



# Geochemical data analysis and evaluation of ecological risk index of potentially toxic elements in surface sediments of Karun River, Vays to Ahvaz

Saeed Choopani<sup>1</sup>, Payman Rezaee<sup>2\*</sup> and Mohammadreza Gharibreza<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD Student, Department of Geology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor Department of Geology, University of Hormozgan

<sup>3</sup> Assoc. Professor, Research Department of River and Coastal Engineering, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran

Received: 20 July 2021

Accepted: 16 January 2022

## Extended abstract

### Introduction

Rivers are highly variable systems and one of the most important water ecosystems that play an important role in the life of humans and other living beings and are easily affected by pollution. (Maanan et al., 2015). The concentration of heavy metals in sediments is generally several times that of water bodies, and heavy metals are not destroyed and decomposed during natural processes, therefore, heavy metals can be stored in sediments and remain there for a long time. For this reason, surface sediments are one of the main reservoirs of heavy metals and other pollutants (Islam et al., 2016). The Karoun River is not immune from these pollutions and many wastes from metal, petrochemical and oil, cellulose and food industries, domestic and hospital sewage and agriculture are discharged into this water environment. On the other hand, this river supplies water for these industries and is a source of drinking water for cities such as Ahvaz, Khorramshahr and Abadan. The fishes of this great river are one of the main sources of nutrition for the people of the region, as a result of the presence of pollutants, especially potentially fertilizing elements in Karoun, it can cause pollution of sediment, water and food and affect the life cycle of this great river. damage (Rastmanesh et al. 2015). Considering the quantitative extent and diversity of human activities in the Khuzestan plain and the entry of all kinds of effluents and sewage into the Karoun River, investigating the pollution, pollutants and risk levels is an inevitable necessity. Therefore, this research aims to determine the level of enrichment of elements, to determine the ecological risk and dangerousness of pollution in comparison with the quality standards of sediments in the Karoun river in the Weis basin to the beginning of Ahvaz city using geochemical data and statistical analysis. It was done by XLSTAT2018 software.

### Materials and methods

In order to evaluate the pollution of the sediments of the Karoun River bed, 22 samples were taken with a boat from a depth of 0-10 cm and based on common methods in sedimentary geology Tucker (1988) and Arzani (1997) of sediments was harvested. Then, the samples were prepared in the water and soil laboratory of the Soil Conservation and Watershed Research Institute for the granulation test and determination of the concentration of toxic metal elements. In order to investigate the state of sediment pollution, the obtained concentrations have been compared with the standard values of ISQGs, severe effect level (SEL), probable effect level (PEL) and global base values.

### Results and discussion

According to the results obtained from the grading, the sediments of the river bed in most of the stations have a granular texture and are of the type of mud, silty sand and sandy mud. These sediments have an average of 0.62% organic matter in terms of organic matter. The results of the pollution level also showed that the concentration of toxic elements As, Cr and Ni have values beyond the standard values of ISQGs and PEL. Based on the comparison between sediment quality criteria and standards, Karun River in the studied area has clean sediments from the point of view of Cd and Pb elements. The results of calculation

\* Corresponding author: p.rezaee@hormozgan.ac.ir

of enrichment factor showed that Zn element has moderate to significant enrichment. The enrichment of Cu, Ni and Cr was in the range of moderate pollution. The semi-metal As is in the range of low to medium enrichment and the two elements Cd and Pb have low enrichment. The average enrichment of elements is  $Zn > Ni > Cu > Cr > As > Pb > Cd$ . Finally, the results obtained from the risk index showed that the values of the risk index for all samples are in the low risk range ( $RI < 150$ ). The statistical analysis of the samples showed that there is a significant positive relationship between Cr, Ni, Cu and AS with clay. So clay particles are the main carriers of Cr, Ni, Cu and AS elements. A high correlation coefficient between elements indicates a common source, mutual dependence, and the same behavior during transportation.

### Conclusion

The current research leads to sufficient understanding of the geochemical situation and any change from natural conditions and revealing the local and thematic enrichment of pollution levels for aquatic animals and users, especially in the field of agriculture and food cycle in the Karun River in the Vays basin to the city of Ahvaz. The results of the enrichment factor showed low to high pollution for selected elements. The potential ecological risk values of all selected elements except As in sample 21 are in the low risk range, and AS in sample number 21 is in the medium risk range. The risk index values for all samples are in the low risk range. Based on the comparison of sediment quality criteria with the standards, Karoun River has clean sediments from the point of view of Cd and Pb elements in the studied period. So that 100 percent of the samples have a concentration lower than ISQG. Cr with 27% and Ni with 100% has a concentration beyond the PEL pollution level and all the values obtained for Cr and Ni elements have a concentration beyond the minimum concentration of the ISQG pollution level. In this way, there is a possibility of poisoning for aquatic animals and water exploitation by the toxic elements Ni and Cr. Comparing the concentration of elements with the standards showed that in stations number seven (subordinate to Mahi Shiban), 21 (east coast of KianPars) and 10 (Kouresh sewage), Cr and Ni elements have concentrations beyond the PEL pollution level and more As. It is from the minimum level of ISQG and the most polluted stations are in the study period. So, the maximum enrichment of Cr and As has also happened in station number seven. Element clustering analysis showed that organic materials are the main carriers of Cu and Zn elements and clay particles are the main carriers of Ni and Cr elements. Also, in the case of Cu and As elements, clay particles play the main role. But the toxic metal Pb has not shown any significant relationship with other elements as well as organic materials and clay particles. So Pb element has a different origin than Cu, Zn, Cr, Ni and As elements. The results of principal component analysis, while confirming the correlation coefficient and cluster analysis, showed that Cu, Zn, Cr, Ni, and As are of anthropogenic origin, and Pb and Cd are of terrestrial origin. This study has an important contribution in determining the origin, pollution and ecological risk of potential fertilizing elements and can help in identifying pollutant sources and pollutant control.

**Keywords:** Clustering analysis, Enrichment factor, Principal component analysis, Sediment quality, Toxic elements

Cite this article: Choopani, S., Rezaee, P., Gharibreza, M., 2023. Geochemical data analysis and evaluation of ecological risk index of potentially toxic elements in surface sediments of Karun River, Vays to Ahvaz. *Watershed Engineering and Management* 15 (2), 201–223.

© 2023, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی و ارزیابی خطر اکولوژیکی عناصر بالقوه سمناک در رسوبات سطحی رودخانه کارون، بازه ویس تا اهواز

سعید چوپانی<sup>۱</sup>، پیمان رضائی<sup>۲\*</sup> و محمدرضا غریب رضا<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری رسوب شناسی و سنگ شناسی رسوبی، دانشکده علوم، دانشگاه هرمزگان

<sup>۲</sup> دانشیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه هرمزگان

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه تحقیقات مهندسی رودخانه و سواحل، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶

### چکیده مبسوط

#### مقدمه

رودخانه‌ها، سامانه‌های بسیار تغییرپذیر و یکی از مهمترین اکوسیستم‌های آبی هستند که نقش مهمی در زندگی بشر و سایر موجودات زنده دارند و به سادگی تحت تاثیر آلودگی قرار می‌گیرند. به طور کلی، غلظت فلزات سنگین در رسوبات چندین برابر بدنه‌های آبی است و فلزات سنگین در طی فرایندهای طبیعی، تخریب و تجزیه نمی‌شوند. بنابراین، فلزات سنگین می‌توانند در رسوبات ذخیره شده و به مدت طولانی در آن باقی بمانند. به همین دلیل، رسوبات سطحی یکی از مخازن اصلی فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها محسوب می‌شوند. رودخانه کارون نیز از این آلودگی‌ها مصون نمانده است و پساب‌های بسیاری از صنایع فلزی، پتروشیمی و نفت، سلولزی و غذایی، فاضلاب‌های خانگی، بیمارستانی و کشاورزی به این محیط آبی تخلیه می‌شود. از سویی، این رودخانه تامین کننده آب برای این صنایع و منبع آب آشامیدنی برای شهرستان‌هایی مانند اهواز، خرمشهر و آبادان است. ماهی‌های این رودخانه بزرگ، یکی از منابع اصلی تغذیه مردم منطقه هستند که در نتیجه حضور آلاینده‌ها به خصوص عناصر بالقوه سمناک در کارون، می‌تواند باعث آلودگی رسوب، آب و مواد غذایی شوند و چرخه حیات این رودخانه بزرگ را مورد آسیب قرار دهند. با توجه به گستردگی کمی و تنوع فعالیت‌های انسانی در دشت خوزستان و ورود انواع پساب‌ها و فاضلاب‌ها به رودخانه کارون، بررسی آلودگی‌ها، آلاینده‌ها و سطوح مخاطرات ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. لذا، این پژوهش با هدف تعیین میزان غنی‌شدگی عناصر، تعیین خطر اکولوژیکی و مخاطره آمیز بودن آلودگی‌ها در مقایسه با استانداردهای کیفیت رسوبات در رودخانه کارون در بازه ویس تا ابتدای شهر اهواز با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی و تحلیل‌های آماری انجام شده است.

### مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی آلودگی رسوبات بستر رودخانه کارون، تعداد ۲۲ نمونه با یک دستگاه شناور (قایق) از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری و بر مبنای روش‌های رایج در زمین‌شناسی رسوبی از رسوبات ریزدانه برداشت شد. سپس نمونه‌ها در آزمایشگاه آب و خاک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، برای آزمون دانه‌بندی و تعیین غلظت عناصر فلزی سمی آماده‌سازی شدند. در نهایت، به منظور بررسی وضعیت آلودگی رسوبات، غلظت‌های به‌دست آمده با مقادیر استاندارد شاخص کیفیت رسوب (ISQGs)، سطح اثر شدید (SEL)، سطح اثرات احتمالی (PEL) و مقادیر پایه جهانی مقایسه شد.

## نتایج و بحث

بر اساس نتایج به‌دست آمده از دانه‌بندی، رسوبات بستر رودخانه در بیشتر ایستگاه‌ها دارای بافت دانه ریز و از نوع گل، ماسه گلی و گل ماسه‌ای و به‌طور میانگین، دارای ۰/۶۲ درصد ماده آلی هستند. نتایج سطح آلودگی نیز نشان داد که غلظت عناصر سمی آرسنیک (As)، نیکل (Ni) و کروم (Cr)، دارای مقادیری فراتر از مقادیر استاندارد ISQGs و PEL هستند. بر اساس مقایسه بین معیارهای کیفیت رسوب با استانداردها، رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه دارای رسوباتی پاک از منظر عناصر Cd و Pb است. نتایج محاسبه عامل غنی‌شدگی نشان داد که عنصر Zn، غنی‌شدگی متوسط تا قابل توجه دارد. غنی‌شدگی Cu، Ni و Cr در محدوده آلودگی متوسط قرار داشت. شبه فلز As، در محدوده غنی‌شدگی کم تا متوسط و دو عنصر Cd و Pb، دارای غنی‌شدگی کم هستند. میانگین غنی‌شدگی عناصر به‌ترتیب  $Zn > Ni > Cu > Cr > As > Pb > Cd$  است. بر اساس طبقه‌بندی ژانگ و لیو، Cr، Ni، Zn، Cu و As، دارای منشأ انسان‌زاد و Pb و Cd منشأ زمین‌زاد دارند. در انتها، نتایج به‌دست آمده از شاخص خطر نشان داد که مقادیر شاخص خطر برای همه نمونه‌ها در محدوده خطر کم ( $RI < 150$ ) قرار دارد. بررسی و تحلیل آماری بر روی نمونه‌ها نشان داد که ارتباط معنی‌دار مثبتی میان Cr، Ni، Cu و As با رس وجود دارد. پس ذرات رس حامل اصلی عناصر Cr، Ni، Cu و As هستند. ضریب همبستگی بالا بین عناصر نشان از منبع مشترک، وابستگی متقابل و رفتار یکسان در طول حمل و نقل دارد.

## نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر منجر به شناخت کافی از وضعیت ژئوشیمیایی و هرگونه تغییر از شرایط طبیعی و آشکارسازی غنی‌شدگی موضعی و موضوعی سطح آلودگی‌ها برای آبریزان و بهره‌برداران به‌ویژه حوزه کشاورزی و چرخه غذایی در رودخانه کارون در بازه ویس تا شهر اهواز شده است. نتایج عامل غنی‌شدگی، آلودگی کم تا زیاد را برای عناصر انتخابی نشان دادند. مقادیر خطر بالقوه اکولوژیکی کلیه عناصر انتخابی به‌جز As در نمونه ۲۱، در محدوده خطر کم قرار دارند و AS در نمونه شماره ۲۱ (ساحل شرقی کیان پارس) در محدوده خطر متوسط قرار دارد. مقادیر شاخص خطر برای همه نمونه‌ها در محدوده خطر کم قرار دارد. بر اساس مقایسه معیارهای کیفیت رسوب با استانداردها، رودخانه کارون دارای رسوباتی پاک از منظر عناصر Cd و Pb در بازه مورد مطالعه است. به‌طوری که ۱۰۰ درصد نمونه‌ها غلظتی کمتر از ISQG دارند. میانگین غلظت شبه فلز سمی As، زیر کمینه سطح آلودگی ISQG است. Cr با ۲۷ درصد و Ni با ۱۰۰ درصد، دارای غلظتی فراتر از سطح آلودگی PEL و کلیه مقادیر به‌دست آمده برای عناصر Cr و Ni دارای غلظتی فراتر از غلظت کمینه سطح آلودگی ISQG است. بدین ترتیب، احتمال بروز مسمومیت برای آبریزان و بهره‌برداری آب به‌وسیله عناصر سمی Ni و Cr وجود دارد. مقایسه غلظت عناصر با استانداردها نشان داد که در ایستگاه‌های شماره هفت (زیردست پرورش ماهی شبیان)، ۲۱ (ساحل شرقی کیان پارس) و ۱۰ (فاضلاب کورش)، عناصر Cr و Ni دارای غلظتی فراتر از سطح آلودگی PEL داشته و As بیشتر از حداقل سطح ISQG بوده است و آلوده‌ترین ایستگاه‌ها در بازه مورد مطالعه هستند. به‌طوری که در ایستگاه شماره هفت، حداکثر غنی‌شدگی Cr و As هم اتفاق افتاده است. تحلیل خوشه‌بندی عناصر نشان داد که مواد آلی حامل اصلی عنصر Cu و Zn و ذرات رس، حامل اصلی عناصر Ni و Cr هستند. همچنین، در مورد عناصر Cu و As نیز ذرات رس نقش اصلی را ایفا می‌کنند. اما فلز سمی Pb، هیچ‌گونه رابطه معنی‌داری با عناصر دیگر و همچنین مواد آلی و ذرات رس نشان نداده است. در نتیجه عنصر Pb دارای منشأ متفاوتی نسبت به عناصر Cu، Zn، Ni، Cr و As است. نتایج تحلیل مولفه اصلی، ضمن تایید ضریب همبستگی و تحلیل خوشه‌ای، در تایید عامل غنی‌شدگی نشان داد که Cu، Zn، Cr، Ni و As منشأ انسان‌زاد دارند و عناصر Pb و Cd دارای منشأ زمین‌زاد هستند. این مطالعه سهم مهمی در تعیین منشأ آلودگی و خطر اکولوژیکی عناصر بالقوه سمناک دارد و می‌تواند در شناخت منابع آلاینده و کنترل آلاینده‌ها کمک کند.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل مولفه اصلی، خوشه‌بندی، غنی‌شدگی، فلزات سمی، کیفیت رسوب

## مقدمه

کنندگی، به‌عنوان گردآورنده<sup>۱</sup> عناصر بالقوه سمی عمل می‌کنند. بنابراین، نقش مثبتی در کنترل آلودگی سامانه‌های آبی ایفا می‌کنند، اما هم‌زمان به‌عنوان منبع<sup>۲</sup> آلودگی آب نیز عمل کرده، با تغییر شرایط محیطی مثل pH، کاهش پتانسیل اکسایش و قدرت یونی، عناصر را مجدد وارد ستون آب می‌کنند. نگهداشت عناصر سمی به‌وسیله رسوبات، به عوامل متعدد مانند ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محیط و خصوصیات زمین‌شناسی عنصر مورد نظر بستگی دارد (Forghani et al., 2009). فلزات پس از ورود به محیط آبی، از طریق فرایندهای فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی در رسوبات نهشته می‌شوند (Unlu et al., 2008)، به‌طوری که بیش از ۹۰ درصد این عناصر در پیکره‌های آبی در ترکیب با ذرات معلق و رسوبات باقی می‌مانند (Ali-Beigi et al., 2017).

غلظت فلزات سمی در رسوبات تا حد زیادی به‌وسیله اندازه ذرات تشکیل‌دهنده رسوبات کنترل می‌شود. در مجموع، بسیاری از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی رسوبات در درجه اول تحت تاثیر ذرات دانه‌ریز و مواد آلی و تا حدودی به‌وسیله ذرات دانه درشت‌تر، نظیر ماسه و سیلت کنترل می‌شود (Rubio et al., 2001). بنابراین، داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات سطحی رودخانه‌ها، آرشو اطلاعاتی مهمی برای مطالعه آن‌ها از دید رسوبی و محیط زیستی است (Rollinson, 1993).

Babapour Mofrad et and Pandey et al., (2017) al., (2013) دلایل اصلی آلودگی رسوبات به فلزات سنگین را شامل انتقال آب از سرشاخه‌های رودخانه، برگشت زهاب‌های کشاورزی، صنعتی و مصارف شهری دانسته و تخلیه‌های ناگهانی در طول سال از سوی صنایع بالادستی و افزایش میزان استفاده از کودهای شیمیایی و مزارع پرورش ماهی غیرمجاز را از عوامل آلودگی مقطعی می‌دانند. به‌عبارتی دیگر، رسوبات به وسیله بسیاری از مواد سمی و خطرناک از جمله عناصر سنگین از طریق مسیرهایی مانند تخلیه پساب‌های مایع، رواناب‌های زمینی، نشت حاصل از منابع صنعتی و کشاورزی و نزولات جوی آلوده می‌شوند که از منابع

رودخانه‌ها سامانه‌های بسیار تغییرپذیر و یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های آبی هستند که نقش مهمی در زندگی بشر و سایر موجودات زنده دارند و به سادگی تحت تاثیر آلودگی قرار می‌گیرند. به‌طوری‌که کیفیت این اکوسیستم‌ها به‌عنوان یکی از عوامل اساسی برای کنترل وضعیت سلامت و بیماری‌های انسانی و حیوانی در نظر گرفته می‌شود (Maanan et al., 2015). اما، امروزه بشر با فعالیت‌های صنعتی و غیرصنعتی تا حدود زیادی در این بخش از طبیعت دخالت کرده و مشکلات بسیاری را برای محیط زیست اطراف خود به‌ویژه اکوسیستم‌های آبی به‌وجود آورده است. ورود انواع آلاینده‌های آلی و معدنی ناشی از فعالیت‌های مختلف شهری، صنعتی و کشاورزی از مهم‌ترین این نوع معضلات محیط زیستی به‌شمار می‌آیند (Mashal et al., 2015).

لذا، روند جهانی افزایش آلودگی ناشی از عوامل تنش‌زای طبیعی و انسانی، در این سامانه‌ها، ضرورت به‌کارگیری راهبردهای کنترل و پایش آلاینده‌ها در محیط‌های آبی را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد (Gamain et al., 2016). در این میان، رسوبات بستر، منبع بالقوه آلودگی، به‌عنوان معرف و شناساگر مهمی برای آلودگی محیط‌های آبی مطرح هستند که با مطالعه آن‌ها می‌توان به راحتی مقدار و نوع آلودگی را مشخص کرد (Mohammadzadeh et al., 2018). غلظت فلزات سنگین در رسوبات، به‌طور کلی چندین برابر بدنه‌های آبی است و فلزات سنگین در طی فرایندهای طبیعی، تخریب و تجزیه نمی‌شوند. بنابراین، فلزات سنگین می‌توانند در رسوبات ذخیره شده و به مدت طولانی در آن باقی بمانند. به همین دلیل، رسوبات سطحی یکی از مخازن اصلی فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها محسوب می‌شوند (Islam et al., 2016).

رسوبات رودخانه‌ای نیز به‌عنوان شاخصی مناسب برای بررسی آلودگی اکوسیستم رودخانه‌ها به‌کار گرفته می‌شوند (Varol, 2011)، چرا که رسوبات دائماً آلاینده‌ها را جذب کرده و در نتیجه به مراتب آلودگی بیشتری نسبت به ستون آب دارند (Rastmanesh et al., 2018). رسوبات، به‌علت دارا بودن ماهیت جذب

<sup>1</sup> Sink

<sup>2</sup> Source

آماري به‌وسیله نرم‌افزار XLSTAT2018 انجام شده است.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** محدوده مورد بررسی این پژوهش، مسیر رودخانه کارون از نیروگاه رامین در شمال شهر ویس تا ابتدای شهر اهواز (کیان آباد) به طول تقریباً ۴۰ کیلومتر است که بیش از نیمی از آن دارای وضعیت مئاندري شدید است (شکل ۱). رودخانه کارون، بزرگترین و پرآب‌ترین رودخانه ایران است که به شمال غرب خلیج فارس می‌ریزد.

در طول این رودخانه، به‌خصوص در دشت خوزستان، تخلیه فاضلاب‌های خانگی شهری و روستایی، پساب‌های صنعتی، جریانات برگشتی کشاورزی و برداشت بی‌رویه آب از رودخانه، رو به گسترش است. از کانون‌های مهم آلودگی در طول این مسیر می‌توان به فاضلاب حوضچه‌های پرورش ماهی شیپان و ویس، فاضلاب فاز ۳ کورش، پساب ناشی از صنایع نیشکر، شهرک صنعتی اهواز و تصفیه‌خانه غرب اهواز اشاره کرد (شکل ۱). یکی از دلایلی که سبب توجه به آلودگی رودخانه کارون شده است، همین تخلیه انواع فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی به آن است (Rastmanesh et al., 2015).

**بررسی‌های میدانی:** پیمایش‌های میدانی در دو بخش پایش کانون‌های آلودگی و طرح نمونه‌برداری تنظیم شد. نمونه‌برداری، به‌عنوان مرحله اصلی عملیات میدانی با راهبرد قطعی<sup>۱</sup> و پس از شناسایی کانون‌های آلودگی، شرایط مورفولوژی رودخانه، جزایر و پشته‌های میان کانالی، جریان رودخانه و حوضچه‌های آرامش قبل، و بعد از کانون‌های آلاینده به انجام رسید. در روش راهبرد قطعی (Radtko, 2005)، منطقه مورد مطالعه به بازه‌های کوچکتری بر اساس شناخت به‌دست آمده از کانون‌های آلاینده، تقسیم و محل برداشت بر مبنای قضاوت کارشناسی انتخاب شد و هیچ نمونه‌ای مطابق شبکه یا اتفاقی برداشته نشد. بدین ترتیب، تعداد ۲۲ نمونه با یک دستگاه شناور (قایق) از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری و بر مبنای

طبیعی یا انسان‌ساخت سرچشمه می‌گیرند (Karageorgis et al., 2002; Mucha et al., 2003). بنابراین، بسیاری از پژوهشگران بر این باورند که رسوبات، شاخص مهمی برای بررسی آلودگی آب‌های سطحی هستند. از این‌رو، تجزیه و تحلیل رسوبات می‌تواند اطلاعات مهمی برای ارزیابی فعالیت انسانی ارائه کرده و نقش مهمی در مطالعات محیط زیستی و ارزیابی خطر اکولوژیک ایفا نماید، که برای مدیریت اکوسیستم و سلامت موجودات حایز اهمیت است.

رودخانه کارون نیز از این آلودگی‌ها مصون نمانده و پساب‌های بسیاری از صنایع فلزی، پتروشیمی و نفت، سلولزی و غذایی، فاضلاب‌های خانگی، بیمارستانی و کشاورزی به این محیط آبی تخلیه می‌شود. از سویی، این رودخانه تأمین‌کننده آب برای این صنایع و منبع آب آشامیدنی برای شهرستان‌هایی مانند اهواز، خرمشهر و آبادان است. ماهی‌های این رودخانه بزرگ، یکی از منابع اصلی تغذیه مردم منطقه هستند، در نتیجه حضور آلاینده‌ها به‌خصوص عناصر بالقوه سمناک در کارون می‌تواند باعث آلودگی رسوب، آب و مواد غذایی شده و چرخه حیات این رودخانه بزرگ را مورد آسیب قرار دهند (Rastmanesh et al., 2015).

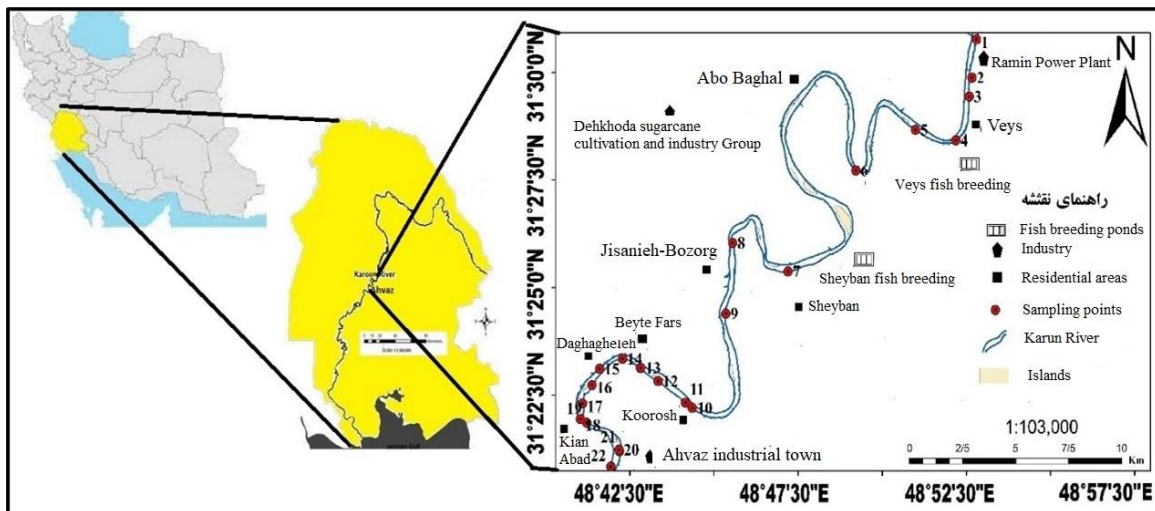
پژوهش‌های مشابه و گسترده‌ای، در زمینه آلودگی عناصر فلزی سمی در محیط‌های مختلف آبی انجام شده که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های Ustaoglu and Islam (2020), Júnior et al., (2020), Milačić et al., (2019), Gharibreza et al., (2020), Amjadi and Khaledi Darvishan (2020), Ghalandarzadeh et al., (2020), Zare Zadeh and Rezaee (2017), Bagheri and Khairabadi (2017), Soleimani et al., (2021) اشاره کرد.

با توجه به گستردگی کمی و تنوع فعالیت‌های انسانی در دشت خوزستان و ورود انواع پساب‌ها و فاضلاب‌ها به رودخانه کارون، بررسی آلودگی‌ها، آلاینده‌ها و سطوح مخاطرات ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. لذا، این پژوهش با هدف تعیین میزان غنی‌شدگی عناصر، تعیین خطر اکولوژیکی و مخاطره‌آمیز بودن آلودگی‌ها در مقایسه با استانداردهای کیفیت رسوبات در رودخانه کارون در بازه ویس تا ابتدای شهر اهواز با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی و تحلیل‌های

<sup>1</sup> Deterministic strategy

دستگاه مغزه‌گیر رسوب دست‌نخورده، مجهز به لوله پلی‌پروپیلن شفاف برداشته شد. موقعیت نمونه‌ها نیز با استفاده از یک دستگاه GPS ثبت شد (شکل ۱).

روش‌های رایج در زمین‌شناسی رسوبی، شامل (1988) Tucker و (1997) Arzani از رسوبات ریزدانه بستر رودخانه کارون برداشت شد. نمونه‌ها با وزن تقریبی ۳۰۰-۲۰۰ گرم، در بازه مورد نظر با استفاده از



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی و ایستگاه‌های نمونه‌برداری در رودخانه کارون

Fig 1. The location of the study area and sampling stations in the Karun River

پلی‌پروپیلن شفاف برداشته شد. موقعیت نمونه‌ها نیز با استفاده از یک دستگاه GPS ثبت شد (شکل ۱).

در بازه مکانی مورد بررسی این پژوهش، کاربری‌های مختلف شهری، روستایی، کشاورزی و صنعتی قابل مشاهده بودند. مهمترین کاربری اراضی این بازه در بخش ابتدایی و میانی، بیشتر کشاورزی و روستایی و در بخش انتهایی، بیشتر صنعتی (شهرک صنعتی اهواز و شرکت تصفیه شکر) و شهری هستند. در بخش اول از بازه مورد بررسی، نمونه‌های شماره یک تا نه، از محدوده پساب نیروگاه رامین، فاضلاب شهر ویس، فاضلاب ناشی از پرورش ماهی ویس، کانون‌های غیر-نقطه‌ای آلودگی فعالیت‌های کشاورزی (مانند کشت و صنعت دهخدا، اراضی کشاورزی پیرامون رودخانه کارون و آلودگی ناشی از پرورش ماهی شیبان) برداشت شدند. نمونه‌های شماره ۱۰ تا ۲۲، بیشتر از فاضلاب‌های شهری و روستایی، پساب‌های صنعتی و تصفیه‌خانه‌ها، به‌منظور، بررسی اثر کانون‌های آلودگی شهری و صنعتی مورد بررسی قرار گرفتند. در این محدوده، بیشترین تمرکز ورود فاضلاب‌ها و پساب‌ها به رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه قابل مشاهده هستند. بدین ترتیب، نقاط نمونه‌برداری به گونه‌ای

**بررسی‌های میدانی:** پیمایش‌های میدانی در دو بخش پایش کانون‌های آلودگی و طرح نمونه‌برداری تنظیم شد. نمونه‌برداری، به‌عنوان مرحله اصلی عملیات میدانی با راهبرد قطعی<sup>۱</sup> و پس از شناسایی کانون‌های آلودگی، شرایط مورفولوژی رودخانه، جزایر و پشته‌های میان کانالی، جریان رودخانه و حوضچه‌های آرامش قبل، و بعد از کانون‌های آلاینده به انجام رسید. در روش راهبرد قطعی (Radtko, 2005)، منطقه مورد مطالعه به بازه‌های کوچکتری بر اساس شناخت به‌دست آمده از کانون‌های آلاینده، تقسیم و محل برداشت بر مبنای قضاوت کارشناسی انتخاب شد و هیچ نمونه‌ای مطابق شبکه یا اتفاقی برداشته نشد.

بدین ترتیب، تعداد ۲۲ نمونه با یک دستگاه شناور (قایق) از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری و بر مبنای روش‌های رایج در زمین‌شناسی رسوبی، شامل (1988) Tucker و (1997) Arzani از رسوبات ریزدانه بستر رودخانه کارون برداشت شد. نمونه‌ها با وزن تقریبی ۳۰۰-۲۰۰ گرم، در بازه مورد نظر با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر رسوب دست‌نخورده، مجهز به لوله

<sup>1</sup> Deterministic strategy

انتخاب شدند که بیشینه اثرات منشأهای آلودگی در این محدوده پایش شوند (شکل ۱).

بررسی‌های آزمایشگاهی: نمونه‌ها پس از برداشت و انجام ملاحظات بسته‌بندی و نگهداری، در کیسه‌های پلاستیکی مخصوص (زیپ کیپ) قرار گرفته و پس از ثبت محل و کد نمونه بر روی آن، تا زمان آماده‌سازی در دمای ۴- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند (Gharibreza et al., 2020). سپس نمونه‌ها در آزمایشگاه آب و خاک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، پس از خشک شدن در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به دو قسمت به ترتیب برای بررسی‌های دانه‌بندی و بخش ریزدانه‌تر از دو میلی‌متر، برای بررسی‌های ژئوشیمیایی و تعیین غلظت عناصر فلزی سمی، آماده‌سازی شدند. پس از دانه‌بندی نمونه‌های رسوبات بستر، با توجه به روش Kingston and Jassie (1988)، مقدار ۰/۲۵ گرم از ذرات کوچک‌تر از ۶۳ میکرون هر نمونه توزین و هضم شیمیایی به روش مرطوب و مخلوط اسیدهای نیتریک (HNO<sub>3</sub>)، هیدروکلریک (HCl) و هیدروفلوریک (HF) و پرکلریک (HClO<sub>4</sub>) صورت گرفت.

برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سمی (وزن خشک، میلی‌گرم در کیلوگرم) از یک طیف‌سنج جرمی پلاسما جفت القایی استفاده شد. درجه‌بندی دستگاه ICP-MS، از طریق نمونه استاندارد و نمونه بلنک، و کنترل کیفیت از طریق تکرار نمونه آزمون، برای برخی نمونه‌ها انجام شده است. مراحل این فرایند از روش Wernimont and Spendley (1985) اقتباس شده است.

تحلیل دانه‌بندی نمونه‌های رسوب: به‌منظور بررسی و تعیین ویژگی‌های رسوبات، تحلیل مقدار ماده آلی و دانه‌بندی بر روی نمونه‌های رسوب انجام گرفت. ابتدا، نمونه‌ها با استفاده از سری کامل الک استاندارد UNIFIED1 و آزمایش هیدرومتری دانه‌بندی شدند (Tucker, 1988). مقادیر درصد کربن آلی<sup>۱</sup> بر اساس دستورالعمل Walkley and Black (1934) و درصد سیلت و رس نمونه‌ها نیز با کمک روش هیدرومتری اندازه‌گیری شدند (Rayment and Higginson, )

همچنین، نام‌گذاری رسوبات با استفاده از طبقه‌بندی فولک (Folk, 1974) انجام شد. برای تحلیل دانه‌بندی رسوبات، محاسبات آماری و ترسیم نمونه‌ها در مثلث فولک، از نرم‌افزار GRADISTAT 9.1 استفاده شد.

تعیین سطح آلودگی: به‌منظور بررسی وضعیت آلودگی رسوبات، غلظت‌های به‌دست آمده با مقادیر استاندارد ISQGs، سطح اثر شدید (SEL)، سطح اثرات احتمالی (PEL) و مقادیر پایه جهانی مقایسه شده است (جدول‌های ۱ و ۲). تعیین این‌که آیا غلظت عناصر فلزی سمی در رسوبات تهدیدی برای زندگی آبریان در بر خواهد داشت، مهم است. شایان توجه است که این مرحله از رایج‌ترین روش‌های بررسی وضعیت آلودگی رسوبات در نظر گرفته می‌شود (Fortescue, 1992; Rudnick and Gao, 2014).

جدول ۱- غلظت پایه عناصر فلزی و شبه‌فلزی در پوسته زمین (میلی‌گرم بر کیلوگرم) (CCME, 1995; EPA, 2001)

Table 1. Basic concentration of metallic and semi-metallic elements in the earth's crust (mg/kg) (CCME, 1995; EPA, 2001)

| Parameter s | Rudnick and Gao (2014) | Fortescue (1992) | Fortescue (1992) | Rickwood (1993) |
|-------------|------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| As          | 5                      | 1.8              | 0.2              | 1.7-5           |
| Cd          | -                      | -                | 0.16             | 0.1-5           |
| Cr          | 92                     | 100              | 122              | 70-330          |
| Cu          | -                      | 55               | 68               | 14-100          |
| Ni          | 47                     | 75               | 99               | 23-200          |
| S           | -                      | 260              | 340              | 260-1200        |

جدول ۲- مقادیر استاندارد کیفیت رسوبات برای عناصر اصلی و سمی (میلی‌گرم بر کیلوگرم) (CCME, 1995; EPA, 2001)

Table 2. Sediment quality standard values for major and toxic elements (mg/kg) (CCME, 1995; EPA, 2001)

| Sediment quality index | As  | Cr   | Zn  | Cu   | Ni | Pb   | Cd   |
|------------------------|-----|------|-----|------|----|------|------|
| LEL                    | 6   | 26   | 120 | 16   | 16 | 31   | 0.6  |
| SEL                    | 33  | 110  | 270 | 110  | 50 | 110  | 9    |
| ISQG                   | 5.9 | 37.3 | 123 | 35.7 | -  | 35   | 0.6  |
| PEL                    | 17  | 90   | 315 | 197  | -  | 93.1 | 3.5  |
| CBSQG                  | 9.8 | 43   | 120 | 32   | 23 | 36   | 0.99 |

عامل غنی‌شدگی<sup>۲</sup>: عامل غنی‌شدگی، یکی از پرکاربردترین شاخص‌های کیفیت رسوب در محیط

<sup>2</sup> Enrichment Factor

<sup>1</sup> Total Organic Carbon (TOC)



$$C_f = C_x / b \quad (2)$$

که در آن،  $C_x$  غلظت عنصر در نمونه و  $C_b$  غلظت هر عنصر در زمینه است. خطر بالقوه اکولوژیکی از حاصل ضرب عامل آلودگی در عامل سمیت بیولوژیکی برای هر فلز از طریق رابطه (۳)، به دست می‌آید (Kusin et al., 2018).

$$ER = C_f * Tr \quad (3)$$

که در آن،  $C_f$  عامل آلودگی و  $Tr$  عامل سمیت بیولوژیکی برای هر عنصر است. مقادیر عامل سمیت بیولوژیکی برای عناصر به ترتیب  $Cd=30$ ،  $Cr=2$ ،  $As=10$ ،  $Zn=1$  و  $Cu=Pb=Ni=5$  است. شاخص خطر بالقوه اکولوژیکی، به پنج رده زیر تقسیم می‌شود (Suresh et al., 2012).

|        |   |                     |               |
|--------|---|---------------------|---------------|
| $PER:$ | { | $ER \leq 40$        | خطر کم        |
|        |   | $40 < ER \leq 80$   | خطر متوسط     |
|        |   | $80 < ER \leq 160$  | خطر قابل توجه |
|        |   | $160 < ER \leq 320$ | خطر زیاد      |
|        |   | $ER > 320$          | خطر خیلی زیاد |

**شاخص خطر (RI):** برای محاسبه خطر اکولوژیکی کل، از شاخص خطر استفاده می‌شود. این شاخص از حاصل جمع شاخص خطر بالقوه اکولوژیکی هر عنصر در یک نمونه (رابطه ۴) به دست می‌آید (Kusin et al., 2018).

$$RI = \sum_{i=1}^n Er \quad (4)$$

در این رابطه،  $Er$  شاخص خطر بالقوه اکولوژیکی برای هر یک از عناصر است. شاخص خطر در چهار رده زیر طبقه‌بندی می‌شود.

|       |   |                     |               |
|-------|---|---------------------|---------------|
| $IR:$ | { | $IR < 150$          | خطر کم        |
|       |   | $150 \leq IR < 300$ | خطر متوسط     |
|       |   | $300 \leq IR < 600$ | خطر قابل توجه |
|       |   | $IR > 600$          | خطر زیاد      |

**روش‌های آماری تحلیل داده‌ها:** به منظور انجام تجزیه و تحلیل آماری، از روش‌ها و تکنیک‌های آماری مانند ضرایب همبستگی و تحلیل‌های چند متغیره استفاده شده است. کاربرد داده‌های ژئوشیمیایی، به طور کلی بر اساس تحلیل‌های آماری مثل تحلیل عاملی<sup>۳</sup>، تحلیل مولفه‌های اصلی<sup>۱</sup> و تحلیل خوشه‌ای

های آبی به شمار می‌رود (رابطه ۱) که به وسیله Loring et al., (1995) ارائه شده و به وسیله Sutherland and Toolsa (2000) توسعه داده شده است.

$$EF = \frac{Ci/Cr}{Bn/Br} \quad (1)$$

که در آن،  $Ci$  غلظت به دست آمده برای عنصر مورد بررسی،  $Cr$  غلظت عنصر نرمال‌کننده در همان نمونه،  $Bn$  غلظت پایه عنصر مورد بررسی و  $Br$  غلظت پایه عنصر نرمال‌کننده است. بر اساس روش Sutherland and Toolsa (2000)، مقادیر متفاوت غنی‌شدگی به شرح زیر است.

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| $EF \leq 2$       | غنی‌شدگی کم        |
| $2 < EF \leq 5$   | غنی‌شدگی متوسط     |
| $5 < EF \leq 20$  | غنی‌شدگی قابل توجه |
| $20 < EF \leq 40$ | غنی‌شدگی زیاد      |
| $EF > 40$         | غنی‌شدگی خیلی زیاد |

عامل غنی‌شدگی، برای برآورد تاثیر فعالیت‌های انسان‌زاد بر آلودگی رسوبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش، از عنصر اسکاندیم به دلیل غیر-متحرک بودن و داشتن کمترین تغییرات (۰/۱۳)، به عنوان عنصر مرجع برای محاسبه عامل غنی‌شدگی استفاده شد (Sinex and Wrigh, 1988).

منشأ زمین‌زاد و انسان‌زاد هر یک از عناصر، بر اساس طبقه‌بندی Zhang and Liu (2000) مشخص شد. مقادیر  $EF$  کمتر از ۱/۵، نشان‌دهنده نقش عوامل طبیعی و فرایند هوازدگی و  $EF$  بیشتر از ۱/۵، نشان دهنده سهم عوامل انسانی در غنی‌شدگی رسوبات به فلزات است.

### شاخص‌های ارزیابی خطر اکولوژیکی و شاخص خطر بالقوه اکولوژیکی<sup>۱</sup>: شاخص خطر اکولوژیکی

برای ارزیابی درجه آلودگی فلزات سنگین و ارزیابی همه جانبه پتانسیل خطر اکولوژیکی هر یک از عناصر در رسوب به کار می‌رود (Hakanson, 1980). برای محاسبه خطر بالقوه اکولوژیکی، ابتدا عامل آلودگی<sup>۲</sup> از روش‌های مرسوم Hakanson (1980) محاسبه شد (رابطه ۲).

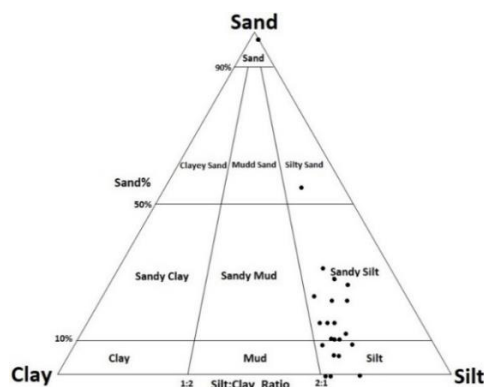
<sup>1</sup> Potential Ecological Risk (PER)

<sup>2</sup> Contamination Factor

<sup>3</sup> Factor Analysis (FA)

هستند (شکل ۲). فقط در ایستگاه‌های دو (ماسه دانه ریز با جورشدگی خوب) و هفت (ماسه دانه متوسط با جورشدگی خیلی خوب) بافت رسوبات، ماسه‌ای است. به‌طور کلی، در ۳۲ درصد نمونه‌ها، رسوبات دارای بافت گلی، در ۵۴ درصد از نمونه‌ها، رسوبات از نوع گل ماسه‌ای و در پنج درصد از نمونه‌ها، رسوبات دارای بافت ماسه گلی هستند. تنها در کمتر از یک درصد نمونه‌ها، رسوبات با بافت ماسه‌ای هستند.

از نظر میزان ماده آلی، نمونه‌های رسوب به‌طور میانگین، دارای ۰/۶۲ درصد ماده آلی هستند (جدول ۳). میزان این پارامتر در محدوده فاضلاب‌های شهری در نمونه‌های ۲۲ (فاضلاب کیان پارس) و ۱۱ (فاضلاب کوروش) افزایش چشمگیری می‌یابد (جدول ۴). به‌طور کلی، بالا بودن ماده آلی در این نمونه‌ها به دلیل ورود فاضلاب‌های مجاور این ایستگاه‌ها است.



شکل ۲- طبقه‌بندی بافت رسوبات بر اساس مثلث فولک (1974)  
Fig 2. Classification of sediment texture based on Falk's triangle (1974)

جدول ۳- نتایج تحلیل دانه‌بندی نمونه‌های رسوب در رودخانه کارون در بازه ویس تا اهواز

Table 3. The results of analysis of sediment samples in the Karun River from Veys to Ahvaz

| Statistical index  | Sand    | Silt   | Clay   | O.C         |
|--------------------|---------|--------|--------|-------------|
|                    | %       |        |        |             |
| Median             | 11.20   | 56.80  | 23.60  | 0.64        |
| Average            | 23.20   | 55.90  | 20.90  | 0.62        |
| Standard deviation | 27.80   | 20.00  | 8.60   | 0.29        |
| Range              | 0.1-100 | 0-75.9 | 0-32.6 | 0.168-1.647 |

### غلظت کل عناصر بالقوه سمناک در رسوب:

مقادیر میانگین غلظت عناصر سمی در پوسته زمین و مقادیر زمینه طبیعی و مقایسه میانگین غلظت عناصر سمی با میانگین پوسته زمین و زمینه محلی در شکل ۳، ارائه شده است. همچنین، نتایج حاصل از داده‌های

سلسله مراتبی<sup>۲</sup> قابل بررسی است. این روش‌ها در زمینه پژوهش‌های ژئوشیمیایی بوده، اغلب به‌طور مشترک به کار می‌روند (Holger et al., 2008). در پژوهش حاضر، به‌منظور شناسایی دسته عناصر فلزی دارای رفتار ژئوشیمیایی مشابه در محیط رسوبی رودخانه‌ای و نیز یافتن مهمترین جاذب کاتیونی مانند مواد آلی و ذرات رسی در بازه‌های مورد بررسی از تحلیل AHC و تحلیل PCA با ضریب تشابه پیرسون، در نرم‌افزار XLSTAT2018 استفاده شده است.

تحلیل مولفه اصلی، از روش‌های چند متغیره است که به‌طور گسترده در مطالعات آلودگی آب، رسوب و خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Shakeri et al., 2015). برای انجام تحلیل مولفه‌های اصلی به‌منظور منشأیابی غلظت عناصر در نمونه‌های رسوب، در مرحله اول، مناسب بودن داده‌ها به روش آزمون (KMO)<sup>۳</sup> و بارتلت بررسی شد (Li et al., 2013). تحلیل AHC نیز از روش‌های آماری متداولی است که در مطالعه ژئوشیمی رسوبات کاربرد قابل‌اطمینانی برای یافتن همبستگی بین عناصر از منظر برخاستگاه، رفتار ژئوشیمیایی در ورود به فاز محلول یا جامد به شمار می‌رود (Gharibreza, 2020; Gharibreza and Ashraf, 2014). درخت خوشه‌ای یا دندوگرام، گزینه‌های هم‌وزن را به هم متصل می‌کند تا خوشه‌های بزرگ‌تر ایجاد شود و تشابهات بین نمونه‌ها را سنجش و ارزیابی کند (Choueri et al., 2009).

### نتایج و بحث

تحلیل دانه‌بندی نمونه‌های رسوب: در جدول ۳، ویژگی‌های آماری (شامل میانگین، میانه و انحراف معیار) برخی از خواص اندازه‌گیری شده در نمونه‌های رسوب آورده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از دانه‌بندی رسوبات، و با توجه به طبقه‌بندی فولک، رسوبات بستر رودخانه در بیشتر ایستگاه‌ها دارای بافت دانه‌ریز و از نوع گل<sup>۴</sup>، ماسه گلی<sup>۵</sup> و گل ماسه‌ای<sup>۶</sup>

<sup>1</sup> Principal Component Analysis (PCA)

<sup>2</sup> Analytical Hierarchical Clustering (AHC)

<sup>3</sup> Kaiser–Meyer–Olkin

<sup>4</sup> Mud

<sup>5</sup> Muddy Sand

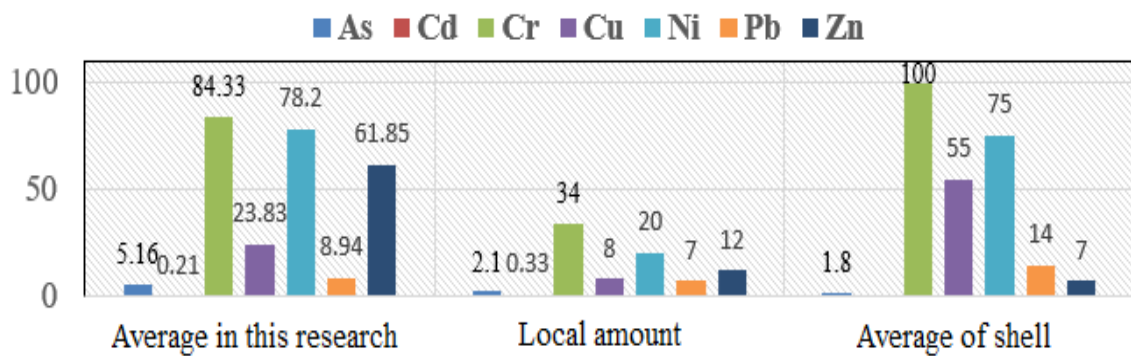
<sup>6</sup> Sandy Mud

عناصر شامل Ni، As و Zn، نسبت به مقادیر زمینه محلی (Choopani et al., 2021)، میانگین پوسته زمین فراتر است (شکل ۳). نتایج نشان داد که توزیع غلظت عناصر به ترتیب  $Cr > Ni > Zn > Cu > Pb > As > Cd$  است. مقایسه غلظت عناصر Ni، Cr، As، Cu و Zn با درصد رس، بیانگر ارتباط بسیار نزدیک عناصر Cr و Ni با درصد رس است. اما عناصر Cu و Zn کاملاً از این روند پیروی نمی‌کنند (شکل ۴).

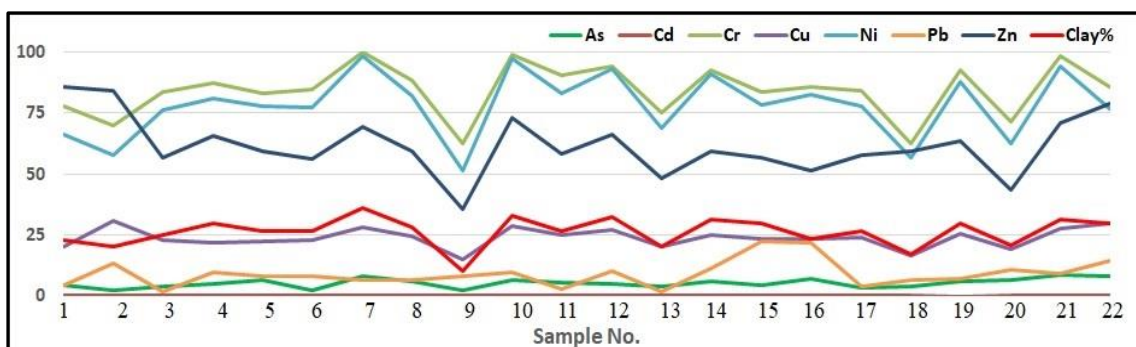
**تعیین سطح آلودگی:** مقایسه بین معیار کیفیت رسوب، غلظت عناصر انتخابی همراه با درصد نمونه‌ها در هر معیار و سطح آلودگی آن‌ها در مقایسه با حدود استاندارد PEL، SEL و ISQGs ارائه شده است (جدول ۵). علاوه بر این، در شکل‌های ۵، ۶ و ۷، برآزش غلظت عناصر سمی As، Cr و Ni که دارای مقادیری فراتر از مقادیر استاندارد ISQGs و PEL هستند، نمایش داده شده است.

ژئوشیمیایی، درصد کربن آلی و بخش ریزدانه سیلتی-رسی رسوبات سطحی، در بازه مورد بررسی، به علاوه توصیف آماری داده‌ها، شامل توصیف جامعه آماری عناصر انتخابی و درصد رس و مواد آلی بر مبنای شاخص‌های گرایش به مرکز (میانگین و میانه)، شاخص‌های پراکندگی (توزیع آماری و انحراف معیار) در جدول ۴ آورده شده است.

برای بعضی از عناصر، تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین شاخص‌های آماری وجود دارد. به طوری که ضریب تاثیر از ۰/۱۳ در عنصر Cr تا ۰/۶۱ در عنصر Pb در تغییر است (جدول ۴) و یا مقادیر غلظت بعضی از



شکل ۳- مقایسه میانگین غلظت عناصر (میلی‌گرم بر کیلوگرم) با میانگین پوسته زمین و زمینه محلی در رودخانه کارون، بازه ویس تا اهواز  
 Fig 3. Comparison of the average concentration of elements (mg/kg) with the average of the earth's crust and the local context in the Karun River, from Veys to Ahvaz



شکل ۴- مقایسه غلظت عناصر آرسنیک، کروم، نیکل، مس و روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم) با درصد رس در رودخانه کارون، بازه ویس تا اهواز  
 Fig 4. Comparison of the concentration of arsenic, chromium, nickel, copper and zinc elements (mg/kg) with the percentage of clay in the Karun River, from Veys to Ahvaz

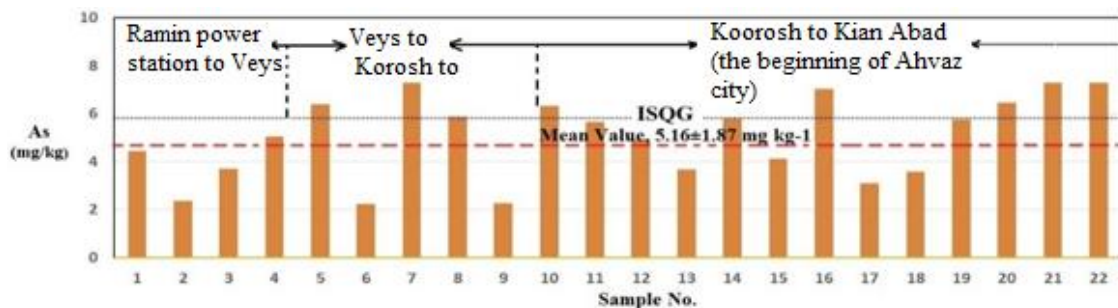
**جدول ۴-** غلظت عناصر سمی (میلی گرم بر کیلوگرم)، درصد کربن آلی و درصد رس در رسوبات سطحی رودخانه کارون، بازه ویس تا اهواز  
**Table 4.** Concentration of toxic elements (mg/kg), percentage of organic carbon and percentage of clay in the surface sediments of the Karun River, from Veys to Ahvaz

| Element/Row              | As   | Cd   | Cr     | Cu    | Ni    | Pb    | Zn    | TOC   | clay  |
|--------------------------|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1                        | 4.45 | 0.12 | 77.65  | 20.32 | 66.17 | 4.13  | 86.00 | 0.706 | 22.59 |
| 2                        | 2.35 | 0.28 | 70.02  | 30.85 | 58.02 | 13.21 | 84.24 | 0.724 | 20.02 |
| 3                        | 3.70 | 0.27 | 83.61  | 23.11 | 76.10 | 1.94  | 56.6  | 0.774 | 24.84 |
| 4                        | 5.06 | 0.21 | 87.61  | 21.95 | 81.30 | 9.72  | 65.97 | 0.168 | 29.65 |
| 5                        | 6.41 | 0.26 | 83.32  | 22.57 | 78.12 | 8.05  | 59.33 | 0.454 | 26.44 |
| 6                        | 2.24 | 0.19 | 84.91  | 22.83 | 77.26 | 8.00  | 56.31 | 0.640 | 26.44 |
| 7                        | 8.24 | 0.22 | 100.00 | 27.90 | 98.58 | 6.40  | 69.21 | 0.510 | 36.07 |
| 8                        | 5.87 | 0.28 | 88.42  | 24.57 | 81.96 | 6.47  | 59.33 | 0.510 | 28.04 |
| 9                        | 2.27 | 0.22 | 62.63  | 14.87 | 51.39 | 7.79  | 35.79 | 0.200 | 10.40 |
| 10                       | 6.34 | 0.20 | 98.87  | 28.71 | 97.59 | 9.78  | 73.04 | 0.656 | 32.86 |
| 11                       | 5.65 | 0.33 | 90.50  | 25.17 | 83.09 | 2.83  | 58.46 | 1.110 | 26.44 |
| 12                       | 4.93 | 0.22 | 94.48  | 26.89 | 93.13 | 10.26 | 66.21 | 0.740 | 32.22 |
| 13                       | 3.66 | 0.13 | 75.45  | 20.27 | 69.05 | 1.57  | 48.38 | 0.570 | 20.02 |
| 14                       | 5.79 | 0.22 | 92.98  | 24.86 | 91.03 | 11.19 | 59.58 | 0.538 | 31.25 |
| 15                       | 4.14 | 0.14 | 83.97  | 23.28 | 78.51 | 22.06 | 56.61 | 0.689 | 29.65 |
| 16                       | 7.04 | 0.20 | 85.61  | 23.19 | 82.87 | 21.8  | 51.44 | 0.555 | 23.23 |
| 17                       | 3.09 | 0.25 | 84.18  | 24.08 | 77.85 | 3.85  | 57.85 | 0.642 | 26.44 |
| 18                       | 3.56 | 0.18 | 26.77  | 16.37 | 56.51 | 6.41  | 59.41 | 0.303 | 16.81 |
| 19                       | 5.75 | 0.11 | 92.90  | 25.49 | 87.80 | 7.01  | 63.39 | 0.521 | 29.65 |
| 20                       | 6.46 | 0.13 | 71.33  | 19.34 | 62.67 | 10.61 | 43.37 | 0.706 | 20.66 |
| 21                       | 8.57 | 0.28 | 98.35  | 27.80 | 94.30 | 8.90  | 70.87 | 0.724 | 31.25 |
| 22                       | 8.04 | 0.25 | 85.71  | 29.94 | 77.02 | 14.57 | 79    | 1.647 | 29.65 |
| Average                  | 5.16 | 0.21 | 84.33  | 23.83 | 87.20 | 8.94  | 61.85 | 0.640 | 26.12 |
| Standard deviation       | 1.91 | 0.06 | 10.71  | 4.06  | 13.22 | 5.41  | 12.19 | 0.300 | 5.97  |
| Impact factor            | 0.37 | 0.28 | 0.13   | 0.17  | 0.17  | 0.61  | 0.20  | 0.470 | 0.23  |
| Minimum                  | 2.24 | 0.11 | 62.63  | 14.87 | 51.39 | 1.57  | 35.79 | 0.168 | 10.40 |
| Maximum                  | 8.57 | 0.33 | 100    | 30.85 | 98.58 | 22.06 | 86.00 | 1.650 | 36.07 |
| Mean shell (Spark, 2003) | 5    | 0.6  | 84     | 26    | 34    | 29    | 60    | -     | -     |
| Local amount             | 2.1  | 0.33 | 34     | 10    | 20    | 7     | 12    | -     | -     |

**جدول ۵-** مقایسه بین معیار کیفیت رسوب و غلظت فلزات سنگین (میلی گرم بر کیلوگرم) همراه با درصد نمونه‌ها در هر معیار

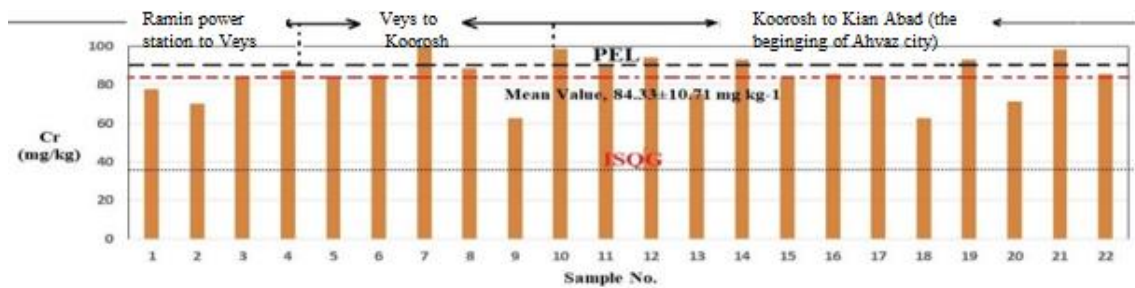
**Table 5.** Comparison between sediment quality criterion and heavy metal concentration (mg/kg) along with the percentage of samples in each criterion

|   | As    | Cd   | Cr    | Cu    | Ni    | Pb    | Zn  |
|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|-----|
| ISQG                                    | 5.9   | 0.6  | 37.3  | 35.7  | 15.9  | 35    | 123 |
| PEL                                     | 17    | 3.5  | 90    | 197   | 42.8  | 91.3  | 315 |
| The scope of this study                 |       |      |       |       |       |       |     |
| Min                                     | 2.23  | 0.11 | 62.63 | 14.87 | 51.4  | 1.57  | 10  |
| Max                                     | 8.57  | 0.33 | 100   | 30.85 | 98.58 | 22.06 | 86  |
| Percentage of samples in each criterion |       |      |       |       |       |       |     |
| Percentage of samples < ISQG            | 63.63 | 100  | 0     | 100   | 0     | 100   | 100 |
| Between ISQG – PEL                      | 36.37 | 0    | 72.73 | 0     | 0     | 0     | 0   |
| Percentage of samples > PEL             | 0     | 0    | 27.27 | 0     | 100   | 0     | 0   |



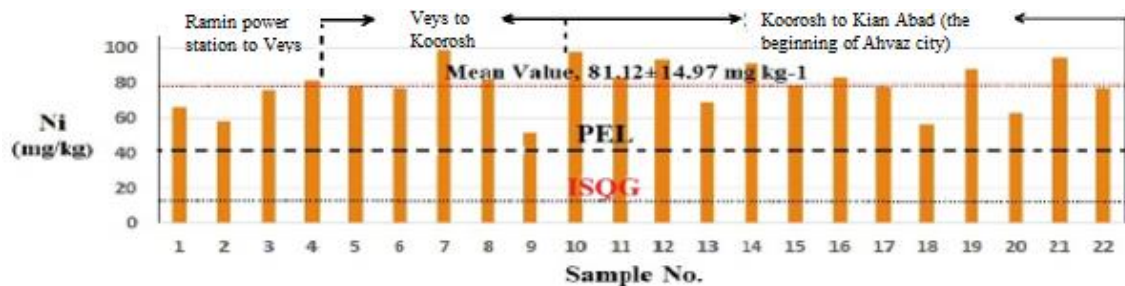
**شکل ۵-** مقایسه غلظت As نمونه‌های سطحی رودخانه کارون با استانداردهای کیفیت رسوب در بازه ویس تا اهواز

**Fig 5.** Comparison of As concentration of surface samples of Karun River with sediment quality standards from Veys to Ahvaz



شکل ۶- مقایسه غلظت Cr نمونه‌های سطحی رودخانه کارون با استانداردهای کیفیت رسوب در بازه ویس تا اهواز

Fig 6. Comparison of Cr concentration of surface samples of Karun River with sediment quality standards from Veys to Ahvaz



شکل ۷- مقایسه غلظت Ni نمونه‌های سطحی رودخانه کارون با استانداردهای کیفیت رسوب در بازه ویس تا اهواز

Fig 7. Comparison of Ni concentration of surface samples of Karun river with sediment quality standards from Veys to Ahvaz

نمونه شماره ۲۲ فاضلاب کیان پارس، نمونه شماره ۱۶ زبردست پل شرکت نفت و نمونه شماره پنج پرورش ماهی ویس، دارای غلظتی فراتر از ISQG و به تعبیری در آستانه مخاطره‌آمیزی هستند (شکل ۵).

مس: نتایج نشان داد که میانگین، کمینه و بیشینه غلظت Cu، در رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه فوق به ترتیب ۲۳/۸۳، ۱۴/۸۷ و ۳۰/۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم با ضریب تغییر، ۰/۱۷ است. تمامی نمونه‌ها دارای غلظتی کمتر از کمینه تراز آلودگی ISQG هستند (جدول ۵). نتایج پژوهش‌های Nasrabadi et al., (2010) و Gharibreza et al., (2019) نیز نشان دهنده سطح پایین آلودگی Cu در رسوبات سطحی رودخانه‌های روضه‌چای و هراز هستند. این امر نشان از غلظت اندک عنصر Cu در منابع طبیعی تأمین‌کننده رسوبات رودخانه‌ای است.

کروم و نیکل: Cr با ۲۷ درصد و Ni با ۱۰۰ درصد، دارای غلظتی فراتر از سطح آلودگی PEL بودند (جدول ۵). میانگین غلظت عناصر Cr و Ni در رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه ویس تا اهواز، به ترتیب ۸۴/۳۳ و ۷۸/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. کمینه و بیشینه غلظت Cr به ترتیب ۶۲/۶۳ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و Ni دارای کمینه و بیشینه به ترتیب ۵۱/۴

کادمیوم و سرب: بر اساس مقایسه بین معیارهای کیفیت رسوب با استانداردها، رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه، دارای رسوباتی پاک از منظر عناصر Cd و Pb است. به طوری که ۱۰۰ درصد نمونه‌ها غلظتی کمتر از ISQG دارند (جدول ۸). کم شدن غلظت Cd نسبت به سایر آلاینده‌ها را می‌توان به دلیل شعاع هیدراته بزرگ‌تر از سایر عناصر دانست که تمایل کمی برای جذب شدن روی سطح رسوبات از خود نشان می‌دهد (Koaser et al., 2003). کاهش غلظت Pb نیز می‌تواند به علت کاهش منابع آلودگی این عنصر باشد. لذا، این بازه از رودخانه کارون از نظر آلودگی Pb، برای آبیان و بهره‌برداران آب دارای وضعیت مطلوبی است.

آرسنیک: میانگین غلظت شبه فلز As در رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه، ۵/۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم که بیشینه آن در نمونه شماره ۲۱، در ساحل شرقی کیان پارس و کمترین آن برابر ۲/۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم، در نمونه شماره شش در ساحل شرقی در مجاور اراضی کوت سید شریف به‌دست آمده است. میانگین حاصله، دارای غلظتی زیر کمینه سطح آلودگی ISQG است (شکل ۵). نمونه های شماره ۲۱ فاضلاب ساحل شرقی کیان پارس، نمونه شماره هفت زبردست پرورش ماهی شبیان،

ایستگاه شماره هفت (زیردست پرورش ماهی شیپان)، ایستگاه ۲۱ (ساحل شرقی کیان پارس) و ایستگاه ۱۰ (فاضلاب کورش) از تمامی ایستگاه‌ها، آلوده‌تر هستند.

جدول ۶- مقایسه بین ایستگاه‌های دارای عناصر با غلظت فراتر از سطح آلودگی ISQG و PEL (As, Cr, Ni)

**Table 6.** Comparison between stations with elements with concentrations exceeding ISQG and PEL pollution level (As, Cr, Ni)

| Element/Rank | As   | Cr   | Ni   |
|--------------|------|------|------|
| Rank 1       | S 21 | S 7  | S 7  |
| Rank 2       | S 7  | S 10 | S 10 |
| Rank 3       | S 22 | S 21 | S 21 |
| Rank 4       | S 16 | S 12 | S 12 |
| Rank 5       | S 20 | S 14 | S 14 |
| Rank 6       | S 5  | S 19 | S 19 |
| Rank 7       | S 10 | S 11 | S 11 |

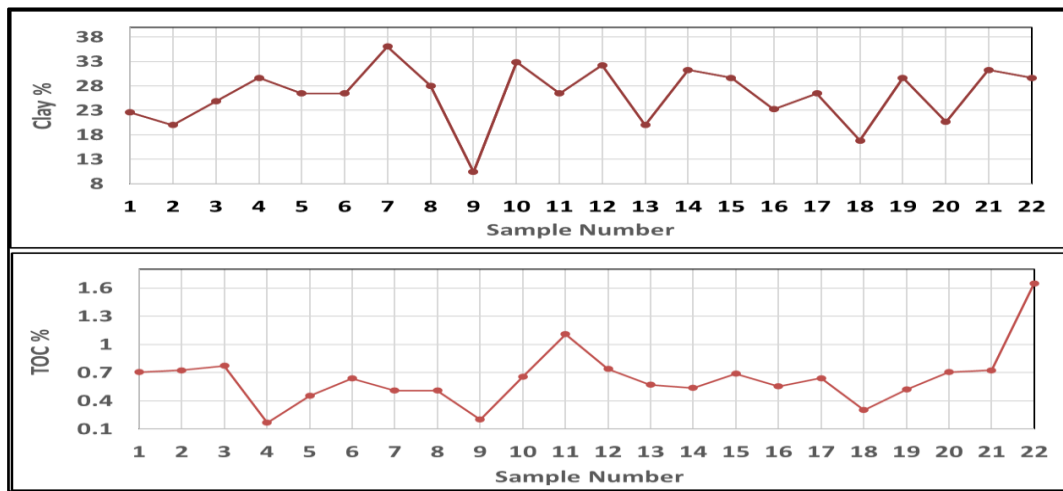
**درصد مواد آلی و رس:** درصد مواد آلی و بخش ریزدانه (ریزتر از ۰/۶۳ میلی‌متر)، به منظور شناخت تاثیرگذار آن در جذب و غنی‌شدگی عناصر بالقوه سمی در رودخانه کارون در بازه ویس تا ابتدای شهر اهواز، مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، بیشینه، کمینه و میانگین ماده آلی به ترتیب ۱/۶۵، ۰/۱۷ و ۰/۶۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم با ضریب تغییر ۰/۴۷ است. همچنین، بخش عمده‌ای از رسوبات رودخانه را ذراتی در اندازه رس تشکیل داده، به طوری که در اغلب آن‌ها میزان رس بیش از ۲۰ درصد است (شکل ۸). ذرات رس و مواد آلی، از حامل‌ها و جاذب‌های عناصر سمی به فرم کاتیونی به‌شمار می‌روند (Gharibreza and Ashraf, 2014).

درصد قابل ملاحظه رس و مواد آلی، می‌تواند شرایط را برای افزایش سطح آلودگی و مسمومیت آبیان و دام و بهره‌برداران آب، به‌ویژه بخش کشاورزی فراهم کند. فزونی مواد آلی به‌طور مستقیم تحت تاثیر ورود فاضلاب‌های شهری پیرامون (به خصوص نمونه ۱۱ فاضلاب کورش و نمونه ۲۲ فاضلاب کیان پارس) که هر دو بیش از یک درصد هستند، است (جدول ۴ و شکل ۸). در صورتی که میزان ذرات رس، یک پارامتر ناشی از رژیم رسوبی رودخانه است.

۹۸/۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. شواهد نشان داد که کلیه مقادیر به‌دست آمده برای عناصر Cr و Ni دارای غلظتی فراتر از غلظت کمینه سطح آلودگی ISQG است (شکل ۶). بیشینه غلظت Cr و Ni به‌طور مشترک در نمونه‌های شماره‌های هفت (زیر دست پرورش ماهی شیپان) و ۱۰ (فاضلاب کورش) و ۲۱ (فاضلاب ساحل شرقی کیان پارس) دیده می‌شود که بیشتر در پایین دست خروجی فاضلاب‌های شهری و آبی‌پروری مشاهده شده است. تحلیل میدانی کانون‌های آلودگی، بیانگر تاثیر قابل‌ملاحظه کاربری‌های شهری و صنعتی و فعالیت کشاورزی در افزایش غلظت عناصر Ni و Cr در طول رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه است. نتایج نشان داد، شرایط محیطی به گونه‌ای است که قابلیت جذب عنصر Ni در رسوبات سطحی رودخانه فراهم بوده و در غالب نقاط آن وارد فاز کانی‌سازی شده است. عنصر سمی Ni، در شرایط کاتیونی قادر به ورود به فاز محلول و آب مصرفی بهره‌برداران است. بدین ترتیب، رودخانه کارون در تمام ایستگاه‌های نمونه‌برداری در بازه مورد مطالعه، آلوده به عنصر سمی Ni است (جدول ۵ و شکل ۷). این نتایج با نتایج Rastmanesh et al., (2015) در رودخانه کارون مطابقت دارد.

**روی:** بیشترین میزان غلظت عنصر Zn در رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه، در نمونه‌های شماره یک و دو (محدوده نیروگاه رامین) و ۲۲ (کیان پارس) به ترتیب با میزان ۸۶، ۸۴/۲۴ و ۷۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده می‌شود. کمینه غلظت عنصر Zn، برابر ۳۵/۷۹ و با میانگین ۶۱/۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمده است. شرایط نشان از تغییرات غلظت عنصر Zn، در قسمت‌های مختلف رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه دارد. اما تمامی نمونه‌ها دارای غلظتی کمتر از کمینه تراز آلودگی ISQG هستند. ایستگاه‌های دارای عناصر با غلظت فراتر از کمینه سطح آلودگی ISQG (As, Cr, Ni) در جدول ۶، به ترتیب بر اساس بیشترین میزان آلودگی اولویت‌بندی شدند. به طوری که آلوده‌ترین ایستگاه‌ها در مرتبه یک تا هفت قرار گرفتند. با توجه به جدول ۶،





شکل ۸- روند تغییرات درصد رس و درصد ماده آلی در نمونه‌های سطحی رودخانه کارون در بازه ویس تا اهواز  
 Fig 8. Changes in the percentage of clay and percentage of organic matter in the surface samples of the Karun River from Veys to Ahvaz

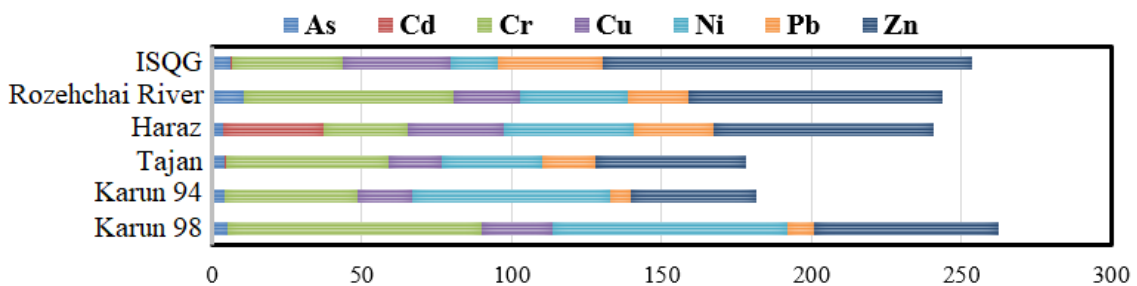
روضة‌چای و هراز بیشتر است. اما نسبت به کارون ۹۴ (میانگین غلظت عناصر سنگین فقط برای ایستگاه‌های دو تا ۱۵ مربوط به کارون ۹۴ که در محدوده مطالعه حاضر بوده‌اند، محاسبه شده است) غلظت کلیه عناصر سنگین با یک افزایش قابل ملاحظه همراه است. نسبت به استاندارد ISQG، میانگین غلظت Cr و Ni بیش از حد استاندارد است (جدول ۷ و شکل ۹).

مقایسه غلظت عناصر سنگین در رسوبات سطحی کارون، بازه ویس تا اهواز با پژوهش‌های دیگر: مقایسه میانگین غلظت عناصر سنگین و سمی در بازه مورد مطالعه، با سایر پژوهش‌های مشابه در ایران از جمله رودخانه‌های تجن، هراز، روضه‌چای، رودخانه کارون ۹۴ و استاندارد ISQG نشان داد که میانگین غلظت Ni و Cr نسبت به رودخانه تجن و

جدول ۷- میانگین غلظت عناصر سنگین رودخانه کارون، بازه ویس تا اهواز و پژوهش‌های مشابه

Table 7. The average concentration of heavy elements in Karun River from Veys to Ahvaz and similar studies

| References               | River/Area | As   | Cd    | Cr    | Cu    | Ni    | Pb    | Zn    |
|--------------------------|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| current study            | Karun 98   | 5.16 | 0.21  | 84.33 | 23.83 | 78.20 | 8.94  | 61.85 |
| Rastmanesh et al., 2015  | Karun 94   | 4.09 | -     | 44.22 | 18.37 | 66.1  | 6.93  | 42    |
| Gharibreza et al., 2020  | Tajan      | 4.16 | 0.33  | 54.29 | 18    | 33.42 | 17.88 | 50    |
| Nasrabadi et al., 2010   | Haraz      | 3.45 | 33.55 | 28.10 | 32.1  | 43.6  | 26.35 | 73.8  |
| Gharibreza et al., 2019  | Rozehchai  | 10.5 | 0.28  | 69.7  | 22.4  | 36    | 20    | 85    |
| EPA, 2001 and CCME, 1995 | ISQG       | 5.9  | 0.60  | 37.3  | 35.7  | 15.9  | 35    | 123   |



شکل ۹- مقایسه میانگین غلظت عناصر سنگین رودخانه کارون، بازه ویس تا اهواز با پژوهش‌های مشابه  
 Fig 9. Comparison of the average concentration of heavy elements in the Karun River from Veys to Ahvaz, with similar studies

غنی‌شدگی محاسبه شد (شکل ۱۰). نتایج محاسبه عامل غنی‌شدگی (جدول ۷) نشان داد که عنصر Zn غنی‌شدگی متوسط تا قابل توجه دارد. غنی‌شدگی Cu،

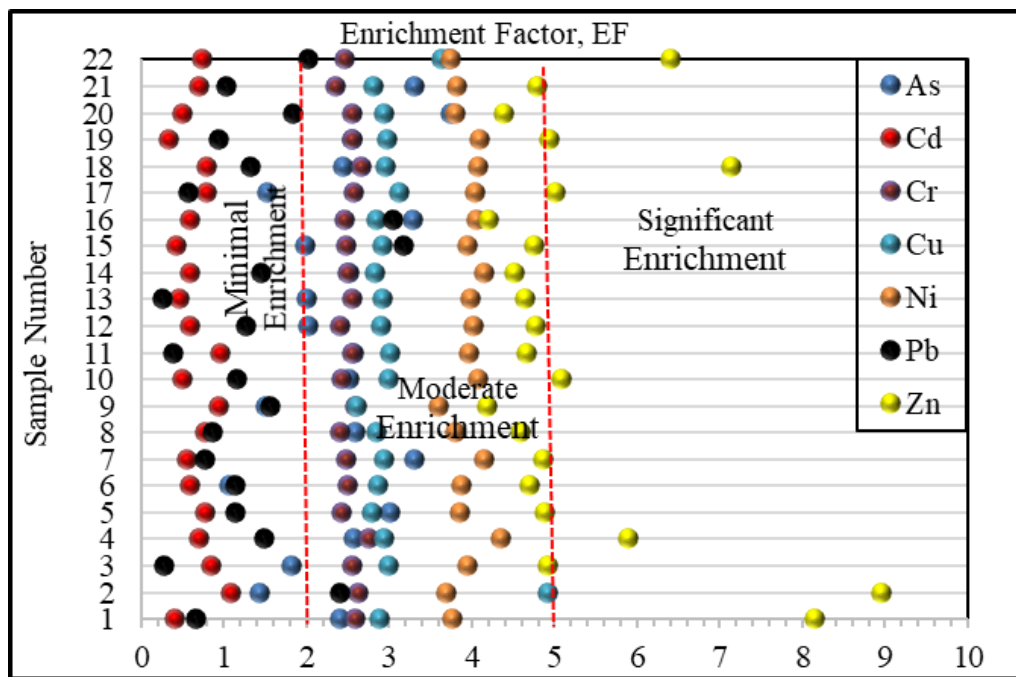
غنی‌شدگی: برای برآورد تاثیر فعالیتهای انسان‌زاد، بر آلودگی رسوبات و آشکارسازی هرچه بیشتر اثرگذاری منشأهای پیرامون بازه مورد مطالعه، عامل

ایستگاه شماره دو، تحت تاثیر پساب نیروگاه رامین و بیشینه غنی‌شدگی عناصر Ni و Cr در ایستگاه شماره چهار، تحت تاثیر فاضلاب ویس رخ داده است. بررسی وضعیت غنی‌شدگی As و Pb نشان داد که این عامل در همه نمونه در سطح کم تا متوسط بوده است (شکل ۹). این شرایط بیانگر تاثیر بیشتر آلاینده‌های کشاورزی (پساب‌های آبی‌پروری و کشاورزی) در بازه اول (۱ تا ۹) و تاثیر بیشتر فاضلاب‌های شهری و پساب‌های صنعتی در بازه دوم (۱۰ تا ۲۲) است.

عنصر سمی Cd، دارای غنی‌شدگی کم با حداقل ضریب تغییر در تمامی ایستگاه‌ها است (شکل ۹). بدین ترتیب، رودخانه کارون دارای رسوباتی پاک از منظر عنصر Cd در بازه مورد مطالعه است. عنصر Pb، فقط در نمونه‌های شماره دو (نیروگاه رامین)، ۱۵ و ۱۶ (فاضلاب دغاغله و زیردست آن) و نمونه ۲۲ (فاضلاب کیان پارس) در محدوده غنی‌شدگی متوسط قرار دارند. اما بقیه ایستگاه‌ها دارای رسوباتی پاک از منظر عنصر Pb در بازه مورد مطالعه است.

Ni و Cr در محدوده آلودگی متوسط قرار داشت (شکل ۱۰). شبه فلز As در محدوده غنی‌شدگی کم تا متوسط و دو عنصر Cd و Pb دارای غنی‌شدگی کم هستند (شکل ۱۰). میانگین غنی‌شدگی عناصر به ترتیب  $Zn > Ni > Cu > Cr > As > Pb > Cd$  است. بر اساس طبقه‌بندی ژانگ و لیو، Cr، Ni، Zn، Cu و As دارای منشأ انسان‌زاد (جدول ۸)، و Pb و Cd منشأ زمین‌زاد دارند.

بیشترین غنی‌شدگی عنصر Zn در ایستگاه‌های دو (پساب نیروگاه رامین)، یک (بالادست نیروگاه رامین)، ۱۸ (پساب تصفیه‌خانه غرب اهواز)، ۲۲ (فاضلاب کیان پارس)، چهار (انتهای شهر ویس) و ۱۰ (فاضلاب کورش) دیده می‌شود که به ترتیب دارای غنی‌شدگی ۸/۹۵، ۸/۱۵، ۷/۱۳، ۶/۴۱، ۵/۸۸ و ۵/۰۸ هستند و در محدوده غنی‌شدگی قابل‌ملاحظه قرار دارند. این شرایط، بیانگر تاثیر زیاد آلاینده‌های صنعتی و شهری بر غنی‌شدگی عنصر Zn در بازه فوق است. بررسی‌ها نشان داد که بیشینه غنی‌شدگی عناصر Zn و Cu در



شکل ۱۰- وضعیت غنی‌شدگی عناصر سمی در رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه ویس تا اهواز

Fig 10. Situation of the enrichment of toxic elements in the surface sediments of the Karun River from Veys to Ahvaz

جدول ۸- پارامترهای غنی‌شدگی عناصر انتخابی در رودخانه کارون، بازه ویس تا اهواز

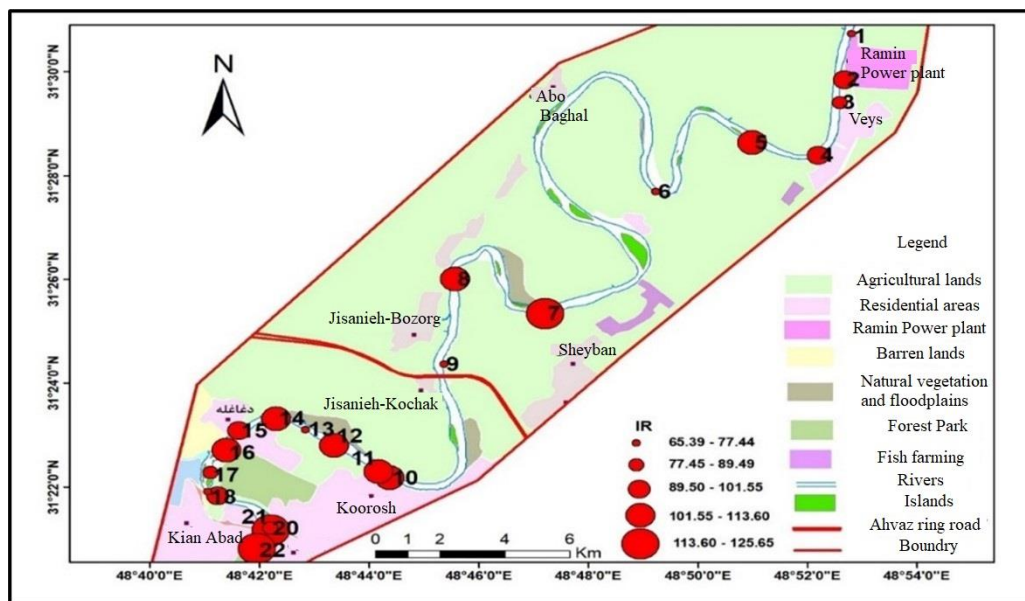
Table 8. Enrichment parameters of selected elements in Karun River from Veys to Ahvaz

|         | As   | Cd   | Cr   | Cu   | Ni   | Pb   | Zn   |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|
| Max     | 3.74 | 1.09 | 2.76 | 4.92 | 4.35 | 3.17 | 8.95 |
| Min     | 1.07 | 0.33 | 2.35 | 2.61 | 3.60 | 0.26 | 4.18 |
| Average | 2.45 | 0.67 | 2.52 | 3.03 | 3.95 | 1.31 | 5.29 |



کل، از شاخص خطر استفاده و نتایج آن در (شکل ۱۰) ارائه شد. نتایج به‌دست آمده از شاخص خطر نشان داد که مقادیر شاخص خطر برای همه نمونه‌ها در محدوده خطر کم ( $RI < 150$ ) قرار دارد. بزرگی شاخص خطر هریک از ایستگاه‌های نمونه‌برداری، نسبت به کمترین میزان شاخص خطر بالقوه اکولوژیکی در شکل ۱۱، به نمایش گذاشته شده است.

**خطر بالقوه اکولوژیکی (PER):** نتایج به‌دست آمده (جدول ۹) نشان می‌دهد که مقادیر خطر بالقوه اکولوژیکی همه عناصر به‌جز As در نمونه ۲۱ در محدوده ریسک کم ( $< 40$ ) قرار دارند. مقادیر خطر بالقوه اکولوژیکی As، برای نمونه شماره ۲۱ (فاضلاب شرقی کیان پارس) در محدوده آلودگی متوسط ( $40 < PER < 80$ ) قرار دارد (جدول ۹).  
**شاخص خطر (RI):** به‌منظور ارزیابی خطر اکولوژیکی



شکل ۱۱- مقادیر شاخص خطر در رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه ویس تا اهواز  
Fig 11. Risk index values in the surface sediments of the Karun River from Veys to Ahvaz

جدول ۹- مقادیر خطر بالقوه اکولوژیکی برای هر عنصر در رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه ویس تا اهواز

Table 9. Potential ecological risk values for each element in the surface sediments of the Karun River from Veys to Ahvaz

| Sample | PER   |       |      |       |       |       |       | RI     |
|--------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
|        | As    | Cd    | Cr   | Cu    | Ni    | Pb    | Zn    |        |
| 1      | 21.17 | 10.91 | 4.57 | 12.70 | 16.54 | 2.95  | 7.17  | 76.01  |
| 2      | 11.20 | 25.72 | 4.12 | 19.28 | 14.50 | 9.44  | 7.02  | 91.28  |
| 3      | 17.61 | 24.45 | 4.92 | 14.44 | 19.02 | 1.39  | 4.74  | 86.57  |
| 4      | 24.08 | 19.46 | 5.15 | 13.72 | 20.32 | 6.94  | 50.50 | 95.17  |
| 5      | 30.52 | 23.29 | 4.90 | 14.11 | 19.53 | 5.75  | 4.94  | 103.04 |
| 6      | 10.65 | 17.51 | 4.99 | 14.27 | 19.31 | 5.71  | 4.69  | 77.14  |
| 7      | 39.22 | 19.94 | 5.88 | 17.44 | 24.64 | 4.57  | 5.77  | 117.46 |
| 8      | 27.96 | 25.09 | 5.20 | 15.36 | 20.49 | 4.62  | 4.94  | 103.66 |
| 9      | 10.81 | 20.21 | 3.68 | 9.30  | 12.85 | 5.56  | 2.98  | 65.39  |
| 10     | 30.21 | 18.22 | 5.82 | 17.95 | 24.40 | 6.99  | 6.09  | 109.66 |
| 11     | 26.89 | 30.28 | 5.32 | 15.73 | 20.77 | 2.02  | 4.87  | 105.89 |
| 12     | 23.46 | 20.36 | 5.56 | 16.81 | 23.28 | 7.33  | 5.52  | 102.31 |
| 13     | 17.44 | 11.82 | 4.44 | 12.67 | 17.26 | 1.12  | 4.03  | 68.78  |
| 14     | 27.59 | 19.56 | 5.47 | 15.54 | 22.76 | 8.00  | 4.97  | 103.88 |
| 15     | 19.70 | 12.66 | 4.94 | 14.55 | 19.69 | 15.76 | 4.72  | 91.95  |
| 16     | 33.51 | 17.99 | 5.04 | 14.49 | 20.72 | 15.57 | 4.29  | 111.61 |
| 17     | 14.71 | 22.86 | 4.95 | 15.05 | 19.46 | 2.75  | 4.82  | 84.60  |
| 18     | 16.97 | 16.34 | 3.69 | 10.23 | 14.13 | 4.58  | 4.95  | 70.90  |
| 19     | 27.38 | 10.45 | 5.46 | 15.93 | 21.95 | 5.01  | 5.28  | 91.47  |
| 20     | 30.78 | 12.12 | 4.20 | 12.09 | 15.67 | 7.58  | 3.61  | 86.05  |
| 21     | 40.82 | 25.83 | 5.79 | 17.38 | 23.57 | 6.36  | 5.91  | 125.66 |
| 22     | 38.30 | 22.83 | 5.04 | 18.71 | 19.25 | 10.41 | 6.58  | 121.13 |

همبستگی پیرسون استفاده شد (جدول ۱۰). برای این منظور، ابتدا بررسی نرمال بودن داده‌ها از طریق آزمون‌های نرمال بودن داده (Shapiro-Wilk, Anderson-Darling, Lilliefors, Jarque-Bera) تایید شد.

**ضریب همبستگی:** ضریب همبستگی، در واقع ارتباط احتمالی بین عناصر مانند منشأ مشترک، توزیع واحد و رفتار مشابه را بیان می‌کند (Diop et al., 2015). از آنجا که عناصر سمی تهدیدی برای موجودات آبی هستند، شناسایی روابط متقابل آن‌ها امری مهم است. در این پژوهش برای تعیین همبستگی داده‌ها از ضریب

**جدول ۱۰-** ضریب همبستگی پیرسون عناصر فلزی سمی، مواد آلی و رسوبات رسی (n=22) در بازه مورد مطالعه رودخانه کارون  
**Table 10.** Pearson's correlation coefficient of toxic metal elements, organic substances and clay sediments (n=22) in the study area of Karun River

| Variables | As     | Cd     | Cr      | Cu      | Ni      | Pb    | Zn     | TOC   | clay% |
|-----------|--------|--------|---------|---------|---------|-------|--------|-------|-------|
| As        | 1      |        |         |         |         |       |        |       |       |
| Cd        | 0.132  | 1      |         |         |         |       |        |       |       |
| Cr        | 0.629* | 0.228  | 1       |         |         |       |        |       |       |
| Cu        | 0.448* | 0.426  | 0.686** | 1       |         |       |        |       |       |
| Ni        | 0.637* | 0.182  | 0.987** | 0.635*  | 1       |       |        |       |       |
| Pb        | 0.229  | -0.142 | 0.052   | 0.227   | 0.087   | 1     |        |       |       |
| Zn        | 0.246  | 0.156  | 0.341   | 0.673*  | 0.270   | 0.042 | 1      |       |       |
| TOC       | 0.322  | 0.248  | 0.228   | 0.557*  | 0.151   | 0.116 | 0.392  | 1     |       |
| clay%     | 0.605* | 0.148  | 0.940** | 0.719** | 0.930** | 0.138 | 0.453* | 0.269 | 1     |

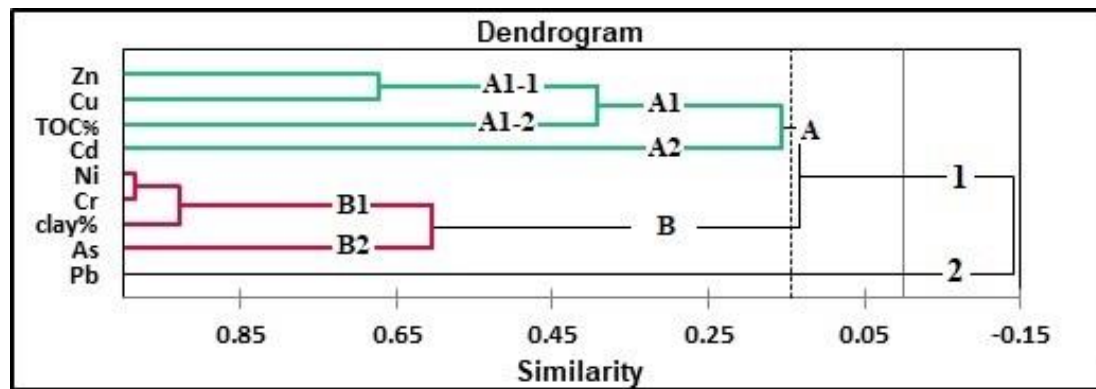
\*: Significant correlation at the 95% confidence level, \*\*: Significant correlation at the 99% confidence level

آزمون‌ها فرض صفر بر نرمال بودن داده‌ها بنا شده است. معمولاً چنانچه سطح معنی‌داری در این آزمون بیشتر از ۰/۰۵ باشد، می‌توان داده‌ها را با اطمینان بالایی نرمال فرض کرد. نتایج نشان داد که تمام عناصر دارای توزیع نرمال هستند. در روش آنالیز خوشه‌ای، عنصر Pb به‌تنهایی در یک خوشه قرار می‌گیرد و همبستگی مثبت و معنی‌داری با خوشه دیگر ندارد (شکل ۱۲).

بقیه عناصر به همراه درصد رس و مواد آلی در خوشه دوم و در دو زیرخوشه A و B هستند، زیرخوشه A به دو گروه A1 و A2 تقسیم شده است و گروه A1 نیز به دو زیرگروه کوچک‌تر تقسیم می‌شود. به‌طوری‌که در زیر گروه A1-1 عناصر Cu و Zn و زیر گروه A1-2 مواد آلی قرار می‌گیرند. اما گروه A2 با همبستگی بیشینه ۰/۱۵، با گروه A1 تنها عنصر Cd را در خود جای داده است. زیرخوشه B، به دو گروه B1 و B2 تقسیم شده است. به‌طوری‌که گروه B1 شامل عناصر Ni، Cr و درصد رس و گروه B2 شامل عنصر As است (شکل ۱۲). ولی بین دو زیر خوشه B1 و B2 ضریب همبستگی مثبت و معنی‌دار (۰/۶) وجود دارد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مواد آلی همبستگی مثبت و معنی‌داری با عنصر Cu دارد که بیانگر جذب عنصر Cu به‌وسیله مواد آلی است. بنابراین، مواد آلی می‌توانند به‌عنوان یک حامل برای این عنصر عمل کنند (Rastmanesh et al., 2015). ارتباط معنی‌دار مثبتی میان Cr، Ni، Cu و AS با رس وجود دارد. پس ذرات رس حامل اصلی عناصر Cr، Ni، Cu و AS هستند. ضریب همبستگی بالا بین عناصر، نشان از منبع مشترک، وابستگی متقابل، رفتار یکسان در طول حمل و نقل دارد. پس، همبستگی بالای عناصر Cr و Ni (۰/۹۸۷)، Cu و Cr (۰/۶۸۶) و Ni و AS (۰/۶۳۷) بیانگر آلودگی از منابع ورودی یکسان و مشترک است. عناصر Cu و Zn (۰/۶۷۳) نیز همبستگی مثبت و قابل توجهی دارند و می‌توانند از منابع آلودگی مشترک باشند.

**تحلیل خوشه‌ای:** تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی (AHC) با استفاده از داده‌های نرمال انجام شد. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون‌های نرمال بودن داده (Shapiro-Wilk, Anderson-Darling, Lilliefors, Jarque-Bera) استفاده شد. در این



شکل ۱۲- خوشه‌بندی عناصر سمی، ذرات رس، مواد آلی در نمونه‌های سطحی رودخانه کارون بازه ویس تا اهواز

Fig 12. Clustering of toxic elements, clay particles, organic substances in the surface samples of the Karun River from Veys to Ahvaz

همبستگی با همه عناصر است و در یک گروه مجزا قرار دارد. تمام این نتایج، به‌خوبی با ضریب همبستگی پیرسون مطابقت دارند.

**تحلیل مولفه‌های اصلی:** در این مطالعه، PCA برای اندازه‌گیری داده‌های مورد مطالعه برای ارزیابی نتایج و درک بیشتر فرایندهای پراکندگی عناصر مورد مطالعه و منشأیابی غلظت عناصر در نمونه‌های رسوب به‌کار رفته است. از چرخش عمودی به‌روش Varimax، برای کاهش واریانس بار هر یک از عوامل و تسهیل متغیرهای ساختار عاملی استفاده شد. برای محدود کردن تعداد عامل‌ها، از آماره کفایت اندازه داده‌ها (KMO) استفاده شد. ضریب KMO برابر ۰/۷۰۲ به‌دست آمد. این تحلیل، به‌کرات در مطالعات مختلف برای منشأیابی غلظت فلزات در رسوبات استفاده شده است و معمولاً قاعده این است که عناصری که در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، به احتمال زیاد از لحاظ منابع کنترل‌کننده یکسان هستند (Křibek et al., 2010) بر اساس این تحلیل، سه مولفه اصلی شناسایی شد (جدول ۱۰).

مولفه نخست ۴۰/۴۷ درصد، مولفه دوم ۲۴/۳ درصد و مولفه سوم ۱۲/۸ درصد از واریانس کل را تشکیل داده است. در مولفه نخست که مولفه اصلی است، فلزات Ni، Cr، As و Cu به‌ترتیب با بارهای عاملی ۰/۹۶، ۰/۹۸، ۰/۷۰ و ۰/۵۷ قرار دارند که دلیل همبستگی بالا و منشأ یکسان عناصر Ni، Cr و As است. Cu دارای همبستگی متوسط با بقیه عناصر در این مولفه است و در مولفه دوم که عمود بر مولفه اصلی است، Cu، Zn و Cd به‌ترتیب با بار عاملی ۰/۷۵،

تحلیل خوشه‌بندی عناصر (شکل ۱۲) نشان می‌دهد که در زیر خوشه A عناصر Zn و Cu دارای رابطه معنی‌دار هستند و مواد آلی نیز در همین زیرخوشه قرار دارند. مواد آلی می‌توانند حامل عنصر Cu باشند. در زیرخوشه B نتایج بیانگر رابطه معنی‌دار ذرات رسی و عناصر Ni و Cr است. این زیرخوشه دارای زیرطبقاتی هست که بالاترین ضریب همبستگی بین Cr و Ni ( $r=0.987$ ,  $p\text{-value}<0.0001$ ) به‌دست آمد، که نشان‌دهنده همبستگی بالای مثبت و معنی‌دار بین این دو فلز از منظر برخاستگاه و شرایط فیزیکی‌وشیمیایی حاکم بر ورود آن‌ها به فاز جامد و کانی‌سازی در رسوبات سطحی رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه است. از طرفی، این دو فلز دارای ارتباط معنی‌دار و همبستگی بالا با مواد رسی ( $r=0.930$ ) کاتیون‌های آزاد در فاز محلول کانون‌های آلودگی در طول بازه مورد مطالعه هستند.

همچنین، در مورد عنصر AS نیز ذرات رس نقش اصلی را ایفا می‌کنند. در زیرخوشه B، Ni و Cr رابطه نزدیک‌تری باهم دارند. با توجه به رابطه متقابل و تشابه بالا بین عنصر Ni، Cr و AS در زیرخوشه B و Zn و Cu در زیرخوشه A، می‌توان بیان کرد که احتمالاً هر یک از این گروه‌ها دارای منابع ورودی و عوامل کنترل‌کننده یکسانی هستند. فلزاتی مانند Zn و Cu معمولاً با کاربری‌های صنعتی و فاضلاب‌های شهری مرتبط و عناصر As، Cr و Ni به‌طور عمده از منابع طبیعی و احتمالاً پساب‌های کشاورزی هستند (Rastmanesh et al., 2015). عنصر Pb، دارای کمینه

مقادیر خطر بالقوه اکولوژیکی کلیه عناصر انتخابی به جز As در نمونه ۲۱ در محدوده خطر کم قرار دارند و AS در نمونه شماره ۲۱ (ساحل شرقی کیان پارس) در محدوده خطر متوسط ( $PER > 40$ ) قرار دارد. مقادیر شاخص خطر برای همه نمونه‌ها در محدوده خطر کم ( $RI < 150$ ) قرار دارد. بر اساس مقایسه معیارهای کیفیت رسوب با استانداردها، رودخانه کارون دارای رسوباتی پاک از منظر عناصر Pb و Cd در بازه مورد مطالعه است. به طوری که ۱۰۰ درصد نمونه‌ها غلظتی کمتر از ISQG دارند. میانگین غلظت شبه فلز سمی As، زیر کمینه سطح آلودگی ISQG است. اما نمونه‌های ۲۱ (فاضلاب ساحل شرقی کیان پارس)، هفت (زیردست پرورش ماهی شیبان)، ۲۲ (فاضلاب کیان پارس)، ۱۶ (زیردست پل شرکت نفت) و پنج (بین ویس و شیبان) دارای غلظتی فراتر از ISQG و به تعبیری در آستانه مخاطره آمیزی هستند (شکل ۵). Cr با ۲۷ درصد و Ni با ۱۰۰ درصد دارای غلظتی فراتر از سطح آلودگی PEL، و کلیه مقادیر به دست آمده برای عناصر Cr و Ni، دارای غلظتی فراتر از غلظت کمینه سطح آلودگی ISQG است. بدین ترتیب، احتمال بروز مسمومیت برای آبریان و بهره‌برداری آب به وسیله عناصر سمی Ni و Cr وجود دارد. مقایسه غلظت عناصر با استانداردها نشان داد که در ایستگاه‌های شماره هفت (زیردست پرورش ماهی شیبان)، ۲۱ (ساحل شرقی کیان پارس) و ۱۰ (فاضلاب کورش)، عناصر Cr و Ni دارای غلظتی فراتر از سطح آلودگی PEL و As بیشتر از حداقل سطح آلودگی ISQG بوده و آلوده‌ترین ایستگاه‌ها در بازه مورد مطالعه هستند. به طوری که در ایستگاه شماره هفت، حداکثر غنی‌شدگی Cr و As هم اتفاق افتاده است.

تحلیل خوشه‌بندی عناصر نشان داد که مواد آلی حامل اصلی عنصر Cu و Zn و ذرات رس حامل اصلی عناصر Ni و Cr هستند. همچنین، در مورد عنصر Cu و As نیز ذرات رس نقش اصلی را ایفا می‌کنند. اما فلز سمی Pb هیچ گونه رابطه معنی‌داری با عناصر دیگر و همچنین، مواد آلی و ذرات رس نشان نداده است. پس عنصر Pb، دارای منشأ متفاوتی نسبت به عناصر Cu، Zn، Cr، Ni و As است. نتایج تحلیل مولفه اصلی، ضمن تایید ضریب همبستگی و تحلیل

۰/۷۰ و ۰/۵۳ که دلیل، همبستگی بالا و منشأ یکسان عناصر Cu و Zn است. اما Cd، دارای همبستگی متوسط با دو عنصر Cu و Zn است. در مولفه سوم، عناصر Pb و Cd به ترتیب با بار عاملی ۰/۸۷ و ۰/۵۷ قرار گرفتند. اثر منابع کنترل‌کننده طبیعی و تحلیل مولفه اصلی نشان داد که ذرات رس با بار عاملی ۰/۹۳ حامل اصلی عناصر Ni، Cr و As و احتمالاً Cu هستند (جدول ۱۱). در مولفه دوم، مواد آلی با بار عاملی ۰/۸۲ حامل اصلی عناصر Cu و Zn هستند و تمام این نتایج به خوبی با ضریب همبستگی پیرسون و تحلیل خوشه‌ای مطابقت دارند.

جدول ۱۱- نتایج ماتریس دوران عوامل حاصل از تحلیل مولفه اصلی

**Table 11.** The results of the period matrix of the factors obtained from the principal component analysis

| Element | The first component | The second component | The third component |
|---------|---------------------|----------------------|---------------------|
| As      | 0.70                | 0.22                 | 0.22                |
| Cd      | 0.09                | 0.53                 | -0.57               |
| Cr      | 0.96                | 0.18                 | -0.09               |
| Cu      | 0.57                | 0.75                 | 0.02                |
| Ni      | 0.98                | 0.09                 | -0.05               |
| Pb      | 0.09                | 0.18                 | 0.87                |
| Zn      | 0.24                | 0.70                 | 0.02                |
| TOC     | 0.06                | 0.82                 | 0.08                |
| clay    | 0.93                | 0.25                 | 0.03                |

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر، منجر به شناخت کافی از وضعیت ژئوشیمیایی و هرگونه تغییر از شرایط طبیعی و آشکارسازی غنی‌شدگی موضعی و موضوعی سطح آلودگی‌ها برای آبریان و بهره‌برداران به‌ویژه حوزه کشاورزی و چرخه غذایی در رودخانه کارون در بازه ویس تا شهر اهواز شده است. نتایج عامل غنی‌شدگی، آلودگی کم تا زیاد را برای عناصر انتخابی نشان دادند. عنصر Zn، دارای غنی‌شدگی متوسط تا قابل ملاحظه و میزان غنی‌شدگی Cu، Ni و Cr در محدوده آلودگی متوسط قرار داشت. شبه فلز As، در محدوده غنی‌شدگی کم تا متوسط و دو عنصر Cd و Pb، دارای غنی‌شدگی کم هستند. میانگین غنی‌شدگی عناصر به ترتیب  $Cd > Pb > As > Cr > Cu > Ni > Zn$  است. بر اساس طبقه‌بندی ژانگ و لیو، Cr، Ni، Zn، Cu و As دارای منشأ انسان‌زاد و Pb و Cd منشأ زمین‌زاد هستند.

جلوگیری از ورود آلاینده‌های خطرناک به‌ویژه As به آب استفاده کرد.

### سپاسگزاری

از همکاری صمیمانه بخش تحقیقات آب‌خیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان جناب آقایان دکتر فریدون سلیمانی و دکتر نظام اصغری پور دشت‌بزرگ در اجرای عملیات میدانی و پژوهش‌شده حفاظت خاک و آب‌خیزداری در اجرای عملیات میدانی و خدمات آزمایشگاهی تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آید.

خوشه‌ای، در تایید عامل غنی‌شدگی نشان داد که Cu، Zn، Cr، Ni و As منشأ انسان‌زاد دارند و عناصر Cd و Pb دارای منشأ زمین‌زاد هستند. این مطالعه، سهم مهمی در تعیین منشأ، آلودگی و خطر اکولوژیکی عناصر بالقوه سمناک دارد و می‌تواند در شناخت منابع آلاینده و کنترل آلاینده‌ها کمک کند. همچنین با توجه به تعداد و نوع نمونه‌برداری از رسوبات رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه، می‌توان از نتایج این پژوهش در مکان‌یابی مناسب برای تعیین مخازن آب شرب شهرها و روستاهای اطراف، به‌منظور

### منابع مورد استفاده

- Ali-Beigi, H., R. Mirzaei and R.Z.A. Mahmoodi. 2017. Investigation of heavy metals concentration in surface sediments of Choghakhor Wetland. *Journal of Environmental Studies*, 43: 149–161 (in Persian).
- Amjadi, M. and A. Khaledi-Darvishan. 2020. Effect of residential area on bed sediment geochemical characteristics in Khamsan Representative Watershed. *Proceedings of 15th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran*. Sari, Iran (in Persian).
- Arzani, N. 1997. *Sedimentology laboratory*. Payame Noor University Press, 129 pages.
- Ashraf, M.A., M. Sarfaraz, N. Rizwan and M. Gharibreza. 2015. *Environmental impacts of metallic elements*. Springer, 444 pages.
- Babapourmofrad, A., S. Rostami, M. Alanejad, M. Frozanfar, E. Khaksar and Z. Ramazani. 2013. Determination of some heavy metals in the Karun and Dez rivers, *Jundishapur Sciences Medical Journal*, 87-100 (in Persian).
- Bagheri, H and V. Khairabadi. 2017. Seasonal assessment of heavy metals concentration in Gorganroud sediments and their origin. *Human and Environment*, 47 (in Persian).
- CCME. 1995. Protocol for the derivation of Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life. Technical Secretariat of the CCME Task Group on Water Quality Guidelines, Ottawa, 48 pages.
- Choopani, S., P. Rezaee and M.R. Gharibreza. 2021. Assessment of heavy metal contamination and distribution in surface sediments of Karun River, Panjoun Bridge to Farsit, using geochemical datas and statistical analysis. *Applied Sedimentology*, 9(18): 133-151(in Persian).
- Choueri, R.B., A. Cesar, R.J. Torres, D.M.D.S. Abessa, R.D. Morais, C.D.S. Pereira and T.A. DelValls. 2009. Integrated sediment quality assessment in Paranaguá estuarine system, Southern Brazil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72(7): 1824-1831.
- Diop, C.h., D. Dewaelé, F. Cazier, A. Diouf and B. Ouddane. 2015. Assessment of trace metals contamination level, bioavailability and toxicity in sediments from Dakar Coast and Saint Louis Estuary in Senegal, West Africa. *Chemosphere*, 138: 980-987.
- EPA. 2001. *Methods for collection, storage and manipulation of sediments for chemical and toxicological analyses: technical manual*. Environmental Protection Agency, 208 pages.
- Folk, R.L. 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Co., Austin, Texas, 182 pages.
- Forghani, G., F. Moore, S. Lee and A. Qishlaqi. 2009. Geochemistry and speciation of metals in sediments of the Maharlu Saline Lake, Shiraz, SW Iran. *Environmental Earth Science*, 59:173–184.
- Fortescue, J.A.C. 1992. Landscape geochemistry: retrospect and prospect. *Applied Geochemistry*, 7(1): 1-53.
- Gamain, P., P. Gonzalez, J. Cachot, P. Pardon, N. Tapie, P.Y. Gourves, H. Budzinski and B. Morin, 2016. Combined effects of pollutants and salinity on embryo-larval development of the Pacific Oyster, *Crassostrea gigas*. *Marine Environmental Research*, 113: 31-38.
- Gharibreza, M.R. and M.A. Ashraf. 2014. *Applied limnology*. Springer, Tokyo, 199 pages.
- Gharibreza, M.R., M. Mahdizadeh and H. Masoumi. 2019. Ecological risk assessment of Rozechai River sediments using sediment quality indices. *Soil Conservation and Watershed Management Research Institute*, 45 pages (in Persian).
- Ghalandarzadeh, F., K. Rezaei Tavabe, R. Haji Sayed Mohamamd shirazi and B. Samadi. 2020. Heavy metal (Cadmium, Chromium, Zinc) evaluation of water and sediment, and assessing the biological value index (Z) in Karaj River. *Journal of Fisheries*, 73(2): 199-212 (in Persian).

- Gharibreza, M.R., M. Mahdizadeh and H. Masoumi. 2020. Assessing the quality of surface sediments in the Tajan River and determining the level of ecological pollution. *Environment and Water Engineering*, 6(4): 485 – 500 (in Persian).
- Hakanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach. *Water Research*, 14(8): 975-1001.
- Holger, L., L. Frohlich, F. Hans-Georg, A. Johan, B. Huisman and B. Kellie. 2008. Water source characterization through spatiotemporal patterns of major, minor and trace element stream concentrations in a complex, mesoscale German catchment. *Hydrological Processes*, 22: 2028–2043.
- Islam, S., M. Bhuiyan, T. Rume, M. Mohinuzzaman and D. Management. 2016. Assessing heavy metal contamination in the bottom sediments of Shitalakhya River, Bangladesh using pollution evaluation indices and geo-spatial analysis. *Pollution*, 2(3): 299–312
- Júnior, J.B., S.I.M. Abreu, D.A.F. Oliveira, G.M. Hadlich and A.C.R. Albergaria-Barbosa. 2020. Combining geochemical and chemometric tools to assess the environmental impact of potentially toxic elements in surface sediment samples from an urban river. *Marine Pollution Bulletin*, 155, 111146.
- Karageorgis, A.P., A.I. Sioulas and C.L. Anagnostou. 2002. Use of surface sediments in Pagassitikos Gulf, Greece, to detect anthropogenic influence. *Geo-Marine Letters*, 21: 200-211.
- Kingston, H.M. and L.B. Jassie. 1998. Introduction to microwave sample preparation theory and practice. ACS Professional Reference Book Series, Washington, DC: American Chemical Society, 10 pages.
- Koaser, S., S. Barrington, M. Elektorowicz and L. Wang. 2003. Effect of Pb and Cd on Cu adsorption by sand–bentonite liner. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(2): 241-249.
- Kříbek, B., V. Majer, F. Veselovský and I. Nyambe. 2010. Discrimination of lithogenic and anthropogenic sources of metals and sulphur in soils of the central-northern part of the Zambian copperbelt mining district: a topsoil vs. subsurface soil concept. *Journal of Geochemical Exploration*, 104(3): 69-86.
- Kusin, F.M., N.N.M. Azani, S.N.M.S. Hasan and N.A. Sulong. 2018. Distribution of heavy metals and metalloid in surface sediments of heavily mined area for bauxite ore in Pengerang, Malaysia and associated risk assessment. *Catena*, 165: 454-464.
- Li, J., Z.Y. Huang, Y. Hu and H. Yang. 2013. Potential risk assessment of heavy metals by consuming shellfish collected from Xiamen, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(5): 2937-47.
- Loring, D.L., K. Naes, S. Dahle, G.G. Matishov and D. Illind. 1995. Arsenic, trace metals, and organic micro contaminants in sediments from the Pechora Sea, Russia. *Mar. Geol.*, 128: 152-167.
- Maanan, M., M. Saddik, M. Chaibi, O. Assobhei and B. Zourarah. 2015. Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador Lagoon, Morocco. *Ecological Indicators*, 48: 616-626.
- Mashal, K., M. Salahat, M. Al-Qinna and Y. Al-Degs. 2015. Spatial distribution of cadmium concentrations in street dust in an arid environment. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(5): 3171-3182.
- Milačič, R., T. Zuliani, J. Vidmar, M. Bergant, E. Kalogianni, E. Smeti, N. Skoulikidis and J. Ščančar. 2019. Potentially toxic elements in water, sediments and fish of the Evrotas River under variable water discharges. *Science of the Total Environment*, 648:1087–1096.
- Mohammadzadeh, Z.h., M. Mohammadiroozbhani and T. Babaei-Nezhad. 2018. Survey of heavy metals accumulation in (*Phragmites australis*) and sediments of Karun River, case study: Ahvaz City. *Wetland Ecology*, 10(1): 64-55 (in Persian).
- Mucha, A.P.M.T.S.D., A.A. Vasconcelos and B. ordalo. 2003. Macrobenthic community in the Douro Estuary: relations with trace metals and natural sediment characteristics. *Environmental Pollution*, 121: 169-180.
- Nasrabadi, T., G. Nabi-Bidhendi, A. Karbassi and N. Mehrdadi. 2010. Evaluating the efficiency of sediment metal pollution indices in interpreting the pollution of Haraz River sediments, southern Caspian Sea Basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 171:395–410.
- Pandey, J. and R. Singh. 2017. Heavy metals in sediments of Ganga River: up and downstream urban influences. *Applied Water Science*, 7(4): 1669-78.
- Radtke, D.B. 2005. Bottom-material samples. Geological Survey, Department of the Interior, National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data, 60 pages.
- Rastmanesh, F., S. Safaie, A.R. Zarasvandi and M. Edraki. 2018. Heavy metal enrichment and ecological risk assessment of surface sediments in Khorramabad River, west Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(5), (in Persian).
- Rastmanesh, F., A. Zarasvandi and F. Muslim. 2015. Evaluation of heavy metal pollution in surface sediments of Karun River in Ahvaz City. *Advanced Applied Geology*, 17, 10 – 22 (in Persian).
- Rayment, G.E. and F.R. Higginson. 1992. Australian laboratory handbook of soil and water chemical methods. Inkata Press, Sydney, 330 pgses.
- Rollinson, H.R. 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical, New York, 352 pages.
- Rickwood, P.C. 1983. Crustal abundance, distribution, and crystal chemistry of the elements. In *Handbook of Exploration Geochemistry*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 40 pages.

- Rubio, B., K. Pye, J.E. Raea and D. Rey. 2001. Sedimentological characteristics, heavy metal distribution and magnetic properties in subtidal sediments, Ría de Pontevedra, NW Spain. *Sedimentology*, 48: 1277-1296.
- Rudnick, R.L. and S. Gao. 2014. Composition of the continental crust. In *Treatise on Geochemistry*, Elsevier, Oxford, 4.1: 1-51.
- Shakeri, A., R. Shakeri and B. Mehrabi. 2015. Potentially toxic elements and persistent organic pollutants in water and fish at Shahid Rajaei Dam, north of Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(7): 2201-12.
- Sinex, S. and D. Wright. 1988. Distribution of trace metals in the sediments and biota of Chesapeake Bay, *Marine Pollution Bulletin*, 19: 425-431.
- Soleimani, F., M.R. Gharibreza and F. Soozangar. 2021. Investigation of the quality and pollution level of surface sediments of Karun River in Ahvaz urban area. *Watershed Management Research*, 34(4): 118-134 (in Persian).
- Sparks-Donald, L. 2003. *Environmental soil chemistry*. Second Edition, Academic Press, 356 pages.
- Suresh, G., P. Sutharsan, V. Ramasamy and R. Venkatachalapathy. 2012. Assessment of spatial distribution and potential ecological risk of the heavy metals in relation to granulometric contents of Veeranam Lake sediments, India. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 84:1-8.
- Sutherland, R.A. and C.A. Tolosa. 2000. Multi-element analysis of road-deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii. *Environmental Pollution*, 110: 483-495.
- Tucker, M.E. 1988. *Techniques in sedimentology*. Blackwells, Oxford, 394 pages.
- Unlu, S., S. Topcuoglu, B. Alpar, C. Kirbasoglu and Y.Z. Yilmaz, 2008. Heavy metal pollution in surface sediment and mussel samples in the Gulf of Gemlik. *Environmental Monitoring and Assessment*, 144(1-3): 169-178.
- Ustaoglu, F. and S. Islam, 2020. Potential toxic elements in sediment of some rivers at Giresun, Northeast Turkey: a preliminary assessment for ecotoxicological status and health risk. *Ecological Indicators*, 113: 106237.
- Varol, M. 2011. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques. *Journal of Hazardous Materials* 195:355-64.
- Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff Method for determining organic carbon in soils: effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science*, 37(1): 29-38.
- Wernimont, G.T. and W. Spendley. 1985. Use of statistics to develop and evaluate analytical methods. In *AOAC International Arlington, VA*, 65 pages
- ZareZadeh, R., P. Rezaee, R. Lak, M. Masoodi and M. Ghorbani. 2017. A study of textural and accumulation heavy metals of sediments in mangrove ecosystem of Persian Gulf, south Iran. *Indian Journal of Geo Marine Sciences*, 46(01): 78-85.
- Zhang, J. and C.L. Liu. 2000. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54, 1051-1070.