

بررسی وضعیت عناصر با ارزش و قابل استحصال در معدن سرب و روی انگوران

اسلام کاشی^{۱*}، راضیه حبیب پور^۲

۱- استادیار مهندسی شیمی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

۲- استادیار شیمی فیزیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۹/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۵/۱۱

پیام‌نگار: Kashi@irost.ir

چکیده

فلزاتی چون کادمیم، ژرمانیم، کبالت و ایندیم، مواد معدنی مهمی‌اند که در نیمرساناها، کاتالیزورها، باتری‌ها، شیشه، سرامیک، مواد ساینده و مواد مغناطیسی به کار می‌روند. مسئله‌ای که در ارتباط با این فلزات پیش می‌آید از این قرار است که آنها محصول اولیه معادن (فلزات اصلی صنعتی یا فلزات حامل) نظیر آلومینیم، مس، روی و سرب نیستند. بلکه تولید آنها تنها به صورت محصولات جانبی یا گاهی به صورت محصول مشترک استخراج و تصفیه سنگ معدن اولیه، امکانپذیر است. به همین دلیل به آنها فلزات "سوار" یا "همنشین" می‌گویند. به دلیل ضرورت استفاده از این فلزات، برآورد منابع بالقوه آنها از معادن موجود، سودمند است. در این مقاله فلزات سوار در معدن سرب و روی بررسی و داده‌های مجتمع سرب و روی انگوران با آنها مقایسه شده است. مطالعات انجام شده نشان دادند که استحصال عناصری چون کادمیم، نقره، آرسنیک، ژرمانیم و ایندیم مقرون به صرفه است. عیار متوسط مربوط به این عناصر در معدن مشابه که این عناصر از آنها استحصال می‌شود، به ترتیب، ۱۵۰۰، ۷۸، ۵۰۰، ۱۲، ۵۰۰ و ۱ قسمت بر میلیون (ppm) بود. عیار متوسط این عناصر در بخش‌های مختلف معدن سرب و روی انگوران متفاوت و البته در بیشتر موارد از حد عیار متوسط معادن مشابه فعال، بیشتر بود و باید مطالعات دامنه‌داتری در مورد جداسازی این عناصر صورت گیرد.

کلیدواژه‌ها: عناصر با ارزش، محصولات جانبی، سرب و روی، انگوران.

۱. مقدمه

پتانسیل تولید محصولات جانبی را می‌توان براساس مقدار نظری آنها در سنگ معدن به‌دست آورد. برآورد دقیق‌تر مستلزم ارزیابی و بررسی دقیق‌تر فرایندهای استحصال و تولید هر کدام از محصولات جانبی به صورت تک‌تک است. میزان فلزات اصلی (حامل) در سنگ معدن دارای گستره‌ای در مقیاس درصد وزنی، درحالی‌که میزان فلزات جانبی در گستره ppm است. در شکل (۱)، یک گردونه از توزیع فلزات در ذخایر معدنی را مشاهده می‌کنید که در آن،

به منظور افزایش تولید محصولات جانبی که اغلب کمیاب‌اند، دو گزینه وجود دارد: ۱. افزایش استحصال از سنگ‌های معدنی حاوی فلزات اصلی (حامل) با تمرکز بر بهبود بازدهی و کارآمدی فرایندهای استحصال و تولید؛ و یا ۲. افزایش بازیافت [۱]. اولین برآورد از

* تهران، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، گروه فناوری‌های شیمیایی سبز

میلیون تن روی (بر اساس میزان تولید سال ۲۰۱۰) حدود ۶۰۰ تن ایندیم و ۶۰۰ تن ژرمانیم را به عنوان محصول جانبی به دست آورد. هرچند مقادیر واقعی تولید این دو عنصر در جهان در سال ۲۰۱۰ معادل ۵۷۴ تن ایندیوم و ۶۴ تن ژرمانیم بوده است. اسفالریت به عنوان یک منبع مهم گالیم (Ga) نیز شناخته می‌شود که حاوی ۰/۰۴٪ گالیم است. بنابراین، بر اساس میزان روی تولید شده در سال ۲۰۱۰، حدود ۴۹۰ تن گالیم می‌تواند تولید شده باشد. متأسفانه آمار مشخصی از میزان تولید شده واقعی در دسترس نیست [۱۲-۷].

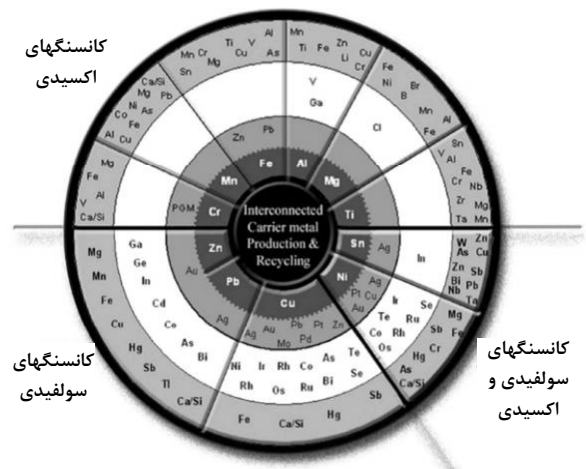
بر اساس مطالب ذکر شده و به دلیل اهمیت عناصر جانبی، در این مقاله استحصال عنصری که معمولاً در کنار عناصر اصلی سرب و روی استخراج می‌شوند و مقدار آنها در نمونه‌های آنالیز شده معدن سرب و روی انگوران در حد قابل قبولی بوده است، بررسی شده‌اند. این عناصر عبارتند از کادمیم، نقره، آرسنیک، ژرمانیم، ایندیم و کبالت.

۱-۱ کادمیم

کادمیم فلزی نرم، چکش‌خوار، مفتول‌پذیر با رنگ سفید مایل به آبی است که در سال ۱۸۱۷ در آلمان کشف شده است. مواد معدنی کادمیم به تنهایی در ذخایر تجاری یافت نمی‌شوند. فراوانی کادمیم در پوسته زمین تقریباً برابر ۰/۲ ppm است. گرینوکیست (CdS)، تنها ماده معدنی مهم دارای کادمیم، هیچگاه به صورت یک تک‌ذخیره یافت نشده، بلکه همیشه با اسفالریت (ZnS) یافت می‌شود. کادمیم معمولاً به صورت یک محصول جانبی در بازیابی اولیه روی از سنگ معدن روی، و نیز از سنگ معدن سرب و یا سنگ معدن ترکیبی مس-سرب-روی تولید می‌شود. هیچکدام از کانی‌های مستقل کادمیم به اندازه کافی فراوان نیستند که بتوان از آنها به عنوان یک سنگ معدن یاد کرد. سنگ معدن روی منبع عمده کادمیم تجاری است و تاکنون مهمترین محصول جانبی پالایش کنسانتره (کانسنگ پر عیار) روی، کادمیم بوده است. بنابراین، در حال حاضر می‌دانیم که بزرگترین کنسانتره‌های کادمیم از سنگ معدن‌های روی سولفوری حاصل می‌شوند [۱۴ و ۱۳].

بالاترین مصرف کادمیم در کشورهای صنعتی صورت می‌گیرد که آمریکا در این زمینه پیشتاز است [۱۵]. در جدول (۱)، میزان کادمیم موجود در چند معدن آمریکا و کانادا بر حسب درصد درج شده است [۱۶].

دایره داخلی شامل فلزات اصلی (حامل) است. دایره‌های خارجی عناصر جانبی همراه با عناصر حامل به ترتیب اولویت دیده می‌شوند [۲].



شکل ۱. گردونه عناصر اصلی (حامل) و عناصر جانبی (سوار) هر یک از عناصر اصلی [۲].

اولین گزارش در ارتباط با فلزات با ارزش جانبی را شورای تحقیقات ملی آمریکا^۱ در سال ۲۰۰۸ تحت عنوان "مواد معدنی، مواد معدنی راهبردی و اقتصاد آمریکا" منتشر کرد. در همان سال، کمیته محیط زیست سازمان ملل، به انستیتو Öko در آلمان ماموریت داد تا فلزات راهبردی برای فناوری‌های پایدار آینده و نیز نحوه بازیافت آنها را تعریف و مشخص کند. فناوری‌های انتخاب شده توسط این مؤسسه، شامل تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی، فناوری‌های فتوولتایی، باتری‌ها و کاتالیزورها بودند. فلزات راهبردی بررسی شده نیز شامل تانتالیم، ایندیم و روتینیم برای تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی، گالیم، تلوریم (تلور) و ژرمانیم برای فناوری‌های فتوولتایی، کبالت و لیتیم برای باتری‌ها، فلزات گروه پلاتین (PGM) برای کاتالیزورها و عناصر نادر خاکی (REE) برای کلیه فناوری‌ها بود [۳-۶].

در حال حاضر، ژرمانیم (Ge) و ایندیم (In) محصولات جانبی فرایند تولید روی از اسفالریت^۲ (ZnS) هستند. به طور کلی، اسفالریت ترکیبی سولفیدی دارای حدود ۰/۶۷٪ روی و حدود ۰/۰۰۵٪ ژرمانیم و ۰/۰۰۵٪ ایندیم است. با فرض این که ۹۵٪ محصول روی از ذخیره اسفالریت حاصل می‌شود، در عالم نظر می‌توان در کنار تولید ۸/۴

1. U.S. National Research Council
2. Sphalerite

جدول ۱. درصد کادمیم موجود در برخی از معادن آمریکا و کانادا [۱۶].

متوسط	بازه	مکان
۰/۱۲	۰/۰۸-۰/۱۵	Balmt-Edwards, N.Y
۰/۴	-	Edwards, N.Y
۰/۱۵	-	Franklin, N.J
۰/۰۵	-	Friedensville, Pa
۰/۲۰	-	Do
۰/۱۲	۰/۰۸-۰/۱۶	Birmingham, Pa
۰/۲۲	-	Valzinco, Va
۰/۳۲	۰/۲۵-۰/۳۸	Timberville, Va
۰/۵۲	۰/۴۵-۰/۶۰	Do
۰/۱۵	۰/۱۳-۰/۱۸	Austinville, Va
۰/۱۸	۰/۰۸-۰/۴۵	Austinville (and other occurrences in Cambrian rocks of southeastern U.S.)
۰/۳۲	۰/۲۴-۰/۴۸	East Tennessee, Kingsport ores
۰/۴۷	۰/۲۵-۰/۸۰	Do
۰/۰۹	-	Ducktown, Tenn
۱/۳	-	Middle Tennessee viens
۱/۳۴	-	Middle Kentucky viens
۰/۶۹	۰/۳۸-۱/۴۰	Illinois-kentucky fluorspar district
۰/۱۷	۰/۰۴-۰/۴۰	Upper Mississippi Valley
۰/۳۴	۰/۱۱-۰/۷۱	Tri-State
۰/۲۲	-	Gilman, Colo
۰/۲۸	۰/۱-۰/۶	Rocky Mountain region (U.S. except Butte)
۰/۵۸	۰/۴-۱/۰	Do
۰/۱	-	Butte, Mont
۰/۲	۰/۲-۰/۲	Do
۰/۴۰	۰/۱۰-۰/۸۰	Coeur d'Alene, Idaho
۰/۴۵	۰/۳-۰/۶	Metaline, Wash
۰/۲۶	۰/۱-۰/۷	Northport, Wash
۰/۴۵	۰/۲-۰/۹	Western Canada, chiefly British Columbia
۰/۲۲	۰/۲-۰/۳	Ontario and Quebec
۰/۱۱	۰/۶-۰/۱۵	Pine Point, Northwest territories

۲-۱ نقره

نقره در سنگهای معدن دارای آرژنتیت^۱، سرب، سرب و روی، مس و

1. Argentite

طلا یافت می‌شود. نقره جزو عناصر نسبتاً کمیاب به‌شمار می‌آید و از نظر فراوانی در قشر جامد زمین، در مرتبه شصت و سوم قرار دارد. فراوانی آن در پوسته زمین ۰/۰۰۳۱ ppm تا ۰/۰۰۴ ppm است. مقدار استحصال این فلز که توجیه اقتصادی داشته باشد، حدود ۷۵ ppm تا ۸۰ ppm است. حدود سه‌چهارم نقره تولیدی جهان، فراورده جانبی حاصل از استخراج سایر فلزات است [۱۷].

۳-۱ آرسنیک

در صنعت، آرسنیک را معمولاً به عنوان آفت‌کش به کار می‌گیرند. سمیت آرسنیک برای حشرات، باکتری‌ها و سایر موارد مشابه آن را به ترکیبی آرمانی برای محافظت از چوب تبدیل کرده است. در صنایع الکترونیک به صورت آرسنید گالیوم (GaAs)، در تولید نیمرساناها و مدارهای مجتمع به کار می‌رود. آرسنیک تری اکسید در خون‌شناسی برای درمان بیماران مبتلا به سرطان خون حاد که در برابر ATRA درمانی مقاومت نشان می‌دهند، مقدار اقتصادی استخراج این عنصر، حدود ۵۰۰ ppm تا ۱۰۰۰ ppm است [۱۸].

۴-۱ ژرمانیم

ژرمانیم یکی از اعضای مهم خانواده نیمرساناهاست و در صنعت نیمرسانا کاربرد فراوان دارد. ژرمانیم شبه فلزی است سخت، درخشان و به رنگ سفید خاکستری که از نظر شیمیایی شبیه قلع است. این عنصر تعداد بسیار زیادی از ترکیبات آلی-فلزی را تشکیل می‌دهد و نیمرسانای مهمی در ترانزیستورها و نورسنج‌ها به حساب می‌آید. یکی از مصارف نظامی ژرمانیم در ساخت تجهیزات دید در شب است. بهای هر گرم ژرمانیم در سال ۲۰۱۶ تقریباً ۱/۸ تا ۲/۵ دلار آمریکا در هر گرم است [۱۹].

۵-۱ کبالت

مهم‌ترین سنگ معدن‌های کبالت شامل کبالتیت^۲ و اریتریت^۳ اند و این فلز معمولاً همراه با سنگ معدن‌های آهن، نیکل، نقره، سرب و مس یافت می‌شود. تولیدکنندگان اصلی کبالت در جهان عبارتند از کشورهای کنگو، چین، زامبیا، روسیه و استرالیا. مقدار استحصال این فلز، دارای توجیه اقتصادی، در برخی از معادن مهم آن حدود ۵۰۰ ppm تا ۱۰۰۰ ppm گزارش شده است [۲۰].

2. Cobaltite
3. Erythrite

۱-۶ ایندیم

ایندیم فلزی کمیاب و نرم و چکش خوار است و به راحتی ذوب می‌شود. از نظر شیمیایی مانند آلومینیم و گالیم است، اما از نظر ظاهری بیشتر به روی شباهت دارد (همچنین، سنگ معدن روی منبع اصلی ایندیم است). فراوانی این عنصر در پوسته زمین در حدود ۰/۱ ppm است. در حال حاضر، عمده کاربرد آن در ساخت لایه‌های نازکی است که از آنها به عنوان لایه‌های روغن کاری استفاده می‌شود. ایندیم را بیشتر از ته‌مانده‌هایی که در طول پردازش سنگ معدن روی بر جای مانده، تولید می‌کنند. اما در سنگ معدن آهن، سرب و مس نیز یافت می‌شود. بیشترین مقدار ایندیم مصرف شده مربوط به تولید LCD است [۲۱].

۱-۶ ایندیم فلزی کمیاب و نرم و چکش خوار است و به راحتی ذوب می‌شود. از نظر شیمیایی مانند آلومینیم و گالیم است، اما از نظر ظاهری بیشتر به روی شباهت دارد (همچنین، سنگ معدن روی منبع اصلی ایندیم است). فراوانی این عنصر در پوسته زمین در حدود ۰/۱ ppm است. در حال حاضر، عمده کاربرد آن در ساخت لایه‌های نازکی است که از آنها به عنوان لایه‌های روغن کاری استفاده می‌شود. ایندیم را بیشتر از ته‌مانده‌هایی که در طول پردازش سنگ معدن روی بر جای مانده، تولید می‌کنند. اما در سنگ معدن آهن، سرب و مس نیز یافت می‌شود. بیشترین مقدار ایندیم مصرف شده مربوط به تولید LCD است [۲۱].

۲. نمونه‌گیری و آزمایش‌ها

مناطق معدن سرب و روی انگوران براساس میزان عیار سرب و روی موجود در آنها مشخص و نام‌گذاری شده‌اند. نمونه‌گیری از این معدن شامل برداشت حدود ۵۰ کیلوگرم از خاک مناطق مختلف، و به نحوی بوده است که آن نمونه نماینده کل خاک ناحیه مربوطه باشد. علاوه بر آن، نمونه‌گیری از نقاط مختلف خط تولید کارخانه تولید سرب و روی دندی (شرکت کالسیمین) به عنوان واحد فراوری کننده مواد معدنی برداشت شده از معدن سرب و روی انگوران، انجام شد. این نقاط در جدول (۲) درج شده‌اند. پس از خردایش و آسیاب کردن، نمونه‌های پودر ۵۰ گرمی به آزمایشگاه ارسال شد و آنالیز ICP، XRD و XRF بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفت.

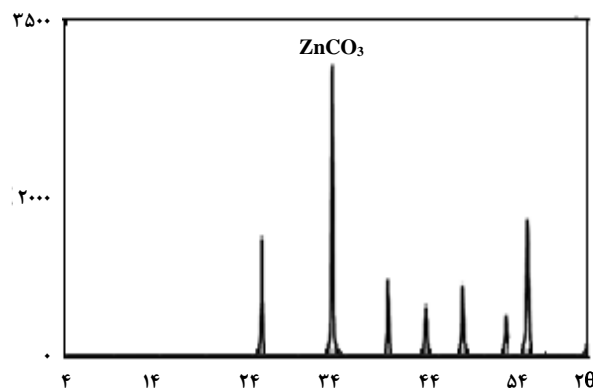
۲-۱ مطالعات طیفسنجی پراش پرتو ایکس (XRD) و

فلوئورسانی پرتو ایکس (XRF)

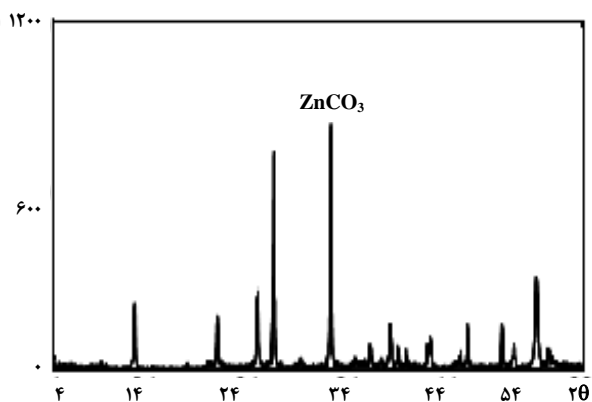
به منظور بررسی ترکیب فازهای موجود و آنالیز عنصری نمونه‌های معدنی، نتایج آنالیز با روش طیفسنجی پراش پرتو ایکس (XRD) مربوط به نمونه‌های کالامین، پرعیار اکسیده، توده شمالی، سولفور، شیست مینرالیزه، مخلوط کم عیار و عیار متوسط را، به ترتیب، در شکل‌های (۲) تا (۸) مشاهده می‌شود. در ادامه، نتیجه آنالیز فلوئورسانی پرتو ایکس (XRF) نمونه‌های ذکر شده در شکل (۹) مشاهده می‌شود. بر این اساس، مهمترین فازهای موجود در نمونه‌های معدنی مورد بررسی عبارتند از: $ZnCO_3$ ، ZnS ، $PbCO_3$.

جدول ۲. نقاط نمونه‌گیری در معدن سرب و روی انگوران و خط تولید کارخانه تولید سرب و روی دندی.

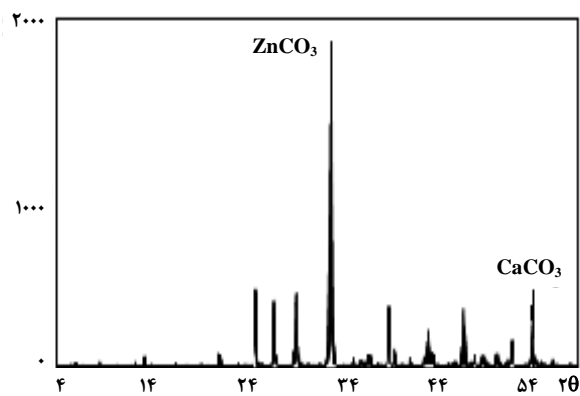
کالامین	کیک کبات
توده شمالی	خاک سولفور تونل (نمونه ۱)
مخلوط کم عیار	خاک سولفور تونل (نمونه ۲)
سولفور	شیست سیاه
شیست مینرالیزه	شیست مینرالیزه ۹۴
عیار متوسط	خاک پرعیار پر سرب ۹۴
پر عیار اکسیده	خاک سولفور روباز ۹۴
کیک لیچ کارخانه روی دندی	مخلوط سولفور ۹۴ (اکسید و سولفور)
کیک لیچ واحد تحقیقات و برنامه‌ریزی	خاک متوسط عیار ۹۴
کیک نیکل	خاک مخلوط کم عیار ۹۴



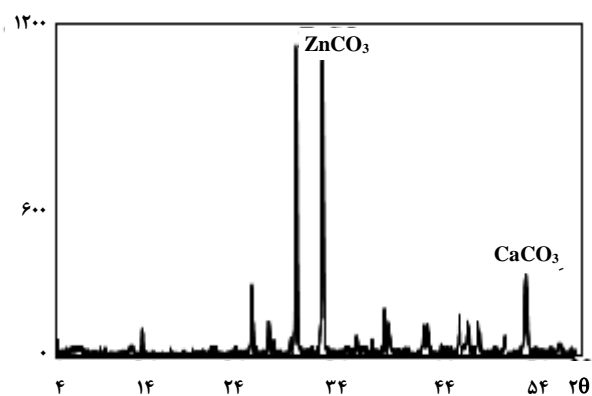
شکل ۲. ترکیب فازی نمونه کالامین - فاز اصلی: $ZnCO_3$.



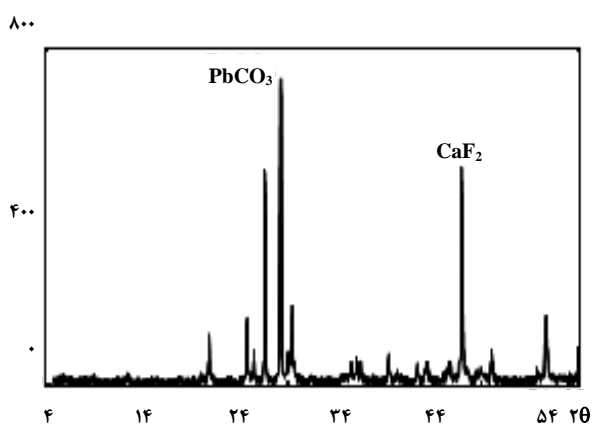
شکل ۶. ترکیب فازی نمونه شیبست میسرالیزه- فاز اصلی:
 $\text{SiO}_2, \text{ZnCO}_3$



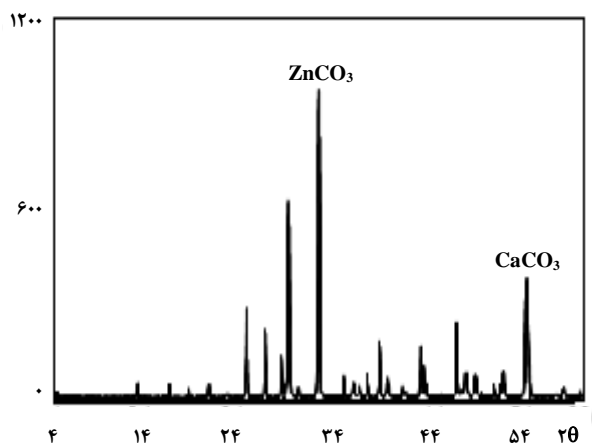
شکل ۳. ترکیب فازی نمونه پرعیار اکسیده- فاز اصلی:
 $\text{SiO}_2, \text{CaCO}_3, \text{ZnCO}_3$



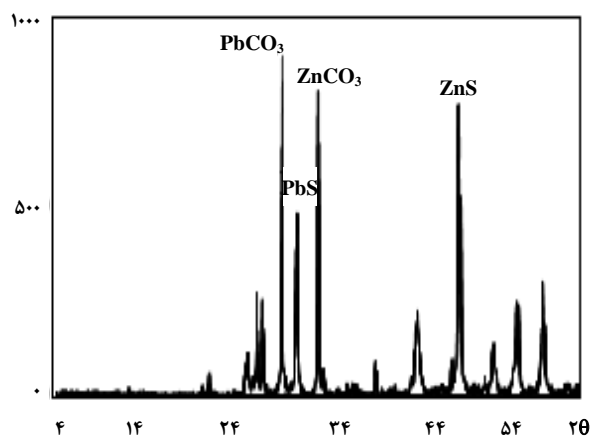
شکل ۷. ترکیب فازی نمونه مخلوط کم عیار- فاز اصلی:
 $\text{CaCO}_3, \text{ZnCO}_3$



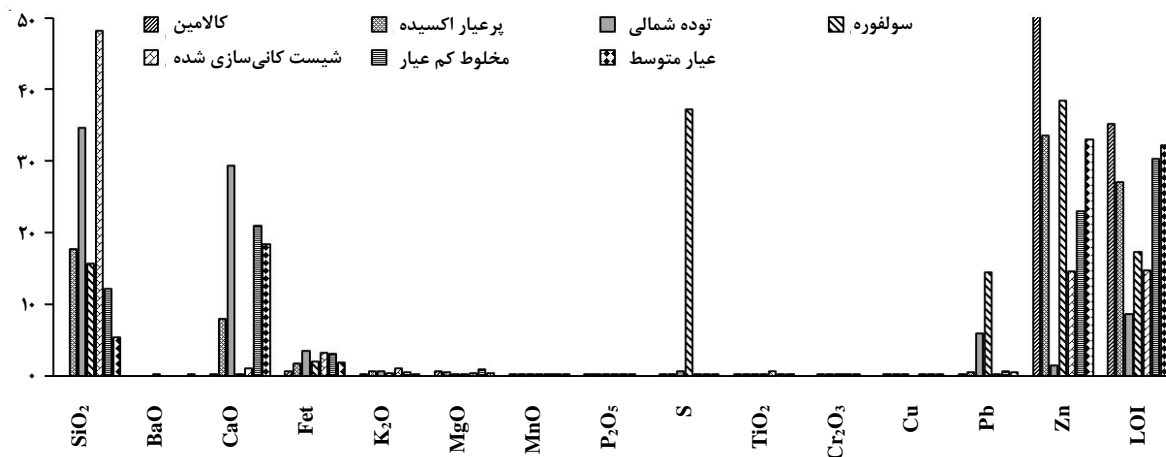
شکل ۴. ترکیب فازی نمونه توده شمالی- فاز اصلی:
 $\text{SiO}_2, \text{CaF}_2, \text{PbCO}_3$



شکل ۸. ترکیب فازی نمونه عیار متوسط- فاز اصلی:
 $\text{CaCO}_3, \text{ZnCO}_3$



شکل ۵. ترکیب فازی نمونه سولفور- فاز اصلی:
 $\text{PbS}, \text{ZnS}, \text{ZnCO}_3, \text{PbCO}_3$



شکل ۹. ترکیب درصد اکسیدهای موجود در نمونه‌های معدنی.

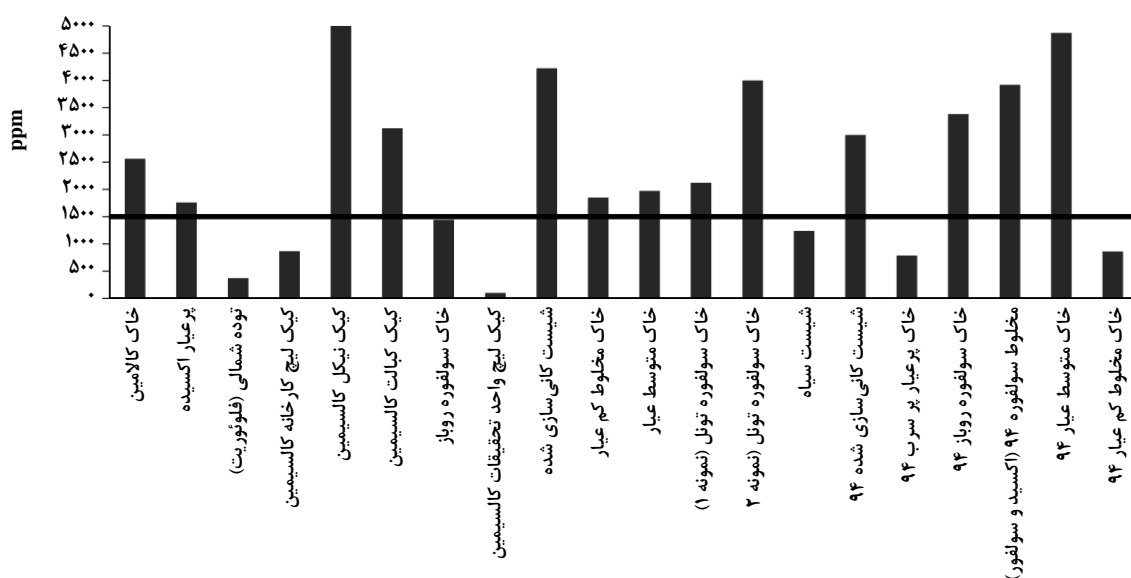
شکل (۱۰) با خط افقی مشخص شده است. بر این اساس و با توجه به اینکه مقادیر کادمیم گزارش شده در بیشتر نمونه‌ها از غلظتی با توجه اقتصادی یاد شده بالاتر است (شکل ۱۰)، استحصال این عنصر به عنوان یک محصول جانبی، اقتصادی به نظر می‌رسد. همچنین، بررسی مقادیر مربوط به کیک نیکل خط تولید کارخانه کالسیمین نشان می‌دهد که مقادیر زیادی کادمیم به همراه کیک نیکل از فرایند خارج می‌شود. به عبارت دیگر یکی از نقاط مهم و حساس برای کار بر روی استحصال این عنصر، کیک نیکل در واحد فراوری است.

۲-۲ طیف سنجی نشری اتمی - پلاسمای جفت شده القایی (ICP-AES)

در این بخش، عناصری که معمولاً در کنار عناصر سرب و روی استخراج می‌شوند و یا مقدار آنها در نمونه‌های آنالیز شده به شیوه آنالیز ICP در حد قابل قبولی است، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲-۲-۱ کادمیم (Cd)

غلظت کادمیم در معادن سرب و روی فعال که عملیات استحصال کادمیم در آنها صورت می‌گیرد، حدود ۱۵۰۰ ppm است [۱۴] که در



شکل ۱۰. مقادیر کادمیم موجود در نمونه‌های برداشت شده از معدن سرب و روی انگوران و خط تولید شرکت کالسیمین.

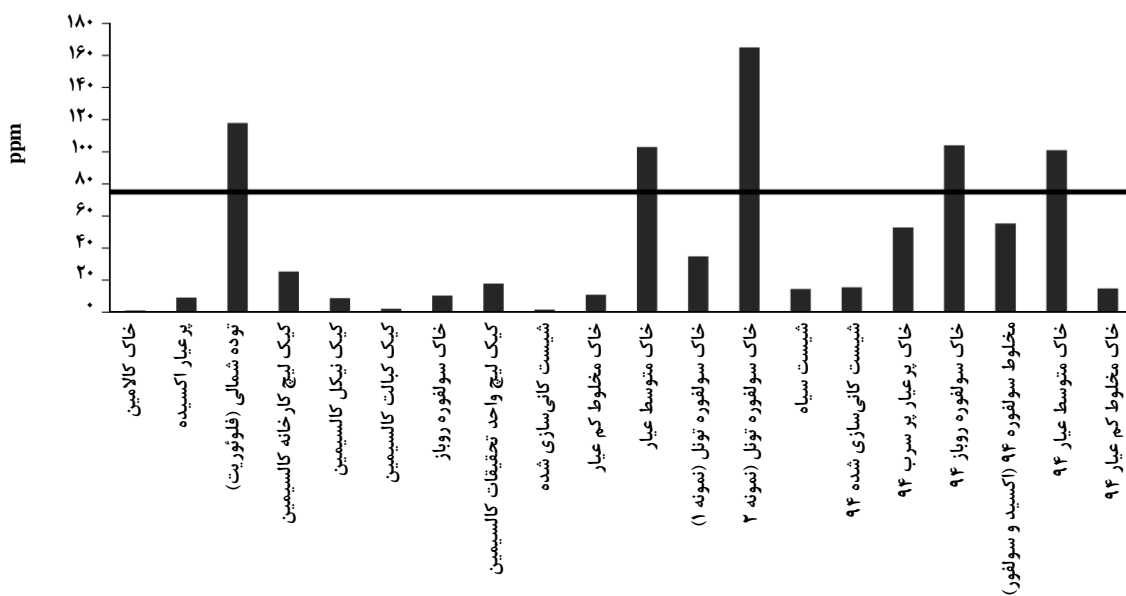
۲-۲-۲ نقره (Ag)

بر اساس نتایج گزارش شده در شکل (۱۱)، بیشترین مقدار این عنصر مربوط به خاک سولفور تونل و در حدود ۱۶۵ ppm است. با دقت در میزان نقره موجود در نمونه‌های دیگر، و با در نظر گرفتن عیار اقتصادی این فلز در معادن مشابه، به نظر می‌رسد استحصال این عنصر به عنوان یک محصول جانبی به صرفه و اقتصادی باشد.

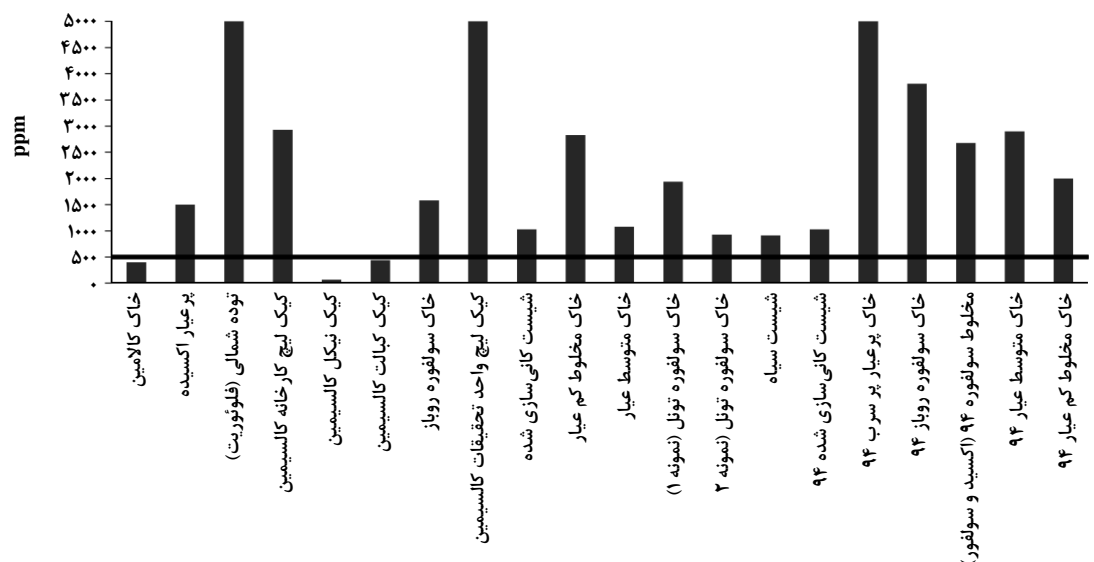
۲-۲-۳ آرسنیک (As)

با توجه به مقادیر چشمگیر گزارش شده در اکثر نمونه‌های مورد

بررسی (شکل (۱۲))؛ و مقایسه میزان عیار این عنصر در معادن مشابه مورد بهره‌برداری، استحصال این عنصر اقتصادی به نظر می‌رسد. فراوانی این عنصر در خاک پر عیار سرب و خاک مربوط به توده شمالی معدن زیاد است که توجیه اقتصادی استحصال این عنصر از خاک این مناطق را کاملاً بارز می‌کند. همچنین، با دقت در نتایج مربوط به نمونه‌های گرفته شده از خط تولید شرکت کالسیمین، مشاهده می‌شود که تجمع این عنصر در کیک لیچ واحد تحقیقات بسیار زیاد است و مطالعات برای جداسازی این عنصر به عنوان یک محصول جانبی باید بر روی این بخش، متمرکز شود.



شکل ۱۱. میزان نقره موجود در نمونه‌های برداشت شده از معدن سرب و روی انگوران و خط تولید شرکت کالسیمین.



شکل ۱۲. میزان آرسنیک موجود در نمونه‌های برداشت شده از معدن سرب و روی انگوران و خط تولید شرکت کالسیمین.

۴-۲-۲ ژرمانیم (Ge)

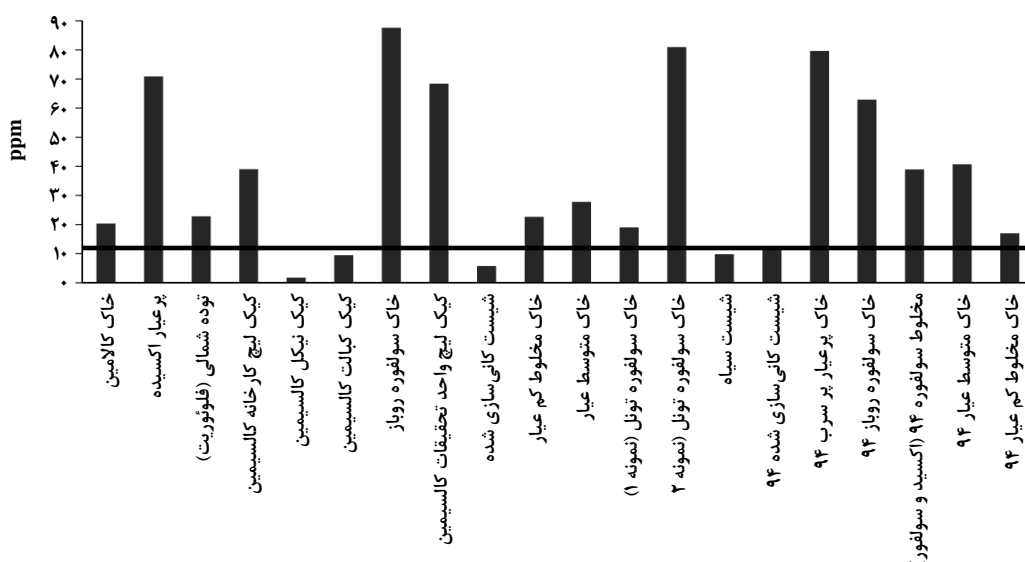
غلظت اقتصادی استحصال ژرمانیم (ppm ۱۰ تا ppm ۱۵) در معادن مشابه که در آنها استحصال ژرمانیم صورت می‌گیرد، در شکل (۱۳) با خط افقی نشان داده شده است. همچنین، نتایج آنالیز کلیه نمونه‌های برداشت شده در این شکل با این مقدار عیار مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، وجود مقادیر اقتصادی ژرمانیم در اکثر نمونه‌ها تأیید شده و استحصال آن دارای توجیه اقتصادی به نظر می‌رسد. خاک پرعیار و خاک سولفور به بیشترین مقادیر ژرمانیم را دارد و تمرکز این عنصر در کیک لیج واحد تحقیقات شرکت کالسیمین است.

۵-۲-۲ کبالت (Co)

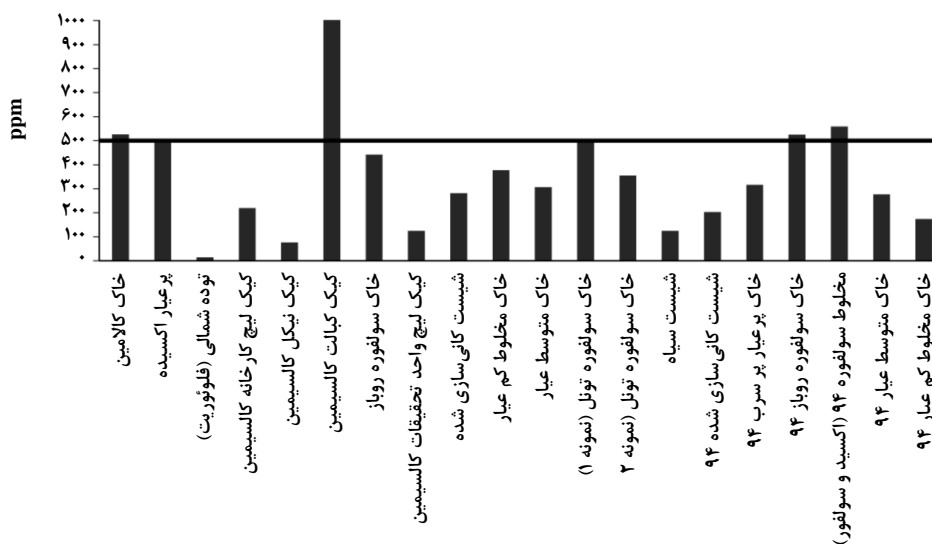
همانگونه که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار این عنصر در نمونه‌های مربوط به خاک سولفور و خاک کالامین گزارش شده است. با توجه به عیار این عنصر در دیگر معادن مشابه، استحصال این عنصر منطقی به نظر نمی‌رسد. هرچند مطالعات بیشتری می‌تواند بر روی مناطق حاوی این عنصر صورت گیرد.

۶-۲-۲ ایندیم (In)

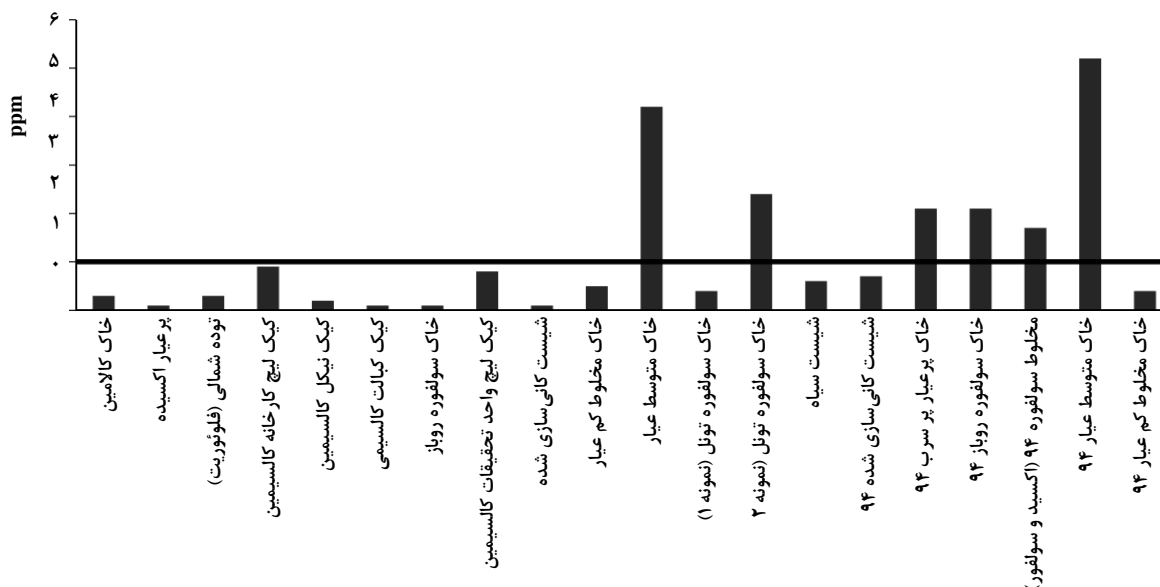
مقدار اقتصادی استحصال ایندیم در معادن روی بین ppm ۱ تا ppm ۱۰ است [۲۲]. بر این اساس و با توجه به شکل (۱۵)، مقدار این عنصر در اکثر نمونه‌ها، به‌ویژه خاک عیار متوسط، قابل قبول است.



شکل ۱۳. میزان ژرمانیم موجود در نمونه‌های برداشت شده از معدن سرب و روی انگوران و خط تولید شرکت کالسیمین.



شکل ۱۴. میزان کبالت موجود در نمونه‌های برداشت شده از معدن سرب و روی انگوران و خط تولید شرکت کالسیمین.



شکل ۱۵. میزان ایندیم موجود در نمونه‌های برداشت شده از معدن سرب و روی انگوران و خط تولید شرکت کالسیمین.

- [2] Verhoef, E. V., Dijkema, G. P. J., Reuter, A. "Process Knowledge, System Dynamics, and Metal Ecology", *Journal of Industrial Ecology*, 8, 23-43, (2004).
- [3] National Research Council, "Minerals, critical minerals, and the US economy". National Academies Press, (2008).
- [4] Buchert, M., Schueler, D., Bleher, D., "Critical Metals for Future Sustainable Technologies and Their Recycling Potential", UNEP, (2009).
- [5] European Commission, "Critical Raw Materials for the European Union", European Commission, (2010).
- [6] Habashi, F., "Handbook of the Extractive Metallurgy", Willy-VCH, (1997).
- [7] Ayres, R.U., Talens-Peiro, L., "Materials efficiency: rare and critical metals", *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 371: 20110563, (2013).
- [8] Cook, N. J., Ciobanu, C. L., Pring, A., Skinner, W., Shimizu, M., "Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 4761-4791, (2009).
- [9] Frenzel, M., Hirsch, T., Gutzmer, J., "Gallium, germanium, indium and other trace and minor elements in sphalerite as a function of deposit type – A meta-analysis", *Ore Geology Reviews*, 76, 52-78 (2016).
- [10] Guberman, D. E., "Germanium. In: U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries", U.S. Geological Survey, Reston, 64, (2015).
- [11] Jaskula, B. W., "Gallium. In: U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries", U.S. Geological Survey, Reston, 58, (2015).
- [12] Tolcin, A. C. "Indium. In: U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries", U.S. Geological Survey, Reston, 74, (2015).
- [13] Tolcin, A. C., "Cadmium in Metals and minerals", U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cadmium/myb1-2008-cadmi.pdf>, (2008).

۳. نتیجه‌گیری کلی

سنگ‌های معدنی که معمولاً برای به منظور تهیه فلزات اصلی نظیر آلومینیم، مس، سرب و روی استخراج می‌شوند، به طور کلی حاوی انواع مختلفی فلزات کمیاب نیز هستند، که آنها را فلزات "سوار" یا "همنشین" می‌نامیم. در مواردی استحصال این فلزات برای کل فرایند توجیه اقتصادی و یا کاهش قیمت تمام شده فلز اصلی را فراهم می‌آورد. در این مقاله، مقادیر فلزات همنشین ممکن در سنگ معدن مجتمع سرب و روی انگوران، بررسی و با دیگر معادن مشابه فعال در دنیا مقایسه شد. عناصر همنشین با صرفه اقتصادی این مجتمع، به ترتیب، عبارتند از کادمیم، نقره، آرسنیک، ژرمانیم و ایندیم. به بیان دیگر، استحصال این عناصر در کنار سرب و روی می‌تواند ارزش افزوده مناسبی داشته باشد.

۴. سپاسگزاری

این کار تحقیقاتی با حمایت مجتمع سرب و روی انگوران انجام شده است، مؤلفان از مسئولان این مجتمع بسیار سپاسگزارند.

مراجع

- [1] European Commission Enterprise, "Critical raw materials for the EU, Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials", http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_de.htm, (2010).

- [14] Faroon, O., Ashizawa, A., Wright, S., Tucker, P., Jenkins, K., Ingerman, L., Rudisill, C., "Toxicological Profile for Cadmium", Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, Georgia, (2012).
- [15] Tolcin, A. C., "Cadmium", U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cadmium/myb1-2014-cadmi.pdf>, (2014).
- [16] Buttermann, W. C., Plachy, J., "Mineral Commodity Profiles: Cadmium", U.S. Geological Survey, (2002).
- [17] Buttermann, W. C., Hilliard, H.E., "Silver", U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, (2005).
- [18] Peltekov, A. B., Boyanov, B. S., Markova, T. S., "Behavior of arsenic in hydrometallurgical zinc production and environmental impact", Polish Journal of chemical Technology, 16, 80-86, (2014).
- [19] Greenwood, N. N., Earnshaw, A., "Chemistry of the elements, Germanium, tin, and lead", Butterworth-Heinemann Publishers Ltd, Oxford, United Kingdom, (1998).
- [20] Mezei, A., Ferron, C. J., Goad, R. E., "Recovery of Cobalt, Gold and Bismuth from the NICO Deposit, NWT, Canada - Part III: Recovery of cobalt", EDP Congress - Solution Purification and Purification in Aqueous Processing, New Orleans, Louisiana, (2001).
- [21] Tolcin, A. C., "Indium", U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, (2011).
- [22] Tolcin, A. C., "Indium in Metals and minerals", U. S. Geological Survey Minerals Yearbook, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/myb1-2008-indiu.pdf>, (2008).