



Analyzing the level of river sediment pollution with heavy metals using Geo-accumulation Index and Enrichment Factor

Received: 2023.05.01

Accepted: 2023.09.26

Sepehr Akhlaghifard, Touraj Nasrabadi,*^{ORCID} Hassan Hoveidi

Department of
Environmental Planning,
Management and
Education, University of
Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT

Introduction: Rivers are considered as a vital resource for mankind from the past to the present day. Considering the ever-increasing population, industrial developments and the expansion of modern urban societies, it is expected that the rivers located near densely populated urban and rural areas to be in danger of destruction due to a large part of urban, rural, domestic, industrial and agricultural pollutants to the sources of surface and groundwater in the riparian and riverside more than any other water ecosystems. On the other hand, regarding Iran's arid and semi-arid climate, the use of sediment qualitative indicators in research and investigation is crucial in order to predict, evaluate and provide a sustainable solution for controlling the amount of pollutants and also improving the quality of river water. The Karaj River is one of the main freshwater and energy production resources in the region, which plays a vital part in creating an ecological balance in parameters affecting the quality of this water ecosystem. The purpose of this research is to measure the concentration of heavy metals in the sediments of the river bed and to evaluate and analyze it using Geoaccumulation index and Enrichment Factor, which led to the suggested solutions in order to avert and control the further spreading of pollution.

Material and methods: In this research, nine stations were selected based on the land use of the area. The sediments of the river bed in each station were sampled. Sediment samples were prepared and later transferred to the laboratory and the total concentration of heavy metals was measured by Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy (ICP) device.

Results and discussion: The results obtained from the measurements using the mentioned indices assessed that the level of heavy element pollution is relatively low in the Karaj River. Nevertheless, part of this slight pollution is related to human activities such as road construction, tourism and the leakage of local runoff and sewage into the river and its riparian zone, which led to the increase of the Geoaccumulation of elements including copper and chromium to the numbers of 1.01 and 1.96 in downstream stations P8 and P9, respectively. Also, the highest average amount of Geoaccumulation for copper in 9 sampling stations was 0.23. On the other hand, these anthropogenic activities have significantly increased the arsenic Enrichment up to 17.81 in station P4 and the average Enrichment Factor of Arsenic in 9 sampling stations up to 13.12. But since each heavy element has its own unique nature, part of the quantity of the pollution present in the sedimentary environment of the river is related to natural factors, geology, soil erosion and weathering of riverbed rocks.

Conclusion: The process of changes in the amount and distribution of elements in the sediments were compared and the factors affecting their alignment or mismatch were discussed and researched. Generally, the results of this research show that the Karaj River, taking into account the Geoaccumulation index and Enrichment Factor, has negligible contamination of heavy metals in the riverbed sediment. However, the trend of index changes along the river route shows the direct effects of destructive human activities in the region.

Keywords: Concentration of heavy metals, Sediment pollution, Geoaccumulation Index, Enrichment Factor, Karaj River

How to cite this article:

Akhlaghifard, S., Nasrabadi, T. and Hoveidi, H., 2023. Analyzing the level of river sediment pollution with heavy metals using Geo-accumulation Index and Enrichment Factor. . Environ. Sci. 21(4): 77-98.

* Corresponding Author Email Address: tnasrabadi@ut.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2023.1299



تحلیل میزان آلودگی رسوبات رودخانه‌ای به فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های زمین‌انباشتگی و غنی‌شدگی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۴

سپهر اخلاقی‌فرد، تورج نصرآبادی*  حسن هودی

گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

سابقه و هدف: رودخانه‌ها تحت عنوان یک منبع حیاتی برای جوامع بشری از گذشته تا به امروز از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. با در نظر گرفتن رشد روزافزون جمعیت، توسعه صنعتی و گسترش جوامع مدرن شهری می‌توان انتظار داشت که رودخانه‌های واقع در نزدیکی مناطق شهری و روستایی پرجمعیت به دلیل ورود بخش اعظمی از آلاینده‌های شهری، روستایی، خانگی، صنعتی و کشاورزی به منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در حریم و حاشیه رودخانه، بیش از سایر سامانه‌های آبی در معرض خطر تخریب و نابودی قرار دارند. از طرفی با توجه به قرارگیری کشور ایران در اقلیم خشک و نیمه خشک، تحقیق و تفحص بر آلودگی رسوبات رودخانه به عناصر سنگین با استفاده از شاخص‌های کیفی رسوب یک امر ضروری در جهت پیش‌بینی، ارزیابی و ارائه راه حل‌های مناسب برای کنترل میزان آلودگی و بهبود کیفیت آب رودخانه می‌باشد.

مواد و روش‌ها: رودخانه‌ی کرج یکی از منابع اصلی در مصارف شرب و تولید انرژی در منطقه می‌باشد که نقش حیاتی در ایجاد تعادل اکولوژیک میان پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت این اکوسیستم آبی دارد. هدف از این پژوهش اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین موجود در رسوبات بستر رودخانه و ارزیابی و آنالیز آن با استفاده از شاخص‌های زمین‌انباشتگی و غنی‌شدگی می‌باشد که به ارائه راهکارهای پیشنهادی به منظور پیشگیری و کنترل گسترش آلودگی منتج گردید. در این پژوهش ۹ ایستگاه، با توجه به کاربری اراضی منطقه در نظر گرفته شده و از رسوبات بستر رودخانه نمونه برداری به عمل آمد. نمونه‌های رسوب پس از آماده‌سازی به آزمایشگاه منتقل گردید و غلظت کل عناصر سنگین توسط دستگاه ICP اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث: این پژوهش به منظور بررسی غلظت عناصر سنگین در رسوبات بستر رودخانه‌ی کرج به عنوان یک اندیکاتور مناسب جهت ارزیابی آلودگی آب و سیستم رودخانه با به کارگیری شاخص‌های زمین‌انباشتگی و غنی‌شدگی در محدوده‌ی حوزه‌ی آبریز دریاچه‌ی نمک انجام شد. نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری‌ها با استفاده از شاخص‌های مذکور مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که رودخانه‌ی کرج دارای سطح کمی از آلودگی عناصر سنگین بوده اما بخشی از این میزان اندک آلودگی مربوط به فعالیت‌های انسانی نظیر راه‌سازی، گردشگری و نشت و تخلیه‌ی رواناب‌ها و فاضلاب‌های محلی به رودخانه و حریم آن می‌باشد که موجب افزایش زمین‌انباشتگی عناصری همچون مس و کروم به ترتیب تا اعداد ۱۷۰۱ و ۱۹۶ در ایستگاه‌های پایین دست P8 و P9 گردیده‌اند. همچنین بیشتر میزان میانگین زمین‌انباشتگی برای عنصر مس در ۹ ایستگاه نمونه برداری، به مقدار ۰/۲۳ بدست آمده است. از سویی این فعالیت‌های بشرزاد موجب افزایش قابل توجه غنی‌شدگی آرسنیک در ایستگاه P4 تا رقم ۱۷/۸۱ شده است که میانگین غنی‌شدگی آرسنیک را در ۹ ایستگاه نمونه برداری به مقدار ۱۳/۱۲ رسانده است. 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.

نتیجه‌گیری: روند تغییرات میزان و پراکنش عناصر در رسوبات مقایسه و عوامل مؤثر بر همسویی یا عدم تطابق آن‌ها بحث و بررسی گردید. به طور کلی نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که رودخانه‌ی کرج با در نظر داشتن شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور غنی‌شدگی، دارای آلودگی ناچیز فلزات سنگین در رسوبات بستر می‌باشد. اما روند تغییرات شاخص‌ها در طول مسیر رودخانه بیانگر تأثیرات مستقیم فعالیت‌های مخرب انسان در منطقه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: غلظت عناصر سنگین، آلودگی رسوب، شاخص زمین‌انباشتگی، فاکتور غنی‌شدگی، رودخانه کرج

استناد به این مقاله: اخلاقی‌فرد، س.، نصرآبادی و ح. هودی. ۱۴۰۲. تحلیل میزان آلودگی رسوبات رودخانه‌ی کرج به فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های زمین‌انباشتگی و غنی‌شدگی. فصلنامه علوم محیطی، ۹۸-۷۷: (۴)۲۱.

* Corresponding Author Email Address: tnasrabadi@ut.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2023.1299



مقدمه

آلودگی آب های شیرین به عناصر سنگین به یکی از قابل توجه ترین چالش های موجود در مبحث منابع آب در عصر حاضر بدل گردیده است. (Wang *et al.*, 2022)

رودخانه ها و آب های جاری در مقایسه با دریاچه ها و آب های ساکن به عنوان تأمین کننده ی آب شرب کمتر مورد توجه و ارزش گذاری قرار گرفته اند و از نظر حفاظت جایگاه مناسبی در محیط زیست ندارند. در میان پیکره های آبی، رودخانه ها عموماً از منابع محلی، کشاورزی و صنایع و پروژه های عمرانی میزان قابل توجهی از عناصر سنگین را دریافت و در فاز رسوبی خود جذب و ذخیره می نمایند. (Li *et al.*, 2019) نقش فعالیت های انسانی و شرایطی که برای منابع آب به وجود آمده و همچنین آلودگی رودخانه ها و تأثیر آن بر محیط زیست، توجه به کیفیت آب رودخانه ها و کنترل میزان آلودگی را به عنوان یک اصل ضروری برای ارزیابی آبهای سطحی، بدل کرده است. (Singhal and Gupta, 1999) به علت واقع شدن کشور ایران در ناحیه ی خشک و نیمه خشک و به تبع آن معضل کمبود آب و همچنین توسعه ی صنعت و شهرنشینی، ارزیابی منابع آبی و مدیریت و برنامه ریزی برای حفظ و بهبود کیفیت آب امری لازم و دارای اهمیت ویژه می باشد. (Abolghasemi Rahimabadi, 1999; Abedi Koupaei, 2005) رودخانه ی کرج به علت تأمین بخشی از انرژی و آب شرب استان های تهران و البرز به واسطه ی سد امیر کبیر که حوالی روستای واریان واقع گردیده، از اهمیت و ارزش ویژه ای در میان اکوسیستم های آبی البرز برخوردار است. از طرفی فعالیت هایی نظیر گردشگری، پروژه های بهره برداری از منابع طبیعی، راه سازی و تونل سازی تأثیر بالقوه ای بر آلودگی این محیط آبی به عناصر سمی دارد. لذا این موضوع بر ضرورت ارزیابی و آنالیز آلودگی عناصر سنگین رودخانه کرج با استفاده از شاخص های زمین انباشتگی و غنی شدگی به عنوان هدف اصلی این پژوهش تأکید ویژه ای دارد.

(Castro-Català *et al.*, 2017) در پژوهش خود به بررسی سم زدایی رسوبات رودخانه ها پرداختند. تعیین سمیت واقعی رسوبات در اکوسیستم های آبی چالش برانگیز و برای ارزیابی

امروزه به علت رشد جمعیت و توسعه ی صنایع مختلف و جوامع شهری، انتشار عناصر سنگین و آلودگی ناشی از این عناصر در اکوسیستم های آبی به عنوان یک معضل جهانی مطرح می باشد. (Lazaro, 2006) روند توسعه ی شهری و به دنبال آن افزایش تراکم جمعیتی در مناطقی خاص، از جمله دلایل اصلی برای بحران کمبود آب و آلودگی منابع آبی می باشد که موجب افزایش نگرانی ها و به تبع آن پژوهش های گسترده در مبحث آلودگی آب برای حفاظت و کنترل اکوسیستم های آبی در جهت راهبرد های مدیریت پایدار زیست محیطی، گردیده است. (Lone *et al.*, 2020) در جهان توسعه یافته ی امروز، رودخانه هایی که از مناطق شهری و روستایی عبور می کنند تحت تأثیر منابع آلودگی نقطه ای و غیر نقطه ای قرار می گیرند. (Mishra and Kumar, 2020) آلودگی منابع آب با آلاینده های میکروبی و شیمیایی (فلزات سنگین) اغلب از طریق راهیابی پساب های شهری، صنعتی و کشاورزی به این بوم سامانه ها صورت می گیرد. (Kane *et al.*, 2012) مخازن اصلی ذخیره ی فلزات سنگین در اکوسیستم های آبی رسوبات می باشند که به عنوان بستری برای انتقال و جذب آلودگی نقش بسیار مهمی ایفا می کنند. (Yu *et al.*, 2010) رسوبات به عنوان محلی برای انباشت عناصر سنگین محسوب گردیده و حفظ این عناصر در بافت رسوبی به شکل طولانی مدت صورت گرفته که می تواند در قالب یک خطر جدی برای زیست بوم های گوناگون مطرح باشد. (Berkowitz *et al.*, 2008) عناصر سنگین به علت پایداری زیاد تحت عنوان یکی از معضلات جدی در شبکه و زنجیره غذایی و همچنین شدت اثر بزرگنمایی زیستی در جانداران مطرح می باشد. (Zhao *et al.*, 2021) در سال های اخیر، اکثر تحقیقات در زمینه ی آلودگی آب به عناصر سنگین، بر پایه ی ارزیابی غلظت کل این عناصر در رسوبات بستر رودخانه ها و دریاچه ها بنا گردیده است. (Lin *et al.*, 2022) به طور کلی سلامت آب های سطحی بسته به کیفیت رسوبات بوده که اثر مستقیم بر فعالیت میکروارگانیسم ها و منابع غذایی آن ها و در نتیجه سلامت آب می گذارد. (Sunderland, 2008) به طور کلی

رودخانه سیاه رود نسبت به سرب و کادمیم آلودگی متوسط و نسبت به سایر فلزات آلودگی کم نشان می‌دهند. Karimi et al. (2012) به بررسی توزیع ژئوشیمیایی و میزان آلودگی فلزات سنگین (سرب، روی، نیکل، کروم و آرسنیک) در رسوبات رودخانه‌ی کر (جنوب مرودشت) پرداخته‌اند. به منظور بررسی چگونگی توزیع، روند تحرک و منشأ عناصر بالقوه‌ی سمی رودخانه کر، نمونه‌برداری از ۹ ایستگاه در طول این رودخانه انجام شد. اجزای رسوبی دانه‌ریز (ذرات کوچک‌تر از ۶۳ میکرون) توسط دستگاه ICP-OES تجزیه شیمیایی شدند. مقایسه‌ی نتایج حاصل از تجزیه نمونه‌ها با مقادیر زمینه و استاندارد های معتبر جهانی، بیانگر غلظت بالای فلزات Cr, Zn, Pb, Ni, As در تعدادی از ایستگاه‌های مورد مطالعه است. جهت برآورد شدت آلودگی و همچنین تفکیک اثر عوامل انسانی (آنتروپوژنیک) از عوامل طبیعی (ژئوژنیک) در منطقه، از شاخص زمین انباشت (Igeo)، شاخص آلودگی (PI)، فاکتور غنی‌شدگی (EF) و درصد عوامل انسان‌زاد استفاده شد. ضرایب همبستگی به دست آمده بین عناصر آلاینده نشان داد که عناصر آرسنیک، سرب و روی با یکدیگر همبستگی مثبت و بالایی دارند که ناشی از منشأ یکسان، آزاد سازی و رسوب مشابه این عناصر تحت شرایط سطحی در طول مسیر رودخانه است.

مواد و روش‌ها

رودخانه کرج به عنوان یکی از منابع آبی حیاتی در رشته کوه البرز بوده که در گستره‌ی حوزه‌ی آبریز دریاچه نمک واقع گردیده است. این رودخانه در محدوده‌ی مختصات جغرافیایی به عرض $35^{\circ}47'00''N$ تا $36^{\circ}06'00''N$ و به طول $51^{\circ}00'00''E$ تا $51^{\circ}32'00''E$ قرار گرفته است و به علت نقش مهم آن در حفظ اکوسیستم منطقه و تأمین آب و انرژی برای جوامع انسانی به یکی از ارزشمندترین و استراتژیک‌ترین اکوسیستم‌های آبی ایران بدل شده است که از منظر اکولوژیکی، اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و فرهنگی دارای فرصت‌ها و ظرفیت‌های بسیاری می‌باشد. در این پژوهش با توجه به نوع کاربری اراضی منطقه از ۹ ایستگاه با استفاده از نمونه بردارهای

ریسک مناسب، ضروری است. به همین منظور ترکیبی از رویکرد واحد سمی با آزمایش‌های حساس منافذ آب و آزمون‌های قرار گرفتن در معرض رسوب، به همراه ترکیب بی مهرگان برای تشخیص پاسخ‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت موجودات زنده در چهار رودخانه شبه جزیره ایری انتخاب شد. سمیت بالا در سه سایت مشاهده شد. حشره‌کش‌های ارگانوفسفات و فلزات به عنوان متغیرهای اصلی ایجاد این سمیت، به‌ویژه در آزمون‌های رسوبی شناسایی شدند. ترکیبی از رویکرد‌های مختلف به ما امکان می‌دهد تا اثرات اکوتوکسیولوژیکی موجودات زنده را شناسایی کرده و عوامل اصلی سمیت در این رودخانه‌های پر تنش را شناسایی کنیم.

Rybicka et al. (2005) ردیابی توزیع فلزات در سیستم رودخانه اودرا و رسوبات ماده معلق در آب را بررسی کردند. تحقیقات گسترده در مورد ردیابی غلظت فلزات در آب، ذرات معلق (SPM) و رسوبات زیرین کل سیستم رودخانه اودرا طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۰ انجام شد. توزیع عمودی فلزات منتخب و تحرک آن‌ها نیز در ساختمان رسوب از بخش فوقانی و میانی رودخانه مورد بررسی قرار گرفت. سطح قابل توجهی از آلودگی فلز مشاهده شد. بالاترین آلودگی فلز جامدات رودخانه اودرا با کادمیم، روی، سرب و آرسنیک مشاهده شد که نشانگر شباهت بالای توزیع فراوانی آن‌ها در ذرات معلق و رسوبات است. نتایج مطالعات بسیار گسترده سیستم رودخانه اودرا طی ۴ سال نشان می‌دهد که آلودگی فلز به‌ویژه برای روی، سرب و مس کاهش یافته است.

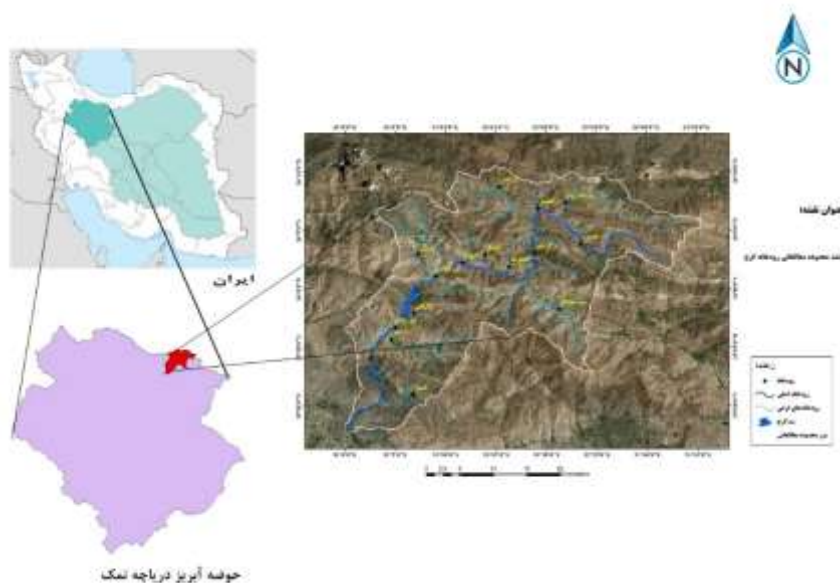
Gheshlaghi and Rostami (2016) به بررسی آلودگی و گونه سازی فلزات سنگین در رسوبات بستر رودخانه سیاه رود پرداخته‌اند. نتایج به‌دست‌آمده به‌طور کلی نشان داد که تغییرات غلظت بیشتر فلزات در طول رودخانه روندی غیر یکنواخت داشته که علت آن آلاینده‌ها به‌ویژه در نقاط نزدیک به مناطق شهری و ایستگاه‌های آخر نمونه برداری و همچنین تأثیر پارامترهای فیزیکی شیمیایی رسوب از جمله محتوای مواد آلی و درصد رس بر غلظت فلزات است. ارزیابی شدت آلودگی با محاسبه ضریب زمین انباشت نیز آشکار ساخت که رسوبات

باغات و در نهایت بخشی از بافت شهر کرج واقع شده است. پس از نمونه برداری بر مبنای دلایلی که ذکر شد نمونه ها در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد خشک گردید و برای اندازه گیری غلظت کل عناصر سنگین بوسیله ی دستگاه ICP به آزمایشگاه منتقل گردید و غلظت ۹ عنصر سنگین که در این پژوهش به ارزیابی آن با استفاده شاخص های کیفی رسوب به آن می پردازیم، اندازه گیری شد.

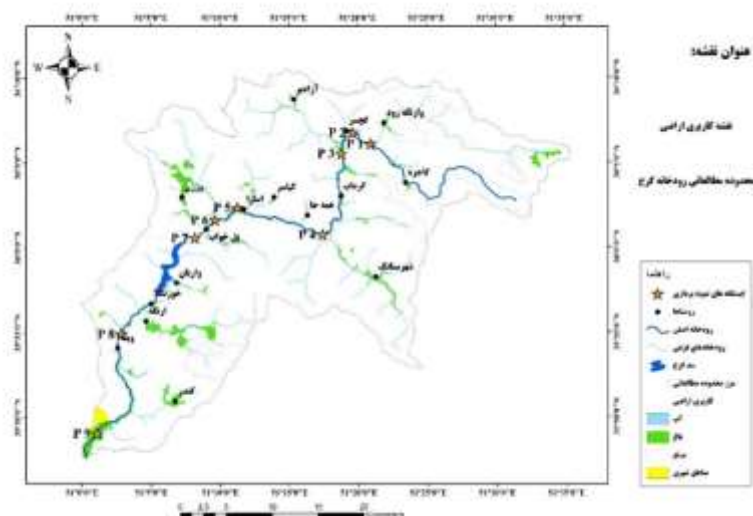
اهداف این تحقیق عبارتند از:

- الف) اندازه گیری و ارزیابی آلودگی رسوبات رودخانه کرج به فلزات سنگین و تعیین شدت آن با استفاده از فاکتورهایی نظیر شاخص زمین انباشت (Igeo) و شاخص غنی شدگی (EF)
- ب) مقایسه غلظت فلزات سنگین رسوبات رودخانه کرج با استاندارد های موجود برای کیفیت رسوبات بستر رودخانه
- ج) ترسیم نمودار تغییرات غلظت فلزات سنگین رسوبات رودخانه کرج و تجزیه و تحلیل آماری نتایج
- د) شناخت منابع آلاینده منطقه و ارائه ی راه حل ها و اقدامات لازم راهبردی به منظور کنترل و کاهش آلودگی رودخانه با توجه به اهداف مورد نظر. پژوهش کاملی از مطالعات و تحقیقات پیشین در رابطه با آلودگی اکوسیستم های آبی در ایران و جهان صورت پذیرفت.

غیر فلزی از رسوبات بستر رودخانه کرج نمونه گیری به عمل آمده است. ایستگاه های P1 و P2 در پایین دست سرشاخه های عبوری از باغات و روستاهای وارنگه رود، گاجره، ولایت رود و... می باشد. این دو ایستگاه از کاربری های مختلف تجاری، تفریحی، فرهنگی و ورزشی نظیر مجموعه ی پیست اسکی دیزین و هتل ها و اقامتگاه های آن منطقه تأثیر می پذیرند. ایستگاه P3 در ناحیه ای واقع گردیده که چندین عامل از جمله کاربری های روستایی و مسکونی، عمرانی و راه سازی و همچنین باغات اطراف سرشاخه ها و روستاهایی نظیر گچسر و آزادبر، بر کیفیت آب و رسوب این منطقه اثر مستقیم می گذارند. ایستگاه P4 که در پایین دست باغات متمرکز روستای شهرستانک واقع گردیده و همچنین فعالیت هایی نظیر ساخت جاده و بهره برداری از منابع طبیعی بر این ناحیه در زمینه ی آلودگی آب و رسوب تأثیرگذارند. ایستگاه های P5، P6 و P7 در ناحیه ی متمرکز روستایی و باغات آن در بالادست سد قرار گرفته اند که در این میان ایستگاه P7 در بستر دریاچه ی سد امیرکبیر واقع گردیده که می تواند تأثیرات و ترکیبات رسوب گذاری در مجموعه ی سد را به طور مستقیم نمایان سازد. ایستگاه های P8 و P9 در پایین دست سد بوده و در واقع نقاطی می باشند که در فاصله ی میان آن ها روستاها، مراکز تفریحی و رستوران ها،



شکل ۱- نقشه ی محدوده ی جغرافیایی رودخانه ی کرج
Fig. 1- Geographical area map of Karaj River



شکل ۲- نقشه ی نقاط نمونه برداری و کاربری اراضی رودخانه ی کرج
Fig. 2- Map of sampling points and land use of Karaj River

شاخص زمین انباشت (I_{geo})

یکی از شاخص های موجود برای ارزیابی و سنجش میزان انباشت فلزات سنگین آلاینده در رسوبات، شاخص زمین انباشتگی (I_{geo}) می باشد. (Loska and Wiechula, 2003) این شاخص برای بررسی آلودگی رسوب و تعیین میزان اثرات فعالیت های بشرزاد در بحث آلودگی محیط زیست بوده و از رابطه ی زیر محاسبه می گردد: (Muller, 1969 ; Voral, 2011)

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \quad (1)$$

در این رابطه I_{geo} : شاخص زمین انباشتگی، C_n : غلظت عنصر مورد مطالعه در نمونه ی رسوب و B_n : غلظت زمینه ای عنصر مورد مطالعه (میانگین سنگ شیل) و همچنین از ضریب ۱/۵ برای حداقل سازی تغییرات زمینه در رابطه با تغییرات لیتولوژی رسوبات و تأثیر عوامل زمینی استفاده می گردد. (Stoffers et al., 1986 ; Goodarzi et al., 2009)

شاخص غنی شدگی (EF)

برای غلظت های بالاتر از حد زمینه یکی از رایج ترین روش ها برای ارزیابی اثرات فعالیت های بشرزاد بر میزان آلودگی رسوبات، محاسبه ی شاخص غنی شدگی می باشد. شاخص غنی شدگی بر مبنای غلظت عناصر نمونه برداری شده نسبت به میزان میانگین این عناصر در پوسته ی زمین می باشد.

این شاخص اولین بار توسط پژوهشگران (Loska et al., 1995) استرالیایی معرفی گردیده و نمایانگر تجمع و پراکندگی عناصر در محیط های آبی می باشد. به این ترتیب اگر میزان غنی شدگی کمتر از عدد ۱ باشد نشانگر محیط دافعه و اگر بیش از ۱ باشد نشان دهنده ی محیط های تجمعی برای عناصر سنگین می باشد و از طرفی اگر مقدار غنی شدگی دقیقاً برابر با ۱ باشد حاکی از طبیعی و نرمال بودن محیط رسوب می باشد. همچنین اگر میزان غنی شدگی یک عنصر نسبت به پوسته کوچکتر از ۱/۵ باشد بیانگر عوامل دخالت زمین زاد و اگر این مقدار بیش از ۱/۵ باشد نشانگر دخالت عوامل انسانی در میزان آلودگی رسوبات به آن عنصر می باشد. (Sutherland, 2000) به طور کلی این شاخص برای تعیین سهم عوامل بشرزاد در آلودگی رودخانه به عناصر سنگین می باشد. (Liu et al., 1996; Dickinson et al., 2005) از این شاخص در برآورد شیمی رسوبات در رابطه با آلودگی عناصر سنگین استفاده می شود و از رابطه ی زیر محاسبه می گردد: (Yinghong et al., 2009; Sutherland, 2000)

$$EF = \frac{\left(\frac{C_n}{C_{ref}} \right)_{Sample}}{\left(\frac{C_n}{C_{ref}} \right)_{Background}} \quad (2)$$

که در این رابطه EF : ضریب غنی شدگی، C_n : غلظت فلز مورد بررسی و C_{ref} : غلظت فلز مبنا می باشد.

جدول ۱- طبقه بندی شدت آلودگی رسوب بر اساس شاخص زمین انباشتی (Muller, 1969)

Table 1. Classification of sediment pollution severity based on Geoaccumulation Index (Muller, 1969)

رده ی آلودگی	شدت آلودگی	شاخص زمین انباشت (Igeo)
۱	آلودگی ناچیز تا کم	$I_{geo} \leq 0$
۲	آلودگی کم	$0 < I_{geo} \leq 1$
۳	آلودگی متوسط	$1 < I_{geo} \leq 2$
۴	آلودگی زیاد	$2 < I_{geo} \leq 3$
۵	آلودگی خیلی زیاد	$3 < I_{geo} \leq 4$
۶	آلودگی شدید	$4 < I_{geo} \leq 5$
۷	آلودگی بسیار شدید	$I_{geo} \geq 5$

جدول ۲- طبقه بندی فاکتور غنی شدگی رسوب (Sutherland, ۲۰۰۰)

Table 2. Classification of sediment Enrichment Factor (Sutherland, 2000)

رده ی آلودگی	شدت غنی شدگی	غنی شدگی (EF)
۱	غنی شدگی کم	$EF \leq 2$
۲	غنی شدگی متوسط	$2 < EF \leq 5$
۳	غنی شدگی قابل توجه	$5 < EF \leq 20$
۴	غنی شدگی زیاد	$20 < EF \leq 40$
۵	غنی شدگی بسیار زیاد	$EF \geq 40$

نتایج و بحث

مقادیر متوسط می باشد. در ایستگاه P3 که در پایین دست روستای گچسر واقع شده و در قسمت های سرشاخه های فرعی رودخانه حضور روستا های آزادبر و کهنه ده و همچنین باغات این منطقه می تواند بر میزان غلظت سرب در این ناحیه اثرگذار باشد و از طرفی بیشترین تأثیر طبیعی بر افزایش غلظت سرب در این ایستگاه نوع سنگ شیل خاکستری تیره (TRJs) در آن ناحیه می باشد که به علت دارا بودن آهن موجب هم افزایش غلظت سرب تا رقم ۳۰ ppm گردیده است. در ایستگاه P6 به علت نزدیک بودن به روستا های سیرا، ورزنه و باغات متمرکز این نواحی و همچنین واقع شدن این نقطه در پایین دست روستای آسارا و به دنبال آن فعالیت های مردم این مناطق می توانند بر غلظت سرب در این ایستگاه تأثیرگذار باشند. در نهایت ایستگاه P8 که در پایین دست روستا های ارنگه و خوزنکلا قرار گرفته است، با توجه به اینکه این نقطه به بافت شهری کرج نیز نزدیک می باشد همین مسئله موجب افزایش حجمه ی گردشگری مردم منطقه به این ناحیه گردیده است و از طرفی ترافیک و حمل و نقل وسایل نقلیه موجب انتشار

در این پژوهش با توجه به نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از غلظت عناصر و همچنین تجزیه و تحلیل آن با استفاده از شاخص های کیفی رسوب (شاخص زمین انباشتی و شاخص غنی شدگی)، به سطح مطلوبی از اطلاعات به جهت ارزیابی و تخمین آلودگی به عنوان پیش زمینه ای برای ارائه ی راهکار های منطقی در رابطه با اکوسیستم رودخانه ی کرج دست پیدا کردیم.

بر مبنای نقشه های موجود در (شکل ۳) غلظت عناصر سنگین رسوبات بستر رودخانه ی کرج به شکل زیر مورد بررسی قرار گرفت.

غلظت سرب در تمامی ایستگاه ها بالاتر از میانگین غلظت سرب در پوسته ی زمین می باشد اما در ایستگاه های P1، P3، P6 و P8 غلظت این عناصر از میانگین آن در سنگ شیل نیز بیشتر می باشد. در ایستگاه P1 با توجه به نوع بافت سنگ و خاک بستر رودخانه و حضور روستا های گاجره، وارنگه رود، ولایت رود و باغات مربوط به آن در بالادست این نقطه، غلظت سرب در این ناحیه بیش از

گردیده است. علت این رقم بالا در غلظت کروم در ایستگاه P9 عوامل بشرزاد نظیر نشت فاضلاب های شهری و روستایی، پساب های رستوران ها و مراکز تجاری به رودخانه و همچنین حمل و نقل گسترده و آلودگی های حاصل از ترافیک و در نتیجه اثرگذاری آن بر آلودگی رسوب، می باشد. با توجه به مقدار غلظت بسیار بالای کروم در ایستگاه P9 میزان میانگین غلظت کروم برابر $90/66$ ppm بوده که تأثیر آلودگی بسیار بالا به کروم در ایستگاه آخر در این رقم مشهود می باشد.

غلظت روی در تمامی ایستگاه ها بالاتر از حد میانگین آن در پوسته ی زمین می باشد و در ایستگاه P3 برابر با متوسط غلظت آن در سنگ شیل بوده و از طرفی ایستگاه های P5 و P8 به ترتیب با غلظت های 125 ppm و 173 ppm می باشند که از میانگین سنگ شیل فرا تر رفته و از دلایل آن می توان به عوامل طبیعی و سایر عوامل انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی و ایجاد آلودگی محلی در حریم رودخانه اشاره داشت. غلظت روی در رودخانه ی کرج به طور میانگین برابر با $112/56$ ppm می باشد.

مقدار غلظت کل نیکل با توجه به (شکل ۳) در همه ی ایستگاه ها کمتر از میانگین پوسته و سنگ شیل می باشد. غلظت نیکل در طول مسیر رودخانه در ایستگاه P1 به مقدار 33 ppm می باشد که بین ۹ ایستگاه دومین ایستگاه آلوده و ایستگاه P9 با مقدار غلظت 39 ppm آلوده ترین ایستگاه در میان تمامی ایستگاه ها می باشد. از علل آلودگی ایستگاه P9 می توان پایین دست بودن این ناحیه و اثرات تجمعی عوامل انسانی در آلودگی رودخانه به نیکل را بیان نمود. نیکل به طور میانگین در رودخانه ی کرج به میزان $29/44$ ppm وجود دارد.

غلظت مس در ایستگاه های P1، P3 و P8 به ترتیب 107 ppm، 113 ppm و 118 ppm می باشد. با توجه به نقشه ی زمین شناسی محدوده ی مطالعاتی رودخانه ی کرج (شکل ۴)، یکی از مهمترین علل زمین زاد افزایش غلظت کل مس در ایستگاه P3 نوع سنگ سنگ شیل خاکستری

سرب در هوا و در نتیجه تأثیرگذاری آن بر سطح آلودگی خاک، آب و رسوبات به این عنصر می گردد. میانگین غلظت کل سرب از ۹ ایستگاه نمونه برداری برابر با 24 ppm می باشد.

در تمامی نقاط به غیر از ایستگاه های P5 و P8 مقدار غلظت کادمیوم بیش از میانگین آن در پوسته ی زمین می باشد و تنها در نقاط P5 و P8 غلظت این عنصر برابر با غلظت میانگین آن در پوسته ی زمین یعنی برابر $0/1$ ppm می باشد. غلظت این عنصر در ایستگاه های P1، P2، P4 و P7 از مقدار متوسط آن در سنگ شیل نیز بیشتر بوده که این مسئله می تواند ناشی از فعالیت های انسانی و بافت طبیعی خاک منطقه در نقاط P1 و P2 باشد و در ایستگاه P4 به علت بهره برداری از منابع خاک و پروژه های راه سازی، این مقدار برابر با $0/3$ ppm می باشد. در ایستگاه P7 که در بستر دریاچه ی سد واقع گردیده، غلظت این عنصر بیش از مقدار آن در سنگ شیل می باشد و از علل طبیعی افزایش غلظت کادمیوم در این ایستگاه تا مقدار $0/3$ ppm می توان نوع سنگ شیل سیاه مایل به سبز (Eksh) در بستر آن محدوده نام برد که حاوی مواد آلی با توجه به (جدول ۳) تا میزان $10/55\%$ می باشد و سبب افزایش انباشت عنصر کادمیوم در رسوبات بستر رودخانه گردیده است. همچنین میانگین غلظت کادمیوم در ۹ ایستگاه نمونه برداری شده برابر با $0/24$ ppm می باشد که این عدد نزدیک به میانگین غلظت این عنصر در سنگ شیل بوده و از میانگین آن در بافت سنگ آهک کمتر می باشد. میانگین غلظت کادمیوم در کل مسیر رودخانه برابر با $0/24$ ppm می باشد.

غلظت کروم در هر ۹ ایستگاه بالاتر از میانگین غلظت آن در سنگ شیل می باشد و تنها در ایستگاه P9 این عدد به 227 ppm می رسد که بیش از دو برابر میانگین این عنصر در پوسته ی زمین می باشد. ایستگاه P9 در پایین دست روستا های وینه و کندور و همچنین در بخشی از بافت شهری کرج و کلاک واقع شده که همین مسئله باعث تغییر کاربری و مسکونی شدن حریم رودخانه در این ناحیه

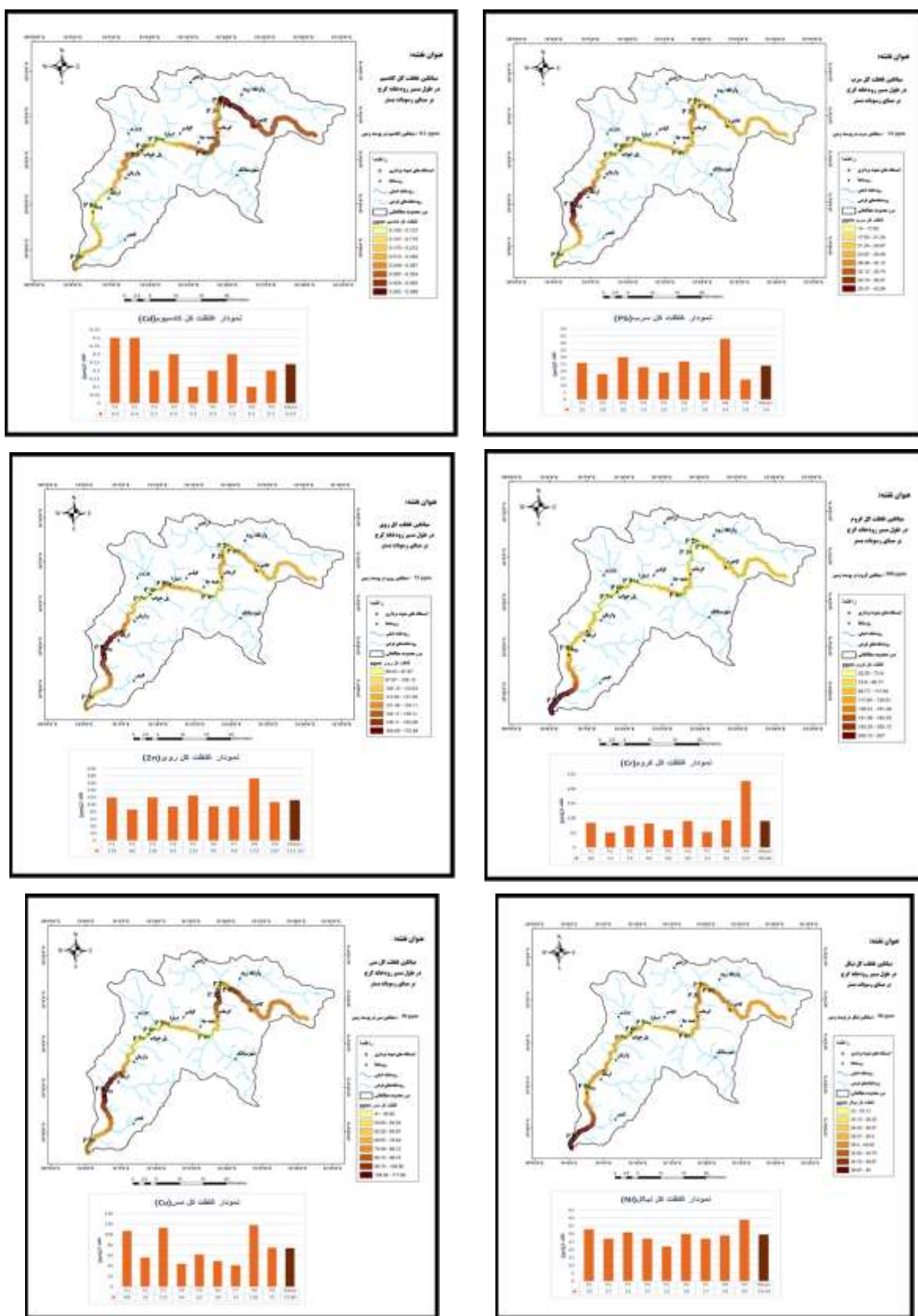
دست روستاهای ارنکه و خوزنکلا و همچنین سرچشمه ی هفت چشمه قرار گرفته و عواملی نظیر پساب های روستایی و مراکز تفریحی و رستوران ها سبب افزایش غلظت آرسنیک به مقدار $19/2$ ppm گردیده است. میانگین غلظت آرسنیک در کل مسیر رودخانه $14/96$ ppm گزارش شده است.

غلظت کل منگنز در ایستگاه های P4، P5، P7 و P9 از میانگین منگنز در پوسته ی زمین کمتر بوده و غلظت منگنز تنها در ایستگاه P5 از میانگین آن در سنگ شیل نیز کمتر می باشد. در ایستگاه های P1، P2، P3، P6 و P8 ارقام به دست آمده از سنجش غلظت منگنز بیش از میانگین این عنصر در پوسته ی زمین می باشد که از علل آن می توان به لیتولوژی و نوع بافت رسوبات منطقه در ایستگاه های P1 و P2 علاوه بر مداخله گری های انسان اشاره کرد. همچنین از عوامل مهم آلاینده در ایستگاه های P6 و P8 فعالیت های مردم منطقه و سایر گردشگران را می توان نام برد. میانگین غلظت کل منگنز در رودخانه ی کرج برابر با $1034/1$ ppm بوده که این مقدار با توجه میزان غلظت این عنصر در سایر نقاط زمین رقم نسبتا بالایی می باشد.

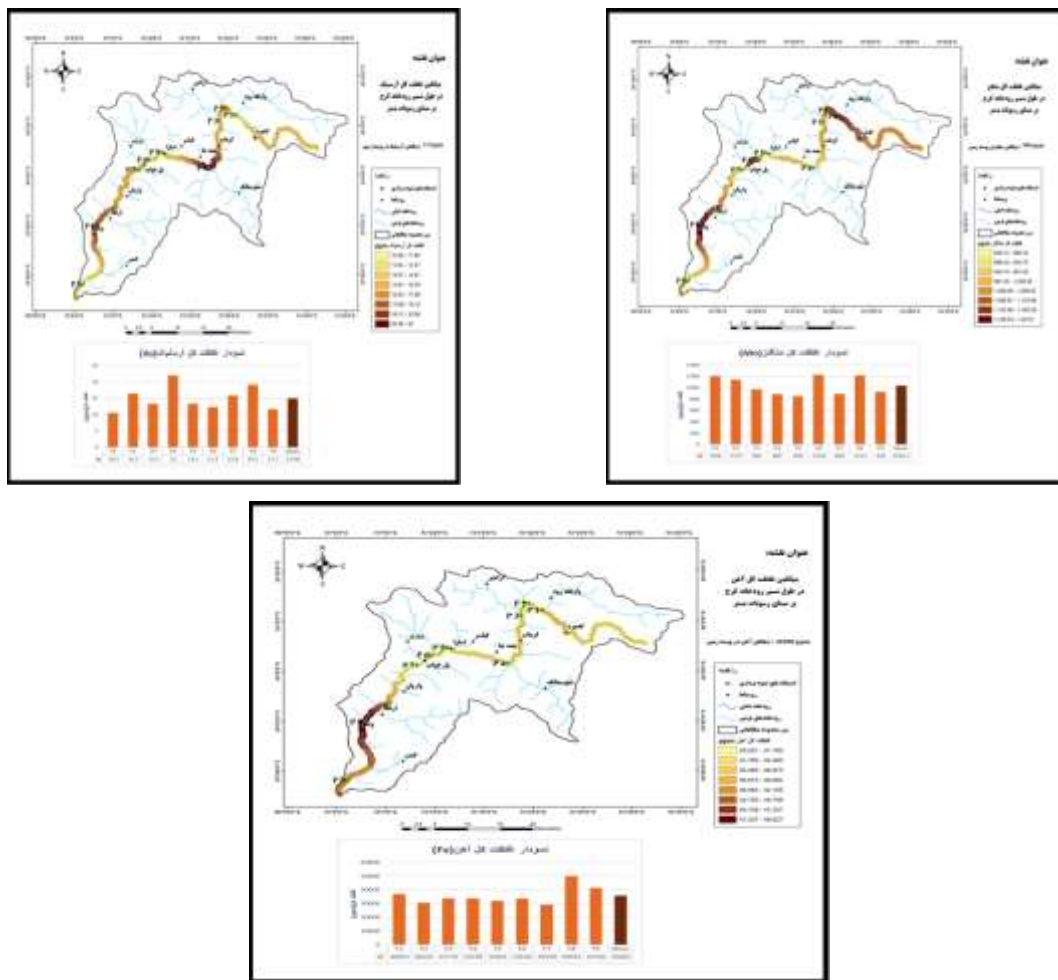
غلظت آهن در تمامی ایستگاه های نمونه برداری به استثناء ایستگاه های P8 و P9 از میانگین غلظت این عنصر در پوسته ی زمین بیشتر می باشد و در ایستگاه P8 با مقدار 49931 ppm حتی از میانگین آهن در سنگ شیل نیز بیشتر بوده که دلیل اصلی آلاینده گی این دو ایستگاه به آهن، عوامل مصنوعی مانند تغییر کاربری اراضی در حاشیه ی رودخانه و ساخت و ساز های غیراصولی در این ناحیه می باشد. با توجه به نقشه ی زمین شناسی محدوده مطالعاتی رودخانه کرج (شکل ۴ و جدول ۳) میزان زیاد غلظت آهن در ایستگاه P8 ناشی از نوع سنگ بستر توف آتشفشانی سبز (*Ek*) در آن منطقه می باشد که حاوی آهن سه ظرفیتی و کلر بوده و از جمله کاربردهای این نوع سنگ استفاده در مصالح سدسازی و ساختمان سازی می باشد. ایستگاه های P8 و P9 که در پایین دست رودخانه قرار دارند سبب افزایش میانگین غلظت آهن در کل مسیر رودخانه گردیده اند و مقدار آن را به 35662 ppm رسانیده اند.

تیره و ماسه سنگ (TRJs) در بستر آن ناحیه بوده که حاوی مواد آلی، کلسیت، سیلیس، اکسید آهن، دولومیت $[CaMg(CO_3)_2]$ و آهک می باشد. از طرفی سنگ آهک موجب بازیابی و افزایش غلظت مس می گردد. همچنین فرهنگ سازی و آموزش ضعیف در رابطه با حفاظت از محیط زیست به مردم منطقه و گردشگران در حوالی ایستگاه های نمونه برداری به ویژه ایستگاه P8 را می توان متصور شد. در تمامی ایستگاه ها مقدار مس از میانگین غلظت آن در سنگ شیل بیشتر بوده اما در ایستگاه های P1، P2، P3، P5، P7 و P8 این مقدار بیش از میانگین جهانی مس در پوسته ی زمین می باشد. همچنین به طور متوسط مس در رودخانه ی کرج دارای غلظتی برابر با $73/89$ ppm می باشد.

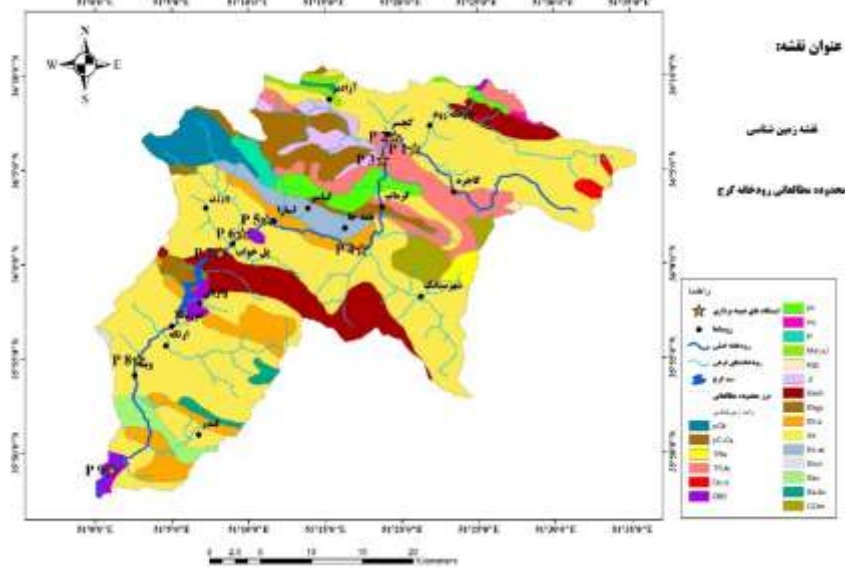
با توجه به زمین شناسی و کاربری اراضی محدوده ی مطالعاتی، غلظت عنصر آرسنیک در تمامی ایستگاه های نمونه برداری بالاتر از میانگین پوسته ی زمین بوده و غلظت این عنصر در ایستگاه P2 به دلیل نوع بافت خاک منطقه از میانگین آرسنیک در سنگ شیل نیز فرا تر می رود. در سایر نقاط نمونه برداری به غیر از ایستگاه های P1، P6 و P9 غلظت آرسنیک تحت عوامل طبیعی و همچنین فعالیت های انسانی، رقمی بیشتر از میانگین جهانی سنگ شیل می باشد. در حوالی ایستگاه های P3 و P4 پروژه های راه سازی و تونل سازی موجب افزایش غلظت آرسنیک به ویژه در ایستگاه P4 به عنوان آلوده ترین ایستگاه از منظر غلظت کل آرسنیک (22 ppm) گردیده است. با توجه به این که ایستگاه P5 در پایین دست روستا های کیاسر و آسارا قرار دارد افزایش غلظت در این نقطه می تواند ناشی از فعالیت های روستایی در بالادست، تأثیر راه سازی و همچنین عوامل طبیعی دانست. در ایستگاه P7 غلظت آرسنیک $15/8$ ppm گزارش شده که این نقطه با توجه به این که در ابتدای دریاچه ی سد قرار گرفته و رسوبات به مرور زمان در این محل تجمع یافته، اثرات درازمدت آلودگی موجب افزایش غلظت به حد فرا تر از میانگین سنگ شیل گردیده است. ایستگاه P8 در منطقه ای واقع گردیده که در پایین



شکل ۳- نقشه های تغییرات غلظت عناصر سنگین در طول مسیر رودخانه
 Fig. 3- The maps of heavy metals' concentration changes along the river



ادامه شکل ۳- نقشه های تغییرات غلظت عناصر سنگین در طول مسیر رودخانه
 Fig. 3- Cont. The maps of heavy metals' concentration changes along the river



شکل ۴- نقشه ی زمین شناسی رودخانه ی کرج
 Fig. 4- Geological map of Karaj River

جدول ۳- راهنمای نقشه ی زمین شناسی

Table 3. Geological map guide

GEO UNIT	DESCRIPTION	AGE	AGE_ERA
C0m	Dolomite platy and flaggy limestone containing trilobite; sandstone and shale (MILA FM)	Cambrian	PALEOZOIC
Ea.bv	Andesitic and basaltic volcanics	Eocene	CENOZOIC
Eav	Andesitic volcanics	Middle.Eocene	CENOZOIC
Ebvt	Basaltic volcanic tuff	Eocene	CENOZOIC
Ed.at	Dacitic to Andesitic tuff	Eocene	CENOZOIC
Ek	Well, bedded green tuff and tuffaceous shale (KARAJ FM)	Eocene	CENOZOIC
Ek.a	Calcareous shale with subordinate tuff (Asara Shale)	Middle.Eocene	CENOZOIC
Ekgy	Gypsum	Late.Eocene	CENOZOIC
Eksh	Greenish-black shale, partly tuffaceous with intercalations of tuff (Lower Shale Member)	Middle.Eocene	CENOZOIC
Jl	Light grey, thin - bedded to massive limestone (LAR FM)	Jurassic-Cretaceous	MESOZOIC
Ktzt	Thick bedded to massive, white to pinkish orbitolina bearing limestone (TIZKUH FM)	Early.Cretaceous	MESOZOIC
Mm,s, 1	Marl, calcareous sandstone, sandy limestone and minor conglomerate	Miocene	CENOZOIC
P	Undifferentiated Permian rocks	Permian	PALEOZOIC
pC-Cs	Thick dolomite and limestone unit, portly cherty with thick shale intercalations (SOLTANIEH FM)	PreCambrian-Cambrian	PROTEROZOIC-PALEOZOIC
pCk	Dull green grey slaty shales with subordinate intercalation of quartzitic sandstone (KAHAR FM; Morad series and Kalmard Fm)	PreCambrian	PROTEROZOIC
Pd	Red sandstone and shale with subordinate sandy limestone (DORUD FM)	Permian	PALEOZOIC
Pr	Dark grey medium - bedded to massive limestone (RUTEH LIMESTONE)	Permian	PALEOZOIC
Qft2	Low level piedmont fan and vally terrace deposits	Quaternary	CENOZOIC
Qs,d	Unconsolidated windblown sand deposit including sand dunes	Quaternary	CENOZOIC
TRe	thick bedded grey o'olitic limestone; thin - platy, yellow to pinkish shaly limestone with worm tracks and well to thick - bedded dolomite and dolomitic limestone (ELIKAH FM.)	Early-Middle.Triassic	MESOZOIC
TRJs	Dark grey shale and sandstone (SHEMSHAK FM.)	Triassic-Jurassic	MESOZOIC

درصد تقریباً در یک رنج مشخص به علت حضور روستاها، باغات و به دنبال آن آلودگی های حاصل از آن ها، قرار دارد. در ایستگاه P7 با توجه به حضور آبریان مختلف در دریاچه ی سد امیرکبیر و آلودگی های بیولوژیکی حاصل از آن ها و همچنین نوع سنگ شیل سیاه مایل به سبز (Eksh) در آن ایستگاه، ماده ی آلی موجود در رسوبات این نقطه افزایش ۱/۵ درصدی نسبت به ایستگاه بالادست خود داشته است. در ایستگاه P8 نیز می توان درصد کل ماده آلی به میزان ۷/۹٪ را با دلایلی همچون حضور آلودگی، درختزار ها و به طور کلی پوشش گیاهی توجیح نمود. اما ایستگاه P9 با رقم ۱۱/۲۶٪ بیشترین ماده آلی فرار را در میان کلیه ی ایستگاه های نمونه برداری دارد که از علل اصلی آن رهاسازی و نشت فاضلاب های شهری به این ناحیه از رودخانه می باشد. به طور کلی

میزان ماده ی آلی در رسوبات نقش تعیین کننده ای را در مقدار pH محیط دارد. (Langmuir *et al.*, ۲۰۰۵) هر چه pH محیط پایین تر باشد به این معناست که محیط اسیدی بوده و دارای قابلیت اثرگذاری بر میزان تحرک عناصر سنگین می باشد. (Bradl *et al.*, 2005; Berkowitz *et al.*, 2008) عموماً تغییرات مقدار ماده ی آلی همبستگی بالایی با میزان رس در بافت خاک و رسوب منطقه دارد. با توجه به (جدول ۴) در ایستگاه های P1 و P2 درصد ماده آلی نسبتاً پایین تر از سایر نقاط بوده و دلیل آن را می توان کمبود پوشش گیاهی و فعالیت های زیستی آبریان در نقاط بالادستی رودخانه ی کرج تلقی کرد. درصد کل ماده ی آلی با یک روند منطقی از ایستگاه P3 تا P7 که تماماً نقاط بالادستی سد امیرکبیر می باشند، افزایش یافته و در ایستگاه های P4، P5 و P6 این

وجود گیاهان آبی، پرندگان مهاجر و بقایای جانوران آبی نظیر ماهی ها و بی مهرگان و همچنین ورود فاضلاب های گوناگون به رودخانه از علل اصلی افزایش ماده آلی در رسوبات بستر می باشند. (Nezami and Khodaparast, 1996).

جدول ۴- درصد کل ماده آلی فرار در رسوبات رودخانه ی کرج

Table 4. The total percentage of volatile organic matter in Karaj River sediments

درصد کل ماده آلی فرار (LOI) Loss on ignition (%)	ایستگاه های نمونه برداری Sampling station
6.83	P1
6.40	P2
8.62	P3
9.38	P4
9.55	P5
9.09	P6
10.55	P7
7.90	P8
11.26	P9

می باشد. ایستگاه های P2 و P7 دارای شاخص زمین انباشتگی کمتر از ۱ برای کروم بوده که نمایانگر آلودگی ناچیز تا کم در این دو ایستگاه می باشد. در ایستگاه های P1، P3، P4، P5، P6 و P8 شاخص زمین انباشت کروم اعدادی بین صفر و یک بوده که بیانگر آلودگی کم در این نقاط می باشد که به تفکیک می توان به فعالیت های روستا های بالادست ایستگاه P1 و عملیات عمرانی شرکت های راه سازی در پایین دست روستای گچسر و در ناحیه ی ایستگاه های P3 و P4 و همچنین حضور روستا های آسارا، کیاسر، کیاسرلات و سپهسالار در بالادست ایستگاه P5 و ایستگاه P6 که در محدوده ی روستای سیرا واقع گردیده و در نهایت ایستگاه P8 که فعالیت های گردشگری و روستایی منطقه موجب افزایش زمین انباشتگی کروم گردیده، اشاره کرد. ایستگاه P9 با زمین انباشتگی ۱/۹۶ برای کروم در میان تمامی نقاط نمونه برداری بالاترین میزان را دارد که عدد ذکر شده در محدوده ی آلودگی متوسط تلقی می گردد و از دلایل افزایش زمین انباشتگی کروم می توان به فعالیت های شهری و روستایی منطقه و مسکونی سازی حریم رودخانه در این ناحیه اشاره کرد. اما در مجموع زمین انباشتگی کروم

با توجه به (شکل ۴) که شامل اعداد و ارقام زمین انباشتگی می باشد ارزیابی و آنالیز میزان زمین انباشتگی عناصر سنگین بر اساس طبقه بندی (جدول ۱) به طریق زیر انجام گردید.

شاخص زمین انباشتگی برای عنصر سرب تنها در ایستگاه P8 عددی مثبت و برابر با ۰/۳۲ بوده و این ایستگاه در رده بندی آلودگی در طبقه ی آلودگی کم قرار دارد که این مسئله ناشی از فعالیت های بشرزاد در منطقه نظیر فعالیت های روستایی و گردشگری می باشد. اما به طور کلی میانگین زمین انباشتگی سرب برابر با ۰/۵۸- می باشد که در رده ی آلودگی ناچیز تا کم دسته بندی می شود.

در تمامی ایستگاه ها به غیر از ایستگاه های P1 و P2 زمین انباشتگی کادمیوم عددی منفی بوده و در این دو نقطه میزان زمین انباشتگی کادمیوم برابر با ۰/۲۸- می باشد و در محدوده ی آلودگی کم محسوب می گردند که فعالیت های روستای در بالادست و نوع بافت منطقه بلحاظ زمین شناسی از علل اصلی توجیح این رقم می باشند. میانگین شاخص زمین انباشت برای ۹ ایستگاه نمونه برداری برابر با ۰/۵۹- می باشد که نشانگر طبقه ی آلودگی ناچیز تا کم برای متوسط کل زمین انباشتگی کادمیوم در رودخانه ی کرج

۰/۲۳ می باشد که بیانگر آلودگی کم رودخانه به عنصر مس می باشد.

اعداد به دست آمده در تمامی نقاط نمونه برداری برای شاخص زمین انباشت آرسنیک منفی بوده که رودخانه از نظر شاخص زمین انباشت مولر در هر ۹ ایستگاه برای عنصر آرسنیک در رده ی آلودگی ناچیز تا کم قرار می گیرد. میانگین شاخص زمین انباشتگی آرسنیک برابر با -۰/۴۲ می باشد که وضعیت آلودگی رودخانه به آرسنیک در کمترین حد یعنی آلودگی ناچیز می باشد.

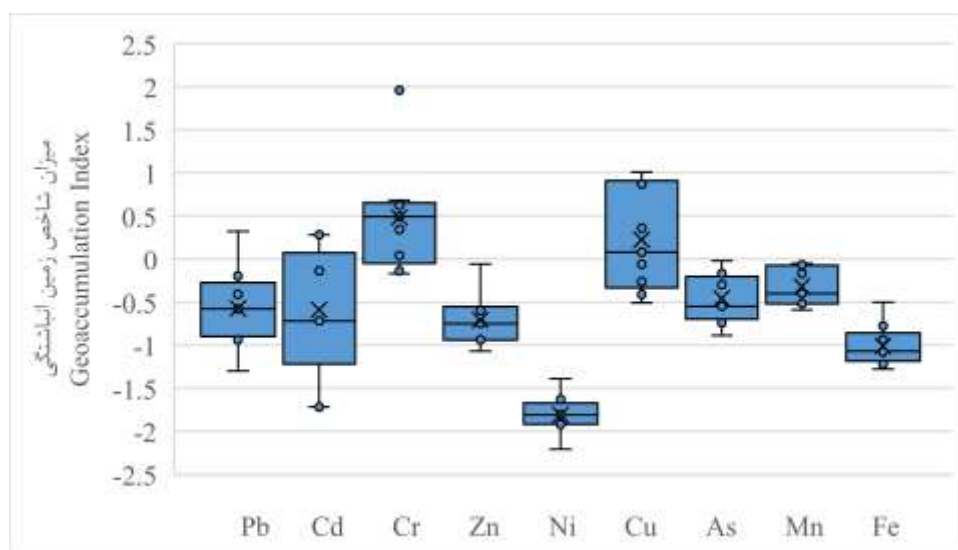
شاخص زمین انباشتگی منگنز در طول رودخانه ی کرج در تمام ایستگاه های نمونه برداری شده عددی منفی گزارش شده که نشانگر آلودگی ناچیز تا کم به عنصر منگنز برای رسوبات بستر رودخانه طبق رده بندی می باشد. میانگین زمین انباشتگی منگنز در رودخانه ی کرج برابر با -۰/۳۲ می باشد که رودخانه از نقطه نظر آلودگی به منگنز در رده ی مذکور قرار می گیرد.

زمین انباشتگی آهن در ۹ ایستگاه نمونه برداری با اختلاف زیادی کمتر از صفر بوده رودخانه ی کرج از حیث آلودگی به آهن در رده ی آلودگی ناچیز تا کم جای می گیرد. این مقدار زمین انباشتگی پایین آهن بیانگر تأثیر بسیار کم فعالیت های بشر در انتشار آلودگی آهن در اکوسیستم می باشد. به طور کلی میانگین زمین انباشتگی آهن در رودخانه ی کرج برابر با -۱/۰۱ می باشد که بلحاظ زمین انباشتگی رودخانه در وضعیت آلودگی ناچیز به آهن قرار دارد.

شاخص زمین انباشتگی برای تمامی عناصر به غیر از کروم و مس رقمی منفی در اغلب ایستگاه های نمونه برداری می باشد که نشانگر آلودگی ناچیز این عناصر در رسوبات رودخانه می باشد. کروم در اغلب ایستگاه ها زمین انباشتگی بین صفر و یک داشته که آلودگی کم این عنصر را برای رسوبات رودخانه نشان می دهد. همچنین مس در بیش از نیمی از ایستگاه های نمونه برداری بر مبنای زمین انباشتگی دارای آلودگی کمی می باشد.

به طور میانگین ۰/۴۸ می باشد که به طور کلی رودخانه ی کرج در رده ی آلودگی کم محسوب می گردد. میزان زمین انباشتگی کروم در تمامی ایستگاه های نمونه برداری شده عددی کمتر از صفر بوده که رودخانه ی کرج به لحاظ زمین انباشتگی روی در دسته ی آلودگی ناچیز تا کم قرار می گیرد. همچنین میانگین زمین انباشتگی روی در ۹ ایستگاه نمونه برداری شده برابر با ۰/۷۱- می باشد که این رقم گواه آلودگی ناچیز روی در رودخانه ی کرج می باشد. میزان شاخص زمین انباشتگی نیکل در هر ۹ ایستگاه نمونه برداری عددی کمتر از صفر بوده که بیانگر آلودگی ناچیز تا کم برای عنصر نیکل می باشد. همچنین میانگین زمین انباشتگی نیکل در رودخانه ی کرج ۱/۱۸- می باشد که به طور کلی وضعیت آلودگی ناچیز نیکل را برای این رودخانه بیان می دارد.

میزان زمین انباشتگی مس در ایستگاه های P2، P4، P6 و P7 کمتر از صفر بوده و این سطح از زمین انباشتگی نشانگر آلودگی ناچیز تا کم رسوبات نقاط مذکور با عنصر مس می باشد. در ایستگاه های P1، P3، P5 و P9 میزان زمین انباشتگی مس عددی بین صفر و یک را نشان می دهد که این ایستگاه ها دارای مقدار آلودگی کم به وسیله عنصر مس می باشند. اما در ایستگاه P8 زمین انباشتگی مس در حدود ۱/۰۱ می باشد که این رقم در رده بندی آلودگی متوسط به مس برای این ایستگاه جای می گیرد. به طور اجمالی ایستگاه های P1، P3 و P8 از نظر زمین انباشتگی مس با اختلاف زیادی نسبت به سایر ایستگاه ها آلوده تر بوده که علاوه بر عوامل زمین زاد می توان فعالیت مراکز تفریحی و روستا های بالادست ایستگاه P1 و فعالیت های روستایی و عمرانی در بالادست ایستگاه P3 و در انتها تأثیرات تجمعی فعالیت های محلی و روستایی و به دنبال آن نشت فاضلاب ها و پساب های رستوران ها و مناطق مسکونی به رودخانه و افزایش آلودگی در ایستگاه P8 را از علل اصلی آلودگی مس در این نواحی دانست. به طور میانگین زمین انباشتگی مس در رودخانه ی کرج برابر با



شکل ۵- نمودار جعبه ای شاخص زمین انباشتگی عناصر سنگین رسوبات رودخانه ی کرج
 Fig. 4- Boxplot diagram of heavy metals' Geoaccumulation Index in Karaj River sediments

می توانند در میزان غنی شدگی کادمیوم در این نواحی دخیل باشند. ایستگاه P2 دارای بالاترین غنی شدگی برای کادمیوم در میان سایر نقاط نمونه برداری می باشد که با میزان غنی شدگی ۵/۱۸ در رده ی غنی شدگی قابل توجه قرار می گیرد. علل مختلفی از جمله عوامل انسانی که شامل فعالیت های گردشگری و روستایی مردم منطقه می باشد در میزان غنی شدگی قابل توجه کادمیوم در این ناحیه نقش دارند. به طور میانگین غنی شدگی کادمیوم در رودخانه کرج برابر با ۳/۲۱ می باشد که می توان این رودخانه را در رده بندی غنی شدگی متوسط برای عنصر کادمیوم محسوب کرد.

در تمامی ایستگاه ها به غیر از ایستگاه P9 میزان غنی شدگی کروم کمتر از ۲ بوده که این نقاط در رده ی آلودگی کم قرار می گیرند. در ایستگاه P9 میزان غنی شدگی ۲/۷۶ می باشد که غنی شدگی متوسط کروم و تأثیر فعالیت های بشرزاد را در این ناحیه نشان می دهد. میزان غنی شدگی کروم در تمام ایستگاه ها به استثنای ایستگاه P9 از عدد ۱/۵ نیز کمتر بوده که حاکی از آلودگی کروم به واسطه ی منابع زمین زاد در این نواحی می باشد. میانگین غنی شدگی کروم در طول رودخانه ی کرج برابر با ۱/۱۷ می باشد که می توان این رودخانه را در رده ی غنی شدگی کم کروم دسته بندی کرد. در سه ایستگاه P7، P8 و P9 میزان غنی شدگی روی کم

با توجه به (شکل ۵) و (جدول ۲) میزان غنی شدگی و رده آلودگی عناصر سنگین به شکل زیر مشخص و بررسی گردید.

غنی شدگی عنصر سرب در طی رودخانه در ایستگاه های P2، P5، P7 و P9 کم بوده و این عنصر در ایستگاه های P1، P3، P4، P6 و P8 دارای غنی شدگی متوسط می باشد که این مسئله به ویژه در ایستگاه P8 مشهود می باشد. ایستگاه P8 علاوه بر قرارگیری در پایین دست روستا های ارنکه و خوزنکلا، سرشاخه های هفت چشمه و آتشفشان نیز به این ناحیه می ریزد که فعالیت های انسانی و بار ترافیکی در این منطقه گواه میزان بالای غنی شدگی این ایستگاه نسبت به سایر نقاط نمونه برداری می باشد. غنی شدگی سرب بر مبنای آهن به طور میانگین برابر با ۲/۲۶ می باشد که در دسته ی غنی شدگی متوسط قرار می گیرد.

میزان غنی شدگی کادمیوم در دو ایستگاه P5 و P8 کمتر از ۲ بوده و می توان گفت که این عنصر در این دو نقطه دارای غنی شدگی کم می باشد و از سویی مقادیر غنی شدگی کادمیوم در ایستگاه های P5 و P8 کمتر از ۱/۵ نیز می باشد که بیانگر تأثیر زیاد عوامل زمین زاد در این نقاط می باشد. ایستگاه های P1، P3، P4، P6، P7 و P9 دارای غنی شدگی متوسط برای عنصر کادمیوم می باشند که اغلب عوامل انسانی

بوده اما اعداد به دست آمده در این سه نقطه بیش از ۱/۵ بوده گه نمایانگر حضور منابع مصنوعی آلودگی در این ایستگاه ها می باشد. در ایستگاه های P1، P2، P3، P4، P5 و P6 میزان غنی شدگی روی بیش از عدد ۲ بوده که میزان غنی شدگی عنصر روی در این ایستگاه ها در رده ی متوسط بوده و در نتیجه این نقاط نیز از نظر آلودگی رسوبات بستر رودخانه به واسطه ی فعالیت های بشر تحت شعاع قرار گرفته اند. همچنین میانگین غنی شدگی از تمامی نقاط نمونه برداری ۲/۱۹ می باشد رودخانه ی کرج را به لحاظ غنی شدگی روی در دسته ی غنی شدگی متوسط قرار می دهد.

میزان غنی شدگی عنصر نیکل در هر ۹ ایستگاه کمتر از عدد ۲ می باشد که تمامی ایستگاه ها در رده ی غنی شدگی کم جای می گیرند. متوسط غنی شدگی نیکل در رودخانه ی کرج برابر با ۰/۴۸ می باشد که عددی بسیار کوچک در طبقه بندی غنی شدگی عناصر می باشد و در نتیجه این مسئله نشانگر عوامل طبیعی و زمین زاد در آلودگی رسوبات رودخانه به نیکل می باشد.

میزان غنی شدگی مس در ایستگاه های P2، P4، P5، P6، P7 و P9 اعدادی کمتر از ۲ را نشان می دهد که این نقاط دارای غنی شدگی کم برای عنصر مس می باشند. از طرفی علارغم میزان غنی شدگی کم مس در دو ایستگاه P5 و P9 با توجه به مقادیر غنی شدگی این نقاط که به ترتیب ۱/۶۶ و ۱/۸۳ می باشد، می توان عوامل انسانی آلاینده را به عنوان منبع اصلی آلودگی در این نقاط لحاظ کرد. اما مس در ایستگاه های P1، P3 و P8 به ترتیب دارای غنی شدگی به مقدار ۲/۶۲، ۲/۹۸ و ۲/۸ می باشد که این سه ایستگاه دارای غنی شدگی متوسط برای این عنصر می باشند. افزایش اینچنینی غنی شدگی در این سه ایستگاه می تواند ناشی از منابع بشرزاد در بالادست این نقطه باشد. میانگین غنی شدگی مس در رودخانه ی کرج برابر با ۱/۹ بوده که این عدد در محدوده ی غنی شدگی کم می باشد.

میزان غنی شدگی آرسنیک مشخص می باشد، غنی شدگی

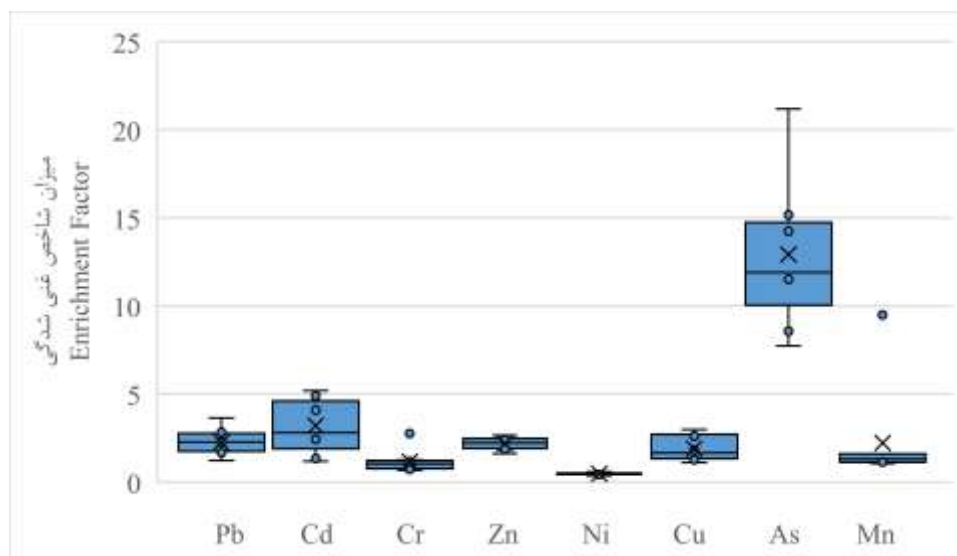
این عنصر در تمامی ایستگاه ها به غیر از ایستگاه P4 در طبقه ی غنی شدگی قابل توجه قرار می گیرد که این مسئله حاکی از تأثیر عوامل انسانی به ویژه در ایستگاه های P2، P7 و P8 می باشد. در ایستگاه P2 به دلیل حضور روستا های وارنگه رود، گاجر و ولایت رود در بالادست و همچنین مجتمع های تفریحی و ورزشی دیزین در نزدیکی این ناحیه موجبات افزایش غنی شدگی آرسنیک فراهم گردیده است. ایستگاه P7 که در بستر دریاچه ی سد قرار دارد، می تواند تاریخچه ای برای وضعیت غنی شدگی آرسنیک در درازمدت ارائه دهد. در ایستگاه P8 نیز به علت فعالیت های انسانی نظیر روستا های اطراف و مشکلات پساب و فاضلاب آن ها و گردشگری غیراصولی ناشی از فقدان آموزش در خصوص محیط زیست، غنی شدگی آرسنیک به مقدار چشمگیری افزایش یافته است. در بین تمامی ایستگاه ها، ایستگاه P4 دارای غنی شدگی شدید می باشد که علت این امر پروژه های عمرانی، راه سازی و بهره برداری از منابع طبیعی می باشد. میانگین غنی شدگی آرسنیک در رسوبات رودخانه ی کرج با رقم ۱۳/۱۲ در رده ی غنی شدگی قابل توجه قرار دارد.

در تمامی ایستگاه ها میزان غنی شدگی منگنز کمتر از ۲ می باشد و در طبقه بندی استاندارد، منگنز دارای غنی شدگی کم در رودخانه ی کرج می باشد. اما از طرفی می توان با توجه به غنی شدگی ایستگاه های P1، P2، P6 و P8 به این نتیجه دست یافت که در این نقاط غالباً عوامل بشرزاد موجب انتشار آلودگی منگنز در محیط های آبی گردیده اند. همانطور که قبلاً اشاره شد ایستگاه های P1 و P2 تحت تأثیر روستا ها و مراکز تفریحی-گردشگری در بالادست خود دچار آلودگی به عنصر منگنز می باشند. همچنین در ایستگاه های P6 و P8 با توجه به سوءمدیریت در دفع پسماند ها و فاضلاب های روستایی و عدم آموزش و شناخت مردم منطقه نسبت به آلودگی عناصر سنگین و اثرات آن بر محیط زیست آلاینده‌گی به این عنصر نسبتاً بالا می باشد.

تمامی عناصر مورد مطالعه به استثناء سرب، مس، روی،

رودخانه در طبقه ی غنی شدگی متوسط قرار دارد. در این میان آرسنیک از غنی شدگی قابل توجهی برخوردار است که نمایانگر نقش عمده ی فعالیت های انسانی در تولید و انتشار این عنصر می باشد.

کادمیوم و آرسنیک دارای غنی شدگی کمی می باشند. سرب، مس و روی تقریباً در نیمی از ایستگاه های نمونه برداری دارای غنی شدگی متوسط بوده و گستره ی غنی شدگی کادمیوم نیز در اغلب نمونه های برداشت شده از



شکل ۶- نمودار جعبه ای شاخص غنی شدگی عناصر سنگین رسوبات رودخانه ی کرچ بر مبنای آلومینیوم
Fig. 6- Boxplot diagram of heavy metals' Enrichment Factor in Karaj River sediments based on AI

میزان آلاینده ی کمی را از جانب این فلز برای رسوبات رودخانه ی کرچ تلقی کرد اما به علت غنی شدگی متوسط این عنصر، بخشی از انتشار آن مربوط به فعالیت های بشرزاد می باشد.

غلظت میانگین فلز کروم برابر با ۹۰/۶۶ ppm بوده که رقمی کمتر از میانگین غلظت این عنصر در پوسته ی زمین می باشد. غلظت کروم در میان نمونه های برداشت شده از رودخانه میان ۵۲ ppm تا ۲۲۷ ppm متغیر است. این عنصر با زمین انباشته ی به مقدار متوسط ۰/۴۸ دارای آلودگی زایی کم برای رسوبات بستر رودخانه بوده و از حیث غنی شدگی نیز با میزان ۱/۱۷ از غنی شدگی کمی برخوردار است.

در نمونه های برداشت شده از رسوبات رودخانه ی کرچ غلظت فلز روی با میانگین ۱۱۲/۵۶ ppm از میانگین غلظت این عنصر در پوسته (۷۵ ppm) بیشتر بوده و غلظت آن از ۸۶ ppm تا ۱۷۳ ppm در رسوبات بستر رودخانه متغیر است. روی آلودگی ناچیز تا کمی را در رسوبات به لحاظ زمین انباشته ی (به مقدار میانگین ۰/۷۱-) ایجاد کرده و با رقم

بر اساس یافته ها و داده های به دست آمده میانگین غلظت سرب در رودخانه ی کرچ به طور کلی برابر با ۲۴ ppm بوده که در حدود دو برابر میانگین غلظت آن در پوسته ی زمین می باشد. غلظت این عنصر در طول رودخانه ی کرچ از ۱۴ ppm تا ۴۳ ppm متغیر بوده است. شاخص زمین انباشته ی سرب به طور میانگین برابر با ۰/۵۸- می باشد که آلاینده ی ناچیز تا کم را برای رسوبات رودخانه به همراه دارد. همچنین شاخص غنی شدگی سرب در رودخانه ی کرچ به طور متوسط با غنی شدگی کم به مقدار ۱/۹۹ به دست آمد.

عنصر کادمیوم دارای غلظت متوسط ۰/۲۴ ppm در رسوبات رودخانه ی کرچ می باشد که این رقم بین ۰/۱ تا ۰/۴ ppm متغیر است. غلظت میانگین کادمیوم در رسوبات رودخانه بیش از دو برابر غلظت میانگین آن در پوسته ی زمین (۰/۱ ppm) می باشد. کادمیوم از نظر زمین انباشته ی (۰/۵۹-) دارای آلودگی ناچیز تا کم برای رودخانه بوده و همچنین دارای غنی شدگی متوسط به مقدار ۲/۹۶ برای رسوبات می باشد. در مورد این عنصر در مجموع می توان

شدگی کم قرار دارد. در نتیجه می توان آلودگی عنصر منگنز را در رسوبات رودخانه ی کرج به مقدار بسیار کمی تلقی کرد که عمدتاً تحت تأثیر عوامل طبیعی قرار دارد. غلظت میانگین آهن در رسوبات رودخانه ی کرج ۳۵۶۶۲ ppm می باشد که از میانگین غلظت آن در پوسته ی زمین (۴۱۰۰۰ ppm) کمتر بوده و این میانگین به دست آمده از کلیه ی ایستگاه های نمونه برداری بین ppm ۲۹۱۹۹ تا ppm ۴۹۹۳۱ متغیر است. تغییرات غلظت آهن در ۹ ایستگاهی که از رسوبات، نمونه برداری صورت گرفته بسیار کم بوده که نمایانگر عوامل طبیعی مربوط به زمین شناسی در انتشار این عنصر به محیط می باشد، به همین علت معمولاً برای محاسبات شاخص غنی شدگی از این فلز به عنوان عنصر زمینه ای یا مبنا استفاده می گردد اما در این پژوهش از عنصر آلومینیوم که دارای نوسانات کمی در میزان غلظت بوده، به عنوان عنصر زمینه ای در محاسبه ی شاخص غنی شدگی استفاده گردید و نتایج صحیح تر و منطقی تر حاصل گردید. میزان متوسط زمین انباشتگی آهن در رودخانه برابر با ۱/۰۱- می باشد که بیانگر آلودگی ناچیز آهن در رسوبات رودخانه ی کرج می باشد. به طور کلی آلودگی آهن در رسوبات این رودخانه بسیار کم بوده و این فلز غالباً توسط عوامل طبیعی و زمین شناختی در رسوبات نشر و پراکنش یافته است.

نتیجه گیری

در راستای مدیریت و ارزیابی آلودگی رسوبات بستر رودخانه ی کرج برای تجزیه و تحلیل دقیق و ارتباط بین عناصر و عوامل مؤثر در کیفیت رسوب پارامترهای غلظت کل عناصر سنگین و درصد کل ماده ی آلی فرار نمونه های رسوب اندازه گیری شد. سپس با استفاده از شاخص های مختلف مانند شاخص زمین انباشت (I_{geo}) و شاخص غنی شدگی (EF) از طریق تجزیه و تحلیل محاسباتی به بررسی کیفی رسوبات رودخانه ی کرج پرداخته شد. نتایج بدست آمده نشانگر این موضوع می باشد که آلودگی رودخانه ی کرج به

۲/۱۹ دارای غنی شدگی متوسط به علت تأثیر برخی از فعالیت های بشرزاد در تولید و انتشار آن می باشد. غلظت میانگین فلز نیکل در رودخانه ی کرج برابر با ۲۹/۴۴ ppm می باشد که از میانگین غلظت این عنصر در پوسته ی زمین کمتر بوده و با شاخص زمین انباشتگی ۱/۱۸- دارای آلودگی ناچیزی برای رسوبات می باشد. غلظت نیکل بین ppm ۲۲ و ppm ۳۹ در رسوبات رودخانه ی کرج متغیر است. علاوه بر این متوسط غنی شدگی این عنصر ۰/۴۸ می باشد که حاکی از غنی شدگی کم آن در رسوبات رودخانه ی کرج می باشد. به طور کلی رودخانه ی کرج دارای آلودگی بسیار ناچیزی از جانب فلز نیکل می باشد.

میانگین غلظت مس در رودخانه ی کرج با رقم ppm ۷۳/۸۹ از متوسط غلظت آن در پوسته ی زمین بیشتر بوده و غلظت این عنصر در محدوده ی ppm ۴۱ تا ppm ۱۱۸ متغیر است. میانگین زمین انباشتگی مس در این رودخانه برابر با ۰/۲۳ می باشد که بیانگر آلودگی کم مس در رسوبات بستر رودخانه است. همچنین به طور متوسط غنی شدگی این فلز با رقم ۱/۹، مقدار کمی می باشد.

غلظت آرسنیک به طور متوسط در رسوبات رودخانه ی کرج برابر با ppm ۱۴/۹۶ به دست آمده که این رقم حد میانگین تغییرات آرسنیک از ppm ۱۰/۵ تا ppm ۲۲ می باشد و در کل اعدادی بسیار بالاتر از میانگین این عنصر در پوسته ی زمین است. علیرغم این مسئله آرسنیک با میانگین زمین انباشتگی ۰/۴۲- دارای آلودگی کمی بوده ولی با غنی شدگی قابل توجه خود به میزان ۱۱/۷۳ بیانگر عامل اصلی انتشار آن توسط فعالیت های انسانی در محیط زیست و رسوبات رودخانه می باشد.

میانگین غلظت منگنز برابر با ppm ۱۰۳۴/۱ می باشد که از غلظت میانگین آن در پوسته ی زمین بیشتر بوده و غلظت این عنصر در بازه ی ppm ۸۴۹ تا ppm ۱۲۲۸ متغیر است. زمین انباشتگی منگنز با مقدار میانگین ۰/۳۲- نمایانگر آلودگی ناچیز این عنصر در رسوبات می باشد و از طرفی غنی شدگی این عنصر نیز با رقم میانگین ۱/۲۷، در دسته ی غنی

کنترل و نظارت بر آلودگی صورت پذیرد. مکان یابی مناسب به جهت پروژه های عمرانی و ارزیابی های زیست محیطی قبل از احداث پروژه به ویژه در محدوده ایستگاه های P3 و P4 و همچنین نظارت و مدیریت صحیح زیست محیطی بر پروژه های عمرانی در دست احداث منطقه انجام گیرد. پیش گیری از تغییرات کاربری اراضی و تجاوز به حریم رودخانه در محدوده ایستگاه های P3، P5 و P9 با استفاده از قوانین نظارتی به منظور حفظ و حراست از اکوسیستم رودخانه می تواند در کاهش و کنترل آلودگی در این نواحی تأثیر بسزایی بگذارد و از طرفی ساماندهی توسعه سیستم فاضلاب و رواناب های جاری به رودخانه در روستا های پرجمعیت و مراکز گردشگری منطقه با اتخاذ برنامه ریزی مناسب موجب جلوگیری از آلودگی بستر رودخانه و آب های زیرزمینی حاشیه رودخانه خواهد شد. همچنین توسعه ای آموزش های همگانی در تمامی سطوح و سلسله مراتب جامعه (اعم از سازمان های دولتی و غیر دولتی) و اشاعه ای فرهنگ حفظ و حراست از محیط زیست و همچنین ارتقاء سطح شناخت و درک عموم جامعه از اثرات آلودگی بر محیط زیست یکی از مهمترین اصول اولیه در حفاظت و کنترل اکوسیستم های آبی از آلودگی به عناصر سنگین می باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان کمال تشکر را از امکانات دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران ابراز می دارند. ضمناً در نگارش این مقاله از حمایت مالی سازمان/نهاد یا شخص خاصی استفاده نشده است.

References

Abedi Koupaei, J., 2007. Methods of preventing the wastage of water resources; In Proceedings of the 2nd Conference on Methods of Preventing the Wastage of National Resources, 4th-6th November, Shahrekord, Iran. pp. 131-142.

Abolghasemi Rahimabadi, A., 1999. Identifying and investigating the effect of pollutant sources on the

فلزات سنگین دارای دو منشأ طبیعی (زمین زاد) و مصنوعی (انسان زاد) می باشد. منشأ طبیعی این آلودگی شامل عوامل زمین شناسی و ویژگی های فیزیکی و شیمیایی و همچنین فرسایش و هوازدگی سنگ های بستر و شستشوی حاشیه رودخانه می باشد که سبب ته نشینی و انباشت رسوبات آلوده به عناصر سنگین در بستر و حاشیه رودخانه ها می گردد. از طرفی تخلیه فاضلاب ها و رواناب های شهری، روستایی و کشاورزی به آب رودخانه و همچنین کمبود آموزش و فرهنگ سازی در مبحث گردشگری از جمله منابع انسان زاد می باشند که موجب ورود مقدار قابل توجهی از عناصر سنگین به این اکوسیستم آبی گردیده است. در راستای جلوگیری و کنترل آلودگی رودخانه ی کرج به عناصر سمی خطرناک، در این پژوهش به اندازه گیری غلظت عناصر سنگین موجود در رسوبات بستر رودخانه و تجزیه و تحلیل آن با استفاده از شاخص های کیفی رسوب (شاخص زمین انباشت (Igeo)، شاخص غنی شدگی (EF)) پرداخته شد و از این ارزیابی استنباط گردید که رسوبات بستر رودخانه ی کرج آلودگی کمی را دارا بوده که بخشی از این میزان کم آلودگی بر اثر فعالیت های مخرب بشر در منطقه ی مورد مطالعه ایجاد گردیده است. برای جلوگیری از گسترش آلودگی رودخانه به عناصر سنگین تا آستانه های بحرانی و کنترل میزان آلودگی فعلی رودخانه راهکار های ذیل مهم و لازم الاجرا می باشد:

به منظور پایش دقیق و مستمر، پژوهش و نمونه برداری از نقاط مختلف رودخانه در شرایط و فصول مختلف با تعداد نمونه های بیشتر صورت گیرد و اندازه گیری و بررسی مکرر میزان عناصر سنگین در آب و رسوبات رودخانه به جهت

منابع

water quality of the Zayandeh Rood River using the QUAL2E model. MS.c. Thesis. Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Berkowitz, B., Dror, I. and Yaron, B., 2008. Contaminant geochemistry: Interactions and Transport in the Subsurface Environment. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 412p.

- Bradl, H.B., Kim, C., Kramar, U. and Stiiben, D., 2005. Interactions of heavy metals. in H. B. Bradl, Heavy metals in the environment: Germany. Elsevier. 6, 28-148.
- Castro-Català, N., Kuzmanovic, M., Roig, N., Sierra, J., Ginebreda, A., Barceló, D. and Muñoz, I., 2016. Ecotoxicity of sediments in rivers: Invertebrate community, toxicity bioassays and the toxic unit approach as complementary assessment tools. *Science of the Total Environment*. 540, 297-306.
- Dickinson, W.W., Dunbar, G.B. and Mcleod, H., 1996. Heavy metal history from cores in Wellington Harbour New Zealand. *Environmental Geology*. 27, 59-69.
- Gheshlaghi, S. and Rostami, A., 2016. Contamination and speciation of heavy metals in sediments of Siah Rood riverbed (Qaemshahr region, Mazandaran Province). *Stratigraphy and Sedimentology Researches*. 33(2), 73-90.
- Goorzadi, M., Vahabzade, Gh., Ghanbarpour, M.R. and Karbassi, A.R., 2009. Assessment of heavy metal pollution in Tilehbon riversediment. *Journal of Applied Sciences*. 9(6), 1190-1193.
- Kane, S., Lazo, P. and Vlora, A., 2012. Assessment of Heavy Metals in some Dumps of Copper Mining and Plants in Mirdita Area, Albania. In *Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Water, Climate and Environment, EDS, 24th-29th June, Ohrid, Macedonia*.
- Karimi, M. and Ghasempour Shirazi, SM., 2012. Geochemical distribution and degree of contamination of heavy metals (lead, zinc, nickel, chromium and arsenic) in the sediments of the Kor River (south of Marvdasht). *Geotechnical Geology (Applied Geology)*. 2(8), 133-145.
- Langmuir, D., Chrostowski, P., Vigneault, B. and Chaney, R., 2005. Issue paper on the environmental chemistry of metals: U.S. Environmental Protection Agency Risk Assessment Forum 1200 Pennsylvania Avenue, NW Washington, DC. 113p.
- Lazaro, J.D., Kidd, P.S. and Martinez, C.M., 2006. A phytogeochemical study of the Tra's-os-Montes region (NE Portugal): possible species for plant based soil remediation technologies. *Science of the Total Environment*. 354 (2-3), 265-277.
- Li, Z., Liu, J., Chen, H., Li, Q., Yu, C., Huang, X. and Guo, H., 2019. Water environment in the Tibetan Plateau: heavy metal distribution analysis of surface sediments in the Yarlung Tsangpo River Basin. *Environ Geochem Health*. 17, 1-9.
- Lin, K.N., Lim, Y.C., Chen, C.W., Chen, C.F., Kao, C.M. and Dong, C.D., 2022. Spatiotemporal variation and ecological risk assessment of heavy metals in industrialized urban river sediments: Fengshan River in southern Taiwan as a case study. *Appl Sci*. 12(3),1013.
- Liu, H., Probst, A. and Liao, B., 2005. Metal contamination of soils and crops affected by the Ehenzhou lead Zinc mine spill (Hunan, Ehina). *Science of the Total Environment*. 339, 153-156.
- Lone, S. A., Bhat, S. U., Hamid, A., Bhat, F. A., and Kumar, A., 2020. Quality assessment of springs for drinking water in the Himalaya of South Kashmir India. *Environ Sci Pollut Res*. 28, 2279-2300.
- Loska, K. and Wiechula, D., 2003. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal pollution in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*. 51, 723-733.
- Loska, K., Cebula, J., Pelczar, J., Wiechula, D. and Kwapulinski, J., 1995. Use of environment, and contamination factors together with geoaccumulation indexes to elevate the content of Cd, Cu and Ni in the Reybnik water reservoir in Poland. *Water, Air Soil Pollution*. 93, 347-365.
- Mishra, S. and Kumar, A., 2020. Estimation of physicochemical characteristics and associated metal contamination risk in river Narmada. *India Env Eng Res*. 26, 190521.
- Muller, G., 1969. Index of geoaccumulation Mullen sediments of the Rhine River. *Journal of Geology*. 2, 108-118.
- Nezami, S. and Khodaparast, H., 1996. Survey on organic matter accumulation in the Anzali Lagoon. *Iranian Fisheries Scientific Journal*. 5 (2), 1-10.
- Rybicka, E.H., Adamiec, E. and Aleksander-Kwarczak, U., 2005. Distribution of trace metals in the Odra River system: water-suspended matter-sediments. *Limnologia*. 35(3), 185-198.
- Singhal, B.B.S. and Gupta, R.P., 1999. *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Kluwer Academic Publishers. 400p.
- Stoffers, P., Glasby, G.P., Wilson, C.J., Davis, K.R.

and Watter, P., 1986. Heavy metal pollution in Wellington Harbor. *New Zealand Marine and Freshwater Research*. 20, 494-512.

Sunderland, E.M., 2008. Reconciling models and measurements to assess trends in atmospheric mercury deposition. *Environmental Pollution*. 156 (2), 526-35.

Sutherland, R.A., 2000. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environment Geology*. 39, 611-627.

Voral, M., 2011. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris river (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques. *Hazardous Materials*. 195, 355-364.

Wang, Q.Q., Duan, W.Y., Yao, X.M., Guo, X.N., Liu, D.Y., Gao, W.M. and 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 Bioavailable*. 34(1),180-189.

Yinghong, F., Chunye, L., Mengchang, H. and Zhifeng, Y., 2009. Enrichment and Chemical Fraction of Copper and Zinc in the Sediments of the Dalio River System, China. *Soil and Sediment Contamination*. 18, 688-701.

Yu, R.L., Hu, G.R. and Wang, L.J., 2010. Speciation and ecological risk of heavy metals in intertidal sediments of quanzhou bay, China. *Environmental Monitoring Assessment*. 2010, 163, 241-252.

Zhao, Y.Q., Yang, Y., Dai, R.K., Leszek, S., Wang, X.Y. and 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.



