

Original Article



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, * 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): 79-100.

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

DOI: 10.48308/envs.2023.1299



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.



مقاله پژوهشی

تحلیل میزان آلودگی رسوبات رودخانه‌ای به فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های زمین انباستگی و غنی شدگی



تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۴

سپهر اخلاقی‌فرد، تورج نصرآبادی*^{ID}، حسن هویدی

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، توسعه‌ی 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 ارائه‌ی 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 تاثیرگذار 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 زمین انباستگی و غنی شدگی می‌باشد که به ارائه‌ی 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 آماده سازی 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 زمین انباستگی و غنی شدگی 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 اندازه‌گیری مربوط به فعالیت‌های انسانی نظیر راه سازی، گردشگری و نشت و تخلیه‌ی رواناب‌ها و فاضلاب‌های محلی به رودخانه و حریم آن می‌باشد که موجب افزایش زمین انباستگی عناصری همچون مس و کروم به ترتیب تا اعداد ۱/۰۱ و ۱/۹۶ در ایستگاه‌های پایین دست P8 و P9 گردیده‌اند. همچنین بیشتر میزان میانگین زمین انباستگی برای عنصر مس در ۹ ایستگاه نمونه برداری، به مقدار ۰/۲۳ بدست آمده است. از سویی این فعالیت‌های بشرزاد موجب افزایش قابل توجه غنی شدگی آرسنیک در ایستگاه P4 تا رقم ۱۷/۸۱ شده است که میانگین غنی شدگی 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 با عدم تطابق آن‌ها بحث و بررسی گردید. به طور کلی نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که رودخانه‌ی کرج با در نظر داشتن شاخص‌زمین انباستگی و فاکتور غنی شدگی، 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، شاخص‌زمین انباستگی، فاکتور غنی شدگی، رودخانه کرج

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۴

استناد به این مقاله: اخلاقی فرد، س، ت. نصرآبادی و ح. هویدی. ۱۴۰۲. تحلیل میزان آلودگی رسوبات رودخانه ای به فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های زمین انباستگی و غنی شدگی. فصلنامه علوم محیطی. ۷۹(۴): ۱۰۰-۱۱۰.

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

DOI: 10.48308/envs.2023.1299



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

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 عموما 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 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 ابناشستگی 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 معطل 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 های گسترشده 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 راهیایی 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 انباست 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 استانداردهای معنی‌گذاری، بیانگر غلاظت بالای فلزات Cr, Zn, Pb, Ni, As در تعدادی از ایستگاه‌های مورد مطالعه است. جهت برآورد شدت آلودگی و همچنین تفکیک اثر عوامل انسانی (آنتروپوزیونیک) از عوامل طبیعی (ژئوژئیک) 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 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 فرستاده‌های و ظرفیت‌های بسیاری می‌باشد. در این پژوهش با توجه به نوع کاربری اراضی منطقه از ۹ ایستگاه با استفاده از نمونه‌بردارهای

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 شبیه 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 اکوتوكسیلوژیکی موجودات زنده را شناسایی کرده و عوامل اصلی سمیت در این رودخانه‌های پر تنفس را شناسایی کنیم.

Rybicka *et al.* (2005) رسوبات ماده معلق در آب را بررسی کردند. تحقیقات گسترده در مورد رسوبات ماده معلق فلزات در آب، ذرات معلق (SPM) و رسوبات زیرین کل سیستم رودخانه اودرا طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۰ انجام شد. توزیع عمومی 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 کادمیوم، 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.

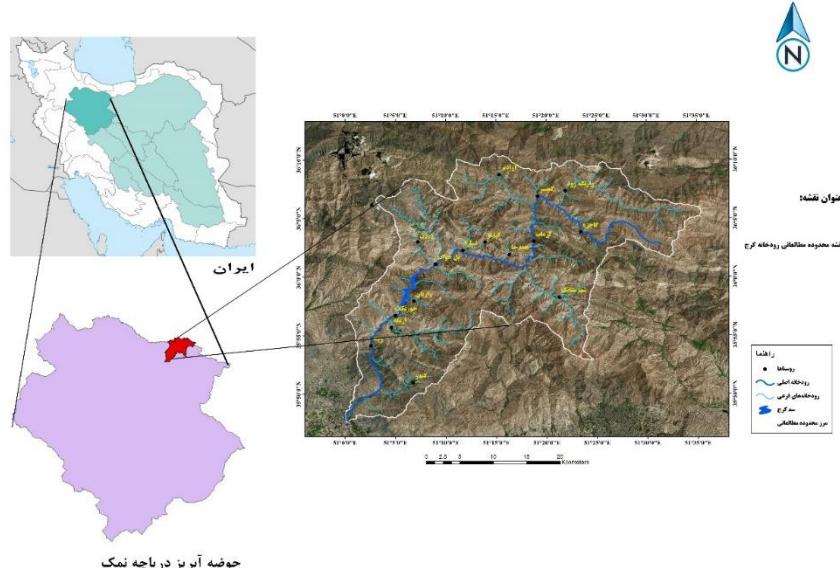
Gheshlaghi and Rostami (2016) به بررسی آلودگی و گونه سازی فلزات سنگین در رسوبات بستر رودخانه سیاه رود پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده به‌طور کلی نشان داد که تغییرات غلاظت بیشتر فلزات در طول رودخانه روندی غیر یکنواخت داشته که علت آن آلاینده‌ها بهویژه در نقاط نزدیک به مناطق شهری و ایستگاه‌های آخر نمونه برداری و همچنین تأثیر پارامترهای فیزیکو شیمیایی رسوب از جمله محتوای مواد آلی و درصد رس بر غلاظت 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 بوسیلهٔ 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 عبارت اند از:

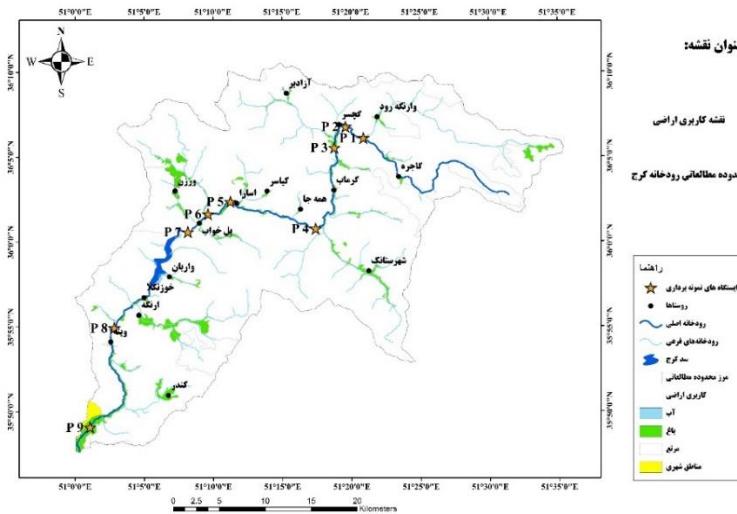
- (الف) اندازه گیری و ارزیابی آلودگی رسوبات رودخانه کرج به فلزات سنگین و تعیین شدت آن با استفاده از فاکتورهایی نظری شاخص زمین انباشت (Igeo) و شاخص غنی شدگی (EF)
- (ب) مقایسه غلظت فلزات سنگین رسوبات رودخانه کرج با استانداردهای موجود برای کیفیت رسوبات بستر رودخانه
- (ج) ترسیم نمودار تغییرات غلظت فلزات سنگین رودخانه کرج و تجزیه و تحلیل آماری نتایج
- (د) شناخت منابع آلاینده منطقه و ارائهٔ 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 اکو سیستم 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، ولايت رود و... می باشد. این دو ایستگاه از کاربری های مختلف تجاری، تفریحی، فرهنگی و ورزشی نظری مجموعهٔ 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 آزادپر، بر کیفیت آب و رسوب این منطقه اثر مستقیم می گذارد. ایستگاه P4 که در پایین دست باغات متتمرکز روستای شهرستانک واقع گردیده و همچنین فعالیت هایی نظیر ساخت جاده و بهره برداری از منابع طبیعی بر این ناحیه در زمینهٔ آلودگی آب و رسوب تأثیر گذارند. ایستگاه های P5، P6 و P7 در ناحیهٔ پیست رودخانه کرج واقع متمرکز روستایی و باغات آن در بالادست سد قرار گرفته اند که در این میان ایستگاه P7 در بستر دریاچهٔ سد امیرکبیر واقع گردیده که می تواند تأثیرات و ترکیبات رسوب گذاری در مجموعهٔ 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 فاصلهٔ میان آن ها روستاه، مراکز تفریحی و رستوران ها،



شکل ۱- نقشهٔ محدودهٔ جغرافیایی رودخانهٔ کرج

Fig. 1- Geographical area map of Karaj River



شکل ۲- نقشه‌ی نقاط نمونه برداشی و کاربری اراضی رودخانه‌ی کرج

Fig. 2- Map of sampling points and land use of Karaj River

(Loska *et al.*, 1995) این شاخص اولین بار توسط پژوهشگران استرالیایی معرفی گردیده و نمایانگر تجمع و پراکندگی عناصر در محیط‌های آبی می‌باشد. به این ترتیب اگر میزان غنی شدگی کمتر از عدد ۱ باشد نشانگر محیط دافعه و اگر بیش از ۱ باشد نشان دهنده‌ی محیط‌های تجمیعی برای عناصر سنگین می‌باشد و از طرفی اگر مقدار غنی شدگی دقیقاً برابر با ۱ باشد حاکی از طبیعی و نرمال بودن محیط رسوب می‌باشد. 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 می‌باشد. (Sutherland, 2000) به طور کلی این شاخص برای تعیین سهم عوامل بشرزاد در آلودگی رودخانه به عناصر سنگین می‌باشد. (Liu *et al.*, 2005; Dickinson *et al.*, 1996) از این شاخص در برآورد شیمی رسوبات در رابطه با آلودگی عناصر سنگین استفاده می‌شود و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد: (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 می‌باشد.

شاخص زمین انباشت (I_{geo})

یکی از شاخص‌های موجود برای ارزیابی و سنجش میزان انباشت فلزات سنگین آلانینده در رسوبات، شاخص زمین انباشتگی (I_{geo}) می‌باشد. (Loska and Wiechula, 2003) این شاخص برای بررسی آلودگی رسوب و تعیین میزان اثرات فعالیت‌های بشرزاد در بحث آلودگی محیط زیست بوده و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد: (Muller, 1969 ; Voral, 2011)

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

در این رابطه I_{geo} : شاخص زمین انباشتگی، C_n : غلظت عنصر مورد مطالعه در نمونه‌ی رسوب و B_n : غلظت زمینه‌ی 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 می‌گردد. (Stoffers *et al.*, 1986 ; Goodarzi *et al.*, 2009)

شاخص غنی شدگی (EF)

برای غلظت‌های بالاتر از حد زمینه یکی از رایج ترین روش‌ها برای ارزیابی اثرات فعالیت‌های بشرزاد بر میزان آلودگی رسوبات، محاسبه‌ی شاخص غنی شدگی می‌باشد. شاخص غنی شدگی بر مبنای غلظت عناصر نمونه برداری شده نسبت به میزان میانگین این عناصر در پوسته‌ی زمین می‌باشد.

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

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

| رده‌ی 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)

| رده‌ی آلودگی | شدت غنی شدگی | غناشی 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 | $EF \geq 40$ |

مقادیر متوسط می باشد. در ایستگاه P3 که در پایین دست روستای گچسر واقع شده و در قسمت های سرشاره های فرعی رودخانه حضور روستا های آزادبر و کنه 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 آهک موجب هم افزایی غلظت سرب تا رقم ۳۰ ppm گردیده است. در ایستگاه P6 به علت نزدیک بودن به روستا های سیرا، ورزنه و باغات مرکز این نواحی و همچنین واقع شدن این نقطه در پایین دست روستای آسرا 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 هجمه‌ی گردشگری مردم منطقه به این ناحیه گردیده است و از طرفی ترافیک و حمل و نقل وسایل نقلیه موجب انتشار

نتایج و بحث

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

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

غلظت سرب در تمامی ایستگاه ها بالاتر از میانگین غلظت سرب در پوسته ای زمین می باشد اما در ایستگاه های P1، P6، P8 و P3 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 بالادرست 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 درنتیجه اثرگذاری آن بر آلودگی رسوب، می باشد. با توجه به مقدار غلظت بسیار بالای کروم در ایستگاه P9 میزان میانگین غلظت کروم برابر $90/66 \text{ ppm}$ 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 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 فراتر 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 ای کرج به طور میانگین برابر با $112/56 \text{ ppm}$ می باشد.

مقدار غلظت کل نیکل با توجه به (شکل ۳) در همه 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 تجمیعی عوامل انسانی در آلودگی رودخانه به نیکل را بیان نمود. نیکل به طور میانگین در رودخانه ای کرج به میزان $29/44 \text{ ppm}$ وجود دارد.

غلظت مس در ایستگاه های P1، P3 و P8 به ترتیب 10.7 ppm ، 113 ppm و 118 ppm می باشد. با توجه به نقشه ای زمین شناسی محدوده ای مطالعاتی رودخانه ای کرج (شکل ۴)، یکی از مهمترین علل زمین زاد افزایش غلظت کل مس در ایستگاه P3 نوع 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 زمین می باشد و تنها در نقاط P5 و P8 غلظت این عنصر برابر با غلظت میانگین آن در پوسته 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 ای 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 انباست 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 زمین می باشد. ایستگاه P9 در پایین دست رستا 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

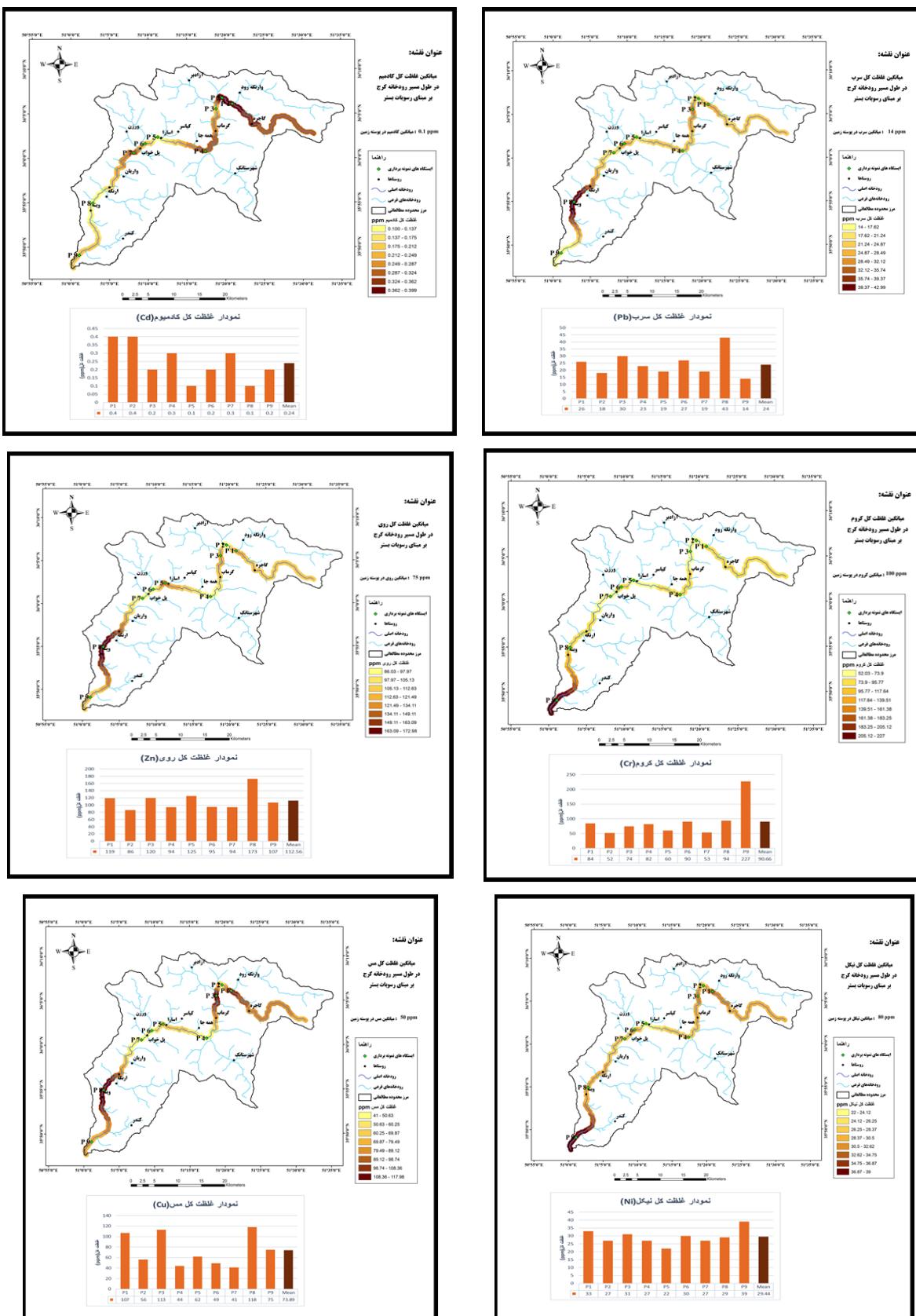
دست روستاهای ارنگه و خوزنکلا و همچنین سرچشمه‌ی هفت چشمه قرار گرفته و عواملی نظیر پساب‌های روستایی و مراکز تفریحی و رستوران‌ها سبب افزایش غلظت آرسنیک به مقدار $19/2 \text{ ppm}$ گردیده است. میانگین غلظت آرسنیک در کل مسیر رودخانه $14/96 \text{ ppm}$ گزارش شده است.

غلظت کل منگنز در ایستگاه‌های P4، P5، P7 و P9 از میانگین منگنز در پوسته‌ی زمین کمتر بوده و غلظت منگنز تنها در ایستگاه P5 از میانگین آن در سنگ شیل نیز کمتر می‌باشد. در ایستگاه‌های P1، P2، P3، P6 و P8 ارقام به دست آمده از سنجش غلظت منگنز بیش از میانگین این عنصر در پوسته‌ی زمین می‌باشد که از علل آن می‌توان به لیتولوژی و نوع بافت رسوبات منطقه در ایستگاه‌های P1 و P2 علاوه بر مداخله گری‌های انسان اشاره کرد. همچنین از عوامل مهم آلاینده در ایستگاه‌های P6 و P8 فعالیت‌های مردم منطقه و سایر گردشگران را می‌توان نام برد. میانگین غلظت کل منگنز در رودخانه‌ی کرج برابر با $10/34 \text{ ppm}$ بوده که این مقدار با توجه میزان غلظت این عنصر در سایر نقاط زمین رقم نسبتاً بالایی می‌باشد.

غلظت آهن در تمامی ایستگاه‌های نمونه برداری به استثناء ایستگاه‌های P8 و P9 از میانگین غلظت این عنصر در پوسته‌ی زمین بیشتر می‌باشد و در ایستگاه P8 با مقدار $49/93 \text{ ppm}$ حتی از میانگین آهن در سنگ شیل نیز بیشتر بوده که دلیل اصلی آلایندگی این دو ایستگاه به آهن، عوامل مصنوعی مانند تغییر کاربری اراضی در حاشیه‌ی رودخانه و ساخت و ساز‌های غیراصولی در آین ناحیه می‌باشد. با توجه به نقشه‌ی زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی رودخانه کرج (شکل ۴ و جدول ۳) میزان زیاد غلظت آهن در ایستگاه P8 ناشی از نوع سنگ بستر توف آتشفانی سبز (*Ek*) در آن منطقه می‌باشد که حاوی آهن سه ظرفیتی و کلر بوده و از جمله کاربردهای این نوع سنگ استفاده در مصالح سدسازی و ساختمان سازی می‌باشد. ایستگاه‌های P8 و P9 که در پایین دست رودخانه قرار دارند سبب افزایش میانگین غلظت آهن در کل مسیر رودخانه گردیده‌اند و مقدار آن را به $35/62 \text{ ppm}$ رسانیده‌اند.

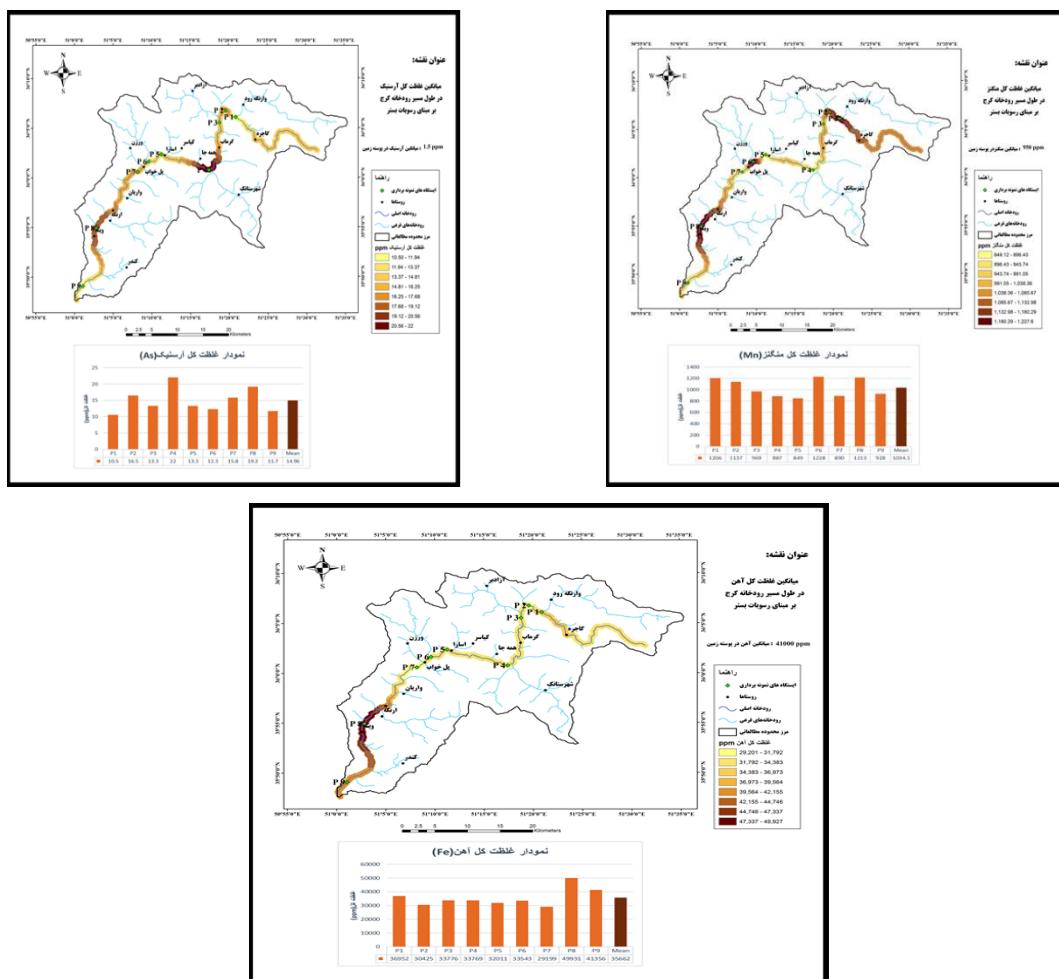
تیره و ماسه سنگ (TRJs) در بستر آن ناحیه بوده که حاوی مواد آلی، کلسیت، سیلیس، اکسید آهن، دولومیت $[CaMg(CO_3)_2]$ و آهک می‌باشد. از طرفی سنگ آهک موجب بازیابی و افزایش غلظت مس می‌گردد. همچنین فرهنگ سازی و آموزش ضعیف در رابطه با حفاظت از محیط زیست به مردم منطقه و گردشگران در حوالی ایستگاه‌های نمونه برداری به ویژه ایستگاه P8 را می‌توان متصور شد. در تمامی ایستگاه‌ها مقدار مس از میانگین غلظت آن در سنگ P7، P5، P3، P2، P1 و P8 این مقدار بیش از میانگین جهانی مس در پوسته‌ی زمین می‌باشد. همچنین به طور متوسط مس در رودخانه‌ی کرج دارای غلظتی برابر با $73/89 \text{ ppm}$ می‌باشد.

با توجه به زمین‌شناسی و کاربری اراضی محدوده‌ی مطالعاتی، غلظت عنصر آرسنیک در تمامی ایستگاه‌های نمونه برداری بالاتر از میانگین پوسته‌ی زمین بوده و غلظت این عنصر در ایستگاه P2 به دلیل نوع بافت خاک منطقه از میانگین آرسنیک در سنگ شیل نیز فرا تر می‌رود. در سایر نقاط نمونه برداری به غیر از ایستگاه‌های P1، P6 و P9 غلظت آرسنیک تحت عوامل طبیعی و همچنین فعالیت‌های انسانی، رقمی بیشتر از میانگین جهانی سنگ شیل می‌باشد. در حوالی ایستگاه‌های P3 و P4 پروژه‌های 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 روستا‌های کیاسر و آسارا قرار دارد افزایش غلظت در این نقطه می‌تواند ناشی از فعالیت‌های روستایی در بالادست، تأثیر راه سازی و همچنین عوامل طبیعی دانست. در ایستگاه P7 غلظت آرسنیک $15/8 \text{ ppm}$ گزارش شده که این نقطه با توجه به این که در ابتدای دریاچه‌ی 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 منطقه‌ای واقع گردیده که در پایین

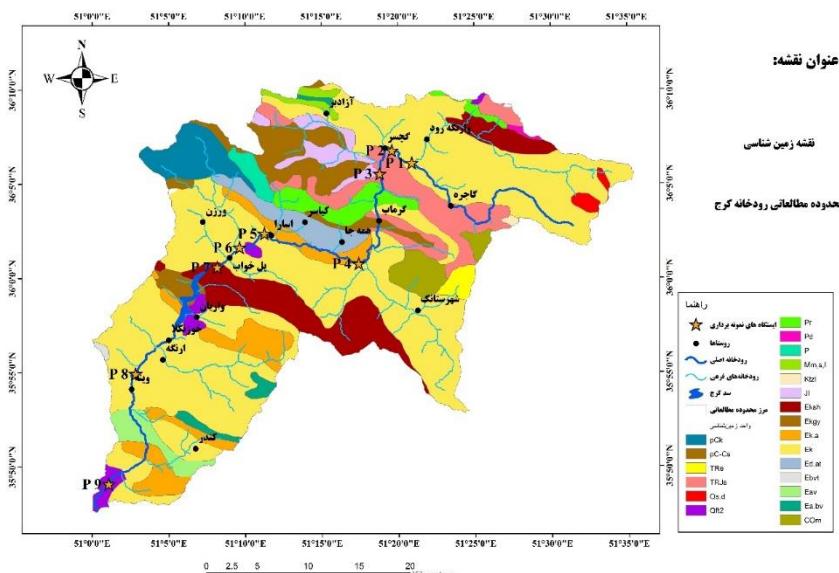


شکل ۳- نقشه های تغییرات غلظت عناصر سنگین در طول مسیر رودخانه

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 ای زمین شناسی رودخانه کرج
Fig. 4- Geological map of Karaj River

جدول ۳- راهنمای نقشه‌ی زمین‌شناسی
Table 3. Geological map guide

| GEO UNIT | DESCRIPTION | AGE | AGE ERA |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------|
| Com | 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 |
| Ekg | 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 |
| Ktzl | 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 | PROTEROZOIC |
| pCk | Dull green grey slaty shales with subordinate intercalation of quartzitic sandstone (KAHAR FM; Morad series and Kalmard Fm) | -Cambrian | -PALEOZOIC |
| 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 deposite 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 تقریبا در یک رنج مشخص به علت حضور روستاها، باغات و به دنبال آن آلوگی های حاصل از آن ها، قرار دارد. در ایستگاه P7 با توجه به حضور آبزیان مختلف در دریاچه‌ی سد امیرکبیر و آلوگی های بیولوژیکی حاصل از آن ها و همچنین نوع سنگ شیل سیاه مایل به سبز (Eksh) در آن ایستگاه، ماده‌ی آلوگی موجود در رسوبات این نقطه افزایش ۱/۵ درصدی نسبت به ایستگاه بالادست خود داشته است. در ایستگاه P8 نیز می‌توان درصد کل ماده‌ی آلوگی به میزان ۷۹٪ را با دلایلی همچون حضور آلوگی، درختزارها و به طور کلی پوشش گیاهی توجیح نمود. اما ایستگاه P9 با رقم ۱۱٪۲۶ بیشترین ماده‌ی آلوگی فرار را در میان کلیه‌ی ایستگاه‌های نمونه برداری دارد که از علل اصلی آن رهاسازی و نشت فاضلاب های شهری به این ناحیه از رودخانه می‌باشد. به طور کلی

میزان ماده‌ی آلوگی در رسوبات نقش تعیین کننده‌ی ای را در مقدار pH محیط دارد. (Langmuir *et al.*, ۲۰۰۵) هر چه محیط پایین تر باشد به این معناست که محیط اسیدی بوده و دارای قابلیت اثرگذاری بر میزان تحرک عنصر سنگین می باشد. (Bradl *et al.*, 2005; Berkowitz *et al.*, 2008) عموما تغییرات مقدار ماده‌ی آلوگی همبستگی بالایی با میزان رس در بافت خاک و رسوب منطقه دارد. با توجه به (جدول ۴) در ایستگاه‌های P1 و P2 درصد ماده‌ی آلوگی نسبتا پایین تر از سایر نقاط بوده و دلیل آن را می‌توان کمبود پوشش گیاهی و فعالیت‌های زیستی آبزیان در نقاط بالادستی رودخانه‌ی کرج تلقی کرد. درصد کل ماده‌ی آلوگی با یک روند منطقی از ایستگاه P7 تا P3 که تماما نقاط بالادستی سد امیرکبیر می باشند، افزایش یافته و در ایستگاه‌های P4، P5 و P6 این

گوناگون به رودخانه از علل اصلی افزایش ماده آلی در رسوبات بستر می باشند. (Nezami and Khodaparast, 1996)

وجود گیاهان آبزی، پرندگان مهاجر و بقایای جانوران آبزی نظیر ماهی ها و بی مهرگان و همچنین ورود فاضلاب های

جدول ۴- درصد کل ماده آلی فرار در رسوبات رودخانه 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 P6، P5، P4، P3، P1، P2، 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 بالادرست ایستگاه P1 و عملیات عمرانی شرکت های راه سازی در پایین دست روستای گچسر و در ناحیه ای ایستگاه های P3 و P4 و همچنین حضور روستا های آسارا، کیاسر، کیاسرات و سپهسالار در بالادرست ایستگاه P5 و ایستگاه P6 که در محدوده ای 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 ای 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 ای آلودگی کم محسوب می گردد که فعالیت های روستای در بالادرست 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 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 ای 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.

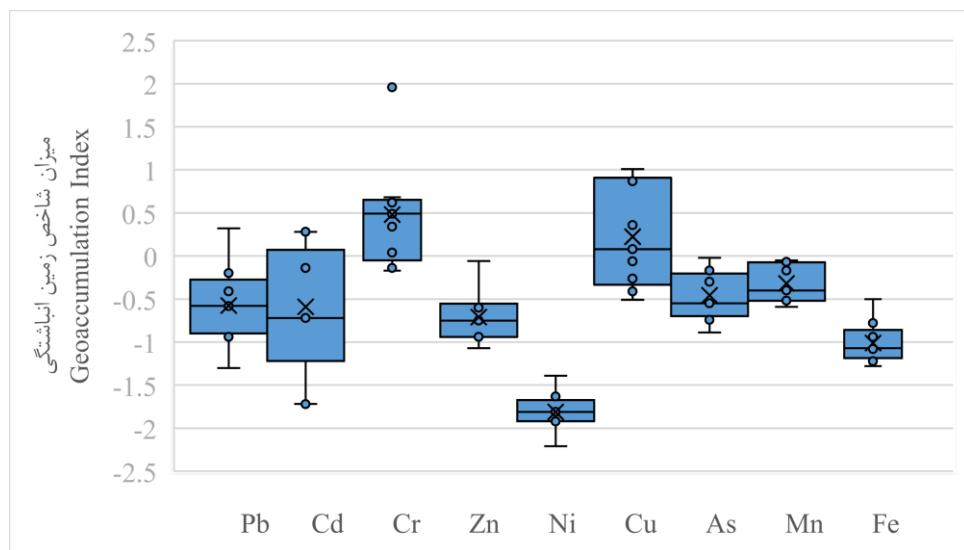
شاخص زمین انباشتگی منگنز در طول رودخانه ای کرج در تمام ایستگاه های نمونه برداری شده عددی منفی گزارش شده که نشانگر آلودگی ناچیز تا کم به عنصر منگنز برای رسوبات بستر رودخانه طبق رده بندی می باشد. میانگین زمین انباشتگی منگنز در رودخانه ای کرج برابر با -۰/۳۲ می باشد که رودخانه از نقطه نظر آلودگی به منگنز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

زمین انباشتگی آهن در ۹ ایستگاه نمونه برداری با اختلاف زیادی کمتر از صفر بوده رودخانه ای کرج از حیث آلودگی به آهن در رده ای 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 ای 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 ای کرج در رده ای آلودگی کم محسوب می گردد. میزان زمین انباشتگی کروم در تمامی ایستگاه های نمونه برداری شده عددی کمتر از صفر بوده که رودخانه ای کرج به لحاظ زمین انباشتگی روی در دسته ای 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 ای 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 ای 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 و 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 روزتا های بالادست ایستگاه P1 و فعالیت های روتاستایی و عمرانی در بالادست ایستگاه P3 و در انتهای تأثیرات تجمعی فعالیت های محلی و روتاستایی 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 آلایندگی مس در این نواحی دانست. به طور میانگین زمین انباشتگی مس در رودخانه ای کرج برابر با



شکل ۵- نمودار جعبه ای شاخص زمین انباستگی عناصر سنگین رسوبات رودخانه 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 ۴ 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 ۴ آلودگی کم قرار می گیرند. در ایستگاه P9 میزان غنی شدگی ۷/۶۲ 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 ای منابع زمین زاد در این نواحی می باشد. میانگین غنی شدگی کروم در طول رودخانه ای کرج برابر با ۱/۱۷ می باشد که می توان این رودخانه را در رده ۴ 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 آلایندگی عناصر سنگین به شکل زیر مشخص و بررسی گردید.

غنی شدگی عنصر سرب در طی رودخانه در ایستگاه های P1، P2، P5 و P9 کم بوده و این عنصر در ایستگاه های 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 ارنگه و خوزنکلا، سرشاخه های هفت چشمه و آتشگاه 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 ۴ 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

این عنصر در تمامی ایستگاه ها به غیر از ایستگاه P4 در طبقه‌ی غنی شدگی قابل توجه قرار می‌گیرد که این مسئله حاکی از تأثیر عوامل انسانی به ویژه در ایستگاه های P2، P7 و P8 می‌باشد. در ایستگاه P2 به دلیل حضور رosta های وارنگه رود، گاجره و ولایت رود در بالادست و همچنین مجتمع‌های تفریحی و ورزشی دیزین در نزدیکی این ناحیه موجبات افزایش غنی شدگی آرسنیک فراهم گردیده است. ایستگاه P7 که در بستر دریاچه‌ی سد قرار دارد، می‌تواند تاریخچه‌ای برای وضعیت غنی شدگی آرسنیک در درازمدت ارائه دهد. در ایستگاه P8 نیز به علت فعالیت‌های انسانی نظیر رosta های اطراف و مشکلات پساب و فاضلاب آن‌ها و گردشگری غیراصولی ناشی از فقدان آموزش در خصوص محیط زیست، غنی شدگی آرسنیک به مقدار چشمگیری افزایش یافته است. در بین تمامی ایستگاه‌ها، ایستگاه P4 دارای غنی شدگی شدید می‌باشد که علت این امر پروژه‌های عمرانی، راه سازی و بهره برداری از منابع طبیعی می‌باشد. میانگین غنی شدگی آرسنیک در رسوبات رودخانه‌ی کرج با رقم ۱۳/۱۲ در رده‌ی غنی شدگی قابل توجه قرار دارد.

در تمامی ایستگاه‌ها میزان غنی شدگی منگنز کمتر از ۲ می‌باشد و در طبقه‌ی بندی استاندارد، منگنز دارای غنی شدگی کم در رودخانه‌ی کرج می‌باشد. اما از طرفی می‌توان با توجه به غنی شدگی ایستگاه‌های P1، P2، P6، P7 و P8 به این نتیجه دست یافت که در این نقاط غالباً عوامل بشرزاد موجب انتشار آلودگی منگنز در محیط‌های آبی گردیده است. همانطور که قبل اشاره شد ایستگاه‌های P1 و P2 تحت تأثیر رosta ها و مراکز تفریحی-گردشگری در بالادست خود دچار آلودگی به عنصر منگنز می‌باشند. همچنین در ایستگاه‌های P6 و P8 با توجه به سوء مدیریت در دفع پسماند‌ها و فاضلاب‌های رosta‌ای و عدم آموزش و شناخت مردم منطقه نسبت به آلودگی عناصر سنگین و اثرات آن بر محیط زیست آلایندگی به این عنصر نسبتاً بالا می‌باشد.

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

بوده اما اعداد به دست آمده در این سه نقطه بیش از ۱/۵ بوده گه نمایانگر حضور منابع مصنوعی آلودگی در این ایستگاه‌ها می‌باشد. در ایستگاه‌های P1، P2، P3، P4، P5 و P6 میزان غنی شدگی روی بیش از عدد ۲ بوده که میزان غنی شدگی عنصر روی در این ایستگاه‌ها در رده‌ی متوسط بوده و در نتیجه این نقاط نیز از نظر آلودگی رسوبات بستر رودخانه به واسطه‌ی فعالیت‌های بشر تحت شعاع قرار گرفته‌اند. همچنین میانگین غنی شدگی از تمامی نقاط نمونه برداری ۲/۱۹ می‌باشد رودخانه‌ی کرج را به لحاظ غنی شدگی روی در دسته‌ی غنی شدگی متوسط قرار می‌دهد.

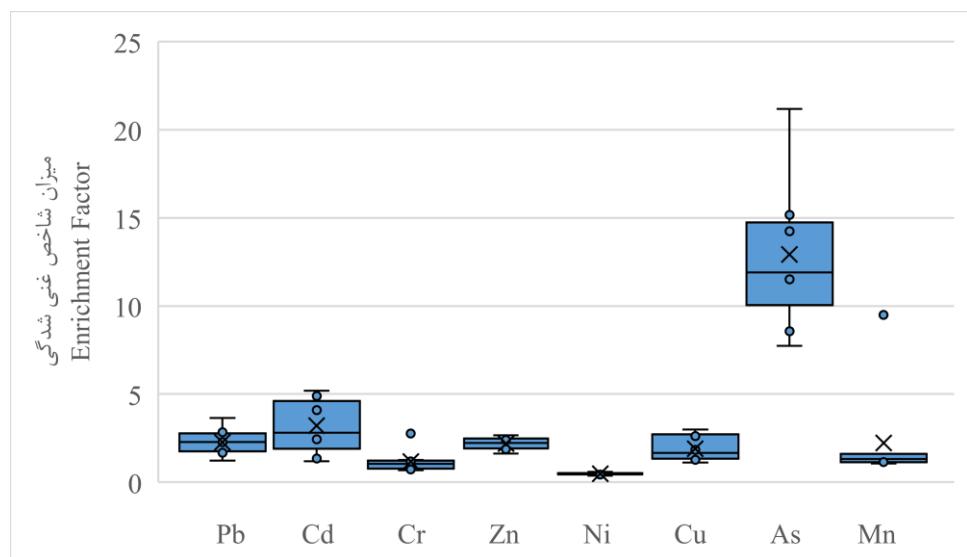
میزان غنی شدگی عنصر نیکل در هر ۹ ایستگاه کمتر از عدد ۲ می‌باشد که تمامی ایستگاه‌ها در رده‌ی غنی شدگی کم جای می‌گیرند. متوسط غنی شدگی نیکل در رودخانه‌ی کرج برابر با ۰/۴۸ می‌باشد که عددی بسیار کوچک در طبقه‌ی بندی غنی شدگی عناصر می‌باشد و در نتیجه این مسئله نشانگر عوامل طبیعی و زمین زاد در آلودگی رسوبات رودخانه به نیکل می‌باشد.

میزان غنی شدگی مس در ایستگاه‌های P2، P4، P5، P6، P7 و P9 اعدادی کمتر از ۲ را نشان می‌دهد که این نقاط دارای غنی شدگی کم برای عنصر مس می‌باشند. 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 می‌باشد، می‌توان عوامل انسانی آلاینده را به عنوان منبع اصلی آلودگی در این نقاط لحاظ کرد. اما مس در ایستگاه‌های P1، P3 و P8 به ترتیب دارای غنی شدگی به مقدار ۲/۶۲، ۲/۹۸ و ۲/۸ می‌باشد که این سه ایستگاه دارای غنی شدگی متوسط برای این عنصر می‌باشند. افزایش اینچنینی غنی شدگی در این سه ایستگاه می‌تواند ناشی از منابع بشرزاد در بالادست این نقطه باشد. میانگین غنی شدگی مس در رودخانه‌ی کرج برابر با ۱/۹ بوده که این عدد در محدوده‌ی غنی شدگی کم می‌باشد.

میزان غنی شدگی آرسنیک مشخص می‌باشد، غنی شدگی

رودخانه در طبقه‌ی غنی شدگی متوسط قرار دارد. در این میان آرسنیک از غنی شدگی قابل توجهی برخوردار است که نمایانگر نقش عمدۀ فعالیت‌های انسانی در تولید و انتشار این عنصر می‌باشد.

کادمیوم و آرسنیک دارای غنی شدگی کمی می‌باشند. سرب، مس و روی تقریباً در نیمی از ایستگاه‌های نمونه برداری دارای غنی شدگی متوسط بوده و گستره‌ی غنی شدگی کادمیوم نیز در اغلب نمونه‌های برداشت شده از



شکل ۶- نمودار جعبه‌ای شاخص غنی شدگی عناصر سنگین رسوبات رودخانه‌ی کرج بر مبنای آلومینیوم

Fig. 6- Boxplot diagram of heavy metals' Enrichment Factor in Karaj River sediments based on AI

میزان آلایندگی کمی را از جانب این فلز برای رسوبات رودخانه‌ی کرج تلقی کرد اما به علت غنی شدگی متوسط این عنصر، بخشی از انتشار آن مربوط به فعالیت‌های بشرزاد می‌باشد.

غلظت میانگین فلز کروم برابر با ۹۰/۶۶ ppm که رقمی کمتر از میانگین غلظت این عنصر در پوسته‌ی زمین می‌باشد. غلظت کروم در میان نمونه‌های برداشت شده از رودخانه میان ۵۲ ppm تا ۲۲۷ ppm متغیر است. این عنصر با زمین انباشتگی 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 نمونه‌های برداشت شده از رسوبات رودخانه‌ی کرج غلظت فلز روی با میانگین ۱۱۲/۵۶ ppm از میانگین غلظت این عنصر در پوسته (۷۵ ppm) بیشتر بوده و غلظت آن از روی آلودگی ناچیز تا کم را در رسوبات بستر رودخانه متغیر است. روی آلودگی ناچیز تا کم را در رسوبات به لحاظ زمین انباشتگی (به مقدار میانگین ۰/۷۱) ایجاد کرده و با رقم

بر اساس یافته‌ها و داده‌های به دست آمده میانگین غلظت سرب در رودخانه‌ی کرج به طور کلی برابر با ۲۶ ppm بوده که در حدود دو برابر میانگین غلظت آن در پوسته‌ی زمین می‌باشد. غلظت این عنصر در طول رودخانه‌ی کرج از ۱۴ ppm تا ۴۳ ppm متغیر بوده است. شاخص زمین انباشتگی سرب به طور میانگین برابر با ۰/۰۵۸ می‌باشد که آلایندگی ناچیز تا کم را برای رسوبات رودخانه به همراه دارد. همچنین شاخص غنی شدگی سرب در رودخانه‌ی کرج به طور متوسط با غنی شدگی کم به مقدار ۱/۹۹ به دست آمد.

عنصر کادمیوم دارای غلظت متوسط ۰/۲۴ ppm در رسوبات رودخانه‌ی کرج می‌باشد که این رقم بین ۰/۰۱ ppm تا ۰/۰۴ ppm متغیر است. غلظت میانگین کادمیوم در رسوبات رودخانه بیش از دو برابر غلظت میانگین آن در پوسته‌ی زمین (۰/۰۱ ppm) می‌باشد. کادمیوم از نظر زمین انباشتگی (۰/۰۵۹) دارای آلودگی ناچیز تا کم برای رودخانه بوده و همچنین دارای غنی شدگی متوسط به مقدار ۲/۹۶ برای رسوبات می‌باشد. در مورد این عنصر در مجموع می‌توان

شدگی کم قرار دارد. در نتیجه می توان آلودگی عنصر منگنز را در رسوبات رودخانه‌ی کرج به مقدار بسیار کمی تلقی کرد که عمدتاً تحت تأثیر عوامل طبیعی قرار دارد. غلظت میانگین آهن در رسوبات رودخانه‌ی کرج ۳۵۶۶۲ ppm می باشد که از میانگین غلظت آن در پوسته زمین ppm (۴۱۰۰) کمتر بوده و این میانگین به دست آمده از کلیه ایستگاه های نمونه برداری بین ۲۹۱۹۹ ppm تا ۴۹۹۳۱ ppm 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 مینا 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 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 رودخانه‌ی 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.

نتیجه‌گیری

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

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

میانگین غلظت مس در رودخانه‌ی کرج با رقم ۷۳/۸۹ ppm از متوسط غلظت آن در پوسته زمین بیشتر بوده و غلظت این عنصر در محدوده ۴۱ ppm تا ۱۱۸ ppm 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 رودخانه‌ی کرج برابر با ۱۴/۹۶ ppm به دست آمده که این رقم حد میانگین تغییرات آرسنیک از ۱۰/۵ ppm تا ۲۲ ppm می باشد و در کل اعدادی بسیار بالاتر از میانگین این عنصر در پوسته 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 فعالیت‌های انسانی در محیط زیست و رسوبات رودخانه می باشد.

میانگین غلظت منگنز برابر با ۱۰۳۴/۱ ppm می باشد که از غلظت میانگین آن در پوسته زمین بیشتر بوده و غلظت این عنصر در بازه ۸۴۹ ppm تا ۱۲۲۸ ppm 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 دسته‌ی 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 اکو سیستم 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 اکو سیستم های آبی از آلودگی به عناصر سنگین می باشد.

سپاسگزاری

نویسندها 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 تنهشینی و انباست 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 باشدند که موجب ورود مقدار قابل توجهی از عناصر سنگین به این اکو سیستم آبی گردیده است. در راستای جلوگیری و کنترل آلودگی رودخانه ای کرج به عناصر سمی خطرناک، در این پژوهش به اندازه گیری غلطت عناصر سنگین موجود در رسوبات بستر رودخانه و تجزیه و تحلیل آن با استفاده از شاخص های کیفی رسوب (شاخص زمین انباست (*Igeo*)، شاخص غنی شدگی (EF)) پرداخته شد و از این ارزیابی استنباط گردید که رسوبات بستر رودخانه ای کرج آلودگی کمی را دارا بوده که بخشی از این میزان کم آلودگی بر اثر فعالیت های مغرب بشر در منطقه ای 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 phytogeochanical study of the Trás-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-Kwaterczak, U., 2005. Distribution of trace metals in the Odra River system: water-suspended matter-sediments. *Limnologica*. 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.

