

Article Type Case Study

نوع مقاله مطالعه موردی

Assessment of Heavy Metal Pollution Indices in the Atrak River Water Flow Due to the Discharge of Bojnord Municipal Wastewater Treatment Plant Effluent

ارزیابی شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین جریان آب رودخانه اترک ناشی از تخلیه پساب تصفیه خانه فاضلاب شهری بجنورد

M. Jahani¹, S. Partani^{2*}, Gh. H. Akbari³, A. Jafari¹

مرضیه جهانی^۱، صادق پرتانی^{۲*}، غلامحسین اکبری^۳، علی جعفری^۱

1, 2, 3 – M.Sc. Graduate, Assistant Professor, and Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Bojnord, Bojnord, Iran.

۱، ۲ و ۳ – به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد، استادیار و دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران.

Corresponding Author Email: S_partani@ub.ac.ir

E-Mail: S_partani@ub.ac.ir

Received 18-03-2025
Revised 18-05-2025
Accepted 27-05-2025
Available Online 21-06-2025

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۱۲/۲۸
تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۲/۲۸
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۳/۰۶
تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

Abstract

چکیده

This study investigates variations in heavy metal concentrations to assess potential pollutant transport and effective transport distances in the Atrak River, influenced by urban wastewater treatment plant discharge and downstream agricultural activities. The methodology comprises field surveys, in-situ measurements, sample collection, and index analysis. Water and sediment samples were collected from five and one selected stations, respectively, during summer 2024, using duplicate sampling to ensure Quality Assurance (QA) and Quality Control (QC). Heavy metals were quantified via ICP-OES. The Contamination Degree (Cd) index indicated moderate contamination at all stations except S2 (downstream of WWTP discharge). The Heavy Metal Evaluation Index (HEI) and Heavy Metal Pollution Index (HPI) confirmed peak contamination at Station S2. Spatial distribution patterns varied: arsenic (As) and lead (Pb) showed consistent concentrations along the river, while chromium (Cr) and iron (Fe) exhibited an increasing trend downstream, attributed to their strong correlation. The Geoaccumulation Index (Igeo) revealed no sediment contamination for any of the metals. The Contamination Factor (CF) indicated moderate pollution for Cd. The Hazard Index (HI) for children was approximately 0.5, signifying non-carcinogenic risk. Consequently, under prevailing hydraulic conditions, the river's capacity to transport wastewater-derived pollutants is limited to a 50–100 meters range from the discharge point. These findings underscore the critical importance of wastewater management and continuous water quality monitoring in similar watersheds.

این پژوهش به بررسی تغییرات غلظت فلزات سنگین با هدف انتقال آلاینده‌های احتمالی و فاصله انتقال موثر آن‌ها در رودخانه اترک که تحت تاثیر از تخلیه پساب تصفیه‌خانه شهری بوده و کاربری کشاورزی را در پایین دست نقطه تخلیه به همراه دارد می‌پردازد. که شامل مراحل پیمایش میدانی، سنجش‌های درجا، نمونه‌برداری و تحلیل شاخص‌ها می‌باشد. نمونه‌برداری از محیط آب و رسوب به ترتیب در پنج و یک ایستگاه منتخب در تابستان ۱۴۰۳ با دو نمونه هم‌زمان (Duplicate) انجام شد، تا از کیفیت نمونه برداری اطمینان حاصل شود (QA) و نمونه‌ها نماینده واقعی جامعه قابل کنترل مجدد باشد (QC). اندازه‌گیری فلزات سنگین به وسیله دستگاه ICP-OES انجام شد. شاخص C_d در کلیه ایستگاه‌ها به جز ایستگاه S2، (پایین‌دست تخلیه پساب)، در محدوده آلودگی متوسط قرار دارد. شاخص‌های HEI و HPI حداکثر آلودگی را در ایستگاه S2 تأیید کردند. الگوی توزیع مکانی عناصر سنگین متفاوت بود. As و Pb دارای طیف ثابت در طول مسیر هستند، در حالی که Cr و Fe روند افزایشی را نشان می‌دهند. چراکه همبستگی قوی بین آن‌ها وجود دارد. شاخص I_{geo} برای تمامی فلزات فاقد آلودگی هستند. مقادیر شاخص C_f برای Cd در محدوده آلودگی متوسط قرار دارد. شاخص HI برای خردسالان مقدار حدود ۰/۵ را نشان می‌دهد که حاکی از غیر سرطان‌زا بودن می‌باشد. بر این اساس، در شرایط هیدرولیکی حاکم، رودخانه توانایی انتقال آلاینده‌های ناشی از پساب را تنها تا فاصله ۵۰-۱۰۰ متری از نقطه تخلیه دارد. این یافته‌ها اهمیت مدیریت پساب و پایش مستمر کیفیت آب در مناطق مشابه را برجسته می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، کیفیت آب، فلزات سنگین، رودخانه.

Keywords: Pollution, Water Quality, Heavy Metals, River.

HomePage: <https://jwsd.um.ac.ir>

How to cite this article: Jahani, M., Partani, S., Akbari, Gh. H. & Jafari, A. (2025). Assessment of Heavy Metal Pollution Indices in the Atrak River Water Flow Due to the Discharge of Bojnord Municipal Wastewater Treatment Plant Effluent. Journal of Water and Sustainable Development, 12(1), 64-81. <https://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v12i1.2503-1411>

می‌توانند در اندام ماهی‌ها تجمع یابند (Afzaal و همکاران، ۲۰۲۲). وجود غلظت‌های بالاتر از حد مجاز در منابع آبی باعث کاهش کیفیت آب می‌شود. برای مثال، پژوهشی در چین با هدف ارزیابی کیفیت آب‌های سطحی انجام شد که نتایج آن نشان می‌دهد غلظت برخی عناصر مانند آرسنیک و سرب بیش از حد استانداردهای موجود کیفیت آب‌های سطحی چین می‌باشد (Ren و Xie، ۲۰۲۲) که به طور قابل توجهی با یکدیگر همبستگی دارند.

یا میزان غلظت فلزات برای ۵۴ ایستگاه نمونه‌برداری از منابع آب سطحی در پاکستان، فراتر از مقادیر تعیین شده توسط سازمان بهداشت جهانی می‌باشد (Khan و همکاران، ۲۰۲۳). برای تعیین وضعیت میزان آلودگی به فلزات سنگین در محیط‌های رسوبی و آبی از شاخص‌های متعددی از جمله شاخص‌های زمین انباشت، بار آلودگی و فاکتور آلودگی استفاده می‌شود (پرتانی و همکاران، ۱۴۰۲ الف؛ Sojka و Jaskuła، ۲۰۲۲). پژوهشگران متعددی اثبات کرده‌اند که کیفیت منابع آب سطحی به طور قابل توجهی تحت تأثیر پساب‌های فاضلاب می‌باشد (پرتانی و همکاران، ۱۴۰۳).

در واقع تجمع فلزات سنگین در منابع آبی و بیماری‌های ناشی از آن، پیامد رشد مستمر صنعت است. برای حذف فلزات سنگین، روش‌های متعددی وجود دارد که روش‌های سازگاری با محیط زیست کم‌هزینه و آسان می‌باشند (Yadav و همکاران، ۲۰۲۱). جذب آلاینده‌ها به جلبک منجر به رشد آن‌ها و حذف فلزات از آب و رسوب می‌شوند (Raj و همکاران، ۲۰۲۴). این فرایند شبیه ته‌نشینی مواد مغذی در رسوبات و افزایش تراکم پوشش گیاهی جنگل‌های حرا می‌باشد (Partani و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین، احیا و حفظ منابع آب سطحی به دلیل نقش حیاتی آن‌ها در حمایت از اکوسیستم‌های آبی و خشکی ضروری است.

این تحقیق با هدف شناسایی کامل وضعیت کمی و کیفی رودخانه اترک و تاثیر کاربری‌های مجاور و تخلیه پساب تصفیه‌خانه بجنورد بر رودخانه و بررسی میدانی فاصله موثر انتقال آلاینده انجام شده است. آب این رودخانه در طول سال تنها برای فصل آبیاری در پایین‌دست بازه مورد بررسی به مصارف آبیاری مستقیم مزارع صیفی‌جات، ذرت، باغات و اراضی کشاورزی استفاده می‌شوند که محصولات آن‌ها مستقیماً وارد چرخه غذایی شهروندان می‌شود. لذا با انجام بررسی‌های میدانی و نمونه‌برداری در نقاط خاص، سطوح غلظت آلاینده‌های مورد بررسی و آلودگی و خطر اکولوژیکی تخلیه فاضلاب به رودخانه در فواصل مختلف پایین‌دست از

آلودگی‌های زیست‌محیطی فلزات سنگین ناشی از پساب‌های شهری، کشاورزی (Zaynab و همکاران، ۲۰۲۲)، شیرابه‌های دفن زباله (پرتانی و نوروزی، ۱۴۰۲) رواناب‌های خارج شده از مناطق شهری و صنعتی خصوصاً صنایع پتروشیمی (Mokarram و همکاران، ۲۰۲۰)، معادن طلا (Loredo و همکاران، ۲۰۰۹) و شهرنشینی (Kuriata-Potasznik و همکاران، ۲۰۲۰) از منابع اصلی آلودگی آب محسوب می‌شوند. وجود فلزات سنگین در آب خطرات قابل توجهی برای سلامت انسان به همراه دارد (Ali و همکاران، ۲۰۱۳؛ Aziz و همکاران، ۲۰۲۳؛ موسوی‌پور و همکاران، ۱۴۰۱).

این آلاینده‌ها که بادوام و مقاوم در برابر تجزیه هستند، به اکوسیستم نفوذ کرده و منابع آب سطحی و زیرزمینی را آلوده می‌کنند (آقامیرزاده و همکاران، ۱۴۰۱). بنابراین، آلودگی آب از مهم‌ترین دلایل ضرورت پایش و ارزیابی کیفیت آب به شمار می‌رود. زیرا تشخیص و کنترل منابع آلودگی مستقیماً به بهبود کیفیت آب و حفظ منابع آبی کمک می‌کند (Poshtegal و Mirbagheri، ۲۰۱۹). به‌ویژه در مناطقی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک که کمبود آب وجود دارد (House و Ellis، ۱۹۸۷). برای ارزیابی کیفیت، علاوه بر عملیات میدانی، بررسی سنجش‌های آزمایشگاهی (پرتانی و همکاران، ۱۴۰۲)، سلامت رودخانه‌ها و رواناب‌ها را می‌توان براساس تغییرات اندازه‌گیری شده در رسوبات، آب و ساختار بوم شناختی بی‌مهرگان آبی ارزیابی کرد (قلی‌زاده و پورحمیدی، ۱۳۹۹).

فلزات سنگین پس از تخلیه در رودخانه‌ها، می‌توانند یون‌ها یا کمپلکس‌ها را تشکیل دهند، به صورت ذرات معلق باقی بمانند، یا به صورت رسوبات بستر ته‌نشین شوند (Yilmaz و همکاران، ۲۰۰۷؛ Zhang و همکاران، ۲۰۲۱). رسوبات معلق و بستر دلیل توانایی جذب فلزات محلول به‌عنوان مخزن عمل می‌کنند (Singh و همکاران، ۲۰۰۵).

آن‌ها با پیدا کردن فرصت وارد زنجیره غذایی شده که از طریق تجمع زیستی، تهدید جدی زیست‌محیطی برای محیط‌های آبی (Aziz و همکاران، ۲۰۲۳؛ Segura و همکاران، ۲۰۰۶) به‌ویژه انسان‌ها، حیوانات و گیاهان ایجاد می‌کنند (Feng و همکاران، ۲۰۲۲؛ Partani و همکاران، ۲۰۲۴؛ Jiao و همکاران، ۲۰۲۲). آلودگی به فلزات سنگین باعث عوارض جانبی متعددی مانند آسیب کلیه، نارسایی کبد، مشکلات معده، عقب ماندگی ذهنی، اثرات باروری و اثرات سرطان‌زایی در انسان می‌شود (Singh و همکاران، ۲۰۲۳؛ Zhang و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین فلزات سنگین موجود در آب شیرین و رسوبات

شمالی و طول‌های ۵۴ درجه تا ۵۹ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی قرار دارد. این حوضه از جنوب با حوضه رودخانه‌های کال شور و گرگان‌رود، از شمال با خاک ترکمنستان، از خاور (شرق) با حوضه رودخانه‌های درونگر و کشف‌رود و از باختر (غرب) به دریای خزر محدود می‌شود (استاندارداری گلستان، ۱۳۹۳). پوشش گیاهی این حوضه آبریز به صورت پوشش جنگلی نیمه‌متراکم و تنک از نوع درختچه (۴/۱٪ مساحت حوضه) و (۶۰٪ مساحت حوضه) است. مابقی زمین‌های حوضه آبریز اترک، مناطق مسکونی، بایر، باتلاقی و شوره‌زار را تشکیل می‌دهد (کار گروه ملی سازگاری با کم‌آبی، ۱۴۰۳). شکل (۱) منطقه مورد مطالعه رودخانه اترک را نشان می‌دهد.

● عملیات نمونه‌برداری و پایش میدانی

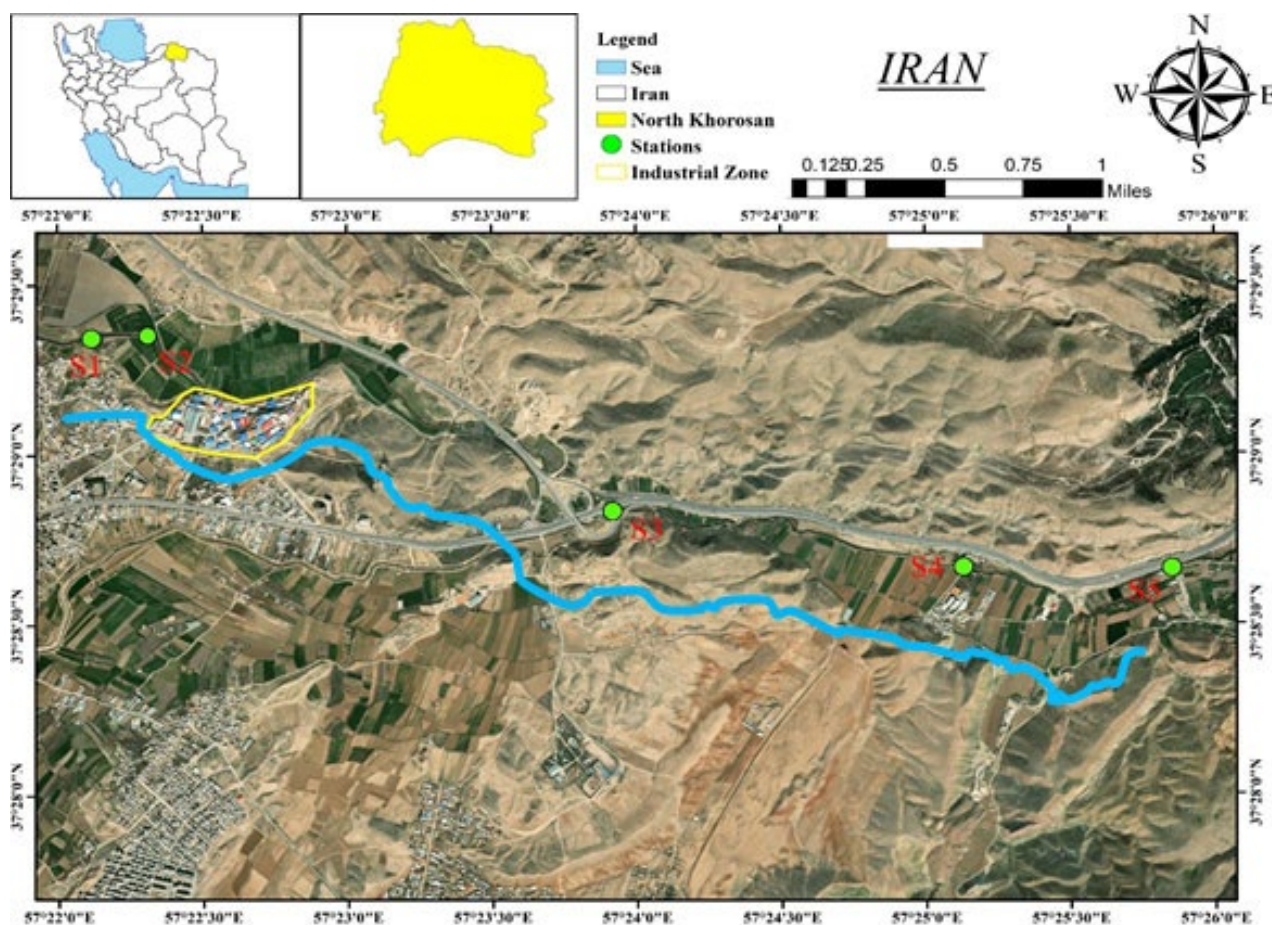
بازه انتخاب شده محاط بر کاربری اراضی کشاورزی (که موجب برداشت آب برای آبیاری می‌شود) و در پایین دست تخلیه پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری قرار دارد. علت انتخاب یک بازه کوتاه (۳۰۰ متر) حداکثر اطمینان از عدم تغییرات

نقطه تخلیه تجزیه و تحلیل می‌شوند. ارزیابی ریسک کاربری کشاورزی از نقطه تخلیه فاضلاب در یکی از سرشاخه‌های رودخانه اترک (واقع در شمال شرقی استان خراسان شمالی) تا نزدیک‌ترین زمین‌های کشاورزی بهره‌مند از آب رودخانه آغاز می‌شود. در این راستا، آلاینده‌های موجود در بخش‌های پایین دست رودخانه با خطر آلودگی بیشتر شناسایی شده و تأثیر فاصله تخلیه فاضلاب بر خطر آلودگی نیز بررسی می‌شود.

روش‌شناسی

● منطقه مورد مطالعه

رودخانه اترک با طول ۶۶۹ کیلومتر، پنجمین رودخانه بلند ایران و طولانی‌ترین رودخانه ترکمنستان محسوب می‌شود. این رودخانه زمین‌های تحت پوشش خود، از جمله حدود ۲۷۳۰۰ کیلومتر مربع از اراضی کشاورزی را آبیاری می‌کند. اما به دلیل مصرف زیاد آب، تنها در زمان وقوع سیلاب‌ها به دریای خزر می‌رسد. حوضه آبریز این رودخانه در محدوده عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۴۲ دقیقه



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه رودخانه اترک بجنورد

جدول ۱- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری منطقه مورد مطالعه

نام ایستگاه	موقعیت	فاصله از مناطق باغات و شالیزار (متر)
S1	۱۰۰ متر قبل از تخلیه پساب	۱۰۰
S2	۵ متر بعد از تخلیه پساب	۵
S3	پل شهید قاسم سلیمانی	۵۰
S4	ابتدای منطقه روستایی	۱۵۰۰
S5	شالیزار بجنورد	۳۰۰۰

● شاخص‌های به‌کاررفته برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در محیط آب

- شاخص ارزیابی فلزات سنگین (HEI)^۵

شاخص HEI رتبه‌بندی کلی در رابطه با کیفیت آب براساس آلودگی فلزات سنگین و درک بهتر از شرایطی کیفی نشان می‌دهد. این شاخص از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Edet و Offiong, ۲۰۰۲; Nayek و همکاران, ۲۰۱۳). سه روش مستند ارزیابی شده در این مطالعه عبارتند از شاخص‌های نام برده شده که قبلاً توسط پژوهشگران توسعه یا پیشنهاد شده بودند (Backman و همکاران, ۱۹۹۸; Prasad و Bose, ۲۰۰۱).

$$HEI = \sum_{i=1}^n \frac{H_c}{H_{mac}} \quad (1)$$

که در آن H_c غلظت قرائت شده عنصر مورد ارزیابی، H_{mac} نیز بیانگر حداکثر غلظت مجاز هر عنصر مورد ارزیابی که در هر دو برحسب میلی‌گرم برلیتر (ppm) در این پژوهش ارزیابی شده است. معیار طبقه‌بندی برای این شاخص عبارت است از $HEI > 10$ نشان‌دهنده آلودگی کم، $10 < HEI < 20$ نشان‌دهنده آلودگی متوسط و $HEI > 20$ نشان‌دهنده آلودگی زیاد است (قدیری و همکاران, ۱۴۰۰; Saleh و همکاران, ۲۰۱۹).

- شاخص ارزیابی فلزات سنگین (HPI)^۶

شاخص HPI می‌تواند اثر آلودگی فلزات سنگین را روی سلامت انسان تعیین کند. این شاخص نشان‌دهنده کیفیت کل آب نسبت به فلزات سنگین و بر اساس روش میانگین کیفیت محاسبه وزنی می‌باشد که در دو مرحله تدوین شده است. ابتدا با ایجاد یک مقیاس رتبه‌بندی برای هر پارامتر انتخاب شده که وزن را نشان می‌دهد و دوم با انتخاب پارامتر آلودگی که شاخص بر اساس آن قرار می‌گیرد. این شاخص از رابطه (۲) و (۳) محاسبه می‌شود (Mohan و همکاران, ۱۹۹۶; نجاتی جهرمی و همکاران, ۱۳۹۶).

لیتولوژی و زمین‌شناسی بستر رودخانه و پایداری در وضعیت رژیم هیدرولیکی و متغیرهای سینماتیکی جریان بوده است. نمونه‌برداری در پنج ایستگاه، که معیارهای انتخاب بر اساس کاربری اراضی اطراف ایستگاه، در تابستان ۱۴۰۳ (به عنوان فصلی که به دلیل دمای بالا، برداشت آب بیشینه کشاورزی و کمینه بده جریان می‌تواند نماینده شرایط بحرانی یک سال باشد) با دو نمونه هم‌زمان (Duplicate) انجام شد، تا از کیفیت نمونه برداری اطمینان حاصل شود (QA)^۱ و نمونه‌ها نماینده واقعی جامعه قابل کنترل مجدد باشد (QC)^۲. ایستگاه یک در بالادست محل تخلیه فاضلاب رودخانه اترک، ایستگاه دو به دلیل نزدیک بودن به مزرعه ذرت، ایستگاه سه به دلیل استفاده از آن برای آبیاری باغات، ایستگاه چهار در روستای کلات آشیان و ایستگاه پنج به دلیل نزدیکی به شالیزارهای روستای باباامان انتخاب شد. جدول (۱) موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده را نشان می‌دهد.

نمونه‌برداری از محیط آب و رسوب مطابق با استاندارد جهانی انجام شد (Forstner, ۲۰۰۲; USEPA, ۱۹۹۶). پودر نمونه‌های خشک شده رسوب در عملیات هضم اسیدی در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد با استفاده از اسیدهای نیتریک و پرکلرید به نسبت ۱ به مدت ۴ ساعت انجام شد. نمونه‌ها در داخل ظرف‌های مخصوص در محفظه یونولیتی حاوی یخ قرارداده شدند. برای جلوگیری از آلودگی‌های نامشخص، تمام تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده دوبار با آب مقطر شستشو شده و در HNO_3 (۱۳ درصد) گذاشته شدند. سپس نمونه‌ها تا دمای ۴ درجه سانتیگراد خنک شده و در کمتر از ۲۴ ساعت به آزمایشگاه معتمد سازمان حفاظت محیط زیست انتقال پیدا کردند. از دستگاه ICP-OES^۴ برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین استفاده شد. اندازه‌گیری‌های درجا، از جمله pH، دما، هدایت الکتریکی، هندسه مقطع و دبی جریان مطابق با استاندارد انجام شد (Biggs و همکاران, ۲۰۲۱).

Cf_i بیانگر عامل آلودگی هر عنصر، CA_i نشان دهنده غلظت قرائت شده عنصر مورد نظر برحسب میلی گرم برلیتر و CN_i بیانگر بالاترین حد غلظت مجاز هر عنصر مورد ارزیابی برحسب میلی گرم برلیتر لازم به ذکر است که مقادیر شاخص Cd<1 بیانگر آلودگی کم، Cd<3>1 آلودگی متوسط و Cd<3 آلودگی زیاد است (Edet و Offiong، ۲۰۰۲؛ Nasrabadi، ۲۰۱۵).

● شاخص های به کار رفته برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در محیط رسوب

- فاکتور انباشت ژئوشیمیایی (I_{geo})^۸

شاخص انباشت ژئوشیمیایی، معیاری برای سنجش میزان انباشت فلزات سنگین در رسوبات می باشد. این شاخص بر مبنای غلظت زمینه ای و غلظت فعلی فلزات سنگین در رسوبات، براساس رابطه (۶) محاسبه می شود (Muller، ۱۹۶۹).

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5 B_n) \quad (6)$$

در این رابطه C_n غلظت کنونی فلز مورد نظر در نمونه رسوب، B_n غلظت زمینه ای فلز مورد نظر، ضریب ۱/۵ فاکتور تصحیح برای اختلاف مقادیر پس زمینه (Mohammad Ali و همکاران، ۲۰۱۵؛ Moore و همکاران، ۲۰۱۱) یا به منظور کمینه کردن اثر تغییر احتمالی در غلظت های زمینه که بیشتر به تغییرات سنگ شناسی رسوبات و تاثیر عوامل زمینی نسبت داده می شود، منظور شده است. شاخص زمین انباشت به ۷ رده (رده ۰ تا رده ۶) تقسیم شده است که در جدول (۲) ارائه شده است.

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i \times w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

$$Q_i = \sum_{i=1}^n \frac{(Mi(-)Ii)}{(Si - Ii)} \quad (3)$$

که در آن Q_i زیر شاخص عنصر مورد ارزیابی، M_i نشان دهنده غلظت عنصر اندازه گیری شده برحسب ppm (میلی گرم برلیتر) I_i غلظت ایده آل عنصر مورد ارزیابی بر حسب ppm است. Si نشان دهنده رهنمود سازمان بهداشت جهانی برای عنصر مورد ارزیابی برحسب ppm است. همچنین W_i ضریب وزنی برای فلز مورد ارزیابی می باشد برای طبقه بندی میزان آلودگی براساس شاخص HPI به شرح زیر می باشد. چنانچه HPI<۱۰۰ آلودگی کم، HPI=۱۰۰ آلودگی متوسط و در نهایت HPI>۱۰۰ آلودگی زیاد است (Nasrabadi، ۲۰۱۵؛ Prasad و Bose، ۲۰۰۱).

- شاخص Cd^۹

برای محاسبه شاخص آلودگی از روابط زیر استفاده شده است. شاخص C_d به منظور تعیین اثرات ترکیبی تعدادی از پارامترهای کیفی که می تواند اثرات نامطلوب بر کیفیت آب داشته باشد، مورد استفاده قرار می گیرد. در واقع کیفیت آب با محاسبه درجه ارزیابی می شود. این شاخص از رابطه (۴) و (۵) محاسبه می شود.

$$C_d = \sum_{i=1}^n Cfi \quad (4)$$

$$Cfi = \frac{CA_i}{CNI} - 1 \quad (5)$$

جدول ۲- طبقه بندی میزان آلودگی فلزات سنگین برای شاخص I_{geo} و Cf (Yerima و همکاران، ۲۰۲۰)

شاخص	وضعیت آلودگی رسوب	طبقه بندی	مقدار I _{geo}
Igeo Index	کاملاً غیر آلوده	۰	Igeo<0
	غیر آلوده تا آلودگی متوسط	۱	0≤ Igeo < 1
	آلودگی متوسط	۲	1≤ Igeo < 2
	آلودگی متوسط تا شدید	۳	2≤ Igeo < 3
	آلودگی شدید	۴	3≤ Igeo < 4
	آلودگی شدید تا بسیار شدید	۵	4≤ Igeo < 5
	آلودگی بسیار شدید	۶	Igeo≥5
Cf Index	آلودگی کم	۱	Cf<1
	آلودگی متوسط	۲	1≤ Cf < 3
	آلودگی قابل توجه	۳	3≤ Cf < 6
	آلودگی خیلی زیاد	۴	Cf≥6

فاکتور آلودگی (Cf)^۱

این فاکتور میزان شدت آلودگی را نشان می‌دهد و برای تعیین شدت آلودگی از رابطه (۷) استفاده شد. در این رابطه C_e فاکتور آلودگی، C_b میانگین عنصر مورد نظر C_b میانگین غلظت عنصر در شیل جهانی هست (Zhao و همکاران، ۲۰۱۸). طبقه‌بندی فاکتور آلودگی براساس جدول (۲) می‌باشد.

$$C_f = \frac{C_e}{C_b} \quad (۷)$$

محاسبه شاخص (HI)

HI معیاری است که برای تخمین احتمال وجود خطر برای سلامتی انسان به کار می‌رود. قرار گرفتن در معرض خاک آلوده به طور عمده از طریق بلعیدن^{۱۱} رابطه (۸)، استنشاق^{۱۲} رابطه (۹) و تماس پوستی^{۱۳} رابطه (۱۰) (Huang و همکاران، ۲۰۱۸) اتفاق می‌افتد. مقدار مصرف روزانه براساس روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$ADI_{ing} = \frac{C_{soil} \times Ingr \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad (۸)$$

$$ADI_{dermal} = \frac{C_{soil} \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad (۹)$$

$$ADI_{inh} = \frac{C_{soil} \times Inhr \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF} \quad (۱۰)$$

که در آن ADI_{ing} ، ADI_{dermal} و ADI_{inh} به ترتیب، مقدار متوسط مصرف روزانه از طریق بلعیدن، استنشاق یا تنفس و تماس پوستی برحسب (mg/kg/day) هستند.

C_{soil} : غلظت فلز سنگین در خاک (mg/kg)

$Ingr$ و $Inhr$: میزان بلع (mg/day) و تنفس (m³/day)

EF : فرکانس (مدت) قرار گرفتن در معرض (day/year)

ED : مدت زمان قرار گرفتن در معرض (سال)

BW : وزن بدن فرد در معرض (کیلوگرم)

CF : فاکتور تبدیل (kg/mg)

PEF : فاکتور انتشار ذرات (m³/kg)

AT : مدت زمانی که دوز به طور متوسط انجام می‌شود (روز)،

برابر است با ۳۶۵ ضرب در ED

SA : سطح پوست در معرض (سانتی متر مربع)

AF : فاکتور چسبندگی^{۱۴} (kg/cm²/day)

ABS : فاکتور جذب پوستی

شاخص خطر HQ از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$HQ = \sum \frac{ADI_{ij}}{RfD_i} \quad (۱۱)$$

که در آن ADI دوزهای جذب شده رژیم غذایی، RFD مقدار

مرجع هر عنصر که مقدار آن برای هر فلز گزارش شده است. $\sum$: تعداد فلزات سنگین، i : تعداد راه‌های در معرض خطر و HQ خطر غیر سرطان‌زایی فلزات در هر مسیر است. مقدار شاخص خطر (HI) براساس رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

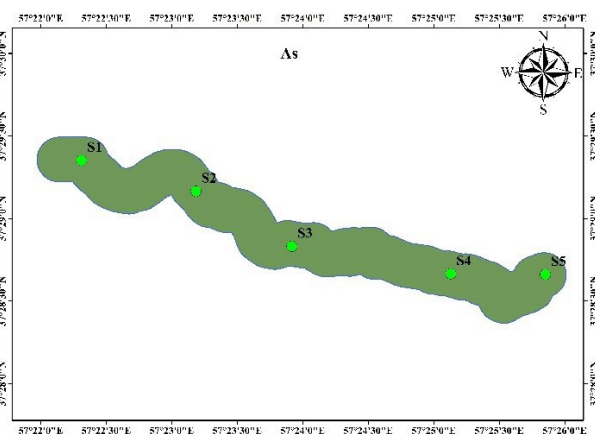
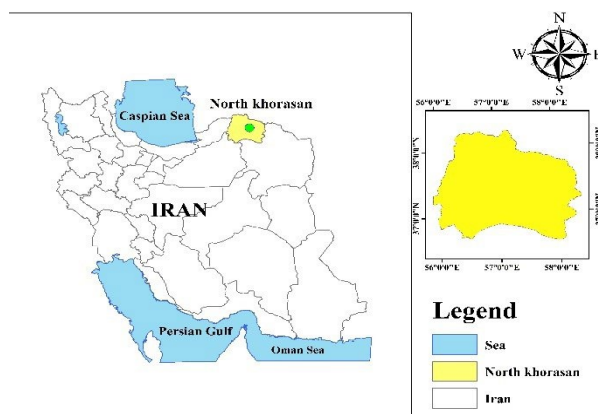
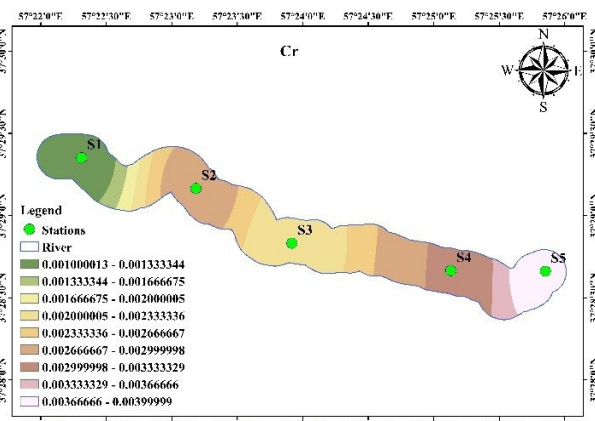
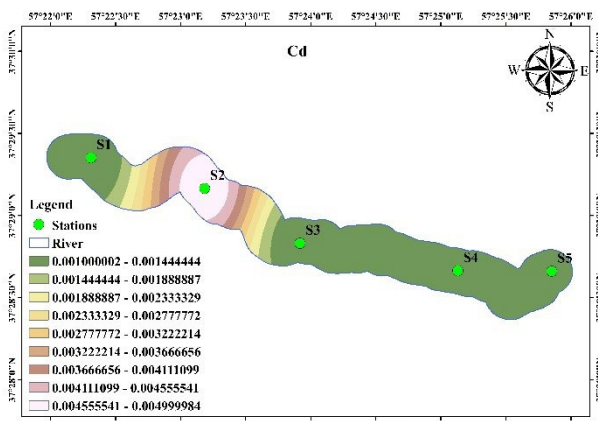
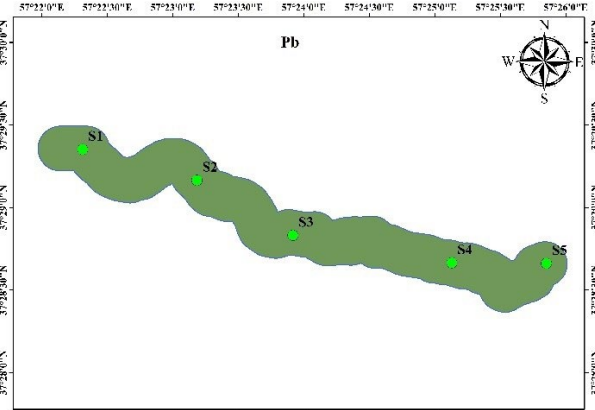
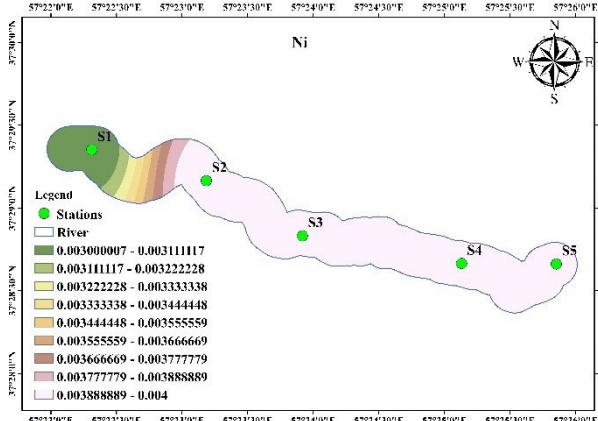
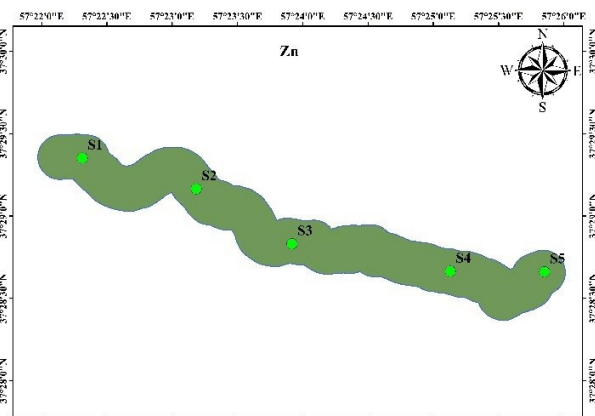
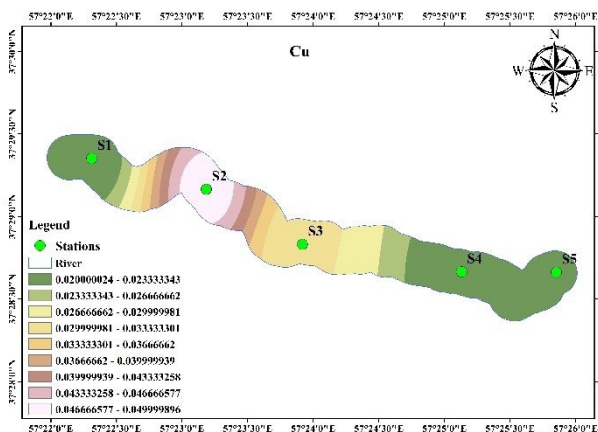
$$HI = \sum HQ \quad (۱۲)$$

نتایج و بحث

مقدار pH آب در بازه مورد مطالعه، براساس داده‌های جدول (۳) بین ۶/۵ تا ۷/۸ نوسان دارد و روند کلی آن کاهشی است. بیشترین مقدار pH در ایستگاه بالادست تخلیه پساب (S۱) ثبت شد، اما با ورود جریان آب به محدوده شهری بجنورد (S۲)، مقدار pH کاهش محسوسی از خود نشان می‌دهد. جدول (۳) میزان pH و دمای آب را به تفکیک در هر ایستگاه نشان می‌دهد. کاهش pH آب می‌تواند به عوامل مختلفی از جمله پایین بودن pH فاضلاب‌های ورودی به رودخانه و غنی بودن آن‌ها از مواد آلی نسبت داده شود. علاوه بر این، بارش‌های جوی، به ویژه باران‌های اسیدی، می‌توانند pH را کاهش دهند. همچنین واکنش آب با سنگ بستر و ورود فاضلاب‌های ناشی از فعالیت‌های مختلف، مانند کشاورزی، نقش مهمی در تغییرات pH دارد (Tyagi و همکاران، ۲۰۱۳). جدول (۴) غلظت فلزات اندازه‌گیری شده در محیط آب و رسوب را برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

براساس نقشه‌های ارائه شده از توزیع فضایی غلظت فلزات سنگین در بازه مورد مطالعه در پنج ایستگاه نمونه‌برداری براساس شکل (۲) به شرح زیر است. ایستگاه‌های S۲ و S۳، غلظت مس به طور قابل توجهی بالاتر است، در حالی که در ایستگاه‌های دیگر غلظت‌ها پایین‌تر هستند. این نشان‌دهنده وجود یک منبع آلودگی محلی یا فعالیت انسانی در نزدیکی این ایستگاه‌ها است. روند تغییرات مکانی غلظت عناصر در آب رودخانه از الگوهای مختلفی تبعیت می‌کند. به طوری که آرسنیک، سرب و روی در تمامی ایستگاه‌ها یکسان هستند. کروم و نیکل از بالادست به پایین‌دست، روند صعودی و کادمیم روند نزولی را در پیش گرفته است. به طور کلی، ایستگاه‌های S۳ و S۴ به طور مکرر نشان‌دهنده غلظت‌های بالاتر فلزات سنگین هستند، که می‌تواند به عوامل مختلفی از جمله نزدیکی به منابع آلودگی انسانی (فاضلاب شهری، کشاورزی)، ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه، یا جریان‌های آب زیرزمینی مرتبط باشد.

براساس نتایج خوشه‌بندی سلسله مراتبی که در نمودار درختی شکل (۳) قابل مشاهده است، As و Pb و Zn با درجه تشابه ۱۰۰ در یک خوشه قرار گرفته‌اند. Co و Cd نیز در یک خوشه مجزا



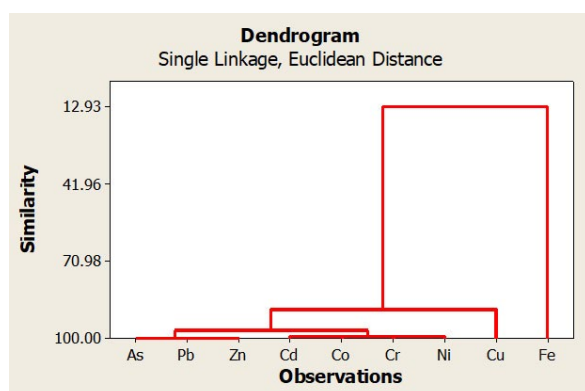
شکل ۲- نقشه توزیع فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه

جدول ۳- متغیرهای فیزیکی نمونه آب

Mean	Max	Min	S5	S4	S3	S2	S1	ایستگاه
۷/۲	۷/۸	۶/۵	۷/۶	۷/۲	۷	۶/۵	۷/۸	pH
۲۶	۳۰	۲۶	۲۹	۳۰	۲۸	۲۶	۲۸	دما آب (c)

جدول ۴- غلظت فلزات سنگین در آب و رسوب (ppm)

Ni ppm	Zn ppm	Pb ppm	Fe ppm	Cu ppm	Cr ppm	Co ppm	Cd ppm	As ppm	ایستگاه	فلز سنگین
۰/۰۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱	S1	نمونه آب
۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۱	S2	
۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۲	۰/۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱	S3	
۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۲۱	۰/۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱	S4	
۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۲۵	۰/۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱	S5	
۳۴	۳۵	۱۳	۳۲۲۰۴	۲۴	۸۰	۹	۰/۳۵	۱/۵	S2	نمونه رسوب



شکل ۳- دندروگرام فلزات سنگین در محیط آب منطقه مورد مطالعه

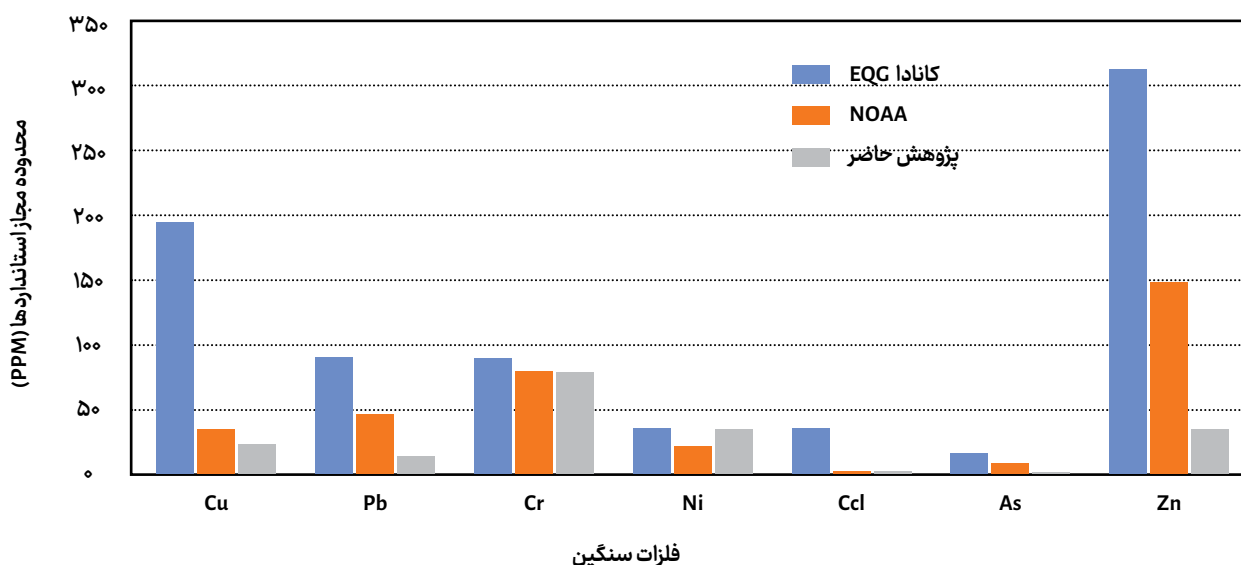
قرار گرفته‌اند. زیرخوشه‌های عناصر Cu با As ، Pb ، Zn ، Co در یک خوشه قرار گرفته است، درحالی که تحلیل خوشه‌ای عنصر Fe، آن را به‌طور کامل از سایر عناصر اندازه‌گیری شده متمایز نموده است. نتایج همبستگی زوجی غلظت فلزات سنگین برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول (۵) ارائه شده است. براساس این جدول همبستگی قوی (مثبت) بین فلزات (آهن-کروم)، (آهن-کبالت)، (نیکل-کروم) و (آهن و نیکل) با رنگ قرمز دیده می‌شود. همچنین بین (کبالت-کادمیم)، (کبالت-کروم) و (نیکل-کبالت) با رنگ نارنجی همبستگی وجود دارد. در سایر فلزات نیز همبستگی منفی مشاهده نشد.

جدول ۵- نتایج همبستگی زوجی بین فلزات سنگین موجود در آب

Ni	Zn	Pb	Fe	Cu	Cr	Co	Cd	As	فلزات سنگین
								۱	As
							۱	۰/۱۲	Cd
						۱	۰	۰	Co
					۱	۰	۰/۶۷	۰/۴۵	Cr
				۱	۰/۸۲	۰	۰/۸۹	۰/۳۴	Cu
			۱	۰/۹۵	۰/۹۱	۰	۰/۷۸	۰/۵۶	Fe
		۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	Pb
	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	Zn
۱	۰	۰	۰/۹۱	۰/۸۲	۱	۰	۰/۶۷	۰/۴۵	Ni

فلزات اندازه‌گیری شده نمونه رسوب این پژوهش در مقایسه با استاندارد EQG کانادا فاقد آلودگی می‌باشند. در مقایسه با استاندارد NOAA^{۱۵}، ایستگاه S۲ آلوده به فلز Ni و فلز Cr نزدیک به آلوده می‌باشد. در دیگر فلزات براساس این استاندارد، آلودگی تشخیص داده نشده است. با در نظر گرفتن استاندارد Probable Effect Concentration (PEC) SQGs Ontario MOE فلز نیکل برای جوامع بیولوژیکی خطرناک است. شکل

(۴) نتایج غلظت فلزات سنگین این پژوهش با استانداردهای جهانی را نشان می‌دهد. فلزات Cu، Ni و Cd در نمونه رسوبات محدوده مطالعاتی از مقادیر متناظر در نمونه‌های رسوبات رودخانه Yangtz (Wang و همکاران، ۲۰۱۳) بیشتر است و در مابقی فلزات کمتر است. جدول (۶) نتایج مقایسه غلظت فلزات سنگین با استانداردهای جهانی و دیگر تحقیقات را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مقایسه غلظت فلزات سنگین این پژوهش با استانداردهای جهانی (ppm)

جدول ۶- نتایج مقایسه غلظت فلزات سنگین با استانداردهای جهانی (ppm) (Partani و همکاران، ۲۰۲۴)

Zn	As	Cd	Fe	Ni	Cr	Co	Pb	Cu	Ref. Std	
۹۵	۱۳	۰/۳	۴۷۰۰۰	۶۸	۹۰	۱۹	۲۰	۴۵	Shale	غلظت زمینه در میانگین شیل
۳۱۵	۱۷	۳/۵	-	۳۶	۹۰	-	۹۱/۳	۱۹۷	PEL	EQG کانادا
۱۵۰	۸/۲	۱/۲	-	۲۰/۹	۸۱	-	۴۷	۳۴	ERL	NOAA
-	۰/۰۱	۱	-	-	-	-	۰/۰۱	۱۲۵	EQS	MOE ژاپن
۱۱۹/۰۴	۷/۰۲	۰/۶۶	-	-	۵۰/۲۱	-	۲۸/۳۹	۱۷/۰۲	TEL	USEPA Region II For Mangrove
۲۷۱	۴۱/۶	۴/۲	-	۴۲/۸	۱۶۰	-	۱۱۲	۱۰۸	PEL	
۱۲۰	۶	۰/۶	-	۱۶	۲۶	-	۳۱	۱۶	LEL	Probable Effect
۳۱۵	-	۳/۵۳	-	۳۶	۹۰	-	۹۱/۳	۱۹۷	PEL	Concentration (PEC)
۲۷۰	-	۹	-	۵۰	۱۴۵	-	۱۱۰	۳۹۰	ERM	SQGs Ontario MOE
۳۵	۱/۵	۰/۳۵	۳۲۲۰۴	۳۴	۸۰	۹	۱۳	۲۴	S۲	پژوهش حاضر
۸۱/۱	۹	۰/۲	-	۳۲	۸۰/۹	-	۲۳/۴	۲۳/۹	Wang و همکاران، ۲۰۱۳	رسوبات رودخانه Yangtz

جدول مقایسه‌ای (۷) داده‌های مربوط به غلظت فلزات سنگین شامل (Zn)، (Ni)، (Pb)، (Cr)، (Cd)، (As) و (Cu) را از مطالعات مختلف در اکوسیستم‌های آبی متنوع با این پژوهش در پنج ایستگاه (S1-S5) ارائه می‌دهد. مقادیر گزارش شده در جدول (۷)، که بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم (ppm) اندازه‌گیری شده‌اند، نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجه در میزان آلودگی فلزات سنگین در مناطق جغرافیایی مختلف هستند. در این میان، مطالعه حاضر که شامل پنج نمونه است، غلظت‌های بسیار پایین‌تری را برای تمامی فلزات سنگین گزارش می‌کند. آرسنیک و کادمیوم در حد ۰/۰۱، کروم بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۴، سرب و نیکل در حد ۰/۰۱، روی بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۰۴ و مس بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۵.

این مقادیر ناچیز در مقایسه با مطالعات دیگر، ممکن است نشان‌دهنده محیطی با آلودگی کمتر، تفاوت در روش‌های نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل، یا شرایط محیطی خاص مانند جریان آب بالا، رقیق‌سازی آلاینده‌ها یا فقدان منابع آلودگی قابل توجه در منطقه مورد مطالعه باشد. این مقایسه نه تنها تنوع گسترده در توزیع فلزات سنگین در اکوسیستم‌های آبی را نشان می‌دهد، بلکه بر اهمیت فاکتورهای محلی مانند کاربری زمین، فعالیت‌های انسانی و ویژگی‌های هیدرولوژیکی در تعیین سطوح آلودگی را تأکید می‌کند. به‌طور مثال این پژوهش در مقایسه تحقیق رودخانه آکچای در ترکیه که غلظت‌های قابل

توجهی از آرسنیک (۱/۴۴)، کروم (۸/۳)، نیکل (۲/۳۸)، روی (۱/۲۹) و مس (۱/۱۳) را نشان می‌دهد و احتمالاً ناشی از ورودی‌های صنعتی یا کشاورزی است، غلظت بسیار کمتری را از خود نشان می‌دهد.

مقادیر شاخص زمین انباشت و فاکتور آلودگی برای فلزات سنگین موجود در رسوبات ایستگاه S2 در جدول (۸) ارائه شده است. باتوجه به اینکه مقادیر I_{geo} برای تمامی فلزات کمتر از صفر حاصل شده است، بنابراین رسوبات مورد مطالعه در محدوده غیر آلوده قرار دارند. شاخص C_f برای تمامی فلزات سنگین به غیر از کادمیم در محدوده غیر آلوده قرار گرفته است. فلز کادمیم در محدوده آلودگی متوسط است. فلز کروم نیز نزدیک به محدوده آلودگی کم است. نمونه‌برداری رسوب از ایستگاه S2 انجام شده است، جایی که باغات و مزارع ذرت قرار دارند. از آنجا که مقدار pH در تمامی نقاط کمتر از ۸ است، کادمیم در محدوده pH بین ۹ تا ۱۰ از حالت محلول به فاز جامد تبدیل می‌شود (Stumm و Morgan، ۲۰۱۳). بنابراین به‌نظر می‌رسد که میزان کادمیم موجود، منتقل شده از فاز محلول به جامد نبوده و می‌تواند به دلیل استفاده از کود فسفات‌ها برای زمین‌های کشاورزی به خاک انتقال پیدا کرده باشد (Moslehi و همکاران، ۲۰۱۹). در صورت عدم مدیریت و پیشگیری، امکان آلوده شدن محیط به فلزهای کادمیم و کروم بسیار زیاد است.

جدول ۷- مقایسه غلظت فلزات سنگین این پژوهش با سایر پژوهش‌ها (ppm)

منبع	Cu	Zn	Ni	Pb	Cr	Cd	As	Location
Akinsanya و همکاران، ۲۰۲۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۳	-	۰/۰۶	-	-	Lekki lagoon, lagos, Nigeria
Abbasi و همکاران، ۲۰۲۲	۲/۰۱	۶۴	۰/۱	-	۰/۹۸	-	۰/۲۹	Hashilan wetland, Iran
Yalcin و Leventeli، ۲۰۲۱	۱/۱۳	۱/۲۹	۲/۳۸	-	۸/۳	-	۱/۴۴	Akcaay River, Turkey
A Shetaia و همکاران، ۲۰۲۰	۳۲۸	۲۸۹	-	-	-	-	-	Edku Lagoon-Egypt
Kachoueiyan و همکاران، ۲۰۲۴	۱۰۲/۵	۵۰	۲۰	-	۱۶۱/۶	-	۷۱/۶	Gomishan Wetland
Islam و همکاران، ۲۰۱۸	-	-	۲۴۰	۷۳۱	۹۷	۷/۷	-	Buriganga River
Islam و همکاران، ۲۰۱۵	-	-	۳۴	۲۵	۴۵	۰/۷	-	Pairst River
	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱	S1
	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۱	S2
	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۱	S3
	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۱	S4
	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۱	S5

جدول ۸- مقادیر شاخص زمین انباشت (Igeo) و فاکتور آلودگی (Cf) برای ایستگاه دوم (رسوب)

Fe	Co	Pb	Zn	Ni	As	Cu	Cr	Cd	Heavy Metal	
-۰/۳۴	-۰/۵	-۰/۳۶	-۰/۶۱	-۰/۴۸	-۱/۱۱	-۰/۴۵	-۰/۲۳	-۰/۰۱۱	I _{geo}	S _۲
۰/۶۸۵۲	۰/۴۷۳۷	۰/۶۵	۰/۳۶۸۴	۰/۵	۰/۱۱۵۴	۰/۵۳۳۳	۰/۹	۱/۱۶	C _f	

بنابراین در هر مسیر خطر سرطان‌زایی وجود دارد (Qing و همکاران، ۲۰۱۵؛ Zhao و همکاران، ۲۰۱۴). به عبارت دیگر، سمیت عنصر مورد نظر اثرات مخربی بر سلامتی انسان می‌گذارد. در صورتی که مقدار HQ در هر مسیر کمتر از یک باشد برای انسان مضر نیست. مقادیر این شاخص در گروه سنی خردسالان به مراتب بیشتر از بزرگسالان می‌باشد که نشان می‌دهد خردسالان حساسیت بیشتری دارند. در بین مقادیری که در جدول (۱۰) محاسبه شده است، مقدار HQ برای کروم بیشتر است که نشان می‌دهد کروم از طریق بلعیدن خطر آفرین است و مقادیر آن برای خردسالان تقریباً سه برابر بیشتر از بزرگسالان است. براساس جدول (۱۰) میزان خطر کروم از طریق تنفس و جذب پوستی نسبت به دیگر فلزات بیشتر است. باتوجه به این که فلز کروم در pH (۶-۷) قابلیت ترسیب در فاز جامد را دارد، لذا می‌توان

پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه شاخص خطر سلامت انسانی محاسبه شد. نتایج شاخص‌های ADI برای سه حالت (جذب فلز سنگین ناشی از بلعیدن، تنفس و جذب پوستی) برای گروه‌های خردسالان و بزرگسالان در جدول (۹) قابل مشاهده می‌باشد.

HQ یک شاخص بدون بعد می‌باشد که مقادیر آن از تقسیم هر یک از شاخص‌های ADI برای مقدار مرجع هر یک از فلزات به دست می‌آید. مقادیر آن برای هر سه حالت جذب برای دو گروه سنی خردسالان و بزرگسالان در جدول (۱۰) ارائه شده است. دوز مرجع (RFD)، تخمینی از حداکثر خطر مجاز بر جمعیت انسان از طریق قرار گرفتن در معرض روزانه با در نظر گرفتن گروه‌های حساس در طول زندگی است. در صورتی که مقادیر (ADI) بیشتر از مقدار مرجعیت فلز در هر مسیر باشد، مقدار HQ بیشتر از یک به دست می‌آید.

جدول ۹- ADI_{ing}، ADI_{dermal} و ADI_{inh} ناشی از بلعیدن، تنفس و تماس پوستی برای گروه‌های سنی خردسالان و بزرگسالان (mg/kg/day)

ADI _{inh}	ADI _{dermal}	ADI _{ing}	گروه سنی	عناصر
3/07E-08	5/38E-10	1/92E-05	خردسالان	As
7/83505E-08	2/42173E-10	2/57E-06	بزرگسالان	
2/05E-08	1/26E-10	1/28E-08	خردسالان	Cd
1/82818E-08	5/6507E-11	1/72E-09	بزرگسالان	
1/64E-06	2/87E-08	0/001023	خردسالان	Cr
4/17869E-06	1/29159E-08	0/000137	بزرگسالان	
4/90959E-07	1/43E-11	5/11E-07	خردسالان	Cu
1/25361E-06	3/87477E-09	0/000244	بزرگسالان	
6/95525E-07	1/22E-08	2/17E-06	خردسالان	Ni
1/77595E-06	5/48925E-09	5/83E-05	بزرگسالان	
2/65936E-07	4/66E-09	0/000166	خردسالان	Pb
6/79038E-07	2/09883E-09	2/23001E-05	بزرگسالان	
7/15982E-07	1/26E-08	0/000447	خردسالان	Zn
1/82818E-06	5/6507E-09	6/00387E-05	بزرگسالان	

جدول ۱۰- مقادیر HQ_{dermal} ، HQ_{ing} و HQ_{inh} به تفکیک گروه‌های سنی

عنصر	گروه سنی	HQ_{ing}	HQ_{dermal}	HQ_{inh}
As	خردسالان	0/063926941	1/79324E-06	0/000249471
	بزرگسالان	0/00857696	8/07243E-07	0/000636996
Cd	خردسالان	1/27854E-05	1/25527E-07	0/002045662
	بزرگسالان	1/71539E-06	5/6507E-08	0/001828179
Cr	خردسالان	0/340943683	0/001003214	0/027275495
	بزرگسالان	0/045743786	0/000451605	0/069644914
Cu	خردسالان	1/27854E-05	9/69E-08	6/13699E-09
	بزرگسالان	0/006087926	9/68692E-08	3/13402E-05
Ni	خردسالان	0/000108676	2/74463E-07	0/000128801
	بزرگسالان	0/002916166	2/74463E-07	0/000328879
Pb	خردسالان	0/055403349	1/32456E-06	7/555E-05
	بزرگسالان	0/007433365	5/96259E-07	0/000192908
Zn	خردسالان	0/001491629	4/18424E-08	1/1933E-05
	بزرگسالان	0/001491629	1/88357E-08	3/04696E-05
میزان		$HQ < 1$ بی خطر	$HQ > 1$ سرطان‌زا	

بیشتر از این مقدار در محدوده آلودگی زیاد است. باتوجه به طبقه‌بندی این شاخص، ایستگاه S2 و S3 در محدوده آلودگی متوسط و دیگر ایستگاه‌ها در محدوده آلودگی کم قرار دارند. به‌ترتیب بیشترین و کمترین آلودگی در S2، پایین‌تر از محل تخلیه پساب شهری و S1 قبل از تخلیه پساب مشاهده می‌شود. به‌طور کلی، این شاخص در طول مسیر روند صعودی پیدا کرده است. در صورتی که تمهیداتی صورت نپذیرد، باتوجه به مصارف آب برای کاربری‌های زراعی و باغی، عواقب جبران ناپذیری را در چرخه غذایی انسان و دام می‌تواند در پی خواهد داشت و سلامتی جامعه را به خطر می‌اندازد.

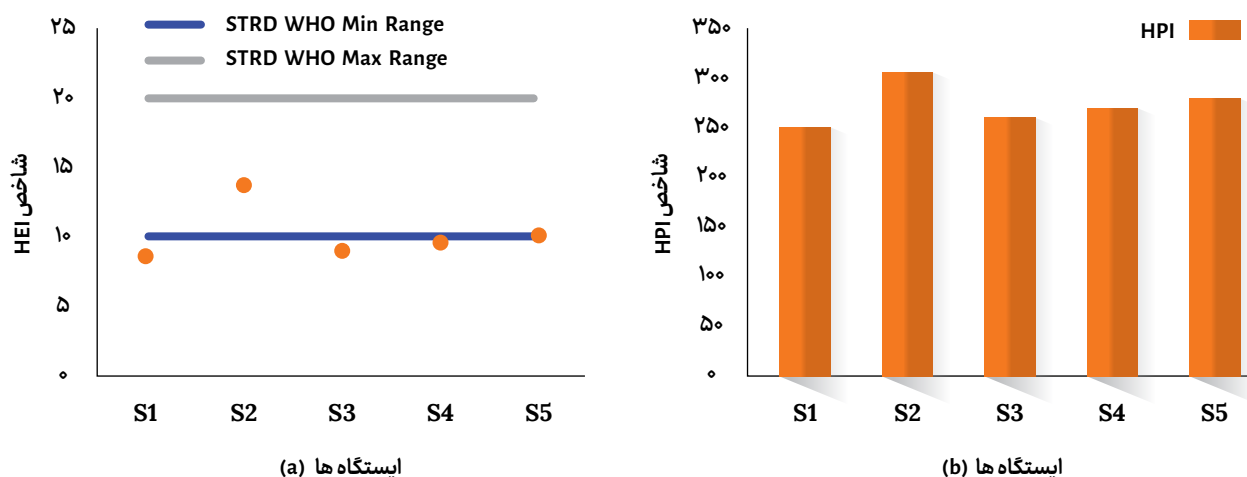
جدول ۱۱- مقادیر شاخص HI برای گروه‌های سنی مختلف

شاخص	گروه سنی	S2
HI	خردسالان	۰/۴۹۲۶۹۴
	بزرگسالان	۰/۱۴۴۱۰۷
$HI < 1$: خطر آفرین		$HI > 1$: بدون خطر

مقدار کروم (سه ظرفیتی) را ناشی از تغییر فاز آن از حالت محلول به رسوب دانست (Snoeyink و Jenkins، ۱۹۹۱؛ Stumm و Morgan، ۲۰۱۳).

از مجموع شاخص‌های HQ برای سه‌حالت بلعیدن، تنفس و جذب پوستی برای کل فلزات شاخص HI به دست می‌آید. مقادیر این شاخص برای هر دو گروه سنی بزرگسال و خردسال در جدول (۱۱) ارائه شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، با وجود اینکه مقدار این شاخص کمتر از یک ۱ به دست آمده اما مقادیر این شاخص برای خردسالان بیشتر از بزرگسالان به دست آمده است که نشان می‌دهد خردسالان بیشتر در معرض خطر این فلزات هستند. شاخص HI برای خردسالان حدود ۴ برابر بیشتر از بزرگسالان است و مقدار آن به ۵/۰ می‌رسد. با این حال در صورتی که تدابیری اندیشیده نشود نه تنها کودکان بلکه بزرگسالان نیز در معرض خطر این فلزات خواهند بود.

مقادیر شاخص HEI و HPI برای فلزات سنگین آب در شکل (۵) ارائه شده است. مقادیر استاندارد برای شاخص HEI در WHO حداقل میزان استاندارد ۱۰ و حداکثر آن ۲۰ است که

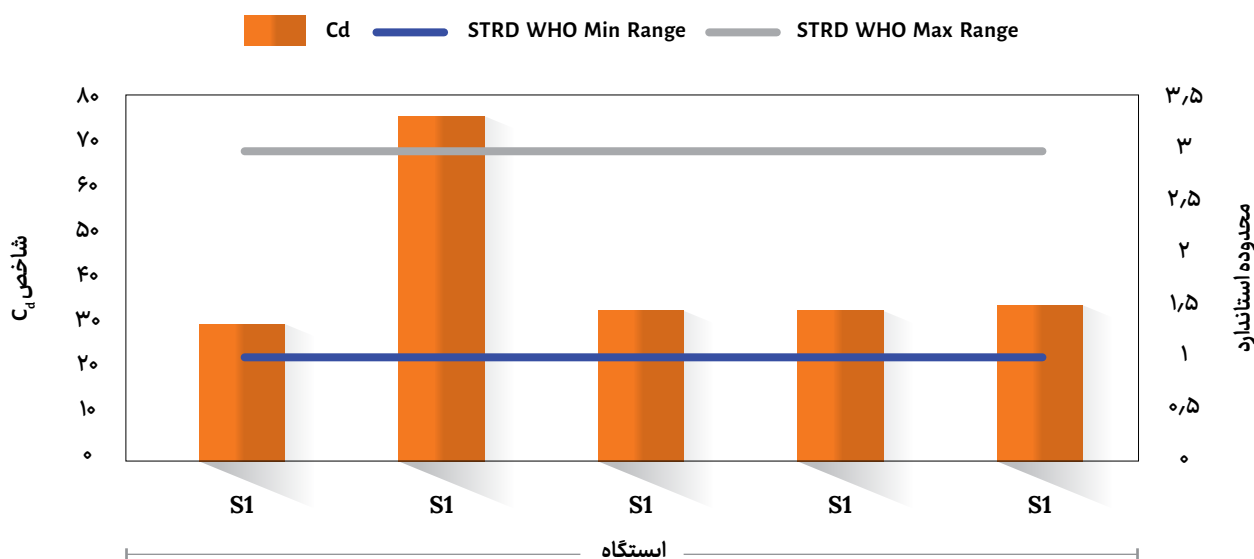


شکل ۵- روند تغییرات شاخص HEI و HPI به ترتیب (a) و (b) در ایستگاه‌های مورد مطالعه

تقویت مقادیر فلزات سنگین پیشنهاد شود که بررسی زمانی دقیق‌تری برای عمومیت دادن به این گزاره نیاز است. لازم به ذکر است این شاخص یک شاخص تجمیعی از تمام عناصر سنگین اندازه‌گیری شده است که تاثیر تجمیعی کلیه فلزات را نیز نشان می‌دهد و انگشت نشانه به سمت فلز یا عنصر خاصی ندارد و لذا نمی‌توان در خصوص منبع آن اظهار نظری کرد.

شاخص درجه آلودگی یک شاخص تجمیعی بوده که حاصل تجمیع شاخص فاکتور آلودگی برای فلزات ارزیابی شده است. در این شاخص غلظت‌های ارائه شده فلزات با بالاترین حد غلظت مجاز فلزات مقایسه می‌شود. مقادیر این شاخص در شکل (۶) ارائه شده است. براساس طبقه‌بندی استاندارد

شاخص آلودگی فلزات سنگین به‌منظور تعیین اثر فلزات سنگین بر سلامت انسان استفاده می‌شود. به این منظور، باید غلظت اندازه‌گیری شده فلزات با غلظت ایده‌آل و استانداردهای سازمان بهداشت جهانی مقایسه شود. باتوجه به شکل (۵-ب) در مقایسه با استاندارد سازمان جهانی، آلودگی در تمام ایستگاه‌ها بالاتر از حد استاندارد WHO بوده و در محدوده آلودگی زیاد قرار می‌گیرد. به ترتیب بیشترین و کمترین آلودگی در S2، پایین‌تر از محل تخلیه پساب شهری و S1 قبل از تخلیه پساب مشاهده می‌شود. به‌طورکلی، این شاخص در طول مسیر روند صعودی داشته است. در ایستگاه S2 زمانی که پساب وارد رودخانه می‌شود، یک رشد صعودی مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر ورود پساب می‌تواند از پتانسیل‌های



شکل ۶- روند تغییرات شاخص Cd در ایستگاه‌های مورد مطالعه

برای این شاخص ذکر شد، تمام ایستگاه‌ها (حدود ۸۰ درصد) به جز ایستگاه S۲ در محدوده آلودگی متوسط قرار دارند. همان‌طور که ذکر شد ایستگاه S۲ که پس از محل تخلیه فاضلاب قرار دارد، بیشترین مقدار این شاخص را داشته است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی ریسک آلودگی رودخانه و بررسی تأثیر پساب تصفیه‌خانه شهری بجنورد بر کاهش خطرات سلامت در چرخه غذایی، به‌ویژه در مصارف کشاورزی، انجام شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد روند تغییرات مکانی غلظت عناصر سنگین در آب رودخانه از الگوهای متفاوتی پیروی می‌کند. به‌طور مشخص، آرسنیک، سرب و روی طیف ثابت از بالادست به پایین‌دست دارند، درحالی‌که کروم و آهن روند افزایشی را نشان می‌دهند. برای ارزیابی کیفیت آب و تأثیر فلزات سنگین بر سلامت انسان، از شاخص‌های HPI و HEI استفاده شد.

ایستگاه‌های نزدیک به محل تخلیه پساب بیشترین آلودگی را به‌ویژه در مورد فلزات کروم و نیکل نشان دادند. شاخص HEI و HPI در ایستگاه S۲، پس از محل تخلیه فاضلاب بیشترین آلودگی را از خود نشان دادند. در شاخص Igeo، مقادیر به‌دست‌آمده برای تمام فلزات کمتر از صفر بود. مقادیر شاخص Cf برای کلیه فلزات سنگین، به جز کادمیم، در محدوده آلودگی کم قرار دارد. باین‌حال، این شاخص برای فلز کادمیم بیانگر آلودگی متوسط در رسوبات است. شاخص HI محاسبه شده برای خردسالان حدود ۰/۵ است که نشان‌دهنده عدم

وجود خطر سرطان‌زایی می‌باشد. این موضوع به‌ویژه از منظر ریسک‌های اکولوژیکی و سلامت جامعه انسانی اهمیت دارد. جوامع محلی و کشاورزان که در معرض مستقیم این آلودگی‌ها قرار دارند، به‌ویژه در محدوده پایین‌دست تخلیه پساب، با خطرات جدی مواجه هستند. این خطرات برای کودکان و خردسالان که آسیب‌پذیری بیشتری دارند، به مراتب جدی‌تر است. با توجه به اینکه آب این رودخانه برای مصارف کشاورزی استفاده می‌شود و مستقیم بر چرخه غذایی انسان تأثیر می‌گذارد، با توجه به مقادیر تغییرات مکانی غلظت عناصر و وضعیت شاخص‌های مورد بررسی در ایستگاه S۲ (و مقایسه آن با سایر ایستگاه‌ها) فرضیه توان خودپالایی بازه مورد مطالعه از رودخانه را به تقویت نماید. لذا فاصله موثر آلودگی در این بازه بین ۵۰ الی ۱۰۰ متر از محل تخلیه منبع آلودگی متمرکز (نقطه تخلیه پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری) پیش‌بینی می‌شود که برای تایید آن برنامه عملیاتی زمان‌بندی شده با بسامد پایین‌تر دقیق‌تری هم‌زمان با سنجش‌های سینماتیکی جریان نیاز می‌باشد.

ضرورت مدیریت و کنترل آلودگی در این منطقه بیش از پیش آشکار می‌شود. بنابراین، توجه و تمرکز بیشتر بر پایش و کاهش آلودگی در محدوده پایین‌دست تخلیه پساب، به‌ویژه با رویکرد حفظ سلامت جامعه و محیط‌زیست، امری ضروری است. این مطالعه بر لزوم تدوین استراتژی‌های پیشگیرانه و اصلاحی برای کاهش ریسک‌های ناشی از آلودگی فلزات سنگین در چرخه غذایی و محیط‌های آبی تأکید می‌کند.

پی‌نوشت‌ها

1. Quality Assurance
2. Quality Control
3. Nitric acid
4. Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy
5. Heavy Metal Evaluation Index
6. heavy metal pollution index
7. The Degree of Contamination
8. Geochemical Accumulation Index
9. Contamination Factor
10. The Hazard Index
11. Soil Ingestion
12. Inhalation
13. Dermal Contact
14. adherence factor
15. National Oceanic and Atmospheric Administration

- Abbasi, S., Sheikh Fakhradini, S., Jaafarzadeh, N., Ebrahimi, P., & Ashayeri, S. Y. (2022). Eutrophication and sediment-water exchange of total petroleum hydrocarbons and heavy metals of Hashilan wetland, a national heritage in NW Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(18), 27007-27025. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-17937-x>
- Afzaal, M., Hameed, S., Liaqat, I., Ali Khan, A. A., Abdul Manan, H., Shahid, R., & Altaf, M. (2022). Heavy metals contamination in water, sediments and fish of freshwater ecosystems in Pakistan. *Water Practice & Technology*, 17(5), 1253-1272. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.039>
- Akinsanya, B., Ayanda, I. O., Fadipe, A. O., Onwuka, B., & Saliu, J. K. (2020). Heavy metals, parasitologic and oxidative stress biomarker investigations in *Heterotis niloticus* from Lekki Lagoon, Lagos, Nigeria. *Toxicology Reports*, 7, 1075-1082. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.08.010>
- Ali, Z., Malik, R. N., & Qadir, A. (2013). Heavy metals distribution and risk assessment in soils affected by tannery effluents. *Chemistry and Ecology*, 29(8), 676-692. <https://doi.org/10.1080/02757540.2013.810728>
- AShetaia, S., M Abu Khatita, A., A Abdelhafez, N., M Shaker, I., & B El Kafrawy, S. (2020). Evaluation of potential health risk, heavy metal pollution indices and water quality of Edku Lagoon-Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 24(2), 265-290. doi: [10.21608/ejabf.2020.80718](https://doi.org/10.21608/ejabf.2020.80718)
- Aziz, K. H. H., Mustafa, F. S., Omer, K. M., Hama, S., Hamarawf, R. F., & Rahman, K. O. (2023). Heavy metal pollution in the aquatic environment: efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: a review. *RSC advances*, 13(26), 17595-17610. doi: [10.1039/D3RA00723E](https://doi.org/10.1039/D3RA00723E)
- Backman, B., Bodiš, D., Lahermo, P., Rapant, S., & Tarvainen, T. (1998). Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. *Environmental geology*, 36, 55-64. <https://link.springer.com/article/10.1007/s002540050320>
- Biggs, H., Smart, G., Holwerda, N., Doyle, M., McDonald, M., & Ede, M. (2021). River discharge from surface velocity measurements-A field guide for selecting alpha. *Envirolink Advice Report*. Christchurch, New Zealand. doi: [10.13140/RG.2.2.22159.05282/1](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22159.05282/1)
- Edet, A. E., & Offiong, O. E. (2002). Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring. A study case from Akpabuyo-Odukpani area, Lower Cross River Basin (southeastern Nigeria).
- استانداری گلستان. (۱۳۹۳). مطالعه توسعه اقتصادی و اجتماعی حوضه آبریز اترک (اترک سفلی). گرگان.
- آقامیرزاده، شاهین، گنجه‌ای زاده روحانی، فاطمه، سعیدیان، حمزه، و گنجه‌ای‌زاده، کامران. (۱۴۰۱). بررسی تغییرات عنصر آلومینیوم در آب‌های سطحی و زیرزمینی حوضه آبخیز سرچشمه استان کرمان. مدیریت جامع حوضه‌های آبخیز، ۲(۱)، ۶۱-۷۲. doi: [10.22034/iwm.2022.551640.1026](https://doi.org/10.22034/iwm.2022.551640.1026)
- پرتانی، صادق، رشیدی، انیسه، جراحی، هادی، جعفری، علی، و ارزنگی، امین. (۱۴۰۲ الف). ارزیابی ریسک اکولوژیکی فلزات سنگین در رسوبات تالاب‌های (شوره زار) ساحلی، مطالعه موردی: تالاب‌های ساحلی خلیج چابهار، اکوسیستم حرا. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴(۱۱)، ۱۷۳۳-۱۷۵۷. doi: [10.22059/ijswr.2023.360884.669517](https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.360884.669517)
- پرتانی، صادق، طاهریان، عباس، جعفری، علی، جراحی، هادی، و ارزنگی، امین. (۱۴۰۲ ب). شناسایی و ارزیابی کاربری اراضی موثر بر آلودگی بیولوژیکی رواناب شهری. محیط‌شناسی، ۴۹(۴)، ۴۳۷-۴۵۶. doi: [10.22059/jes.2023.361348.1008423](https://doi.org/10.22059/jes.2023.361348.1008423)
- پرتانی، صادق، و نوروزی، آسیه. (۱۴۰۲). بررسی و تحلیل حساسیت ریسک مراکز دفن زباله بر آلودگی منابع پذیرنده آب استان خراسان شمالی. فصلنامه علوم محیطی، ۲۱(۱)، ۶۴-۴۷. doi: [10.48308/envs.2023.1222](https://doi.org/10.48308/envs.2023.1222)
- پرتانی، صادق، یحیی آبادی، حمید، و جعفری، علی. (۱۴۰۳). ارزیابی فرآیندهای تصفیه: استحصال و بازچرخانی آب از پساب انسانی در برج مرتفع با بهره‌گیری از روش‌های اتوماسیون (مطالعه و اجرای موردی: برج سپهر تهران). نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، ۵۴(۱۱۶)، ۱۰۱-۱۱۳. <https://doi.org/10.22034/CEEJ.2024.59115.2297>
- قدیری، علی، هاشمی، سید حسین، و نصرآبادی، تورج. (۱۴۰۰). بررسی غلظت فلزات سنگین شاخص در رواناب شهری (مطالعه موردی: حوضه شمال و شرق تهران). نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۳(۱۰)، ۴۵۰۴-۴۴۸۹. doi: [10.22060/ceej.2020.18384.6859](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18384.6859)
- قلی‌زاده، محمد، و پورحمیدی، فرزانه. (۱۳۹۹). ارزیابی سلامت کیفیت آب رودخانه مادرسو (استان گلستان) با استفاده از شاخص زیستی چند معیاره. محیط‌شناسی، ۴۶(۲)، ۳۷۵-۳۹۰. doi: [10.22059/jes.2021.300388.1007997](https://doi.org/10.22059/jes.2021.300388.1007997)
- موسوی‌پور، فاطمه، کاظمی، آزاده، هادی‌پور، مهرداد، و هدایتی آقمشهدی، امیر. (۱۴۰۱). نقش آلاینده‌ها بر سلامت و محیط‌زیست با تأکید بر تاب‌آوری اجتماعی (مطالعه بر اساس آلاینده‌ها در شهر اراک). مدیریت جامع حوضه‌های آبخیز، ۲(۲)، ۷۵-۹۳. doi: [10.22034/iwm.2022.552129.1027](https://doi.org/10.22034/iwm.2022.552129.1027)
- نجاتی جهرمی، زهره، ناصری، حمیدرضا، نخعی، محمد و علیجانی، فرشاد. (۱۳۹۶). ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی آبخوان ورامین از نظر قابلیت شرب: آلودگی با فلزات سنگین. سلامت و محیط زیست، ۱۰(۴)، ۵۵۹-۵۷۲. <http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-5906-fa.html>
- کارگروه ملی سازگاری با کم‌آبی. (۱۴۰۳). خلاصه مدیریتی برنامه سازگاری با کم‌آبی استان خراسان شمالی. وزارت خانه‌های نیرو، جهاد کشاورزی، کشور و صنعت، معدن و تجارت.

- GeoJournal, 57, 295-304. <https://link.springer.com/article/10.1023/B:GEJO.0000007250.92458.de>
- Feng, X., Long, R., Wang, L., Liu, C., Bai, Z., & Liu, X. (2022). A review on heavy metal ions adsorption from water by layered double hydroxide and its composites. Separation and Purification Technology, 284, 120099. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120099>
 - Förstner, U. (2002). Sediment sampling, sample preparation, grain size corrections, and chemical criteria. Publisher McGraw-Hill. New York, United States.
 - House, M. A., & Ellis, J. B. (1987). The development of water quality indices for operational management. Water Science and Technology, 19(9), 145-154. <https://doi.org/10.2166/wst.1987.0076>
 - Huang, Y., Chen, Q., Deng, M., Japenga, J., Li, T., Yang, X., & He, Z. (2018). Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China. Journal of environmental management, 207, 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.072>
 - Islam, M. S., Ahmed, M. K., Habibullah-Al-Mamun, M., & Hoque, M. F. (2015). Preliminary assessment of heavy metal contamination in surface sediments from a river in Bangladesh. Environmental earth sciences, 73, 1837-1848. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-014-3538-5>
 - Islam, M. S., Proshad, R., & Ahmed, S. (2018). Ecological risk of heavy metals in sediment of an urban river in Bangladesh. Human and ecological risk assessment: an international journal, 24(3), 699-720. <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1397499>
 - Jiao, G. J., Ma, J., Li, Y., Jin, D., Zhou, J., & Sun, R. (2022). Removed heavy metal ions from wastewater reuse for chemiluminescence: Successive application of lignin-based composite hydrogels. Journal of Hazardous Materials, 421, 126722. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126722>
 - Kachoueian, F., Karbassi, A., Nasrabadi, T., Rashidiyan, M., & De-la-Torre, G. E. (2024). Speciation characteristics, ecological risk assessment, and source apportionment of heavy metals in the surface sediments of the Gomishan wetland. Marine Pollution Bulletin, 198, 115835. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115835>
 - Khan, M., Omer, T., Ellahi, A., Ur Rahman, Z., Niaz, R., & Ahmad Lone, S. (2023). Monitoring and assessment of heavy metal contamination in surface water of selected rivers. Geocarto International, 38(1), 2256313. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2256313>
 - Kuriata-Potasznik, A., Szymczyk, S., & Skwierawski, A. (2020). Influence of cascading river-lake systems on the dynamics of nutrient circulation in catchment areas. Water, 12(4), 1144. <https://doi.org/10.3390/w12041144>
 - Leventeli, Y., & Yalcin, F. (2021). Data analysis of heavy metal content in riverwater: multivariate statistical analysis and inequality expressions. Journal of Inequalities and Applications, 2021(1), 14. <https://link.springer.com/article/10.1186/s13660-021-/02549-3>
 - Loredó, J., Soto, J., Ordóñez, A., & Álvarez, R. (2009). Mercury and arsenic pollution associated to artisanal gold mining in Huanca (Ayacucho Department, Peru). Fresenius environmental bulletin, 18(4), 391-398. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20093156963#>
 - Mohammad Ali, B. N., Lin, C. Y., Cleophas, F., Abdullah, M. H., & Musta, B. (2015). Assessment of heavy metals contamination in Mamut river sediments using sediment quality guidelines and geochemical indices. Environmental monitoring and assessment, 187, 1-11. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-014-4190-y>
 - Mohan, S. V., Nithila, P., & Reddy, S. J. (1996). Estimation of heavy metals in drinking water and development of heavy metal pollution index. Journal of Environmental Science & Health Part A, 31(2), 283-289. <https://doi.org/10.1080/10934529609376357>
 - Mokarram, M., Saber, A., & Sheykhi, V. (2020). Effects of heavy metal contamination on river water quality due to release of industrial effluents. Journal of Cleaner Production, 277, 123380. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123380>
 - Moore, F., Esmaili, K., & Keshavarzi, B. (2011). Assessment of heavy metals contamination in stream water and sediments affected by the Sungun porphyry copper deposit, East Azerbaijan Province, Northwest Iran. Water Quality, Exposure and Health, 3, 37-49. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12403-011-0042-y>
 - Moslehi, A., Faizian, M., & Eisvand, H. (2019). Effect of Phosphate fertilizer in salinity stress conditions on Cadmium fate in the plant and qualitative characteristics of tobacco. Journal of Crop Production, 12(2), 89-106. doi: [10.22069/ejcp.2019.15233.2136](https://doi.org/10.22069/ejcp.2019.15233.2136)
 - MULLER, G. (1969). Index of Geoaccumulation in sediments of the Rhine River. GeoJournal, 2, 108-118. <https://cir.nii.ac.jp/crid/157113565073812472>
 - Nasrabadi, T. (2015). An index approach to metallic pollution in riverwaters. International Journal of Environmental Research, 9(1), 385-394.

- Nayek, S., Gupta, S., & Saha, R. N. (2013). Heavy metal distribution and chemical fractionation in water, suspended solids and bed sediments of industrial discharge channel: an implication to ecological risk. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 17(6), 26-33. www.academia.edu/49897552
- Partani, S., Mehr, A. D., & Jafari, A. (2024). Enhancing nutrient absorption through the influence of mangrove ecosystem on flow rate and retention time in salt marshes. *Science of the Total Environment*, 924, 171518. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171518>
- Partani, S., Mehr, A. D., Ahmadi, K. A., Alaei, M., Maghrebi, M., Taniwaki, R. H., & Jafari, A. (2024). Identifying toxic elements in water, sediments, and roots of mangrove forest (*Avicennia marina*) in Chabahar Bay, Sea of Oman. *Science of The Total Environment*, 954, 176635. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176635>
- Poshtegal, M. K., & Mirbagheri, S. A. (2019). The heavy metals pollution index and water quality monitoring of the Zarrineh river, Iran. *Environmental & Engineering Geoscience*, 25(2), 179-188. <https://doi.org/10.2113/EEG-1996>
- Prasad, B., & Bose, J. (2001). Evaluation of the heavy metal pollution index for surface and spring water near a limestone mining area of the lower Himalayas. *Environmental geology*, 41(1), 183-188. <https://link.springer.com/article/10.1007/s002540100380>
- Qing, X., Yutong, Z., & Shenggao, L. (2015). Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, North-east China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 120, 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.06.019>
- Raj, A. R. A., Mylsamy, P., Sivasankar, V., Kumar, B. S., Omine, K., & Sunitha, T. G. (2024). Heavy metal pollution of river water and eco-friendly remediation using potent microalgal species. *Water Science and Engineering*, 17(1), 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.04.001>
- Saleh, H. N., Panahande, M., Yousefi, M., Asghari, F. B., Oliveri Conti, G., Talaee, E., & Mohammadi, A. A. (2019). Carcinogenic and non-carcinogenic risk assessment of heavy metals in groundwater wells in Neyshabur Plain, Iran. *Biological trace element research*, 190, 251-261. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12011-018-1516-6>
- Segura, R., Arancibia, V., Zúñiga, M. C., & Pastén, P. (2006). Distribution of copper, zinc, lead and cadmium concentrations in stream sediments from the Mapocho River in Santiago, Chile. *Journal of geochemical exploration*, 91(1-3), 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2006.03.003>
- Singh, K. P., Mohan, D., Singh, V. K., & Malik, A. (2005). Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments—a tributary of the Ganges, India. *Journal of hydrology*, 312(1-4), 14-27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.01.021>
- Singh, V., Singh, N., Rai, S. N., Kumar, A., Singh, A. K., Singh, M. P., Sahoo, A., Shekhar, S., Vamanu, E., & Mishra, V. (2023). Heavy metal contamination in the aquatic ecosystem: toxicity and its remediation using eco-friendly approaches. *Toxics*, 11(2), 147. <https://doi.org/10.3390/toxics11020147>
- Snoeyink, V. L., & Jenkins, D. (1991). *Water chemistry*. John Wiley & Sons. Chapter Two. New York, USA.
- Sojka, M., & Jaskuta, 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(17), 10502. <https://doi.org/10.3390/ijerph191710502>
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (2013). *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*. John Wiley & Sons. Chapter one. New York USA.
- Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., & Dobhal, R. (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of water resources*, 1(3), 34-38. doi: [10.12691/ajwr-1-3-3](https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3)
- US Environmental Protection Agency. (1996). Method 1669: Sampling ambient water for trace metals at EPA water quality criteria levels. Washington, D.C., USA.
- USEPA. (1996). Method 1669: Sampling Ambient Water for Trace Metals at EPA Water Quality Criteria Levels. Environmental Protection. USA.
- Wang, Y., Qiu, Q., Xin, G., Yang, Z., Zheng, J., Ye, Z., & Li, S. (2013). Heavy metal contamination in a vulnerable mangrove swamp in South China. *Environmental monitoring and assessment*, 185, 5775-5787. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-012-2983-4>
- Xie, Q., & Ren, B. (2022). Pollution and risk assessment of heavy metals in rivers in the antimony capital of Xikuangshan. *Scientific reports*, 12(1), 14393. <https://www.nature.com/articles/s41598-022-18584-z>
- Yadav, G., Shanmugam, S., Sivaramakrishnan, R., Kumar, D., Mathimani, T., Brindhadevi, K., & Rajendran, K. (2021). Mechanism and challenges behind algae as a wastewater treatment choice for bioenergy production and beyond. *Fuel*, 285, 119093. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119093>
- Yerima, E. A., Itodo, A. U., Shaâ, R., & Wuana, R. A. (2020). Ecological risk assessment of mineral and heavy metals

levels of soil around auto mechanic village Wukari, Nigeria. Academic Journal of Chemistry, 5(7), 81-90. doi: [10.32861/ajc.57.81.90](https://doi.org/10.32861/ajc.57.81.90)

- Yilmaz, F., Özdemir, N., Demirak, A., & Tuna, A. L. (2007). Heavy metal levels in two fish species *Leuciscus cephalus* and *Lepomis gibbosus*. Food chemistry, 100(2), 830-835. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.09.020>
- Zaynab, M., Al-Yahyai, R., Ameen, A., Sharif, Y., Ali, L., Fatima, M., Khan, K.A., & Li, S. (2022). Health and environmental effects of heavy metals. Journal of King Saud University-Science, 34(1), 101653. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101653>
- Zhang, P., Yang, M., Lan, J., Huang, Y., Zhang, J., Huang, S., Yang, Y., & Ru, J. (2023). Water quality degradation due to heavy metal contamination: health impacts and eco-friendly approaches for heavy metal remediation. Toxics, 11(10), 828. <https://doi.org/10.3390/toxics11100828>
- Zhang, Q., Ren, F., Xiong, X., Gao, H., Wang, Y., Sun, W., Leng, P., Li, Z., & Bai, Y. (2021). Spatial distribution and contamination assessment of heavy metal pollution of sediments in coastal reclamation areas: a case study in Shenzhen Bay, China. Environmental Sciences Europe, 33, 1-11. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00532-9>
- Zhao, Q., Wang, Y., Cao, Y., Chen, A., Ren, M., Ge, Y., Yu, Z., Wan, S., Hu, A., Bo, Q. & Li, L. (2014). Potential health risks of heavy metals in cultivated topsoil and grain, including correlations with human primary liver, lung and gastric cancer, in Anhui province, Eastern China. Science of the Total Environment, 470, 340-347. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.086>
- Zhao, X. M., Yao, L. A., Ma, Q. L., Zhou, G. J., Wang, L., Fang, Q. L., & Xu, Z. C. (2018). Distribution and ecological risk assessment of cadmium in water and sediment in Longjiang River, China: Implication on water quality management after pollution accident. Chemosphere, 194, 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.127>