

# Investigating the Potential Toxic Elements of Arsenic, Cadmium and Nickel by Means of Water Quality Indicators and Sediment Pollution Indicators in the Karkheh River

**Laleh Roomiani**

Department of Fisheries, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

**Mohammad Velayatzadeh**

\*Master's degree of Industrial Safety, Caspian Institute of Higher Education, Qazvin, Iran. (Corresponding Author): mv.5908@gmail.com

Received: 2023/09/19

Accepted: 2024/02/08

Doi: 10.22038/jreh.2024.24338

## Abstract

**Background and Purpose:** Potentially toxic elements represent significant threats to aquatic ecosystems. This study aimed to assess environmental pollution indicators and analyze potentially toxic elements present in the water and surface sediments of the Karkheh River in 2020.

**Materials and Methods:** A total of 180 samples of water and sediments from three designated stations along the Karkheh River were collected and prepared following ASTM guidelines. The analysis of the target elements utilized atomic absorption spectroscopy coupled with a graphite and hydride furnace system facilitated by a Perkin Elmer 4100 device.

**Results:** The highest concentrations of the studied elements in the water of the Karkheh River were recorded for cadmium at 8.01 mg/liter, while in sediments, nickel exhibited the highest concentration at 13.02 mg/kg. Comparative analysis revealed that concentrations of cadmium, arsenic, and nickel in the river water exceeded the World Health Organization's standard limits ( $P < 0.05$ ) across all three stations. Conversely, arsenic and nickel levels in sediments fell below the standard set by the National Environmental Organization of Iran ( $P < 0.05$ ). Cadmium concentrations in sediments at the first ( $P$  value=0.0) and second ( $P$  value=0.255) stations were below the national standard, whereas at the third station, they exceeded it ( $P$  value = 0.459).

**Conclusion:** The assessment of water pollution indicators suggests that the Karkheh River exhibits minor pollution concerning potentially toxic elements such as cadmium, arsenic, and nickel, which pose risks to aquatic organisms. Sediment analysis indicates elevated cadmium, arsenic, and nickel concentrations, likely influenced by agricultural and industrial activities along the river. The findings underscore the impact of geological and anthropogenic factors on the Karkheh River ecosystem, highlighting the need for comprehensive management strategies.

**Keywords:** Water Quality Assessment, Indicators of Pollution, Potentially Toxic Elements, Human Health Risk

**Open Access Policy:** This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Citation:** Roomiani L, Velayatzadeh M. Investigating the Potential Toxic Elements of Arsenic, Cadmium and Nickel by Means of Water Quality Indicators and Sediment Pollution Indicators in the Karkheh River. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Spring 2024; 10(1):77-95.

# بررسی عناصر بالقوه سمی آرسنیک، کادمیوم و نیکل به وسیله شاخص‌های کیفی آب و شاخص‌های آلودگی رسوبات در رودخانه کرخه

## چکیده

**زمینه و هدف:** عناصر بالقوه سمی جزء خطرناک‌ترین آلاینده‌های اکوسیستم‌های آبی می‌باشند. این پژوهش با هدف تجزیه و تحلیل شاخص‌های آلودگی محیط‌زیستی و ارزیابی عناصر بالقوه سمی در آب و رسوبات سطحی رودخانه کرخه در سال ۱۳۹۹ انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** در مجموع ۱۸۰ نمونه آب و رسوبات رودخانه کرخه از سه ایستگاه مورد مطالعه بر اساس روش ASTM تهیه شد. سنجش عناصر مورد مطالعه به روش جذب اتمی و سیستم کوره گرافیتی و هیدرید با کمک دستگاه Perkin Elmer 4100 انجام شد.

**یافته‌ها:** بیشینه عناصر مورد مطالعه در آب رودخانهی کرخه مربوط به کادمیوم  $0.1/8$  میلی‌گرم بر لیتر و در رسوبات بیشینه  $0.2/13$  میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به نیکل بود. غلظت کادمیوم، آرسنیک و نیکل در آب رودخانهی کرخه در سه ایستگاه مورد مطالعه در مقایسه با حد مجاز استاندارد سازمان بهداشت جهانی بالاتر بود ( $p < 0.05$ )، اما مقادیر آرسنیک و نیکل در رسوبات رودخانه کرخه در ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقایسه با استاندارد ملی سازمان محیط‌زیست ایران پایین‌تر به دست آمد ( $p < 0.05$ ). همچنین میزان کادمیوم در رسوبات در ایستگاه اول ( $p\text{-value} = 0.0$ ) و دوم ( $p = 0.255$ ) ( $\text{value}$ ) رودخانه کرخه پایین‌تر از استاندارد ملی سازمان محیط‌زیست ایران بود، اما غلظت این عنصر در ایستگاه سوم بالاتر از استاندارد به دست آمد ( $p\text{-value} = 0.459$ ).

**نتیجه‌گیری:** شاخص‌های آلودگی آب رودخانهی کرخه نشان داد که از نظر عناصر بالقوه سمی کادمیوم، آرسنیک و نیکل آلودگی کمی دارد و چنین به نظر می‌رسد که این آلاینده‌ها می‌توانند باعث مشکلات برای موجودات زنده شوند. با توجه به شاخص‌های آلودگی رسوبات، عناصر کادمیوم، آرسنیک و نیکل دارای غلظت بالایی بوده و تحت تاثیر فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی حاشیه رودخانه کرخه هستند. چنین استنباط می‌شود سنگ‌های مادری و فعالیت‌های انسانی از بالادست رودخانه تا قسمت پایین‌دست این اکوسیستم آبی را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

**کلید واژه‌ها:** ارزیابی کیفیت آب، شاخص‌های آلودگی، عناصر بالقوه سمی، ریسک سلامت انسان

لاله رومیانی

گروه شیلات، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

محمد ولایت‌زاده

دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد ایمنی صنعتی، مؤسسه آموزش عالی کاسپین، قزوین، ایران.

(نویسنده مسئول)

mv.5908@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۹

نوع مقاله: پژوهشی

◀ **استناد:** رومیانی ل، ولایت زاده م. بررسی عناصر بالقوه سمی آرسنیک، کادمیوم و نیکل به وسیله شاخص-

های کیفی آب و شاخص‌های آلودگی رسوبات در رودخانه کرخه. فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. بهار

۱۴۰۲؛ (۱) ۷۷-۹۵.

آب یکی از منابع طبیعی ضروری برای حیات و توسعه انسان و بخش مهمی از سیستم بیولوژیکی است. کمتر از ۳ درصد از کل منابع آب را منابع آب شیرین تشکیل می‌دهد و تنها کمتر از ۱ درصد آن برای استفاده انسانی مناسب است (۱). در حفظ حیات زیستی موجودات آبی و خشکی‌زی، منابع آب شیرین نقش اجتناب‌ناپذیری ایفا می‌کنند و به‌طور مستقیم با شرب، کشاورزی و آبی‌پروری مرتبط هستند (۲). حدود ۶۹ درصد از کل آب شیرین در یخچال‌های طبیعی قاره‌ای و کوهستانی، حدود ۳۰ درصد در مخازن آب زیرزمینی و بخش باقی‌مانده در آب‌های سطحی دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و تالاب‌ها ذخیره شده‌اند (۳). آب شیرین به‌طور مساوی بر روی زمین توزیع نمی‌شود. بهره‌برداری از منابع آب برای مصارف صنعتی، کشاورزی، تولید برق، حمل‌ونقل و سایر فعالیت‌های انسانی، مشکلات آلودگی عظیمی را ایجاد کرده و منجر به مشکلاتی در دسترسی به آب شیرین برای جمعیت روبه رشد انسانی شده است (۴،۵).

منابع آب می‌تواند در برابر آلودگی عناصر بالقوه سمی<sup>۱</sup> در محیط آسیب‌پذیر باشند (۶). در اکوسیستم‌های آب شیرین، عناصر بالقوه سمی<sup>۲</sup> به‌دلیل ماندگاری در طبیعت به یکی از سمی‌ترین مواد شیمیایی تبدیل شده‌اند (۷). عناصر بالقوه سمی توسط فعالیت‌های انسانی مانند معدن، ذوب، فرآیندهای بهره‌برداری متالورژی و صنعتی، حفاری و حمل‌ونقل، به محیط‌زیست رها می‌شوند که در نهایت منجر به آلودگی بیشتر محیط اطراف خواهند شد (۸-۱۱). همچنین فرآیندهای طبیعی باعث بروز عناصر بالقوه سمی به‌دلیل واکنش‌های پیچیده فیزیکی و شیمیایی با هوازدگی سنگ‌های مادری، اکسیداسیون، انحلال ترکیبات معدنی و جابه‌جایی مواد معدنی اسیدی حاوی مقادیر بالای عناصر بالقوه سمی می‌شود که می‌تواند به شدت محیط ژئوشیمیایی اطراف را تحت تاثیر قرار دهد (۱۲،۱۳). همچنین سایر فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و پساب‌های خانگی شهری و روستایی، می‌تواند کیفیت آب‌های سطحی و منابع آب شیرین را در یک دوره‌ی زمانی طولانی به صورت منطقه‌ای، تغییر داده و محیط‌زیست آن‌ها را تحت تاثیر قرار دهد (۱۴،۱۵). تحرک عناصر بالقوه سمی در محیط آبی

به‌طور عمده توسط ترکیبات رسوبی و فعالیت‌های انسانی کنترل می‌شود که ممکن است پارامترهای محیطی و فعالیت‌های زیستی را تغییر دهد (۱۶). این آلاینده‌ها در محیط‌های آبی به‌طور عمده از منابع قاره‌ای و خشکی ناشی می‌شوند که از طریق رودخانه‌ها جابه‌جا می‌شوند (۱۷). عناصر بالقوه سمی در رسوبات رودخانه‌ها نیز می‌توانند از فرآیندهای طبیعی از جمله فرسایش و هوازدگی سنگ‌های مختلف و حمل‌ونقل رودخانه‌ای و همچنین آلودگی‌های انسانی مانند رسوبات اتمسفری، تخلیه پساب‌های بیمارستانی و کشتارگاه‌ها، آبی‌پروری، فعالیت‌های کشاورزی و تخلیه پساب‌های صنعتی ناشی شوند (۱۸-۲۰). رودخانه‌ی کرخه از ارتفاعات الوند، ملایر و نهاوند توسط یکی از سرشاخه‌های مهم خود یعنی گاماسیاب، سرچشمه گرفته و بخش نسبتاً وسیعی از زاگرس میانی را زهکش نموده، در نهایت وارد هورالعظیم می‌شود. وسعت حوضه آبریز آن حدود ۵۰۷۶۸ کیلومتر مربع است که حدود ۱۷۰۹۴ کیلومتر مربع آن دشت‌ها و مناطق کوهپایه و بقیه را ارتفاعات اشغال می‌کند. بلندترین نقطه حوضه ۲۰۰۰ متر و در ارتفاعات زاگرس میانی و پایین‌ترین نقطه آن در شمال-شرق سوسنگرد، ۵۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. طول رودخانه کرخه از سرمنشا (گاماسیاب) تا هورالعظیم ۸۷۵ کیلومتر می‌باشد (۲۱). درخصوص عناصر سمی و فلزات سنگین در رودخانه کرخه و منابع آبی مجاور آن، مطالعات و تحقیقاتی انجام شده است. پژوهشگران انباشت زیستی عناصر سرب و نیکل را در گیاه لویی<sup>۳</sup> رودخانه شاوور را بررسی کردند (۲۲،۲۳). بررسی شاخص‌های مختلف استفاده‌شده در رودخانه‌ی کرخه در منطقه کرخه نور شهرستان هویزه گزارش شده است که مقادیر فلزات سنگین مورد مطالعه در منطقه نسبت به مقادیر میانگین پوسته، استانداردهای کیفیت رسوب آمریکا و تعیین‌شده توسط محیط‌زیست کانادا در حد پایین‌تری هستند. درمورد مس می‌توان گفت که گرچه نسبت به استاندارد کانادا بیشتر گزارش شده است، اما از آن‌جا که نسبت به غلظت میانگین پوسته کمتر بوده، لذا احتمالاً منبع ورودی از این آلاینده به محیط وجود ندارد (۲۴). در تحقیق دیگری عناصر سمی و سنگین جیوه، کادمیوم، سرب، روی، آهن، مس و منگنز در

<sup>3</sup> Typha Latifolia

<sup>1</sup> Potentially Toxic Elements

<sup>2</sup> PTEs

اندام‌های عضله، کبد و آبشش ماهی بیاه<sup>۱</sup> رودخانه کرخه بررسی شده‌اند (۲۵). میزان فلزات سنگین جیوه، آرسنیک، نیکل و کادمیوم در آب، رسوبات و چهار گونه گیاهان آبی عدسک آبی<sup>۲</sup>، گندمک آبی<sup>۳</sup>، ناز باتلاقی<sup>۴</sup> و آلاله آبی<sup>۵</sup> در رودخانه کرخه نیز گزارش شده است (۲۶).

رودخانه‌ی کرخه دارای عوامل آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای بوده که گسترش شهرنشینی و فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی در حاشیه رودخانه کرخه از این دو گروه آلودگی می‌باشند. در استان‌های لرستان و کرمانشاه در سرچشمه رودخانه‌ی کرخه واحدهای آبی‌پروری و کشتارگاه‌ها و به‌دنبال آن تخلیه پساب آن‌ها از جمله عوامل موثر در آلودگی رودخانه کرخه هستند. ورود پساب‌های شهری و روستایی مناطق مختلف از جمله هویزه و سوسنگرد در پایین‌دست رودخانه باعث آلودگی آب توسط آلاینده‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی گردیده است. همچنین استقرار کارخانه‌های صنایع غذایی و پتروشیمی و سایر واحدهای صنعتی و کارگاه‌های کوچک در بالادست رودخانه در استان کرمانشاه از عوامل آلودگی آب این رودخانه می‌باشند (۲۲، ۲۴، ۲۶).

بنابراین با توجه به اهمیت پایش و سنجش عناصر بالقوه سمی و نقش آن‌ها در به خطر انداختن سلامت عمومی

انسان و موجودات زنده، این پژوهش با هدف تجزیه و تحلیل شاخص‌های آلودگی محیط‌زیستی و ارزیابی عناصر بالقوه سمی در آب و رسوبات رودخانه‌ی کرخه انجام شد. در این تحقیق برای اولین بار از شاخص‌های آلودگی و کیفی آب و رسوبات برای ارزیابی عناصر سمی نیکل، کادمیوم و آرسنیک برای تعیین وضعیت آلودگی رودخانه کرخه استفاده شده است.

## روش کار

### معرفی رودخانه

حوزه‌ی آبریز رودخانه کرخه به وسعت حدود ۴۳ هزار کیلومتر مربع، بین ۴۶ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (۲۶). محل نمونه برداری رودی آب و رسوبات در این تحقیق در محدوده استان خوزستان بود. موقعیت جغرافیایی ایستگاه اول در محدوده پارک ملی کرخه (۳۲ درجه و ۴ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۱۳ دقیقه طول شرقی)، ایستگاه دوم در محدوده‌ی پایین‌دست شهر الوان (۳۱ درجه و ۵۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی) و ایستگاه سوم در مجاورت روستای بروایه (۳۱ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی) بود (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی نمونه‌برداری آب و رسوبات رودخانه‌ی کرخه

<sup>4</sup> Bacopa Monnieri

<sup>5</sup> Ranunculus Fluitans

<sup>1</sup> Liza Abu

<sup>2</sup> Lemna Gibba

<sup>3</sup> Vallisneria Spiralis

### نمونه برداری آب و رسوبات

از هر ایستگاه تعداد ۳۰ نمونه آب و ۳۰ نمونه رسوب جمع-آوری گردید که در مجموع ۱۸۰ نمونه آب و رسوبات رودخانه‌ی کرخه از سه ایستگاه مورد مطالعه تهیه شد. برای نمونه برداری از آب، بطری نمونه بردار روتنر به عمق یک متری فرستاده و نمونه‌های آب در بطری‌هایی که از قبل استریل شده بودند ریخته و به آزمایشگاه منتقل شدند. بطری‌ها با محلول آب مقطر و اسید نیتريك ۲ درصد (ساخت شرکت مرک آلمان) شستشو شدند. نمونه برداری رسوبات با استفاده از دستگاه نمونه بردار گرب اکمن<sup>۱</sup> با سطح مقطع ۲۲۵ سانتیمتر از ۳۰ سانتیمتری بستر انجام شد. نمونه‌های رسوب در بطری‌هایی که از قبل با محلول آب مقطر و اسید نیتريك ۱۰ درصد (ساخت شرکت مرک آلمان) استریل شده بودند به آزمایشگاه منتقل گردیدند (۲۷).

### سنجش عناصر بالقوه سمی

نمونه‌های آب به طور مستقیم درون دستگاه اتوسمپلر قرار داده شدند. نمونه‌های رسوبات را به مدت ۱۲۰ تا ۱۵۰ دقیقه در آون با دمای ۶۵ درجه سلسیوس قرار داده تا به وزن ثابت رسیدند و سپس از داخل آون خارج شدند. برای هضم نمونه‌ها از روش مرطوب استفاده شد، به این صورت که ۰/۵ گرم از نمونه در یک بالن ۲۵۰ میلی لیتر ریخته شد و به آن ۲۵ میلی لیتر اسید سولفوریک غلیظ، ۲۰ میلی لیتر اسید نیتريك ۷ مولار و ۱ میلی لیتر محلول مولیبدات سدیم ۲ درصد اضافه شد و از سنگ جوش برای یکنواخت جوشیدن استفاده شد، سپس نمونه سرد شده و به آن از بالای مبرد به آرامی ۲۰ میلی لیتر مخلوط اسید نیتريك غلیظ و اسید پرکلریک غلیظ به نسبت ۱:۱ به نمونه اضافه شد، سپس مخلوط حرارت داده شد تا بخارات سفیدرنگ اسید به طور کامل محو شد، مخلوط سرد شده و در حالی که بالن چرخانده می‌شد ۱۰ میلی لیتر آب مقطر از بالای مبرد به آرامی به آن اضافه شد. با حرارت دادن حدود ۱۰۰ دقیقه محلول کاملاً شفافى به دست آمد، این محلول پس از سرد شدن به داخل بالن ژوژه ۱۰۰ میلی لیتر انتقال داده شد و به حجم رسانده شد (۲۸،۲۹). سنجش عناصر مورد مطالعه به روش جذب اتمی و سیستم کوره گرافیتی و

هیدرید با کمک دستگاه پرکین المر ۴۱۰۰ انجام شد. حد تشخیص عناصر توسط این دستگاه جذب اتمی به روش کوره گرافیتی و هیدرید در حد میکروگرم بر کیلوگرم<sup>۲</sup> بود که دارای دقت حدود ۱۰۰۰ برابر سیستم شعله می‌باشد. ابتدا به ۱۰ میلی لیتر محلول هضم شده نمونه‌ها، ۵ میلی لیتر محلول آمونیم پیرولیدین کاربامات ۵ درصد اضافه شده و به مدت ۲۰ دقیقه نمونه‌ها بهم زده شدند تا عناصر به صورت فرم آلی فلزی در محلول کمپلکس شوند و سپس به نمونه‌ها ۲ میلی لیتر متیل ایزوبوتیل کتون اضافه شد و به مدت ۳۰ دقیقه نمونه‌ها بهم زده شدند و پس از ۱۰ دقیقه نمونه‌ها در دور ۲۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ شدند و عناصر مورد نظر به فاز آلی منتقل شدند. پس از تنظیم کوره و منبع تولید اشعه کاتدی دستگاه و بهینه کردن دستگاه جذب اتمی منحنی کالیبراسیون این عناصر به کمک استانداردهای این عناصر و ماتریکس مدیفایر پالادیم توسط نرم-افزار WinLab32 رسم و مقدار این عناصر در محلول‌های آماده شده اندازه گیری گردید (۳۰). صحت داده‌های به دست آمده با استفاده از استاندارد مرجع<sup>۳</sup> بررسی شد. ابتدا غلظت-های مختلف استاندارد عناصر به تعداد ۵ نمونه ساخته شد و پس از تزریق به دستگاه جذب اتمی منحنی کالیبراسیون عناصر رسم و پس از آن نمونه‌های آماده شده به دستگاه تزریق و غلظت قرائت گردید (۳۱).

### شاخص آلودگی فلزات سنگین<sup>۴</sup>

این شاخص نشان دهنده‌ی کیفیت کلی آب و مخصوص فلزات سنگین است و با رابطه‌های ۱ و ۲ شاخص آلودگی فلزات سنگین<sup>۵</sup> محاسبه شد که در آن شاخص فرعی Qi برای پارامتر نمونه عنصر محاسبه و وزن Wi به پارامتر نمونه عنصر اختصاص داده شد (۳۲). وزن پارامتر را می‌توان بر اساس اهمیت آن نسبت داد که ممکن است بین ۰ تا ۱ داده شود و همچنین می‌توان آن را با مقدار استاندارد برای هر عنصر یا پارامتر نسبت معکوس در نظر گرفت که در این تحقیق پارامتر وزنی کادمیوم، آرسنیک و نیکل به ترتیب ۰/۳، ۰/۲ و ۰/۰۵ در رابطه ۱ قرار داده شد (۳۳). در رابطه ۲، Mi مقدار عنصر نمونه بر حسب میکروگرم بر لیتر، Ii و Si به ترتیب مقادیر ایده‌آل (کادمیوم، آرسنیک و

<sup>۴</sup>Standard Reference Materials; SRM

<sup>۵</sup> Heavy Metal Pollution Index

<sup>۶</sup> HPI

<sup>۱</sup> Ekman Grab

<sup>۲</sup> Perkin Elmer 4100

<sup>۳</sup> ppb

بالاترین غلظت مجاز عنصر مورد نظر (کادمیوم، آرسنیک و نیکل به ترتیب ۳، ۱۰ و ۰ میکروگرم بر لیتر) است. شاخص درجه آلودگی برای طبقه بندی آلودگی فلزات در آب های سطحی به صورت، شاخص درجه آلودگی بیشتر از ۳ آلودگی بالا، شاخص درجه آلودگی در دامنه ۳-۱ آلودگی متوسط و شاخص درجه آلودگی کمتر از ۱ آلودگی کم استفاده می شود (۳۸).

$$Cd = \sum_{i=1}^n Cfi \quad \text{رابطه ۴:}$$

$$Cfi = \frac{Mi}{Si} - 1 \quad \text{رابطه ۵:}$$

#### شاخص آلودگی آب<sup>۴</sup>

شاخص آلودگی آب در همه انواع آبها استفاده می شود و شامل کنترل و نظارت آلودگی آب است. یک عدد قابل مقایسه توسط این شاخص درمورد کمترین حد مجاز برای یک عنصر سمی خاص داده می شود که بر اساس رابطه ۶ محاسبه شد (۳۹) که در آن  $Ri$  محدوده حد مجاز برای یک عنصر خاص می باشد که از سازمان بهداشت جهانی (۲۰۱۱) گرفته شده و حداقل حد قابل قبول استاندارد است (۳۵). اگر شاخص آلودگی آب بالاتر از ۱ به دست آید آب  $n$  بار آلوده شده است و باید با آب با بهترین کیفیت در محدوده قابل قبول رقیق شود. اگر شاخص آلودگی آب در دامنه ۱-۰ باشد، این آب برای اهداف خاص قابل قبول است. اگر شاخص آلودگی آب کمتر از ۰ باشد این آب دارای کیفیت مناسب می باشد (۳۹).

$$WPI = (Mi - Min_i) / Ri \quad \text{رابطه ۶}$$

نیکل به ترتیب ۱۰، ۳ و ۰ میکروگرم بر لیتر) و غلظت استاندارد (کادمیوم، آرسنیک و نیکل به ترتیب ۵، ۵۰ و ۷۰ میکروگرم بر لیتر) برای آب آشامیدنی سالم است که از آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (۲۰۰۹) و سازمان بهداشت جهانی (۲۰۱۱) برای عناصر در نظر گرفته شده است (۳۴، ۳۵). مقدار شاخص آلودگی فلزات سنگین برابر با ۱۰۰ مقدار آستانه ای است که در آن نتایج مضر محتمل است، در حالی که مقدار زیر ۱۰۰ نشان دهنده آلودگی کم توسط عناصر است.

اگر مقدار شاخص آلودگی فلزات سنگین بیش از ۱۰۰ باشد، نشان می دهد که آب برای استفاده مناسب نیست (۳۲).

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n Wi Qi}{\sum_{i=1}^n Wi} \quad \text{رابطه ۱:}$$

$$Qi = \sum_{i=1}^n \frac{|Mi - Li|}{Si - Li} \quad \text{رابطه ۲:}$$

#### شاخص ارزیابی فلزات سنگین<sup>۱</sup>

کیفیت عمومی آب های سطحی با توجه به محتوای عناصر سمی توسط شاخص ارزیابی فلزات سنگین<sup>۲</sup> ارائه می شود که بر اساس رابطه ۳ محاسبه شد که در آن،  $MACi$  بالاترین غلظت مجاز عنصر مورد نظر (کادمیوم، آرسنیک و نیکل به ترتیب ۳، ۱۰ و ۰ میکروگرم بر لیتر) است. کیفیت آب های سطحی بر اساس شاخص ارزیابی فلزات سنگین بالاتر از ۲۰ آلودگی بالا، شاخص ارزیابی فلزات سنگین در دامنه ۲۰-۱۰ آلودگی متوسط و شاخص ارزیابی فلزات سنگین کمتر از ۱۰ آلودگی کم طبقه بندی می شوند (۳۶، ۳۷).

$$HEI = \sum_{i=1}^n \frac{Mi}{MACi} \quad \text{رابطه ۳:}$$

#### شاخص درجه آلودگی<sup>۳</sup>

اثرات تجمعی عناصر مورد مطالعه بر روی آب های سطحی توسط شاخص درجه آلودگی<sup>۴</sup> نشان داده می شود که به صورت رابطه ۴ و ۵ محاسبه گردید که در آن  $Cfi$  فاکتور آلودگی را برای عنصر نمونه آب نشان می دهد. در رابطه ۵،  $Mi$  مقدار عنصر نمونه بر حسب میکروگرم بر لیتر و  $Si$

<sup>4</sup> Cd

<sup>5</sup> Water Pollution Index

<sup>1</sup> Heavy Metal Evaluation Index

<sup>2</sup> HEI

<sup>3</sup> Contamination Degree



بود. با توجه به مقادیر شاخص شاخص زمین انباشت، درجه آلودگی را می‌توان به هفت طبقه تقسیم‌بندی کرد.  $I_{geo} < 0$  غیر آلوده، ۱-۰ غیر آلوده تا کمی آلوده، ۲-۱ کمی آلوده، ۳-۲ کمی آلوده تا خیلی آلوده، ۴-۳ خیلی آلوده، ۵-۴ خیلی آلوده تا شدیداً آلوده و  $5 >$  شدیداً آلوده طبقه‌بندی شده است (۴۱).

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (1.5 \times B_i)] \quad \text{رابطه ۸:}$$

#### شاخص خطر زیست‌محیطی بالقوه<sup>۶</sup>

شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه اغلب برای ارزیابی درجه خطر اکولوژیکی عناصر سمی بالقوه در رسوبات منابع آبی استفاده شده است. این روش علاوه بر اینکه سطوح آلودگی در رسوبات را ارزیابی می‌کند، بلکه اثرات اکولوژیکی و زیست‌محیطی را با سم‌شناسی ترکیب می‌کند که ارزیابی بهتری از خطرات بالقوه آلودگی عناصر سمی بالقوه با سطح شاخص ارائه می‌دهد (۴۲). ابتدا برای هر نمونه رسوب فاکتور آلودگی با استفاده از رابطه ۹ محاسبه شد که در آن  $C_{fi}$  عامل آلودگی عنصر  $i$  در نمونه رسوب،  $C_{si}$  غلظت عنصر  $i$  در نمونه رسوب و  $C_{ni}$  مقدار پس زمینه ژئوشیمیایی عنصر  $i$  (برای کادمیوم، نیکل و آرسنیک به ترتیب ۰/۲، ۸۰ و ۱/۵) است. بر اساس مقادیر فاکتور آلودگی، درجات آلودگی را می‌توان به آلودگی کم ( $>1$ )، آلودگی متوسط (۳-۱)، آلودگی قابل توجه (۶-۳) و آلودگی بسیار بالا ( $<6$ ) تقسیم‌بندی کرد (۴۳).

$$C_{fi} = C_{si} / C_{ni} \quad \text{رابطه ۹:}$$

سپس شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه (RI) به کمک رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ محاسبه شد که  $E_{ri}$  عامل خطر اکولوژیکی بالقوه عنصر سمی  $i$  است،  $Tri$  فاکتور پاسخ سمیت عنصر  $i$  است. مقادیر  $Tri$  برای کادمیوم، نیکل و آرسنیک به ترتیب ۳۰، ۵ و ۱۰ است. عامل خطر اکولوژیکی بالقوه برای هر عنصر در پنج سطح خطر کم

#### شاخص سمیت فلزات سنگین<sup>۱</sup>

غلظت عناصر بالقوه سمی یافت شده در منابع آبی که بر سلامت انسان تاثیر دارند با شاخص بار سمیت فلزات سنگین ارزیابی می‌شوند. با ضرب شدت خطر عناصر بالقوه سمی با غلظت مشاهده‌شده عناصر بالقوه سمی بر اساس رابطه ۷ محاسبه شد که در آن  $C$  غلظت عنصر سمی است،  $n$  عدد تعداد عناصر و  $HIS$  امتیاز شدت خطر است. امتیاز شدت خطر از آژانس ثبت مواد سمی و بیماری‌ها<sup>۳</sup> به دست می‌آید. امتیاز بر اساس فراوانی وقوع ماده خطرناک در فهرست اولویت‌های ملی<sup>۴</sup> تهیه شده توسط ATSDR (کادمیوم، آرسنیک و نیکل به ترتیب ۱۳۱۸، ۱۶۷۶ و ۹۹۳)، سطح سمیت این مواد و احتمال قرار گرفتن در معرض انسان ارائه می‌شود. حداکثر امتیاز برای یک فلز کمیاب و سمی ۱۸۰۰ است که در آن ۶۰۰ امتیاز برای فرکانس  $NPL$ ، سمیت و پتانسیل قرار گرفتن در معرض انسان در نظر گرفته شده است. دو شاخص  $HPI$  و  $HEI$  فقط کیفیت آب و تاثیر آن را بر اساس مقدار آستانه مشخص می‌کنند. آن‌ها فقط بیان می‌کنند که کیفیت آب نامناسب است و تاثیر سلامتی فراتر از حد آستانه ( $HPI > 100$  یا  $HEI > 10$ ) دارد، اما شاخص بار سمیت فلزات سنگین غلظت آلودگی را در یک اکوسیستم یا منبع آبی کمی‌سازی می‌کند و درصد حذف مورد نیاز فلزات سمی از آن منبع آبی را پیش‌بینی می‌کند تا آن را برای استفاده انسان ایمن کند. شاخص بار سمیت فلزات سنگین میزان فلز سنگین سمی موجود در آب را اندازه‌گیری می‌کند که بر سلامت انسان تاثیر می‌گذارد (۴۰).

$$HMTL = \sum_{i=1}^n c \times HIS \quad \text{رابطه ۷:}$$

#### شاخص زمین انباشت<sup>۵</sup>

شاخص زمین انباشت بر اساس رابطه ۸ محاسبه شد که  $C_i$  غلظت عنصر،  $B_i$  مقدار پس‌زمینه عنصر و ضریب ثابت ۱/۵ برای به حداقل رساندن تاثیر اثر لیتوژنیک و غنی‌سازی ناشی از ورودی‌های رسوب از منابع متعدد

<sup>4</sup> National Priorities List

<sup>5</sup> Geo-Accumulation Index

<sup>6</sup> Potential Ecological Risk Index

<sup>1</sup> Heavy Metal Toxicity Load

<sup>2</sup> Hazard Intensity Score

<sup>3</sup> Agency for Toxic Substances and Disease Registry

که مورد مطالعه قرار می‌گیرند در منطقه مورد مطالعه را مشخص می‌کند. این شاخص در پنج سطح بدون آلودگی ( $NIPI < 0.7$ )، خطر هشدار آلودگی ( $0.7 \leq NIPI < 1$ )، سطح آلودگی کم ( $1 \leq NIPI < 2$ )، سطح آلودگی متوسط ( $2 \leq NIPI < 3$ )، سطح بالای آلودگی ( $NIPI > 3$ ) طبقه‌بندی شده است (۴۳).

$$NIPI = \sqrt{\frac{Pl_i^2 \max + Pl_i^2 \text{ave}}{2}} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

### تجزیه و تحلیل آماری

غلظت عناصر سمی بالقوه آب و رسوبات به وسیله نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۲ و رسم جداول و محاسبات شاخص‌های آلودگی با استفاده از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۰۷ انجام شد. میانگین داده‌ها به منظور مقایسه اختلاف معنی‌دار با حدود اطمینان ۹۵٪ ( $P=0.05$ ) با استفاده از آنالیز واریانس یکطرفه<sup>۳</sup> صورت پذیرفت. برای مقایسه آماری بین میانگین غلظت عناصر سمی بالقوه آب و رسوبات رودخانه کرخه با استانداردهای ملی و جهانی از آزمون t استفاده شد.

### یافته‌ها

کمینه، بیشینه، میانگین، انحراف معیار، خطای استاندارد و واریانس عناصر سمی بالقوه آب و رسوبات رودخانه کرخه در جدول ۱ ارائه شده است. بیشینه عناصر مورد مطالعه در آب رودخانه کرخه مربوط به کادمیوم  $8/01$  میلی‌گرم بر لیتر و در رسوبات بیشینه  $13/02$  میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به نیکل بود. انحراف معیار داده‌های مورد مطالعه نشان داد که پراکندگی عناصر مورد مطالعه در آب و رسوبات در ایستگاه‌های ۱، ۲ و ۳ بالا بوده است. با توجه به اینکه چولگی و کشیدگی داده‌ها در تمامی موارد بین ۲ و ۲- به دست آمد، بنابراین داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار هستند، اما با توجه به برخی نتایج، داده‌ها دارای چولگی بالا می‌باشند که نشان از پراکندگی بالای مقادیر عناصر دارد و انحراف معیار بالای میانگین غلظت‌ها را توجیه می‌کند (جدول ۱).

$Er < 40$ ، خطر متوسط  $40 \leq Er < 80$ ، خطر قابل توجه  $80 \leq Er < 160$ ، خطر زیاد  $160 \leq Er < 320$  و خطر خیلی زیاد  $Er \geq 320$  رده بندی شده است. برای تحلیل شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه (RI) چهار رده ریسک اکولوژیکی کم  $RI < 150$ ، ریسک اکولوژیکی متوسط  $150 \leq RI < 300$ ، ریسک اکولوژیکی قابل توجه  $300 \leq RI < 600$  و ریسک اکولوژیکی خیلی زیاد  $RI \geq 600$  طبقه‌بندی شده است (۴۳).

$$Er_i = Tr_i \times Cf_i \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n Er \quad \text{رابطه ۱۱}$$

### فاکتور غنی‌شدگی<sup>۱</sup>

یک روش رایج برای تخمین تاثیر انسانی بر رسوبات، محاسبه یک فاکتور غنی‌سازی نرمال شده برای غلظت عنصر سمی بالاتر از سطح پس‌زمینه آلوده است. روش فاکتور غنی‌شدگی محتوای عنصر سمی اندازه‌گیری شده را با توجه به یک نمونه فلزی مرجع مانند آهن یا آلومینیوم نرمال می‌کند. آهن معمولاً دارای غلظت طبیعی نسبتاً بالایی است و

بنابراین انتظار نمی‌رود که به‌طور قابل توجهی از منابع انسانی در رسوبات رودخانه‌ای غنی شود (۴۴). فاکتور غنی‌شدگی بر اساس رابطه ۱۲ به دست آمد که در آن  $M_x$  و  $F_{ex}$  غلظت‌های نمونه رسوب عناصر سمی و آهن هستند، در حالی که  $M_b$  و  $F_{eb}$  غلظت آن‌ها در پس‌زمینه مناسب (کادمیوم، نیکل و آرسنیک به ترتیب  $0.02$ ،  $80$  و  $1/5$ ) یا مرجع پایه (آهن  $41000$ ) هستند (۴۵).

$$EF = M_x \times F_{ex} / M_b \times F_{eb} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

### شاخص آلودگی نمره<sup>۲</sup>

این شاخص از جذر مجموع بیشینه و میانگین مقادیر عنصر سمی تقسیم بر ۲ بر اساس رابطه ۱۳ محاسبه گردید. شاخص نمره ریسک آلودگی برای همه فلزاتی

<sup>3</sup> ANOVA One Way

<sup>1</sup> Enrichment factor

<sup>2</sup> Nemerow Index



جدول ۱. نتایج پارامترهای توصیفی عناصر بالقوه سمی (PETS) در آب و رسوبات رودخانه کرخه

نمونه	عناصر	ایستگاه	کمینه (میلی-گرم بر لیتر)	بیشینه (میلی-گرم بر کیلوگرم)	میانگین	انحراف معیار	خطای استاندارد	واریانس	چولگی	کشیدگی
آب	کادمیوم	اول	۰/۱۰	۰/۶۰	۰/۲۴	۰/۱۸	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۷۸۹	-۰/۷۱۵
		دوم	۱/۴۹	۴/۲۳	۲/۲۹	۰/۶۳	۰/۱۱۵	-۰/۳۹۷	۱/۰۶۹	۱/۵۵۵
		سوم	۱/۰۱	۸/۰۱	۳/۱۸	۱/۸۴	۰/۳۳۶	۳/۳۹۹	۱/۱۰۷	۰/۵۵۲
	آرسنیک	اول	۰/۵۰	۷	۲/۸۶	۱/۴۹	۰/۲۷۲	۲/۲۳۲	۱/۱۶۰	۱/۹۱۹
		دوم	۰/۱۲	۳/۰۱	۱/۰۶	۰/۸۲	۰/۱۵۰	۰/۶۷۹	۱/۱۰۸	۰/۴۴۷
		سوم	۰/۵۰	۴	۱/۹۷	۰/۹۴	۰/۱۷۱	۰/۸۸۴	۰/۵۸۳	-۰/۳۰۹
	نیکل	اول	۱/۲۹	۴/۰۶	۳/۶۳	۰/۸۱	۰/۱۴۹	۰/۶۶۷	۰/۱۸۲	-۱/۰۰۶
		دوم	۰/۱۴	۳	۱/۰۳	۰/۷۰	۰/۱۲۸	۰/۴۹۳	۰/۹۶۱	۰/۴۶۳
		سوم	۱	۶/۰۱	۲/۶۵	۱/۲۹	۰/۲۳۵	۱/۶۶۵	۱/۰۸۸	۱/۱۳۸
رسوبات	کادمیوم	اول	۰/۱۰	۲/۰۴	۰/۸۳	۰/۷۱	۰/۱۳۱	۰/۵۱۵	۰/۷۴۲	-۱/۰۹۴
		دوم	۱/۲۵	۶/۴۵	۳/۰۲	۱/۰۶	۰/۱۹۵	۱/۱۴۵	۱/۱۵۰	۱/۶۶۵
		سوم	۱/۵۰	۱۰	۴/۹۳	۲/۴۷	۰/۴۵۲	۶/۱۴۲	۰/۵۴۱	-۰/۸۱۳
	آرسنیک	اول	۱/۳۶	۷/۰۱	۳/۳۴	۱/۴۱	۰/۲۵۸	۲	۱/۴۱۰	۱/۸۴۴
		دوم	۱	۳/۲۶	۱/۹۳	۰/۵۵	۰/۱۰۱	۰/۳۰۷	۰/۳۰۱	۰/۳۷۵
		سوم	۱/۲۳	۷/۱۱	۳/۱۱	۱/۳۰	۰/۲۳۸	۱/۷۱۳	۱/۲۵۵	۱/۱۵۰
	نیکل	اول	۱/۶۴	۹/۰۱	۴/۶۳	۱/۹۶	۰/۳۵۹	۳/۸۷۶	۰/۵۷۹	-۰/۴۳۸
		دوم	۱/۴۷	۸	۴/۹۰	۱/۸۳	۰/۳۳۵	۳/۳۸۳	۰/۰۹۱	-۰/۹۳۲
		سوم	۲/۲۲	۱۳/۰۲	۶/۷۶	۳/۰۸	۰/۵۶۲	۹/۵۰۶	۰/۴۸۴	-۰/۷۴۹

میزان کادمیوم در رسوبات در ایستگاه اول ( $p=0/0$ ) و دوم ( $p\text{-value}=0/255$ ) رودخانه کرخه پایین تر استاندارد ملی سازمان محیط زیست ایران بود، اما غلظت این عنصر در ایستگاه سوم بالاتر از استاندارد محیط زیست به دست آمد ( $p\text{-value}=0/459$ ) (جدول ۲).

غلظت کادمیوم، آرسنیک و نیکل در آب رودخانه کرخه در سه ایستگاه مورد مطالعه در مقایسه با حد مجاز استاندارد سازمان بهداشت جهانی بالاتر بود ( $p<0/05$ )، اما مقادیر آرسنیک و نیکل در رسوبات رودخانه کرخه در ایستگاه های مورد مطالعه در مقایسه با استاندارد ملی سازمان محیط زیست ایران پایین تر به دست آمد ( $p<0/05$ ). همچنین

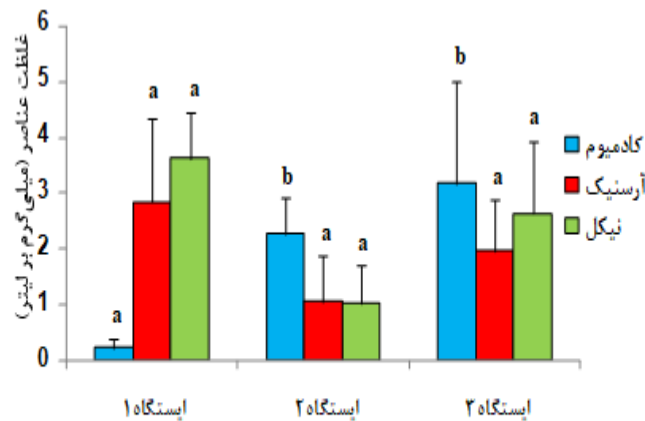
جدول ۲. مقایسه غلظت عناصر بالقوه سمی ایستگاه های مورد مطالعه رودخانه کرخه با حد مجاز استاندارد

رسوبات (میلی گرم بر کیلوگرم)					آب (میلی گرم بر لیتر)				
P Value	DOE**	میانگین	ایستگاه	عناصر	P Value	WHO*	میانگین	ایستگاه	عناصر
۰	۳/۹	۰/۸۳	اول	کادمیوم	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۲۴	اول	کادمیوم
۰/۲۵۵		۳/۰۲	دوم		۰/۰۲۰		۲/۲۹	دوم	
۰/۴۵۹		۴/۹۳	سوم		۰		۳/۱۸	سوم	
۰/۰۳۸	۷/۲۴	۳/۳۴	اول	آرسنیک	۰	۰/۰۰۱	۲/۸۶	اول	آرسنیک
۰/۰۱۳		۱/۹۳	دوم		۰		۱/۰۶	دوم	
۰/۰۴۰		۳/۱۱	سوم		۰		۱/۹۷	سوم	
۰	۵۰	۴/۶۳	اول	نیکل	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷	۳/۶۳	اول	نیکل
۰		۴/۹۰	دوم		۰		۱/۰۳	دوم	
۰		۶/۷۶	سوم		۰/۰۱۲		۲/۶۵	سوم	

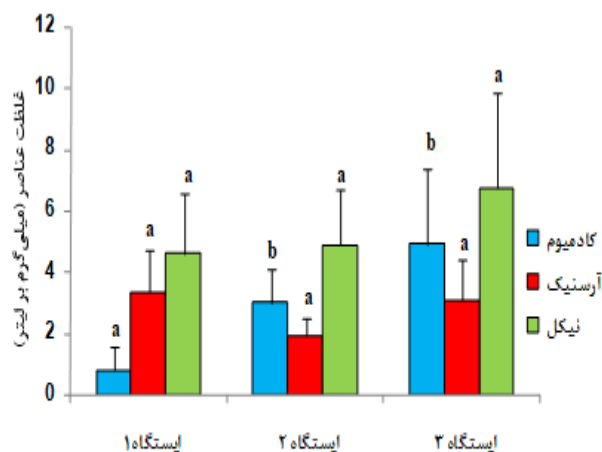
\* استاندارد سازمان بهداشت جهانی، \*\* استاندارد ملی سازمان محیط زیست ایران

غلظت کادمیوم، آرسنیک و نیکل در آب رودخانه کرخه در ایستگاه‌های مورد مطالعه اختلاف معنی‌داری نداشت ( $p < 0.05$ )، اما کادمیوم در ایستگاه اول با سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه اختلاف معنی‌داری داشتند ( $p < 0.05$ ). میزان عنصر کادمیوم در ایستگاه سوم (۳/۱۸ میلی‌گرم بر لیتر) نسبت به ایستگاه اول (۰/۲۴ میلی‌گرم بر لیتر) ( $p < 0.05$ ) و دوم (۲/۲۹ میلی‌گرم بر لیتر،  $p\text{-value} = 0.765$ ) بالاتر بود ( $p > 0.05$ ). غلظت عنصر آرسنیک در ایستگاه اول (۲/۸۶ میلی‌گرم بر لیتر) نسبت به ایستگاه دوم (۱/۰۶ میلی‌گرم بر لیتر،  $p\text{-value} = 0.076$ ) و سوم (۱/۹۷ میلی‌گرم بر لیتر،  $p\text{-value} = 0.345$ ) بالاتر به‌دست آمد ( $p > 0.05$ ). همچنین غلظت عنصر نیکل در ایستگاه اول (۳/۶۳ میلی‌گرم بر لیتر) نسبت به ایستگاه دوم (۱/۰۳ میلی‌گرم بر لیتر،  $p\text{-value} = 0.622$ ) و سوم (۲/۶۵ میلی‌گرم بر لیتر،  $p\text{-value} = 0.097$ ) بالاتر به‌دست آمد ( $p > 0.05$ ) (نمودار ۱).

غلظت کادمیوم، آرسنیک و نیکل در رسوبات رودخانه کرخه در ایستگاه‌های مورد مطالعه اختلاف معنی‌داری نداشت ( $p > 0.05$ )، اما کادمیوم در ایستگاه اول با سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه اختلاف معنی‌داری داشتند ( $p < 0.05$ ). میزان کادمیوم در ایستگاه سوم (۴/۹۳ میلی‌گرم بر لیتر) نسبت به ایستگاه اول (۰/۸۶ میلی‌گرم بر لیتر) ( $p < 0.05$ ) و دوم (۳/۰۲ میلی‌گرم بر لیتر،  $p\text{-value} = 0.065$ ) بالاتر بود ( $p > 0.05$ ). غلظت آرسنیک در ایستگاه اول (۳/۳۴ میلی‌گرم بر لیتر) نسبت به ایستگاه دوم (۱/۹۳ میلی‌گرم بر لیتر،  $p\text{-value} = 0.555$ ) و ایستگاه سوم (۳/۱۱ میلی‌گرم بر لیتر،  $p\text{-value} = 0.891$ ) بالاتر به‌دست آمد ( $p > 0.05$ ). همچنین غلظت نیکل در ایستگاه اول (۴/۶۳ میلی‌گرم بر لیتر) نسبت به ایستگاه دوم (۴/۹۰ میلی‌گرم بر لیتر،  $p\text{-value} = 0.226$ ) و ایستگاه سوم (۶/۷۶ میلی‌گرم بر لیتر،  $p\text{-value} = 0.128$ ) بالاتر به‌دست آمد ( $p > 0.05$ ) (نمودار ۲).



نمودار ۱. مقایسه غلظت عناصر بالقوه سمی در آب (میلی‌گرم بر لیتر) ایستگاه‌های مورد مطالعه رودخانه کرخه (حروف غیرهمنام a, b و c برای مقایسه عناصر اختلاف معنی‌دار را در سطح اطمینان ۹۵ ( $p < 0.05$ ) نشان می‌دهد)



نمودار ۲. مقایسه غلظت عناصر بالقوه سمی در رسوبات (میلی گرم بر کیلوگرم) ایستگاه‌های مورد مطالعه رودخانه‌ی کرخه (حروف غیرهمنام (a, b و c) برای مقایسه عناصر اختلاف معنی‌دار را در سطح اطمینان ۹۵ ( $p < 0.05$ ) نشان می‌دهد)

(WPI) آرسنیک و نیکل در ایستگاه اول بالاتر از ایستگاه دوم و سوم بودند. شاخص آلودگی آب (WPI) کادمیوم (۱/۰۷) در ایستگاه سوم رودخانه کرخه بالاتر به دست آمد. شاخص آلودگی آب (WPI) آرسنیک در ایستگاه اول (۰/۲۸۸) نسبت به کادمیوم و نیکل بالاتر بود و این شاخص برای کادمیوم در ایستگاه دوم (۰/۷۶۶) بالاتر از آرسنیک و نیکل به دست آمد. شاخص بار سمیت فلزات سنگین (HMTL) در ایستگاه اول و سوم به ترتیب ۴۸۲۶/۸۸ و ۴۴۹۱/۶۸ برای عنصر آرسنیک بالاتر از کادمیوم و نیکل بود و در ایستگاه دوم (۳۰۳۱/۴۰) عنصر کادمیوم مقادیر بالاتری را نشان داد (جدول ۴).

عناصر بالقوه سمی کادمیوم، آرسنیک و نیکل در آب و رسوبات ارتباط مثبت و همبستگی نداشتند. با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌گردد که بین عناصر ارتباطی وجود نداشت و همبستگی برای عنصر آرسنیک ( $r = -0.209$ ) و نیکل ( $r = -0.075$ ) منفی بود. شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI) در آب رودخانه کرخه برای ایستگاه‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۱۱۳/۶۶، ۲۹/۵۸ و ۹/۵۰ به دست آمد. شاخص ارزیابی فلزات سنگین (HEI) برای کادمیوم در ایستگاه‌های دوم و سوم بالاتر از آرسنیک و نیکل بود که مجموع این شاخص برای ایستگاه‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۰/۱۳۸۸، ۰/۴۹۶۲ و ۰/۷۲۴ به دست آمد. شاخص درجه آلودگی (Cd) آب رودخانه کرخه مقادیر کمتر از صفر را نشان داد. شاخص آلودگی آب

جدول ۳. همبستگی عناصر بالقوه سمی در آب و رسوبات ایستگاه‌های مورد مطالعه رودخانه کرخه

عناصر	کادمیوم	آرسنیک	نیکل
کادمیوم	۱	-۰/۲۰۹*	-۰/۰۷۵
آرسنیک	-۰/۲۰۹*	۱	۰/۲۳۵*
نیکل	-۰/۰۷۵	۰/۲۳۵*	۱

جدول ۴. نتایج ارزیابی کیفیت عناصر بالقوه سمی کادمیوم، آرسنیک و نیکل در آب رودخانه کرخه

شاخص	ایستگاه	کادمیوم	آرسنیک	نیکل	مجموع شاخص
شاخص فرعی $Q_i$	اول	۱۳۹	۱۷/۸۰	۰/۰۳۷۲	-
	دوم	۳۵	۲۲/۳۷	۰/۰۱۵۲	-
	سوم	۱۰/۵	۱۸/۳۰	۰/۰۲۸۴	-
شاخص $W_i Q_i$	اول	۴۱/۷	۰/۳۵۶	۰/۰۰۱۸۶	۴۲/۰۵۷
	دوم	۱۰/۵	۰/۴۴۷	۰/۰۰۰۷۶	۱۰/۹۴۸
	سوم	۳/۱۵	۰/۳۶۶	۰/۰۰۱۴۲	۳/۵۱۷
شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI)	اول	-	-	-	۱۱۳/۶۶
	دوم	-	-	-	۲۹/۵۸
	سوم	-	-	-	۹/۵۰
شاخص ارزیابی فلزات سنگین (HEI)	اول	۰/۰۴۴	۰/۰۵۷۶	۰/۰۳۷۲	۰/۱۳۸۸
	دوم	۰/۴۶۰	۰/۰۲۱	۰/۰۱۵۲	۰/۴۹۶۲
	سوم	۰/۶۴۲	۰/۰۵۳۶	۰/۰۲۸۴	۰/۷۲۴
شاخص درجه آلودگی (Cd)	اول	-۰/۹۵	-۰/۹۴	-۰/۹۶	-۲/۸۵
	دوم	-۰/۵۴	-۰/۹۷	-۰/۹۸	-۲/۴۹
	سوم	-۰/۳۵	-۰/۹۴	-۰/۹۷	-۲/۲۶
شاخص آلودگی آب (WPI)	اول	۰/۰۷۳	۰/۲۸۸	۰/۲۶۱	-
	دوم	۰/۷۶۶	۰/۱۰۵	۰/۱۰۷	-
	سوم	۱/۰۷	۰/۲۶۸	۰/۱۹۹	-
شاخص بار سمیت فلزات سنگین (HMTL)	اول	۲۸۹/۹۶	۴۸۲۶/۸۸	۲۵۹۱/۷۳	۷۷۰۸/۵۷
	دوم	۳۰۳۱/۴۰	۱۷۵۹/۸	۱۰۶۲/۵۱	۵۸۵۳/۷۱
	سوم	۴۲۳۰/۷۸	۴۴۹۱/۶۸	۱۹۷۶/۰۷	۱۰۶۹۸/۵۳

مطالعه در رسوبات رودخانه‌ی کرخه در ایستگاه سوم بالاتر از ایستگاه اول و دوم بودند. درمورد عنصر آرسنیک فاکتور آلودگی، فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشت و عامل خطر اکولوژیکی بالقوه در ایستگاه اول نسبت به ایستگاه دوم و سوم اول بالاتر مشاهده شدند (جدول ۵).

شاخص‌های آلودگی عناصر در رسوبات رودخانه‌ی کرخه نشان دادند که مقادیر عنصر کادمیوم نسبت به آرسنیک و نیکل بالاتر بوده است. فاکتور آلودگی، فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشت و عامل خطر اکولوژیکی بالقوه عناصر کادمیوم و نیکل در ایستگاه سوم نسبت به ایستگاه اول و دوم بالاتر به‌دست آمد. همچنین شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه و شاخص آلودگی نمره عناصر بالقوه سمی مورد

جدول ۵. نتایج ارزیابی مخاطره عناصر بالقوه سمی کادمیوم، آرسنیک و نیکل در رسوبات رودخانه کرخه

شاخص	ایستگاه	کادمیوم	آرسنیک	نيكل
فاكتور آلودگي (CF)	اول	۴/۱۶	۱/۵۹	۰/۲۳
	دوم	۱۵/۱۳	۰/۹۲	۰/۲۵
	سوم	۲۴/۶۸	۱/۴۸	۰/۳۴
فاكتور غني شدگي (EF)	اول	۳۳/۸۷	۱/۳۳	۰/۴۰
	دوم	۱۲۶/۷۷	۰/۷۸	۰/۴۲
	سوم	۲۰۹/۳۷	۱/۲۴	۰/۵۹
شاخص زمين انباشت (Igeo)	اول	۰/۸۴	-۰/۰۲	-۲/۸۳
	دوم	۳/۲۵	-۰/۷۶	-۲/۷۳
	سوم	۳/۸۵	-۰/۱۳	-۲/۳۰
عامل خطر اکولوژيكي بالقوه (Er)	اول	۱۲۴/۴۸	۱۵/۹۲	۱/۱۶
	دوم	۴۵۳/۹۲	۹/۲۳	۱/۲۳
	سوم	۷۴۰/۳۴	۱۴/۸۱	۱/۶۹
شاخص خطر اکولوژيكي بالقوه (RI)	اول	۱۴۱/۹۲		
	دوم	۴۶۴/۳۸		
	سوم	۷۵۶/۸۵		
شاخص آلودگي نمره (NIPI)	اول	۳/۲۷		
	دوم	۱۰/۷۸		
	سوم	۱۷/۵۷		

## بحث

سازمان بهداشت جهانی (۰/۰۰۳ میلی گرم در لیتر) بالاتر گزارش شده است که آب این رودخانه را برای مصرف انسانی نامناسب می‌کند. مطالعات بر روی کادمیوم در آب رودخانه-های مختلف غلظت‌هایی را ثبت کرده‌اند که بالاتر از حد توصیه‌شده‌ی سازمان بهداشت جهانی است (۵۰، ۵۱). عنصر آرسنیک در آب رودخانه‌ی کرخه (۷-۰/۵ میلی گرم در لیتر) نیز بالاتر حد مجاز سازمان بهداشت (۰/۰۰۱ میلی گرم در لیتر) جهانی گزارش شده است. سایر مطالعات در کشورهای جهان نیز مقادیر آرسنیک در منابع آبی را بالا گزارش کردند (۴، ۱۲، ۴۰، ۴۴) که نتایج این تحقیق را تایید می‌کند. فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی باعث رهاسازی عناصر سمی مانند آرسنیک، کادمیوم و نیکل در آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود که اثرات سمی برای سلامت انسان دارد. به همین ترتیب، افزودن این عناصر به آب‌های سطحی و رسوبات نیز اثرات سمی زیستی بر روی جانداران دارند و کیفیت آب را تغییر می‌دهند. کیفیت هر آبی به منابع و منشا آن بستگی دارد که می‌تواند خواص فیزیکی و شیمیایی آب را تغییر دهد (۱۴، ۳۳).

در این تحقیق عناصر آرسنیک، کادمیوم و نیکل در آب و رسوبات رودخانه کرخه در ایستگاه‌های مورد مطالعه شناسایی شدند. مقادیر این عناصر در غلظت‌های متفاوت در آب و رسوبات گزارش شدند. در مطالعات دیگر مقادیر عناصر سمی در آب، رسوبات، گیاهان آبی و ماهیان رودخانه تعیین شدند (۲۶-۲۲) که نتایج این تحقیق را تایید می‌کند. گسترش شهرنشینی و فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی در حاشیه رودخانه کرخه و به دنبال آن تخلیه پساب آن‌ها به منابع آب باعث آلودگی آب توسط آلاینده‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی گردیده است (۴۶، ۴۷). غلظت نیکل در آب رودخانه کرخه ۰/۱۴-۶/۰۱ میلی گرم در لیتر به دست آمد. غلظت‌های معمولی نیکل در آب‌های سطحی آلوده به صورت ۰/۰۱۵-۰/۰۲۰ میلی گرم در لیتر گزارش شده است و حد توصیه شده ۰/۰۷ میلی گرم در لیتر نیکل در آب آشامیدنی توسط سازمان بهداشت جهانی تعیین شده (۴۸، ۴۹) که با نتایج این تحقیق هم-خوانی دارد. غلظت کادمیوم در آب‌های رودخانه‌ی کرخه ۰/۱-۸/۰۱ میلی گرم در لیتر بود که در مقایسه با حد مجاز

غلظت آرسنیک، کادمیوم و نیکل در رسوبات رودخانه کرخه در مقایسه با استاندارد سازمان محیط زیست ایران پایین تر به دست آمد، اما نکته قابل توجه این است که رسوبات این رودخانه با توجه به آلودگی آب ایستگاه‌های مورد مطالعه به این عناصر سمی نیز دارای آلاینده‌گی هستند. در این تحقیق شاخص‌های آلودگی رسوبات از جمله شاخص آلودگی نمره، فاکتور غنی‌شدگی و شاخص زمین انباشت، آلودگی متوسط عناصر آرسنیک، کادمیوم و نیکل را نشان دادند. بنابراین می‌توان چنین استنباط کرد آلودگی این رودخانه ارتباط چندانی با سازندهای زمین شناسی منطقه نداشته و مهم‌ترین عامل آن، ورود فاضلاب‌ها و پساب‌های کشاورزی زمین‌های اطراف به رودخانه می‌باشد (۴۶،۴۷). رسوباتی که در آب‌های هم‌جوار و مجاور با مناطق صنعتی و شهری مثل کرخه نور قرار دارند توانایی بالقوه جذب و ته‌نشین کردن آلودگی‌های فلزی که از محیط‌های خشکی ناشی می‌شوند را دارا می‌باشند، همچنین از آن‌جا که غلظت‌های بالای سرب ممکن است به‌علت ورودی‌های انسانی و فاضلاب‌های ناشی از ورودی آب رودخانه به محیط باشد، لذا احتمالاً می‌توان نتیجه گرفت که منبع ورودی از این آلاینده‌ها به محیط وجود ندارد و در نتیجه پتانسیل ایجاد خطر در منطقه مورد مطالعه را ندارند (۲۴). بخش ناچیزی از یون‌های عناصر دریافت‌شده در آب، حل شده و بقیه به رسوبات منتقل شده و در رسوبات انباشته می‌شوند (۵۲). در مقایسه با تجزیه و تحلیل آب، ترکیبات شیمیایی رسوب می‌تواند نمای کلی‌تری از منابع بالقوه و مخزن‌های منابع شیمیایی ارائه دهد (۵۳). رسوبات مجموعه‌ای از ترکیبات محلول و مواد آلی در نظر گرفته می‌شوند که ناشی از منابع مختلف تحت کنترل فرآیندها و عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی هستند (۵۴). ذرات معلق و رسوبات حمل‌شده در امتداد رودخانه‌ها رسوباتی را در دریاچه‌های رودخانه‌ای ایجاد می‌کنند که در طول زمان آلودگی را انباشته می‌کنند و این الگوها برای ارزیابی روندهای یکپارچه زمان قابل اعتماد هستند (۵۵). سرچشمه اصلی رودخانه‌ی کرخه از منابع آبی گاماسیاب در استان همدان می‌باشد که بخش وسیعی از رشته‌کوه‌های زاگرس را طی می‌کند تا وارد دشت خوزستان شود و چنین استنباط می‌شود که سنگ‌های مادری و فعالیت‌های انسانی از بالادست رودخانه تا قسمت پایین‌دست این اکوسیستم آبی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مطالعه ارزیابی ریسک سلامت و

بهداشتی عناصر سمی و فلزات سنگین در آب، رسوبات، گیاهان آبی و ماهیان رودخانه کرخه به‌عنوان شاخص‌های زیستی ضروری به‌نظر می‌رسد.

شاخص‌های آلودگی آب عناصر بالقوه رودخانه‌ی کرخه نشان داد که آب این رودخانه نسبت به عناصر آرسنیک، کادمیوم و نیکل دارای آلودگی بوده است. شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI) در ایستگاه اول بالاتر از ۱۰۰ و در ایستگاه دوم و سوم کمتر از ۱۰۰ به‌دست آمد. بر اساس تفسیر این شاخص مقدار HPI برابر با ۱۰۰ مقدار آستانه‌ای است که در آن نتایج مضر محتمل است، در حالی که مقدار زیر ۱۰۰ نشان دهنده آلودگی کم توسط عناصر است. اگر مقدار HPI بیش از ۱۰۰ باشد، نشان می‌دهد که آب برای استفاده مناسب نیست (۳۲). بنابراین چنین به‌نظر می‌رسد که آب این رودخانه دارای آلودگی آرسنیک، کادمیوم و نیکل می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه مقادیر شاخص ارزیابی فلزات سنگین (HEI) آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه رودخانه کمتر در دامنه ۱-۰ به‌دست آمد، می‌توان بیان کرد که کیفیت آب رودخانه کرخه (HEI کمتر از ۱۰) در رده آلودگی کم طبقه‌بندی می‌شود (۳۶،۳۷). مقادیر به‌دست آمده شاخص بار سمیت فلزات سنگین (HMTL) عناصر آرسنیک، کادمیوم و نیکل در آب رودخانه کرخه در دامنه ۲۸۹/۹۶-۱۰۶۹۸/۵۳ محاسبه شده است. با توجه به مقادیر فراوانی وقوع ماده خطرناک در فهرست اولویت‌های ملی تهیه شده توسط ATSDR (کادمیوم، آرسنیک و نیکل به ترتیب ۱۳۱۸، ۱۶۷۶ و ۹۹۳) سمیت عناصر آرسنیک، کادمیوم و نیکل در آب رودخانه کرخه و پتانسیل قرار گرفتن در معرض انسان خطرناک می‌باشد (۴۰). در مورد شاخص آلودگی آب (WPI) در ایستگاه سوم مقادیر این شاخص برای عنصر کادمیوم بالاتر از ۱ بود که نشان می‌دهد آب آلوده شده است و باید با آب با بهترین کیفیت در محدوده قابل قبول رقیق شود. ارقام شاخص آلودگی آب (WPI) سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه و عناصر آرسنیک، نیکل و کادمیوم در دامنه ۱-۰ به‌دست آمد که در واقع این آب برای اهداف خاص قابل قبول است (۳۹). مقادیر شاخص درجه آلودگی (Cd) آب رودخانه کرخه در ایستگاه‌های مورد مطالعه کمتر از ۱ به‌دست آمد که نشان‌دهنده‌ی آلودگی پایین عناصر آرسنیک، نیکل و کادمیوم می‌باشد (۳۸). احتمالاً دلیل پایین بودن مقادیر عناصر سمی در آب رودخانه کرخه، این است که آب در رودخانه‌ها جاری و روان



بر آلودگى عنصر كادميوم دانست (۶۲). الكوى مقادير غنى - شدگى متفاوت عناصر سمى در اكوسيستم‌هاى آبى مختلف نشان‌دهنده‌ى وجود منابع آلاينده متفاوت است، به عبارت ديگر منشا و پراكنش عناصر سمى در محيط‌هاى آبى توسط چندين عامل كنترل مى‌شود (۱۶،۵۲). منشا ورود فلزات سنگين در اكوسيستم‌هاى آبى و محيط‌زيست شامل فرآيندهاى طبيعى زمين‌شناختى و فعاليت‌هاى انسان‌زاد مى‌باشد. منابع ورود فلزات سنگين در مناطق مختلف جهان بر اساس بافت زمين‌شناسى منطقه و منابع آلاينده موجود متفاوت است (۶۳،۶۴).

### نتيجه‌گيرى

غلظت كادميوم، آرسنيك و نيكل در آب رودخانه‌ى كرخه در سه ايستگاه مورد مطالعه در مقايسه با حد مجاز استاندارد سازمان بهداشت جهاني بالاتر بود، اما مقادير آرسنيك و نيكل در رسوبات رودخانه‌ى كرخه در ايستگاه‌هاى مورد مطالعه در مقايسه با استاندارد ملى سازمان محيط‌زيست ايران پايين‌تر به دست آمد. همچنين ميزان كادميوم در رسوبات در ايستگاه اول و دوم رودخانه‌ى كرخه پايين‌تر از استاندارد ملى سازمان محيط‌زيست ايران بود، اما غلظت اين عنصر در ايستگاه سوم بالاتر از استاندارد به دست آمد. شاخص‌هاى آلودگى آب رودخانه كرخه نشان داد كه از نظر عناصر بالقوه سمى كادميوم، آرسنيك و نيكل آلودگى كمى دارد. با توجه به شاخص‌هاى آلودگى رسوبات، عناصر سمى كادميوم، آرسنيك و نيكل داراى غلظت بالاى بوده و تحت تاثير فعاليت‌هاى كشاورزى و صنعتى حاشيه رودخانه‌ى كرخه هستند.

**تشكر و قدردانى:** اين مقاله از بخشى از يك طرح پژوهشى (كد طرح ۹۵۱۰۳) مربوط به دانشگاه آزاداسلامى واحد اهواز استخراج شده است. نويسندگان مقاله، تشكر و قدردانى خود را در راستاى انجام اين تحقيق از مديريت و معاونت پژوهشى و همكاران محترم اين دانشگاه اعلام مى‌نمايند.

**تعارض منافع:** نويسندگان هيچ گونه تعارض منافع با يكديگر ندارند.

**حمایت مالی:** نويسندگان مقاله در راستاى كمك‌هاى مالى تشكر و قدردانى خود را از مديريت و معاونت پژوهشى و همكاران محترم اين دانشگاه اعلام مى‌نمايند.

مى‌باشد و بديهي است كه آلودگى‌هاى مختلف در اين منابع آبى جابه‌جا مى‌شود (۴،۸،۲۰)، اما رسوبات در بستر و دلتاى يك رودخانه ساكن بوده و مى‌تواند به‌عنوان يك شاخص زيربستى مناسب وضعيت آلودگى عناصر سمى را در همان منطقه مورد مطالعه نشان دهد (۱۶،۱۹).

ميانگين غلظت كل عناصر آرسنيك، نيكل و كادميوم در رسوبات سطحى رودخانه‌ى مهابادچاى به ترتيب ۱۳/۲۹، ۶۳/۴۰، ۰/۴۷ ميلي‌گرم بر كيلوگرم گزارش شده است. آرسنيك، نيكل و كادميوم مقاديرى بالاتر از غلظت استاندارد فلزات سنگين در رسوبات را داشتند (۵۶) كه با نتايج اين تحقيق هم‌خوانى داشت. در اين تحقيق عناصر بالقوه سمى كادميوم، آرسنيك و نيكل در آب و رسوبات ارتباط مثبت و همبستگى نداشتند كه نشان‌دهنده اين است كه عناصر منشا متفاوتى دارند. در رسوبات سطحى رودخانه مهابادچاى آرسنيك، نيكل و كادميوم ضريب همبستگى پيرسون بيشترين همبستگى مثبت معنى‌دار را با نحوه توزيع فلزات سنگين دارند كه نتايج نشان داد همه‌ى عناصر داراى منشا يكسانى هستند (۵۶) كه با نتايج اين تحقيق متفاوت بود. نيكل جزء فلزاتى است كه داراى جرم بالاى بوده و بنا بر اين تمايل دارند در رسوبات قرار گيرند و به همين دليل معمولاً در رسوبات مقادير بالاى آن‌ها مشاهده مى‌شود (۵۷،۵۸). مقادير عناصر سمى بالقوه در رسوبات رودخانه كرخه در ايستگاه سوم بالاتر از ساير مناطق مورد مطالعه بود. احتمال مى‌رود بالا بودن بار آلودگى در ايستگاه سوم به‌علت تاثير ورود حجم عظيمى از روان‌آب‌هاى شهرى و روستايى، پساب‌ها و پسماندهاى فعاليت‌هاى انساني باشد (۵۹،۶۰). در رسوبات روخانه زاينده‌رود مقايسه ميانگين غلظت كادميوم با مقادير استاندارد كيفيت رسوب كانادا براى آب‌هاى شيرين، ميزان كادميوم بيش از ميزان استاندارد گزارش شده است كه وضعيت بحراني رودخانه را به‌عنوان مهم‌ترين منبع آب شيرين در فلات مركزي ايران نشان مى‌دهد (۶۱).

در اين تحقيق مقادير فاكترور غنى شدگى كادميوم نشان داد اين عنصر منشا انساني دارد، اما مقادير اين شاخص براى آرسنيك و نيكل پايين بود. ميزان كادميوم در رسوبات سطحى تالاب انزلى نيز داراى سهم و منشا انساني گزارش شده است به‌طوري كه در مجموع فعاليت‌هاى مختلف انساني و توسعه صنايع و وجود اراضى كشاورزى در محدوده تالاب انزلى و رودخانه‌هاى ورودى را مى‌توان از عوامل موثر

**مشارکت نویسندگان:** نویسندگان مقاله خانم لاله رومیانی و آقای محمد ولایتزاده در مراحل مختلف انجام پژوهش شامل طراحی و ایده، نمونه برداری، عملیات آزمایشگاهی و نگارش مقاله همکاری متقابل داشتند.

## References

- Saleh, T.A., Parthasarathy, P. and Irfan, M., 2019. Advanced functional polymer nanocomposites and their use in water ultra-purification. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 24, p.e00067. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2019.e00067>
- Pilotto, F., Tonkin, J. D., Januschke, K., Lorenz, A.W., Jourdan, J., Sundermann, A., Hering, D., Stoll, S. and Haase, P., 2019. Diverging response patterns of terrestrial and aquatic species to hydromorphological restoration. *Conservation Biology*, 33 (1), pp.132-141. <https://doi.org/10.1111/cobi.13176> PMID:29947087
- McMichael, C.E., 2014. Freshwater. The 2008. "Freshwater". In: Cleveland, C.J., Aiman Al-Rawajfeh, A. (Eds.), *Encyclopedia of Earth* (Washington, D.C., USA). Retrieved from. <http://www.eoearth.org/view/article/152861> last assessed December 2016.
- Milacic, R., Zuliani, T., Vidmar, J., Oprckal, P. and Scancar, J., 2017. Potentially toxic elements in water and sediments of the Sava River under extreme flow events. *Science of the Total Environment*, 605, pp.894-905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.260> PMID:28686993
- Bhatti, Z., Ishtiaq, M., Khan, S., Khan, S., Baig, S., Muhammad, I., Din, Z., Khan, A. and Ghani, J., 2021. Contamination Level, Source Identification And Health Risk Assessment of Potentially Toxic Elements In Drinking Water Sources of Mining And Non-Mining Areas of Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Journal of Water and Health*, 1, pp.1-21. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-618930/v2>
- Ciazela, J., Siepak, M. and Wojtowicz, P., 2018. Tracking heavy metal contamination in a complex river-oxbow lake system: Middle Odra Valley, Germany/Poland. *Science of the Total Environment*, 616, pp.996-1006. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.219> PMID:29103644
- Strungaru, S.A., Nicoara, M., Teodosiu, C., Baltag, E., Ciobanu, C. and Plavan, G., 2018. Patterns of toxic metals bioaccumulation in a

**ملاحظات اخلاقی:** نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هر گونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تاثیر بگذارد را رد می‌کنند.

- crossborder freshwater reservoir. *Chemosphere*, 207, pp.192-202. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.079> PMID:29800819
- Oyebamiji, A., Odebunmi, A., Ruizhong, H. and Rasool, A., 2018. Assessment of trace metals contamination in stream sediments and soils in Abuja leather mining, southwestern Nigeria. *Acta Geochimica*, 37 (4), pp.592-613. <https://doi.org/10.1007/s11631-017-0256-1>
- Kumar, V., Parihar, R.D., Sharma, A., Bakshi, P., Sidhu, G.P.S., Bali, A.S., Karaouzas, I., Bhardwaj, R., Thukral, A.K. and Gyasi-Agyei, Y., 2019. Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: a meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses. *Chemosphere*, 236, p.124364. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124364> PMID:31326755
- Nawab, J., Khan, N., Ahmed, R., Khan, S., Ghani, J., Rahman, Z., Khan, F., Wang, X., Muhammad, J. and Sher, H., 2019. Influence of different organic geo-sorbents on Spinacia oleracea grown in chromite mine-degraded soil: a greenhouse study. *Journal of Soils and Sediments*, 19 (5), pp.2417-2432. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02260-3>
- Santana, C.S., Olivares, D.M.M., Silva, V.H., Luzardo, F.H., Velasco, F.G. and de Jesus, R.M., 2020. Assessment of water resources pollution associated with mining activity in a semi-arid region. *Journal of Environmental Management*, 273, p.111148. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111148> PMID:32758915
- Nawab, J., Khan, S., Xiaoping, W., Rahman, A., Ali, H., Qamar, Z., Khan, Z. A., Rehman, Z. U., Rahman, H. and Muhammad, J., 2018. Spatial distribution of toxic metals in drinking water sources and their associated health risk in district buner, Northern Pakistan. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24 (3), pp.615-626. <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1395684>

13. Yang, K., Yu, Z., Luo, Y., Yang, Y., Zhao, L. and Zhou, X. 2018. Spatial and temporal variations in the relationship between lake water surface temperatures and water quality-A case study of Dianchi Lake. *Science of the Total Environment*, 624, pp. 859-871.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.119>  
PMid:29274610
14. Yang, Y., He, Z., Wang, Y., Fan, J., Liang, Z. and Stoffella, P.J., 2013. Dissolved organic matter in relation to nutrients (N and P) and heavy metals in surface runoff water as affected by temporal variation and land uses - a case study from Indian River Area, South Florida, USA. *Agricultural Water Management*, 118, pp.38-49.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.12.001>
15. Baeten, J., Langston, N. and Lafreniere, D., 2018. A spatial evaluations of historic iron mining impacts on current impaired waters in Lake Superior's Mesabi Range. *Ambio*, 47 (2), pp.231-244.  
<https://doi.org/10.1007/s13280-017-0948-0>  
PMid:28983806 PMCid:PMC5794688
16. Chen, H., Wang, J., Chen, J., Lin, H. and Lin, C., 2016. Assessment of heavy metal contamination in the surface sediments: A reexamination into the offshore environment in China. *Marine Pollution Bulletin*, 113, pp.132-140.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.08.079>  
PMid:27600270
17. Guo, B., Liu, Y., Zhang, F., Hou, J., Zhang, H. and Li, C., 2018. Heavy metals in the surface sediments of lakes on the Tibetan Plateau, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25, pp.3695-3707.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-017-0680-0>  
PMid:29168132
18. Szydłowski, K., Rawicki, K. and Burczyk, P., 2017. The content of heavy metals in bottom sediments of the watercourse in agricultural catchment on the example of the river Gowienica. *Inżynieria Ekol*, 18, pp.218-224.  
<https://doi.org/10.12912/23920629/69377>
19. Wardhani, E., Rosmini, D. and Notodarmojo, S., 2017. Status of heavy metal in sediment of Saguling Lake, West Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 60, p.012035.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/60/1/012035>
20. Sarkar, A. and Pandey, P., 2015. River water quality modelling using artificial neural network technique. *Aquatic Procedia*, 4, pp.1070-1077.  
<https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.135>
21. Jafari, A., 2000. *Gitology of Iran*. The second volume. Gitasani Publications, first edition, Tehran. 544 p. [In Persian].
22. Abdulkhani, R., Sawari, A., Neysi, A. and Marwaneh, J., 2013. Determining the role of Typha Latifolia and sediments in refining and bioaccumulation of lead metal in Shaver River in winter, spring, summer, and autumn seasons. The third conference on environmental planning and management, Tehran, University of Tehran, 10 p. [In Persian].
23. Abdulkhani, R. and Abboudi, J., 2015. Determining the amount of nickel metal accumulation in Typha Latifolia and sediments of Shaver River. The first national specialized conference of agricultural and environmental sciences of Iran, Ardabil, Zeminkav research center. 5 p. [In Persian].
24. Behbodi, M. and Tahmasbinejad, H., 2015. Evaluation of heavy metals in the water of Karkhe River in Karkhe Noor area, Hoizeh city, The first international conference on natural hazards and environmental crises of Iran, solutions and challenges, Ardabil, 13 P. [In Persian].
25. Askary Sary, A., Velayatzadeh, M. and Beheshti, M., 2012. Determination of heavy metals in Liza abu from Karkheh and Bahmanshir Rivers in Khoozestan from Iran. *Advances in Environmental Biology*, pp.578-583.
26. Roomiani, L. and Payandeh, Kh., 2017. Investigating the accumulation of heavy metals in water, surface sediments and four species of aquatic plants of Karkheh River. *Wetland Ecobiology Journal*, 9 (33), pp.69-84. [In Persian].
27. ASTM, 1991. Standard guide for collection, storage, characterization and manipulation of sediments for toxicological testing (Vol. 11.06). Philadelphia: ASTM.
28. United States Environmental Protection Agency (USEPA), 1996. Method 3050B: Acid digestion of Sediments; sludges and soils (revision 2).
29. Baldwin, D.R. and Marshall, W.J., 1999. Heavy metal poisoning and its laboratory investigation, *Ann. Clinica; Biochemistry*, 36, pp.267-300.  
<https://doi.org/10.1177/000456329903600301>  
PMid:10376071
30. Ahmad, A.K. and Shuhaimi-Othman, M., 2010. Heavy metal concentration in sediments and fishes

- from Lake Chini, Pahang, Malaysia. *Journal of Biological Sciences*, 10(2), pp.93-100. <https://doi.org/10.3923/jbs.2010.93.100>;
31. Rouessac, F. and Rouessac, A., 2007. *Chemical Analysis Modern Instrumentation Methods and Techniques*. 2nd Edition, England, John Wiley & Sons Ltd.;
32. Sheykhi, V., Moore, F., 2012. Geochemical characterization of Kor River water quality, Fars province, Southwest Iran. *Water Quality, Exposure and Health*, 4 (1), pp.25-38. <https://doi.org/10.1007/s12403-012-0063-1>;
33. Prasanna, M.V., Praveena, S.M., Chidambaram, S., Nagarajan, R. and Elayaraja, A., 2012. Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring: a case study from Curtin Lake, Miri City, East Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 67(7), pp.1987-2001. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1639-6>;
34. USEPA, 2009. *Drinking Water Standards and Health Advisories*. EPA 822-R-09-011.;
35. World Health Organization, 2011. *Guidelines for Drinking-water Quality (Fourth Ed). Incorporating the First Addendum*. Geneva.;
36. Al-Ani, M.Y., Al-Nakib, S.M., Ritha, N.M. and Nouri, A.H., 1987. Water quality index applied to the classification and zoning of Al-Jaysh canal, Baghdad Iraq. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 22 (4), pp.305-319. <https://doi.org/10.1080/10934528709375351>;
37. Ameh, E.G., 2013. Geostatistics and heavy metal indexing of surface water around Okaba coal mines, Kogi State, Nigeria. *Asian Journal of Environmental Science*, 8 (1), pp.1-8.;
38. Backman, B., Bodis, D., Lahermo, P., Rapant, S. and Tarvainen, T., 1998. Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. *Environmental geology*, 36 (1-2), pp.55-64. <https://doi.org/10.1007/s002540050320>;
39. Thukral, A.K., Bhardwaj, R. and Kaur, R., 2005. *Water quality indices. Statistical Accounting of Water Resources*. Central Statistical Organization, Ministry of Statistics and Programme Implementation, GoI, New Delhi.;
40. Saha, P. and Paul, B., 2019. Assessment of heavy metal toxicity related with human health risk in the surface water of an industrialized area by a novel technique. *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*, 25(4), pp.966-987. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1458595>;
41. Muller, G., 1979. Index of geo accumulation in the sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, PP.108-118.;
42. Zhao, X.M., Yao, L.A., Ma, Q.L., Zhou, G.J., Wang, L., Fang, Q.L. and Xu, Z.C., 2018. Distribution and ecological risk assessment of cadmium in water and sediment in Longjiang River, China: Implication on water quality management after pollution accident. *Chemosphere*, 194, pp.107-116. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.127> PMID:29197813;
43. Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14, pp.975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8);
44. Ravichandran, M., Baskaran, M., Santschi, P.H. and Bianchi, T., 1995. History of trace metal pollution in Sabine-Neches Estuary, Beaumont, Texas. *Environmental Science and Technology*, 29, pp.1495-1503. <https://doi.org/10.1021/es00006a010> PMID:22276869;
45. Niencheski, L.F., Windom, H.L. and Smith, R., 1994. Distribution of particulate trace metal in Patos Lagoon Estuary (Brazil). *Marine Pollution Bulletin*, 28, pp.96-102. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(94\)90545-2](https://doi.org/10.1016/0025-326X(94)90545-2);
46. Rasi Nezami, S., Nazariha, M., Baghvand, A. and Moridi, A., 2013. Karkheh River Water Quality Using Multivariate Statistical Analysis and Qualitative Data Variations. *Journal of Health System Research*, 8 (7), pp. 1280-1292. [In Persian].;
47. Iranmanesh, F., Maghsodi, M., Moghimi, E., Yamani, M. and Charkhabi, A., 2016. Environmental Changes of Karkheh River Delta Using Sediments Geochemical data. *Kharazmi Journal of Earth Sciences*, 1 (2), pp.125-135. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/gnf.1.2.125>;
48. Salnikow, K. and Denkhaus, E., 2002. Nickel Essentiality, Toxicity, And Carcinogenicity. *Critical Reviews in Oncology/Haematol*, 42, pp.35-56. [https://doi.org/10.1016/S1040-8428\(01\)00214-1](https://doi.org/10.1016/S1040-8428(01)00214-1) PMID:11923067;



49. Awofolu, O.R., Mbolekwa, V.M. and Fatoki, O.S., 2005. Levels of trace metals in water and sediment from Tyume River and its effects on an irrigated farmland. *Water SA*, 31 (1), pp.87-94. <https://doi.org/10.4314/wsa.v31i1.5124>;
50. Alaa, G.M. and Osman, W.K., 2010. Water Quality and heavy metal monitoring in water, sediments, and tissues of the African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) from the River Nile, Egypt. *Journal of Environmental Protection*, 1, pp.389-400. <https://doi.org/10.4236/jep.2010.14045>;
51. Wachira, D.N., 2007. Physico-electrochemical assessment of pollutants in Nairobi river. Thesis, University of Nairobi.†
52. Hedges, J.I. and Keil, R.G., 1995. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis. *Marine chemistry*, 49(2-3), pp.81-115. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(95\)00008-F](https://doi.org/10.1016/0304-4203(95)00008-F);
53. Henrichs, S.M., 1995. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis—a comment. *Marine Chemistry*, 49(2-3), pp.127-136. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(95\)00012-G](https://doi.org/10.1016/0304-4203(95)00012-G);
54. Drygiannaki, I., Rao, B., Dawson, J.A., Rakowska, M., Reible, D.D., Hayman, N.T., Rosen, G.H., Colvin, M.A., Chadwick, D.B., Pitt, R. and Otto, M., 2020. Assessing sediment recontamination from metals in stormwater. *Science of The Total Environment*, 737, p.139726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139726> PMID:32563112†
55. Iordache, A.M., Nechita, C., Zgavarogea, R., Voica, C., Varlam, M. and Ionete, R.E., 2022. Accumulation and ecotoxicological risk assessment of heavy metals in surface sediments of the Olt River, Romania. *Scientific Reports*, 12(1), p.880. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-04865-0> PMID:35042928 PMCID:PMC8766583†
56. Kheiri Soltan Ahmadi, R., Nazarnejad, H. and Asadzadeh, F., 2022. Evaluation of heavy metal pollution in surface sediments of Mahabadchai river. *Jurnal of Research in Environmental Health*, 8 (1), pp.46-58. [In Persian].†
57. Demora, S.D. and Sheikholeslami, M.R., 2002. ASTP: Contaminate screening program: Final report: Interpretation of Caspian Sea sediment data. Caspian Environment Program (CEP).†
58. Yang, X.L., Yuan, X.T., Zhang, A.G., Ma, Y.Z., Li, Q., Zong, H.M., Wang, L.J. and Li, X.D., 2015. Spatial distribution and sources of heavy metals and petroleum hydrocarbon in the sand flats of Shuangtaizi Estuary, Bohai Sea of China. *Marine Pollution Bulletin*, 95, pp.503-512. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.02.042> PMID:25792121†
59. Kayalvizhi, J., Nirmala, T. and Medona Mary, R., 2015. Level of Heavy Metals in Soil Sediments From Wetlands of Theni and Dindigul Districts. *International Journal of Recent Scientific Research*, 6 (11), pp.7372-7376.†
60. Jiang, X., Wang, W., Wang, S., Zhang, B. and Hu, J., 2012. Initial identification of heavy metals contamination in Taihu Lake, a eutrophic lake in China. *Journal Environment Science (China)*, 24, pp.1539-1548. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60986-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60986-8) PMID:23520860†
61. Koochi, M. and Chamani, A., 2023. Ecological risk assessment of Lead and Cadmium in Zayandehrud river sediments. *Jurnal of Research in Environmental Health*, 9 (1), pp.50-65. [In Persian].†
62. Mohammadi, M., Hedayati, A.A., Forouhar Vajargah, M., Pirali, A.R. and Fallah, M., 2021. Zonation of heavy metal distribution of surface sediments in Anzali wetland Using Geographical Information System (GIS). *Jurnal of Research in Environmental Health*, 7 (4), pp.323-331. [In Persian].†
63. Fazel Valipour, M.E., 2021. Investigation of soil heavy metals concentrations (As, Cd, Co, Cr and Ni) in region Dehnov Shandiz. *Jurnal of Research in Environmental Health*, 7 (3), pp. 216-225. [In Persian].†
64. Sadat Hosseini, N. and Sobhan Ardakani, S., 2023. Assessment of level and source identification of heavy metals in the surface soil of the roadside: A case study. *Jurnal of Research in Environmental Health*, 9 (2), pp.197-214. [In Persian].†