

Original Article

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

Ali Khodaie¹, Rahman Zandi²

1. Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran, Email: alikhodaie@yahoo.com
2. Department of Natural Geography, Geographical Sciences and Planning, Isfahan Faculty of University, Isfahan, Iran, Email: r.zandi@geo.ui.ac.ir

Abstract

Objective: Given the increasing and alarming trend of land cover changes-primarily driven by unsustainable development in agricultural, urban, and industrial sectors-surface water resources, particularly rivers, are facing serious threats from various pollutants. Among the most critical of these pollutants are heavy and toxic metals, which, through direct or indirect entry into the food chain, pose significant risks to human health and other living organisms. The Aras River, as a transboundary and vital water source for the northwestern provinces of Iran, is subject to such threats. Accordingly, this study aims to analyze the spatiotemporal changes in land cover and examine their relationship with variations in the concentration of heavy metals in the Aras River water. The main focus is on identifying spatial patterns of overlap between land use changes and areas of high chemical pollution, as well as assessing the potential biological risk associated with the entry of these elements into the food chain.

Methods: To analyze the trend of land cover changes from 2001 to 2024, this study used time series imagery from the MODIS sensor (product MCD12Q1). Land cover changes were extracted and analyzed for three key time periods: 2001, 2012, and 2024. Simultaneously, in order to assess the heavy metal pollution status, field sampling was conducted at 13 selected stations along the Aras River during two time periods (May and August 2024). The collected samples were prepared and acidified, and then subjected to chemical analysis using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). The 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).

Findings: The land cover analysis showed that rangelands and agricultural lands experienced the highest rate of change during the study period. The chemical analysis of water samples in May revealed that concentrations of lead, arsenic, and nickel in some stations exceeded international permissible limits. In August, despite a relative reduction in lead levels, other elements such as arsenic, cadmium, mercury, nickel, and chromium showed relatively uniform concentrations close to the biological risk threshold in most stations. Comparison with national and international standards indicated that although some metals were within the safe range for agricultural irrigation, livestock and poultry use, and aquatic organism tissue accumulation thresholds, they were deemed unsuitable for aquatic life health. Furthermore, if these resources are consumed directly or indirectly by humans through agricultural, livestock, or aquatic products, there is a potential for bioaccumulation and serious long-term toxic effects.

Conclusion: Based on the results, a significant relationship was identified between land use changes and the increase in toxic metal concentrations in water. These findings highlight the necessity of revising land management policies, imposing restrictions on the discharge of polluted effluents, and strengthening continuous water quality monitoring systems. By integrating remote sensing data with laboratory analyses, this study presents a comprehensive model for assessing the environmental impacts of land use changes, which can also be applied to other water basins across the country.

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

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

علی خدائی^۱ | رحمان زندی^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده جغرافیا محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، ایران، رایانامه: alikhodaie@yahoo.com

۲. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، رایانامه: r.zandi@geo.ui.ac.ir

چکیده

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. بر این اساس، 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.

روش پژوهش: 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 جمع‌آوری‌شده 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، EPA، WHO) ارزیابی شدند.

یافته: 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 یکنواخت 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 آبیان قرار دارند، اما برای سلامت آبیان مناسب ارزیابی نشد و در صورت مصرف مستقیم یا غیرمستقیم انسانی این منابع از طریق محصولات کشاورزی و دامی یا آبیان 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 سنجش از دور و تحلیل‌های آزمایشگاهی، مدلی جامع برای بررسی اثرات زیست‌محیطی تغییرات کاربری زمین ارائه می‌دهد که می‌تواند در سایر حوضه‌های آبی کشور نیز به‌کار گرفته شود.

کلید واژه‌ها: مادیس، فلزات سنگین، سلامت انسان، سنجش از دور، رودخانه ارس.

مقدمه

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). به‌طوری‌که کیفیت این اکوسیستم‌ها به‌عنوان 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 محیط‌زیست منابع آبی، کیفیت منابع آب را به‌شدت مورد تهدید و در معرض ورود آلاینده‌های فلزی قرار می‌دهد (Safizadeh, et al., 2020). آلودگی آب با فلزات سنگین از آلاینده‌های جدی محیط‌زیست به شمار می‌روند که به طریق مختلف و متعدد با منشأ طبیعی و انسانی به محیط‌زیست 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 محیط‌زیست به حساب می‌آیند (Ananth, et al., 2014). بنابراین آلودگی اکوسیستم‌های آبی به فلزات سنگین می‌تواند از طریق بررسی آب، رسوبات و موجودات زنده و همچنین طیف وسیعی از شاخص‌های 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 دارا می‌باشد. تغییرات پوشش سطح زمین ناشی از دو عامل انسانی و تغییرات محیطی است؛ سنجش و ارزیابی میزان این تغییرات می‌تواند کمک شایانی به یافتن علل تغییرات کیفیت منابع آبی بکند، 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 ماهواره‌ای لاندسات و اکوواکه 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 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 MODIS¹ (محصول MCD12Q1) برای بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ استفاده گردید، لذا تلفیق فناوری سنجش از دور و داده‌های آزمایشگاهی از نوآوری پژوهش حاضر می‌باشد.

¹. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

با توجه به اهمیت بررسی اثرات تغییرات کاربری زمین بر کیفیت محیط زیست، به ویژه در نواحی رودخانه‌ای، مطالعات متعددی در سطح جهان و ایران به بررسی غلظت فلزات سنگین در اکوسیستم‌های آبی و پیامدهای زیست محیطی 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 آلودگی² (PLI) و شاخص تجمع جغرافیایی³ (Igeo) پرداختند نتایج تحقیق نشان داد غلظت فلزات سنگین در سایت‌های پایین دست به علت دفع زباله‌های شهری، پساب‌های تصفیه نشده از صنایع مختلف و فعالیت‌های زیاد کشاورزی بیش از حد 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 نیتрат 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 ژئوشیمیایی و پراکنش فلزات سنگین مس، روی، سرب و نیکل در محدوده منطقه آزاد تجاری و صنعتی رودخانه ارس پرداختند نتایج نشان‌دهنده غلظت بیشتر فلز مس در رسوبات و گیاهان بود. ایستگاه‌های مورد بررسی به جز سنک استپانوس به فلز مس به شدت آلوده بودند که احتمالاً ناشی از فعالیت‌های معدن کاوی 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 WHO⁴ 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 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 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. (Siddiqui and Pandey. (2019) در تحقیقی ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در آب و رسوبات سطحی جهت ارزیابی خطرات زیست محیطی رودخانه گانگا در کشور هند پرداختند آن‌ها هشت فلز سنگین (Mn, Fe, Zn, Pb, Ni, Cu, Cd, Cr) در رسوبات آب و بستر در طول رودخانه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد غلظت Cu, Ni, Pb, Cd, Cr و Fe در آب از حد متناظر آن‌ها در وسط و پایین رودخانه فراتر رفته است و باعث ایجاد خطرات زیست محیطی زیادی خواهد شد.

(Zhang et al. (2019) در تحقیقی به بررسی کیفیت آب رودخانه سیردریا در کشور قزاقستان در بخش کشاورزی به مطالعه پرداختند. برای این کار 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.

2. pollution load index

3. Geoaccumulation index

4. World Health Organization

Cengiz et al. (2017) به ارزیابی فلزات سنگین در آب رودخانه بوگاکای در ترکیه پرداختند 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 قرار دادند نتایج نشان داد کیفیت آب در انتهای رودخانه نسبت به ابتدا و وسط رودخانه به علت گذشتن از مناطق شهری در حال کاهش است.

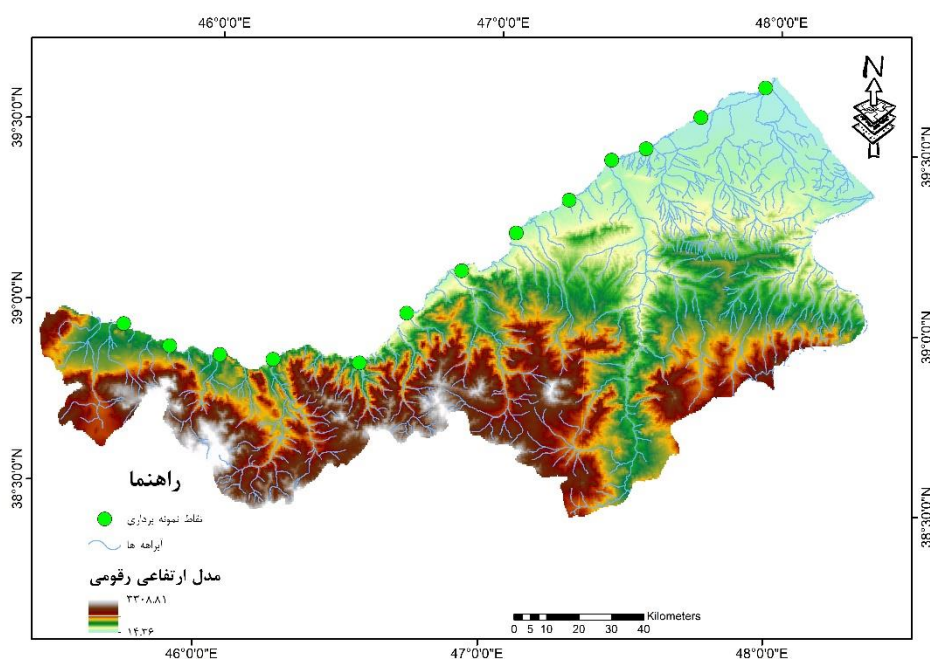
مروری بر پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که جای یک پژوهش نسبتاً جامع که از یکسو تغییرات پوشش سطح زمین و از سوی دیگر تغییرات کیفیت آب را مورد سنجش قرار دهد، تقریباً خالی است، لذا دستیابی به این مهم از اهداف پژوهش حاضر می‌باشد.

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 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 خداآفرین 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 برداشت‌شده به کمک GPS^۱ 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.



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

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

^۱. Global Positioning System

به علاوه به جهت اطمینان از انتخاب مکان مناسب، با مراجعه به سازمان های ذی ربط نظیر منابع طبیعی، اداره کل محیط زیست، شیلات و آب منطقه ای در خصوص محل های ورود منابع آلاینده به رودخانه ارس و امکان دسترسی به ایستگاه ها، هر یک از ایستگاه های منتخب بررسی و تائید نهایی صورت گرفت. جدول (۱)، نام و مشخصات ایستگاه های مورد مطالعه را نشان می دهد. شکل شماره ۲ نیز جهت مستندسازی از آنالیز نمونه آورده شده است.

جدول ۱. محل ایستگاه های نمونه برداری در رودخانه ارس

Table 1. Location of sampling stations in the Aras River

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



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

روش‌شناسی پژوهش

این تحقیق از نوع کاربردی و مقطعی به روش پیمایشی و از طریق نمونه‌برداری و انجام مطالعات آزمایشگاهی و استفاده از تصاویر سنجش از دور (سنجده 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 به‌عنوان 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 برداشت‌شده 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 سنجده مادیس در بازه‌ی زمانی (۲۰۲۴-۲۰۰۱) استفاده شد.

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) برداشت 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 ICP⁶ OES⁷ -مدل OES-730 آنالیز شد.

¹. Inductively Coupled Plasma

². Optical Emission Spectrometry

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 سربدار، 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، هوازگی 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

جهت ارزیابی تغییرات پوشش سطح زمین، از تصاویر ماهواره‌های ترا و آکوا، 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 پرداخته می‌شود تا روندهای بلندمدت و پیامدهای زیست‌محیطی آن‌ها به‌طور دقیق‌تری شناسایی گردد.

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 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. به عنوان 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. به عنوان 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. به عنوان مثال، افزایش سطح دریاها 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 بیش از حد 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.

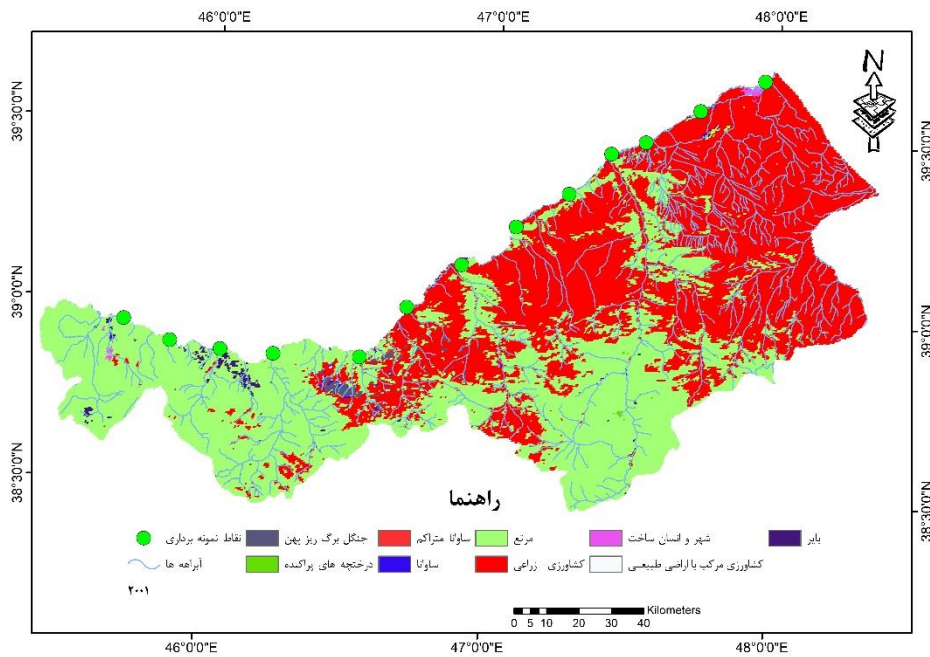
اهمیت بررسی تغییرات در بازه‌های زمانی مختلف:

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.

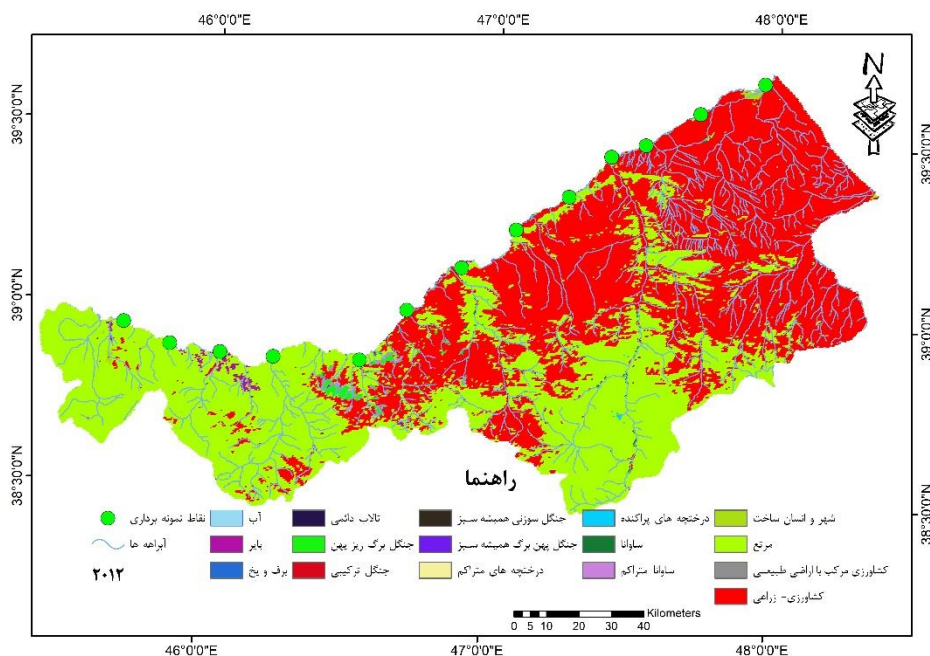
تدوین استراتژی‌های مدیریتی: با درک اثرات تغییرات در بازه‌های زمانی مختلف، می‌توان استراتژی‌های مدیریتی مؤثرتری برای حفظ و بهبود کیفیت آب تدوین کرد. این استراتژی‌ها می‌تواند شامل اقداماتی مانند مدیریت رواناب، حفاظت از خاک، احیای پوشش گیاهی و توسعه پایدار باشد.

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.



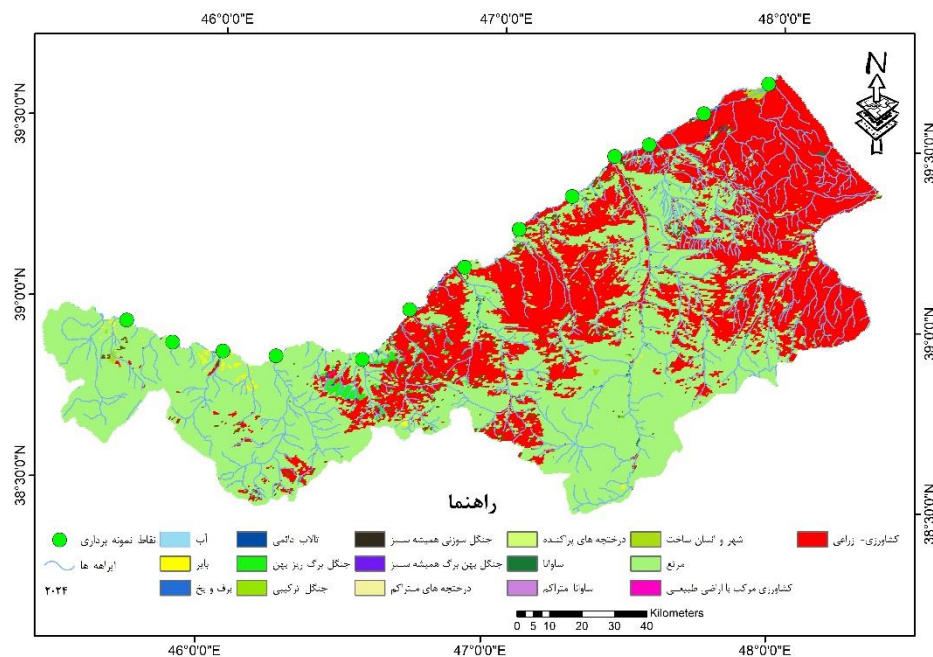
شکل ۳. نقشه‌ی پوشش سطح زمین در سال ۲۰۰۱
Figure 3. Land cover map in 2001

شکل شماره ۴، پوشش سطح زمین در سال ۲۰۱۲ را نشان می‌دهد، سطح زراعی 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 زراعی و کشاورزی اضافه شده است.



شکل ۴. نقشه‌ی پوشش سطح زمین در سال ۲۰۱۲
Figure 3. Land cover map in 2012

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 کیلومتر مربع) رسیده و در عوض مراتع با رشد نسبتاً زیاد به حدود ۵۷ درصد (۸۱۴۳ کیلومتر مربع) رسیده‌اند.



شکل ۵. نقشه‌ی پوشش سطح زمین در سال ۲۰۲۴

Figure 3. Land cover map in 2024

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 مرزاد، 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 مرزاد 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 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 مرزاد، امامزاده شعیب (روستای دوزال) و روستای باقراغلو و کمترین میزان در سایر ایستگاه‌ها مشاهده شده است. بیشترین میزان نیکل در ایستگاه روستای مرزاد 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.

جدول ۵. میزان غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در آب رودخانه ارس اردیبهشت ۱۴۰۳ (ppb)

Table 5. Concentration levels of heavy metals measured in the Aras River water in May 2024 (ppb)

فلزات سنگین Heavy Metal						ایستگاه Station
نیکل Nickel (Ni)	کروم Chromium (Cr)	جیوه Mercury (Hg)	آرسنیک Arsenic (As)	کادمیم Cadmium (Cd)	سرب Lead (Pb)	

<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

بر اساس جداول نهایی آنالیز آب در مردادماه (جدول ۶) بیشترین میزان سرب در ایستگاه دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان (۳۰) و کمترین میزان آن در ایستگاه‌های روستای بویدوز، روستای داودان بالا، روستای باقراغلو و شهر پارس‌آباد مشاهده گردیده است. میزان کادمیوم آرسنیک، جیوه، کروم و نیکل در تمامی ایستگاه‌ها یکسان بوده است.

جدول ۶: میزان غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در آب رودخانه ارس مرداد ۱۴۰۳ (ppb)

Table 6. Concentration levels of heavy metals measured in the Aras River water in August 2024 (ppb)

فلزات سنگین Heavy Metals	ایستگاه Station	سرب Lead (Pb)	کادمیوم 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

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 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 قابل تشخیص 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.

جدول ۷. میانگین مقادیر مربوط به هریک از فلزات سنگین در دو ماه نمونه‌برداری (ppb)

Table 7. Average concentrations of each heavy metal in the two sampling months (ppb)

فلزات سنگین Heavy Metals	سرب Lead (Pb)	کادمیم Cadmium (Cd)	آرسنیک Arsenic (As)	جیوه Mercury (Hg)	کروم Chromium (Cr)	نیکل Nickel (Ni)
ایستگاه Station						
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 قابل‌ملاحظه قرار دارد. کروم (Cr): غلظت کروم در رودخانه ارس (10.96 $\mu\text{g/l}$) به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کمتر از همه قاره‌ها به‌جز 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، رودخانه تحلیل جدول ۸، که غلظت عناصر سنگین در رودخانه ارس را با میانگین‌های منطقه‌ای رودخانه‌ها و دریاچه‌های موجود در قاره‌های مختلف جهان مقایسه می‌کند که بر اساس این جدول، 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 قابل‌توجهی 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 قابل‌توجهی بالاتر از قاره‌های آمریکای شمالی و جنوبی می‌باشد. این مقدار نشان می‌دهد رودخانه ارس 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 است، 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 با توجه به تجمع زیستی آن در زنجیره غذایی. سرب (Pb): میزان سرب در رودخانه ارس (20.77 $\mu\text{g/l}$) 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 رودخانه ارس است. نیکل (Ni): غلظت نیکل در رودخانه ارس (11.73 $\mu\text{g/l}$) 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.

جدول ۸. 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 8. 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)

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

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 نه تنها 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 می‌نماید.

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 mg/L) تا 0.2 mg/L و همچنین مقدار مجاز در بافت ماهیان طبق FAO/WHO (1.4 mg/L) می‌باشد. همچنین این مقدار پایین‌تر از حد مجاز سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده (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 کادمیوم (Cd) اندازه‌گیری شده در رودخانه برابر با 0.0119 mg/L است که به‌طور معنی‌داری بالاتر از حد مجاز استاندارد EPA برای آبزیان (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 آبزیان 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 آبزیان 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 آبزیان است، و با توجه به خاصیت تجمع زیستی بالای جیوه، 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) و 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 آبزیان (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 (5.5 mg/L) و استاندارد EPA برای آبزیان (0.052 mg/L) است. از این منظر، نیکل در رودخانه ارس در محدوده ایمن قرار دارد.

جدول ۹. مقایسه میانگین برخی فلزات سنگین رودخانه ارس با مقادیر برخی استانداردهای بین‌المللی و استانداردهای ایران (واحد‌ها برحسب میلی‌گرم بر لیتر)

Table 9. 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; Radkhah et al., 2022; Drechsel et al., 2023)

تحقیق حاضر (present study on the Aras River)	حد مجاز آب‌های سطحی برای حفاظت از آبزیان EPA (2024), (2022) (Surface water quality standard for aquatic life protection (EPA, 2024 & 2022))	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)	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)	حد مجاز آب سطحی برای آشامیدنی دام و طیور (استاندارد ملی شماره ۱۲۹۶۸ ایران) Maximum allowable concentration in surface water for livestock and poultry drinking (Iran National Standard No. 12968)	استاندارد کیفیت آب‌های سطحی برای آبیاری کشاورزی (سازمان محیط زیست ایران، ۱۳۹۵) Surface water quality standard for agricultural irrigation (Iran DOE, 2016)	مقایسه استانداردهای فلزات سنگین (mg/l) Heavy Metal Standards Comparison (mg/l)
0.0111	0.150	1.4	0.1	0.2	0.1	آرسنیک Arsenic (As)
0.0109	0.011	1	0.1	1	0.1	کروم Chromium (Cr)
0.0119	0.00025	0.05	0.01	0.05	0.01	کادمیم Cadmium (Cd)
0.01	0.00077	0.0005	0.01	0.01	-	جیوه Mercury (Hg)
0.0207	0.0025	0.5	5	0.05- (دام) - (0.1 دام) - (0.1 (livestock) - 0.05 (poultry)) طیور)	1	سرب Lead (Pb)
0.0117	0.052	0.05 – 5.5	0.2	1	0.2	نیکل Nickel (Ni)

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 محیط زیست 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 می‌باشد:

۱. ایجاد نظام پایش مستمر کیفی آب با استفاده از حسگرهای سنجش از دور 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 به‌دلیل همکاری در جمع‌آوری نمونه‌های آب از رودخانه ارس، سپاسگزاری به عمل می‌آید.

References

- Ananth, S., Mathivanan, V., Aravindh, 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>

Kükrer, 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., Dolenec, T., Šmuc, N. R., Dolenec, 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>