University of Tehran Press

**Journal of Environmental Studies**
**Vol. 49, No. 3, Autumn 2023**

**Journal Homepage:** www.Jes.ut.ac.ir
**Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922**

# Ecological Risk Assessment of Sediments in the River Environment (Case Study: Karaj River)

**Sepehr Akhlaghifard[1], Touraj Nasrabadi[2]✉, Hassan Hoveidi[3]**

1. Department of Environmental Planning, Management & Education, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: sepehrfard7@gmail.com
2. Department of Environmental Planning, Management & Education, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: tnasrabadi@ut.ac.ir
3. Department of Environmental Planning, Management & Education, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: hoveidi@ut.ac.ir

**Article Info**

**Research Article:**
**Research Paper**

**Article history:**
Received 30 March 2023
Received in revised from 10 May 2023
Accepted 21 May 2023
Publish online 10 June 2023

**Keywords:**
*Ecological risk index, Heavy metals, Karaj River, Pollution Load Index, Riverbed sediments.*

**ABSTRACT**

Rivers are one of the most important sources of surface water in the world. The purpose of this research is to investigate the contamination of Karaj River sediments with heavy metals using sediment quality indices, evaluate the effects of pollution on the environment, and provide solutions to reduce pollution and its aftereffects. To achieve this goal, the sediments of the Karaj River bed were sampled at nine stations, and the total concentration of heavy elements in the samples was measured by the ICP device. Eventually, the sediment quality indicators for each of the metals were analyzed separately. The results showed that the Karaj River suffered little pollution in terms of bed sediment contamination with heavy metals, but the role of human activities in producing this amount of pollution cannot be neglected. Urban and rural activities, as a result of their effluents and sewage leaking into the river environment, construction and road construction projects in the region, land use changes in the river's boundaries and margins, and the people's lack of awareness in the region regarding the environmental effects of metal pollution. Inadequacy in proper education and culture in relation to tourism and environmental protection are among the destructive and polluting human factors in the area of Karaj River, which caused an increase in copper contamination up to 2.36 as well as the Pollution Load Index to the point of 0.76 in downstream stations.

**Cite this article:** Akhlaghifard, S., Nasrabadi, T., Hoveidi, H. (2023). Ecological Risk Assessment of Sediments in the River Environment (Case Study: Karaj River). Journal of Environmental Studies, 49 (3), 321- 335.
DOI: http//doi.org/10.22059/JES.2023.358325.1008404

© The Author(s).
**Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/JES.2023.358325.1008404

**Extended Abstract**

**Introduction**

Rivers are one of the main sources of freshwater for drinking, agriculture, and industry. The chemistry of the river has a direct relationship with the incoming waters from the atmosphere, the geological structure of the region, and the effects of human activities along the river's border. Today, the progress of industries and urban and rural communities, as well as the leakage of sewage and their waste materials into river ecosystems, has caused a serious problem regarding water pollution. Therefore, the contamination of aquatic ecosystems with heavy elements is a substantial topic that has been focused on by researchers in the recent studies. Karaj River is one of the most important sources of surface water in terms of providing energy, drinking water, economics, and tourism in this region due to its special geographical location and proximity to metropolises such as the capital of Iran. The natural geological features as well as the special climate of the Karaj River have turned this area into a valuable native habitat. The purpose of this study is to investigate the occurrence of heavy metals, including lead, cadmium, chromium, zinc, copper, and arsenic in surface sediments of the river and to evaluate their ecological risk and also investigate the pollution factor of these polluting elements.

**Materials and Methods**

In this research, based on the land use of the region, road construction, the location of recreational, commercial and restaurant centers, the location of villages and the main branches of the Karaj River, as well as the geographical location of the Amirkabir Dam, which is one of the main sources of drinking water in the two provinces of Tehran and Alborz, the river bed sediments were sampled in nine domains from upstream to downstream respectively. Two sediment samples were taken from two stations in downstream of the river due to the presence of villages and commercial centers, as well as the river leading to the urban fabric of Karaj and agricultural and industrial lands, and the other seven samples were taken due to the high importance of Amirkabir Dam as a vital system in the provision and distribution of drinking water in the region, and considering the presence of upstream villages, samples were also taken from the upstream parts of the dam. The samples were dried in an oven at 30°C in order to prepare them for the laboratory and to measure the concentrations and total volatile organic matter, and then they were separated and filtered by a sieve with a 63-micron mesh. The sieved samples were transferred to the laboratory to measure the total concentration using the ICP device.

**Results and Discussion**

In general, except for the copper and arsenic elements, the rest of the heavy metals investigated in this index generally have a contamination factor of less than 1 in most stations and are in the category of low pollution. The copper element with the highest contamination factor in most of the sampling stations shows numbers between 1 and 3, which indicates the average contamination of the sediments of the sampling stations with this element. On the other hand, arsenic has moderate pollution in approximately half of the stations, and in the rest of the stations, arsenic pollution was considerably low. In general, the ecological risk factor for all the studied elements in the sediments of the Karaj River is less than 40, which means that heavy polluting elements in the sediments of the riverbed have created a small risk for this ecosystem. The elements like arsenic, copper and cadmium hold a higher ecological risk among the others and include a wider range. In terms of risk, all the stations have a relatively low risk index in such a way that the obtained figures are far less than 150, and the Karaj River is considered to be in the range of low risk at 9 sampling stations. On average, the risk index for the Karaj River is 29.09, which is an acceptable figure in terms of ecological risk potential for this watershed.

**Conclusion**

According to the findings of this research and the analysis and evaluations, it can be generally said that the Karaj River is not in a critical situation regarding the threats and dangers of heavy element pollution, but with the increase and continuation of human activities in the catchment of the river, the issue of heavy element pollution has a high potential to reduce the water quality and sedimentation of this aquatic environment.

University of Tehran Press

**نشـــریه محیـــط شناســـی**

**دوره ۴۹، شمـــاره ۳، پاییز ۱۴۰۲**

**Journal Homepage**: http://Jes.ut.ac.ir

**۶۹۲۲- ۲۳۴۵ :شاپای الکترونیکی** **۸۶۲۰- ۱۰۲۵:شاپای چاپی**

# ارزیابی سطح ریسک اکولوژیک رسوبات در محیط رودخانه‌ای (مطالعه موردی: رودخانه کرج)

**سپهر اخلاقی فرد[۱]، تورج نصرآبادی[۲]✉، حسن هویدی[۳]**

۱. گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: sepehrfard7@gmail.com
۲. گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: tnasrabadi@ut.ac.ir
۳. گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: hoveidi@ut.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله: مقاله پژوهشی**

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۲/۰۱/۱۰
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۲/۰۲/۲۰
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۲/۰۲/۳۱
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۲/۰۳/۲۰

**کلیدواژه‌ها:**
*رسوبات بستر رودخانه، رودخانه کرج، شاخص بار آلودگی، شاخص ریسک اکولوژیک، عناصر سنگین.*

**چکیده**

رودخانه‌ها از مهمترین منابع آب در جهان به شمار می‌روند. هدف از این پژوهش بررسی آلودگی رسوبات رودخانه کرج به عناصر سنگین با استفاده از شاخص‌های کیفی رسوب و ارزیابی اثرات آلودگی بر محیطزیست و همچنین ارایه راهکارهایی به جهت کاهش آلودگی و اثرات آن می‌باشد. بدین‌منظور از رسوبات بستر رودخانه کرج در ۹ ایستگاه نمونه‌برداری به عمل آمد و اندازه‌گیری غلظت کل عناضر سنگین موجود در نمونه‌ها توسط دستگاه ICP صورت پذیرفت و در انتها با به‌کارگیری شاخص‌های کیفی رسوب هر کدام از عناصر به طور جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج به گونه‌ای رقم خورد که رودخانه کرج از نظر آلودگی رسوبات بستر به عناصر سنگین به طورکلی آلایندگی کمی را متحمل گردیده اما نقش فعالیت‌های بشرزاد در تولید این میزان از آلودگی قابل اغماض نیست. فعالیت‌های شهری و روستایی و در نتیجه نشت پساب‌ها و فاضلاب‌های آن‌ها به محیط رودخانه، پروژه‌های عمرانی و راه‌سازی در منطقه، تغییرات کاربری اراضی در حریم و حاشیه رودخانه، کمبود آگاهی مردم منطقه نسبت به اثرات زیست‌محیطی آلودگی عناصر سنگین و ضعف در آموزش و فرهنگ‌سازی صحیح در رابطه با گردشگری و حفاظت از محیط زیست از جمله عوامل انسانی مخرب و آلاینده در محدوده رودخانه کرج بوده که سبب افزایش فاکتور آلودگی مس تا رقم ۲/۳۶ و همچنین شاخص بار آلودگی در ایستگاه‌های انتهایی تا مقدار ۰/۷۶ شده است.

**استناد:** اخلاقی فرد، سپهر.؛ نصرآبادی، تورج.؛ هویدی، حسن. (۱۴۰۲). ارزیابی سطح ریسک اکولوژیک رسوبات در محیط رودخانه‌ای (مطالعه موردی: رودخانه کرج). نشریه محیط‌شناسی، ۴۹(۳)، ۳۲۱- ۳۳۵.

DOI: http//doi.org/ 10.22059/JES.2023.358325.1008404
DOR: 20.1001.1.10258620.1402.49.3.4.8

**ناشر:** انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: http//doi.org/ 10.22059/JES.2023.358325.1008404

## ۱. مقدمه

رودخانه‌ها به عنوان بخشی از چرخه هیدرولوژی یکی از تامین‌کنندگان اصلی آب به جهت مصارف شرب، کشاورزی و صنعت می‌باشند. شیمی رودخانه ارتباط مستقیمی با آب‌های ورودی از اتمسفر زمین، ساختار زمین شناختی منطقه و تاثیر ات فعالیت‌های بشر در حریم و حاشیه رود، دارد. امروزه با پیشرفت صنایع و جوامع شهری و روستایی و همچنین تخلیه یا نشت فاضلاب‌ها و مواد زاید آن‌ها به رودخانه سبب ایجاد معضلی جدی در مبحث آلودگی آب گردیده است. (Junubi, 2004) در این میان آلودگی اکوسیستم‌های آبی به عناصر سنگین مبحثی با درجه اهمیت بسیار بالا می‌باشد که در مطالعات اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. ( Idris et al., 2007 ; Kar et al., 2008) به طورکلی عناصر سنگین از طریق فعالیت‌های بشر و فرآیندهای طبیعی اکوسیستم‌ها وارد بوم سامانه‌های آبی می‌گردد. (Bhuyan et al., 2017) این عناصر پس از ورود به محیط رودخانه، به مدت کمی در فاز محلول باقی‌مانده و در رسوبات بستر تجمع یافته که می‌توانند در درازمدت به عنوان یک منبع آلودگی ثانویه عمل کنند. فلزات سنگین در نهایت توسط رسوبات سامانه‌های آبی جذب گردیده و مدت زمان زیادی را در محیط رسوبی باقی می‌مانند که موجب آثار زیان بار زیست‌محیطی می‌گردند. (Feng Peng et al., 2009) فلزات سنگین تحت عنوان آلاینده‌های سمی به طور جدی نقش اساسی در تشدید پدیده‌هایی از قبیل تجمع زیستی و بزرگنمایی زیستی در موجودات زنده دارند (Zhao et al, 2021). پایداری بالای این عناصر و انتقال آن در زنجیره غذایی جانداران تحت عنوان بزرگنمایی زیستی، ریسک اکولوژیکی این عناصر را دوچندان کرده است. (Azimi et al., 2012) امروزه خطر آلودگی پیکره‌های آبی در مقیاس جهانی به عنوان یک هشدار جدی برای سلامت اکوسیستم مطرح گردیده است (Liang and Bartzas, 2021) در نتیجه به فلزات سنگین که یکی از آلاینده‌های اصلی آب‌های سطحی در عصر حاضر می‌باشند بیش از پیش پرداخته می‌شود (Li et al., 2022 ; Wang et al., 2022). بنابراین مطالعه بر روی کیفیت رسوبات رودخانه از طریق ارزیابی غلظت فلزات سنگین رسوبات بستر امری لازم و ضروری جهت شناسایی منابع آلاینده و تخصیص راه‌حل‌هایی در راستای مدیریت و رفع بحران آلودگی آب رودخانه است. (Pahlevan, 2010) رودخانه کرج به دلیل موقعیت جغرافیایی ویژه و مجاورت با کلان‌شهرهایی مانند پایتخت ایران، یکی از مهمترین منابع آب‌های سطحی به لحاظ تامین انرژی و آب شرب، اقتصادی و گردشگری در این منطقه به شمار می‌رود. ویژگی‌های طبیعی، زمین شناختی و همچنین اقلیم خاص رودخانه کرج این منطقه را به زیست بومی با ارزش تبدیل کرده است. هدف از این مطالعه، بررسی غلظت فلزات سنگین سرب، کادمیوم، کروم، روی، مس و آرسنیک در رسوبات سطحی رودخانه و ارزیابی ریسک اکولوژیک آنها و همچنین بررسی فاکتور آلودگی این عناصر آلاینده می‌باشد.

## ۲. مواد و روش‌ها

رودخانه کرج از جمله رودخانه‌های دایمی استان البرز در حوزه آبخیز دریاچه نمک می‌باشد که از به هم پیوستن دو رودخانه ولایت‌رود و وارنگه رود که به ترتیب از کوه کلون بستک و کوه خرسنگ در رشته کوه‌های البرز سرچشمه گرفته و در طی مسیر سرشاخه‌هایی به آن پیوسته و سپس با عبور از دشت‌های کرج و شهریار به جاجرود می‌پیوندد و در نهایت به دریاچه نمک قم می‌ریزد. این رودخانه واقع در محدوده مختصات جغرافیایی به عرض 35°47'00"N تا 36°06'00"N و به طول 51°00'00"E تا 51°32'00"E می‌باشد. آلاینده‌های مختلفی از جمله فلزات سنگین در طی فعالیت‌های روستایی و گردشگری از طریق فاضلاب و مواد زاید وارد این اکوسیستم آبی می‌شوند. در این پژوهش بر اساس کاربری اراضی منطقه، راه‌سازی، موقعیت مراکز تفریحی، تجاری و رستوران‌ها، محل قرارگیری روستاها و سرشاخه‌های ورودی به رودخانه کرج و همچنین موقعیت جغرافیایی سد امیرکبیر که یکی از منابع اصلی تامین کننده آب شرب استان‌های تهران و البرز می‌باشد. در ۹ نقطه، نمونه‌برداری از رسوبات بستر رودخانه به ترتیب از بالادست تا پایین دست صورت گرفته است. ۲ نمونه رسوب از ۲ ایستگاه در پایین‌دست رودخانه به علت حضور روستاها و مراکز تجاری و همچنین منتهی شدن رودخانه به بافت شهری کرج و اراضی کشاورزی و صنعتی گرفته شده و ۷ نمونه دیگر به دلیل اهمیت بالای سد امیرکبیر به عنوان یک سیستم حیاتی در تامین و توزیع آب شرب منطقه و حضور روستاهای بالادست آن، از قسمت‌های بالادستی سد نمونه‌برداری شد.

نمونه‌برداری از بستر سد توسط نمونه‌بردارهای غیرفلزی (پلاستیکی یا پلی‌اتیلن) به منظور به حداقل رساندن خطا در آنالیز نمونه‌ها صورت گرفته و سپس رسوبات در نایلون‌هایی در بسته به طور مجزا قرار داده شد. پس از مرحله نمونه‌برداری نمونه‌ها به جهت آماده‌سازی برای آزمایشگاه و سنجش میزان غلظت‌ها و کل ماده آلی فرار، ابتدا درون آون در دمای ۳۰°C خشک گردیده و توسط الک با مش ۶۳ میکرون، جداسازی و الک شدند. نمونه‌های الک شده به آزمایشگاه جهت اندازه‌گیری غلظت کل با استفاده از دستگاه ICP منتقل گردیدند. جهت بررسی غلظت کل عناصر سمی در نمونه‌های رسوب از روش آنالیز چهار اسید (HF, HCl, HClO4, HNO3) و خوانش با به کارگیری ICP-MS استفاده گردید. همچنین اطلاعات لازم نظیر نقشه‌های GIS و اطلاعات زمین شناسی و هیدرولوژیکی از مراجع و سازمان‌های مربوطه گردآوری و آنالیز شد

از اهداف این پژوهش می‌توان موارد ذیل را نام برد:

الف) اندازه‌گیری و ارزیابی آلودگی رسوبات رودخانه کرج به فلزات سنگین و تعیین شدت آن با استفاده از فاکتورهایی مانند فاکتور آلودگی ($C_f$) یا شاخص هاکانسون (Hakanson, 1980)، شاخص بار آلودگی (PLI)، شاخص درجه آلودگی ($C_d$)، شاخص درجه آلودگی اصلاح شده ($mC_d$) و شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک (PER)

ب) شناسایی منابع احتمالی در آلایندگی رودخانه کرج به فلزات سنگین و ارایه راهکارهای مدیریتی برای آن

در این مطالعه برای رسیدن به اهداف موردنظر ابتدا بررسی کاملی از پیشینه تحقیق در ایران و جهان در مبحث آلودگی رودخانه و طریقه انتقال و توزیع آلاینده‌ها انجام گردید.

میلاچی و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهش خود به شناسایی عناصر بالقوه سمی در آب و رسوبات رودخانه ساوا پرداختند. اکوسیستم‌های رودخانه‌ای در معرض عوامل تنش‌زای مختلف قرار دارند. در میان آن‌ها، عناصری ممکن است به آلودگی کلی محیط‌های رودخانه، به‌ویژه در حوادث جریان شدید کمک کند. برای ارزیابی تاثیر شرایط متغیر جریان رودخانه از عناصر سمی بالقوه (PTE) در رسوبات نمونه‌ها در سپتامبر ۲۰۱۴ (هنگام تخلیه آب بسیار زیاد) و در سپتامبر ۲۰۱۵ (شرایط کم‌آبی) جمع‌آوری شد. در نمونه‌های آب غلظت عناصر کل و محتوای عنصر حل شده (۰/۴۵ میکرومتر) تعیین شد. آلودگی رسوب با تعیین غلظت عناصر کل و کسر عنصر متحرک محاسبه شد. ورودی‌های آنتروپوژنیکی عناصر به رسوبات با عادی‌سازی عنصر در مقابل غلظت آلومینا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که غلظت PTE در آب به‌طورکلی در هنگام تخلیه آب زیاد بود، در حالی که غلظت محلول در شرایط سطح آب پایین بیشتر بود.

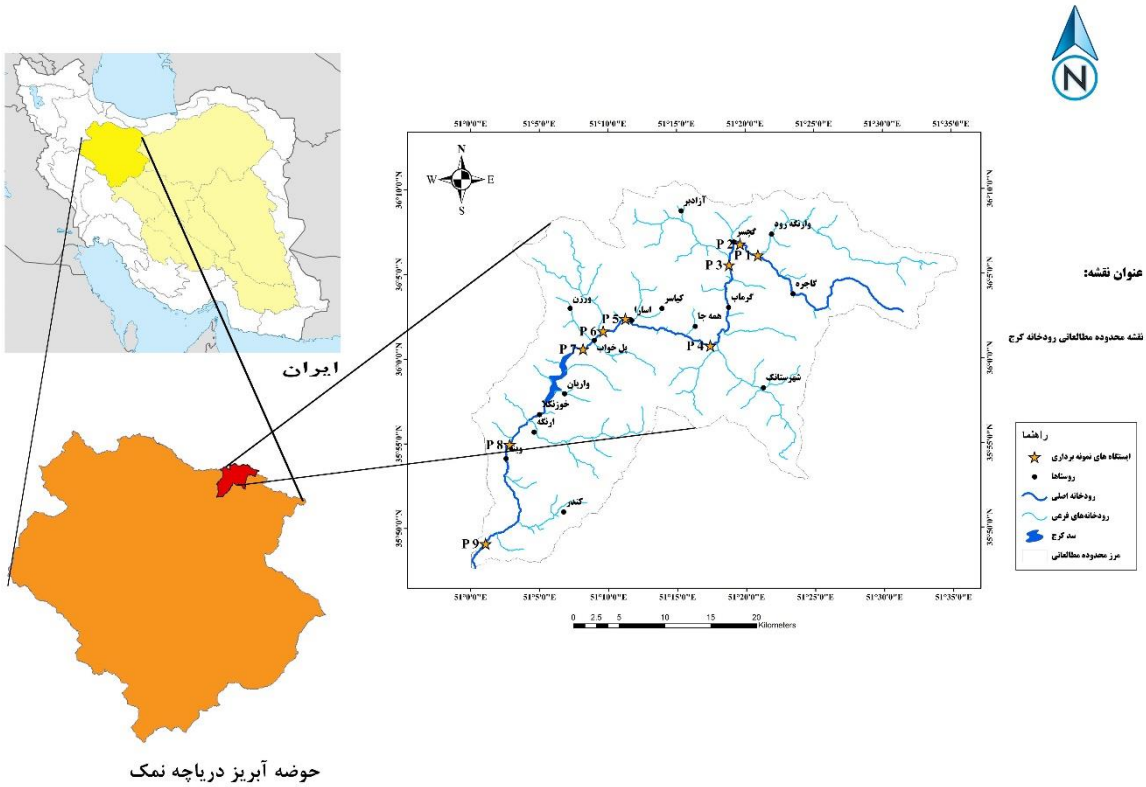
شی و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی تاثیر خاصیت جذب توسط فراکتال و توزیع انرژی سایت در مورد رسوب رودخانه زرد پرداختند. با توجه به این که آلودگی توسط فلزات سنگین عامل اصلی است که بر کیفیت آب در رودخانه تاثیر می‌گذارد، فلز سنگین سرب در حوضه رودخانه زرد مورد توجه قرار گرفته است. فلزات سنگین موجود در رودخانه توسط رسوب معلق به‌شدت جذب می‌شوند. روند جذب فلزات سنگین توسط رسوبات رودخانه زرد توسط آزمایش دسته‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بعد دی‌فراکتالی توزیع ذرات رسوب و کربن آلی بر پارامترهای جذب تاثیر داشته است. محتوای رس + سیلت مختلف در رسوب سبب شده است که ساختار رسوب متفاوتی ایجاد شود.

سان و همکاران (۲۰۱۱) در مقاله خود شبیه‌سازی محتویات فلزی از طریق همبستگی پایدار فلزات رسوبات رودخانه داگو انجام دادند. تعیین آلاینده‌های رسوبات رودخانه امری ضروری و باارزش است. به‌منظور کاهش تعداد فلزات مانیتورینگ که در آینده مورد بررسی قرار گرفته‌اند، از تجزیه‌وتحلیل آماری فلزات سنگین در رسوبات رودخانه داگو استفاده شده و یک مدل شبیه‌سازی تهیه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تمام فلزات مورد بررسی به‌جز روی و نیکل در رسوبات رودخانه داگو با سه یا بیشتر از سه فلز دیگر ارتباط مثبت دارند. فلزات مانیتورینگ بهینه رسوبات رودخانه داگو بر اساس همبستگی‌ها و ضرایب همبستگی آن‌ها از فلزات سرب (کروم)، نیکل، جیوه و روی است. برای تعیین محتوای فلز در رسوبات رودخانه داگو در آینده، تنها شناسایی فلزات مانیتورینگ بهینه در هر ترانس کت نمونه‌برداری مورد نیاز است.

راست منش و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهش خود به ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات سطحی رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز پرداختند. به‌منظور ارزیابی آلودگی رسوبات رودخانه کارون به فلزات سنگین، ۲۴ نمونه از رسوبات سطحی (۰/۵سانتی‌متر) جمع‌آوری

شد. غلظت فلزات سنگین (کروم، مس، روی، سرب، آرسنیک، نیکل، منگنز و آهن) توسط روش ICP-MS تعیین گردید. به منظور بررسی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات منطقه، فاکتور آلودگی ($C_f$) و درجه آلودگی (Cd) محاسبه شدند. از معیار کیفی رسوب (SQGs) برای تعیین ریسک بوم‌شناختی فلزات سنگین استفاده نمودند. تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که مس، روی، سرب، ارتباط معنی‌داری با OC دارند و احتمالا به‌طور عمده از فاضلاب خانگی و پساب صنعتی ناشی می‌شوند. در مقابل، کروم و آرسنیک و نیکل با آهن و منگنز همبستگی دارند که احتمالا ناشی از منابع طبیعی یا کشاورزی است. نتایج نشان‌دهنده آلودگی متوسط رسوبات رودخانه بود.

وثوق و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه خود با موضوع آلودگی رسوبات رودخانه‌ای دانه‌بندی شده به فلزات سنگین مطالعه موردی: رودخانه سفیدرود به بررسی میزان آلودگی رودخانه پرداختند. بدین‌منظور از رسوبات سطحی پنج ایستگاه در طول رودخانه سفیدرود نمونه‌برداری کردند. در ادامه شش اندازه ذرات رسوبات برای انجام آنالیزهای شیمیایی، محاسبه شاخص‌های آلودگی و آنالیزهای آماری انتخاب شدند. نتایج آنالیز فلزات سنگین نشان داد که با کاهش اندازه ذرات غلظت تعداد فلزات بیشتری از میانگین رسوبات جهانی و پوسته زمین فراتر و برای برخی همانند منگنز افزایش اندازه ذرات همراه افزایش میزان غلظت این‌گونه فلزات بوده است. نتایج شاخص‌های درجه آلودگی اصلاح شده و ریسک اکولوژیک نشان داد که رسوبات ۶۳ تا ۱۲۵ میکرون به ترتیب دارای آلودگی شدید و ریسک اکولوژیک زیادند.




**شکل ۱.** نقشه محدوده جغرافیایی رودخانه کرج

## ۱-۲. فاکتور آلودگی ($C_f$)

یکی از راه‌های تفسیر آلودگی رسوبات محیط‌های آبی به عناصر سنگین و تعیین شدت آن استفاده از فاکتور آلودگی می‌باشد (Andy & Khaled, 2009) که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد: (Hakanson, 1980)

$$C_f = \frac{C_x}{C_b} \quad (۱)$$

در این رابطه $C_f$: فاکتور آلودگی، $C_x$: غلظت عنصر در نمونه و $C_b$: غلظت عنصر در مدیای مرجع می‌باشد.

### ۲-۲. درجه آلودگی ($C_d$)

شاخص درجه آلودگی به منظور یکپارچه‌سازی داده‌های مربوط به آلودگی و ارزیابی شدت آلودگی می‌باشد و از مجموع فاکتورهای آلودگی حاصل می‌گردد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود: (Hakanson, 1980)

$$C_d = \sum_{i=1}^{i=n} C_f \quad (۲)$$

که در این رابطه $C_f$: ضریب آلودگی برای هر عنصر و n: تعداد عناصر مورد بررسی می‌باشد.

### ۲-۳. درجه آلودگی اصلاح شده ($mC_d$)

شاخص درجه آلودگی که توسط هاکانسون ارایه گردید از چندین جهت دارای محدودیت می‌باشد که این مشکل با استفاده از درجه آلودگی اصلاح شده رفع گردیده که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد: (Abrahim, 2005)

$$mC_d = \frac{\left(\sum_{i=1}^{i=n} C_f^i\right)}{n} \quad (۳)$$

که در این رابطه $mC_d$: درجه آلودگی اصلاح شده، $C_f$: ظریب آلودگی و n: تعداد عناصر مورد بررسی می‌باشد.

### ۲-۴. شاخص بار آلودگی (PLI)

شاخص بار آلودگی فاکتوری برای بررسی میزان کل آلاینده‌ها در هر نمونه می‌باشد که در سال ۱۹۸۰ توسط تام لینسون ارایه گردید. (Paneer Selvam et al., 2011) هر چه مقادیر بار آلودگی به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد بیانگر آلودگی رسوبات به وسیله منابع زمین‌زاد و همچنین انسان‌زاد است. (Tomlinson et al., 1980) از دیدگاه برخی کارشناسان اگر میزان بار آلودگی بالاتر از ۱ باشد می‌توان رسوبات را آلوده تلقی کرد و اگر این شاخص کمتر از ۱ به‌دست آید، می‌توان رسوبات مورد بررسی را فاقد آلودگی دانست. (Cabrera et al., 1999) در اصل فاکتور بار آلودگی نمایانگر تعداد دفعات افزایش غلظت کل عناصر سنگین به مقدار بیش از غلظت زمینه می‌باشد و مختصرا میزان سمیت عناصر سنگین مورد مطالعه را ارزیابی می‌کند. (Hall, 2002) شاخص بار آلودگی تام لینسون (PLI) به شکل ریشه nام حاصل ضرب غلظت‌های عناصر سنگین مورد محاسبه قرار می‌گیرد و از رابطه زیر حاصل می‌گردد: (Angulo, 1996)

$$PLI = \sqrt[n]{\left(C_f 1 \times C_f 2 \times \ldots \times C_f n\right)} \quad (۴)$$

که در این رابطه PLI: شاخص بار آلودگی و $C_f$: فاکتور آلودگی برای هر عنصر n: تعداد عناصر مورد بررسی می‌باشد.

### ۲-۵. شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک (PER)

این شاخص به منظور ارزیابی پتانسیل ریسک اکولوژیکی رسوبات توسط هاکانسون در سال ۱۹۸۰ ارایه گردید. برای هر فلز سنگین یک بازخورد و پاسخ سمیت وجود دارد که مقادیر آن در قالب $T_r$ برای عناصر کادمیوم، آرسنیک، مس، سرب، نیکل، کروم و روی به ترتیب ۳۰، ۱۰، ۵، ۵، ۵، ۲ و ۱ می‌باشد. فاکتور ریسک اکولوژیک ($E_r$) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد: (Hakanson, 1980)

$$E_r^i = C_f^i \times T_r^i \quad (۵)$$

که در این رابطه $E_r^i$: فاکتور ریسک اکولوژیکی و $T_r^i$: میزان پاسخ سمیت برای هر عنصر و $C_f^i$: فاکتور آلودگی برای هر عنصر می‌باشد.

مجموع فاکتورهای ریسک اکولوژیک، شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک را تشکیل می‌دهند که برای ارزیابی ریسک اکولوژیکی آلودگی رسوبات رودخانه کاربرد دارد. از این شاخص با عنوان شاخص خطر نیز نام برده می‌شود و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد: (Hakanson, 1980)

$$RI = \sum_i^n E_r^i \quad (۶)$$

**جدول ۱.** رده بندی ریسک اکولوژیکی بر اساس فاکتور ریسک اکولوژیک(Hakanson, 1980)

| فاکتور ریسک اکولوژیکی (Er) | شدت ریسک | رده |
|---|---|---|
| Er < ۴۰ | ریسک کم | ۱ |
| ۴۰ ≤ Er < ۸۰ | ریسک متوسط | ۲ |
| ۸۰ ≤ Er < ۱۶۰ | ریسک قابل توجه | ۳ |
| ۱۶۰ ≤ Er < ۳۲۰ | ریسک زیاد | ۴ |
| ۳۲۰ ≤ Er | ریسک بسیار زیاد | ۵ |

**جدول ۲.** رده بندی ریسک اکولوژیک بر مبنای شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک (شاخص خطر)(Hakanson, 1980)

| شاخص خطر (RI) | میزان ریسک |
|---|---|
| RI < ۱۵۰ | پایین |
| ۱۵۰ ≤ RI < ۳۰۰ | متوسط |
| ۳۰۰ ≤ RI < ۶۰۰ | قابل ملاحظه |
| ≤ RI۶۰۰ | خیلی بالا |

**جدول ۳.** رده بندی آلودگی رسوبات بر اساس شاخص بار آلودگی(Tomlinson et al., 1980)

| شاخص بار آلودگی (PLI) | میزان آلودگی رسوبات |
|---|---|
| PLI < ۱ | رسوبات غیر آلوده |
| PLI ≥ ۱ | رسوبات آلوده |

## ۳. نتایج و بحث

این پژوهش به منظور بررسی غلظت عناصر سنگین در رسوبات بستر رودخانه کرج به عنوان یک اندیکاتور مناسب جهت ارزیابی آلودگی آب و سیستم رودخانه با به کارگیری شاخص‌های کیفی رسوب در محدوده حوزه آبریز دریاچه نمک انجام شد. در مبحث آلودگی رسوبات برای تجزیه و تحلیل دقیق و ارتباط بین عناصر و عوامل موثر در کیفیت رسوب پارامتر غلظت کل عناصر سنگین نمونه‌های رسوب اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از شاخص‌های مختلف مانند شاخص بار آلودگی (PLI)، درجه آلودگی ($C_d$)، درجه آلودگی اصلاح شده ($mC_d$) و شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک (PER) از طریق تجزیه و تحلیل محاسباتی به بررسی کیفی رسوبات رودخانه کرج پرداخته شد.

میانگین فاکتور آلودگی برای عنصر سرب ۰/۳۵ بوده که این عدد در مجموع آلودگی پایینی را برای این عنصر در رسوبات بستر رودخانه کرج بر مبنای این شاخص نشان می‌دهد. به طور تفکیکی در تمامی ایستگاه‌ها فاکتور آلودگی سرب کمتر از یک بوده که بیانگر آلودگی پایین این عنصر در رسوبات این نقاط می‌باشد. با توجه به (شکل ۲) و طبقه‌بندی استاندارد فاکتور آلودگی برای شش عنصر سنگین به طریق ذیل بررسی گردید:

فاکتور آلودگی کادمیوم در تمامی ایستگاه‌ها کمتر از یک می‌باشد که این مساله نمایانگر رده آلودگی کم در رسوبات هر ۹ ایستگاه نمونه‌برداری می‌باشد. همچنین میانگین فاکتور آلودگی کادمیوم برابر با ۰/۲۴ می‌باشد که این موضوع را به طورکلی تصدیق می‌کند.

فاکتـور آلودگی کروم در ایستگاه‌هـای P8 و P9 اعدادی بین یک و سه بوده که این نقـاط در رده آلودگی متوسط قرار می‌گیرند که به

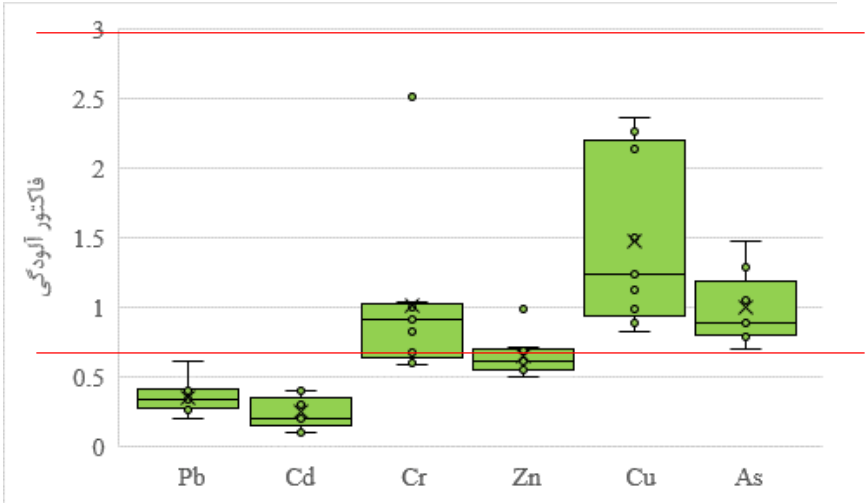
طورکلی از علل آن می‌توان تاثیر عوامل انسانی مانند رواناب‌ها و فاضلاب‌های روستایی، حمل و نقل و ترافیک در این محدوده و همچنین فعالیت‌های تفریحی- گردشگری غیراصولی را بیان کرد. میانگین فاکتور آلودگی برای عنصر کروم در مجموع ۹ ایستگاه نمونه‌برداری برابر با ۱ می‌باشد که رسوبات رودخانه کرج از نظر آلودگی به این عنصر را می‌توان در دسته آلودگی کم احتساب کرد.

فاکتور آلودگی روی در تمامی ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده کمتر از یک بوده و رسوبات رودخانه کرج در رده آلودگی کم از حیث فاکتور آلودگی فلز روی طبقه‌بندی می‌گردد. میانگین فاکتور آلودگی روی در رسوبات نمونه‌برداری شده برابر با ۰/۶۴ بوده که این رقم گواه میزان کم آلودگی روی بر مبنای شاخص فاکتور آلودگی می‌باشد.

فاکتور آلودگی مس در ۹ ایستگاه نمونه‌برداری اعدادی بین یک و سه می‌باشند که رسوبات بستر رودخانه کرج از نظر میزان آلودگی به مس در رده آلودگی متوسط قرار می‌گیرند. از طرفی در ایستگاه‌های P1، P3 و P8 میزان فاکتور آلودگی مس ارقام بالاتری نسبت به سایر نقاط نمونه‌برداری بوده که آلودگی رسوبات این نقاط را تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی نشان داده و می‌توان گفت که عوامل بشرزاد مسئول این میزان آلودگی بالا نسبت به سایر نواحی می‌باشد. میانگین فاکتور آلودگی مس برابر با ۱/۴۸ است که بیانگر آلودگی متوسط رسوبات رودخانه کرج به مس از نقطه نظر فاکتور آلودگی می‌باشد.

اعداد به دست آمده برای فاکتور آلودگی آرسنیک در ایستگاه‌های P2، P4، P7 و P8 بزرگتر از یک می‌باشند که رسوبات این نقاط بر مبنای فاکتور آلودگی آرسنیک، دارای آلودگی متوسط می‌باشند. علت این میزان از آلودگی در رسوبات این ایستگاه‌ها می‌تواند عوامل بشرزاد نظیر آلایندگی‌های روستایی در قسمت‌های بالادست و فعالیت‌های عمرانی در حوالی ایستگاه‌های بالادست سد از جمله ایستگاه P4 باشد. میانگین فاکتور آلودگی آرسنیک برابر با ۰/۹۹ می‌باشد که با اختلاف کمی رسوبات رودخانه کرج را مجموعا در رده آلودگی کم قرار می‌دهد.

در مجموع به غیر از عناصر مس و آرسنیک، باقی فلزات سنگین مورد بررسی در این شاخص به طورکلی فاکتور آلودگی کمتر از ۱ در اغلب ایستگاه‌ها داشته و در رده آلودگی کم قرار می‌گیرند. عنصر مس با بیشترین فاکتور آلودگی در اکثر ایستگاه‌های نمونه‌برداری ارقامی بین ۱ و ۳ را نشان می‌دهد که بیانگر آلودگی متوسط رسوبات ایستگاه‌های نمونه‌برداری به این عنصر می‌باشد. از طرفی آرسنیک نیز به طور تقریبی در نیمی از ایستگاه‌ها آلودگی متوسطی را دارا می‌باشد و در باقی ایستگاه‌ها این آلودگی از جانب آرسنیک کم است.

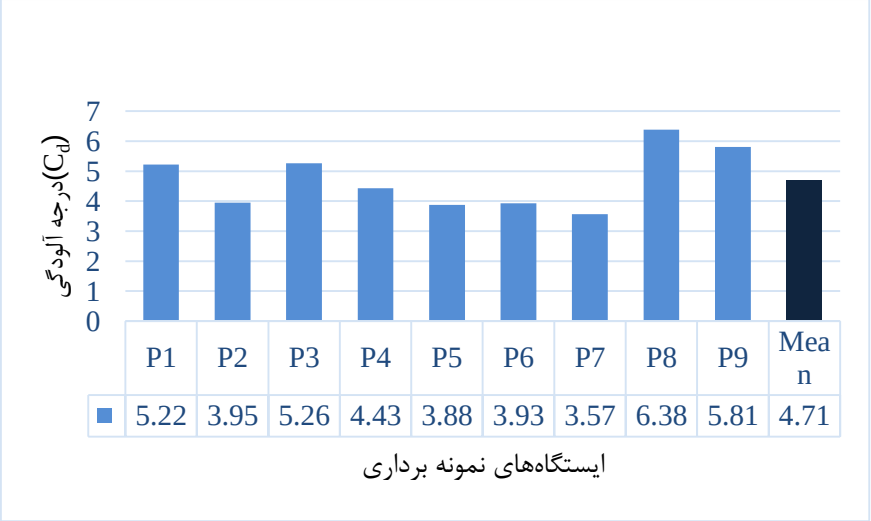



**شکل ۲.** نمودار جعبه ای فاکتور آلودگی عناصر سنگین رسوبات رودخانه ی کرج

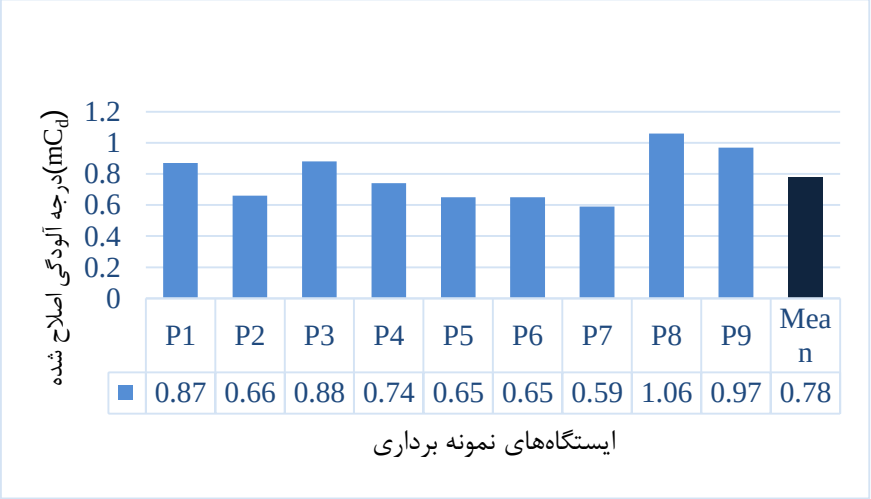
بر اساس (شکل ۳) میزان درجه آلودگی در تمامی ایستگاه‌های نمونه‌برداری به استثناء ایستگاه P8 ارقامی کمتر از ۶ می‌باشند که این نقاط در زمره ایستگاه‌هایی با درجه آلودگی پایین رسوب محسوب می‌گردند. از طرفی درجه آلودگی در ایستگاه P8 با مقادیری بین ۶ و ۸ در سطح درجه آلودگی متوسط قرار می‌گیرد. از علل آلودگی ایستگاه P8 به این میزان می‌توان به انواع فعالیت‌های انسان‌زاد همچون بهره‌برداری از منابع‌طبیعی، پروژه‌های عمرانی، راه‌سازی و اتوبان‌کشی در حوزه آبریز رودخانه کرج به منظور دسترسی کوتاه به سایر مناطق

و انواع فعالیت‌های محلی و روستایی به منظور کسب و درآمدزایی از جنبه‌های گردشگری منطقه اشاره کرد. ایستگاه P8 به عنوان آلوده‌ترین ایستگاه از منظر درجه آلودگی به مقدار ۶/۳۸ بوده که نشانگر این موضوع می‌باشد که این ناحیه تحت شعاع فعالیت‌های انسانی در بالادست و اثرات تجمعی آلودگی این منابع و همچنین فعالیت‌های مخرب در حاشیه رودخانه قرار دارد. میانگین درجه آلودگی از تمامی نقاط نمونه‌برداری شده برابر با ۴/۷۱ می‌باشد که این رقم بیانگر درجه آلودگی پایین رسوبات بستر رودخانه کرج در چارچوب یک میانگین می‌باشد.

بر مبنای (شکل ۴) تمامی ایستگاه‌ها دارای درجه آلودگی اصلاح شده پایینی می‌باشند. زیرا، ارقام به دست آمده برای این شاخص کمتر از ۱/۵ بوده و به لحاظ درجه آلودگی اصلاح شده در رده‌بندی غیر آلوده تا آلودگی بسیار اندک جای می‌گیرند. میانگین درجه آلودگی اصلاح شده از مجموع تمامی نقاطی که از آن‌ها نمونه‌برداری به عمل آمده برابر با ۰/۷۸ می‌باشد که از حیث این شاخص، به طورکلی رودخانه کرج در وضعیت غیر آلوده تا آلودگی بسیار اندک قرار دارد.

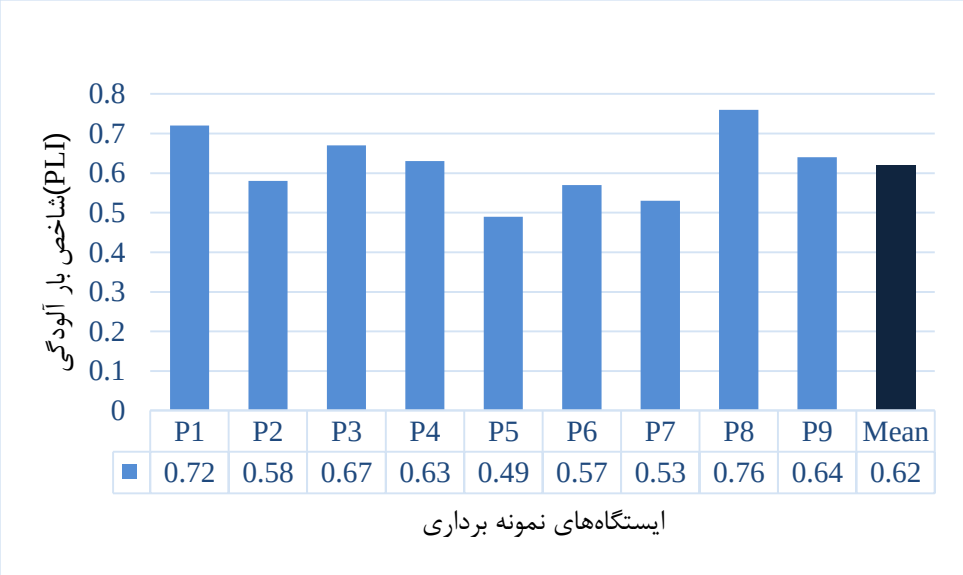



**شکل ۳.** نمودار درجه آلودگی رسوبات بستر رودخانه کرج




**شکل ۴.** نمودار درجه آلودگی اصلاح شده برای رسوبات بستر رودخانه کرج

هر چه میزان شاخص بار آلودگی به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشانگر قرابت غلظت عناصر سنگین به عناصر زمینه‌ای است. با توجه به (شکل ۵) ایستگاه‌های P1 و P8 دارای شاخص بار آلودگی نزدیک به یک می‌باشند که نمایانگر انطباق نسبی غلظت عناصر سنگین در این ایستگاه‌ها با غلظت عناصر زمینه‌ای هستند. در میان این ایستگاه‌ها کمترین بار آلودگی مربوط به ایستگاه P5 با میزان ۰/۴۹ بوده و بیشترین بار آلودگی مربوط به ایستگاه P8 به مقدار ۰/۷۶ می‌باشد. میانگین بار آلودگی در رودخانه ی کرج ۰/۶۲ می‌باشد که با توجه به این که رقم مذکور کوچک‌تر از یک بوده، به طورکلی رسوبات بستر رودخانه کرج از نقطه نظر بار آلودگی، غیرآلوده تلقی می‌گردد. در پژوهشی که توسط حسین و همکاران در سال ۲۰۲۱ تحت عنوان قیاس دو رودخانه Buriganga و Turag در کشور بنگلادش صورت گرفت، از هر رودخانه ۵ ایستگاه نمونه‌برداری در نظر گرفته شد که پس از بررسی مشخص گردید مقادیر PLI برای همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری در رودخانه Buriganga کمتر از ۱ است که نشان‌دهنده سطح آلودگی ناچیز بوده، در حالی که در رودخانه Turag مقدار بار آلودگی در ایستگاه اول کمی بیشتر از عدد ۱ در هر دو فصل زمستان و تابستان می‌باشد. بیشترین میزان بار آلودگی در رودخانه Buriganga در اولین ایستگاه نمونه‌برداری می‌باشد که با رقم ۰/۵۶ در رده آلودگی ناچیز قرار دارد. همچنین بیشترین میزان بار آلودگی برای رودخانه Turag نیز در ایستگاه اول نمونه‌برداری برابر با ۱/۰۶ بوده که نشانگر آلودگی این ناحیه نسبت به سایر مناطق مورد بررسی در آن مطالعه می‌باشد.




**شکل ۵.** نمودار شاخص بار آلودگی رسوبات بستر رودخانه ی کرج

فاکتور ریسک اکولوژیک شش عنصر سنگین با توجه به ارقام به دست آمده در (شکل ۶) و طبقه‌بندی موجود در (جدول ۱) به صورت ذیل تجزیه و تحلیل گردید:

در تمامی نقاط نمونه‌برداری شده از رسوبات بستر رودخانه فاکتور ریسک اکولوژیکی سرب در محدوده ریسک کم قرار دارند. فاکتور ریسک اکولوژیک سرب به طور میانگین برابر با ۱/۷۴ می‌باشد.

هر ۹ ایستگاه نمونه‌برداری از نقطه نظر فاکتور ریسک اکولوژیک برای عنصر کادمیوم دارای پتانسیل و ریسک کمی می‌باشند و در مجموع به طور میانگین فاکتور ریسک اکولوژیک این عنصر برابر با ۷/۳۳ بوده که نمایانگر ریسک اکولوژیکی کم برای کادمیوم می‌باشد.

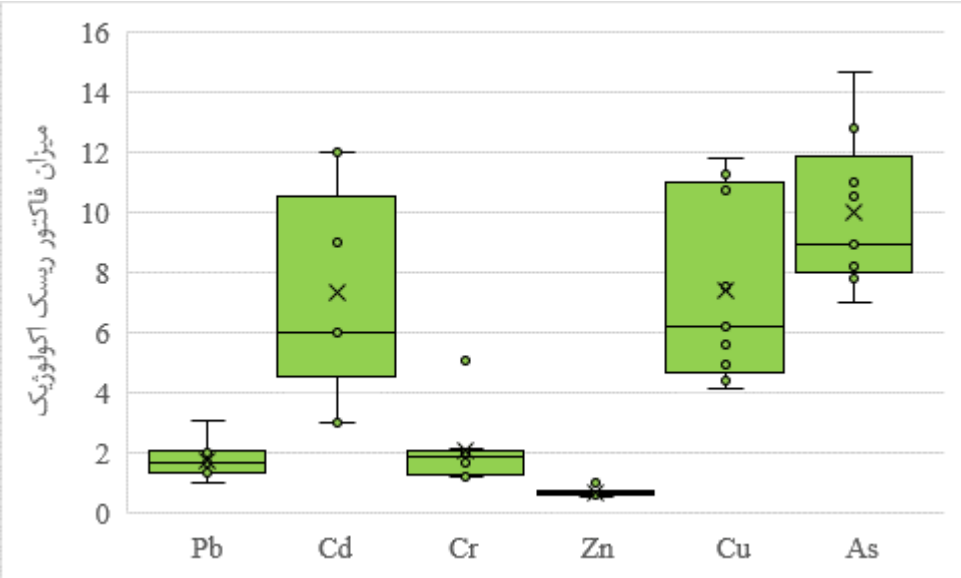
ریسک اکولوژیک کروم در تمامی ایستگاه‌های نمونه‌برداری با اختلاف زیادی کمتر از ۴۰ بوده و با میانگین ۲/۰۱ عنصر کروم در رسوبات بستر رودخانه کرج دارای ریسک کم می‌باشد.

فاکتور ریسک اکولوژیک روی در طول رودخانه کرج بسیار کم و نزدیک به صفر می‌باشد که این موضوع ناشی از ماهیت عنصر ضروری روی برای جانداران و خطر ریسک کم آن برای اکوسیستم می‌باشد. میانگین فاکتور ریسک اکولوژیک روی برای کل مسیر اصلی رودخانه کرج ۰/۶۴ بوده ریسک بسیار ناچیزی از جانب این عنصر به محیط وارد آمده است.

میزان فاکتور ریسک اکولوژیک عنصر مس در رسوبات بستر رودخانه کرج در تمامی ایستگاه‌ها در رده ریسک کم طبقه‌بندی می‌گردد اما با توجه به شاخص‌های غنی‌شدگی و فاکتور آلودگی می‌توان دریافت که ایستگاه‌های P1، P3 و P8 از ریسک بالاتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها برخوردارند که عملا این مساله نشان‌دهنده فعالیت‌های مخرب انسانی در انتشار آلودگی مس می‌باشد.

در تمامی ایستگاه‌های نمونه‌برداری در طول رودخانه کرج فاکتور ریسک اکولوژیک برای عنصر آرسنیک اعدادی کمتر از ۴۰ می‌باشد که آرسنیک در رسوبات بستر رودخانه کرج در هر ۹ ایستگاه دارای ریسک کم برای اکوسیستم آبی بوده و به طور میانگین این ریسک برابر با ۹/۹۸ برای کل رودخانه کرج می‌باشد.

به طورکلی فاکتور ریسک اکولوژیک برای تمامی عناصر مورد مطالعه در رسوبات رودخانه کرج کمتر از ۴۰ می‌باشد که عناصر سنگین آلاینده در رسوبات بستر رودخانه ریسک کمی را برای این اکوسیستم ایجاد کرده است، البته ریسک اکولوژیک آرسنیک، مس و کادمیوم در میان سایر عناصر بالاتر بوده و بازه وسیع‌تری را شامل می‌گردد. در پژوهشی مشابه کیندا و همکاران در سال ۲۰۲۱ از شش ایستگاه در رودخانه Mara واقع در تانزانیا نمونه‌برداری کردند و نتایج به دست آمده به گونه‌ای بود که در فصول خشک سال همه عناصر دارای پتانسیل ریسک اکولوژیک کمتر از ۴۰ بوده که نشان‌دهنده پتانسیل ریسک کم زیست‌محیطی است اما در فصول بارندگی ارقام و اعداد به دست آمده برای پتانسیل ریسک اکولوژیک عناصر مورد بررسی در تمامی ایستگاه‌ها بیشتر از ۴۰ بوده که بیانگر ریسک متوسط می‌باشد.

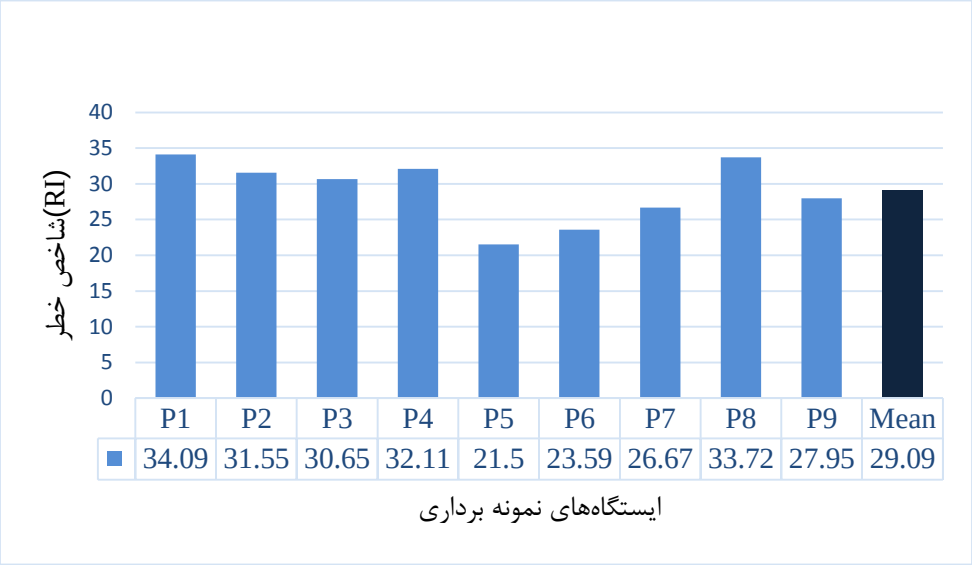



**شکل ۶.** نمودار جعبه‌ای فاکتور ریسک اکولوژیک عناصر سنگین رسوبات رودخانه کرج

به لحاظ ریسک با توجه به (شکل ۷) و (جدول ۲) تمامی ایستگاه‌ها دارای شاخص خطر نسبتا کمی می‌باشند به این صورت که ارقام به دست آمده با اختلاف زیادی کمتر از ۱۵۰ بوده و رودخانه ی کرج در ۹ ایستگاه نمونه‌برداری در محدوده ریسک خطر کم محسوب می‌گردد. به طور میانگین شاخص خطر برای رودخانه ی کرج ۲۹/۰۹ بوده که رقم قابل قبولی به لحاظ پتانسیل ریسک اکولوژیکی برای این حوزه‌آبخیز می‌باشد. در حالی که مکوریا و همکاران با پژوهشی که در سال ۲۰۲۰ بر میزان آلودگی رودخانه Little Akaki واقع در اتیوپی داشتند، میزان شاخص خطر را برای تمامی ایستگاه‌ها به طور میانگین برابر با ۳۵۰/۶۲ برآورد کردند که این رقم با اختلاف فاحشی نسبت به میانگین شاخص خطر در رودخانه کرج در طبقه ریسک قابل ملاحظه قرار می‌گیرد.

بر اساس یافته‌ها و داده‌های به دست آمده سرب از منظر فاکتور آلودگی نیز آلودگی پایینی را به مقدار ۰/۳۵ برای رودخانه کرج ایجاد کرده و همچنین از حیث ریسک اکولوژیک، ریسک کمی را با فاکتور ریسک اکولوژیک به میزان ۱/۷۴ برای رودخانه به وجود آورده است.

به طورکلی می‌توان گفت که رودخانه کرج از نظر آلودگی رسوبات به عنصر سرب در وضعیت مناسبی قرار دارد و آلایندگی این فلز بر مبنای فاکتورهای کیفی رسوب کم است.




**شکل ۷.** نمودار شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک (شاخص خطر) در رسوبات بستر رودخانه کرج

عنصر کادمیوم به لحاظ فاکتور آلودگی با رقم متوسط ۰/۲۴ آلودگی کمی را برای رسوبات رودخانه کرج به دنبال دارد. فاکتور ریسک اکولوژیکی این عنصر برابر با ۷/۳۳ بوده که دارای ریسک کمی برای رودخانه کرج از نقطه نظر آلودگی و تاثیرات مخرب آن دارد. در مورد عنصر کادمیوم در مجموع می‌توان میزان آلایندگی کمی را از جانب این فلز برای رسوبات رودخانه کرج تلقی کرد اما به علت غنی‌شدگی متوسط این عنصر، بخشی از انتشار آن مربوط به فعالیت‌های بشرزاد می‌باشد.

فاکتور آلودگی کروم برابر با ۱ بوده که می‌توان گفت رسوبات رودخانه از نظر آلایندگی کروم در رده آلودگی کم می‌باشند. از منظر ریسک اکولوژیکی نیز کروم با میانگین ۲/۰۱ دارای ریسک کم برای اکوسیستم رودخانه کرج می‌باشد. در مجموع می‌توان اظهار داشت که رودخانه کرج با آلودگی کمی از جانب عنصر کروم مواجه است.

در نمونه‌های برداشت شده از رسوبات رودخانه کرج فلز روی با میانگین فاکتور آلودگی به میزان ۰/۶۴، آلودگی کمی را در رسوبات رودخانه کرج به وجود آورده و با رقم مشابه ۰/۶۴ برای فاکتور ریسک اکولوژیک، ریسک بسیار کمی را برای محیط رودخانه به همراه دارد. به طورکلی رودخانه کرج دارای آلودگی کمی به فلز روی می‌باشد.

فاکتور آلودگی مس با میانگین ۱/۴۸ آلودگی متوسطی را برای رسوبات به همراه دارد. میانگین فاکتور ریسک اکولوژیک مس به مقدار ۷/۳۹ نمایانگر ریسک کم این عنصر برای رودخانه از نظر آلودگی رسوبی می‌باشد. در مجموع عنصر مس با توجه به فاکتور آلودگی به میزان متوسط، آلودگی کم تا متوسطی را در رسوبات بستر رودخانه کرج ایجاد کرده است که بر اساس شاخص غنی‌شدگی به دست آمده برای مس این آلودگی را می‌توان غالبا از منشاء زمین‌شناختی تلقی کرد، اما سهم فعالیت‌های انسانی نیز در این مساله قابل چشم‌پوشی نیست.

از منظر فاکتور آلودگی آرسنیک با رقم میانگین ۰/۹۹ آلودگی‌زایی کمی را در رسوبات رودخانه به همراه داشته و از منظر فاکتور ریسک اکولوژیک نیز ریسک کمی را به مقدار ۹/۹۸ به اکوسیستم رودخانه وارد آورده است. به طورکلی می‌توان گفت که آلودگی آرسنیک در رسوبات رودخانه کرج کم بوده اما همین مقدار کم عمدتا توسط عوامل و فعالیت‌های بشری ایجاد گردیده است.

از نقطه نظر درجه آلودگی، رسوبات رودخانه کرج با میانگین درجه ۴/۷۱ دارای آلودگی کمی می‌باشند و به لحاظ درجه آلودگی اصلاح

شده نیز با رقم متوسط ۰/۷۸ در زمره رودخانه‌های غیرآلوده از منظر آلودگی رسوبات به عناصر سنگین محسوب می‌گردد. شاخص بار آلودگی رسوبات نیز با میانگین عددی ۰/۶۲ گواه غیرآلوده بودن رسوبات رودخانه کرج می‌باشد. به طورکلی از حیث پتانسیل ریسک اکولوژیک، شاخص خطر با میانگین ۲۹/۰۹ ریسک پایینی را از جانب آلودگی رسوبات به عناصر سنگین بر رودخانه کرج اعمال کرده است.

## ۴. نتیجه‌گیری

روند تغییرات میزان و پراکنش عناصر در رسوبات مقایسه و عوامل موثر بر همسویی یا عدم تطابق آن‌ها بحث و بررسی گردید. پس از قیاس شاخص‌های کیفی رسوب با استانداردهای موجود به منظور تلفیق نتایج مستخرج از این فاکتورها تفسیری بر مبنای یک جمع‌بندی از رده آلودگی در تمامی شاخص‌های کیفی رسوب انجام گرفت. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که منابع عمده ایجاد آلایندگی در رودخانه کرج پساب‌های شهری و روستایی، فاضلاب‌های خانگی، رواناب‌های باغداری، پروژه‌های بهره‌برداری از منابع‌طبیعی و عملیات راه‌سازی و احداث تونل می‌باشد. اما از آنجا که هر عنصر سنگین ماهیت منحصر به فرد خود را دارد، بخشی از میزان آلودگی حاضر در محیط رسوبی رودخانه مربوط به عوامل طبیعی، زمین‌شناسی، فرسایش خاک و هوازدگی سنگ‌های بستر رودخانه می‌باشد. با توجه به یافته‌های این پژوهش و تحلیل و ارزیابی‌های صورت گرفته در آن، به طورکلی می‌توان گفت که رودخانه کرج در وضعیت بحرانی از منظر تهدیدات و مخاطرات آلودگی عناصر سنگین قرار ندارد اما با افزایش و تداوم روند فعالیت‌های انسانی در محدوده رودخانه، مبحث آلودگی عناصر سنگین پتانسیل بالایی در کاهش کیفیت آب و رسوب این محیط آبی دارد. در نتیجه به منظور پیشگیری از این مشکلات، در این پژوهش به ارزیابی، قیاس و ارایه راهکار در راستای بهبود کیفیت محیط‌زیست رودخانه انجام گردید. با توجه به کمبود مطالعات زیست‌محیطی در منطقه و نظارت ناکافی بر فعالیت‌های انسانی در محدوده رودخانه کرج، راهکارهای ذیل در جهت مدیریت صحیح، بهبود وضعیت کیفی رودخانه کرج و پیشبرد اهداف توسعه پایدار پیشنهاد می‌گردد:

- شناسایی، ارزیابی و کنترل منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای آلاینده رودخانه کرج
- پیشگیری از نشت و ورود فاضلاب و پساب‌های خانگی و روستایی به محیط رودخانه و تصفیه و فرآوری آن در محل تولید به ویژه در محدوده ایستگاه P9
- ایجاد سیستم جمع‌آوری فاضلاب روستایی و جلوگیری از ورود آن به رودخانه کرج
- توسعه سیستم فاضلاب شبکه‌ای در منطقه به ویژه در روستاهای پرجمعیت توابع بخش آسارا که در بالادست سد قرار دارند و همچنین روستاهای پایین‌دست نظیر خوزنکلا و کندور
- مستقر کردن نشانگرهای زیستی در سیستم آبی رودخانه و سد به منظور دریافت و آنالیز بهتر داده‌ها
- نمونه‌برداری و بررسی مداوم از گونه‌های گیاهی و جانوری اکوسیستم رودخانه در جهت برآورد میزان غلظت و سمیت عناصر سنگین و اثربخشی و کنترل آن بر سلامت موجودات زنده وابسته به رودخانه

## منابع


Abrahim, G.M.S. (2005). Ph.D. Thesis, "Holonce sediment of Tamaki estuary: Characterization and impact of recent human activity on an urban estuary in Auckland, New Zealand", University of Auckland, New Zealand, pp. 361.

Andy, H. H., and Khaled, A. (2009). Heavy metals contamination in sediments of the western part of Egyptian Mediterranean Sea: Australian Journal of Basic and Applied Sciences, v. 3, p. 3330-3336.

Angulo, E. (1996). The Tomlinson's pollution load index applied to heavy metal "Mussel-Watch" data: a useful index to assess coastal pollution. Sciences Total Environment, 187(3): 19-56.

Azimi, A., Dadollahi Sohrab, A., Safahieh, A., Zolgharnein, H., Savari, A., Faghiri, A. (2012). Studying the levels of heavy metals mercury, cadmium, lead and copper in the sediments of the northwest of the Persian Gulf - Imam Khomeini Port, Oceanography, 3(11): 33-41.

Bhuyan, M.S., Abu Bakar, M., Akhtar, A., Hossain, M.B., Ali, M.M., Islam, M.S. (2017). Heavy metal contamination in surface water and sediment of the Meghna River, Bangladesh. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management 8 :273–279.

Cabrera, F., Clemente, L., Daz Barreintos, E., Lopez, R., Murillo, J.M. (1999). Heavy metal pollution of soils affected by the Gaudiamar toxic flood. The Science of Total Environment 242, 117-129.

Feng Peng J., Song Y., Yuan P., Cui X. and Qiu G. (2009). The remediation of heavy metals contaminated sediment. Journal of Hazardous Materials, 161, pp. 633-640.

Hakanson, l. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. Water Res, 14(8): 975-1001.

Hall, J.E. (2002). Bioconcentration, Bioaccumulation, and Biomagnification in Puget Sound Biota: Assessing the Ecological Risk of Chemical Contaminants in Puget Sound. University of Washington Tacoma. 19 p.

Hossain, M. N., Rahaman, A., Hasan, M. J., Uddin, M. M., Khatun, N., & Shamsuddin, S. M. (2021). Comparative seasonal assessment of pollution and health risks associated with heavy metals in water, sediment and Fish of Buriganga and Turag River in Dhaka City, Bangladesh. SN Applied Sciences, 3(4): 1–16.

Idris, A.M., Eltayeb, M.A.H., Potgieter-Vermaak, S.S., Van Grieken, R. and Potgieter, J.H. (2007). Assessment of heavy metals pollution in Sudanese harbors along the Red Sea Coast. Microchem. J, 87(11): 104-112.

Junubi, R. (2004). Contamination of water production resources and prevention techniques. Research Project of Rural Water and Water waste Company of West Azarbayjan Orumiyeh, Iran. pdfistical analyses, Environment Monitoring Assess, 152(1-4): 309-317.

Kar, D., Sur, P., Mandal S.K., Saha, T. and Kole, R.K. (2008). Assessment of heavy metal pollution in surface water. International Journal Environmental Sciences Technology, 5(1): 119-124.

Li, J. L., Zuo, Q. T., Feng, F., Jia, H. T. (2022). Occurrence and ecological risk assessment of heavy metals from Wuliangsuhai Lake, Yellow River Basin, China. Water 14(8):1264

Liang P., Bartzas G. (2021). Editorial overview: Heavy metals and metalloids: a serious threat to environment and human health. Curr Opin Environ Sci Health 23:100287

Mekuria, D. M., Kassegne, A. B., & Asfaw, S. L. (2020). Little Akaki River sediment enrichment with heavy metals, pollution load and potential ecological risks in downstream. Central Ethiopia. Environmental Systems Research, 9, 1-14.

Milačič, R., Zuliani, T., Vidmar, J., Oprčkal, P., & Ščančar, J. (2017). Potentially toxic elements in water and sediments of the Sava River under extreme flow events. Science of the Total Environment, 605, 894-905.

Nkinda, M. S., Rwiza, M. J., Ijumba, J. N., & Njau, K. N. (2021). Heavy metals risk assessment of water and sediments collected from selected river tributaries of the Mara River in Tanzania. Discover Water, 1(1), 3.

Pahlevan, R. (2010). The effect of weathering in the Buyukmelen River basin on the geochemistry of suspended and bed sediments and the hyrogeo chemical characteristics of river water, Duzce, Turkey. Journal of Asian Earth Sciences. 39, 62–75.

Paneer Selvam A., Laxmi Priya S., Banerjee K., Hariharan G., Purvaja R. and Ramesh R. (2011). "Heavy metal assessment using geochemical and statistical tools in the surface sediment of Vembanad Lake, Southwest coast of India", Environ Monit Assess., 184, 5899-5915.

Rastmanesh, F., Zarasvandi, A., Moslem, F. (2015). Assessment of heavy metal pollution in the surface sediments of the Karun River in Ahvaz city, Advanced Applied Geology, 5(17): 11-22.

Shi, H., Sun, Y., Zhao, X., & Qu, B. (2013). Influence on sorption property of Pb by fractal and site energy distribution about sediment of Yellow River. Procedia Environmental Sciences, 18, 464-471.

Sun, J., Wang, Z., Li, R., Ma, D., & Liu, B. (2011). Simulation of metal contents through correlated optimal monitoring metals of Dagu river sediments. Procedia Environmental Sciences, 8, 161-165.

Tomllinson, D. C. Wilson, J.G. Harris, C. R. and Jeffrey, D. W. (1980). Problems in the assessment of heavy metals levels in estuaries and the formation of pollution index‖ Helgol Meeresunters., 33, pp 566–569.

Vosough, A., Saeedi, M., and Lak, R. (2016). Pollution of granular river sediments with heavy metals, case study: Sefidroud River, Environmental Studies, 41(4): 887-907.

Wang, Q. Q., Duan, W. Y., Yao, X. M., Guo, X. N., Liu, D. Y., Gao, W. M., Zhang, J. D. (2022). Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Changli ecological monitoring area, northwest of Bohai Bay, China. Environ Pollut Bioavailab 34(1):180–189.

Zhao, Y. Q., Yang, Y., Dai, R. K., Leszek, S., Wang, X. Y., Xiao, L. Z. (2021). Adsorption and migration of heavy metals between sediments and overlying water in the Xinhe River in central China. Water Sci Technol, 84(5):1257.