

Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Sediment of the Siahrood River, Mazandaran province

Hassan Malvandi

* Assistant Professor, Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

Sabzevar University of Medical Sciences, Sabzevar, Iran.

(Corresponding Author): Email: h.malvandi@hsu.ac.ir, hmalvandi@gmail.com

Nasrin Hassanzadeh

Assistant Professor, Department of Environmental Sciences, Faculty of Environment and Natural Resource, Malayer University, Malayer, Iran

Received: 2019/02/20

Accepted: 2019/11/11

Document Type: Research article

ABSTRACT

Background and purpose: Evaluation of concentration and degree of heavy metal contamination in rivers based on sediment contamination indices is one of the important issues in ecotoxicology research. Therefore, the purpose of this study was to measure the heavy metal concentrations in the sediments of the Siahrood River and to assess the health risk of these pollutants. Another purpose was to determine the status of the river in terms of contamination and non-contamination for ecotoxicology studies.

Materials and methods: Acid digestion method was used to prepare the samples. Then the concentrations of Cr, Fe, Zn, As, Se, Ni, Co, Al and Mn were measured using ICP-OES. Pollution and ecological risk indices were also calculated.

Results: The mean concentrations of chromium, iron, zinc, arsenic, selenium, nickel, cobalt, aluminum and manganese were 33.02, 7309.82, 42.61, 13.15, 13.36, 12.88, 6.58, 159.28 and 384.51 $\mu\text{g/g dw}$, respectively. Most of the studied elements were in the first category of pollution assessment indices.

Conclusion: The results based on contamination indices and comparison with sediment quality guidelines showed that concentrations of Cr, Se and As are of concern and could potentially be a threat to the health of organisms. For ecotoxicology studies, this river is considered to be relatively contaminated in terms of Cr, Se and As and non-contaminated for other studied elements. However, further studies and monitoring of pollutants in this ecosystem are essential for making proper and effective management decisions.

Keywords: Heavy metals, Toxicity, Health risk, Siahrood River, Pollution index

► **Citation:** Malvandi H, Hassanzadeh N. Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Sediment of the Siahrood River, Mazandaran province. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Fall 2019;5 (3):217-229.

سنجش ریسک بالقوه بوم‌شناسی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات سطحی رودخانه سیاه‌رود استان مازندران

چکیده

زمینه و هدف: ارزیابی غلظت و درجه آلودگی فلزات سنگین در رودخانه‌ها بر اساس شاخص‌های آلودگی رسوبات، یکی از موضوعات مهم در تحقیقات بوم‌شناسی است. مطالعه حاضر با هدف سنجش غلظت فلزات سنگین در رسوبات رودخانه سیاه‌رود و ارزیابی ریسک خطر سلامت این آلاینده‌ها و همچنین تعیین وضعیت این رودخانه از لحاظ آلوده و غیرآلوده بودن برای مطالعات بوم‌شناسی انجام شد. مواد و روش‌ها: از روش هضم اسیدی برای آماده‌سازی نمونه‌ها استفاده شد. سپس غلظت‌های عناصر کروم، آهن، روی، آرسنیک، سلیسیم، نیکل، کبالت، آلومینیوم و منگنز با استفاده از اسپکتروسکوپی نشری نوری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) اندازه‌گیری شد. شاخص‌های ریسک آلودگی و ریسک اکولوژیکی نیز محاسبه گردید.

یافته‌ها: میانگین غلظت‌های کروم، آهن، روی، آرسنیک، سلیسیم، نیکل، کبالت، آلومینیوم و منگنز به ترتیب ۳۳/۰۲، ۷۳۰۹/۸۲، ۴۲/۶۱، ۱۳/۱۵، ۱۳/۳۶، ۱۲/۸۸، ۶/۵۸، ۱۵۵۹/۲۸ و ۲۸۴/۵۱ میکروگرم بر گرم وزن خشک بودند. اکثر عناصر مورد مطالعه در طبقه اول شاخص‌های ارزیابی آلودگی قرار داشتند. نتیجه‌گیری: نتایج به‌دست آمده بر مبنای شاخص‌های آلودگی و مقایسه با دستورالعمل کیفیت رسوبات نشان داد که غلظت عناصر کروم، سلیسیم و آرسنیک نگران‌کننده است و این عناصر به‌طور بالقوه می‌توانند تهدید کننده سلامت موجودات باشند. برای مطالعات بوم‌شناسی، این رودخانه از لحاظ عناصر کروم، سلیسیم و آرسنیک می‌تواند نسبتاً آلوده و برای سایر عناصر مورد مطالعه غیرآلوده در نظر گرفته شود. هرچند انجام مطالعات تکمیلی و پایش آلاینده‌ها در این اکوسیستم جهت اتخاذ تصمیمات مدیریتی صحیح و اثربخش ضروری می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: رودخانه سیاه‌رود، ریسک سلامت، سمیت، شاخص آلودگی، فلزات سنگین

حسن ملوندی

* استادیار، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.
دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، سبزوار، ایران.
(نویسنده مسئول): پست الکترونیک:

h.malvandi@hsu.ac.ir,
hmalvandi@gmail.com

نسرین حسن‌زاده

استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده محیط زیست و منابع طبیعی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۰

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

◀ استناد: ملوندی ح، حسن‌زاده ن. سنجش ریسک بالقوه بوم‌شناسی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات سطحی رودخانه سیاه‌رود، استان مازندران فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط. تابستان ۱۳۹۸: ۵ (۳): ۲۱۷-۲۲۹.

مقدمه

فلزات سنگین به دلایلی از قبیل توزیع گسترده در اکوسیستم‌های مختلف، فراوانی، منابع متنوع ایجاد کننده، تجمع آسان در محیط زیست، بزرگ‌نمایی زیستی و سمیت برای انسان‌ها و موجودات؛ به‌عنوان یکی از آلاینده‌های مهم در نظر گرفته شده‌اند. فلزات سنگین به سه دسته بالقوه سمی مانند عناصر آرسنیک، کروم و کادمیوم، احتمالاً ضروری مانند نیکل و ضروری مانند مس و روی طبقه‌بندی شده‌اند (۱). این آلاینده‌ها در ماتریس‌های مختلف وجود دارند، اما از طریق چرخه هیدرولوژیکی وارد اکوسیستم‌های آبی شده و در نهایت در بستر و رسوبات ته‌نشین می‌شوند (۲). آلودگی فلزات سنگین به واسطه شهرنشینی و فعالیت‌های مختلف انسانی در سراسر جهان گزارش شده است (۳).

غلظت فلزات سنگین در رسوبات به‌طور کلی چندین برابر بدنه‌های آبی است و فلزات سنگین در طی فرآیندهای طبیعی تخریب و تجزیه نمی‌شوند، بنابراین فلزات سنگین می‌توانند در رسوبات ذخیره شده و به‌مدت طولانی در آن باقی بمانند. به همین دلیل رسوبات سطحی، یکی از مخازن اصلی فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها محسوب می‌شوند (۴). فلزات متصل شده به رسوبات می‌توانند در اثر فرآیندهای بیولوژیکی و فیزیکی وارد بدنه‌های آبی شده و اکوسیستم و موجودات وابسته را تحت تأثیر قرار دهند (۵). بنابراین رسوبات نیز به‌عنوان شاخصی مناسب برای بررسی آلودگی اکوسیستم رودخانه‌ای به کار گرفته می‌شوند (۶). این آلاینده‌ها بعد از ورود به زنجیره غذایی، در غلظت‌های بالا می‌توانند برای موجودات (برای نمونه برخی بی‌مهره‌ها و ماهی‌ها) خطرناک بوده و در نهایت اثرات مخربی بر سلامت انسان‌ها و اکوسیستم‌ها تحمیل نمایند (۷). بنابراین، مطالعه غلظت فلزات سنگین، توزیع و ارزیابی ریسک آن‌ها در رسوبات، یک روش مؤثر برای درک وضعیت آلودگی فلزات سنگین در بسترهای آبی است؛ به‌طوری‌که این چنین مطالعاتی می‌تواند منعکس کننده میزان آلودگی فعالیت‌های انسانی بوده و اطلاعاتی ارزشمند را که برای مدیریت اکوسیستم و سلامت موجودات حائز اهمیت است، به‌دست آورند.

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه‌ها مسئله‌ای مهم، داغ و به‌روز در تحقیقات اخیر مرتبط با وضعیت این ترکیبات در محیط‌های آبی و بحث سلامت انسان است. برای نمونه می‌توان به تحقیقات انجام شده در رودخانه‌های زرین گل (۸)، تجن (۹)، کر (۱۰)، زاینده‌رود (۱۱) و خرم‌آباد (۱۲) در ایران و رودخانه‌های Yellow (۱۳)، Taizihe (۱۴)، Balok (۱۵) و Gomti (۱۶) در سایر کشورها اشاره کرد.

ریسک بوم‌شناسی به خطرات مرتبط با اکوسیستم‌ها اشاره می‌کند که می‌تواند منعکس کننده خطرات احتمالی یا فجایع در اکوسیستم یا اجزای آن باشد. این خطرات ممکن است منجر به آسیب رساندن به ساختار و عملکرد اکوسیستم‌ها شده و در نتیجه ایمنی و سلامت اکوسیستم‌ها را به خطر اندازد (۱۴). در حال حاضر، ارزیابی ریسک زیست‌محیطی به‌طور گسترده‌ای در بسیاری از اکوسیستم‌های رودخانه‌ای در کشورهای مختلف از قبیل چین، هند، مالزی و کشورهای اروپایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با این حال، کار ارزیابی ریسک در ایران تا حدودی نوپا است و نیازمند توجه بیشتر برای مدیریت ریسک و ارزیابی تأثیرات آلاینده‌ها می‌باشد. برای ارزیابی آلودگی و ریسک خطر از شاخص‌های متنوعی استفاده می‌شود که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به شاخص‌های زمین انباشتگی (Igeo) ^۱، شاخص فاکتور آلودگی (CF) ^۲، شاخص بار آلودگی (PLI) ^۳، شاخص فاکتور غنی شدن (EF) ^۴ و شاخص‌های ریسک اکولوژیکی بالقوه (PERI) ^۵ اشاره کرد (۹، ۲).

1. Geoaccumulation index

2. Contamination factor

3. Pollution load index

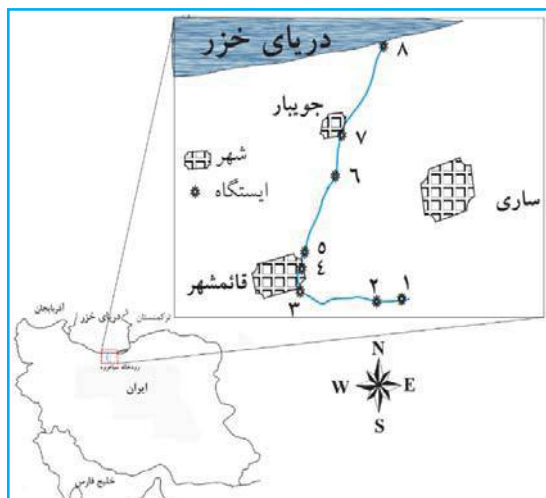
4. Enrichment factor

5. Potential ecological risk index

روش کار

منطقه مورد مطالعه

رودخانه سیاه‌رود در موقعیت جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۲ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۶ دقیقه طول شرقی قرار دارد. طول آبراهه اصلی در این رودخانه ۷۶ کیلومتر است که شاخه اصلی رودخانه از شرق روستای پرچینک شروع شده و در نهایت پس از عبور از شهرها و روستاهای متعدد از ناحیه صیدگاه لاریم به دریای خزر می‌ریزد. جهت حوضه در دشت از شرق به غرب و در منطقه کوهستانی از جنوب به طرف شمال است (۱۹). ۸ ایستگاه در طول رودخانه از بالادست تا پایین‌دست انتخاب گردید (شکل ۱) و از رسوبات سطحی نمونه‌برداری شده و تا زمان آزمایش در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.



شکل ۱. موقعیت رودخانه سیاه‌رود و ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده

آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از خشک شدن کامل نمونه‌ها با دستگاه منجمد-خشک‌کن، نمونه‌ها الک شدند. برای انجام هضم اسیدی، از هر نمونه ۱ گرم توزین شده، سپس با استفاده از اسیدهای نیتریک^۱، پرکلریک^۲ و فلئوریک^۳ در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت هضم گردیدند. پس از خنک شدن نمونه‌ها و فیلتر کردن با کاغذ واتمن،

به‌طور گسترده استفاده شده است، زیرا با استفاده از این شاخص‌ها علاوه بر تعیین درجه سمیت هر عنصر به‌صورت منفرد، می‌توان میزان سمیت مجموع عناصر آلوده‌کننده را نیز ارزیابی نمود و در نهایت میزان ریسک اکولوژیکی را بیان کرد. به علاوه این شاخص جامع میزان سمیت و حساسیت زیست‌محیطی فلزات سنگین را نیز در نظر می‌گیرد (۱۷، ۱۸).

یکی از رودخانه‌های مهم استان مازندران، رودخانه سیاه‌رود است. حوضه آبریز سیاه‌رود در قائمشهر به‌واسطه ورود فاضلاب‌های صناعی نظیر نساجی، کنسروسازی، گونی‌بافی، فاضلاب‌های شهری و ... و همچنین عبور از شهرهایی نظیر قائمشهر و جوبیار و سایر روستاها، یکی از آلوده‌ترین رودخانه‌های حوزه جنوبی دریای مازندران محسوب می‌شود (۱۹). با توجه به اهمیت آلودگی فلزات سنگین، اطلاعات اندکی در مورد برخی فلزات سنگین این رودخانه وجود دارد. برای نمونه می‌توان به مطالعات انجام شده توسط کرباسی و همکاران (۱۹) و قشقائی و رستمی (۲۰) اشاره کرد. در این مطالعات در مورد آلودگی برخی فلزات سنگین و درجه آلودگی آن‌ها تحقیق شده است. به علاوه در مطالعه طاهری و همکاران (۲۱) نیز آلودگی آفت‌کش‌های ارگانوفسفره و ارگانوکلره در رسوبات رودخانه سیاه‌رود مورد ارزیابی قرار گرفت. اما با این وجود، کمبود اطلاعات در زمینه آلودگی و آلاینده‌های موجود در این اکوسیستم رودخانه‌ای همچنان مشهود است. بنابراین در این تحقیق به‌طور سیستماتیک و جامع این موضوع مورد بررسی قرار گرفت. اهداف اصلی این مطالعه تعیین غلظت عناصر سنگین (کروم، آهن، روی، آرسنیک، سلنیوم، نیکل، کبالت، آلومینیوم و منگنز)، تعیین درجه آلودگی بر مبنای شاخص‌های آلودگی Igeo، CF، PLI و EF، ارزیابی ریسک بوم‌شناسی بر مبنای شاخص‌های PERI و تعیین روند افزایشی یا کاهش غلظت آلاینده‌ها نسبت به گذشته در این رودخانه و همچنین تعیین وضعیت آلودگی این رودخانه برای مطالعات بوم‌شناسی بود.

1. Nitric acid
2. Perchloric acid
3. Hydrofluoric acid

هر نمونه به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد. آنالیز عناصر با استفاده از اسپکتروسکوپی نشری نوری با استفاده از پلاسما جفت شده القایی (ICP-OES) ساخت کشور آلمان در آزمایشگاه دانشکده علوم دانشگاه زنجان انجام شد.

ارزیابی ریسک خطر فلزات سنگین
شاخص زمین انباشتگی (Igeo)

این شاخص توسط محقق بنام مولر در سال ۱۹۶۹ برای ارزیابی ریسک آلودگی زیست‌محیطی ارائه شده است و نحوه محاسبه آن بر اساس معادله ۱ است (۲۲). در این فرمول، C_n غلظت عنصر مورد مطالعه n در نمونه‌های رسوب و B_n غلظت زمینه عنصر n است.

$$EF = (C_n/C_{ref}) / (B_n/B_{ref}) \quad (\text{معادله ۴})$$

شاخص‌های ریسک اکولوژیکی بالقوه (PERI)

از دو شاخص ریسک بالقوه (E_{pi}^i) و ریسک بالقوه بوم‌شناختی (RI) برای ارزیابی ریسک اکولوژیکی بالقوه عناصر استفاده شد. شاخص منعکس‌کننده تأثیرات انفرادی عناصر و شاخص RI نشان‌دهنده تأثیرات جمعی عناصر می‌باشد. شاخص RI بر میزان درجه آلودگی تمام عناصر مورد مطالعه دلالت دارد. این دو شاخص بر اساس فرمول‌های ۵ و ۶ محاسبه شدند (۲۳).

$$E_{pi}^i = T_{pi}^i \times CF \quad (\text{معادله ۵})$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_{pi}^i \quad (\text{معادله ۶})$$

یافته‌ها

غلظت فلزات سنگین

در جدول ۱، غلظت فلزات سنگین مورد مطالعه در رسوبات سطحی رودخانه سیاه‌رود نشان داده شده است. میانگین غلظت کل عناصر کروم، آهن، روی، آرسنیک، سلنیوم، نیکل، کبالت، آلومینیوم و منگنز به ترتیب به ترتیب ۰۲/۳۳، ۸۲/۷۳۰۹، ۶۱/۴۲، ۱۵/۱۳، ۳۶/۱۳، ۸۸/۱۲، ۵۸/۶، ۲۸/۱۵۵۹ و ۵۱/۳۸۴ بود.

ارزیابی آلودگی

مقادیر شاخص زمین انباشتگی (Igeo) به دست آمده از

این شاخص توسط محقق بنام مولر در سال ۱۹۶۹ برای ارزیابی ریسک آلودگی زیست‌محیطی ارائه شده است و نحوه محاسبه آن بر اساس معادله ۱ است (۲۲). در این فرمول، C_n غلظت عنصر مورد مطالعه n در نمونه‌های رسوب و B_n غلظت زمینه عنصر n است.

$$I_{geo} = \text{Log}_2(C_n) / 1.5(B_n) \quad (\text{معادله ۱})$$

شاخص فاکتور آلودگی (CF)

شاخص CF اطلاعاتی را در مورد تمرکز عنصر مورد مطالعه در مکان مورد مطالعه نسبت به مکان مرجع ارائه می‌دهد. این شاخص بر اساس معادله ۲ محاسبه شد. C_n غلظت عنصر مورد مطالعه در نمونه‌های رسوب و C_B غلظت زمینه عنصر مورد مطالعه است (۲).

$$CF = C_n / C_B \quad (\text{معادله ۲})$$

شاخص بار آلودگی (PLI)

شاخص PLI، بیان‌کننده میزان درجه آلودگی برای مجموع عناصر مورد مطالعه است و طبق معادله ۳ محاسبه شد. در این فرمول CF نشان‌دهنده فاکتور آلودگی و n بیانگر تعداد عناصر مورد مطالعه است (۹).

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)^n \quad (\text{معادله ۳})$$

شاخص فاکتور غنی شدن (EF)

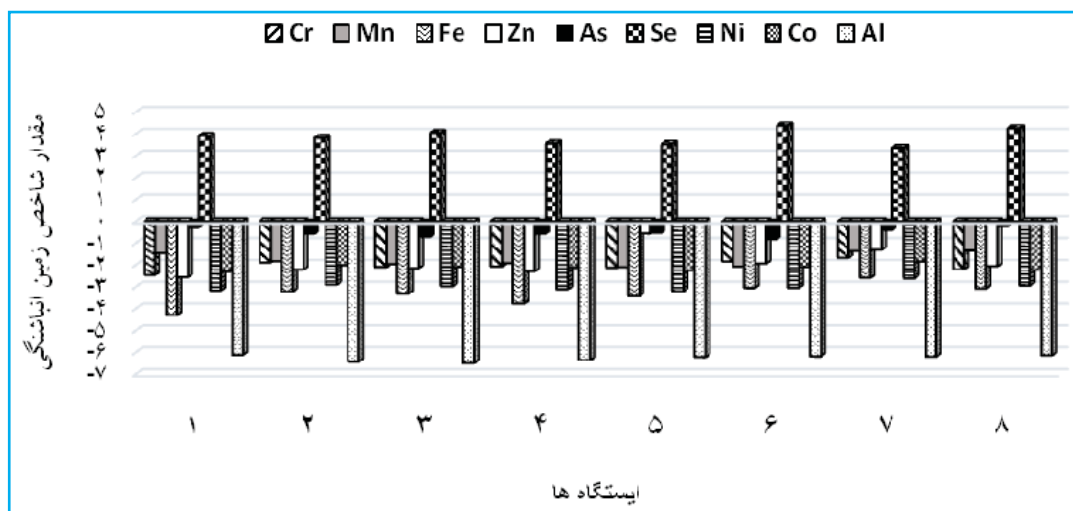
این شاخص، معیاری برای تعیین درجه آلودگی عناصر انسان ساخت است. در این شاخص میزان آلودگی عناصر مورد مطالعه بر

1. Potential risk index
2. Potential ecological risk index

جدول ۱. غلظت فلزات سنگین بر حسب میکروگرم بر گرم وزن خشک در رسوبات سطحی رودخانه سیاهرود

عنصر	کروم	آهن	روی	آرسنیک	سلنیوم	نیکل	کبالت	آلومینیوم	منگنز
۱	۲۴/۳۷	۳۵۷۲/۶۸	۴۲/۱۲	۱۵/۱۷	۱۳/۵۳	۱۱/۳۶	۵/۷۱	۱۷۲۲/۲۵	۴۶۱/۴۸
۲	۳۶/۳۴	۷۵۸۷/۵۸	۳۰/۶۱	۱۲/۶۰	۱۲/۶۳	۱۳/۶۵	۷/۰۸	۱۳۸۰/۰۵	۳۵۸/۶۹
۳	۳۱/۴۳	۷۰۳۱/۰۵	۳۲/۰۸	۱۱/۴۴	۱۴/۹۰	۱۲/۸۹	۶/۷۰	۱۳۳۰/۲۸	۳۲۶/۴۴
۴	۳۲/۱۵	۵۲۰۴/۲۳	۲۹/۰۰	۱۲/۶۲	۱۰/۵۳	۱۱/۸۳	۶/۵۳	۱۴۵۱/۴۶	۳۳۷/۳۰
۵	۳۰/۹۴	۶۵۴۲/۰۵	۹۶/۰۵	۱۲/۹۵	۱۰/۳۴	۱۱/۱۳	۵/۹۷	۱۶۱۴/۷۶	۲۹۶/۱۳
۶	۳۷/۴۹	۸۴۹۰/۹۳	۳۷/۲۲	۱۰/۵۹	۱۸/۶۷	۱۲/۲۹	۶/۶۸	۱۶۴۶/۲۸	۳۰۱/۰۳
۷	۴۲/۲۷	۱۱۶۶۴/۴۵	۵۷/۶۵	۱۴/۰۳	۹/۱۵	۱۶/۶۲	۷/۸۸	۱۶۲۷/۴۲	۴۹۳/۲۶
۸	۲۹/۱۴	۸۳۸۵/۶۱	۳۴/۱۷	۱۵/۸۰	۱۷/۱۲	۱۳/۲۹	۶/۰۹	۱۷۰۱/۷۳	۵۰۱/۷۶
کل	۳۳/۰۲	۷۳۰۹/۸۲	۴۲/۶۱	۱۳/۱۵	۱۳/۳۶	۱۲/۸۸	۶/۵۸	۱۵۵۹/۲۸	۳۸۴/۵۱

ایستگاه‌های مورد مطالعه در نمودار ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل، درجه آلودگی عناصر مورد مطالعه به غیر از سلنیوم در تمام ایستگاه‌ها در طبقه صفر قرار داشتند، در حالی که درجه آلودگی عنصر سلنیوم در ایستگاه‌های ۱، ۲، ۴، ۵ و ۷ در طبقه ۴ و در ایستگاه‌های ۳، ۶ و ۸ در طبقه ۵ دسته‌بندی شدند.



نمودار ۱. مقادیر شاخص Igeo در ایستگاه‌های رودخانه سیاهرود

مقادیر شاخص CF در جدول ۲ نشان داده شده است. عناصر کروم، آهن، نیکل، کبالت، آلومینیوم و منگنز در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه و عنصر روی در تمام ایستگاه‌ها به غیر از ایستگاه شماره ۱ در طبقه اول این شاخص قرار داشتند. عنصر سلنیوم مقادیر شاخص CF در جدول ۲ نشان داده شده است. عناصر کروم، آهن، نیکل، کبالت، آلومینیوم و منگنز در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه و عنصر روی در تمام ایستگاه‌ها به غیر از ایستگاه شماره ۱ در طبقه اول این شاخص قرار داشتند. عنصر سلنیوم مقادیر شاخص PLI نیز در تمام ایستگاه‌های کمتر از ۱ بود (جدول ۲).

جدول ۲. مقادیر شاخص CF و PLI در ایستگاه‌های مورد مطالعه از رودخانه سیاه‌رود

PLI	CF									شاخص ایستگاه
	منگنز	آلومینیوم	کبالت	نیکل	سلنیوم	آرسنیک	روی	آهن	کروم	
۰/۳۵	۰/۵۴	۰/۰۲	۰/۳۰	۰/۱۷	۲۲/۵۵	۱/۱۷	۰/۲۵	۰/۰۸	۰/۲۷	۱
۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۰۲	۰/۳۷	۰/۲۰	۲۱/۰۵	۰/۹۷	۰/۳۲	۰/۱۶	۰/۴۰	۲
۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۰۲	۰/۳۵	۰/۱۹	۲۴/۸۴	۰/۸۸	۰/۳۴	۰/۱۵	۰/۳۵	۳
۰/۳۵	۰/۴۰	۰/۰۲	۰/۳۴	۰/۱۷	۱۷/۵۵	۰/۹۷	۰/۳۱	۰/۱۱	۰/۳۶	۴
۰/۴۱	۰/۳۵	۰/۰۲	۰/۳۱	۰/۱۶	۱۷/۲۳	۱/۰۰	۱/۰۱	۰/۱۴	۰/۳۴	۵
۰/۴۱	۰/۳۵	۰/۰۲	۰/۳۵	۰/۱۸	۳۱/۱۲	۰/۸۱	۰/۳۹	۰/۱۸	۰/۴۲	۶
۰/۴۸	۰/۵۸	۰/۰۲	۰/۴۱	۰/۲۴	۱۵/۲۵	۱/۸۰	۰/۶۱	۰/۲۵	۰/۴۷	۷
۰/۴۴	۰/۵۹	۰/۰۲	۰/۳۲	۰/۲۰	۲۸/۵۳	۱/۲۲	۰/۳۶	۰/۱۸	۰/۳۲	۸
۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۰۲	۰/۳۵	۰/۱۹	۲۲/۲۷	۱/۰۱	۰/۴۵	۰/۱۵	۰/۳۷	کل

بر اساس نتایج شاخص EF، عنصر آلومینیوم کمترین میزان این شاخص و عنصر سلنیوم بیشترین مقدار را دارا بود (جدول ۳). ترتیب مقادیر به‌دست آمده از این شاخص از کمترین به بیشترین > سلنیوم > آلومینیوم > نیکل > کبالت > کروم > روی > منگنز > آرسنیک > منگنز > آرسنیک > سلنیوم.

جدول ۳. مقادیر شاخص‌های EF در رودخانه سیاه‌رود

شاخص ایستگاه	EF							
	کروم	روی	آرسنیک	سلنیوم	نیکل	کبالت	آلومینیوم	منگنز
۱	۳/۵۸	۳/۳۵	۱۵/۴۲	۲۹۷/۹۲	۲/۲۱	۳/۹۷	۰/۲۸	۷/۱۷
۲	۲/۵۱	۲/۰۰	۶/۰۳	۱۳۰/۹۵	۱/۲۵	۲/۳۲	۰/۱۱	۲/۶۳
۳	۲/۳۴	۲/۲۷	۵/۹۱	۱۶۶/۷۵	۱/۲۷	۲/۳۷	۰/۱۱	۲/۵۸
۴	۳/۲۴	۲/۷۷	۸/۸۰	۱۵۹/۱۷	۱/۵۸	۳/۱۲	۰/۱۶	۳/۶۰
۵	۲/۴۸	۷/۲۹	۷/۱۹	۱۲۴/۳۴	۱/۱۸	۲/۲۷	۰/۱۵	۲/۵۱
۶	۲/۳۲	۲/۱۸	۴/۵۳	۱۷۲/۹۸	۱/۰۰	۱/۹۵	۰/۱۱	۱/۹۷
۷	۱/۹۰	۲/۴۶	۴/۳۷	۶۱/۷۱	۰/۹۹	۱/۶۸	۰/۰۸	۲/۳۵
۸	۱/۸۲	۲/۰۲	۶/۸۴	۱۶۰/۶۱	۱/۱۰	۱/۸۰	۰/۱۲	۳/۳۲
کل	۲/۵۲	۳/۰۴	۷/۳۹	۱۵۹/۳۰	۱/۳۲	۲/۴۴	۰/۱۴	۳/۲۷

ریسک بوم‌شناسی

ارزیابی ریسک بوم‌شناختی با استفاده از شاخص‌های ریسک اکولوژیکی بالقوه E_p^i و RI انجام شد. بر اساس شاخص ریسک اکولوژیکی برای هر عنصر (E_p^i) ، نتایج نشان‌دهنده ریسک اکولوژیکی اندک بود و همچنین شاخص ریسک اکولوژیکی برای تمام عناصر (RI) نیز ریسک اندک را نشان داد (جدول ۴).

جدول ۴. شاخص‌های ریسک اکولوژیکی E_p^i و RI در ایستگاه‌های رودخانه سیاه‌رود

درجه آلودگی	شاخص RI	شاخص						شاخص و عناصر
		کبالت	نیکل	آرسنیک	روی	منگنز	کروم	سایت
کم	۱۴/۴۴	۰/۶۰	۰/۸۴	۱۱/۶۷	۰/۲۵	۰/۵۴	۰/۵۴	۱
کم	۱۲/۹۹	۰/۷۵	۱/۰۰	۹/۶۹	۰/۳۲	۰/۴۲	۰/۸۱	۲
کم	۱۱/۸۸	۰/۷۱	۰/۹۵	۸/۸۰	۰/۳۴	۰/۳۸	۰/۷۰	۳
کم	۱۲/۶۹	۰/۶۹	۰/۸۷	۹/۷۱	۰/۳۱	۰/۴۰	۰/۷۱	۴
کم	۱۳/۴۶	۰/۶۳	۰/۸۲	۹/۹۶	۱/۰۱	۰/۳۵	۰/۶۹	۵
کم	۱۱/۳۲	۰/۷۰	۰/۹۰	۸/۱۵	۰/۳۹	۰/۳۵	۰/۸۳	۶
کم	۱۴/۹۷	۰/۸۳	۱/۲۲	۱۰/۷۹	۰/۶۱	۰/۵۸	۰/۹۴	۷
کم	۱۵/۳۷	۰/۶۴	۰/۹۸	۱۲/۱۵	۰/۳۶	۰/۵۹	۰/۶۵	۸
کم	۱۳/۳۹	۱۰/۱۲	۰/۴۵	۰/۹۵	۰/۶۹	۰/۴۵	۰/۷۳	کل ایستگاه‌ها
	کم	کم	کم	کم	کم	کم	کم	درجه آلودگی

بحث

غلظت عناصر مورد مطالعه

عناصر مورد مطالعه در رودخانه سیاه‌رود در مطالعه حاضر با سایر غلظت‌های گزارش شده از سایر رودخانه‌ها در جدول ۵، تمام این عناصر در مطالعه حاضر غلظت کمتری از سایر رودخانه‌ها داشتند. بیشترین غلظت عناصر کروم، منگنز و آهن در رودخانه خرم‌آباد، عناصر سلیونیوم، کبالت و آلومینیوم در رودخانه زرین‌گل، عناصر روی و آرسنیک در رودخانه Taizihe و عنصر نیکل در رودخانه کر به دست آمد.

در تجزیه و تحلیل همبستگی بین غلظت‌های عناصر مورد مطالعه نیز بین عناصر کروم، آهن، کبالت و نیکل؛ و آرسنیک با منگنز همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود داشت ($p < 0/05$). عناصر آلومینیوم، روی و سلیونیوم نیز با هیچ کدام از عناصر همبستگی معنی‌داری را نشان ندادند. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین عناصر یاد شده می‌تواند نشان‌دهنده مرتبط بودن این عناصر و احتمال وجود منابع مشترک طبیعی یا انسان ساخت باشد (۲، ۲۳).

ارزیابی آلودگی

مقادیر شاخص Igeo در محدوده ۶/۵۰- تا ۳/۸۵ بودند. تفسیر مقادیر این شاخص به شرح زیر است: $Igeo \geq 0$ نشان‌دهنده درجه

در مطالعه حاضر غلظت عناصر کروم، روی، آهن، کبالت و آلومینیوم در ایستگاه‌های بالادست رودخانه کمتر از ایستگاه‌های پایین‌دست بود. بیشترین غلظت عناصر مورد مطالعه در ایستگاه‌های پایین‌دست مشاهده شد، به استثنای عنصر آلومینیوم که در ایستگاه بالادست (ایستگاه ۱) بیشترین غلظت را نشان داد (جدول ۱). بر اساس داده‌های به دست آمده، بیشترین غلظت مشاهده شده مربوط به آلومینیوم و کمترین مربوط به کبالت بود. ترتیب غلظت عناصر مورد مطالعه به صورت زیر بود: آلومینیوم < آهن < منگنز < روی < کروم < سلیونیوم < آرسنیک < نیکل < کبالت.

به منظور بررسی وضعیت آلودگی عناصر مورد مطالعه، غلظت‌های به دست آمده در این تحقیق با غلظت‌های به دست آمده از سایر رودخانه‌ها در جدول ۵ مقایسه شد. در مطالعه حاضر غلظت‌های عناصر کروم، روی و نیکل کمتر و غلظت آرسنیک بیشتر از غلظت‌های به دست آمده از همین رودخانه در مطالعه قشقایی و رستمی بود. سایر عناصر نیز فاقد داده‌ای منتشر شده در آن تحقیق برای مقایسه بودند (۲۰). در مقایسه غلظت تمام

جدول ۵. مقادیر فلزات سنگین بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم در رسوبات سطحی رودخانه سیاه‌رود در مقایسه با سایر رودخانه‌ها

منبع	عناصر									کشور	رودخانه
	Al	Co	Ni	Se	As	Zn	Fe	Mn	Cr		
مطالعه حاضر	۱۵۵۹/۲۸	۶/۵۸	۱۲/۸۸	۱۳/۳۶	۱۳/۱۵	۴۲/۶۱	۷۳۰۹/۸۲	۳۸۴/۵۱	۳۳/۰۲	ایران	سیاه‌رود
(۲۰)	-	-	۲۹/۶	-	۹/۶۶	۶۳/۶	-	-	۸۶/۶	ایران	سیاه‌رود
(۱۲)	-	-	۷۶/۸	-	۵/۸۰	۸۷/۶۰	۲۴۳۶۹/۹۰	۶۳۶/۳۰	۱۶۹/۶۰	ایران	خرم‌آباد
(۲)	۲۹۲۳/۸۶	۸/۷۹	۱۲/۳۹	۴۰/۵۹	۲۱/۹۱	۳۲/۶۸	۱۳۷۵۱/۵۶	۲۸۶/۲۸	۳۷/۶۷	ایران	زرین گل
(۹)	-	۴/۲۳	۸/۲۱	۱۹/۸۰	۱۲/۷۶	۱۹/۷۴	۵۰۰۵/۲۶	۲۱۵/۳۹	۱۹/۹۷	ایران	تجن
(۱۰)	-	-	۸۳/۳۳	-	۳/۵۳	۵۹/۲۱	-	-	۱۰۲	ایران	کر
(۱۳)	-	-	۲۷/۳۰	-	۱۳/۸۳	۷۱/۲۵	-	-	۶۱/۶۲	چین	Yellow
(۱۴)	-	-	-	-	۸۵۵/۲۵	۱۷۳۷/۳۵	-	-	۱۳۶/۸	چین	Taizihe
(۷)	-	-	۶۳/۹۵	-	۲۳/۶۷	۴۱۳/۱۷	-	-	۶۰/۲۸	تایوان	Houjing
(۲۴)	-	-	۱۰	-	-	۹۰	-	۲۴۰	۱۶	ایتالیا	Olona
(۱۶)	-	-	۱۵/۷	-	-	۴۱/۶۷	-	۱۴۸/۱۳	۸/۱۵	هند	Gomti
(۲۵)	-	-	-	-	۸۱/۰۹	-	-	-	۲۰/۳	بنگلادش	Karnaphuli
(۱۵)	-	-	۳۰/۳	-	-	۱۵۲/۱	-	۱۵۵/۷	۴۱/۹	مالزی	Balok

* اعداد تیره شده و مورب شده، نشان‌دهنده بیشترین غلظت عنصر در بین رودخانه‌ها می‌باشد.

دسته غیرآلوده تا آلودگی متوسط، آلودگی زیاد و آلودگی زیاد تا به شدت آلوده قرار داشتند (۱۹). این نتایج نشان‌دهنده این است که میزان آلودگی بر اساس این شاخص در طول زمان، در رودخانه مورد مطالعه کاهش داشته است. همچنین نتایج مطالعه حاضر مشابه نتایج به دست آمده از مطالعات انجام شده در رودخانه‌های زرین گل (۲) و تجن (۹) بود. در این دو مطالعه نیز تمام عناصر به استثنای سلنیوم در طبقه غیرآلوده قرار داشتند.

مقادیر شاخص CF برای کل ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده در محدوده ۰/۰۲-۳۱/۱۲ قرار داشت. بیشترین و کمترین مقدار این شاخص به ترتیب مربوط به عناصر آلومینیوم و سلنیوم بود. تفسیر مقادیر این شاخص بدین صورت بود که CF کمتر از ۱ نشان‌دهنده درجه آلودگی کم، $CF > 3$ نشان‌دهنده درجه آلودگی متوسط، $CF > 6$ نشان‌دهنده درجه آلودگی خیلی آلوده است (۲). بنابراین بر مبنای این شاخص، عناصر کروم، آهن، نیکل، کبالت، آلومینیوم و منگنز در تمام ایستگاه‌ها و عنصر روی به غیر از ایستگاه شماره ۱، در سایر ایستگاه‌ها درجه آلودگی کم را نشان دادند. عنصر روی در ۱

آلودگی عملاً غیرآلوده، $Igeo > 1$ نشان‌دهنده درجه آلودگی غیرآلوده تا آلودگی متوسط، $Igeo > 2$ نشان‌دهنده درجه آلودگی متوسط، $Igeo > 3$ نشان‌دهنده درجه آلودگی متوسط تا آلودگی زیاد، $Igeo > 4$ نشان‌دهنده درجه آلودگی زیاد، $Igeo < 5$ نشان‌دهنده درجه آلودگی زیاد تا به شدت آلوده و $Igeo < 5$ نشان‌دهنده درجه آلودگی به شدت آلوده می‌باشد. بنابراین با توجه به موارد فوق، تمام عناصر در تمام ایستگاه‌های نمونه‌برداری در طبقه صفر این شاخص قرار گرفتند، یعنی در طبقه غیرآلوده دسته‌بندی شدند، البته به استثنای عنصر سلنیوم که در ایستگاه‌های ۳، ۶ و ۸ در طبقه ۵ این شاخص با درجه آلودگی زیاد تا به شدت آلوده و در سایر ایستگاه‌های در طبقه ۴ با درجه آلودگی زیاد قرار داشت (شکل ۱). نتایج مشابهی نیز در تحقیق قشلاقی و رستمی در این رودخانه توسط به دست آمد. در مطالعه قشلاقی و رستمی مقادیر عناصر آرسنیک، کروم، نیکل و روی در طبقه غیرآلوده قرار داشتند (۲۰)، در حالی که در مطالعه کرباسی و همکاران فقط عنصر آرسنیک در کمتر از ۵۰٪ ایستگاه‌های نمونه‌برداری در طبقه صفر یعنی غیرآلوده قرار داشت و عناصر منگنز، روی و نیکل به ترتیب در

زیرین گل مشابه نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر بود، اما مقادیر این شاخص برای سایر عناصر مورد مطالعه در تحقیق انجام شده در رودخانه زیرین گل کمتر از مطالعه حاضر به دست آمد (۲).

ریسک بوم‌شناسی

به منظور ارزیابی ریسک بوم‌شناختی از شاخص‌های ریسک اکولوژیکی بالقوه و RI استفاده شد. تفسیر شاخص‌های RI و بدین صورت است که $RI > 40$ و $RI > 150$ دارای ریسک اکولوژیکی کم، $80 > E_{ri}^i > 40$ و $RI > 300$ دارای ریسک اکولوژیکی متوسط، $160 > E_{ri}^i > 80$ و $RI > 600$ دارای ریسک اکولوژیکی قابل ملاحظه، $320 > E_{ri}^i > 160$ و $RI > 600$ دارای ریسک اکولوژیکی زیاد و $E_{ri}^i > 320$ دارای ریسک اکولوژیکی شدید می‌باشند (۲). بنابراین بر مبنای نتایج هر دو شاخص، می‌توان نتیجه گرفت که ریسک اکولوژیکی اندکی بر مبنای غلظت عناصر مورد مطالعه در این رودخانه وجود داشت (جدول ۴). این نتایج نیز مشابه تحقیقات انجام شده در رودخانه‌های زیرین گل و تجن بود (۲، ۹).

آلاینده‌ها در رسوبات برای موجودات سمی بوده و سبب ایجاد اثرات مضر بر سلامتی آن‌ها می‌شوند، بنابراین رسوبات را از لحاظ میزان آلودگی به سه کلاس: کلاس A، کلاس B و کلاس C طبقه‌بندی کرده‌اند. کلاس A به آلودگی غیرقابل توجه (بدون سمیت برای حیات آبی)، کلاس B به آلودگی متوسط (به‌طور بالقوه دارای سمیت مزمن برای حیات آبی) و کلاس C به آلودگی بالا (به‌طور بالقوه دارای سمیت حاد برای حیات آبی) اشاره دارند. در مطالعه حاضر به‌منظور غربال کردن و بررسی آلودگی رسوبات، در جدول ۶ مقادیر فلزات سنگین مورد مطالعه در رودخانه سیاه‌رود با استانداردهای کیفیت رسوبات مقایسه شده است. بر این اساس غلظت‌های کروم به‌طور متوسط در کلاس B یعنی آلودگی متوسط قرار داشت، حدود ۸۵٪ نمونه‌ها در این کلاس و بقیه در کلاس A قرار داشتند. عنصر منگنز در کل ایستگاه‌ها در کلاس B قرار گرفت و ۲۸٪ نمونه‌ها در این کلاس و بقیه در طبقه A بودند. برای عنصر روی فقط ۸٪ نمونه‌ها در کلاس B و بقیه در کلاس A بودند. تمام نمونه‌های برای عنصر آهن در کلاس A

ایستگاه و آرسنیک در ۳ ایستگاه درجه آلودگی متوسط را نشان دادند، در حالی که فقط عنصر سلنیوم در تمام ایستگاه‌ها در طبقه آخر این شاخص یعنی درجه آلودگی خیلی آلوده قرار داشت. این نتایج همسو با نتایج مطالعات انجام شده در رودخانه‌های زیرین گل (۲) و تجن (۹) بود. در آن مطالعات نیز به غیر از عنصر سلنیوم و آرسنیک، سایر عناصر در طبقه غیرآلوده دسته‌بندی شدند، این درحالی است که نتایج متفاوتی از رودخانه‌های Houjing (۷) و Karnaphuli (۲۵) گزارش شده است.

نتایج شاخص PLI که بر مبنای آلودگی مجموع عناصر مورد مطالعه محاسبه شده است، در محدوده ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ بود. با توجه به اینکه مقادیر PLI کمتر از یک نشان‌دهنده عدم آلوده بودن و مقدار PLI بیشتر از ۱ نشان‌دهنده آلوده بودن منطقه است، نتایج نشان‌دهنده غیرآلوده بودن تمام سایت‌ها بود. نتایج این تحقیق مشابه نتایج به دست آمده از رودخانه‌های زیرین گل (۲) و تجن (۹) بود. در حالی که مقادیر این شاخص در رودخانه خرم‌آباد (۱۲)، Tigris (۶) و Bernam (۲۶) بیشتر از ۱ بوده است.

محدوده مقادیر شاخص EF از ۰/۰۸ تا ۲۹۷/۹۲ به ترتیب برای عناصر آلومینیوم و سلنیوم متغیر بود. در کل تفسیر نتایج این شاخص به این صورت است که $EF > 1$ نشان‌دهنده عدم غنی‌سازی، $3 > EF > 1$ نشان‌دهنده غنی‌سازی جزئی، $5 > EF > 3$ نشان‌دهنده غنی‌سازی متوسط، $10 > EF > 5$ نشان‌دهنده غنی‌سازی بیش از متوسط، $25 > EF > 10$ نشان‌دهنده غنی‌سازی شدید، $50 > EF > 25$ نشان‌دهنده غنی‌سازی خیلی شدید و $EF < 50$ نشان‌دهنده غنی‌سازی فوق‌العاده شدید است (۲۷). بنابراین بر مبنای مقادیر این شاخص، عنصر آلومینیوم در تمام ایستگاه‌ها عدم غنی‌سازی، عناصر کروم، نیکل، کبالت و روی غنی‌سازی جزئی و متوسط، آرسنیک غنی‌سازی متوسط، بیش از متوسط و شدید و سلنیوم غنی‌سازی فوق‌العاده شدید را نشان دادند. نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر همسو با نتایج به دست آمده از رودخانه تجن بود (۹)، هرچند به‌طور کلی مقادیر این شاخص‌ها در مطالعه حاضر بیشتر بود. همچنین نتایج به دست آمده در مورد عناصر آلومینیوم و سلنیوم در رودخانه

بودند، درحالی که ۱۰۰٪ نمونه‌ها از لحاظ عنصر آرسنیک در کلاس C یعنی آلودگی شدید قرار گرفتند.

جدول ۶. راهنمای کیفیت رسوبات برای فلزات سنگین

منبع	عناصر										دستورالعمل‌ها	
	منیزیم	آلومینیوم	سلنیوم	آرسنیک	روی	نیکل	کبالت	آهن	سلنیوم	کروم		
(۲۸-۳۰)	-	-	-	<۳	<۹۰	<۲۰	-	<۱۷۰۰۰	<۳۰۰	<۲۵	غیر آلوده	طبقه سمیت رسوبات
	-	-	-	۳-۸	۹۰-۲۰۰	۲۰-۵۰	-	۱۷۰۰۰-۲۵۰۰۰	۳۰۰-۵۰۰	۲۵-۷۵	آلودگی متوسط	
	-	-	-	>۸	>۲۰۰	>۵۰	-	>۲۵۰۰۰	>۵۰۰	>۷۵	آلودگی شدید	
(۳۱, ۳۰)	-	-	-	۵/۹	۱۲۳	۱۸	-	-	-	۳۷/۳	TEL	راهنمای کیفیت رسوب
	-	-	-	۳۳	۱۲۰	۳۰	-	-	-	۸۰	ERL	
	-	-	-	۶	۱۲۰	۱۶	-	۲۰۰۰۰	۴۶۰	۲۶	LEL	
	-	-	-	۷	۱۵۰	۳۵	-	-	-	۵۵	MET	
	-	-	-	۱۷	۳۱۵	۴۲/۸	-	-	-	۹۰	PEL	
	-	-	-	۸۵	۲۷۰	۵۰	-	-	-	۱۴۵	ERM	
	-	-	-	۱۷	۵۴۰	۶۱	-	-	-	۱۰۰	TET	
	-	-	-	۳۳	۸۲۰	۷۵	-	۴۰۰۰۰	۱۱۰۰	۱۱۰	SEL	
۳۸۴	۱۵۵۹	۱۳	۱۳	۴۳	۱۳	۷	۷۳۱۰	۳۸۵	۳۳		مطالعه حاضر	

لزوم توجه بیش از پیش به این آلاینده‌های این محیط آبی را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

بر اساس تجزیه و تحلیل‌های انجام شده در مورد غلظت عناصر مورد مطالعه و ارزیابی ریسک بوم‌شناسی، در بین عناصر مورد مطالعه بیشترین غلظت مشاهده شده مربوط به عنصر آهن و سپس منگنز و کمترین غلظت مربوط به کبالت بود. در مقایسه غلظت عناصر با برخی از رودخانه‌ها، غلظت عناصر در رودخانه تحت مطالعه کمتر از سایر رودخانه‌ها بود. مقادیر غلظت عناصر در مطالعه حاضر همچنین کمتر از دیگر مطالعه انجام شده در همین رودخانه بود (۲۰) که این امر احتمالاً می‌تواند نشان‌دهنده روند کاهش آلودگی این عناصر در طول زمان در این رودخانه باشد. نتایج شاخص‌های ارزیابی خطر (Igeo، CF، PLI و EF) با یکدیگر همسو بودند. نتایج مشابهی نیز در رودخانه‌های چشمه کیله، زرین‌گل و تجن نیز به‌دست آمده است (۲۹، ۲۳). همچنین نتایج شاخص‌ها نشان دادند که عناصر سلنیوم و آرسنیک نسبت به سایر عناصر درجه آلودگی بیشتری داشتند. همچنین در بررسی

به‌علاوه برای کامل‌تر شدن ارزیابی درجه‌بندی آلودگی و اثرات مخرب احتمالی بر موجودات آبی، مقادیر با استانداردهای کیفیت رسوبات نیز مقایسه شد (جدول ۶) که بر اساس نتایج، میانگین غلظت عناصر کروم، آهن، منگنز، روی و نیکل در کل ایستگاه‌ها از تمام استانداردهای راهنمای کیفیت رسوبات ذکر شده شامل کمترین سطح اثر (LEL) ^۱، سطح اثر آستانه (TEL) ^۲، سطح اثر احتمالی (PEL) ^۳، محدوده اثر کم (ERL) ^۴، محدوده اثر متوسط (ERM) ^۵، آستانه تأثیر حداقل (MET) ^۶، آستانه اثر سمی (TET) ^۷ و سطح اثر شدید (SEL) ^۸ کمتر بود، در حالی که عنصر آرسنیک از تمام استانداردهای ذکر شده در جدول به استثنای ERM و SEL بیشتر بود. نتایج مقایسه با استانداردها، بیانگر آلوده بودن منطقه به عنصر آرسنیک و در رتبه بعدی کروم بوده و این نتایج همچنین

1. Lowest effect level
2. Threshold effect level
3. Probable effect level
4. Effect range low
5. Effect range median
6. Minimal effect threshold
7. Toxic effect threshold
8. Severe effect level

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را در می‌کنند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از تمامی افرادی که در جمع‌آوری نمونه‌ها، نویسندگان را یاری کردند از جمله از جناب آقای دکتر جابر اعظمی و رضا قوسی، تشکر و قدردانی می‌شود.

ریسک بوم‌شناسی از طریق مقایسه با راهنمای کیفیت رسوبات نیز غلظت عناصر آرسنیک و کروم نگران‌کننده بود. در مجموع می‌توان گفت هرچند غلظت عناصر روی، آهن، نیکل، کبالت، آلومینیوم و منگنز نگران‌کننده نیست، اما مقادیر عناصر کروم، سلنیوم و آرسنیک نگران‌کننده بوده و به‌طور بالقوه می‌تواند تهدید کننده سلامت موجودات باشند. بنابراین لازم است تا تمهیدات لازم برای کاهش مقادیر این آلاینده‌ها اتخاذ شده و پایش مدام نیز صورت گیرد. برای مطالعات بوم‌شناسی، این رودخانه از لحاظ عناصر کروم، سلنیوم و آرسنیک می‌تواند نسبتاً آلوده و برای سایر عناصر مورد مطالعه غیرآلوده در نظر گرفته شود.

References

- Gu YG, Huang HH, Lin Q. Concentrations and human health implications of heavy metals in wild aquatic organisms captured from the core area of Daya Bay's Fishery Resource Reserve, South China Sea. *Environ Toxicol Pharmacol*. 2016;45:90-4.
- Malvandi H. Preliminary evaluation of heavy metal contamination in the Zarrin-Gol River sediments, Iran. *Mar Pollut Bull* [Internet]. 2017;117(1-2):547-53. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.035>
- Harikumar PS, Nasir UP. Ecotoxicological impact assessment of heavy metals in core sediments of a tropical estuary. *Ecotoxicol Environ Saf* [Internet]. 2010;73(7):1742-7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.08.022>
- Islam S, Bhuiyan M, Rume T, Mohinuzzaman M, Management D. Assessing Heavy Metal Contamination in the Bottom Sediments of Shitalakhya River, Bangladesh; Using Pollution Evaluation Indices and Geo-spatial Analysis. 2016;2(3):299-312.
- Quan S, Yan B, Lei C, Yang F, Li N, Xiao X, et al. Science of the Total Environment Distribution of heavy metal pollution in sediments from an acid leaching site of e-waste. *Sci Total Environ* [Internet]. 2014;499:349-55. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.084>
- Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques. *J Hazard Mater*. 2011;195:355-64.
- Vu CT, Lin C, Nguyen KA, Shern CC, Kuo YM. Ecological risk assessment of heavy metals sampled in sediments and water of the Houjing River, Taiwan. *Environ Earth Sci* [Internet]. 2018;77(10):0. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-018-7573-5>
- Malvandi H, Esmaili-Sari A, Aliabadian M. Mercury contamination in Khrumulia (Capoeta capoeta) from the Cheshme Kile and Zarrin Gol Rivers in Iran and human health risk assessment. *Bull Environ Contam Toxicol*. 2014;93(4):472-7.
- Alahabadi A, Malvandi H. Contamination and ecological risk assessment of heavy metals and metalloids in surface sediments of the Tajan River, Iran. *Mar Pollut Bull* [Internet]. 2018;133(June):741-9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.030>
- Karimi M, Ghassempoor Shirazi SMR. Geochemical distribution and level of heavy metals pollution (lead, zinc, nickel, chrome and arsenic) in sediments of Kor river (South Marvdasht). *J Geotech Geol (Applied Geol)*. 2012;8(2):133-45.
- Mirzaei M, Solgi E. Evaluation of heavy metals concentration (cadmium, copper, manganese, nickel, lead and zinc) in sediments of Zayandehrood River. *J Res Environ Heal* [Internet]. 2015;1(4):251-65. Available from: http://jreh.mums.ac.ir/article_6584.html
- Rastmanesh F, Safaie S, Zarasvandi AR, Edraki M. Heavy metal enrichment and ecological risk assessment of surface sediments in Khorramabad River, West Iran. *Environ Monit Assess*. 2018;190(5).
- Rao Q, Sun Z, Tian L, Li J, Sun W, Sun W. Assessment of arsenic and heavy metal pollution and ecological risk in inshore sediments of the Yellow River estuary, China. *Stoch Environ Res Risk Assess* [Internet]. 2018;32(10):2889-902. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s00477-018-1588-z>
- Wang Q, Chen Q, Yan D, Xin S. Distribution, ecological risk, and source analysis of heavy metals in sediments of Taizihe River, China. *Environ Earth Sci* [Internet]. 2018;77(16):569. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s12665-018-7750-6>

15. Abdullah MZ, Louis VC, Abas MT. Metal pollution and ecological risk assessment of Balok River sediment , Pahang Malaysia. *Am J Environ Eng.* 2015;5(3A):1-7.
16. Singh KP, Mohan D, Singh VK, Malik A. Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments—a tributary of the Ganges, India. *J Hydrol.* 2005;312(1-4):14-27.
17. Zhao H, Li X. Risk assessment of metals in road-deposited sediment along an urban e rural gradient. *Environ Pollut [Internet].* 2013;174:297-304. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2012.12.009>
18. Jiang X, Lu WX, Zhao HQ, Yang QC, Yang ZP. Potential ecological risk assessment and prediction of soil heavy-metal pollution around coal gangue dump. *Nat Hazards Earth Syst Sci.* 2014;14(6):1599-610.
19. Karbassi A, Habibzadeh, Gholamreza Nabi Bidhendi F, Ghazban SK, Nabi Bidehendi GR, Ghazban F, Koukabi S. Chemical partitioning and pollution intensity of heavy metals in Siahруд River sediment. *J enviromental Stud.* 2010;36(53):11-20.
20. Ghashghaie A, Rostami S. Contamination and fractionation of heavy metals in bedload sediments of the Siahroud River (Qaem-Shar area-Mazandaran Province). *J Stratigr Sedimentol Res.* 2016;32(63):73-90.
21. Taheri K, Bahrami Far N, Moradi HR, Ahmad Pour M. The role of agricultural and residential land-uses on organophosphorus and organochlorine pesticides residues in water and sediments of Siahруд River, Qaemshahr. *J Environ Stud [Internet].* 2015 Mar 21;41(1):25-37. Available from: https://jes.ut.ac.ir/article_53897.html
22. Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geo J.* 1969;2:108-118.
23. Malvandi H, Hassanzadeh N. Environmental and Ecological risk evaluation of heavy metals in surface sediments of the CheshmeKile River, Mazandaran. *Iran J Heal Environ.* 2018;11(3):419-32.
24. Dalmiglio A, Grespi F, Pasini M, Roella V, Genoni P. Indagine preliminare sui sedimenti del fiume Olona settentrionale. *Rep ARPA Lomb.* 2005;20.
25. Ali MM, Ali ML, Islam MS, Rahman MZ. Preliminary assessment of heavy metals in water and sediment of Karnaphuli River, Bangladesh. *Environ Nanotechnology, Monit Manag [Internet].* 2016;5:27-35. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215153216300022>
26. Kadhum SA, Ishak MY, Zulkifli SZ. Evaluation and assessment of baseline metal contamination in surface sediments from the Bernam River, Malaysia. *Environ Sci Pollut Res.* 2016;23(7):6312-21.
27. Ribeiro C, Couto C, Ribeiro AR, Maia AS, Santos M, Tiritan ME, et al. Distribution and environmental assessment of trace elements contamination of water, sediments and flora from Douro River estuary, Portugal. *Sci Total Environ.* 2018;639:1381-93.
28. Zheng NA, Wang Q, Liang Z, Zheng D. Characterization of heavy metal concentrations in the sediments of three freshwater rivers in Huludao City, Northeast China. *Environ Pollut.* 2008;154(1):135-42.
29. Burton GA. Sediment quality criteria in use around the world. *Limnology.* 2002;3(2):65-75.
30. Iqbal J, Shah MH. Occurrence, risk assessment, and source apportionment of heavy metals in surface sediments from Khanpur Lake, Pakistan. *J Anal Sci Technol.* 2014;5(1):28.
31. Sobhanardakani S, Habibi H. Investigation of heavy metals content in sediments of Shirin Su wetland, western Iran. *J Chem Heal Risks.* 2016;6(4).