

Evaluation of water quality of the Saridareh River for drinking and agricultural purposes with emphasis on water hydrochemistry

Balal Oroji^{1*}

*1. Faculty of Biological Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

*Email Address: Balaloroji@khu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article Type: Research Paper Article History: Received Date: 2026/06/07 Revised Date: 2026/06/21 Accepted Date: 2026/07/28 Published Date: 2026/07/29 Keywords: Saridareh River, Heavy metals, Hydrogeochemicals, Lead, Arsenic	Rivers are considered to be the most important sources of fresh water for drinking, agricultural and industrial purposes, but the increase in mining, agricultural and urban development activities can affect the quality of these resources. The Saridareh River is located in the east of East Azerbaijan Province and in an area with high mineral potential and plays an important role in providing drinking and agricultural water in the region. The aim of this study was to evaluate the water quality of the Saridareh River for drinking and agricultural purposes and also to investigate the origin of water chemical changes. In order to achieve this goal, sampling was carried out from 14 points along the river during two dry and wet periods from August 2025 to March 2026. The measured parameters included heavy metals such as arsenic, lead and iron and physicochemical parameters (major ions and trace elements). Water quality was also evaluated using common irrigation indices, Piper and Wilcox diagrams and Pearson correlation analysis. The results showed that the average concentrations of As, Pb and Fe were 1.40, 6.8 and 0.017 µg/l respectively and except for a few stations with a relative increase in Pb, all other values were below the permissible limits of the World Health Organization. The pH values were measured between 7.77 and 8.33, TDS between 148 and 330 mg/l and EC between 297 and 660 µS/cm, which indicate good water quality and the prevalence of weak alkaline conditions. The dominant hydrochemical facies were Ca-HCO₃ and Ca-Mg-HCO₃, and the weathering process of carbonate rocks was identified as the most important factor controlling water chemistry. The results of the correlation analysis also showed a significant relationship between As and SO₄²⁻, EC and TDS, which confirms the terrestrial origin of this element. Agricultural indices, Wilcox plot indicated that all samples were in the C2-S1 class and the water was suitable for irrigation. Also, the river water is mainly sediment-forming and does not pose a serious risk of corrosion for industrial uses. Overall, the water quality of the Saridareh River was assessed as desirable for drinking, agricultural, and industrial uses, and geological processes and rock weathering were identified as the most important factors controlling the chemical composition of the river water.
Cite this article:	Balal Oroji (2026) Evaluation of water quality of the Saridareh River for drinking and agricultural purposes with emphasis on water hydrochemistry, Journal of Environmental Sciences Studies , 11(1), Pages 11150-11165.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Rivers are considered to be the most important sources of fresh water, which play a fundamental role in providing drinking water, agriculture, and maintaining the stability of natural ecosystems. However, the development of human activities, the expansion of urbanization, the increase in mining and agricultural exploitation, as well as the natural processes of rock weathering can affect the quality of these resources. The Saridareh River is located in the city of Kalybar and, due to its location within the Arasbaran metallogenic belt and proximity to areas with mineral potential, is of particular importance from the perspective of assessing water quality and determining the origin of dissolved elements. The aim of this study was to investigate the water quality of the Saridareh River for drinking, agricultural, and industrial uses, as well as to analyze the geochemical origin of dissolved elements and ions in the water of this river.

Materials and methods

In order to achieve the research objectives, water sampling was carried out from 14 stations along the river during different hydrological periods. Physicochemical parameters including pH, EC, TDS, TH, HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} and NO_3^- were measured. Also, the concentration of selected elements including arsenic, lead, iron, zinc, barium and other elements were determined using ICP-MS. Common drinking, agricultural and industrial indicators were used to assess water quality and the relationships between parameters were examined through Pearson correlation analysis. In addition, the hydrochemical facies of the water was assessed using the Piper diagram and the irrigability was assessed using the Wilcox diagram and USSL classification.

Results and discussion

The results showed that the average arsenic concentration was $1.40 \mu\text{g/l}$ and was lower than the World Health Organization permissible limit ($10 \mu\text{g/l}$) at all stations. Lead concentrations ranged from 0.05 to $13.43 \mu\text{g/l}$ and exceeded the drinking water guideline at several stations, which is likely due to the weathering effects of the mineral units and activities related to mineralization in the region. The average iron concentration was also much lower than the drinking water limit, indicating adequate water quality in this regard. The sulfate, chloride, and nitrate values in all samples were below standard limits, indicating limited impact of human pollutant sources on river water quality. The pH values ranged from 7.77 to 8.33 with an average of about 8.06 , indicating slightly alkaline water conditions. Electrical conductivity ranged from 297 to $660 \mu\text{S/cm}$ and TDS ranged from 148 to 330 mg/l , indicating that the water is sweet and the risk of salinity is low. The results of the correlation analysis showed that arsenic has a positive and significant correlation with sulfate, EC and TDS, indicating a common terrane origin and the role of weathering of sulfide minerals in the release of this element. Also, sulfate showed a strong and significant correlation with EC and TDS, confirming its role in controlling the ionic load of water. The study of water quality for agricultural purposes showed that all samples fall into the C2-S1 class, which indicates water with moderate salinity and low sodium risk. Low levels of sodium, chloride and sulfate indicate that the water is suitable for irrigation of most crops and horticultural crops in the region. The results of the Wilcox plot also showed that most samples are in the "excellent to good" and "good to acceptable" ranges and that long-term use of this water does not pose a significant risk in terms of soil salinization or sodium. From an industrial perspective, 13 stations had sedimentation properties and only one station had corrosive properties, indicating that the river water mainly tends to form calcium carbonate deposits in industrial facilities.

Conclusion

According to the Piper diagram, the dominant facies of the river water are Ca-HCO_3 and Ca-Mg-HCO_3 , indicating that the water chemistry is controlled by the weathering process of carbonate rocks and the dissolution of minerals containing calcium and magnesium. Overall, the results of this study indicate that the water quality of the Saridareh River is suitable for drinking and agricultural purposes, and natural geological processes and rock weathering are the most important factors controlling the chemical composition of the water. However, the observation of relatively high concentrations of lead at some stations highlights the need for continuous monitoring of this element and assessment of the possible effects of mining activities in the catchment area.



ارزیابی کیفیت آب رودخانه ساری دره برای مصارف شرب و کشاورزی با تأکید بر

هیدروشیمی آب

بلال اروجی*

*۱- دانشکده علوم زیستی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: Balaloroji@khu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی	رودخانه‌ها از مهم‌ترین منابع آب شیرین برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی محسوب می‌شوند، اما افزایش فعالیت‌های معدنی، کشاورزی و توسعه شهری می‌تواند کیفیت این منابع را تحت تأثیر قرار دهد. رودخانه ساری دره در شرق استان آذربایجان شرقی و در محدوده‌ای با پتانسیل معدنی بالا واقع شده است و نقش مهمی در تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه دارد. هدف این پژوهش ارزیابی کیفیت آب رودخانه ساری دره برای مصارف شرب و کشاورزی و همچنین بررسی منشأ تغییرات شیمیایی آب بود. به منظور دستیابی به این هدف، در ۱۴۰۴ از ۱۴ نقطه در طول رودخانه طی دو دوره خشک و مرطوب نمونه‌برداری انجام شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده شامل فلزات سنگین مانند آرسنیک، سرب و آهن و پارامترهای فیزیکوشیمیایی (یون‌های اصلی و عناصر کم‌مقدار) بود. همچنین کیفیت آب با بهره‌گیری از شاخص‌های متداول آبیاری، نمودارهای پایپر و ویلکاکس و تحلیل همبستگی پیرسون مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین غلظت آرسنیک، سرب و آهن به ترتیب ۱/۴۰، ۶/۸ و ۰/۱۷ میکروگرم بر لیتر و به جز چند ایستگاه با افزایش نسبی سرب، سایر مقادیر کمتر از حدود مجاز سازمان بهداشت جهانی بودند. مقادیر pH بین ۷/۷ تا ۸/۳۳، TDS بین ۱۴۸ تا ۳۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و EC بین ۲۹۷ تا ۶۶۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شد که بیانگر کیفیت مناسب آب و غلبه شرایط قلیایی ضعیف است. رخساره هیدروشیمیایی غالب از نوع Ca-Mg-HCO_3 و Ca-HCO_3 بوده و فرآیند هوازدگی سنگ‌های کربناته مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده شیمی آب تشخیص داده شد. نتایج تحلیل همبستگی نیز ارتباط معنی‌دار آرسنیک با سولفات، EC و TDS را نشان داد که مؤید منشأ زمین‌زاد این عنصر است. شاخص‌های کشاورزی، نمودار ویلکاکس بیانگر قرارگیری تمامی نمونه‌ها در کلاس C2-S1 و مناسب بودن آب برای آبیاری بودند. همچنین آب رودخانه از نظر مصارف صنعتی عمدتاً دارای خاصیت رسوب‌گذاری و فاقد خطر جدی خوردگی است. در مجموع، کیفیت آب رودخانه ساری دره برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی مطلوب ارزیابی شد و فرآیندهای زمین‌شناختی و هوازدگی سنگ‌ها مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آب این رودخانه شناخته شدند.
کلید واژه‌ها: رودخانه ساری دره، فلزات سنگین، هیدروژئوشیمیایی، سرب، آرسنیک.	

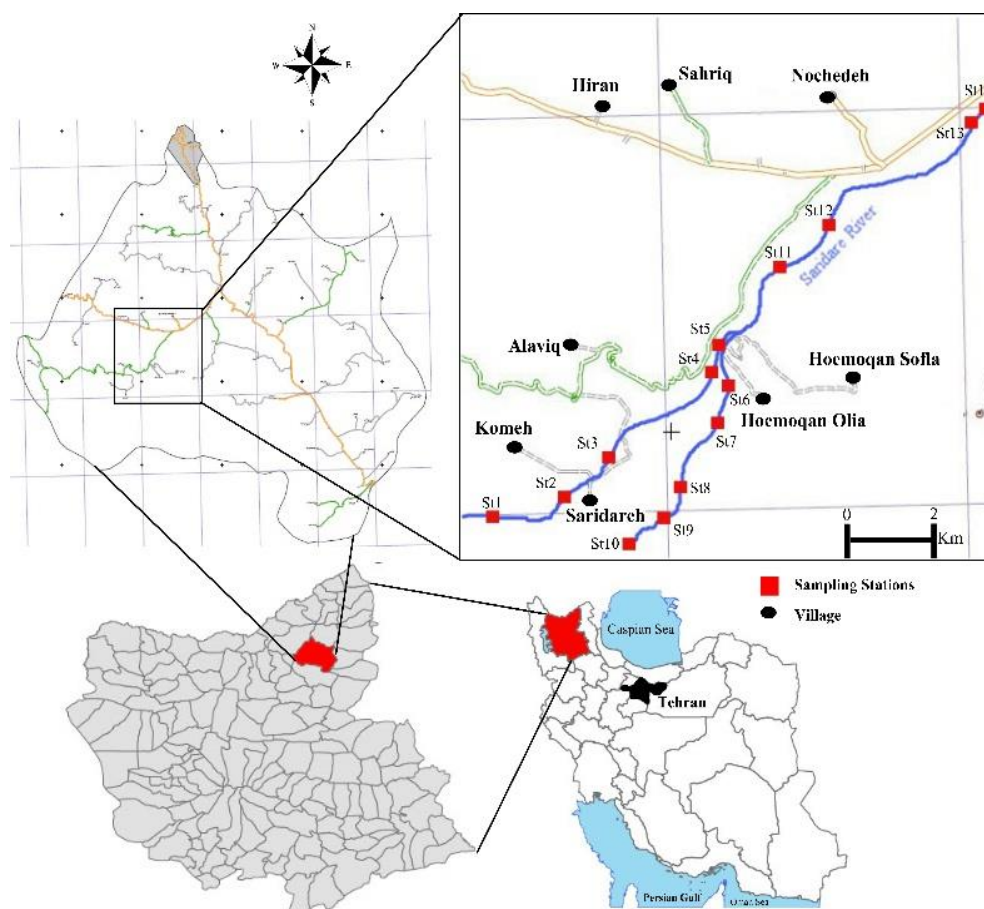
امروزه بخش قابل توجهی از آلودگی منابع آب ناشی از فعالیت‌های صنعتی، مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها و همچنین مدیریت نامناسب پسماندها است. این عوامل آلاینده می‌توانند به‌طور چشمگیری کیفیت منابع آبی را کاهش داده و سلامت اکوسیستم‌های وابسته را تهدید کنند (Whig et al., 2026; Rahmati et al., 2026). توسعه شتابان صنایع در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، آفت محسوس کیفیت آب را به دنبال داشته است. افزایش بار آلاینده‌ها در رودخانه‌ها موجب تشدید تخریب اکوسیستم‌های آبی شده و در عین حال، چالش‌های جدی برای تحقق اقتصاد چرخشی ایجاد کرده است (Naz et al., 2025; Limazie and Woni, 2024). در چنین شرایطی، تأمین آب شیرین و ایمن به یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های بشر در سطح جهانی تبدیل شده است. بر اساس گزارش سازمان ملل متحد، بیش از ۲ میلیارد نفر در جهان از دسترسی به آب آشامیدنی سالم محروم هستند و حدود ۳/۶ میلیارد نفر نیز با کمبود آب سالم برای شرب مواجه‌اند. آلودگی منابع آب می‌تواند تحت تأثیر عوامل متعددی ایجاد شود که منشأ آن‌ها را می‌توان در دو گروه اصلی منابع طبیعی و فعالیت‌های انسانی طبقه‌بندی کرد (Varatharajan et al., 2025). در همین حال، کمبود آب در مقیاس جهانی و فشار روزافزون بر منابع موجود به دلیل افزایش تقاضا در بخش‌های خانگی، صنعتی، کشاورزی، تولید انرژی برقی و سایر فعالیت‌ها به‌طور مستمر در حال تشدید است (Mishra, 2023). نیاز روزافزون به منابع آب تحت تأثیر فرآیندهای صنعتی شدن، رشد جمعیت و توسعه فعالیت‌های اقتصادی افزایش یافته است. افزون بر این، گسترش سریع شهرنشینی و تغییر الگوهای مصرف، مدیریت منابع آب را با چالش‌های متعددی روبه‌رو کرده و در بسیاری از موارد موجب بهره‌برداری ناکارآمد از این منابع شده است. استفاده از فاضلاب در بخش کشاورزی می‌تواند آثار مثبت و منفی مختلفی بر محیط زیست بر جای بگذارد، اما در صورت برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح، دستیابی به مزایای قابل توجه آن امکان‌پذیر خواهد بود. ارزیابی کیفیت آب معمولاً بر پایه بررسی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی آن، در کنار سایر شاخص‌های هیدرولوژیکی انجام می‌شود (Mallick et al., 2023). از سوی دیگر، استقرار و گسترش سکونتگاه‌های انسانی در اطراف حوضه‌های آبریز سبب شده است که بسیاری از رودخانه‌ها در معرض آلودگی شدید قرار گیرند و به یکی از آسیب‌پذیرترین منابع آبی جهان تبدیل شوند. در این راستا، طراحی و اجرای راهکارهای مؤثر برای پیشگیری و کاهش آلودگی رودخانه‌ها با چالش‌ها و محدودیت‌های قابل توجهی همراه است که نیازمند برنامه‌ریزی جامع و مدیریت کارآمد می‌باشد (Bhatt et al., 2025). رودخانه‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی آب شیرین، نقش اساسی در تأمین نیازهای انسانی و حفظ تعادل اکولوژیکی ایفا می‌کنند. با این حال، در بسیاری از نقاط جهان این منابع ارزشمند تحت فشار فزاینده ناشی از برداشت بیش از حد و بهره‌برداری گسترده برای مصارف شرب، صنعتی، کشاورزی و توسعه شهری قرار گرفته‌اند (Abdul et al., 2023). در دهه‌های اخیر، کاربرد گسترده کودهای شیمیایی و نهاده‌های کشاورزی و انتقال آن‌ها به منابع آبی، از مهم‌ترین عوامل آلودگی آب‌های سطحی شناخته شده است (Das, 2025a). اگرچه شدت تأثیر این آلاینده‌ها به عواملی نظیر میزان تغذیه آبخوان، الگوی بارش سالانه، فرآیندهای هوازگی سنگ‌ها و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی منطقه وابسته است، اما ورود مداوم و گسترده آلاینده‌ها در نهایت موجب کاهش کیفیت منابع آب سطحی می‌شود. علاوه بر این، رشد سریع شهرنشینی و افزایش جمعیت، همراه با محدودیت منابع آب شیرین، در سال‌های اخیر به کاهش هم‌زمان کیفیت و کمیت منابع آب سطحی در بسیاری از مناطق جهان منجر شده است (Gao et al., 2022). آب‌های سطحی، به‌ویژه رودخانه‌ها، به‌طور مستمر در معرض آلودگی‌های میکروبی ناشی از منابع انسانی و طبیعی از جمله شبکه‌های زهکشی شهری، نشت سامانه‌های فاضلاب، شستشوی کودها، استفاده از فاضلاب در آبیاری و تخلیه مستقیم پساب‌های تصفیه‌نشده قرار دارند (Abdulkarim et al., 2022). افزون بر این، فعالیت‌هایی نظیر رواناب‌های کشاورزی متمرکز، تخلیه فاضلاب‌های صنعتی و گسترش سریع و بدون برنامه شهرها، تهدیدی جدی برای کیفیت این منابع محسوب می‌شوند. چنین فعالیت‌هایی موجب افزایش قابل توجه غلظت مواد محلول و انتقال آن‌ها در چرخه میان خاک، جو و اکوسیستم‌های زنده شده است (Genjula et al., 2023). به‌طور ویژه، مصرف گسترده کودهای شیمیایی، پسماندهای حاصل از آبی‌پرووری و دفع نامناسب فاضلاب‌ها و فصولات دامی، امروزه به یک چالش جهانی تبدیل شده و علاوه بر اثرات مخرب زیست‌محیطی، پیامدهای مهمی برای سلامت عمومی به همراه داشته است (Ahmadi et al., 2020). منابع آب سطحی به عنوان سیستم‌هایی پویا و طبیعی، یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شیرین در جهان به شمار می‌آیند. این منابع علاوه بر تأمین آب شرب، نقش مؤثری در آبیاری اراضی کشاورزی، پشتیبانی از فعالیت‌های صنعتی و حفظ پایداری اکوسیستم‌های آبی ایفا می‌کنند (Zhu et al., 2021). با این وجود، گسترش فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی، توسعه شهرنشینی و تغییرات کاربری اراضی، فشارهای فزاینده‌ای را بر این سامانه‌های آبی وارد کرده است. در این میان، افزایش تخلیه پساب‌های صنعتی، فاضلاب‌های شهری، رواناب‌های کشاورزی و پساب‌های ناشی از فعالیت‌های آبی‌پرووری، از عوامل اصلی تشدید آلودگی و افت کیفیت آب‌های سطحی محسوب می‌شوند (Gao et al., 2023; Panagopoulos, 2022). در نتیجه، کاهش کیفیت آب نه تنها عملکرد و سلامت اکوسیستم‌های آبی را مختل می‌کند، بلکه بهره‌برداری پایدار از منابع آب را نیز با چالش‌های جدی مواجه می‌سازد. از این رو، شناسایی منابع آلاینده، پایش مستمر کیفیت آب و تعیین سهم هر یک از عوامل آلوده‌کننده، از الزامات اساسی برای طراحی راهبردهای مدیریتی مؤثر و اجرای برنامه‌های کنترل و کاهش آلودگی به شمار می‌رود. همچنین مطالعات مختلف نشان داده‌اند که اتخاذ رویکردهای

مدیریتی مناسب برای احیای کیفیت آب در حوزه‌های آبخیز، نقش مهمی در تقویت تاب‌آوری اکوسیستم‌های آبی و دستیابی به توسعه پایدار دارد. اهمیت این اقدامات در سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی و فرآیندهای تصمیم‌سازی نیز به طور گسترده مورد تأکید قرار گرفته است (Das, 2025b). به همین دلیل، با توجه به اهمیت راهبردی رودخانه‌ها در تأمین آب و خدمات اکوسیستمی، پژوهش‌های متعددی در سراسر جهان به بررسی عوامل مؤثر بر تخریب و آلودگی این منابع اختصاص یافته است. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های فراوانی بر ارزیابی کیفیت آب و بررسی آلودگی فلزات سنگین در رودخانه‌های ایران و سایر کشورها متمرکز بوده و در مطالعات انجام شده از درجه اهمیت بالایی برخوردار بوده‌اند (Khodami et al., 2026; Gharahi et al., 2026). برای نمونه، خلیلی و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای بر روی رودخانه هراز، وضعیت آلودگی فلزات سنگین در آب و رسوبات را با استفاده از شاخص بار آلودگی و شاخص زمین‌انباشت مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که در بخش‌های پایین‌دست رودخانه، به دلیل ورود زباله‌های شهری، تخلیه فاضلاب‌های صنعتی تصفیه‌نشده و رواناب‌های ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، غلظت برخی فلزات سنگین از حدود مجاز تعیین شده برای آب آشامیدنی فراتر رفته است. پژوهش‌های متعددی در حوضه آبریز رودخانه ارس انجام شده است. صفی‌زاده و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که مقادیر هدایت الکتریکی و جامدات محلول کل در برخی از ایستگاه‌های نمونه‌برداری بیانگر شرایط نسبتاً شور آب و محدودیت‌هایی برای استفاده کشاورزی است. همچنین نتایج آنها حاکی از آن بود که غلظت نیتрат و نیتريت در تعدادی از نمونه‌ها از حدود مجاز فراتر رفته است، در حالی که پارامترهایی نظیر pH، یون‌های پتاسیم و کلسیم و همچنین فلزات سنگین سرب و کادمیوم عمدتاً در محدوده استانداردهای پذیرفته‌شده قرار داشتند. شاه‌محمدی و حبیب‌زاده (۲۰۱۷) با بررسی پراکنش ژئوشیمیایی عناصر مس، روی، سرب و نیکل در منطقه آزاد ارس دریافتند که رسوبات برخی ایستگاه‌ها، به‌ویژه در مجاورت نواحی معدنی، آلودگی قابل توجهی به عنصر مس دارند که منشأ احتمالی آن فعالیت‌های معدن مس سونگون است. همچنین رامین و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای بر روی عناصر مولیبدن، مس، جیوه و آرسنیک در آب و رسوبات رودخانه ارس گزارش کردند که میانگین غلظت مس در محدوده آلودگی متوسط قرار دارد، در حالی که غلظت جیوه و آرسنیک در برخی نقاط از مقادیر استاندارد فراتر رفته است. افزون بر این، مقدار آرسنیک موجود در رسوبات از حدود پیشنهادی سازمان بهداشت جهانی بیشتر گزارش شد. سلگی و شیخ‌زاده (۲۰۱۶) نیز با ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب رودخانه ارس در محدوده پارس‌آباد، کیفیت آب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقادیر نیترات، نیتريت و هدایت الکتریکی در برخی مناطق بالاتر از حدود توصیه‌شده سازمان بهداشت جهانی است، در حالی که سایر یون‌های اصلی و فلزات سنگین از جمله سدیم، پتاسیم، کلسیم، سرب و کادمیوم در محدوده استاندارد قرار دارند. این پژوهش ورود رواناب‌های کشاورزی و تخلیه فاضلاب‌های شهری را مهم‌ترین عوامل کاهش کیفیت آب معرفی کرد. در مطالعه‌ای دیگر، کوکینا و لوبوس (۲۰۲۱) بر روی رودخانه گای در چین نشان دادند که عناصر آهن، منگنز، کروم، کبالت، نیکل و مس عمدتاً منشأ زمین‌زاد داشته و شاخص غنی‌شدگی آنها کمتر از ۱.۵ است، در حالی که عنصر سرب بیانگر سطحی از آلودگی متوسط بود. صدیقی و پاندی (۲۰۱۹) نیز گزارش کردند که غلظت عناصر کروم، کادمیوم و سرب در بخش‌های میانی و پایین‌دست رودخانه از حدود مجاز فراتر رفته و می‌تواند مخاطرات زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد کند. در منطقه آسیای مرکزی، ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی کیفیت آب رودخانه سیردریا در قزاقستان برای مصارف کشاورزی، نتیجه گرفتند که هوازدهی سنگ‌های حوزه آبخیز و فرآیند تبخیر مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آب هستند و بر اساس شاخص‌های ارزیابی آبیاری، کیفیت آب این رودخانه برای فعالیت‌های کشاورزی مناسب است. همچنین چنگیز و همکاران (۲۰۱۷) غلظت فلزات سنگین را در رودخانه باغسی ترکیه اندازه‌گیری کردند و نشان دادند که کیفیت آب در بخش پایین‌دست به دلیل عبور رودخانه از نواحی شهری در مقایسه با مناطق بالادست کاهش یافته است. به طور کلی، نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهد که کیفیت آب و رسوبات رودخانه‌ها حاصل برهم‌کنش عوامل طبیعی نظیر زمین‌شناسی منطقه و فرآیندهای هوازدهی سنگ‌ها با عوامل انسانی شامل فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی، معدنی و توسعه شهری است. با وجود این، بسیاری از زیرحوضه‌های کوهستانی شمال غرب ایران، به‌ویژه مناطق وابسته به ارسباران، هنوز از منظر ارزیابی جامع کیفیت آب، تعیین منشأ عناصر و کاربرد شاخص‌های نوین آلودگی به‌طور کامل بررسی نشده‌اند. این خلأ پژوهشی ضرورت انجام مطالعات یکپارچه در این مناطق را آشکار می‌سازد. در ایران، منابع آب سطحی با تهدیدهای مختلفی مواجه هستند. بخش قابل توجهی از این منابع در محدوده‌های دارای پتانسیل معدنی گسترده و گاه ناشناخته واقع شده‌اند و از این رو در معرض ورود آلاینده‌های طبیعی ناشی از شرایط زمین‌شناسی قرار دارند. بنابراین، شناسایی منشأ آلاینده‌ها و تفکیک سهم عوامل طبیعی و انسانی می‌تواند نقش مهمی در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و حفاظت از منابع آب ایفا کند؛ به‌ویژه آنکه برخی از این رودخانه‌ها به عنوان منابع تأمین آب سدهای مخزنی برای مصارف شرب و کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. رودخانه ساری‌دره در شرق استان آذربایجان شرقی یکی از این منابع آب سطحی است که به دلیل قرارگیری در محدوده‌ای با کانی‌سازی و پتانسیل معدنی بالا، احتمال تأثیرپذیری از آلاینده‌های زمین‌زاد در آن وجود دارد. با این حال، تاکنون مطالعه جامعی در خصوص کیفیت آب و منشأ عناصر موجود در این رودخانه انجام نشده است. از این رو، هدف پژوهش حاضر بررسی وضعیت کیفیت آب رودخانه ساری‌دره و تحلیل توزیع مکانی و منشأ عناصر مختلف در این سامانه رودخانه‌ای است.

۲- روش انجام تحقیق

• محدوده مورد مطالعه

رودخانه ساری دره در بخش مرکزی شهرستان کلیر در استان آذربایجان شرقی قرار گرفته و در محدوده‌ای با پتانسیل قابل توجه منابع معدنی و طبیعی جریان دارد. این رودخانه در فاصله تقریبی ۱۶ کیلومتری شهر کلیر، حدود ۲۰ کیلومتری شمال غرب شهر اهر و نزدیک به ۱۷۰ کیلومتری شمال شرق تبریز واقع شده است. دسترسی به منطقه مورد مطالعه از طریق محور تبریز - اهر و سپس جاده‌های فرعی منتهی به روستاهای پیغام، علویق و هورمغان امکان پذیر است. موقعیت جغرافیایی محدوده پژوهش در شکل ۱ نمایش داده شده است. رودخانه ساری دره علاوه بر عبور از نواحی دارای فعالیت‌های معدنی، نقش مهمی در تأمین آب مورد نیاز بخش‌های شرب و کشاورزی منطقه ایفا می‌کند. همچنین، این رودخانه در نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ اهر به خوبی قابل مشاهده است (باباخانی، ۱۹۸۶). این پژوهش در بازه زمانی مرداد تا اسفندماه ۱۴۰۴ انجام گرفت. برای پایش کیفیت آب، نمونه‌برداری از ۱۴ ایستگاه منتخب مطابق شکل ۱ در دو دوره هیدرولوژیکی شامل فصل‌های خشک و مرطوب صورت پذیرفت. محل استقرار ایستگاه‌ها به گونه‌ای تعیین شد که نمایانگر بخش‌های بالادست، میانی و پایین دست رودخانه بوده و همچنین نواحی دارای احتمال تأثیرپذیری از فعالیت‌های انسانی را پوشش دهند. در هر مرحله نمونه‌برداری، نمونه‌های آب بر اساس دستورالعمل‌ها و روش‌های استاندارد نمونه‌برداری از آب‌های سطحی جمع‌آوری شدند. بدین منظور، نمونه‌ها در ظروف پلی اتیلنی از پیش اسیدشویی شده نگهداری شده و در صورت نیاز، عملیات فیلتراسیون بر روی آن‌ها انجام شد. سپس به منظور تثبیت عناصر محلول، مقدار مناسبی اسید نیتریک خالص به نمونه‌ها افزوده شد و تا زمان انتقال به آزمایشگاه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردید. در مرحله آزمایشگاهی، پس از آماده‌سازی و هضم اسیدی نمونه‌ها مطابق روش‌های استاندارد، غلظت عناصر مختلف با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی اندازه‌گیری شد. این تکنیک به دلیل حساسیت و دقت بالا، یکی از روش‌های مناسب برای تعیین غلظت عناصر در مقادیر بسیار کم محسوب می‌شود. علاوه بر این، پارامترهای فیزیکوشیمیایی شامل pH، هدایت الکتریکی، دما و کل مواد جامد محلول به صورت برخط و در محل نمونه‌برداری با استفاده از تجهیزات قابل حمل و کالیبره‌شده اندازه‌گیری شدند تا از بروز تغییرات احتمالی ناشی از انتقال و نگهداری نمونه‌ها جلوگیری شود. اجرای این روش امکان بررسی و مقایسه دقیق الگوهای مکانی و فصلی تغییرات کیفیت آب رودخانه را فراهم ساخت.



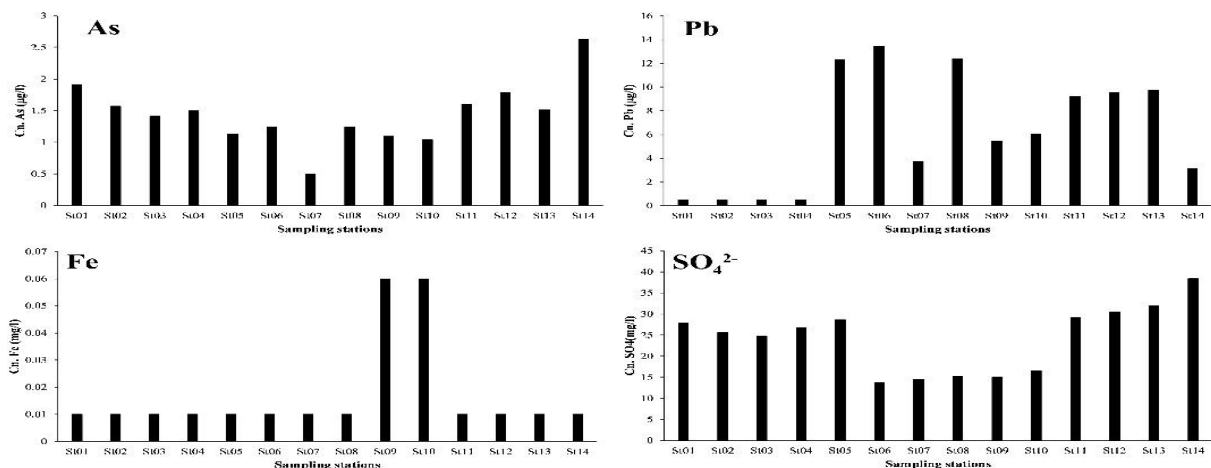
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

رودخانه ساری دره در محدوده ساختاری البرز - آذربایجان و در بخش فلزایی اهر - جلفا قرار گرفته است که خود بخشی از کمربند ماگمایی - فلزی ارسباران محسوب می‌شود. از منظر زمین‌ساختی، این ناحیه تحت تأثیر همگرایی صفحات عربی و اوراسیا شکل گرفته و پیامد این فرایند، وقوع فعالیت‌های گسترده ماگمایی، دگرگونی‌های مجاورتی و توسعه سامانه‌های کانی‌سازی رگه‌ای و اسکارنی بوده است (Abdollahi, 2009; Aghazadeh, 2009). از دیدگاه چینه‌شناسی، قدیمی‌ترین واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در منطقه به دوره کرتاسه پسین تعلق دارند و شامل مجموعه‌ای از نهشته‌های آتشفشانی - رسوبی متشکل از توفها، گدازه‌های آندزیتی تا بازالتی، سنگ‌آهک، مارن، شیل و رخساره‌های فلیشی هستند. این واحدها بیانگر استقرار یک حوضه رسوبی فعال‌اند که در آن فرآیندهای آتشفشانی زیردریایی و رسوب‌گذاری در محیط‌های دریایی کم‌عمق به طور همزمان رخ داده است (Abdollahi, 2009; Aghazadeh, 2009; Babakhani, 1986). همچنین، ارتباط بین‌انگشتی رخساره‌های آتشفشانی و کربناته، نشان‌دهنده نوسانات سریع شرایط زمین‌ساختی و محیط‌های رسوبی در طول کرتاسه می‌باشد. در ادامه و طی دوره الیگوسن، منطقه شاهد فاز مهمی از فعالیت‌های ماگمایی بوده که به نفوذ توده‌های آذرین با ترکیب گرانودیوریتی، گرانیتی، دیوریتی و سینیتی در واحدهای قدیمی‌تر کرتاسه منجر شده است. این توده‌های نفوذی باعث ایجاد دگرگونی مجاورتی، توسعه زون‌های اسکارنی در سنگ‌های آهکی و شکل‌گیری انواع دگرسانی‌های آرژیلیک، سیلیسی و کلریتی شدند (Babakhani, 1986). این فرآیندها علاوه بر اهمیت اقتصادی ناشی از تمرکز کانی‌سازی، تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی منطقه برجای گذاشته‌اند. جوان‌ترین واحدهای زمین‌شناسی منطقه مربوط به رسوبات و نهشته‌های کواترنری هستند که شامل گدازه‌های بازالتی، تراس‌های قدیمی و جدید رودخانه‌ای، رسوبات آبرفتی و دشت‌های سیلابی می‌شوند. این واحدها عمدتاً در امتداد دره اصلی رودخانه گسترش یافته‌اند و به دلیل برخورداری از تخلخل و نفوذپذیری بالا، در تغذیه و جابجایی آب‌های زیرزمینی نقش اساسی دارند. روند تحول سنگ‌شناسی منطقه از سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب حدواسط تا بازی به سوی ترکیبات اسیدی‌تر، بیانگر تغییر تدریجی در ماهیت ماگماتیسم و تکامل رژیم تکتونیکی منطقه در طول زمان است. به طور کلی، تنوع گسترده واحدهای سنگی، حضور توده‌های نفوذی و گسترش سنگ‌های آتشفشانی - رسوبی دگرسان‌شده، چارچوب زمین‌شناسی پیچیده‌ای را برای حوضه رودخانه ساریدره ایجاد کرده‌اند که تأثیر مستقیمی بر ترکیب ژئوشیمیایی رسوبات و همچنین آب‌های سطحی و زیرزمینی دارد. این ساختار زمین‌شناسی چندمرحله‌ای، بستر مناسبی برای بررسی فرآیندهای هوازدگی، انحلال کانی‌ها، انتقال عناصر و تعیین منشأ ژئوشیمیایی آلاینده‌ها در مطالعات محیط‌زیستی و زمین‌شناسی منطقه فراهم می‌کند. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است.

۳- نتایج و بحث

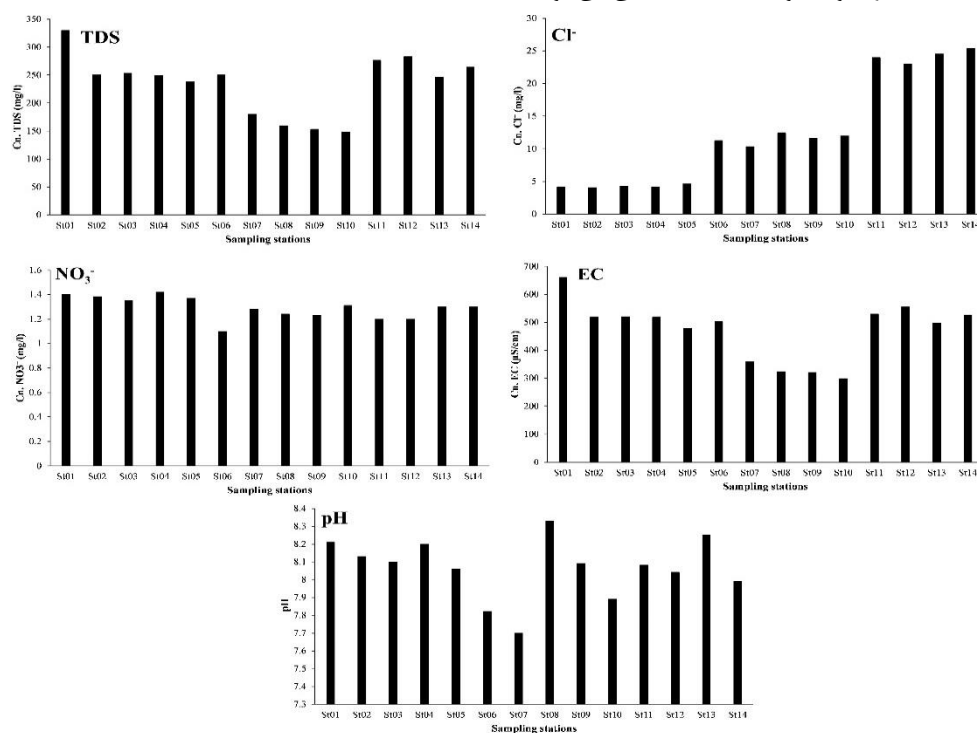
بررسی نتایج نشان می‌دهد که غلظت آرسنیک در آب رودخانه ساری دره در محدوده ۰/۰۵ تا ۲/۶۳ میکروگرم بر لیتر قرار دارد. کمترین مقدار در ایستگاه شماره ۷ با ۰/۰۵ میکروگرم بر لیتر و بیشترین مقدار در ایستگاه ۱۴ با ۲/۶۳ میکروگرم بر لیتر مشاهده شده است. میانگین غلظت آرسنیک در کل ایستگاه‌ها حدود ۱/۴۰ میکروگرم بر لیتر برآورد می‌شود که به‌طور قابل‌توجهی کمتر از حد مجاز تعیین‌شده توسط سازمان جهانی بهداشت و همچنین استاندارد ملی ایران برای آب آشامیدنی، یعنی ۱۰ میکروگرم بر لیتر، است. این موضوع نشان می‌دهد که از نظر آلودگی آرسنیک، آب رودخانه در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه در محدوده ایمن برای مصارف شرب قرار دارد. همچنین تغییرات مکانی آرسنیک نشان می‌دهد که غلظت این عنصر در بیشتر ایستگاه‌ها نسبتاً یکنواخت بوده و عمدتاً بین ۱ تا ۲ میکروگرم بر لیتر نوسان دارد (شکل ۲). با این حال، افزایش نسبی غلظت آرسنیک در ایستگاه‌های ۱۱ تا ۱۴، (به‌ویژه در ایستگاه ۱۴)، می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر عوامل زمین‌شناختی محلی، هوازدگی سنگ‌های حاوی کانی‌های سولفیدی یا ورود زه‌آب‌های ناشی از فعالیت‌های معدنی در بخش‌های پایین‌دست حوضه باشد. در مقابل، کاهش چشمگیر غلظت آرسنیک در ایستگاه ۷ احتمالاً ناشی از رقیق‌شدن آب رودخانه توسط ورود جریان‌های فرعی یا تغییر شرایط ژئوشیمیایی مؤثر بر تحرک این عنصر است. از دیدگاه ژئوشیمیایی، حضور آرسنیک در آب‌های سطحی مناطق معدنی اغلب با اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی نظیر آرسنوپیریت، انحلال کانی‌های حاوی آرسنیک و فرآیندهای هوازدگی سنگ‌ها مرتبط است. با این وجود، مقادیر بسیار پایین آرسنیک در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که در زمان نمونه‌برداری، فرآیندهای آزادسازی آرسنیک به آب رودخانه محدود بوده و یا مکانیسم‌های طبیعی نظیر جذب سطحی بر روی اکسیدهای آهن و آلومینیوم، ته‌نشینی و رقیق‌سازی هیدرولوژیکی مانع از تجمع این عنصر در ستون آب شده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اگرچه منشأ طبیعی و زمین‌شناختی می‌تواند در حضور آرسنیک در آب رودخانه نقش داشته باشد، اما غلظت‌های اندازه‌گیری‌شده بسیار کمتر از حدود مجاز بین‌المللی بوده و در شرایط فعلی خطر قابل‌توجهی برای مصارف شرب ایجاد نمی‌کند. با این حال، با توجه به وجود پتانسیل معدنی در منطقه، پایش دوره‌ای آرسنیک به‌ویژه در ایستگاه‌های پایین‌دست و مجاور محدوده‌های کانی‌سازی شده توصیه می‌شود تا هرگونه تغییر احتمالی ناشی از فعالیت‌های معدنی یا فرآیندهای هوازدگی در آینده به‌موقع شناسایی گردد. در این مطالعه، غلظت سرب در ایستگاه‌های مختلف رودخانه ساری دره در محدوده ۰/۰۵ تا ۱۳/۴۳ میکروگرم بر لیتر قرار داشت. پایین‌ترین میزان معادل ۰/۰۵ میکروگرم بر لیتر در ایستگاه‌های ۱ تا ۴ ثبت شد و بالاترین مقدار با ۱۳/۴۳ میکروگرم بر لیتر متعلق به ایستگاه ۶ بود. میانگین غلظت سرب در همه ایستگاه‌ها تقریباً ۶/۸ میکروگرم بر لیتر محاسبه شد. مقایسه یافته‌ها با معیار

سازمان بهداشت جهانی نشان می‌دهد که حداکثر مجاز سرب در آب آشامیدنی ۱۰ میکروگرم بر لیتر است. بر این اساس، در ایستگاه‌های ۵، ۶ و ۸ غلظت سرب از این حد فراتر رفته و در ایستگاه‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نیز به مقدار راهنما نزدیک شده است. بررسی الگوی مکانی سرب حاکی از آن است که در ایستگاه‌های بالادست یعنی ۱ تا ۴، غلظت بسیار ناچیز بوده و سپس در بخش میانی رودخانه به طور چشمگیری افزایش می‌یابد (شکل ۲). این جهش ناگهانی می‌تواند نشانه ورود منابع نقطه‌ای آلاینده سرب به رودخانه باشد. با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه و وجود کانی‌زایی‌های فلزی و فعالیت‌های معدنی در حوضه آبریز، بخشی از سرب اندازه‌گیری شده احتمالاً منشأ طبیعی دارد و در نتیجه هوازدگی سنگ‌های معدنی و انتقال رواناب به محیط آبی راه یافته است. افزون بر این، ورود زه‌آب‌های معادن، فرسایش مواد باطله معدنی و انتقال ذرات معلق غنی از فلزات سنگین می‌تواند در افزایش غلظت سرب در برخی ایستگاه‌ها مؤثر باشد. در سوی دیگر، کاهش نسبی غلظت سرب در تعدادی از ایستگاه‌های پایین‌دست نشان می‌دهد که عواملی مانند رقیق‌شدگی، ته‌نشینی ذرات حامل سرب و جذب سطحی توسط رسوبات بستر رودخانه در کنترل میزان این عنصر نقش داشته‌اند. هرچند که میانگین غلظت سرب در بیشتر ایستگاه‌ها پایین‌تر از حد مجاز سازمان بهداشت جهانی است، مشاهده مقادیر فراتر از استاندارد در چند نقطه، لزوم پایش مداوم این عنصر و بررسی دقیق‌تر منابع احتمالی آلودگی در کل حوضه آبریز را آشکار می‌سازد (WHO, 2017). غلظت آهن در آب رودخانه ساری در دامنه ۰/۱ تا ۰/۰۶ میلی‌گرم بر لیتر قرار دارد (شکل ۲). بیشترین مقدار آهن مربوط به ایستگاه‌های ۹ و ۱۰ با مقدار ۰/۰۶ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین مقدار آن در اغلب ایستگاه‌ها معادل ۰/۰۱ میلی‌گرم بر لیتر ثبت شده است. میانگین غلظت آهن در همه ایستگاه‌ها حدود ۰/۰۱۷ میلی‌گرم بر لیتر برآورد می‌شود که به‌طور قابل ملاحظه‌ای از حد مجاز توصیه‌شده برای آب آشامیدنی توسط سازمان بهداشت جهانی که ۰/۳ میلی‌گرم بر لیتر است، کمتر می‌باشد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که میزان آهن حل‌شده در آب رودخانه پایین بوده و از نظر شرب، محدودیتی ایجاد نمی‌کند. افزایش نسبی آهن در این دو ایستگاه می‌تواند ناشی از هوازدگی سنگ‌های غنی از کانی‌های آهن‌دار، ورود رواناب‌های سطحی، یا تأثیر فعالیت‌های معدنی در بخش‌های میانی حوضه باشد. با این حال، از آنجا که مقادیر اندازه‌گیری شده فاصله زیادی با استانداردهای موجود دارند، می‌توان نتیجه گرفت که فرآیندهای طبیعی زمین‌شناختی مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده غلظت آهن در آب رودخانه هستند. همچنین همزمانی افزایش آهن با مقادیر بالاتر هدایت الکتریکی و مواد جامد محلول در این ایستگاه‌ها می‌تواند بیانگر افزایش انحلال مواد معدنی و انتقال یون‌ها به محیط آبی باشد. غلظت سولفات در ایستگاه‌های گوناگون رودخانه ساری دره بین ۱۳/۸ تا ۳۸/۴ میلی‌گرم بر لیتر در نوسان است. کمترین میزان در ایستگاه ۶ برابر ۱۳/۸ میلی‌گرم بر لیتر و بیشترین مقدار در ایستگاه ۱۴ معادل ۳۸/۴ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شده است. میانگین غلظت سولفات در همه ایستگاه‌ها حدود ۲۴/۶ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد که به مراتب از حد مجاز سازمان بهداشت جهانی برای آب آشامیدنی یعنی ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر کمتر است. بنابراین از نظر سولفات، آب این رودخانه برای مصرف شرب کاملاً مناسب محسوب می‌شود. تغییرات مکانی سولفات نشان می‌دهد که در بخش‌های پایین‌دست رودخانه، به ویژه در ایستگاه‌های ۱۱ تا ۱۴، غلظت این یون روند افزایشی دارد (شکل ۲). این الگو به احتمال زیاد ناشی از انحلال کانی‌های سولفیدی و سولفات‌ها موجود در سازندهای زمین‌شناسی منطقه، به‌ویژه کانسارهای فلزی و سنگ‌های دگرساز شده، است. از سوی دیگر، همبستگی احتمالی سولفات با عناصر فلزی مانند آهن، آرسنیک و سرب می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر فرآیندهای هوازدگی کانی‌های سولفیدی باشد. با این وجود، مقادیر نسبتاً پایین سولفات در تمامی ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که پدیده زهکشی اسیدی معدن در منطقه مورد مطالعه یا رخ نداده است یا شدت آن بسیار ناچیز است. در نتیجه، سولفات موجود در آب رودخانه عمدتاً منشأ طبیعی داشته و اثر منفی قابل توجهی بر کیفیت آب شرب و کشاورزی منطقه ندارد. غلظت‌های پایین آهن و سولفات در تمامی ایستگاه‌های نمونه‌برداری نشان می‌دهد که کیفیت آب رودخانه ساری دره از نظر این دو پارامتر مطلوب است. اگرچه افزایش نسبی آهن در ایستگاه‌های ۹ و ۱۰ و افزایش سولفات در بخش پایین‌دست مشاهده شده، اما مقادیر اندازه‌گیری شده همچنان بسیار کمتر از حدود استانداردهای بین‌المللی بوده و حاکی از غلبه فرآیندهای طبیعی هوازدگی سنگ‌ها بر شیمی آب رودخانه است.



شکل ۲. نمودار توزیع سولفات آهن و سرب و آرسنیک در محدوده مطالعاتی

مقادیر pH در ایستگاه‌های مختلف بین ۷/۷۷ تا ۸/۳۳ متغیر بوده و میانگین آن حدود ۸/۰۶ است. این محدوده نشان‌دهنده شرایط کمی قلیایی آب رودخانه می‌باشد (شکل ۳). ویژگی‌ای که در بسیاری از رودخانه‌های واقع در مناطق دارای سازندهای کربناته دیده می‌شود. تمامی مقادیر در محدوده استاندارد سازمان بهداشت جهانی یعنی ۶/۵ تا ۸/۵ قرار می‌گیرند؛ این موضوع بیانگر مناسب بودن شرایط اسیدیته آب برای مصارف شرب و کشاورزی است (WHO, 2017). مقادیر نسبتاً بالای pH را می‌توان ناشی از انحلال سنگ‌های آهکی و دولومیتی منطقه و حضور یون‌های بی‌کربنات در آب رودخانه دانست که خاصیت بافری آب را افزایش می‌دهند. غلظت کل مواد جامد محلول (TDS) در ایستگاه‌های مورد مطالعه بین ۱۴۸ تا ۳۳۰ میلی‌گرم بر لیتر متغیر بوده است. بیشترین مقدار در ایستگاه ۱ و کمترین مقدار در ایستگاه ۱۰ مشاهده شد. میانگین TDS حدود ۲۳۵ میلی‌گرم بر لیتر است که به‌طور قابل توجهی کمتر از حد مجاز سازمان بهداشت جهانی یعنی ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که آب رودخانه از نظر میزان املاح محلول در رده آب‌های شیرین جای می‌گیرد و محدودیتی برای استفاده شرب و آبیاری ایجاد نمی‌کند. کاهش نسبی TDS در برخی ایستگاه‌های پایین‌دست احتمالاً ناشی از رقیق‌شدگی آب توسط شاخه‌های فرعی یا تغییر در شرایط زمین‌شناسی حوضه است. هدایت الکتریکی آب (EC) در محدوده ۲۹۷ تا ۶۶۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر قرار دارد و میانگین آن حدود ۴۹۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است. روند تغییرات EC تا حد زیادی مشابه TDS می‌باشد که نشان‌دهنده وابستگی مستقیم این دو پارامتر به میزان یون‌های محلول در آب است. تمامی مقادیر EC کمتر از محدوده بحرانی برای مصارف کشاورزی بوده و خطر کم شوری را برای گیاهان زراعی نشان می‌دهد. بیشترین مقدار EC در ایستگاه ۱ مشاهده شد که به احتمال زیاد ناشی از انحلال بیشتر مواد معدنی در بخش بالادست حوضه است (شکل ۳). غلظت یون کلرید (Cl^-) در نمونه‌های آب بین ۴/۱ تا ۲۵/۴ میلی‌گرم بر لیتر متغیر بوده است. میانگین کلرید حدود ۱۳/۴ میلی‌گرم بر لیتر برآورد می‌شود که بسیار کمتر از حد مجاز سازمان بهداشت جهانی یعنی ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر است. پایین بودن غلظت کلرید نشان می‌دهد که منابع آلاینده شهری، فاضلاب‌ها یا زه‌آب‌های شور کشاورزی تأثیر چشمگیری بر کیفیت آب رودخانه ندارند. افزایش نسبی کلرید در ایستگاه‌های ۱۱ تا ۱۴ را می‌توان به ویژگی‌های زمین‌شناسی محلی و انحلال کانی‌های حاوی کلر نسبت داد، ولی این افزایش از نظر زیست‌محیطی چشمگیر نیست. مقادیر نیترات (NO_3^-) در محدوده ۱/۱۰ تا ۱/۴۲ میلی‌گرم بر لیتر قرار داشته و میانگین آن حدود ۱/۳۰ میلی‌گرم بر لیتر است. این مقادیر بسیار کمتر از حد مجاز سازمان بهداشت جهانی برای آب شرب یعنی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر هستند و نشان می‌دهند که رودخانه تأثیر قابل توجهی از فعالیت‌های کشاورزی، ورود کودهای شیمیایی یا فاضلاب‌های انسانی نمی‌پذیرد. یکنواختی نسبی غلظت نیترات در تمامی ایستگاه‌ها نیز مؤید آن است که منشأ این یون عمدتاً طبیعی بوده و از فرآیندهای هوازدگی خاک و چرخه طبیعی نیتروژن ناشی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که آب رودخانه ساری‌دره از نظر پارامترهای pH، TDS، EC، کلرید و نیترات دارای کیفیت مطلوب بوده و تمامی مقادیر اندازه‌گیری‌شده در محدوده استانداردهای بین‌المللی آب شرب و آبیاری قرار دارند (WHO, 2017). مقادیر پایین TDS، EC، کلرید و نیترات بیانگر تأثیر محدود فعالیت‌های انسانی و غلبه فرآیندهای طبیعی زمین‌شناختی بر ترکیب شیمیایی آب رودخانه است. این شرایط نشان می‌دهد که آب رودخانه ساری‌دره از منظر این پارامترها برای مصارف شرب و کشاورزی مناسب ارزیابی می‌شود.



شکل ۳. نمودار توزیع پارامترهای فیزیکو-شیمیایی در محدوده مورد مطالعه

نتایج همبستگی پیرسون در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس این نتایج آرسنیک دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار با سولفات با ضریب همبستگی ۰/۷۷۵ در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۱، هدایت الکتریکی با ضریب ۰/۶۴۱ در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۵ و کل مواد جامد محلول با ضریب ۰/۶۴۰ در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۵ است. این ارتباط قوی بیانگر آن است که افزایش غلظت آرسنیک همزمان با افزایش یون‌های محلول و میزان شوری آب رخ می‌دهد. چنین الگویی معمولاً نشان‌دهنده منشأ زمین‌شناختی مشترک آرسنیک و سولفات بوده و می‌تواند ناشی از هوازدهی و انحلال کانی‌های سولفیدی حاوی آرسنیک در سازندهای معدنی منطقه باشد. از آنجا که رودخانه در محدوده‌ای با پتانسیل معدنی قرار دارد، آزادسازی همزمان آرسنیک و سولفات از کانی‌هایی نظیر آرسنوپیریت و پیریت محتمل به نظر می‌رسد. عنصر سرب در اغلب موارد همبستگی ضعیف و غیرمعنی‌داری با سایر پارامترها نشان داده است. با این حال، یک همبستگی منفی و معنی‌دار میان سرب و نیترات با ضریب ۰/۶۹۴- در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۱ مشاهده شد. این رابطه معکوس نشان می‌دهد که منشأ سرب احتمالاً با فرآیندهای مؤثر بر تغییرات نیترات متفاوت است و افزایش نیترات با کاهش غلظت سرب همراه بوده است. نبود همبستگی معنی‌دار سرب با هدایت الکتریکی، کل مواد جامد محلول و سولفات نیز حاکی از آن است که رفتار ژئوشیمیایی سرب مستقل از فرآیندهای کنترل‌کننده شوری و ترکیب یونی آب بوده و احتمالاً تحت تأثیر جذب سطحی، رسوب‌گذاری یا منابع موضعی قرار دارد. عنصر آهن همبستگی منفی و معنی‌داری با هدایت الکتریکی با ضریب ۰/۶۵۵- در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۵ و کل مواد جامد محلول با ضریب ۰/۶۵۶- در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۵ نشان داد. این نتیجه می‌تواند بیانگر آن باشد که در شرایط افزایش غلظت یون‌های محلول، بخشی از آهن از فاز محلول خارج شده و به صورت اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن رسوب می‌کند. همچنین همبستگی منفی نسبتاً قوی آهن با سولفات با ضریب ۰/۴۵۷- از احتمال کنترل غلظت آهن توسط فرآیندهای اکسایش و رسوب‌گذاری در محیط رودخانه حکایت دارد. بین هدایت الکتریکی و کل مواد جامد محلول یک همبستگی بسیار قوی و مثبت با ضریب ۰/۹۹۵ در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۱ مشاهده شد که کاملاً مورد انتظار است، زیرا هدایت الکتریکی مستقیماً تحت تأثیر غلظت یون‌های محلول قرار دارد. همچنین سولفات با هدایت الکتریکی با ضریب ۰/۷۰۲ در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۱ و با کل مواد جامد محلول با ضریب ۰/۷۰۹ در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۱ همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد که نقش مهم این یون در افزایش بار یونی و املاح محلول آب را تأیید می‌کند. این نتایج بیانگر آن است که بخش عمده تغییرات شیمیایی آب رودخانه توسط فرآیندهای انحلال مواد معدنی سولفات و هوازدهی سنگ‌های بستر کنترل می‌شود. نیترات نیز با کلرید همبستگی منفی و معنی‌داری با ضریب ۰/۵۴۳- در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۵ نشان داد. این رابطه می‌تواند بیانگر تفاوت منابع این دو یون باشد؛ به گونه‌ای که نیترات بیشتر تحت تأثیر فرآیندهای زیستی و چرخه نیتروژن قرار دارد، در حالی که کلرید عمدتاً منشأ زمین‌شناختی یا هیدروشیمیایی دارد. افزون بر این، عدم وجود همبستگی معنی‌دار بین نیترات و هدایت الکتریکی یا کل مواد جامد محلول نشان می‌دهد که فعالیت‌های کشاورزی و ورود کودهای شیمیایی نقش غالبی در کنترل کیفیت آب رودخانه ندارند. نتایج تحلیل همبستگی نشان می‌دهد که فرآیندهای زمین‌شناختی و هوازدهی کانی‌های معدنی مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آب رودخانه ساری‌دره هستند. همبستگی قوی آرسنیک با سولفات، هدایت الکتریکی و کل مواد جامد محلول، همراه با ارتباط نزدیک سولفات با شاخص‌های شوری، مؤید نقش سازندهای معدنی و کانی‌های سولفیدی در آزادسازی عناصر به محیط آبی است. در مقابل، رفتار متفاوت سرب و آهن نشان می‌دهد که این عناصر تحت تأثیر فرآیندهای ژئوشیمیایی پیچیده‌تری نظیر جذب سطحی، رسوب‌گذاری و تغییرات شرایط اکسایش - کاهش قرار دارند. این یافته‌ها با ویژگی‌های زمین‌شناسی و وجود رخدادهای معدنی در حوضه آبریز رودخانه ساری‌دره سازگاری مناسبی دارند.

جدول ۱. ماتریس همبستگی بین پارامترهای اصلی مورد بررسی در منطقه

پارامترها	As	Pb	Fe	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	EC	TDS	PH	Cl ⁻
As	۱								
Pb	-۰/۱۷۴	۱							
Fe	-۰/۲۵۳	-۰/۰۲۸	۱						
NO ₃ ⁻	۰/۱۳۰	-۰/۶۹۴**	-۰/۱۰۰	۱					
SO ₄ ²⁻	۰/۷۷۵**	-۰/۱۹۹	-۰/۴۵۷	۰/۳۶۸	۱				
EC	۰/۶۴۱*	-۰/۲۷۵	-۰/۶۵۵*	۰/۲۴۹	۰/۷۰۲**	۱			
TDS	۰/۶۴۰*	-۰/۲۱۷	-۰/۶۵۶*	۰/۱۸۶	۰/۷۰۹**	۰/۹۹۵**	۱		
pH	۰/۴۵۱	-۰/۰۶۶	-۰/۱۸۲	۰/۳۷۳	۰/۳۴۹	۰/۲۴۸	۰/۲۱۴	۱	
Cl ⁻	۰/۳۷۱	۰/۴۱۶	-۰/۰۳۷	-۰/۵۴۳*	۰/۴۰۵	۰/۰۱۵	۰/۰۸۴	-۰/۰۴۴	۱

(**) همبستگی در سطح ۰/۰۱ (*) همبستگی در سطح ۰/۰۵

بر اساس نتایج به دست آمده، هدایت الکتریکی و کل مواد جامد محلول دارای همبستگی بسیار قوی و مثبت با ضریب $0/995$ و سطح معناداری کمتر از $0/01$ هستند که حکایت از آن دارد که تغییرات هدایت الکتریکی آب بیشتر تحت تأثیر افزایش یا کاهش غلظت مواد محلول رخ می‌دهد (جدول ۲). این رابطه قوی با ماهیت فیزیکی هدایت الکتریکی سازگار است، زیرا هدایت الکتریکی به طور مستقیم به غلظت یون‌های حل‌شده در آب وابسته است. همچنین میان سولفات با هر دو پارامتر هدایت الکتریکی با ضریب $0/702$ و کل مواد جامد محلول با ضریب $0/709$ و سطح معناداری کمتر از $0/01$ ، همبستگی مثبت و معناداری دیده می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که یون سولفات یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده میزان املاح محلول و هدایت الکتریکی آب در منطقه مورد مطالعه به شمار می‌رود. منشأ این سولفات‌ها می‌تواند ناشی از انحلال کانی‌های سولفات یا هوازدگی سنگ‌های معدنی موجود در حوضه آبریز باشد. بین سدیم و سولفات نیز همبستگی مثبت و قوی با ضریب $0/747$ و سطح معناداری کمتر از $0/01$ مشاهده می‌شود که احتمال وجود منشأ زمین‌شناختی مشترک برای این دو یون را مطرح می‌سازد. این رابطه می‌تواند حاصل انحلال کانی‌های تبخیری یا فرآیندهای هوازدگی سنگ‌های حاوی سدیم و سولفات در منطقه باشد. افزون بر این، سدیم با کلرید همبستگی مثبت و معناداری با ضریب $0/690$ و سطح معناداری کمتر از $0/01$ نشان داد که بیانگر رفتار ژئوشیمیایی مشابه این دو یون و احتمال منشأ یکسان آن‌ها در آب رودخانه است. در مقابل، نیتрат تنها با کلرید همبستگی منفی و معناداری با ضریب $-0/543$ و سطح معناداری کمتر از $0/05$ نشان می‌دهد. این رابطه معکوس می‌تواند نشان‌دهنده تفاوت منشأ و فرآیندهای کنترل‌کننده این دو پارامتر باشد. در حالی که کلرید عمدتاً تحت تأثیر انحلال مواد معدنی و شرایط زمین‌شناسی قرار می‌گیرد، نیترات بیشتر از فرآیندهای بیوژئوشیمیایی، فعالیت‌های کشاورزی و چرخه نیتروژن تأثیر می‌پذیرد. عدم وجود همبستگی معنادار نیترات با هدایت الکتریکی، کل مواد جامد محلول و سایر یون‌ها نیز نشان می‌دهد که ورود نیترات به سیستم آبی محدود بوده و نقش چشمگیری در کنترل شیمی آب رودخانه ندارد. سختی کل با هیچ‌یک از پارامترهای بررسی‌شده همبستگی معناداری نشان نمی‌دهد، اگرچه بیشترین ضریب همبستگی آن با سدیم به میزان $0/485$ مشاهده گردید. این موضوع حاکی از آن است که تغییرات سختی آب احتمالاً تحت تأثیر عوامل مستقل‌تری مانند غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم قرار دارد که در این ماتریس همبستگی گنجانده نشده‌اند. به طور کلی، یافته‌های تحلیل همبستگی نشان می‌دهد که فرآیندهای هوازدگی سنگ‌ها و انحلال کانی‌های سولفات و نمکی، مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آب رودخانه ساری‌دره هستند. همبستگی‌های قوی میان سولفات، سدیم، هدایت الکتریکی و کل مواد جامد محلول مؤید نقش غالب منشأ زمین‌شناختی در تعیین کیفیت آب است، در حالی که سهم منابع انسانی به‌ویژه در مورد نیترات محدود به نظر می‌رسد. این نتایج با شرایط طبیعی و معدنی حوضه آبریز ساری‌دره سازگاری دارد و بیانگر غلبه فرآیندهای ژئوتکنیک بر شیمی آب رودخانه می‌باشد.

جدول ۲. ماتریس همبستگی بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی مورد بررسی در منطقه

پارامترها	NO_3^-	SO_4^{2-}	EC	TDS	Cl^-	Na	TH
NO_3^-	۱						
SO_4^{2-}	$0/368$	۱					
EC	$0/249$	$0/702^{**}$	۱				
TDS	$0/186$	$0/709^{**}$	$0/995^{**}$	۱			
Cl^-	$-0/543^*$	$0/405$	$0/015$	$0/084$	۱		
Na	$-0/155$	$0/747^{**}$	$0/373$	$0/401$	$0/690^{**}$	۱	
TH	$-0/23$	$0/268$	$0/283$	$0/280$	$0/134$	$0/485$	۱

(**) همبستگی در سطح $0/01$ (*) همبستگی در سطح $0/05$

بر اساس داده‌های ارائه‌شده، کیفیت آب رودخانه ساری‌دره برای کاربرد کشاورزی در شرایط مطلوبی ارزیابی می‌شود. میزان هدایت الکتریکی در ایستگاه‌های مختلف بین 297 تا 660 میکروزیمنس بر سانتی‌متر ثبت شده که نشانگر شوری کم تا متوسط آب است. برپایه رده‌بندی سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد، آبی با هدایت الکتریکی کمتر از 700 میکروزیمنس بر سانتی‌متر معمولاً محدودیت چشمگیری برای آبیاری بیشتر گیاهان زراعی ایجاد نمی‌کند. همچنین مقدار کل مواد جامد محلول در بازه 148 تا 330 میلی‌گرم بر لیتر قرار دارد که به مراتب کمتر از آستانه 450 تا 500 میلی‌گرم بر لیتر برای آب با کیفیت خوب کشاورزی بوده و نشان‌دهنده غلظت اندک املاح محلول است. غلظت یون‌های اصلی یعنی کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم نیز در دامنه طبیعی جای دارد. میزان سدیم بین $5/91$ تا $17/54$ میلی‌گرم بر لیتر بوده که در مقایسه با کلسیم و منیزیم مقداری اندک محسوب می‌شود؛ بنابراین پیش‌بینی می‌شود نسبت جذب سدیم در همه ایستگاه‌ها در محدوده بسیار مناسب قرار گیرد. این امر حاکی از آن است که خطر سدیمی شدن خاک و کاهش نفوذپذیری آن در اثر استفاده درازمدت از این آب ناچیز است. مقادیر بی‌کربنات بین 174 تا 247 میلی‌گرم بر لیتر و سختی کل حدود 106 تا 197 میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است. هرچند غلظت بی‌کربنات در برخی ایستگاه‌ها نسبتاً بالاست، ولی با وجود مقادیر مناسب کلسیم و منیزیم، احتمال بروز مشکلات شدید قلیائیت خاک

اندک است. همچنین میزان کلرید در بازه ۴/۱ تا ۲۵/۴ میلی گرم بر لیتر و سولفات بین ۱۳/۸ تا ۳۸/۴ میلی گرم بر لیتر قرار دارد که بسیار پایین تر از حدود بحرانی گزارش شده برای گیاهان حساس بوده و خطری از بابت سمیت یونی برای محصولات ایجاد نمی کند. از نظر عناصر کم مقدار، غلظت روی، آهن و باریم در تمام ایستگاه ها پایین بوده و در محدوده مجاز آبیاری جای دارد. غلظت آرسنیک بین ۰/۰۵ تا ۲/۶۳ میکروگرم بر لیتر اندازه گیری شده که به مراتب کمتر از حدود توصیه شده برای آب آبیاری است. مقدار سرب نیز اگرچه در برخی ایستگاه ها نسبت به دیگر نقاط بیشتر است، اما همچنان در محدوده ای قرار دارد که انتظار اثرات نامطلوب کوتاه مدت بر خاک و گیاهان نمی رود. کیفیت آب رودخانه ساری دره از دیدگاه شوری، خطر سدیمی شدن، سمیت کلرید و سولفات و همچنین غلظت فلزات سنگین برای مصارف کشاورزی مناسب به شمار می رود. مقادیر پایین هدایت الکتریکی و کل مواد جامد محلول همراه با غلظت کم سدیم نشان می دهد که این آب در رده آب های مطلوب برای آبیاری جای می گیرد و می تواند بدون محدودیت چشمگیر برای بیشتر محصولات زراعی و باغی منطقه به کار رود. این شاخص ها امکان رده بندی دقیق آب از نظر خطر شوری و سدیمی را فراهم می کنند و اعتبار علمی مقاله را به طور قابل ملاحظه ای افزایش خواهند داد. در ایستگاه های مختلف رودخانه ساری دره، میزان سختی کل آب در دامنه ۱۰۶/۰۴ تا ۱۹۶/۶۷ میلی گرم بر لیتر معادل کربنات کلسیم اندازه گیری شد. برپایه رده بندی مرسوم سختی آب، اغلب ایستگاه ها در گروه آب سخت قرار می گیرند، در حالی که تنها دو ایستگاه ۷ و ۹ در دسته آب نسبتاً سخت طبقه بندی می شوند (جدول ۳). بیشترین مقدار سختی کل مربوط به ایستگاه ۶ با ۱۹۶/۶۷ میلی گرم بر لیتر و کمترین آن مربوط به ایستگاه ۷ با ۱۰۶/۰۴ میلی گرم بر لیتر بوده است. غلبه آب های سخت در این منطقه را می توان ناشی از انحلال کانی های کلسیم دار و منیزیم دار موجود در سازندهای زمین شناسی حوضه دانست. هرچند سختی آب نسبتاً بالاست، اما مقادیر ثبت شده همچنان در حد مجاز برای آشامیدن قرار داشته و نشان دهنده تأثیر عمده فرایندهای طبیعی هوازدگی سنگ ها بر ترکیب شیمیایی آب رودخانه است.

جدول ۳. کیفیت آب در ایستگاه های نمونه برداری

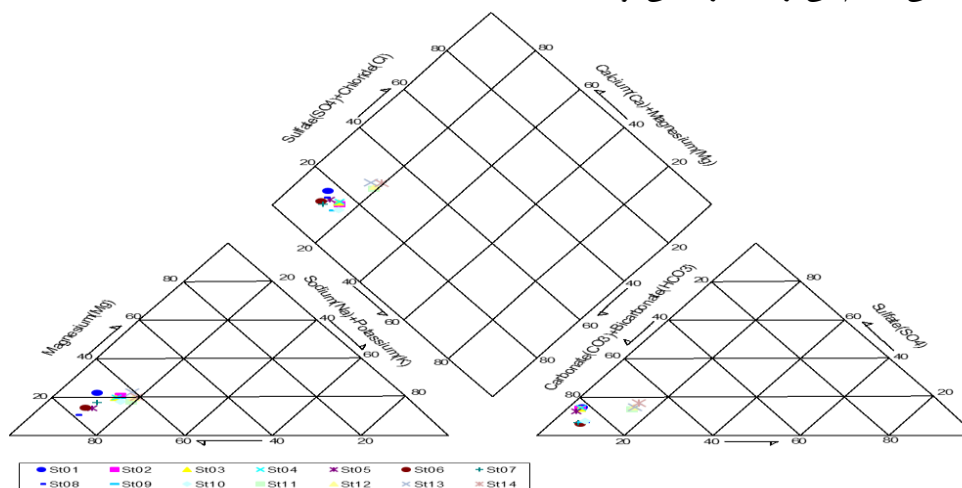
ایستگاه	سختی کل	کیفیت آب بر اساس سختی کل
St01	۱۵۰/۶۶	سخت
St02	۱۶۶/۸۳	سخت
St03	۱۶۰/۱۲	سخت
St04	۱۶۷/۷۸	سخت
St05	۱۸۵/۰۷	سخت
St06	۱۹۶/۶۷	سخت
St07	۱۰۶/۰۴	نسبتاً سخت
St08	۱۸۴/۲	سخت
St09	۱۴۷/۹۸	نسبتاً سخت
St10	۱۵۰/۴۴	سخت
St11	۱۶۲/۷	سخت
St12	۱۷۴/۵۴	سخت
St13	۱۶۹/۴۷	سخت
St14	۱۷۳/۹۱	سخت

بر اساس نتایج حاصل از شاخص های ارزیابی کیفیت آب برای مقاصد کشاورزی، تمامی ایستگاه های نمونه برداری در رده C2-S1 جای می گیرند (جدول ۴). این طبقه بندی نشانگر آبی با شوری در سطح متوسط و خطر سدیمی اندک است. مقدار نسبت جذب سدیم در همه ایستگاه ها بسیار ناچیز بوده و حاکی از آن است که کاربرد این آب اثری نامطلوب بر نفوذپذیری و ساختار خاک نخواهد گذاشت. افزون بر این، مقادیر درصد سدیم در تمام نمونه ها در سطح عالی قرار داشته و بیانگر سازگاری این آب برای آبیاری محصولات کشاورزی است. شاخص کربنات سدیم باقیمانده نیز در بیشتر ایستگاه ها در دامنه «مناسب» و تنها در ایستگاه ۷ در محدوده «قابل قبول» مشاهده می شود که نشان می دهد بی کربنات و کربنات موجود در آب آبیاری، محدودیت جدی ایجاد نمی کنند. به طور کلی، با توجه به شاخص های نسبت جذب سدیم، درصد سدیم و کربنات سدیم باقیمانده، آب رودخانه ساری دره از کیفیت مناسبی برای کاربرد کشاورزی برخوردار بوده و برای آبیاری زمین های منطقه مناسب ارزیابی می گردد.

جدول ۴. ارزیابی کیفیت آب منطقه براساس مصرف کشاورزی و شاخص %Na

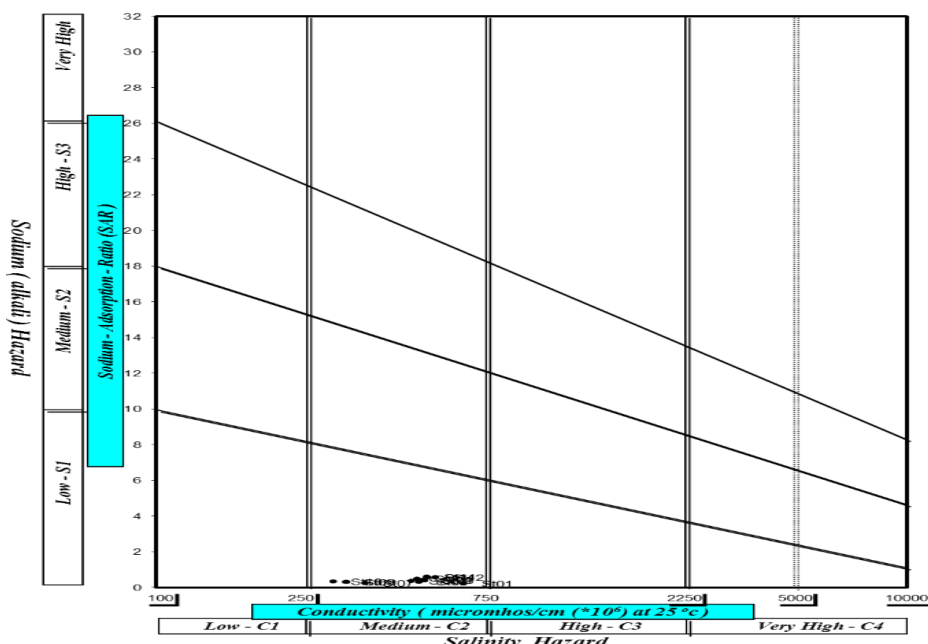
ایستگاه	SAR	کلاس آب	کیفیت آب برای کشاورزی	%Na	کیفیت بر اساس %Na	RSC	کیفیت بر اساس RSC
St01	۰/۲۲	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	۹/۱۶	عالی	۰/۲	مناسب
St02	۰/۴۲	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	۱۵/۱۹	عالی	-۰/۱۵	مناسب
St03	۰/۳۹	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	۱۴/۵۵	عالی	-۰/۱	مناسب
St04	۰/۴۱	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	۱۴/۵۸	عالی	-۰/۱۹	مناسب
St05	۰/۳۶	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	۱۱/۸۶	عالی	۰/۳۲	مناسب
St06	۰/۳۱	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	۱۰/۲	عالی	۰/۱	مناسب
St07	۰/۲۵	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	۱۱/۵۷	عالی	۱/۹	قابل قبول
St08	۰/۳	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	۱۰/۱۹	عالی	۰/۲۷	مناسب
St09	۰/۳	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	۱۵/۶۹	عالی	۰/۹۶	مناسب
St10	۰/۳۴	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	۱۶/۵۳	عالی	۰/۸۷	مناسب
St11	۰/۵۵	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	۱۹/۰۷	عالی	۰/۰۴	مناسب
St12	۰/۵۶	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	۱۸/۶۷	عالی	۰/۴۲	مناسب
St13	۰/۴۹	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	۱۶/۸۷	عالی	-۰/۲۱	مناسب
St14	۰/۵۸	C2-S1	کمی شور - مناسب برای کشاورزی	۱۹/۱۹	عالی	-۰/۲۵	مناسب

بر اساس یافته‌های ارائه‌شده، میزان کل مواد جامد محلول در آب رودخانه بین ۱۴۸ تا ۳۳۰ میلی‌گرم بر لیتر در نوسان است و در اغلب ایستگاه‌ها، اختلاف میان pH اشباع و pH اندازه‌گیری شده مقداری مثبت دارد. نتایج حاکی از آن است که ۱۳ ایستگاه دارای شاخص پایداری مثبت بوده و در دسته آب‌های رسوب‌گذار جای می‌گیرند؛ به این معنا که آب تمایل به تشکیل رسوبات کربنات کلسیم در تجهیزات، لوله‌ها و تأسیسات صنعتی دارد. فقط در ایستگاه ۷ مقدار اختلاف پیچ اشباع منهای پیچ اندازه‌گیری شده برابر ۰/۱۳- است و آب خاصیت خوردگی در بیشتر نشان می‌دهد. به طور کلی، آب رودخانه ساری‌دره برای مصارف صنعتی عمدتاً پتانسیل رسوب‌گذاری داشته و خطر خوردگی در بیشتر ایستگاه‌ها ناچیز ارزیابی می‌شود. طبق نمودار پایپر، رخساره‌های هیدروشیمیایی رودخانه ساری‌دره عمدتاً توسط فلزات قلیایی خاکی، به‌ویژه یون‌های کلسیم و منیزیم، همراه با آنیون‌های اسید ضعیف، به‌ویژه بی‌کربنات، کنترل می‌شوند (شکل ۴). بیشتر نقاط نمونه‌برداری در مناطق Ca-Mg-HCO_3 و Ca-HCO_3 قرار دارند که نشان می‌دهد هوازدهی کربنات به عنوان فرآیند ژئوشیمیایی اولیه در شکل‌دهی شیمی آب رودخانه عمل می‌کند. سطوح بالای بی‌کربنات، از ۱۸۸ تا ۲۴۷ میلی‌گرم در لیتر، همراه با غلظت بالای کلسیم بین ۴۵/۸ تا ۶۶/۳ میلی‌گرم در لیتر، به تعامل قابل توجه بین آب و سازندهای سنگی کربنات‌دار در حوزه آبریز اشاره دارد. حضور نسبتاً کم یون‌های سدیم، پتاسیم، کلرید و سولفات نشان می‌دهد که انحلال تبخیری‌ها و فعالیت‌های مرتبط با انسان تنها نقش جزئی در تعیین ویژگی کلی هیدروشیمیایی رودخانه دارند. با این وجود، افزایش اندک در سطوح سولفات و کلرید در برخی از نقاط پایین‌دست ممکن است منعکس‌کننده تأثیرات محلی از واحدهای زمین‌شناسی معدنی، عملیات معدنی، زهکشی کشاورزی یا ورودی‌های فاضلاب خانگی باشد. در مجموع، نمودار پایپر نشان می‌دهد که رودخانه ساری‌دره دارای ترکیب آب شیرین و از نوع تغذیه مجدد است که عمدتاً توسط فرآیندهای هوازدهی کربنات شکل گرفته و توسط رخساره هیدروشیمیایی کلسیم-بی‌کربنات تعریف می‌شود.



شکل ۴. نمودار پایپر برای ایستگاه‌های نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه

نمودار ویلکاکس ترسیم شده از کیفیت آب‌های سطحی منطقه در شکل ۵ نشان داده شده است. براساس این نمودار، اکثر ایستگاه‌های نمونه‌برداری در کلاس‌های «عالی تا خوب» و «خوب تا مجاز» قرار می‌گیرند. مقادیر رسانایی الکتریکی بین ۲۹۷ تا ۶۶۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر بود که نشان‌دهنده خطر شوری کم تا متوسط است و محتوای سدیم عموماً کم منجر به درصد سدیم قابل قبول برای اهداف آبیاری می‌شود. قرارگیری نمونه‌ها در نمودار ویلکاکس نشان می‌دهد که آب رودخانه کمترین تهدید را در مورد سدیمی شدن خاک و تجمع شوری دارد. در نتیجه، استفاده از این آب برای آبیاری طولانی مدت بعید است که به نفوذپذیری خاک، سرعت نفوذ یا عملکرد محصول آسیبی برساند. به طور خلاصه، طبقه‌بندی ویلکاکس تأیید می‌کند که آب رودخانه ساری‌دره به طور کلی برای مصارف کشاورزی مناسب است و می‌تواند به عنوان یک منبع آبیاری قابل اعتماد در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شود.



شکل ۵. نمودار ویلکاکس برای ایستگاه‌های نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کیفیت آب رودخانه ساری‌دره به طور کلی در وضعیت مطلوبی قرار دارد و اغلب پارامترهای فیزیکوشیمیایی و غلظت عناصر اندازه‌گیری شده در محدوده استانداردهای ملی و بین‌المللی آب شرب و کشاورزی قرار دارند (WHO, 2017). مقادیر pH، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد محلول، کلرید، نیترات و سولفات بیانگر آب شیرین با شوری کم تا متوسط بوده و محدودیت قابل توجهی برای استفاده شرب و آبیاری ایجاد نمی‌کنند. غلظت آرسنیک، آهن و سایر عناصر مورد بررسی کمتر از حدود مجاز سازمان بهداشت جهانی بود و تنها در چند ایستگاه، غلظت سرب از مقدار راهنمای آب آشامیدنی فراتر رفت که ضرورت پایش مستمر این عنصر را به ویژه در بخش‌های تحت تأثیر فعالیت‌های معدنی آشکار می‌سازد. نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که فرآیندهای زمین‌شناختی و هوازدگی سنگ‌ها مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آب رودخانه هستند. همبستگی مثبت و معنی‌دار آرسنیک با سولفات، هدایت الکتریکی و کل مواد جامد محلول، همراه با ارتباط نزدیک سولفات با شاخص‌های شوری، بیانگر نقش سازندهای معدنی و کانی‌های سولفیدی در آزادسازی عناصر به محیط آبی است. در مقابل، غلظت پایین نیترات و نبود ارتباط آن با شاخص‌های شوری نشان می‌دهد که تأثیر فعالیت‌های کشاورزی و منابع انسانی بر کیفیت آب رودخانه در زمان انجام مطالعه محدود بوده است. بر اساس نمودار پایپر، رخساره هیدروشیمیایی غالب آب از نوع Ca-Mg-HCO_3 و Ca-HCO_3 بوده و شیمی آب عمدتاً تحت تأثیر هوازدگی سنگ‌های کربناته قرار دارد. همچنین نتایج ارزیابی کیفیت آب برای کشاورزی، شامل نمودار ویلکاکس، نشان داد که تمامی نمونه‌ها در کلاس S1-C2 قرار گرفته و دارای خطر سدیمی کم و شوری متوسط هستند. بنابراین آب رودخانه برای آبیاری اغلب محصولات زراعی و باغی منطقه مناسب ارزیابی می‌شود. از نظر مصارف صنعتی نیز آب رودخانه عمدتاً دارای خاصیت رسوب‌گذاری بوده و خطر خوردگی در بیشتر ایستگاه‌ها ناچیز است. به طور کلی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که کیفیت آب رودخانه ساری‌دره در شرایط فعلی برای مصارف شرب، کشاورزی و تا حدود زیادی صنعتی مناسب است و فرآیندهای طبیعی زمین‌شناختی نقش غالبی در کنترل ترکیب شیمیایی آن دارند. با این حال، به دلیل وجود پتانسیل معدنی و مشاهده افزایش موضعی غلظت سرب و برخی عناصر در بخش‌هایی از رودخانه، اجرای برنامه‌های پایش دوره‌ای و بلندمدت به منظور شناسایی تغییرات احتمالی ناشی از فعالیت‌های معدنی و حفظ کیفیت این منبع ارزشمند آبی توصیه می‌شود.

- Abdollahi, Azam 2009. Study of alteration and mineralization of the Sari Darreh region north of Shanivardagh-Ahar. Payam Noor University of East Azerbaijan Province, Faculty of Basic Sciences. (In Persian)
- Abdul, R. M., Arhin, E., & Arhin Jnr, A. A. 2023. Mineralogy and geochemistry of geophagic materials at Mfensi-Adankwame in the Ashanti region of Ghana and possible health implications. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 7(4), 281-292. <https://doi.org/10.1080/24749508.2021.1952775>
- Abdulkarim, E., Fufa, F., & Takala, W. 2022. Identification of groundwater recharge site using geographical information system and remote sensing: case study of Sude district, Oromia, Ethiopia. *Environmental Earth Sciences*, 81(2), 56. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10170-w>
- Aghazadeh, M. 2009. Study of alteration and mineralization of the Sari Darreh region (north of Shivaradagh-Ahar), Tarbiat Modares University. (In Persian)
- Ahmadi, H., Kaya, O. A., Babadagi, E., Savas, T., & Pekkan, E. 2020. GIS-based groundwater potentiality mapping using AHP and FR models in central antalya, Turkey. *Environmental Sciences Proceedings*, 5(1), 11. <https://doi.org/10.3390/IECG2020-08741>
- Babakhani, A. R. 1989. Description of the geological map of the Ahar quadrangle, scale 1:250,000. Tehran: Geological and Mineral Exploration Organization of the country. (In Persian)
- Bhatt, D., Swain, M., & Yadav, D. 2025. Artificial intelligence based detection and control strategies for river water pollution: A comprehensive review. *Journal of Contaminant Hydrology*, 104541. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2025.104541>
- Cengiz, M. F., Kilic, S., Yalcin, F., Kilic, M., & Gurhan Yalcin, M. 2017. Evaluation of heavy metal risk potential in Bogacayi River water (Antalya, Turkey). *Environmental monitoring and assessment*, 189(6), 248. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5925-3>
- Das, A. 2025a. Water pollution and water quality assessment and application of criterion impact loss (CILOS), geographical information system (GIS), artificial neural network (ANN) and decision-learning technique in river water quality management: An experiment on the Mahanadi catchment, Odisha, India. *Desalination and Water Treatment*, 321, 100969. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100969>
- Das, A. 2025b. Surface water potential zones delineation and spatiotemporal variation characteristics of water pollution and the cause of pollution formation in Brahmani River Basin, Odisha. *HydroResearch*, 8, 99-112. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100969>
- Falah, F., Haghizadeh, A. Hydrochemical 2017. Evaluation of river water quality-a case study: Horroud River. *Appl Water Sci* 7, 4725–4733. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0635-0>
- Gao, M., Chen, X., Singh, S. K., & Wei, L. 2022. An improved method to estimate the rate of change of streamflow recession and basin synthetic recession parameters from hydrographs. *Journal of Hydrology*, 604, 127254. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127254>
- Gao, Y., Wang, S., Zhang, C., Xing, C., Tan, W., Wu, H., ... & Liu, C. 2023. Assessing the impact of urban form and urbanization process on tropospheric nitrogen dioxide pollution in the Yangtze River Delta, China. *Environmental Pollution*, 336, 122436. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122436>
- Genjula, W., Jothimani, M., Gunalan, J., & Abebe, A. 2023. Applications of statistical and AHP models in groundwater potential mapping in the Mensa river catchment, Omo river valley, Ethiopia. *Model Earth Syst Environ* 9: 4057–4075. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01765-8>
- Gharahi, N., Fathian, MM., Jafari, A., & Bahmani, M. 2026. Comprehensive assessment of pollution indicators in agricultural soils around the Zayandeh Rood River in Isfahan. *Journal of Environmental Science Studies*, 10(4), 10836-10847.
- Khalili, R., Zali, A., & Motaghi, H. 2021. Evaluating the heavy metals in the water and sediments of Haraz River, using pollution load index (PLI) and geo accumulation index (Igeo). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(4), 933-942. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.316080.668850>
- Khodami, S., Eskandari, T., Nasrollahzadeh Saravi, H., Rahnama, B., Khoshnamvand, M., Rezaei, M., & Younesipour, H. 2026. Assessment of heavy metal pollution (Iron, Zinc, Copper, Cadmium, Lead, and Mercury) in the sediments of the Khersan 3 dam reservoir using geochemical indicators. *Journal of Environmental Science Studies*, 10(4), 10992-11001.
- Koukina, S. E., & Lobus, N. V. 2020. Relationship between enrichment, toxicity, and chemical bioavailability of heavy metals in sediments of the Cai River estuary. *Environmental monitoring and assessment*, 192(5), 305. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08282-6>

- kumar Mallick, S., Maity, B., Das, P., & Rudra, S. 2023. GIS-based groundwater recharge potentiality analysis using frequency ratio and weights of evidence models. In Case studies in geospatial applications to groundwater resources (pp. 91-108). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99963-2.00016-X>
- Limazie, M. S., & Woni, S. 2024. Foreign direct investment and carbon emissions in ECOWAS: does good governance matter?. *Journal of Economics and Development*, 26(2), 139-153. <https://doi.org/10.1108/JED-08-2023-0158>
- Mishra, R. K. 2023. Fresh water availability and its global challenge. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, 4(3), 1-78. doi: <https://doi.org/10.37745/bjmas.2022.0207>
- Naz, S., Habib, S. S., Arshad, M., Majeed, S., & Mohany, M. 2025. Seasonal trends in heavy metal pollution and water quality in the Chashma (Indus River, Pakistan): A study on environmental health risks. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(10), 670. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08317-z>
- Panagopoulos, A. 2022. Brine management (saline water & wastewater effluents): Sustainable utilization and resource recovery strategy through Minimal and Zero Liquid Discharge (MLD & ZLD) desalination systems. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 176, 108944. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108944>
- Pérez, P. A., Quiroz, W., & Echeveste, P. 2026. Coupled pollution and water scarcity heighten ecological degradation and social vulnerability in global dryland rivers. *Environmental Research*, 123708. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2026.123708>
- Rahmati, O., Melesse, A. M., & Naghibi, A. 2026. Water scarcity crisis: overview of challenges and solutions. *Water Scarcity Management*, 1-12. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-26722-2.00027-1>
- Ramin, M., Nasrollahzadeh Saravi, H., Dostar, M., Ghasemi, H., Pourang, N., & Baniamam, M. 2017. Study on Trace Elements (Mo, Cu, Hg and As) in Water and Sediments in Aras River in East Azerbaijan Province.
- Safizadeh, E., Karimi, D., Ghafarzadeh, H. R., & Poorhashemi, S. A. 2020. Environmental of Aras River Environmental Pollution. *Geographical Research*, 35(2), 167-176. <https://doi.org/10.29252/geores.35.2.167>
- Shahmohammadi, K. S., & Habibzadeh, N. 2017. Assessment of geochemical and distribution of heavy metals Pb, Cu, Zn and Ni in the Aras free trade-industrial zone.
- Shakeri, R., Amini, H., Fakheri, F., Lam, M. Y., & Zahraie, B. 2025. Comparative analysis of correlation and causality inference in water quality problems with emphasis on TDS Karkheh River in Iran. *Scientific Reports*, 15(1), 2798. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85908-0>
- Solgi, E., & Sheikhzadeh, H. 2016. Study of Water Quality of Aras River Using Physico- Chemical Variables. *Iran-Water Resources Research*, 12(3), 207-213.
- USEPA (United State Environmental Protection Agency) 2016. Integrated Risk Information System. Available online: <https://www.epa.gov/iris> (accessed on 4 July 2024).
- Varatharajan, G. R., Ndayishimiye, J. C., & Nyirabuhoro, P. 2025. Emerging contaminants: a rising threat to urban water and a barrier to achieving SDG-aligned planetary protection. *Water*, 17(16), 2367. <https://doi.org/10.3390/w17162367>
- Whig, P., Banerjee, S., Achanta, P. R. D., & Whig, A. 2026. Impact of environmental pollution on food security: concepts and issues. *Sustainable solutions for environmental pollution*, 49-70. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-33145-9.00010-9>
- WHO 2017. Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed.). World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950> ISBN: 978-92-4-154995-0
- Zarei, E., Noori, R., Jun, C., Bateni, S. M., Kianmehr, P., & Zhu, S. 2025. A comprehensive water chemistry dataset for Iranian rivers. *Scientific Data*, 12(1), 1646. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05932-7>
- Zhang, W., Ma, L., Abuduwaili, J., Ge, Y., Issanova, G., & Saparov, G. 2019. Hydrochemical characteristics and irrigation suitability of surface water in the Syr Darya River, Kazakhstan. *Environmental monitoring and assessment*, 191(9), 572. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7713-8>
- Zhu, Y., Chen, Z., & Asif, Z. 2021. Identification of point source emission in river pollution incidents based on Bayesian inference and genetic algorithm: Inverse modeling, sensitivity, and uncertainty analysis. *Environmental Pollution*, 285, 117497. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117497>