



Evaluation of water quality changes in Aras border river downstream and upstream of Khodaafrin Dam using water quality indicators

Mohammad Babaei¹ | Mohammad Taghi Sattari² | Sara Nikmaram³ | Houshang Gholami⁴ | Fariborz Masoumi⁵ | Mohammad Pirhayati⁶ | Mohammad Mosaferi⁷

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: mohammad.babae72@gmail.com

2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: mtsattar@tabrizu.ac.ir

3. Water and Wastewater Company, East Azerbaijan Province, Tabriz, Iran. E-mail: sara.nikmaram@icloud.com

4. Border Rivers Office, Iran Water Resources Management Company, Tehran, Iran. E-mail: hgholami@moe.gov.ir

5. Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: f_masoumi@uma.ac.ir

6. Border Rivers Office, Iran Water Resources Management Company, Tehran, Iran. E-mail: mohammad.pirhayati@srbiu.ac.ir

7. Corresponding Author, Health and Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran. E-mail: mmosaferi@yahoo.com

Article Info

ABSTRACT

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 15, 2024

Revised: Oct. 20, 2024

Accepted: Dec. 31, 2024

Published online: April. 2025

Keywords:

Water Quality Parameters,
Aras River,
IRWQI,
NSFWQI and CCME.

Reliable estimation of changes in water quality parameters in the country's reservoirs is important for efficient planning and exploitation of water resources on a temporal and spatial scale. In this study, firstly, the evaluation of the changes in the water quality parameters of Khoda Afarin Dam at the two inlet and outlet stations to the dam during the study period of the water year 1400 and 1401 was considered. Then IRWQI, NSFWQI and CWQI indexes were used to identify and classify water quality for different uses. According to the obtained results, the maximum values of water quality parameters, including turbidity, total coliform, nitrate, TDS, TSS, EC, DO, BOD5 and COD are respectively equivalent to 5900 (NTU), 35000 (MPN/100 ml), 11.3, 1001.7, 5580, 1590 (us/cm), 12.3, 5.5 and 32 (mg/L) were estimated. According to the obtained results, the BOD at the outlet of the dam is reduced by 10.3% compared to the inlet. The reason for its decrease compared to the inlet station is the decrease in the decomposition of organic matter and its conversion into inorganic compounds, which can be attributed to the activity of bacteria. The average value of COD for the inlet and outlet of Khodaafrin Dam was calculated as 13.4 and 13.8 mg/lit, respectively, which shows an increase of 2.9%. By evaluating the values of water quality indicators, it was found that the range of changes of IRWQI and NSFWQI indicators at the outlet of Khodaafrin dam was between 39 to 72.4 and 54 to 78, respectively. Also, based on the CWQI index, this value was calculated as 40, which indicates the improvement of water quality at the outlet of the dam.

Cite this article: Babaei, M., Sattari, M. T., Nikmaram, S., Gholami, H., Masoumi, F., Pirhayati, M., & Mosaferi, M. (2025).

Evaluation of water quality changes in Aras border river downstream and upstream of Khodaafrin Dam using water quality indicators, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (2), 503-518.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.379440.669756>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.379440.669756>



EXTENDED ABSTRACT

Background and purpose

Water reservoirs have become very vulnerable due to the entry of pollutants, nutrients, organic substances and suspended solids from the basin. This is caused by human activities such as mining, animal husbandry, waste production and disposal (industrial, urban and agricultural), increased runoff, sedimentation or soil erosion due to land use change and heavy metal pollution. In such a situation, paying attention to the quality monitoring and protection of surface water resources has become one of the main criteria for the sustainable development of water resources in any country. Therefore, water quality management requires the collection and analysis of data sets of water quality parameters, which can be evaluated using water quality indicators. Water quality indicators are presented according to the importance of quality parameters for each country, which will be investigated in this study.

Materials and methods

In this study, 16 water samples were taken during eight stages in the study period of the water year 1400 and 1401 in order to compare and evaluate the quality of water at the two inlet and outlet stations of the Khoda Afarin dam reservoir, and a wide range of water quality parameters were analyzed. Also, in order to obtain a better and more comprehensive understanding of the quality conditions of the Aras River in the upstream and downstream of the Khodaafarin Dam, the quality indicators of surface water resources of Iran (IRWQI), the water quality index of the National Health Foundation (NSFWQI) and the water quality index of Canada (CCME) was used to analyze the quality parameters of water and the factors influencing the reduction of water quality were identified.

Findings

According to the results, one of the largest percentage changes between the upstream and downstream of the tank is related to the water turbidity parameter. Because the average water turbidity for the inlet of the tank was recorded as 1155.6 (NTU), and the average of this parameter was measured at the outlet of the dam tank as 18.2 (NTU), which represents a change of 98.4%. Also, TSS, EC and TDS parameters have decreased by 97.5%, 17.2% and 17.1% respectively in the outlet of the tank compared to the inlet of the dam. The water quality status in terms of IRWQI_SC index is relatively normal in autumn and winter, but in spring and summer both at the entrance and exit of the dam, the quality of water is relatively bad. NSFWQI index also works seasonally in line with IRWQI_SC index, with the difference that relatively this index shows more optimistic results compared to IRWQI_SC index, but the difference in water quality is evident in different seasons. According to the CWQI index, the general condition of water quality is in the poor category, but it has the most favorable conditions for cattle consumption and is in the excellent category. The quality of water for agriculture was also estimated to be relatively good.

Conclusion

Considering the existing conditions, it is necessary to take serious measures to prevent or reduce the entry of all kinds of pollutants into the river and the reservoir of the dam (especially the mineral effluents of Armenia).

In addition to increasing the quality of water, this will also reduce the environmental and health consequences of these pollutions in the region.

Author Contributions

For research articles with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided. The following statements should be used “Conceptualization, M.B., M.T.S., S.N., H.G., F.M., M.P. and M.M.; methodology, M.B., M.T.S. and M.M; software, M.M.; validation, M.B., M.T.S. and M.M.; formal analysis, M.B.; investigation, M.B.; resources, S.N.; data curation, M.B.; writing—original draft preparation, M.B.; writing—review and editing, M.T.S.; visualization, M.B.; supervision, M.M.; project administration, M.M.; funding acquisition, M.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.” Please turn to the CRediT taxonomy for the term explanation. Authorship must be limited to those who have contributed substantially to the work re-ported.

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی تغییرات کیفی آب رودخانه مرزی ارس در ورودی و خروجی سد خداآفرین با استفاده از شاخص های کیفی آب

- محمد بابایی^۱ | محمدتقی ستاری^۲ | سارا نیک‌مرام^۳ | هوشنگ غلامی^۴ | فریبرز معصومی^۵ | محمد پیرهراتی^۶ | محمد مسافری^۷ ✉
۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: mohammad.babae72@gmail.com
۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: mtsattar@tabrizu.ac.ir
۳. پایش کیفیت آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران. رایانامه: saranikmaram@icloud.com
۴. رودخانه‌های مرزی، شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران، ایران. رایانامه: hgholami@moe.gov.ir
۵. گروه آموزشی مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: f_masoumi@uma.ac.ir
۶. رودخانه‌های مرزی، شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران، ایران. رایانامه: mohammad.pirhayati@srbiau.ac.ir
۷. نویسنده مسئول، مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: mмосаferi@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

برآورد قابل اطمینان از تغییرات پارامترهای کیفی آب در مخازن کشور به منظور برنامه‌ریزی‌های کارآمد و بهره‌برداری از منابع آبی در مقیاس زمانی و مکانی حائز اهمیت است. در مطالعه حاضر ابتدا ارزیابی تغییرات پارامترهای کیفی آب سد خداآفرین در دو ایستگاه ورودی و خروجی به مخزن سد طی دوره مطالعاتی سال آبی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ مدنظر قرار گرفت. سپس جهت شناسایی و طبقه‌بندی کیفیت آب برای مصارف مختلف از شاخص‌های IRWQI، NSFWQI و CWQI استفاده گردید. مطابق نتایج، حداکثر مقدار پارامترهای کیفی آب از جمله کدورت، مجموع کلیفرم، نترات، TDS، TSS، EC، DO، BOD5 و COD به ترتیب معادل ۵۹۰۰ (NTU)، ۳۵۰۰۰ (MPN/100 ml)، ۱۱/۳، ۱۰۰۱/۷، ۵۵۸۰، ۱۵۹۰ (us/cm)، ۱۲/۳، ۵/۵ و ۳۲ (mg/L) برآورد گردید. مطابق نتایج به دست آمده BOD در خروجی مخزن نسبت به ورودی به میزان ۱۰/۳ درصد کاهش می‌یابد. دلیل کاهش آن نسبت به ایستگاه ورودی، کاهش تجزیه مواد آلی و تبدیل آن به ترکیبات معدنی بوده که علت آن را می‌توان فعالیت باکتری‌ها قلمداد کرد. متوسط مقدار COD برای ورودی و خروجی سد خداآفرین به ترتیب معادل ۱۳/۴ و ۱۳/۸ میلی‌گرم بر لیتر محاسبه شد که افزایش ۲/۹ درصدی را نشان می‌دهد. با ارزیابی مقادیر شاخص‌های کیفیت آب مشخص گردید که بازه تغییرات شاخص‌های IRWQI و NSFWQI در خروجی سد خداآفرین به ترتیب بین ۳۹ تا ۷۲/۴ و ۵۴ تا ۷۸ به دست آمد که براساس شاخص CWQI نیز این مقدار معادل ۴۰ محاسبه شد که نشان‌دهنده بهبود کیفیت آب در خروجی مخزن آب است. کاهش سرعت آب و ته‌نشین شدن آب در پشت مخزن سد و رقیق‌سازی آب مخزن بواسطه ورود رودخانه هاکاری باعث گردیده تا کیفیت آب در خروجی در وضعیت قابل قبولی قرار داشته باشد. اما در ورودی سد خداآفرین به علت ورود آلاینده‌های مختلف کیفیت آب براساس مقادیر هر دو شاخص در طبقه نسبتا بد و بد قرار گرفت.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۷/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

تاریخ انتشار: اردیبهشت ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

پارامترهای کیفی آب، رودخانه ارس، IRWQI، NSFWQI، CWQI

استناد: بابایی، محمد؛ ستاری، محمدتقی؛ نیک‌مرام، سارا؛ غلامی، هوشنگ؛ معصومی، فریبرز؛ پیرهراتی، محمد؛ و مسافری، محمد (۱۴۰۴). ارزیابی تغییرات کیفی آب رودخانه مرزی ارس در ورودی و خروجی سد خداآفرین با استفاده از شاخص‌های کیفی آب، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶ (۲)، ۵۱۸-۵۰۳.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.379440.669756>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.379440.669756>

مقدمه

آب یک جزء حیاتی از محیط زیست است که سرمنشأ ادامه تمدن بشر است و به اشکال مختلف مانند منابع آب سطحی و زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد (خلیلی و همکاران، ۱۳۹۹). اما کیفیت منابع آب سطحی به دلیل عوامل طبیعی و انسانی در طول دهه‌های اخیر رو به وخامت گذاشته است. مخازن آب به دلیل ورود بارهای بالای آلاینده‌ها، مواد مغذی، مواد آلی و جامدات معلق از حوضه بسیار آسیب‌پذیر هستند که ناشی از فعالیت‌های انسانی مثل استخراج معادن، دامداری، تولید و دفع زباله (صنعتی، شهری و کشاورزی)، افزایش رواناب، رسوب یا فرسایش خاک به دلیل تغییر کاربری زمین (Labato et al., 2015) و آلودگی فلزات سنگین می‌باشد (Kamali et al., 2020). در چنین شرایطی توجه به پایش کیفی و حفاظت از منابع آب سطحی یکی از اصلی‌ترین ملاک‌های توسعه پایدار منابع آب هر کشور شده است. از این رو مدیریت کیفیت آب مستلزم جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های پارامترهای کیفی آب است که ارزیابی آن‌ها با استفاده از شاخص‌های کیفی آب میسر می‌گردد (ستاری و همکاران، ۱۴۰۲). رویکردهای متعددی جهت ارزیابی کیفیت آب در سال‌های اخیر استفاده شده است که یکی از این رویکردها، استفاده از شاخص‌های کیفیت آب (WQIs) است (Wan Abdul Ghani et al., 2018). شاخص‌های کیفی آب با توجه به اهمیت پارامترهای کیفی مشخص شده در هر کشور ارائه گردیده است که شاخص IRWQI^۱ در ایران و شاخص CCMEWQI^۲ در کشور کانادا در مطالعات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از دیگر شاخص‌های کیفی آب در جهان که امروزه مورد توجه بسیاری قرار گرفته است، شاخص NSFQI^۳ می‌باشد (Zaghloul et al., 2023). با تجزیه و تحلیل پارامترهای کیفی آب در قالب این شاخص‌ها امکان شناسایی بالقوه آلودگی میسر شده و استراتژی‌های مدیریتی مؤثری برای بهبود کیفیت آب می‌توان ایجاد کرد. علاوه بر این، نظارت بر تغییرات کیفیت آب در طول زمان با استفاده از شاخص‌های مورد نظر، می‌تواند به ارزیابی اثر بخشی هر چه بیشتر استراتژی‌های مدیریتی و هدایت تصمیم‌گیری‌های آینده کمک شایانی کند (Singh and Noori, 2022). در سال‌های اخیر مطالعات متعددی جهت پایش شرایط کیفی رودخانه‌ها و مخازن با استفاده از شاخص‌های بیان شده انجام گرفته است که به چند نمونه از این مطالعات اشاره می‌شود.

جهت مقایسه بین NSFQI و IRWQI در رودخانه سفیدرود با استفاده از مقادیر پارامترهای کیفی آب انجام گردید. بر اساس نتایج، عملکرد شاخص‌ها در نمایش نوسانات فصلی و مکانی کیفیت آب رودخانه تقریباً مشابه بود. بر اساس شاخص NSFQI، میانگین کیفیت آب رودخانه حدود ۴۹ برآورد گردید که بر اساس آن آب در کلاس با وضعیت بد طبقه‌بندی شد، در حالی که طبق شاخص IRWQI میانگین امتیاز ۵۶/۱ را نشان داد که در کلاس با وضعیت نسبتاً خوب مطابقت دارد. نتایج حاکی از این است که شاخص NSFQI کیفیت آب را با معیارهای سخت‌گیرانه‌تری نسبت به IRWQI در رابطه با بهداشت عمومی شناسایی می‌کند. جهت تفسیر بهتر شرایط کیفی منابع آبی، استفاده از هر دو شاخص ضروری است (Ebraheim et al., 2020).

به منظور ارزیابی تغییرات کیفی آب سد ارس در دو ایستگاه ورودی و خروجی به مخزن سد طی دوره مطالعاتی سال آبی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱، طی هشت مرحله ۱۶ نمونه آب از ورودی و خروجی برداشت و پارامترهای کیفی آب مورد واکاوی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که سد ارس به عنوان یک واحد ته‌نشینی عمل می‌کند. طبق نتایج بیشترین مقدار مجموع کلیفرم، BOD^۴، نترات و فلزات سنگین از جمله سرب، آرسنیک و کادمیوم به ترتیب معادل (MPN/100ml) ۱۸۰۰۰، ۹، ۰/۰۰۸، ۰/۰۳ و ۰/۰۱ میلی‌گرم بر لیتر و متوسط میزان EC در ورودی و خروجی سد به ترتیب معادل ۱۲۷۹/۳ و ۱۳۹۶/۴ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود. به منظور ارزیابی تمایل آب به رسوب-گذاری یا خوردگی از شاخص‌های LSI و RSI استفاده گردید. طبق نتایج به دست آمده مشخص شد که رسوب‌گذاری پدیده غالب در این سد می‌باشد (ستاری و همکاران، ۱۴۰۲).

در مطالعه‌ای کیفیت آب رودخانه چورلو ترکیه با پایش ۱۰ فلز سمی و ۱۳ متغیر کیفیت آب در فصول خشک و مرطوب سال ۲۰۲۱ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کیفیت آب در ایستگاه‌های S2 و S3 رودخانه دریافت‌کننده تخلیه‌های خانگی و صنعتی به طور جدی توسط NH₄-N، PO₄-P، COD، BOD₅ و جامدات معلق مطابق با استانداردهای کیفیت آب سطحی آلوده است. با توجه به نتایج روش‌های ارزیابی خطر سلامت، خطرات غیرسرطان‌زایی ناشی از مصرف فلزات ترکیبی در آب رودخانه در ایستگاه S3 برای کودکان و بزرگسالان و در ایستگاه S2 برای کودکان قابل انتظار است. همچنین، تخمین زده شد که Cr و As در ایستگاه S3 ممکن است خطرات

1. Iran Water Quality Index for Surface Water Resources-Conventional Parameters

2. The Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index

3. The National Sanitation Foundation Water Quality Index

4. Biochemical Oxygen Demand

سرطان زا برای سلامت ساکنان ایجاد کند (Varol and Tokatlı, 2023).

به منظور پایش کیفیت آب رودخانه بشار در شهر یاسوج برای مصارف آشامیدنی، کشاورزی، آبیاری پروری، تفریح و سرگرمی از شاخص کیفیت آب کانادا (CCME) استفاده شد. سه ایستگاه نمونه برداری در امتداد رودخانه انتخاب و از هر ایستگاه چهار نمونه در فصل‌های مختلف سال ۱۳۹۸ برداشته شد. نتایج به دست آمده نشان داد که کیفیت آب رودخانه بشار برای مصرف شرب در رتبه خوب و متوسط و از نظر آبیاری پروری و تفریح و سرگرمی در رتبه عالی و خوب و از نظر کشاورزی و مصرف احشام در رتبه عالی قرار دارند. همچنین تحلیل نمودارهای شولر نشان داد که کیفیت آب رودخانه بشار از نظر شرب در محدوده خوب و متوسط قرار دارد (خلیلی و همکاران، ۱۳۹۹). به منظور ارزیابی کیفیت آب رود فرات در شهرهای کربلا و بابل، از شاخص‌های کیفی NSFQI، CCMEQI، OWQI، WAWQI، IRCA و شاخص کیفیت آب عراق (WQI) بهره گرفته شد که ۲۰ پارامتر کیفی آب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج برای پنج ایستگاه در طول سه فصل برای شاخص‌های NSFQI، CCME، OWQI، WAWQI و IRCA به ترتیب در طبقه متوسط تا عالی، ضعیف، ضعیف تا عالی، نامناسب تا عالی و غیرقابل قبول قرار گرفت. در آخرین طبقه‌بندی براساس شاخص کیفی عراق نیز نتایج بین بد تا خیلی بد برای آب آشامیدنی و برای آبیاری زمین‌های کشاورزی، قابل قبول نیست (Khlaif and Al-Hassany, 2023).

همچنین بررسی و ارزیابی مطالعات انجام شده نشان‌دهنده این است که شاخص‌های مهم کیفیت آب با استفاده از تکنیک‌های مختلف مانند استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (Jang et al., 2016; Abdullah et al., 2017; Oiry and Barille, 2021; Gani et al., 2023)، هوش مصنوعی (Chen et al., 2023; Ghosh et al., 2023; Uddin et al., 2023)، آنالیز مؤلفه‌های اصلی (Fadel et al., 2023)، تکنیک‌های همبستگی (Tampo et al., 2021)، نظرات متخصص (Medeiros et al., 2017; Sutadian et al., 2018)، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (Juwana et al., 2020)، دسترس بودن داده‌ها (ستاری و همکاران، ۱۴۰۲) و غیره برآورد می‌شوند.

در این پژوهش ۱۶ نمونه آب طی هشت مرحله در دوره مطالعاتی سال آبی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ جهت مقایسه و ارزیابی کیفی آب در دو ایستگاه ورودی و خروجی مخزن سد خداآفرین برداشت شد و طیف زیادی از پارامترهای کیفی آب مورد واکاوی قرار گرفت. همچنین به منظور به دست آوردن دید بهتر و جامع‌تری از شرایط کیفی رودخانه ارس در ورودی و خروجی سد خداآفرین از شاخص‌های کیفیت منابع آب سطحی ایران (IRWQI) شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت (NSFWQI) و شاخص کیفیت آب کانادا (CCME) جهت تجزیه و تحلیل پارامترهای کیفی آب استفاده گردید و عوامل تأثیرگذار بر کاهش کیفیت آب شناسایی شد.

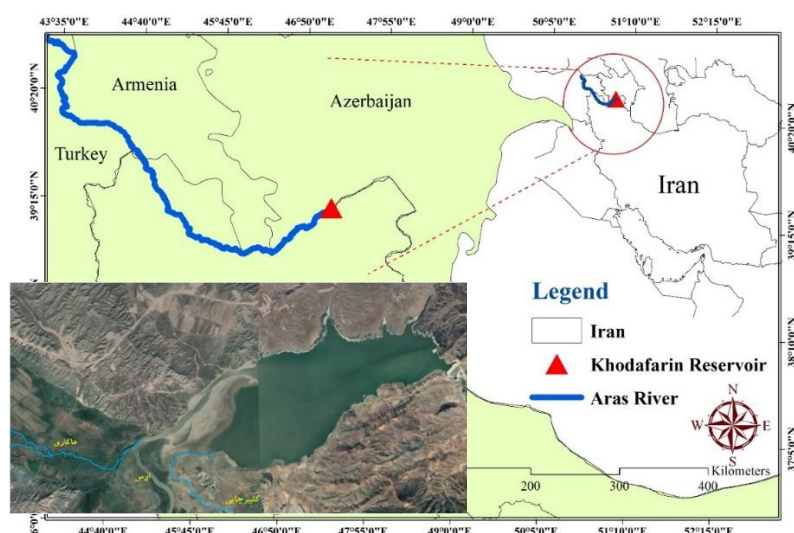
مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

سد خداآفرین از جمله سدهای مهم بر روی رودخانه ارس در بازه مرزی ایران است که نقش مهمی در ذخیره‌سازی آب و تامین آب آبیاری در پایین دست به ویژه در منطقه مغان دارد که به طور مشترک توسط ایران و جمهوری آذربایجان ساخته شده است. طول این مخزن حدود هفت کیلومتر و بیشترین عرض آن سه کیلومتر می‌باشد. این سد مخزنی با حجم مخزن حدود ۱/۶ میلیارد مترمکعب قادر است حدود ۲ میلیارد مترمکعب آب خروجی از سد ارس و حوضه میانی را تنظیم نماید. ورودی اصلی سد خداآفرین رودخانه ارس است. با این حال رودخانه هاکاری از سمت شمال مخزن (کشور آذربایجان) و رودخانه کلیبر نیز از سمت جنوب وارد مخزن سد خداآفرین می‌شود. در عین حال پساب تصفیه‌خانه فاضلاب جانانلو نیز از طریق رودخانه کلیبر وارد مخزن سد می‌شود. رشد جلبکی قابل توجه طی ماه‌های تابستان در این سد هر ساله مشاهده شده و توسط سازمان‌های متولی گزارش می‌شود.

در بالادست مخزن خداآفرین رودخانه‌های متعدد دیگری نیز به ارس می‌پیوندند که مشتمل بر رودخانه گلستان، قطور، حاجیلر، کارچیوان، مگری، ایلقنا، بسیط چای (تساو)، اوخچو چای (وغچی) و رودخانه هاکاری است که شاخه اصلی آن رودخانه وروتان (بازارچای) است. بیشتر این رودخانه‌ها در فصل تابستان فاقد جریان بوده اما در این میان رودخانه‌های دائمی شامل ووغچی و هاکاری می‌توانند آورد رودخانه ارس و نیز کیفیت آن را متاثر نمایند. بر اساس اطلاعات موجود میانگین طولانی مدت دبی رودخانه وروتان که شاخه اصلی و مهم

رودخانه هاکاری است ۲۱/۸ متر مکعب در ثانیه است. به عبارت دیگر آورد سالانه رودخانه وروتان ۶۸۷/۴ میلیون متر مکعب است. میانگین طولانی مدت حداکثر دبی این رودخانه نیز ۱۰۱ متر مکعب در ثانیه است. دبی شاخه هاکاری نیز ۱۰/۷ متر مکعب در ثانیه است که معادل ۳۳۷/۴ میلیون مترمکعب در سال است. در مجموع می توان گفت که از طریق رودخانه هاکاری بالغ بر ۱۰۱۵/۴ میلیون مترمکعب آب وارد مخزن سد خداآفرین می شود که تاثیر مهمی بر کیفیت آن دارد.



شکل ۱. موقعیت سد و رودخانه ارس در حوضه فرامرزی

نمونه برداری و آنالیز

در مطالعه حاضر نمونه برداری از آب ایستگاه ورودی و خروجی سد خداآفرین از شهریور ۱۴۰۱ تا مرداد ۱۴۰۲ در هشت مرحله انجام شد. جهت انجام آزمایش های فیزیکوشیمیایی از ظروف پلاستیکی چهار لیتری اسیدشویی شده استفاده شد. همچنین از ظروف شیشه ای استریل برای نمونه های میکروبی استفاده شد و محتمل ترین تعداد (MPN) کل کلیفرم و کلی فرم های مدفوعی با استفاده کشت میکروبی تعیین گردید. همه نمونه ها جهت حفظ کیفیت در کولداکس در دمای چهار درجه سانتی گراد نگهداری و به آزمایشگاه منتقل شد. آزمایش های فیزیکوشیمیایی مطابق با روش های استاندارد برای آزمایشات آب و فاضلاب (نسخه ۲۰۱۸) در آزمایشگاه مرجع شرکت آب و فاضلاب به انجام رسید. پارامتر دما و اکسیژن محلول با استفاده از دستگاه پرتابل شرکت Hach در محل نمونه برداری تعیین گردید. فلزات سنگین بعد از انجام مرحله پیش هضم و تغلیظ، با دستگاه جذب اتمی آنالیز گردید. آزمایش COD با روش فلاکس و آزمایش BOD نیز با روش زیست آزمونی، انکوباسیون نمونه و تعیین DO باقیمانده انجام گردید. برای نیترات از روش طیف سنجی و برای آلودگی میکروبی از روش کشت ۱۵ لوله ای استفاده شد. برای کنترل کیفی آنالیزها (QC)، ضمن آنالیز محلول های استاندارد، درصد خطای آنالیز کاتیون ها و آنیون ها محاسبه و خطای کمتر از ۵٪ قابل قبول در نظر گرفته شد. همچنین بر حسب مورد نمونه های یکسان دو تایی با نام های متفاوت آنالیز و نتایج حاصل جهت اطمینان از تکرار پذیری آنالیزها با هم مقایسه گردید.

شاخص کیفی NSFQI

از شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت NSFQI به منظور تعیین وضعیت کیفیت آب استفاده می شود که این فرآیند براساس اندازه گیری نه پارامتر انجام می گردد. این پارامترها شامل اکسیژن محلول (DO)، تغییرات دما (T)، کلیفرم مدفوعی (CF)، کدورت (TUR)، فسفات کل (P)، نیترات (N)، کل مواد جامد (TS)، pH و میزان اکسیژن خواهی بیولوژیکی (BOD) می باشد. شاخص NSFQI با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می گردد (Brown et al., 1970).

$$NSFWQI = \sum W_i I_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه ۱، W_i بیانگر وزن هر کدام از این پارامترها ارائه شده در جدول ۱ و I_i مقادیر کمی هر یک از پارامترها می باشد. همچنین

جدول ۲ نیز طبقه بندی توصیفی براساس شاخص مذکور را نشان می دهد. در مطالعه حاضر برای محاسبه این شاخص از نرم افزار WQI Calculator استفاده گردید.

جدول ۱. پارامترهای شاخص NSFQI و وزن‌های آن‌ها

| وزن | پارامتر |
|------|------------------|
| ۰/۰۸ | TUR |
| ۰/۱۱ | BOD ₅ |
| ۰/۱۷ | DO |
| ۰/۱۶ | Fecal coliforms |
| ۰/۱۰ | NO ₃ |
| ۰/۱۱ | pH |
| ۰/۱۰ | Temperature |
| ۰/۰۷ | TDS |
| ۰/۱۰ | PO ₄ |

جدول ۲. طبقه بندی توصیفی طبق شاخص NSFQI

| مقدار شاخص | طبقه بندی توصیفی |
|------------|------------------|
| ۹۰/۱ - ۱۰۰ | عالی |
| ۷۰/۱ - ۹۰ | خوب |
| ۵۰/۱ - ۷۰ | متوسط |
| ۲۵/۱ - ۵۰ | بد |
| ۰ - ۲۵ | خیلی بد |

شاخص کیفی IRWQI_{SC}

شاخص IRWQI یک شاخص کاربردی برای تحلیل کیفیت آب است که تلفیقی از NSFQI و شاخص کیفیت آب بریتیش کلمبیا (BCEQI) می‌باشد که براساس نظریات کارشناسی حفاظت محیط زیست ایران مطرح شده و با استفاده از این شاخص می‌توان وضعیت کیفیت آب را به صورت کمی بیان کرد. این شاخص ابزاری ساده و مناسب برای تعیین وضعیت و شرایط کیفیت آب با توجه به شرایط طبیعی و مسائل و مشکلات منابع آب ایران است که در آن داده‌های کیفیت آب برای منابع آبی از جمله مخازن در یک فرمول ریاضی که با یک عدد میزان سلامتی آب را نشان می‌دهد، شرکت داده می‌شوند. به طور کلی عدد موردنظر با یک مقیاس نسبی که گویای کیفیت آب از بسیار بد تا عالی است و مطابق جدول ۳ طبقه‌بندی می‌شود (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۰).

 جدول ۳. طبقه‌بندی کیفیت منابع آبی بر اساس شاخص IRWQI_{SC}

| مقدار شاخص | معادل توصیفی |
|-------------|--------------|
| کمتر از ۱۵ | خیلی بد |
| ۱۵ - ۲۹/۹ | بد |
| ۳۰ - ۴۴/۹ | نسبتاً بد |
| ۴۵ - ۵۵ | متوسط |
| ۵۵/۱ - ۷۰ | نسبتاً خوب |
| ۷۰/۱ - ۸۵ | خوب |
| بیشتر از ۸۵ | خیلی خوب |

در این روش برای ارزیابی کیفیت منابع آب سطحی از رابطه ۲ استفاده می‌شود که برای به دست آوردن آن به سه عامل مقدار کیفی و شاخص رتبه‌بندی (جهت هم‌مقیاس‌سازی) و وزن‌دهی (جدول ۴) پارامترهای مدل IRWQI_{SC} نیاز دارد.

$$IRWQI = \left[\prod_{i=1}^n I_i^{W_i} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه فوق $\gamma = \sum_{i=1}^n W_i$ و W_i : وزن پارامتر نام، n : تعداد پارامترها، I_i : مقدار شاخص برای پارامتر نام از منحنی رتبه‌بندی می‌باشد (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۰).

جدول ۴. پارامترهای شاخص IRWQI_{sc} و وزن‌های آن‌ها

| وزن | پارامتر |
|-------|------------------|
| ۰/۱۴۰ | Coliform |
| ۰/۱۱۷ | BOD ₅ |
| ۰/۱۰۸ | N |
| ۰/۰۹۷ | DO |
| ۰/۰۹۶ | EC |
| ۰/۰۹۳ | COD |
| ۰/۰۹۰ | Amonium |
| ۰/۸۷ | P |
| ۰/۰۶۲ | TUR |
| ۰/۰۵۹ | Total hardness |
| ۰/۰۵۱ | pH |

شاخص کیفی CWQI

مدل CWQI شامل سه اندازه‌گیری واریانس با هدف بررسی کیفیت آب است. این سه روش واریانس برای تولید مقداری بین صفر تا ۱۰۰ می‌باشد که نشان‌دهنده کیفیت کلی آب است که در مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی کیفیت آب استفاده شده است (Boyacioglu, 2010; Hurley et al., 2012; Sutadian et al., 2016; Kujiek and Sahile, 2024). همچنین در جدول ۵، به ۵ گروه این شاخص ارائه شده است.

جدول ۵. طبقه بندی طبق شاخص CWQI

| طبقه کیفی آب | مقدار شاخص | تفسیر تناسب و شرایط کیفی آب |
|--------------|------------|---|
| عالی | ۹۵-۱۰۰ | کیفیت آب تا حد زیادی در برابر تهدیدات و اختلالات حفظ شده است. شرایط بسیار نزدیک به حالت طبیعی و بکر است. |
| خوب | ۸۰-۹۴ | کیفیت آب حفظ شده و فقط اندکی تهدید یا اختلال وجود دارد؛ شرایط به ندرت از حالت طبیعی یا مطلوب فاصله می‌گیرد. |
| متوسط | ۶۵-۷۹ | کیفیت آب به طور معمول حفظ شده و گاهی اوقات مورد تهدید و اختلال قرار دارد، شرایط در برخی مواقع از حالت طبیعی یا مطلوب خارج می‌شود. |
| بد | ۴۵-۶۴ | کیفیت آب به طور مکرر در معرض تهدید یا اختلال قرار دارد، شرایط در اغلب مواقع از حالت طبیعی و مطلوب خارج می‌شود. |
| خیلی بد | ۰-۴۴ | کیفیت آب تقریباً همیشه در معرض تهدید یا اختلال قرار دارد؛ شرایط مداوماً از حالت طبیعی یا مطلوب خارج شده است |

روابط حاکم بر مدل CWQI به ترتیب در معادلات ۳ تا ۹ ارائه گردیده است (Saffranet al., 2001).

$$CWQI = 100 - \frac{\sqrt{(F_1^2 + F_2^2 + F_3^2)}}{1.732} \quad \text{رابطه (۳)}$$

فاکتور F_1 درصد متغیرهایی را نشان می‌دهد که حداقل یکبار در طول دوره زمانی با مشاهدات تطابق داشته باشند و با استفاده از رابطه ۴ برآورد می‌گردد:

$$F_1 = \left(\frac{\text{Number of failed variables}}{\text{Total number of variables}} \right) \times 100 \quad \text{رابطه (۴)}$$

فاکتور F_2 بیانگر آزمایش‌های منفردی است که با مشاهدات تطابق ندارد و با استفاده از رابطه ۵ برآورد می‌گردد:

$$F_2 = \left(\frac{\text{Number of failed test}}{\text{Total number of variables}} \right) \times 100 \quad \text{رابطه (۵)}$$

فاکتور F_3 بیانگر تعداد آزمایش‌های رد شده‌ای را که با مشاهدات تطابق ندارد. این فاکتور در سه مرحله برآورد می‌شود: ابتدا، برآورد مقدار انحراف مقادیر رد شده با استاندارد در مواقعی که مقادیر آزمون نباید از مقادیر استاندارد تجاوز کند.

$$\text{Excursion } i = \left(\frac{\text{Failed test value } i}{\text{objective } j} \right) - 1 \quad \text{رابطه (۶)}$$

در صورتی که مقدار آزمون نباید از مقدار استاندارد کمتر باشد.

$$\text{Excursion } i = \left(\frac{\text{Objective } j}{\text{Failed test value } i} \right) - 1 \quad \text{رابطه (۷)}$$

سپس، مقدار تجمعی آزمایش‌ها که دارای تابع نمی‌باشند، از مجموع انحرافات تعداد آزمایش‌های مجزای مشاهدات بر تعداد کل آزمایش‌ها محاسبه می‌شوند. این متغیرها که به مجموع انحرافات نرمال شده معروف هستند، با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شوند (Hurley et al., 2012):

$$\text{nse} = \left(\frac{\sum \text{Excursion}}{\text{Total number of test}} \right) - 1 \quad \text{رابطه (۸)}$$

مرحله سوم: فاکتور F_3 پس از انجام مراحل فوق با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود (Farhan et al., 2020):

$$F_3 = \frac{\text{nse}}{0.01\text{nse} + 0.01} \quad \text{رابطه (۹)}$$

نتایج و بحث

هدف از مطالعه حاضر، بررسی و ارزیابی تغییرات متغیرهای کیفی آب مخزن سد خداآفرین با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در ورودی و خروجی مخزن سد، طی دوره زمانی سال آبی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ می‌باشد. با توجه به اینکه سد خداآفرین یک سد مرزی است. به دلیل محدودیت‌های موجود، امکان دسترسی و نمونه‌برداری در مناطق مختلف از سد و رودخانه ارس فراهم نبود. به همین جهت ورودی و خروجی از سد خداآفرین به عنوان دو ایستگاه اصلی در مطالعه حاضر در نظر گرفته شده است (ستاری و همکاران، ۱۴۰۲). در جدول ۶ تغییرات میانگین و انحراف معیار پارامترهای کیفی آب رودخانه ارس در ورودی و خروجی سد خداآفرین طی دوره مطالعاتی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ قرار داده شده است.

مطابق جدول ۶ ملاحظه می‌شود که یکی از بیشترین درصد تغییرات بین ورودی و خروجی مخزن مربوط به پارامتر کدورت آب می‌باشد که در شکل ۲ مقادیر کدورت ورودی و خروجی سد ارس نیز جهت مقایسه با سد خداآفرین ارائه شده است. به عنوان نمونه میانگین کدورت آب برای بازه ورودی مخزن معادل ۱۱۵۵/۶ (NTU) می‌باشد که این مقدار در خروجی معادل ۱۸/۲ (NTU) را نشان می‌دهد که بیانگر تغییرات ۹۸/۴ درصدی می‌باشد که این امر در کلیه ماه‌های اندازه‌گیری به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. بنابراین کدورت ناشی از مواد معلق و کلوئیدی در آن ترسیب یافته و آب خروجی از سد کیفیت مناسبی از نظر کدورت دارد. مطابق آزمون T-TEST کاهش معنی‌دار کدورت در سطح ۰/۰۱ می‌باشد که ناشی از رقیق‌سازی املاح توسط آب رودخانه هاکاری است.

در بالادست سد خداآفرین، بر روی رودخانه ارس، سد ارس واقع شده است که مطالعه‌ای درخصوص نمونه‌برداری و بررسی متغیرهای کیفیت آب رودخانه ارس در ورودی و خروجی سد ارس انجام شده است. شکل ۲ جهت مقایسه نتایج دو مطالعه ارائه شده است. مطابق نتایج، مخزن سد ارس به عنوان یک مخزن ته نشینی عمل نموده و کدورت ناشی از مواد معلق و کلوئیدی در آن ترسیب می‌یابد و آب خروجی از سد از نظر کدورت از کیفیت بهتری برخوردار است. این مسئله به طور مشابه در مقایسه کیفیت آب خروجی و ورودی سد خداآفرین نیز کاملاً مشهود است. اما متوسط TDS و EC در خروجی سد ارس نسبت به ورودی آن افزایش یافته است در حالی که مقادیر این پارامترها مطابق کدورت آب در خروجی سد خداآفرین، نسبت به ورودی آن کاهش یافته است، این امر می‌تواند ناشی از نقش تبخیر آب در مخزن سد و تغلیظ املاح باشد در سد ارس باشد (ستاری و همکاران، ۱۴۰۲).

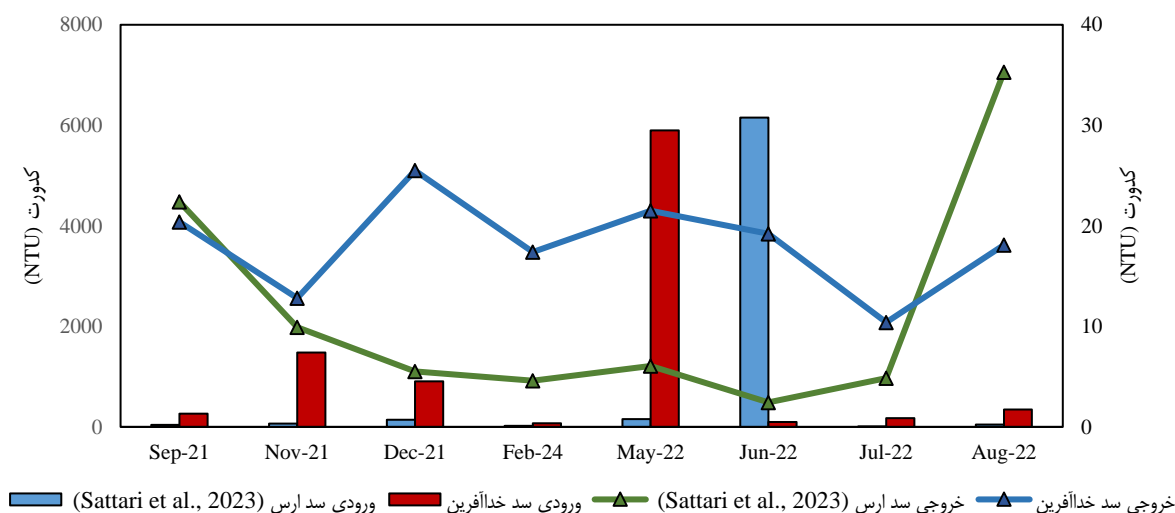
به دلیل رقیق‌سازی املاح توسط آب رودخانه هاکاری، بقیه املاح نیز در مخزن سد خداآفرین، کاهش می‌یابد. همچنین کاهش معنی‌دار در غلظت مس، آلومینیوم، آهن و منگنز نیز رخ می‌دهد. همچنین TSS، EC و TDS نیز به ترتیب معادل ۹۷/۵، ۱۷/۲ و ۱۷/۱ درصد نسبت ورودی به مخزن کاهش داشته است. از طرفی پارامترهایی از قبیل T، NO₃، DO، COD و RSI به ترتیب معادل ۴/۷، ۲۱/۸، ۵/۲ و ۲/۹ درصد افزایش یافته‌اند. اما در مخزن سد ارس به دلیل حجم زیاد ورودی جریان‌های آلوده مانند زه‌آب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های شهری و انحلال مواد از رسوبات کف بستر افزایش TDS و EC مؤثر است. میزان تغییرات متوسط BOD و COD در خروجی سد ارس نسبت به ورودی آن کاهش نشان می‌دهد که ناشی از فرآیند خود پالایی مواد آلی در مخزن سد با نرخ ۲۸/۷ درصد است (ستاری و همکاران، ۱۴۰۲).

جدول ۶. تغییرات میانگین پارامترهای کیفی آب سد خدآفرین در ورودی و خروجی طی دوره مطالعاتی ۱۴۰۰-۱۴۰۱

| پارامتر | Temp | Turbidity | TSS | EC | TDS | pH | Alkalinity | Total hardness | Temporary hardness | Permanent hardness | HCO3 | SO4 | Cl |
|---------------|--------|-----------|--------|---------|--------|--------|------------|----------------|--------------------|--------------------|--------|--------|--------|
| واحد | (C°) | (NTU) | (mg/L) | (µs/cm) | (mg/L) | - | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| ورودی میانگین | ۱۶/۷ | ۱۱۵۵/۶ | ۱۸۱۴/۳ | ۱۳۷۴/۶ | ۸۶۶/۱ | ۸/۱۵ | ۲۴۱/۹ | ۴۰۲/۳ | ۲۴۳/۵ | ۱۵۸/۸ | ۲۹۷/۱ | ۲۵۸/۴ | ۱۶۸/۱ |
| انحراف معیار | ۸/۲ | ۱۹۷۷/۷ | ۲۲۸۱/۴ | ۱۷۷/۱ | ۱۱۱/۷ | -/۱۷ | ۲۵/۶ | ۶۰/۹ | ۲۸/۳ | ۳۶/۴ | ۳۴/۵ | ۶۰/۶ | ۱۶/۸ |
| خروجی میانگین | ۱۷/۵ | ۱۸/۲ | ۴۴/۳ | ۱۱۳۹/۶ | ۷۱۷/۹ | ۸/۱۵ | ۲۱۵/۰ | ۳۴۶/۹ | ۲۱۷/۹ | ۱۲۹/۱ | ۲۶۵/۸ | ۲۱۵/۵ | ۱۲۵/۶ |
| انحراف معیار | ۹/۰ | ۴/۸ | ۵۰/۳ | ۱۷۱/۸ | ۱۰۸/۱ | -/۱۹ | ۱۶/۹ | ۴۱/۱ | ۲۰/۳ | ۲۳/۳ | ۲۴/۸ | ۶۱/۷ | ۲۳/۱ |
| تغییرات | ▲ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | = | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ |
| درصد تغییرات | ۴/۷ | -۹۸/۴ | -۹۷/۵ | -۱۷/۱ | -۱۷/۱ | ۰/۰ | -۱۱/۱ | -۱۳/۷ | -۱۰/۵ | -۱۸/۷ | -۱۰/۵ | -۱۶/۶ | -۲۵/۲ |
| پارامتر | Ca | Mg | Na | K | NO3 | NO2 | NH4 | PO4 | DO | DO | BOD | COD | RSI |
| واحد | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (%) | (mg/L) | (mg/L) | - |
| ورودی میانگین | ۶۶/۰ | ۵۷/۶ | ۱۵۱/۸ | ۸/۰۳ | ۳/۲ | -/۱۱ | -/۰۲۹ | -/۰۲۷۰ | ۹/۵ | ۱۰۱/۱ | ۲/۹ | ۱۳/۴ | ۶/۹۶ |
| انحراف معیار | ۱۵/۳ | ۱۳/۵ | ۲۲/۸ | ۱/۲۵ | ۴/۱ | -/۰۹ | -/۰۲۱ | -/۰۱۴۸ | ۱/۸ | ۱۹/۳ | ۱/۷ | ۷/۲ | -/۰۳۲ |
| خروجی میانگین | ۶۲/۰ | ۴۶/۷ | ۱۱۴/۹ | ۶/۳۸ | ۳/۹ | -/۱۰ | -/۰۲۵ | -/۰۲۲۸ | ۱۰/۰ | ۱۰۷/۳ | ۲/۶ | ۱۳/۸ | ۷/۰۶ |
| انحراف معیار | ۹/۹ | ۵/۹ | ۲۷/۰ | ۰/۸۵ | ۲/۸ | -/۰۵ | -/۰۱۸ | -/۰۱۳۲ | ۱/۷ | ۲۵/۷ | ۱/۶ | ۹/۴ | -/۰۲۶ |
| تغییرات | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▲ | ▼ | ▼ | ▼ | ▲ | ▲ | ▼ | ▲ | ▲ |
| درصد تغییرات | -۶/۰ | -۱۸/۹ | -۲۴/۳ | -۲۰/۵ | ۲۱/۸ | -۹/۰ | -۱۳/۷ | -۱۵/۵ | ۵/۲ | ۶/۱ | -۱۰/۳ | ۲/۹ | ۱/۴ |
| پارامتر | As | Cu | Mo | Cd | Ba | Al | Co | Cr | Pb | Zn | Ni | Fe | Mn |
| واحد | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) |
| ورودی میانگین | ۰/۰۱۵ | ۰/۲۴۸ | ۰/۰۳۷ | ۰/۰۰۱ | ۰/۱۸۲ | ۸/۵۰۳ | ۰/۰۱۷ | ۰/۰۲۴ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۷۵ | ۰/۰۵۴ | ۱۹/۰۲۵ | ۰/۵۱۹ |
| انحراف معیار | ۰/۰۰۴ | ۰/۳۷۱ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۲۹ | ۹/۱۵۴ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۶۱ | ۰/۱۱۱ | ۱۶/۷۵۸ | ۰/۶۳۷ |
| خروجی میانگین | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۳۰ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۶۰ | ۰/۲۶۷ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۰۰ | ۰/۳۷۵ | ۰/۰۱۸ |
| انحراف معیار | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۱۹ | ۰/۱۵۳ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۰۰ | ۰/۳۷۱ | ۰/۰۱۴ |
| تغییرات | ▼ | ▼ | ▼ | = | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ |
| درصد تغییرات | -۲۰/۰ | -۹۴/۷ | -۱۸/۹ | ۰/۰ | -۶۷/۰ | -۹۶/۸ | -۷۶/۴ | -۷۹/۱ | -۵۰/۰ | -۸۴/۰ | -۱۰۰/۰ | -۹۸/۵ | -۹۶/۵ |

▲ = افزایش

▼ = کاهش



شکل ۲. مقایسه مقادیر کدورت ورودی و خروجی مخازن ارس و خدآفرین برای دوره مطالعاتی سال آبی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱

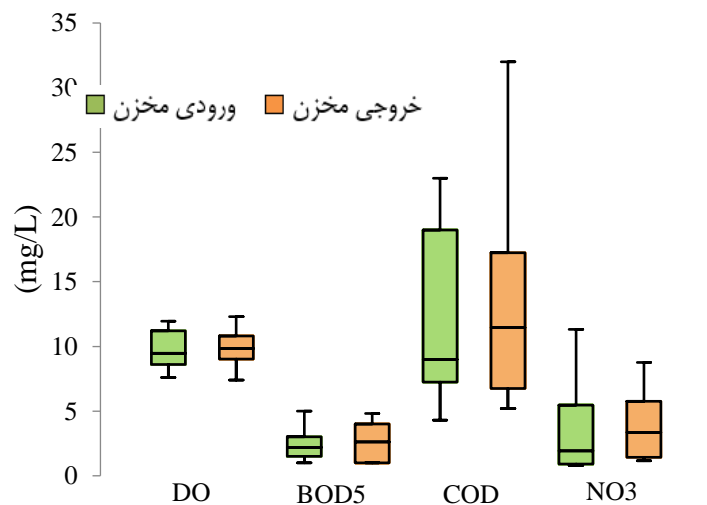
طبقه‌بندی کیفی آب برای کشاورزی، بعد از انجام آنالیز هیدروشیمیایی بر روی نمونه‌های آب و برآورد مقادیر یون‌ها امکان‌پذیر خواهد بود. براساس نتایج طبقه‌بندی کیفی آب جهت کشاورزی در همه نمونه‌ها وضعیت کیفی آب در حالت متوسط (C3S1) برآورد گردید که دارای خطر سدیم کم و خطر شوری بالا جهت استفاده در خاک‌های سبک می‌باشد. همچنین تیپ آب براساس اولویت‌های غلظتی یکی

از آنیون‌های آب تعیین می‌شود که به‌جز اردیبهشت ۱۴۰۱ که تیپ کلروره سدیک می‌باشد. در سایر نمونه‌برداری‌ها دو تیپ اصلی بی‌کربناته، سولفات‌ه وجود دارد. همچنین مقادیر کل کلیفرم‌ها (MPN/100mL) در کنار سایر نتایج طبقه‌بندی کیفیت آب در جدول ۷ ارائه گردیده است.

جدول ۷. طبقه‌بندی کیفی کلاس و تیپ آب رودخانه ارس براساس ویلکاس در ورودی و خروجی سد خداآفرین

| تپه آب | Aug-22 | Jul-22 | Jun-22 | May-22 | Feb-22 | Dec-21 | Nov-21 | Sep-21 |
|--------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| تیپ | کلاس MPN/100ml | کلاس MPN/100ml | کلاس MPN/100ml | کلاس MPN/100ml | کلاس MPN/100ml | کلاس MPN/100ml | کلاس MPN/100ml | کلاس MPN/100ml |
| ورودی | Na-SO ₄ ۹۲۰ | Na-SO ₄ ۹۳۰۰ | Na-HCO ₃ ۴۶۰۰ | Na-SO ₄ ۵۰ | Na-Cl ۳۵۰۰۰ | Na-HCO ₃ ۳۴۰۰ | Na-SO ₄ ۹۲۰۰ | Na-SO ₄ ۳۳۰۰ |
| خروجی | Na-SO ₄ ۱۷ | Na-SO ₄ ۱۷۰۰ | Na-HCO ₃ ۸۰ | Na-HCO ₃ ۳۳ | Na-HCO ₃ ۷۸۰ | Na-HCO ₃ ۳۵۰ | Na-SO ₄ ۴۳۰۰ | Na-SO ₄ ۷۸۰ |
| | C3S1 | C3S1 | C3S1 | C3S1 | C3S1 | C3S1 | C3S1 | C3S1 |

طبق شکل ۳ ملاحظه می‌گردد که متوسط BOD اندازه‌گیری شده در ورودی و خروجی سد خداآفرین به ترتیب معادل ۲/۸ و ۲/۶ میلی‌گرم بر لیتر برآورد شده است. حداکثر مقدار BOD اندازه‌گیری شده معادل ۵/۶ میلی‌گرم بر لیتر است که در شهریور ۱۴۰۰ نمونه‌برداری شده است. همچنین مطابق نتایج به دست آمده BOD در خروجی مخزن نسبت به ورودی به میزان ۱۰/۳ درصد کاهش می‌یابد. دلیل کاهش آن نسبت به ایستگاه ورودی، کاهش تجزیه مواد آلی و تبدیل آن به ترکیبات معدنی است و علت آن را می‌توان فعالیت باکتری‌ها قلمداد کرد. متوسط مقدار COD برای ورودی و خروجی سد خداآفرین به ترتیب معادل ۱۳/۴ و ۱۳/۸ میلی‌گرم بر لیتر محاسبه شد که افزایش ۲/۹ درصدی را نشان می‌دهد. همچنین تغییرات پارامترهای DO و NO₃ نیز در این شکل ارائه شده است. یکی از دلایل اصلی افزایش ۶/۱ درصدی DO در خروجی سد، ناشی از کاهش میزان شوری در این مقطع است. از طرفی افزایش و تجمع نسبی نترات در خروجی مخزن، ناشی از هرس آب‌های کشاورزی که به علت مصرف بیش از حد کودهای نیتراتی بوده یا ناشی از آلودگی‌های نقطه‌ای از فاضلاب‌های انسانی به درستی دفع و فراوری نشده است.



شکل ۳. دامنه تغییرات DO، BOD و COD در ورودی و خروجی مخزن خداآفرین ارس طی دوره مطالعاتی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱

بررسی وضعیت کیفی و دلایل آلودگی رودخانه ارس با توجه به عبور از مراتع، زمین‌های کشاورزی، شهرک صنعتی، مناطق شهری و روستایی و مراکز تفریحی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. از طرفی استفاده از شاخص‌های کیفیت آب یک رویکرد جامع برای ارزیابی

و مدیریت کیفیت آب فراهم می‌کند تا امکان درک بهتر سلامت و پایداری منابع آب را در اختیار ما قرار دهند. در راستای ضرورت این مسئله از سه شاخص $IRWQI_{SC}$ ، $NSFWQI$ و $CWQI$ جهت تجزیه و تحلیل وضعیت کیفیت آب در زمینه مصارف مختلف استفاده گردید.

براساس شاخص $IRWQI_{SC}$ خروجی سد خداآفرین در مقایسه با ورودی سد دارای کیفیت آب بهتری می‌باشد که این امر نشان‌دهنده تاثیر مثبت سد خداآفرین و همچنین تاثیر قابل توجه آورد سایر رودخانه‌ها مثل رودخانه هاکاری به رود ارس می‌باشد که در نهایت منجر به بهبود کیفیت آب رود ارس در خروجی مخزن سد خداآفرین می‌شود (جدول ۸). لازم به ذکر است که وضعیت کیفیت آب به لحاظ شاخص $IRWQI_{SC}$ در پاییز و زمستان نسبتاً نرمال بوده اما در فصل بهار و تابستان در دو ایستگاه وضعیت کیفی آب نسبتاً بد می‌باشد. بدترین شرایط کیفی آب به لحاظ شاخص فوق در اردیبهشت ماه ۱۴۰۱ برآورد شده است. بررسی شاخص $NSFWQI$ نیز به لحاظ فصلی مطابق شاخص $IRWQI_{SC}$ عمل می‌کند با این تفاوت که نسبتاً این شاخص نتایج خوشبینانه‌تری در مقایسه با شاخص $IRWQI_{SC}$ را نشان می‌دهد اما اختلاف کیفیت آب در فصل‌های مختلف مشهود است. مطابق نتایج به دست آمده از شاخص $NSFWQI$ در خروجی سد خداآفرین در همه ماه‌های مختلف نمونه‌برداری کیفیت آب رودخانه در وضعیت متوسط و خوب قرار دارد و همچنین وضعیت بدی در این ایستگاه مشاهده نشده است. اما در ورودی سد خداآفرین وضعیت کیفیت آب طبق هر دو شاخص در طبقه نسبتاً بد و بد قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه یک منطقه گردشگری محسوب می‌شود. افزایش مسافرت‌های فصلی از یک طرف و از طرف دیگر تعدد مراتع کشاورزی، ورود پساب به خصوص در فصل بهار و تابستان را افزایش داده است. عدم مدیریت مناسب پسماندهای رها شده در بستر رودخانه ارس نیز در نوبه خود باعث شده است که کیفیت آب رودخانه ارس در مقطع ورودی سد خداآفرین کاهش قابل توجهی را تجربه کند.

جدول ۸. نتایج شاخص $IRWQI_{SC}$ و $NSFWQI$ آب رودخانه ارس طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۰

| شاخص | ماه | Sep-21 | Nov-21 | Dec-21 | Feb-22 | May-22 | Jun-22 | Jul-22 | Aug-22 |
|--------------|--------------|--------|--------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $IRWQI_{SC}$ | ورودی | ۵۳/۹ | ۵۴ | ۴۴/۹ | ۵۱/۱ | ۲۷ | ۳۹ | ۳۴ | ۳۴ |
| | معادل توصیفی | متوسط | متوسط | نسبتاً بد | متوسط | بد | نسبتاً بد | نسبتاً بد | نسبتاً بد |
| | خروجی | ۷۲/۴ | ۵۲/۹ | ۵۰/۶ | ۵۸/۶ | ۳۹ | ۴۶ | ۳۹ | ۴۲ |
| | معادل توصیفی | خوب | متوسط | متوسط | نسبتاً خوب | نسبتاً بد | متوسط | نسبتاً بد | نسبتاً بد |
| $NSFWQI$ | ورودی | ۵۳ | ۶۳ | ۶۵ | ۶۹ | ۴۶ | ۵۰ | ۵۴ | ۴۹ |
| | معادل توصیفی | متوسط | متوسط | متوسط | متوسط | بد | بد | متوسط | بد |
| | خروجی | ۷۸ | ۶۳ | ۶۵ | ۷۳ | ۵۵ | ۵۵ | ۵۸ | ۵۴ |
| | معادل توصیفی | خوب | متوسط | متوسط | خوب | متوسط | متوسط | متوسط | متوسط |

جدول ۹. نتایج سالانه شاخص $CWQI$ در ورودی و خروجی سد خداآفرین

| Data Summary | | عمومی | شرب | زیست‌آزی | تفریح | آبیاری | احشام |
|--------------|-----------|-------|------|----------|------------|--------|-------|
| ورودی | $CWQI$ | ۲۹ | ۲۸ | ۲۴ | ۶۸ | ۶۱ | ۸۴ |
| مخزن | طبقه‌بندی | ضعیف | ضعیف | ضعیف | نسبتاً خوب | متوسط | خوب |
| خروجی | $CWQI$ | ۴۳ | ۴۰ | ۳۹ | ۵۴ | ۸۱ | ۱۰۰ |
| مخزن | طبقه‌بندی | ضعیف | ضعیف | ضعیف | متوسط | خوب | عالی |

شاخص $CWQI$ با توجه به پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مورد نیاز، پهنه‌های آبی را از نظر کیفی برای آشامیدن، کشاورزی، آبیان و احشام بررسی می‌کند. مطابق شکل ۴ و جدول ۹ مشاهده می‌شود که وضعیت کیفی آب جهت مصارف شرب و پرورش آبی مناسب نبوده و در صورت لزوم، خروجی آب سد خداآفرین وضعیت نسبتاً بهتری دارد. مطلوب‌ترین شرایط جهت مصرف احشام می‌باشد که مطابق جدول ۵ در خروجی سد خداآفرین کیفیت آب حفاظت شده است و نشانه‌ای از تهدید یا افت کیفی نیست و شرایط بسیار نزدیک به حالت طبیعی است و در ورودی سد نیز کیفیت آب حفاظت شده است اما درجه خفیفی از تهدید یا تنزل کیفی وجود دارد و شرایط آب به ندرت از حالت طبیعی خارج می‌شود و برای مصرف احشام مناسب است. در زمینه آبیاری نیز برای ورودی و خروجی سد وضعیت کیفی آب نسبتاً خوب و خوب است که شرایط آب به ندرت از حالت طبیعی خارج می‌شود. در نهایت برخلاف سایر موارد مصرف جهت تفریح و سرگرمی در ایستگاه ورودی شرایط نسبتاً بهتری دارد. براساس شاخص فوق به طور کلی وضعیت کیفی آب هم در ورودی و هم در خروجی

مطالعه کم بودن طول دوره زمانی بازه مطالعاتی و تعداد کم نمونه‌ها می‌باشد. اگرچه براساس همین نمونه‌های موجود هم می‌توان تصویر نسبتاً گویایی از وضعیت کیفیت آب بدست آورد اما قطعاً در صورت وجود نمونه‌های متعدد در بازه زمانی طولانی‌تر شامل دوره‌های خشک و تر می‌توان تحلیل‌های دقیق‌تر و پایدارتری در ارتباط با کیفیت آب و روند تغییرات آن ارائه نمود. بهرحال با توجه به شرایط موجود ضروری است که اقدامات جدی از طرف مدیران بخش آب در منطقه برای جلوگیری و یا کاهش ورود انواع آلاینده‌ها به داخل رودخانه و مخزن سد (بوئژه پساب‌های معدنی ارمنستان) ضروری است تا با افزایش کیفیت آب، پیامدهای زیست محیطی و سلامتی ناشی از این آلودگی‌ها در منطقه کاهش یابد.

سپاسگزاری

مقاله حاضر برگرفته از نتایج طرح پژوهشی که توسط دفتر رودخانه‌های مرزی و منابع آب مشترک شرکت مدیریت منابع آب ایران حمایت شده است. نویسندگان مقاله تشکر و قدردانی صمیمانه خود را از این شرکت اعلام می‌دارند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

ستاری، محمدتقی، بابایی، محمد، غلامی، هوشنگ، پیرحیاتی، محمد، معصومی، فریبرز و مسافری، محمد. (۱۴۰۲). نمونه برداری و بررسی متغیرهای تحقیقات منابع آب ایران، ۱۹(۵)، ۹۹-۱۱۳. (ستاری و همکاران، ۱۴۰۲). کیفیت آب رودخانه ارس در پایین دست و بالادست سد ارس. هاشمی، سید حسین، پور اصغر، فرزاد، نصرآبادی، تورج و رضانی، سعیده. (۱۳۹۰). راهنمای شاخص کیفیت آب ایران برای منابع آب سطحی - پارامترهای متعارف. سازمان حفاظت محیط زیست ایران. (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۰).
مطالعات علوم CCME متقی، حامد. (۱۳۹۹). ارزیابی کیفیت آب رودخانه بشار با استفاده از شاخص کیفیت آب و خلیلی، رضا، پروین نیا، محمد محیط زیست. (۳)، ۵، ۲۸۱۴-۲۸۰۷. (خلیلی و همکاران، ۱۳۹۹).

REFERENCES

- Abdullah, H. S., Mahdi, M. S., & Ibrahim, H. M. (2017). Water quality assessment models for Dokan Lake using Landsat 8 OLI satellite images. *Journal of Zankoy Sulaimani, Pure and Applied Sciences*, 19(4), 25-44.
- Boyacioglu, H. (2010). Utilization of the water quality index method as a classification tool. *Environmental monitoring and assessment*, 167, 115-124.
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). A water quality index-do we dare. *Water and sewage works*, 117(10).
- Chen, P., Wang, B., Wu, Y., Wang, Q., Huang, Z., & Wang, C. (2023). Urban river water quality monitoring based on self-optimizing machine learning method using multi-source remote sensing data. *Ecological Indicators*, 146, 109750.
- Ebraheim, G., Zonoozi, M. H., & Saeedi, M. (2020). A comparative study on the performance of NSFQI m and IRWQI sc in water quality assessment of Sefidroud River in northern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1-13.
- Gani, M. A., Sajib, A. M., Siddik, M. A., & Moniruzzaman, M. (2023). Assessing the impact of land use and land cover on river water quality using water quality index and remote sensing techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(4), 449.
- Ghosh, H., Tusher, M. A., Rahat, I. S., Khasim, S., & Mohanty, S. N. (2023, February). Water Quality Assessment Through Predictive Machine Learning. *In International Conference on Intelligent Computing and Networking* (pp. 77-88). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Gupta, S., & Maiti, S. (2023). Comparison between self-organizing map and principal component analysis for water quality assessment and hydro-geochemical characterization in dyke intruded complex geological settings. *Water and Environment Journal*.
- Hashemi, S. H., Poursaghar, F., Nasrabadi, T., Ramezani, S., & Khoshrou, G. (2011). Guide to Iran Water Quality Index for Surface Water Resources-Conventional Parameters. *Environmental Protection Organization of Iran*. (In Persian)
- Hurley, T., Sadiq, R., & Mazumder, A. (2012). Adaptation and evaluation of the Canadian Council of Ministers



- of the Environment Water Quality Index (CWQI WQI) for use as an effective tool to characterize drinking source water quality. *Water research*, 46(11), 3544-3552.
- Jang, E., Im, J., Ha, S., Lee, S., & Park, Y. G. (2016). Estimation of water quality index for coastal areas in Korea using GOCI satellite data based on machine learning approaches. *Korean Journal of Remote Sensing*, 32(3), 221-234.
- Kamali Maskooni, E., Naseri-Rad, M., Berndtsson, R., & Nakagawa, K. (2020). Use of heavy metal content and modified water quality index to assess groundwater quality in a semiarid area. *Water*, 12(4), 1115.
- Khalili, R., Parvinnia, M., & Motaghi, H. (2020). Evaluation of Bashar River water quality using CWQI water quality index. *Journal of Environmental Science Studies*, 5(3), 2807-2814 (In Persian)
- Khlaif, B. M., & Al-Hassany, J. S. (2023, December). Assessment of the Euphrates River's Water Quality at a Some Sites in the Iraqi Governorates of Babylon and Karbala. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science* (Vol. 1262, No. 2, p. 022021). IOP Publishing.
- Kujiek, D. C., & Sahile, Z. A. (2024). Water quality assessment of Elgo river in Ethiopia using CCME, WQI and IWQI for domestic and agricultural usage. *Heliyon*, 10(1).
- Oiry, S., & Barillé, L. (2021). Using sentinel-2 satellite imagery to develop microphytobenthos-based water quality indices in estuaries. *Ecological Indicators*, 121, 107184.
- Saffran, K., Cash, K., Hallard, K., & Wright, R. (2001). Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life, CWQI water quality Index 1, 0, Users manual. *Excerpt from Publication*, 1299.
- Sattari, M. T., Babaei, M., Masoumi, F., & Mosafieri, M. (2023). Sampling and evaluation of water quality variables of Aras River downstream and upstream of Aras Dam. *Iran-Water Resources Research*. 19(5), 99-113. (In Persian)
- Silva, T. F. D. G., Beltrán, D., de Oliveira Nascimento, N., Rodríguez, J. P., & Mancipe-Muñoz, N. (2023). Assessing major drivers of runoff water quality using principal component analysis: a case study from a Colombian and a Brazilian catchments. *Urban Water Journal*, 20(10), 1555-1567.
- Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G., & Perera, B. J. C. (2016). Development of river water quality indices—a review. *Environmental monitoring and assessment*, 188, 1-29.
- Uddin, M. G., Nash, S., Rahman, A., & Olbert, A. I. (2023). Performance analysis of the water quality index model for predicting water state using machine learning techniques. *Process Safety and Environmental Protection*, 169, 808-828.
- Varol, M., & Tokath, C. (2023). Evaluation of the water quality of a highly polluted stream with water quality indices and health risk assessment methods. *Chemosphere*, 311, 137096.
- Wan Abdul Ghani, W. M. H., Abas Kutty, A., Mahazar, M. A., Al-Shami, S. A., & Ab Hamid, S. (2018). Performance of biotic indices in comparison to chemical-based Water Quality Index (WQI) in evaluating the water quality of urban river. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 1-14.
- Zaghloul, G. Y., Zaghloul, A. Y., Hamed, M. A., El-Moselhy, K. M., & El-Din, H. M. E. (2023). Water quality assessment for Northern Egyptian lakes (Bardawil, Manzala, and Burullus) using NSF-WQI Index. *Regional Studies in Marine Science*, 103010.