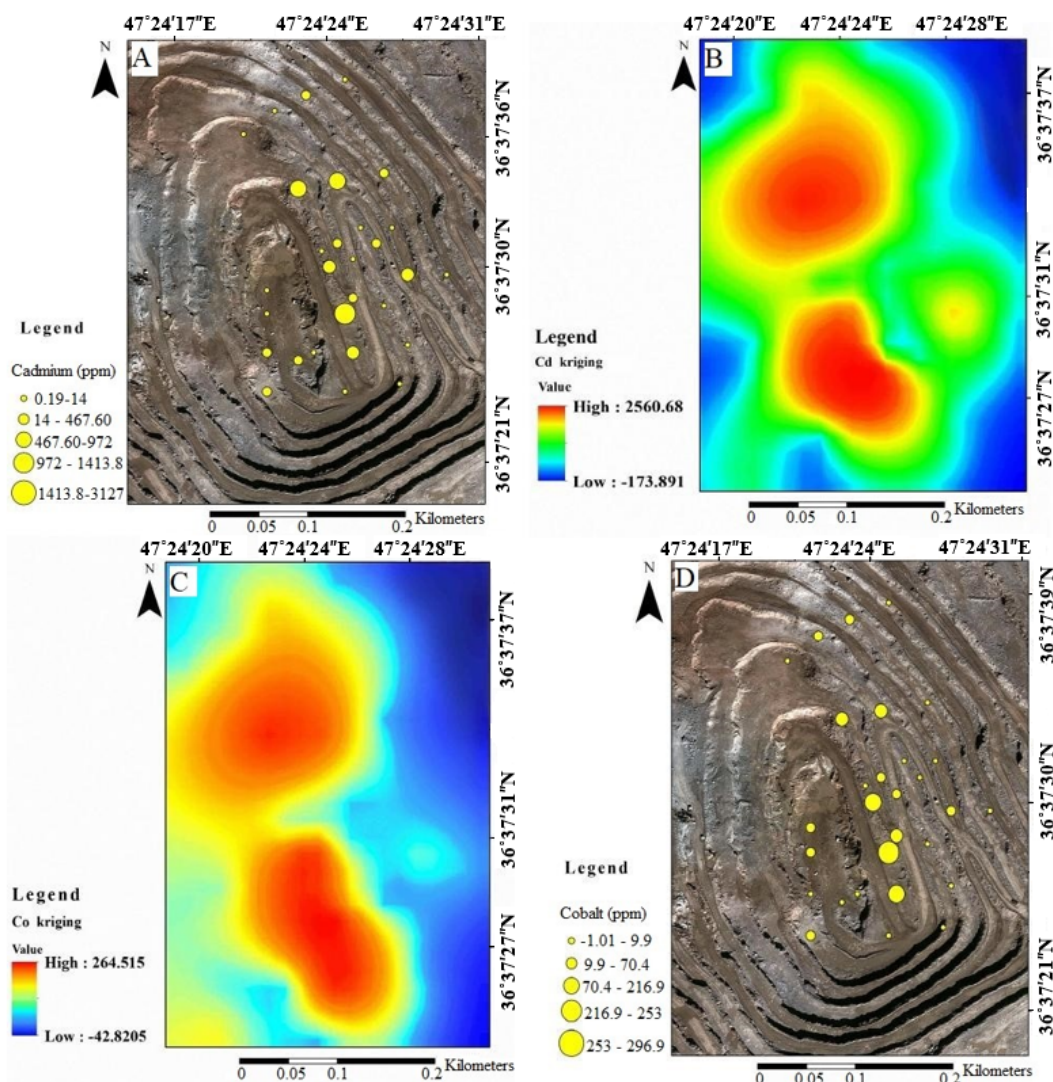


شکل ۱۲. نمودارهای مربوط به دو عنصر A: کادمیم و B: کبالت در معدن انگوران

Fig. 12. Diagrams of two (A) cadmium and (B) cobalt elements in the Angouran mine

اغلب مانند نمونه ۳-۴ دارای پلی مورف ورتزیت هستند) است و می‌تواند نشان‌دهنده همبستگی بالای این عناصر در معدن انگوران باشد (شکل ۱۳- A و B و C و D).

طبق نتایج به‌دست آمده از نقشه پراکندگی و شبکه‌بندی Kriging، عنصر کادمیم و کبالت دارای پراکندگی و جای‌مکان مشابهی با بخش‌های سولفیدی است که این موضوع توجه‌کننده تمرکز بالای این عناصر در نمونه‌های اسفالریت (که



شکل ۱۳. تصاویر مربوط به نقشه زمین‌آمار Kriging و نقشه پراکندگی دو عنصر کادمیم و کبالت در بخش روباز معدن انگوران. A و B: به ترتیب نشان‌دهنده نقشه پراکندگی و جای مکان به‌دست آمده از پهنه‌بندی Kriging برای عنصر کادمیم در بخش روباز معدن انگوران است. C و D: به ترتیب نشان‌دهنده جای مکان به‌دست آمده از پهنه‌بندی Kriging و نقشه پراکندگی عنصر کبالت در بخش روباز معدن انگوران است.

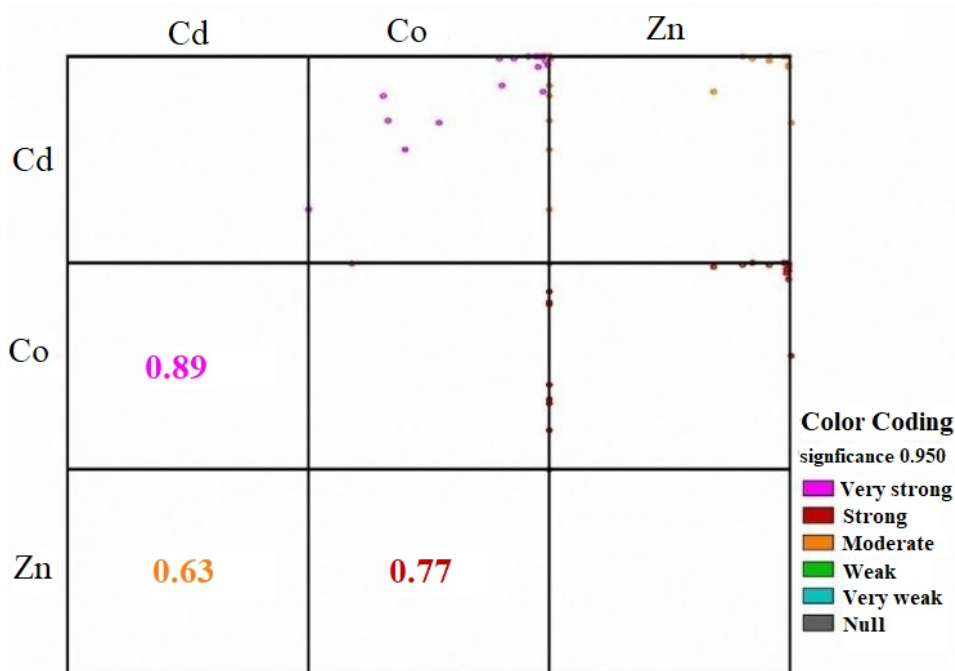
Fig. 13. Images of kriging geostatistics map and the distribution map of two elements of cadmium and cobalt in the open-pit part of the Angouran mine. A and B: represent the distribution map and locations of the kriging zoning for cadmium element in the open-pit of the Angouran mine, respectively. C and D: represent the locations of the kriging zoning and distribution map of cobalt element in the open-pit part of the Angouran mine, respectively.

اسفالریت است (Kritikos, 2016; Wang et al., 2018). مقایسه صورت گرفته از همبستگی بین سه عنصر کادمیم، کبالت و روی نشان‌دهنده همبستگی بالا بین این سه عنصر است که

Cd^{2+} و Co^{2+} دارای شعاع یونی مشابهی با Zn^{2+} هستند که غلظت بالای این دو عنصر نشان‌دهنده همبستگی قوی از طریق جانشینی $\text{Cd}^{2+} \leftrightarrow \text{Zn}^{2+}$ و $\text{Co}^{2+} \leftrightarrow \text{Zn}^{2+}$ در ساختار

در برخی از نمونه‌های باطله کربنات می‌تواند در نتیجه کانه‌زایی در فرادیواره کربنات معدن انگوران باشد.

تأیید‌کننده جانشینی دو عنصر کادمیم و کبالت در ساختار اسفالریت است (شکل ۱۴). تمرکز دو عنصر کادمیم و کبالت



شکل ۱۴. تصویر مربوط به مقایسه همبستگی سه عنصر کادمیم، کبالت و روی در معدن انگوران که نشان‌دهنده همبستگی قوی بین این سه عنصر است.

Fig. 14. The image relates to the correlation between the three elements of cadmium, cobalt and zinc in the Angouran mine, which shows a strong correlation between these three elements.

سلنیوم

(A-۱۵).

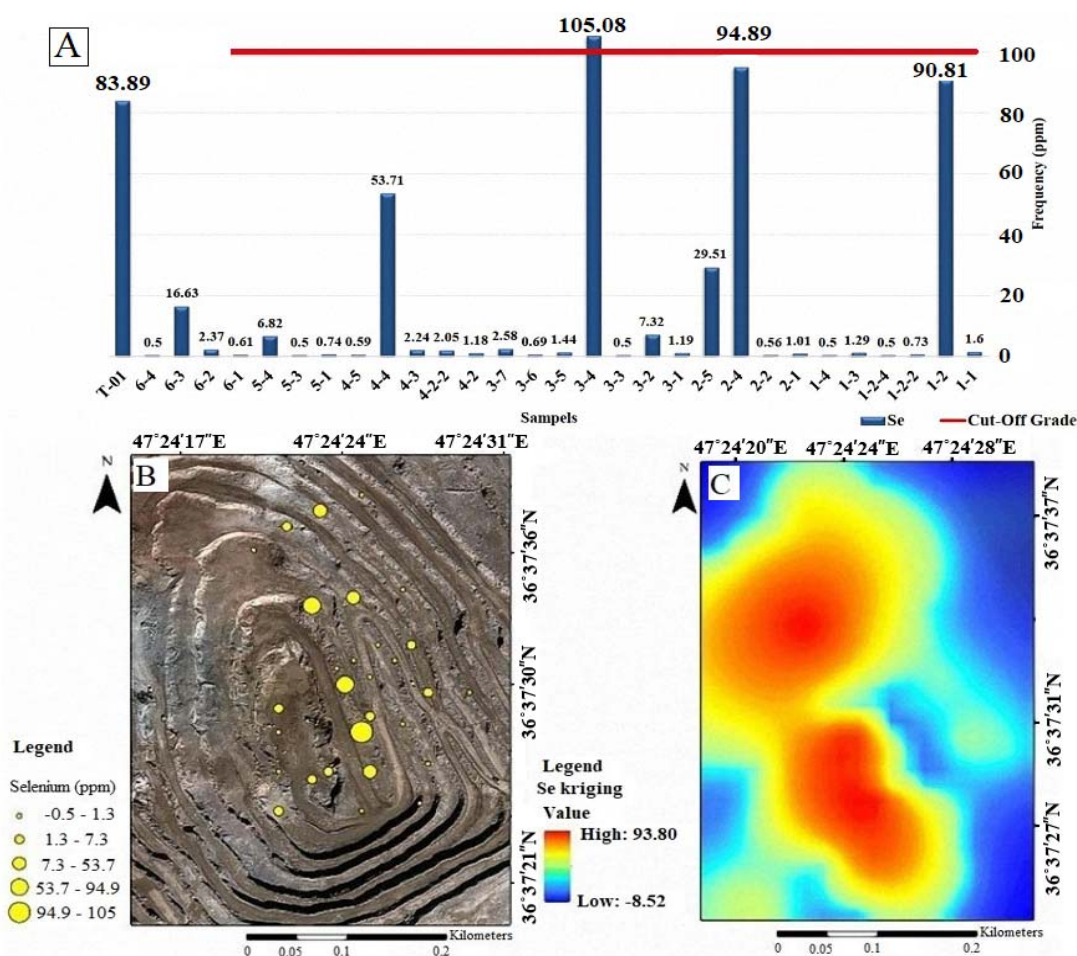
با توجه به این موضوع که بیشترین تمرکز عنصر سلنیوم در نمونه اسفالریت فقیر از سرب (نمونه ۳-۴) رخ داده است، انتظار همبستگی بالای Se-Zn دور از انتظار نیست. تمرکز عنصر سلنیوم در برخی از نمونه‌های باطله کربنات می‌تواند در نتیجه کانه‌زایی در فرادیواره کربنات معدن انگوران باشد.

نقشه به دست آمده از پراکندگی این عنصر (شکل B-۱۵) نیز نشان‌دهنده تجمع عنصر سلنیوم در بخش‌های مرکزی منطقه کانه‌زایی و در ارتباط با کانه‌زایی سولفیدی است. تصویر به دست آمده از شبکه‌بندی Kriging عنصر سلنیوم (شکل ۱۵-C)، نشان‌دهنده توزیع این عنصر در ارتباط با بخش سولفیدی

سلنیوم دارای ارتباط نزدیکی با گوگرد است؛ زیرا شعاع یونی Se^{2-} تنها کمی بزرگ‌تر (حدود هشت درصد) از آنیون گوگرد S^{2-} است. در نتیجه به راحتی می‌تواند جایگزین گوگرد در ساختار کانی‌های سولفیدی شود. (Butterman and Brown, 2004a). عیار حد در نظر گرفته شده برای عنصر سلنیوم برای استخراج به عنوان یک محصول جانبی ۰/۰۴ درصد معادل ۴۰۰ ppm است (Bhappu, 1962) که بالاترین مقدار این عنصر در معدن روی-سرب انگوران، ۱۰۵/۰۸ ppm در ارتباط با نمونه غنی از اسفالریت (نمونه ۳-۴) که دارای پلی‌مورف ورتزیت است) و فقیر از سرب اندازه‌گیری شده است (شکل

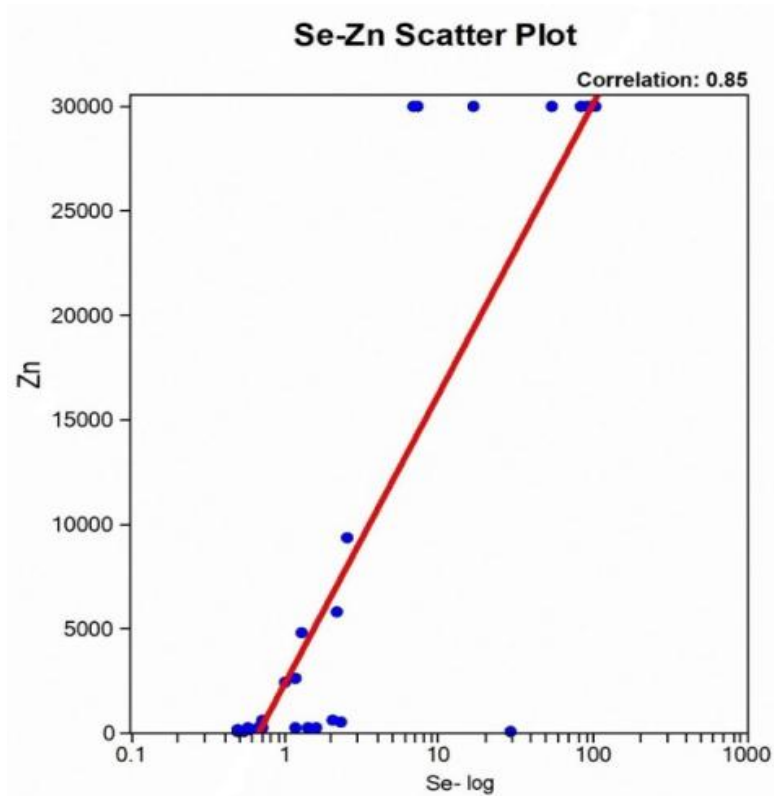
(Marshall and Fairbridge, 2006). همبستگی بالای دو عنصر سلیوم و روی (شکل ۱۶) می‌تواند تأییدکننده این موضوع باشد که سلیوم به صورت محلول جامد بین ZnS و ZnSe در ساختار اسفالریت شرکت کرده است ($\text{Se}^{2-} \leftrightarrow \text{S}^{2-}$) (Kritikos, 2016).

معدن انگوران است که دارای تطابق با مطالب ارائه‌شده و نتایج حاصل از تجزیه ژئوشیمیایی است. بنابراین با توجه به این موضوع که تمرکز سلیوم در معدن انگوران بالاتر از عیار حد در نظر گرفته شده برای این عنصر است؛ می‌توان از آن به عنوان یک محصول جانبی با ارزش، استخراج و بهره‌برداری کرد. این عنصر اقتصادی در سطوح بالا می‌تواند به شدت سمی باشد



شکل ۱۵. تصاویر مربوط به میزان تجمع، نقشه زمین‌آمار Kriging و نقشه پراکندگی عنصر سلیوم در معدن انگوران است. A: تصویر مربوط به تمرکز عنصر سلیوم در معدن انگوران، B: تصویر مربوط به نقشه پراکندگی عنصر سلیوم در بخش روباز معدن انگوران و C: تصویر مربوط به پهنه‌بندی Kriging به دست آمده برای عنصر سلیوم در بخش روباز معدن انگوران

Fig. 15. Images of accumulation, kriging geostatistics map and the distribution map of selenium element in the Angouran mine. A: The image of the concentration of selenium element in the Angouran mine, B: The image of the distribution maps of selenium element in the open-pit part of the Angouran mine, and C: The image of the kriging zoning of selenium element in the open-pit part of the Angouran mine



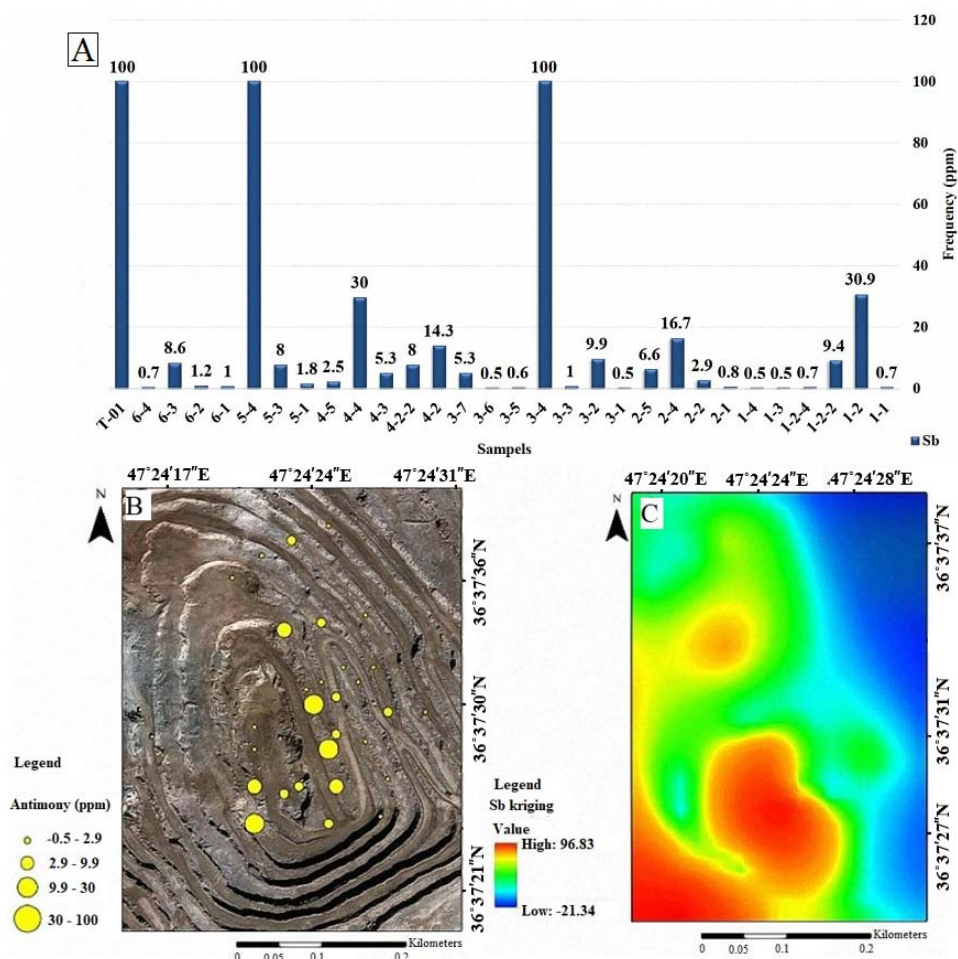
شکل ۱۶. تصویر مربوط به نمودار پراکندگی سلینیوم- روی در معدن انگوران است که روند به‌دست آمده نشان‌دهنده همبستگی بالا بین این دو عنصر است.

Fig. 16. The image of scatter diagram of selenium- zinc in the Angouran mine which shows the high correlation between these two elements.

آنتیموان

آنتیموان در کانسنگ‌های سولفیدی تمایل زیادی به حضور با عناصری همچون مس، سرب و نقره دارد (Butterman and Carlin Jr, 2004b). با توجه به همراهی آنتیموان با عناصری همچون سرب و نقره، تمرکز این عنصر در بخش کانسنگ سولفیدی معدن روی- سرب انگوران دور از انتظار نیست. محدوده عیار اقتصادی عنصر آنتیموان برای استخراج از ۱/۵ تا ۶۰ درصد معادل ۱۵۰۰۰ ppm تا ۶۰۰۰۰۰ ppm در نظر گرفته می‌شود (Butterman and Carlin, 2004b) که بیشترین میزان تجمع عنصر آنتیموان در معدن روی- سرب انگوران در حدود ۱۰۰ ppm اندازه‌گیری شده است (شکل ۱۷-A).

آنتیموان از عناصری است که در بخش سولفید معدن انگوران از توضیح یکسانی برخوردار است. تجمع مشابه این عنصر در نمونه اسفالریت فقیر از سرب (نمونه ۴-۳ که دارای پلی‌مورف ورتزیت است) و نمونه اسفالریت غنی از سرب (نمونه T-01) می‌تواند نشان‌دهنده همبستگی عنصر آنتیموان با روی و سرب و شرکت در ساختار هر دو کانی اسفالریت و گالن باشد. عنصر آنتیموان دارای کمترین تمرکز در نمونه‌های باطله کربنات و فرودپواره شست در معدن انگوران است که مقدار تمرکز جزئی این عنصر در برخی از نمونه‌های باطله کربنات می‌تواند در نتیجه کانه‌زایی در فرادپواره کربنات معدن انگوران باشد (شکل ۱۷-B و C).



شکل ۱۷. تصاویر مربوط به میزان تجمع، نقشه زمین‌آمار Kriging و نقشه پراکندگی عنصر آنتیموان در معدن انگوران است. A: تمرکز عنصر آنتیموان در معدن انگوران، B: نقشه پراکندگی عنصر آنتیموان در بخش روباز معدن انگوران و C: پهنه‌بندی Kriging به دست آمده برای عنصر آنتیموان در بخش روباز معدن انگوران

Fig. 17. Images of accumulation, kriging geostatistics map, and the distribution map of antimony element in the Angouran mine. A: the concentration of antimony element in the Angouran mine, B: the distribution maps of antimony element in the open-pit part of the Angouran mine, and C: the kriging zoning map of antimony element in the open-pit part of the Angouran mine

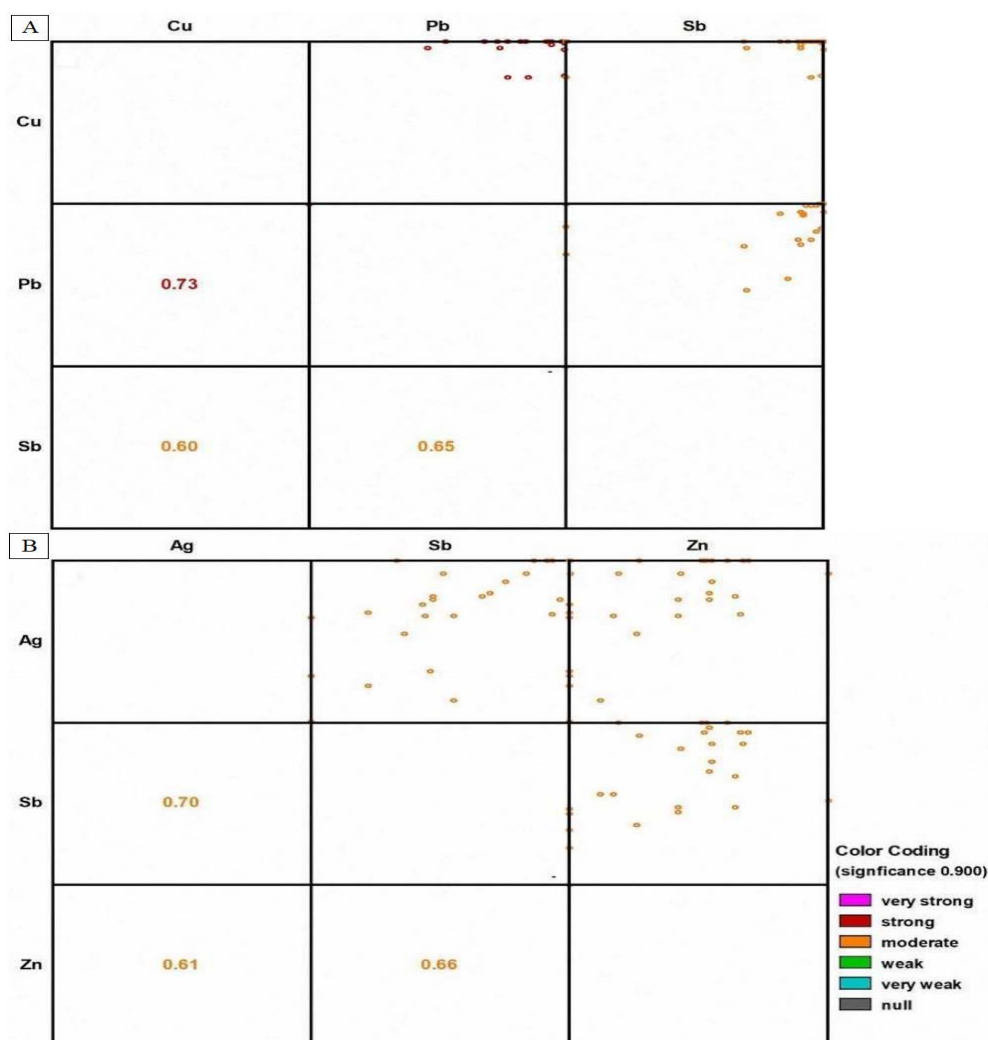
غنی از سرب (نمونه T-01) و در عین حال تجمع پایین مس در نمونه اسفالریت فقیر از سرب (نمونه ۴-۳) در کنار همبستگی مورد انتظار بین عناصر آنتیموان-مس-سرب (شکل ۱۸-A)، می‌تواند بیانگر جانشینی دوگانه آنتیموان به صورت $\text{Cu}^+ + \text{Sb}^{3+} \leftrightarrow 2\text{Pb}^{2+}$ در شبکه کانی گالن باشد (George et al., 2015). بنابراین جای‌گیری آنتیموان در ساختار اسفالریت‌های

نکته قابل توجه در ارتباط همبستگی آنتیموان با روی و سرب در معدن انگوران این است که بر خلاف پژوهش‌های انجام شده در گذشته (Marangi, 2017)، علاوه بر ذکر همبستگی موجود بین آنتیموان و عناصر مس و سرب، تمرکز آنتیموان را تنها مختص به جانشینی در ساختار کانی اسفالریت می‌دانستند. در حالی که در این پژوهش، تجمع بالای مس در نمونه اسفالریت

$(\text{Cu,Ag})^+ \leftrightarrow 3\text{Zn}^{2+}$ در شبکه اسفالریت رخ داده باشد (Belissont et al., 2014; Bonnet et al., 2016; Kritikos, 2016). بنابر نتایج به دست آمده، جانشینی آنتیموان مختص به کانی اسفالریت نبوده و به دلیل همبستگی مثبتی که بین آنتیموان و عناصر مس و سرب وجود دارد، این عنصر می‌تواند به صورت جانشینی دو گانه نیز وارد ساختار گالن موجود در اسفالریت‌های غنی از کانی سرب شود.

فقیر از سرب و به میزان کمتر مس، سازوکار متفاوتی را پیش می‌گیرد.

در اسفالریت‌های فقیر از سرب، به دلیل غنی بودن از نقره و به میزان بسیار جزئی عنصر مس (شکل ۶ و شکل ۷-A) و با توجه به همبستگی قابل قبول بین عناصر آنتیموان-نقره-روی (شکل ۱۸-B)، انتظار می‌رود که جایگزینی آنتیموان به صورت $\text{Cu, (Cu,Ag)}^{2+} + \text{Sb}^{3+}$ و یا به صورت $(\text{Ag})^+ + \text{Sb}^{3+} \leftrightarrow 2\text{Zn}^{2+}$



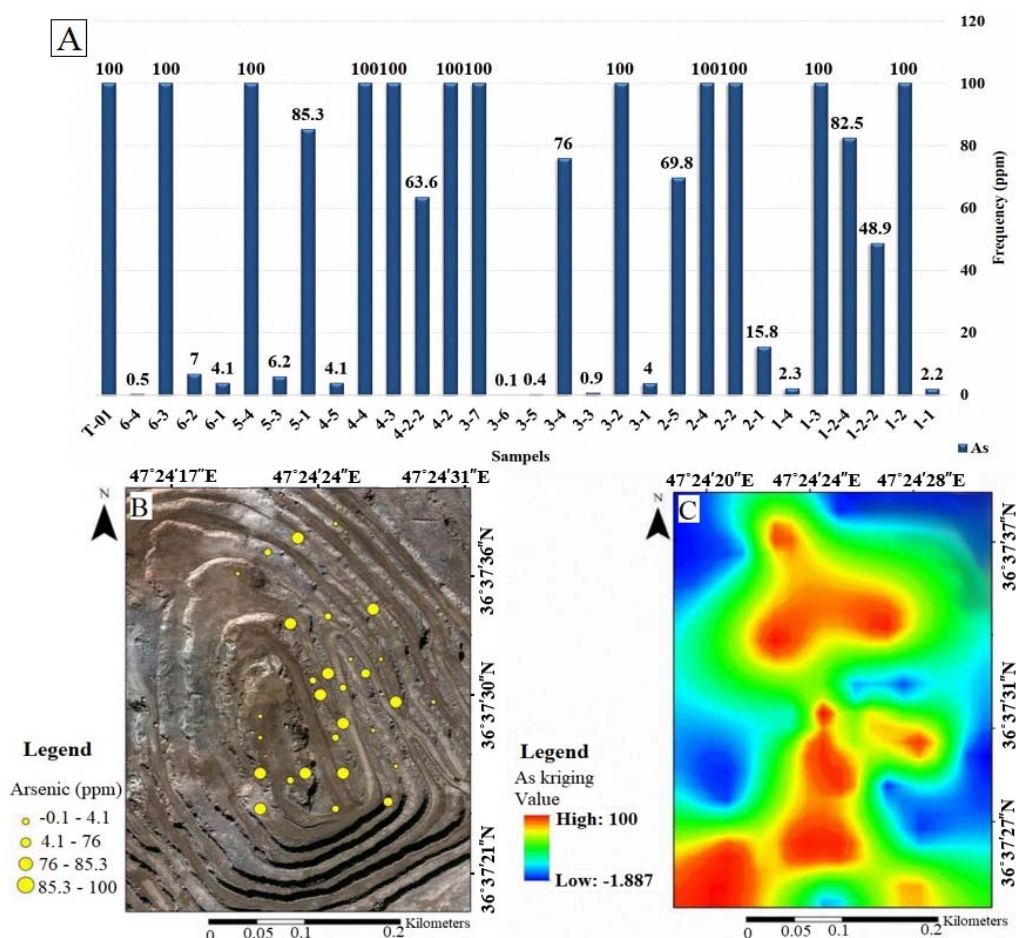
شکل ۱۸. A: مقایسه همبستگی سه عنصر آنتیموان- مس- سرب در معدن انگوران و B: مقایسه همبستگی سه عنصر آنتیموان- نقره- روی در معدن انگوران که نشان‌دهنده همبستگی قوی بین این عناصر در تصاویر A و B است.

Fig. 18. A: the correlation between the three elements of antimony- copper- lead in the Angouran mine, and B: the correlation between the three elements of antimony- silver- zinc in the Angouran mine, which shows a strong correlation between these elements in the A and B images.

آرسنیک

میمتیت‌های کانسنگ کربناته هستند T نیز در این معدن گزارش شده است. توضیحات ذکر شده دارای مطابقت کامل با نتایج حاصل از تجزیه انجام شده و نقشه پراکندگی تهیه شده از این عنصر است که تجمع آرسنیک تا بیش از ۱۰۰ ppm با پراکندگی نسبتاً ثابت و یکنواخت را در نمونه‌های سولفید و کربناته نشان می‌دهد (شکل ۱۹- A، B و C).

تجمع اصلی آرسنیک در معدن روی-سرب انگوران به صورت آرسنوپیریت در کانسنگ سولفیدی و میمیتیت در کانسنگ کربناته رخ داده است. مقادیر بسیار کمی از ادخال جزئی سرب آرسنات-فسفات-سولفات، همچنین سولفوسالت‌ها (Daliran et al., 2013) و به مقادیر جزئی کانی‌های آدیمیت ($\text{Zn}_2\text{AsO}_4\text{OH}$) و بودانتیت ($\text{PbFe}_3(\text{OH})_6\text{SO}_4\text{AsO}_4$) (Moradi and Monhemius, 2011) که در ارتباط با



شکل ۱۹. تصاویر مربوط به میزان تجمع، نقشه زمین‌آمار Kriging و نقشه پراکندگی عنصر آرسنیک در معدن انگوران است. A: تمرکز عنصر آرسنیک، B: نقشه پراکندگی عنصر آرسنیک در بخش روباز معدن انگوران و C: پهنه‌بندی Kriging به‌دست آمده برای عنصر آرسنیک در بخش روباز معدن انگوران

Fig. 19. Images of accumulation, kriging geostatistics map, and the distribution map of arsenic element in the Angouran mine. A: the concentration of arsenic element, B: the distribution maps of arsenic element in the open-pit part of the Angouran mine, and C: the kriging zoning map of arsenic element in the open-pit part of the Angouran mine

بیشتری از آهن (Fe)، کادمیم (Cd) و منگنز (Mn) را نسبت به اسفالریت دارد.

ینو و همکاران (Ueno et al., 1996)، با بررسی دمای گذار ورتزیت در سیستم Zn-Fe-Ga-S به این نتیجه رسیدند که ورتزیت در جزء غنی از گالیم (Ga) و گوگرد ایجاد می‌شود. بر طبق این شواهد، نتیجه گرفتند که حضور عناصر فلزی کمیاب می‌تواند دمای گذار را پایین آورده و موجب تشکیل ورتزیت شود؛ در حالی که افزایش فوگاسیته گوگرد موجب افزایش دمای گذار اسفالریت به ورتزیت می‌شود.

بونت و همکاران (Bonnet et al., 2016)، با بررسی اسفالریت‌های کانسار Tennessee که یک کانسار MVT دما پایین (۱۰۰ تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد) است، متوجه این موضوع شدند که ساختار کوبیک اسفالریت زمانی غالب است که محتوای ژرمانیوم (Ge) و مس آن پایین باشد و غنی‌شدگی از آهن و کادمیم در محیط وجود داشته باشد. در مقابل، نوع هگزگونال ورتزیت زمانی رخ می‌دهد که غنی‌شدگی آهن و کادمیم به همراه مقدار بالای ژرمانیوم و مس در محیط وجود داشته باشد. این گزارش ضمن تکمیل و تأیید استدلال‌های ارائه‌شده توسط اسکات و بارنز (Scott and Barnes, 1972) و ینو و همکاران (Ueno et al., 1996)، توانست دیدگاه جدید از حالت گذار اسفالریت به ورتزیت را به ارمغان آورد که محیط احيایی و فوگاسیته پایین گوگرد به همراه حضور عناصر فلزی کمیاب همچون ژرمانیوم و گالیوم و مس، می‌تواند توضیح‌دهنده حضور ساختار ورتزیت در یک کانسار دما پایین باشد.

توضیحات ذکر شده، بیانگر این موضوع است که، همزیستی اسفالریت با پلی‌مورف دما بالای ورتزیت در یک کانسار دما پایین، می‌تواند به عنوان یک معرف و ردیاب برای دسترسی به مکان‌های غنی‌شده از عناصر فلزی کمیاب استفاده شود. طبق گزارش بونت و همکاران (Bonnet et al., 2016)، کانسار Tennessee دارای عوامل اصلی ذکر شده مانند فوگاسیته نسبتاً پایین گوگرد، دمای پایین کانی‌زایی و حضور همزیست اسفالریت و ورتزیت است.

مقادیر قابل توجهی از آرسنیک در تراورتن‌های تکاب (ppm ۲۵۸-۱۱۵) و چندین چشمه آب گرم در تمامی منطقه گزارش شده است که نشان‌دهنده گردش سیالات هیدروترمال در مقیاس ناحیه‌ای است (Boni et al., 2007).

عنصر آرسنیک برای انسان، حیوانات و گیاهان عنصری سمی بوده که میزان استاندارد آن توسط سازمان جهانی سلامت (WHO) ۰/۰۱ ppm در نظر گرفته شده است (Adriano, 2001)؛ لذا چنین مقادیر بالا و گسترش وسیع آرسنیک در معدن انگوران به خصوص انباشت عظیم باطله‌ها در بخش‌های جنوب و جنوب غرب معدن (شکل ۱)، می‌تواند تهدید بزرگی برای گونه‌های مختلف گیاهی، جانوری و سفره‌های آب زیرزمینی در منطقه باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از کانی اسفالریت و پلی‌مورف ورتزیت، به عنوان کانی معرف و ردیاب برای شناسایی مکان‌های مستعد غنی‌شده از عناصر فلزی کمیاب نظیر کادمیم (Cd)، گالیم (Ga)، ژرمانیوم (Ge)، آهن (Fe) استفاده شد. روابط پایداری بین دو فاز مجزا از کانی‌های سولفید روی یعنی اسفالریت و ورتزیت از موضوعات مهم در بحث کانی‌شناسی است. آلن و همکاران (Allen et al., 1912)، مطالعات اولیه در زمینه حالت گذار بین اسفالریت و ورتزیت را مورد بررسی قرار دادند و دمای ۱۰۲۰ درجه سانتی‌گراد در فشار یک اتمسفر را برای تبدیل اسفالریت به ورتزیت در نظر گرفتند. پلی‌مورف ورتزیت در معدن انگوران که در بخش سولفید هیپوژن رخ داده (Sadeghi et al., 2017)، اغلب به صورت تک‌بلورهای خوش‌وجه همراه با اسفالریت‌های نسل اول است.

اسکات و بارنز (Scott and Barnes, 1972)، نشان دادند که اسفالریت و ورتزیت می‌توانند در محدوده دمایی زیر ۱۰۲۰ درجه سانتی‌گراد، تحت تابعی از فوگاسیته S_2 با یکدیگر حضور داشته باشند. طبق استدلال ارائه‌شده توسط اسکات و بارنز (Scott and Barnes, 1972)، ورتزیت توانایی حلالیت

باطله‌های بخش روباز معدن روی-سرب انگوران، غنی‌شدگی و پراکندگی قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد (بیش از ۱۰۰ ppm) که این میزان بسیار بالاتر از استاندارد تعیین شده برای عنصر آرسنیک توسط سازمان جهانی سلامت (۰/۰۱ ppm) است.

تمرکز اقتصادی عناصر فلزی در معدن انگوران به دو بخش سولفیدی و باطله‌های کربناته قابل تقسیم هستند. بخش سولفیدی دارای غنی‌شدگی از عناصر نقره، کادمیم، سلنیوم (بالاتر از عیار حد خود) و عناصر کمیاب که در کانی ورتزیت و اسفالریت تمرکز دارند و بخش باطله‌های کربناته که دارای غنی‌شدگی از عنصر آرسنیک است. طبق این شواهد و با توجه به سیاست‌های موجود در معدن انگوران، در ادامه روند برداشت و بهره‌برداری از بخش روباز معدنی برای جلوگیری از مخلوط و انباشته شدن باطله‌ها و سایر مواد معدنی، می‌توان آنها را بر اساس نوع و میزان غنی‌شدگی احتمالی از عناصر فلزی کمیاب، دسته‌بندی و انباشت کرد تا در زمان مناسب توسط تجهیزات لازم مورد بهره‌برداری و استخراج قرار گیرند. با توجه به پراکندگی وسیع عنصر آرسنیک در باطله‌های معدنی، انباشت و دسته‌بندی اصولی این باطله‌ها در ادامه روند استخراج در این معدن، می‌تواند راه‌حلی برای جلوگیری از ارتباط این عنصر سمی با سفره‌های آب زیرزمینی و محیط‌زیست اطراف باشد. بنابراین، دسته‌بندی و انباشت اصولی عناصر فلزی موجود در باطله‌ها و سایر بخش‌های معدنی بر اساس نوع و میزان غنی‌شدگی، نه تنها موجب به حداقل رساندن مخاطرات زیست‌محیطی می‌شود؛ بلکه می‌تواند قدمی برای استخراج و بهره‌برداری این عناصر به صورت محصول جانبی باشد تا در کنار عناصر اصلی، کمک حال اقتصادی مهمی برای معدن انگوران و ایجاد زمینه اقتصادی مناسب در کشور باشد.

قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان و شرکت تهیه و تولید مواد معدنی (مجمع معدنی سرب و روی انگوران)

با مقایسه دو کانسار Tennessee و انگوران باید انتظار غنی‌شدگی قابل توجهی از عناصر فلزی کمیاب را در معدن انگوران همانند آنچه در کانسار Tennessee رخ داده است، داشت. زیرا معدن انگوران نیز یک کانسار دما پایین و دارای مقادیر ایزوتوپ گوگرد مشابه با سایر ذخایر (MVT Gilg et al., 2006) و همچنین دارای همزیستی اسفالریت در کنار بلورهای خوش وجه ورتزیت است. نکته قابل توجه در ارتباط با معدن انگوران این است که دمای کانی‌زایی در این کانسار به طور میانگین ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد (Sadeghi Bojd and Moore, 2005; Marangi, 2017) است که این شرایط با دمای گذار اعلام شده برای تبدیل اسفالریت به ورتزیت سازگار است.

نتایج تجزیه ژئوشیمیایی به دست آمده در این پژوهش، تمرکز بالای عناصر فلزی (نقره، کادمیم، سلنیوم، قلع، ایندیم، کبالت و غیره) در بخش سولفیدی معدن انگوران و مشابه با آنچه که در کانسار Tennessee گزارش شده است را نشان می‌دهد. این نتایج تأییدکننده نظرهای ارائه شده پیشین در ارتباط با تشکیل کانی‌های اسفالریت و ورتزیت به صورت همزیست در نتیجه غنی‌شدگی از عناصر فلزی کمیاب است.

براساس مطالب ارائه شده و پژوهش‌های انجام شده پیشین، تشکیل همزیست پلی‌مورف دما بالای ورتزیت به همراه بلورهای اسفالریت در یک کانسار دما پایین، می‌تواند به عنوان یک معرف برای غنی‌شدگی از عناصر کمیاب فلزی در یک کانسار دما پایین در نظر گرفته شود. در این پژوهش نیز از تشکیل همزیست بلورهای ورتزیت و اسفالریت، برای بررسی تمرکز و توجیه غنی‌شدگی عناصر فلزی کمیاب در کانسار انگوران استفاده شده است که یک کانسار با دمای کانه‌زایی پایین است.

طبق تجزیه‌های ژئوشیمیایی به دست آمده، عمده عناصر اقتصادی که قابلیت برنامه‌ریزی برای استخراج و بهره‌برداری را داشته باشند (نقره، کادمیم و سلنیوم)، متمرکز در بخش سولفیدی این معدن و اغلب در ارتباط با اسفالریت‌های فقیر از کانی‌های سرب هستند؛ در حالی که، عنصر آرسنیک در

راهنمایی‌های علمی ارزنده‌اشان سپاسگزاری می‌نماید.

برای انجام این پژوهش تشکر می‌نماید. همچنین نویسندگان از سردبیر و داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی برای

References

- Adriano, D.C., 2001. Trace elements in terrestrial environments, Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. Springer, New York, 867 pp. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5>
- Ahrabian Fard, P., 2019. Geology, geochemistry and genesis of Chromite mineralization in the Alamkandi area, west of Zanjan. M.sc. Thesis, Zanjan University, Zanjan, Iran, 145 pp. (in Persian with English abstract)
- Allen, E.T., Crenshaw, J.L. and Merwin, H.E., 1912. The sphides of zinc, cadmium, and mercury; their crystalline forms and genetic conditions; microscopic study by HE Merwin. American Journal of Science, 34(202): 341–396. <https://doi.org/10.2475/ajs.s4-34.202.341>
- Babakhani, A.R. and Ghalamghash, J., 1990. Geological map of Iran, 1: 100,000 series sheet Takht-e-Soleiman. Geological Survey of Iran, Tehran. (in Persian)
- Bauer, M.E., Burisch, M., Ostendorf, J., Krause, J., Frenzel, M., Seifert, T. and Gutzmer, J., 2018. Trace element geochemistry of sphalerite in contrasting hydrothermal fluid systems of the Freiberg district, Germany: insights from LA-ICP-MS analysis, near-infrared light microthermometry of sphalerite-hosted fluid inclusions, and sulfur isotope geochemistry. Mineralium Deposita, 54(2): 237–262. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0850-0>
- Beaudoin, G., 2000. Acicular sphalerite enriched in Ag, Sb, and Cu embedded within color-banded sphalerite from the Kokanee Range, British Columbia, Canada. The Canadian Mineralogist, 38(6): 1387–1398. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.6.1387>
- Belissant, R., Boiron, M.C., Luais, B. and Cathelineau, M., 2014. LA-ICP-MS analyses of minor and trace elements and bulk Ge isotopes in zoned Ge-rich sphalerites from the Noailhac–Saint-Salvy deposit (France): Insights into incorporation mechanisms and ore deposition processes. Geochimica et Cosmochimica Acta, 126(1): 518–540. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.10.052>
- Bhappu, R.B., 1962. Recovering Selenium from Sandstone Ores of New Mexico. JOM (The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society (TMS)), 14(6): 429–431. <https://doi.org/10.1007/BF03378161>
- Boni, M., Gilg, H.A., Balassone, G., Schneider, J., Allen, C.R. and Moore, F., 2007. Hypogene Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran. Mineralium Deposita, 42(8): 799–820. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0144-4>
- Bonnet, J., Mosser-Ruck, R., Caumon, M.C., Rouer, O., Andre-Mayer, A.S., Cauzid, J. and Peiffert, C., 2016. Trace Element Distribution (Cu, Ga, Ge, Cd, and Fe) in Sphalerite from the Tennessee MVT Deposits, USA, By Combined EMPA, LA-ICP-MS, Raman Spectroscopy, and Crystallography. The Canadian Mineralogist, 54(5): 1261–1284. <https://doi.org/10.3749/canmin.1500104>
- Butterman, W.C. and Brown Jr, R.D., 2004a. Mineral Commodity Profiles: Selenium. U.S. Geological Survey, United States, Report 03–18, 20 pp. <https://doi.org/10.3133/ofr0318>
- Butterman, W.C. and Carlin Jr, J.F., 2004b. Mineral commodity profiles: Antimony. U.S. Geological Survey, United States, Report 03–19, 35 pp. <https://doi.org/10.3133/ofr0319>
- Butterman, W.C. and Plachy, J., 2004c. Mineral commodity profiles: Cadmium. U.S. Geological Survey, United States, Report 02–238, 25 pp. <https://doi.org/10.3133/ofr02238>
- Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Pring, A., Skinner, W., Shimizu, M., Danyushevsky, L., Saini-Eidukat,

- B. and Melcher, F., 2009. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(16): 4761–4791.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.045>
- Daliran, F., Pride, K., Walther, J., Berner, Z.A. and Bakker, R.J., 2013. The Angouran Zn (Pb) deposit, NW Iran: evidence for a two stage, hypogene zinc sulfide–zinc carbonate mineralization. *Ore Geology Reviews*, 53: 373–402.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.02.002>
- Fallah, M., Nabatian, Gh. and Ghadimi, S., 2019. Introduction of wurtzite mineral as trace metal elements potential in the Angouran Zn-Pb mine. 26th Symposium of Crystallography and Mineralogy of Iran (SCMI), Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. (in Persian with English abstract) Retrieved March 30, 2019 from <http://www.cmsi.ir/UI/ArticleDetails?Lang=fa&ArticleID=2043>
- George, L., Cook, N.J., Ciobanu, C.L. and Wade, B.P., 2015. Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study. *American Mineralogist*, 100(2–3): 548–569.
<https://doi.org/10.2138/am-2015-4862>
- Ghorbani, M., 2008. Economic geology of natural and mineral resources of Iran. Pars Arian Zamin Publication, Tehran, 570 pp. (in Persian)
- Gilg, H.A., Boni, M., Balassone, G., Allen, C.R., Banks, D. and Moore, F., 2006. Marble-hosted sulfide ores in the Angouran Zn-(Pb-Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex. *Mineralium Deposita*, 41(1): 1–16.
<https://doi.org/10.1007/s00126-005-0035-5>
- Gocht, W.R., Eggert, R.G. and Zantop, H., 1988. International mineral economics: mineral exploration, mine valuation, mineral markets, international mineral policies. Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 279 pp.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-73321-5>
- Kritikos, A., 2016. Compositional Systematics of Sphalerites from Western Bergslagen, Sweden. M.Sc. Thesis, Uppsala University, Uppsala, Sweden, 111 pp. Retrieved March 03, 2019 from <https://www.semanticscholar.org/paper/Compositional-Systematics-of-Sphalerites-from-Kritikos/e4d52db4fcea6b3e6657bbcd5e655fc8e870aae>
- Maanijou, M. and Khodaei, L., 2018. Mineralogy and electron microprobe studies of magnetite in the Sarab-3 iron Ore deposit, southwest of the Shahrak mining region (east Takab). *Journal of Economic Geology*, 10(1): 267–293. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v10i1.56522>
- Maanijou, M. and Salemi, R., 2015. Mineralogy, chemistry of magnetite and genesis of Korkora-1 iron deposit, east of Takab, NW Iran. *Journal of Economic Geology*, 6(2): 355–374. (in Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/econg.v6i2.22650>
- Marangi, H., 2017. Mineralogy and geochemistry of prone ore and minerals to concentration of trace and rare earth elements in zinc and lead Angouran mine - southwest of Zanjan. M.Sc. Thesis, Zanjan University, Zanjan, Iran, 145 pp. (in Persian with English abstract)
- Marshall, C.P. and Fairbridge, R.W., 2006. *Encyclopedia of Geochemistry*. Springer Netherlands, 747 pp.
- Moradi, S. and Monhemius, A.J., 2011. Mixed sulphide-oxide lead and zinc ores: Problems and solutions. *Minerals Engineering*, 24(10): 1062–1076.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.05.014>
- Pirkharrati, H. and Farhadi, Kh., 2014. Investigating the potential of water and soil pollution in the Angouran lead and zinc mine area and providing solutions for crisis management. IMPASCO, Iran, Yazd, Report 1, pp. 55–76. (in Persian)
- Rahimi, H., 2016. Geological Map of Angouran Mine, scale 1: 2000. Iran's minerals producer and supplier co. (IMPASCO), Zanjan.
- Ridley, J., 2014. *Ore deposit geology*. Cambridge University Press, New York, 411 pp.
<https://doi.org/10.2138/am-2014-651>
- Sadeghi, N., Moghaddam, J. and Ilkhchi, M.O., 2017. Determination of effective parameters in pilot plant scale direct leaching of a zinc sulfide concentrate. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 53(1): 601–616.
<https://doi.org/10.5277/ppmp170147>
- Sadeghi Bojd, M. and Moore, F., 2005. From fluid inclusion study to genesis of the Angouran ore deposit NW Iran. The 15th

- Annual Goldschmidt Conference: A voyage of discovery, University of Idaho, Idaho, Moscow. Retrieved February 28, 2018 from <https://goldschmidt.info/conferencesView>
- Scott, S.D. and Barnes, H.L., 1972. Sphalerite-wurtzite equilibria and stoichiometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 36(11): 1275–1295. . [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(72\)90049-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(72)90049-X)
- Ueno, T., Scott, S.D. and Kojima, S., 1996. Inversion between sphalerite and wurtzite-type structures in the system Zn-Fe-Ga-S. *The Canadian Mineralogist*, 34(5): 949–958. . Retrieved March 18, 2018 from <https://pubs.geoscienceworld.org/canmin/article/34/5/949/12799/Inversion-between-sphalerite-and-wurtzite-type>
- Wang, Y., Han, X., Petersen, S., Frische, M., Qiu, Z., Cai, Y. and Zhou, P., 2018. Trace Metal Distribution in Sulfide Minerals from Ultramafic-Hosted Hydrothermal Systems: Examples from the Kairei Vent Field, Central Indian Ridge. *Minerals*, 8(11): 1–21. <https://doi.org/10.3390/min8110526>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



How to cite this article

Fallah, M., Nabatian, Gh. and Ghadimi, S., 2021. Investigation of mineralogical and geochemical evidence for evaluation of economic potential in the waste minerals of Angouran zinc and lead mine. *Journal of Economic Geology*, 13(2): 295–325. (in Persian with English abstract) <https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i2.81335>



Investigation of mineralogical and geochemical evidence for evaluation of economic potential in the waste minerals of Angouran zinc and lead mine

Mohammad Fallah¹, Ghasem Nabatian^{1*} and Saideh Ghadimi²

1) Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2) Angoran Mine, Zanjan, Iran

Submitted: June 15, 2019

Accepted: Apr. 28, 2020

Keywords: Waste minerals, wurtzite, trace elements, Sanandaj- Sirjan zone, Angouran, Zanjan

Introduction

Increasing demand for ore minerals needed for economic development and the desire to find a suitable rank in the international community has forced developing countries such as Iran employ more mining activities which has led to creation of a large amount of waste minerals. Given the existing equipment establishing the necessary situation and economic solutions for the exploitation of valuable elements from these waste minerals can be considered as a source for economic development of the country. The Angouran Zn-Pb mine is located west of the Zanjan province and northwest of the magmatic-metamorphic Sanandaj-Sirjan zone. The wurtzite mineral can be used as an indicator mineral for trace elements such as IGG (indium, gallium, germanium) in this mine. The economic concentration of metal elements in the Angouran mine can be divided into two parts of sulfide and gangue carbonate. The sulfide part of this mine is enriched with silver, cadmium and selenium (higher than their cut-off grade) and the gangue carbonate part is enriched in arsenic element. The foot-wall schists show some concentration of elements which are related to sulfide mineralization.

Material and methods

More than 30 rock samples were collected from cross sections in the open-pit part of the Angouran mine which covers all different parts such as foot-wall schist, sulfide mineralization, carbonate mineralization and hanging-wall carbonate

(marble). About 30 samples were prepared for petrographic studies and geochemistry analysis which were analyzed at the Zarazma laboratory (Tehran, Iran). The ArcGIS, Geosoft Oasis Montaj and Excel software packages were also used for interpretation of data.

Geology of the study area

The Angouran Zn-Pb mine is located west of the Zanjan province and northwest of the magmatic-metamorphic Sanandaj- Sirjan zone. The rock units in the study area include foot-wall quartz schist and hanging-wall marble with Precambrian age, Mesozoic diorite and granite, Cenozoic pyroclastic units such as white tuffs and Quaternary travertine sediments. It should be mentioned that the white tuffs and, in some cases older units are crosscut by younger diabatic sills and dikes (Ghorbani, 2008; Pirkharrati and Farhadi, 2014; Fallah et al., 2019).

Results

The Angouran deposit has been formed as breccia structure on the boundary between thrusting hanging-wall marble and foot-wall quartz schist. According to this study, mineralization in the Angouran deposit has occurred during two hypogene and supergene stages. Hypogene mineralization in the Angouran deposit has been formed as successive phases of sulfide and carbonate. The hypogene mineralization continued by the formation of supergene mineralization. According to the geochemical analysis, a high concentration of trace elements such as silver,

*Corresponding author Email: gh.nabatian@znu.ac.ir

cadmium and selenium was detected in the Angouran deposit. These elements are concentrated in the sulfide ore mainly in the sphalerite mineral with poor lead minerals. The carbonate part of the Angouran mine which is considered to be waste contains enrichment of arsenic. The foot-wall schists are not enriched with trace elements and just concentrate in some elements such as iron, antimony, cadmium, cobalt and selenium, which are related to sulfide mineralization.

Discussion

Based on the geochemistry analysis and microscopic studies, the economic concentration of metal elements in the Angouran mine can be divided into two parts of sulfide and carbonate. The sulfide part of this mine has been enriched with silver, cadmium and selenium (higher than their cut-off grade) and the carbonate part has been enriched with arsenic. This element can be considered to be a major threat to human health, along with its numerous uses, such as pesticides, medicine, electronics, etc.

The wide distribution of arsenic in the open pit mine along with the other toxic elements such as cadmium and selenium (mainly related to the sulfide mineralization and host quartz schist) are too dangerous for the villagers who live near the mine due to the seepage of these toxic elements to underground water aquifers and their surrounding environment. It should be mentioned that, in the Angouran mine, the waste minerals are abandoned as deserted mountains irrespective of their relationship to groundwater and the surrounding environment.

It is hoped that with the continuation of the exploitation process in the Angouran mine, the waste minerals are classified according to their type and element enrichment in a suitable manner

by environmental standards. This could help prevent seepage of toxic elements (As, Cd, Se) to groundwater. Furthermore, the economic elements such as Ag, Cd, Se can be used as byproducts and be sold as raw material for other uses or extracted by using the necessary equipment. This is due to the fact that what is considered to be waste minerals for a mine, can be considered as useful material for another mine, either now or in the future.

Acknowledgements

The authors are grateful for the financial support of the University of Zanzan and the Iran Minerals Production and Supply Company (Angouran lead-zinc mine).

References

- Fallah, M., Nabatian, Gh. and Ghadimi, S., 2019. Introduction of wurtzite mineral as trace metal elements potential in the Angouran Zn-Pb mine. 26th Symposium of Crystallography and Mineralogy of Iran (SCMI), Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. (in Persian with English abstract) Retrieved March 30, 2019 from <http://www.cmsi.ir/UI/ArticleDetails?Lang=fa&ArticleID=2043>
- Ghorbani, M., 2008. Economic geology of natural and mineral resources of Iran. Pars Arian Zamin Publication, Tehran, 570 pp. (in Persian)
- Pirkharrati, H. and Farhadi, Kh., 2014. Investigating the potential of water and soil pollution in the Angouran lead and zinc mine area and providing solutions for crisis management. IMPASCO, Iran, Yazd, Report 1, pp. 55–76. (in Persian)