

(OPEN ACCESS)

Qualitative assessment of surface sediments of the Gavehrud and Qeshlaq tributaries of the Sirvanroud to predict the phenomenon of eutrophication at the construction site of the Zhavah Dam (2023-2024)

Mahdieh Balouei¹, Hassan Nasrollahzadeh Saravi^{*2}, Behzad Rahnama³,
Tahereh Eskandari⁴, Hourieh Younesipour⁵, Maryam Rezaei⁶,
Marzieh Rashidi Golrooye⁷, Mohammad Kardar Rostami⁸

1. M.Sc., Caspian Sea Ecology Research Center (CSERC), Iranian Fisheries Science Research Institute (IFSRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mazandaran, Iran. E-mail: m.baloei70@gmail.com
2. Corresponding Author, Professor, Caspian Sea Ecology Research Center (CSERC), Iranian Fisheries Science Research Institute (IFSRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mazandaran, Iran. E-mail: hnsaravi@gmail.com
3. Assistant Prof., Caspian Sea Ecology Research Center (CSERC), Iranian Fisheries Science Research Institute (IFSRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mazandaran, Iran. E-mail: rahnama.behzad@gmail.com
4. Ph.D., Caspian Sea Ecology Research Center (CSERC), Iranian Fisheries Science Research Institute (IFSRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mazandaran, Iran. E-mail: taher950@yahoo.com
5. M.Sc., Caspian Sea Ecology Research Center (CSERC), Iranian Fisheries Science Research Institute (IFSRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mazandaran, Iran. E-mail: younesipourh@yahoo.com
6. Ph.D., Caspian Sea Ecology Research Center (CSERC), Iranian Fisheries Science Research Institute (IFSRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mazandaran, Iran. E-mail: maryam_rezaei_83@yahoo.com
7. M.Sc., Caspian Sea Ecology Research Center (CSERC), Iranian Fisheries Science Research Institute (IFSRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mazandaran, Iran. E-mail: marziehrashidi@yahoo.com
8. B.Sc., Caspian Sea Ecology Research Center (CSERC), Iranian Fisheries Science Research Institute (IFSRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mazandaran, Iran. E-mail: mohammadkardarrostami@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: The Sirvan River catchment in western Iran— particularly, the Zhavah Dam area near Sanandaj city—formed by the confluence of the Qeshlaq and Gavehrud rivers—has been subjected to increasing environmental stress over the past few years. The disposal of city and industrial wastewater into river tributaries, particularly the Qeshlaq branch, has raised concerns about sediment contamination and the initiation of eutrophication in the Zhavah Dam reservoir. Eutrophication, caused by the overloading of water with nutrients such as phosphorus, can lead to uncontrolled algal growth, poor water quality, and danger to aquatic organisms. Rivers' surface sediments serve a twofold purpose within aquatic ecosystems: on the one hand, they store nutrients; on the other hand, under certain conditions, they release them into the water column. Phosphorus reserves in sediments were several times higher than in the water, particularly in areas influenced by untreated wastewater outflows. This study investigates spatiotemporal variations in sediment characteristics within the Zhavah Dam, focusing on phosphorus speciation to assess the potential for eutrophication. Results are further compared with national and international standards to ascertain sediment quality and environmental risk.
Article history: Received: 09.03.2025 Revised: 01.01.2026 Accepted: 01.25.2026	
Keywords: Eutrophication, Sediment quality parameters, Sequential extraction, Sirvanroud	
	Materials and Methods: This research was conducted in 2023–2024 at six sites on the Qeshlaq and Gaveh Rivers, and in the reservoir of Zhavah

Dam. Sediment quality parameters under investigation were various forms of phosphorus, pH, redox potential (Eh), and total organic carbon (TOC). The fractions of sediment phosphorus were quantified using a sequential extraction procedure that assesses five forms of phosphorus: adsorbed, Fe-bound, Al-bound, Ca-bound, and residual. The Phosphorus Pollution Index (PPI) was calculated to predict ecological risk by comparing measured phosphorus levels with contamination standards. Parametric statistical tests, such as stepwise regression, Pearson correlation, and one-sample t-tests for comparison with standards, were performed using SPSS version 18.

Results: Available phosphorus in sediments from stations 3 and 4 (Qeshlaq branch) accounted for approximately 50% of total phosphorus, which could be due to infiltration of wastewater into the river. Among phosphorus forms present, loosely bound phosphorus was the lowest percentage because it is utilized directly by aquatic organisms. The major form of phosphorus in sediments was aluminum-bound phosphorus fractions (more than 60%). At all stations and under all seasons, the inorganic phosphorus percentage was more than 95% of total phosphorus, while organic phosphorus concentration was recorded as less than 5%. The results of this research showed that the TP content in the Sirvan River basin (2519 mg/kg.dw) was 3.44 times higher than China's national standard (733 mg/kg.dw), in a way that, based on total phosphorus contamination concentration range in sediments, all those with TP content above 1000 mg/kg.dw were highly polluted. Station 6, near the existing construction of the Zhavveh Dam, contained more phosphorus than stations 1 and 5. The Phosphorus Pollution Index (PPI) was above 1 at most sampling stations, except at stations 1 and 5, indicating that most of the research area was polluted. The mean PPI in the current study (2023–2024) was 3.4 ± 0.81 , slightly higher than in the previous study (2020–2021). Stations 1 and 3 showed the lowest and highest PPI, respectively. The results of the phosphorus ecological risk assessment of sediments using the single pollution standard index method (PPI) showed that the TP standard index ranged from 1.60 to 8.08. This indicated that the ecological pollution risks of phosphorus in this area ranged from relatively low to high. It provides a means of efficiently assessing the ecological risk of nutrients in watershed sediments, identifying their dominant sources and factors, as well as supporting eutrophication prevention and ecological restoration of the basin. Total organic carbon (TOC%) in basin sediments was generally within Canadian standard values, except for the maximum values at stations 3 and 4, which exceeded the standard. Compared with the original study, total phosphorus (TP) increased by 1.2 times, while the percentages of TOC were generally consistent. Total phosphorus (TP) and total organic matter (TOM) levels ranged from 0.17–0.39% and 4.65–19.23%, respectively, and were higher than Canadian standard measurements, both seasonally and annually. TP percentages in this study were higher across all seasons except summer, while annual values were similar to those in the previous study. In contrast, TOM percentages were lower in all seasons, except autumn, and annually, compared with the previous study. The balance of mineral phosphorus in the sediments and water in the current research (2023–2024) ranged from 3366 to 475, whereas in the previous study (2020–2021) it ranged from 267 to 796. This indicates greater diffusion of mineral phosphorus from sediment into the water column, consistent with diffusion from high- to low-concentration environments.

Comparative analysis indicated that overall phosphorus and mineral phosphorus in this study were 1.5 and 0.3 times higher, respectively, than that in the previous study. Curiously, for the spring season, river discharge in this study was 26.32 m³/s, while it was only 1.98 m³/s in 2020–2021. These changes in riverbed turbulence and discharge likely aided the downstream transport of upstream sediment phosphorus, thereby enhancing its impact on water phosphorus concentration near the dam location.

Conclusions: This study encountered very elevated levels of total phosphorus (TP: 2518 ± 231 mg/kg.dw) and bioavailable phosphorus (1126 ± 141 mg/kg.dw) in Sirvan River sediments discharged at the Zhavah Dam location. They were several times above the Chinese national standard (733 mg/kg.dw), indicating a very high degree of ecological risk (High PPI). Significantly, TP levels in the reservoir sediments were over a thousand times higher than in the river water, indicating that sediments have the potential to act as a long-term phosphorus source and to amplify eutrophic conditions. The implications of this research indicate the importance of managing nutrient loads and conducting regular sediment quality monitoring in the region.

Cite this article: Balouei, Mahdieh, Nasrollahzadeh Saravi, Hassan, Rahnama, Behzad, Eskandari, Tahereh, Younesipour, Hourieh, Rezaei, Maryam, Rashidi Golrooye, Marzieh, Kardar Rostami, Mohammad. 2026. Qualitative assessment of surface sediments of the Gavehroud and Qeshlaq tributaries of the Sirvanroud to predict the phenomenon of eutrophication at the construction site of the Zhavah Dam (2023-2024). *Journal of Water and Soil Conservation*, 33 (2), 1-29.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2026.24033.3827

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

کیفیت‌سنجی رسوبات سطحی شاخه‌های گاوهرود، قشلاق و سیروان‌رود به‌منظور پیش‌بینی پدیده تغذیه‌گرایی در محل احداث سد ژاوه (سال ۱۴۰۳-۱۴۰۲)

مهدیه بالوئی^۱، حسن نصراله‌زاده ساروی^{۲*}، بهزاد رهنما^۳،
طاهره اسکندری^۴، حوریه یونسی‌پور^۵، مریم رضایی^۶،
مرضیه رشیدی گلرویه^۷، محمد کاردر رستمی^۸

۱. کارشناسی‌ارشد پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج جهاد کشاورزی، مازندران، ایران. رایانامه: m.baloei70@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استاد پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج جهاد کشاورزی، مازندران، ایران. رایانامه: hnsaravi@gmail.com
۳. استادیار پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج جهاد کشاورزی، مازندران، ایران. رایانامه: rahnama.behzad@gmail.com
۴. دکتری پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج جهاد کشاورزی، مازندران، ایران. رایانامه: taher950@yahoo.com
۵. کارشناسی‌ارشد پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج جهاد کشاورزی، مازندران، ایران. رایانامه: younesipourh@yahoo.com
۶. دکتری پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج جهاد کشاورزی، مازندران، ایران. رایانامه: maryam_rezaei_83@yahoo.com
۷. کارشناسی‌ارشد پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج جهاد کشاورزی، مازندران، ایران. رایانامه: marziehrashidi@yahoo.com
۸. کارشناسی پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج جهاد کشاورزی، مازندران، ایران. رایانامه: mohammadkardarirostami@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۰۴/۰۶/۱۳ تاریخ ویرایش: ۰۴/۱۰/۱۱ تاریخ پذیرش: ۰۴/۱۱/۰۵ واژه‌های کلیدی: استخراج پی در پی، پارامترهای کیفی رسوبات، تغذیه‌گرایی، سیروان‌رود	سابقه و هدف: حوزه آبخیز سیروان‌رود در غرب ایران، به‌ویژه منطقه احداث سد ژاوه در نزدیکی شهر سنندج، که از پیوستن دو شاخه قشلاق و گاوه رود تشکیل می‌شود، در سال‌های اخیر با فشارهای زیست‌محیطی فزاینده‌ای مواجه شده است. ورود فاضلاب‌های شهری و صنعتی به شاخه‌های فرعی این رودخانه، به‌ویژه شاخه قشلاق، نگرانی‌هایی را در خصوص آلودگی رسوبات و بروز پدیده تغذیه‌گرایی^۱ در مخزن سد ژاوه ایجاد کرده است. تغذیه‌گرایی، که ناشی از تجمع بیش از حد مواد مغذی مانند فسفر در آب است، می‌تواند منجر به رشد بی‌رویه جلبک‌ها، کاهش کیفیت آب و تهدید اکوسیستم‌های آبی شود. رسوبات سطحی رودخانه‌ها نقش دوگانه‌ای در اکوسیستم‌های آبی ایفا می‌کنند؛ از یک‌سو به‌عنوان مخزن مواد مغذی عمل می‌کنند و از سوی دیگر، در شرایط خاص می‌توانند این مواد را به ستون آب آزاد کنند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که غلظت فسفر در رسوبات می‌تواند چندین برابر غلظت آن در آب باشد، به‌ویژه در مناطقی که تحت‌تأثیر ورود فاضلاب‌های تصفیه‌نشده قرار دارند. این مطالعه به بررسی تغییرات مکانی و زمانی ویژگی‌های رسوبات در سد ژاوه می‌پردازد و تمرکز آن بر گونه‌بندی فسفر به منظور ارزیابی پتانسیل تغذیه‌گرایی است. یافته‌ها با استانداردهای ملی و بین‌المللی مقایسه می‌شوند تا کیفیت رسوبات و خطرات زیست‌محیطی آن‌ها ارزیابی گردد. مواد و روش‌ها: این پژوهش طی سال‌های ۱۴۰۲ تا ۱۴۰۳ در شش ایستگاه واقع در امتداد شاخه‌های قشلاق و گاوه‌رود و همچنین در مخزن سد ژاوه انجام شد. پارامترهای کیفی رسوبات شامل فرم‌های مختلف فسفر، pH، پتانسیل اکسایش-کاهش (Eh)، و کربن آلی کل (TOC) مورد بررسی قرار گرفتند. از روش استخراج متوالی (پی در پی) برای جداسازی انواع فسفر موجود در رسوب استفاده شد. در این روش امکان جداسازی پنج فرم مختلف فسفر (فسفر جذب سطحی، فسفر متصل به آهن، فسفر متصل به آلومینیم، فسفر متصل به کلسیم و فسفر باقی‌مانده) وجود دارد. برای ارزیابی خطرات زیست‌محیطی، شاخص آلودگی فسفر (PPI) با مقایسه غلظت‌های اندازه‌گیری‌شده فسفر با آستانه‌های آلودگی محاسبه گردید. تحلیل‌های آماری پارامتری شامل رگرسیون گام‌به‌گام، همبستگی پیرسون و آزمون تی تک‌نمونه‌ای برای مقایسه با استانداردها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۸ انجام گرفت. یافته‌ها: نتایج نشان داد که فسفر قابل دسترس در رسوبات ایستگاه‌های ۳ و ۴ (شاخه قشلاق) حدود ۵۰٪ از کل فسفر را تشکیل می‌دهد که احتمالاً ناشی از ورود فاضلاب به رودخانه است. در میان اشکال فسفر قابل دسترس، فسفر جذب سطحی کم‌ترین درصد را داشت، زیرا مستقیماً توسط موجودات آبی مصرف می‌شود. شکل غالب فسفر در رسوبات، فسفر متصل به آلومینیم بود که بیش از ۶۰٪ را شامل گردید. در تمامی ایستگاه‌ها و فصل‌ها، درصد فسفر معدنی بیش از ۹۵٪ کل فسفر بود، در حالی که غلظت فسفر آلی کم‌تر از ۵٪ ثبت شد. نتایج این مطالعه نشان داد که میانگین غلظت فسفر کل (TP) در حوزه آبخیز سیروان رود (۲۵۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) ۳/۴ برابر بیش‌تر از استاندارد ملی چین (۷۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) بود، به‌طوری‌که بر اساس دامنه غلظت آلودگی فسفر کل در رسوبات، تمامی ایستگاه‌هایی که غلظت فسفر کل آن‌ها بیش از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک بود، در سطح آلودگی بالا قرار داشتند. ایستگاه ۶ که در نزدیکی محل ساخت سد ژاوه قرار دارد، غلظت فسفر بالاتری نسبت به ایستگاه‌های ۱ و ۵ نشان

داد. شاخص آلودگی فسفر (PPI) در تمامی نقاط نمونه برداری به جز ایستگاه های ۱ و ۵ بیش از ۱ بود که نشان دهنده آلودگی در بیش تر مناطق مورد مطالعه است. میانگین PPI در این مطالعه (۱۴۰۳-۱۴۰۲) برابر با $0/81 \pm 3/4$ بود که اندکی بیش تر از مطالعه قبلی در سال های ۱۴۰۰-۱۳۹۹ است. ایستگاه های ۱ و ۳ به ترتیب کم ترین و بیش ترین مقدار PPI را داشتند. نتایج ارزیابی خطر زیست محیطی فسفر در رسوبات با استفاده از روش شاخص استاندارد آلودگی منفرد (PPI) نشان داد که مقدار شاخص استاندارد TP از $1/6$ تا $8/1$ متغیر بود. این امر نشان داد که خطرات زیست محیطی ناشی از آلودگی فسفر در این منطقه از سطح پایین تا بالا متغیر است. این مطالعه روشی مؤثر برای ارزیابی خطرات زیست محیطی مواد مغذی در رسوبات حوزه آبخیز، تعیین منابع کنترل کننده و عوامل مؤثر بر مواد مغذی در رسوبات حوزه و جلوگیری از تغذیه گرای و احیای اکولوژیکی حوزه ارائه می دهد. درصد کربن آلی کل (TOC%) در رسوبات حوزه به طور کلی در محدوده استانداردهای کانادایی قرار داشت، اگرچه مقادیر حداکثری در ایستگاه های ۳ و ۴ از استاندارد فراتر رفت. در مقایسه با مطالعه قبلی، فسفر کل $1/2$ برابر افزایش یافت، در حالی که درصد های TOC تقریباً بدون تغییر باقی ماندند. مقادیر TP و کل مواد آلی (TOM) به ترتیب در محدوده $0/17$ تا $0/39$ و $4/65$ تا $19/2$ قرار داشتند و به صورت فصلی و سالانه بالاتر از ارزیابی های استاندارد کانادایی بودند. درصد های TP در این مطالعه در تمامی فصل ها به جز تابستان بیش تر بودند، در حالی که مقادیر سالانه با مطالعه قبلی قابل مقایسه بودند. در مقابل، درصد های TOM در تمامی فصل ها به جز پاییز و در مقیاس سالانه نسبت به مطالعه قبلی کم تر بودند. رابطه بین فسفر معدنی در رسوبات و آب در مطالعه حاضر (۱۴۰۳-۱۴۰۲) در محدوده ۳۳۶۶ تا ۴۷۵ بود، در حالی که در مطالعه قبلی (۱۴۰۰-۱۳۹۹) در محدوده ۲۶۷ تا ۷۹۶ قرار داشت. این امر نشان دهنده افزایش انتشار فسفر معدنی از رسوبات به ستون آب است که با اصل انتشار از محیط های با غلظت بالا به پایین سازگار است. تحلیل مقایسه ای نشان داد که فسفر کل و فسفر معدنی در مطالعه حاضر به ترتیب $1/5$ و $0/3$ برابر بیش تر از مطالعه قبلی بودند. قابل توجه است که در فصل بهار، دبی رودخانه در مطالعه حاضر $26/3$ متر مکعب بر ثانیه بود، در حالی که در سال های ۱۴۰۰-۱۳۹۹ فقط $1/98$ متر مکعب بر ثانیه بود. این تغییرات در آشفستگی بستر رودخانه و دبی جریان احتمالاً باعث انتقال رسوبات فسفر از بالادست به پایین دست شده و تأثیر آن را بر غلظت فسفر در آب در نزدیکی محل ساخت سد افزایش داده است.

نتیجه گیری: بررسی رسوبات در مطالعه حاضر بیانگر مقادیر بالا از غلظت فسفر کل (2518 ± 231 میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک) و فسفر قابل دسترس (1126 ± 141 میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در مسیر رودخانه های منتهی به سد بوده که خطر مغذی شدن آب را افزایش خواهد داد. ضمن این که غلظت فسفر کل (TP) در رسوبات محل مخزن سد بیش از هزار برابر بیش تر از آب رودخانه بود که می تواند فسفر لازم را برای تقویت تغذیه گرای فراهم نماید. یافته های این پژوهش ضرورت مدیریت بار مواد مغذی و پایش مستمر کیفیت رسوبات را در این منطقه برجسته می سازد.

استناد: بالوئی، مهدیه، نصراله زاده ساروی، حسن، رهنما، بهزاد، اسکندری، طاهره، یونسی پور، حوریه، رضایی، مریم، رشیدی گلرویه، مرضیه، کاردر رستمی، محمد (۱۴۰۵). کیفیت سنجی رسوبات سطحی شاخه های گاوهرود، قشلاق و سیروان رود به منظور پیش بینی پدیده تغذیه گرای در محل احداث سد ژاوه (سال ۱۴۰۳-۱۴۰۲). پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۳۳ (۲)، ۲۹-۱.

DOI: 10.22069/jwsc.2026.24033.3827



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

آب رودخانه یک منبع طبیعی ضروری است که نقش مهمی در حمایت از توسعه اقتصادی و اجتماعی ایفا می‌کند. رودخانه‌ها و نهرها تا حد زیادی برای تأمین آب برای مصرف انسان، شرب دام، آبی‌پروری، آبیاری، صنایع، حمل‌ونقل، تفریح و سایر اهداف مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند (۱). باوجود این مزایا، در کشورهای درحال توسعه، رودخانه‌ها و نهرها در معرض آلودگی منابع مختلف انسانی و طبیعی شامل گسترش شهری، رشد صنعتی، رواناب مواد شیمیایی کشاورزی، زباله‌های شهری و خانگی قرار دارند (۲ و ۳).

رسوبات به‌عنوان شاخص حساس و مناسب برای پایش آلودگی‌های محیط‌های آبی شناخته می‌شوند و به همین دلیل در تحقیقات و مطالعاتی که با هدف ارزیابی وضعیت سلامت محیط و شناسایی منابع آلاینده به کار می‌روند بسیار موردتوجه می‌باشند (۴). سنجش وضعیت آلودگی رسوبات محیط‌های آبی، شناسایی دقیق منابع آلودگی و اعمال راهکارهای مدیریتی با توجه به نتایج ارزیابی‌های صورت گرفته به‌منظور کاهش میزان ورود آلاینده‌ها به محیط‌های آبی، از اهمیت بیش‌تری در مقایسه با روش‌های پاک‌سازی برخوردار است. ازاین‌رو از دهه‌های گذشته تاکنون مطالعات بسیاری بر سنجش وضعیت آلودگی رسوبات محیط‌های آبی در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است (۵). ازجمله راه‌های ارزیابی رسوبات، مقایسه رسوبات با استانداردهای کیفیت رسوب بوده و هدف از ارائه استانداردهای کیفیت رسوب، محافظت از محیط‌های آبی و بررسی کیفیت رسوبات از نظر میزان عناصر، مواد مغذی و ترکیبات آلی است. به‌طورکلی مقادیر استانداردها براساس چهار سطح بدون اثر، کم‌ترین سطح اثر، حد تأثیر متوسط و شدیدترین حد اثر ارائه شده‌اند (۶).

یکی از پدیده‌های نامطلوبی که در آب‌های سطحی به‌ویژه دریاچه‌ها و مخازن سدها اتفاق می‌افتد پدیده تغذیه‌گرایی است. ورود بار اضافی مواد مغذی به‌خصوص فسفر در اثر تخلیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی منجر به افزایش رشد جلبک می‌گردد. کیفیت آب در منابعی که دچار پدیده تغذیه‌گرایی شده‌اند به‌شدت پایین می‌آید (۷). هر پیکره آبی ساکن در طول زمان به سمت پرغذایی شدن حرکت می‌کند. این روند معمولاً در مخازن سریع‌تر از دریاچه‌های طبیعی رخ می‌دهد (۸). ارزیابی پتانسیل آزادسازی فسفر (P) از رسوبات برای کنترل تغذیه‌گرایی دریاچه‌ها و مخازن حیاتی است (۹).

نوری و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که با افزایش اندازه ذرات رسوب، ظرفیت جذب فسفر کاهش می‌یابد. همچنین، غلظت اولیه فسفر تأثیر مستقیمی بر میزان جذب آن دارد (۱۰). تنگ و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که میزان فسفر کل (TP) در رسوبات رودخانه چانگ‌جیانگ بین ۷۳۸ تا ۹۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که کمی بالاتر از میانگین ملی چین است. رسوبات دریاچه‌ها دارای غلظت بالاتری از فسفر کل هستند، بنابراین، رسوبات مخازن واقع در زیرحوضه‌های دریاچه‌های تایهو و چائوهو نقش مهمی در تشدید پدیده تغذیه‌گرایی این دریاچه‌ها دارند (۱۱). هونگ‌بین و همکاران (۲۰۲۲) با پژوهش در دریاچه تایهو نشان داده‌اند که افزایش دما موجب افزایش فسفر محلول و شار فسفر از رسوبات به آب بالایی شده و با این افزایش، رشد جلبک‌ها تشدید می‌شود. این یافته‌ها اهمیت بررسی چرخه داخلی فسفر رسوبی در مدیریت تغذیه‌گرایی آب‌ها را برجسته می‌سازد (۱۲). بالوئی و همکاران (۲۰۲۴) با بررسی رسوبات سطحی در پنج ایستگاه از سیروان‌رود و شاخه‌های قشلاق و گاوهرود نشان دادند

برخی ایستگاه‌ها (به‌ویژه ایستگاه‌های ۲ و ۳) دارای آلودگی بالای آلی و معدنی هستند. غلظت بالای فسفر کل و قابل‌دسترس در این مناطق خطر تغذیه‌گرایی را افزایش می‌دهد و کنترل آن پس از آبیگری سد دشوار خواهد بود (۱۳). ژانگ و همکاران (۲۰۲۵) با بررسی مطالعات انجام‌شده در سطح جهان از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۴ نتیجه گرفتند شاخص‌های آزمون فسفات رسوب (STP)^۱، با استفاده از استخراج‌های شیمیایی (به‌عنوان مثال، اسیدها، بازها، نمک‌ها)، به‌طور مؤثر فسفر قابل‌دسترس زیستی را تخمین می‌زنند. شاخص‌های هموستاز فسفر^۲ (PHI)، که از مدل‌سازی ایزوترم جذب مشتق شده‌اند، پتانسیل آزادسازی فسفر و حداکثر ظرفیت جذب را پیش‌بینی می‌کنند. اگرچه این شاخص‌ها مدیریت فسفر را بهبود می‌بخشند، اما برای برآورد دقیق‌تر شار فسفر، توصیه می‌شود از ترکیب چند شاخص به‌طور هم‌زمان استفاده شود و همچنین آزمایش‌های شبیه‌سازی سینتیک آزادسازی فسفر با استفاده از انکوباسیون‌های هسته دست‌نخورده، تحت شرایط کنترل‌شده pH و Eh انجام گیرد (۹).

سد ژاوه بر روی سیروان‌رود با هدف استحصال آب میان حوزه و آب رهاشده از سدهای قشلاق و گاوشان و انتقال آب جهت استفاده در بخش‌های کشاورزی و صنعت احداث شده است. شاخه قشلاق با سهم حدود ۴۳٪ آورد ورودی به مخزن سد، به دلیل مجاورت با شهر سنندج و صنایع اطراف این شهر، پذیرای حجم زیادی از فاضلاب‌های شهری و صنعتی است که اغلب بدون تصفیه کافی و رعایت استانداردهای لازم به رودخانه تخلیه می‌شوند. با توجه به مخزن سد ژاوه در پایین‌دست منابع آلاینده، ادامه این روند در آینده می‌تواند با ایجاد تغذیه‌گرایی

در مخزن سد، منجر به شرایط بحرانی‌تری گردد (۱۴). اگرچه مطالعه کیفیت رسوبات سیروان‌رود در سال‌های قبل انجام‌شده است، اما به دلیل تکمیل و ارتقای تصفیه‌خانه شهر سنندج در مجاورت شاخه قشلاق که در بالادست حوزه آبخیز این رودخانه قرار دارد، بررسی مجدد کیفیت رسوبات منطقه موردنظر به‌منظور مقایسه با مطالعه قبل ضروری است.

با توجه به اهمیت بالای سیروان‌رود در تأمین آب کشاورزی شهر سنندج و تأثیر آن بر اکوسیستم‌های محلی، این پژوهش با هدف تعیین تغییرات زمانی (فصلی) - مکانی (ایستگاهی) پارامترهای محیطی رسوبات در حوزه آبخیز سیروان رود و شاخه‌های اصلی آن، تعیین شاخص کیفیت رسوبات (SQI) و تعیین اشکال مختلف فسفر در رسوبات سطحی جهت پیش‌بینی پدیده تغذیه‌گرایی در محل احداث سد ژاوه بر روی سیروان‌رود و مقایسه پارامترهای محیطی رسوبات با استانداردهای ملی و جهانی و مطالعه پیشین (در ایستگاه‌ها و زمان‌های مشابه) در این ناحیه (جهت بررسی عملکرد تصفیه‌خانه) صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: رودخانه قشلاق در استان کردستان در شمال‌شرقی شهر سنندج پس از عبور از سد قشلاق، وارد محدوده شهری می‌شود. این رودخانه در پایین‌دست با پیوستن به شاخه گاوهرود در نهایت سیروان رود را تشکیل می‌دهد که به سد ژاوه می‌ریزد (شکل ۱). به دلیل اهمیت این حوزه آبخیز جهت کاربرد در کشاورزی بررسی کیفیت رسوبات آن ضرورت ویژه‌ای دارد.

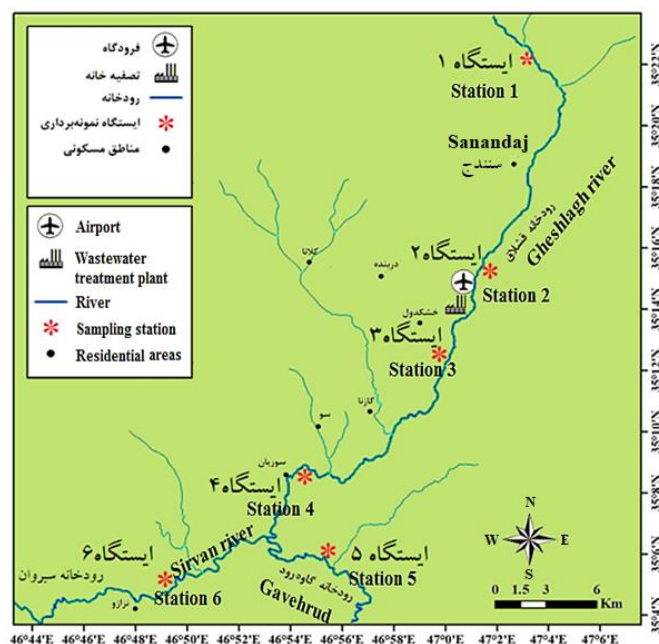
1- Sediment Test P

2- P Homeostasis Indices

فسفر متصل به آلومینیم، فسفر متصل به کلسیم و فسفر باقی‌مانده) وجود دارد (شکل ۲). از آنجایی که با روش‌های مستقیم اندازه‌گیری اطلاعات چندانی درباره اشکال مختلف فسفر به دست نمی‌آید و از سویی دیگر بدون شناسایی این ترکیبات (گونه‌های مختلف فسفر قابل دسترس برای موجودات) و فراوانی نسبی آن‌ها، درک چرخه فسفر در اکوسیستم‌های آبی دشوار خواهد بود، این روش آنالیز در این تحقیق به کار برده شد.

برای اندازه‌گیری فرم‌های مختلف فسفر، از روش طیف-نورسنجی^۳ استفاده گردید (۱۶ و ۱۷).

نمونه‌برداری از رسوبات سطحی شش ایستگاه واقع در امتداد شاخه‌های قشلاق و گاوه‌رود و همچنین در محل مخزن سد زاوه طی فصول مختلف تابستان، پاییز و زمستان (۱۴۰۲) و بهار (۱۴۰۳) انجام شد. مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. تعداد ۶ نمونه رسوب با نمونه‌بردار ون وین گرب^۱ جمع‌آوری گردید و پس از انتقال به آزمایشگاه با دستگاه فریز درایر^۲ مدل (Vaco2-Zirbus Technology) خشک شد. در این مطالعه از روش پس‌ر و همکاران (۱۹۸۴) برای جداسازی انواع فسفر موجود در رسوب استفاده شد (۱۵). در این روش امکان جداسازی پنج فرم مختلف فسفر (فسفر جذب سطحی، فسفر متصل به آهن،



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در حوزه آبخیز سیروان‌رود-سندج روی نقشه.

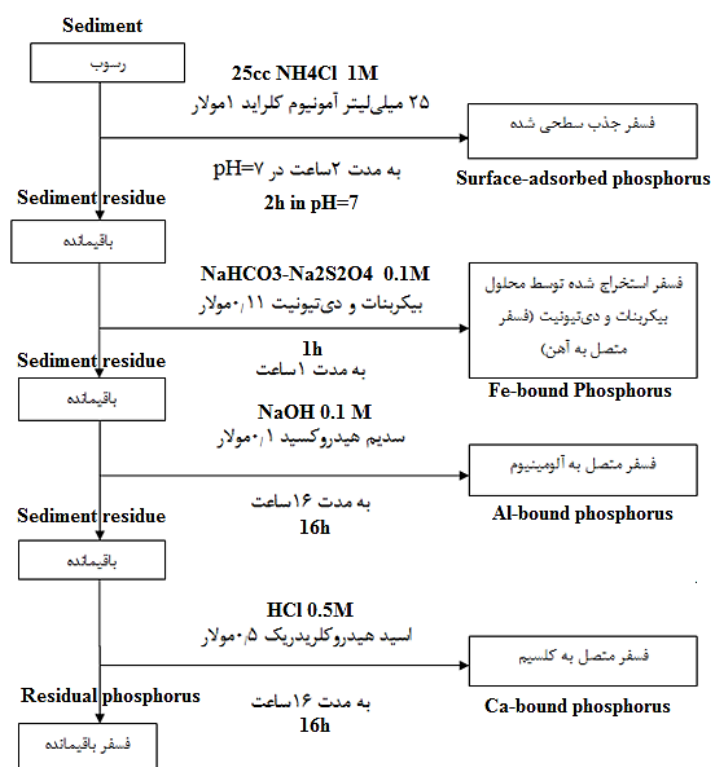
Figure 1. Location of sampling stations in the Sirvan river basin on the map.

- 1- Van Veen Grab sampler
- 2- Freeze dryer
- 3- Spectrophotometry

جدول ۱- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در حوزه آبخیز سیروان‌رود- سنندج (۱۴۰۲-۱۴۰۳).

Table 1. Location of sampling stations in the Sirvan river basin -Sanandaj (2023-2024).

شماره ایستگاه Number of Station	ایستگاه Name of Station	مختصات جغرافیایی Geographic coordinates	عمق (متر) Depth (meter)
1	بالادست قشلاق (قبل از تصفیه‌خانه) Upstream of Gheslagh branch (before the treatment plant)	N 35° 22' 36" E 47° 01' 12"	0.70
2	شاخه قشلاق (بالادست تصفیه‌خانه) Gheslagh branch (Upstream the treatment plant)	N 35° 13' 41" E 47° 00' 22"	0.50
3	شاخه قشلاق (پایین دست تصفیه‌خانه) Gheslagh branch (Downstream the treatment plant)	N 35° 12' 12" E 46° 59' 33"	0.50
4	شاخه قشلاق (حدود ۳ کیلومتر پایین‌تر از ایستگاه ۲ واقع گردید) Gheslagh Branch (located about 3 km downstream from Station 2)	N 35° 08' 08" E 46° 53' 59"	1.20
5	شاخه گاوه رود Gavehroud Branch	N 35° 05' 04" E 46° 55' 21"	0.80
6	رودخانه سیروان (محل سد) Sirvan River (dam reservoir)	N 35° 03' 52" E 46° 49' 51"	2.0



شکل ۲- نمودار روش استخراج متوالی (پی‌درپی) فسفر در رسوبات (۱۵).

Figure 2. Diagram of the sequential extraction method of phosphorus in sediments (15).

که در آن، C_i غلظت فسفر نمونه i است (mg/kg) و C_{std} غلظت استاندارد (mg/kg) است که پتانسیل ریسک اکولوژیک را نشان می‌دهد.

تجزیه و تحلیل آماری: در این مطالعه داده‌ها را براساس فرایند رتبه‌بندی انتقال داده و سپس با آزمون شاپیرو-ویلک^۴ و رسم شکل Q-Q نرمال بودن آن تأیید گردید (۲۱). برای تجزیه و تحلیل آماری از آزمون‌های پارامتریک رگرسیون گام به گام^۵ و همبستگی پیرسون^۶ و همچنین آزمون تی تک نمونه‌ای^۷ جهت مقایسه با استاندارد بر روی داده‌های نرمال شده استفاده گردید. تجزیه و تحلیل داده‌ها در برنامه‌های آماری SPSS نسخه ۱۸ انجام گردید.

نتایج و بحث

مقدار فسفر کل رسوبات در ایستگاه‌های ۳ و ۴، یعنی بعد از تصفیه‌خانه شهر سنندج افزایش فراوانی داشته است که به دلیل ورود مستقیم پساب تصفیه‌خانه فاضلاب سنندج است. آمار توصیفی (میانگین، حداقل و حداکثر) پارامترهای محیطی رسوبات در فصول و ایستگاه‌های مختلف حوزه آبخیز سیروان رود-سنندج در جدول ۲ و جدول ۳ آورده شده است. شکل ۳-الف درصد فرم‌های مختلف فسفر معدنی و آلی را در ایستگاه‌ها و شکل ۳-ب در فصول مختلف حوزه آبخیز سیروان رود-سنندج نشان می‌دهد. در همه ایستگاه‌ها و فصول درصد فسفر معدنی بیش از ۹۵ درصد از فسفر کل بود در صورتی که غلظت فسفر آلی کم‌تر از ۵ درصد ثبت گردید. این اختلاف به این دلیل است که مواد آلی حاوی فسفر به مرور توسط میکروارگانیسم‌ها تجزیه و به مواد معدنی تبدیل می‌شود که طی این فرآیند ترکیبات آلی فسفر به

pH، Eh و TOC رسوبات: ۱۰ گرم از هر نمونه رسوب با ۲۰ میلی‌لیتر محلول پتاسیم کلراید یک نرمال مخلوط و به مدت پنج دقیقه تکان داده شد. سپس بعد از گذشت ۳۰ دقیقه، pH و Eh محلول شفاف بالایی با دستگاه pH متر مدل WTW قرائت شد.

برای اندازه‌گیری کل کربن آلی^۱ (TOC) رسوب، مقدار مشخصی از رسوبات تر به کروزه وزن شده (وزن کروزه خالی=A) منتقل شد. سپس به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا خشک گردد (وزن کروزه + وزن رسوب خشک شده=B). در ادامه رسوب خشک شده مرحله قبلی به مدت ۴ ساعت در کوره ۵۵۰°C قرار گرفت. اوزان مربوطه تعیین و محاسبه کل مواد آلی^۲ (TOM) طبق رابطه ۱ انجام شد (۱۸):

$$TOM(\%) = (B - C / B - A) * 100 \quad (1)$$

میزان درصد کل کربن آلی (TOC) به روش غیرمستقیم با استفاده از کل مواد آلی (TOM) از طریق رابطه ۲ محاسبه گردید:

$$TOC(\%) = TOM(\%) / 1.724 \quad (2)$$

- شاخص آلودگی فسفر (PPI): شاخص آلودگی فسفر^۳ (PPI) معمولاً برای ارزیابی سطح آلودگی فسفر در مناطق مورد مطالعه استفاده می‌شود که برابر با سطح آلودگی مقدار محاسبه شده به سطح استاندارد آلودگی است و پتانسیل ریسک اکولوژیک را نشان می‌دهد (۱۹ و ۲۰).

معادله رابطه ۳ برای محاسبه PPI استفاده گردید:

$$PPI = C_i / C_{std} \quad (3)$$

4- Shapiro-Wilk
5- Stepwise regression
6- Pearson correlation
7- One-sample t test

1- Total Organic Carbon
2- Total Organic Matter
3- Phosphorus Pollution Index

اشکال معدنی نظیر فسفات‌های محلول تبدیل می‌شوند. از طرفی فسفر معدنی به راحتی با آهن، آلومینیم و کلسیم ترکیب شده و به شکل فسفات‌های نامحلول در بستر رسوبات تثبیت می‌شود بنابراین در برابر فسفر آلی که سریع تر تجزیه می‌شود، پایدارتر است.

جدول ۲- آمار توصیفی پارامترهای محیطی رسوبات در فصول مختلف حوزه آبخیز سیروانرود- سنندج (۱۴۰۲-۱۴۰۳).

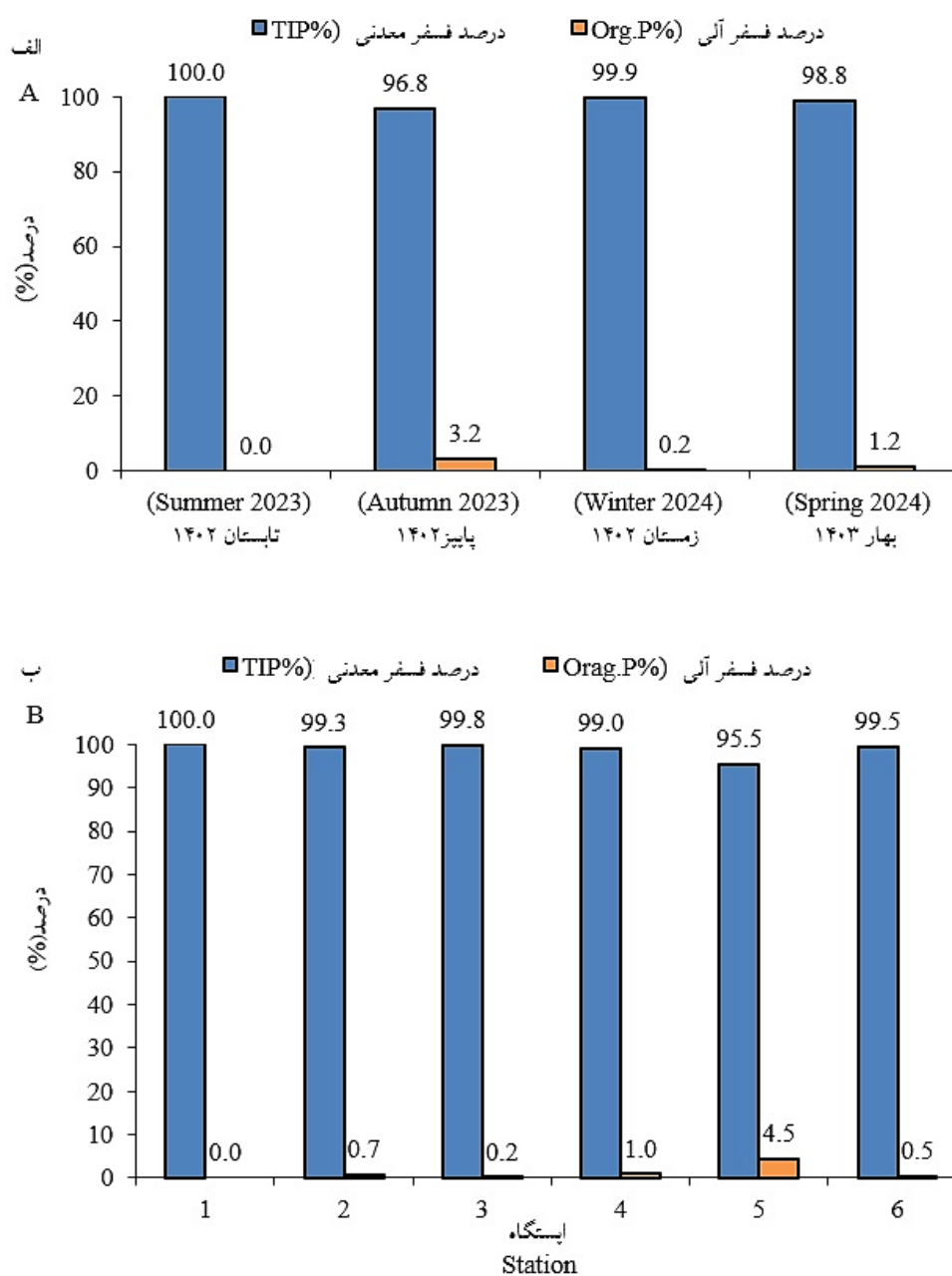
Table 2. Descriptive statistics of sediment environmental parameters in different seasons of the Sirvan river basin -Sanandaj (2023-2024).

فصل‌ها Seasons		متغیرها Variables									
		pH	Eh	فسفر سطحی Loosely-P	فسفر متصل به آهن Fe-P	فسفر متصل به آلومینیم Al-P	فسفر متصل به کلسیم Ca-P	فسفر قابل دسترس Biova. P	فسفر معدنی TIP	فسفر کل TP	فسفر باقی‌مانده (آلی) Org.P
تابستان ۱۴۰۲ Summer 2023	Mean	7.72	-64.40	54.74	366.36	540.05	1309.25	961.15	2270.6	2270.6	0.0
	SE	0.14	8.53	21.17	105.88	175.74	241.21	285.76	500.6	500.6	0.0
	Min	7.22	-85.70	16.95	178.65	219.79	917.60	519.76	1456.0	1456.0	0.0
	Max	8.07	-34.70	136.56	768.29	1127.86	2228.30	1947.39	4176.0	4176.0	0.0
پاییز ۱۴۰۲ Autumn 2023	Mean	7.80	-68.20	48.80	273.12	788.10	1392.14	1110.01	2502.0	2559.6	57.6
	SE	0.10	6.01	16.75	85.32	213.99	319.22	311.44	620.8	609.6	26.6
	Min	7.41	-84.40	14.67	70.48	163.42	585.85	248.56	834.0	961.0	0.0
	Max	8.07	-45.80	118.27	625.07	1536.19	2566.54	2279.54	4846.0	4846.0	128.0
زمستان ۱۴۰۲ Winter 2024	Mean	7.69	-61.56	29.14	231.67	820.40	1306.82	1081.22	2388.0	2393.2	5.1
	SE	0.07	4.03	6.19	55.79	153.98	149.63	195.36	285.7	287.4	4.7
	Min	7.50	-74.00	14.67	76.57	166.46	854.00	259.23	1467.0	1467.0	0.0
	Max	7.90	-50.90	47.43	427.00	1103.48	1774.26	1513.92	3288.0	3288.0	25.7
بهار ۱۴۰۳ Spring 2024	Mean	7.97	-57.10	190.04	617.15	937.72	1740.74	1744.90	3485.8	3526.4	40.6
	SE	0.14	8.38	13.61	54.78	193.31	96.28	239.43	322.6	306.6	26.7
	Min	7.62	-89.20	144.94	433.10	580.89	1454.31	1248.81	2807.0	2860.0	0.0
	Max	8.51	-36.60	229.50	783.53	1755.59	2024.14	2730.52	4755.0	4755.0	150.0
کل Total	Mean	7.80	-63.37	76.87	344.86	704.50	1406.61	1126.23	2532.8	2555.6	22.8
	SE	0.06	3.18	14.82	47.79	93.64	101.84	141.01	227.0	226.2	9.7
	Min	7.22	-89.20	14.67	70.48	93.33	585.85	189.14	834.0	961.0	0.0
	Max	8.51	-34.70	229.50	783.53	1755.59	2566.54	2730.52	4846.0	4846.0	150.0

جدول ۳- آمار توصیفی پارامترهای محیطی رسوبات در ایستگاه‌های مختلف حوزه آبخیز سیروان‌رود-سندج (۱۴۰۲-۱۴۰۳).

Table 3. Descriptive statistics of sediment environmental parameters in different stations of the Sirvan river basin -Sanandaj (2023-2024).

Station: Saman (2010-2011)											
ایستگاه‌ها Stations	متغیرها Variables										
	pH	Eh	فسفر سطحی Loosely-P	فسفر متصل به آهن Fe-P	فسفر متصل به آلومینیم Al-P	فسفر متصل به کلسیم Ca-P	فسفر قابل دسترس Biova. P	فسفر معدنی TTP	فسفر کل TP	فسفر باقی مانده (آلی) Org.P	
1	Mean	7.85	-66.12	46.86	167.22	270.07	1239.76	484.15	1723.7	1725.7	2.0
	SE	0.08	5.44	23.55	63.68	110.85	97.65	197.08	123.0	124.4	2.0
	Min	7.70	-81.70	16.95	72.00	93.33	957.61	189.14	1461.0	1461.0	0.0
	Max	8.02	-56.30	116.75	343.20	568.70	1387.27	1028.65	1986.0	1994.0	8.0
2	Mean	7.74	-57.80	72.82	359.96	743.40	1293.82	1176.19	2470.0	2481.0	11.0
	SE	0.13	9.40	49.39	126.03	153.17	190.34	298.64	476.8	468.5	11.0
	Min	7.50	-76.40	22.29	198.46	437.67	1082.54	658.41	1741.0	1774.0	0.0
	Max	7.93	-46.10	171.60	608.31	913.03	1673.71	1692.95	3367.0	3367.0	33.0
3	Mean	7.57	-49.62	103.42	556.13	1133.96	2076.70	1793.50	3870.2	3876.7	6.4
	SE	0.15	7.10	47.18	145.06	157.18	211.25	217.25	428.2	422.9	6.4
	Min	7.22	-68.80	14.67	129.90	768.29	1573.14	1248.05	2821.0	2847.0	0.0
	Max	7.83	-34.70	229.50	768.29	1536.19	2566.54	2279.54	4846.0	4846.0	25.7
4	Mean	7.78	-62.22	78.85	423.19	999.88	1619.51	1501.92	3121.5	3153.5	32.0
	SE	0.07	8.96	37.57	128.15	302.05	241.64	457.82	676.3	674.9	32.0
	Min	7.62	-75.20	36.00	219.79	282.26	917.60	538.05	1456.0	1456.0	0.0
	Max	7.90	-36.60	191.41	783.53	1755.59	2024.14	2730.52	4755.0	4755.0	128.0
5	Mean	7.83	-64.92	48.19	217.50	305.11	1101.11	570.80	1672.0	1741.2	69.2
	SE	0.09	2.25	32.25	88.13	122.57	213.92	234.98	426.4	442.1	40.3
	Min	7.69	-71.30	14.67	70.48	163.42	585.85	248.56	834.0	961.0	0.0
	Max	8.09	-60.80	144.94	433.10	670.78	1612.76	1248.81	2862.0	3012.0	150.0
6	Mean	8.05	-78.15	110.08	348.92	784.29	1080.54	1243.29	2323.7	2337.0	13.2
	SE	0.20	8.35	40.40	78.55	75.03	130.89	45.91	171.1	183.6	13.2
	Min	7.55	-89.20	43.62	209.12	580.89	854.00	1138.35	2062.0	2062.0	0.0
	Max	8.51	-53.30	212.74	559.55	908.46	1454.30	1353.18	2807.0	2860.0	53.0

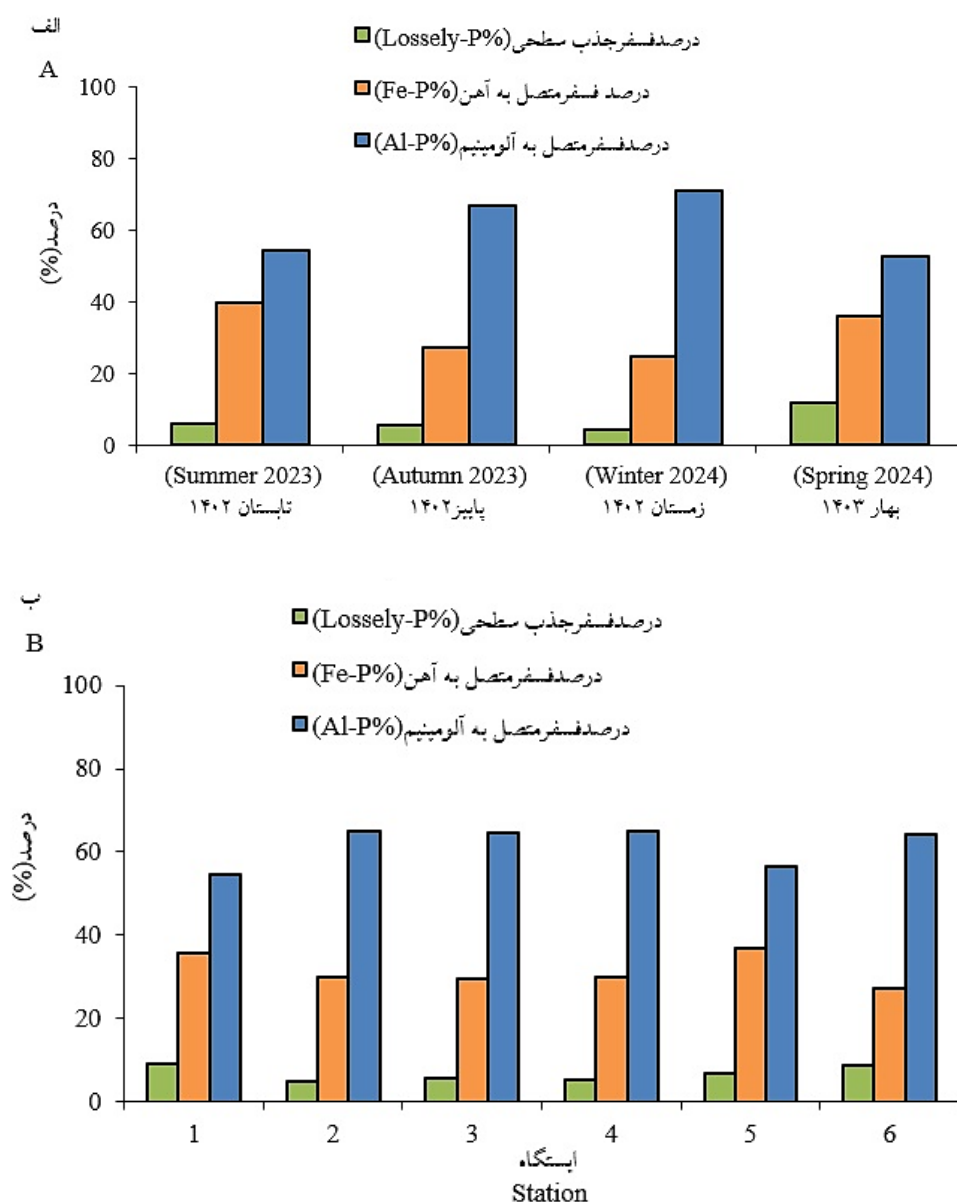


شکل ۳- تغییرات درصد فرم فسفر معدنی کل (TIP) و آلی (Org.-P) در فصول (الف) و ایستگاه‌ها (ب) حوزه آبخیز سیروان‌رود-سنندج (۱۴۰۲-۱۴۰۳).

Figure 3. Percentage distribution of Inorganic Phosphorus (TIP) and Organic Phosphorus (Org.-P) forms at different seasons (A) and stations (B) in the Sirvan river basin, Sanandaj (2023–2024).

شکل ۴-الف درصد فرم‌های مختلف فسفر قابل‌دسترس (فسفر جذب سطحی، فسفر متصل به آهن و فسفر متصل به آلومینیم) فسفر متصل به آلومینیم (بیش از ۶۰ درصد) بیش‌ترین و فسفر جذب سطحی کم‌ترین درصد را داشتند.

شکل ۴-الف درصد فرم‌های مختلف فسفر قابل‌دسترس رسوبات را در ایستگاه‌ها و شکل ۴-ب درصد آن‌ها را در فصول مختلف حوزه آبخیز سیروان‌رود-سنندج نشان می‌دهد. در میان سه فرم

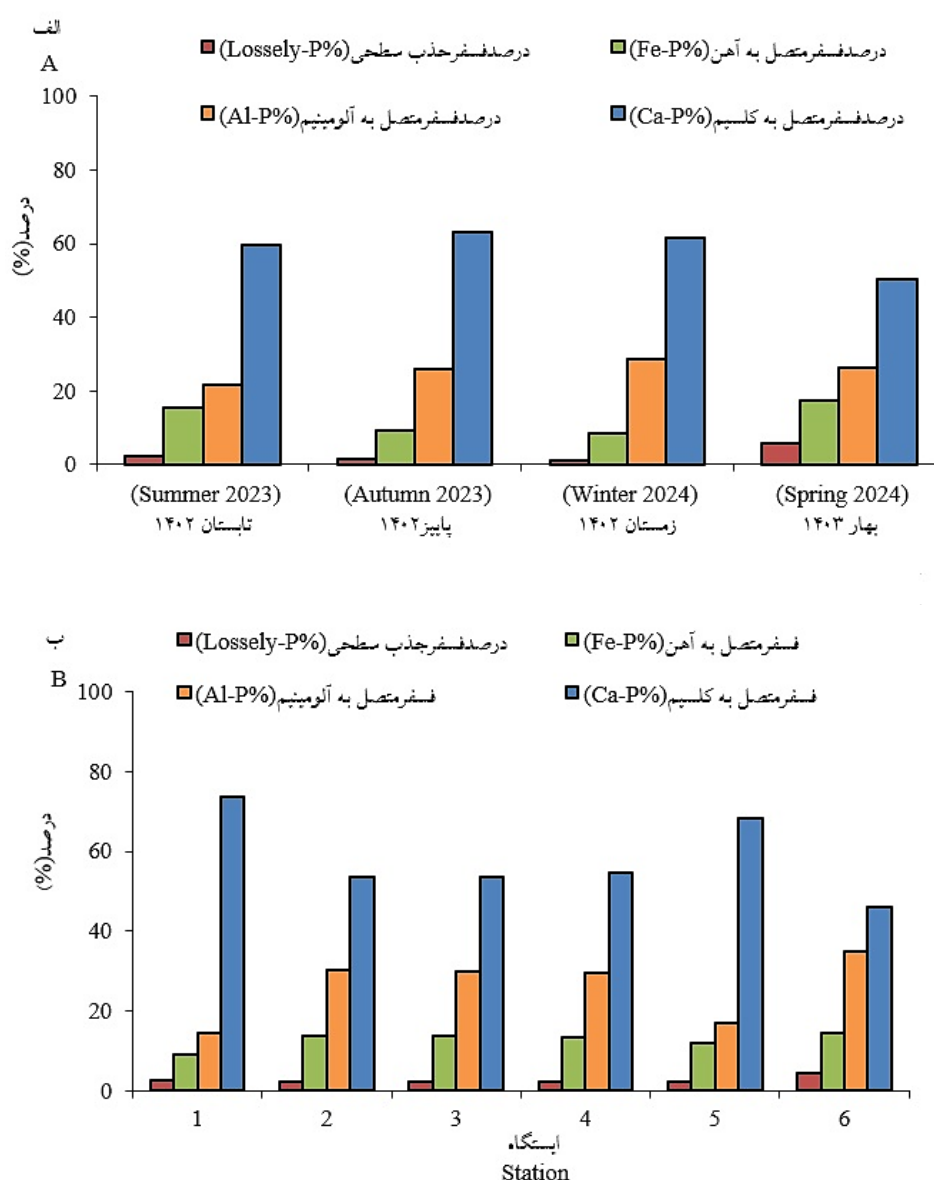


شکل ۴- درصد فرم‌های مختلف فسفر قابل دسترس در فصول (الف) و ایستگاه‌های مختلف (ب) حوزه آبخیز سیروان‌رود-سنندج (۱۴۰۲-۱۴۰۳).

Figure 4. Percentage distribution of different forms of bioavailable Phosphorus at different seasons (A) and stations (B) in the Sirvan river basin, Sanandaj (2023–2024).

و فسفر متصل به کلسیم) فسفر متصل به کلسیم (۶۳-۵۰ درصد) بیش‌ترین و فسفر جذب سطحی (۷۰/۵-۱/۷۰) کم‌ترین درصد را در تمام ایستگاه‌ها و فصول داشتند.

شکل ۵-الف درصد فرم‌های مختلف فسفر معدنی رسوبات در ایستگاه‌ها و شکل ۵-ب در فصول مختلف حوزه آبخیز سیروان‌رود-سنندج را نشان می‌دهد. در میان چهار فرم فسفر معدنی (فسفر جذب سطحی، فسفر متصل به آهن، فسفر متصل به آلومینیم



شکل ۵- درصد فرم‌های مختلف فسفر معدنی در فصول (الف) و ایستگاه‌های مختلف (ب) حوزه آبخیز سیروان‌رود-سندج (۱۴۰۲-۱۴۰۳).

Figure 5. Percentage distribution of different inorganic Phosphorus forms at different of seasons (A) and stations (B) in the Sirvan river basin, Sanandaj (2023–2024).

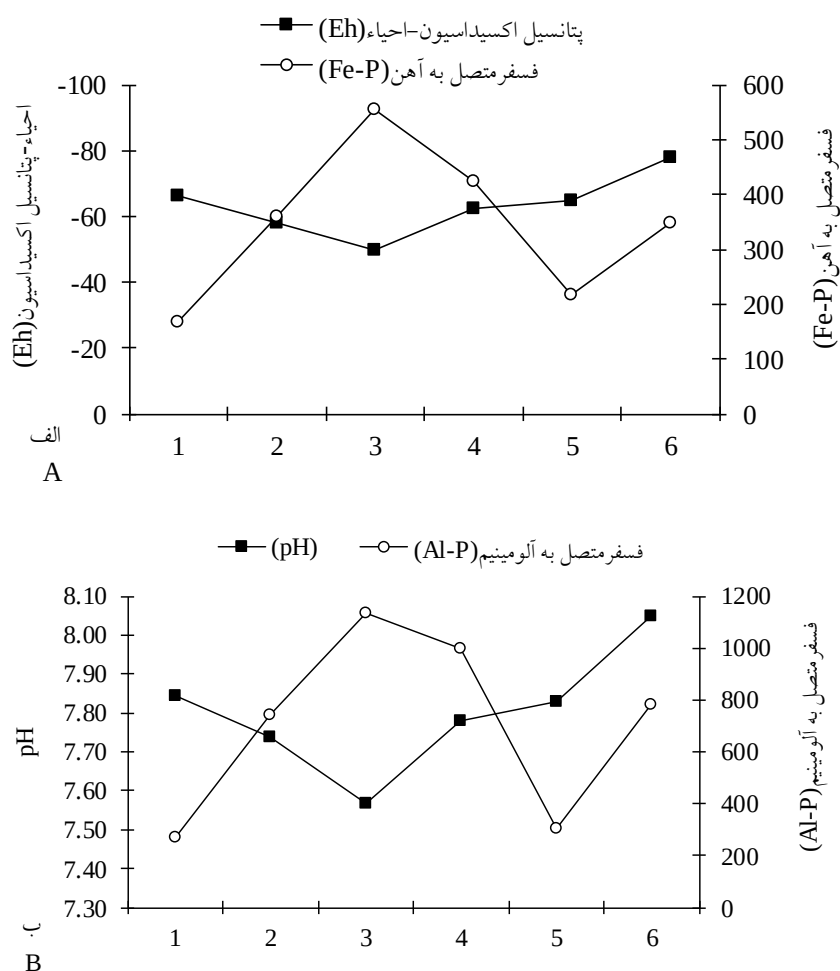
فسفر جذب سطحی کم‌ترین درصد را بین فرم‌های فسفر قابل‌دسترس دارد که به دلیل مصرف شدن مستقیم آن توسط موجودات زنده است. فسفر قابل‌دسترس در بیش‌تر موارد به فرم‌های فسفر متصل به آهن و فسفر متصل به آلومینیم در رسوبات مشاهده شد. این مقادیر در ایستگاه ۶ که محل احداث سد می‌باشد نسبت به ایستگاه‌های ۱ و ۵ افزایش یافت.

نتایج این تحقیق نشان داد غلظت فسفر قابل‌دسترس (مجموع سه فرم فسفر جذب سطحی، متصل به آهن و متصل به آلومینیم) در رسوبات ایستگاه‌های ۳ و ۴ (شاخه قشلاق رود) دارای درصد قابل‌ملاحظه‌ای بوده است (تقریباً ۵۰ درصد از فسفر کل) که به دلیل تخلیه مستقیم فاضلاب شهر به داخل این شاخه است.

۶-الف). هم‌چنین غلظت این نوع فسفر در مقایسه با فسفر متصل به آلومینیم کم‌تر می‌باشد.

میزان فسفر متصل به آلومینیم (Al-P) تحت‌تأثیر pH محیط قرار دارد. با افزایش pH و رقابت یون هیدروکسید با یون فسفات، فسفات از رسوب آزاد شده و میزان آن در رسوب کاهش می‌یابد. با توجه به افزایش pH، طبق شکل ۶-ب غلظت فسفر متصل به آلومینیم کاهش یافته است.

در رسوبات با پتانسیل اکسیداسیون-احیاء (Eh) منفی، Fe^{2+} به Fe^{3+} تبدیل شده و چون فسفر متصل به آهن دوظرفیتی به‌صورت محلول است، در نتیجه شرایط آزادسازی فسفر از رسوب به محیط آب فراهم خواهد شد. در این مطالعه در تمام ایستگاه‌ها پتانسیل اکسیداسیون-احیاء منفی دارند. بنابراین آزادسازی فسفر متصل به آهن (Fe-P) راحت‌تر انجام گرفته و مقدار فسفر متصل به آهن کاهش می‌یابد (شکل

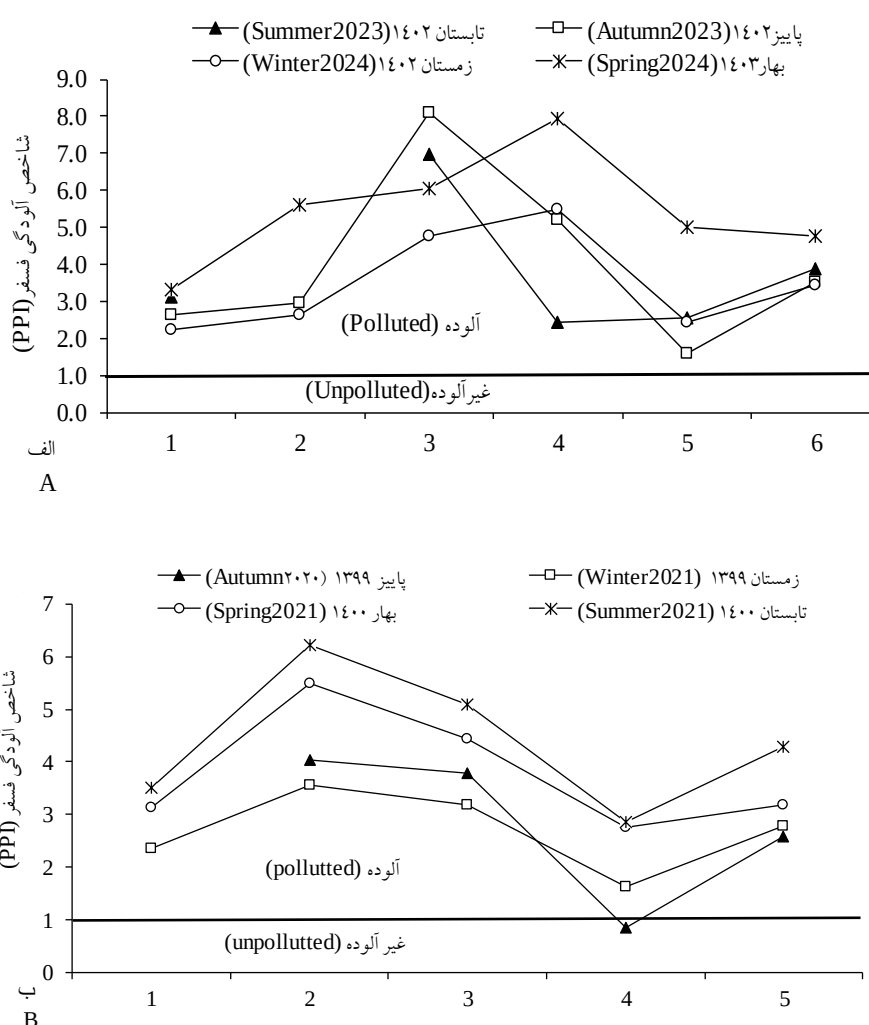


شکل ۶- تغییرات Eh و غلظت Fe-P (الف) و pH و Al-P (ب) در ایستگاه‌های مختلف حوزه آبخیز سیروان‌رود (سال ۱۴۰۳-۱۴۰۲).

Figure 6. Variations in Eh and Fe-P (A), pH and Al-P concentration (B) at sampling stations in the Sirvan river basin (2023–2024).

دادند. PPI در اکثر محل‌های نمونه‌برداری بیش از ۱ بود، که نشان می‌دهد رسوبات منطقه مورد مطالعه از نظر غلظت فسفر آلوده شده‌اند. مقایسه میانگین شاخص PPI در دو مطالعه این حوزه نشان داد که در تحقیق حاضر آلودگی کمی بیش‌تر از مطالعه قبل (۱۳۹۹-۱۴۰۰) با میانگین $3/4 \pm 0/81$ (شکل ۷-ب) بوده است.

با توجه به معیارهای ارزیابی کیفیت وزارت محیط‌زیست و انرژی (DOEE) - کانادا (۲۲)، هنگامی که غلظت فسفر از ۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم (C_{std}) بیش‌تر شود، این منجر به حداقل سطح خطر زیست‌محیطی می‌شود (۲۳). در تحقیق حاضر PPI از ۱/۶ تا ۸/۱ با میانگین $4/2 \pm 1/8$ در رسوبات حوزه آبخیز سیروان‌رود متغیر بود (شکل ۷-الف). ایستگاه‌های ۱ و ۳ به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین PPI را نشان



شکل ۷- مقایسه شاخص آلودگی فسفر (PPI) حوزه آبخیز سیروان‌رود-سندج در فصول و ایستگاه‌های مختلف سال‌های ۱۴۰۳-۱۴۰۲ (الف) و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ (ب).

Figure 7. Comparison of the Phosphorus Pollution Index (PPI) in the Sirvan river basin, Sanandaj at different seasons and sampling stations during 2023–2024 (A) and 2020–2021 (B).

TP بیش‌تر از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک دارای آلودگی بالا بوده است (جدول ۴). میانگین کل کربن آلی (TOC%) رسوبات این حوزه در محدوده استاندارد کشور کانادا بوده است اما حداکثر آن (ایستگاه ۳ و ۴) بیش‌تر از مقدار استاندارد ثبت گردید. همچنین مقایسه میانگین تحقیق حاضر (۱۴۰۳-۱۴۰۲)، (۲۵۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) و مطالعه قبل (۱۴۰۰-۱۳۹۹)، (۲۰۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) نشان می‌دهد که غلظت TP افزایش ۱/۲ برابری را نشان می‌دهد اما درصد TOC تقریباً مشابه بوده است (جدول ۴).

غلظت TP رسوبات در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مخازن حوزه رودخانه چانجیانگ چین نشان می‌دهد که میانگین مقدار TP رسوبات در حوزه بین ۷۳۸ تا ۹۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک بود که کمی بیش‌تر از سطح متوسط ملی (۷۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است (۲۴). نتایج تحقیق حاضر نشان داد که میانگین میزان غلظت TP حوزه آبخیز سیروان‌رود تحقیق حاضر (۲۵۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در مقایسه با استاندارد ملی چین (۷۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) ۳/۴۴ برابر بیش‌تر بوده است به‌طوری‌که براساس محدوده غلظتی آلودگی فسفر کل رسوبات تمام ایستگاه‌ها با غلظت

جدول ۴- مقایسه محدوده استاندارد غلظت فسفر کل در رسوبات با تحقیق حاضر.

Table 4. Comparison of standard ranges for Total Phosphorus concentration in sediments with the present study.

مراجع References	محدوده مقادیر TOC (%) Threshold TOC	محدوده غلظت TP (mg/kg.dw) Threshold TP	کشورها Countries
Yang et al., 2017	-	733	China چین (NAL)
Huh et al., 2014	-	1600	South Korea کره جنوبی (SMSs)
Persaud et al., 1993	1-10	600-2000	Canada انتاریو کانادا (PSQG)
Baloei et al., 2024	0.86-26.23	515-3725	Iran ایران، حوزه آبخیز
	5.35 ± 5.19	2075 ± 776	سیروان‌رود-سندج (۱۴۰۰-۱۳۹۹)
تحقیق حاضر Present study	0.59-29.81	961-4846	Iran ایران، حوزه آبخیز
	5.46 ± 1.29	2519 ± 231.2	سیروان‌رود-سندج (۱۴۰۳-۱۴۰۲)

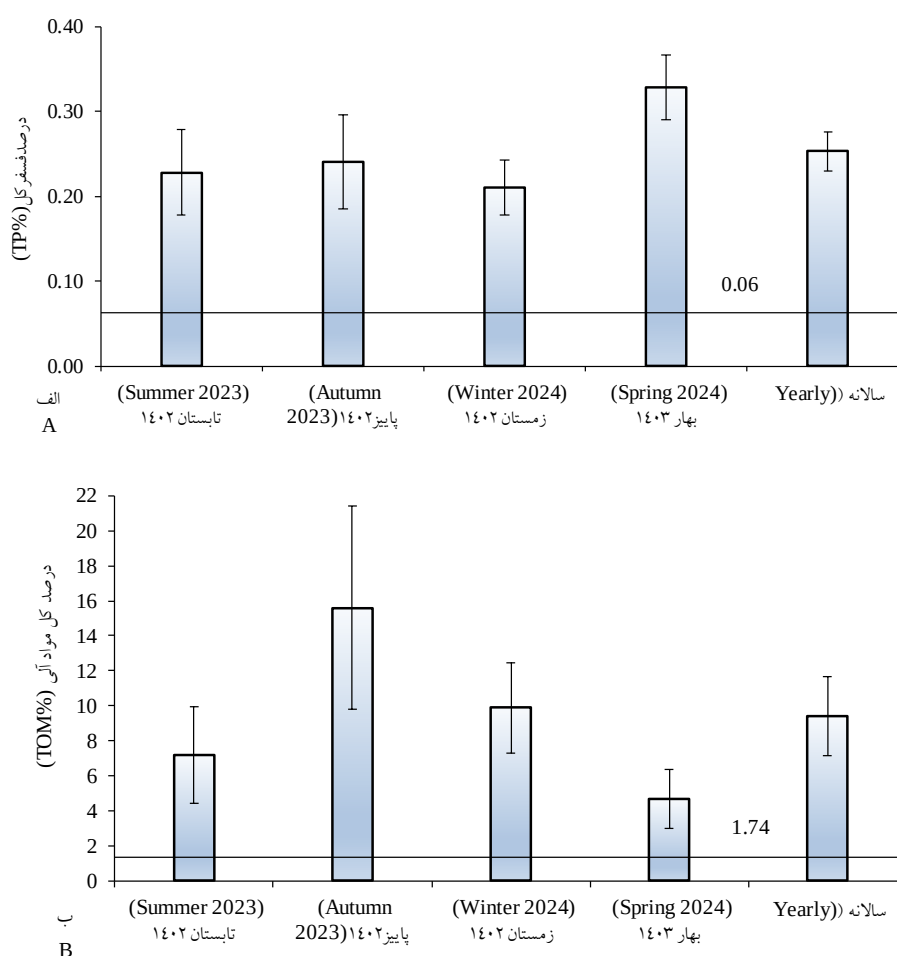
واقع در این زیرحوضه‌ها دارای محتوای متوسط TP نسبتاً زیاد ۴۷۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم هستند که شش برابر بیش‌تر از میانگین ملی کشور چین است، این نشان‌دهنده پتانسیل آزاد شدن فسفر بالا و خطر مغذی شدن دریاچه می‌باشد. بنابراین، این شرایط برای سیروان‌رود نیز با توجه بالا بودن غلظت فسفر کل (۲۵۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در مسیر رودخانه‌های منتهی به سد خطر مغذی کردن آن را افزایش خواهد داد.

براساس گزارش یانگ و همکاران (۲۰۱۷) غلظت فسفر کل (TP) در رسوبات دریاچه بیش‌تر از رسوبات رودخانه است، و نیتروژن و فسفر آزادشده از رسوبات منابع مغذی اساسی برای تقویت یوتروفیکاسیون دریاچه‌ها و سدها هستند (۲۳). در دریاچه تایهو و دریاچه چائوهو، انشعابات مانند رودخانه ووچیانگ و رودخانه هانجیانگ از مناطقی با سطح فسفر بالا از نظر زمین‌شناسی عبور می‌کنند. بنابراین، رسوب مخازن

تغذیه‌گرایی و ترمیم اکولوژیکی حوزه ارائه کرده است.

براساس نتایج به‌دست‌آمده درصد مقادیر فسفر کل و مواد آلی کل معمولاً به ترتیب در محدوده ۰/۱۷-۰/۳۹٪ (شکل ۸-الف) و ۱۹/۲۳-۴/۶۵٪ (شکل ۸-ب) متغیر بوده و در مقایسه با ارزیابی استاندارد کانادا به‌صورت فصلی و سالانه بیش‌تر بوده است (۳).

معیارهای درجه‌بندی، ازجمله دستورالعمل‌های ارزیابی کیفیت رسوب (توسط وزارت محیط‌زیست و انرژی، انتاریو- کانادا)، شاخص آلودگی منفرد و شاخص آلودگی کلی به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی عناصر مغذی رسوب استفاده شده است. این مطالعه، روشی را برای ارزیابی مؤثر خطر اکولوژیکی مواد مغذی در رسوبات حوضه، تعیین منابع کنترل و عوامل تأثیرگذار مواد مغذی در رسوبات و جلوگیری از

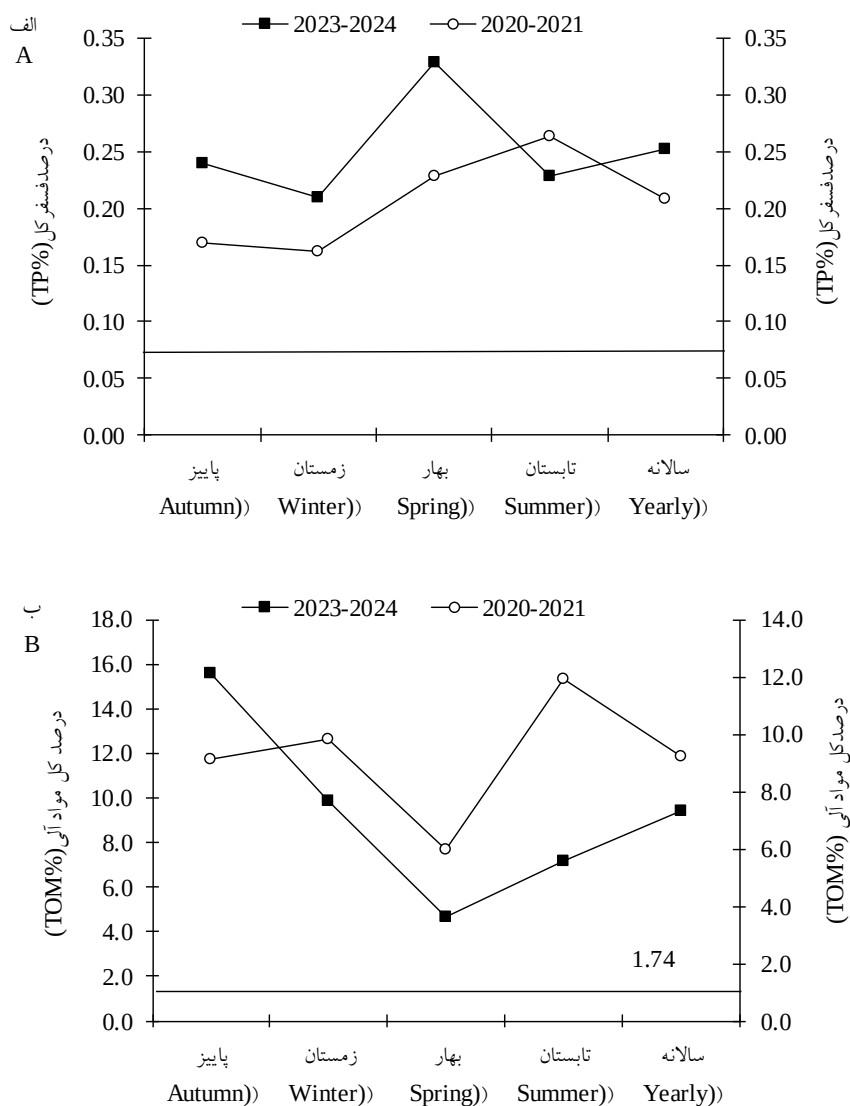


شکل ۸- تغییرات میانگین درصد فسفر کل (الف) و مواد آلی کل (ب) حوزه آبخیز سیروان‌رود به همراه ارزیابی استاندارد انتاریو کانادا (۶).

Figure 8. Variations in the mean percentage of Total Phosphorus (A) and Total Organic Matter (B) in the Sirvan river basin, along with the Canadian standard assessment (6).

(به‌غیر از فصل پاییز) و سالانه کم‌تر از مطالعه قبلی (۱۳۹۹-۱۴۰۰) مشاهده شد (شکل ۹-ب). به‌طور کلی در هر دو سال در مقایسه با ارزیابی استاندارد کانادا بیش‌تر بوده است.

براساس نتایج به‌دست‌آمده درصد مقادیر TP در تحقیق حاضر در تمام فصول (به‌غیر از تابستان) بیش‌تر از مطالعه قبلی (۱۳۹۹-۱۴۰۰) بوده است و مقایسه سالانه تقریباً مشابه ثبت گردید (شکل ۹-الف). درصد TOM در تحقیق حاضر در تمام فصول



شکل ۹- مقایسه میانگین درصد فسفر کل (الف) و مواد آلی کل (ب) حوزه آبخیز سیروان‌رود به همراه ارزیابی استاندارد کانادا.

Figure 9. Comparison of the mean percentage of Total Phosphorus (A) and Total Organic Matter (B) in the sirvan river basin, along with the Canadian standard assessment.

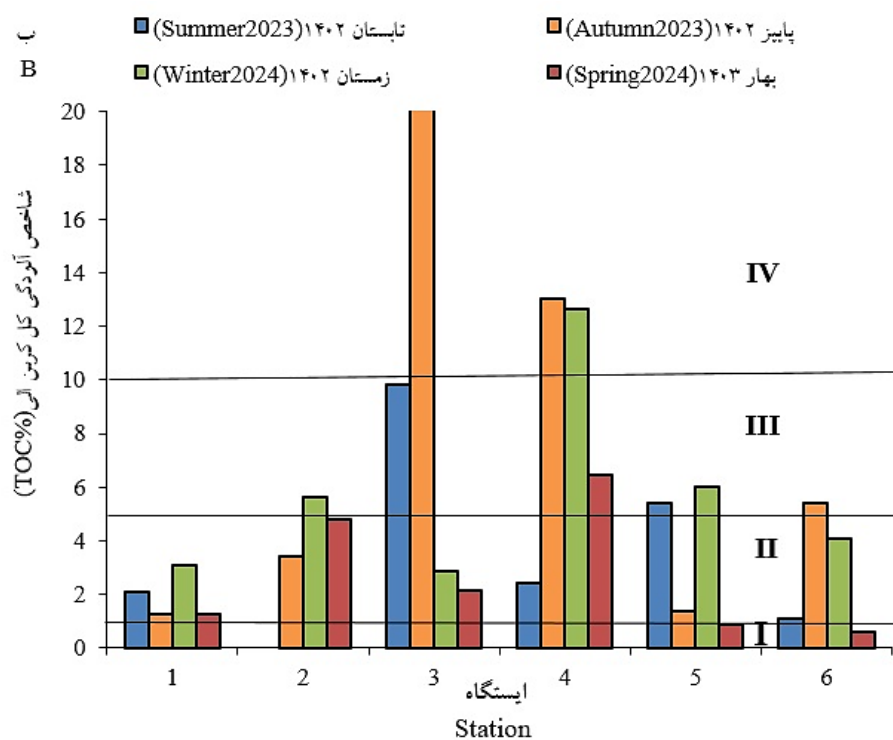
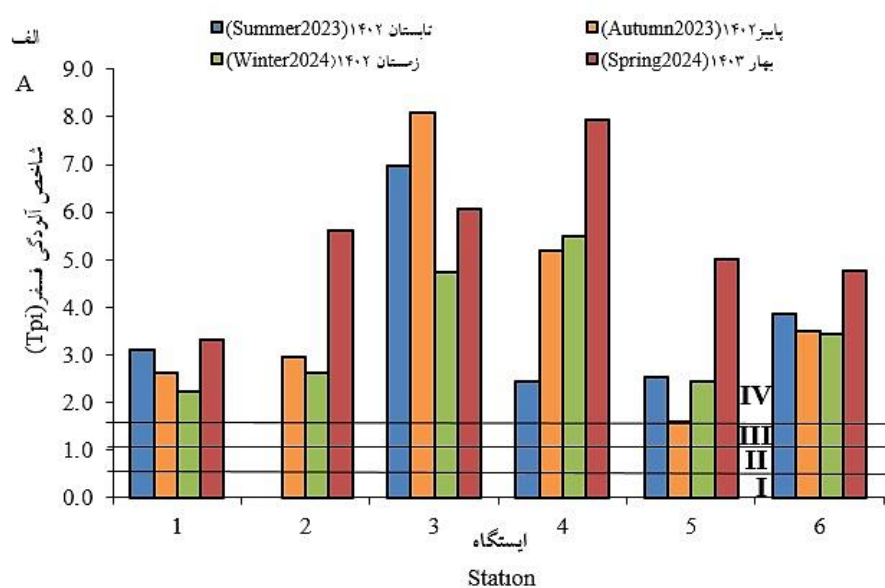
نسبت به محدودیت‌های غلظت مناسب برای مواد مغذی و کل کربن آلی در دستورالعمل‌های کیفیت رسوب (SQGs) (۲۵)، غلظت استاندارد TP و %TOC به ترتیب برابر ۶۰۰ میکروگرم بر گرم و ۱٪ می‌باشد. مطابق با این شاخص، خطرات به چهار درجه طبقه‌بندی می‌شوند، همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده درصد مقادیر TP_i در تحقیق حاضر در تمام ایستگاه‌ها و سالانه بیشتر از مطالعه قبلی (۱۴۰۰-۱۳۹۹) بوده است. درصد P_{TOC} در تحقیق حاضر در تمام ایستگاه‌ها و سالانه بیشتر از مطالعه قبلی (۱۴۰۰-۱۳۹۹) مشاهده شد (شکل ۱۰). به‌طورکلی P_{TOC} در هر دو سال در مقایسه با معیار ارزیابی جدول ۵ در وضعیت ریسک آلودگی متوسط (به‌غیر از ایستگاه‌های ۳ و ۴) بوده است

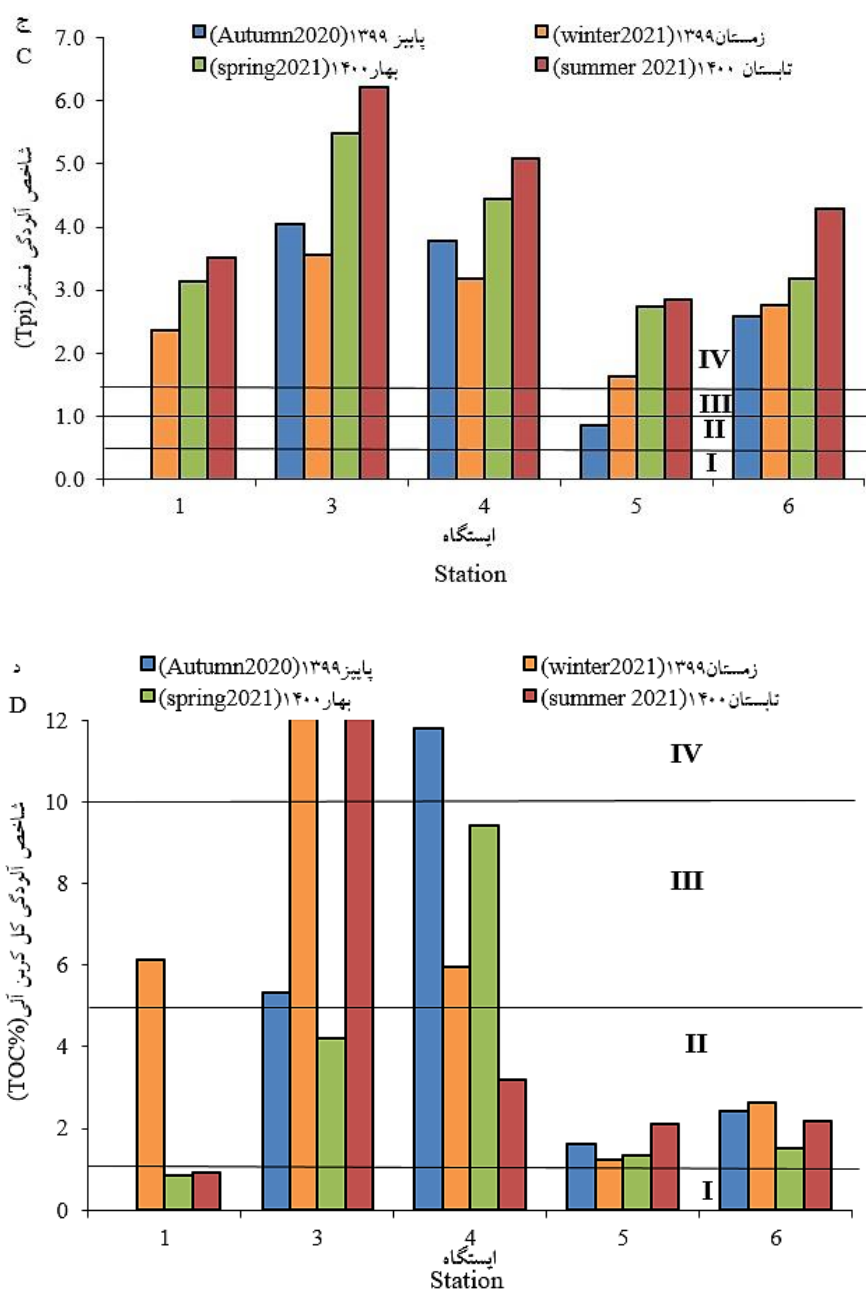
نتایج تغییرات ارزیابی TP_i و %TOC در رسوبات سطحی در ایستگاه‌ها و فصول مختلف حوزه آبخیز سیروان‌رود در شکل ۱۰ در مقایسه با جدول ۴ نشان داد که براساس مقدار TP_i رسوبات رودخانه خیلی آلوده (seriously polluted) ارزیابی گردید. اما براساس %TOC رسوبات منطقه کمی آلوده تا خیلی آلوده به‌خصوص در ایستگاه‌های ۳ و ۴ در نظر گرفته شد. کل فصول وضعیت ایستگاه ۵ که مربوط به رودخانه گاوه‌رود می‌باشد بهتر بوده است اما ایستگاه‌های رودخانه قشلاق حتی در بالادست نیز آلودگی‌های مختلف TP_i و %TOC را نشان داده است. طبق نتایج روش شاخص آلودگی منفرد، سطح خطر آلودگی TOC در رسوبات در کل منطقه نسبتاً زیاد بوده و سطح خطر آلودگی TP کم تا متوسط و در برخی مناطق شدید بوده است.

جدول ۵- معیار ارزیابی مواد مغذی (ریسک اکولوژیکی فسفر و کربن) رسوبات آب‌های سطحی (۲۵).

Table 5. Evaluation criteria for nutrient content (ecological risk of Phosphorus and Carbon) in surface sediments (25).

سطح خطر Risk Level	کل کربن آلی TOC	فسفر کل TP	ارزیابی آلودگی Pollution Assessment
I	P _{TOC} <1	P _{TP} <0.5	تمیز Clean
II	1<P _{TOC} <5	0.5<P _{TP} <1	کمی آلوده Slightly Polluted
III	5<P _{TOC} <10	1<P _{TP} <1.5	آلودگی متوسط Moderately Polluted
IV	P _{TOC} >10	P _{TP} >1.5	به‌شدت آلوده Seriously Polluted





شکل ۱۰- مقایسه شاخص استاندارد TP_i و TOC در رسوبات حوزه آبخیز سیروان رود-سندج در ایستگاه‌ها و فصول مختلف سال‌های ۱۴۰۲-۱۴۰۳ (الف و ج) و ۱۳۹۹-۱۴۰۰ (ب و د).

Figure 10. Comparison of standard indices TP_i and TOC in sediments of the Sirvan river basin–Sanandaj at different stations and seasons during 2020–2021 (A,C) and 2023–2024 (B,D).

۱/۵ و ۳/۰ برابر بیش‌تر از سال قبل (۱۴۰۰-۱۳۹۹) ثبت گردیده است. شایان ذکر است که براساس نتایج به‌دست‌آمده برای دبی آب رودخانه در فصل بهار در تحقیق حاضر برابر ۲۶/۳۲ مترمکعب بر ثانیه در صورتی که در مطالعه قبل (۱۴۰۰-۱۳۹۹) در این منطقه برابر ۱/۹۸ مترمکعب بر ثانیه بوده است (تغییرات دبی آب به دلیل تسطیح بستر رودخانه و هم‌چنین دلایل هیدرولوژیکی بوده است) که این تغییرات دبی و تلاطم بستر رودخانه سبب می‌گردد که فسفر رسوبات بالادست به پایین‌دست (محل احداث سد) انتقال یافته و بر نسبت فسفر رسوبات به فسفر آب اثر افزایشی داشته باشد که با نتایج جدول ۶ مطابقت دارد.

نسبت فرم‌های مختلف فسفر در رسوبات به آب در محل سد (ایستگاه ۶) نشان داد که غلظت فسفر کل و فسفر قابل‌دسترس در رسوبات از آب بسیار بیش‌تر می‌باشد (جدول ۶). همان‌طور که جدول ۶ نشان می‌دهد نسبت فسفر معدنی رسوبات سیروان‌رود به فسفر معدنی آب در تحقیق حاضر (۱۴۰۳-۱۴۰۲) برابر ۳۳۶۶-۴۷۵ و در سال‌های قبل (۱۴۰۰-۱۳۹۹) در محدوده ۲۶۷ تا ۷۹۶ بوده است که بیانگر نفوذ فسفر معدنی از رسوبات به محیط آب است. زیرا غلظت فسفر در رسوبات خیلی بیش‌تر از ستون آبی است که با قانون انتشار ترکیبات از محیط با غلظت بیش‌تر به محیط با غلظت کم‌تر، مطابقت دارد. مقایسه دو سال مطالعات در این حوزه نشان داده است که فسفر کل و فسفر معدنی در تحقیق حاضر به ترتیب

جدول ۶- مقایسه نسبت غلظت فسفر کل و قابل‌دسترس در آب و رسوبات حوزه آبخیز سیروان‌رود-سندج سال‌های ۱۴۰۳-۱۴۰۲ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹.

Table 6. Comparison of Phosphorus concentration ratios in water and sediments of the the Sirvan river basin-Sanandaj During 2023–2024 and 2020–2021.

سال بررسی Year of Study	فسفر قابل دسترس رسوب / فسفات آب Bioava.-Ps/PO ₄ w	فسفر کل رسوب / فسفر کل آب TPs/TPw	نسبت‌ها Ratio of media
تحقیق حاضر (1402-1403) Present study	801	1140	نسبت رسوبات به آب رودخانه Ratio P at sediment and water
مطالعه پیشین (1399-1400) Pervious Study	267	769	

Bioava.-Ps (غلظت فسفر قابل‌دسترس در رسوبات) و PO₄w (غلظت فسفات در آب)

TPs (غلظت فسفر کل در رسوبات) و TPw (غلظت فسفر کل در آب)

نتیجه‌گیری کلی

رسوبات نقش مهمی در کیفیت آب ایفا می‌کنند، زیرا مواد مغذی بارگذاری شده در آب، جذب رسوبات می‌شود و آن همواره می‌تواند مواد مغذی را در آب آزاد کند و در اختیار جلبک‌ها و سایر مصرف‌کنندگان قرار دهد (۲۶).

به‌طورکلی طبق نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق برای مقایسه شاخص‌های کیفیت رسوبات حوزه آبخیز سیروان‌رود در این تحقیق در مقایسه با مطالعه قبلی (در ایستگاه‌های مشابه) ارتقای تصفیه‌خانه عملکرد خوبی را نشان نداده است.

رسوبات اغلب حاوی مقادیر زیادی فسفر و نیتروژن هستند که در صورت وجود شرایط مناسب می‌توانند وارد ستون آب شده و در نتیجه تغذیه‌گرایی را تشدید کنند (۲۷).

هم‌چنین تجمع رسوبات غنی از مواد مغذی در بستر رودخانه‌ها می‌تواند ظرفیت طبیعی آن‌ها برای تصفیه و پالایش و خودپالایی آب را کاهش دهد. بنابراین برای پیش‌بینی روند تغذیه‌گرایی و طراحی راهکارهای کنترلی، جهت مدل‌سازی کیفی آب و شبیه‌سازی رفتار مخزن در برابر بار آلاینده‌ها، برای مدیریت پایدار سدها و حفظ کیفیت آب در بلندمدت، به‌منظور کاهش هزینه‌های تصفیه آب و جلوگیری از بحران‌های زیست‌محیطی بررسی رسوبات ضروری است.

بررسی رسوبات در مطالعه حاضر بیانگر مقادیر بالا از غلظت فسفر کل (231 ± 2518 میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) و فسفر قابل‌دسترس (141 ± 1126 میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در مسیر رودخانه‌های منتهی به سد بوده که خطر مغذی شدن آب را افزایش خواهد داد. ضمن این‌که غلظت فسفر کل (TP) در رسوبات محل مخزن سد بیش از هزار برابر بیش‌تر از آب رودخانه بود که می‌تواند فسفر لازم را برای تقویت تغذیه‌گرایی فراهم نماید. پس از آگیری سد زاوه و وقوع تغذیه‌گرایی در آن، کنترل این پدیده اکولوژیکی با در نظر گرفتن زمان ماند مخزن به‌سختی امکان‌پذیر خواهد بود. بنابراین کنترل بارگذاری مواد مغذی به‌خصوص فسفر در رودخانه برای افزایش کیفیت آب مخزن سد ضروری است. در این راستا ارتقای تصفیه‌خانه سهم مهمی در کاهش بار آلاینده‌های ورودی به مخزن دارد. به‌منظور کاهش عمده در غلظت آلاینده‌های مختلف نیتروژن و فسفر کل در مخزن، لازم و ضروری است که تمام منابع آلاینده‌های نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای در شاخه‌های

اصلی قشلاق و گاوه‌رود و هم‌چنین شاخه‌های فرعی حاوی فاضلاب‌های روستایی مدیریت و ساماندهی شوند. درنهایت، پیشنهاد می‌شود امکان‌سنجی و ارزیابی روش‌های کاهش فسفر رسوبی، مانند تثبیت شیمیایی یا برداشت هدفمند رسوبات غنی از فسفر، در قالب طرح‌های مدیریت داخلی مخزن موردبررسی قرار گیرد. این تحقیق پایه علمی و عملی لازم برای مدیریت تغذیه‌گرایی سد زاوه را فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که کنترل آلاینده‌های ورودی و مدیریت رسوبات پیش از آگیری کامل سد یک ضرورت مدیریتی است. هم‌چنین داده‌های این پژوهش می‌تواند در تدوین برنامه‌های پایش، مدل‌سازی کیفی و تعیین بهترین راهکارهای جلوگیری از کاهش کیفیت آب سد مورد استفاده مستقیم قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

بر خود لازم می‌دانیم از کارکنان پژوهشکده اکولوژی دریای خزر که در زمینه‌های مشاوره، راهنمایی، دسترسی به اطلاعات و بازدیدهای میدانی برای اجرای این تحقیق مساعدت نموده‌اند و هم‌چنین از داوران محترم که با نظرات ارزشمند خود موجب بهبود متن حاضر شده‌اند، سپاسگزاری نماییم.

داده‌ها و اطلاعات

این مقاله منتج از پروژه "بررسی کیفیت آب و رسوبات شاخه‌های رودخانه سیروان (سد زاوه سندج) به‌منظور پیش‌بینی پدیده تغذیه‌گرایی (۱۴۰۳-۱۴۰۲)" با کد ۱۴-۷۶-۱۲-۱۰۱-۰۲۰۴۶-۰۲۰۸۴۹ در مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور انجام گردید.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دانشجوی دکتری شیلات گرایش اکولوژی است و آماده‌سازی داده‌ها، تهیه پیش‌نویس مقاله و نهایی‌سازی مقاله با ایشان بوده است.

نویسنده دوم: استاد پژوهشی و عضو هیئت‌علمی مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی است و مجری پروژه و انجام محاسبات آماری و شاخص‌ها و نظارت بر انجام پژوهش را عهده‌دار بوده است.

نویسنده سوم: استادیار پژوهشی و عضو هیئت‌علمی مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی است که مدیریت گروه نمونه‌برداری در طول یک سال با ایشان بوده است.

نویسنده چهارم: دکترای شیمی تجزیه و در تنظیم و محاسبه داده‌های فصول مختلف مشارکت داشت.

نویسنده پنجم: دانش‌آموخته مقطع کارشناسی‌ارشد شیمی تجزیه است و انجام کار فریزدرایر شدن نمونه‌ها برای آنالیز بعدی به عهده ایشان بوده است.

نویسنده ششم: دکترای زیست‌شناسی دریا و همکاری در انجام آزمایش‌ها و آنالیز داده‌ها داشته‌اند.

نویسنده هفتم: دانشجوی دکتری شیمی و در انجام مراحل پژوهش مشارکت داشته است.

نویسنده هشتم: دانش‌آموخته مقطع کارشناسی است و در انجام مراحل پژوهش و نمونه‌برداری همکاری داشته است.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

حمایت مالی

این تحقیق با حمایت مالی شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران اجرا گردید.

منابع

1. Barakat, A., El Baghdadi, M., Rais, J., Aghezzaf, B., & Slassi, M. (2016). Assessment of spatial and seasonal water quality variation of Oum Er Rabia River (Morocco) using multivariate statistical techniques. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(4), 284-292. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.11.002>.
2. Mustapha, A., Aris, A. Z., Juahir, H., Ramli, M. F., & Kura, N.U. (2013). River water quality assessment using environmentric techniques: case study of Jakra River Basin. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(8), 5630-5644. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1542-z>.
3. Oketola, A. A., Adekolurejo, S. M., & Osibanjo, O. (2013). Water quality assessment of River Ogun using multivariate statistical techniques. *Journal of Environmental Protection*, 4(5), 466-479. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.45055>.
4. Power, E. A., & Chapman, P. M. (1992). *Assessing Sediment Quality*. In: *Sediment Toxicity Assessment*, G.A. Burton, Jr. (Ed.). Lewis Publishers, Boca Raton, FL. Pp: 1-8.
5. Melegy, A., Cveckova, V., Krcmova, K., & Rapant, S. (2010). Environmental risk assessment of some potentially toxic elements in EI-Tabbian region (Cairo, Egypt). *Environmental Earth Sciences*, 61(2), 429-439. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0355-3>.
6. Persaud, D., Jaagumagi, R., & Hayton, A. (1993). *Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality*. Ontario Ministry of the Environment, Toronto, Canada, 27p.

7. Fernandez, C., Parodi, E. R., & Caceres, E. J. (2009). Limnological characteristics and trophic state of Paso de las Piedras Reservoir: an inland reservoir in Argentina. *Lake Reserv. Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 14(1), 85-101. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2009.00393.x>.
8. Wetzel, R. (1983). *Limnology*. 2nd ed. Saunders College Publishing, Philadelphia, USA, 767p.
9. Zhang, W., Yang, J., Yin, Y., Guo, A., Rao, T., Wang, P., & Xu, Q. (2025). Review of indices evaluating potential phosphorus release from sediments in lakes and reservoirs: History, approaches, advantages, and limitations. *Ecological Indicators*, 178, 113953. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113953>.
10. Noori, Z., Salajegheh, A., Ebadi, T., & Moghadamnia, A. (2019). The effect of river sediment particle size on phosphorus adsorption characteristics (Case study: Karaj River sediments). *Environmental Studies*, 45(3), 471-483. [In Persian]
11. Tang, X., Li, R., Han, D., & Scholz, M. (2020). Response of Eutrophication Development to Variations in Nutrients and Hydrological Regime: A Case Study in the Changjiang River (Yangtze) Basin. *Water*, 12(6), 1634. <https://doi.org/10.3390/w12061634>.
12. Yin, H., Zhang, M., Yin, P., & Li, J. (2022). Characterization of internal phosphorus loading in the sediment of a large eutrophic lake (Lake Taihu, China). *Water Research*, 225, 119125. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119125>.
13. Balouei, M., Saravi, H. N., Makhloogh, A., Rostami, M. K., Golrooye, M. R., & Chehreh, A. A. (2024). Study on sediment quality parameters in the tributaries of the Sirvan River–Zhavah Dam of Sanandaj (2020–2021). *Kharazmi Journal of Earth Sciences*, 9(2), 225-249. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.106971>. [In Persian]
14. Mashanir Electrical Engineering Services Company. (2018). *Study of the qualitative purification of the Javeh Dam*. Report of Mashanir Electrical Engineering Services Company. Tehran, Iran, 92p. [In Persian]
15. Psenner, R., Puesko, R., & Sager, M. (1984). Die fractionierung organischer und anorganischer phosphorverbindungen von sedimenten – versuche einer definition ökologisch wichtiger fractionen. *Archiv fuer Hydrobiologie Supplement*, 70(1984), 111-155.
16. American Public Health Association (APHA). (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 18th ed., Washington, DC, 1113p.
17. Sapozhnikov, V. N., Agativa, A. E., Arjanova, N. V., Nalitova, E. A., Mardosova, N. V., Zobarowij, V. L., & Bandarikov, E. A. (1988). Methods of hydrochemical analysis of the major nutrients. VNIRO Publisher, Moscow, Russia, 187p.
18. Holme, N. A., & McIntyre, A. D. (1971). *Methods for the study of marine benthos*.
19. Bing, H., Wu, Y., Liu, E., & Yang, X. (2013). Assessment of heavy metal enrichment and its human impact in lacustrine sediments from four lakes in the mid-low reaches of the Yangtze River. China. *Journal of Environmental Sciences*, 25(7), 1300-1309. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60195-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60195-8).
20. Zhang, Z. B., Lv, Y., Zhang, W., Zhang, Y., Sun, C., & Marhaba, T. F. (2015). Phosphorus, organic matter, and nitrogen distribution characteristics of the surface sediments in Nansi Lake. *Environmental Earth Sciences*, 73(9), 5669-5675. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3821-5>.
21. Nasiri, R. (2009). *Step-by-step training in SPSS (version 17)*. Nashr Gostar Cultural Center, Tehran, Iran, 312p. [In Persian]

22. Mudroch, A., & Azcue, J. M. (1995). *Manual of aquatic sediment sampling*. Lewis Publishers.
23. Yang, Y., Gao, B., Hao, H., Zhou, H., & Lu, J. (2017). Nitrogen and phosphorus in sediments in China: A national-scale assessment and review. *Science of the Total Environment*, 576, 840-849. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.136>.
24. Wang, L., Ye, M., Li, Q., Zou, H., & Zhou, Y. (2013). Phosphorus speciation in wetland sediment of Zhujiang (Pearl) River Estuary, China. *Chinese Geographical Science*, 23(5), 574-583. <https://doi.org/10.1007/s11769-013-0627-4>.
25. Alvarez-Guerra, M., Viguri, J. R., Casado-Martínez, M. C., & DelValls, T. A. (2007). Sediment quality assessment and dredged material management in Spain: Part I, application of sediment quality guidelines in the Bay of Santander. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 3(4), 529-538. https://doi.org/10.1897/ieam_2006-055.1.
26. Lee, H. W., Lee, Y. S., Kim, J., Lim, K. J., & Choi, J. H. (2019). Contribution of internal nutrients loading on the water quality of a reservoir. *Water*, 11(7), 1409. <https://doi.org/10.3390/w11071409>.
27. Fan, P., Wang, Y., Wang, W. H., Chai, B. H., Lu, X. X., & Zhao, J. C. (2019). Release characteristics of nitrogen and phosphorus from sediments formed under different supplemental water sources in Xi'an moat, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(11), 10746-10755. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04537-z>.

