

ارزیابی ریسک اکولوژیکی و منشاء فلزات سنگین و آرسنیک در رسوبات سطحی رودخانه خیاو در منطقه زمین گرمایی سبلان، شمال غرب ایران

مهدی شریفی فرد

دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران

عطا شاکری

دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران

بهزاد مهرابی

دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران

تاریخ پذیرش: ۹۶/۷/۲۸ تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۲۴

atashakeri@khu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق عناصر بالقوه سمناک آرسنیک، وانادیم، مس، آنتیموان، سرب و روی در رسوبات سطحی رودخانه خیاو به منظور تعیین سطح آلودگی، منشاء و ارزیابی ریسک اکولوژیکی مورد مطالعه قرار گرفتند. بدین منظور ۱۹ نمونه رسوب سطحی در طول رودخانه خیاو، حد فاصل نیروگاه زمین گرمایی تا مشکین شهر برداشت شد. نتایج فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین انباشت و فاکتور آلودگی براساس مقادیر زمینه عناصر نشان دهنده آلودگی پایین تا متوسط برای عناصر مس، سرب، روی و وانادیم است. آرسنیک و آنتیموان به ترتیب برای ۲۴ و ۱۹ درصد نمونه‌ها آلودگی قابل توجه تا زیاد را نشان دادند. نتایج ارزیابی پتانسیل ریسک اکولوژیکی برای آرسنیک ریسک متوسط را نشان داد. محاسبه شاخص ریسک مجموع عناصر انتخابی، مقدار ریسک پایین را برای رسوبات رودخانه خیاو نشان داد در صورتی که نمونه‌های رسوب چاه زمین گرمایی، چشمه گرمابی قینرجه و نمونه معدن آهن موئیل شاخص ریسک اکولوژیکی بالایی را نشان دادند. تحلیل مولفه اصلی در تایید نتایج فاکتور غنی‌شدگی، نشان می‌دهد که غنی‌شدگی وانادیم، سرب، منگنز و آهن و مولیبیدن تحت تاثیر فعالیت معدنکاری معدن آهن موئیل قرار دارند در حالی که روی و مس تحت تاثیر زمین‌شناسی و خاک شناسی منطقه و منشاء زمین‌زاد دارند. آلودگی آرسنیک در رسوبات سطحی رودخانه خیاو نشانگر منابع مختلفی مانند فعالیت‌های زمین گرمایی، چشمه‌های گرمابی و فعالیت‌های معدنی معدن آهن است. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، پایش مستمر و دقیق عناصر بالقوه سمناک بویژه آرسنیک در آب و رسوب رودخانه خیاو برای ارزیابی ریسک اکولوژیکی و ریسک سلامت انسان ضروری است. همچنین استفاده از داده‌های این پژوهش می‌تواند در تعیین کاربری آب رودخانه خیاو مانند شرب، کشاورزی، پرورش ماهی و گردشگری مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: فلزات سنگین، آرسنیک، ریسک اکولوژیکی، *PCA*، زمین گرمایی، مشکین شهر

مقدمه

سمناک به دلیل تداوم آنها در محیط زیست و همچنین توانایی انتقال و زیست انباشتگری در طول زنجیره غذایی، یکی از آلاینده‌های بسیار خطرناک هستند (Gall et al, 2015). فلزات سنگین مانند سرب، روی، وانادیم، مس، آنتیموان شبه فلزاتی مانند آرسنیک به آسانی در رسوبات جذب شده و با توجه به تجزیه ناپذیری زیستی و سمیت آنها، در صورت بالا رفتن غلظت از حد استاندارد برای موجودات آبی و انسان نگرانی‌هایی را به وجود می‌آورند (Aktar et al, 2010; Aschale et al, 2015). حوضه آبریز خیاو در دامنه شمال غربی کوه سبلان و در منطقه ژئوترمال سبلان قرار دارد (شکل ۱). شواهد فعالیت‌های هیدروترمالی، وجود چشمه های اسیدی دما بالا و اندیس‌های معدنی، فعالیت‌های کشاورزی و گردشگری در محدوده حدفاصل سایت نیروگاه انرژی زمین گرمایی سبلان تا مشکین شهر می‌تواند تاثیر زیادی بر کیفیت رسوبات رودخانه خیاو بویژه از نظر تمرکز عناصر بالقوه سمناک داشته باشد. از اینرو هدف اصلی این تحقیق تعیین منشاء و ارزیابی آلودگی و ریسک اکولوژیکی عناصر آرسنیک، سرب، روی، مس، مولیبیدن، وانادیم و آنتیموان در امتداد رودخانه خیاو از محدوده بالا دست سایت انرژی زمین گرمایی تا شهر مشکین شهر است.

رودخانه‌ها قسمتی از چرخه هیدرولوژی و یکی از منابع اصلی تامین کننده آب برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت هستند. رسوبات رودخانه‌ای از نظر اکولوژیکی بخش مهمی از زیستگاه‌های آبی و محل ذخیره آلاینده‌ها هستند (Singh et al, 2005). رسوب، علاوه بر اینکه شرایط مورد نیاز برای حیات موجودات ریز آبی را فراهم می‌نماید، به عنوان یک منبع بالقوه برای ته‌نشست بسیاری از فلزات سنگین و مواد شیمیایی خطرناک در نظر گرفته می‌شود. بر اساس مطالعات گیبز، سالومون و فورسترنر (Gibbs, 1973; Salomons and Forstner, 1984) تخمین زده شده است که حدود ۳۰ تا ۹۸ درصد از فلزات موجود در آب رودخانه تمایل به تجمع در فاز رسوب را دارند. به همین دلیل پایش آلودگی در رسوب بهتر از آب است. آلودگی آب و رسوب در اثر فرایندهای طبیعی مانند آتشفشان، هوازدگی سنگ‌ها، واکنش آب - سنگ و اختلاط آب‌های هیدروترمالی رخ می‌دهد (Bagul et al, 2015). همچنین فعالیت‌های معدن‌کاری، ذوب فلزات، فاضلاب‌های صنعتی، فعالیت‌های کشاورزی و پساب‌های خانگی از مهمترین منابع آلاینده انسان‌زاد آب و رسوب هستند (Armah et al, 2014). عناصر بالقوه

مواد و روش‌ها

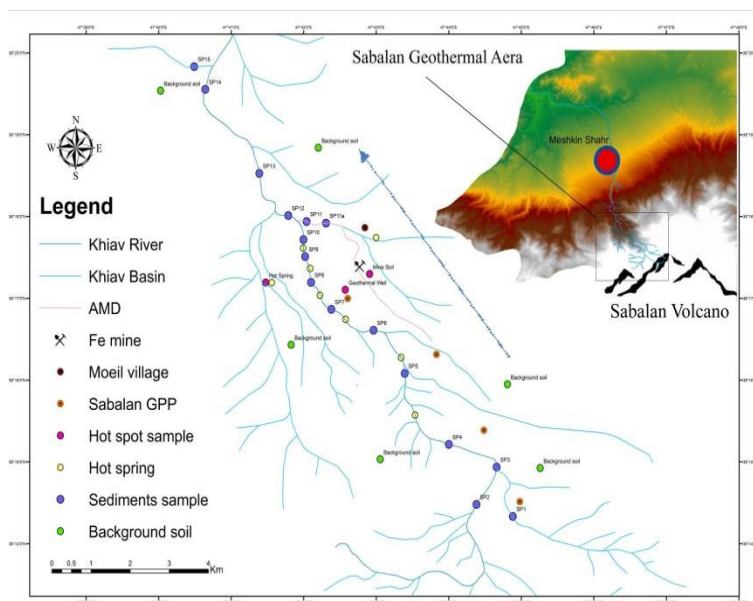
منطقه مورد مطالعه

منطقه زمین‌گرمایی سبلان در محدوده عرض جغرافیایی $38^{\circ} 11'$ و $55'$ و $38^{\circ} 22' 00''$ و طول جغرافیایی $47^{\circ} 38' 30''$ و $47^{\circ} 48'$ در $20''$ کیلومتری شهر اردبیل و 20 کیلومتری جنوب مشکین‌شهر در دامنه شمال غربی کوه آتشفشانی سبلان دومین کوه بلند ایران واقع شده است (شکل ۱). حوضه آبریز خیاوچای در استان اردبیل و در ضلع شرقی مشکین‌شهر از زیرشاخه‌های اصلی رودخانه قره‌سو است. رودخانه اصلی حوضه خیاوچای رودخانه خیاو است که اصلی‌ترین منبع آب شرب شهر مشکین‌شهر است و از ارتفاعات سبلان (هزار میخ، آیقار، دلی آلی و جنوداغ) سرچشمه می‌گیرد و سرتاسر دره موئیل را طی نموده و در آخر به رودخانه قره‌سو از زیرحوضه‌های رودخانه ارس می‌ریزد. کاربری اراضی در حوضه تحت شرب رودخانه خیاو شامل باغات، اراضی متوسط تا خوب کشاورزی (قنوتی و همکاران، ۱۳۹۴)، پرورش ماهی، نیروگاه زمین‌گرمایی و مجتمع‌های آبدرمانی است. علاوه بر وجود تعداد زیادی چشمه آب سرد و گرم اسیدی در حوزه آبریز، ۹ دهنه چشمه معدنی دما بالا در امتداد رودخانه خیاو رخنمون دارند که تعدادی از این چشمه‌ها اسیدی و از نوع آب‌های سولفات - کلریدی هستند (Bogie et al, 2000; Noorollahi and Yousefi, 2003). در سمت شرق رودخانه خیاو، سایت نیروگاه زمین‌گرمایی و روستای موئیل و در غرب آن روستای دیزو واقع شده است. معدن آهن موئیل در بالا دست رودخانه و در مجاورت روستای موئیل قرار دارد. جاده دسترسی به منطقه از سمت مشکین‌شهر تا روستای موئیل (بزرگترین روستا در منطقه زمین‌گرمایی سبلان) آسفالت بوده و از روستای موئیل تا نیروگاه زمین‌گرمایی سبلان دارای جاده خاکی است (شکل ۱). ارتفاع از سطح دریا در منطقه زمین‌گرمایی سبلان از 2000 تا 3500 متر متغیر است که نشان‌دهنده شیب دامنه رشته کوه سبلان و کوه کسرا می‌باشد (Noorollahi and Yousefi, 2005). بارش در منطقه مشکین‌شهر در فصل پاییز و بهار به صورت باران و در

فصل زمستان به صورت برف است. بیشترین بارش در ماه آبان 60 میلی‌متر و کمترین بارش در ماه مرداد کمتر از 5 میلی‌متر در سال 2014 گزارش شده است (سازمان هواشناسی کل کشور، 2014).

زمین‌شناسی منطقه

منطقه مشکین‌شهر عمدتاً پوشیده از گدازه‌ها و همچنین پیروکلاست‌های آتشفشانی حاصل از فعالیت آتشفشان سبلان در دوره ترشیری است. با این حال سنگ‌های دگرگونی از نوع آمفیبول شیت و آهک‌های مرمری در جنوب خاوری مشکین‌شهر احتمالاً کهن‌ترین سازندهای منطقه مشکین‌شهر است (امینی، 1373). منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر توده آتشفشانی سبلان و باتولیت بزغوش قرار دارد (شکل ۲) که با توجه به این امر پوشش سنگی منطقه بیشتر از نوع سنگ‌های آتشفشانی و ساب و لکانیک است (Mousavi, 2013; Shahbazi Shiran and Shafaii, 2016; Moghadam, 2014; Fahim Guilany et al, 2016). سبلان یک آتشفشان از نوع استراتوولکان است و شامل یک ساختار مرکزی که احتمالاً در نتیجه فعالیت‌های تکتونیک و به شکل هورست ایجاد شده است. در طی فعالیت آتشفشانی حجم زیادی از فوران‌های ماگمایی با قطر 12 کیلومترمربع و فرافتادگی 400 متر ایجاد شده است (Bogie et al, 2000). جریان گدازه در سبلان بیشتر از نوع تراکی آندزیت و داسیت با انفجارهای متناوب همراه بوده است (شکل ۲) (Bogie et al, 2000). بر اساس مطالعات سن‌سنجی، سن آتشفشان سبلان $10/5$ میلیون سال پیش بینی شده است (Ghalamghash et al, 2013) محدوده مورد مطالعه از نظر سنگ‌شناسی به چهار رده تقسیم شده است: ۱ - آبرفت‌های کوآرتزری و رسوبات عهد حاضر، ۲ - جریان تراکی آندزیت بعد از تشکیل کالدرای به سن پلیستوسن، گنبدی و لاهارا، ۳ - گنبدی‌های تراکی داسیتی تا تراکی آندزیتی همزمان با تشکیل کالدرای به سن پلیستوسن همراه با جریان گدازه و لاهارا و ۴ - جریان تراکی آندزیتی قبل از تشکیل کالدرای به سن پلیوسن، توف و پیروکلاست (SKM, 1998).



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه، حوضه آبریز خیاو، منابع آلاینده احتمالی و راه‌های دسترسی به منطقه

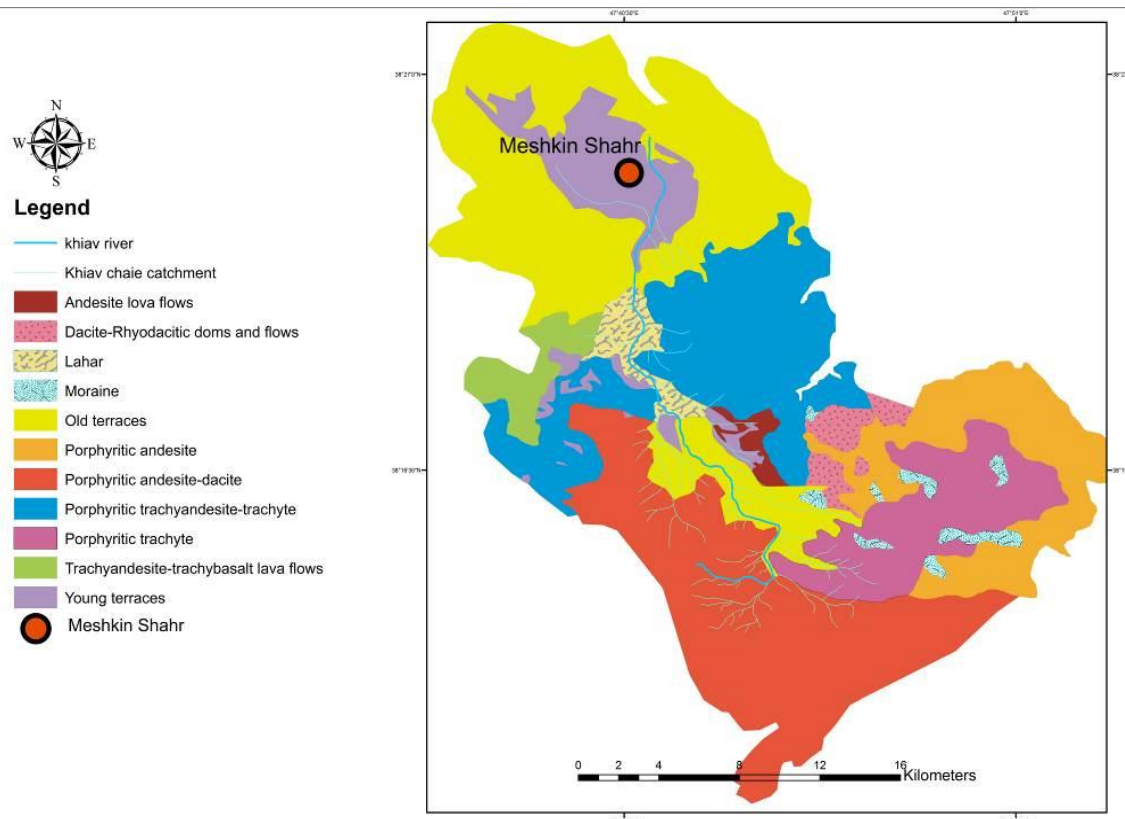
زمین‌شناسی منطقه

منطقه مشکین‌شهر عمدتاً پوشیده از گدازه‌ها و همچنین پیروکلاست‌های آتشفشانی حاصل از فعالیت آتشفشان سبلان در دوره ترشیری است. با این حال سنگ‌های دگرگونی از نوع آمفیبول شیت و آهک‌های مرمری در جنوب خاوری مشکین‌شهر احتمالاً کهن‌ترین سازندهای منطقه مشکین‌شهر است (امینی، ۱۳۷۳). منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر توده آتشفشانی سبلان و باتولیت بزغوش قرار دارد (شکل ۲) که با توجه به این امر پوشش سنگی منطقه بیشتر از نوع سنگ‌های آتشفشانی و ساب‌ولکانیک است (Mousavi, 2013; Shahbazi Shiran and Shafai Moghadam, 2014; Fahim and Guilany et al, 2016). سبلان یک آتشفشان از نوع استراتوولکان است و شامل یک ساختار مرکزی که احتمالاً در نتیجه فعالیت‌های تکتونیکی و به شکل هورست ایجاد شده است. در طی فعالیت آتشفشانی حجم زیادی از فوران‌های ماگمایی با قطر ۱۲ کیلومترمربع و فروافتادگی ۴۰۰ متر ایجاد شده است (Bogie et al, 2000). جریان گدازه در سبلان بیشتر از نوع تراکی آندزیت و داسیت با انفجارهای متناوب همراه بوده است (شکل ۲) (Bogie et al, 2000). بر اساس مطالعات سن‌سنجی، سن آتشفشان سبلان ۱۰/۵ میلیون سال پیش بینی شده است (Ghalamghash et al, 2013) محدوده مورد مطالعه از نظر سنگ‌شناسی به چهار رده تقسیم شده است: ۱ - آبرفت‌های کواترنری و رسوبات عهد حاضر، ۲ - جریان تراکی آندزیت بعد از تشکیل کالدرای به سن پلیستوسن، گنبدها و لاهارا، ۳ - گنبدهای تراکی داسیتی تا تراکی

آندزیتی همزمان با تشکیل کالدرای به سن پلیستوسن همراه با جریان گدازه و لاهارا و ۴ - جریان تراکی آندزیتی قبل از تشکیل کالدرای به سن پلیوسن، توف و پیروکلاست (SKM, 1998).

نمونه برداری و روش های تجزیه ای

در این پژوهش بر اساس کاربری اراضی در حوضه آبریز، زمین‌شناسی منطقه، چشمه‌های گرمایی و مجتمع‌های آبدرمانی، فعالیت‌های زمین‌گرمایی و معدنکاری در منطقه، تعداد ۱۶ نمونه رسوب سطحی در امتداد رودخانه خیاو و به صورت خطی از پایین دست به سمت بالا دست یعنی از شمال رودخانه خیاو به سمت جنوب رودخانه برداشت شد. همچنین ۳ نمونه رسوب از نقاط داغ (رسوب چشمه گرمایی با دمای ۸۴ درجه سلسیوس، رسوب چاه اکتشافی نیروگاه زمین‌گرمایی و معدن آهن روستای موئیل) و ۶ نمونه خاک سازندی از منطقه به عنوان غلظت زمینه برداشت شد (شکل ۱). نمونه‌های رسوب با استفاده از بیلچه پلاستیکی و با دستکش برداشته و در کیسه‌های پلاستیکی زیپ دار جمع‌آوری شدند. سپس در یک محفظه سرد (دمای کمتر از ۴ درجه سانتی‌گراد) نگهداری و بعد از انتقال به آزمایشگاه، در دمای آزمایشگاه خشک و بر اساس استاندارد آماده شد (Becker, 2005). سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه زرازا برای تعیین غلظت فلزات سنگین انتخابی و آرسینک به روش MS - ICP ارسال شدند.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

شاخص‌های تعیین منشاء و آلودگی فلزات سنگین و آرسنیک

برای تعیین منشاء فلزات سنگین و شبه فلزاتی مانند آرسنیک از روش تحلیل مولفه اصلی (Principle Component Analysis) با استفاده از نرم افزار SPSS23 استفاده شد. تحلیل مولفه اصلی از روش‌های چند متغیره است که به طور گسترده در مطالعات آلودگی آب، رسوب و خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Kaiser, 1960; Shakeri et al, 2016; Kukrer et al, 2014; کشاورزی و همکاران، ۱۳۹۲).

شاخص زمین انباشت (I_{geo})

شاخص زمین انباشت روشی برای بررسی آلودگی محیط و همچنین تعیین میزان تاثیر فعالیتهای انسان زاد در آلودگی محیط زیست است و از معادله زیر به دست می‌آید (Abraham and Parker, 2008):

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / 1.5 B_n]$$

در اینجا C_n نشان دهنده غلظت عنصر مورد نظر در رسوب و B_n نشانگر زمینیه آن عنصر در مرجع زمین‌شیمیایی است. شاخص زمین انباشت توسط مولر در سال ۱۹۶۹ ارائه شد. شاخص زمین انباشت به ۷ رده تقسیم می‌شود که در زیر ارائه شده است (Muller, 1969).

I _{geo}	$I_{geo} \leq 0$	غیر آلوده
	$0 < I_{geo} \leq 1$	غیر آلوده تا آلودگی متوسط
	$1 < I_{geo} \leq 2$	آلودگی متوسط
	$2 < I_{geo} \leq 3$	آلودگی متوسط تا زیاد
	$3 < I_{geo} \leq 4$	آلودگی زیاد
	$4 < I_{geo} \leq 5$	آلودگی زیاد تا خیلی زیاد
	$I_{geo} > 5$	آلودگی خیلی زیاد

فاکتور غنی‌شدگی (EF)

فاکتور غنی‌شدگی روشی برای تعیین منشاء عناصر است. (Vald'es et al, 2005; Bastami et al, 2014a, 2014b). براساس تقسیم‌بندی ژانگ و لیو، مقادیر فاکتور غنی‌شدگی کمتر از ۱/۵ نشانگر منشاء زمین‌زاد و مقادیر بالاتر از ۱/۵ نشانگر منشاء مشترک انسان‌زاد و زمین‌زاد می‌باشد و مقادیر بالاتر EF نشانگر شدت بالای منشاء انسان‌زاد است (Zhang and Liu, 2002). در این پژوهش از عنصر اسکاندیم به عنوان عنصر مرجع برای محاسبه فاکتور غنی‌شدگی استفاده شد (Sinex and Wright, 1988).

فاکتور غنی‌شدگی با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید (Lee et al, 1998; Woitke et al, 2003; Chen et al, 2015):

در این معادله C_n غلظت عنصر مورد نظر و C_x غلظت عنصر مرجع (در این پژوهش Sc) است. ساترلند در سال ۲۰۰۰ فاکتور غنی‌شدگی را به ۵ رده از غنی‌شدگی کم تا غنی‌شدگی خیلی زیاد تقسیم کرد. مقادیر غنی‌شدگی بالاتر نشانگر منشاء انسان‌زاد است (Sutherland, 2000).

EF	$EF \leq 2$	غنی‌شدگی کم
	$2 < EF \leq 5$	غنی‌شدگی متوسط
	$5 < EF \leq 20$	غنی‌شدگی قابل توجه
	$20 < EF \leq 40$	غنی‌شدگی زیاد
	$EF > 40$	غنی‌شدگی خیلی زیاد

فاکتور آلودگی (C_f)

فاکتور آلودگی به منظور بررسی میزان آلودگی رسوب به کار می‌رود و از معادله زیر به دست می‌آید (Hakanson, 1980):

$$C_f = C_x / C_b$$

که در این معادله C_x غلظت عنصر مورد نظر در نمونه و C_b غلظت استاندارد عنصر مورد نظر و یا غلظت زمینیه عنصر مورد نظر است. فاکتور آلودگی توسط هاکنسون به چهار رده زیر تقسیم شده است.

C _f	$C_f \leq 1$	آلودگی کم
	$1 < C_f \leq 3$	آلودگی متوسط
	$3 < C_f \leq 6$	آلودگی قابل توجه
	$C_f > 6$	آلودگی خیلی بالا

درجه آلودگی (mC_{ddeg})

شاخص درجه آلودگی از حاصل جمع فاکتور آلودگی عناصر در هر نمونه به دست می‌آید که اولین بار توسط هاکنسون در سال ۱۹۸۰ ارائه شد. ابراهیم در سال ۲۰۰۵ درجه آلودگی اصلاح شده را به جای درجه آلودگی مطرح کرد. درجه آلودگی اصلاح شده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_f^i / n$$

در اینجا C_f فاکتور آلودگی برای آلاینده n ام و n تعداد پارامترهای مورد مطالعه است. طبقه بندی ارزیابی وضعیت آلودگی رسوب بر اساس درجه آلودگی اصلاح شده در زیر ارائه شد است (Abraham, 2005).

mC _d	$mC_d < 1.5$	آلودگی ناچیز تا کم
	$1.5 \leq mC_d < 2$	آلودگی کم
	$2 \leq mC_d < 4$	آلودگی متوسط
	$4 \leq mC_d < 8$	آلودگی زیاد
	$8 \leq mC_d < 16$	آلودگی خیلی زیاد
	$16 \leq mC_d < 32$	آلودگی بسیار زیاد
	$mC_d \geq 32$	به شدت آلوده

شاخص‌های ارزیابی ریسک اکولوژیکی

شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی (PER)

شاخص ریسک اکولوژیکی برای ارزیابی درجه آلودگی فلزات سنگین و ارزیابی همه جانبه پتانسیل ریسک اکولوژیکی هر یک از عناصر در رسوب به کار می‌رود (Hakanson, 1980). پتانسیل ریسک اکولوژیکی از حاصل ضرب فاکتور آلودگی در فاکتور سمیت بیولوژیکی برای هر فلز به دست می‌آید.

$$E_r^i = C_f \times T_r^i$$

در اینجا C_f فاکتور آلودگی و T_r^i فاکتور سمیت بیولوژیکی برای هر عنصر است. مقادیر فاکتور سمیت بیولوژیکی برای عناصر به ترتیب $Cu=Pb=5, Zn=1, As=10, Sb=7$ است. شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی به پنج رده زیر تقسیم می‌شود (Suresh et al, 2015).

نمونه‌های رسوب نشان می‌دهد که غلظت همه عناصر انتخابی بجز سرب از غلظت این عناصر در خاک زمینه منطقه بیشتر است.

همچنین میانگین غلظت عناصر آرسنیک، آهن، گوگرد، منگنز، وانادیم، آنتیموان، و مولیبدن بیشتر از میانگین غلظت عناصر در رسوبات بالادست رودخانه خیاو است. بیشترین غلظت آرسنیک در بین نمونه‌های رسوب رودخانه ای مربوط به نمونه SP11a (۷۵ ppm) و کمترین مقدار آن مربوط به نمونه SP3 (۳/۳ ppm) است. غلظت آرسنیک در سه نمونه نقطه داغ شامل رسوب چشمه گرمایی قینرجه با دمای ۸۴ درجه سلسیوس، رسوب چاه اکتشافی انرژی زمین گرمایی و نمونه خاک معدن آهن موئیل به ترتیب برابر ۳۷۸۳ ppm، ۳۷۰۰۰ ppm و ۱۸۲۰ ppm است که نشانگر غلظت بسیار بالای آرسنیک در این نمونه‌ها است. غلظت بالاتر آرسنیک در نمونه چاه اکتشافی زمین گرمایی می‌تواند به دلیل عمق بالا و تبخیر آب در محل خروج باشد. میانگین غلظت آرسنیک در نمونه های خاک سازندی زمینه ppm ۱۰/۶۵ به دست آمد. مس و روی در بالا دست رودخانه غلظت بیشتری داشتند و به سمت پایین دست رودخانه غلظت این عناصر کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار سرب در نمونه خاک معدن آهن (۴۷ ppm) اندازه‌گیری شد. مقادیر pH در نمونه های رسوب رودخانه خیاو در محدوده ۶ تا ۷ بدست آمد. مقدار pH نمونه SP11 که در پایین دست معدن آهن و دو چشمه اسیدی موئیل و قوتور سویی قرار دارد ۵/۲ بود. نمونه‌های رسوب چشمه آبگرم و چاه اکتشافی انرژی زمین گرمایی کمترین مقادیر pH (۴ تا ۵/۵) را نشان دادند. میانگین غلظت آرسنیک، مس، سرب و روی در این پژوهش با پژوهش‌های دیگر در مناطق دیگر جهان مقایسه شد (شکل ۳). نتایج نشان داد که میانگین غلظت آرسنیک، مس، سرب و روی در رسوبات رودخانه خیاو از میانگین غلظت این عناصر در رودخانه پنینسولاردر مالزی، کارون در ایران و لیاو در چین بیشتر و از میانگین غلظت این عناصر در رودخانه لئان و جین جیانگ کمتر است.

همچنین میانگین غلظت آرسنیک در رسوبات سطحی رودخانه خیاو بیشتر از رودخانه کارون، جین جیانگ و لیاو است.

PER	$E_r^i < 40$	ریسک کم
	$40 \leq E_r^i < 80$	ریسک متوسط
	$80 \leq E_r^i < 160$	ریسک قابل توجه
	$160 \leq E_r^i < 320$	ریسک زیاد
	$E_r^i \geq 320$	ریسک بسیار زیاد

شاخص خطر (RI)

برای محاسبه ریسک اکولوژیکی کل از شاخص ریسک استفاده می‌شود. این شاخص از حاصل جمع شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی هر عنصر در یک نمونه به دست می‌آید (Hakanson, 1980).

$$IR = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

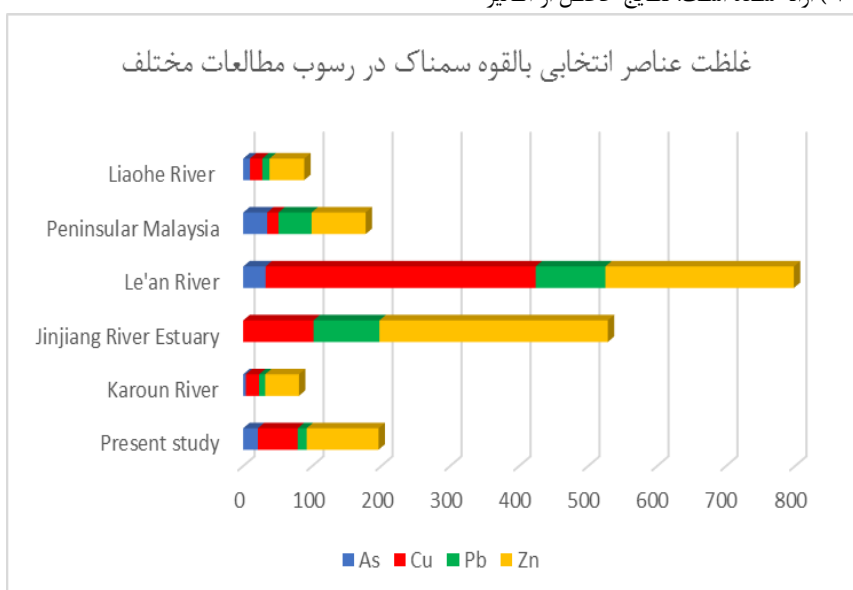
در این معادله E_r^i شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی برای هر یک از عناصر است. شاخص خطر در چهار رده زیر طبقه بندی می‌شود.

RI	$RI < 150$	خطر کم
	$150 \leq RI < 300$	خطر متوسط
	$300 \leq RI < 600$	خطر قابل توجه
	$RI \geq 600$	خطر زیاد

بحث و نتیجه گیری

غلظت کل عناصر بالقوه سمناک در رسوب

مقادیر غلظت کل عناصر آرسنیک، سرب، روی، وانادیم، آنتیموان، مس، گوگرد، آهن، منگنز، اسکاندیم و مولیبدن در نمونه‌های رسوب رودخانه خیاو و مقادیر غلظت این عناصر در زمینه محلی و نقاط داغ به همراه مقادیر میانگین غلظت در پوسته زمین در (جدول ۱) ارائه شده است. نتایج حاصل از آنالیز



شکل ۳. نمودار مقایسه ای غلظت عناصر بالقوه سمناک انتخابی (As, Cu, Pb, Zn) در رسوبات سطحی رودخانه خیاو با مناطق دیگر

جدول ۱. غلظت عناصر انتخابی در نمونه های رسوب رودخانه خیاو و برخی رودخانه های جهان و مقادیر میانگین پوسته زمین (ppm)

Sample.N	As	Cu	Pb	Zn	Fe	S	Mn	V	Se	Sb	Sc	Mo	pH
SP1	۴/۵۰	۸۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱۶۱/۰۰	۳۱۶۳۱/۰۰	۴۹۴/۰۰	۵۸۲/۰۰	۶۵/۰۰	۱۴/۸۱	۰/۵۰	۶/۱۰	۲/۱۰	۶/۳۰
SP2	۳/۸۰	۶۵/۰۰	۱۱/۰۰	۱۰۰/۰۰	۳۸۰۵۷/۰۰	۱۳۳۵/۰۰	۶۸۰/۰۰	۹۱/۰۰	۲۹/۹۸	۰/۸۰	۷/۶۰	۰/۹۰	۶/۱۰
SP3	۳/۳۰	۴۲/۰۰	۱۰/۰۰	۹۰/۰۰	۳۴۰۰۳/۰۰	۱۱۰۳/۰۰	۶۹۳/۰۰	۷۲/۰۰	۶/۶۸	۰/۶۰	۶/۸۰	۱/۳۰	۶/۵۰
SP4	۴/۳۰	۴۴/۰۰	۶/۰۰	۹۷/۰۰	۳۹۱۶۳/۰۰	۱۱۷۷/۰۰	۷۱۸/۰۰	۸۶/۰۰	۱۹/۸۳	۰/۷۰	۷/۳۰	۲/۳۰	۶/۵۰
SP5	۴/۰۰	۶۶/۰۰	۵/۰۰	۹۰/۰۰	۳۹۸۴۰/۰۰	۱۹۹۸/۰۰	۵۶۳/۰۰	۸۹/۰۰	۶/۳۵	۰/۹۰	۷/۸۰	۱/۸۰	۶/۴۰
SP6	۵/۷۰	۴۵/۰۰	۵/۰۰	۸۸/۰۰	۳۸۴۸۶/۰۰	۱۶۸۵/۰۰	۵۸۲/۰۰	۸۱/۰۰	۱۰/۰۵	۰/۸۰	۶/۸۰	۱/۹۰	۶/۴۰
SP7	۱۶/۲۰	۶۶/۰۰	۹/۰۰	۹۴/۰۰	۴۱۲۵۴/۰۰	۳۵۰۳/۰۰	۵۵۷/۰۰	۹۳/۰۰	۸/۹۷	۲/۱۰	۷/۰۰	۲/۲۰	۶/۲۰
SP8	۱۵/۳۰	۷۵/۰۰	۵/۰۰	۱۱۲/۰۰	۴۹۲۲۸/۰۰	۲۸۱۹/۰۰	۶۸۲/۰۰	۱۱۱/۰۰	۴/۶۲	۱/۸۰	۷/۰۰	۲/۵۰	۶/۳۰
SP9	۲۰/۲۰	۴۵/۰۰	۵/۰۰	۱۰۱/۰۰	۴۰۰۸۶/۰۰	۲۴۶۷/۰۰	۶۵۶/۰۰	۸۸/۰۰	۲/۶۱	۲/۰۰	۶/۴۰	۲/۲۰	۶/۶۰
SP10	۵۱/۵۰	۵۶/۰۰	۵/۰۰	۱۱۶/۰۰	۴۶۸۰۹/۰۰	۱۴۸۸/۰۰	۶۶۹/۰۰	۹۳/۰۰	۲/۸۸	۲/۰۰	۶/۵۰	۳/۰۰	۶/۸۰
SP11	۲۹/۷۰	۵۷/۰۰	۲۹/۰۰	۱۳۳/۰۰	۶۳۲۷۸/۰۰	۱۶۶۵/۰۰	۱۱۰۰/۰۰	۱۳۱/۰۰	۲/۲۴	۱/۶۰	۷/۰۰	۴/۱۰	۵/۴۰
SP11-a	۷۵/۰۰	۵۰/۰۰	۴۷/۰۰	۹۸/۰۰	۶۳۵۱۳/۰۰	۲۵۵۷/۰۰	۶۱۸/۰۰	۱۰۸/۰۰	۱/۲۳	۰/۱۰	۷/۹۰	۳/۶۰	۵/۸۰
SP12	۴۰/۶۰	۵۳/۰۰	۶/۰۰	۱۲۲/۰۰	۵۸۲۸۱/۰۰	۱۸۵۹/۰۰	۱۰۷۷/۰۰	۱۰۳/۰۰	۸/۷۵	۱/۶۰	۶/۹۰	۴/۲۰	۶/۱۰
SP13	۳۸/۷۰	۴۹/۰۰	۱۳/۰۰	۱۰۲/۰۰	۴۴۵۲۸/۰۰	۱۷۹۱/۰۰	۸۰۷/۰۰	۱۱۱/۰۰	۰/۲۰	۱/۸۰	۸/۰۰	۳/۷۰	۶/۴۰
SP14	۱۸/۱۰	۶۲/۰۰	۲۵/۰۰	۹۹/۰۰	۴۶۵۳۶/۰۰	۶۰۳۲/۰۰	۶۳۰/۰۰	۱۰۲/۰۰	۲/۸۵	۱/۶۰	۶/۱۰	۳/۲۰	۸/۷۰
SP15	۹/۰۰	۶۷/۰۰	۱۹/۰۰	۶۴/۰۰	۲۸۱۲۳/۰۰	۱۷۵/۰۰	۴۳۲/۰۰	۵۵/۰۰	۱/۳۶	۰/۲۰	۴/۸۰	۱/۷۰	۸/۸۰
Mean	۲۱/۲۴	۵۷/۶۳	۱۳/۱۳	۱۰۴/۱۹	۴۳۹۲۶/۰۰	۲۰۰۹/۲۵	۶۹۰/۳۸	۹۲/۴۴	۷/۷۱	۱/۱۹	۶/۸۸	۲/۵۴	۶/۵۸
Hot spring	۳۷۸۳/۶۰	۳۸/۰۰	۱۲/۰۰	۷۲/۰۰	۵۲۵۸۱/۰۰	۵۲۴۳/۰۰	۱۳۵۷/۰۰	۶۳/۰۰	۱/۲۷	۴۴/۰۰	۶/۱۰	۰/۶۰	۹/۰۰
Geothermal well	۳۷۰۰۰/۰۰	۷/۰۰	۱۲/۰۰	۱۳۳/۰۰	>۱۰٪	۸۸۸/۰۰	۱۷۵/۰۰	۶/۰۰	<۰.۵	۹/۰۰	۰/۷۰	۰/۹۰	۸/۱۰
Fe-mine	۱۸۲۰/۰۰	۶/۰۰	۴۷/۰۰	۹۳/۰۰	>۱۰٪	۱۰۸۵۸/۰۰	۴۱/۰۰	۲۹۰/۰۰	<۰.۵	۰/۹۰	۱/۵۰	۶/۳۰	۴/۲۰
Local soil Background	۱۰/۶۵	۵۱/۰۰	۳۸/۰۰	۷۷/۵۰	۳۴۹۹۶/۰۰	۲۹۹/۵۰	۵۴۰/۰۰	۷۲/۵۰	۰/۸۶	۰/۶۰	۶/۹۰	۱/۲۵	۸/۰۰
Sediment Background	۳/۹۸	۵۷/۷۵	۹/۲۵	۱۱۲/۰۰	۲۶۵۳۸/۸۰	۱۲۲۱/۴۰	۶۴۷/۲۰	۸۰/۶۰	۱۵/۵۳	۰/۷۰	۷/۱۲	۱/۶۸	۶/۳۵
Crustal average ^a	۱/۸۰	۵۵/۰۰	۱۴/۰۰	۷۰/۰۰	-	-	۹۰۰/۰۰	۱۳۵/۰۰	۰/۰۵	۰/۲۰	۱۱/۰۰	۱/۵۰	
Karoun River	۳/۸۵	۱۹/۱۳	۸/۸۱	۴۸/۹۹	راست منش و همکاران، ۱۳۹۴								
Jinjiang River Estuary	-	۱۰۲	۹۵/۵	۳۳۱	Yu et al, 2017								
Liaohu River	۹/۸	۱۷/۸۲	۱۰/۵۷	۵۰/۲۸	Ke et al, 2017								
Le'an River	۳۲/۴۵	۳۹/۱۵	۱۰۰/۹۴	۲۷۳/۲۹	Chen et al, 2016								
Peninsular Malaysia	۳۴/۸۲	۱۶/۳۶	۴۷/۸۷	۷۸/۴۱	Cheng and Yap, 2015								

^a Mason and Moore, 1982; Reimann and Caritat, 1998

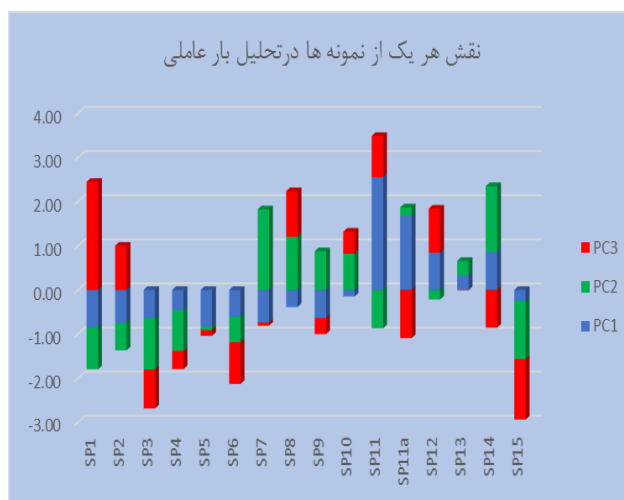
در مولفه دوم (PC2) دارند؛ که با توجه به تاثیر ایستگاه ها و همچنین همراهی آرسنیک با گوگرد که اغلب چشمه های گرمایی اسیدی موجود در منطقه حاوی گوگرد بالایی هستند؛ به احتمال زیاد منشأ این عناصر مربوط به فعالیت های ژئوترمالی و وجود چشمه های اسیدی دما بالا در امتداد رودخانه خیاو است. عنصر آرسنیک دو منشأ را نشان می دهد که با توجه به نتایج غلظت عناصر در نمونه های چشمه آبگرم قینرجه، چاه اکتشافی زمین گرمایی و خاک زمینه معدن آهن موئیل (جدول ۱) می توان نتیجه گرفت که آرسنیک هم از طریق فعالیت های معدنی و هم از طریق چشمه های گرمایی و فعالیت های زمین گرمایی وارد رودخانه خیاو می شود. مولفه سوم (PC3) فاکتور وزنی مثبت بالای عناصر مس و روی را نشان می دهند. ایستگاه های SP1، SP2، SP8، SP11، بیشترین تاثیر را در این مولفه دارد. با توجه به تمرکز این دو عنصر در رسوب و نتایج فاکتور غنی شدگی می توان نتیجه گرفت که منشأ زمین زاد دارند.

تحلیل مولفه اصلی

برای تحلیل مولفه اصلی علاوه بر عناصر بالقوه سمناک انتخابی، عناصر آهن، منگنز، گوگرد، مولیبدن و اسکاندیم نیز مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بدست آمده از PCA، سه مولفه با واریانس کل ۸۱ درصد را نشان داد (جدول ۲). در مولفه اول (PC1) عناصر مولیبدن، آهن، منگنز، وانادیم، سرب و آرسنیک فاکتور وزنی مثبت بالایی را نشان دادند که نشانگر منشأ یکسان برای این عناصر است. ایستگاه های SP11، SP11a، SP14، SP12، بیشترین تاثیر را در بار عاملی PC1 دارند و چون همه نمونه ها در پایین دست معدن آهن و تحت تاثیر زهاب اسیدی معدن است به احتمال زیاد منشأ این عناصر فعالیت معدن آهن موئیل و اندیس های معدنی باشد. مولفه دوم (PC2) فاکتور وزنی مثبت بالای عناصر آنتیموان و گوگرد و متوسط تا خوب آرسنیک را نشان می دهد. نتایج حاصل از تاثیر هر یک از ایستگاه ها در بار عاملی (شکل ۴) نشان می دهد که ایستگاه های SP14، SP10، SP9، SP8، SP7، بیشترین تاثیر را

جدول ۲. تحلیل مولفه اصلی برای فلزات سنگین و آرسنیک در رسوبات سطحی رودخانه خیاو

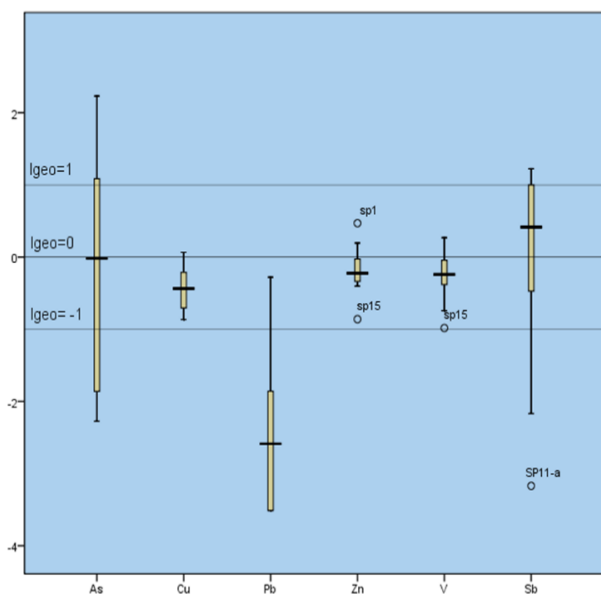
	Rotated Component Matrix		
	PC1	PC2	PC3
Mo	۰/۸۹	۰/۳۰	۰/۰۳
Fe	۰/۸۸	۰/۳۰	-۰/۰۱
Mn	۰/۷۹	-۰/۱۰	۰/۱۲
V	۰/۷۶	۰/۴۴	۰/۰۵
Pb	۰/۷۱	-۰/۱۴	۰/۰۵
As	۰/۷۰	۰/۶۳	-۰/۲۲
Sb	۰/۱۷	۰/۸۴	۰/۰۶
S	۰/۱۰	۰/۷۸	۰/۰۰
Sc	۰/۳۷	۰/۱۴	-۰/۱۹
Cu	-۰/۲۴	۰/۱۰	۰/۸۲
Zn	۰/۴۱	-۰/۰۵	۰/۷۷
Se	-۰/۱۸	۰/۱۰	۰/۶۲



شکل ۴. تاثیر هر یک از نمونه‌ها در تحلیل بار عاملی

ارزیابی آلودگی رسوبات

شکل ۵. شاخص زمین‌انباشت فلزات سنگین و آرسنیک در رسوبات سطحی رودخانه خیاو



برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در رسوب از شاخص زمین‌انباشت، فاکتور غنی‌شدگی، فاکتور آلودگی و درجه آلودگی اصلاح شده استفاده شد.

شاخص زمین‌انباشت (Igeo)

نتایج شاخص زمین‌انباشت در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج به دست آمده از شاخص زمین‌انباشت نشان می‌دهد که مس، روی، وانادیم و سرب در محدوده غیر آلوده تا آلودگی کم و آرسنیک در محدوده آلودگی کم تا زیاد قرار دارد. آنتیموان بیشترین میانگین شاخص زمین‌انباشت را نشان می‌دهد. مقادیر میانگین آرسنیک، سرب، روی، مس و وانادیم کمتر از صفر است. نرخ شاخص زمین‌انباشت آرسنیک در محدوده ۲ تا -۲ قرار دارد که نشانگر تغییر غلظت آرسنیک در نمونه‌های رسوب است و میزان انباشت آرسنیک در پایین دست رودخانه خیاو بیشتر از بالادست رودخانه است. با توجه به نمودار، مقادیر میانگین شاخص زمین‌انباشت به ترتیب $Sb > As > Zn > V > Cu > Pb$ است. مقدار شاخص زمین‌انباشت برای عنصر آرسنیک در نمونه‌های رسوب چاه زمین گرمایی، چشمه آبگرم قینرجه و معدن آهن موئیل به ترتیب ۱۱/۱۸، ۷/۸۹ و ۶/۸۳ به دست آمد که برای هر سه نمونه در محدوده آلودگی خیلی زیاد قرار می‌گیرند (جدول ۴).

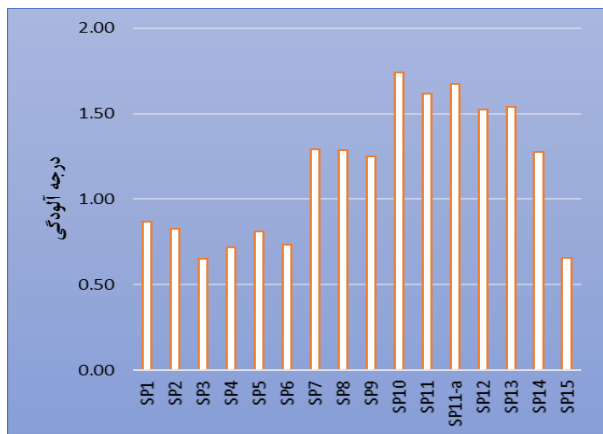
فاکتور غنی‌شدگی (EF)

جدول ۳. فاکتور آلودگی فلزات سنگین و آرسنیک در رسوبات سطحی رودخانه خیاو (بر حسب درصد)

Sb	V	As	Cu	Pb	Zn	CF (%)
۱۸/۷۵	۱۸/۷۵	۴۳/۷۵	۳۷/۵۰	۹۳/۷۵	۶/۲۵	آلودگی کم
۶۲/۵۰	۸۱/۲۵	۳۱/۲۵	۶۲/۵۰	۶/۲۵	۹۳/۷۵	آلودگی متوسط
۱۸/۷۵	۰/۰۰	۱۸/۷۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	آلودگی قابل توجه
۰/۰۰	۰/۰۰	۶/۲۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	آلودگی زیاد

درجه آلودگی اصلاح شده (mC_{deg})

با توجه به نتایج به دست آمده از شاخص درجه آلودگی (شکل ۷)، نمونه‌های SP10 و SP11a در محدوده آلودگی متوسط قرار داشتند. بقیه نمونه‌ها آلودگی ناچیز و غیر آلوده نشان دادند. بیشترین درجه آلودگی مربوط به نمونه SP10 (۱/۷۲) و کمترین درجه آلودگی مربوط به نمونه SP15 (۰/۶۵) مشاهده شد.



شکل ۷. نمودار درجه آلودگی اصلاح شده در رسوبات سطحی رودخانه خیاو

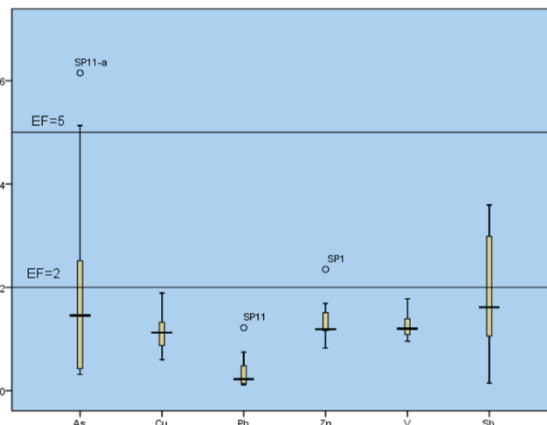
جدول ۴. مقادیر شاخص زمین‌انباشت، فاکتور غنی‌شدگی، فاکتور آلودگی و پتانسیل ریسک اکولوژیکی نمونه‌های رسوب چاه اکتشافی ژئوترمال، چشمه آبگرم قینرجه و معدن آهن موئیل و میانگین رسوبات سطحی رودخانه خیاو

چشمه آبگرم قینرجه	معدن آهن موئیل	چاه اکتشافی ژئوترمال	میانگین رسوبات سطحی رودخانه خیاو
Igeo	۷/۸۹	۶/۸۳	۱۱/۱۸
EF	۴۰۱/۸۶	۷۸۶/۱۰	۳۴۲۴۵/۴۷
C_f	۳۵۵/۲۷	۱۷۰/۸۹	۳۴۷۴/۱۸
PER	۳۵۵۲/۶۸	۱۷۰۸/۹۲	۳۴۷۴۱/۷۸

پتانسیل ریسک اکولوژیکی (PER)

پتانسیل ریسک اکولوژیکی شاخصی برای ارزیابی ریسک اکولوژیکی برای هر عنصر بالقوه سمناک در رسوب است که از ضرب فاکتور آلودگی به فاکتور سمیت بیولوژیکی هر عنصر به دست می‌آید. مقادیر شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقادیر پتانسیل ریسک اکولوژیکی همه عناصر بجز آرسنیک در دو نمونه SP10 و SP11a ($PER > 40$) در محدوده ریسک کم (< 40) قرار دارند. مقادیر پتانسیل ریسک اکولوژیکی آرسنیک برای سه نمونه چاه اکتشافی ژئوترمال، معدن آهن موئیل و چشمه آبگرم قینرجه در محدوده آلودگی بسیار

برای برآورد تاثیر فعالیتهای انسان زاد بر آلودگی رسوبات رودخانه خیاو از فاکتور غنی‌شدگی استفاده شد. نتایج فاکتور غنی‌شدگی در (شکل ۶) ارائه شده است. نتایج به دست آمده از فاکتور غنی‌شدگی برپایه خاک زمینه منطقه نشان داد که آرسنیک غنی‌شدگی متوسط تا قابل توجه دارد. نرخ غنی‌شدگی آنتیموان در محدوده آلودگی کم تا متوسط قرار داشت. غنی‌شدگی آرسنیک می‌تواند ناشی از فعالیتهای معدن آهن موئیل، چشمه‌های گرمایی و مجتمع‌های آبدرمانی و یا فعالیتهای زمین گرمایی باشد. غنی‌شدگی آنتیموان از بالا دست رودخانه خیاو به سمت پایین دست افزایش می‌یابد و در پایین دست رودخانه غنی‌شدگی متوسط نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از ورود چشمه‌های گرمایی اسیدی به رودخانه خیاو باشد. سرب، روی، مس و وانادیم غنی‌شدگی کم نشان دادند. بر اساس طبقه‌بندی ژانگ و لیو سرب، روی، وانادیم و مس منشاء زمین زاد و آرسنیک و آنتیموان منشاء انسان زاد دارن (Zhang and Liu, 2002). میانگین غنی‌شدگی عناصر به ترتیب $Sb > As > Zn > V > Cu > Pb$ است. آرسنیک در نمونه‌های رسوب چاه اکتشافی ژئوترمال، چشمه آبگرم و معدن آهن موئیل به ترتیب فاکتور غنی‌شدگی $۳۴۲۴۵/۴۷$ ، $۷۸۶/۱۰$ و $۴۰۱/۸۶$ را نشان می‌دهد. مقادیر فاکتور غنی‌شدگی آرسنیک در هر سه نمونه رسوب بر اساس خاک سازندی زمینه در محدوده غنی‌شدگی زیاد قرار دارند که بالاتر از میانگین غنی‌شدگی آرسنیک در نمونه‌های رسوب سطحی رودخانه خیاو (۱/۹۱) است (جدول ۴).



شکل ۶. فاکتور غنی‌شدگی فلزات سنگین و آرسنیک در رسوبات سطحی رودخانه خیاو

فاکتور آلودگی (C_f)

فاکتور آلودگی شاخصی برای سنجش میزان آلودگی رسوب است. نتایج فاکتور آلودگی بر حسب درصد در (جدول ۳) ارائه شده است. آرسنیک در ۲۵ درصد از نمونه‌ها آلودگی قابل توجه تا زیاد نشان داد. مس، وانادیم، سرب و روی آلودگی کم تا متوسط نشان دادند. وانادیم و روی به ترتیب در ۸۱/۲۵ و ۹۳/۷۵ درصد از نمونه آلودگی متوسط نشان دادند. آنتیموان در ۱۸/۷۵ درصد از نمونه‌ها آلودگی قابل توجه نشان داد. آرسنیک در نمونه‌های رسوب چاه اکتشافی زمین گرمایی، چشمه آبگرم قینرجه و معدن آهن موئیل به ترتیب فاکتور آلودگی $۳۴۷۴/۱۸$ ، $۱۷۰/۸۹$ و $۴۰۱/۸۶$ را نشان می‌دهد که در مقایسه با میانگین فاکتور آلودگی رسوبات سطحی رودخانه خیاو (۱/۹۹) بسیار بالاتر است (جدول ۴).

نتیجه گیری

در این تحقیق عناصر آرسنیک، مس، سرب، روی، وانادیم و آنتیمون به منظور تعیین منشأ آلودگی و ارزیابی ریسک اکولوژیک در رسوبات سطحی رودخانه خیاو مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج میانگین شاخص زمین انباشت، فاکتور آلودگی و فاکتور غنی‌شدگی آلودگی کم تا متوسط را برای عناصر انتخابی نشان دادند. آنتیمون در ۱۹ درصد از نمونه‌ها آلودگی قابل توجه و آرسنیک برای ۲۵ درصد از نمونه‌ها آلودگی قابل توجه تا زیاد نشان دادند. شاخص درجه آلودگی اصلاح شده برای نمونه‌های پایین دست رودخانه، نشان دهنده آلودگی متوسط رسوبات است. نتایج ارزیابی ریسک اکولوژیک نشان دهنده افزایش این شاخص به سمت پایین دست رودخانه است. آرسنیک در ایستگاه‌های SP11a، SP10 پتانسیل ریسک اکولوژیک متوسط نشان داد. نتایج شاخص زمین انباشت، فاکتور غنی‌شدگی و فاکتور آلودگی در نمونه‌های رسوب چاه اکتشافی زمین گرمایی، چشمه آبگرم فینرجه و معدن آهن موئیل نشان دهنده آلودگی خیلی زیاد آرسنیک در این رسوبات و نقش مهم فعالیت‌های معدنی، چشمه‌های گرمایی و فعالیت‌های هیدروترمالی در افزایش غلظت آرسنیک و دیگر عناصر در رسوبات رودخانه خیاو است. نتایج تحلیل مولفه اصلی در تایید فاکتور غنی‌شدگی و شاخص زمین انباشت نشان داد که مس و روی منشأ زمین زاد دارند و افزایش غلظت آنتیمون بیشتر تحت تاثیر چشمه‌های گرمایی و فعالیت‌های زمین گرمایی است. عناصر سرب، وانادیم و آهن و منگنز در رسوبات بیشتر تحت تاثیر معدن آهن موئیل قرار دارند. آرسنیک دو منشأ (فعالیت‌های معدنی و چشمه‌های گرمایی) را در رسوبات نشان داد. اگرچه این مطالعه سهم مهمی در تعیین منشأ آلودگی و ریسک اکولوژیک فلزات سنگین و آرسنیک دارد، اما به دلیل افزایش فعالیت‌های انسانی بخصوص صنعت گردشگری در امتداد رودخانه خیاو و همچنین احداث نیروگاه زمین گرمایی در بالادست، پایش مستمر غلظت فلزات سنگین و آرسنیک در آب و رسوب رودخانه خیاو می‌تواند در شناسایی دقیق‌تر منابع آلاینده و کنترل آلاینده‌ها در آینده کمک نماید. با توجه به نوع نمونه‌برداری از رسوبات رودخانه خیاو (نمونه برداری خطی از پایین دست رودخانه به سمت بالادست رودخانه) می‌توان از نتایج این پژوهش در مکان‌یابی مناسب برای تعیین مخازن آب شرب مشکین شهر و روستاهای اطراف به منظور جلوگیری از ورود آلاینده‌های خطرناک به ویژه آرسنیک به آب استفاده کرد.

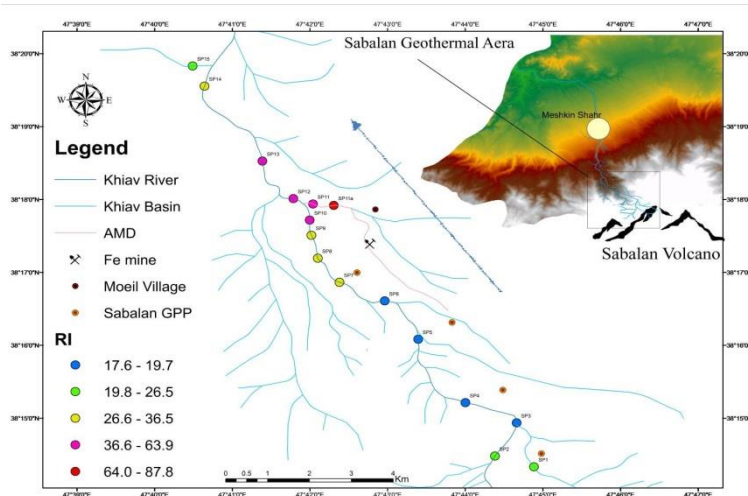
زیاد ($PER < 320$) قرار دارد که نسبت به میانگین پتانسیل ریسک اکولوژیک آرسنیک در نمونه‌های رسوب سطحی رودخانه خیاو بسیار بیشتر است (جدول ۴).

جدول ۵. مقادیر پتانسیل ریسک اکولوژیک برای هر عنصر در رسوبات سطحی رودخانه خیاو

	PER					RI
	As	Cu	Pb	Sb	Zn	
SP1	۴/۳۳	۷/۸۴	۱/۳۲	۵/۸۳	۲/۰۸	۲۱/۳۰
SP2	۳/۵۷	۶/۳۷	۱/۴۵	۹/۳۳	۱/۲۹	۲۲/۰۱
SP3	۳/۱۰	۴/۱۲	۱/۳۲	۷/۰۰	۱/۱۶	۱۶/۶۹
SP4	۴/۰۴	۴/۳۱	۰/۷۹	۸/۱۷	۱/۲۵	۱۸/۵۶
SP5	۳/۷۶	۶/۴۷	۰/۶۶	۱۰/۵۰	۱/۱۶	۲۲/۵۵
SP6	۵/۳۵	۴/۴۱	۰/۶۶	۹/۳۳	۱/۱۴	۲۰/۸۹
SP7	۱۵/۲۱	۶/۴۷	۱/۱۸	۲۴/۵۰	۱/۲۱	۴۸/۵۸
SP8	۱۴/۳۷	۷/۳۵	۰/۶۶	۲۱/۰۰	۱/۴۵	۴۴/۸۲
SP9	۱۸/۹۷	۴/۴۱	۰/۶۶	۲۳/۳۳	۱/۳۰	۴۸/۶۷
SP10	۴۸/۳۶	۵/۴۹	۰/۶۶	۲۳/۳۳	۱/۵۰	۷۹/۳۴
SP11	۲۷/۸۹	۵/۵۹	۶/۱۸	۱۸/۶۷	۱/۷۲	۶۰/۰۴
SP11a	۷۰/۴۲	۴/۹۰	۳/۸۲	۱/۱۷	۱/۲۶	۸۱/۵۷
SP12	۳۸/۱۲	۵/۲۰	۰/۷۹	۱۸/۶۷	۱/۵۷	۶۴/۳۵
SP13	۳۶/۳۴	۴/۸۰	۱/۷۱	۲۱/۰۰	۱/۳۲	۶۵/۱۷
SP14	۱۷/۰۰	۶/۰۸	۳/۲۹	۱۸/۶۷	۱/۲۸	۴۶/۳۱
SP15	۸/۴۵	۶/۵۷	۲/۵۰	۲/۳۳	۰/۸۳	۲۰/۶۸

شاخص ریسک (RI)

به منظور ارزیابی ریسک اکولوژیک کل از شاخص ریسک خطر استفاده و نتایج آن در (شکل ۸) ارائه شد. نتایج به دست آمده از شاخص ریسک نشان داد که نمونه SP11a بیشترین ریسک اکولوژیک را دارد که تحت تاثیر زهاب اسیدی معدن و چشمه‌های آبگرم قوتورسویی و موئیل قرار دارد. همچنین مقادیر شاخص ریسک در نمونه‌های SP10 تا SP13 از بقیه نمونه بیشتر بود. مقادیر شاخص ریسک برای همه نمونه‌ها در محدوده ریسک کم ($RI < 150$) قرار دارد.



شکل ۸. مقادیر شاخص ریسک در رسوبات سطحی رودخانه خیاو

منابع

- امینی، ب. ۱۳۷۳، نقشه زمین‌شناسی مشکین شهر در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- پورتال سازمان هواشناسی کل کشور، آمار بارش و دمای ماهیانه در سال ۲۰۱۴، <http://WWW.irimo.ir/far/wd/2703>.
- راست منش. ف.، زراسوندی. ع.، مسلم. ف.، ۱۳۹۴، ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات سطحی رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، پاییز ۹۴، شماره ۱۷، ص ۱۱-۲۲.
- قنواتی. ع.، بابایی اقدم. ف.، همتی. ط.، رحیمی. م.، ۱۳۹۴، پهنه بندی پتانسیل سیل گیری از مدل منطق فازی در محیط GIS، مورد مطالعاتی حوضه رودخانه خیاو چایی مشکین‌شهر، هیدرولوژی، شماره ۳، تابستان ۱۳۹۴، ص ۱۲۱ تا ۱۳۵.
- کشاورزی. ب.، ابراهیمی. پ.، مر. ف.، حمزه. م.، ۱۳۹۲، زمین‌شیمی و توزیع فلزات سنگین در رسوبات ساحلی و دریایی خلیج چابهار، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، بهار ۱۳۹۲، شماره ۷، ص ۷۴ - ۸۱.
- Abraham .G.M.S., 2005, Holocene sediments of Tamaki Estuary, Characterization and impact of recent hum an activity on an urban estuary in Auckland, New Zealand. Ph.D, thesis, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 361p.
- Abraham. G.M.S., Parker. R.J., 2008, Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. Environ. Monit. Assess, 136, 227-238.
- <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-007-9678-2>.
- Armah. F.A., Quansah, R., Luginaah. I., 2014, Int. Scholarly Res, Notices, 1- 37.
- Aschale. M., Yilma. S., Mary. K., Dereje. H., 2015, Potentially toxic trace element contamination of the Little Akaki River of Addis Ababa Ethiopia, J. Nat. Sci. Res.5,1, 13.
- Aktar. M., Paramasiva. M., Anguly. M., Purka. S. Sengupta. M., 2010, Assessment and occurrence of various heavy metals in surface water of Ganga River around Kolkata: a study for toxicity and ecological impact, Environ. Monit. Assess, 160, 207-213.
- Bagul. V.R., Shinde. D.N., Chavan. R.P., Patil. C.L., Pawar. R.K., 2015, New perspective on heavy metal pollution of water, J. Chem. Pharma. Res, 7(12): 700-705, ISSN : 0975-7384 CODEN(USA) : JCPRC5.
- Bastami. K.D., Bagheri. H., Kheirabadi. V., Zaferani. G.G., Teymori. M.B., Hamzehpoor. A., Soltani. F., Haghparast. S., Harami. S.R., Ghorghani. N.F., Ganji. S., 2014a, Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments along southeast coast of the Caspian Sea, Mar, Pollut, Bull, 81 (1), 262-267.
- Bastami. K.D., Taheri. M., Bagheri. H., Foshtomi. M.Y., Ganji. S., Haghparast. S., Soltani. F., Hamzehpoor. A., Karimi. B., 2014b, Response of sediment-dwelling annelida community in relation to geochemical parameters in the Gorgan Bay, Caspian Sea. Int. J. Environ. Sci, Technol. 11, 2025-2026.
- Becker. J.S., 2005, Trace and Ultra-trace Analysis in Liquids by Atomic Spectrometry, Trends in Analytical Chemistry 24 (3): 243-54.
- Bogie. I., Cartwright. A.J., Khosrawi. K., Talebi. B., Sahabi. F., 2000. The Meshkin Shahr geothermal prospect, Iran, Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, 997-1002.
- Chen. H., Chen. R., Teng. Y., Wu. J., 2016, Contamination characteristics, ecological risk and source identification of trace metals in sediments of the Le'an River (China), Ecotoxicology and Environmental Safety 125 (2016) 85-92.
- Chen. H.Y., Teng. Y.G., L. S.J., W. Y.Y., W. J.S., 2015, Contamination features and health risk of soil heavy metals in China. Sci, Total Environ. 512-523, 143-1561.
- Cheng. V. H., Yap. C. K., 2015, Potential human health risks from toxic metals via mangrove snail consumption and their ecological risk assessments in the habitat sediment from Peninsular Malaysia, Chemosphere 135 (2015) 156-165
- Fahim Guilany. R., Darvishzadeh. A. and Sheikhzakariaee. S.J., 2016, The Nuée Ardentes of Sabalan Volcano in Iran, Open Journal of Geology, 6, 1553-1566, <http://dx.doi.org/10.4236/ojg.2016.612110>
- Gall. J.E., Boyd. R.S., Rajakaruna. N., 2015, Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: a review, Environ. Monit. Assess. 187, 201.
- Gibbs. R. J., 1973, Mechanisms of trace metal transport in rivers, Science 180, 71-73.
- Hakanson. L., 1980, An ecological risk index aquatic pollution control, A sedimentological approach, Water Res, 14, 975-1001.
- Kaiser. HF., 1960, The application of electronic computers to factor analysis, Edu Psychol Meas. 20:141-151.
- Ke. X., Gui. S., Huang. H., Zhang. H., Wang. C., Guo. W., 2017, Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China, Chemosphere, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.02.029.
- Kukrer. S., Seker., S, Tugba. Abacı. Z et al., (2014) Ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of northern littoral zone of Lake Cildir, Ardahan, Turkey. Environ Monit Assess. 186:3847-3857.
- Lee. C.L., Fang. M.D., Hsieh. M.T., 1998, Characterization and distribution of metals in surficial sediments in Southwestern Taiwan, Mar, Pollut, Bull. 36, 464-471.
- Mason, B., and Moore, C., 1982, Principles of Geochemistry, Wiley, New York.
- Mousavi. S.Z., 2013, Volcanology and Petrology of Sabalan Volcano, North West of Iran, Ph.D, Dissertation, Department of Geology of Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran.
- Muller. G., 1969, Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River, GeoJournal 2, 108-118.

- Noorollahi. Y., Yousefi. H., 2005, Monitoring of surface and ground water quality in geothermal exploration drilling of Meshkinshahr geothermal field, NW-Iran, Proceeding of World Geothermal Congress (WGC 2005), Turkey, Antalya, pp. 1-11.
- Noorollahi. Y., and Yousefi. H., 2003, Preliminary environmental impact assessment of a geothermal project in Meshkinshahr, NW-Iran, Proceedings of the International Geothermal Conference IGC 2003, Reykjavík, S12 1-11.
- Reimann. C., de Caritat. P., 1998 Chemical elements in the environment— factsheets for the geochemist and environmental scientist, Berlin, Germany7 Springer-Verlag; ISBN 3-540-63670-6.
- Rudnick. RL., Fountain. DM., 1995, Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective, *Rev Geophys* Richmond Va Then Wash. 33:267
- Salomons. W., Forstner. V., 1984, *Metals in the Hydro-Cycle*. Berlin, Springer.
- Shahbazi Shiran. H., Shafaii Moghadam. H., 2014 Geochemistry and Petrogenesis of the Sabalan Plio-Quaternary Volcanic Rocks: Implication for Post-Collisional Magmatism, *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 22, 57-68.
- Shakeri, A., Shakeri, R., Mehrabi, B., 2016, *Environ Earth Sci*, 75: 679. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5461-4>.
- Sinex. S., Wright. D., 1988, Distribution of trace metals in the sediments and biota of Chesapeake Bay, Mar, *Pollut. Bull.* 19, 425-431.
- Singh, KP., Mohan, D., Singh, VK., Malik, A., 2005, Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments-a tributary of the Ganges, India. *Journal of Hydrology (Amst)*. 312:14-27. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.01.021
- SKM. 1998, Sabalan geothermal project, Stage 1: surface exploration, final exploration report, Sinclair Knight Merz Ltd., report 2505-RPT-GE-003 to the Renewable Energy Organization of Iran, Tehran, 83P.
- Sutherland. R.A., 2000, Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii, *Environ Geol*, 39: 611-627.
- Yu. R., Hu. G., Lin. C., Yang. Q., Zhang. C., Wang. X., Contamination of heavy metals and isotopic tracing of Pb in intertidal surface sediments of Jinjiang River Estuary, SE China, *Applied Geochemistry* (2017), doi: 10.1016/j.apgeochem.2016.12.025.
- Vald'es. J., Vargas. G., Sifeddine. A., Ortieb. L., Guinez. M., 2005, Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones Bay (23 °S), Northern Chile: geochemical and statistical approach, *Mar, Pollut, Bull*, 50, 1558-1568.
- Woitke. P., Wellmitz. J., Helm. D., Kube. P., Lepom. P., Litheraty. P., 2003, Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and sediments of the river Danube. *Chemosphere* 51, 633-642.
- Zhang. J., Liu. C.L., 2000, Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes, *Estua. Coast. Shelf Sci.* 54, 1051-1070.