



Environmental Assessment of heavy metal in Dez river sediment of Dezful

Saeed Varmarzyar¹, Sediqeh Battaleb-Looie^{2*} and Hakime Amanipour³

1- M.Sc. Dept. of Geology, Faculty of Marine Natural Resources, University of Marine Sciences and Technology, Khoramshahr, Iran

2, 3- Assoc. Prof., Dept. of Geology, Faculty of Marine Natural Resources, University of Marine Sciences and Technology, Khoramshahr, Iran

ARTICLE INFO

Article type:

Original Research

Article history:

Received: 2024 December 7

Accepted: 2025 March 3

Keywords:

Enrichment factor

Geoaccumulation index

Contamination factor
River

ABSTRACT

This study investigated heavy metal contamination in the sediments of the Dez River and analyzes related environmental indices and physicochemical parameters. For this purpose, 25 sediment samples were collected from a limited area of the Dez River, spanning from Cham Golak to Ziba Shahr in Dezful, and analyzed. The results indicated that the pH range of the sediments was between 7.23 and 8.05, with little effect on the concentration of heavy metals. Additionally, the organic matter content in the sediments ranged from 0.28% to 2.54%, with the highest values observed at upstream stations, likely due to the influence of urban sewage, agricultural runoff, and industrial activities. A comparison of the heavy metal concentrations in the sediments with the Earth's crust values showed that the concentrations of arsenic (1.1 mg/kg), bismuth (0.65 mg/kg), and copper (27.92 mg/kg) were higher than typical concentrations in the Earth's crust, while chromium and lead had lower concentrations than the global average. Statistical analyses, including Pearson's correlation coefficient, revealed a significant positive correlation ($r = 0.786$) between chromium and nickel, suggesting a common hydrocarbon-based source for these two elements. Cluster analysis further indicated that stations with lower pollution, located downstream of the river with higher flow rates, were grouped separately. The results of this study highlight the varied impacts of pollutant sources on the concentration of heavy metals in the sediments of the Dez River. While some metals like copper and arsenic have significantly increased in the area, others like lead and chromium have lower concentrations compared to global averages. This could be due to the complex combination of pollutant sources, including agricultural, industrial, and urban activities. These findings suggest the influence of diverse pollution sources, including agricultural, industrial, and urban wastewater, on the heavy metal concentrations in the Dez River sediments.

DOI: <https://doi.org/10.22084/NFAG.2025.30232.1647>

Corresponding author: Sediqeh Battaleb-Looie, E-mail: sblooie@gmail.com

Cite this article: Saeed Varmarzyar, Sediqeh Battaleb-Looie and Hakime Amanipour (2026). Environmental Assessment of heavy metal in Dez river sediment of Dezful, New Findings of Applied Geology, Vol. 20, No. 39, pp: 95-115.



Journal of New Findings of Applied Geology by Bu-Ali Sina University Press is licensed under CC BY-NC 4.0

Web Site: <https://nfag.basu.ac.ir> E-mail: nfag@basu.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Water and sediment quality in aquatic ecosystems are critical indicators of environmental health. The accumulation of heavy metals in sediments, influenced by various natural and anthropogenic factors, poses significant threats to aquatic organisms and human health. This study investigates the sediment quality in the Dez River region, focusing on the concentration of heavy metals, organic materials, pH, and their potential environmental impacts.

Materials and Methods

The study was conducted in the Dez River basin, where sediment samples were collected from various stations along the river. The concentrations of heavy metals, including arsenic, bismuth, copper, chromium, lead, and nickel, were analyzed using standard laboratory techniques. Additionally, the physical and chemical properties of the sediments, such as pH, organic materials, and electrical conductivity (EC), were measured. The study employed various environmental indices to evaluate contamination levels, including enrichment factors (EF), geoaccumulation index (Igeo), and contamination factors (CF).

Results

The pH levels in the sediment samples ranged from 7.23 to 8.05, indicating only minimal variation. This stable pH range did not significantly influence the concentration of heavy metals, as evidenced by the lack of strong correlations between pH and metal concentrations. However, the alkaline nature of the sediment may help limit the mobility of certain metals like nickel and copper.

The organic material content in the sediments ranged from 0.28% to 2.54%. The lowest levels were found at stations 4, 21, and 22, while the highest values were at stations 11, 13, and 14. The presence of high organic material is attributed to urban and agricultural wastewater, as well as the potential influence of fish farming practices upstream, as indicated by studies on wastewater and agricultural runoff.

The study found that the concentrations of arsenic, bismuth, and copper were above the Earth's crust average, suggesting significant contamination, likely from agricultural

chemicals and industrial runoff. Arsenic concentrations (10.1 mg/kg) were notably high, likely due to the use of pesticides and fertilizers containing arsenic. Bismuth levels (0.65 mg/kg) were also elevated, pointing to industrial activities such as mining and waste disposal as possible sources of contamination. In contrast, chromium, lead, and nickel concentrations were lower than the Earth's crust averages, with chromium likely originating from natural geological processes such as rock erosion.

The EF values showed that nickel and copper had minimal enrichment ($EF < 2$), indicating low contamination. However, arsenic exhibited severe enrichment ($EF = 40-20$), suggesting significant pollution. Bismuth had extremely high enrichment ($EF > 40$), indicating intensive contamination. Lead and chromium showed moderate enrichment, confirming the presence of moderate pollution due to anthropogenic activities.

The Igeo values indicated that arsenic and bismuth fell into the "moderately to heavily polluted" category, while the other metals, such as copper, nickel, and chromium, showed lower levels of pollution. Bismuth, with an Igeo value of 3.33, was classified as highly polluted, indicating significant anthropogenic impacts. Arsenic's Igeo of 3.97 also suggested severe contamination at certain sampling sites, particularly in areas where agricultural runoff was prevalent.

Bismuth and arsenic were found to be in the "very high contamination" category ($CF > 6$), indicating extreme pollution. The contamination factor for metals like copper, lead, and chromium was lower, suggesting less significant pollution. The highest CF values for arsenic and bismuth were observed at stations 4, 6, and 8, which are located near agricultural and industrial zones.

Correlation analysis showed no significant relationships between the concentrations of heaviest metals, except for a strong positive correlation between chromium and nickel ($r = 0.786$, $p < 0.01$). This correlation suggests a shared hydrocarbon source for these metals, likely stemming from industrial activities. Additionally, the pH exhibited a negative correlation with organic material content and EC, suggesting that higher pH values lead to lower organic material degradation and reduced conductivity.

Discussion

The findings highlight the significant impact of industrial and agricultural activities on the sediment quality of the Dez River. Elevated levels of arsenic and bismuth, primarily linked to agricultural runoff and industrial effluents, suggest that these metals are of primary concern. Despite the relatively stable pH and moderate organic material content, the contamination levels, particularly for bismuth and arsenic, indicate the pressing need for pollution control measures. The lack of significant correlations between pH and metal concentrations suggests that while pH influences metal mobility, it does not solely dictate their concentration in the sediments. Furthermore, the correlation between chromium and nickel supports the hypothesis that these metals share common industrial sources.

Conclusion

This study underscores the significance of monitoring heavy metal contamination in river sediments, particularly in regions affected by agricultural runoff and industrial activities. The elevated concentrations of arsenic, bismuth, and copper, coupled with the high pollution indices, indicate that these metals pose a significant environmental risk. Further research is needed to assess the long-term impacts of this contamination on aquatic ecosystems and human health, as well as to develop mitigation strategies for reducing heavy metal pollution in the Dez River.



ارزیابی آلودگی زیست‌محیطی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه دز محدوده شهر دزفول

سعید ورمزیا^۱، صدیقه بطالبویی^{۲*} و حکیمه امانی‌پور^۳

۱- کارشناس ارشد زمین‌شناسی، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی، خرمشهر، ایران
 ۲ و ۳- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی، خرمشهر، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳ کلیدواژه‌ها: فاکتور غنی‌شدگی شاخص زمین‌انباشتگی فاکتور آلودگی رودخانه	این پژوهش در محدوده‌ای از رودخانه دز، واقع در استان خوزستان، بین شهر چم‌گلک تا منطقه زیباشهر دزفول انجام شد. این پژوهش به بررسی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه دز و تحلیل‌های مربوط به شاخص‌های زیست‌محیطی و پارامترهای فیزیکوشیمیایی پرداخته است. برای این منظور ۲۵ نمونه رسوب از دو طرف رودخانه به صورت تصادفی - قضاوتی جمع‌آوری شد. نمونه‌ها پس از خشک‌شدن در دمای محیط و عبور از الک ۲۳۰ مش، برای اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکوشیمیایی، و غلظت فلزات سنگین (آرسنیک، بیسموت، کروم، مس، سرب و نیکل) آماده شدند. غلظت فلزات سنگین نیز با استفاده از دستگاه ICP-MS اندازه‌گیری شد. برای ارزیابی آلودگی و منشأ فلزات سنگین، از شاخص‌های زیست‌محیطی شامل ضریب آلودگی (CF)، عامل غنی‌شدگی (EF) و شاخص زمین‌انباشت (Igeo) استفاده شد. تحلیل‌های آماری با نرم‌افزارهای SPSS و Excel انجام گرفت. نتایج نشان داد که دامنه تغییرات pH رسوبات بین ۷/۲۳ و ۸/۰۵ بوده و تأثیر چندانی بر غلظت فلزات سنگین نداشته است. همچنین، میزان مواد آلی در رسوبات بین ۰/۲۸ تا ۲/۵۴ درصد تغییر می‌کند و بالاترین مقادیر در ایستگاه‌های بالادست مشاهده شد که احتمالاً به علت تأثیر فاضلاب‌های شهری، پساب‌های کشاورزی و فعالیت‌های صنعتی است. مقایسه غلظت فلزات سنگین در رسوبات با مقادیر پوستر زمین نشان داد که غلظت آرسنیک (۱/۱ میلی گرم بر کیلوگرم)، بیسموت (۰/۶۵ میلی گرم بر کیلوگرم) و مس (۲۷/۹۲ میلی گرم بر کیلوگرم) بالاتر از مقادیر معمول در پوستر زمین بوده، در حالی که کروم و سرب دارای غلظت کمتری نسبت به میانگین جهانی هستند. تجزیه و تحلیل‌های آماری شامل ضریب همبستگی پیرسون نشان داد که بین فلزات کروم و نیکل همبستگی مثبت و معناداری (۰/۷۸۶) وجود دارد، که نشان‌دهنده منشأ مشترک هیدروکربنی این دو عنصر است. نتایج تحلیل خوشه‌ای نشان داد که ایستگاه‌ها به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند، که بیشترین همبستگی بین ایستگاه‌های ۱۶ و ۲۰ مشاهده شد و کاهش آلودگی در پایین‌دست رودخانه به دلیل احتمالی ویژگی خودپالایی و سرعت بالاتر جریان آب می‌باشد. در حالی که برخی فلزات مانند مس و آرسنیک به‌طور قابل‌توجهی در منطقه افزایش یافته‌اند، دیگر فلزات مانند سرب و کروم غلظت کمتری در مقایسه با میانگین‌های جهانی دارند. این می‌تواند به دلیل احتمالی ترکیب پیچیده منابع آلاینده، شامل فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری باشد. این یافته‌ها حاکی از تأثیر منابع مختلف آلودگی از جمله فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و فاضلاب‌های شهری بر غلظت فلزات سنگین در رسوبات رودخانه دز است.

DOI: <https://doi.org/10.22084/NFAG.2025.30232.1647>

* نویسنده مسئول: صدیقه بطالبویی، E-mail: sblooie@gmail.com

استناد: سعید ورمزیا، صدیقه بطالبویی و حکیمه امانی‌پور (۱۴۰۵). ارزیابی آلودگی زیست‌محیطی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه دز محدوده شهر دزفول، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۲۰، شماره ۳۹، صفحه ۹۵ تا ۱۱۵.

این نشریه علمی رایگان است و حق مالکیت فکری خود را بر اساس لایسنس کپی‌رایت کامنز (CC BY-NC 4.0) به نویسندگان واگذار کرده است.

آدرس وبسایت نشریه: <https://nfag.basu.ac.ir> ایمیل نشریه: nfag@basu.ac.ir

۱- پیشگفتار

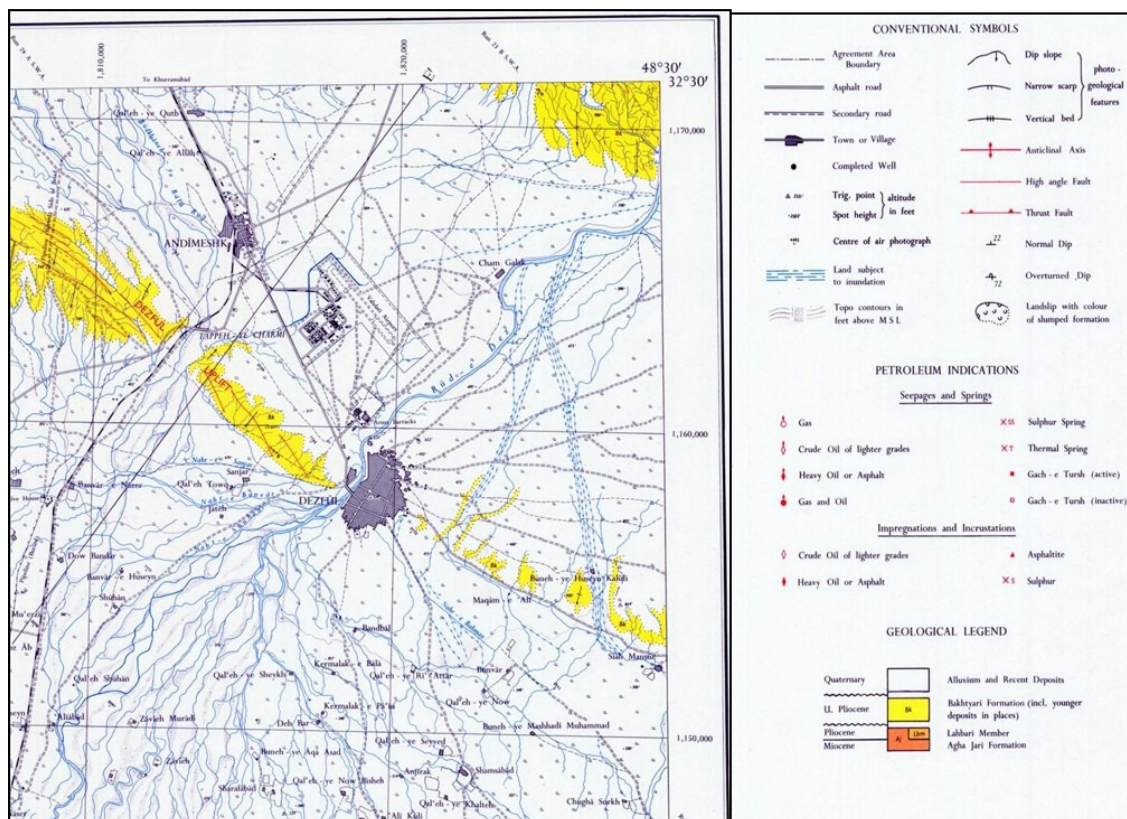
آلودگی رودخانه‌ها یکی از چالش‌های اساسی زیست‌محیطی در دنیای امروزی است که توجه زیادی را در سطح جهانی به خود جلب کرده است (پیرمرد، ۱۳۹۳). رودخانه‌ها به‌عنوان منابع حیاتی آب شیرین برای کشاورزی، شرب و صنعت، نقش مهمی در تأمین منابع آبی و حفظ تعادل اکولوژیکی ایفا می‌کنند. هرگونه آلودگی در این منابع می‌تواند تأثیرات منفی بر کیفیت زیست‌محیطی سایر بخش‌های طبیعت از جمله خاک، هوا و تنوع زیستی داشته باشد (نلسون و همکاران، ۲۰۲۰). از این‌رو، شناخت و بررسی عوامل آلودگی در رودخانه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. از نظر آلودگی، هر رودخانه ظرفیت خاصی برای خودپالایی دارد و چنانچه میزان آلاینده‌ها از این ظرفیت فراتر رود، مشکلات زیست‌محیطی به شکل پایدار و قابل توجهی در اکوسیستم رودخانه ایجاد خواهد شد (کامر و همکاران، ۲۰۱۹). در این بین، رسوبات رودخانه‌ها به دلیل پویایی کمتر نسبت به آب، می‌توانند آلاینده‌ها به‌ویژه فلزات سنگین را در خود متمرکز سازند و به عنوان یک مخزن دائمی آلاینده‌ها عمل کنند (کاتر و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، بررسی غلظت فلزات سنگین در رسوبات بستر رودخانه‌ها می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری در مورد شدت آلودگی و تاریخچه آن ارائه دهد.

یکی از عوامل عمده‌ای که در افزایش غلظت فلزات سنگین در محیط‌های آبی موثر است، کاربرد بی‌رویه کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها در بخش کشاورزی است. این مواد می‌توانند موجب تجمع فلزات سنگین در خاک و سپس ورود آن‌ها به منابع آبی شوند (ابراهیمی، ۱۳۸۷). علاوه بر این، فاضلاب‌های شهری و صنعتی و رواناب‌های کشاورزی که شامل مواد آلی، شوینده‌ها و فلزات سنگین می‌باشند، می‌توانند به‌طور مستقیم به رودخانه‌ها وارد شوند و کیفیت آب را به‌طور قابل توجهی کاهش دهند (عطاران، ۱۳۹۵). به‌ویژه پساب‌های صنایع فلزی مانند مس، سرب، نیکل، روی و کادمیوم و همچنین پساب‌های واحدهای شیمیایی از مهم‌ترین منابع آلودگی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه‌ها به شمار می‌روند (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۱). از آنجا که کیفیت و کمیت آب رودخانه‌ها تحت تأثیر فاضلاب‌های ورودی به مناطق شهری و صنعتی و همچنین رواناب‌های ناشی از فعالیت‌های کشاورزی قرار دارد، این آلودگی‌ها می‌توانند تهدیدی جدی برای سلامت انسان و

موجودات آبی محسوب شوند (لی و همکاران، ۲۰۲۲). تخلیه فاضلاب‌ها به رودخانه‌ها موجب ورود مقادیر زیادی آلاینده، از جمله فلزات سنگین و مواد شیمیایی مضر، به محیط زیست می‌شود. در نتیجه، بررسی دقیق کیفیت آب و رسوبات در این اکوسیستم‌ها ضروری است. در سال‌های اخیر، خشکسالی‌های مداوم و برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی منجر به کاهش منابع آب سالم در بسیاری از کشورها، از جمله ایران شده است. این مسئله همراه با بی‌توجهی به مدیریت صحیح دفع زباله‌ها و فقدان سیستم‌های فاضلاب شهری مناسب، باعث آلودگی گسترده منابع آبی و تهدید جدی برای کیفیت آب آشامیدنی شده است. آلودگی فلزات سنگین در اکوسیستم‌های آبی به راحتی تجمع می‌یابد و می‌تواند منجر به افزایش غلظت‌های آلاینده‌ها در زنجیره غذایی شود (کاتر و همکاران، ۲۰۱۸). این آلودگی‌ها تهدیدی جدی برای سلامت انسان و موجودات وابسته به آب و اکوسیستم‌های آبی محسوب می‌شوند. رودخانه دز با طول ۵۱۵ کیلومتر، از نظر طول در بین رودخانه‌های کشور در مرتبه نهم قرار دارد. این رودخانه از کوه‌های بختیاری و اشترانکوه سرچشمه گرفته و پس از عبور از شمال دزفول، وارد شهر دزفول می‌شود و در نهایت در منطقه‌ای به نام بند قیر به رودخانه کارون می‌پیوندد. سد دز که بر روی این رودخانه در شمال دزفول ساخته شده است، در سال ۱۳۴۱ احداث گردید و با ارتفاع ۲۰۳ متر از پی، یکی از بزرگ‌ترین سدهای کشور به شمار می‌آید (صمدزاده، ۱۳۸۹). این سد نه تنها برای تأمین آب شرب و کشاورزی، بلکه برای کنترل سیلاب‌ها و تولید برق آبی اهمیت فراوانی دارد. منطقه مورد مطالعه در شمال رودخانه دز، از جمله مناطقی است که تحت تأثیر آلودگی‌های مختلف قرار دارد. در این ناحیه، بیشترین آلودگی‌ها ناشی از فاضلاب‌های صنعتی و خانگی است که عمدتاً از شهر دزفول وارد رودخانه می‌شود. در حالی که در بخش‌های پایین‌دست رودخانه، آلودگی‌های ناشی از پساب‌های کشاورزی بیشترین سهم را به خود اختصاص می‌دهند (افروز و همکاران، ۲۰۱۰). این آلودگی‌ها می‌توانند تأثیرات منفی زیادی بر کیفیت آب و اکوسیستم‌های آبی در منطقه داشته باشند. حوضه آبریز رودخانه دز که در محدوده چین‌خوردگی‌های زاگرس میانه قرار دارد و از نظر زمین‌شناسی (شکل ۱) بستر رودخانه دز بر روی سنگ‌های کنگلومرای بختیاری قرار دارد (آذری و همکاران، ۱۳۹۲).

حوضه را تأمین می‌کند. این شرایط اقلیمی باعث می‌شود که رودخانه دز، منبع اصلی تأمین آب در فصل‌های خشک سال باشد و نقش مهمی در کشاورزی و تأمین آب شرب ایفا کند. لذا، با توجه به اهمیت و وضعیت ویژه رودخانه دز، هدف از مطالعه حاضر تعیین غلظت فلزات سنگین در رسوبات سطحی این رودخانه و ارزیابی خطرات زیست‌محیطی و بوم‌شناسی آن‌ها می‌باشد. این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی در جهت کاهش آلودگی و حفاظت از اکوسیستم‌های آبی منطقه محسوب شود.

از نظر موقعیت جغرافیایی در سیستم UTM در عرض‌های شمالی $32^{\circ} 27' 59''$ تا $32^{\circ} 24' 58''$ و طول شرقی $48^{\circ} 29' 59''$ تا $48^{\circ} 26' 10''$ به‌عنوان یک حوضه درجه ۳، زیرمجموعه‌ای از حوضه کارون بزرگ به حساب می‌آید و در تقسیم‌بندی‌های بزرگ‌تر، جزو حوضه خلیج فارس و دریای عمان محسوب می‌شود. در ارتفاعات دامنه‌های غربی و جنوب غربی زاگرس که جزء مناطق پرباران کشور به‌شمار می‌روند، بخش عمده بارش‌ها در فصل‌های پاییز و زمستان به صورت برف می‌بارد و ذوب‌شدن آن‌ها از اواخر زمستان تا اواخر بهار، بخش عمده آب سالانه رواناب‌های سطحی این



شکل ۱. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ دزفول)

Fig. 1. The geology of study area (1:100000 geological map of Dezful)

حاکمی از وجود منابع متنوع آلاینده در طول رودخانه است که شامل پساب‌های صنعتی، کشاورزی، انسانی و همچنین رواناب‌های شهری می‌شود و به داخل رودخانه تخلیه می‌گردند (شکل ۳). پس از انجام بازدیدهای میدانی، تعداد ۲۵ نمونه رسوب از دو طرف رودخانه محدوده‌ای از رودخانه دز حداقل شهر چم گلک تا منطقه زیبا شهر دزفول به‌صورت تصادفی-قضاوتی و با سطح مقطع ۰/۱ متر مربع برداشته

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نمونه‌برداری

در این پژوهش، به‌منظور دستیابی به الگویی مشخص از روند انتقال عناصر، تعیین منابع آلاینده و همچنین مشخص نمودن محل‌های نمونه‌برداری، ابتدا رودخانه دز به دو بخش تقسیم شد: حاشیه شمالی و حاشیه جنوبی. بازدیدهای میدانی در چندین مرحله انجام شد. مشاهدات میدانی

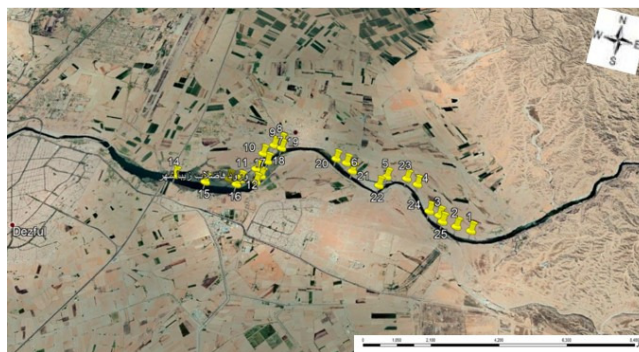
نمونه‌ها به صورت دستی و با استفاده از بیلچه پلاستیکی جمع‌آوری شدند. در طول فرآیند نمونه‌برداری، تلاش شد که روش‌های استاندارد نمونه‌برداری طبق دستورالعمل‌های EPA^۱ رعایت گردد (آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا، ۱۹۹۴ و ۲۰۰۱).

شد. برای دقت بیشتر، نمونه‌ها به صورت مرکب از رسوبات مختلف رودخانه جمع‌آوری شدند (شکل ۲ و جدول ۱). در هر ایستگاه، از هر نقطه حدود دو کیلوگرم نمونه رسوب در کیسه‌های پلاستیکی ضخیم پلی‌اتیلنی برداشت گردید. در انتخاب محل‌های نمونه‌برداری، تلاش شد که فاصله تقریبی ۵۰۰ متری بین مکان‌های نمونه‌برداری در نظر گرفته شود.

جدول ۱. نقاط جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری

Table 1. geographical coordinates of sampled sites (in UTM)

	latitude	longitude
۱	۳۲°۲۷'۲۹.۳۲"	۴۸°۲۹'۳۱.۸۱"
۲	۳۲°۲۷'۲۵.۲۹"	۴۸°۲۹'۱۴.۰۷"
۳	۳۲°۲۷'۳۰.۲۶"	۴۸°۲۸'۳۷.۰۲"
۴	۳۲°۲۷'۱۵.۲۳"	۴۸°۲۸'۱۳.۲۱"
۵	۳۲°۲۶'۵۷.۲۲"	۴۸°۲۷'۳۷.۶۸"
۶	۳۲°۲۶'۲۶.۹۷"	۴۸°۲۶'۳۹.۳۵"
۷	۳۲°۲۶'۱۹.۵۱"	۴۸°۲۶'۳۸.۵۸"
۸	۳۲°۲۶'۷.۷۱"	۴۸°۲۶'۴۰.۲۷"
۹	۳۲°۲۵'۵۴.۶۸"	۴۸°۲۶'۵۱.۰۰"
۱۰	۳۲°۲۵'۳۸.۸۳"	۴۸°۲۶'۵۲.۳۸"
۱۱	۳۲°۲۵'۳۱.۹۴"	۴۸°۲۶'۴۵.۰۳"
۱۲	۳۲°۲۶'۲۶.۴۷"	۴۸°۲۶'۳۹.۰۵"
۱۳	۳۲°۲۴'۵۸.۷۹"	۴۸°۲۶'۱۰.۶۱"
۱۴	۳۲°۲۵'۱۵.۱۶"	۴۸°۲۶'۳۴.۳۸"
۱۵	۳۲°۲۵'۳۳.۹۵"	۴۸°۲۶'۵۴.۳۷"
۱۶	۳۲°۲۵'۴۶.۶۴"	۴۸°۲۷'۲.۱۱"
۱۷	۳۲°۲۵'۵۴.۲۶"	۴۸°۲۷'۰.۸۲"
۱۸	۳۲°۲۶'۶.۱۸"	۴۸°۲۶'۵۰.۴۷"
۱۹	۳۲°۲۶'۲۲.۹۶"	۴۸°۲۶'۴۵.۷۷"
۲۰	۳۲°۲۶'۴۴.۹۷"	۳۲°۲۶'۴۴.۹۷"
۲۱	۳۲°۲۶'۵۲.۹۵"	۴۸°۲۷'۲۷.۸۶"
۲۲	۳۲°۲۶'۵۶.۱۷"	۴۸°۲۷'۴۸.۴۷"
۲۳	۳۲°۲۷'۴.۹۷"	۴۸°۲۸'۱۶.۰۶"
۲۴	۳۲°۲۷'۲۷.۰۶"	۴۸°۲۸'۲۶.۰۹"
۲۵	۳۲°۲۷'۲۳.۶۶"	۴۸°۲۹'۲۰.۵۷"



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده بر روی رودخانه دز (مکان‌های زرد رنگ) (برگرفته از Google Earth)

Fig. 2. The location of the sampled stations on the Dez River (yellow markers)



شکل ۳. ورود فاضلاب شهری به رودخانه دز

Fig. 3. An example of urban wastewater entering the Dez River

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌های رسوب

در این مطالعه، ابتدا نمونه‌های جمع‌آوری شده در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) خشک شده و به صورت همگن درآمدند. سپس از الک ۲۳۰ مش (۶۲ میکرون) عبور داده شدند تا به صورت یک نمونه هموژن آماده برای انجام آزمایش‌ها گردد. نمونه‌های الک‌شده برای اندازه‌گیری پارامترهای pH، EC و TOM و نمونه‌های آسیاب‌شده برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین بسته‌بندی شدند. پارامترهای EC و pH رسوبات طبق روش $D 9045$ آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا، ۱۹۹۷) انجام شد. در این روش، مخلوطی از خاک و آب با نسبت ۱ به ۲/۵ در بشر تهیه شده و به مدت ۳۰ دقیقه روی استیرر قرار گرفت تا کاملاً همگن شود. سپس مخلوط برای یک تا دو ساعت رها شده تا به تعادل برسد. بعد از آن، با استفاده از pH متر و EC متر کالیبره شده مدل 84-WP ساخت شرکت TPS استرالیا، به ترتیب میزان pH و EC لایه‌ی بالایی رسوب ته‌نشین‌شده اندازه‌گیری شد. جهت تعیین درصد مواد آلی موجود در رسوب، ابتدا کروزه‌های چینی وزن‌شده (مقدار آن با حرف C نشان داده شد) انتخاب گردید. سپس کروزه‌ها تا نیمه از رسوب پر شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون حرارت داده شدند. پس از این زمان، کروزه‌ها به مدت ۱۰ تا ۲۰ دقیقه در دمای آزمایشگاه در دسیکاتور قرار گرفتند تا سرد شوند. پس از سرد شدن، مجدداً وزن شدند (مقدار آن با حرف A نشان داده شد).

سپس کروزه‌ها در کوره قرار گرفتند و به مدت ۸ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند تا مواد آلی بسوزند و تنها خاکستر باقی بماند. پس از سرد شدن، وزن مجدد گرفته شد (مقدار آن با حرف B نشان داده شد). درصد مواد آلی (TOM) هر ایستگاه طبق رابطه زیر محاسبه گردید (بوچانان، ۱۹۸۴):

$$TOM = (A - B / A - C) \times 100$$

اندازه‌گیری فلزات سنگین با استفاده از دستگاه ICP-MS در آزمایشگاه زرآما تهران انجام شد. ابتدا مقدار مشخصی از رسوب (معمولاً ۰/۵ تا ۱ گرم) توزین شده و در یک ظرف تفلون یا شیشه‌ای مقاوم به اسید قرار گرفت. سپس ترکیب اسیدهای HNO_3 و HCl به نمونه اضافه گردید و نمونه در دمای بالا (۱۵۰-۱۸۰ درجه سانتی‌گراد) هضم شد. محلول حاصل از هضم از فیلتر (معمولاً ۰/۴۵ میکرون) عبور داده شد تا ذرات جامد باقی‌مانده جدا شوند. سپس نمونه به حجم مشخصی (معمولاً ۵۰ یا ۱۰۰ میلی‌لیتر) با آب دیونیزه رقیق شد و پس از آماده‌سازی به دستگاه ICP-MS تزریق گردید (بتینلی و همکاران، ۲۰۰۰).

۲-۳- ضرایب زیست‌محیطی

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی توزیع فلزات سنگین در رسوبات، از شاخص‌های آلودگی نظیر ضریب آلودگی (CF)، عامل غنی‌شدگی (EF) و شاخص زمین‌انباشت (Igeo) استفاده شد. این شاخص‌ها ابزارهایی کارآمد برای بررسی میزان آلودگی و تأثیرات ناشی از منابع طبیعی و انسان‌زاد

آلودگی و میزان تأثیر عوامل انسانی در مقایسه با عوامل طبیعی در محیط خاک و رسوبات به کار می‌رود. این شاخص از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$I_{geo} = \log_2(Cn/1.5Bn) \quad \text{معادله ۲}$$

همچنین، برای تعیین آلودگی خاک به عناصر سنگین، از فاکتور آلودگی استفاده می‌شود. براساس فاکتور آلودگی، می‌توان میزان فلزات را نسبت به مقدار طبیعی آن‌ها سنجید و شدت آلودگی خاک را ارزیابی کرد (هاکانسون، ۱۹۸۰). رابطه فاکتور آلودگی مطابق معادله (۳) است و جدول ۲، رده‌بندی فاکتور آلودگی را نشان می‌دهد.

$$Cf = \frac{c(\text{Sample})}{c(\text{Background})} \quad \text{معادله ۳}$$

۲-۴- نرم‌افزار

تجزیه و تحلیل داده‌ها و همچنین ترسیم نمودارها و جداول با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۲ و همچنین EXCEL استفاده شد.

۳- نتایج

پارامترهای EC، pH و نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در نمونه رسوب ۲۵ ایستگاه در جدول ۳ ارائه شده است. شاخص‌های زیست‌محیطی شامل فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشت، و فاکتور آلودگی بر اساس معادلات ۲، ۱ و ۳ در جدول‌های (۴ و ۵ و ۶) ارائه شده است. شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نمودار جعبه‌ای شاخص‌های زیست‌محیطی در نمونه‌های رسوب رودخانه دز را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین میانگین این شاخص‌ها مربوط به عنصر بیسموت و سپس آرسنیک می‌باشد.

هستند. یکی از روش‌های متداول برای تعیین منشأ آلاینده‌ها، استفاده از عامل غنی‌شدگی (EF) است که برای بیان میزان تأثیر عامل خارجی بر رسوبات به کار می‌رود. ارزیابی این عامل، روش مناسبی برای تشخیص تأثیر منشأ لیتوژنیک (طبیعی) و آنتروپوژنیک (انسان‌زاد) آلودگی فلزی به شمار می‌رود (آدامو و همکاران، ۲۰۰۵؛ ژانگ، ۲۰۰۷). به‌طور خاص، فاکتور غنی‌شدگی می‌تواند میزان اثرات انسان‌زاد بر خاک‌ها را با مقایسه غلظت عناصر در نمونه‌ها با غلظت‌های پس‌زمینه (زمینه طبیعی) مشخص کند. این فاکتور به‌دلیل فرمول جهانی خود، ابزاری ساده برای ارزیابی درجه غنی‌شدگی و مقایسه آلودگی در محیط‌های مختلف است. پژوهشگران مختلفی عناصر مرجع متفاوتی را برای تعیین مقدار فاکتور غنی‌شدگی به کار برده‌اند که از آن جمله می‌توان به آلومینیوم، آهن، اسکاندیوم، کبالت و تیتانیوم اشاره کرد، زیرا این عناصر در نمونه‌های آزمایش شده تأثیری ندارند (شهبازی و همکاران، ۲۰۱۱؛ شایسته‌فر و همکاران، ۲۰۱۲) در این پژوهش، عنصر آلومینیوم به عنوان عنصر مرجع انتخاب شده است. با استفاده از این فاکتور، می‌توان غلظت عناصر را نسبت به مقدار طبیعی خود سنجید. برای محاسبه فاکتور غنی‌شدگی عناصر سنگین در خاک‌های منطقه مطالعه از رابطه (۱) استفاده شد (لوسکا و همکاران، ۱۹۹۵)

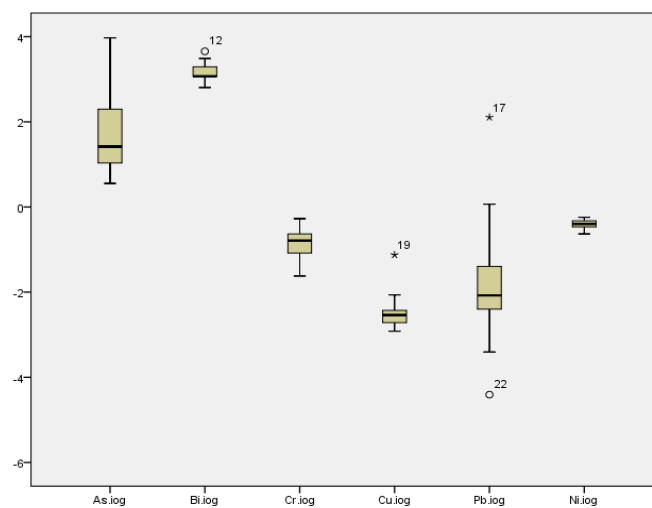
$$EF = \frac{\left(\frac{C_m}{C_n}\right)_{\text{Sample}}}{\left(\frac{C_m}{C_n}\right)_{\text{Reference Sample}}} \quad \text{معادله ۱}$$

به‌منظور ارزیابی شدت آلودگی، می‌توان از شاخص زمین‌انباشتگی که توسط مولر (۱۹۹۶) معرفی شده است، استفاده کرد. این شاخص به‌طور خاص برای ارزیابی آلودگی خاک از طریق مقایسه میزان فلزات سنگین در حال حاضر با مقادیر فلزات در شرایط پیش از صنعتی‌شدن طراحی شده است. شاخص زمین‌انباشتگی برای مشخص کردن درجه

جدول ۲. رده‌بندی فاکتور آلودگی فلزات سنگین

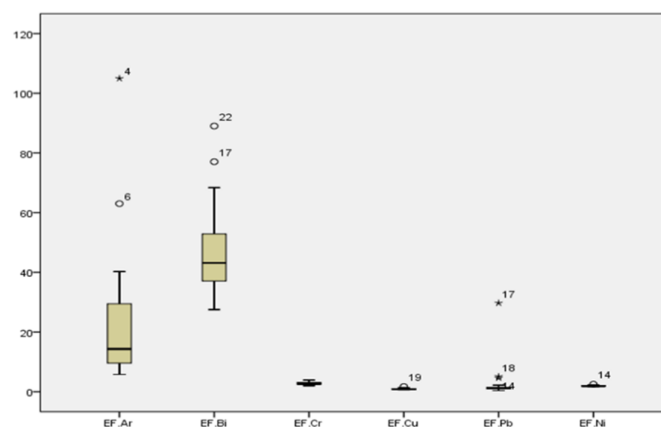
Table 2. Contamination factor classification of heavy metals

آلودگی	شاخص CF
آلودگی کم	$CF < 1$
آلودگی متوسط	$1 < CF < 3$
آلودگی بالا	$3 < CF < 6$
آلودگی شدید (بسیار بالا)	$6 > CF$



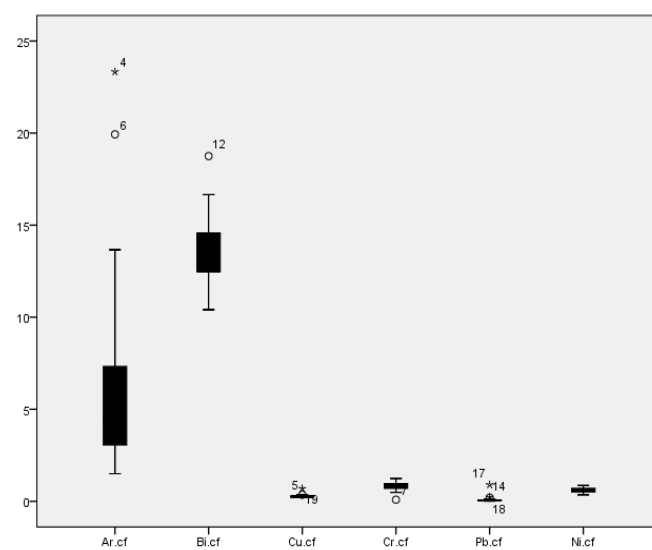
شکل ۴. نمودار جعبه‌ای شاخص غنی‌شدگی

Fig. 4. Bar charts of enrichment factors



شکل ۵. نمودار جعبه‌ای شاخص زمین‌انباشت

Fig. 5. Bar charts of geoaccumulation index



شکل ۶. نمودار جعبه‌ای فاکتور آلودگی

Fig. 6. Bar charts of contamination factors

جدول ۳. غلظت فلزات سنگین (ppm) و پارامترهای فیزیکی و شیمیایی در نمونه رسوب

Table 3. The content of heavy metals and physiochemical parameters in the sediment samples

ایستگاه	EC	pH	مواد آلی	آرسنیک	بیسموت	کروم	مس	سرب	نیکل
P-1	۱	۷/۹۶	۰/۷	۶	۰/۸	۶۱	۲۷	۴	۳۸
P-2	۱/۱	۸۲/۷	۰۸/۱	۴/۹	۰/۸	۸۵	۲۷	۱۰	۵۴
P-3	۰/۹۳	۸۱/۷	۲۷/۱	۶	۰/۶	۷۱	۲۵	۴	۴۵
P-4	۲/۰۸	۷۲/۷	۶/۰	۳۵	۰/۶	۶۹	۲۳	۲	۳۱
P-5	۱/۳۲	۷۳/۷	۶۳/۰	۸/۳	۰/۶	۸۶	۳۶	۴	۴۳
P-6	۱/۲۲	۷۲/۷	۵۵/۱	۹/۲۹	۰/۸	۸۴	۲۸	۵	۴۸
P-7	۱/۶	۷۷/۷	۶۷/۰	۴/۲۰	۰/۷	۹۰	۳۰	۷	۵۷
P-8	۱/۹۹	۵۶/۷	۷/۰	۶/۴	۰/۶	۹۲	۲۱	۳	۳۸
P-9	۱/۳۱	۵۹/۷	۴۴/۰	۴/۳	۰/۶	۷۷	۲۷	۲	۲۹
P-10	۲/۳۵	۶۴/۷	۱۱/۱	۸/۶	۰/۵	۸۹	۲۴	۵	۵۶
P-11	۱/۷۱	۵۴/۷	۴۳/۲	۲/۱۰	۰/۶	۱۰۶	۲۷	۶	۶۹
P-12	۱/۳	۵۲/۷	۸۳/۱	۵/۲۰	۰/۹	۸۷	۲۶	۵	۴۶
P-13	۱/۷	۵۷/۷	۵۴/۲	۱/۲۰	۰/۷	۹۷	۲۸	۶	۵۳
P-14	۱/۹	۳۶/۷	۴۳/۲	۶/۵	۰/۶	۱۱۵	۲۵	۲۲	۶۹
P-15	۱/۳	۵۸/۷	۹۲/۱	۳/۳	۰/۷	۸۸	۲۶	۸	۵۶
P-16	۳/۳۲	۲۳/۷	۳۳/۲	۳/۳	۰/۵	۷۰	۲۱	۴	۴۲
P-17	۰/۷	۶/۷	۸۵/۰	۴/۳	۰/۸	۵۴	۲۴	۹۰	۳۲
P-18	۲/۰۰	۵/۷	۰۷/۱	۴	۰/۷	۶۵	۲۳	۲۰	۴۱
P-19	۱/۱۹	۸۱/۷	۷۵/۰	۱/۵	۰/۶	۷۸	۶۹	۱۲	۶۱
P-20	۱/۳۲	۷۴/۷	۱۳/۱	۶/۴	۰/۷	۹۹	۳۱	۶	۶۲
P-21	۱/۱	۰۰/۸	۶/۰	۶/۹	۰/۶	۱۲۴	۳۵	۲	۶۳
P-22	۱/۵۲	۸/۷	۲۸/۰	۹/۹	۰/۷	۴۹	۲۰	۱	۲۸
P-23	۱/۵	۷۷/۷	۴۸/۱	۱۱	۰/۷	۱۰۸	۲۲	۵	۴۹
P-24	۱/۵	۸۴/۷	۲۳/۱	۸/۱۲	۰/۶	۹۰	۲۲	۴	۴۸
P-25	۰/۶۴	۰۵/۸	۸۸/۰	۵/۱۰	۰/۶	۱۰۰	۳۱	۸	۶۳

جدول ۴. فاکتور غنی‌شدگی در نمونه رسوب

Table 4. Enrichment factor of sediment samples

ایستگاه	آرسنیک	بیسموت	کرم	مس	سرب	نیکل
P-1	15.55	68.40	2.37	1.04	1.11	1.84
P-2	7.85	49.00	2.50	0.79	2.10	1.98
P-3	14.72	46.30	2.61	0.92	1.05	2.07
P-4	104.97	56.20	3.10	1.03	0.64	1.74
P-5	8.37	41.30	2.84	1.19	0.94	1.77
P-6	63.02	52.20	2.65	0.88	1.12	1.89
P-7	39.37	42.20	2.60	0.86	1.44	2.06
P-8	11.85	48.30	3.55	0.86	0.84	1.83
P-9	14.35	62.50	3.85	1.35	0.71	1.81
P-10	11.98	27.50	2.35	0.63	0.94	1.85
P-11	18.22	33.50	2.84	0.72	1.14	2.31
P-12	36.09	62.98	2.92	0.87	1.19	1.93
P-13	37.37	40.67	2.70	0.78	1.43	1.84
P-14	10.93	36.62	3.36	0.73	4.60	2.52
P-15	5.79	38.39	2.31	0.68	1.50	1.84
P-16	7.83	37.10	2.49	0.74	1.01	1.86
P-17	10.48	77.06	2.49	1.10	29.72	1.84
P-18	9.57	52.35	2.33	0.82	5.12	1.84
P-19	8.67	31.90	1.99	1.76	2.18	1.94
P-20	8.16	38.84	2.63	0.82	1.14	2.06
P-21	12.64	34.37	3.40	0.96	0.39	2.16
P-22	40.28	89.02	2.99	1.22	0.43	2.13
P-23	26.58	52.87	3.91	0.79	1.29	2.22
P-24	29.45	43.15	3.10	0.75	0.98	2.07
P-25	16.78	29.97	2.39	0.74	1.37	1.88

جدول ۵. شاخص زمین‌انباشت

Table 5. I_{geo} index

ایستگاه	ارسنیک	بیس‌موت	کرم	مس	سرب	نیکل
P-1	1.42	3.49	-1.30	-2.48	-2.40	-0.5
P-2	1.13	3.49	-0.82	-2.48	-1.07	-0.35
P-3	1.42	3.07	-1.08	-2.59	-2.40	-0.43
P-4	3.97	3.07	-1.12	-2.71	-3.40	-0.59
P-5	0.76	3.07	-0.81	-2.07	-2.40	-0.45
P-6	3.74	3.49	-0.84	-2.43	-2.08	-0.40
P-7	3.19	3.29	-0.74	-2.33	-1.59	-0.32
P-8	1.04	3.07	-0.71	-2.85	-2.82	-0.50
P-9	0.94	3.07	-0.97	-2.48	-3.40	-0.62
P-10	1.60	2.81	-0.76	-2.65	-2.08	-0.33
P-11	2.19	3.07	-0.50	-2.48	-1.81	-0.24
P-12	3.20	3.66	-0.79	-2.54	-2.08	-0.42
P-13	3.17	3.29	-0.63	-2.43	-1.81	-0.35
P-14	1.32	3.07	-0.38	-2.59	-0.07	-0.24
P-15	0.55	3.29	-0.77	-2.54	-1.40	-0.33
P-16	0.55	2.81	-1.10	-2.85	-2.40	-0.46
P-17	0.60	3.49	-1.48	-2.65	2.11	-0.57
P-18	0.83	3.29	-1.21	-2.71	-0.07	-0.47
P-19	1.18	3.07	-0.95	-1.12	-0.81	-0.29
P-20	1.04	3.29	-0.60	-2.18	-1.81	-0.29
P-21	1.62	3.07	-0.28	-2.11	-3.40	0.28
P-22	2.14	3.29	-1.62	-2.92	-4.41	-0.63
P-23	2.30	3.29	-0.48	-2.78	-2.08	-0.39
P-24	2.52	3.07	-0.74	-2.78	-2.40	-0.40
P-25	2.23	3.07	-0.59	2.78	-1.40	-0.28

جدول ۶. شاخص ضریب آلودگی در نمونه‌های رسوب

Table 6. contamination factor of sediment samples

ایستگاه	ارسنیک	بیس‌موت	کرم	مس	سرب	نیکل
P-1	4	16.66	0.61	0.27	0.04	0.47
P-2	3.26	16.66	0.85	0.27	0.10	0.67
P-3	4	12.50	0.71	0.25	0.04	0.56
P-4	23.33	12.50	0.69	0.23	0.02	0.38
P-5	2.53	12.50	0.86	0.36	0.04	0.53
P-6	19.93	16.66	0.84	0.28	0.05	0.60
P-7	13.60	14.58	0.09	0.30	0.07	0.71
P-8	3.06	12.50	0.92	0.21	0.03	0.47
P-9	2.86	12.50	0.77	0.27	0.02	0.36
P-10	4.53	10.41	0.89	0.24	0.05	0.70
P-11	6.80	12.50	1.06	0.27	0.06	0.86
P-12	13.66	18.75	0.87	0.26	0.05	0.57
P-13	13.40	14.58	0.97	0.28	0.06	0.66
P-14	6.73	12.50	1.15	0.25	0.22	0.86
P-15	2.20	14.58	0.88	0.26	0.08	0.70
P-16	1.50	10.41	0.70	0.21	0.04	0.52
P-17	2.66	16.66	0.54	0.24	0.90	0.40
P-18	2.60	14.58	0.65	0.23	0.20	0.51
P-19	3.40	12.50	0.78	0.69	0.12	0.76
P-20	3.06	14.58	0.99	0.31	0.06	0.77
P-21	4.60	12.50	1.24	0.35	0.02	0.78
P-22	6.60	14.58	0.49	0.20	0.01	0.35
P-23	7.33	14.58	1.08	0.22	0.05	0.61
P-24	8.53	12.50	0.90	0.22	0.04	0.60
P-25	7	12.50	1.00	0.31	0.08	0.78

۳-۱- ضریب همبستگی

در جدول (۷) ضریب همبستگی محاسبه شده به روش پیرسون بین غلظت فلزات و با دیگر پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های رسوب ارائه شده است.

۴- بحث

۴-۱- pH

مقادیر pH یکی از شاخص‌های مهم کیفیت محیط‌زیست و درجه آلودگی در سیستم‌های آبی است در این پژوهش، مقدار pH های رسوب نشان می‌دهد که دامنه تغییرات pH رسوبات در گستره حداقل ۷/۲۳ و حداکثر ۸/۰۵ متغیر است. دامنه تغییرات بسیار کم این پارامتر، تأثیر چندانی بر غلظت فلزات سنگین را نشان نداد.

۴-۲- مواد آلی

با توجه به نتایج حاصل، مقدار مواد آلی در محدوده ۰/۲۸ تا ۲/۵۴ درصد متغیر است. کمترین مقدار مواد آلی مربوط به ایستگاه‌های ۴، ۲۱ و ۲۲ بوده و بیشترین درصد مواد آلی مربوط به ایستگاه‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ است. این میزان مواد آلی در منطقه می‌تواند به علت فاضلاب‌های شهری و روستایی مسیر رودخانه (لئو و همکاران، ۲۰۲۱)، پساب کشاورزی و صنایع (سینگ و ورما، ۲۰۲۳؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۴) و احتمالاً لاشه‌های ماهی‌های استخرهای پرورش ماهی در بالادست باشد.

۴-۳- فلزات سنگین

جدول (۸) مقایسه‌ای از غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در رسوبات منطقه مورد بررسی با نتایج سایر مطالعات را ارائه می‌دهد. با بررسی نتایج حاصل از این مقایسه در جدول فوق مشخص شد که میزان آرسنیک، بیسموت و مس رسوبات منطقه مورد مطالعه از میانگین این فلزات در پوسته زمین بیشتر می‌باشد اما میزان کرم، سرب و نیکل منطقه مورد مطالعه کمتر از غلظت پوسته زمین است. مقادیر بالا آرسنیک در این مطالعه (۱۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به میانگین پوسته ۱/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) می‌تواند ناشی از کاربرد علف‌کش‌ها و کودهای حیوانی در کشاورزی باشد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ اولو و همکاران، ۲۰۲۵). در رودخانه دز، شواهدی از آلودگی آرسنیک مشاهده می‌شود که احتمالاً ناشی از منابعی مانند

آب، خاک، کودهای حیوانی و محصولات کشاورزی آلوده به آرسنیک است. بیشترین سهم این آلودگی به استفاده از علف‌کش‌ها و آفت‌کش‌های شیمیایی در فعالیت‌های کشاورزی مربوط می‌شود (جعفرزاده و همکاران، ۲۰۰۴). استفاده از آفت‌کش‌ها در کشاورزی می‌تواند از طریق مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم، از جمله حضور آرسنیک در برخی از آفت‌کش‌ها، تغییرات شیمیایی خاک به وسیله آفت‌کش‌ها، و تأثیرات آن‌ها بر جمعیت‌های میکروبی که در تبدیل آرسنیک نقش دارند، منجر به آلودگی آرسنیک در رسوبات شوند. این اثرات می‌تواند منجر به افزایش غلظت آرسنیک در بستر رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و دیگر محیط‌های رسوبی شود که تهدیدی برای سلامت محیط‌زیست و انسان‌ها به شمار می‌رود (علی و همکاران، ۲۰۲۱).

در این پژوهش، مقدار غلظت فلز بیسموت (۰/۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) اندازه‌گیری شده که از غلظت پوسته زمین (۰/۰۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بسیار بیشتر است و نسبت به غلظت فلز در رسوبات دو رودخانه آغدره، شمال تکاب (۰/۴۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و بایچه باغ، شمال غرب زنجان (۰/۳۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است. با توجه به اینکه منابع آلودگی بیسموت در رسوبات متنوع هستند و عمدتاً، فعالیت‌های صنعتی، رواناب‌های کشاورزی، رسوب‌گذاری جوی، فرآیندهای مدیریت پسماند و زمین‌شناسی می‌توانند منجر به تهدید برای محیط‌زیست و سلامت انسان‌ها گردد (یوان و همکاران، ۲۰۲۳؛ چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۲۳؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

مقدار کروم با غلظت میانگین کمتر از پوسته (۵۸/۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نمونه‌ای رسوب، می‌تواند به‌طور طبیعی از طریق فرآیندهای زمین‌شناسی مانند فرسایش سنگ‌ها و خاک‌ها وارد رودخانه‌ها شود. کروم به‌طور طبیعی در پوسته زمین به‌عنوان یک جزء از سنگ‌ها و مواد معدنی یافت می‌شود، و در نتیجه فرسایش و تخریب سنگ‌ها، این فلز می‌تواند وارد رسوبات رودخانه‌ها و سایر اکوسیستم‌های آبی شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱). از دیگر منابع احتمالی آلودگی می‌توان به فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در منطقه اشاره کرد، از جمله صنایع فولاد و تولید آلیاژهای فولادی، ابزارهای برش، شرکت‌های تولید رنگ و صنایع شیشه‌سازی که در بالادست رودخانه دز واقع شده‌اند (تکر و اریلماز، ۲۰۲۰).

جدول ۷. ماتریس همبستگی پارامترهای نمونه‌های رسوب منطقه

Table 7. Correlation matrix of parameters of sediment samples

	EC	pH	مواد الی	آرسنیک	بیسموت	کرم	مس	سرب	نیکل
EC	1								
	0								
pH	-0.771**	1							
	0.000	0							
مواد الی	0.404*	-0.617**	1						
	0.045	0.001	0						
آرسنیک	0.140	0.101	0.072	1					
	0.504	0.630	0.733	0					
بیسموت	-0.111	-0.108	0.214	-0.144	1				
	0.597	0.607	0.304	0.491	0				
کرم	-0.120	0.069	0.375	0.020	0.012	1			
	0.567	0.744	0.065	0.923	0.955	0			
مس	-0.331	0.301	-0.191	-0.116	-0.049	0.122	1		
	0.106	0.143	0.361	0.581	0.815	0.583	0		
سرب	0.034	-0.186	-0.014	-0.226	0.001	-0.295	-0.029	1	
	0.872	0.373	0.948	0.278	0.995	0.152	0.892	0	
نیکل	-0.192	0.090	0.462*	-0.097	0.107	0.786**	0.381	-0.151	1
	0.375	0.090	0.020	0.644	0.610	0	0.061	0.471	0

جدول ۸. غلظت فلزات سنگین مورد مطالعه در رسوبات منطقه را در مقایسه با پوسته

Table 8. heavy metals of sediment samples compared to crust

منطقه	آرسنیک	بیسموت	کرم	مس	سرب	نیکل	منبع
شیل جهانی	۱۳		۹۰	۴۵	۲۰	۶۸	سدیک و همکاران، ۲۰۱۹
میانگین پوسته	۱/۷	۰/۰۸۵	۱۰۰	۲۵	۱۴/۸۱	۵۶	کاباتا و پندیاس، ۲۰۰۰
مطالعه حاضر	۱۰/۱	۰/۶۵	۵۸/۳۶	۲۷/۹۲	۹/۸	۴۸/۸۴	

صنعتی که دارای غلظت بالایی از فلزات سنگین هستند، می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم به آلوده شدن رسوبات در مناطق اطراف رودخانه‌ها و دریاچه‌ها منجر شوند. نتایج مقایسه میانگین غلظت سرب در رسوبات رودخانه دز (۹/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) با مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) در مورد تأثیر فاضلاب‌های صنعتی بر آلودگی فلزات سنگین در بستر رودخانه‌ها، نشان می‌دهد که ورود این پساب‌ها به افزایش غلظت سرب در رسوبات منجر شده است. با این حال، مقایسه میانگین غلظت سرب در رسوبات این رودخانه با مقادیر استاندارد پوسته زمین (۱۴/۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و شیل جهانی (۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیانگر آن است که غلظت سرب در رسوبات رودخانه دز به‌طور قابل‌توجهی کمتر از این مقادیر است. این یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند که آلودگی ناشی از سرب در این منطقه، علی‌رغم وجود فعالیت‌های صنعتی، در سطح پایین‌تری قرار دارد. مطالعات همچنین بیان می‌کنند که عواملی مانند ویژگی‌های زمین‌شیمیایی (مانند ترکیب

مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری میانگین غلظت فلز مس در رسوبات منطقه با میانگین آن در پوسته زمین نشان می‌دهد که غلظت مس اندازه‌گیری شده در رسوبات (۲۷/۹۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از مقدار آن در پوسته زمین (۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) است. این میزان بالای مس در رسوبات منطقه می‌تواند نشان‌دهنده منابع غیرطبیعی آلودگی باشد. در مناطق فاقد فعالیت‌های معدنی مانند استان خوزستان، منابع احتمالی این آلودگی می‌تواند ناشی از فعالیت‌های صنعتی و شیمیایی باشد. پالایشگاه‌ها، فاضلاب‌های صنعتی و پساب‌های شیمیایی که به رودخانه‌ها و منابع آبی منطقه تخلیه می‌شوند، به‌عنوان منابع عمده آلودگی مس شناخته می‌شوند (وزارت نیرو، ۲۰۲۰). همچنین، تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که پساب‌های صنعتی و آلاینده‌های شیمیایی می‌توانند منجر به افزایش غلظت فلزات سنگین مانند مس در محیط‌های آبی شوند (ژائو و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، مطالعات متعدد نشان داده‌اند که پساب‌های شهری و

چشمگیر در مقایسه با سایر نقاط نمونه‌برداری احتمالاً ناشی از ورود پساب‌های کشاورزی است که حاوی مقادیر قابل توجهی کودهای شیمیایی و سموم علف‌کش هستند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۸). نتایج نشان می‌دهند که عناصر مس و نیکل فاقد غنی‌شدگی هستند و غلظت آن‌ها در محدوده طبیعی قرار دارد. به علاوه، عوامل انسانی و طبیعی نتوانسته‌اند تغییر قابل توجهی در غنی‌شدگی این فلزات در رسوبات رودخانه ایجاد کنند. در مقابل، عناصر سرب، کروم، آرسنیک و بیسموت تحت تأثیر عوامل انسانی و طبیعی قرار دارند و سطوح آلودگی آن‌ها از متوسط (برای سرب و کروم) تا شدید (برای بیسموت) متغیر است. این در حالی است که سرب به‌طور گسترده در آفت‌کش‌ها استفاده می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰) و به دلیل وجود کاربری بالا کشاورزی و احتمال استفاده از آفت‌کش‌ها توسط کشاورزان می‌توان علت احتمالی سرب را ناشی از آفت‌کش‌ها دانست (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰) و برای کروم که به‌عنوان یک جزء در آلیاژها، در فولاد ضد زنگ و منشا فلز بیسموت به احتمال زیاد به فعالیت‌های صنعتی و استفاده از این فلز در آلیاژها و صنایع غیرسمی مرتبط است (گائو و همکاران، ۲۰۱۷). این عنصر به عنوان جایگزین غیر سمی سرب در مواردی مثل لعاب ظروف سفالی، وزنه‌های ماهیگیری، وسایل تهیه غذا، ابزارهای دستی در مصارف لوله‌کشی، روغن‌های مربوط به روغن کاری و ساچمه‌های شکار پرندگان رایج شده است. با توجه به اینکه بالادست رودخانه، سد دز می‌باشد که یک محیط کاملاً صنعتی است. قایق‌های تفریحی و پمپ‌های آب کشاورزی که از سوخت‌های فسیلی برای انتقال آب از رودخانه به سمت زمین‌های کشاورزی استفاده می‌کنند می‌توان آلودگی را از سد دز و نشت سوخت به رودخانه ربط داد چنانچه در بازدیدهای میدانی به عمل آمده نشت سوخت‌های فسیلی کاملاً مشاهده شده است.

شاخص زمین‌انباشت: در این مطالعه برای عنصر آرسنیک با میانگین $1/78$ در گروه کمی آلوده ($2 < I_{geo}$) و بیسموت با میانگین عدد $3/33$ در گروه خیلی آلوده ($4 < I_{geo}$) قرار دارد (جدول ۵). می‌توان به این نتیجه رسید که بعد از صنعتی شدن شاخص زمین‌انباشت منطقه برای عنصر بیسموت تغییر قابل توجهی به وجود آورده و آلودگی را نشان می‌دهد. عنصر بیسموت در ایستگاه ۱۲ عدد $3/66$ و آلودگی خیلی شدید را نشان می‌دهد. ایستگاه ۴ برای فلز آرسنیک با عدد $3/97$ آلودگی خیلی زیاد را نشان

سنگ‌های مادر، pH، ظرفیت تبادل کاتیونی و مواد آلی) منطقه و شرایط هیدرولوژیکی (مانند جریان آب، رسوب‌گذاری و تعامل آب و رسوب) رودخانه‌ها می‌توانند در تعیین غلظت فلزات سنگین مانند سرب در رسوبات نقش مؤثری داشته باشند (سان و همکاران، ۲۰۲۱). این دو عامل به‌طور متقابل بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. به‌عنوان مثال، در مناطق با سنگ‌های مادر غنی از سرب، اگر شرایط هیدرولوژیکی به گونه‌ای باشد که آب به سرعت جریان داشته باشد، سرب ممکن است به سرعت از منطقه خارج شود و غلظت آن در رسوبات پایین بماند.

۴-۴- بررسی شاخص‌های زیست‌محیطی

عامل غنی‌شدگی: نتایج نشان داد که غنی‌شدگی نیکل و مس بسیار کم ($EF < 2$) و حداقل غنی‌شدگی را دارد و عناصر سرب و کروم در درجه دوم شدت غنی‌شدگی، شدت غنی‌شدگی متوسط ($2 < EF < 5$) را نشان می‌دهد و در مورد آرسنیک شدت غنی‌شدگی زیاد یا خیلی شدید ($20 < EF < 40$) را نشان می‌دهد و شدت آلودگی بی‌نهایت ($EF > 40$) را در فلز بیسموت نمایان است با توجه به جدول (۳-۴)، مشخص شد متوسط میزان EF اندازه‌گیری شده به ترتیب مس > نیکل > سرب > کروم > آرسنیک > بیسموت است؛ به بیان دیگر، بیشترین میزان میانگین غنی‌شدگی رسوب فلزات سنگین بر اساس شاخص EF، به فلز بیسموت و کمترین نیز به فلز مس مربوط است. با بررسی موردی شدت آلودگی ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده در شکل (۴-۳) نمودار جعبه‌ای شاخص غنی‌شدگی در ایستگاه‌های مختلف بیشترین میزان آلودگی که در درجه خیلی زیاد قرار می‌گیرد مربوط به فلزات سنگین آرسنیک در ایستگاه ۴ با مقدار ($104/95$) و ایستگاه ۶ ($63/02$) و می‌باشند. همچنین فلز بیسموت در ایستگاه‌های ۱۷ و ۲۲ به ترتیب ($89/02$) و ($77/06$) بی‌نهایت غنی‌شدگی را نشان می‌دهند و برای عنصر سرب در ایستگاه ۱۷ و ۱۸ به ترتیب ($29/72$) غنی‌شدگی خیلی شدید و ($5/12$) غنی‌شدگی شدید را نشان می‌دهد. غنی‌شدگی برای سایر فلزات سنگین مورد سنجش در محدوده حداقل غنی‌شدگی کم قرار داشتند. میزان غنی‌شدگی فلزات به ترتیب از بیشترین به کمترین شامل فلزات روی، کروم، نیکل، وانادیم، مس، سرب و آرسنیک می‌باشد. ایستگاه ۴ برای آرسنیک ($104/95$) بیشترین ضریب غنی‌شدگی را نشان می‌دهد که این اختلاف

می‌دهد. با توجه به این که آرسنیک از ترکیبات مهم سموم کشاورزی (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷) می‌باشد و میانگین شاخص زمین‌انباشت (Igeo) برای این عنصر در تمامی نقاط نمونه‌برداری، سطح آلودگی متوسط را نشان می‌دهد. با این حال، در ایستگاه ۴ این شاخص به‌طور قابل‌توجهی بالاتر است که احتمالاً ناشی از تخلیه پساب‌های کشاورزی به رودخانه می‌باشد. این عامل باعث افزایش شاخص زمین‌انباشت آرسنیک در رسوبات رودخانه در این ایستگاه شده است. این شاخص برای عناصر کروم، مس، سرب و نیکل منفی بدست آمد که شرایط هیدرولوژیکی مانند سرعت جریان آب، غلظت زمینه بالا به دلیل ویژگی‌های زمین‌شیمیایی منطقه می‌تواند دلیل احتمالی آن باشد.

ضریب آلودگی: میانگین عناصر نیکل، سرب، مس و کروم در کلاس اول طبقه بندی ($CF < 1$) و آلودگی کم با توجه به جدول (۴-۵) تمام ایستگاه برای عناصر ذکر شده آلودگی بسیار کمی دارند. میانگین عناصر بیسموت با عدد (۱۳/۸۳) و آرسنیک با عدد (۸/۴۴) در طبقه چهارم ($CF > 6$) و در کلاس آلودگی بسیار شدید قرار دارد. شکل (۴-۵) نمودار جعبه‌ای فاکتور آلودگی برای نمونه‌های اندازه‌گیری شده را نشان داده شده برای چهار عنصر نیکل، سرب، مس و کروم آلودگی وجود ندارد و بیشترین آلودگی برای عنصر آرسنیک در ایستگاه ۴، ۶ و ۸ به ترتیب عدد ۴۳/۳۳، ۹۳/۲۳، ۱۹/۰۶ و ۴۳/۰۶ را نشان می‌دهد و این سه نقطه در کلاس آلودگی بسیار شدید قرار می‌گیرند. آرسنیک و بیسموت در کلاس چهارم آلودگی قرار دارند و به طور قابل‌ملاحظه‌ای تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار دارند (لوپز-پرز و همکاران، ۲۰۲۱؛ موسکرا و همکاران، ۲۰۱۷). این نشان‌دهنده تجمع بالای این فلزات در رسوبات و تأثیرات احتمالی فعالیت‌های صنعتی، به‌ویژه در مناطق نزدیک به سد دز و فعالیت‌های کشاورزی است. ترتیب روند ضرایب آلودگی سرب $>$ مس $>$ کروم $>$ نیکل $>$ بیسموت $>$ آرسنیک می‌باشد.

تحلیل آماری: در جدول (۶) ضریب همبستگی محاسبه شده به روش پیرسون بین غلظت فلزات و همچنین خواص فیزیکوشیمیایی نمونه‌های رسوب آورده شده است. بررسی رابطه همبستگی بین عناصر نشان می‌دهد که فلزات مورد مطالعه، آرسنیک، بیسموت، کروم، مس، سرب و نیکل در سطح اطمینان ($\alpha = 0.01$) به علت سطح معناداری ($P\text{-value} < 0.05$) با یکدیگر رابطه مثبت و معنی‌داری نشان نمی‌دهند (بجز کروم و نیکل). این عدم همبستگی‌ها نشان

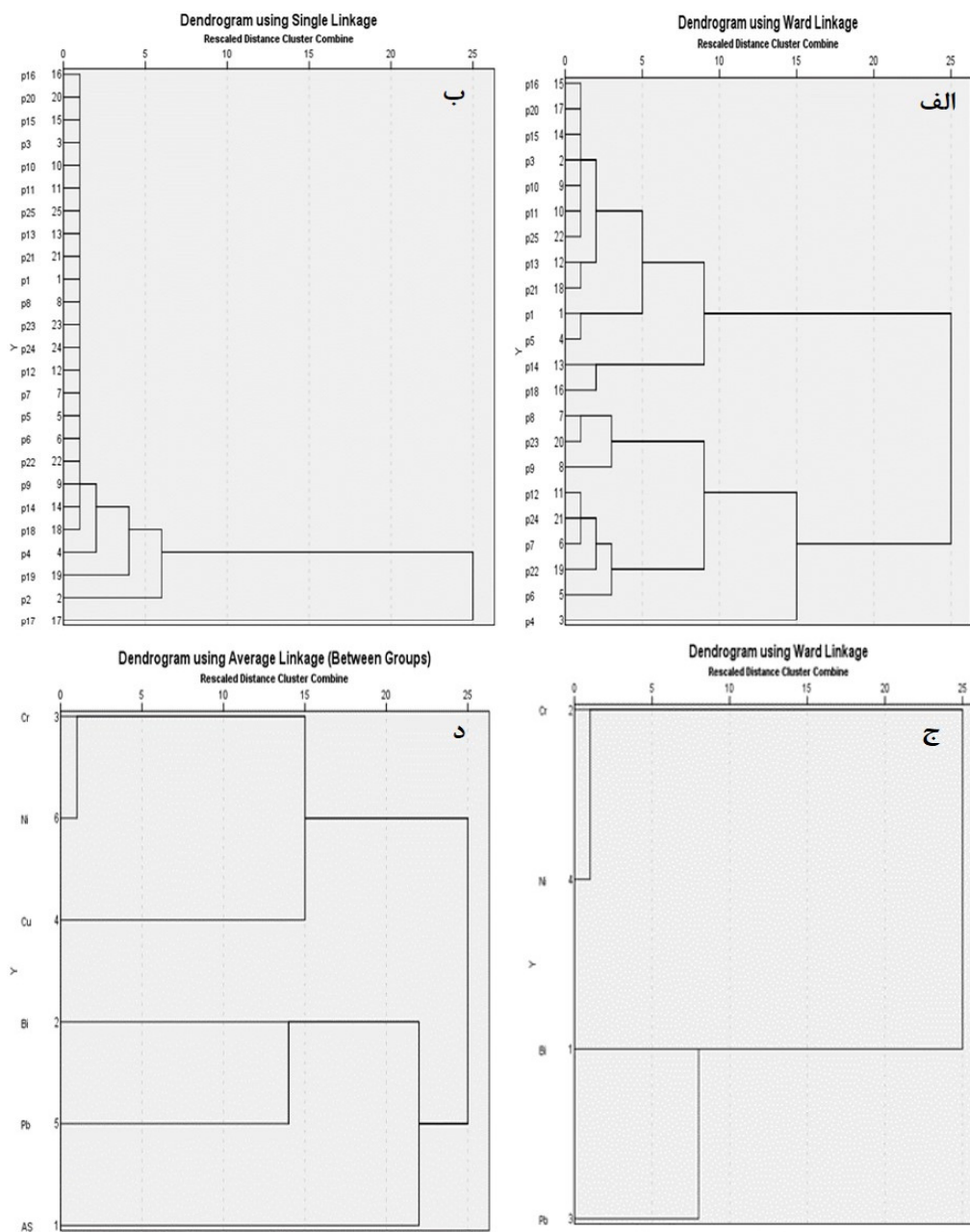
از مشابه نبودن عوامل حاکم بر رفتار شیمیایی این فلزات و یا نداشتن منشأ مشترک این فلزات است (لی و همکاران، ۲۰۰۹). با توجه به ضریب همبستگی ($r = 0.786$) و سطح معناداری ($P\text{-value} = 0$)، مشاهده می‌شود که کروم و نیکل دارای همبستگی قوی و مثبت هستند. این همبستگی می‌تواند به دلیل منشأ هیدروکربنی مشترک این دو عنصر باشد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که نیکل و کروم در منابع هیدروکربنی، و فعالیت‌های انسانی مانند صنایع پتروشیمی و فراآوری فلزات ممکن است همزمان حضور داشته باشند و در نتیجه، اثرات مشابهی از خود نشان دهند (ژائو و همکاران، ۲۰۱۶). بررسی جدول (۶) نشان می‌دهد که مقدار همبستگی pH با EC برابر با ($r = -0.771$) که نشان‌دهنده همبستگی منفی و قوی این دو پارامتر با همدیگر می‌باشد. این دو پارامتر می‌توانند تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند ترکیب شیمیایی خاک یا آب، نوع مواد حل شده، و فعالیت‌های میکروبی قرار گیرند. افزایش pH در برخی موارد می‌تواند موجب کاهش یون‌های هیدروژن و در نتیجه افزایش غلظت سایر یون‌ها شود که این امر می‌تواند هدایت الکتریکی را بالا ببرد (میلر، ۲۰۰۷). pH و مواد آلی همبستگی ($r = -0.671$) با سطح معناداری ($P\text{-value} < 0.05$) را برای این رابطه نشان می‌دهد. این بدین معناست که با افزایش pH، میزان مواد آلی در محیط کاهش می‌یابد. این نوع ارتباط در مطالعاتی مانند تحقیقات در زمینه شیمی خاک و کیفیت آب گزارش شده است که نشان می‌دهند در محیط‌های قلیایی، تجزیه مواد آلی ممکن است کاهش یابد (لئو و همکاران، ۲۰۲۱). مواد آلی در محیط‌های آبی و خاکی نقش مهمی در شیمی محلول‌ها و فعالیت‌های میکروبی دارند pH می‌تواند بر واکنش‌های شیمیایی و تجزیه مواد آلی تأثیر بگذارد. تحقیقات مختلف نشان می‌دهند که در محیط‌های با pH بالا (قلیایی)، فعالیت‌های میکروبی که موجب تجزیه مواد آلی می‌شود، کاهش می‌یابد و در نتیجه مقدار مواد آلی کاهش می‌یابد (لال، ۲۰۲۰؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۲). تأثیر pH بر جذب فلزات سنگین رابطه‌ای معکوس دارد. قابلیت جذب عناصر در رسوب در pH کم نسبت به pH زیاد بیشتر است. فلزاتی مانند روی و کادمیوم به راحتی با اسیدی شدن خاک متحرک می‌شوند، به‌طوری‌که تحرک بالای این فلزات در محیط می‌تواند منجر به غلظت بالا آن شود و در این شرایط

زیست دسترس‌پذیری^۲ آن می‌تواند افزایش یابد. با افزایش هر واحد pH تقریباً ۱۰۰ بار از حلالیت روی کاسته می‌شود (مجللی، ۱۳۹۶). کاهش pH خاک در افزایش میزان بعضی فلزات محلول خاک موثر خواهد بود. مقدار مس قابل جذب در خاک‌های مختلف متفاوت است و افزایش مقدار آن در خاک متناسب با کاهش pH خاک‌ها بوده و خاک با pH کمتر از مقدار مس بیشتری برخوردارند. همچنین سرب یکی از مهم‌ترین آلوده‌کننده‌های خاک می‌باشد که بسیاری پژوهشگران معتقدند که قلیایی بودن خاک می‌تواند تا حدود زیادی از بروز سمیت آن جلوگیری کند (اسمیت، ۱۹۹۶). در این پژوهش به وضوح دیده می‌شود که pH قلیایی مانع از حرکت فلزات شده و از افزایش غلظت فلزات جلوگیری می‌کند. با افزایش میزان pH، قابلیت جذب فلز نیکل کمتر می‌شود. نیکل در حضور مواد آلی قابلیت جذب بالایی را نشان می‌دهد. در pH کمتر از ۷/۲ تا ۶/۲ خاک، غلظت نیکل خام به سرعت افزایش می‌یابد. ضریب همبستگی بین، EC و مواد آلی برابر با $(r = 0.4)$ که یک همبستگی متوسط را نشان می‌دهد. داشتن میزان متوسطی از مواد آلی که توانایی نگهداری ویژه‌ای برای فلزات سنگین را دارند، در ایستگاه‌ها منجر به تجمع میزان متوسطی از فلزات سنگین در آنها می‌شود. مواد آلی می‌توانند یون‌هایی را در محیط آزاد کنند که موجب افزایش EC شوند. این امر به‌ویژه در محیط‌هایی که مواد آلی با فلزات یا مواد معدنی واکنش می‌دهند و یون‌های اضافی تولید می‌کنند، مشاهده می‌شود (ژائو و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین مواد آلی می‌توانند منبع غذایی برای میکروارگانیسم‌ها باشند و افزایش فعالیت میکروبی می‌تواند باعث افزایش تجزیه مواد آلی و تولید یون‌های مختلف شود که هدایت الکتریکی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (لال، ۲۰۲۰).

آنالیز خوشه‌ای: در شکل‌های (۶) تا (۸) برای گروه‌بندی داده‌ها از روش سلسله مراتبی استفاده و نتیجه‌ی حاصل به صورت دندروگرام نمایش داده شده است. تجزیه خوشه‌ها نشان می‌دهد که پس از حذف ایستگاه‌های ۲، ۱۷ و ۱۹ در فاصله ۱۰ (شکل‌های ۶ الف و ب)، سه گروه مجزا قابل مشاهده است. گروه اول شامل بیشترین تعداد ایستگاه‌ها می‌باشد، در حالی که گروه سوم کمترین تعداد ایستگاه‌ها را در بر می‌گیرد. ایستگاه‌های ۱۶ و ۲۰ بیشترین همبستگی را با یکدیگر دارند و پس از آن، ایستگاه ۱۵ در رده

پایین‌تری قرار می‌گیرد. همچنین، ایستگاه ۴ کمترین ارتباط را با سایر ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. رودخانه دز در طول مسیر خود با ورودی‌های متعددی از فاضلاب مرغذاری‌ها، دامداری‌ها و پساب‌های زمین‌های کشاورزی که با کودهای شیمیایی و سموم غلیظ آلوده شده‌اند، مواجه می‌شود. این عوامل متعدد می‌توانند رسوبات منطقه را تحت تأثیر قرار دهند و به همین دلیل، تحلیل دقیقی از نمودار خوشه‌ای حاصل نمی‌شود. ضرایب همبستگی پایین نیز این موضوع را تأیید می‌کنند. در خوشه اول، تقریباً هیچ‌یک از ایستگاه‌های پایین‌دست (۸ تا ۱۷) مشاهده نمی‌شود که نشان‌دهنده کاهش آلودگی فلزات سنگین در پایین‌دست رودخانه به دلیل ویژگی خودپالایی آن است. رودخانه دز یک رودخانه پیچان‌رود است و سرعت جریان آب در نقاط مختلف آن متفاوت می‌باشد. احتمال دیگر این است که ایستگاه‌های ۱۰ و ۱۱، که در پایین‌دست رودخانه و نزدیک به شهرک چم‌گلک (ساحل شمالی) و در قسمت داخلی پیچ رودخانه قرار دارند (جایی که سرعت رودخانه کم است)، در گروه اول قرار گرفته‌اند. در حالی که ایستگاه‌های ۱۳ تا ۱۶، که نزدیک به شهر زیباشهر (ساحل جنوبی) و در بخشی از رودخانه با جریان آرام‌تر واقع شده‌اند، در بالای نمودار و در ارتباط با یکدیگر قرار دارند. با توجه به پراکندگی ایستگاه‌ها در نمودار، می‌توان نتیجه گرفت که سرعت رودخانه نقش مهمی در تجمع غلظت فلزات سنگین در رسوبات دارد؛ به‌طوری که با افزایش سرعت رودخانه، غلظت فلزات سنگین کاهش می‌یابد. شکل‌های (۶ ج و د) که براساس غلظت میانگین عناصر رسم شده است با توجه به تحلیل سلسله مراتبی در نمودار اول عنصر آرسنیک و مس حذف شده و در نمودار دوم در فاصله ده، نمودار به دو گروه تقسیم می‌شوند. کرم و نیکل در گروه اول با هم در ارتباط هستند که احتمالاً می‌تواند در ارتباط با منشأ یکسان این دو عنصر باشد و احتمالاً از سوخت‌های فسیلی استفاده شده در طول مسیر رودخانه می‌باشند و در گروه دوم عنصر بیسموت و سرب نیز با همبستگی کمتر بهم متصل شده است، که احتمالاً بخشی از آن از منابع انسانی مشترک منشأ می‌گیرند. این فلزات معمولاً با کاربردهای صنعت و تخلیه فاضلاب‌های شهری مرتبط می‌باشند. عدم وجود ارتباط میان این دو شاخه نشان‌دهنده نبود منشأ یکسان برای آنهاست.

^۲ Bioavailability



شکل ۶. نمودار خوشه‌ای

۵- نتیجه‌گیری

۱. توالی غلظت فلزات سنگین در رسوبات رودخانه دز به صورت بیسموت <سرب <مس<آرسنیک<نیکل<کروم است. در اکثر ایستگاه‌ها، بیسموت روند یکنواختی را نشان می‌دهد و محدوده تغییرات آن قابل توجه نیست.
۲. نیکل و مس حداقل غنی‌شدگی، سرب و کروم غنی‌شدگی متوسط، آرسنیک غنی‌شدگی شدید و بیسموت غنی‌شدگی بسیار شدید را نشان می‌دهند.

۳. مقدار شاخص زمین‌انباشت برای فلزات مس، کروم، نیکل و سرب منفی محاسبه شد و روند مشخصی برای این مقادیر منفی مشاهده نمی‌شود. در حالی که آرسنیک در رده کمی آلوده و بیسموت در رده بسیار آلوده قرار می‌گیرد.
۴. رسوبات از نظر کیفیت و ضریب آلودگی، در رده آلودگی کم قرار دارند؛ اما برای آرسنیک و بیسموت، آلودگی در رده شدید و بسیار بالا ارزیابی می‌شود.
۵. ضریب همبستگی پیرسون نشان داد که هیچ‌گونه همبستگی معناداری بین فلزات سنگین و عوامل

- Toxicology, 39(7): 1901-1912. <https://doi.org/10.1002/tox.22548>.
- Ebrahimi, M. (2008) The Impact of Chemical Fertilizers and Pesticides on the Accumulation of Heavy Metals in Soil and Water Resources. University of Tehran Press, Tehran, 250p. (in Persian)
- EPA (Environmental Protection Agency). (1994) Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils. US EPA.
- EPA (Environmental Protection Agency). (2001) Guidelines for environmental sampling and analysis. US EPA, Washington, DC.
- EPA (Environmental Protection Agency) U.S. (1994) Methods for measuring the toxicity and bioaccumulation of sediment-associated contaminants with freshwater invertebrates. C.G. Ingersoll, G.T. Ankley, G.A. Burton.
- Gao, B., Santschi, P. H., Cifuentes, L. A. (2017) Biogeochemistry of heavy metals in sediments and waters. Environmental Science & Technology, 51(22): 13403-13413. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04233>.
- Ghadiri, H., Nazari, A. (2019) Water resources and environmental impacts in the Dez River basin. Journal of Water Resource and Protection, 11(12): 1439-1448.
- Ghareeb, A. A., El-Metwally, M. M., Ali, M. E. (2021) Arsenic contamination in agricultural soils and water in the Dez River region: Sources and risks. Environmental Monitoring and Assessment, 193(7): 477-485. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08985-9>.
- Gharib, S., Asadollahzadeh, M., Mohammadifard, M., Rezaei, M. (2021) Water quality and heavy metal contamination in the Dez River, Khuzestan Province, Iran. Environmental Monitoring and Assessment, 193: 24. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08753-9>.
- Gharib, S., Asadollahzadeh, M., Rezaei, M., Mohammadifard, M. (2021) Heavy metal contamination in the Dez River, Khuzestan Province, Iran: A study of bismuth and other metals. Environmental Monitoring and Assessment, 193(4): 173. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08765-5>.
- Hakanson, L. (1980) Ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. Water Research, 14: 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).
- Jafarzadeh, N., Rostami, S., Sepehrfar, K., & Lahijanazadeh, A. (2004). Identification of the Water Pollutant Industries in Khuzestan Province. Journal of Environmental Health Science & Engineering, 1(2):36-42.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H. (2001) Trace elements in soils and plants (3rd ed.). CRC Press, Boca Raton.
- Kümmerer, K., Schmidt, L., Müller, C. (2019) River systems and pollution dynamics. Springer.

فیزیکوشیمیایی رسوبات وجود ندارد. تنها بین نیکل و کروم همبستگی مثبت و معناداری مشاهده شد.

۶. در این پژوهش، مواد آلی و pH به دلیل محدودیت در تغییرات و مقادیر بسیار کم در نمونه‌های رسوب، همبستگی قابل توجهی با فلزات سنگین مورد مطالعه نشان نمی‌دهند.

۷. با وجود همبستگی‌های ضعیف و متوسط بین برخی فلزات و ویژگی‌های رودخانه، نتایج به‌طور کلی نشان‌دهنده پیچیدگی در تحلیل ارتباطات بین فلزات سنگین و شرایط محیطی است. این موضوع به‌ویژه در مناطقی که منابع آلاینده متعدد و متنوع (مانند فاضلاب‌های شهری، کشاورزی و صنعتی) وارد رودخانه می‌شوند، مشهود است.

References

- Adamo, P., Arienzo, M., Imperato, M., Naimo, D., Nardi, G., Stanzione, D. (2005) Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port. Chemosphere, 61(6): 800-809.
- Afrouz, M., Zeynali, S., Najafi, M. (2010) Pollution sources and impacts on water quality in the Dez River basin. Environmental Monitoring and Assessment, 168(1-4): 389-397. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1141-5>.
- Ali, H., et al. (2021) Impact of Pesticides on Arsenic Mobilization and Bioavailability in Sediments: A Comprehensive Review. Environmental Pollution, 280: 116-130. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116130>.
- Attaran, R. (2016) Investigation of the Impact of Urban and Industrial Wastewater on River Water Quality. Isfahan University of Technology Press, Isfahan, 300p. (in Persian)
- Azari, A., Mohammadi, M., Rezaei, H. (2013) Investigation of Geology and Geomorphology of the Dez River Basin. Research Institute of Earth Sciences Press, Tehran, 180p. (in Persian)
- Bettinelli, M., Beone, G. M., Spezia, S., Baffi, C. (2000) Determination of heavy metals in soils and sediments by microwave-assisted digestion and ICP-MS analysis. Analytica Chimica Acta, 424(2): 289-296.
- Buchanan, J. B. (1984) Sediment Analysis. In: Holme, N. A., McIntyre, A. D. (Eds.), Methods for the Study of Marine Benthos (2nd ed., pp. 41-65). Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Chakraborty, P., Banerjee, S., Das, S., Ghosh, S., Saha, S., Ray, S. (2023) Biogeochemical cycling and anthropogenic inputs of heavy metals including bismuth in riverine sediments. Environmental Pollution, 312: 120150. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120150>.
- Cutter, M. A., Lopez, M., Garcia, A. (2018) Sediment contamination and heavy metals in freshwater ecosystems. Environmental

- Lal, R. (2020) Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112: 3265–3277. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>.
- Li, X., Jiang, X., He, M. (2022) Environmental impacts of river sediment pollution: A global perspective. *Science of the Total Environment*, 805: 150395.
- Li, X., Wang, F., Liu, X., Zhao, J. (2009) Heavy metal contamination in soils and its relationship with land use in the southeastern region of China. *Environmental Pollution*, 157(6): 1589–1595.
- Liao, Z., Liu, X. (2021) Heavy metals in river sediments and their ecotoxicological effects on aquatic life. *Environmental Pollution*, 274: 115680.
- Liu, Y. E., Luo, X. J., Huang, C. C., Zeng, Y. H., Lu, Q., Wang, S., Mai, B. X. (2021) Legacy and alternative plasticizers in surface sediment of black-odorous urban rivers across China: Occurrence, spatial distribution, and ecological risk assessment. *Chemosphere*, 283: 131206.
- Loska, K., Wiechuła, D., Korus, I. (1995) Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International*, 30(2): 159–165.
- Miller, J. J. & Curtin, D. (2007) Electrical Conductivity and Soluble Ions. 161–171.
- Ministry of Energy, Iran. (2020) Assessment of heavy metal pollution in Dez River, including copper sources. Tehran: Ministry of Energy. (in Persian).
- Mohammadi, M., Tavakkol, M. (2021) Environmental stressors and heavy metal contamination in Dez River sediments. *Journal of Environmental Science and Pollution Research*, 28(3): 3225–3234. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11065-7>.
- Mosquera, M. E., Fernández, L. A., González, M. L., García, L. (2017) Trace elements in agricultural soils and their impact on environmental quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(3): 125–136. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5869-9>.
- Muller, G. (1969) Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2(3): 108–118.
- Nelson, T., Brown, M., Williams, P. (2020) Water quality management and river pollution: Challenges and solutions. *Environmental Research Letters*, 15(10): 105024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9cfe>.
- Pérez, C. G., Gómez, A. A., Jiménez, P. S., Martínez, D. L. (2021) Geochemical assessment of heavy metals in soils and sediments. *Science of the Total Environment*, 758: 143682. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143682>.
- PirMorad, M., Qadari, R. (2014) Introduction to types of water pollutants and their impacts. First National Conference on Environment, Isfahan. Retrieved from: <https://civilica.com/doc/279355>. (in Persian).
- Saddik, M., Saddik, A., Makan, A. (2019) Assessment of heavy metal contamination in surface sediments along the Mediterranean coast of Morocco. *Environmental Monitoring and Assessment*.
- Samadzadeh, M. (2010) Geomorphology of Iran. Tarbiat Modares University Press, Tehran. (in Persian)
- Samadzadeh, A. (2010) Study of Hydrological and Environmental Characteristics of the Dez River. Research Institute of Water and Environmental Sciences Press, Tehran, 220p. (in Persian)
- Singh, P., Verma, H. (2023) Industrial effluents and organic pollution in freshwater systems. *Journal of Environmental Management*, 305: 113127. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113127>.
- Shahbazi, B., Shayestehfar, M. R., Karimi, H. (2011) Geochemical and environmental assessment of heavy metals in soils around a coal washing plant in Zirab, northern Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 111(3): 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.04.004>.
- Shayestehfar, M. R., Shahbazi, B., Karimi, H. (2012) Environmental geochemistry of heavy metals in soils around a coal washing plant in Zirab, northern Iran. *Environmental Earth Sciences*, 67(1): 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1696-x>.
- Smith, S. L., MacDonald, D. D., Keenleyside, K. A., Ingersoll, C. G., Field, J. (1996) A preliminary evaluation of sediment quality assessment values for freshwater ecosystems. *Great Lakes Research*, 22(3): 624–638.
- Sun, Y., Zhang, L., Wang, H., Li, J., Chen, X. (2021) Geochemical and Hydrological Controls on Heavy Metal Distribution in River Sediments. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(15): 18945–18958.
- Teker, A., Eryilmaz, S. (2020) The impact of industrial activities on chromium contamination in sediments: A case study from a river in Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(32): 40005–40016. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09624-2>.
- Teker, D., Eryilmaz, G. (2020) Chromium contamination in river sediments due to industrial activities in the Dez River Basin. *Science of the Total Environment*, 738: 139602. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139602>.
- Ullah, Z., Iqbal, J., Abbasi, B. A., Ijaz, S., Yaseen, T., Murtaza, G., Iqbal, R., Noreen, S., Waqar, R., Kanwal, S., Mahmood, T. (2025) Chapter 3 - Arsenic pollution: Sources, types, and effects on soil chemistry. In: Saud, S., Fahad, S., Wang, D. (Eds.), *Beneficial Elements for Remediation of Heavy Metals in Polluted Soil*. Elsevier, pp. 55–91.

- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). (1997) Test Methods for Evaluating Solid Waste Physical/Chemical Methods (SW-846).
- Wang, Z., Chen, Q., Li, Y., Zhang, H. (2020) Effects of pH on organic matter decomposition in aquatic ecosystems: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(15): 17821–17832.
- Wang, H., Luo, X., Liu, X. (2018) Evaluation of heavy metal contamination in sediment cores from a river in China. *Environmental Pollution*, 242: 122-132.
- Wang, C., Hu, X., Liu, Y., Jin, G. (2022). Sources, spectral characteristics, and fluxes of dissolved organic matter in coastal groundwater and river water in western Guangdong, China. *Front. Environ. Sci.* 10.
- WHO (World Health Organization). (2023) Water pollution and its impact on human health. WHO Press, Geneva.
- Yuan, X. (2023) Bismuth contamination from mining activities and its influence on riverine sediment quality. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 42(6): 1564-1573. <https://doi.org/10.1002/etc.5472>.
- Zhang, H., Zhang, Y., Wang, S. (2021) Heavy metals in river sediments: Assessment and management. *Journal of Environmental Quality*, 50(4): 1136-1145.
- Zhang, L., Ye, X., Feng, H., Jing, Y., Ouyang, T., Yu, X., Liang, R., Gao, C., Chen, W. (2007) Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity, China. *Marine Pollution Bulletin*, 54: 974-982. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.02.010>
- Zhang, X., Zhang, S., Li, S. (2020) Sources and distribution of heavy metals in agricultural soils: Implications for food safety and environmental protection. *Science of the Total Environment*, 721: 137723.
- Zhang, Y., Chen, W., Liu, Z., Wang, S., Li, X. (2021) Impact of pesticide use on the distribution and speciation of arsenic in soils and sediments. *Science of the Total Environment*, 755: 142859. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142859>.
- Zhang, Y., Liu, Z., Chen, W., Wang, S. (2021) Sources and environmental impact of bismuth in aquatic ecosystems: A review. *Journal of Environmental Management*, 288: 112399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112399>.
- Zhang, Y., Zhang, S., Liu, Z., Wang, S. (2022) Effect of chemical pollutants on sediment contamination in riverine systems. *Environmental Pollution*, 290: 118040. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118040>.
- Zhao, F. J., McGrath, S. P., Sun, B. (2016) The role of organic matter in the retention and release of heavy metals in soils. *Environmental Pollution*, 209: 75-82.
- Zhao, J., Wang, H., Chen, X. (2024) Agricultural runoff and its effect on organic matter content in river sediments. *Science of the Total Environment*, 857: 159345. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159345>.
- Zhao, L., Wang, X., Zhang, L. (2021) Impact of industrial effluents on heavy metal contamination in river sediments. *Science of the Total Environment*, 772: 145254.
- Zhao, J., Cao, X., Wang, Z., Dai, Y., Xing, B. (2017) Mechanistic understanding toward the toxicity of graphene-family materials to freshwater algae. *Water Research*, 111: 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.041>.