

Petrogeochemical Evaluation of the Concentration and Origin of Heavy Metals in Rocks and Red Soil of Hormuz Island

Najmīyeh Gholami

PhD Student in Geology, Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Iran.

Shahram Baikpour

* Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

(Corresponding Author)
shahbaik54@iau.ac.ir

Seyed Jamal Sheikh Zakriai

Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Seyed Mohammad Hashem Emami

Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract

Background and Objective: Hormuz Island, located at the entrance of the Strait of Hormuz and the Persian Gulf, is an environmentally sensitive area due to its unique geological setting and proximity to major industrial and port facilities. The island is largely composed of Neoproterozoic evaporitic–carbonate deposits. This study aims to determine the concentrations and sources of heavy metals in the rocks and red soils of the island and to assess their contamination status and ecological risk.

Materials and Methods: Rock and red soil samples were collected from different lithological units. The concentrations of arsenic, iron, cadmium, titanium, and vanadium were measured using XRF and ICP-MS techniques. To improve analytical accuracy, six additional samples were re-analyzed using ICP-MS.

Results: The results showed that arsenic concentrations in red soils ($\approx 151/2$ ppm) and limestone (up to 130 ppm) were more than 60 and 52 times higher than the upper continental crust (UCC), indicating severe contamination. Iron concentrations in limestone ($\approx 395/763$ ppm) and salt units ($\approx 187/460$ ppm) were relatively high and reflected a combination of geogenic and anthropogenic inputs. In contrast, cadmium and vanadium remained within natural ranges. Ecological risk assessment revealed that all samples, except one limestone sample, exhibited low risk, whereas this sample showed a very high cadmium contamination factor and a high single-element risk, placing it in the “high-risk” category.

Conclusion: This study provides precise geochemical data and ecological risk analysis, offering a scientific basis for environmental management and protective planning in this sensitive region.

Keywords: Soil, Rock, Geochemistry Assessment, Sediments, Co-dispersion Map

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Received: 2025/10/07

Accepted: 2026/03/18

Doi: 10.22038/jreh.2026.28044

► **Citation:** Gholami N, Baikpour Sh, Zakriai S.J, Hashem Emami S.M. Petrogeochemical Evaluation of the Concentration and Origin of Heavy Metals in Rocks and Red Soil of Hormuz Island. *Journal of Research in Environmental Health*. 12(1):89-106.

ارزیابی پتروژئوشیمیایی غلظت و منشأ فلزات سنگین در سنگ‌ها و خاک سرخ جزیره هرمز

نجمیه غلامی

دانشجوی دکتری زمین‌شناسی، گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،

شهرام بیگ‌پور

* گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول)

shahbaik54@iau.ac.ir

سیدجمال شیخ‌ذکریایی

گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

سید محمدهاشم امامی

گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

زمینه و هدف: جزیره هرمز، واقع در دهانه تنگه‌ی هرمز و ورودی خلیج فارس، به دلیل موقعیت ژئولوژیکی ویژه و نزدیکی به مراکز صنعتی و بندری، یکی از مناطق حساس برای بررسی آلاینده‌های محیط‌زیستی محسوب می‌شود. بخش عمده‌ای از این جزیره از رسوبات تبخیری-کربناتی نئوپروتروژئیک تشکیل شده است. هدف این پژوهش، سنجش غلظت و منشأ فلزات سنگین در سنگ‌ها و خاک‌های سرخ جزیره و ارزیابی وضعیت آلودگی و ریسک اکولوژیک آن‌ها است.

مواد و روش‌ها: نمونه‌های مورد نیاز از واحدهای سنگی و خاک سرخ برداشت شد و غلظت عناصر آرسنیک، آهن، کادمیوم، تیتانیوم و وانادیوم با استفاده از روش‌های XRF و ICP-MS اندازه‌گیری گردید. برای افزایش دقت، تعداد ۶ نمونه اضافی نیز با روش ICP-MS مورد آنالیز تکمیلی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد غلظت آرسنیک در خاک‌های سرخ (حدود $151/2$ ppm) و سنگ آهک (تا 130 ppm) به ترتیب بیش از ۶۰ و ۵۲ برابر میانگین پوسته قاره‌ای بالای است که بیانگر آلودگی شدید این عنصر است. غلظت آهن در سنگ آهک ($395/763$ ppm) و نمک ($187/460$ ppm) نسبتاً بالا بوده و منشأی ترکیبی از فرآیندهای زمین‌زاد و فعالیت‌های انسان‌زاد دارد. در مقابل، غلظت کادمیوم و وانادیوم عمدتاً در محدوده‌ی طبیعی قرار گرفتند. ارزیابی ریسک اکولوژیک نشان داد که تمامی نمونه‌ها به جز نمونه آهکی دارای ریسک کم هستند، در حالی که این نمونه با ضریب آلودگی بسیار بالای کادمیوم و ریسک تک‌فلزی شدید در طبقه «ریسک زیاد» قرار گرفت.

نتیجه‌گیری: این پژوهش با ارائه‌ی داده‌های ژئوشیمیایی دقیق و تحلیل ریسک، مبنایی علمی برای مدیریت زیست‌محیطی و برنامه‌ریزی حفاظتی در این منطقه حساس فراهم می‌آورد.

کلیدواژه‌ها: خاک، سنگ، ارزیابی ژئوشیمی، رسوبات، نقشه هم‌پراکنش

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۷

نوع مقاله: پژوهشی

◀ **استناد:** غلامی ن، بیگ‌پور ش، شیخ‌ذکریایی س.ج، هاشم امامی س.م. ارزیابی پتروژئوشیمیایی غلظت و منشأ فلزات سنگین در سنگ‌ها و خاک سرخ جزیره هرمز. فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. بهار ۱۴۰۵؛ ۱(۱)۱۲: ۸۹-۱۰۶.

فلزات سنگین گروهی از عناصر با چگالی بیش از ۵ گرم بر سانتی متر مکعب هستند و شامل عناصری مانند آلومینیوم، آرسنیک، بریلیوم، کروم، کبالت، آهن، سرب، مس، جیوه، منگنز، بیسموت، کادمیوم، نیکل، سلنیم، تالیوم، روی، قلع و تیتانیوم می‌شوند (۱،۲،۳،۴). این عناصر در چرخه ژئوشیمیایی خود نهایتاً در رسوبات تجمع می‌یابند (۴،۵،۶) و در صورت افزایش غلظت از حد مجاز، آثار مخرب زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد می‌کنند (۷،۸). اهمیت این موضوع در محیط‌های ساحلی و رسوبات دریایی به‌ویژه در مناطق صنعتی و پرتردد دریایی بیشتر نمایان می‌شود. برای ارزیابی کمی و کیفی آلودگی فلزات سنگین و تعیین منشأ آن‌ها، شاخص‌های ژئوشیمیایی و زیست‌محیطی مختلفی توسعه یافته‌اند (۹،۱۰) که امکان تحلیل دقیق‌تر رفتار عناصر و میزان خطر آن‌ها را فراهم می‌کنند.

نتایج مطالعات انجام‌شده در حوزه‌ی آلودگی فلزات سنگین در محیط‌های آبی نشان می‌دهد که پویایی آب‌رسوب، ویژگی‌های ژئوشیمیایی رسوبات و تغییرات هیدرولوژیک نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل کیفیت آب و شدت ریسک اکولوژیک دارند. بررسی بلندمدت دریاچه دونگ‌تینگ^۱، نشان داد که کاهش ورودی رسوب معلق و تغییر رژیم هیدرولوژیک ناشی از ساخت سد سه‌دره، روابط علت و معلولی میان دبی آب، رسوب و غلظت مواد مغذی را به‌طور اساسی تغییر داده و موجب شده شاخص‌های کیفیت آب بیشترین تأثیر را از رفتار درونی خود دریافت کنند (۱۰). در مقابل، مطالعه‌ی بندر کائوسیونگ^۲ تأکید کرد که ویژگی‌های رسوب و اندازه ذرات، عامل اصلی تعیین‌کننده زیست‌فراهمی و سمیت واقعی فلزات است (۱۱). ارزیابی دریاچه‌ی بیشهیر^۳ نیز نشان داد که اگرچه غلظت فلزات در آب کمتر از حدود مجاز است، اما رسوبات در برخی نقاط دارای آلودگی قابل توجه تا متوسط برای فلزاتی مانند آرسنیک، کروم و نیکل هستند (۱۲). همچنین نتایج مطالعه‌ی صالح و همکاران (۱۳) نشان داد که ارزیابی ریسک فلزات سنگین تنها با اتکا به غلظت فلزات کافی نیست و باید ویژگی‌های

رسوب، شرایط هیدرولوژیک و ابزارهای نوین مدل‌سازی در تحلیل‌ها به‌طور هم‌زمان لحاظ شوند (۱۱، ۱۲، ۱۳). جزیره هرمز به‌دلیل موقعیت زمین‌شناسی منحصربه‌فرد، حضور واحدهای آتشفشانی-تبخیری، و مجاورت با فعالیت‌های صنعتی و بندری، یکی از حساس‌ترین مناطق ایران از نظر انباشت و جابه‌جایی فلزات سنگین در خاک و رسوبات است. ویژگی‌های خاص سنگ‌ها و خاک‌های این جزیره به‌ویژه خاک سرخ غنی از اکسیدهای فلزی باعث می‌شود که منشأ، رفتار ژئوشیمیایی و میزان خطر فلزات سنگین در آن با سایر مناطق متفاوت باشد. با وجود اهمیت بالای این منطقه، تاکنون مطالعات جامع پتروژئوشیمیایی که هم‌زمان منشأ زمین‌زاد و انسان‌زاد فلزات را بررسی کند، محدود بوده است. بنابراین این تحقیق با هدف شناسایی غلظت، منشأ، الگوهای پراکنش و ریسک زیست‌محیطی فلزات سنگین در واحدهای خاکی و سنگی جزیره هرمز انجام شده است. در این راستا، اهداف عملیاتی مطالعه به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

۱. تعیین غلظت فلزات سنگین منتخب (آرسنیک، آهن، کادمیوم، تیتانیوم و وانادیوم) در واحدهای سنگی و خاک سرخ منطقه.

۲. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری‌شده با استانداردهای مرجع از جمله میانگین پوسته قاره‌ای بالایی (UCC) و حدود مجاز جهانی به‌منظور ارزیابی شدت آلودگی.

۳. بررسی منشأ زمین‌زاد یا انسان‌زاد عناصر با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی، الگوهای پراکنش فضایی و تحلیل‌های ریسک اکولوژیک.

جزیره هرمز به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین پهنه‌های تبخیری-کربناتی نئوپروتروزوئیک، تحت تأثیر فرآیندهای پیچیده زمین‌ساختی، فوران‌های آتشفشانی و واکنش‌های بین کانی‌های آذرین و سنگ‌های سیلیکاتی قرار گرفته است (۱۴،۱۵). این فرآیندها همراه با برهم‌کنش با نمک‌ها، زمینه‌ساز تغییرات ژئوشیمیایی و بروز آلودگی‌های بالقوه شده‌اند (۱۶،۱۷). علاوه بر عوامل زمین‌زاد، موقعیت جغرافیایی جزیره نیز آن را در معرض آلودگی‌های انسان‌زاد قرار می‌دهد؛ به‌طوری‌که از شمال‌غرب و غرب توسط مجموعه‌های صنعتی، پالایشگاهی و اسکله‌های بندر شهید رجایی احاطه شده و تردد گسترده کشتی‌های تجاری و نفت‌کش‌ها احتمال ورود آلاینده‌های فلزی به

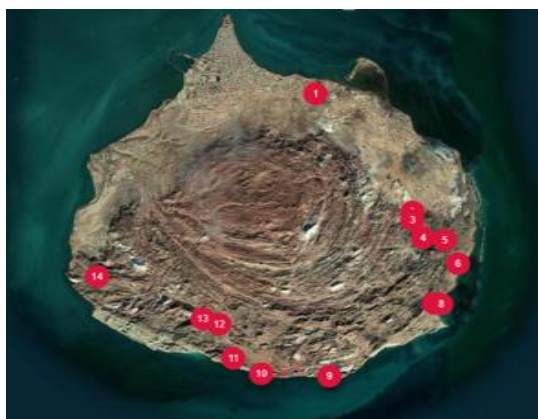
¹ Dongting

² Kaohsiung

³ Beyşehir

رسوبات ساحلی را افزایش می‌دهد. با وجود مطالعات متعدد درباره فلزات سنگین در سواحل خلیج فارس، پژوهش‌های اختصاصی درباره رفتار ژئوشیمیایی فلزات سنگین در محیط‌های تبخیری-کربناتی منحصربه‌فردی مانند جزیره هرمز بسیار محدود است. هم‌چنین، بررسی هم‌زمان غلظت، منشأ و ریسک اکولوژیک این عناصر در این جزیره تاکنون به صورت نظام‌مند انجام نشده است. بنابراین، شکاف دانشی اصلی این پژوهش، نبود یک تحلیل جامع از وضعیت آلودگی، منشأ عناصر و پیامدهای اکولوژیک آن‌ها در این محیط ویژه است. این مطالعه با هدف پرکردن این خلأ و ارائه‌ی تصویری دقیق از وضعیت ژئوشیمیایی و ریسک فلزات سنگین در جزیره هرمز انجام

شده است. سالانه بیش از ۱۵ هزار کشتی تجاری و نفت‌کش از تنگه هرمز عبور می‌کنند و بندرعباس بیش از ۷۰ میلیون تن بار دریایی را جابه‌جا می‌کند. این حجم از تردد و فعالیت صنعتی، احتمال ورود فلزات سنگین به رسوبات ساحلی را به شدت افزایش می‌دهد و می‌تواند پیامدهای جدی برای سلامت اکوسیستم، تجمع زیستی در آبزیان و در نهایت سلامت انسان ایجاد کند. آرسنیک و کادمیوم از جمله عناصری هستند که می‌توانند موجب سرطان‌زایی، اختلالات کبدی و آسیب‌های عصبی شوند و در زنجیره‌ی غذایی دریایی به سرعت انباشته می‌شوند (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت و موقعیت ایستگاه‌های نمونه برداری جغرافیای منطقه مورد مطالعه

روش کار

منطقه مورد مطالعه

جزیره هرمز در دهانه‌ی تنگه هرمز و در مدخل ورودی خلیج فارس واقع شده و بین طول‌های جغرافیایی $۱۰^{\circ}۵۶'$ تا $۳۰^{\circ}۵۶'$ شرقی و عرض‌های $۲۷^{\circ}۰۲'$ تا $۲۷^{\circ}۰۶'$ شمالی قرار دارد (۱۸). این جزیره بیضوی شکل با مساحت تقریبی ۴۵ کیلومتر مربع، از شمال غرب به بندرعباس و از جنوب شرق به جزایر قشم و لارک محدود می‌شود (۱۹). از دیدگاه زمین‌شناسی، جزیره هرمز یک گنبد نمکی فعال است که بخش عمده‌ی آن را سنگ‌های آذرین و آتشفشانی تشکیل می‌دهند و رخنمون شاخص سری هرمز (پرکامبرین پسین تا کامبرین پیشین) در این منطقه محسوب می‌شود (۱۴). این سری شامل سنگ‌نمک، گچ، انیدریت، آهک و دولومیت، همراه با توده‌ها و قطعات سنگ‌های آذرین و رسوبی است که با هیچ‌یک از واحدهای چینه‌ای دوران دوم و سوم مجاور تطابق مستقیم ندارند. در مرکز جزیره، نمک و انیدریت قرار گرفته و

به صورت هم‌مرکز با واحدهای گچی و سنگ‌های آذرین احاطه شده‌اند. در جنوب جزیره، لایه‌های رسوبی شامل ماسه‌سنگ، آهک ماسه‌سنگی، کنگلومرا و شیل روی سازند نمکی قرار گرفته‌اند. به طور کلی، ساختار زمین‌شناسی جزیره هرمز حاصل ترکیب دی‌پایریسم نمکی، فعالیت‌های ولکانیکی اسیدی-آلکانل و فرآیندهای هیدروترمال متعاقب آن است که در کنار توپوگرافی خاص جزیره، نقش مهمی در تمرکز عناصر فلزی و شکل‌گیری کاناله‌زایی تبخیری-هیدروترمال ایفا کرده‌اند.

روش جمع‌آوری نمونه‌ها

نوع نمونه‌برداری به صورت هدفمند^۱ و با تأکید بر پوشش واحدهای سنگی اصلی و مناطق در معرض آلودگی انسان‌زاد مشخص شده است. این مطالعه توصیفی-تحلیلی است. تعمیم نتایج به کل جزیره بر پایه نمایندگی لیتولوژیک و ژئوشیمیایی نمونه‌ها انجام شده است. در این مطالعه، از میان نمونه‌های برداشت‌شده از واحدهای

^۱ Purposive Sampling

اسید نیتریک^۳، اسید هیدروفلوئوریک^۴ و اسید پرکلریک^۵ در ظروف تفلون و تحت شرایط کنترل شده انجام شد. برای آنالیز XRF، پودر نمونه‌ها به صورت پرس پلت تهیه شد. به منظور کنترل کیفیت^۶ (QA) و تضمین کیفیت^۷ (QC) با استفاده از بلانک، نمونه تکراری مطابق مرجع استاندارد بین‌المللی (CRM)^۸ انجام شده است. تکرارپذیری آزمون با اندازه‌گیری دوباره ۱۰ درصد از نمونه‌ها انجام شد. حدود تشخیص (LOD)^۹ و سنجش (LOQ)^{۱۰} بر اساس مشخصات دستگاه و نتایج بلانک‌ها انجام شد. داده‌های خام پس از تصحیح زمینه، نرمال‌سازی شدند سپس مقادیر پرت حذف شدند. انجام آزمایشات طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی^{۱۱} در کشور استرالیا توسط شرکت کانساران بینالود انجام شده است. هم‌چنین جهت بررسی‌های تکمیلی تعداد ۶ نمونه سنگ و خاک سرخ نیز مجدداً جهت انجام آزمایشات طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی در ایران توسط شرکت نوین شیمیاری انجام گرفت.

اگر غلظت هر عنصر با EE نشان داده شود، نسبت EE $EE_{UCC} > 1$ soil / EE بیانگر غنی‌شدگی و وجود آلودگی است، در حالی که مقدار $EE_{soil} / EE_{UCC} < 1$ نشان می‌دهد که خاک نسبت به آن عنصر فاقد آلودگی بوده و غلظت آن در محدوده طبیعی پوسته قاره‌ای بالایی (UCC)^{۱۲} قرار دارد (۲۰). به عبارت دیگر، مقدار کمتر از ۱ نشان‌دهنده آن است که فلز منشأ زمین‌شناختی دارد (۲۱) و افزایش آن ناشی از فرایندهای طبیعی است، نه آلودگی انسان‌زاد. مقایسه غلظت فلزات سنگین در منطقه با مقادیر استاندارد پوسته زمین برگرفته از روش مور و میسون (۲۲) ریمان و کاریتات (۲۳) انجام گرفته است. هم‌چنین مقادیر استاندارد سنگ آذرین اسیدی و سنگ آهک برگرفته از روش کاباتا-پندیاست و موکرجی (۲۴) انجام شده است.

مختلف زمین‌شناسی جزیره، تعداد ۱۱ نمونه که کمترین میزان دگرسانی، هوازدگی و تغییرات ثانویه را نشان می‌دادند و از نظر ترکیب سنگ‌شناسی نماینده طیف گسترده سنگ‌های منطقه بودند، برای انجام آنالیزهای فلورسانس پرتو ایکس^۱ انتخاب شدند. معیار انتخاب این نمونه‌ها بر پایه حفظ ترکیب اولیه سنگ، عدم آلودگی ثانویه و قابلیت اعتماد برای تحلیل‌های پتروژئوشیمیایی بوده است تا نتایج حاصل توانایی منشأ و رفتار ژئوشیمیایی فلزات سنگین را منعکس کند. به منظور ایجاد شفافیت در ارائه نتایج و امکان پیگیری دقیق داده‌ها، نمونه‌ها بر اساس یک الگوی ثابت و قابل‌ردیابی نام‌گذاری شدند. در این روش، پیشوند HN نشان‌دهنده (ایستگاه نمونه‌برداری در جزیره هرمز) بوده و عدد پس از آن بیانگر شماره ایستگاه برداشت نمونه است. به‌عنوان مثال، کدهایی مانند HN-38، HN-48، HN-41 مربوط به نمونه‌های برداشت‌شده از واحدهای مختلف شامل آهک، خاک سرخ، نمک و ریولیت هستند و ترتیب عددی، توالی برداشت و موقعیت مکانی آن‌ها را مشخص می‌کند.

در این پژوهش، مجموعاً ۱۱ نمونه از واحدهای سنگی و خاک سرخ جزیره هرمز برداشت شد. انتخاب ایستگاه‌ها بر اساس سه معیار اصلی شامل تنوع لیتولوژیک، فاصله از منابع بالقوه آلودگی انسان‌زاد نظیر مسیرهای تردد کشتی‌ها و صنایع غرب بندرعباس، و پراکندگی مکانی مناسب در بخش‌های شمالی، مرکزی و جنوبی جزیره انجام گرفت. مختصات تمامی نقاط نمونه‌برداری با استفاده از دستگاه GPS^۲ ثبت شد تا امکان تحلیل فضایی فراهم شود. نمونه‌برداری از عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر صورت گرفت تا بخش فعال خاک و رسوبات سطحی که بیشترین تماس را با آلاینده‌ها دارند، مورد بررسی قرار گیرد. از هر ایستگاه حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ گرم نمونه با استفاده از ابزارهای استیل تمیز برداشت و بلافاصله در کیسه‌های پلی‌اتیلن دربسته قرار داده شد. نمونه‌ها در فصل خشک و تحت شرایط جوی پایدار جمع‌آوری شدند تا اثر بارندگی و رواناب بر غلظت عناصر به حداقل برسد. پس از انتقال به آزمایشگاه، نمونه‌ها در دمای اتاق خشک، الک ۲ میلی‌متر و برای آنالیز آماده شدند. آماده‌سازی نمونه‌ها برای آنالیز ICP-MS با استفاده از هضم اسیدی کامل و مخلوط

³ HNO₃

⁴ HF

⁵ HClO₄

⁶ Quality Assurance

⁷ Quality Control

⁸ Certified Reference Material

⁹ Limit of Detection

¹⁰ Limit of Quantification

¹¹ Inductively coupled plasma – mass spectrometry (ICP-MS)

¹² Upper Continental Crust

¹ X-Ray Fluorescence

² Global Positioning System

جدول ۱. استاندارد میانگین داده‌های ژئوشیمیایی برای پوسته

بالایی زمین، شیل و کربنات (۲۰)

عنصر (قسمت در میلیون)	کادمیوم	آرسنیک
پوسته بالایی زمین	۰/۱	۱/۵
شیل	۰/۲	۹
کربنات	۰/۰۵	۲

جدول ۱ میانگین غلظت عناصر آرسنیک و کادمیوم را در سه مرجع ژئوشیمیایی شامل پوسته بالایی زمین^۱، شیل و سنگ‌های کربناته نشان می‌دهد. این مقادیر به‌عنوان استانداردهای زمینه‌ای جهانی استفاده می‌شوند تا غلظت عناصر اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌های منطقه را با مقادیر طبیعی مقایسه کرده و میزان غنی‌شدگی یا آلودگی احتمالی را تعیین کرد.

شاخص تجمع ژئوشیمیایی (Igeo)^۲

شاخص تجمع ژئوشیمیایی (Igeo) برای ارزیابی میزان آلودگی فلزات سنگین در خاک و رسوبات به‌کار می‌رود و بر اساس مقایسه غلظت اندازه‌گیری‌شده هر عنصر با مقدار طبیعی یا پس‌زمینه آن محاسبه می‌شود. در این شاخص، یک ضریب ثابت ۱/۵ برای جبران نوسانات طبیعی زمین‌شناسی در فرمول لحاظ می‌گردد. مقدار Igeo با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد. در آن Cn غلظت اندازه‌گیری‌شده عنصر، Bn مقدار زمینه‌ای آن، و Igeo شاخص تجمع ژئوشیمیایی است.

$$I_{geo} = \ln \frac{C_n}{1.5B_n} \quad (1)$$

ضریب غنی‌سازی (EF)^۳

شاخص ضریب غنی‌سازی (EF) برای ارزیابی میزان غنی‌شدگی عناصر و تشخیص منشأ طبیعی یا انسان‌زاد آن‌ها به‌کار می‌رود. در این شاخص، غلظت عنصر مورد بررسی نسبت به یک عنصر مرجع پایدار نرمال‌سازی می‌شود تا اثر تغییرات لیتولوژیکی و زمینه زمین‌شناسی حذف گردد. مقدار EF با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد. در آن نسبت غلظت عنصر به عنصر مرجع در نمونه، با نسبت همان عناصر در مقدار پس‌زمینه مقایسه می‌شود. مقادیر بالاتر از ۱ نشان‌دهنده غنی‌شدگی و احتمال تأثیر

فعالیت‌های انسان‌زاد بوده و مقادیر نزدیک به ۱ بیانگر منشأ طبیعی و کنترل زمین‌زاد عناصر است.

$$EF = \frac{(C_x/C_{ref})_{sample}}{(C_x/C_{ref})_{background}} \quad (2)$$

Cx غلظت عنصر در نمونه، Cref غلظت عنصر مرجع در نمونه، Cx غلظت عنصر در پس‌زمینه و Cref غلظت عنصر مرجع در پس‌زمینه است.

ارزیابی ریسک زیست‌محیطی^۴

در این پژوهش ارزیابی ریسک زیست‌محیطی فلزات سنگین با استفاده از شاخص ریسک اکولوژیک بالقوه انجام شد. این شاخص بر اساس روش هاکانسون^۵ محاسبه گردید و با ترکیب غلظت اندازه‌گیری‌شده فلزات و ضرایب سمیت آن‌ها، میزان خطر بالقوه هر عنصر و ریسک تجمعی کل منطقه را تعیین می‌کند. نتایج حاصل از ریسک اکولوژیک بالقوه امکان شناسایی عناصر با ریسک بالاتر و نواحی حساس‌تر را فراهم کرده و نقش عوامل زمین‌زاد و انسان‌زاد را در افزایش ریسک اکولوژیک مشخص می‌سازد.

محاسبه ضریب آلودگی (Cf)^۶

ضریب آلودگی هر فلز از رابطه (۳) محاسبه شد:

$$C_f = \frac{C_i}{C_n} \quad (3)$$

Ci: غلظت اندازه‌گیری‌شده فلز در نمونه

Cn: غلظت زمینه در منطقه

محاسبه ریسک اکولوژیک هر فلز (Er)^۷

ریسک اکولوژیک هر فلز با استفاده از ضریب سمیت^۸ با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد:

$$E_r = T_r \times C_f \quad (4)$$

محاسبه ریسک اکولوژیک کل (RI)^۹

محاسبه و ارزیابی ریسک اکولوژیک کل از مجموع ریسک هر یک از فلزات با استفاده از رابطه ۵ به دست آمده است.

جدول ۲ طبقه‌بندی شدت ریسک در شاخص‌های ضریب آلودگی، ریسک اکولوژیک و ریسک اکولوژیک کل ارائه شده است. (۵)

$$R_I = \sum E_r \quad (5)$$

⁴ Ecological Risk Assessment – ERA

⁵ Hakanson

⁶ Contamination Factor

⁷ Ecological Risk

⁸ Toxic Response Factor

⁹ Risk Index

¹ UCC

² Geo-accumulation Index (Igeo)

³ Enrichment Factor (EF)

جدول ۲. طبقه‌بندی شدت ریسک در شاخص‌های ضریب آلودگی، ریسک اکولوژیک و ریسک اکولوژیک کل

شاخص	محدوده	طبقه‌بندی
تجمع ژئوشیمیایی (Igeo)	$I_{geo} \leq 0$	بدون آلودگی
	$0 < I_{geo} \leq 2$	بدون آلودگی تا آلودگی کم
	$2 < I_{geo} \leq 3$	آلودگی کم تا متوسط
	$3 < I_{geo} \leq 4$	آلودگی متوسط تا زیاد
	$4 < I_{geo} \leq 5$	آلودگی زیاد تا بسیار آلوده
ضریب غنی‌سازی (EF)	$EF < 2$	بسیار آلوده
	$2 < EF < 5$	منشا طبیعی
	$5 < EF < 20$	غنی‌سازی متوسط
	$20 < EF < 40$	غنی‌سازی شدید
	$EF \geq 40$	غنی‌سازی بسیار شدید
ضریب آلودگی	$Cf < 1$	غنی‌سازی فوق‌العاده شدید
	$1 < Cf < 3$	بدون آلودگی
	$3 < Cf < 6$	آلودگی کم
	$Cf \geq 6$	آلودگی متوسط
	ریسک اکولوژیک	$Er < 40$
$40 < Er < 80$		ریسک کم
$80 < Er < 160$		ریسک متوسط
$160 < Er < 320$		ریسک قابل توجه
$Er > 320$		ریسک زیاد
ریسک اکولوژیک کل	$RI < 150$	ریسک بسیار بالا
	$150 < RI < 300$	ریسک کم
	$300 < RI < 600$	ریسک متوسط
	$RI > 600$	ریسک زیاد

جدول ۳. افقی ضرایب سمیت در روش هاگانسون

عناصر قسمت در میلیون	وانادیوم	تیتانیوم	آهن	کادمیوم	آرسنیک
ضریب سمیت	در روش هاگانسون ضریب رسمی ندارد	در ریسک اکولوژیک بالقوه استفاده نمی‌شود	فلز ضروری، سمیت زیست‌محیطی بسیار پایین	۳۰	۱۰

تلفیق لایه‌های اطلاعاتی و تعیین مکان‌های مطابق با پهنه‌های مناسب

برای تهیه نقشه‌های هم‌پراکنش ژئوشیمیایی، ابتدا داده‌های نقطه‌ای غلظت عناصر همراه با مختصات مکانی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی GIS^۱ وارد شد و برای هر عنصر، با استفاده از روش درون‌یابی IDW^۲، یک سطح رستری پیوسته تولید گردید تا تغییرات مکانی

غلظت عناصر از حالت نقطه‌ای به سطحی تبدیل شود. سپس تمامی رسترهای حاصل به‌منظور قابل‌مقایسه شدن، با روش‌های استانداردسازی و فازی‌سازی به مقیاس مشترک صفر تا یک تبدیل شدند. پس از استانداردسازی، لایه‌های رستری عناصر مختلف با استفاده از ابزار ترکیب رستری لایه‌ها در نرم‌افزار ArcGIS به‌صورت ریاضی و منطقی با یکدیگر تلفیق شدند تا نواحی‌ای که چند عنصر به‌طور هم‌زمان الگوهای مشابه یا غلظت‌های هم‌زمان بالا دارند، شناسایی شود. خروجی این فرآیند نقشه‌های

¹ Geographic Information System

² Inverse Distance Weighting (IDW)

هم‌پراکنش ژئوشیمیایی بود که مناطق دارای رفتار مکانی مشابه عناصر را نمایش و امکان تفسیر الگوهای تجمع، هم‌زمانی و هم‌منشأ بودن عناصر را فراهم می‌سازد.

ابزارها و نرم‌افزارهای تحلیل داده

به‌منظور انجام محاسبات شاخص‌های آلودگی شامل ضریب غنی‌سازی (EF)^۱، شاخص تجمع ژئوشیمیایی (Igeo)^۲، شاخص‌های ارزیابی ریسک زیست‌محیطی و هم‌چنین پردازش اولیه داده‌ها و تهیه و تنظیم جداول، از نرم‌افزار میکروسافت اکسل^۳ استفاده شد. این نرم‌افزار به‌دلیل قابلیت‌های مناسب در مدیریت داده‌ها، محاسبات عددی، فرمول‌نویسی و تولید جداول، یکی از ابزارهای مهم در تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی در این پژوهش بوده است. علاوه بر این، برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی، تحلیل فضایی، تهیه نقشه‌های خروجی و شناسایی نواحی دارای پتانسیل آلودگی، از نرم‌افزار ArcGIS بهره گرفته شد. این نرم‌افزار امکان هم‌پوشانی لایه‌ها، تحلیل مکانی و نمایش فضایی شاخص‌های آلودگی را فراهم کرده و نقش مهمی در تفسیر نهایی نتایج داشته است.

یافته‌ها

همان‌طور که در (جدول ۴) مشاهده می‌شود، غلظت فلزات سنگین در چند گروه ریولیت به‌عنوان سنگ مادر، خاک سرخ (خاک حاصله)، سنگ آهک (سنگ رسوبی) و نمک (سنگ تبخیری) در منطقه مورد بررسی قرار گرفته است. به‌نحی دیگر شدن غلظت کل فلزات^۴ در نمونه‌های منطقه را با استفاده از غلظت در پوسته قاره‌ای فوقانی محاسبه شده است.

بر اساس داده‌های (جدول ۵) نشان داده که مقادیر فلزات آرسنیک و کادمیوم در نمونه‌های مورد بررسی از استاندارد کربناتی بسیار بالاتر است. آرسنیک نمونه‌برداری شده ۶۰/۴۴ برابر بیشتر از استاندارد است. هم‌چنین کادمیوم منطقه مورد بررسی ۱/۸ برابر بیشتر میزان استاندارد است. مقایسه مقادیر استاندارد آهن (۴-۱۰ کیلوگرم/گرم) با میزان منطقه مطالعاتی (۵۵/۲۴۲ کیلوگرم/گرم) ۵/۵۳ برابر بیشتر است. مقدار تیتانیوم نمونه منطقه ۳۸/۷۵ برابر بالاتر استاندارد کربناتی است. وانادیوم تنها نمونه‌ی مورد

بررسی است از استاندارد کربناتی پایین‌تر است. نتایج نشان می‌دهد غلظت میانگین آرسنیک در منطقه بالاتر از مقادیر در استاندارد شیل است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در غلظت میانگین میزان آهن در منطقه از میانگین جهانی بیشتر است.

بررسی‌های (شکل ۲) مقادیر آرسنیک در نمونه‌های منطقه نشان می‌دهد. کمترین میزان آرسنیک در سنگ‌های ریولیت دیده می‌شود. در خاک‌های سرخ حاصل از سنگ‌های آذرین اسیدی میزان آرسنیک به شکل قابل توجهی افزایش پیدا کرده و در نمونه آهک به حداکثر خود رسیده است. تنها در ۲ نمونه خاک سرخ آلودگی دیده شد. از مقایسه مقادیر کادمیوم در نمونه‌های آهک و نمک، غلظت این عنصر از میزان استاندارد کمی بالاتر (۰/۶-۰/۸ قسمت در میلیون) است که میزان آلودگی بالایی به حساب نمی‌آید. تنها در یک نمونه از ریولیت‌ها مقادیر کادمیوم (در حد ۰/۱ قسمت در میلیون) بیشتر از مقادیر استاندارد جدول ۲ دیده می‌شود که از آن به‌عنوان آلودگی یاد نمی‌شود. تنها در ۲ نمونه خاک‌های سرخ آلودگی دیده می‌شود. این آلودگی به فعالیت‌های صنعتی در منطقه باز می‌گردد. بنابراین نمونه‌های منطقه غیر از خاک سرخ‌های برداشت شده از محل دپو صنعتی فاقد آلودگی هستند.

جدول ۶ نتایج شاخص تجمع ژئوشیمیایی مولر عناصر سنگین در نمونه‌های مختلف منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بررسی شاخص ژئوشیمیایی آلودگی نشان داد که رفتار عناصر در واحدهای سنگی منطقه با هم تفاوت دارند. آرسنیک در اغلب نمونه‌های آهک و خاک‌سرخ دارای مقادیر بالای Igeo است و در بازه‌ی متوسط تا بسیار آلوده قرار می‌گیرد. در مقابل، کادمیوم تقریباً در تمامی نمونه‌ها دارای مقادیر منفی Igeo بوده و در طبقه بدون آلودگی قرار گرفته است؛ تنها یک نمونه خاک‌سرخ مقدار اندکی آلودگی نشان می‌دهد که از نظر محیط‌زیستی قابل‌چشم‌پوشی است. تیتانیوم بیشترین شدت آلودگی را در منطقه نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که تمامی نمونه‌ها، به‌ویژه ریولیت‌ها، در طبقه بسیار آلوده و مقادیر Igeo بسیار بالا (تا حدود ۷/۸ قسمت در میلیون) را ثبت کرده‌اند. عنصر وانادیوم در تمامی نمونه‌ها دارای مقادیر منفی شاخص تجمع ژئوشیمیایی بوده و در طبقه بدون آلودگی است. این نتایج نشان می‌دهد که تیتانیوم

¹ Enrichment Factor

² Geo-accumulation Index (Igeo)

³ Microsoft Excel

⁴ Total Metal Concentration

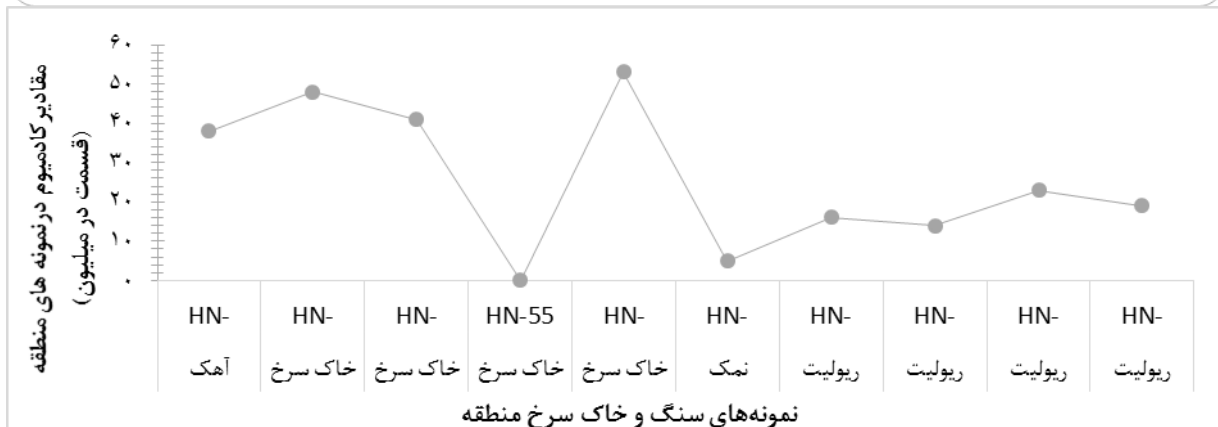
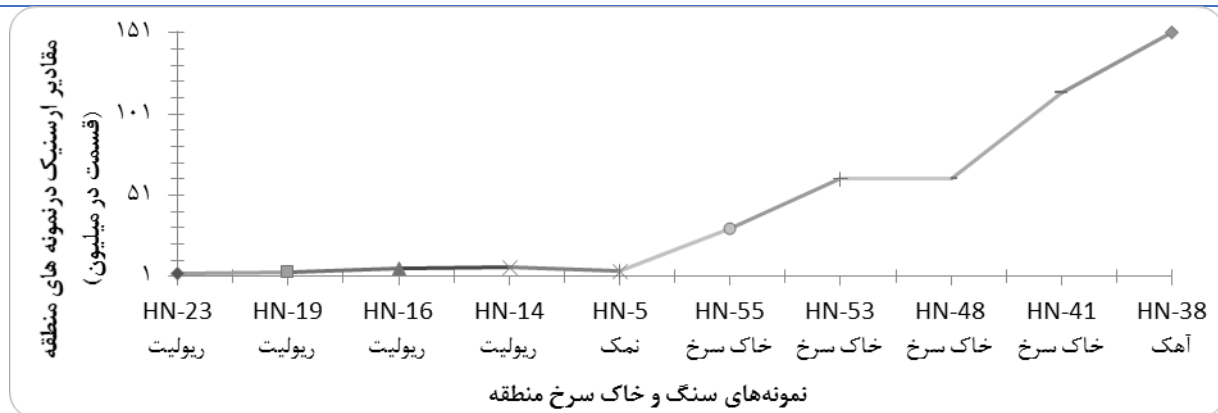
آلوده‌ترین عنصر منطقه و وانادیوم کم‌خطرترین عناصر از نظر شاخص تجمع ژئوشیمیایی هستند.

جدول ۴. غلظت فلزات سنگین در نمونه های منطقه

عناصر قسمت در میلیون	ریولیت	ریولیت	ریولیت	ریولیت	نمک	خاک سرخ	خاک سرخ	خاک سرخ	خاک سرخ	آهک
	HN-19	HN-23	HN-14	HN-16	HN-5	HN-53	HN-55	HN-41	HN-48	HN-38
آرسنیک	۳/۲	۲/۷	۶/۹	۶	۴	۶۱/۳	۳۰/۱	۱۱۴/۵	۶۱/۶	۱۵۱/۲
کادمیوم	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۳۱	۰/۱۶	۰/۲۷	۰/۹۴	۰/۲۱	۰/۰۵	۰/۱۸
آهن	۲۲۱۳۶	۱۶۰۱۴	۲۷۸۱۵	۲۷۱۵۹	۱۸۷۴۶۰	۳۵۹۷۶۳	۷۴۷۸۱	۳۰۳۱۵۱	۳۳۰۱۲۸	۵۵۲۴۲
تیتانیوم	۸۹۶	۱۲۹۷	۱۱۸۰	۱۱۶۱	۱۷	۵۷۹	۵۱۶	۶۱۱	۶۴۳	۱۵۵
وانادیوم	۶	۲۷	۱۱	۹	۳	۳۰	۲۷	۳۱	۵۴	۲۳

جدول ۵. مقایسه مقادیر فلزات سنگین در منطقه با مقادیر استاندارد

عناصر (قسمت در میلیون)	مقادیر استاندارد (قسمت در میلیون)			مقادیر منطقه مورد مطالعه (قسمت در میلیون)				آستانه سنجش (تشخیص دستگاه آنالیز)
	آذین اسیدی	آهک	پوسته زمین	ریولیت	خاک سرخ	آهک	نمک	
آرسنیک	۱-۲/۵	۱-۲/۵	۱/۸	۲/۷-۶/۹	۳۰/۱-۱۱۴/۵	۱۵۱/۲	۴	۰/۵
کادمیوم	۰/۰۵-۰/۲	۰/۰۴-۰/۱	۰/۱-۰/۲	۰/۰۵-۰/۳۱	۰/۰۵-۰/۹۴	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۰۵
آهن (کیلوگرم/گرم)	۱۴-۲۷	۴-۱۰	۵۰	۱۶۰۱-۱۷/۸۱	۷۴/۸۷-۳۹۵/۷۶	۵۵/۲۴۲	۱۸۷/۴۶۰	۱۰۰
تیتانیوم	۰/۳-۳/۴	۰/۴-۴	۴۴۰۰	۸۹۶-۱۲۹۷	۵۱۶-۶۴۳	۱۵۵	۱۷	۱۰
وانادیوم	۴۰-۹۰	۱۰-۴۵	۱۲۵	۶-۲۷	۲۷-۵۴	۲۳	۳	۲





شکل ۲. مقایسه مقادیر فلزات سنگین (آرسنیک، کادمیوم و آهن) در منطقه مورد مطالعه

جدول ۶. نتایج شاخص تجمع ژئوشیمیایی (Igeo) مولر عناصر سنگین در نمونه های مختلف منطقه

نمونه (قسمت در میلیون)	آرسنیک	طبقه بندی	کادمیوم	طبقه بندی	تیتانیوم	طبقه بندی	وانادیوم	طبقه بندی
آهک	۵/۶	بسیار آلوده	۰/۷	بدون آلودگی	۴/۷	زیاد- بسیار زیاد	۲/۶	بدون آلودگی
خاک سرخ	۴/۴	زیاد-بسیار زیاد	۲/۶	بدون آلودگی	۶/۷	بسیار آلوده	۱/۳	بدون آلودگی
خاک سرخ	۵/۳	بسیار آلوده	۰/۵	بدون آلودگی	۶/۷	بسیار آلوده	۲/۱	بدون آلودگی
خاک سرخ	۳/۳	متوسط-زیاد	۱/۶	کم- متوسط	۶/۴	بسیار آلوده	۲/۳	بدون آلودگی
خاک سرخ	۴/۳	زیاد-بسیار زیاد	۰/۲	بدون آلودگی	۶/۶	بسیار آلوده	۲/۲	بدون آلودگی
نمک	۰/۴	کم	۰/۹	بدون آلودگی	۱/۵	کم - متوسط	۵/۵	بدون آلودگی
ریولیت	۱	کم - متوسط	۰	کم	۷/۶	بسیار آلوده	۳/۹	بدون آلودگی
ریولیت	۱/۷	کم - متوسط	۱/۷	بدون آلودگی	۷/۶	بسیار آلوده	۳/۶	بدون آلودگی
ریولیت	۱/۳	کم - متوسط	۲/۶	بدون آلودگی	۷/۸	بسیار آلوده	۲/۳	بدون آلودگی
ریولیت	۰/۱	کم	۲/۶	بدون آلودگی	۷/۲	بسیار آلوده	۴/۵	بدون آلودگی

جدول ۷. نتایج ضریب غنی سازی (EF) عناصر سنگین در نمونه های مختلف منطقه

نمونه (قسمت در میلیون)	آرسنیک	طبقه بندی	کادمیوم	طبقه بندی	تیتانیوم	طبقه بندی	وانادیوم	طبقه بندی
آهک	۳/۶۹	متوسط	۰/۴۴	طبیعی	۱۹	شدید	۱/۲۵	طبیعی
خاک سرخ	۰/۲۵	طبیعی	۰/۰۲	طبیعی	۱۳/۱	شدید	۰/۴۶	طبیعی
خاک سرخ	۰/۵۱	طبیعی	۰/۰۷	طبیعی	۱۳/۷	شدید	۰/۳۴	طبیعی
خاک سرخ	۰/۵۴	طبیعی	۱/۷	طبیعی	۴۶/۵	فوق العاده شدید	۰/۵۴	طبیعی
خاک سرخ	۰/۳۱	طبیعی	۰/۱۴	طبیعی	۱۰/۸	شدید	۰/۲۵	طبیعی
نمک	۰/۰۳	طبیعی	۰/۱۳	طبیعی	۰/۸۵	طبیعی	۰/۰۵	طبیعی
ریولیت	۰/۳	طبیعی	۱/۵۵	طبیعی	۲۸۹	فوق العاده شدید	۰/۳۳	طبیعی
ریولیت	۰/۴۶	طبیعی	۰/۴۸	طبیعی	۲۸۵	فوق العاده شدید	۰/۳۹	طبیعی
ریولیت	۰/۶	طبیعی	۰/۴۲	طبیعی	۴۰۵	فوق العاده شدید	۱/۸۷	طبیعی
ریولیت	۰/۱۸	طبیعی	۰/۳	طبیعی	۲۷۳	فوق العاده شدید	۰/۲۷	طبیعی

کم قرار می گیرد؛ تنها نمونه آهک با EF حدود ۳/۶۹ قسمت در میلیون در طبقه غنی سازی متوسط قرار دارد که نشان دهنده افزایش نسبی این عنصر در این واحد است. کادمیوم در تمام نمونه ها EF کمتر از ۲ داشته و به طور کامل در محدوده «طبیعی» قرار دارد. در مقابل،

نتایج ضریب غنی سازی (EF) عناصر سنگین در نمونه های مختلف منطقه (جدول ۷) نشان داد که رفتار ژئوشیمیایی عناصر تفاوت قابل توجهی با یکدیگر دارند. آرسنیک در تمامی واحدهای سنگی دارای ضریب غنی سازی کمتر از ۲ بوده و در طبقه طبیعی تا غنی سازی

غنی‌سازی شدید در منطقه است، در حالی که آرسنیک، کادمیوم و وانادیوم عمدتاً در محدوده طبیعی هستند.

تیتانیوم بیشترین میزان غنی‌سازی را در منطقه نشان می‌دهد؛ به طوری که نمونه‌های خاک سرخ و به‌ویژه ریولیت‌ها دارای EF بسیار بالا (تا حدود ۴۰۵) بوده و در طبقه‌بندی غنی‌سازی شدید تا فوق‌العاده شدید قرار می‌گیرند. وانادیوم نیز در تمامی نمونه‌ها دارای ضریب غنی‌سازی کمتر از ۲ و در طبقه‌بندی طبیعی قرار دارند. یافته‌ها نشان می‌دهد که تیتانیوم تنها عنصر دارای

جدول ۸. نتایج ارزیابی ریسک زیست‌محیطی فلزات سنگین

سنگ (قسمت در میلیون)	آرسنیک	کادمیوم	ضریب آلودگی آرسنیک	ضریب آلودگی کادمیوم	ریسک اکولوژیک آرسنیک	ریسک اکولوژیک کادمیوم	ریسک اکولوژیکی کل	طبقه‌بندی
آهک	۲/۱۵۱	۱۸	≈۱/۱۹	۱۲	≈۱۱/۹	۳۶۰	≈۳۷۱/۹	ریسک بالا
خاک سرخ	۶/۶۱	۰/۰۵	≈۳/۶۷	≈۰/۰۳	≈۳۶/۷	≈۱/۰	≈۳۷/۷	ریسک کم
خاک سرخ	۵/۱۱۴	۰/۲۱	≈۲/۸۴	≈۰/۱۴	≈۲۸/۴	≈۴/۲	≈۳۲/۶	ریسک کم
خاک سرخ	۱/۳	۰/۹۴	≈۰/۷۲	≈۰/۶۳	≈۷/۲	≈۱۸/۹	≈۲۶/۱	ریسک کم
خاک سرخ	۳/۶۱	۰/۲۷	≈۲/۰۰	≈۰/۱۸	≈۲۰/۰	≈۵/۴	≈۲۵/۴	ریسک کم
نمک	۴	۰/۱۶	≈۲/۲۲	≈۰/۱۱	≈۲۲/۲	≈۳/۳	≈۲۵/۵	ریسک کم
ریولیت	۶	۰/۳۱	≈۳/۳۳	≈۰/۲۱	≈۳۳/۳	≈۶/۳	≈۳۹/۶	ریسک کم
ریولیت	۹/۶	۰/۰۹	≈۵/۳۳	≈۰/۰۶	≈۵۳/۳	≈۱/۸	≈۵۵/۱	ریسک کم
ریولیت	۷/۲	۰/۰۵	≈۴/۰۰	≈۰/۰۳	≈۴۰/۰	≈۱/۰	≈۴۱/۰	ریسک کم
ریولیت	۲/۳	۰/۰۵	≈۱/۲۸	≈۰/۰۳	≈۱۲/۸	≈۱/۰	≈۱۳/۸	ریسک کم

حدود ۳۷۲ محاسبه شد و در طبقه ریسک بالا قرار می‌گیرد.

جدول ۸ نتایج بررسی شاخص ریسک را نشان می‌دهد. بررسی شاخص ریسک اکولوژیک بالقوه نشان داد که الگوی آلودگی و ریسک در نمونه‌های مختلف منطقه تفاوت قابل توجهی دارد. نتایج نشان داد که آرسنیک در اغلب نمونه‌ها دارای ضریب آلودگی بین ۱/۲ تا ۳/۵ بوده و در محدوده آلودگی کم تا متوسط قرار می‌گیرد، در حالی که کادمیوم به‌جز نمونه آهکی دارای ضریب آلودگی بسیار پایین (کمتر از ۰/۲) است. با این حال، نمونه سنگ آهک به دلیل غلظت بسیار بالای کادمیوم (ضریب آلودگی ≈ ۱۲) دارای ریسک اکولوژیک کادمیوم برابر با ۳۶۰ بوده و در طبقه ریسک بسیار بالا قرار می‌گیرد. در سایر نمونه‌ها، مقادیر ریسک اکولوژیک آرسنیک عمدتاً در محدوده ریسک کم تا متوسط (۷ تا ۵۳) قرار داشته و سهم اصلی ریسک را آرسنیک تعیین می‌کند. شاخص ریسک کل (RI) نیز نشان داد که تمامی نمونه‌ها به‌جز سنگ آهک در محدوده ریسک کم ($RI < 150$) قرار دارند، در حالی که ریسک اکولوژیکی نمونه سنگ آهک

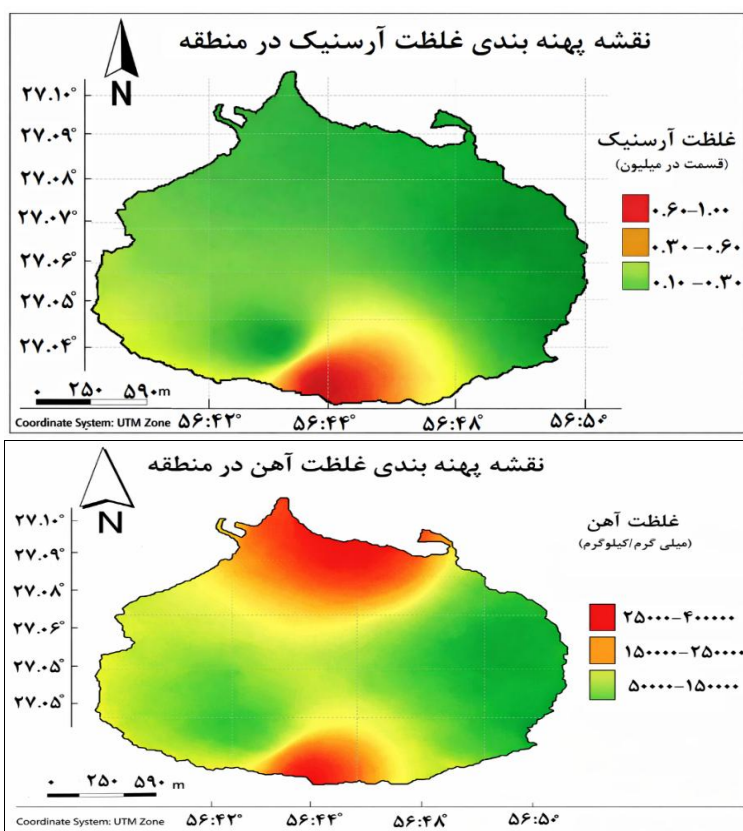
پراکندگی ژئوشیمیایی عناصر و رسم نقشه های

هم پراکنش

شکل ۳ نمونه‌ای از نقشه پراکندگی فراوانی عناصر آرسنیک و آهن در منطقه را نشان می‌دهد. غلظت آرسنیک در منطقه مطالعه الگوی فضایی ناهمگن دارد و از شمال به جنوب افزایش می‌یابد. نواحی شمالی و شرقی در محدوده غلظت پایین (۰/۱۰ تا ۰/۳۰ قسمت در میلیون) قرار دارند، در حالی که بخش‌های مرکزی در محدوده غلظت متوسط (۰/۳۰ تا ۰/۶ قسمت در میلیون) واقع شده‌اند. بیشترین غلظت آرسنیک در جنوب و جنوب‌غرب منطقه مشاهده می‌شود. غلظت آهن در منطقه مطالعه الگوی فضایی ناهمگنی دارد و از شمال به جنوب افزایش می‌یابد. نواحی شمالی و شمال‌شرقی عمدتاً در محدوده غلظت پایین (۵۰۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰۰ میلی‌گرم بر

منطقه مشاهده می‌شود که در محدوده ۲۵۰۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار دارد و به‌عنوان مناطق پرخطر شناسایی شدند.

کیلوگرم) قرار دارند. بخش‌های مرکزی در محدوده غلظت متوسط (۱۵۰۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) واقع شده‌اند. بیشترین غلظت آهن در جنوب و جنوب‌غرب



شکل ۳. نمونه‌ای از نقشه پراکنده‌ی فراوانی عناصر آرسنیک و آهن در منطقه

و نشان می‌دهد که ترکیب کانی‌شناسی و شرایط ژئوشیمیایی نقش تعیین‌کننده‌ای در تمرکز عناصر سنگین دارند. نتایج نشان داد که نتایج این مطالعه نشان داد که

تمامی نمونه‌های خاک سرخ برداشت شده دارای آلودگی بوده که بسیار خطرناک است. این آلودگی به فعالیت‌های صنعتی در منطقه باز می‌گردد. نمونه‌های خاک سرخ دارای آلودگی قابل‌توجه هستند و این آلودگی به‌طور مستقیم با فعالیت‌های صنعتی منطقه مرتبط است. در مقابل، نمونه‌های آهک، نمک و اغلب نمونه‌های ریولیت فاقد آلودگی قابل‌توجه بوده و در محدوده طبیعی قرار می‌گیرند.

مقادیر کادمیوم در بیشتر نمونه‌ها بین ۰/۰۵ تا ۰/۳۱ قسمت در میلیون قرار دارد. این مقادیر در مقایسه با میانگین پوسته بالایی زمین (۰/۱ قسمت در میلیون) و شیل (۰/۲ قسمت در میلیون) نشان‌دهنده غنی‌شدگی نسبی در برخی نمونه‌ها مانند ریولیت-HN-16 و HN-

بحث

این پژوهش با هدف ارزیابی پتروژئوشیمیایی فلزات سنگین در آلاینده‌های زیست‌محیطی جزیره هرمز انجام شد. در این مطالعه، داده‌های آزمایشگاهی معتبر برای محاسبه شاخص‌های آلودگی شامل EF و Igeo به‌کار گرفته شد تا میزان غنی‌شدگی و شدت آلودگی عناصر تعیین شود. همچنین به‌منظور سنجش پیامدهای احتمالی آلودگی بر محیط‌زیست، ارزیابی ریسک زیست‌محیطی عناصر سنگین انجام شد. برای تحلیل فضایی و تعیین نواحی دارای پتانسیل آلودگی نیز از تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که غلظت برخی عناصر سنگین در منطقه به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از مقادیر زمینه‌ای است و این موضوع اهمیت ویژه‌ای در تشخیص غنی‌شدگی، منشأ آلودگی و رفتار ژئوشیمیایی عناصر دارد. تنوع نمونه‌ها شامل ریولیت، نمک، خاک سرخ و آهک امکان تحلیل رفتار عناصر در محیط‌های مختلف را فراهم

در همین نمونه مقدار بالایی دارد. نمونه‌هایی مانند HN-19، HN-16 و HN-41 نیز مقادیر بالایی دارند که نشان‌دهنده‌ی غلبه فازهای آهن‌دار در منطقه است. در نمونه‌های آهک و نمک، آلودگی آهن به‌وضوح مشاهده می‌شود و نسبت آلودگی تا حدود ۵ برابر استاندارد می‌رسد. تیتانیوم در نمونه‌ها رفتار متفاوتی دارد و مقدار آن از ۱۷ قسمت در میلیون تا بیش از ۱۱۸۰ قسمت در میلیون متغیر است. مقدار بالای تیتانیوم در نمونه‌هایی مانند HN-14 و HN-48 نشان‌دهنده‌ی حضور کانی‌های مقاوم مانند روتیل و ایلمنیت است (۳۵، ۳۶) که معمولاً در سنگ‌های آذرین اسیدی و ریولیتی یافت می‌شوند (۳۷، ۳۸). مقدار بسیار پایین تیتانیوم در نمونه HN-5 (قسمت در میلیون) نشان‌دهنده‌ی منشأ رسوبی یا کربناته این نمونه است. این اختلاف‌ها نشان می‌دهد که تیتانیوم در منطقه بیشتر تحت تأثیر ترکیب سنگ مادر است تا فرآیندهای ثانویه. مطالعه امبوی و همکاران (۳۹) نشان می‌دهد که تبدیل ایلمنیت به روتیل در حضور سیالات ماگمایی-هیدروترمال می‌تواند موجب غنی‌سازی تیتانیوم شود. وانادیوم در محدوده‌ی ۶ تا ۵۴ قسمت در میلیون قرار دارد و بیشترین مقدار آن در نمونه‌های HN-53 و HN-48 مشاهده می‌شود. وانادیوم معمولاً در سنگ‌های آذرین و خاک‌های غنی از آهن تمرکز می‌یابد، بنابراین مقدار بالای آن در نمونه‌هایی که آهن زیادی دارند کاملاً قابل‌توجه است. مقدار پایین وانادیوم در نمونه‌هایی مانند HN-19 و HN-14 نشان‌دهنده منشأ فقیرتر این نمونه‌ها از نظر عناصر واسطه است. نتایج مطالعه اسنیار و همکاران (۴۰) در تجزیه و تحلیل عناصر کمیاب نشان می‌دهد که وانادیوم به‌طور قابل توجهی با اکسیدهای آهن مرتبط هستند. وجود کانی‌های آهن‌دار مانند هماتیت، مگنتیت و گوتیت در رسوبات منطقه و دپوی خاک سرخ در شمال جزیره موجب افزایش اکسید آهن در این بخش‌ها شده است. غلظت وانادیوم می‌تواند ناشی از حضور آپاتیت، مگنتیت و سنگ‌های ریولیتی باشد. همچنین آلودگی نفتی در بخش‌های ساحلی شمالی و شمال‌غربی می‌تواند در افزایش آن نقش داشته باشد. غلظت بالای آرسنیک نیز با حضور فازهای سولفیدی مانند پیریت مرتبط است. غنی‌شدگی عناصر سنگین در رسوبات جزیره هرمز با گزارش‌های ارائه‌شده از جزایر قشم و بحرین مشابه است.

۵۳ است. مقدار ۰/۳۱ قسمت در میلیون در نمونه HN-16 می‌تواند ناشی از فرآیندهای رسوبی یا تأثیر فعالیت‌های انسانی باشد. نمونه‌هایی مانند HN-19، HN-23 و HN-48 مقادیر نزدیک به مقدار زمینه کربنات (۰/۰۵ قسمت در میلیون) دارند و رفتار طبیعی‌تری نشان می‌دهند. مطالعه‌ی سلیس‌هرناندس و همکاران (۲۵) نشان می‌دهد که غنی‌سازی کادمیوم اغلب ناشی از فعالیت‌های شهری و مدیریت ضعیف در پسماند است. نتایج این پژوهش نیز با یافته‌های آن‌ها هم‌خوانی دارد. نتایج بررسی عبدالخانی‌نژاد و منوری نشان داد که بالا بودن غلظت قابل جذب عناصر فلزات سنگین در شیرابه محل دفن پسماند نشانگر ورود آلاینده کادمیوم به خلیج فارس است (۲۶). نتایج پژوهش دهقانی و همکاران نشان می‌دهد فلزات سنگین (کادمیوم و سرب) از طریق پساب صنعتی وارد محیط و در رسوبات تجمع می‌یابند. بنابراین خطر آزادسازی ثانویه فلزات سنگین در اثر آشفستگی یا تغییر شیمی رسوبات وجود دارد (۲۷). بررسی‌ها در ارتباط با غلظت آرسنیک نشان می‌دهد که مقادیر آن در برخی نمونه‌ها مانند HN-53، HN-55 و HN-19 به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از میانگین پوسسته بالایی زمین است (۲۸). مقدار بسیار بالای آرسنیک در نمونه HN-53 (حدود ۶۱ قسمت در میلیون) می‌تواند ناشی از حضور کانی‌های آهن‌دار، شرایط اکسیداسیون بالا یا تجمع ثانویه در خاک‌های سرخ باشد (۲۹، ۳۰). در مقابل، نمونه‌هایی مانند HN-16 و HN-5 مقادیر بسیار پایینی دارند که حتی از مقدار آرسنیک در سنگ‌های کربناته (۲ قسمت در میلیون) نیز کمتر است. این اختلاف شدید نشان‌دهنده منشأ ناهمگن آرسنیک و تأثیر ترکیب سنگ مادر و فرآیندهای هوازدگی است. مطالعه‌ی هیوانگ و همکاران (۳۱) نشان می‌دهد که آهن (II)، آهن و کلسیم محلول محرک‌های اصلی تحرک آرسنیک هستند. همچنین چن و همکاران (۲۹) گزارش کردند که تغییرات کاربری زمین و افزایش سطح دریا می‌تواند موجب آزادسازی آرسنیک در خاک‌های ساحلی شود. عنصر آهن بیشترین دامنه‌ی تغییرات را دارد. مقدار بسیار بالای آهن در نمونه‌ها نشان‌دهنده‌ی حضور گسترده کانی‌های آهن‌دار مانند هماتیت و گوتیت است (۳۲-۳۳). این مقدار بالا می‌تواند نقش مهمی در جذب و نگهداشت آرسنیک داشته باشد و توضیح می‌دهد که چرا آرسنیک

جایی که فعالیت‌های انسانی و ویژگی‌های زمین‌شناسی محلی نقش مهمی در افزایش غلظت فلزات داشته‌اند. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات انجام‌شده در سایر مناطق خلیج فارس و محیط‌های مشابه هم‌خوانی قابل توجهی دارد (۴۱؛ ۴۲؛ ۴۳) هم‌چنین الگوی آلودگی مشاهده‌شده در هرمز با نتایج مطالعات نواحی صنعتی جنوب ایران، از جمله عسلویه، بندرعباس و بوشهر، هم‌راستا است و نشان می‌دهد که ورود پساب‌های صنعتی و تردد کشتی‌ها از عوامل اصلی افزایش کادمیوم و آرسنیک در رسوبات ساحلی هستند (۴۴؛ ۴۵) در محیط‌های تبخیری-کربناته نیز رفتار ژئوشیمیایی عناصر در نمونه‌های آهکی و نمکی هرمز با الگوهای گزارش‌شده از هرمز، لارستان عمان و امارات مطابقت دارد و نشان می‌دهد که ترکیب سنگ مادر نقش تعیین‌کننده‌ای در غلظت عناصر دارد (۴۶، ۴۷). بررسی تحقیقات منتشر شده و مقایسه زمین‌شناسی شمال غربی ایران با غرب و جنوب ایران نشان می‌دهد که آلاینده‌ها با زمین‌شناسی ارتباط دارند. غنی‌شدگی آهن و آرسنیک در خاک‌های سرخ هرمز با مطالعات انجام‌شده بر خاک‌های سرخ در مناطق مختلف سازگار است و بیانگر تأثیر کانی‌های آهن‌دار بر تجمع عناصر سنگین است (۴۸). این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که نتایج پژوهش حاضر نه تنها با الگوهای منطقه‌ای بلکه با روندهای جهانی در محیط‌های مشابه نیز هم‌خوانی دارد. نتایج حاصل از شاخص‌های آلودگی و ریسک اکولوژیک نشان می‌دهد که رفتار آرسنیک و کادمیوم در واحدهای سنگی مختلف منطقه یکسان نیست و هر سنگ‌ساز به‌گونه‌ای متفاوت در افزایش یا کاهش ریسک نقش دارد. آرسنیک در اغلب نمونه‌ها دارای ضریب آلودگی کم تا متوسط بود و مقدار ریسک اکولوژیک آن عمدتاً در محدوده ریسک کم تا متوسط قرار گرفت؛ این موضوع نشان می‌دهد که آرسنیک اگرچه در برخی نقاط (به‌ویژه ریولیت‌های HN-14 و HN-23) غلظت بالاتری دارد، اما به‌دلیل ضریب سمیت پایین‌تر نسبت به کادمیوم، سهم محدودتری در افزایش ریسک کل ایفا می‌کند. در مقابل، کادمیوم با وجود این‌که در بیشتر نمونه‌ها غلظت پایینی دارد، در نمونه‌ی آهکی با افزایش غیرعادی غلظت مواجه است و همین امر باعث شده است که ضریب آلودگی آن به حدود ۱۲ برسد و شاخص ریسک اکولوژیک کادمیوم در طبقه «ریسک بسیار بالا» قرار گیرد. این رفتار

نشان می‌دهد که کادمیوم در منطقه دارای منبعی متفاوت از سایر عناصر است و منشأ آن فعالیت‌های انسان‌زاد است. مانند ورود پساب‌ها، آلودگی‌های صنعتی یا تجمع انتخابی در محیط‌های کربناته است. از سوی دیگر، مقایسه ریسک اکولوژیک کل بین نمونه‌ها نشان داد که تقریباً تمامی نقاط منطقه در محدوده «ریسک کم» قرار دارند و تنها نمونه آهک دارای RI بالا و در طبقه «ریسک زیاد» است. این موضوع بیانگر آن است که ریسک اکولوژیک منطقه به‌طور کلی پایین است، اما وجود یک نقطه با ریسک بالا می‌تواند پایداری اکولوژیک منطقه را تحت تأثیر قرار دهد. چنین الگوی نقطه‌ای معمولاً ناشی از ورود موضعی آلاینده‌ها است و نه فرآیندهای زمین‌زاد. بنابراین، تمرکز اقدامات مدیریتی باید بر شناسایی منشأ کادمیوم در ناحیه آهکی و کنترل ورودی‌های احتمالی آن باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه آلودگی آرسنیک در برخی واحدهای سنگی قابل توجه است، اما کادمیوم به‌عنوان عامل اصلی ریسک اکولوژیک منطقه شناخته می‌شود. این یافته‌ها اهمیت پایش مستمر، مدیریت منابع آلاینده و بررسی دقیق‌تر منشأ کادمیوم در واحد آهکی را برجسته می‌کند.

نتیجه‌گیری

جزیره هرمز دارای محیطی پیچیده از نظر کانه‌زایی است که موجب تجمع فلزات سنگین در رسوبات شده است. شرایط فیزیکی و شیمیایی آب (دما، pH، عمق و Eh) نقش مهمی در حل‌شدن، انتقال و ته‌نشینی فلزات دارند. تشکیل کانی‌های پیریت و دولومیت، همراه با کمپلکس‌سازی فلزات و واکنش با نمک‌ها و کربنات‌ها، منبع اصلی آلودگی‌های زیست‌محیطی در منطقه است. بررسی ژئوشیمیایی و زمین‌زیست‌محیطی رسوبات و سنگ‌های جزیره هرمز نشان داد که غلظت برخی فلزات سنگین به‌ویژه آرسنیک و آهن به‌طور معناداری بالاتر از مقادیر زمینه‌ای و استانداردهای جهانی است. به‌عنوان نمونه، میزان آرسنیک در تمامی نمونه‌ها فراتر از حدود مجاز بود و در برخی نقاط تا بیش از ۶۰ برابر غلظت متوسط پوستره قاره‌ای افزایش یافت که نشان‌دهنده ریسک بالای زیست‌محیطی است. هم‌چنین در خاک‌های سرخ منطقه، غنی‌شدگی چشمگیری از آهن مشاهده شد که ارتباط مستقیم با حضور کانی‌هایی چون پیریت، گالن

تعارض منافع: نویسندگان اظهار می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی: هیچ‌گونه حمایت مالی برای این مطالعه وجود ندارد.

ملاحظات اخلاقی: نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هر گونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

سهم نویسندگان: این مقاله بخشی از رساله دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران با راهنمایی آقایان دکتر سیدجمال شیخ‌ذکریا و دکتر شهرام بیگ‌پور و با مشاوره‌ی جناب آقای دکتر سیدمحمد هاشم-امامی است. طراح ابتدایی این مطالعه به‌عهده‌ی استادان راهنما و قسمت‌هایی از تحلیل و آنالیزها بر عهده‌ی جناب آقای دکتر سیدمحمد هاشم‌امامی بوده است. جمع‌آوری داده‌ها و نگارش مقاله بر عهده‌ی خانم نجمیه غلامی است. در نهایت بازبینی و تکمیل تحلیل داده‌های محاسبه‌شده با راهنمایی جناب آقای دکتر بیگ‌پور انجام شده است.

Reference

- 1) Abdi, Imran, Ahmadi, Salman, & Tabaraki. (2020). Chromium biosorption by *Sargassum ilicifolium*, kinetics and optimization using response surface methodology (RSM) design. *Microbial Biology*, 9(35), 41-57. (Persian)
- 2) Mulware, S. J. (2020). Toxicity of heavy metals, a subject in review. *International Journal of Recent Research in Physics and Chemical Sciences*, 6(2), 30-43. (Persian)
- 3) Teschke, R. (2022). Aluminum, arsenic, beryllium, cadmium, chromium, cobalt, copper, iron, lead, mercury, molybdenum, nickel, platinum, thallium, titanium, vanadium, and zinc: molecular aspects in experimental liver injury. *International journal of molecular sciences*, 23(20), 12213.
- 4) Dung, T. T. T., Cappuyns, V., Swennen, R., & Phung, N. K. (2013). From geochemical background

و هماتیت دارد. نتایج حاکی از آن است که هرچند غلظت عناصری نظیر کادمیوم، تیتانیوم و وانادیوم در محدوده طبیعی باقی مانده، اما وجود مقادیر غیرعادی از آرسنیک می‌تواند منجر به آلودگی پایدار در محیط‌های ساحلی و تهدیدی جدی برای سلامت اکوسیستم دریایی و جوامع انسانی وابسته به آن باشد. علاوه بر این، همبستگی مکانی آلودگی‌ها با مناطق صنعتی و محل دپوی خاک سرخ در شمال جزیره نشان می‌دهد که عوامل انسان‌زاد در کنار زمینه زمین‌شناسی، نقش مهمی در افزایش غلظت فلزات سنگین داشته‌اند. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که جزیره هرمز به‌عنوان یکی از پهنه‌های حساس خلیج فارس، نیازمند برنامه‌ریزی دقیق برای مدیریت و پایش بلندمدت آلودگی‌های فلزی است. استفاده از شاخص‌های زیست‌محیطی، مطالعات تکمیلی ژئوشیمیایی و تدوین راهکارهای کنترلی می‌تواند در کاهش ریسک آلودگی و حفاظت از منابع طبیعی منطقه نقش کلیدی ایفا نماید.

تشکر و قدردانی: بدین‌وسیله از تمامی اساتید دانشگاه علوم تحقیقات تهران که با مساعدت‌ها و دقت علمی خویش، راهگشای مراحل مختلف این پژوهش بودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

determination to pollution assessment of heavy metals in sediments and soils. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 12(4), 335-353.

- 5) Bradl, H. B. (2005). Sources and origins of heavy metals. In *Interface science and technology* (Vol. 6, pp. 1-27). Elsevier.
- 6) Chen, Y., Sun, Y., Yang, Y., Hu, S., Cui, K., Zhu, C. & Huang, Q. (2026). Differential distribution characteristics of heavy metal resistance genes and driving mechanisms of heavy metal speciation in river-lake system sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 142080.
- 7) Ahmed, M., Maryam, Aslam, A. A., Aftab, F., Saeed, A., Sanaulah, M., & Mehdi, M. Z. (2026). Heavy Metal Contamination in Chocolates and Candies: Sources, Health Risks, and Analytical Insights. *Journal of Chemistry*, 2026(1), 5580095.

- 8) Sharma, M., Kant, R., Sharma, A. K., & Sharma, A. K. (2025). Exploring the impact of heavy metals toxicity in the aquatic ecosystem. *International Journal of Energy and Water Resources*, 9(1), 267-280.
- 9) El-Sharkawy, M., Alotaibi, M. O., Li, J., Du, D., & Mahmoud, E. (2025). Heavy metal pollution in coastal environments: ecological implications and management strategies: a review. *Sustainability*, 17(2), 701.
- 10) Geng, M., Qian, Z., Jiang, H., Huang, B., Huang, S., Deng, B., & Zeng, J. (2024). Assessing the impact of water-sediment factors on water quality to guide river-connected lake water environment improvement. *Science of The Total Environment*, 912, 168866.
- 11) Ju, Y. R., Chen, C. F., Lim, Y. C., Tsai, C. Y., Chen, C. W., & Dong, C. D. (2022). Developing ecological risk assessment of metals released from sediment based on sediment quality guidelines linking with the properties: A case study for Kaohsiung Harbor. *Science of the Total Environment*, 852, 158407.
- 12) Şener, E., Şener, Ş., & Bulut, C. (2023). Assessment of heavy metal pollution and quality in lake water and sediment by various index methods and GIS: A case study in Beyşehir Lake, Turkey. *Marine Pollution Bulletin*, 192, 115101.
- 13) Saleh, A. H., Elsayed, S., Gad, M., Elmetwalli, A. H., Elsherbiny, O., Hussein, H., & Abou El-Safa, M. M. (2022). Utilization of pollution indices, hyperspectral reflectance indices, and data-driven multivariate modelling to assess the bottom sediment quality of Lake Qaroun, Egypt. *Water*, 14(6), 890.
- 14) Ellison, R. A., Thomas, R. J., Jacobs, J., & Pharaoh, T. C. (2022). Anatomy and uplift history of the emergent salt domes of the United Arab Emirates. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(1), 23.
- 15) Mohriak, W. (2025). Salt in the Earth sciences: Basin analysis and salt tectonics.
- 16) Lan, S., Dong, L., Shen, P., Mao, Y., Zhang, T., Zheng, Q., ... & Shen, Z. (2026). Green flotation depressants of typical salt and silicate gangue minerals in froth flotation—a comprehensive review. *Green Chemistry*.
- 17) Saidov, A., Yakhshieva, Z., Makhkamova, N., Gudalov, M., Djuraeva, N., Umirzaqov, O., & Juraev, A. (2024). Examining Environmental Impact through Geological Interactions and Earth's Layers. *Archives for Technical Sciences*, 2(31), 230-239.
- 18) Aldawish, A. M. A. (2024). *The Application of the Transit Passage Regime in Straits Used for International Navigation: A Study of the Strait of Hormuz* (Doctoral dissertation, University of Essex (United Kingdom)).
- 19) Akbarzadeh-Chomachaei, G., Koohkan, H., Dehghani, R., Mortazavi, M. S., & Gozari, M. (2023). Comparison of heavy metals pollution in coastal sediments of Bandar Abbas, Qeshm Island and Hormuz-Lark, Persian Gulf. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(10), 10861-10876.
- 20) Taylor, S. R., & McLennan, S. M. (1985). The continental crust: its composition and evolution.
- 21) Hsu, B. M., Chen, Z., & Lin, K. (2006). Geochemical assessment of heavy metal contamination in sediments. *Environmental Geochemistry and Health*, 28(3), 215–228.
- 22) Mason, B., & Moore, C. B. (1982). *Principles of geochemistry* (4th ed.). New York: Wiley and Sons.
- 23) Reimann, C., & De Caritat, P. (2012). *Chemical elements in the environment: factsheets for the geochemist and environmental scientist*. Springer Science & Business Media.
- 24) Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A. B. (2007). *Trace elements from soil to*

- human*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- 25) Urme, O., Reza, A. S., Adham, M. I., & Sattar, G. S. (2025). Arsenic, manganese, and iron concentration in groundwater of northwestern part of Bangladesh using self-organizing maps: Implication for health risk assessment. *Heliyon*, *11*(2).
 - 26) Chen, M., Li, Y., Zhang, Y., Ji, W., Lu, Y., Song, Z. & Long, T. (2025). Unstable geogenic arsenic in reclaimed coastal soils poses environmental risks. *Communications Earth & Environment*, *6*(1), 633.
 - 27) Waikhamnuan, T., Chawchai, S., & Bissen, R. (2025). Geochemistry of laterite around UNESCO world heritage sites in Kamphaeng Phet, Thailand. *npj Heritage Science*, *13*(1), 17.
 - 28) Huang, X., Long, J., Li, Q., Peng, P., Zhou, K., Wan, Y., ... & Yang, Z. (2025). Cadmium and Arsenic Accumulation in Agricultural Soils from Smelting Areas: Multivariate Analysis of Characteristics, Drivers, and Cadmium Isotope Fractionation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 119343.
 - 29) Celis-Hernández, O., Ontiveros-Cuadras, J. F., Ward, R. D., Girón-García, M. P., Pérez-Ceballos, R. Y., Canales-Delgado, J. C., ... & Merino-Ibarra, M. (2022). Biogeochemical behaviour of cadmium in sediments and potential biological impact on mangroves under anthropogenic influence: A baseline survey from a protected nature reserve. *Marine Pollution Bulletin*, *185*, 114260.
 - 30) Abdolkhaninejad, T., & Munavari S. M., (2017). Evaluation of the effects of heavy metals (nickel, lead, cadmium) in the infiltration process of landfill leachate on the fish *Eleutheronema tetradactylum*.
 - 31) Roy, P. (2022). Detection of iron-bearing mineral assemblages in Nainarmalai granulite region, south India, based on satellite image processing and geochemical anomalies. *Environmental Monitoring and Assessment*, *194*(12), 866.
 - 32) Mahanta, C. R., Sahoo, P. R., Mohanta, M. K., Rath, R. K., Dey, S., Tripathy, S. K., ... & Venkatesh, A. S. (2023). Mineralogical characteristics of hematitic iron ore: a geometallurgical study on ore from Eastern India. *Minerals*, *13*(9), 1194.
 - 33) Jiang, Z., Liu, Q., Roberts, A. P., Dekkers, M. J., Barrón, V., Torrent, J., & Li, S. (2022). The magnetic and color reflectance properties of hematite: From Earth to Mars. *Reviews of Geophysics*, *60*(1), e2020RG000698.
 - 34) Nunna, V., Suthers, S. P., Pownceby, M. I., & Sparrow, G. J. (2022). Beneficiation strategies for removal of silica and alumina from low-grade hematite-goethite iron ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, *43*(8), 1049-1067.
 - 35) Sukmara, S., Adi, W. A., & Manaf, A. (2022). Mineral analysis and its extraction process of ilmenite rocks in titanium-rich cumulates from Pandeglang Banten Indonesia. *Journal of Materials Research and Technology*, *17*, 3384-3393.
 - 36) Malybayev, G., Korabayev, A., Sharipov, R., Al Azzam, K. M., Negim, E. S., Baigenzhenov, O., & Shayakhmetova, R. (2024). Processing of titanium-containing ores for the production of titanium products: A comprehensive review. *Heliyon*, *10*(3).
 - 37) Cédric, B. B., Bertrant, B. S., Adama, A., Eric, B. E., Florent, A. D., Nkongho, A. E., & Emile, E. (2024). Origin and morphodynamic characterization of river sands, southwestern coast Cameroon: evidence from grain size, heavy minerals, and ilmenite chemistry. *Arabian Journal of Geosciences*, *17*(4), 115.
 - 38) Rana, M. S., Saha, M. S., Biswas, P. K., Shahriar, M. S., Ahmed, F., & Zaman, M. N. (2023). Characterization and Upgrading of Low-grade Brahmaputra River Basin Ilmenite Concentrate: Exploring an Alternate Feedstock for Synthetic Rutile Preparation: Rana, Saha,

- Biswas, Shahriar, Ahmed, and Zaman. *Jom*, 75(12), 5773-5784.
- 39) Embui, V. F., Suh, C. E., Neh Fru, M. I., Tabe Atemson, C., Afahnwie, N. A., & Bassahak, J. (2025). Metasomatic-alteration of ilmenite to rutile in Ekomedion, SW Cameroon: Implications for provenance. *Journal of Sedimentary Environments*, 10(2), 349-371.
- 40) Asniar, N., Purwana, Y. M., Surjandari, N. S., & Setiawan, B. (2025, September). Geochemical, Mineralogical Properties and Engineering Significance of Volcanic Soils in Central Java, Indonesia. In *International Conference on Urban Infrastructure Development* (pp. 441-452). Cham: Springer Nature Switzerland.
- 41) Naser, H. A. (2013). Assessment and management of heavy metal pollution in the marine environment of the Arabian Gulf: a review. *Marine pollution bulletin*, 72(1), 6-13.
- 42) Ashayeri, N. Y., & Keshavarzi, B. (2019). Geochemical characteristics, partitioning, quantitative source apportionment, and ecological and health risk of heavy metals in sediments and water: A case study in Shadegan Wetland, Iran. *Marine pollution bulletin*, 149, 110495.
- 43) Shi, W., Li, T., Feng, Y., Su, H., & Yang, Q. (2022). Source apportionment and risk assessment for available occurrence forms of heavy metals in Dongdahe Wetland sediments, southwest of China. *Science of the Total Environment*, 815, 152837.
- 44) Mukhtar, A., Zulkifli, S. Z., & Ismail, A. (2026). Heavy metals contamination of cobalt (Co), nickel (Ni), arsenic (As), cadmium (Cd), and lead (Pb) and their ecological risks in seagrass sediments of the Pulai River Estuary, Malaysia. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 116(3), 49.
- 45) Jeyasingh, V., Thirunavukkarasu, R., Sivaprakasam, V., Gunasekaran, S., Sathyanarayanan, B., Sampath, P., & Karthikeyan, A. (2026). Tracing anthropogenic signatures of heavy metal dispersion and risk profiling in marine sediments of tuticorin's industrial coast. *Ocean Dynamics*, 76(1), 4.
- 46) Nokhbatolfoghahaei, A., Adineh, S., Nezafati, N., Ghorbani, M., & Abdolabadi, B. E. (2025). Discovery of sassolite and glauberite in the Deh-Kuyeh, Karmostaj, and Paskhand salt diapirs (Larestan, Iran): mineralogical insights into the genesis of the late Ediacaran Hormuz evaporite basin. *Carbonates and Evaporites*, 40(3), 106.
- 47) Gad, A., Abdelghany, O., Arman, H., Mahmoud, B., Aldahan, A., Paramban, S., & Saima, M. A. (2023). Geochemistry and Sr, S, and O stable isotopes of Miocene Abu Dhabi evaporites, United Arab Emirates. *Heliyon*, 9(5).
- 48) Zandkarimi, K., Zeydalinejad, N., Sadeghi, E., Mobaraki, J., Gavili, S., Amani, H., & Karami, F. Groundwater for Sustainable Development.