

Evaluation of Heavy Metals in Water and Sediments of Haraz River, Using Pollution Load Index (PLI) and Geoaccumulation Index (Igeo)

REZA KHALILI*, SEYED ABOLFAZL ZALI¹, HAMED MOTAQHI¹

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

(Received: Dec. 27, 2020- Revised: March. 8, 2021- Accepted: March. 14, 2021)

ABSTRACT

In recent years, toxic and chemical effluents from agricultural and industrial activities have entered into surface waters without considering environmental considerations, which has caused water pollution, contamination of river sediments and many environmental hazards. In this study, the concentration of four heavy metals of arsenic (As), chromium (Cr), cadmium (Cd), and lead (Pb) in water and sediments of Haraz River in Mazandaran province was investigated using Contamination Factor (CF), Pollution Load Index (PLI) and Geoaccumulation Index (Igeo). The results showed that the concentration ranges of arsenic (AS), chromium (Cr), cadmium (Cd), and lead (Pb) in water are 3.03- 3.99, 2.55-3.92, 1.94-2.42, and 3.96-5.3 mg/lit, and in sediment are 2.12-5.15, 29.91-32.71, 1.02-1.03, and 6.62-9.46 mg/kg, respectively. The concentration of heavy metals in downstream sites (S7 and S8) were higher than the standard drinking water, due to the disposal of waste, untreated effluents from various industries and excessive agricultural activities. The pollution load index (PLI) of heavy metals in sediment samples was in low and medium pollution level and the Geoaccumulation Index (Igeo) in sediment samples was in the level of no and medium pollution. This study suggests a continuous monitoring of heavy metals in water, sediments and other aquatic biomasses, which is crucial in Haraz River to ensure the environmental safety adjacent to the river.

Keywords: Heavy Metals, Surface Water, Sediments, Pollution Load Index (PLI) and Geoaccumulation index (Igeo).

ارزیابی فلزات سنگین در آب و رسوبات رودخانه هراز، با استفاده از شاخص بار آلودگی (PLI) و شاخص تجمع جغرافیایی (Igeo)

رضا خلیلی^{۱*}، سید ابوالفضل زالی^۱، حامد متقی^۱

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴)

چکیده

در سال‌های اخیر پساب سمی و شیمیایی فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی بدون رعایت ملاحظات زیست‌محیطی وارد آب‌های سطحی شده است که این عمل باعث ایجاد آلودگی آب، آلودگی رسوبات رودخانه و ایجاد مشکلات عدیده‌ای برای محیط‌زیست شده است. در این پژوهش مرتبه آلودگی چهار فلز سنگین آرسنیک (As)، کروم (Cr)، کادمیوم (Cd) و سرب (Pb) در آب و رسوبات رودخانه هراز از استان مازندران با استفاده از ضریب آلودگی (CF)، شاخص بار آلودگی (PLI) و شاخص تجمع جغرافیایی (Igeo) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد دامنه غلظت فلزات سنگین آرسنیک (As)، کروم (Cr)، کادمیوم (Cd) و سرب (Pb) در آب به ترتیب $۳/۰۳ - ۳/۹۹$ ، $۲/۵۵ - ۳/۹۲$ ، $۱/۹۴ - ۲/۴۲$ و $۳/۹۶ - ۵/۳$ میکروگرم در لیتر و در رسوب به ترتیب $۲/۱۲ - ۵/۱۵$ ، $۲۹/۹۱ - ۳۲/۷۱$ ، $۱/۰۲ - ۱/۰۳$ و $۶/۶۲ - ۹/۴۶$ میلی‌گرم در کیلوگرم بوده است. غلظت فلزات سنگین در سایت‌های پایین دست به علت دفع زباله‌های شهری، پساب‌های تصفیه نشده از صنایع مختلف و فعالیت‌های زیاد کشاورزی بیش از حد ایمن آب آشامیدنی است. شاخص مرتبه بار آلودگی فلزات سنگین (PLI) در نمونه‌های رسوب در مرتبه آلودگی پایین و متوسط و همچنین مرتبه آلودگی شاخص جغرافیایی (Igeo) در نمونه‌های رسوب در مرتبه بدون آلودگی و آلودگی متوسط قرار داشته است. این مطالعه به نظارت مداوم فلزات سنگین در آب، رسوبات و سایر زیست توده‌های آبی رودخانه هراز برای ارزیابی خطر به‌منظور ایمن‌سازی محیط‌زیست در مجاورت رودخانه توصیه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، آب سطحی، رسوبات، شاخص بار آلودگی و شاخص تجمع جغرافیایی.

مقدمه

آب‌های شیرین یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی بر روی زمین است که برای همه موجودات ضروری می‌باشد (Khalili et al., 2020a). آگاهی از نوسانات غلظت‌های فیزیکی و شیمیایی منابع آب، از جمله مواد مغذی و تشخیص اثر فرآیندهای فیزیکی و زیستی برای مدیریت صحیح این منابع ضروری می‌باشد (Khan et al., 2020; Wu et al., 2020). آلودگی فلزات سنگین در محیط‌های آبی به دلیل فراوانی، ماندگاری و سمیت بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Islam et al., 2020). یکی از مهم‌ترین منابع آب در زمین رودخانه‌ها می‌باشند که تحت تأثیر این آلودگی هستند (Khalili et al., 2020b). فعالیت‌های طبیعی و فعالیت‌های انسانی عامل انتقال فلزات سنگین در محیط‌های آبی و رسوبات می‌باشد که باعث آلودگی محیط‌زیست رودخانه می‌شوند (Li et al., 2020). آلودگی فلزی اکوسیستم‌های آبی به علت اثرات ناشی از شهرنشینی و صنعتی شدن در حال افزایش است و این افزایش

آلودگی اثرات نامطلوبی بر سلامتی بی‌مهرگان، ماهی‌ها و انسان‌ها دارند (Feng et al., 2019). در سال‌ها اخیر در محیط‌های آبی، از رسوبات به عنوان شاخص زیست‌محیطی برای ارزیابی آلودگی فلزات به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (Khalili et al., 2021b). تقسیمات اصلی آلاینده‌های فلزی تابعی از ترکیب رسوبات معلق و شیمیایی در آب طبیعی می‌باشد که رسوب به علت تغییرات در زیستگاه و محیط‌زیست آبریان بخشی اساسی و پویا از حوزه رودخانه است (Fang et al., 2020; Tian et al., 2019). بررسی فلزات سنگین در آب می‌تواند برای ارزیابی تأثیرات انسانی، صنعتی و خطرات ناشی از تخلیه زباله در اکوسیستم‌های رودخانه مورد استفاده قرار گیرد (Prasad et al., 2020; Xiao et al., 2020). بنابراین، اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در آب و رسوبات اکوسیستم رودخانه مهم می‌باشد (Hoang et al., 2020). امروزه آلودگی فلزات سنگین در بسیاری از استان‌های درحال توسعه کشور مانند مازندران یک مشکل اصلی تلقی می‌شود.

رودخانه به علت گذشتن از مناطق شهری در حال کاهش است (Cengiz *et al.*, 2017). Zhang *et al.*, (2016) به بررسی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه بورت الا چین که یک رودخانه معمولی داخلی واقع در مناطق خشک در شمال غربی چین متمرکز شده است پرداختند. آن‌ها نمونه‌های رسوب و خاک از رودخانه و حوضه زهکشی جمع‌آوری و مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری چند متغیره نشان داد که منشأ مس، نیکل، As و Zn در درجه اول از زمینه طبیعی زمین‌شناسی است، در حالی که Cd، Pb، Hg و Cr در رسوبات از فعالیت‌های انسانی نشأت می‌گیرد. بنابراین، بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که بررسی اثرات تخلیه پساب‌های سمی و شیمیایی بر آب و رسوبات رودخانه یک امر اساسی در حفظ محیط زیست رودخانه‌ها می‌باشد، همچنین بیشتر پژوهش‌های انجام شده در ایران با استفاده از یک مدل برای تعیین مرتبه آلودگی در آب‌های سطحی و پرداخته‌اند. در این پژوهش جهت ارزیابی وضعیت آلودگی فلزات سنگین در آب و رسوبات رودخانه هراز از ضریب آلودگی (CF)^۱، شاخص بار آلودگی (PLI)^۲ و شاخص تجمع جغرافیایی (Igeo)^۳ استفاده و مورد ارزیابی قرار گرفت. دستاوردهای این پژوهش می‌تواند جهت برنامه‌های مدیریتی مقابله با آلودگی در آب‌های سطحی مفید باشد.

مواد و روش‌ها

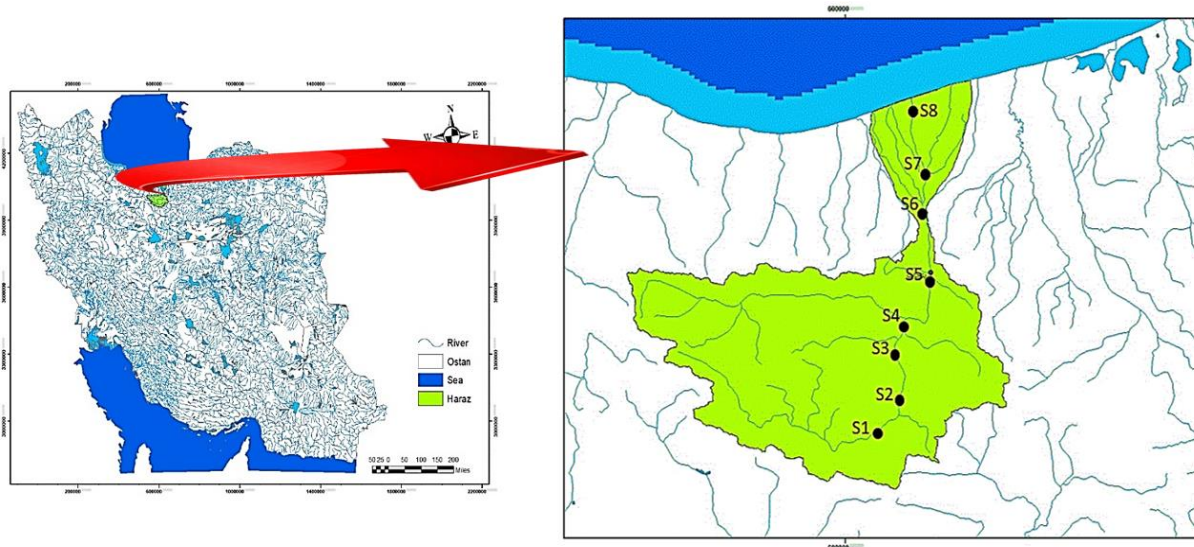
منطقه مورد مطالعه و نمونه‌گیری

این مطالعه بر روی رودخانه هراز، واقع در حوضه هراز استان مازندران انجام شده است (شکل ۱). نام و مختصات محل نمونه‌برداری با مختصات GIS آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. رودخانه هراز با طولی حدود ۱۸۵ کیلومتر از دره لار در جنوب کوه دماوند سرچشمه گرفته و رواناب‌های دره قاضی‌کلا و جنگل دره نیز از کوه‌های شمیم کوه، آب زیارو و لاسم که از کوه‌های غربی قرقان چای فیروزکوه و آب رودهای جاری از دهکده‌های دلارستان، نیز به این رود وارد می‌شوند و در نهایت به دریای خزر می‌ریزد. حدود ۳۰ نمونه رسوب و آب از ۸ مکان نمونه‌برداری از رودخانه هراز در تیرماه ۱۳۹۸ (تابستان) و در دی‌ماه ۱۳۹۸ (زمستان) جمع‌آوری شد. در طول تابستان، بارندگی کمتری وجود دارد و سطح آب رودخانه کاهش می‌یابد. در طول زمستان، به دلیل بارندگی و برف شدید، سطح آب رودخانه افزایش می‌یابد. نمونه‌های آب با استفاده از یک سرنگ پلاستیکی (۵۰ میلی‌لیتر) برداشته شد و با استفاده از بطری‌های پلی اتیلن تمیز جمع‌آوری شد. نمونه‌های رسوب توسط لایروبی از

شهرنشینی و صنعتی سازی شدن مازندران اثرات مخربی بر کیفیت آب و رسوبات و همچنین سایر جانوران آبی داشته است (Karimian *et al.*, 2020). دفع زباله‌های شهری، پساب‌های تصفیه نشده از صنایع مختلف و کشاورزی در آب‌های رودخانه‌های استان مازندران به وضعیت نگران‌کننده‌ای رسیده است که به‌طور مداوم سطح فلزات سنگین را افزایش می‌دهد و کیفیت آب را وخیم می‌کند. یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین رودخانه استان مازندران رودخانه هراز در شهر آمل می‌باشد. رودخانه هراز سالانه مقدار زیادی پساب تصفیه نشده از صنایع مختلف و کشاورزی را دریافت می‌کند که در بین آلودگی این پساب‌ها فلزات سنگین بیشترین مقدار آلودگی را برای آب رودخانه و رسوبات ایجاد کرده است. در سال ۲۰۱۹ در تحقیقی ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در آب و رسوبات سطحی جهت ارزیابی خطرات زیست‌محیطی رودخانه گانگا در کشور هند انجام شد. آن‌ها هشت فلز سنگین (Cr، Cd، Ni، Cu، Pb، روی، منگنز و آهن) در رسوبات آب و بستر را در ۹ سایت در طول ۲۳۲۰ کیلومتری رودخانه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد غلظت Cr، Cd، Ni، Pb، Cu و Fe در آب از حد متناظر آن‌ها در وسط و پایین رودخانه فراتر رفته است و با توجه به اینکه از آب گانگا برای آشامیدن و آبیاری استفاده می‌شود و رودخانه از انواع زیستگاه‌های شیلات برخوردار است، باعث ایجاد خطرات زیست‌محیطی زیادی خواهد شد (Siddiqui & Pandey, 2019). متقی و همکاران در سال ۱۳۹۹ به ارزیابی فلزات سنگین در آب رودخانه بشار استان کهگیلویه و بویراحمد پرداختند. آن‌ها ۴ فلز سنگین (کروم، سرب، روی و کادمیوم) در آب رودخانه در ۲ سایت در بازه زمانی مهر ۱۳۹۷ تا شهریور ۱۳۹۸ به صورت ماهیانه مورد بررسی قرار دادند. نتایج غلظت نمونه‌ها کروم ۰٫۰۱-۰٫۰۷۲، سرب ۰٫۰۰۲-۰٫۰۰۸، روی ۰٫۰۱۶۵-۰٫۰۲۶ و کادمیوم ۰٫۰۰۳۷-۰٫۰۰۰۲ میلی‌گرم در لیتر را نشان داد که بر این اساس استفاده از این آب برای اهداف آشامیدنی، شستشو، ماهیگیری، کشاورزی و برای سلامت انسان و محیط‌زیست مناسب نمی‌باشد (Motaghi *et al.* 1399). مهمت و همکاران ۲۰۱۷ به ارزیابی فلزات سنگین در آب رودخانه بوگاکای در آنتالیا پرداختند تا خطر احتمالی آلودگی توسط فلزات سنگین را بررسی کنند. آن‌ها ۲۵ نمونه آب در امتداد رودخانه جمع‌آوری کردند و غلظت فلزات As، Ba، Cd، Co، Cr، Cu، Hg، Mn، Ni، Pb، Se، Sr را توسط طیف‌سنجی جرمی پلاسما به روش القایی همراه (ICP-MS) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد کیفیت آب در انتها رودخانه نسبت به ابتدا و وسط

ایستگاه‌های مختلف رودخانه هراز در همان مکان‌های نمونه‌برداری
 آب جمع‌آوری شد.

پارامترهای کیفیت آب
 جدول (۲) روش اندازه‌گیری و دستگاه‌هایی که برای اندازه‌گیری
 پارامترهای فیزیکی-شیمیایی نمونه‌ها به کاررفته را نشان می‌دهد.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مطالعه شده در رودخانه هراز

| ایستگاه | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | ارتفاع از سطح دریا (متر) |
|---------|---------------|---------------|--------------------------|
| S1 | ۵۲ ۱۹ ۳۱ | ۳۵ ۸۸ ۳۳ | ۱۴۸۱ |
| S2 | ۵۲ ۲۶ ۲۵ | ۳۵ ۳۶ ۵۰ | ۱۴۲۲ |
| S3 | ۵۲ ۲۶ ۴۵ | ۳۶ ۰۶ ۱۲ | ۱۲۴۵ |
| S4 | ۵۲ ۲۹ ۴۲ | ۳۶ ۱۳ ۲۱ | ۱۰۵۲ |
| S5 | ۵۲ ۳۷ ۳۵ | ۳۶ ۲۴ ۲۹ | ۵۳۸ |
| S6 | ۵۲ ۳۵ ۱۵ | ۳۶ ۴۰ ۱۷ | ۳۰۵ |
| S7 | ۵۲ ۳۶ ۲۴ | ۳۶ ۴۸ ۳۲ | ۲۷ |
| S8 | ۵۲ ۳۵ ۱۰ | ۳۶ ۶۳ ۱۲ | ۲ |

جدول ۲- ابزار و روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای مورد مطالعه

| پارامتر | ابزار و روش‌های اندازه‌گیری |
|------------------|--|
| دما | دماسنج جیوه‌ای |
| اکسیژن محلول | روش وین کالر (Winkler) با دستگاه Do متر |
| نیتروژن آمونیاکی | روش نسلر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتری |
| pH | pH متر مدل Metrohm |
| شوری | کیت تست HANNA, Instruments Ltd |
| قلیابیت | روش تیتراسیون |
| سختی | روش کمپلکسومتری با استفاده از محلول استاندارد EDTA |
| فلزات سنگین | اسپکتروفتومتری جذب اتمی |

مواد شیمیایی و هضم نمونه
 تمام محلول‌های استاندارد برای عنصر هدف توسط Merck آلمان
 با بالاترین سطح خلوص (۹۹٫۹۸٪) تهیه شده است. برای هضم
 نمونه از HNO_3 خالص استفاده شد. پس از جمع‌آوری، نمونه‌های
 آب ابتدا با استفاده از فیلتر غشایی ۰/۴۵ میلی‌متر از طریق
 فیلتراسیون فیلتر شدند. حدود ۵ میلی‌لیتر HNO_3 غلیظ در هر
 ۵۰ میلی‌لیتر محلول جمع‌آوری شده پس از فیلتر اضافه شده تا
 $\text{pH} < 2$ برسد و سپس در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد روی صفحه

فیلتراسیون فیلتر شدند. حدود ۵ میلی‌لیتر HNO_3 غلیظ در هر
 ۵۰ میلی‌لیتر محلول جمع‌آوری شده پس از فیلتر اضافه شده تا
 $\text{pH} < 2$ برسد و سپس در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد روی صفحه

شاخص تجمع جغرافیایی (Igeo)

درجه آلودگی ناشی از فلزات سنگین می‌تواند با اندازه‌گیری شاخص تجمع جغرافیایی (Igeo) اندازه‌گیری شود. شاخص تجمع جغرافیایی به‌طور گسترده برای ارزیابی آلودگی رسوب مورداستفاده قرار گرفته است (Barbieri, 2016). به‌منظور مشخصه بندی سطح آلودگی در رسوب، مقادیر شاخص تجمع جغرافیایی (Igeo) با استفاده از معادله زیر محاسبه شدند:

$$Igeo = \log_2 [C_n / 1.5B_n] \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن Cn غلظت اندازه‌گیری شده فلز در رسوب و Bn مقدار پیش‌زمینه ژئوشیمیایی المان n در نمونه پیش‌زمینه است. ضریب ۱/۵ به منظور تصحیح غلظت اولیه رسوبات به دلیل تأثیر عوامل زمینی اعمال شده است. مقادیر شاخص تجمع جغرافیایی (Igeo) بر اساس جدول (۴) تفسیر شده است (Al-Dabbas & Abdullah, 2020).

جدول ۴- مقادیر شاخص تجمع جغرافیایی (Igeo) (Ukah et al., 2020)

| دامنه | طبقه بندی آلودگی |
|----------------------|----------------------------|
| $Igeo \leq 0$ | آلوده نشده |
| $1 \leq Igeo \leq 0$ | آلوده نشده تا آلودگی متوسط |
| $2 \leq Igeo \leq 1$ | آلودگی متوسط |
| $3 \leq Igeo \leq 2$ | آلودگی متوسط تا زیاد |
| $4 \leq Igeo \leq 3$ | آلودگی زیاد |
| $5 \leq Igeo \leq 4$ | آلودگی زیاد تا شدید |
| $Igeo > 5$ | به‌شدت آلوده |

نتایج و بحث**پارامترهای کیفیت آب**

پارامترهای فیزیکی-شیمیایی نمونه‌های آب مانند دما، pH، شوری، سختی، اکسیژن محلول، کلیت، آمونیاک در جدول (۵) ارائه شده است. پارامترهای فیزیکوشیمیایی بسیار مهم هستند زیرا تأثیر قابل توجهی بر کیفیت آب دارند. علاوه بر این، در سال‌های اخیر زندگی آبریان رودخانه‌ها به دلیل کاهش کیفیت آب در حال نابودی می‌باشد. در میان عوامل خارجی دما یکی از مهم‌ترین عواملی است که بر محیط‌زیست آب تأثیر می‌گذارد. بر اساس جدول (۵) مقادیر دما در تابستان و زمستان به ترتیب از ۲۶/۵ درجه سانتی‌گراد تا ۲۲/۸ درجه سانتی‌گراد متغیر بودند. میانگین مقدار دمای آب به‌غیراز سایت S8 در تابستان در حد مجاز تعیین شده قرار دارد. متوسط pH در تابستان و زمستان به ترتیب ۷/۹۵ و ۸/۲۲ بود که در همه سایت‌ها به‌غیراز سایت S7 و S8 در زمستان در حد مجاز تعیین شده قرار دارد. مقادیر متوسط شوری در تابستان ۶/۸ و در زمستان ۷/۸۳ مشاهده شد. در مطالعه حاضر، بیشترین سختی ۷۰۵ میلی‌گرم در لیتر در سایت ۸ در طول زمستان به دلیل سطح شوری بالاتر و کمترین سختی ۱۲۵

داغ^۱ قرار داده شد تا حجم نمونه به حدود ۲۵ تا ۳۰ میلی‌لیتر کاهش تا به رنگ روشن برسد. افزودن HNO₃ و جوشاندن تکرار شد تا محلول به رنگ روشن یا شفاف رسید و پس از کاهش دما، محلول مجدداً از کاغذ فیلتر شماره ۴۱ عبور داده شد. همچنین حدود ۰/۲ گرم از رسوبات خشک شده در بشر ۱۰۰ میلی‌لیتری با آب دیونیزه به حجم رسانده و ۱۵ میلی‌لیتر HNO₃ غلیظ به آن اضافه شد. محتوا به مدت ۵ ساعت در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد تا ۲-۳ میلی‌لیتر در لیوان باقی بماند. پس از عبور مواد هاضم از شماره کاغذ صافی شماره ۴۱، با محلول HNO₃ ۰/۱ میلی‌لیتر شسته شد.

ارزیابی فلزات سنگین در رسوب

در تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی، انتخاب مقادیر پیش‌زمینه نقش مهمی را ایفا می‌کند. محققین بسیاری از مقادیر متوسط شیل یا داده‌های فراوانی به‌عنوان خط مبناهای خود استفاده کردند [۱۶]. مرتبه آلودگی فلزات سنگین در این پژوهش با ضریب آلودگی (CF)، شاخص بار آلودگی (PLI) و شاخص تجمع جغرافیایی (Igeo) مورد ارزیابی قرار گرفت.

شاخص بار آلودگی (PLI) و ضریب آلودگی (CF)

برای ارزیابی کیفیت رسوب، روش‌های ترکیبی شاخص بار آلودگی چهار فلز بر اساس شاخص بار آلودگی (PLI) محاسبه شدند. به‌صورت ریسه \ln ضرب ضریب‌های آلودگی (CF) فلزات تعریف می‌شود:

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن CF_{metals} نسبت بین مقدار هر فلز به مقادیر پیش‌زمینه (مقادیر پیش‌زمینه از مقدار متوسط شیل جهانی) در رسوب است. $CF_{\text{metals}} = C_{\text{metal}} / C_{\text{background}}$ (رابطه ۲)

بنابراین، مقدار PLI که در آن صفر نشان‌دهنده بدون آلودگی بودن و مقدار بالای یک نشان‌دهنده آلودگی می‌باشد. PLI یک ارزیابی از وضعیت سمی بودن کلی نمونه می‌باشد. نسبت غلظت اندازه‌گیری شده به فراوانی طبیعی یک فلز مشخص به صورت ضریب آلودگی (CF) پیشنهاد می‌شود که برای نظارت بر آلودگی یک فلز در طی یک دوره زمانی استفاده می‌شود که به چهار سطح تقسیم بنده می‌شود (Joksimović et al., 2020).

جدول ۳- مقادیر فاکتور آلودگی (CF) (Egbueri et al., 2020)

| دامنه | طبقه بندی آلودگی |
|-----------------|-------------------|
| $1 < CF$ | مرتبه پایین |
| $1 \leq CF < 2$ | مرتبه متوسط |
| $2 \leq CF < 6$ | مرتبه قابل‌ملاحظه |
| $CF \geq 6$ | مرتبه بسیار بالا |

۱۴ میلی‌گرم در لیتر در زمستان بیان شده است همان‌طور که انتظار می‌رفت در سایت اول بالاترین مقدار DO برابر با ۱۴ میلی‌گرم در لیتر در فصل زمستان ثبت شد، ممکن است به دلیل کم بودن دما در این فصل باشد. کمترین مقدار DO در طول تابستان به دلیل کمبود بارندگی یا عدم بارش و افزایش دما مشاهده شد. همچنین دامنه تغییرات کلیات دامنه کلیات (۱۰±۱۰ تا ۱۷±۱۷ میلی‌گرم در لیتر) بود، این نشان می‌دهد که سطح کلیایی شرایط مناسبی است. و در همه سایت‌ها مقادیر آمونیاک در حد مجاز تعیین شده قرار دارد.

میلی‌گرم در لیتر در طول تابستان در سایت S1 به دلیل غلظت شوری کمتر مشاهده شد. اکسیژن محلول به دلیل تأثیر آن بر موجودات زنده یک پارامتر مهم در ارزیابی کیفیت آب می‌باشد (Ashar et al., 2020). آب طبیعی معمولاً حاوی مقداری گاز اکسیژن می‌باشد (Kang et al., 2019). اکسیژن در گوارا کردن آب و خوش‌طعم نمودن آن اهمیت زیادی دارد. زندگی حیوانات و گیاهان آبی به حداقل غلظت اکسیژن محلول در آب بستگی دارد. حلالیت اکسیژن با کاهش دما افزایش می‌یابد. مقادیر اکسیژن محلول ۶/۸ تا ۱۲/۲ میلی‌گرم در لیتر در طول تابستان و ۸/۵ تا

جدول ۵- غلظت پارامترهای کیفیت آب رودخانه هراز

| Sites | Temperature (°C) | | pH | | Salinity (ppt) | | Hardness (mg/L) | | DO (mg/L) | | Alkalinity (mg/L) | | Ammonia (mg/L) | |
|-----------|------------------|--------|---------|--------|----------------|--------|-----------------|--------|-----------|--------|-------------------|--------|----------------|--------|
| | تابستان | زمستان | تابستان | زمستان | تابستان | زمستان | تابستان | زمستان | تابستان | زمستان | تابستان | زمستان | تابستان | زمستان |
| S1 | ۲۱/۷ | ۱۶/۱ | ۷/۷ | ۸/۱ | ۱/۵ | ۳ | ۱۲ | ۱۷۰ | ۱۲/۲ | ۱۴ | ۱۰۰ | ۱۵۰ | ۰/۱ | ۰/۳ |
| S2 | ۲۱ | ۱۷/۵ | ۸/۷ | ۷/۵ | ۵ | ۷ | ۲۵۰ | ۳۴۰ | ۱۱ | ۱۳ | ۱۱۵ | ۱۴۵ | ۰/۳ | ۰/۴۵ |
| S3 | ۲۲/۱ | ۱۶/۹ | ۷/۹ | ۷/۶ | ۷/۴ | ۸/۱ | ۳۳۵ | ۶۰۰ | ۱۱/۲ | ۱۲/۸ | ۱۱۶ | ۱۴۰ | ۰/۱ | ۰/۲ |
| S4 | ۲۱/۹ | ۲۱ | ۷/۹ | ۷/۸ | ۷/۲ | ۸/۲ | ۳۶۵ | ۵۷۴ | ۱۰/۵ | ۱۱ | ۱۲۰ | ۱۵۰ | ۰/۱ | ۰/۳ |
| S5 | ۳۰/۲ | ۲۲ | ۸ | ۸/۲ | ۷/۶ | ۸/۹ | ۳۷۰ | ۶۶۰ | ۹/۶ | ۱۰/۶ | ۱۲۵ | ۱۵۵ | ۰/۱ | ۰/۲ |
| S6 | ۲۸/۷ | ۲۳/۸ | ۸ | ۸/۳ | ۸/۷ | ۹ | ۳۴۰ | ۵۸۵ | ۹ | ۱۱ | ۱۳۰ | ۱۷۰ | ۰/۲۵ | ۰/۴ |
| S7 | ۲۹/۲ | ۲۴ | ۸/۱ | ۸/۹ | ۸/۸ | ۹/۲ | ۴۷۰ | ۶۹۵ | ۸/۵ | ۱۲ | ۱۲۰ | ۱۴۵ | ۰/۱ | ۰/۳۲ |
| S8 | ۳۴/۹ | ۲۵/۳ | ۸/۲ | ۹/۱ | ۸/۸ | ۹/۳ | ۴۸۵ | ۷۰۵ | ۶/۵ | ۸/۵ | ۱۲۵ | ۱۷۵ | ۰/۲ | ۰/۲۵ |
| Average ± | ۲۶/۵ | ۲۲/۸ | ۷/۹۵ | ۲۳/۸ | ۶/۸ | ۷/۸۳ | ۳۲۸ | ۴۷۶ | ۹/۸۵ | ۱۱/۶۱ | ۱۱۸/۸ | ۱۵۳ | ۰/۱۵۶ | ۰/۲۸ |
| SD | ۱/۵± | ۱/۲± | ۰/۲۵± | ۰/۳۵± | ۰/۱۳± | ۰/۲۵± | ۵۵± | ۷۵± | ۱/۸± | ۲± | ۱۰± | ۱۳± | ۰/۰۸± | ۰/۱± |

بیشتر از تابستان (۳/۰۳ میکروگرم در لیتر) بود که تنها در سایت S8 در زمستان بیش از حد استاندارد WHO، ISIRI و TRV^۳ می‌باشد. همچنین میانگین غلظت سرب در آب در فصل تابستان و زمستان به ترتیب ۳/۹۶ و ۵/۳۷ میکروگرم در لیتر بود. که در سایت (S7 و S8) در زمستان بیش از حد استاندارد WHO و ISIRI (۱۰ میکروگرم در لیتر) بود. با توجه به مقادیر استاندارد WHO، ISIRI و سمیت (TRV) پیشنهاد شده توسط USEPA (۱۹۹۹)، تقریباً تمام فلزات سنگین از سایت ۶ از حد مجاز برای آب سالم فراتر رفته است. فلزات موجود در آب به صورت فصلی متغیر بوده، به صورتی که مقادیر فلزات در فصل زمستان بیشتر از تابستان نشان داده شده است. (Kumar et al., 2020).

غلظت فلزات سنگین در آب

نتایج غلظت فلزات سنگین در آب رودخانه هراز و استانداردهای کیفی آب در جدول (۶) نشان داده شده است. میانگین غلظت Cr آب در فصل تابستان و زمستان ۲/۵۵ و ۳/۹۲ میکروگرم در لیتر مشاهده شد که در سایت‌های (S7 و S8) به ترتیب از سطح استاندارد WHO^۱ و ISIRI^۲ بالاتر بود. میانگین غلظت Cd در فصل تابستان و زمستان به ترتیب ۱/۹۴ و ۲/۴۲ میکروگرم در لیتر مشاهده شد. جالب توجه است که بیشترین مقدار Cd در سایت S6 مشاهده شد (۷/۱ میکروگرم بر لیتر در طول زمستان) که ممکن است به دلیل کاربری شهری و صنعتی و همچنین تخلیه فاضلاب و پسماندهای خانگی در آب رودخانه باشد (Garba et al., 2018). متوسط غلظت As در زمستان (۳/۹۹ میکروگرم در لیتر)

جدول ۶- غلظت فلزات سنگین (میکروگرم در لیتر) در نمونه آب رودخانه هراز و حداکثر غلظت مجاز در آب (میکروگرم در لیتر).

| سایت | As | | Cr | | Cd | | Pb | |
|------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| | تابستان | زمستان | تابستان | زمستان | تابستان | زمستان | تابستان | زمستان |
| S1 | ۰/۰۸ | ۰/۸ | ۰/۰۱ | ۰/۰۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰۸ | ۰/۱ | ۰/۳ |
| S2 | ۰/۹ | ۱/۰۵ | ۰/۰۵ | ۰/۲ | ۰/۱ | ۰/۳ | ۰/۶ | ۰/۸ |
| S3 | ۰/۳ | ۱ | ۰/۵ | ۰/۸ | ۰/۹ | ۱ | ۱ | ۱/۵ |
| S4 | ۱/۵ | ۲/۸ | ۱/۵ | ۲/۲ | ۱/۴ | ۱/۸ | ۱/۶ | ۲/۳ |
| S5 | ۲/۲ | ۳/۳ | ۲/۶ | ۳/۴ | ۱/۵ | ۲ | ۴/۶ | ۷/۵ |
| S6 | ۵/۱ | ۵/۸۵ | ۳/۸ | ۵/۵ | ۵/۳ | ۷/۱ | ۶/۷ | ۸/۹ |
| S7 | ۵/۴ | ۶ | ۵/۲ | ۸/۶ | ۴/۲ | ۴/۴ | ۷/۸ | ۱۱ |
| S8 | ۸/۸ | ۱۱/۵ | ۶/۸ | ۹/۹ | ۲/۱ | ۲/۷ | ۹/۳ | ۱۰/۶۹ |

3. TRV (toxicity reference value) for fresh water proposed by USEPA (1999).

1. World Health Organization

2. Institute of Standards Industrial Research of Iran

| Average \pm SD | ۰/۲۵ \pm ۳/۰۳ | ۰/۵۲ \pm ۳/۹۹ | ۰/۵ \pm ۲/۵۵ | ۰/۳۹ \pm ۳/۹۲ | ۰/۲۵ \pm ۱/۹۴ | ۰/۶ \pm ۲/۴۲ | ۰/۷۵ \pm ۳/۶۹ | ۰/۷۷ \pm ۵/۳۷ |
|------------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| ISIRI | ۱۰ | | ۵ | | ۳ | | ۱۰ | |
| TRV | ۱۵۰ | | ۱۱ | | ۲ | | ۳ | |
| WHO (2011) | ۱۰ | | ۵ | | ۳ | | ۱۰ | |

غلظت فلزات سنگین در رسوبات

غلظت رسوبات فلزات سنگین در جدول (۷) ارائه شده است. غلظت کروم برای سایت S7 در تابستان و زمستان به ترتیب ۴۲/۲ و ۵۹/۶۵ میلی گرم در کیلوگرم می باشد اما در سایت S8 در تابستان و زمستان به ترتیب ۸۵/۸ و ۹۱/۹ میلی گرم در کیلوگرم می باشد که نشان دهنده تجمع پسماندهای شهری و صنعتی و همچنین می تواند ناشی از تخلیه مستقیم مواد زائد تصفیه نشده کودها باشد (Joksimović *et al.*, 2020). میانگین غلظت As در رسوبات در تابستان ۲/۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم و در زمستان ۵/۱۵ میلی گرم بر کیلوگرم مشاهده شد که مقادیر بالاتر از استاندارد ASV در سایت S8 می باشد که ممکن است به دلیل تجمع فعالیت های انسانی مانند تخلیه کودها و سموم دفع آفات نسبت داده شود (Eberechi, 2019). میانگین غلظت Cd در تابستان ۱/۰۲ میلی گرم بر کیلوگرم و در زمستان ۱/۰۳ میلی گرم در

کیلوگرم بود نشان داد که سطح تقریباً بالا از Cd در طول زمستان یافت شد که ممکن است به دلیل تفاوت در ظرفیت آب رودخانه باشد و همچنین می تواند به دلیل تخلیه فاضلاب واحدهای مرغداری اطراف رودخانه به داخل رودخانه باشد. فاضلاب مرغداری دارای ترکیبات فسفات بوده که بر میزان کادمیوم تاثیر گزار است (Deep *et al.*, 2020). میانگین غلظت سرب در فصل تابستان و زمستان ۶/۶۲ و ۹/۴۶ میلی گرم در کیلوگرم می باشد. که در سایت S8 مقادیر بالاتر از استاندارد ASV مشاهده شد و همچنین افزایش مقادیر سرب از سایت S6 می تواند به دلیل تأثیر از منابع نقطه ای و غیر نقطه ای مانند رواناب های شهری و رسوبات جوی، تولید مواد شیمیایی و الکترونیکی، کابل و روغن باشد. غلظت فلزات سنگین در رسوبات سایت S8 به دلیل اینکه در منطقه ساحلی رودخانه قرار دارند از مناطق دیگر مخصوصاً در زمستان که می تواند به تجمع فلزات در رسوبات کمک کند بیشتر از تابستان می باشد.

جدول ۷- غلظت فلزات سنگین (میلی گرم / کیلوگرم) در رسوبات رودخانه هراز

| سایت | As | | Cr | | Cd | | Pb | |
|---------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | تابستان | زمستان | تابستان | زمستان | تابستان | زمستان | تابستان | زمستان |
| S1 | ۰/۰۳۳ | ۰/۰۸ | ۱/۰۵ | ۴/۰۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۴ | ۰/۴ | ۰/۸ |
| S2 | ۰/۷ | ۰/۹۵ | ۶/۰۳ | ۸/۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰۶ | ۱/۱ | ۱/۹ |
| S3 | ۰/۸ | ۱/۱ | ۱۰/۳ | ۱۰/۹ | ۰/۰۶ | ۰/۸۰ | ۲ | ۲/۶ |
| S4 | ۱ | ۳/۸ | ۲۱/۱ | ۱۱/۷ | ۰/۰۷۵ | ۰/۲ | ۲/۶ | ۳/۶ |
| S5 | ۱/۲ | ۴/۳ | ۳۰/۱ | ۲۱/۴ | ۱/۴ | ۱/۱ | ۶/۳ | ۸/۵ |
| S6 | ۳/۵ | ۶/۵ | ۳۸/۵ | ۳۵/۵ | ۲/۳ | ۲/۵ | ۱۰/۵ | ۱۷/۹ |
| S7 | ۴/۴ | ۱۱ | ۴۲/۲ | ۵۹/۶ | ۲/۲ | ۱/۶ | ۱۴/۸ | ۱۹ |
| S8 | ۵/۸ | ۱۳/۵ | ۸۵/۸ | ۹۱/۹ | ۲ | ۲/۹ | ۱۵/۳ | ۲۱/۶ |
| Average \pm SD | ۰/۵ \pm ۲/۱۲ | ۰/۷۵ \pm ۱۵/۵ | ۶ \pm ۲۹/۹۱ | ۹ \pm ۳۲/۷۱ | ۰/۰۴ \pm ۱/۰۲ | ۰/۰۵ \pm ۱/۰۳ | ۰/۴۲ \pm ۶/۶۲ | ۰/۷۳ \pm ۹/۴۶ |
| average shale value | ۱۳ | | ۹۰ | | ۰/۳ | | ۲۰ | |

جدول ۸- همبستگی بین عناصر موجود در آب و رسوبات رودخانه هراز.

| | As | Cr | Cd | Pb |
|----------|--------|--------|-------|----|
| Water | | | | |
| As | 1 | | | |
| Cr | ۰/۳۶۸ | 1 | | |
| Cd | ۰/۳ | ۰/۱۹۸ | 1 | |
| Pb | -۰/۲۰۱ | ۰/۱۸۵ | ۰/۱۵۲ | 1 |
| Sediment | | | | |
| As | 1 | | | |
| Cr | -۰/۳۸۵ | 1 | | |
| Cd | ۰/۷۳۱ | -۰/۲۹۱ | 1 | |
| Pb | -۰/۰۵۱ | ۰/۳۱ | ۰/۰۹ | 1 |

سنگین رسوبات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت تا ارتباط بین

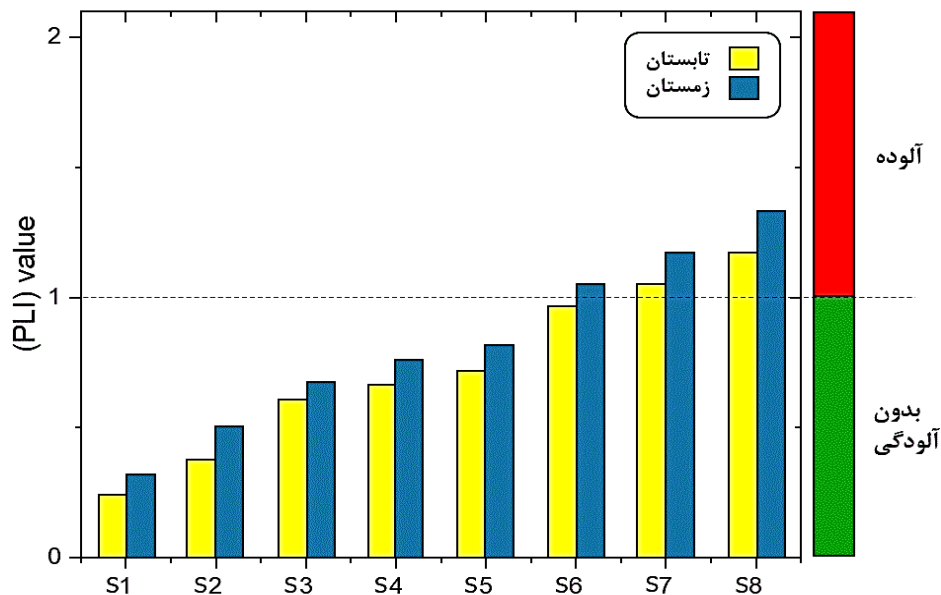
ماتریس همبستگی پیرسون (PC) برای پارامترهای فلزات

است. بر اساس شکل (۲) مقادیر PLI در ایستگاه‌های اول تا چهارم و نمونه تابستان ایستگاه ششم برابر با ($PLI < 1$) بوده که بیانگر این است که رسوبات بدون آلودگی بوده مقادیر PLI زمستان ایستگاه ۶ و ایستگاه‌های ۷ و ۸ برابر با ($PLI > 1$) بوده که بیانگر آلودگی رسوب رودخانه هراز می‌باشد. مقادیر عامل آلودگی (CF) فلزات در شکل (۳) نشان داده شد. مقادیر عامل آلودگی همه فلزات نشان‌دهنده میزان متوسط آلودگی ($1 \leq CF < 3$) می‌باشد در حالی که مقدار ($CF > 1$) در تابستان برای فلزات As و Pb مرتبه پایین آلودگی را نشان داد. مقادیر شاخص تجمیع زمین جغرافیایی (Igeo) فلزات سنگین مطالعه شده در شکل (۴) نشان داده شده است. مقادیر Igeo برای فلزات مطالعه شده نشان‌دهنده بدون آلودگی تا آلودگی متوسط می‌باشد.

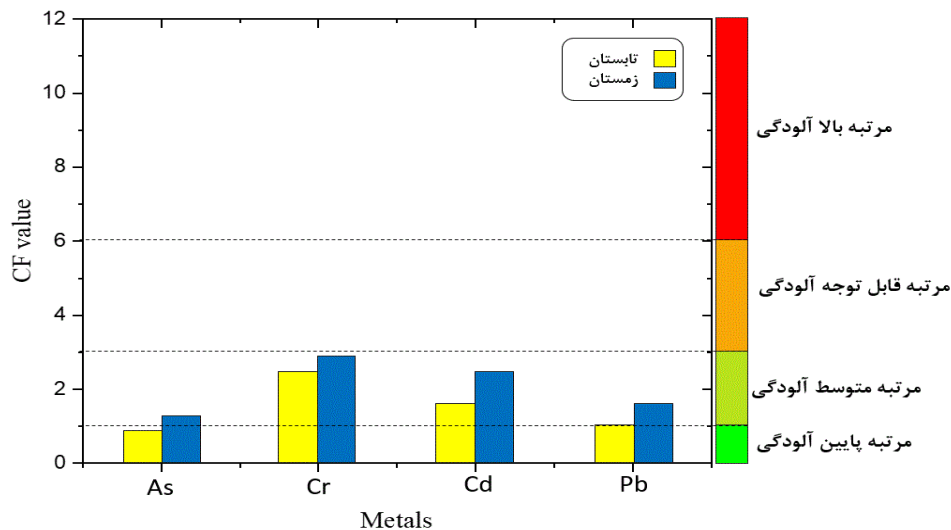
برخی از پارامترها مشخص شود و نتایج در جدول (۸) ارائه شده است. همبستگی مثبت حاکی از منابع مشابه ورودی (انسانی یا طبیعی) برای این دو فلز در آب رودخانه است (Fan et al., 2020). همبستگی زیاد بین فلزات سنگین خاص در آب ممکن است بیانگر سطح مشابهی از آلودگی و یا انتشار از همان منابع آلودگی، وابستگی متقابل و رفتار یکسان را در حین انتقال آن‌ها در سیستم رودخانه منعکس کند (Khalili et al., 2021a).

ارزیابی آلودگی فلزات

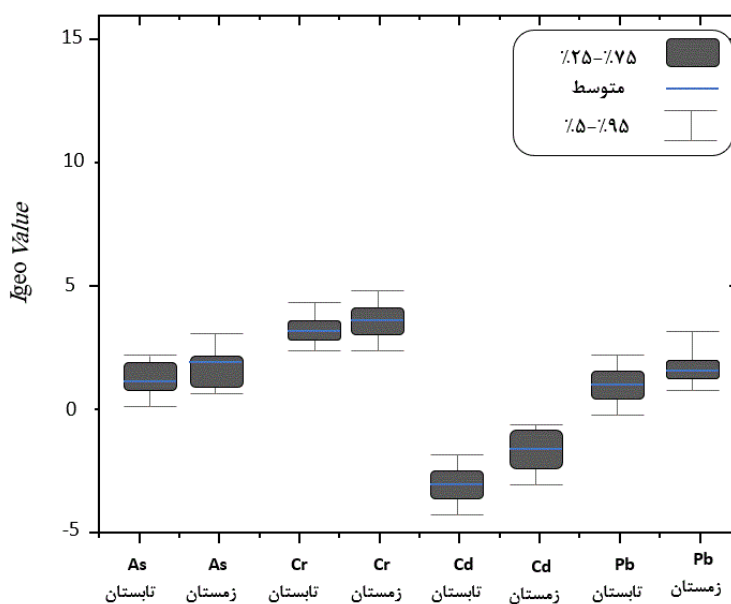
PLI علاوه بر تعیین مقدار آلودگی و کیفیت رسوب رودخانه می‌تواند اطلاعات اساسی را برای تصمیم‌گیری در خصوص وضعیت آلودگی منطقه مورد مطالعه ارائه کند. مقادیر محاسبه شده شاخص بار آلودگی فلزی PLI رسوبات در شکل (۲) ارائه شده



شکل ۲- مقدار شاخص بار آلودگی (PLI) مقدار فلزات سنگین در رسوبات رودخانه هراز



شکل ۳- ضریب آلودگی (CF) فلزات سنگین در رسوبات رودخانه هراز



شکل ۴- شاخص تجمع جغرافیایی (Igeo) فلزات سنگین در رسوبات رودخانه هراز

نتیجه گیری

مشاهده شده در فصل زمستان به طور قابل توجهی بیشتر از فصل تابستان بود. عامل آلودگی (CF)، شاخص بار آلودگی (PLI) و شاخص تجمع جغرافیایی (Igeo) در معرض آلودگی رسوبات به آلودگی فلزات سنگین قرار گرفت و برای بهبود شرایط هیدرولوژیکی از ورود پساب صنعتی و تخلیه فاضلاب خانگی به این رودخانه باید جلوگیری شود.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

در سال های اخیر آلودگی فلزات سنگین یک مشکل عمده در رودخانه ها مخصوصاً رودخانه هراز، آمل محسوب می شود. در مطالعه حاضر تجزیه تحلیل غلظت های فلزات سنگین Cr، As، Cd و Pb نشان داد غلظت آلودگی رسوبات رودخانه هراز در آستانه دریای خزر بیش تر از مقادیر ایمن بوده که بیانگر رودخانه هراز توسط فلزات سنگین بیان شده آلوده شده است و ممکن است اثر نامطلوبی بر این اکوسیستم رودخانه ایجاد کند. بار کلی آلودگی

REFERENCES

- Al-Dabbas, M. A., & Abdullah, M. A. (2020). Assessment of Soil Pollution in the Ishaqi Project Area-Salah Al-Dean Governorate, Iraq. *Iraqi Journal of Science*, 382–388.
- Ashar, Y. K., Susilawati, S., & Agustina, D. (2020). Analisis Kualitas (BOD, COD, DO) Air Sungai Pesangrahan Desa Rawadenok Kelurahan Rangkepan Jaya Baru Kecamatan Mas Kota Depok.
- Barbieri, M. (2016). The importance of enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (Igeo) to evaluate the soil contamination. *J Geol Geophys*, 5(1), 1–4.
- Cengiz, M. F., Kilic, S., Yalcin, F., Kilic, M., & Yalcin, M. G. (2017). Evaluation of heavy metal risk potential in Bogacayi River water (Antalya, Turkey). *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(6), 248.
- Deep, A., Gupta, V., Bisht, L., & Kumar, R. (2020). Application of WQI for water quality assessment of high-altitude snow-fed sacred Lake Hemkund, Garhwal Himalaya. *Sustainable Water Resources Management*, 6(5), 1–8.
- Eberechi, D. G. (2019). heavy metal contamination in selected dumpsites in warri, niger delta.
- Egbueri, J. C., Ezugwu, C. K., Ameh, P. D., Unigwe, C. O., & Ayejoto, D. A. (2020). Appraising drinking water quality in Ikem rural area (Nigeria) based on chemometrics and multiple indexical methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1–18.
- Fan, M., Xia, P., Chen, W., Wang, T., Du, X., & Lin, T. (2020). Metal (loid) accumulation levels in submerged macrophytes and epiphytic biofilms and correlations with metal (loid) levels in the surrounding water and sediments. *Science of The Total Environment*, 143878.
- Fang, Y., Zheng, T., Zheng, X., Peng, H., Wang, H., Xin, J., & Zhang, B. (2020). Assessment of the hydrodynamics role for groundwater quality using an integration of GIS, water quality index and multivariate statistical techniques. *Journal of Environmental Management*, 273, 111185.
- Feng, Y., Chenglin, L., & Bowen, W. (2019). Evaluation of heavy metal pollution in the sediment of Poyang Lake based on stochastic geo-

- accumulation model (SGM). *Science of the Total Environment*, 659, 1–6.
- Garba, S. T., Gudusu, M., & Inuwa, L. B. (2018). Accumulation Ability of the Native Grass Species, *Cyperus rotundus* for the Heavy Metals; Zinc (Zn), Cadmium (Cd), Nickel (Ni) and Lead (Pb). *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 1–15.
- Hoang, H.-G., Lin, C., Tran, H.-T., Chiang, C.-F., Bui, X.-T., Cheruiyot, N. K., ... Lee, C.-W. (2020). Heavy metal contamination trends in surface water and sediments of a river in a highly-industrialized region. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101043.
- Islam, A. R. M. T., Al Mamun, A., Rahman, M. M., & Zahid, A. (2020). Simultaneous comparison of modified-integrated water quality and entropy weighted indices: implication for safe drinking water in the coastal region of Bangladesh. *Ecological Indicators*, 113, 106229.
- Joksimović, D., Perošević, A., Castelli, A., Pestorić, B., Šuković, D., & Đurović, D. (2020). Assessment of heavy metal pollution in surface sediments of the Montenegrin coast: a 10-year review. *Journal of Soils and Sediments*, 20(6), 2598–2607.
- Kang, D., So, Y. H., Park, K., Kim, I., & Kim, B.-W. (2019). Analyses of TOC efficiency and correlation between DO, BOD, COD and influence factors using long-term observation data in the main stream of Nakdong River. *Journal of Environmental Science International*, 28(5), 465–474.
- Karimian, S., Chamani, A., & Shams, M. (2020). Evaluation of heavy metal pollution in the Zayandeh-Rud River as the only permanent river in the central plateau of Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(5).
- Khalili, R., Parvinnia, M., & Motaghi, H. (2020a). Evaluation of Bashar River water quality using CCME water quality index. *Journal of Environmental Science Studies*, 5(3), 2807–2814. (In Farsi)
- Khalili, R., Parvinnia, M., & Motaghi, H. (2021a). The effects of forecasted precipitation amount on probable maximum precipitation and probable maximum flood parameters. *Journal of Environmental Science Studies*, 5(4), 2982–2989. (In Farsi)
- Khalili, R., Ghaedi, M., Parvinnia, M., & Sabzehmeidani, M. M. (2021b). Simultaneous removal of binary mixture dyes using Mn - Fe layered double hydroxide coated chitosan fibers prepared by wet spinning. *Surfaces and Interfaces*, 100976.
- Khalili, R., Parvinnia, M., & Zali, A. (2020b). Water Quality Assessment of Garmarood River Using the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI), River Pollution Index (RPI) and Weighted Arithmetic Water Quality Index (WAWQI). *Environment and Water Engineering*, 6(3), 274–284. (In Farsi)
- Khan, R., Saxena, A., & Shukla, S. (2020). Evaluation of heavy metal pollution for River Gomti, in parts of Ganga Alluvial Plain, India. *SN Applied Sciences*, 2(8), 1–12.
- Kumar, V., Sharma, A., Kumar, R., Bhardwaj, R., Kumar Thukral, A., & Rodrigo-Comino, J. (2020). Assessment of heavy-metal pollution in three different Indian water bodies by combination of multivariate analysis and water pollution indices. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 26(1), 1–16.
- Li, Y., Chen, H., & Teng, Y. (2020). Source apportionment and source-oriented risk assessment of heavy metals in the sediments of an urban river-lake system. *Science of The Total Environment*, 737, 140310.
- Prasad, S., Saluja, R., Joshi, V., & Garg, J. K. (2020). Heavy metal pollution in surface water of the Upper Ganga River, India: human health risk assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(11), 1–15.
- Siddiqui, E., & Pandey, J. (2019). Assessment of heavy metal pollution in water and surface sediment and evaluation of ecological risks associated with sediment contamination in the Ganga River: a basin-scale study. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(11), 10926–10940.
- Tian, Y., Jiang, Y., Liu, Q., Dong, M., Xu, D., Liu, Y., & Xu, X. (2019). Using a water quality index to assess the water quality of the upper and middle streams of the Luanhe River, northern China. *Science of the Total Environment*, 667, 142–151.
- Ukah, B. U., Ameh, P. D., Egbueri, J. C., Unigwe, C. O., & Ubido, O. E. (2020). Impact of effluent-derived heavy metals on the groundwater quality in Ajao industrial area, Nigeria: an assessment using entropy water quality index (EWQI). *International Journal of Energy and Water Resources*, 1–14.
- Wu, H., Yang, W., Yao, R., Zhao, Y., Zhao, Y., Zhang, Y., ... Lin, A. (2020). Evaluating surface water quality using water quality index in Beiyun River, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(28), 35449–35458.
- Xiao, H., Shahab, A., Xi, B., Chang, Q., You, S., Li, J., ... Saddique, J. (2020). Heavy metal pollution, ecological risk, spatial distribution, and source identification in sediments of the Lijiang River, China. *Environmental Pollution*, 116189.
- Zhang, Z., Juying, L., Mamat, Z., & QingFu, Y. (2016). Sources identification and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediments of Bortala River, Northwest China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 126, 94–101.