Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Autumn 2025, Vol. 15 (3): 205 - 221

Research Article

Assessment of Heavy Metal Contamination in the Sediments of the Karun River Using Satellite Images and Geochemical Analysis

Danya Karimi[1]*, Fatemeh Rastmanesh[1], Fatemeh Nakhili Nezhad[1]

1- Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Keywords: *Heavy Metals, Karun River Sediments, Remote Sensing, Satellite Image Fusion, Environmental Pollutions.*

1- Introduction

Heavy metal contamination in aquatic environments has become a pressing environmental concern, largely due to the toxic, persistent, and bioaccumulative nature of these elements (Ahmed et al., 2024; Arnous & Hassan, 2015). Rivers exposed to discharges from industrial operations, urban development, and agricultural runoff frequently exhibit elevated levels of hazardous metals such as arsenic (As), lead (Pb), nickel (Ni), chromium (Cr), copper (Cu), zinc (Zn), iron (Fe), and manganese (Mn). The Karun River, as one of Iran's primary freshwater sources, is notably vulnerable, particularly due to the rapid pace of industrial and urban expansion in and around the city of Ahvaz.

While conventional field sampling remains a robust method for detecting contamination, it often lacks the temporal and spatial coverage required for large-scale assessments. Recent advances in satellite remote sensing offer powerful alternatives, enabling the integration of spatially continuous imagery with geochemical data to support more comprehensive environmental monitoring.

2- Materials and methods

2-1- Study Area

Located in southwestern Iran, the Karun River serves as a critical water source for agriculture, industry, and urban consumption. Sediment samples were collected from 10 strategically selected stations (S1-S10) in February 2024, based on their proximity to major pollution sources, including industrial zones, residential areas, and farmlands.

2-2- Sediment Sampling and Laboratory Analysis

Surface sediments from each station were collected under standardized conditions, stored appropriately, and analyzed using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). Concentrations of eight metals, including As, Pb, Ni, Cr, Cu, Zn, Fe, and Mn, were quantified.

2-3- Satellite Data Collection and Processing

Remote sensing data were obtained from Landsat 8 (OLI/TIRS) and Sentinel-2 (MSI) platforms for the sampling timeframe. Preprocessing included geometric and atmospheric corrections, followed by co-registration. Specific band combinations and spectral indices were employed to extract reflectance features relevant to sediment metal content.

* Corresponding author: : d.karimi@scu.ac.ir
DOI: 10.22055/aag.2025.50196.2525
Received: 2025-07-23
Accepted: 2025-12-17

ISSN: 2717-0764

2-4- Image Fusion Techniques

To enhance spatial and spectral clarity, four image fusion techniques were applied: Gram-Schmidt Transformation (GST), Brovey Transformation (BT), Principal Component Spectral Sharpening (PC), and NNDiffuse Pan Sharpening (NND) (Pohl & Van Genderen, 2016). Their effectiveness was evaluated based on their predictive performance for heavy metal concentration mapping.

2-5- Statistical Analysis and Spatial Modeling

Pearson correlation coefficients were computed to explore the relationships between satellite band values and metal concentrations. Regression models were then constructed, and their accuracy assessed using Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE). Spatial distribution maps for each metal were generated based on the highest-performing model and imagery set

3- Results and discussions

3-1- Heavy Metal Levels Across Sampling Sites

Metal concentrations varied substantially across stations and, in many cases, exceeded natural background levels:

- As: 7.4 to 16.1 ppm (background: 2.5 ppm)
- Pb: 6 to 12 ppm (background: 5.3 ppm)
- Ni: 32 to 74 ppm (background: 41 ppm)
- Cr: 14 to 26 ppm (background: 34 ppm)
- Cu: 6 to 12 ppm (background: 11.1 ppm)
- Zn: 49 to 119 ppm (background: 28 ppm)
- Fe: 13,461 to 24,186 ppm (background: 11,000 ppm)
- Mn: 336 to 495 ppm (background: 353 ppm)

Stations located near urban and industrial regions (e.g., S2, S5, S10) exhibited notably higher contamination, suggesting localized pollution hotspots.

3-2- Spectral Correlations with Metal Concentrations

Significant correlations emerged between satellite spectral bands and certain heavy metal concentrations. Sentinel-2 Band 3 (green) demonstrated strong relationships with Zn, Fe, and Ni, indicating its potential utility in sediment contamination assessment. Among the fusion techniques, BTM PCM and NND methods frequently yielded stronger correlations.

3-3- Predictive Accuracy and Validation

Regression models using fused images often outperformed those relying on individual spectral bands:

- Best RMSEs: Cr (0.30), Ni (0.10), Zn (0.27), Mn (0.56), Pb (0.027), Cu (0.11), As (0.028), Fe (14.06).
- Best MAEs: Cr (0.20), Ni (0.08), Zn (0.02), Mn (0.96), Pb (0.045), Cu (0.13), As (0.020), Fe (24.83).

Image fusion proved particularly effective for Zn, Pb, Cu, and As, whereas original bands provided more accurate predictions for Fe, Cr, Mn, and Ni. Sentinel-2 data consistently outperformed Landsat 8, primarily due to its higher spatial resolution.

3-4- Spatial Trends and Source Attribution

The distribution maps highlighted concentrated areas of contamination near industrial complexes, urban zones, and farmland. These patterns strongly suggest that industrial discharges, urban runoff, and agricultural inputs are the principal contributors to sediment contamination.

4- Conclusion

This study demonstrates the efficacy of integrating satellite remote sensing with traditional geochemical analysis to assess sediment contamination in complex environments. Key insights include:

ISSN: 2717-0764
CC BY

- Satellite imagery, especially when enhanced through image fusion, provides a reliable means of predicting heavy metal concentrations, reducing reliance on exhaustive field surveys.
- Fusion techniques, such as Brovey, significantly improved spatial accuracy for metals such as Zn, Pb, Cu, and As.
- Sentinel-2 imagery outperformed Landsat 8 in resolution and correlation strength.
- Environmental remediation efforts should prioritize contamination hotspots, particularly in industrial regions near Ahvaz.
- The methodology presented here is scalable and can be applied to other river systems for ongoing environmental monitoring and policy support.

5- References

Ahmed, A.H., Al-Abyadh, M., Muthanna, F.M., 2024. Investigation of Toxic Metals Pollution in Water, Sediment, and Fish at Al-Hodeidah City, Red Sea Coast of Yemen. International Journal of Multidisciplinary Sciences and Arts 3, 278-288. https://doi.org/10.47709/ijmdsa.v3i01.3662

Arnous, M.O., Hassan, M.A., 2015. Heavy metals risk assessment in water and bottom sediments of the eastern part of Lake Manzala, Egypt, based on remote sensing and GIS. Arabian Journal of Geosciences 8, 7899-7918.

Pohl, C., Van Genderen, J.L., 2016. Remote sensing image fusion: a practical guide. https://doi.org/10.1201/9781315370101

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Karimi, D., Rastmanesh, F., Nakhili Nezhad, F., 2025. Assessment of Heavy Metal Contamination in the Sediments of the Karun River Using Satellite Images and Geochemical Analysis. Adv. Appl. Geol. 15 (3), 205-221.
DOI: 10.22055/aag.2025.50196.2525
https://aag.scu.ac.ir/article_20453.html

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه کارون با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل ژئوشیمیایی

دانیا کریمی
گروه سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
فاطمه راست منش
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
فاطمه نخیلی نژاد
دانش آموخته گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
d.karimi@scu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی میزان آلودگی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه کارون، یکی از منابع حیاتی آب شیرین ایران، انجام شد. برای این منظور، ده نمونه رسوب با در نظر گرفتن فاصله از مراکز صنعتی و مناطق شهری جمع‌آوری گردید. غلظت هشت فلز سنگین شاملَ As (۷/۴ تا ۱۶/۱ppm)، Pb (۶ تا ۱۲ppm) ، Ni (۳۲ تا ۷۴ ppm) ، Cr (۱۴ تا ۲۶ ppm)، Cu (۶ تا ۱۲ ppm) ، Zn (۴۹ تا ۱۱۹ ppm) ، Fe (۱۵/۴۹ تا ۲۴/۱۸۶ ppm) و Mn (۳۳۶ تا ۴۹۵ ppm) اندازه‌گیری شد. برای ترسیم نقشه‌های توزیع مکانی این فلزات، از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، سنتینل-۲ و تلفیق داده‌های این دو سنجنده استفاده گردید. برای تولید مدل‌های پیش‌بینی مناسب، همبستگی میان باندهای طیفی تصاویر و غلظت فلزات سنگین بررسی شد. دقت مدل‌ها ترتیب برای Zn، Ni، Fe، Cr، As، Pb، Cu و Mn به میزان ۰/۲۶۹۶، ۰/۱۰۱۴، ۱۴/۰۶۷۶، ۰/۳۰۱۷، ۰/۰۲۸۵، ۰/۰۲۷۳، ۰/۱۱۰۷ و ۰/۵۶۴۲ محاسبه شد که نشان‌دهندهٔ پتانسیل بالای داده‌های ماهواره‌ای در تحلیل آلودگی‌های محیطی است. در مورد عناصر Zn، Pb، Cu و As، تلفیق تصاویر ماهواره‌ای، و برای عناصر Ni، Fe، Cr و Mn، استفاده از تصاویر اصلی نتایج پهنه‌بندی دقیق‌تری ارائه داد. یافته‌ها نقش مؤثر تخلیه فاضلاب‌های صنعتی و رواناب‌های کشاورزی را در افزایش سطح آلودگی رسوبات نشان می‌دهند و بر ضرورت اتخاذ راهبردهای مدیریتی مؤثر تأکید دارند. درنهایت، نتایج، کاربرد ترکیبی سنجش‌ازدور و اندازه‌گیری‌های زمینی را به‌عنوان رویکردی کارآمد برای پایش آلودگی فلزات سنگین در اکوسیستم‌های آبی برجسته می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: *فلزات سنگین، رسوبات رودخانه کارون، سنجش‌ازدور، تلفیق تصاویر ماهواره‌ای، آلودگی‌های محیطی.*

۱-مقدمه

آلودگی زیست‌بوم‌های آبی با فلزات سنگین یکی از چالش‌های جدی برای محیط‌زیست و سلامت انسان به شمار می‌رود (Rastmanesh et al., 2024; Jolaosho et al., 2024; Zeb et al., 2024; Sojka and Jakula, 2022; Zhang et al., 2021; Ali et al., 2022; Wang et al., 2022; Miranda et al., 2021; Pandiyan et al., 2021). این فلزات به دلیل زیست تخریب ناپذیر بودن، می‌توانند برای مدت‌زمان طولانی در محیط باقی بمانند و درنتیجه در رسوبات و جانداران انباشته شوند. رودخانه‌ها، به‌عنوان بخش‌های پویا از سامانه‌های آبی، به‌واسطهٔ دریافت پساب‌های صنعتی، رواناب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های شهری در معرض آلودگی قابل‌توجهی قرار دارند.

فلزاتی مانند Pb، As و Cr به دلیل سمیّت زیاد، خاصیت تجمع در زنجیره غذایی و پایداری در محیط، از مهم‌ترین نگرانی‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شوند. تماس مداوم با این عناصر می‌تواند موجب بروز مشکلات جدی سلامتی ازجمله اختلالات عصبی، آسیب به اندام‌های داخلی و حتی بروز برخی سرطان‌ها شود (Rahim et al., 2024). حضور این آلاینده‌ها

در اکوسیستم‌های آبی، تعادل زیستی را مختل می‌کند، بر جانداران آبزی تأثیر منفی می‌گذارد و درنهایت، جوامعی را که به این منابع وابسته هستند با تهدیداتی روبرو می‌سازد.

روش‌های سنتی برای سنجش آلودگی فلزات سنگین، عمدتاً متکی بر نمونه‌برداری میدانی و آزمایش‌های دقیق آزمایشگاهی هستند. باوجود دقت بالا، این روش‌ها هزینه‌بر، زمان‌گیر و محدود به مناطق خاص‌اند. در این میان، فناوری‌های نوین سنجش‌ازدور به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پایش زیست‌محیطی مطرح شده‌اند. بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای باکیفیت بالا، امکان رصد مناطق گسترده با هزینه‌ای کمتر و به‌صورت مداوم را فراهم می‌سازد. تحلیل طیفی داده‌های ماهواره‌ای، قابلیت شناسایی الگوهای آلودگی و پیش‌بینی نقاط بحرانی را دارد و در مدل‌سازی داده‌های محیطی نقش بسزایی ایفا می‌کند.

تحقیقات متعددی در زمینهٔ کاربرد سنجش‌ازدور برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین انجام شده است (برای مثال Fu et al., 2024; Jiji, 2024; Lin et al., 2024; Lovynska et al., 2024; Wang et al., 2024; Singh, 2024; Oyege et al., 2024; Ahmed et al., 2024). به‌عنوان نمونه، Choe و همکاران (۲۰۰۸) از تصاویر فوق طیفی HyMAP برای بررسی آلودگی خاک استفاده کردند. آن‌ها بین ویژگی‌های جذب طیفی (مانند گروه‌های OH شبکه‌ای و اکسیژن موجود بر سطح کانی‌ها) و غلظت فلزاتی نظیر Pb، Zn و As ارتباط برقرار کردند. این پژوهشگران نشان دادند که پارامترهایی مانند نسبت باند ۶۱۰ به ۵۰۰ نانومتر در ناحیه VNIR، مساحت جذب در باند ۲۲۰۰ نانومتر و شاخص عدم تقارن جذب، همبستگی بالایی با غلظت فلزات نشان می‌دهند. این ویژگی‌های طیفی از طریق رگرسیون خطی چندگانه ارزیابی شدند و نتایج آن‌ها با نقشه‌های ژئوشیمیایی مطابقت داشت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تصاویر فوق طیفی می‌توانند ابزاری مؤثر در شناسایی آلودگی فلزات سنگین باشند، گرچه برای نقشه‌برداری دقیق‌تر، باید تفاوت‌های طیفی و مکانی میان داده‌های زمینی و ماهواره‌ای اصلاح شوند.

در مطالعه‌ای دیگر، Arnous و Hassan (۲۰۱۵) با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای ASTER، آلودگی فلزات سنگین در آب و رسوبات دریاچه شرقی منزالا (ELM) را ارزیابی کردند. عناصر بررسی‌شده شامل Zn، Cd، Cu، Mn و Pbبودند. تحلیل‌های زمین‌آماری و نقشه‌برداری مکانی مبتنی بر GIS، برای ارزیابی سطوح آلودگی و بررسی تأثیرات فعالیت‌های انسانی مورداستفاده قرار گرفتند. یافته‌ها نشان دادند که ورود فاضلاب‌های صنعتی، کشاورزی و خانگی، غلظت فلزات سنگین را به‌طور چشمگیری افزایش داده و از حدود مجاز فراتر برده است. این آلودگی‌ها تأثیر منفی بر اکوسیستم، زنجیره‌های غذایی و زندگی جوامع اطراف داشته‌اند. بر اساس نتایج، اجرای برنامه‌های آگاه‌سازی، پایش منظم و تدوین سیاست‌های مدیریتی پایدار امری ضروری به نظر می‌رسد.

در پژوهشی دیگر، Taghizadeh-Mehrjardi و همکاران (۲۰۲۱) از مدل جنگل تصادفی (Random Forest) برای پیش‌بینی توزیع زمانی و مکانی فلزات سنگین در خاک مناطق خشک ایران استفاده کردند. آن‌ها با بهره‌گیری از تصاویر لندست و داده‌های خاک سال ۲۰۱۶، به مقادیر R^2 برابر با ۰/۴۱ برای Ni و ۰/۶۰ برای Zn دست یافتند. نقشه‌های تولیدشده، تنوع زیادی را در توزیع مکانی نشان دادند. برای نمونه، طی دوره ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۶، غلظت Pb از ۱/۵ به ۲ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش یافت. این نتایج نشان‌دهندهٔ اهمیت مدل‌های یادگیری ماشین در شناسایی منابع آلودگی و طراحی راهبردهای کاهش مخاطرات زیست‌محیطی است.

ترکیب داده‌های سنجش‌ازدور با تحلیل‌های آزمایشگاهی، رویکردی جامع برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین فراهم می‌سازد. پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل-۲، همراه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌های رسوب، به بررسی توزیع مکانی فلزات سنگین در بستر رودخانه کارون می‌پردازد. هدف اصلی، شناسایی نقاط بحرانی آلودگی و ارزیابی قابلیت‌های سنجش‌ازدور در پایش زیست‌محیطی است. نوآوری این پژوهش، به‌کارگیری هم‌زمان روش‌های کلاسیک تلفیق تصاویر (GST، BT وBrovey) و روش نوین تلفیق مبتنی بر شبکه (NNDiffuse) به‌منظور تولید داده‌های با ویژگی‌های مکانی و طیفی جدید برای نگاشت مستقیم فلزات سنگین در رسوبات رودخانه است؛ رویکردی که در ادبیات پیشین به‌ندرت گزارش شده و می‌تواند ظرفیت‌های بالای فناوری سنجش‌ازدور را در پایش اکوسیستم‌های تحت فشارهای انسانی برجسته سازد. یافته‌های به‌دست‌آمده می‌توانند در تدوین راهبردهای مدیریتی پایدار برای حفاظت از منابع آبی و بهبود وضعیت زیست‌محیطی منطقه مؤثر باشند.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-منطقه موردمطالعه

رودخانهٔ کارون که در جنوب غربی ایران جریان دارد، بزرگ‌ترین رودخانه کشور به شمار می‌رود و نقشی حیاتی در تأمین آب کشاورزی، صنعتی و خانگی منطقه ایفا می‌کند. برای انجام نمونه‌برداری، بخشی از این رودخانه انتخاب شد که در بازه‌ای بین عرض‌های جغرافیایی "۶/۳۴ ‘۳۱ °۱۶ تا "۲۷/۰۳۶ ‘۳۱ °۲۳ شمالی و طول‌های جغرافیائی "۳۰/۵۲ ‘۴۸ °۳۷ تا "۲۰/۸ ‘۴۸ °۴۵ شرقی قرار دارد (شکل ۱).

در تاریخ ۳ بهمن ۱۴۰۳، ده نمونه از رسوبات سطحی (عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر) از ایستگاه‌هایی در نقاط مختلف این بخش از رودخانه جمع‌آوری شد. ایستگاه‌های نمونه‌برداری (S1 تا S10) با در نظر گرفتن نزدیکی آن‌ها به مناطق صنعتی و شهری انتخاب شدند، تا بتوان محدوده‌های بالادست و پایین‌دست رودخانه را به‌طور هم‌زمان موردبررسی قرار داد و تصویری جامع‌تر از وضعیت آلودگی در طول مسیر رودخانه به دست آورد (جدول ۱).

برای ترسیم نقشه‌های توزیع مکانی فلزات سنگین، حاشیه‌ای حفاظتی (Buffer) به شعاع تقریبی ۳۰ متر از بستر رودخانه تعریف شد. این محدوده با توان تفکیک مکانی تصاویر ماهواره‌ای مورداستفاده در این مطالعه تطابق دارد و امکان تحلیل دقیق‌تر توزیع آلودگی را فراهم می‌سازد.

۲-۲-تصاویر ماهواره‌ای

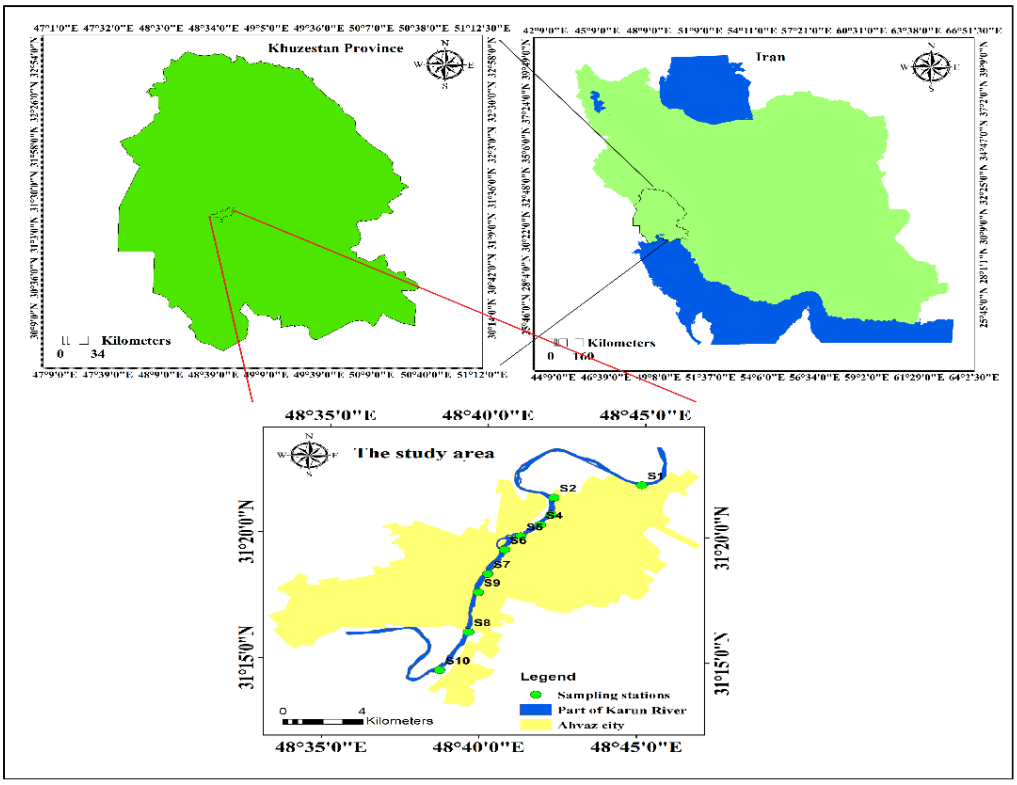
در این پژوهش، داده‌های ماهواره‌ای مربوط به لندست ۸ و سنتینل-۲ با تاریخ ۶ بهمن ۱۴۰۲ (مصادف با ۲۵ ژانویه ۲۰۲۴) برای بررسی الگوهای مکانی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه مورداستفاده قرار گرفتند. هر دو ماهواره، تصاویر با وضوح مکانی نسبتاً بالا ارائه می‌دهند که این امکان را فراهم می‌سازد تا شرایط زیست‌محیطی رودخانه با دقت بیشتری تحلیل شوند.

باندهایی از این دو سنجنده که همبستگی بالایی با غلظت فلزات سنگین نشان داده‌اند، انتخاب شده‌اند تا مدل‌هایی قابل‌اعتماد در زمینهٔ پیش‌بینی مکانی تولید شود.

ماهواره سنتینل-۲ که توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) در ۲۳ ژوئن ۲۰۱۵ به فضا پرتاب شد، دارای قابلیت تصویربرداری چند طیفی در ۱۳ باند است و طیف‌های مرئی، مادون‌قرمز نزدیک (NIR) و مادون‌قرمز کوتاه موج (SWIR) را با وضوح‌های ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر پوشش می‌دهد. وجود دو ماهواره هم‌زمان (A و B) باعث شده است که زمان بازدید مجدد به کمتر از یک هفته برسد؛ ویژگی‌ای که این سنجنده را برای پایش پدیده‌های محیط‌زیستی بسیار مناسب کرده است (Karimi et al., 2017a, b; Rangzan et al., 2019, 2020 a, b, 2022a, b, c, 2023; Zareie et al., 2024).

در این مطالعه، از باندهای ۴، ۳ و ۲ با وضوح ۱۰ متر جهت بررسی غلظت فلزات سنگین بهره گرفته شد. همچنین باند ۸ سنتینل ـ۲ به‌منظور حذف پیکسل‌های خشکی و جداسازی نواحی آبی به کار رفت (https://browser.dataspace.copernicus.eu/).

ماهواره لندست ۸ نیز که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) به فضا پرتاب شده، در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری قرار دارد و سطحی به عرض ۱۸۵ کیلومتر را پوشش می‌دهد. این ماهواره دارای دو حس‌گر اصلی به نام‌های OLI (تصویربردار عملیاتی زمینی) و TIRS (حس‌گر حرارتی فروسرخ) است که اطلاعات را در ۱۱ باند جمع‌آوری می‌کنند. هشت باند دارای وضوح ۳۰ متر، یک باند پانکروماتیک با وضوح ۱۵ متر، و دو باند حرارتی با وضوح ۱۰۰ متر هستند. در این پژوهش، از باندهای ۴، ۳ و ۲ تصویر لندست ۸ با وضوح ۳۰ متر جهت تحلیل روند فلزات سنگین استفاده شد (https://earthexplorer.usgs.gov/).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه

Fig. 1. Geographical location of the study area

۲-۳-تلفیق تصاویر

هدف از تلفیق داده‌های ماهواره‌ای، ترکیب اطلاعات مکمل از حس‌گرهای مختلف به‌منظور تولید تصاویری است که نسبت به تصاویر اولیه، غنی‌تر و دارای اطلاعات مفیدتری باشند. تلفیق معمولاً در سه سطح انجام می‌شود: پیکسل، ویژگی (Feature)، و تصمیم‌گیری (Decision level) (Singh et al., 2023; Javan et al., 2021; Ghassemian, 2016).

در این تحقیق، از روش‌های تلفیق در سطح پیکسل استفاده شده است؛ یعنی داده‌ها در ابتدایی‌ترین مرحله پردازش با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در این مرحله، پارامترهای فیزیکی مربوط به هر پیکسل با هم ادغام می‌شوند، به‌شرط آن‌که تصاویر از نظر هندسی هم‌تراز شده (Co-registered) باشند.

برای اطمینان از هم‌خوانی ابعاد، مختصات و اندازه پیکسل‌ها، تصحیحات هندسی و اتمسفری به‌صورت کامل انجام شده‌اند؛ زیرا عدم دقت در این مرحله می‌تواند خطاهای چشم‌گیری در تحلیل نهایی ایجاد کند (Pohl and Van Genderen, 2016).

نتیجه این رویکرد، تولید تصویر نهایی‌ای است که از نظر وضوح مکانی، طیفی یا زمانی بهینه‌تر بوده و برای تحلیل‌های دقیق‌تر، ازجمله شناسایی الگوهای توزیع آلودگی و ارزیابی پارامترهای محیط‌زیستی مناسب‌تر خواهد بود.

در این پژوهش، چهار روش اصلی تلفیق به کار رفته‌اند (Pohl and Van Genderen, 2016):

- Gram-Schmidt Transformation (GST)
- Brovey Transformation (BT)
- Principal Component Spectral (PC) Sharpening
- NNDiffuse Pan Sharpening

جدول ۱، فهرست اختصارات مورداستفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تعریف مخففهای بکار رفته در تحقیق فعلی
Table 1. List of acronyms and their definitions used in the present research

Acronym	Definition
L8_Bx	Landsat 8 Band (e.g., B2, B3, B4)
S2B_Bx	Sentinel-2 Band (e.g., B2, B3, B4)
GST_Bx	Gram-Schmidt Transformation Band
PC_Bx	Principal Component Analysis Band
BT_Bx	Brovey Transformation Band
NND_Bx	NNDiffuse Pan Sharpening Band

۲-۴-معیارهای کیفیت رسوب (SQGs)

برای ارزیابی وضعیت آلودگی فلزات سنگین در رسوبات و تعیین خطر بالقوه برای موجودات آبزی، از معیارهای کیفیت رسوب (Sediment Quality Guidelines; SQGs) استفاده شد. این روش بر پایه دو شاخص TEL و PEL بنا شده است.

TEL نشان‌دهنده غلظتی است که در آن اثرات سوء به‌ندرت مشاهده می‌شود و به‌عنوان آستانه حداقل خطر شناخته می‌شود. PEL غلظتی را نشان می‌دهد که احتمال وقوع اثرات نامطلوب بر موجودات آبزی بالا بوده و معمولاً با بروز اثرات جانبی همراه است (Smith et al., 1996). برای هر فلز سنگین، حدود TEL و PEL بر اساس مقادیر مرجع MacDonald و همکاران (۲۰۰۰) و NYSDEC (۱۹۹۹) تعیین گردید (جدول ۲). مقایسه غلظت‌های اندازه‌گیری‌شده با این حدود، امکان طبقه‌بندی وضعیت خطر را فراهم می‌کند، به‌گونه‌ای که اگر غلظت فلز کمتر از TEL باشد، خطر پایین، بین TEL و PEL خطر متوسط، و بالاتر از PEL خطر بالا تلقی می‌شود.

۲-۵-نمونه‌برداری میدانی و آنالیز ICP-OES

نمونه‌های رسوب توسط بیلچه پلاستیکی تمیز برداشت و در کیسه‌های پلی‌اتیلنی زیپ‌دار با چگالی بالا قرار داده شدند تا از هرگونه آلودگی جلوگیری شود. سپس به آزمایشگاه زمین‌شیمی دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید چمران اهواز منتقل شدند. در آزمایشگاه، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای محیط خشک شدند. نمونه‌های خشک‌شده به‌وسیله هاون چینی همگن‌سازی شده و ذرات کوچک‌تر ۰/۶۳ میکرومتر آن با استفاده از الک ۲۳۰مش جدا شدند. نمونه‌های آماده‌شده به‌صورت ایمن بسته‌بندی و کدگذاری شده و برای آنالیز شیمیایی به روش ICP-OES به شرکت مطالعات معدنی زرازما (تهران، ایران) با گواهینامه ISO/IEC 17025 ارسال شدند.

برای ارزیابی صحت و دقت نتایج، پروتکل تضمین کیفیت و کنترل کیفیت (QA/QC) که شامل بلانک‌های معرف، آنالیزهای تکراری به‌منظور سنجش تکرارپذیری و به‌کارگیری مواد مرجع گواهی‌شده (CRMs) با مقادیر استاندارد برای طیف وسیعی از فلزات سنگین بود انجام گرفت. مقادیر انحراف معیار نسبی (RSD) کمتر از ۱۰٪ و درصد بازیابی در محدوده ۸۵ تا ۱۱۵ درصد به دست آمد که مطابق با استانداردهای بین‌المللی است. کالیبراسیون دستگاه ICP-OES با استفاده از محلول‌های استاندارد چند عنصری در پنج سطح غلظتی انجام شد. حد تشخیص (DL) مطابق دستورالعمل‌های سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (U.S. EPA) تعیین شد که قابلیت اندازه‌گیری دقیق فلزات سنگین حتی در غلظت‌های بسیار پایین را فراهم می‌سازد (جدول ۲) (Zarazma Mineral Studies Co., 2024).

جدول ۲- غلظت فلزات سنگین (برحسب ppm) در ایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری
Table 2. Concentration of heavy metals (ppm) at different sampling stations

Station	As	Cr	Pb	Ni	Fe	Zn	Cu	Mn
Detection Limit (DL)	0.5	1	1	1	100	1	1	5
S1	7.4	45	12	119	21,199	60	10	101
S2	16.1	84	9	54	21,306	57	9	96
S3	8.4	20	6	55	18,489	57	6	120
S4	12.1	24	8	63	24,186	72	8	122
S5	13.8	26	7	71	22,982	69	7	131
S6	9.6	22	7	54	20,517	61	7	101
S7	8.6	21	11	44	15,490	38	11	88
S8	14.4	14	6	30	13,461	32	6	49
S9	9.3	24	6	54	19,522	57	6	101
S10	9.6	23	8	62	24,112	74	8	104
Min	7.4	14	6	30	13461	32	6	49
Max	16.1	84	12	119	24186	74	11	131
Mean	10.93	30.3	8	60.6	20,126	57.7	7.8	101.3
TEL Values	5.9	37.3	35	18	-	123	35.7	-
PEL Values	17	90	91.3	36	-	315	197	-
Background value	2.5	34	5.3	41	11000	28	11.1	353

۲-۶-تحلیل آماری

برای بررسی ارتباط میان داده‌های ماهواره‌ای و غلظت فلزات سنگین، تحلیل همبستگی آماری انجام شد. در این تحلیل، از باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل-۲ استفاده شد و نتایج بر اساس معادلهٔ (۱) محاسبه و ارزیابی شدند.

$$CR = \frac{n(\sum xy)-(\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2][n\sum y^2-(\sum y)^2]}} \quad \text{(رابطهٔ ۱)}$$

در معادلهٔ مورداستفاده، n نشان‌دهندهٔ تعداد زوج داده‌ها است. عبارت ∑xy مجموع حاصل‌ضرب مقادیر مربوط به هر زوج داده را نشان می‌دهد، درحالی‌که ∑x و ∑y به ترتیب مجموع مقادیر داده‌های x و y هستند. همچنین، ∑x2 و ∑y2 به ترتیب مجموع مربعات مقادیر x و y را نشان می‌دهند.

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل همبستگی و داده‌های آزمایشگاهی، مدل‌های پیش‌بینی توسعه یافتند. عملکرد این مدل‌ها با استفاده از دو شاخص آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بر پایه معادلهٔ (۲) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) بر اساس معادلهٔ (۳) مورد ارزیابی قرار گرفت. این شاخص‌ها برای سنجش دقت مدل‌ها در برآورد سطح آلودگی ناشی از فلزات سنگین محاسبه شدند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\Sigma(X_{pr}-X_{ob})^2}{N}} \quad \text{(رابطهٔ ۲)}$$

در این معادله، XPr نمایانگر مقدار پیش‌بینی‌شده، XOb مقدار مشاهده‌شده، و N نشان‌دهندهٔ تعداد کل مشاهدات است.

همین تعاریف در معادلهٔ بعدی نیز برقرار است؛ به‌عبارت‌دیگر، XPr همچنان به متغیر پیش‌بینی‌شده، XOb به مقدار مشاهده‌شده، و N به تعداد مشاهدات اشاره دارد.

$$MAE = \frac{\Sigma\,|X_{pr}-X_{ob}|}{N} \quad \text{(رابطهٔ ۳)}$$

برای حذف پیکسل‌های مربوط به نواحی آبی، از شاخص تفاوت نرمال‌شدهٔ آب (NDWI) بهره‌گیری شد. این شاخص با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$NDWI = \frac{G-NIR}{G+NIR} \quad \text{(رابطهٔ ۴)}$$

در این فرمول، G بیانگر باند سبز تصاویر ماهواره‌ای و NIR نشان‌دهندهٔ باند فروسرخ نزدیک است.

۳-نتایج و بحث

۳-۱- غلظت فلزات سنگین

نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل آزمایشگاهی رسوبات برداشت‌شده از ده ایستگاه نمونه‌برداری (S1 تا S10) در امتداد رودخانه کارون، نشان‌دهندهٔ تفاوت‌های قابل‌توجهی در میزان غلظت فلزات سنگین است. این تغییرات مکانی می‌تواند هم تحت تأثیر

فرآیندهای طبیعی و هم ناشی از فعالیت‌های انسانی باشد. داده‌های مربوط به این عناصر در جدول ۲ ارائه شده‌اند و شامل مقادیر اندازه‌گیری‌شدهٔ As، Pb، Ni، Cr، Cu، Zn، Fe و Mn می‌باشند.

برای تعیین مقدار طبیعی یا «پس‌زمینه‌ای» فلزات سنگین، نمونه‌برداری از عمق ۵۰ سانتی‌متری مغزه‌های رسوب انجام شد. این روش به‌منظور حذف اثرات احتمالی ناشی از آلودگی انسانی صورت می‌گیرد و از مقادیر به‌دست‌آمده به‌عنوان معیار پایه برای ارزیابی آلودگی ایستگاه‌های مختلف استفاده می‌شود (Moslem, 2015). این اطلاعات در جدول ۲ نیز ذکر شده‌اند و نقش مهمی در تحلیل کیفی داده‌ها ایفا می‌کنند.

۳-۲- مقایسه فلزات سنگین با مقادیر پس‌زمینه (مرجع) و معیارهای کیفیت (SQGs)

غلظت فلزات سنگین در ایستگاه‌های مختلف با مقادیر زمینه‌ای مقایسه شد. نتایج نشان داد که در بسیاری از نمونه‌ها، به‌ویژه در ایستگاه‌هایی که در نزدیکی منابع شهری و صنعتی قرار داشتند (S1، S2، S5 و S10)، غلظت فلزات به میزان قابل‌توجه افزایش می‌یابد (جدول ۲). حضور واحدهای صنعتی همچون کارخانه‌های فولاد و لوله‌سازی، ورود فاضلاب‌های شهری، و نزدیکی این ایستگاه‌ها به مناطق پرتراکم شهری در اهواز، ازجمله عوامل مهم در افزایش غلظت فلزات سنگین در رسوبات محسوب می‌شوند.

مهم‌ترین مشاهدات عبارت‌اند از:

- نقاط داغ آلودگی (Hotspots): ایستگاه‌های S2، S5 و S10 به‌عنوان نقاط بحرانی آلودگی برای فلزاتی مانند As، Cr و Ni شناخته شدند.
- الگوهای مکانی: کاهش تدریجی غلظت در ایستگاه‌های پایین‌دست مشاهده شد که این امر احتمالاً به دلیل اثر رقیق‌سازی و ته‌نشینی ذرات در جریان رودخانه است.
- تأثیرات انسانی: رواناب‌های شهری و صنعتی، از اصلی‌ترین منابع ورود فلزات سنگین به رودخانه بودند؛ این تأثیر به‌ویژه در مورد عناصرAs، Pb، Ni و Zn برجسته‌تر بود.

برای تعیین وضعیت بحرانی غلظت فلزات سنگین در رسوبات معیارهای کیفیت رسوب (SQG) مقایسه شدند. در این رویکرد، غلظت‌های کمتر از TEL به‌عنوان خطر پایین (Low) تلقی شده و احتمال اثرات زیستی منفی در آن‌ها بسیار اندک است. مقادیر بین TEL و PEL نشان‌دهنده خطر متوسط هستند که بروز اثرات زیستی منفی ممکن، اما قطعی نیست. غلظت‌های بزرگ‌تر از PEL بیانگر خطر بالا (High) بوده و با احتمال بسیار زیاد اثرات منفی شدید بر موجودات آبزی همراه خواهند بود.

در ایستگاه‌های S1، S2، S5 و S10 عناصر As و Ni به‌طور پیوسته از آستانه TEL فراتر رفته و در برخی موارد (مانند Ni در S1) حتی بالاتر از PEL قرار داشتند که بیانگر خطر بالا و احتمال وقوع اثرات منفی شدید بر موجودات زنده بستر رودخانه است. مقایسه با مقادیر زمینه محلی منطقه نیز نشان داد که غلظت این عناصر به‌طور معنی‌داری بالاتر از سطح طبیعی بوده و بنابراین آلایندگی ناشی از منابع انسانی (مانند صنایع فولاد، لوله‌سازی و فاضلاب شهری اهواز) تأیید می‌شود. بر همین اساس، ایستگاه‌هایی که مقادیر غلظت‌های اندازه‌گیری‌شده آن‌ها بزرگ‌تر از TEL و در برخی موارد حتی بیش‌تر از PEL بودند (مانند Ni درS1)، به‌عنوان نقاط بحرانی آلودگی (Hotspots) شناسایی شدند.

۳-۳- همبستگی با داده‌های ماهواره‌ای

تحلیل تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که بین غلظت فلزات سنگین در رسوبات رودخانه کارون و برخی باندهای طیفی از ماهواره‌های Landsat 8 وSentinel-2، همبستگی معناداری وجود دارد. این یافته‌ها به شناسایی باندهای کلیدی که در پیش‌بینی مکانی آلودگی مؤثر هستند کمک کرده است (جدول ۳).

بر اساس جدول ۳، باند S2B_B3 بالاترین همبستگی را با غلظت‌های Zn و Fe نشان داد و بنابراین به‌عنوان یک باند حساس برای شناسایی این فلزات مطرح می‌شود. همچنین Ni نیز با همین باند همبستگی قوی داشت. در مورد As، همبستگی مثبت معناداری با باند BT_B3 مشاهده شد که نقش این باند را در پیش‌بینی توزیع مکانی As برجسته می‌سازد.

این روابط آماری، توان بالقوهٔ سنجش‌ازدور را در شناسایی و پایش آلودگی فلزات سنگین در محیط‌های رسوبی نشان می‌دهند. نقشه‌های پیش‌بینی‌شده نیز که بر اساس این همبستگی‌ها تهیه شده‌اند، تمرکز نقاط داغ آلودگی را عمدتاً در مناطق صنعتی و بخش‌هایی با فعالیت‌های کشاورزی فشرده تأیید کردند. این نتایج، کاربرد سنجش‌ازدور را به‌عنوان یک ابزار مقرون‌به‌صرفه و گسترده در پایش محیط‌زیست، مورد تأکید قرار می‌دهند.

جدول ۳- ضرایب همبستگی بین فلزات سنگین و باندهای منتخب ماهواره‌ای
Table 3. Correlation coefficients between heavy metals and selected satellite bands

	Input Images								
Metal	L8_B2	L8_B3	L8_B4	S2B_B2	S2B_B3	S2B_B4	BT_B1	BT_B2	BT_B3
Zn	-0.012	0.318	0.226	0.482	0.489	0.391	0.491	0.485	0.450
Ni	-0.010	0.375	0.336	0.483	0.601	0.567	0.468	0.519	0.456
Fe	-0.054	0.433	0.414	0.466	0.579	0.554	0.456	0.499	0.433
Pb	-0.074	0.165	0.157	0.170	0.193	0.169	0.179	0.167	0.151
Cu	-0.166	0.132	0.035	0.585	0.571	0.464	0.560	0.597	0.591
Cr	-0.309	0.024	-0.025	0.036	0.192	0.135	0.017	0.071	0.026
Mn	-0.173	0.134	0.102	0.270	0.384	0.354	0.226	0.311	0.286
As	0.087	-0.061	0.065	-0.383	-0.395	-0.397	-0.354	-0.391	-0.407
	GST_B1	GST_B2	GST_B3	PC_B1	PC_B2	PC_B3	NND_B1	NND_B2	NND_B3
Zn	0.495	0.487	0.457	-0.253	-0.502	-0.588	0.435	0.501	0.466
Ni	0.495	0.493	0.455	-0.098	-0.335	-0.458	0.450	0.500	0.471
Fe	0.482	0.473	0.434	-0.136	-0.382	-0.496	0.453	0.480	0.459
Pb	0.188	0.165	0.150	-0.036	-0.177	-0.233	0.197	0.186	0.168
Cu	0.583	0.591	0.578	-0.282	-0.454	-0.520	0.481	0.605	0.558
Cr	0.047	0.046	0.008	0.263	0.105	-0.030	-0.018	0.055	0.018
Mn	0.269	0.281	0.260	-0.026	-0.097	-0.178	0.202	0.277	0.256
As	-0.377	-0.386	-0.385	0.076	0.194	0.251	-0.318	-0.387	-0.370

۳-۴- نقشه‌برداری مکانی فلزات سنگین

با توجه به مقادیر همبستگی به‌دست‌آمده، این بخش به تولید نقشه‌های پیش‌بینی غلظت فلزات سنگین در منطقهٔ موردمطالعه اختصاص دارد. برای هر عنصر، دو باند طیفی که بیشترین همبستگی را با داده‌های میدانی داشتند، انتخاب شدند تا بر پایهٔ آن‌ها مدل‌های رگرسیون توسعه داده شود. سپس این مدل‌ها بر روی تصاویر ماهواره‌ای اعمال شده و نقشه‌هایی برای تخمین توزیع مکانی فلزات تولید شد.

به‌منظور ارزیابی دقت این نقشه‌ها، از مجموعه داده‌های آزمایشی مستقل (نمونه‌های رسوبی متفاوت) استفاده شد. در این مرحله، غلظت‌های پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی حاصل از آنالیزهای آزمایشگاهی مقایسه شدند. شاخص‌هایی مانند ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) برای اعتبارسنجی مدل‌ها به کار رفتند که نتایج آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

نقشه‌هایی که در فرآیند اعتبارسنجی از بالاترین دقت برخوردار بودند، در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند. این نقشه‌ها توزیع مکانی عناصر کلیدی را به‌خوبی نشان می‌دهند و مناطق با غلظت‌های زیاد به‌ویژه در مجاورت مناطق صنعتی و زمین‌های کشاورزی به‌عنوان نقاط داغ آلودگی برجسته شده‌اند. چنین نقشه‌هایی می‌توانند به‌عنوان ابزارهای مؤثر و کاربردی برای پایش زیست‌محیطی و تعیین اولویت مداخله مدیریتی به کار گرفته شوند، چراکه مناطق بحرانی را با دقت مشخص می‌کنند.

بر اساس داده‌های جدول ۴، در مورد فلزات سنگین Zn ، Ni، Fe، Cr وAs، سناریوی اول عملکرد بهتری از خود نشان داده و مقادیر خطای RMSE و MAE در این حالت به‌مراتب کمتر از سناریوی دوم بوده است. به‌عنوان نمونه، برای عنصر Fe، دقت مدل در سناریوی اول به‌طور چشمگیری افزایش یافته است؛ به‌طوری‌که مقادیر RMSE از ۵۷/۵۸۷۱ به ۱۴/۰۶۷۶ و MAEاز ۵۰/۹۶۷۳ به ۲۴/۸۳۵۰ کاهش یافته‌اند.

در نقطهٔ مقابل، برای فلزات Pb، Cu وMn، نتایج سناریوی دوم مطلوب‌تر بوده است. به‌ویژه برای عنصر Pb، مقادیر RMSEو MAE به ترتیب به ۰/۰۲۷۳ و ۰/۰۲۲۸ کاهش یافته‌اند (در مقایسه با ۰/۰۴۶۹ و ۰/۰۴۵۱ در سناریوی اول). همین الگو در مورد عنصر Cu نیز مشاهده می‌شود؛ جایی که RMSEاز ۰/۱۳۷۶ به ۰/۱۱۰۷ و MAE از ۰/۱۳۰۷ به

۰/۰۹۷۴ کاهش یافته است. عنصر Mn نیز دقت بیشتری را در سناریوی دوم نشان می‌دهد؛ با بهبود مقادیر RMSE از ۱/۰۱۹۹ به ۰/۵۶۴۲ و MAE از ۰/۹۶۰۴ به ۰/۴۹۱۱.

همان‌طور که نتایج تحلیل‌ها مشخص می‌سازد، در حدود نیمی از فلزات بررسی‌شده (شامل Zn، Pb، Cu وAs) ، روش‌های مبتنی بر تلفیق تصویر عملکرد بهتری داشته‌اند. در این موارد، تکنیک‌های PC، NNDiffuse وBT، نقشه‌هایی با دقت بالاتر در ارزیابی پراکنش فلزات ارائه داده‌اند. در مقابل، برای نیمهٔ دیگر فلزات موردمطالعه (Ni، Fe، Cr و Mn)، استفاده از تصاویر اصلی به تولید نقشه‌هایی دقیق‌تر منجر شده است. این تصاویر به ترتیب با باند آبی Sentinel-2 ، باند سبز Sentinel-2، باند آبی Landsat 8 و باند سبز Sentinel-2 مطابقت داشته‌اند.

نکتهٔ قابل‌تأمل این است که، از بین تصاویر اصلی استفاده‌شده، سه مورد از چهار مورد متعلق به Sentinel-2 بوده‌اند که دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر هستند. همچنین، نیمی از نقشه‌های تولیدشده از طریق تلفیق نیز مبتنی بر داده‌هایی با همین قدرت تفکیک مکانی بوده‌اند. این موضوع، نقش مهم قدرت تفکیک فضایی بالا در تولید نقشه‌های دقیق‌تر از پراکنش فلزات سنگین را برجسته می‌سازد. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بیشتر، گزینه‌ای مناسب‌تر برای این نوع تحلیل‌ها محسوب می‌شوند.

بر اساس مشاهدات ارائه‌شده در شکل ۲a، تمرکز بالای As عمدتاً در نیمهٔ شمالی منطقهٔ موردمطالعه دیده می‌شود. این نواحی با رنگ‌های نارنجی تا قهوه‌ای تیره مشخص شده‌اند و با داده‌های میدانی نیز تطابق خوبی دارند. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، چنین نقاط داغی احتمالاً نتیجهٔ تخلیه‌های صنعتی و فعالیت‌های کشاورزی وابسته به As در منطقه هستند. این الگوها بر نقش مهم فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه صنعتی، در شکل‌گیری پراکنش مکانی آلودگی As تأکید می‌کنند.

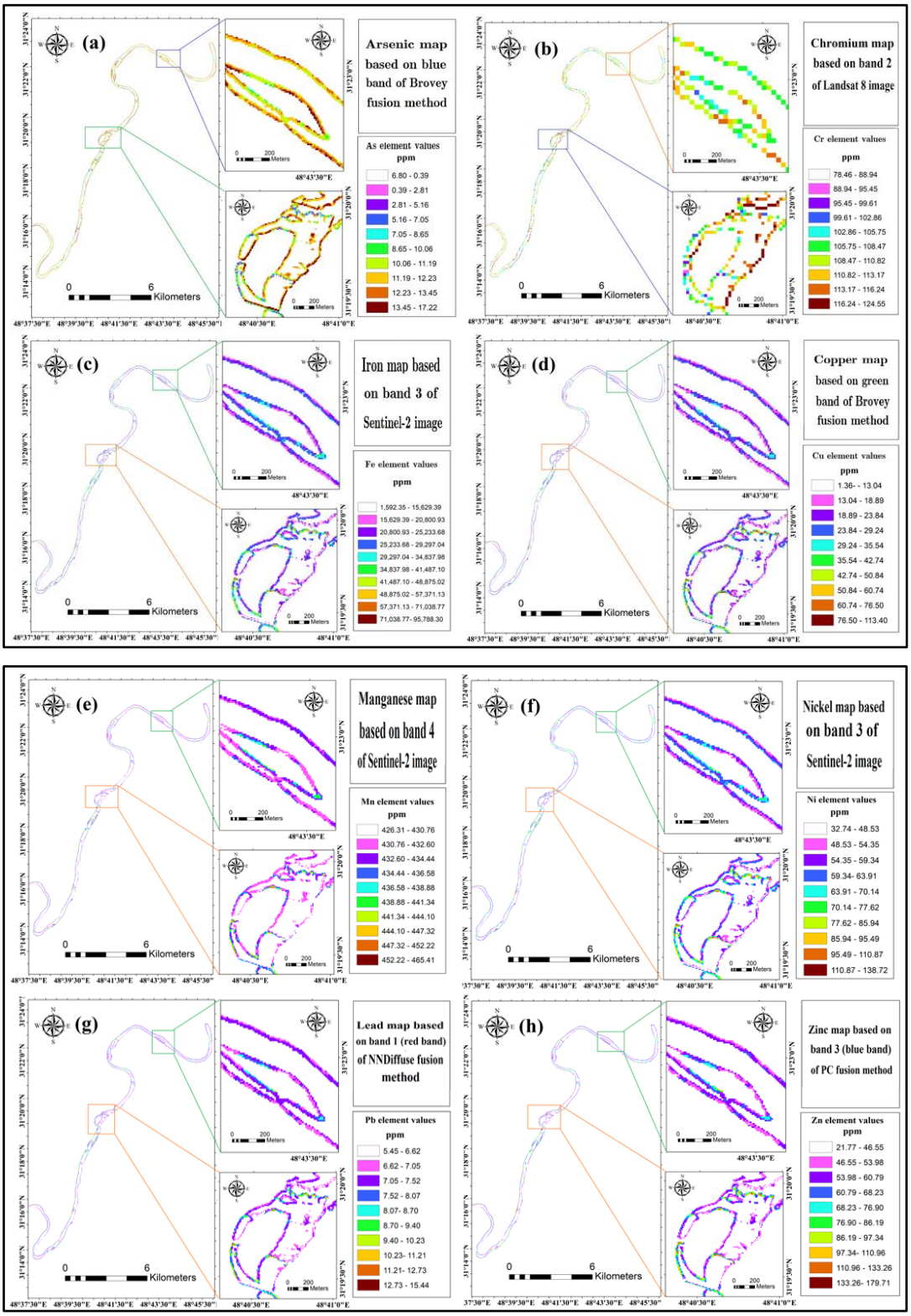
در شکل ۲b نیز توزیع Cr با بیشترین شدت رنگ نارنجی، بیشتر در نیمهٔ شمالی منطقه ظاهر شده است. شش ایستگاه اندازه‌گیری در این بخش، مقادیر بالای Cr را ثبت کرده‌اند که مؤید یافته‌های مکانی است. این الگو به‌وضوح نشان می‌دهد که منابع صنعتی نقش غالبی در شکل‌گیری آلودگی Cr دارند و این ناحیه باید به‌عنوان اولویت در اقدامات کاهش‌دهنده مدنظر قرار گیرد.

تحلیل شکل ۲c مربوط به Cu نشان می‌دهد که در اغلب مناطق، غلظت این عنصر در بازهٔ کم تا متوسط قرار دارد؛ بااین‌حال، در شهر اهواز، افزایش قابل‌توجهی در مقادیر Cu مشاهده می‌شود. این امر احتمالاً از ترکیب آلودگی شهری گسترده و تخلیه‌های موضعی صنعتی ناشی می‌شود.

جدول ۴- درصد معیارهای اعتبارسنجی (MAE و RMSE) نقشه‌های فلزات سنگین

Table 4. Validation metrics (%RMSE and MAE) of the heavy metal maps

The map of the studied heavy metals based on the first highest correlation values								
	Zn	Ni	Fe	Pb	Cu	Cr	Mn	As
RMSE	0.2696	0.1014	14.0676	0.0469	0.1376	0.3017	1.0199	0.0285
MAE	0.0238	0.0824	24.8350	0.0451	0.1307	0.2020	0.9604	0.0202
The map of the studied heavy metals based on the second highest correlation values								
	Zn	Ni	Fe	Pb	Cu	Cr	Mn	As
RMSE	0.3544	0.1589	57.5871	0.0273	0.1107	0.3659	0.5642	0.0356
MAE	0.3065	0.1482	50.9673	0.0228	0.0974	0.2804	0.4911	0.0346



شکل ۲- بهترین نقشه‌های خروجی فلزات سنگین موردمطالعه: (a) نقشه As، (b) نقشه Cr، (c) نقشه Cu، (d) نقشه Fe، (e) نقشه Mn، (f) نقشه Ni، (g) نقشه Pb و (h) نقشه Zn

Fig. 2. The best output maps of the studied heavy metals: (a) As map, (b) Cr map, (c) Cu map, (d) Fe map, (e) Mn map, (f) Ni map, (g) Pb map, and (h) Zn map

در رابطه با Fe، شکل ۲d سطوح نسبتاً کم تا متوسط را در اغلب مناطق نمایش می‌دهد؛ اما در مرکز منطقهٔ مطالعه، افزایش مشخصی در غلظت Fe مشاهده شده است که داده‌های میدانی نیز آن را تأیید می‌کنند. این وضعیت، بر لزوم پایش مناطق دارای تداخل منابع طبیعی و انسانی تأکید دارد.

بر اساس شکل ۲e، Mn در سراسر منطقه با غلظت‌های بالاتر از متوسط توزیع شده است. این الگو که با داده‌های میدانی هم‌خوانی دارد، احتمالاً نتیجهٔ تأثیر هم‌زمان رواناب کشاورزی و تخلیه‌های صنعتی است. یکنواختی نسبی در توزیع این عنصر، بیانگر نقش هر دو نوع منبع نقطه‌ای و پراکنده در آلودگی آن است.

در شکل ۲f، تمرکز Ni عمدتاً در سه‌چهارم شمالی منطقه مشاهده می‌شود. مقادیر زیاد در ایستگاه‌های این بخش ثبت شده‌اند و نشان می‌دهند که تخلیه‌های صنعتی به‌طور مشخص در افزایش آلودگی Ni نقش دارند و باید به‌صورت هدفمند کنترل شوند.

نتایج حاصل از شکل ۲g برای عنصر Pb به پراکنش نسبتاً گستردهٔ این فلز در سراسر منطقه و تمرکز بالاتر آن در جنوب اهواز اشاره دارند. منابع اصلی این آلودگی شامل گازهای خروجی وسایل نقلیه و رواناب شهری هستند که نشان می‌دهند توسعهٔ شهری در این منطقه اثر قابل‌توجهی بر افزایش سطح Pbداشته است.

در نهایت، شکل ۲h نشان می‌دهد که Zn نیز در بیشتر مناطق پراکنده شده، اما در بخش‌های شهری اهواز تمرکز بالاتری دارد. این الگوی پراکنش نشان‌دهندهٔ تأثیر قابل‌ملاحظهٔ فعالیت‌های صنعتی و رواناب شهری در افزایش سطوح Zn است.

مقایسهٔ نقشه‌های به‌دست‌آمده با مقادیر پایهٔ طبیعی گزارش‌شده توسط مسلم (۲۰۱۵)، حاکی از انحراف قابل‌توجه بیشتر فلزات از سطوح طبیعی آن‌ها در منطقهٔ موردمطالعه است. به‌عنوان‌مثال، غلظت As بین ۶/۸ ppm تا ۱۷/۲۲ متغیر بوده که به‌وضوح از مقدار پایهٔ ۲/۵ ppm فراتر رفته و بیشترین سطوح در نزدیکی واحدهای صنعتی مشاهده شده‌اند. همین روند در مورد Cr نیز دیده می‌شود؛ به‌طوری‌که مقادیر بین ۷۸/۴۶ ppm تا ۱۲۴/۵۵ ppm ثبت شده، درحالی‌که سطح طبیعی آن حدود ۳۴ ppm است.

عنصر Cu نیز در محدوده‌ای بین ۱/۳۶ تا ۱۱۳/۴ ppm اندازه‌گیری شده و مقادیر بیشتر عمدتاً در مناطق شهری و صنعتی ثبت شده‌اند (در مقایسه با سطح پایهٔ ۱۱/۱ ppm). Ni با غلظت‌هایی تا ۱۳۸/۷۲ ppm نیز فراتر از حد طبیعی ۴۱ ppm گزارش شده و این امر نقش منابع انسانی مانند پساب صنعتی را در افزایش آلودگی تأیید می‌کند.

برای Pb، غلظت‌ها در بازهٔ ۵/۴۵ ppm تا ۱۵/۴۴ قرار داشته که اغلب از مقدار طبیعی ۵/۳ ppm فراتر رفته‌اند. سطوح Zn نیز از مقدار پایهٔ ۲۸ ppm فراتر رفته و در محدودهٔ ۲۱/۷۷ تا ۱۷۹/۷۱ ppm قرار گرفته‌اند. این پراکنش‌ها، نقش فعالیت‌های کشاورزی و رواناب شهری را در تشدید آلودگی آشکار می‌سازند.

در مورد Mn، مقادیر بین ۴۲۶/۳۱ ppm تا ۴۶۵/۴۱ مشاهده شده که از سطح طبیعی ۳۵۳ ppm فراتر رفته‌اند. بااینکه Fe به‌صورت طبیعی در مقادیر بالایی وجود دارد، اما غلظت آن بین ۱۵۹۲/۳۵ ppm تا ۹۵۷۸۸/۳۰ گزارش شده که می‌تواند تحت تأثیر منابع موضعی و فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه صنعتی، قرار گرفته باشد.

مجموعهٔ این یافته‌ها به‌خوبی گسترهٔ آلودگی فلزات سنگین در منطقهٔ موردمطالعه را آشکار می‌سازند و لزوم تدوین راهبردهای مدیریت محیط‌زیستی مؤثر برای کاهش اثرات مخاطره‌آمیز آن‌ها را برجسته می‌سازند.

۴-نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های سنجش‌ازدور با تحلیل‌های ژئوشیمیایی، روشی مؤثر برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه کارون است. با مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده از نمونه‌های جمع‌آوری‌شده با مقادیر پایه در مناطق دور از فعالیت‌های انسانی، مشخص شد که غلظت فلزات سنگین مانند As، Pb، Ni، Cr، Cu، Mn، Zn و Fe به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. برای ترسیم توزیع مکانی این فلزات، از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-2 و Landsat 8 استفاده شد.

مدل‌های پیش‌بینی عملکرد قوی برای برخی فلزات نشان دادند، به‌طوری‌که مقادیر خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) به این شرح به دست آمد: ۰/۰۲۸۵، ۰/۰۲۷۳، ۰/۱۰۱۴، ۰/۳۰۱۷، ۰/۱۱۰۷، ۰/۵۶۴۲، ۰/۲۶۹۶ و ۱۵/۰۶۷۶ به ترتیب برای As، Pb، Ni، Cr، Cu، Mn، Zn و Fe.

این نتایج تأیید می‌کنند که تکنیک‌های سنجش‌ازدور برای شناسایی و نقشه‌برداری از آلودگی فلزات سنگین، به‌ویژه در مناطق نزدیک به مناطق صنعتی و کشاورزی، مناسب هستند.

برای Zn، Pb، Cu و As، تکنیک‌های تلفیق تصویر نقشه‌های دقیق‌تری برای ارزیابی توزیع مکانی ارائه دادند. در مقابل، برای Ni، Fe، Cr و Mn، تصاویر اصلی ماهواره‌ای در تولید نقشه‌های دقیق‌تر مؤثرتر بودند. این موضوع نشان می‌دهد که رویکرد بهینه برای نقشه‌برداری از فلزات سنگین می‌تواند بسته به خواص خاص هر فلز و تعامل آن با ویژگی‌های طیفی تصاویر متفاوت باشد. در تحلیل نقشه‌های مبتنی بر تصاویر اصلی، نقشه‌های Ni، Fe و Mn از داده‌های Sentinel-2 با وضوح مکانی ۱۰ متر به دست آمده‌اند. با توجه به اینکه نقشه‌های مبتنی بر تلفیق نیز وضوح مکانی ۱۰ متر دارند، نقش حیاتی وضوح مکانیِ بالاتر در نقشه‌برداری دقیق توزیع فلزات سنگین به‌وضوح نشان داده می‌شود.

نقشه‌های خروجی همچنین آلودگی قابل‌توجه فلزات سنگین در رسوبات رودخانه کارون را نشان دادند، به‌طوری‌که غلظت‌های As، Cr، Ni، Pb، Zn، Mn، Fe و Cu از مقادیر پایه طبیعی خود فراتر رفته‌اند، به‌ویژه در نزدیکی مناطق صنعتی و شهری پرجمعیت. این یافته‌ها نیاز فوری به استراتژی‌های کاهش برای مقابله با خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی ناشی از سطوح بالای فلزات سنگین را برجسته می‌کنند.

یافته‌ها نقش فعالیت‌های انسانی، مانند پساب‌های صنعتی و رواناب‌های شهری، در غنی‌سازی فلزات سنگین را تأکید می‌کنند. این موضوع نیاز حیاتی به مداخلات زیست‌محیطی هدفمند، ازجمله مدیریت سخت‌گیرانه‌تر تخلیه پسماندهای صنعتی، بهبود کنترل رواناب‌های شهری و نظارت دوره‌ای را برجسته می‌کند. استفاده از سنجش‌ازدور، با توانایی آن در نظارت کارآمد بر مناطق وسیع، در شناسایی الگوهای آلودگی و اطلاع‌رسانی به استراتژی‌های مدیریت پایدار مؤثر بود.

مطالعات آینده باید داده‌های ماهواره‌ای با وضوح بالاتر و تکنیک‌های تلفیق پیشرفته را برای بهبود دقت پیش‌بینی بررسی کنند و این روش‌ها را برای کاربردهای گسترده‌تر در اکوسیستم‌های مشابه تطبیق دهند. با پرداختن به خطرات شناسایی‌شده آلودگی، این تحقیق به حفظ یکپارچگی زیست‌محیطی رودخانه کارون کمک می‌کند و از توسعه استراتژی‌هایی برای کاهش اثرات نامطلوب آلودگی فلزات سنگین بر سیستم‌های آبی و سلامت انسان حمایت می‌کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از سازمان فضائی اروپا و سازمان زمین‌شناسی آمریکا بابت تولید تصاویر رایگان ماهوارهٔ سنتینل-۲ و ماهوارهٔ لندست تشکر و قدردانی می‌نمایند. این تحقیق با حمایت دانشگاه شهید چمران اهواز (گرنت شمارهٔ SCU.EG1404.87118) انجام شد که بدین‌وسیله نویسندگان تشکر خود را از این دانشگاه اعلام می‌دارند.

مراجع

Ahmed, A.H., Al-Abyadh, M., Muthanna, F.M., 2024. Investigation of Toxic Metals Pollution in Water, Sediment, and Fish at Al-Hodeidah City, Red Sea Coast of Yemen. International Journal of Multidisciplinary Sciences and Arts 3, 278-288. https://doi.org/10.47709/ijmdsa.v3i01.3662

Ali, M.M., Rahman, S., Islam, M.S., Rakib, M.R.J., Hossen, S., Rahman, M.Z., Phoungthong, K., 2022. Distribution of heavy metals in water and sediment of an urban river in a developing country: a probabilistic risk assessment. International journal of sediment research 37, 173-187. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2021.09.002

Arnous, M.O., Hassan, M.A., 2015. Heavy metals risk assessment in water and bottom sediments of the eastern part of Lake Manzala, Egypt, based on remote sensing and GIS. Arabian Journal of Geosciences 8, 7899-7918.

Choe, E., van der Meer, F., van Ruitenbeek, F., van der Werff, H., de Smeth, B., Kim, K.W., 2008. Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain. Remote Sensing of Environment 112, 3222-3233. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.017

Fu, P., Li, X., Zhang, J., Ma, C., Wang, Y., Meng, F., 2024. Remote sensing inversion on heavy metal content in salinized soil of Yellow River Delta based on Random Forest Regression-a case study of Gudao Town. Scientific Reports 14, 11216. https://doi.org/10.1038/s41598-024-62087-y

Ghassemian, H., 2016. A review of remote sensing image fusion methods. Information Fusion 32, 75-89.

Jiji, G. W., 2024. Analysis of heavy metal concentrations in soil using Kriging technique using remote sensing data. Multimedia Tools and Applications, 1-16.

Jolaosho, T.L., Elegbede, I.O., Ndimele, P.E., Falebita, T.E., Abolaji, O.Y., Oladipupo, I.O., Isaac, O.O., 2024. Occurrence, distribution, source apportionment, ecological and health risk assessment of heavy metals in water, sediment, fish and prawn from Ojo River in Lagos, Nigeria. Environmental Monitoring and Assessment 196, 109. https://doi.org/10.1007/s10661-023-12148-y

Javan, F.D., Samadzadegan, F., Mehravar, S., Toosi, A., Khatami, R., Stein, A., 2021. A review of image fusion techniques for pan-sharpening of high-resolution satellite imagery. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing 171, 101-117. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.11.001

Karimi, D., Akbarizadeh, G., Rangzan, K., Kabolizadeh, M. 2017a. Effective supervised multiple-feature learning for fused radar and optical data classification. IET Radar, Sonar & Navigation 11, 768-777. https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0346

Karimi, D., Rangzan, K., Akbarizadeh, G., Kabolizadeh, M. 2017b. Combined algorithm for improvement of fused radar and optical data classification accuracy. Journal of Electronic Imaging 26, 013017-013017. https://doi.org/10.1117/1.JEI.26.1.013017

Moslem, F., 2015. Assessment of heavy metal contamination in surface sediments of the Karun River in the Ahvaz region. Master's Thesis, Environmental Geology, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Lin, Y., Gao, J., Tu, Y., Zhang, Y., Gao, J., 2024. Estimating low concentration heavy metals in water through hyperspectral analysis and genetic algorithm-partial least squares regression. Science of the Total Environment 916, 170225. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170225

Lovynska, V., Bayat, B., Bol, R., Moradi, S., Rahmati, M., Raj, R., Montzka, C., 2024. Monitoring heavy metals and metalloids in soils and vegetation by remote sensing: a review. Remote Sensing 16, 3221. https://doi.org/10.3390/rs16173221

Miranda, L.S., Wijesiri, B., Ayoko, G.A., Egodawatta, P., Goonetilleke, A., 2021. Water-sediment interactions and mobility of heavy metals in aquatic environments. Water Research 202, 117386. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117386

MacDonald, D.D., Ingersoll, C.G., Berger, T.A. 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 39, 20–31.

NYSDEC. 1999. Technical guidance for screening contaminated sediments. Division of Fish, Wildlife and Marine Resources, New York State Department of Environmental Conservation 45.

Oyege, I., Katwesigye, R., Kiwanuka, M., Mutanda, H.E., Niyomukiza, J.B., Kataraihya, D.J., Egor, M., 2024. Temporal trends of water quality parameters, heavy metals, microplastics, and emerging organic pollutants in Lake Victoria and its basin: Knowns, gaps, and future direction. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management 100962. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100962

Pandiyan, J., Mahboob, S., Govindarajan, M., Al-Ghanim, K.A., Ahmed, Z., Al-Mulhm, N., Krishnappa, K., 2021. An assessment of level of heavy metals pollution in the water, sediment and aquatic organisms: A perspective of tackling environmental threats for food security. Saudi Journal of Biological Sciences 28, 1218-1225. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.11.072

Pohl, C., Van Genderen, J.L., 2016. Remote sensing image fusion: a practical guide. https://doi.org/10.1201/9781315370101

Rahim, N., Noor, A., Kanwal, A., Tahir, MM., Yaqub, A., 2024. Assessment of heavy metal contamination in leafy vegetables: implications for public health and regulatory measures. Environmental Monitoring and Assessment 196, 684. https://doi.org/10.1007/s10661-024-12855-0

Rastmanesh, F., Farrash-Alvar, S., Shalbaf, F., 2024. Concentration of heavy metals in soil and leaves of Conocarpus Erectus Tree: A Biomonitoring Study, Ahvaz, Iran. Environmental Monitoring and Assessment 196, 579. https://doi.org/10.1007/s10661-024-12728-6

Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Karimi, D., Zareie, S. 2019. Supervised cross-fusion method: a new triplet approach to fuse thermal, radar, and optical satellite data for land use classification. Environmental monitoring and assessment 191, 481. https://doi.org/10.1007/s10661-019-7621-y

Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Karimi, D. 2020a. Improved water quality mapping based on cross-fusion of Sentinel-2 and Landsat-8 imageries. IET Image Processing 14, 1382-1392. https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2019.1503

Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Karimi, D. 2020b. Evaluation of Sentinel-2 and Landsat-8 Satellite images capability and evaluation of image fusion capability in seasonal zoning of NSFWQI and IRWQIsc qualitative indices in surface water (Case Study: Karoun River). Geography and Environmental Planning 31, 73-102. https://doi.org/10.22108/gep.2020.123228.1309

Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Karimi, D. 2022a. Optimized water depth retrieval using satellite imageries based on novel algorithms. Earth Science Informatics 15, 37-55. https://doi.org/10.1007/s12145-021-00698-z

Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Zareie, S., S., Saki, A., Karimi, D. 2022b. The capability of Sentinel-2 image and FieldSpec3 for detecting lithium-containing minerals in central Iran. Frontiers of Earth Science 16, 678-695. https://doi.org/10.1007/s11707-021-0941-6

Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Karimi, D. 2022c. Coastal areas bathymetry based on new hybrid methods and fusion methods of Sentinel-2 and Landsat 8 satellite images. Geographic Space 22, 67-86.

Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Mousavi, S.S., Karimi, D., Rashnoei, A. 2023. Assessing the potential of Sentinel-2 imagery and spectroscopy for determining the origin of ancient artifacts in Khuzestan, Iran. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences 26, 455-476. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.05.007

Zareie, S., Rangzan, K., Karimi, D., Moradi, S. 2024. Analyzing the performance of Landsat-8, Sentinel-2 satellite and their images fusion for detection and evaluation of wheat yellow rust. Advanced Applied Geology 14, 426-450. https://doi.org/10.22055/aag.2024.46418.2444

Singh, S., 2024. Mapping soil trace metal distribution using remote sensing and multivariate analysis. Environmental Monitoring and Assessment 196, 516. https://doi.org/10.1007/s10661-024-12682-3

Singh, S., Singh, H., Bueno, G., Deniz, O., Singh, S., Monga, H., Pedraza, A., 2023. A review of image fusion: Methods, applications and performance metrics. Digital Signal Processing 137, 104020. https://doi.org/10.1016/j.dsp.2023.104020

Sojka, M., Jaskuła, J., 2022. Heavy metals in river sediments: Contamination, toxicity, and source identification-A case study from Poland. International Journal of Environmental Research and Public Health 19, 10502. https://doi.org/10.3390/ijerph191710502

Smith, S.L., MacDonald, D.D., Keenleyside, K.A., Ingersoll, C.G., Field, L.J. 1996. A preliminary evaluation of sediment quality assessment values for freshwater ecosystems. Journal of Great Lakes Research 22, 624-638.

Taghizadeh-Mehrjardi, R., Fathizad, H., Ali Hakimzadeh Ardakani, M., Sodaiezadeh, H., Kerry, R., Heung, B., Scholten, T., 2021. Spatio-Temporal Analysis of Heavy Metals in Arid Soils at the Catchment Scale Using Digital Soil Assessment and a Random Forest Model. Remote Sensing 13, 1698. https://doi.org/10.3390/rs13091698

Wang, Z., Luo, P., Zha, X., Xu, C., Kang, S., Zhou, M., Nover, D., Wang, Y., 2022. Overview assessment of risk evaluation and treatment technologies for heavy metal pollution of water and soil. Journal of Cleaner Production 379, 134043. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134043

Wang, Y., Zou, B., Chai, L., Lin, Z., Feng, H., Tang, Y., Zou, H., 2024. Monitoring of soil heavy metals based on hyperspectral remote sensing: A review. Earth-Science Reviews 104814.

Zhang, J., Li, X., Guo, L., Deng, Z., Wang, D., Liu, L., 2021. Assessment of heavy metal pollution and water quality characteristics of the reservoir control reaches in the middle Han River, China. Science of the Total Environment 799, 149472. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149472

Zeb, M., Khan, K., Younas, M., Farooqi, A., Cao, X., Kavil, Y. N., Al-Sehemi, A.G., 2024. A review of heavy metals pollution in riverine sediment from various Asian and European countries: Distribution, sources, and environmental risk. Marine Pollution Bulletin 206, 116775. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116775