



Environmental Assessment of Land Use Dynamics and their Relationship with Heavy Metal Pollution in the Aras River Ecosystem (Northwest Iran)

Received: 2025.05.17

Accepted: 2025.10.02

Ali Khodaie,^{1*}  Rahman Zandi²

¹ Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

² Department of Natural Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, Isfahan University, Isfahan, Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Given the growing and alarming trend of land cover changes-primarily driven by unsustainable Development in agricultural, urban, and industrial sectors-surface water resources, especially rivers, are increasingly threatened by various pollutants. Among the most critical of these are heavy and toxic metals, which pose serious risks to human and ecological health by directly or indirectly entering the food chain. As a vital transboundary water resource for the northwestern provinces of Iran, the Aras River is exposed to such threats. Accordingly, this study aims to perform a spatiotemporal analysis of land cover changes and investigate their relationship with variations in heavy metal concentrations in the Aras River. The primary focus is on identifying spatial patterns of overlap between land use transformation and chemically polluted hotspots, as well as evaluating the ecological risk potential of toxic elements entering the food web.

Material and methods: To analyze land cover change trends from 2001 to 2024, time-series satellite imagery from the MODIS sensor (MCD12Q1 product) was utilized. Land cover dynamics were extracted and analyzed for three key years: 2001, 2012, and 2024. Concurrently, field sampling was conducted at 13 selected stations along the Aras River during two seasonal intervals (May and August 2024). The collected water samples were acidified and prepared following standard protocols, and were chemically analyzed using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). Target metals included lead (Pb), arsenic (As), nickel (Ni), cadmium (Cd), mercury (Hg), and chromium (Cr), which were evaluated in terms of concentration, spatial distribution, and compliance with national and international standards (FAO, WHO, EPA).

Results and discussion: Land cover analysis revealed that rangelands and agricultural lands experienced the highest rates of change throughout the study period. Chemical analysis of the water samples in May showed that concentrations of lead, arsenic, and nickel exceeded international permissible limits in several stations. In August, although lead concentrations relatively decreased, other elements including arsenic, cadmium, mercury, nickel, and chromium maintained relatively uniform levels across most stations-often approaching ecological risk thresholds. While some metal concentrations remained within safe limits for agricultural irrigation, livestock consumption, and aquatic tissue accumulation, they were deemed unsuitable for aquatic life. Long-term human exposure through consumption of contaminated agricultural, livestock, or aquatic products could pose serious toxicological risks due to bioaccumulation.

Conclusion: The results indicated a significant and meaningful correlation between land use change and increased concentrations of toxic heavy metals in surface waters. These findings underscore the urgent need to revise land management policies, enforce stricter controls on the discharge of untreated effluents, and enhance continuous water quality monitoring systems. By integrating remote sensing data with laboratory-based environmental assessments, this.

Keywords: MODIS, Heavy metals, Human health, Remote sensing, Aras River.

How to cite this article:

Khodaie, A. and Zandi, R. 2026. Environmental Assessment of Land Use Dynamics and their Relationship with Heavy Metal Pollution in the Aras River Ecosystem (Northwest Iran). Adv. Environ. Sci. 24 (1):19-36.

* Corresponding Author Email Address: a.khodaie@hsu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2025.239978.1509



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

ارزیابی زیست‌محیطی دینامیک‌های کاربری زمین و ارتباط آن با آلودگی فلزات سنگین در اکوسیستم رودخانه ارس (شمال غرب ایران)



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۰

علی خدایی*^۱، رحمان زندی^۲

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: با توجه به روند فزاینده و نگران‌کننده تغییرات پوشش سطح زمین که عمدتاً ناشی از توسعه ناپایدار در بخش‌های کشاورزی، شهری و صنعتی است، منابع آب سطحی به‌ویژه رودخانه‌ها با تهدید جدی از سوی آلاینده‌های مختلف مواجه شده‌اند. از جمله مهم‌ترین این آلاینده‌ها می‌توان به فلزات سنگین و سمی اشاره کرد که با ورود مستقیم یا غیرمستقیم به زنجیره غذایی، سلامت انسان و سایر موجودات زنده را به مخاطره می‌اندازند. رودخانه ارس، به‌عنوان یک منبع آبی مرزی و حیاتی برای استان‌های شمال غرب ایران، در معرض چنین خطراتی قرار دارد. براین‌اساس، پژوهش حاضر با هدف تحلیل هم‌زمان تغییرات فضایی-زمانی پوشش سطح زمین و بررسی ارتباط آن با تغییرات غلظت فلزات سنگین در آب رودخانه ارس صورت گرفته است. تمرکز اصلی بر شناسایی الگوهای مکانی هم‌پوشانی بین تغییرات کاربری زمین و نقاط دارای آلودگی شیمیایی بالا و همچنین ارزیابی پتانسیل خطر زیستی ناشی از ورود این عناصر به زنجیره غذایی بوده است.

^۱ گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده جغرافیای محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
^۲ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

مواد و روش‌ها: در این تحقیق، جهت تحلیل روند تغییرات پوشش سطح زمین در دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴، از تصاویر سری زمانی سنجنده MODIS (محصول MCD12Q1) استفاده شد. تغییرات پوشش زمین در سه بازه زمانی کلیدی (۲۰۰۱، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۴) استخراج و تحلیل شد. هم‌زمان، به‌منظور بررسی وضعیت آلودگی فلزات سنگین، نمونه‌برداری میدانی از ۱۳ ایستگاه منتخب در امتداد رودخانه ارس طی دو بازه زمانی (اردیبهشت و مرداد ۱۴۰۳) انجام گرفت. نمونه‌های جمع‌آوری شده پس از آماده‌سازی و اسیدی‌سازی، با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی نشر پلاسمای القایی (ICP-OES) مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند. فلزات هدف شامل سرب (Pb)، آرسنیک (As)، نیکل (Ni)، کادمیم (Cd)، جیوه (Hg) و کروم (Cr) بودند که از نظر غلظت، توزیع مکانی و انطباق با استانداردهای ملی و بین‌المللی (FAO، WHO، EPA) ارزیابی شدند.

نتایج و بحث: نتایج تحلیل پوشش زمین نشان داد که کاربری‌های مراتع و اراضی زراعی - کشاورزی بیشترین نرخ تغییرات را طی دوره مطالعه داشته‌اند و نتایج تجزیه شیمیایی آب در اردیبهشت نشان داد که غلظت فلزات سرب، آرسنیک و نیکل در برخی ایستگاه‌ها فراتر از حدود مجاز بین‌المللی بوده‌اند. در مرداد، با وجود کاهش نسبی غلظت سرب، سایر عناصر شامل آرسنیک، کادمیم، جیوه، نیکل و کروم در اکثر ایستگاه‌ها دارای مقادیر نسبتاً یکتواخت و نزدیک به مرز خطر زیستی بودند. مقایسه داده‌ها با استانداردهای ملی و بین‌المللی نشان داد که اگرچه برخی فلزات در محدوده ایمن برای مصارف آبیاری کشاورزی، دام و طیور و آستانه‌های زیستی برای تجمع در بافت آبریان قرار دارند، اما برای سلامت آبریان مناسب ارزیابی نشد و در صورت مصرف مستقیم یا غیرمستقیم انسانی این منابع از طریق محصولات کشاورزی و دامی یا آبریان، احتمال تجمع زیستی و بروز اثرات سمی جدی در بلندمدت وجود دارد.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج، ارتباطی معنادار میان تغییرات کاربری زمین و افزایش غلظت فلزات سمی در آب شناسایی شد. این یافته‌ها ضرورت بازنگری در سیاست‌های مدیریت سرزمین، اعمال محدودیت بر تخلیه پساب‌های آلوده و تقویت سامانه‌های پایش مستمر کیفی منابع آب را برجسته می‌سازند. پژوهش حاضر با تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور و تحلیل‌های آزمایشگاهی، مدلی جامع برای بررسی اثرات زیست‌محیطی تغییرات کاربری زمین ارائه می‌دهد که می‌تواند در سایر حوضه‌های آبی کشور نیز به کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: مادیس، فلزات سنگین، سلامت انسان، سنجش‌ازدور، رودخانه ارس.

استناد به این مقاله: خدایی، ع.، زندی، ۱۴۰۵. ارزیابی زیست‌محیطی دینامیک‌های کاربری زمین و ارتباط آن با آلودگی فلزات سنگین در اکوسیستم رودخانه ارس (شمال غرب ایران). فصلنامه علوم محیطی نوین. ۳۶-۱۹: (۱) ۲۴.

* Corresponding Author Email Address: a.khodaie@hsu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2025.239978.1509



مقدمه

همچنین طیف وسیعی از شاخصه‌های محیط زیستی همچون ارزیابی خطر اکولوژیکی، شاخص زمین انباشت شیمیایی، فاکتور آلودگی، شاخص بار آلودگی و غیره مورد تأیید قرار گیرد؛ اما در این میان یکی از شاخص‌هایی که به دلیل اهمیت فراوان در چند سال اخیر توجهات قابل ملاحظه‌ای را به خود جلب کرده، شاخص ارزیابی خطر اکولوژیکی فلزات سمی در محیط‌های آبی است (Venkatramanan, et al., 2013). چراکه این شاخص بر اساس میزان غلظت و فاکتور سمیت هر فلز، پتانسیل خطر اکولوژیکی آن‌ها و همچنین خطر محیط زیستی مجموع فلزات را مشخص می‌نماید (Gurumoorthi and Venkatachalapath, 2016).

تغییرات پوشش سطح زمین نقش بسیار مهم در کیفیت آب‌های سطحی و زیرسطحی دارد. تغییرات پوشش سطح زمین ناشی از دو عامل انسانی و تغییرات محیطی است. سنجش و ارزیابی میزان این تغییرات می‌تواند به یافتن علل تغییرات کیفیت منابع آبی کمک شایانی کند؛ لذا در این پژوهش علاوه بر ارزیابی و سنجش کیفیت آب در دو بازه زمانی، تغییرات پوشش سطح زمین را نیز با استفاده از فناوری سنجش از دور و استفاده از تصاویر دو ماهواره ترا و آکووا که هر دو مجهز به سنجنده مادیس می‌باشند، مورد بررسی قرار خواهیم داد.

حوضه آبریز رود ارس، سه استان شمال غربی کشور را پوشش می‌دهد و منبع آبی مهمی برای این منطقه به شمار می‌رود. همچنین با توجه به روند تغییرات پوشش سطح زمین و رشد گسترش روستاها و شهرها در حاشیه این رودخانه، ورود آلاینده‌های خانگی، شهری، کشاورزی و صنعتی اجتناب‌ناپذیر است. لذا پایش و کنترل آلاینده‌های ورودی از جمله فلزات سنگین و سمی به این رودخانه جهت کنترل و حفظ کیفیت مناسب آن امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد؛ بنابراین مطالعه حاضر باهدف ارزیابی تغییرات پوشش سطح زمین و اندازه‌گیری میزان آلودگی فلزات

اکوسیستم‌های آبی یکی از مهم‌ترین و غنی‌ترین اکوسیستم‌های جهان هستند که نقش مهمی در زندگی بشر و سایر موجودات زنده دارند (Maanan, et al., 2015). به طوری که کیفیت این اکوسیستم‌ها به عنوان یکی از فاکتورهای اساسی جهت کنترل وضعیت سلامت و بیماری‌های انسانی و حیوانی در نظر گرفته می‌شود (Yipel and Yarsan, 2014). یکی از مهم‌ترین منابع آب در زمین رودخانه‌ها می‌باشند (Khalili, et al., 2020). به علت روند رو به رشد افزایش جمعیت، گسترش مراکز صنعتی، توسعه بافت‌های شهری و روستایی و فعالیت‌های انسانی، تولید پساب صنعتی، زه آب‌های کشاورزی و انواع فاضلاب‌های بیمارستانی، خانگی و تخلیه آن‌ها به منابع آبی پذیرنده، بدون رعایت موازین و ملاحظات حفاظت از محیط زیست منابع آبی، کیفیت منابع آب را به شدت مورد تهدید و در معرض ورود آلاینده‌های فلزی قرار می‌دهد. (Safizadeh, et al., 2020) آلودگی آب با فلزات سنگین از آلاینده‌های جدی محیط زیست به شمار می‌روند که به طریق مختلف و متعدد با منشأ طبیعی و انسانی به محیط زیست وارد می‌شوند و از فراوانی بالایی در محیط‌های طبیعی برخوردار بوده است (Vrhovnik, et al., 2013). فلزات سنگین به دلیل تجمع در بافت‌ها و اندام‌های موجودات زنده برای سلامتی جانداران و انسان‌ها خطرناک هستند (Kukrer, 2017). آلودگی فلزات سنگین در محیط‌های آبی به دلیل فراوانی، ماندگاری و سمیت بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Islam, et al., 2020). دوز سمیت عناصر سنگین به نوع فلز، نقش زیستی آن در بدن و نوع موجود زنده‌ای که در معرض آن قرار می‌گیرد، بستگی دارد (Mendes, et al., 2017). عناصر سمی نظیر جیوه، سرب، کادمیوم و آرسنیک از مهم‌ترین منابع آلاینده محیط زیست به حساب می‌آیند (Ananth, et al., 2014)؛ بنابراین آلودگی اکوسیستم‌های آبی به فلزات سنگین می‌تواند از طریق بررسی آب، رسوبات و موجودات زنده و

ژئوشیمیایی و پراکنش فلزات سنگین مس، روی، سرب و نیکل در محدوده منطقه آزاد تجاری و صنعتی رودخانه ارس پرداختند نتایج نشان دهنده غلظت بیشتر فلز مس در رسوبات و گیاهان بود. ایستگاه‌های مورد بررسی، به جز سنت استپانوس به فلز مس به شدت آلوده بودند که احتمالاً ناشی از فعالیت‌های معدن‌کاوی مس سونگون است. Ramin *et al.* (2017) به بررسی و تعیین میزان فلزات (As, Hg, Cu, Mo) در آب و رسوب رودخانه ارس پرداختند. نتایج نشان می‌دهد غلظت عنصر مس در آب رودخانه ارس بر طبق میانگین در کلاس III (آلودگی متوسط) قرار دارد. غلظت عنصر مولیبدن آب در بیشتر فصول کمتر از حد مجاز بود. آب رودخانه ارس بر طبق میانگین غلظت عنصر جیوه و آرسنیک به ترتیب در کلاس IV و II قرار گرفته است. غلظت آرسنیک در رسوبات از استانداردهای بین‌المللی مانند WHO^۴ بیشتر بوده است، اما غلظت جیوه کمتر ثبت گردید. Solgi and Sheikhzadeh (2016) به مطالعه کیفیت آب رودخانه ارس با استفاده از متغیرهای فیزیکی و شیمیایی در محدوده پارس‌آباد استان اردبیل پرداختند و نتایج تحقیق نشان داد که نیترات، نیتريت و هدایت الکتریکی بیشتر از استاندارد WHO و میانگین PH در محدوده ۸/۲۲ سانتی‌متر و سایر متغیرها سدیم، پتاسیم، کلسیم، سرب و کادمیوم دارای مقادیری کمتر یا در دامنه این استاندارد بودند. به نظر می‌رسد ورود رواناب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های شهری، عامل مهم تأثیرگذار بر کیفیت آب رودخانه ارس هستند.

Koukina and Lobus (2021) به ارزیابی فلزات سنگین در رودخانه گای در کشور چین پرداختند و به این نتیجه رسیدند که عناصر آهن، منگنز، کروم، کبالت، نیکل و مس از منابع طبیعی نشأت گرفته‌اند. غنی‌شدگی این عناصر کمتر از ۱/۵ و شاخص زمین انباشت آن‌ها کمتر از صفر بوده است، درحالی‌که سرب با غنی‌شدگی بین ۱ تا ۲ دارای آلودگی متوسط است.

سنگین و سمی آب رودخانه ارس و مقایسه با استانداردهای ملی، بین‌المللی و مطالعات دیگر در طول ۴ ماه اول سال ۱۴۰۳ و با نمونه‌گیری در ایستگاه‌های مختلف شمال غرب ایران، استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل صورت گرفت. همچنین، جهت ارزیابی پوشش سطح زمین از تصاویر سنجنده MODIS^۱ (محصول MCD12Q1) برای بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ استفاده گردید؛ لذا تلفیق فناوری سنجنش‌ازدور و داده‌های آزمایشگاهی از نوآوری پژوهش حاضر می‌باشد.

با توجه به اهمیت بررسی اثرات تغییرات کاربری زمین بر کیفیت محیط‌زیست، به‌ویژه در نواحی رودخانه‌ای، مطالعات متعددی در سطح جهان و ایران به بررسی غلظت فلزات سنگین در اکوسیستم‌های آبی و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از آن پرداخته‌اند. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: Khalili *et al.* (2021) به ارزیابی فلزات سنگین در آب و رسوبات رودخانه هراز با استفاده از شاخص بار آلودگی (PLI)^۲ و شاخص تجمع جغرافیایی (Igeo)^۳ پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد غلظت فلزات سنگین در سایت‌های پایین‌دست به علت دفع زباله‌های شهری، پساب‌های تصفیه نشده از صنایع مختلف و فعالیت‌های زیاد کشاورزی بیش‌ازحد ایمن آب آشامیدنی است. Safizadeh *et al.* (2020) به بررسی جنبه‌های محیط زیستی آلودگی‌های محیطی رودخانه ارس پرداختند نتایج بیانگر آن بوده است که کمترین میزان هدایت الکتریکی در نمونه‌های اندازه‌گیری شده ۰/۷۸۹ و بیشترین آن‌ها (۲/۳۴۶ ds/m) است که نشانگر محدودیت بالای خاک و آب برای آبیاری گیاهان است. کل مواد جامد نیز با (۱۲۱۱ mg/l) نشانگر محدودیت متوسط برای شوری است. درباره نیترات و نیتريت، بالاتر از محدوده مجاز قرار دارند و درباره pH ۸/۱۷، پتاسیم، کلسیم (۶۴ mg/l)، سرب (۰/۰۹ μg/l)، کادمیوم (۰/۸ μg/l) نیز در محدوده مجاز و استاندارد قرار دارد. Shahmohammadi and Habibzadeh (2017) به بررسی

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

رودخانه ارس به طول ۱۰۷۲ کیلومتر از داخل خاک ترکیه سرچشمه گرفته و در شمال غرب ایران به صورت مرز مشترک بین ایران و جمهوری‌های ارمنستان و آذربایجان جریان دارد. وسعتی تقریباً ۱۰۳۲ کیلومترمربع حدود ۰/۰۳۹ (۳۹۰۰۰) کیلومترمربع از آن را اراضی ایران تشکیل می‌دهد. در طول مسیر طی شده آن تغییراتی مشاهده می‌شود، از جمله از سرچشمه تا شهرستان جلفا مناطق صاف و کمی کوهستانی و از جلفا تا مسیر شهرستان خدا آفرین و اصلاندوز کاملاً کوهستانی و صعب‌العبور بوده و عرض و عمق این رودخانه در مسیر حرکت متفاوت است. این رود در استان اردبیل قسمت شمال شرقی پارس‌آباد مغان وارد خاک آذربایجان گردیده و در آنجا به رود عظیم کورا و سپس به دریای خزر می‌ریزد. عمده منابع آبی دشت مغان آب‌های سطحی است که مهم‌ترین و اصلی‌ترین منبع آن رودخانه ارس است (Ardabili, 2001).

در این تحقیق ۱۳ ایستگاه به منظور نمونه‌برداری مدنظر قرار گرفت شامل نه ایستگاه در استان آذربایجان شرقی و چهار ایستگاه در استان اردبیل که مشخصات آن‌ها در هر ایستگاه نمونه‌برداری، نقاط برداشت شده به کمک GPS^۵ ثبت مکانی شد و تمام اطلاعات در مورد نمونه‌ها و محل نمونه‌برداری، مختصات و مشاهدات عینی از محل در جدول (۱) و شکل (۱) مشاهده می‌گردد.

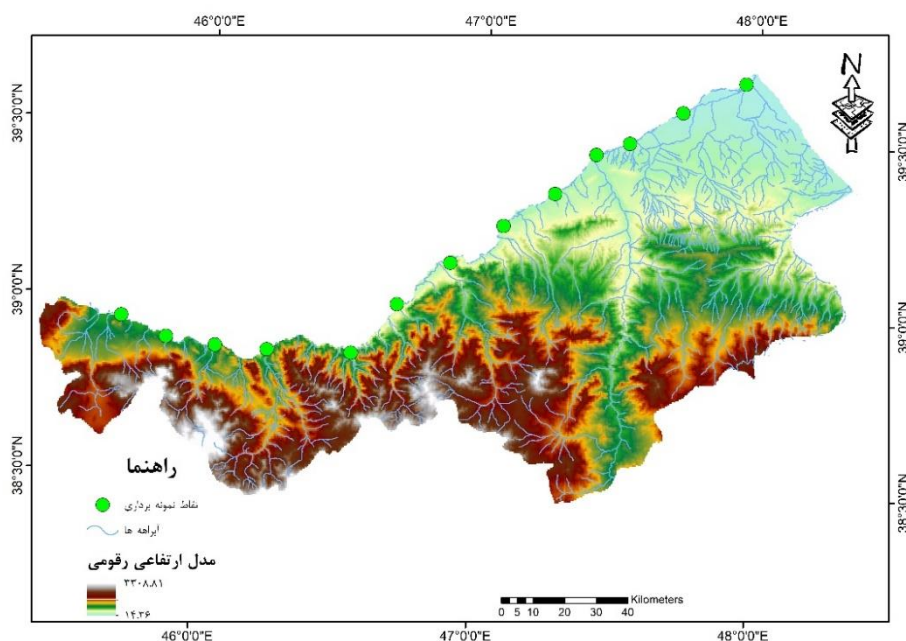
به علاوه، به جهت اطمینان از انتخاب مکان مناسب، با مراجعه به سازمان‌های ذی‌ربط نظیر منابع طبیعی، اداره کل محیط‌زیست، شیلات و آب منطقه‌ای در خصوص محل‌های ورود منابع آلاینده به رودخانه ارس و امکان دسترسی به ایستگاه‌ها، هر یک از ایستگاه‌های منتخب بررسی و تأیید نهایی صورت گرفت. جدول (۱)، نام و مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. شکل شماره ۲ نیز جهت مستندسازی از آنالیز نمونه آورده شده است.

(Siddiqui and Pandey (2019) در تحقیقی به ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در آب و رسوبات سطحی جهت ارزیابی خطرات زیست‌محیطی رودخانه گانگا در کشور هند پرداختند. آن‌ها هشت فلز سنگین (Pb, Ni, Cu, Cd, Cr, Mn, Fe, Zn) را در رسوبات آب و بستر در طول رودخانه مورد مطالعه قراردادند. نتایج نشان داد غلظت (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Fe) در آب از حد متناظر آن‌ها در وسط و پایین رودخانه فراتر رفته است و باعث ایجاد خطرات زیست‌محیطی زیادی خواهد شد.

(Zhang *et al.* (2019) در تحقیقی به بررسی کیفیت آب رودخانه سیردریا در کشور قزاقستان در بخش کشاورزی به مطالعه پرداختند. به این منظور، از ۳۹ نقطه رودخانه مذکور نمونه‌برداری شد. نتایج بررسی نشان داد که هوازدگی سنگ‌های حوزه آبریز به همراه تبخیر از عوامل مهم در کنترل شیمی آب رودخانه می‌باشند. ارزیابی نمونه‌ها بر اساس شاخص‌های کشاورزی نظیر نسبت جذب سدیم، در سدیم تعادلی و شاخص کلی نشان داد که آب رودخانه برای استفاده در بخش کشاورزی مناسب می‌باشد.

(Cengiz *et al.* (2017) به ارزیابی فلزات سنگین در آب رودخانه بوگاکای در ترکیه پرداختند. آنان در طول رودخانه 25 نمونه آب جمع‌آوری کردند و غلظت فلزات (Sr, Se, Pb, Ni, Mn, Hg, Cu, Cr, Co, Cd, Ba, As) را توسط طیف‌سنجی جرمی پلاسما به روش القایی همراه (ICP-MS) مورد بررسی قراردادند. نتایج نشان داد که کیفیت آب در انتهای رودخانه نسبت به ابتدا و وسط رودخانه به علت گذشتن از مناطق شهری، در حال کاهش است.

مروری بر پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که جای یک پژوهش نسبتاً جامع که از یکسو تغییرات پوشش سطح زمین و از سوی دیگر تغییرات کیفیت آب را مورد سنجش قرار دهد، تقریباً خالی است؛ بنابراین، دستیابی به این مهم از اهداف پژوهش حاضر می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های برداشت نمونه‌های سطحی در طول مسیر رودخانه ارس

Fig. 1- Location of surface sampling stations along the Aras River route

جدول ۱- محل ایستگاه‌های نمونه‌برداری در رودخانه ارس

Table 1- Location of sampling stations in the Aras River

ردیف NO	محل ایستگاه Station Location	استان Province	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع Elevation (m)
S ₁	شهر جلفا Jolfa City	آذربایجان شرقی East Azerbaijan	38°56'40" N	45°41'55" E	694
S ₂	روستای مرآزاد Marazad Village	آذربایجان شرقی East Azerbaijan	38°53'23" N	45°52'00" E	670
S ₃	امامزاده بابا یعقوب (شهر سیه‌رود) Imamzadeh Baba Yaqub (Siah Rud City)	آذربایجان شرقی East Azerbaijan	38°52'25" N	46°02'42" E	627
S ₄	امامزاده شعیب (روستای دوزال) Imamzadeh Shoaib (Douzal Village)	آذربایجان شرقی East Azerbaijan	38°52'06" N	46°14'03" E	530
S ₅	روستای مرآباد Marzabad Village	آذربایجان شرقی East Azerbaijan	38°52'14" N	46°32'24" E	382
S ₆	روستای بویدوز Buyduz Village	آذربایجان شرقی East Azerbaijan	39°00'53" N	46°41'58" E	315
S ₇	سد خدا آفرین (جانانلو) Khoda Afarin Dam (Jananlu)	آذربایجان شرقی East Azerbaijan	39°08'20" N	46°53'14" E	273
S ₈	روستای داودان بالا Davoudan-e Bala Village	آذربایجان شرقی East Azerbaijan	39°15'01" N	47°04'34" E	217
S ₉	روستای باقراوغلو Baqraoghlu Village	آذربایجان شرقی East Azerbaijan	39°20'51" N	47°15'36" E	165
S ₁₀	شهر اصلاندوز Aslanduz City	اردبیل Ardabil	39°27'49" N	47°24'21" E	126
S ₁₁	روستای آق قباق Agh Qabaq Village	اردبیل Ardabil	39°29'55" N	47°31'39" E	104
S ₁₂	دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mogan	اردبیل Ardabil	39°35'28" N	47°43'10" E	64
S ₁₃	شهر پارس‌آباد Parsabad City	اردبیل Ardabil	39°40'46" N	47°56'52" E	20



شکل ۲- مستند برداشت و آزمایش نمونه‌های برداشت‌شده از رودخانه ارس در آزمایشگاه شرکت دانش‌بنیان آبرام
 Fig. 2- Documentation of sampling and testing of collected samples from the Aras River at the AbRam knowledge-based company's laboratory

عملیات نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

ظروف نمونه‌برداری از جنس پلی‌اتیلن ۱ لیتری بدون هرگونه استفاده قبلی جهت نمونه‌برداری استفاده گردید که قبل از نمونه‌برداری اسید شویی شده و با آب مقطر نیز شسته شدند، در موقع نمونه‌برداری نیز با آب موردنظر دو بار شستشو انجام گرفت. نمونه‌ها از فاصله تقریباً دو متر از لبه آب و عمق تقریباً ۳۵ سانتی‌متر از رودخانه ارس برداشت شدند. در هر نقطه نمونه‌برداری، یک ظرف آب جهت فلزات سنگین و سمی (جدول- ۲) (سرب، آرسنیک، جیوه، کادمیوم، نیکل، کروم) برداشته شد. نمونه مربوط به فلزات سنگین با استفاده از اسید نیتریک غلیظ تا PH کمتر از ۲ اسیدی شد تا از رسوب احتمالی کاتیون‌ها و رشد میکروارگانیسم‌ها جلوگیری شود و همچنین جذب سطحی به‌وسیله دیواره‌های ظرف به حداقل برسد و سپس بطری‌های آب در مجاورت یخ خشک و درون محفظه یونولیتی درپوش دار قرار داده شد و سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل داده شد و مورد آزمایش قرار گرفتند. میزان غلظت فلزات سنگین موردنظر در نمونه‌های آب برداشت‌شده بر اساس تکنیک‌های مشخص برای هضم در کتاب استاندارد متد، مرحله پیش هضم و تغلیظ انجام گرفت و سپس با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جرمی OES^۶ ICP - مدل OES-730 آنالیز شد.

روش‌شناسی پژوهش

این تحقیق از نوع کاربردی و مقطعی به روش پیمایشی و از طریق نمونه‌برداری و انجام مطالعات آزمایشگاهی و استفاده از تصاویر سنجش‌ازدور (سنجنده مادیس) صورت گرفته است. در بخش نخست، اقدام به اندازه‌گیری و سنجش بار آلودگی آب سطحی رودخانه ارس شد. سپس، با مراجعه به اسناد حقوقی و قوانین و مقررات موجود، در خصوص جنبه‌های مربوط به حقوق محیط‌زیست تحلیل صورت گرفت. نمونه‌برداری در مرحله اول ماه اردیبهشت و مرحله دوم در مردادماه ۱۴۰۳ در ایستگاه‌های منتخب انجام گرفت. این مناطق بر اساس بازدیدهای صورت گرفته و همچنین مطالعه اسناد، مدارک و گزارش‌ها به عنوان کانون‌های پراکنش آلاینده‌های شهری، روستای، صنعتی و کشاورزی در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است در هر ایستگاه نمونه‌برداری، نقاط ثبت مکانی شد و تمام اطلاعات به کمک GPS برداشته شده، در مورد نمونه‌ها و محل نمونه‌برداری، عمق، مختصات و مشاهدات عینی از محل در دفترچه ثبت گردید و در آزمایشگاه مورد آنالیز قرار گرفتند. برای ارزیابی تغییرات پوشش سطح زمین از تصاویر سنجنده مادیس در بازه زمانی (۲۰۲۴-۲۰۰۱) استفاده شد.

جدول ۲- برخی از فلزات سنگین در محیط‌های آبی
Table 2- Selected heavy metals in aquatic environments (Yousif et al., 2021)

عوامل Sources	فلز سنگین Heavy Metal
استخراج و ذوب سنگ معدن فلزی، بنزین سردار، فاضلاب شهری، ضایعات صنعتی غنی‌شده با سرب، انواع رنگ‌ها Metal ore extraction and smelting, leaded gasoline, municipal wastewater, lead-rich industrial waste, various types of paints	سرب Lead
ذوب و پالایش فلزات، سوزاندن سوخت‌های فسیلی، کودهای فسفاته، فاضلاب Metal smelting and refining, burning of fossil fuels, phosphate fertilizers, wastewater	کادمیوم Cadmium
فوران‌های آتش‌فشان، آتش‌سوزی جنگل، انتشار گازهای گلخانه‌ای، زغال‌سنگ و سوزاندن چوب Volcanic eruptions, forest fires, greenhouse gas emissions, coal and wood combustion	جیوه Mercury
نیمه‌هادی‌ها، معدن و ذوب، نیروگاه‌های زغال‌سنگ، علف‌کش‌ها، آتش‌فشان‌ها، پالایش نفت، افزودنی‌های خوراک دام Semiconductors, mining and smelting, coal-fired power plants, herbicides, volcanoes, oil refining, livestock feed additives	آرسنیک Arsenic
صنایع آبکاری، لجن، ضایعات جامد Electroplating industries, sludge, solid waste	کروم Chromium
فوران‌های آتش‌فشانی، دفن زباله، آتش‌سوزی جنگل، هوازدگی خاک، پساب‌های صنعتی، لوازم آشپزخانه، ابزار جراحی، آلیاژهای فولادی، باتری‌های خودرو Volcanic eruptions, landfill, forest fires, soil weathering, industrial effluents, kitchen utensils, surgical instruments, steel alloys, car batteries	نیکل Nickel

پرداخته می‌شود تا روندهای بلندمدت و پیامدهای زیست‌محیطی آن‌ها به‌طور دقیق‌تری شناسایی شود.

کوتاه‌مدت (روزها، هفته‌ها، ماه‌ها)

رویدادهای ناگهانی: در این بازه زمانی، رویدادهای ناگهانی مانند آتش‌سوزی جنگل‌ها، سیلاب‌ها، یا عملیات ساختمانی بزرگ می‌توانند تأثیرات فوری و قابل‌توجهی بر کیفیت آب داشته باشند. به‌عنوان مثال، آتش‌سوزی جنگل‌ها می‌تواند باعث افزایش فرسایش خاک و ورود رسوبات و مواد مغذی به آب‌ها شود.

تغییرات فصلی: تغییرات فصلی در پوشش گیاهی (مانند رشد و خزان گیاهان) می‌تواند بر میزان رواناب و فرسایش خاک تأثیر بگذارد. به‌عنوان مثال، در فصل بارندگی، رواناب

جهت ارزیابی تغییرات پوشش سطح زمین، از تصاویر ماهواره‌های ترا و آکووا، سنجنده مادیس (محصول MCD12Q1) که به‌صورت سالانه و در ۱۷ کلاس مجزا پوشش سطح زمین را نشان می‌دهد، استفاده گردید.

نتایج و بحث

ارزیابی تغییرات پوشش سطح زمین

بررسی تغییرات پوشش سطح زمین در بازه‌های زمانی مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این تغییرات می‌توانند تأثیرات متفاوتی بر کیفیت منابع آب و سایر مؤلفه‌های محیط‌زیستی در طول زمان داشته باشند. در این بخش، به تحلیل این تغییرات در مقاطع زمانی مختلف

اهمیت بررسی تغییرات در بازه‌های زمانی مختلف

شناسایی الگوها و روندها: بررسی تغییرات پوشش زمین در بازه‌های زمانی مختلف به ما کمک می‌کند تا الگوها و روندهای تغییر را شناسایی کنیم. این اطلاعات می‌تواند برای پیش‌بینی تغییرات آینده و اتخاذ اقدامات مناسب برای مدیریت منابع آبی مفید باشد.

ارزیابی اثرات: بررسی تغییرات در بازه‌های زمانی مختلف به ما کمک می‌کند تا اثرات کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت تغییرات پوشش زمین بر کیفیت آب را ارزیابی کنیم.

تدوین استراتژی‌های مدیریتی: با درک اثرات تغییرات در بازه‌های زمانی مختلف، می‌توان استراتژی‌های مدیریتی مؤثرتری برای حفظ و بهبود کیفیت آب تدوین کرد. این استراتژی‌ها می‌تواند شامل اقداماتی مانند مدیریت رواناب، حفاظت از خاک، احیای پوشش گیاهی و توسعه پایدار باشد. بررسی پوشش سطح زمین در سال ۲۰۰۱ (شکل شماره ۳) نشان می‌دهد که اراضی کشاورزی و زارعی بیش از ۵۰ درصد (۷۲۷۲ کیلومترمربع)، سپس مراتع با حدود ۴۸ درصد (۶۸۵۵ کیلومترمربع) سطح منطقه را به خود اختصاص داده‌اند، سایر کاربری‌ها کمتر از دو درصد را به خود اختصاص داده‌اند.

شکل شماره ۴، پوشش سطح زمین در سال ۲۰۱۲ را نشان می‌دهد، سطح زارعی و کشاورزی به بیش از ۵۲ درصد (۷۴۶۱ کیلومترمربع) و مراتع با حدود ۴۶ درصد (۶۶۴۷ کیلومترمربع) را به خود اختصاص داده‌اند. در مقایسه با سال ۲۰۰۱، ۲ درصد از سطح مراتع کاسته شده و به کاربری زارعی و کشاورزی اضافه شده است.

شکل شماره ۵، پوشش سطح زمین در سال ۲۰۲۴ را نشان می‌دهد، سطح زیر کشت زارعی-کشاورزی بیش از ۱۰ درصد کاهش پیدا کرده و به ۴۱ درصد (۵۹۵۵ کیلومترمربع) رسیده و در عوض مراتع با رشد نسبتاً زیاد به حدود ۵۷ درصد (۸۱۴۳ کیلومترمربع) رسیده‌اند.

سطحی افزایش می‌یابد و آلاینده‌ها را به داخل منابع آبی منتقل می‌کند.

میان‌مدت (سال‌ها)

تغییر کاربری اراضی: در این بازه زمانی، تغییرات کاربری اراضی مانند تبدیل جنگل‌ها به زمین‌های کشاورزی یا مناطق شهری می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر کیفیت آب داشته باشد. این تغییرات می‌تواند منجر به افزایش فرسایش خاک، رواناب سطحی و آلودگی آب با مواد مغذی و سموم دفع آفات شود.

مدیریت منابع طبیعی: نحوه مدیریت منابع طبیعی مانند جنگل‌ها، مراتع و زمین‌های کشاورزی می‌تواند بر کیفیت آب تأثیر بگذارد. به‌عنوان مثال، استفاده از شیوه‌های پایدار کشاورزی می‌تواند به کاهش فرسایش خاک و آلودگی آب کمک کند.

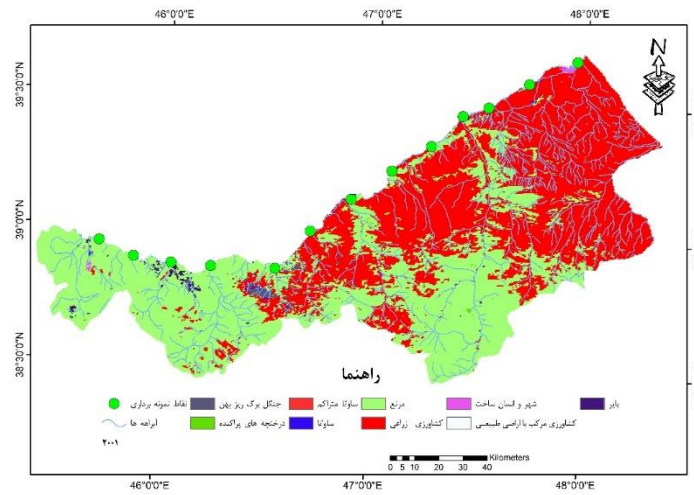
تغییرات اقلیمی: تغییرات اقلیمی مانند افزایش دما و تغییر الگوهای بارش می‌تواند بر پوشش گیاهی و کیفیت آب تأثیر بگذارد. به‌عنوان مثال، افزایش دما می‌تواند باعث خشکی و کاهش پوشش گیاهی شود که این امر منجر به افزایش فرسایش خاک و رواناب می‌شود.

بلندمدت (دهه‌ها، قرن‌ها)

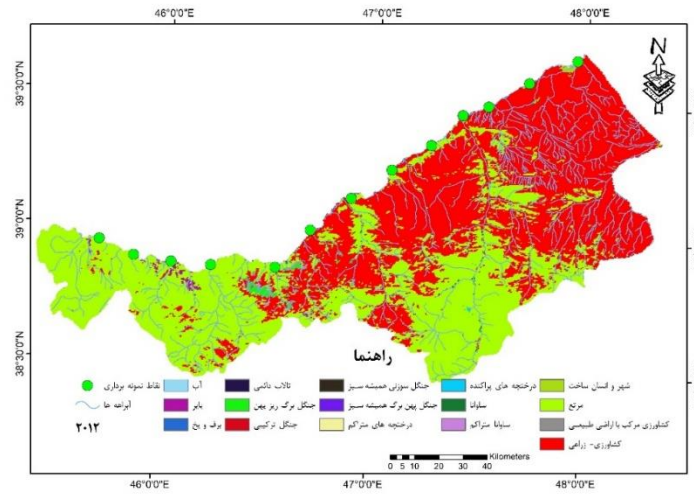
تغییرات اقلیمی پایدار: در این بازه زمانی، تغییرات اقلیمی پایدار می‌تواند تأثیرات عمیقی بر پوشش گیاهی و کیفیت آب داشته باشد. به‌عنوان مثال، افزایش سطح دریاهای می‌تواند باعث نفوذ آب شور به منابع آب شیرین ساحلی شود.

تخریب سرزمین: تخریب سرزمین (*Land Degradation*) ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی ناپایدار، چرای بیش‌ازحد دام و جنگل‌زدایی می‌تواند منجر به از بین رفتن پوشش گیاهی، فرسایش خاک و کاهش کیفیت آب شود.

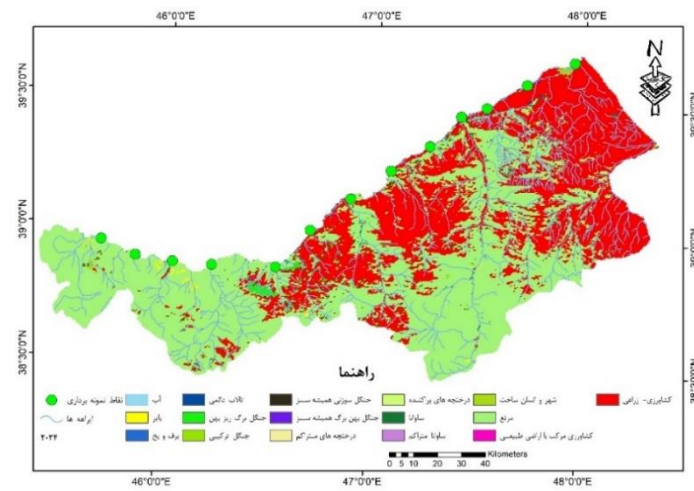
تغییرات زیست‌محیطی گسترده: تغییرات زیست‌محیطی گسترده مانند از بین رفتن تنوع زیستی و تغییر در چرخه‌های بیوژئوشیمیایی می‌تواند بر کیفیت آب تأثیر بگذارد.



شکل ۳- نقشه پوشش سطح زمین در سال ۲۰۰۱
Fig. 3- Land cover map in 2001



شکل ۴- نقشه پوشش سطح زمین در سال ۲۰۱۲
Fig. 4- Land cover map in 2012



شکل ۵- نقشه پوشش سطح زمین در سال ۲۰۲۴
Fig. 5- Land cover map in 2024

اصلاندوز، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان و شهر پارس‌آباد و کمترین میزان آن در سایر ایستگاه‌ها مشاهده شده است. میزان جیوه در کل ایستگاه‌ها یکسان بوده ولی بیشترین میزان کروم در ایستگاه امامزاده یعقوب (شهر سیه‌رود) با مقدار بالای ۲۰ و سه ایستگاه روستای مرزآباد، امامزاده شعیب (روستای دوزال) و روستای باقراغلو و کمترین میزان در سایر ایستگاه‌ها مشاهده شده است. بیشترین میزان نیکل در ایستگاه روستای مرزآباد و روستای مرزآباد و کمترین میزان آن در شش ایستگاه امامزاده بابا یعقوب (شهر سیه‌رود)، روستای داودان بالا، شهر اصلاندوز، روستای آق قباق، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان و شهر پارس‌آباد گزارش گردیده است.

بر اساس جداول نهایی آنالیز آب در اردیبهشت‌ماه (جدول ۵) بیشترین میزان سرب در ایستگاه دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان و سپس در ایستگاه‌های جلفا، روستای مرزآباد، امامزاده بابا یعقوب (شهر سیه‌رود)، روستای مرزآباد و شهر اصلاندوز و کمترین میزان آن در ایستگاه روستای بویدوز مشاهده گردیده است. بیشترین میزان کادمیوم در ایستگاه روستای مرزآباد و کمترین میزان آن در چهار ایستگاه امامزاده بابا یعقوب (شهر سیه‌رود)، روستای مرزآباد، روستای باقراغلو و دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان گزارش شده است. بیشترین میزان آرسنیک در ایستگاه‌های امامزاده بابا یعقوب (شهر سیه‌رود)، روستای مرزآباد، روستای بویدوز، شهر

جدول ۳- میزان غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در آب رودخانه ارس اردیبهشت ۱۴۰۳ (ppb)
Table 3- Concentration levels of heavy metals measured in the Aras River water in May 2024 (ppb)

نیکل Nickel (Ni)	کروم Chromium (Cr)	جیوه Mercury (Hg)	آرسنیک Arsenic (As)	کادمیم Cadmium (Cd)	سرب Lead (Pb)	فلزات سنگین Heavy Metal	ایستگاه Station
<15	<10	<10	<10	<15	20		S1
<20	<15	<10	<10	<20	20		S2
<10	<20	<10	15	<10	20		S3
<15	<15	<10	<10	<15	15		S4
<20	<10	<10	15	<10	20		S5
<15	<10	<10	15	<15	10		S6
<15	<10	<10	<10	<15	15		S7
<10	<10	<10	<10	<15	10		S8
<15	<15	<10	<10	<10	15		S9
<10	<10	<10	15	<15	20		S10
<10	<10	<10	<10	<15	15		S11
<10	<10	<10	15	<10	25		S12
<10	<10	<10	15	<15	15		S13

روستای بویدوز، روستای داودان بالا، روستای باقراغلو و شهر پارس‌آباد مشاهده گردیده است. میزان کادمیوم آرسنیک، جیوه، کروم و نیکل در همه ایستگاه‌ها یکسان بوده است.

بر اساس جداول نهایی آنالیز آب در مردادماه (جدول ۴) بیشترین میزان سرب در ایستگاه دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان (۳۰) و کمترین میزان آن در ایستگاه‌های

جدول ۴- میزان غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در آب رودخانه ارس مرداد ۱۴۰۳ (ppb)
Table 4- Concentration levels of heavy metals measured in the Aras River water in August 2024 (ppb)

ایستگاه Station	فلزات سنگین Heavy Metals	سرب Lead (Pb)	کادمیم Cadmium (Cd)	آرسنیک Arsenic (As)	جیوه Mercury (Hg)	کروم Chromium (Cr)	نیکل Nickel (Ni)
S1		20	<10	<10	<10	<10	<10
S2		20	<10	<10	<10	<10	<10
S3		20	<10	<10	<10	<10	<10
S4		10	<10	<10	<10	<10	<10
S5		20	<10	<10	<10	<10	<10
S6		<10	<10	<10	<10	<10	<10
S7		10	<10	<10	<10	<10	<10
S8		<10	<10	<10	<10	<10	<10
S9		<10	<10	<10	<10	<10	<10
S10		20	<10	<10	<10	<10	<10
S11		10	<10	<10	<10	<10	<10
S12		30	<10	<10	<10	<10	<10
S13		<10	<10	<10	<10	<10	<10

اطراف باشد. در مقابل، فلزاتی مانند کادمیوم (Cd)، آرسنیک (As)، جیوه (Hg)، کروم (Cr) و نیکل (Ni) در اکثر ایستگاه‌ها مقادیری پایین‌تر داشته‌اند. با این وجود، در برخی ایستگاه‌ها (نظیر S3، S5، S10 و S12) حضور مقادیر قابل‌تشخیص آرسنیک و نیکل مشاهده شده است که می‌تواند به فعالیت‌های کشاورزی، فرسایش طبیعی لایه‌های زمین‌شناسی حاوی این عناصر، یا تخلیه فاضلاب خام در بخش‌هایی از حوضه مربوط باشد. اگرچه رودخانه ارس در بازه مورد بررسی از نظر بیشتر فلزات در وضعیت نسبتاً مطلوبی قرار دارد، اما وجود مقادیر نسبتاً بالای سرب و حضور پراکنده آرسنیک و نیکل در برخی نقاط می‌تواند نشانگر تشدید فعالیت منابع آلاینده و تمرکز آلاینده‌ها باشد.

میانگین مقادیر فلزات سنگین در ۱۳ ایستگاه نمونه‌برداری در رودخانه ارس طی دو ماه اردیبهشت و مرداد سال ۱۴۰۳ در جدول ۷، الگوی نابرابر و وابسته به موقعیت مکانی در پراکنش عناصر آلاینده را نشان می‌دهد که می‌تواند بازتاب‌دهنده تأثیر ترکیبی از منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای، شرایط زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و کاربری اراضی در حوضه آبریز باشد. از میان فلزات اندازه‌گیری شده، سرب (Pb) با بیشترین مقدار ثبت‌شده تا (27.5 ppb) در ایستگاه S12 به‌عنوان غالب‌ترین آلاینده شناسایی شد. حضور مقادیر نسبتاً بالای سرب در ایستگاه‌های بالادست و میانی (S1، S2، S3، S5، S10 و S12) می‌تواند ناشی از تخلیه پساب‌های صنعتی، رواناب‌های جاده‌ای و فرسایش مواد معدنی در مناطق

جدول ۵- میانگین مقادیر مربوط به هر یک از فلزات سنگین در دو ماه نمونه برداری (ppb)
Table 5- Average concentrations of each heavy metal in the two sampling months (ppb)

ایستگاه Station	فلزات سنگین Heavy Metals	سرب Lead (Pb)	کادمیم Cadmium (Cd)	آرسنیک Arsenic (As)	جیوه Mercury (Hg)	کروم Chromium (Cr)	نیکل Nickel (Ni)
S1		20	<12.5	<10	<10	<10	<12.5
S2		20	<15	<10	<10	<12.5	<15
S3		20	<10	12.5	<10	<15	<10
S4		12.5	<12.5	<10	<10	<12.5	<12.5
S5		20	<10	12.5	<10	<10	<15
S6		10	<12.5	12.5	<10	<10	<12.5
S7		12.5	<12.5	<10	<10	<10	<12.5
S8		10	<12.5	<10	<10	<10	<10
S9		12.5	<10	<10	<10	<12.5	<12.5
S10		20	<12.5	12.5	<10	<10	<10
S11		12.5	<12.5	<10	<10	<10	<10
S12		27.5	<10	12.5	<10	<10	<10
S13		12.5	<12.5	12.5	<10	<10	<10

در مقایسه با اکثر نواحی جهان دارای آلودگی متوسط به آرسنیک بوده و در بازه‌ای بین کم آلودگی تا قابل ملاحظه قرار دارد. کروم (Cr): غلظت کروم در رودخانه ارس (10.96 $\mu\text{g/l}$) به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از همه قاره‌ها به جز آمریکای شمالی است. آفریقا و آسیا دارای مقادیر بسیار بالایی از کروم هستند و آمریکای جنوبی نیز بسیار فراتر از میانگین جهانی قرار دارد. در نتیجه، براساس تحلیل جدول ۸ که غلظت عناصر سنگین در رودخانه ارس را با میانگین‌های منطقه‌ای رودخانه‌ها و دریاچه‌های موجود در قاره‌های مختلف جهان مقایسه می‌کند، غلظت فلزات سنگین در رود ارس به‌طور کلی کمتر از میانگین قاره‌ها است، ولی در برخی موارد مثل جیوه، کادمیوم و سرب، نسبت به برخی قاره‌ها مقدار قابل توجهی دارد. این مقایسه می‌تواند دید روشنی از وضعیت نسبی آلودگی رودخانه ارس در مقیاس جهانی فراهم سازد.

آرسنیک (As): غلظت آرسنیک در رودخانه ارس برابر با $11.15 \mu\text{g/l}$ است که به‌مراتب پایین‌تر از میانگین قاره‌های آسیا، آفریقا و اروپا است. با این حال، مقدار آن به‌طور قابل توجهی بالاتر از قاره‌های آمریکای شمالی و جنوبی می‌باشد. این مقدار نشان می‌دهد که رودخانه ارس از نظر آلودگی به کروم در وضعیت بسیار مطلوب و کم ریسک قرار دارد. کادمیوم (Cd): مقدار کادمیوم در رودخانه ارس $11.92 \mu\text{g/l}$ گزارش شده که بالاتر از اروپا و آمریکای شمالی است، اما کمتر از آسیا، آفریقا و به‌ویژه آمریکای جنوبی می‌باشد؛ بنابراین، از منظر جهانی، رودخانه ارس دارای غلظت متوسط از کادمیوم است که نیازمند پایش و کنترل می‌باشد. جیوه (Hg): رودخانه ارس با غلظت $10 \mu\text{g/l}$ جیوه، در رتبه‌ای میانی قرار دارد. این مقدار کمتر از مقادیر بسیار بالای آفریقا و آمریکای جنوبی است، اما به‌مراتب بیشتر از اروپا، آمریکای شمالی و آسیا می‌باشد. حضور جیوه در این سطح در رودخانه ارس می‌تواند هشدار برای خطرات زیست‌محیطی بالقوه باشد؛ خصوصاً

در مقایسه با اکثر نواحی جهان دارای آلودگی متوسط به آرسنیک بوده و در بازه‌ای بین کم آلودگی تا قابل ملاحظه قرار دارد. کروم (Cr): غلظت کروم در رودخانه ارس (10.96 $\mu\text{g/l}$) به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از همه قاره‌ها به جز آمریکای شمالی است. آفریقا و آسیا دارای مقادیر بسیار بالایی از کروم هستند و آمریکای جنوبی نیز بسیار فراتر از میانگین جهانی قرار دارد. در نتیجه، براساس تحلیل جدول ۸ که غلظت عناصر سنگین در رودخانه ارس را با میانگین‌های منطقه‌ای رودخانه‌ها و دریاچه‌های موجود در قاره‌های مختلف جهان مقایسه می‌کند، غلظت فلزات سنگین در رود ارس به‌طور کلی کمتر از میانگین قاره‌ها است، ولی در برخی موارد مثل جیوه، کادمیوم و سرب، نسبت به برخی قاره‌ها مقدار قابل توجهی دارد. این مقایسه می‌تواند دید روشنی از وضعیت نسبی آلودگی رودخانه ارس در مقیاس جهانی فراهم سازد.

آرسنیک (As): غلظت آرسنیک در رودخانه ارس برابر با

رودخانه ارس است. نیکل (Ni): غلظت نیکل در رودخانه ارس (11.73 µg/l) نسبت به تمام قاره‌ها به‌جز آمریکای شمالی، در سطح پایین‌تری قرار دارد. مقادیر این عنصر در اروپا، آفریقا، آسیا و آمریکای جنوبی گزارش شده است. این موضوع حاکی از وضعیت بسیار خوب رود ارس از نظر آلودگی به نیکل، در مقیاس جهانی است.

با توجه به تجمع زیستی آن در زنجیره غذایی. سرب (Pb): میزان سرب در رودخانه ارس (20.77 µg/l) در مقایسه با اروپا اندکی بالاتر است، اما نسبت به مقادیر بسیار بالای قاره‌های دیگر مانند آمریکای جنوبی، آمریکای شمالی، آسیا و آفریقا، به‌طور قابل‌توجهی پایین‌تر می‌باشد. این بیانگر شرایط نسبتاً مطلوب در خصوص آلودگی به سرب در

جدول ۶- مقایسه میانگین برخی عناصر سمی رودخانه ارس با میانگین غلظت فلزات سنگین سمی از آب رودخانه‌ها و دریاچه‌های جهانی در پنج قاره برحسب (ppb)

Table 6- Comparison of the average concentrations of selected toxic elements in the Aras River with the global average concentrations of toxic heavy metals in river and lake waters across five continents (ppb) (Zhou et al., 2022)

تحقیق حاضر رود ارس (present study on the Aras River)	آمریکا جنوبی (South America)	آمریکا شمالی (North America)	اروپا (Europe)	آسیا (Asia)	آفریقا (Africa)	فلزات سنگین (µg/l) Heavy Metals(µg/l)
11.15	0.33	0.33	18.54	178.30	33.46	آرسنیک Arsenic (As)
10.96	903.78	5.42	13.69	383.93	388.77	کروم Chromium (Cr)
11.92	63.54	1.12	5.69	17.75	45.04	کادمیم Cadmium (Cd)
10	40.00	1.00	0.15	4.17	528.50	جیوه Mercury (Hg)
20.77	332.93	163.28	14.31	92.70	83.82	سرب Lead (Pb)
11.73	33.55	10.93	137.47	54.84	131.69	نیکل Nickel (Ni)

جهت ارزیابی وضعیت آلودگی فلزات سنگین در رودخانه ارس و تحلیل ریسک‌های زیست‌محیطی مرتبط با آن، مقادیر میانگین غلظت عناصر سنگین اندازه‌گیری شده با استانداردهای معتبر ملی و بین‌المللی مورد مقایسه قرار گرفتند. جدول ۹ نمایی کلی از مقایسه این داده‌ها را ارائه می‌دهد. این مقایسه نه‌تنها امکان قضاوت در خصوص تطابق یا تخطی از حدود مجاز را فراهم می‌کند، بلکه در تبیین پیامدهای احتمالی زیستی انسانی و سایر موجودات نیز نقش مؤثری ایفا می‌کند.

مقدار آرسنیک (As) (1.4 mg/L) می‌باشد. همچنین این مقدار پایین‌تر از حد مجاز سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات‌متحده (EPA) برای حفاظت از آبزیان (0.150 mg/L) است؛ بنابراین، از نظر آلودگی به آرسنیک، رودخانه ارس در وضعیت مطلوب قرار دارد.

غلظت کروم (Cr) نیز معادل (0.0109 mg/L) است که بسیار کمتر از حدود مجاز کشاورزی (1 mg/L) و دامداری (1 mg/L) بوده و به‌طور دقیق در آستانه مقدار بحرانی EPA برای حفاظت از آبزیان (0.011 mg/L) قرار دارد. این نزدیکی به حد آستانه هشدار می‌دهد که هرگونه افزایش کروم در آینده ممکن است به زیست‌بوم آبی آسیب وارد سازد.

غلظت آرسنیک (As) در آب رودخانه برابر با (0.0111 mg/L) است که بسیار پایین‌تر از حدود مجاز تعیین‌شده برای مصارف کشاورزی و دام در ایران (0.1 تا 0.2 mg/L) و همچنین مقدار مجاز در بافت ماهیان طبق

غلظت کادمیوم (Cd) اندازه‌گیری شده در رودخانه برابر با (0.0119 mg/L) است که به‌طور معنی‌داری بالاتر از حد

نیاز به اقدام مدیریتی فوری دارد. غلظت سرب (Pb) در رودخانه معادل (0.0207 mg/L) است. این مقدار پایین‌تر از حدود مجاز در کشاورزی ایران (1 mg/L) دام و طیور (0.05 mg/L) تا (0.1 mg/L) می‌باشد، اما حدود هشت برابر بیش‌تر از حد مجاز EPA برای حفاظت از آبیان (0.0025 mg/L) است. در نتیجه، احتمال آسیب به گونه‌های آبی و انتقال سرب از طریق زنجیره غذایی بسیار بالا ارزیابی می‌شود. غلظت نیکل (Ni) نیز برابر با (0.0117 mg/L) بوده که بسیار پایین‌تر از حدود مجاز کشاورزی FAO نا (5.5 mg/L) و استاندارد EPA برای آبیان (0.052 mg/L) است. از این منظر، نیکل در رودخانه ارس در محدوده ایمن قرار دارد.

مجاز استاندارد EPA برای آبیان (0.00025 mg/L) بوده و حتی از حد مجاز کشاورزی FAO (0.01 mg/L) نیز اندکی تجاوز کرده است. این مقدار بیانگر یک وضعیت پر ریسک برای سلامت آبیان بوده و می‌تواند در درازمدت منجر به تجمع زیستی در زنجیره غذایی گردد.

غلظت جیوه (Hg) در نمونه‌های بررسی‌شده برابر با (0.01 mg/L) می‌باشد. این مقدار در حالی ثبت شده که استاندارد حفاظت از آبیان طبق EPA تنها (0.00077 mg/L) است و حداکثر مقدار مجاز در منابع FAO نیز (0.0005 mg/L) تا (0.01 mg/L) در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، این مقدار در مرز خطر برای مصرف انسانی و فراتر از حد مجاز برای آبیان است و با توجه به خاصیت تجمع زیستی بالای جیوه،

جدول ۷- مقایسه میانگین برخی فلزات سنگین رودخانه ارس با مقادیر برخی استانداردهای بین‌المللی و استانداردهای ایران (واحدها بر حسب میلی‌گرم بر لیتر)

Table 7- Comparison of the average concentrations of selected heavy metals in the Aras River with values from some international and Iranian standards (units in mg/l) Rezaei et al., 2022; Ayers and Westcot, 1985; FAO/WHO, 2016; Radkhan et al., 2022; Drechsel et al., 2023)

مقایسه استانداردهای فلزات سنگین (mg/l) Heavy Metal Standards Comparison (mg/l)	استاندارد کیفیت آب‌های سطحی برای آبیاری کشاورزی (سازمان محیط‌زیست ایران، ۱۳۹۵)	حد مجاز آب سطحی برای آبیاری دام و طیور (استاندارد ملی شماره ۱۲۹۶۸ ایران)	حداکثر غلظت مجاز آب مورد استفاده برای آبیاری کشاورزی (FAO (1992) و US-EPA(2004) Maximum permissible concentration in water used for agricultural irrigation (FAO (1992) and US-EPA (2004)	حداکثر مقدار مجاز استانداردهای سازمان جهانی بهداشت (WHO) و سازمان خواروبار و کشاورزی جهانی (FAO) در بافت ماهیان Maximum allowable limit in fish tissue (WHO & FAO)	حد مجاز آب‌های سطحی برای حفاظت از آبیان (EPA (2024), (2022) (Surface water quality standard for aquatic life protection (EPA, 2024 & 2022)	تحقیق حاضر (present study on the Aras River)
آرسنیک (As)	0.1	0.2	0.1	1.4	0.150	0.0111
کروم (Cr)	0.1	1	0.1	1	0.011	0.0109
کادمیم (Cd)	0.01	0.05	0.01	0.05	0.00025	0.0119
جیوه (Hg)	-	0.01	0.01	0.0005	0.00077	0.01
سرب (Pb)	1	0.1 (livestock) - 0.05 (poultry)	5	0.5	0.0025	0.0207
نیکل (Ni)	0.2	1	0.2	0.05 - 5.5	0.052	0.0117

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با رویکردی تلفیقی، به ارزیابی هم‌زمان تغییرات کاربری زمین و آلودگی فلزات سنگین در اکوسیستم رودخانه ارس طی دو دهه گذشته پرداخته و نشان داده است که دینامیک‌های فضایی-زمانی محیط‌زیست منطقه به‌طور مستقیم با غلظت عناصر سمی در آب رودخانه مرتبط است. تحلیل سری‌های زمانی تصاویر ماهواره‌ای MODIS (محصول MCD12Q1) و تطبیق آن با داده‌های میدانی حاصل از آنالیز ICP-OES حاکی از آن است که تغییرات سریع در الگوی پوشش زمین، به‌ویژه گسترش اراضی کشاورزی، توسعه شهری غیرمجاز و استفاده بی‌رویه از نهاده‌های شیمیایی، به‌عنوان عوامل کلیدی افزایش بار آلودگی شیمیایی شناخته می‌شوند.

نتایج نشان می‌دهد که غلظت فلزات سنگینی همچون سرب، آرسنیک، کادمیوم و نیکل در برخی ایستگاه‌ها (خصوصاً ایستگاه‌های مجاور فعالیت‌های کشاورزی و شهری مانند جلفا، اصلاندوز و منطقه کشاورزی مغان) فراتر از مقادیر آستانه تعیین‌شده توسط استانداردهای ملی و بین‌المللی (EPA، WHO، FAO) قرار داشته‌اند. حضور پایدار این آلاینده‌ها در نمونه‌های فصلی (اردیبهشت و مرداد ۱۴۰۳) گویای پتانسیل خطرناک انباشت زیستی و بروز اثرات سمی در زنجیره غذایی است که می‌تواند سلامت اکولوژیکی و انسانی را به‌طور جدی تهدید کند.

پژوهش همچنین با استناد به مطالعات مشابه نظیر تحقیقات (Siddiqui and Pandey ۲۰۱۹) در هند و (Koukina and Lobus ۲۰۲۱) در چین، هم‌راستایی نتایج خود را در مقیاس بین‌المللی تأیید کرده و بر اهمیت پایش مستمر منابع آبی مشترک، بازنگری سیاست‌های مصرف نهاده‌های شیمیایی، کنترل ورود پساب‌های صنعتی و توسعه

راهبردهای یکپارچه مدیریت سرزمین تأکید می‌نماید. از منظر سیاست‌گذاری، این مطالعه نشان داد که حفاظت از رودخانه‌های مرزی نظیر ارس، نیازمند برنامه‌ریزی چندسطحی و یکپارچه در مقیاس محلی، ملی و منطقه‌ای است. پیشنهادهای کلیدی این تحقیق شامل موارد زیر است:

- ۱- ایجاد نظام پایش مستمر کیفی آب با استفاده از حسگرهای سنجش‌ازدور و نمونه‌برداری‌های میدانی دوره‌ای.
- ۲- اصلاح الگوهای مصرف کود و سموم در بخش کشاورزی از طریق سیاست‌های تشویقی و آموزشی.
- ۳- اعمال محدودیت‌های قانونی شدیدتر برای تخلیه مستقیم پساب‌های صنعتی و شهری در رودخانه‌ها.
- ۴- تقویت همکاری‌های فرامرزی برای مدیریت منابع مشترک آب با کشورهای هم‌مرز، به‌ویژه در چارچوب معاهدات محیط زیستی بین‌المللی.
- ۵- تدوین سیاست‌های یکپارچه مدیریت سرزمین مبتنی بر ارزیابی‌های اکولوژیکی ریسک.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از داوران ارجمند به‌منظور ارائه نظرات ارزشمند و راهگشای علمی، صمیمانه قدردانی می‌شود. همچنین از آقایان شهروز علیزاده و فرهاد خدائی به دلیل همکاری در جمع‌آوری نمونه‌های آب از رودخانه ارس، سپاسگزاری به عمل می‌آید.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- 2 pollution load index
- 3 Geoaccumulation index
- 4 World Health Organization
- 5 Global Positioning System
- 6 Optical Emission Spectrometry
- 7 Inductively Coupled Plasma

References

Ananth, S., Mathivanan, V., Aravinth, S., & Sangeetha, V. 2014. Impact of arsenic metal toxicant on biochemical changes in the grass carp, *Ctenopharyngodon idella*. *International Journal of*

Modern Research and Reviews, 2(2), 74–78. <https://uploads/2014/02/Ananth-2074-78>

Ardabili, B. 2001. *Aras hydrology*. Regional Water

- Organization, Office of Surface Water Research. (In Persian). <https://ardebil.mporg.ir>
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. 1985. Water quality for agriculture (Vol. 29, p. 174). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/t0234e/t0234e00.htm>
- 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, Article 305. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5925-3>
- Drechsel, P., Zadeh, S. M., Pedrero-Salcedo, F., Alcon, F., Allende, A., Amerasinghe, P., & Turrall, H. 2023. Water quality in agriculture: Risks and risk mitigation. <https://doi.org/10.4060/cc7340en>
- Environmental Protection Agency. 2022. Factsheet on water quality parameters: Metals. https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-01/parameter-factsheet_metals_508
- Environmental Protection Agency. 2024. National recommended water quality criteria: Aquatic life criteria table. <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-aquatic-life-criteria-table>
- FAO/WHO. 2016. Accumulation of heavy metals in fishes of freshwater. <https://www.slideshare.net>
- Gurumoorthi, K., & Venkatachalapathy, R. 2016. Spatial and seasonal trend of trace metals and ecological risk assessment along Kanyakumari coastal sediments, southern India. *Pollution*, 2(3), 269–287. <https://doi.org/10.7508/pj.2016.03.003>
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran. 2023. Human and animal feed: Maximum permissible limits of heavy metals (Standard No. 12968, Amendment No. 8). <https://www.isiri.gov.ir>
- Iran Water Quality Standards. 2016. Water and soil office, human environment deputy, department of environment (pp. 1–14). <https://www.doe.ir>
- Islam, A. R. M. T., Al Mamun, A., Rahman, M. M., & Zahid, A. 2020. Simultaneous comparison of modified-integrated water quality and entropy weighted indices: Implication for safe drinking water in the coastal region of Bangladesh. *Ecological Indicators*, 113, Article 106229. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106229>
- Khalili, R., Parvinnia, M., & Motaghi, H. 2020. Evaluation of Bashar River water quality using CCME water quality index. *Journal of Environmental Science Studies*, 5(3), 2807–2814. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12860144.v3> (In Persian)
- 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>
- Koukina, S. E., & Lobus, N.V. 2021. Relationship between enrichment, toxicity, and chemical bioavailability of heavy metals in sediments of the Cai River estuary. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(5), Article 305. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08282-6>
- Kükrcer, S. 2017. Pollution, source, and ecological risk assessment of trace elements in surface sediments of Lake Aktaş, NE Turkey. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 23(7), 1629–1644. <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1332953>
- Maanan, M., Saddik, M., Maanan, M., Chaibi, M., Assobhei, O., & Zourarah, B. 2015. Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador lagoon, Morocco. *Ecological Indicators*, 48, 616–626. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.034>
- Mendes, M. P., Salomão, A. L., Niemeyer, J. C., & Marques, M. 2017. Ecological risk assessment in a tropical wetland contaminated with gasoline: Tier 1. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 23(5), 992–1007. <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1294477>
- Radkhah, A. R., Eagderi, S., & Sadeghinejad Masouleh, E. 2022. Accumulation of heavy metals in fish: A serious threat to food security and public health. *Journal of Marine Medicine*, 3(4), 236–245. <http://dx.doi.org/10.30491/1.1.3> (In Persian)
- 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. *Environmental Research Journal*, 12(3), 73–83. <https://www.magiran.com/p2452324> (In Persian)
- Rezaei, H., Shahbazi, K., Saadat, S., & Bazargan, K. 2022. Investigation of soil pollution and agricultural crops in Iran. *Land Management Journal*, 10(1), 61–93. <https://doi.org/10.22092/lmj.2021.125620.177> (In Persian)
- Safizadeh, E., Karimi, D., Ghafarzadeh, H. R., & Poorhashemi, S. A. 2020. Environmental impacts of Aras River pollution. *Geographical Researches*, 35(2), 167–176. <https://doi.org/10.29252/geores.35.2.167> (In Persian)
- Shahmohammadi Kalalagh, S., & Habibzadeh, N. 2017. Assessment of geochemical and distribution of heavy metals Pb, Cu, Zn and Ni in the Aras free trade-industrial zone. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 6(4), 29–44. <https://www.magiran.com/p1702801> (In Persian)

Siddiqui, E., & Pandey, J. 2019. Assessment of heavy metal pollution in water and surface sediment and evaluation of ecological risks associated with sediment contamination in the Ganga River: A basin-scale study. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 10926–10940. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04495-6>

Solgi, E., & Sheikhzadeh, H. 2016. Study of water quality of Aras River using physico-chemical variables. *Iran-Water Resources Research*, 12(3), 207–213. <https://www.magiran.com/p1627286> (In Persian)

Venkatramanan, S., Ramkumar, T., Anithamary, I., & Jonathan, M. P. 2013. Speciation of selected heavy metals geochemistry in surface sediments from Tirumalairajan River estuary, east coast of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 6563–6575. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-3047-5>

Vrhovnik, P., Arrebola, J. P., Serafimovski, T., Dolenc, T., Šmuc, N. R., Dolenc, M., & Mutch, E. 2013. Potentially toxic contamination of sediments, water and two animal species in Lake Kalimanci, FYR Macedonia: Relevance to human health. *Environmental Pollution*, 180, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.05.004>

Yipel, M., & Yarsan, E. 2014. A risk assessment of heavy metal concentrations in fish and an

invertebrate from the Gulf of Antalya. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 93, 542–548. <https://doi.org/10.1007/s00128-014-1376-5>

Yousif, R., Choudhary, M. I., Ahmed, S., & Ahmed, Q. 2021. Bioaccumulation of heavy metals in fish and other aquatic organisms from Karachi Coast, Pakistan. *Nusantara Bioscience*, 13(1). <https://doi.org/10.13057/nusbiosci/n130111>

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), Article 572. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7713-8>

Zhou, Q., Yang, N., Li, Y., Ren, B., Ding, X., Bian, H., & Yao, X. 2020. Total concentrations and sources of heavy metal pollution in global river and lake water bodies from 1972 to 2017. *Global Ecology and Conservation*, 22, e00925. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00925>

