

آزاد شدن عناصر بالقوه سمناک در طول هوازگی از شیل‌های سیاه محدوده معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا، تکاب، شمال باختر ایران

یوسف رحیم‌سوری^۱، عبدالمجید یعقوب‌پور^۲، سروش مدبری^۳ و صمد علیپور^۱

^۱ گروه زمین‌شناسی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۲ گروه زمین‌شناسی دانشگاه تربیت معلم، تهران، ایران

^۳ دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۱/۲۰

چکیده

شیل‌های سیاه محدوده معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا واقع در شمال‌باختر تکاب، دارای غلظت‌های بالایی از عناصر بالقوه سمناک به‌ویژه آرسنیک (۱۱۸۸۳ - ۴۴۰۳ ppm)، آنتیموان (۱۰۲۲ - ۴۰۵ ppm) و جیوه (۵۸ - ۳۰ ppm) هستند. محاسبه ضریب غنی‌شدگی عناصر نشان داده است که در طول هوازگی بعضی عناصر مانند As، Sb، Hg، Zn، U، Sr، Ni، Mo، Cu، Co، V، Ni، Sr و Zr دچار تهی‌شدگی و عناصری همچون Ta، Rb، Ga، Th، Pb و U دچار غنی‌شدگی شده‌اند. نتایج محاسبات موازنه جرم نیز نشان داده است که بالاترین میزان آزاد شدن عناصر به ترتیب به Cd، Zn، U، Sr، Ni، V، Cu، As، Mo، Zr، Hg و Sb تعلق دارد. با توجه به میانگین غلظت عناصر بالقوه سمناک در سنگ‌های غیرهوازده (سالم) و تناژ محاسبه‌شده رخنمون‌های شیل سیاه، بیشترین مقدار وزنی آزاد شده عناصر به ترتیب به As، Sb، Ni، Zn، V، Cu، U و Hg تعلق دارد. با توجه به بررسی‌های انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که شیل‌های سیاه هوازده در محدوده معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا، نقش اساسی در ایجاد آلودگی زمین‌زاد در محیط‌های پایین دست داشته‌اند.

کلیدواژه‌ها: عناصر بالقوه سمناک، هوازگی، شیل‌های سیاه، معدن متروکه آنتیموان، تکاب، شمال باختر ایران

* نویسنده مسئول: سروش مدبری

E-mail: modabberi@ut.ac.ir

۱- مقدمه

متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا تقریباً به‌طور کامل تخریب شده‌اند و رخنمون سنگ‌های میزبان (آهک و مارن‌های آهکی) و باطله (شیل‌های سیاه) و نیز کپه‌های باطله موجود در جلوی دهانه تونل‌های استخراجی در معرض اکسایش و هوازگی شدید قرار گرفته‌اند (شکل ۲).

مطالعات زیست‌محیطی قبلی در منطقه آغ‌دره، عموماً روی توزیع زمین‌شیمیایی عناصر بالقوه سمناک (به‌ویژه As، Sb و Hg) در آب و رسوبات بستر رودخانه آغ‌دره و تأثیر فعالیت‌های معدن‌کاری روی کیفیت آب سطحی متمرکز بوده، ضمن اینکه زمین‌شیمی زیست‌محیطی معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا و تأثیر آن روی آلودگی آب، رسوبات و خاک‌های حوضه آبریز رودخانه آغ‌دره نیز بررسی شده است (یعقوب‌پور و رحیم‌سوری، ۱۳۸۸). آب شاخه فرعی رودخانه آغ‌دره (شکل ۱) از نظر عناصر As (۳۷۵۳ - ۴۶۷/۶ ppm) و Sb (۶۷۶/۹۸ - ۲۹/۰۹ ppm) و رسوبات بستر آن از نظر عناصر As (> ۱۰۰۰۰ ppm - ۶۲۱/۶ ppm) و Sb (۴۶۸/۲۴ - ۴۳/۲۳ ppm) و Hg (۱۵/۳۹۴ - ۱/۹۷۱ ppm) به شدت آلوده است (یعقوب‌پور و رحیم‌سوری، ۱۳۸۸).

پژوهش فعلی، اولین مطالعه مرتبط با تأثیر واحدهای سنگی روی آلودگی‌های زیست‌محیطی در ایران بوده و به‌طور ویژه به بررسی آزاد شدن عناصر بالقوه سمناک در طول هوازگی از شیل‌های سیاه محدوده معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا می‌پردازد.

۲- زمین‌شناسی و کانی‌سازی

محدوده مورد مطالعه در زون ساختاری سندانج-سیرجان (Stocklin, 1968) و کمر بند آتشفشانی ارومیه-دختر (Alavi, 1994) واقع شده است. این کمر بند در نتیجه فرورانش به سمت شمال نوتیس در طول راندگی زاگرس ایجاد شده است (Stocklin, 1968; Alavi, 1994). باباخانی و قلمقاش (۱۳۷۴) معتقدند که بخش‌های شمالی تکاب محل برخورد زون‌های البرز-آذربایجان، ایران مرکزی و سندانج-سیرجان است (شکل ۱).

شیل‌های سیاه واقع شده در معرض هوازگی، به دلیل داشتن غلظت‌های بالای عناصر بالقوه سمناک به‌ویژه As، Sb، Hg، Cd، Pb و Zn دارای اهمیت زیست‌محیطی زیادی هستند. بر اساس تغییرات ویژه‌ای که در خواص فیزیکی و شیمیایی سنگ‌ها در هنگام هوازگی رخ می‌دهد، عناصر سمناک می‌توانند آزاد، منتقل، پراکنده و یا وارد سامانه‌های رودخانه‌ای، خاک‌های سطحی و کشاورزی، گیاهان و جانوران و نیز زنجیره غذایی و در نهایت وارد بدن انسان به عنوان مصرف‌کننده نهایی شوند و در آن تجمع یابند (Moore and Luoma, 1990; Jung, 2001; Kim et al., 2005; Chang et al., 2005; Navarro et al., 2008). بنابراین فرایندهای اکسایش و هوازگی سنگ‌ها عموماً با اثرات زیست‌محیطی، به‌ویژه آلودگی فلزات سنگین همراه هستند (Lee et al., 1998; Peng et al., 2004). تحرک پذیری عناصر اصلی و فرعی توسط محققان زیادی بررسی شده است (Nesbitt, 1979; Chesworth et al., 1981; Voicu and Bardoux, 2002) اما مطالعات محدودی درباره رفتار عناصر سمناک در طول هوازگی صورت گرفته است (Nora et al., 2002; Coveney and Tao, 2001; Peng et al., 2004; Loukola-Ruskeeniemi et al., 2003).

معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا، در ۴۲ کیلومتری شمال‌باختر تکاب در استان آذربایجان غربی قرار دارد. تکاب منطقه‌ای است با اقلیم نیمه‌خشک، تابستان‌های معتدل و زمستان‌های خیلی سرد با متوسط دمای سالانه حدود ۹°C، بارش سالانه حدود ۴۰۰ mm که اغلب به‌صورت برف است (Modabberi and Moore, 2004; Modabberi, 2004).

کانسار طلای آغ‌دره که یک کانسار با تیپ کارلین در نظر گرفته شده است (Daliran, 2008) در ۳ کیلومتری خاور این معدن متروکه قرار دارد. رخدادهای معدنی جیوه‌شاخ-شاخ نیز در ۲ کیلومتری شمال باختر معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا واقع است (شکل ۱). کارهای شدادی زیادی در جنوب روستاهای آغ‌دره بالا و آغ‌دره وسط شناسایی شده است (کانساران، ۱۳۷۱). تونل‌های استخراجی معدن

۳- مواد و روش‌ها

پانزده مقطع نازک و ۱۰ مقطع صیقلی از شیل سیاه نسبتاً سالم محدوده مورد مطالعه تهیه و بر روی آنها مطالعه کانی‌شناسی و سنگ‌نگاری انجام شد. برای نمونه‌برداری از شیل‌های سیاه نیز یک نیمرخ معرف در رخنمون‌های شیل سیاه محدوده مورد مطالعه انتخاب شد. دوازده نمونه شیل سیاه از ۶ نقطه (از هر نقطه ۲ نمونه) در طول این نیمرخ برداشت شد. این نمونه‌ها انواع سالم (غیر هوازده) تا هوازده با شدت‌های مختلف را دربر می‌گیرند. هر دو نمونه مربوط به یک نقطه نمونه‌برداری را با هم ترکیب و پس از یکنواخت‌سازی، نمونه معرف آن نقطه آماده شد. نمونه‌های ترکیبی با وزن حدود ۲ کیلوگرم در سنگ‌شکن فکی مخصوص تا ابعاد زیر مش ۱۰ (۲ میلی‌متر) خرد شده‌اند، سپس جزء ریزتر از ۲ میلی‌متر جدا و مجدداً تا ابعاد زیر مش ۲۰۰ پودر شد. در ادامه بخش ریزتر از مش ۲۰۰ هر نمونه با درج مشخصات مربوطه در کیسه‌های پلاستیکی زیپ‌دار ریخته شد و مقدار ۲۰ گرم از هر نمونه پودر برای تجزیه شیمیایی ۴۵ عنصری به روش ICP-MS به آزمایشگاه Acme کانادا ارسال شده‌اند. دو نمونه با غلظت آرسنیک بالای ۱۰۰۰۰ ppm در مرحله بعدی به‌طور جداگانه به آزمایشگاه Amdel استرالیا ارسال و به روش INAA تجزیه شیمیایی شدند.

۴- توصیف نیمرخ انتخاب شده و نتایج تجزیه‌های شیمیایی

شدت و درجه هوازدگی شیل‌ها، نقش مهمی در آزاد ساختن عناصر به محیط دارند (Peng et al., 2004). نیمرخ معرف مورد نظر نمونه‌برداری باید دارای سنگ‌های سالم (بدون هوازدگی) و سنگ‌های هوازده با شدت‌های مختلف باشد. بر اساس مطالعات صحرایی، کانی‌شناسی و سنگ‌نگاری به عمل آمده در محدوده معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا، محل نیمرخ معرف در ۳۰۰ تا ۵۰۰ متری پایین‌دست تونل‌های استخراجی معدن متروکه انتخاب شد (شکل ۵). این نیمرخ دارای طول تقریبی ۱۵ متر، امتداد تقریبی شمالی-جنوبی و مختصات جغرافیایی نقطه مرکزی "۲۱/۵"، "۰۰"، "۴۷° طول خاوری و "۴۱"، "۴۰"، "۳۶° عرض شمالی است. در امتداد این نیمرخ، ۶ نمونه ترکیبی معرف از ۶ نقطه مختلف از شیل‌های سیاه غیرهوازده تا شیل‌های سیاه کاملاً هوازده برداشت شد. نتایج تجزیه‌های شیمیایی این نمونه‌ها در جدول ۲ و موقعیت آنها در نیمرخ انتخاب شده در شکل ۵، نشان داده شده‌اند.

۴-۱. غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عناصر در شیل‌های سیاه در طول هوازدگی و محاسبه ضریب غنی‌شدگی

مطالعه تغییرات ضریب غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عناصر، رفتار عناصر مختلف را در طول هوازدگی نشان می‌دهد. سنگ‌های منشأ در طی هوازدگی بخشی از جرم خود را از دست می‌دهند، به همین دلیل عناصری که مقاومت بالایی در برابر عوامل هوازدگی دارند دچار غنی‌شدگی (افزایش) جرم می‌شوند، در حالی که عناصری که دارای مقاومت پایینی در مقابل هوازدگی هستند، دچار تهی‌شدگی (از دست دادن) جرم می‌شوند. به‌دست آوردن (gain) و از دست دادن (loss) جرم ممکن است نه تنها در محیط‌های مختلف متفاوت باشد، بلکه ممکن است در نیمرخ‌های مختلفی از یک رخنمون واحد سنگی نیز به دلیل تغییرات کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی متفاوت باشد. برای محاسبه ضریب غنی‌شدگی (EF) عناصر در شیل‌های سیاه محدوده مورد مطالعه از رابطه زیر استفاده شده است (IAEA-TCS-4, 1992):

$$EF = (X/Nb)_{\text{Weathered rock}} / (X/Nb)_{\text{Bedrock}}$$

که در آن X: عنصر جزئی مورد نظر و Nb: عنصر مرجع (reference element) نام‌تحرک در نمونه‌های سنگ بستر و سنگ هوازده است.

اگر $EF \approx 1$ باشد این بدین معنی است که غلظت عنصر مورد نظر بعد از هوازدگی نیز در سطح مقادیر زمینه باقی مانده است. $EF > 1$ غنی‌شدگی و $EF < 1$ تهی‌شدگی عنصر مورد نظر بر اثر هوازدگی را می‌رساند.

در جدول ۳ ضریب غنی‌شدگی (EF) محاسبه‌شده برای عناصر بالقوه سمناک

قدیمی‌ترین واحد سنگی در محدوده مورد مطالعه را شیل‌های سیاه تشکیل می‌دهند که در امتداد و طرفین دره معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا و در محل کارهای معدنی رخنمون یافته‌اند. این شیل‌ها که دارای امتداد لایه‌بندی ۳۱۰-۲۹۰N تا ۳۵ تا ۵۰ درجه به سمت شمال‌خاوری هستند، عموماً از کانی‌های رسی و کوارتز همراه با مقادیر جزئی فلدسپار در ابعاد سیلت، سیمان کربناتی، مواد آلی و کانی‌های کدر تشکیل شده‌اند (شکل ۳- الف و ۳- ب). در انواعی که تحت تأثیر سیال‌های گرمایی قرار گرفته و دگرسان شده‌اند، کانی‌های آرپمنت، رآلگار و در مقادیر جزئی استیپنیت، اسفالریت و کانی‌های ثانویه اکسیدهای آهن و گوگرد آزاد نیز یافت شده‌اند (شکل ۳- ج، د، و). محتوای کربن کل شیل‌های سیاه محدوده مورد مطالعه بین ۷/۲۱ تا ۱۶/۰۸ درصد وزنی است (جدول ۱).

شیل‌های سیاه محدوده معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا، بر اساس ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی به دو گروه زیر قابل تقسیم بندی هستند.

- ۱- شیل‌های سیاه با لامینه‌های نازک موجی: با اندکی دگرسانی و مقداری مواد آلی که در بین لایه‌های نازک نهشته شده‌اند (شکل ۳- الف و ۳- ب).
- ۲- شیل‌های سیاه بدون ساختار لامینه آشکار: با دگرسانی شدید، دارای کانی‌های کلسیت ثانویه، مسکویت و کانی‌های سولفیدی پیریت و به مقدار کمتر آرپمنت و رآلگار (شکل ۳- ج، د). این نوع از شیل‌های سیاه در کمر پایین رگه‌های کوارتز استیپنیت‌دار واقع شده‌اند و دارای غلظت بالایی از عناصر بالقوه سمناک به‌ویژه As، Hg و Sb هستند.

واحد شیل سیاه به‌طور دگرشیب توسط تناوبی از مارن‌های آهکی سبز متمایل به زرد تا خاکستری و در بخش‌هایی ژپس‌دار به همراه لایه‌هایی از ماسه‌سنگ با افق‌هایی از کنگلومرا (OMmq) پوشیده شده است (شکل ۴). سن این لایه‌ها بر اساس فسیل‌های شاخص شناسایی شده در آنها اولیگومیوسن تعیین شده است (باباخانی و قلمقاش، ۱۳۷۴). بنابراین سن شیل‌های سیاه واقع در زیر این لایه‌ها قدیمی‌تر از اولیگوسن خواهد بود. سن واحد شیل سیاه (میزبان کانی‌سازی آرسنیک و طلا) کانسار طلای زرشوران (شکل ۱) که مشابه و قابل مقایسه با شیل سیاه معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالاست، پرکامبرین تعیین شده است (Mehrabi et al., 1999; Asadi et al., 1999 & 2000).

کانی استیپنیت در معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا عموماً در رگه‌های کوارتز گرمایی نفوذ کرده در لایه‌های شیل سیاه و مارن آهکی، رخداد یافته است (شکل ۳- د).

در بخش خاوری محدوده مورد مطالعه، رخنمون‌هایی از توف آندزیتی سبز تا خاکستری روشن و مارن خاکستری (Tf) وجود دارد که در محدوده معدن متروکه روی مارن‌های آهکی واحد OMmq قرار گرفته‌اند. این واحد سنگی (Tf) توسط گدازه‌های آندزیتی با بافت پورفیری (Omva) پوشیده شده است. واحد سنگ آهک توده‌ای خاکستری تا قهوه‌ای رنگ (OMI2q) که میزبان کانی‌سازی طلا در کانسار طلای آغ‌دره منتسب به میوسن زیرین (باباخانی و قلمقاش، ۱۳۷۴) است، روی واحدهای سنگی قدیمی‌تر قرار گرفته است. این سنگ‌های آهکی کانی‌سازی شده دارای غلظت‌های بالایی از عناصر بالقوه سمناک به‌ویژه As، Sb، و Hg هستند (جدول ۱). در ادامه واحدهای اشاره شده در بالا، شیل و ماسه‌سنگ‌های سرخ (Ms) منتسب به میوسن بالایی شکل گرفته‌اند که دارای گسترش اصلی از شمال‌باختر تا جنوب‌خاور محدوده مورد مطالعه هستند (شکل ۴). از دیگر واحدهای سنگ‌شناسی موجود می‌توان به نهشته‌های تراورتن، خاک‌های سطحی و کشاورزی و آبرفت‌های کواترنری اشاره کرد. از واحدهای آذرین درونی (نفوذی؟) موجود نیز می‌توان به گرانیت تا گرانودیوریت موسوم به گرانیت آغ‌دره با سن احتمالی ژوراسیک (خلقی خسرقی، ۱۳۷۰) اشاره کرد که رخنمون اصلی آن در مناطق شمال تا شمال‌باختر روستای آغ‌دره بالا واقع شده است.

و مرز واحدهای سنگ‌شناختی موجود نقشه‌ای با مقیاس ۱/۱۲۵۰۰ تهیه شد. از روی این نقشه و با استفاده از کاغذ کالک میلی‌متری و مقیاس نقشه، مساحت رخنمون شیل سیاه به مقدار ۱۳۱۹۵۰ مترمربع برآورد شد. از حاصلضرب سینوس متوسط شیب لایه‌ها (۳۰ درجه) در ستبرای ظاهری لایه‌های شیل سیاه، ستبرای واقعی به مقدار ۸ متر که در واقع معرف گسترش عمقی رخنمون شیل سیاه، در محدوده معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالاست، به دست آمد. بر اساس نتایج حفاری، مشخص شد که حدود ۲/۵ متر از ۸ متر مجموع ستبرای واقعی لایه‌های شیل سیاه از هوازدهگی مصون مانده و حکم سنگ بستر غیرهوازده (BSH.0) را دارند، در مقابل، ۵/۵ متر باقیمانده از مجموع ستبرای واقعی دچار هوازدهگی با شدت‌های مختلف شده‌اند. از حاصلضرب مساحت رخنمون در ستبرای واقعی بخش هوازده، حجم بخش هوازده شیل‌های سیاه محاسبه و از حاصلضرب حجم محاسبه‌شده در متوسط چگالی شیل‌های سیاه محدوده مورد مطالعه (2.6 gr/Cm^3)، جرم یا تناژ رخنمون شیل سیاه هوازده به مقدار ۱۸۸۶۸۸۵ تن برآورد شد.

بر اساس مقادیر آزادشده عناصر بالقوه سمناک یا جزئی (ΔM_i) و متوسط درصد آزادشده عناصر (نتایج جدول ۴)، جرم هر کدام از عناصر آزادشده از شیل‌های سیاه هوازده به محیط برآورد شد. نتایج این محاسبات در جدول ۵ آورده شده است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

مطالعات پیشین نشان داده است که آب و رسوبات بستر رودخانه آغ‌دره، خاک‌های سطحی و کشاورزی و پوشش گیاهی بخش‌های جنوب‌باختری حوضه آبریز رودخانه آغ‌دره به سبب فرسایش و هوازدهگی شدید شیل‌های سیاه محدوده معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا و سنگ آهک‌های کانی‌سازی شده کاناسر طلای آغ‌دره، از نظر عناصر بالقوه سمناک Sb، As و Hg به شدت آلوده هستند (یعقوب پور و رحیم سوری، ۱۳۸۸). تجزیه‌های شیمیایی واحدهای سنگی مختلف حوضه آبریز رودخانه آغ‌دره (جدول ۱) نشان می‌دهد که شیل‌های سیاه محدوده معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا دارای توان بالایی در آزاد ساختن عناصر بالقوه سمناک به‌ویژه Sb، As و Hg به محیط‌های پایین دست هستند.

در مقایسه غلظت عناصر جزئی شیل‌های سیاه محدوده مورد مطالعه با غلظت میانگین در شیل‌ها (Turekian & Wedepohl, 1961; Mason & Moore, 1982) می‌توان متوجه غلظت‌های بالاتر عناصر Ni، Mo، Cu، U، Cd، Tl، Pb، Hg، Sb، As و Zn در شیل‌های سیاه منطقه آغ‌دره شد (جدول ۲).

محاسبات عامل غنی‌شدگی (EF) نشان داده است که در طول هوازدهگی عناصر As، Sb، Hg، Zn، Tl، Cd، U، V، Cu، Co، Ni، Mo، Zr در دچار تهی‌شدگی و عناصر Pb، Th، Ga، Rb و Ta دچار غنی‌شدگی شده‌اند (جدول ۳). نتایج محاسبات موازنه جرم نیز نشان داده است که بالاترین درصد آزادشده عناصر از شیل‌های سیاه محدوده مورد مطالعه در طول هوازدهگی به ترتیب به عناصر As، Cu، V، Ni، Sr، U، Zn، Cd، Tl، Mo، Zr، Hg و Sb (جدول ۴) و بالاترین مقدار وزنی (تناژ) آزادشده عناصر به ترتیب به عناصر As، Sb، Sr، Zn، Ni، V، Zr، U و Hg تعلق دارند (جدول ۵).

تجزیه‌های شیمیایی آب و رسوبات بستر رودخانه نشان داده است که سامانه رودخانه‌ای آغ‌دره دارای آلودگی بالایی از نظر As و Sb در آب و Sb، As و Hg در رسوبات بستر است. pH نمونه‌های آب رودخانه آغ‌دره خنثی تا اندکی قلیایی تعیین شده است (یعقوب پور و رحیم سوری، ۱۳۸۸). در ارتباط با آلودگی Hg در محیط‌های جامد حوضه آبریز رودخانه آغ‌دره، کانی سینابار به عنوان کانی منشأ آلودگی مشخص شده است (یعقوب پور و رحیم سوری، ۱۳۸۸). از آن جا که سینابار دارای انحلال‌پذیری پایینی در آب‌های قلیایی است (Gray et al., 2000)، به همین دلیل، غلظت Hg در نمونه‌های آب رودخانه آغ‌دره نیز بسیار پایین (کمتر از $0.2 \mu\text{g/l}$) و از این لحاظ فاقد آلودگی هستند. در مقابل،

و تعدادی از عناصر جزئی نمونه‌های معرف نیمرخ انتخاب‌شده از شیل‌های سیاه محدوده مورد مطالعه، آورده شده است.

۴-۲. محاسبه درصد آزاد شدن عناصر بالقوه سمناک و جزئی از نیمرخ شیل هوازده

با محاسبات موازنه جرم (Mass balance) می‌توان میزان آزادشدن عناصر را مشخص ساخت. میزان آزادشدن عناصر جزئی در طول هوازدهگی را نسبت به عنصر شاخص نامتحرک (immobile index element) با فرض موارد زیر محاسبه می‌کنند (Peng et al., 2004):

- فرض اول: مجموع محتوای عنصر شاخص در طول زمان هوازدهگی دچار تغییر نشده باشد.

- فرض دوم: عنصر شاخص مورد نظر درون نیمرخ هوازده، دچار توزیع مجدد (redistribution) نشده باشد.

در این محاسبات عنصر Nb به عنوان عنصر شاخص نامتحرک در نظر گرفته شده است. از رابطه زیر برای محاسبه جرم آزادشده عناصر استفاده شده است (Nesbitt, 1979; Middelburg et al., 1988; Nesbitt and Wilson, 1992; Kurtz et al., 2000; Peng et al., 2004):

$$\% \text{Loss} = (C_{j,w}/C_{j,p} \times C_{i,p}/C_{i,w} - 1) \times 100$$

که در آن %Loss درصد آزاد شدن عنصر مورد نظر، $C_{i,w}$: غلظت عنصر مورد نظر در سنگ هوازده، $C_{i,p}$: غلظت عنصر مورد نظر در سنگ والد (سنگ بستر سالم)، $C_{j,w}$: غلظت عنصر شاخص نامتحرک در سنگ والد، $C_{j,p}$: غلظت عنصر شاخص نامتحرک در سنگ هوازده است.

نتایج محاسبات درصد آزادشدن عناصر نسبت به سنگ والد می‌تواند اعدادی مثبت و یا منفی باشند که به ترتیب معرف به دست آوردن و از دست دادن (آزادشدن) جرم است.

در محاسبات موازنه جرم قبلاً از عنصر Ti و امروزه از عناصر Nb، Ta و Ir به عنوان عناصر شاخص نامتحرک استفاده می‌کنند. در پژوهش موضوع این مقاله عنصر Nb به عنوان عنصر شاخص نامتحرک انتخاب شده است، به این دلیل که غلظت Nb نسبت به سنگ والد در تمامی نمونه‌های هوازده از نیمرخ انتخاب‌شده در مقایسه با دیگر عناصر به شدت غنی شده است و این بدین معناست که Nb در مقایسه با دیگر عناصر مشابه کم‌تحرک‌ترین عنصر بوده است. نتایج محاسبات درصد آزادشدن عناصر بالقوه سمناک و تعدادی از عناصر جزئی شیل‌های سیاه محدوده مورد مطالعه در جدول ۴ آورده شده است.

۴-۳. برآورد جرم عناصر سمناک از شیل‌های سیاه محدوده مورد مطالعه

با در اختیار داشتن میانگین درصد آزادشدن عناصر سمناک در شیل‌های سیاه محدوده مورد مطالعه (نتایج جدول ۴) و غلظت همین عناصر در شیل‌های سیاه سالم ناهوازده (نمونه BSH.0 جدول ۲) و برآورد وزن (تناژ) رخنمون شیل‌های سیاه محدوده مورد مطالعه، می‌توان اقدام به محاسبه مقدار وزنی عناصر آزادشده در طول هوازدهگی از رابطه زیر کرد (Peng et al., 2004):

$$\Delta M_i = M \times C_i \times (\% \text{Loss})$$

که در آن ΔM_i : مقدار عنصر بالقوه سمناک یا جزئی مورد نظر آزادشده به محیط، M: جرم (تناژ) شیل سیاه دارای رخنمون، C_i : غلظت عنصر مورد نظر در سنگ بستر (شیل سیاه سالم و بدون هوازدهگی) و %Loss: میانگین درصد آزادشدن عنصر مورد نظر در سنگ‌های هوازده است.

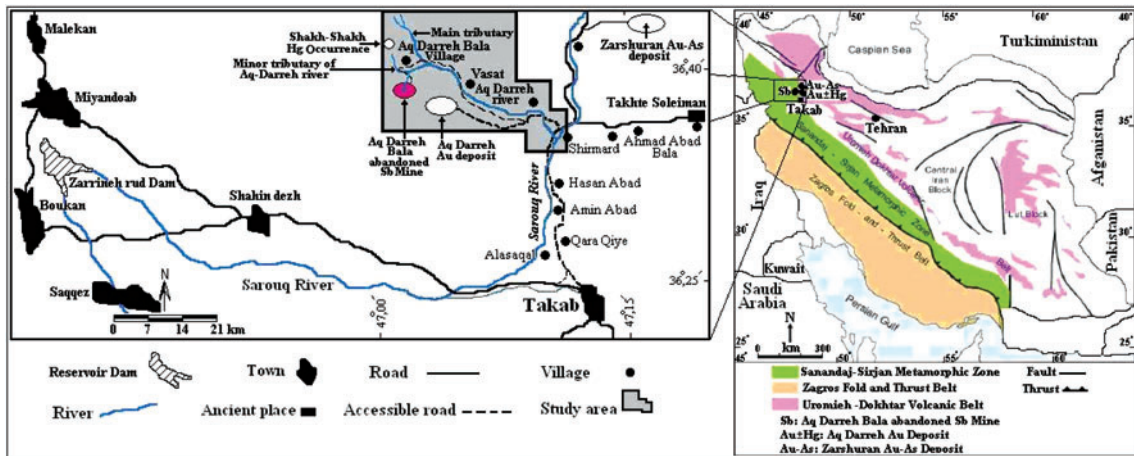
برای محاسبه تناژ رخنمون شیل‌های سیاه محدوده مورد مطالعه، ابتدا توسط یک دستگاه GPS مدل ماژولان ۳۱۵، مرز بین رخنمون‌های شیل سیاه (با طول حدود ۱ کیلومتر، عرض‌های متغیر بین ۸۰ تا ۲۵۰ متر و ستبرایی در حدود ۱۶ متر) با واحدهای سنگ‌شناسی اطراف مشخص و با توجه به مشخصات نقاط برداشت‌شده

می‌توان نتیجه گرفت که شیل‌های سیاه محدوده معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا به سبب داشتن غلظت‌های بالای عناصر بالقوه سمناک Hg و Sb، As و آزادشدن آنها در طول هوازدگی تأثیر بسزایی در ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی منطقه آغ‌دره داشته‌اند.

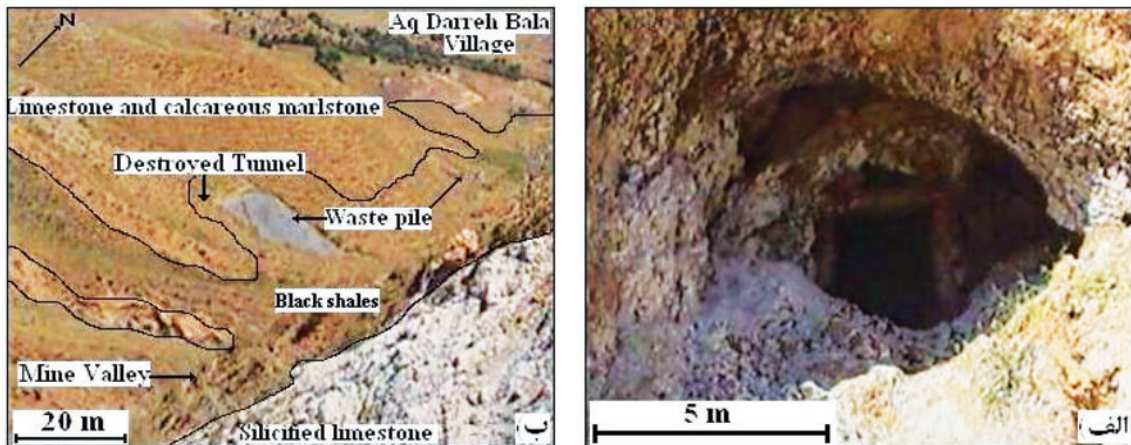
سیاسگزاری

بدینوسیله از حمایت مالی معاونت محیط‌زیست انسانی سازمان حفاظت محیط‌زیست، همکاری معاون محترم معدنی سازمان صنایع و معادن استان آذربایجان غربی (آقای مهندس اکبر طاهری) و مدیریت محترم شرکت پویا زرکان آغ‌دره (بهربردار معدن و واحد استحصال طلای آغ‌دره-تکاب) کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

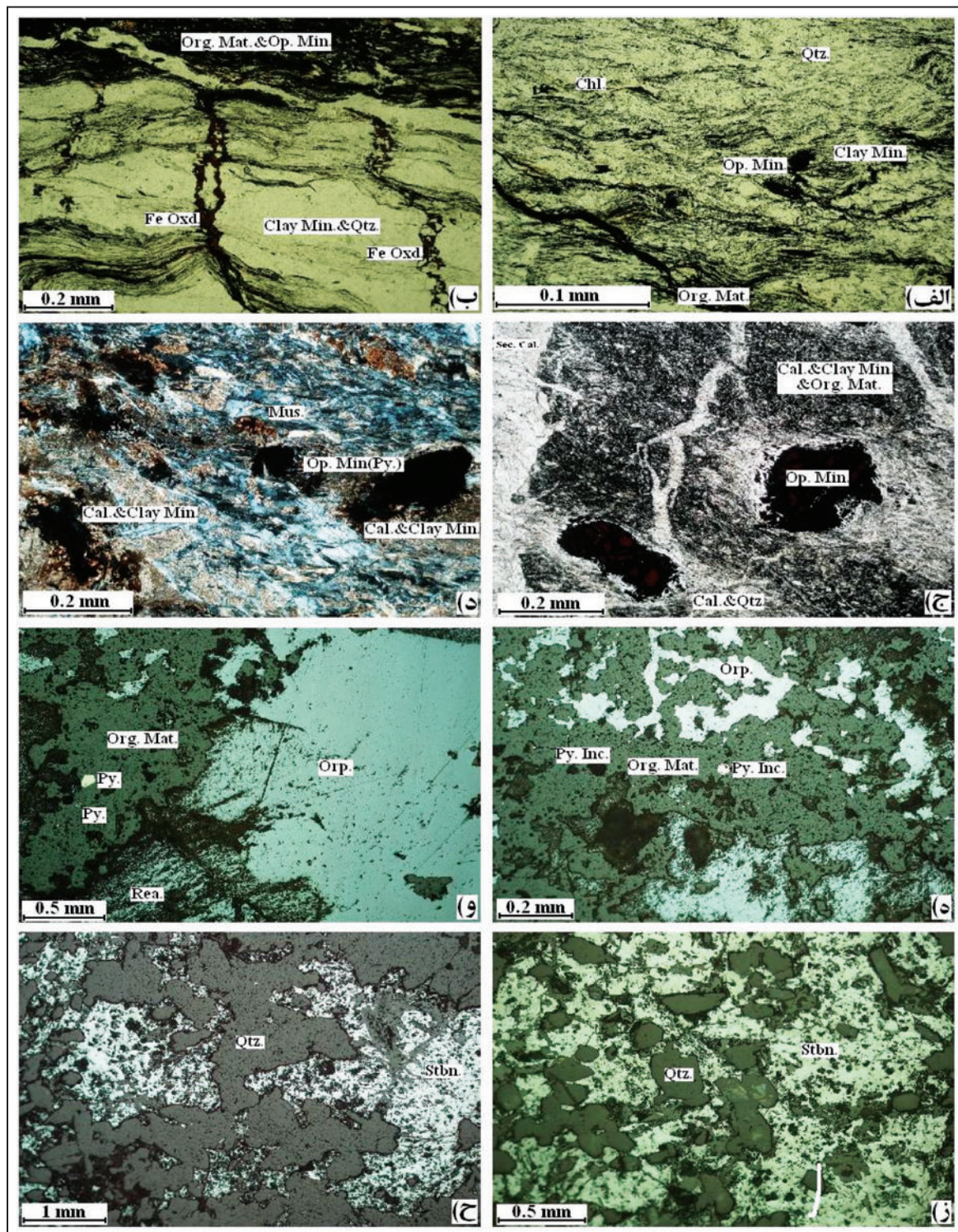
غلظت Hg (به سبب تمرکز سینابار) در رسوبات بستر رودخانه و خاک‌های سطحی و کشاورزی محدوده مورد مطالعه بالاست (یعقوب‌پور و رحیم‌سوری، ۱۳۸۸). شرایط آب‌شناختی، زمین‌ریخت‌شناختی و سیماهای ساختاری محدوده مورد مطالعه سرعت فرسایش، هوازدگی و اکسایش رخنمون‌های شیل سیاه را به‌ویژه در امتداد و طرفین دره معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره، بالاتر برده است. در نتیجه می‌توان دریافت که رخنمون‌های شیل سیاه محدوده معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا، به عنوان منشأ زمین‌زاد، نقشی اساسی در آلودگی محیط‌های پایین دست داشته و دارند. محققان زیادی غلظت‌های بالای عناصر جزئی در شیل‌های سیاه و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از آنها را در سطح جهان گزارش کرده‌اند (Armandes, 1972; Coveney & Glascock, 1989; Kim, 1989; Lee et al., 1998; Peng et al., 2004; Lu and Zhang, 2005, ...).



شکل ۱- موقعیت معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا در نقشه ساده‌شده زمین‌شناسی ایران (تعدیل شده از Stöcklin, 1968)

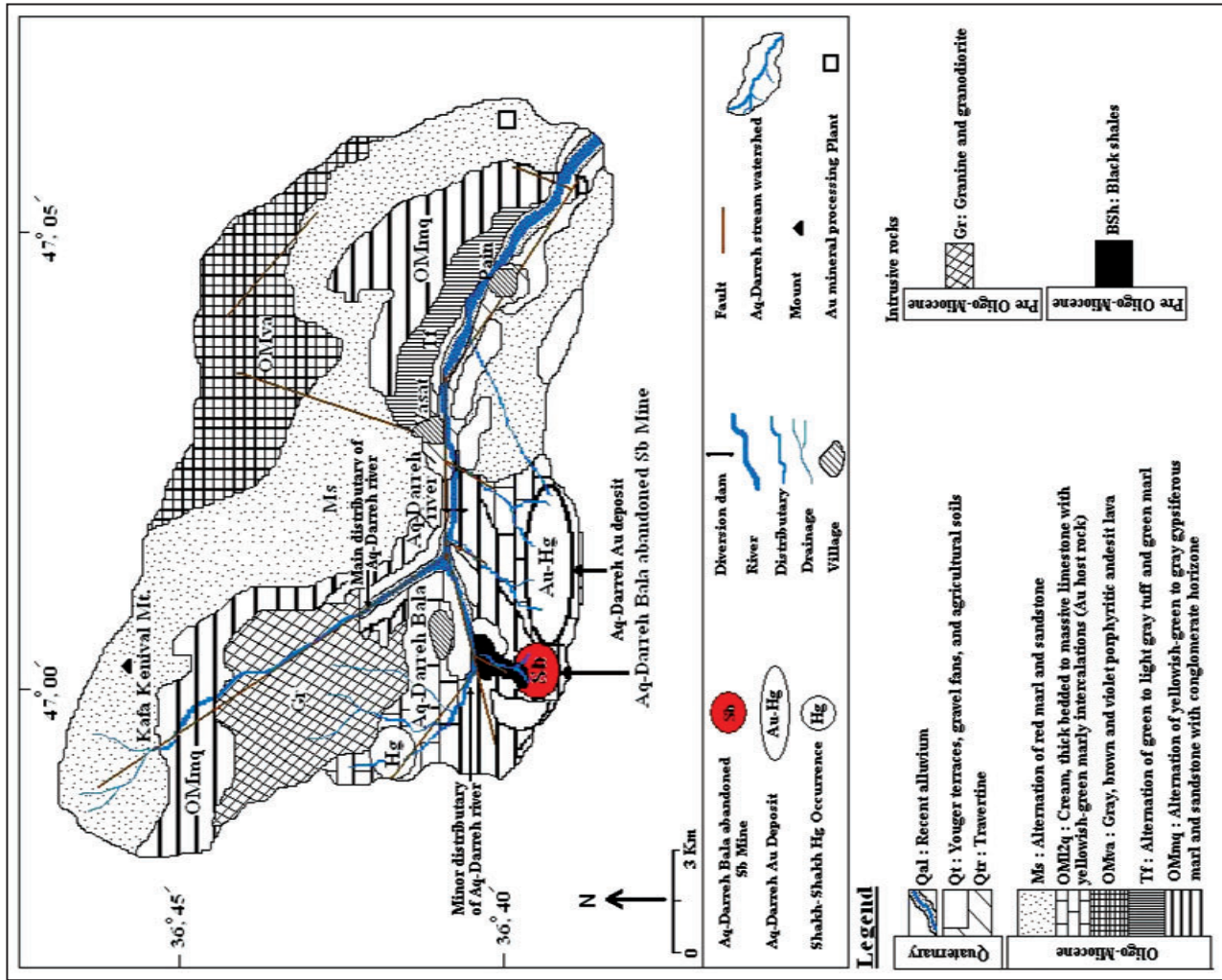


شکل ۲- معدن متروکه آنتیموان آغ‌دره بالا؛ الف) ورودی تونل اصلی، ب) موقعیت تونل اصلی، کپه‌های باطله و سنگ‌های میزبان آهنی

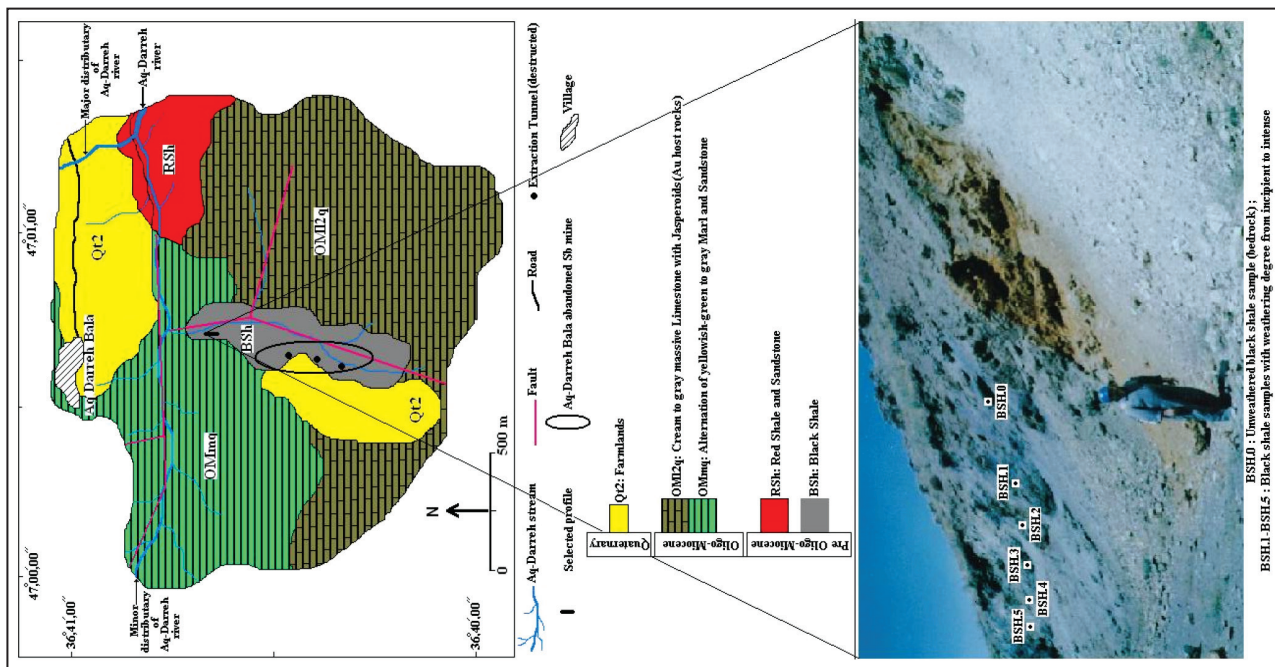


شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی شیل های سیاه و رگه کوارتز گرمایی استینیت داره؛ الف و ب) شیل سیاه موجی با لایه های نازکی از مواد آلی (در نور عبوری)، ج و د) شیل سیاه دگرسان شده بدون لایه بندی نازک غنی از مواد آلی (در نور عبوری)، ه و و) شیل سیاه با کانی های اریپمنت، رآلگار و پیریت (در نور بازتابی)، ز و ح) استینیت بی شکل تا نیمه خود شکل پرکننده فضاهای خالی رگه کوارتزی میزبان.

(Iron oxides.: Fe oxides; Chl.: Chlorite; Ser.: Sericite; Sec. Cal.: Secondary Calcite; Op.Min.: Opaque minerals; Orp.: Orpiment; Rea.: Realgar; Qtz.: Quartz; Stbn.: Stibnite; Py.Inc.: Pyrite inclusion; Py.: Pyrite; Org.Mat.: Organic matter; Cal.: Calcite; Clay Min.: Clay minerals).



شکل ۴- نقشه زمین شناسی محوطه آبریز رودخانه آغ دره و موقعیت معادن متروک آنتیموان آغ دره بالا و رخنمون شیل سیاه (تجدیل شده از یعقوب پور و رحیم سوری، ۱۳۸۸)



شکل ۵- نقشه زمین شناسی محوطه معدن متروک آنتیموان آغ دره بالا و موقعیت نمونه های برداشت شده در امتداد نیمرخ شیل سیاه. امتداد نیمرخ شمالی-جنوبی و دید عکس به سمت جنوب باختر است.

جدول ۱- غلظت عناصر بالقوه سمناک و کربن (Total) کل واحدهای مختلف سنگی حوضه آبریز رودخانه آغدره (یعقوب پور و رحیم سوری، ۱۳۸۸)

C (%wt)	Zn (ppm)	Tl (ppm)	Se (ppm)	Sb (ppm)	Pb (ppm)	Hg (ppm)	Cd (ppm)	As (ppm)	واحد سنگی
۷/۲۱- ۱۶/۰۸	۳۲- ۲۵۰۲	۶/۱- ۳۲/۷	۰/۸- ۱/۳	۴۳/۶- ۷۶۸/۲	۴۶/۲- ۲۴۱/۴	۱۵/۷- ۴۱/۶	۱/۳- ۳/۵	۱۱۲۵- ۸۳۱۸۲	شیل سیاه
۰/۰۷- ۰/۱۸	۴۲- ۵۸	۰/۹- ۱/۷	<۰/۵- ۰/۷	۳۱/۶- ۴۸/۵	۱۵/۳- ۱۸/۶	۳/۱- ۳/۴	۱/۳- ۷/۶	۲۲۵- ۳۱۰	مارن آهکی (زرد تا کرم رنگ)
<۰/۰۱	۲۷۶- ۴۰۲	۲/۴- ۳/۹	<۰/۵- ۰/۶	۲۹/۲- ۲۱۵/۶	۱۴/۷- ۶۲/۸	۳/۶- ۸/۹	۲/۸- ۳/۵	۹۸- ۳۱۲	مارن (زرد تا سبز روشن)
۰/۰۱- ۰/۰۲	۱۰۵- ۲۳۵۱۱	۰/۵- ۸۳/۲	<۰/۵- ۳/۶	۱۱۰۳۶۱- ۲۱۸۰۵۷	۴۸/۶- ۹۲۴۲/۷	۵۶/۷- ۱۸۳/۱	۰/۳- ۳/۱/۲	۲۸۶- ۵۰۷	رگه کوارتزی آنتیموان دار
<۰/۰۱	۵۱- ۶۳	۲/۷- ۱۸/۲	۰/۶- ۱/۱	۵۶/۶- ۹۳/۵	۳۳/۲- ۵۱/۶	۸/۳- ۳۸/۶	۱۱۶- ۲۴۳	۷۶- ۶۹۱	توف (سبز تا خاکستری)
<۰/۰۱	۱۱۲- ۱۸۶	۱/۷- ۲/۹	<۰/۵	۸۲/۲- ۱۰۶/۱	۱۸/۱- ۲۶/۷	۰/۲- ۱/۹	۰/۲- ۰/۶	۱۶۷- ۷۲۶	گدازه آندزیتی
<۰/۰۱	۱۸- ۴۷	۰/۲- ۱/۳	<۰/۵- ۰/۸	۱/۴- ۲/۸	۶/۷- ۱۸/۲	<۰/۱- ۰/۴	۱/۴- ۳/۲	۸۲- ۱۳۶	سنگ آهک دگرسان نشده
<۰/۰۱	۳- ۱۹۲۴۱	۰/۱- ۱۲/۳	<۰/۵- ۵/۶	۱۲/۶- ۳۴۲/۵	۱۰/۲- ۱۱۳۷/۲	۴/۲- ۱۸۴/۷	۱/۸- ۹۶/۷	۲۱۰- ۲۶۴۱۱	سنگ آهک دگرسان شده
<۰/۰۱	۱۹- ۱۱۲	۰/۴- ۱۰/۸	<۰/۵	۱۲/۹- ۵۴/۳	۸/۲- ۱۰۱/۳	۹/۲- ۱۲/۸	۰/۳- ۱/۴	۵۲- ۱۱۲۴	سنگ آهک تودهای خاکستری سیلیسی شده
<۰/۰۱	۲۴- ۶۲	۰/۳- ۰/۵	<۰/۵	۲/۳- ۱۱/۲	۷/۳- ۳۲/۲	۴/۸- ۷۳۶/۲	<۰/۱- ۰/۳	۱۴- ۴۹	سنگ ماسه (سازند سرخ بالایی)
<۰/۰۱	۱۳- ۲۱	۰/۱- ۰/۳	<۰/۵	۱/۶- ۶/۸	۵/۱- ۱۳/۳	۲/۶- ۱۱۳/۹	۰/۲- ۰/۴	۱۵- ۴۶	مارن (سازند سرخ بالایی)
<۰/۰۱	۱۴- ۹۷	۰/۲- ۶/۱	<۰/۵- ۰/۹	۱۳/۶- ۴۰۲/۵	۵/۳- ۸۹۲/۴	۱۱/۲- ۲۹۶/۸	۰/۶- ۱/۱	۳۰۸- ۱۱۲۳۸	تراورتن

جدول ۲- غلظت عناصر بالقوه سمناک و تعدادی از عناصر جزئی همراه در شیل های سیاه غیر هوازده و شیل های هوازده (در شدت های مختلف) محدوده معدن متروکه آنتیموان آغدره بالا و مقایسه آن با غلظت میانگین شیل*

عناصر جزئی	حد تشخیص	BSH.0	BSH.1	BSH.2	BSH.3	BSH.4	BSH.5	میانگین شیل*
As	۱ ppm	۱۱۸۸۳	۱۱۰۳۷	۸۵۱۲	۶۰۰۳	۶۶۱۱	۴۴۰۳	۱۳
Sb	۰/۱ ppm	۹۶۴/۴	۱۰۰۸/۳	۱۰۲۱/۹	۹۰۸/۱	۶۱۲/۴	۴۰۵/۸	۱/۵
Hg	۰/۱ ppm	۵۴/۳	۵۸/۲	۴۳/۸	۴۴/۲	۳۹/۳	۳۰/۱	۰/۴
Pb	۰/۱ ppm	۴۱/۰	۱۶۳/۸	۴۷/۴	۳۰/۶	۱۱۲/۳	۷۸/۵	۲۰
Zn	۱ ppm	۱۸۶	۸۹	۳۲	۲۲	۳۴	۱۹	۹۵
Tl	۰/۱ ppm	۵/۲	۴/۱	۴/۲	۳/۶	۲/۹	۱/۷	۱
Cd	۰/۱ ppm	۴/۲	۱/۱	۰/۶	۰/۳	۰/۷	۰/۲	۰/۳
Th	۰/۲ ppm	۵/۲	۱۱/۷	۹/۲	۱۰/۸	۹/۶	۱۷/۷	۱۲
U	۰/۱ ppm	۶۲/۹	۵۹/۶	۲۸/۴	۱۱/۶	۹/۵	۳/۰	۳/۷
V	۸ ppm	۱۳۳	۱۹۸	۶۷	۲۸	۷۱	۱۶	۱۳۰
Co	۰/۲ ppm	۲۸/۴	۱۲/۹	۳۲/۱	۹/۷	۲۱/۴	۳۴/۲	۱۹
Cu	۰/۱ ppm	۸۲/۷	۷۹/۴	۷۶/۱	۲۴/۴	۴۸/۵	۱۸/۳	۴۵
Mo	۰/۱ ppm	۱۱/۳	۹/۶	۷/۰	۱۱/۸	۵/۳	۲/۷	۲/۶
Ni	۰/۱ ppm	۱۳۴/۶	۸۷/۲	۷۰/۵	۱۰/۴	۳۷/۷	۱۸/۶	۶۸
Ga	۰/۵ ppm	۸/۷	۲۲/۴	۱۰/۱	۱۸/۳	۱۴/۲	۱۹/۵	۱۹
Rb	۰/۱ ppm	۳۶/۲	۶۱/۳	۶۰/۸	۱۲۶/۱	۱۴۶/۲	۱۶۵/۵	۱۴۰
Zr	۰/۱ ppm	۱۵۲/۰	۱۸۳/۳	۱۴۱/۲	۱۳۵/۷	۹۱/۵	۸۰/۴	۱۶۰
Ta	۰/۱ ppm	۰/۶	۰/۹	۰/۸	۱/۲	۱/۰	۱/۲	۰/۸
Nb	۰/۱ ppm	۸/۵	۱۲/۲	۱۱/۸	۱۴/۴	۱۱/۲	۱۳/۷	۱۱

BSH.0: شیل سیاه غیر هوازده (سنگ بستر سالم)، BSH.1: شیل سیاه با هوازگی جزئی و کانی های سولفیدی اکسید شده بدون تغییر در رنگ، سختی و بافت، BSH.2: شیل سیاه با هوازگی ضعیف و کانی های سولفیدی اکسید شده با تغییر رنگ و بدون تغییر در سختی و بافت، BSH.3: شیل سیاه با هوازگی متوسط، کانی های سولفیدی اکسید شده، رنگ از دست رفته، سختی و بافت تغییر یافته، BSH.4: شیل سیاه با هوازگی شدید، کانی های سولفیدی اکسید شده، رنگ از دست رفته، سختی و بافت کاملاً تغییر یافته، BSH.5: شیل سیاه کاملاً هوازده و رنگ و بافت کاملاً از دست رفته و تبدیل شده به خاک. (Mason and Moore, 1982) *After

جدول ۳- ضریب غنی شدگی عناصر بالقوه سمناک و تعدادی از عناصر جزئی شیل های سیاه در نیمرخ مطالعه شده

BSH.5	BSH.4	BSH.3	BSH.2	BSH.1	نمونه شیل سیاه
۰/۲۳۰	۰/۴۲۲	۰/۲۹۸	۰/۵۱۶	۰/۶۴۷	As
۰/۲۶۱	۰/۴۸۲	۰/۵۵۶	۰/۷۶۳	۰/۷۲۸	Sb
۰/۳۴۴	۰/۵۴۹	۰/۴۸۰	۰/۵۸۱	۰/۷۴۶	Hg
۱/۱۸۸	۲/۰۷۵	۰/۴۴۰	۰/۸۳۳	۲/۷۸۳	Pb
۰/۰۶۳	۰/۱۳۸	۰/۰۷۰	۰/۱۲۴	۰/۳۳۳	Zn
۰/۲۰۳	۰/۴۲۳	۰/۴۰۸	۰/۵۸۲	۰/۵۴۹	Tl
۰/۰۲۹	۰/۱۲۶	۰/۰۴۲	۰/۱۰۳	۰/۱۸۲	Cd
۲/۱۱۱	۱/۴۰۰	۱/۲۲۵	۱/۲۷۴	۱/۵۶۷	Th
۰/۰۳۰	۰/۱۱۵	۰/۱۰۹	۰/۳۲۵	۰/۶۶۰	U
۰/۰۷۵	۰/۴۰۵	۰/۱۲۴	۰/۳۶۳	۱/۰۳۷	V
۰/۷۴۷	۰/۵۷۲	۰/۲۰۱	۰/۸۱۴	۰/۳۱۶	Co
۰/۱۳۷	۰/۴۴۵	۰/۱۷۴	۰/۶۶۳	۰/۶۶۹	Cu
۰/۱۴۸	۰/۳۵۶	۰/۶۱۶	۰/۴۴۶	۰/۵۹۲	Mo
۰/۰۸۶	۰/۲۱۲	۰/۰۴۶	۰/۳۷۷	۰/۴۵۱	Ni
۱/۳۹۰	۱/۲۳۸	۱/۲۴۱	۰/۸۳۶	۱/۷۹۴	Ga
۰/۳۲۸	۰/۴۵۷	۰/۵۲۷	۰/۶۶۹	۰/۶۳۴	Zr
۱/۲۴۰	۱/۲۶۵	۱/۱۸۰	۰/۹۶۰	۱/۰۴۵	Ta
۱	۱	۱	۱	۱	Nb

جدول ۴- دامنه تغییرات و متوسط درصد آزاد شدن عناصر بالقوه سمناک و تعدادی از عناصر جزئی شیل های سیاه در نیمرخ مطالعه شده بر اساس محاسبات موازنه جرم

عنصر	دامنه درصد آزاد شدن	میانگین درصد آزاد شدن (% loss)
As	۷۷/۰۱ ~ -۳۵/۲۹	- ۵۷/۷۳
Sb	۷۳/۸۹ ~ -۲۳/۶۷	- ۴۴/۱۹
Hg	۶۵/۶۱ ~ -۲۵/۳۲	- ۴۵/۹۷
Pb	۱۷۸/۳۵ ~ -۵۵/۹۵	+ ۴۶/۴۵
Zn	۹۳/۶۶ ~ -۶۶/۶۶	- ۸۵/۴۱
Tl	۷۹/۷۲ ~ -۴۱/۸۲	- ۵۶/۶۹
Cd	۹۷/۰۴ ~ -۸۱/۷۵	- ۹۰/۳۲
Th	۱۱۱/۱۸ ~ +۲۲/۶۰	+ ۵۱/۶۱
U	۹۷/۰۴ ~ -۳۴/۰۲	- ۷۵/۲۷
V	۳/۶۷ ~ -۹۲/۵۳	- ۵۹/۹۳
Co	۷۹/۸۴ ~ -۱۸/۶۰	- ۴۶/۹۷
Cu	۸۶/۲۷ ~ -۳۳/۱۱	- ۵۸/۲۳
Mo	۸۵/۱۸ ~ -۲۸/۳۷	- ۵۶/۸۳
Ni	۹۵/۴۵ ~ -۴۰/۹۳	- ۷۳/۷۷
Ga	۷۹/۳۸ ~ -۱۶/۳۷	+ ۲۹/۹۶
Rb	۱۸۳/۵۴ ~ +۱۷/۷۴	+ ۹۱/۶۹
Sr	۹۰/۵۰ ~ -۴۹/۱۹	- ۷۳/۸۷
Zr	۶۷/۱۸ ~ -۳۳/۰۹	- ۴۷/۷۰

جدول ۵- مقدار عناصر بالقوه سمناک و تعدادی از عناصر جزئی آزاد شده در طول هوازدگی از شیل های سیاه محدوده معدن متروکه آنتیموان آغ دره بالا

تن (M)= ۱۸۸۶۸۸۵ وزن شیل های سیاه هوازده			
عنصر	غلظت میانگین عنصر جزئی (C _i) در سنگ بستر غیر هوازده (نمونه BRBSH0) (بر حسب ppm)	میانگین درصد آزاد شدن (% loss)	مقدار عنصر جزئی آزاد شده (ΔM _i) (بر حسب تن)
As	۱۱۸۸۳	- ۵۷/۷۳	۱۲۹۴۴/۱۳۶
Sb	۹۶۴/۴	- ۴۴/۱۹	۸۰۴/۱۳۰
Hg	۵۴/۳	- ۴۵/۹۷	۴۷/۰۹۹
Zn	۱۸۶	- ۸۵/۴۱	۲۹۹/۷۵۵
Tl	۵/۲	- ۵۶/۶۹	۵/۵۶۲
Cd	۴/۲	- ۹۰/۳۲	۷/۱۵۸
U	۶۲/۹	- ۷۵/۲۷	۸۹/۳۳۴
V	۱۳۳	- ۵۹/۹۳	۱۵۰/۳۹۸
Co	۲۸/۴	- ۴۶/۹۷	۲۵/۱۷۰
Cu	۸۲/۷	- ۵۸/۲۳	۹۰/۸۶۵
Mo	۱۱/۳	- ۵۶/۸۳	۱۲/۱۱۷
Ni	۱۳۴/۶	- ۷۳/۷۷	۱۸۷/۳۵۷
Sr	۲۸۳/۴	- ۷۳/۸۷	۳۹۵/۰۱۵
Zr	۱۵۲/۰	- ۴۷/۷۰	۱۳۶/۸۰۷

کتابنگاری

باباخانی، ع. و قلمقاش، ج.، ۱۳۷۴- نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ تخت‌سلیمان. چاپ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

خلقی خسرقی، م.ح.، ۱۳۷۰- متامورفیزم، پلوتونیزم و استراتیگرافی شرق صائین‌دژ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد پترولوژی، دانشگاه تهران، ۲۶۰ ص.

کانساران، مهندسین مشاور، ۱۳۷۱- گزارش زمین‌شناسی معدنی طلا و آنتیموان در جنوب آغ‌دره بالا (مقیاس ۱/۵۰۰۰). وزارت معادن و فلزات، ۸۷ ص، ۵ برگ نقشه، یک برگ مقطع و ۴ ضمیمه.

یعقوب‌پور، ع. و رحیم‌سوری، ی.، ۱۳۸۸- ژئوشیمی زیست‌محیطی محدوده معدنی آغ‌دره-تکاب، یافتن منشاء عناصر آلاینده آرسنیک، آنتیموان و جیوه و بررسی تاثیر فعالیت‌های معدنکاری و صنایع معدنی در ایجاد آلودگی منابع آب، رسوبات و خاک منطقه. گزارش نهایی طرح پژوهشی، سازمان حفاظت محیط زیست.

References

- Alavi, M., 1994- Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran; new data and interpretations. *Tectonophysics*. 229: 211-238.
- Armandes, G., 1972- Geochemical studies of uranium and vanadium in a Swedish alum shale. *Stockholm Contribution Geology*. 27: 1-148.
- Asadi, H. H., Voncken, L. H. L. & Hale, M., 1999- Invisible gold at Zarshuran, Iran. *Economic Geology*. 94: 1367-1374.
- Asadi, H. H., Voncken, J. H. L., Kühnel, R. A. & Hale, M., 2000- Petrography, mineralogy and geochemistry of the Zarshouran Carlin-like gold deposit, northwest Iran. *Mineralium Deposita*. 35: 656-671.
- Chang, P., Kim, J. Y. & Kim, K. W., 2005- Concentration of arsenic and heavy metals in vegetation at two abandoned mine tailings in South Korea. *Environmental Geochemistry and Health*. 27: 109-119.
- Chesworth, W., Dejou, L. & Larroque, P., 1981- The weathering of basalt and relative mobilities of the major elements at Belbex, France. *Geochimica Cosmochimica Acta*. 45: 1235-1243.
- Coveney, R. M. & Glascock, M. D., 1989- A review of the origins of metal-rich Pennsylvanian black shales, central U.S.A., with an inferred role for brines. *Applied Geochemistry*. 4: 347-367.
- Coveney, R. M. & Tao, S., 2001- Metal pollution from the Paleozoic black shales of the Midwestern United States. Geological Society of America Annual Meeting. <http://www.gsa.confex.com>.
- Daliran, M., 2008- The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran-hydrothermal alteration and mineralization. *Mineralium Deposita* 43: 383-404.
- Gray, J. E., Theodorakos, P. M., Bailey, E. A. & Turner, R. R., 2000- Distribution, Speciation and transport of mercury in stream-sediment, stream-water and fish collected near abandoned mercury mines in Southwestern Alaska, USA. *The Science of Total Environment*. 260: 21-33.
- IAEA-TCS-4, 1992- Sampling and analytical methodologies for instrumental neutron activation analysis of airborne particulate matter. Training course series no. 4, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Jung, M. C., 2001- Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea. *Applied Geochemistry*. 16: 1369-1375.
- Kim, J. Y., 1989- Geochemistry and genesis of the Guryongsan (Ogcheon) uraniferous black slates. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*. 22: 35-63.
- Kim, J. Y., Kim, K. W., Ahn, J. S., Ko, I. & Lee, C. H., 2005- Investigation and risk assessment modeling of As and other heavy metals contamination around five abandoned metal mines in Korea. *Environmental Geochemistry and Health*. 27: 193-203.
- Kurtz, A. C., Derry, L. A., Chadwick, O. A. & Alfano, M. J., 2000- Refractory element mobility in volcanic soils. *Geology*. 28: 683-686.
- Lee, J. S., Chon, H. T., Kim, J. S., Kim, K. W. & Moon, H. S., 1998- Enrichment of potentially toxic elements in areas underlain by black shales and slates in Korea. *Environmental Geochemistry and Health*. 20: 135-147.
- Loukola-Ruskeeniemi, K., Kantola, M., Halonen, T., Seppanen, K., Henttonen, P., Kallio, E., Kurki, P. & Savolainen, H., 2003- Mercury-bearing black shales and human Hg intake in eastern Finland: impacts and mechanisms. *Environmental Geology*. 43: 283-297.
- Lu, X. & Zhang, X., 2005- Environmental geochemistry study of arsenic in Western Hunan mining area, P.R. China. *Environmental Geochemistry and Health*. 27: 313-320.
- Mason, B. & Moore, C. B., 1982- Principles of geochemistry. John Wiley and Sons, New York (4th edition), 344 p.
- Mehrabi, B., Yardley, B. W. D. & Cann, J. R., 1999- Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran. *Mineralium Deposita*. 34: 673-696.
- Middelburg, J. J., Weijden, C. V. & Woittiez, J. R. W., 1988- Chemical processes affecting the mobility of major, minor and trace elements during weathering of granitic rocks. *Chemical Geology*. 68: 253-273.
- Modabberi, S., 2004- Environmental geochemistry and trace element anomaly in the Takab area, and their impact on the Zarrineh roud reservoir dam, with special reference to Zarshuran deposit. Ph.D thesis (Unpublished), Shiraz University-Iran, 200 p.

- Modabberi, S., Moore, F., 2004- Environmental geochemistry of Zarshuran Au-As deposit, NW Iran. *Environmental Geology*. 46:796-807.
- Moore, J. N. & Luoma, S. N., 1990- Hazardous wastes from large-scale metal extraction. *Environmental Science and Technology*. 24: 1278-1285.
- Navarro, M. C., Perez-Sirvent, C., Martinez-Sanchez, M. J., Vidal, J., Tovar, P. J. & Bech, J., 2008- Abandoned mine sites as source of contamination by heavy metals: A case study in a semi-arid zone. *Journal of Geochemical Exploration*. 96: 183-193.
- Nesbitt, H. W., 1979- Mobility and fractionation rare earth elements during weathering of granodiorite. *Nature*. 279: 206-210.
- Nesbitt, H. W. & Wilson, R. E., 1992- Recent chemical weathering of basalts. *Journal of Science*. 292: 740-777.
- Nora, F., Scott, S., Schultz, A. P., Ayuso, R. A., Robinson, G. R. & Seal, R. R., 2002- Geochemical, mineralogical, and environmental characteristics of metamorphosed black shales of the central Appalachians, with comparisons to metalliferous shales of the Northern Appalachians. <http://www.appalachianregionscience.usgs.gov>.
- Peng, B., Song, Z., Tu, X., Xiao, M., Wu, F. & Lu, H., 2004- Release of heavy metals during weathering of the Lower Cambrian black shales in Western Hunan, China. *Environmental Geology*. 45: 1137-1147.
- Stocklin, J., 1968- Structural history and tectonic of Iran, a review, *American Association of Petroleum Geology Bulletin*. K52(7): 1229-1258.
- Turekian, S. R. & Wedepohl, K. H., 1961- Distribution of the elements in some major units of the earth crust. *Geological Society of America Bulletin*. 72: 175-192.
- Voicu, G. & Bardoux, M., 2002- Geochemical behavior under tropical weathering of the Barama-Mazaruni greenstone belt at the Omai gold mine, Guiana Shield. *Applied Geochemistry*. 17: 321-336.