



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

تعیین محتوی عناصر بالقوه سمی (آهن، سرب و مس) در رسوبات سطحی و اندام‌های گیاهان آبی بومی لویی (Typha Latifolia) و آب تره (Nasturtium microphyllum) رودخانه لار: ارزیابی قابلیت پایش و پالایش زیستی

فاطمه کاکویی دینکی^۱، مهرداد چراغی^{۱*}، بهاره لورستانی^۱، سهیل سبحان اردکانی^۱، عاطفه چمنی^۲

۱- گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران
۲- گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، مرکز تحقیقات پسماند و پساب، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

چکیده

زمینه و هدف: پایش و پالایش آلاینده‌های فلزی در بوم‌سازگان‌های آبی به‌منظور برآورد، کنترل و کاهش سطح تهدیدات برای زیست‌مندان و انسان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این‌رو، این پژوهش با هدف ارزیابی آلودگی رسوبات سطحی و قابلیت پایش و پالایش زیستی عناصر بالقوه سمی آهن، سرب و مس توسط اندام‌های هوایی و زمینی گونه‌های لویی (Typha Latifolia) و آب‌تره (Nasturtium microphyllum) مستقر در بوم‌سازگان آبی رودخانه لار در سال ۱۴۰۱ انجام یافت.

روش بررسی: در این مطالعه توصیفی، در مجموع ۴۸ نمونه گیاهی و ۱۲ نمونه رسوب از چهار مکان نمونه‌برداری منتخب برداشت شد. پس از آماده‌سازی و هضم اسیدی نمونه‌ها در آزمایشگاه، محتوی عناصر در آنها توسط روش طیف‌سنجی نوری پلاسما جفت‌شده القایی (ICP-OES) خوانده شد. همچنین، مقادیر شاخص‌های آلودگی (PI)، شاخص بار آلودگی (PLI)، فاکتور تغلیظ‌زیستی (BCF)، تجمع زیستی (BAF) و فاکتور انتقال (TF) محاسبه شدند. پردازش آماری نتایج نیز با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS انجام یافت.

یافته‌ها: بیشینه میانگین محتوی عناصر آهن، سرب و مس (mg/kg) در نمونه‌های رسوب به‌ترتیب برابر با ۱۱/۸±۰/۶۶۵، ۰/۹۱۵±۰/۰۳۰ و ۰/۷۱۰±۰/۰۲۶ و مربوط به مکان نمونه‌برداری چهار و در اندام‌های گیاهی نیز به‌ترتیب برابر با ۱۱/۴±۱/۲۵، ۰/۵۷۸±۰/۱۸۰ و ۰/۲۹۸±۰/۰۹۵ و مربوط به ریشه لویی بود. مقادیر شاخص PI نشان داد که آلودگی عناصر آهن، سرب و مس در رسوب "کم" و میانگین مقادیر آن از ترتیب نزولی سرب < مس < آهن تبعیت کرده است. میانگین مقادیر شاخص PLI نیز در دامنه ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۶ متغیر و بیان‌گر شرایط کیفی "فقدان آلودگی" در همه مکان‌های مورد مطالعه بود. از طرفی، گونه لویی دارای میانگین مقادیر BCF بزرگ‌تر از ۱ و TF کوچک‌تر از ۱ برای عنصر آهن بود.

نتیجه‌گیری: با استناد به میانگین محتوی عناصر در بافت‌های گیاهی و همچنین میانگین مقادیر محاسبه شده شاخص‌های BCF، BAF و TF برای عناصر می‌توان اذعان کرد که لویی، گونه‌ای مناسب برای تثبیت فلز آهن در رسوب است و به‌عنوان گونه بومی کارآمد برای پایش و پالایش زیستی عناصر بالقوه سمی به‌ویژه آهن در بوم‌سازگان‌های آبی آلوده قابل معرفی است.

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۳۱
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۶
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵

واژگان کلیدی: فلزات سنگین، رسوب، گیاه آبی، گیاه پالایی، رودخانه لار

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
cheraghi@iauh.ac.ir

Please cite this article as: Kakouei Dinaki F, Cheraghi M, Lorestani B, Sobhanardakani S, Chamani A. Toxic elements (Fe, Pb, and Cu) contents in surface sediments and native aquatic plants (Typha Latifolia and Nasturtium microphyllum) tissues of Lar river: evaluation of biomonitoring and bioremediation capability. Iranian Journal of Health and Environment. 2023;16(3):413-32.

مقدمه

رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از اجزای حیاتی بوم‌سازگان‌های (Ecosystems) آب شیرین و منابع مهم آب آشامیدنی، به‌سبب پویایی زیاد و نقش مهم در ثبات بوم‌شناختی، اجتماعی و اقتصادی، یکی از حساس‌ترین و آسیب‌پذیرترین جریان‌های سطحی محسوب می‌شوند که به‌شدت تحت تاثیر فشارهای گسترده ناشی از فعالیت‌های انسانی قرار دارند (۱-۳). در میان طیف وسیعی از آلاینده‌های سمی و خطرناک، فلزات سنگین به‌دلیل پایداری و سمیت زیاد، نیمه عمر زیستی طولانی و قابلیت تجمع و انباشت زیستی تهدیدی بالقوه برای بوم‌سازگان‌های آبی و چالش و نگرانی مهم و مشترک محیط‌زیستی، اقتصادی و بهداشت عمومی در سراسر جهان به‌شمار می‌آیند (۴-۶). اگرچه، این آلاینده‌ها به‌طور عمده از منابع طبیعی (زمین‌شناختی) نشأت می‌گیرند، اما فعالیت‌های انسانی (مانند تخلیه رواناب سطحی یا زهاب کشاورزی به محیط، انتشارات صنعتی و حمل‌ونقل) منجر به افزایش غلظت آنها در بوم‌سازگان‌های آبی شده است. آهن به‌سبب توزیع گسترده در طبیعت و مس و سرب به‌دلیل سمیت، به‌لحاظ بوم‌شناختی و زیستی حائز اهمیت ویژه‌ای هستند. اگرچه، آهن و مس به‌عنوان عناصر ضروری شناخته می‌شوند، اما قرار گرفتن در معرض غلظت‌های بیش‌تر از حد مجاز آنها می‌تواند خطر ابتلا به بیماری‌های گوارشی، کلیوی و پوستی را افزایش دهد (۷-۱۰). سرب نیز به‌عنوان عنصر غیرضروری، نوروٹوکسین قدرتمندی است که قرار گرفتن انسان در معرض آن، حتی در مقادیر بسیار کم، می‌تواند به ابتلا به فشار خون، ناهنجاری‌های کروموزومی، سرطان، آسیب و اختلال عملکرد کلیه منجر شود (۱۱، ۱۲).

رسوب به‌عنوان مخلوطی از مواد معدنی و آلی، بخش مهم بوم‌شناختی زیستگاه‌های آبی و منبع و مخزن فلزات سنگین، از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر ذخیره‌سازی و تعلیق مجدد عناصر فلزی در محیط آبی محسوب می‌شود (۱۳-۱۵). اگر چه، بیش از ۹۰ درصد یون‌های فلزی پس از ورود به بدنه آبی

به‌راحتی روی سطح ذرات معلق جذب و در نهایت در رسوبات ذخیره می‌شوند (۱۶، ۱۷) اما، تغییر شرایط محیطی (کاهش pH، تخریب مواد آلی و غیره) در مرز مشترک آب و رسوب می‌تواند منجر به رهاسازی فلزات در آب و ایجاد آلودگی ثانویه شود (۱۸). در این خصوص، عناصر فلزی موجود در محیط آبی نه‌تنها می‌توانند به‌طور مستقیم و به‌واسطه کاهش کیفیت آب یا رسوب، سلامت زیست‌مندان (Living Organisms) را تهدید کنند، بلکه می‌توانند به افزایش جذب بالقوه فلزات توسط گیاهان منجر شده و به‌طور بالقوه تهدیدی مضر و غیرمستقیم برای حیوانات و انسان از طریق زنجیره غذایی محسوب شوند (۱۹، ۲۰). بنابراین، تعیین مقدار این آلاینده‌ها در رسوبات، به‌عنوان شاخص مهم سطوح آلودگی محیط آبی، برای حفظ سلامت بوم‌سازگان و زیست‌مندان در سال‌های اخیر توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است (۲۱). در این راستا، شاخص‌های آلودگی شامل شاخص آلودگی (IP) و شاخص بار آلودگی (PLI) به‌طور گسترده‌ای در تعیین سطح آلودگی رسوب ناشی از عناصر فلزی استفاده شده است (۲۲-۲۵). با این حال، استفاده بالقوه از موجودات زنده به‌عنوان یک گزینه موثر، اقتصادی و پایدار برای تخمین، کنترل و کاهش توزیع و میزان آلاینده‌های فلزی در محیط‌های آبی در چند دهه گذشته مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است (۱۹، ۲۶). در میان طیف متنوع گونه‌های آبی، گیاهان آبی به‌عنوان اعضای دائمی بوم‌سازگان‌های آبی به‌طور گسترده به‌عنوان شاخص‌های زیستی مفید، مناسب و مطلوب در بررسی بوم‌شناختی و ارزیابی کیفیت آب و رسوبات مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۱۷، ۲۷-۲۹). گیاهان آبی علاوه بر این‌که عامل تولید اکسیژن هستند، نقش مهمی در چرخه و انباشت مواد مغذی و ایجاد زیستگاه برای آبزیان ایفا می‌کنند. در این خصوص، گونه‌های گیاهی بومی و مقاوم با سرعت رشد و زیست‌توده (Biomass) زیاد و سازگار با شرایط مختلف محیطی، گزینه‌هایی مناسب برای پایش زیستی (Biomonitoring) و زیست‌پالایی (Bioremediation) آلاینده‌های فلزی محسوب می‌شوند

هدف تعیین محتوی عناصر بالقوه سمی آهن، سرب و مس در رسوبات سطحی و گیاهان آبی بومی (لویی و آب تره) رودخانه لار و ارزیابی قابلیت پایش زیستی و زیست‌پالایی این گونه‌ها در سال ۱۴۰۱ انجام یافت.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز لار در قسمت شمال شرق شهر تهران و بین مدارهای ۳۶' ۴۰° تا ۳۵' ۴۸° عرض جغرافیایی شمالی و ۵۱' ۳۲° تا ۵۲' ۴۱° طول جغرافیایی شرقی واقع شده است. رود لار به‌عنوان یکی از مهم‌ترین رودهای این حوضه در ۵۰ کیلومتری شمال شرق تهران با جهت شمال غربی - جنوب شرقی، منبع اصلی تامین آب سد لار و یکی از مهم‌ترین منابع آبیاری محصولات کشاورزی استان تهران محسوب می‌شود. این محدوده از دو اقلیم ارتفاعات فوقانی و مرطوب و سرد تشکیل شده است که بارش زیادی را به‌صورت برف ایجاد می‌کند. میانگین بارش سالانه در این حوضه ۵۵۳ mm و محدوده دمایی این منطقه از ۳۱ °C در فصل تابستان تا ۳۷ °C - در فصل زمستان متغیر است (۳۹).

نمونه‌برداری از رسوب و گیاه

در این پژوهش توصیفی-مقطعی، پس از انجام مطالعه‌های کتابخانه‌ای و بررسی‌های اولیه میدانی و به‌منظور تعیین محتوی عناصر بالقوه سمی در رسوب سطحی و ارزیابی قابلیت برخی گونه‌های آبی بومی غالب به‌عنوان پایش‌گر زیستی عناصر با استفاده از رابطه تعیین حجم نمونه کوکران ($N=Z^2S^2/D^2$) و لحاظ کردن منابع مالی در اختیار، نسبت به نمونه‌برداری از رسوب سطحی (۰ تا ۲۰ cm) و دو گونه گیاه آبی شامل لویی و آب تره (به‌عنوان گونه‌های غالب با پراکنش گسترده در منطقه مطالعاتی) از چهار مکان (ایستگاه) از بالادست تا پایین‌دست رودخانه لار در اواخر شهریورماه سال ۱۴۰۱ اقدام شد. به‌منظور ایجاد شرایط یکنواخت و کاهش عوامل مداخله‌گر احتمالی، نمونه‌برداری (رسوب و گیاه) در یک روز کاری

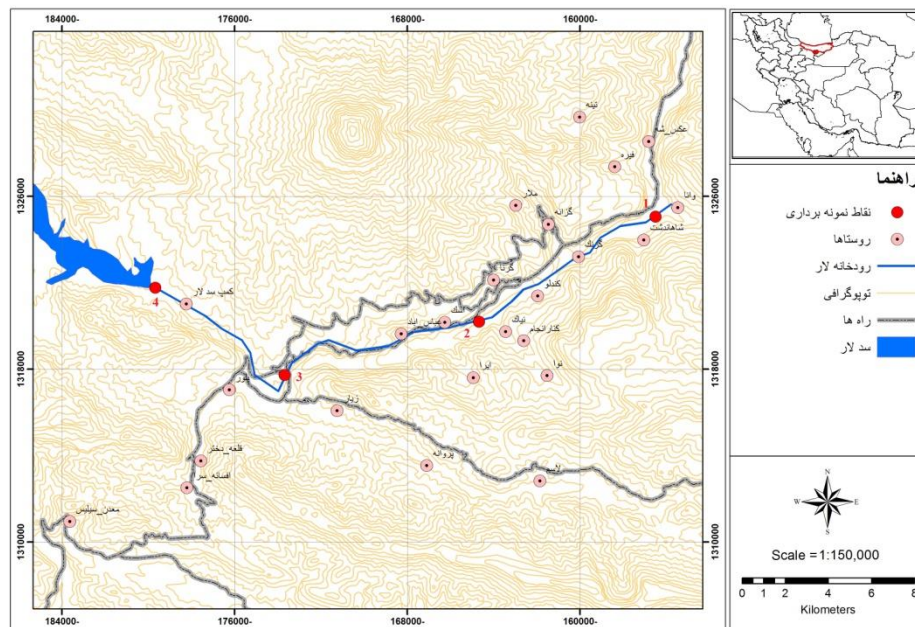
(۲۶، ۲۹، ۳۰).

لویی (*T. Latifolia*) از خانواده لوئیان (Typhaceae) و آب تره (*N. microphyllum*) از خانواده شب‌بوئیان (Cruciferae) از جمله پوشش‌های گیاهی چندساله و نوظهور در مناطق آبی، به‌سبب سازگاری با شرایط مختلف محیطی، رشد سریع، زیست‌توده به‌نسبت زیاد و پراکنش گسترده در بوم‌سازگان‌های مختلف آبی مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و تالاب‌ها در سراسر جهان، می‌توانند به‌عنوان نشانگرهای زیستی مناسب در نظر گرفته شوند (۳۱-۳۳).

علی‌رغم آن‌که تاکنون چندین مطالعه در رابطه با پایش و پالایش زیستی فلزات سنگین در محیط‌های آبی توسط گیاهان انجام یافته و برخی از گیاهان آبی از جمله نی (*Stuckenia filiformis* L.) (۳۴)، لویی (*Typha domingensis* L.) (۳۵)، گزنه (*Urtica dioica* L.) (۳۶)، علف‌شاخی (*Ceratophyllum demersum* L.) (۳۷)، پرطاووسی سنبله‌ای (*Myriophyllum spicatum* L.) (۱۷) و سنبل آبی (*Eichhornia crassipes* L.) (۳۸)، به‌عنوان پایش‌گر و پالاینده بالقوه عناصر فلزی مرتبط با رسوب معرفی شده‌اند، اما مشکل آلاینده‌های فلزی مرتبط با بدنه‌های آبی به‌ویژه بوم‌سازگان‌های آب شیرین (مانند رودخانه‌ها، نهرها و دریاچه‌ها) همچنان پیچیده و نیازمند ارزیابی است (۲۶، ۳۲). بنابراین، نظر به نگرانی‌ها و مخاطرات محیط‌زیستی و بهداشتی مرتبط با آلاینده‌های فلزی در بوم‌سازگان‌های آب شیرین و ضرورت پایش و پالایش آلودگی عناصر بالقوه سمی از یک‌سو و از طرفی، مطالعات بسیار محدود در خصوص قابلیت پایش و پالایش زیستی فلزات سنگین توسط گیاهان آبی در حال رشد در محیط‌های آبی ایران و با توجه به این‌که رودخانه لار به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شرب و آبیاری محصولات کشاورزی استان تهران به‌سبب توسعه شهری و کشاورزی در امتداد رودخانه در معرض آلودگی‌های محیطی به‌ویژه آلودگی به عناصر بالقوه سمی قرار دارد، این پژوهش با

منتقل شدند (۳۲). همچنین، به منظور تهیه نمونه همگن از ریشه و شاخساره در هر مکان، از هر گونه ۱۰ پایه (با شرایط مشابه رویشی و سلامتی) برداشت و به تفکیک گونه با یکدیگر مخلوط و به پاکت‌های پلی اتیلنی با برجسب معین منتقل شدند (۲۶، ۳۲). بدین صورت، در مجموع ۱۲ نمونه رسوب سطحی و ۴۸ نمونه گیاهی جمع‌آوری شد. موقعیت جغرافیایی مکان‌های نمونه‌برداری توسط دستگاه GPS گارمین مدل ETRE 32X ثبت شد که موقعیت استقرار آنها در شکل ۱ آورده شده است.

با سه تکرار انجام شد. نمونه‌های رسوب سطحی (۰ تا ۲۰ cm) با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی جمع‌آوری شدند. بدین صورت که در هر مکان، پنج نمونه رسوب از اعماق ۰/۰ تا ۲۰/۰ cm (با وزن تقریبی ۱/۰ kg) توسط نمونه‌بردار رسوب Van Veen برداشت و برای تهیه یک نمونه همگن از هر مکان، نمونه‌های جمع‌آوری شده با یکدیگر مخلوط و در کیسه‌های پلی اتیلنی زیپ‌دار ذخیره شده و پس از برجسب‌گذاری، برای آنالیز دستگاهی به آزمایشگاه



شکل ۱- موقعیت استقرار مکان‌های نمونه‌برداری

گیاهی نیز در آزمایشگاه، پس از جدا کردن شاخسارها (اندام‌های هوایی) و ریشه‌ها (اندام‌های زیرزمینی)، به منظور زدودن و حذف آلاینده‌های سطحی، ابتدا با آب شرب و سپس با آب دوبار تقطیر شسته شدند. نمونه‌های گیاهی تا زمان خشک

آماده‌سازی و تعیین محتوی عناصر در نمونه‌های رسوب و گیاه در آزمایشگاه، نمونه‌های رسوب به مدت ۷۲ h در آون با دمای ۸۰ °C خشک شدند. سپس، برای حذف ذرات بزرگ و بقایای آلی، نمونه‌ها از الک ۲۰۰ عبور داده شدند (۳۲). نمونه‌های

شدن کامل (در حدود ۴۸ h) در آون با دمای °C ۶۰ قرار گرفتند. در نهایت، پس از پودر کردن نمونه‌های خشک گیاهی توسط آسیاب برقی و انتقال آن‌ها به کیسه‌های پلی‌اتیلنی، نمونه‌ها در دمای °C ۴ در یخچال نگهداری شدند. همچنین، از روش هضم تر برای عصاره‌گیری نمونه‌های رسوب سطحی و گیاه استفاده شد. بدین منظور، ۲/۵۰ g از هر نمونه رسوب را به‌طور مجزا به بشر ۵۰ mL منتقل کرده و پس از افزودن ۱۰ mL اسید نیتريك و اسید کلریدريك (محلول ۱:۳) به هر بشر، محلول حاصل به مدت ۱ h روی هیتر در دمای °C ۹۵ قرار داده شد. پس از خنک شدن محلول‌ها در دمای اتاق، عصاره حاصل با کاغذ صافی واتمن شماره ۴۰ صاف و با آب دوبار تقطیر به حجم ۵۰ mL رسانده شد (۲۶). از طرفی، ۱/۰ g از هر نمونه گیاهی پودر شده، را به‌طور مجزا به بشر ۵۰ mL منتقل کرده و پس از افزودن ۱۰ mL اسید نیتريك غلیظ به هر بشر، محلول حاصل روی هیتر قرار داده شد. پس از افزایش دما تا °C ۹۵، به مدت ۳۰ تا ۴۵ min عمل بازروانی (Reflux) انجام شد. نمونه‌ها پس از تغییر رنگ از روی هیتر برداشته و سرد شدند. سپس، ۴ mL پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد را به نمونه‌ها افزوده و محلول حاصل به مدت ۳۰ min مجدداً رفلکس و روی هیتر با دمای °C ۹۵ حرارت داده شد. عصاره حاصل با کاغذ صافی واتمن شماره ۴۰ صاف و با آب دوبار تقطیر به حجم ۵۰ mL رسانده شد (۲۶). در نهایت، پس از ساخت محلول مادر (استوک) و استاندارد نمک عناصر و کالیبره کردن دستگاه ICP-OES مدل 710-ES ساخت شرکت Varian استرالیا، محتوی عناصر آهن، سرب و مس به‌ترتیب در طول موج‌های ۲۵۸/۵۸۸، ۲۲۰/۳۵۳ و ۳۲۴/۷۵۴ nm خوانده شدند. مقادیر حد تشخیص برای عناصر آهن، سرب و مس به‌ترتیب برابر با ۰/۱۷۰، ۰/۳۸۱ و ۰/۲۹۰ mg/kg حاصل شدند. مقادیر محدودیت کمی عناصر

(mg/kg) نیز برای آهن برابر با ۰/۵۳۰، برای سرب برابر با ۱/۱۰ و برای مس برابر با ۰/۸۹۰ به‌دست آمدند. نرخ بازیابی عناصر (درصد) مورد مطالعه نیز از ۹۱/۶ تا ۱۰۳/۲ متغیر و نشان‌دهنده آن بود که روش مورد استفاده برای تعیین محتوی عناصر مورد مطالعه از اطمینان کافی و دقت مناسب برخوردار بوده است.

محاسبه شاخص آلودگی (PI)، شاخص بار آلودگی (PLI)، فاکتور تغلیظ‌زیستی (BCF)، تجمع زیستی (BAF) و فاکتور انتقال (TF) در این پژوهش، برای ارزیابی سطح آلودگی فلزات سنگین مورد مطالعه و در نتیجه طبقه‌بندی آلودگی عمومی نمونه‌های رسوب شاخص‌های PI و PLI به‌ترتیب با استفاده از معادلات ۱ و ۲ محاسبه شدند (۴۰، ۴۱):

$$PI = \frac{C_{\text{sample}}}{C_{\text{background}}} \quad (1)$$

در معادله ۱: C_p و C_b به‌ترتیب نشان‌دهنده محتوی عنصر مورد مطالعه در نمونه رسوب و غلظت عنصر در پوسته زمین (برابر با ۴۷۲۰۰، ۳۴/۲ و ۲۸/۳ به‌ترتیب برای عناصر آهن، سرب و مس) بر حسب mg/kg است (۴۲، ۴۳). سطوح آلودگی و تفسیر آنها بر اساس مقادیر PI در جدول ۱ آورده شده است (۴۴، ۱۷).

$$PLI = \sqrt[n]{PI_1 \times PI_2 \times PI_3 \times \dots \times PI_n} \quad (2)$$

در معادله ۲: PLI بیان‌گر شاخص بار آلودگی و PI_i نیز نشان‌دهنده شاخص آلودگی هر یک از عناصر مورد مطالعه است. طبقه‌بندی و تفسیر مقادیر شاخص PLI در جدول ۱ آورده شده است (۴۴، ۱۷).

جدول ۱- طبقه‌بندی مقادیر شاخص آلودگی (PI) و شاخص بار آلودگی (PLI)

شاخص آلودگی		شاخص بار آلودگی	
مقدار (ارزش)	طبقه توصیفی	مقدار (ارزش)	طبقه توصیفی
PI < ۱	آلودگی کم	PLI < ۱	بدون آلودگی
۱ ≤ PI < ۳	آلودگی متوسط	PLI ≥ ۱	آلوده
۳ ≤ PI < ۶	آلودگی زیاد		
PI ≥ ۶	آلودگی خیلی زیاد		

$$TF = \frac{C_{shoot}}{C_{root}} \quad (۵)$$

در معادله ۵: C_{shoot} نشان‌دهنده محتوی فلز در شاخساره و C_{root} بیانگر محتوی فلز در ریشه گیاه هر دو بر حسب mg/kg است.

پردازش آماری داده‌ها

پردازش آماری داده‌ها با استفاده از نسخه ۱۹ بسته نرم‌افزار آماری برای علوم اجتماعی (Statistical Package for the Social Sciences: SPSS) انجام یافت. بدین صورت که فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها توسط آزمون شاپیرو-ویلک (Shapiro-Wilk) و فرض برابری واریانس‌ها نیز توسط آزمون لون (Levene Test) بررسی شدند. به منظور مقایسه میانگین محتوی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های رسوب و گیاه بین مکان‌های نمونه‌برداری از آزمون تحلیل واریانس بین آزمودنی یک‌طرفه (One-way ANOVA) و آزمون چند دامنه‌ای دانکن (Duncan Multiple Range Test) در سطح معنی‌داری

در این پژوهش، شاخص‌های تغلیظ‌زیستی (BCF)، تجمع‌زیستی (BAF) و فاکتور انتقال (TF) به منظور ارزیابی قابلیت گیاهان مورد بررسی در پایش و پالایش فلزات سنگین به ترتیب با استفاده از معادلات ۳ تا ۵ محاسبه شدند (۲۸، ۳۰، ۴۵):

$$BCF = \frac{C_{root}}{C_{sediment}} \quad (۳)$$

در معادله ۳: C_{root} و $C_{sediment}$ به ترتیب نشان‌دهنده محتوی فلز در ریشه گیاه و رسوب هر دو بر حسب mg/kg است.

$$BAF = \frac{C_{aerial\ tissues}}{C_{sediment}} \quad (۴)$$

در معادله ۴: C_{shoot} و $C_{sediment}$ به ترتیب نشان‌دهنده محتوی فلز در شاخساره گیاه (اندام هوایی) و رسوب هر دو بر حسب mg/kg است.

نمونه‌های رسوب سطحی و گونه‌های گیاهی به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آورده شده‌اند. نتایج مندرج در جدول ۲ بیان‌گر آن است که میانگین محتوی عناصر آهن، سرب و مس به ترتیب برابر با ۱۰/۳، ۰/۶۷۶ و ۰/۵۲۵ mg/kg بوده است. از طرفی، بیشینه میانگین محتوی عناصر آهن، سرب و مس (mg/kg) در نمونه‌های رسوب به ترتیب با ۱۱/۸، ۰/۹۱۵ و ۰/۷۱۰ مربوط به نمونه‌های جمع‌آوری شده از مکان نمونه‌برداری چهار بود. میانگین محتوی عناصر در نمونه‌ها از روند نزولی آهن < سرب < مس تبعیت کرد.

پنج درصد و برای بررسی وجود یا عدم وجود اختلاف معنی‌دار آماری میانگین محتوی فلزات سنگین بین نمونه‌های رسوب و مقادیر استاندارد از آزمون تی تک نمونه‌ای (One Sample T-Test) استفاده شد.

یافته‌ها

آمار توصیفی مربوط به تعیین مقادیر فلزات سنگین در نمونه‌های رسوب و گیاه
آمار توصیفی مربوط به محتوی عناصر مورد ارزیابی در

جدول ۲- آمار توصیفی محتوی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های رسوب سطحی رودخانه جاجرود (mg/kg)

میانگین	مکان				عناصر
	۴	۳	۲	۱	
۱۰/۳±۱/۲۲	۱۱/۸±۰/۶۶۵ ^a	۱۰/۸±۰/۴۵۸ ^b	۹/۷۱±۰/۴۰۰ ^c	۸/۸۶±۰/۲۸۶ ^c	آهن
۰/۶۷۶±۰/۲۲۴	۰/۹۱۵±۰/۰۳۰ ^a	۰/۸۴۳±۰/۰۸۷ ^a	۰/۵۳۹±۰/۰۲۳ ^b	۰/۴۰۵±۰/۰۳۳ ^c	سرب
۰/۵۲۵±۰/۱۸۹	۰/۷۱۰±۰/۰۲۶ ^a	۰/۶۸۳±۰/۰۴۱ ^a	۰/۴۲۲±۰/۰۲۸ ^b	۰/۲۸۴±۰/۰۳۳ ^c	مس

حروف غیر مشترک (a, b, c و ...) در هر ردیف، بیان‌گر وجود تفاوت معنی‌دار آماری ($p < 0.05$) میانگین محتوی عناصر آهن، سرب و مس در نمونه‌های رسوب بر اساس نتایج آزمون تعقیبی چند دامنه‌ای دانکن است.

برابر با ۱۱/۴، ۰/۵۷۸ و ۰/۲۹۸ mg/kg در ریشه لویی تجمع یافته بود. همچنین، بیشینه میانگین محتوی عناصر آهن، سرب و مس (mg/kg) در نمونه‌های گیاهی به ترتیب با ۹/۸۹، ۰/۵۱۱ و ۰/۲۴۶ مربوط به نمونه‌های جمع‌آوری شده از مکان ۴ بود.

با استناد به نتایج مندرج در جدول ۳، غلظت عناصر آهن، سرب و مس در اندام‌های گیاهی به ترتیب در دامنه ۲/۸۸-۱۲/۸ mg/kg، ۰/۷۴۷-۰/۰۷۷ و ۰/۳۹۸-۰/۰۳۵ mg/kg بود. از طرفی، بیشینه میانگین محتوی عناصر آهن، سرب و مس در اندام‌های گیاهی به ترتیب

جدول ۳- آمار توصیفی محتوی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های گیاهی (mg/kg)

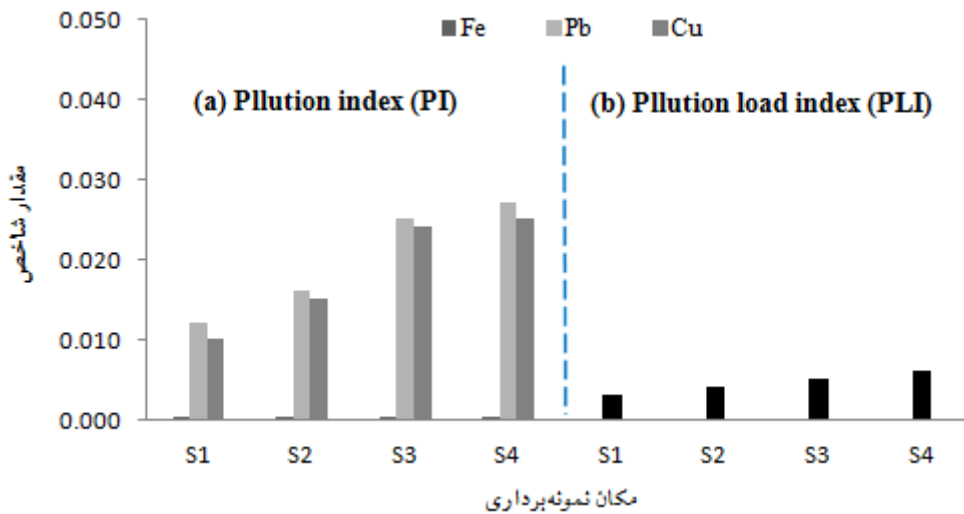
عناصر	مکان نمونه برداری	اندام‌های گیاهی				
		آب تره		لویی		
		ریشه	شاخسار	ریشه	شاخسار	
آهن	۱	۵/۸۵±۲/۶۸ ^C	۴/۷۹±۰/۳۹۳ ^C	۲/۸۸±۰/۲۲۶ ^D	۹/۸۸±۰/۲۸۹ ^C	۵/۸۴±۰/۲۷۵ ^D
	۲	۶/۶۵±۲/۸۴ ^{BC}	۵/۲۷±۰/۳۲۱ ^C	۳/۴۴±۰/۲۱۷ ^C	۱۰/۸±۰/۴۷۳ ^B	۷/۱۱±۰/۱۴۹ ^C
	۳	۸/۴۵±۲/۷۶ ^{AB}	۷/۳۴±۰/۲۵۵ ^B	۴/۹۶±۰/۲۱۰ ^B	۱۲/۱±۰/۴۰۴ ^A	۹/۳۵±۰/۲۲۵ ^B
	۴	۹/۸۹±۲/۵۹ ^A	۱۰/۳±۰/۳۶۱ ^A	۶/۰۲±۰/۲۰۱ ^A	۱۲/۸±۰/۵۵۷ ^A	۱۰/۴±۰/۷۹۷ ^A
	میانگین	۷/۷۱±۳/۰۸	۶/۹۴±۲/۲۹ ^b	۴/۳۳±۱/۳۱ ^c	۱۱/۴±۱/۲۵ ^a	۸/۱۸±۱/۹۲ ^b
سرب	۱	۰/۱۸۸±۰/۱۱۳ ^B	۰/۱۱۰±۰/۰۱۷ ^D	۰/۰۷۷±۰/۰۱۵ ^D	۰/۳۴۱±۰/۰۷۲ ^C	۰/۲۲۶±۰/۰۱۴ ^D
	۲	۰/۲۷۵±۰/۱۶۸ ^B	۰/۱۵۱±۰/۰۲۱ ^C	۰/۱۱۶±۰/۰۱۱ ^C	۰/۵۱۵±۰/۰۶۶ ^B	۰/۳۱۷±۰/۰۱۰ ^C
	۳	۰/۴۵۲±۰/۱۹۴ ^A	۰/۳۶۹±۰/۰۲۲ ^B	۰/۲۱۹±۰/۰۱۷ ^B	۰/۷۰۹±۰/۰۹۶ ^A	۰/۵۱۱±۰/۰۱۳ ^B
	۴	۰/۵۱۱±۰/۱۸۴ ^A	۰/۴۳۵±۰/۰۲۲ ^A	۰/۲۷۵±۰/۰۱۴ ^A	۰/۷۴۷±۰/۰۳۸ ^A	۰/۵۸۷±۰/۰۱۶ ^A
	میانگین	۰/۳۵۷±۰/۲۰۹	۰/۲۶۶±۰/۱۴۶ ^c	۰/۱۷۲±۰/۰۸۳ ^c	۰/۵۷۸±۰/۱۸۰ ^a	۰/۴۱۰±۰/۱۵۲ ^b
مس	۱	۰/۰۹۱±۰/۰۵۵ ^C	۰/۰۵۲±۰/۰۱۳ ^C	۰/۰۳۵±۰/۰۱۱ ^C	۰/۱۶۵±۰/۰۰۸ ^D	۰/۱۱۲±۰/۰۱۵ ^D
	۲	۰/۱۵۸±۰/۰۲۳ ^{BC}	۰/۱۰۵±۰/۰۱۲ ^B	۰/۰۷۱±۰/۰۱۱ ^B	۰/۲۶۴±۰/۰۱۰ ^C	۰/۱۹۲±۰/۰۰۹ ^C
	۳	۰/۲۱۴±۰/۱۱۲ ^{AB}	۰/۱۱۹±۰/۰۱۶ ^{AB}	۰/۰۹۶±۰/۰۰۸ ^A	۰/۳۶۵±۰/۰۰۸ ^B	۰/۲۷۷±۰/۰۰۹ ^B
	۴	۰/۲۴۶±۰/۱۲۷ ^A	۰/۱۴۵±۰/۰۱۹ ^A	۰/۱۱۰±۰/۰۱۷ ^A	۰/۳۹۸±۰/۰۰۹ ^A	۰/۳۳۲±۰/۰۱۴ ^A
	میانگین	۰/۱۷۷±۰/۱۱۳	۰/۱۰۵±۰/۰۳۸ ^c	۰/۰۷۸±۰/۰۳۲ ^c	۰/۲۹۸±۰/۰۹۵ ^a	۰/۲۲۸±۰/۰۸۸ ^b

مقادیر مشخص شده با حروف کوچک غیر مشترک (a, b, c و ...) در هر ردیف، بیانگر وجود تفاوت معنی دار آماری ($p < 0/05$) میانگین محتوی عناصر مورد بررسی در اندام‌های مختلف گیاهی و مقادیر مشخص شده با حروف بزرگ غیر مشترک (A, B, C و ...) در هر ستون، بیانگر وجود تفاوت معنی دار آماری ($p < 0/05$) میانگین محتوی عناصر مورد بررسی در اندام‌های گیاهی بر اساس مکان نمونه برداری بر طبق نتایج آزمون‌های تحلیل واریانس یک طرفه و چند دامنه‌ای دانکن است.

کوچک‌تر از یک و بیانگر آلودگی کم رسوب به عناصر آهن، سرب و مس بود. همچنین، روند نزولی میانگین مقادیر شاخص آلودگی برای عناصر به شرح سرب < مس < آهن بود. از طرفی، مقادیر محاسبه شده شاخص PLI در دامنه ۰/۰۰۳-۰/۰۰۶ متغیر و بیانگر شرایط کیفی غیرآلوده در همه مکان‌های مورد مطالعه بود.

نتایج ارزیابی کیفیت رسوب

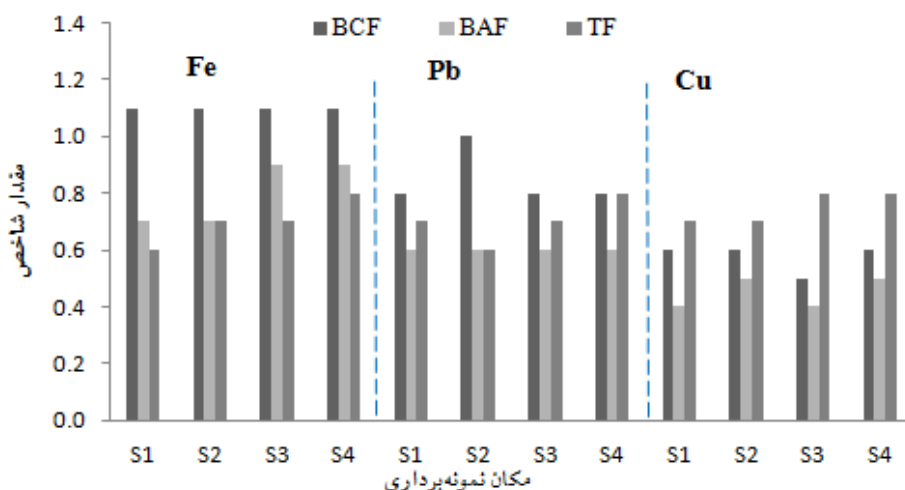
مقادیر شاخص‌های PI و PLI عناصر آهن، سرب و مس در نمونه‌های رسوب در نمودار ۱ نشان داده شده‌اند. نتایج مندرج در نمودار ۱ بیانگر آن است که میانگین مقادیر محاسبه شده شاخص PI در دامنه $10^{-4} \times 1/87$ تا ۰/۰۲۷ متغیر و در همه مکان‌های نمونه برداری (۱۰۰ درصد نمونه‌ها)،



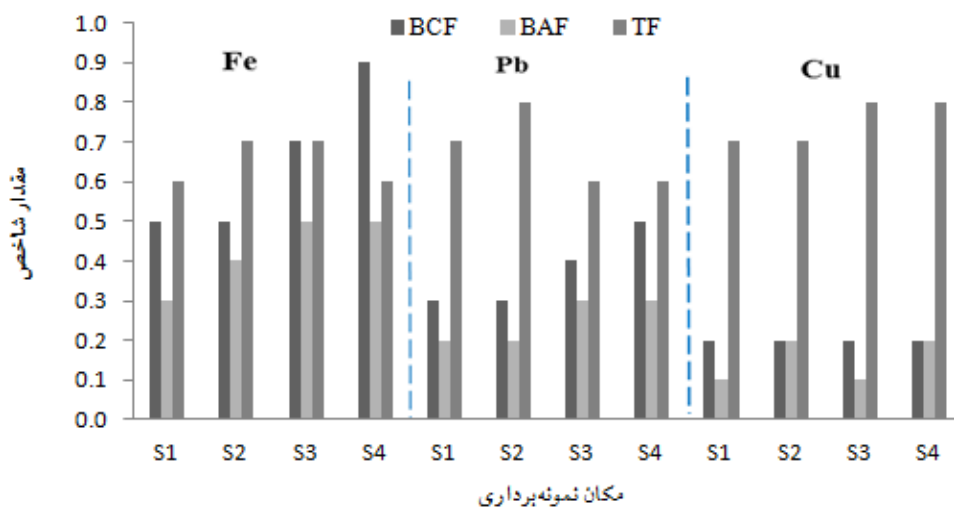
نمودار ۱- مقادیر شاخص‌های PI و PLI عناصر آهن، سرب و مس در نمونه‌های رسوب به تفکیک مکان نمونه‌برداری

BCF بزرگ‌تر از یک را برای عنصر آهن در همه مکان‌های نمونه‌برداری نشان داد. در رابطه با گونه آب‌تره نیز مقادیر BCF، BAF و TF عناصر آهن، سرب و مس به ترتیب در دامنه ۰/۵۸۳-۰/۷۹۸، ۰/۱۲۴-۰/۵۱۱، ۰/۱۷۴-۰/۸۷۸ متغیر بود (نمودار ۳). از سوی دیگر، میانگین مقادیر BCF عنصر آهن ریشه‌های لویی بزرگ‌تر از یک بود (نمودار ۴). این در حالی است که میانگین مقادیر BCF، BAF و TF همه عناصر مورد مطالعه در گونه آب‌تره کوچک‌تر از یک بود (نمودار ۴).

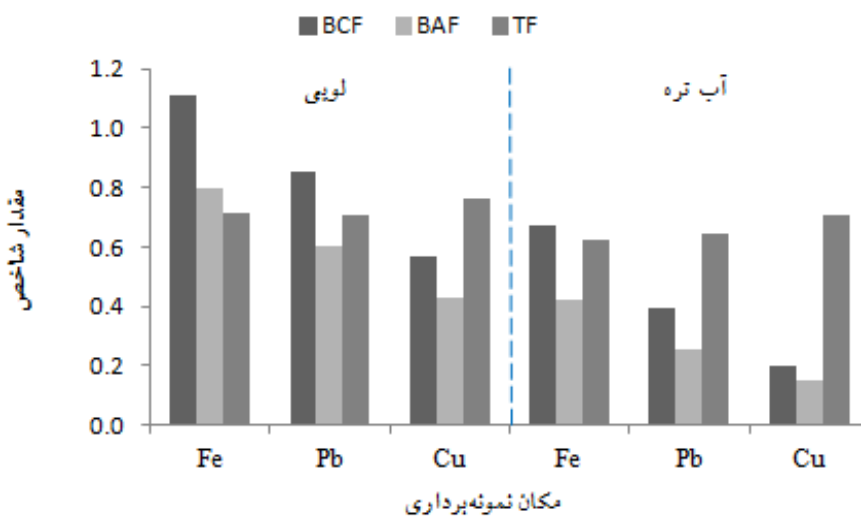
نتایج محاسبه شاخص‌های BCF، BAF و TF عناصر آهن، سرب و مس در نمونه‌های شاخسار و ریشه گونه‌های آبی لویی و آب‌تره در نمودارهای ۲ تا ۴ نشان داده شده‌اند. با استناد به نتایج مندرج در نمودار ۲، مقادیر شاخص‌های BCF، BAF و TF عناصر آهن، سرب و مس شاخسار و ریشه گونه لویی به ترتیب در دامنه ۰/۵۳۴-۱/۱۲، ۰/۸۸۴-۰/۳۹۴ و ۰/۵۹۰-۰/۸۳۴ متغیر بودند. از طرفی، مقادیر



نمودار ۲- مقادیر شاخص‌های BCF، BAF و TF عناصر آهن، سرب و مس در نمونه‌های گیاهی لویی



نمودار ۳- مقادیر شاخص‌های BCF, BAF, TF عناصر آهن، سرب و مس در نمونه‌های گیاهی آب‌تره



نمودار ۴- میانگین مقادیر شاخص‌های BCF, BAF, TF عناصر آهن، سرب و مس در اندام‌های گونه‌های لویی و آب‌تره

لار با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک در جدول ۴ آورده شده است.

نتایج پردازش آماری داده‌ها
نتایج بررسی نرمال بودن توزیع داده‌های رسوب و گیاه رودخانه

جدول ۴- مقادیر سطح معنی داری مربوط به بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها

عنصر	رسوب	شاخسار		ریشه	
		لویی	آب تره	لویی	آب تره
آهن	۰/۴۳۰	۰/۸۲۹	۰/۷۵۶	۰/۸۲۹	۰/۷۵۶
سرب	۰/۷۵۰	۰/۷۵۲	۰/۸۲۰	۰/۷۵۲	۰/۸۲۰
مس	۰/۷۹۹	۰/۵۲۱	۰/۴۸۹	۰/۵۲۱	۰/۴۸۹

نتایج آزمون تی تک‌نمونه‌ای برای مقایسه میانگین مقادیر محتوی عناصر آهن، سرب و مس در نمونه‌های رسوب با حد استانداردهای مربوطه در جدول ۵ نشان داده شده است.

نتایج مندرج در جدول ۴ بیان‌گر آن است که با توجه به $p > ۰/۰۵۰$ ، همه داده‌های مربوط به مقادیر محتوی عناصر در نمونه‌های رسوب و گیاه از توزیع نرمال برخوردار بوده‌اند.

جدول ۵- مقایسه میانگین محتوی عناصر در نمونه‌های رسوب سطحی رودخانه لار با بیشینه رواداری (میلی گرم در کیلوگرم، وزن خشک)

عنصر	حد استاندارد*	تفاوت میانگین از استاندارد	آماره t	درجه آزادی	فاصله اطمینان (۹۵ درصد)	
					حد پایینی	حد بالایی
آهن	۵۰۰۰	-۴۹۹۸۹/۷۲	-۱۴۲۴۷۵/۴۶	۱۱	-۴۹۹۹۰/۵	-۴۹۹۸۸/۹
سرب	۱۰۰	-۹۹/۳	-۱۵۳۵/۷	۱۱	-۹۹/۵	-۹۹/۲
مس	۱۰۰	-۹۹/۵	-۱۸۲۳/۸	۱۱	-۹۹/۶	-۹۹/۴

* برگرفته از اداره ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده آمریکا (NOAA) (۱۹۹۹)

عناصر آهن، سرب و مس در نمونه‌های رسوب و گیاه اختلاف معنی‌دار آماری ($p < ۰/۰۵$) وجود داشته است. از طرفی، با توجه به $p < ۰/۰۵$ ، میانگین محتوی عناصر آهن، سرب و مس در اندام‌های مختلف گیاهی نیز دارای اختلاف معنی‌دار بود.

بحث

رسوب (به‌عنوان منبع و مخزن فلزات سنگین) و گیاه (به‌سبب

نتایج مندرج در جدول ۵ بیان‌گر آن است که با توجه به $p < ۰/۰۵۰$ ، میانگین محتوی عناصر آهن، سرب و مس در نمونه‌های رسوب سطحی رودخانه لار با حد مجاز این عناصر اختلاف معنی‌دار آماری داشته و برای همگی کوچک‌تر از بیشینه رواداری بوده است.

نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (جدول ۲ و ۳) نیز نشان داد که بین مکان‌های مورد مطالعه از حیث میانگین محتوی

است. Jankowski و همکاران (۲۰۱۵)، Malinowska و همکاران (۲۰۱۵)، Zhang و همکاران (۲۰۱۶) و Wang و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش کردند که گونه‌های مختلف گیاهی بسته به ویژگی‌های ریخت‌شناسی و وراثتی مقادیر متفاوتی از عناصر فلزی را انباشته می‌کنند (۴۷-۵۰). همچنین، Li و همکاران (۲۰۰۷) و Taskila و همکاران (۲۰۱۲) با ارزیابی تجمع فلزات سنگین در گیاهان اذعان داشتند که تفاوت در محتوی انباشت عناصر فلزی در اندام‌های مختلف گیاهی ممکن است به دلیل سبک‌های مختلف جذب فلزات در بستر رشد (خاک یا رسوب) و ریشه گیاهان باشد (۵۱، ۵۲). افزون بر این، بیشینه مقادیر عناصر آهن، سرب و مس به ترتیب با $۹/۸۹$ ، $۰/۵۱۱$ و $۰/۲۴۶$ mg/kg، مربوط به نمونه‌های گیاهی جمع‌آوری شده از مکان نمونه‌برداری چهار بود (میانگین تجمعی از دو گیاه). این موضوع را می‌توان با افزایش محتوی عناصر رسوب در امتداد پایین‌دست رودخانه مرتبط دانست. Haghazar و همکاران (۲۰۲۱) و Arshad و همکاران (۲۰۲۳) نیز گزارش کردند که افزایش محتوی عناصر رسوب در امتداد پایین‌دست رودخانه می‌تواند منجر به افزایش غلظت آنها در گیاهان آبری شود (۱۹، ۲۶). شاخص‌های PI و PLI ابزارهایی ساده و مناسب برای تعیین سطح آلودگی و برآوردی جامع از میزان آلودگی رسوب به فلزات سنگین به‌شمار می‌آیند (۵۳، ۵۴). مقادیر محاسبه شده شاخص PI از دامنه $۱/۸۷ \times ۱۰^{-۴}$ تا $۰/۰۲۷$ متغیر و بیان‌گر سطح "آلودگی کم" در همه مکان‌های مورد مطالعه بود (نمودار ۱). همچنین مقادیر محاسبه شده شاخص PLI در دامنه $۰/۰۰۳-۰/۰۰۶$ متغیر و نشان‌دهنده شرایط کیفی "فقدان آلودگی" در همه مکان‌های مورد مطالعه بود (نمودار ۱). از طرفی، بیشینه میانگین مقادیر PI برای عناصر آهن، سرب و مس به ترتیب با $۲/۴۹ \times ۱۰^{-۴}$ ، $۰/۰۲۷$ و $۰/۰۲۵$ مربوط به مکان نمونه‌برداری چهار بود. علاوه بر این، بیشینه میانگین مقدار PLI نیز مربوط به همین مکان نمونه‌برداری بود که این موضوع را می‌توان با تأثیر عوامل انسانی بر محتوی

حضور ثابت در یک منطقه) ابزارهای محیطی مناسب و مفیدی برای سنجش آلودگی آلاینده‌های فلزی در بوم‌سازگان آبی به‌شمار می‌آیند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که بیشینه میانگین محتوی عناصر آهن، سرب و مس در نمونه‌های رسوب به‌ترتیب برابر با $۱۱/۸$ ، $۰/۹۱۵$ و $۰/۷۱۰$ mg/kg مربوط به مکان چهار بود. در این خصوص، بیشینه محتوی عناصر در مکان چهار را می‌توان به دلیل استقرار این محل در پایین‌دست یعنی در انتهای رودخانه لار و نزدیک به ورودی دریاچه سد لار مرتبط دانست. در مطالعات مشابه و در تأیید نتایج حاصل، Saleem و همکاران (۲۰۱۹) و Arshad و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که بیشینه محتوی فلزی مربوط به مکان‌های نزدیک به ورودی مخازن سد بوده است (۲۶، ۴۶). علاوه بر این، غلظت همه فلزات مورد مطالعه در طول مسیر از بالادست به پایین‌دست رودخانه به‌طور معنی‌داری روند افزایشی داشت. در این رابطه، می‌توان اذعان داشت که این عناصر به احتمال زیاد از منابع مشترک و مشابه نشأت گرفته‌اند؛ نظر به این که عمده فعالیت‌های انسانی در منطقه مورد مطالعه کشاورزی و شهری است از این‌رو، انتشارات حاصل از کودهای دامی و شیمیایی، احتراق سوخت‌های فسیلی (توسط صنایع، منازل، خودروها)، حمل و نقل و فعالیت‌های مرتبط با آن می‌تواند از منابع عمده عناصر فلزی در منطقه مورد مطالعه باشند. Haghazar و همکاران (۲۰۲۱) نیز افزایش غلظت عناصر در امتداد پایین‌دست رودخانه به‌منشیر را با منابع مشترک انسان‌پدید (فعالیت‌های صنعتی، شهری و کشاورزی) مرتبط دانستند (۱۹). نتایج سنجش میانگین محتوی عناصر در نمونه‌های گیاهی نشان داد که بیشینه میانگین محتوی تجمع‌یافته عناصر آهن، سرب و مس به‌ترتیب با $۱۱/۴$ ، $۰/۵۷۸$ و $۰/۲۹۸$ mg/kg مربوط به ریشه لویی بود (میانگین تجمعی از چهار مکان). در این رابطه می‌توان اذعان داشت که محتوی عناصر آهن، سرب و مس در نمونه‌های گیاهی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع گونه و اندام‌های مختلف گیاهی

در حالی که مقادیر BCF گونه آب‌تره برای همه عناصر مورد مطالعه در مکان‌های نمونه‌برداری کوچک‌تر از یک بود. همچنین، مقادیر BAF و TF فلزات آهن، سرب و مس در همه مکان‌های نمونه‌برداری برای هر دو گونه آبی کوچک‌تر از یک بود. چنین یافته‌هایی حاکی از آن است که جذب و توزیع فلزات در بین بافت‌های مختلف گیاهی نه تنها تحت تاثیر محتوی عنصر در محیط است، بلکه به نقش متابولیکی فلز در گیاه و سازوکارهای مرتبط با آن نیز بستگی دارد (۲۸، ۳۱). از آن‌جا که برای گونه لویی، میانگین مقادیر BCF و TF عنصر آهن به ترتیب بزرگ‌تر و کوچک‌تر از یک بود، لذا می‌توان نتیجه گرفت که لویی، گونه‌ای مناسب برای تثبیت عنصر آهن در رسوب است. Klink (۲۰۱۷) نیز با ارزیابی قابلیت گونه *Typha latifolia* L. در گیاه‌پالایی رسوبات دریاچه‌ها در غرب لهستان به فلزات سنگین، با استناد به میانگین محتوی عناصر آهن، سرب و مس در نمونه اندام‌های گیاهی لویی (ریشه، شاخسار و ریزوم) و مقادیر محاسبه شده شاخص‌های BCF و TF، گونه *T. latifolia* را گیاهی مناسب برای تثبیت عناصر آهن، سرب و مس در رسوب معرفی کردند (۳۳). از طرفی، Haghazar و همکاران (۲۰۲۱) نیز با ارزیابی قابلیت گونه *Typha latifolia* L. در گیاه‌پالایی رسوبات تالاب شادگان به فلزات سنگین عنوان کردند که با استناد به مقادیر محاسبه شده BCF و TF، گونه *T. latifolia*، از قابلیت تثبیت و استخراج گیاهی عنصر سرب از رسوب برخوردار بوده است (۱۹). همچنین، Torbati و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای که با هدف بررسی قابلیت گیاه‌پالایی فلزات سنگین از رسوبات تالاب گلرمر انجام یافت، با استناد به مقادیر محاسبه شده BCF و TF، گونه *T. latifolia* را گزینه‌ای مناسب برای گیاه‌پالایی بوم‌سازگان‌های آبی آلوده به عناصر کادمیم، روی، سرب و نیکل معرفی کردند (۶۰). از طرفی، میانگین مقادیر شاخص TF برای عنصر مس در گیاه لویی و عناصر سرب و مس در گونه آب‌تره بیش‌تر از میانگین مقادیر شاخص BCF بود. در

فلزات سنگین مرتبط دانست. در مطالعات مشابه و در تایید نتایج حاصل، Radhakrishnan و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که افزایش آلودگی فلزی در رسوبات انتهای حوضه‌های آبخیز ناشی از فعالیت‌های انسانی (تخلیه فاضلاب شهری و انتشارات صنعتی و کشاورزی) است (۵۵). همچنین، Ru و همکاران (۲۰۱۸)، Pan و همکاران (۲۰۲۲) و Li و همکاران (۲۰۲۳) اذعان داشتند عناصری که از منابع نقطه‌ای یا غیرنقطه‌ای وارد بدنه‌های آبی می‌شوند پس از انتقال به پایین‌دست رودخانه در رسوبات آن انباشته می‌شوند (۲۰، ۵۶، ۵۷). از طرفی، مقادیر شاخص‌های PI و PLI از بالادست به پایین‌دست روند افزایشی داشت. در این خصوص می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر PI و PLI به‌طور مستقیم با غلظت فلزات در مکان‌های نمونه‌برداری مرتبط است که مشابه نتایج Haghazar و همکاران (۲۰۲۱) بود (۱۹).

پایش و پالایش زیستی به‌عنوان فناوری دوست‌دار محیط‌زیست روشی کم‌هزینه به‌منظور تخمین و کاهش آلاینده‌های محیط‌زیستی به‌ویژه فلزات سنگین است (۱۲، ۳۰، ۵۸). در این خصوص، ارزیابی دقیق پوشش گیاهی موجود در مناطقی که به‌سبب فعالیت‌های انسانی آلوده محسوب می‌شوند، از اهمیت بسزایی برخوردار است و می‌تواند منجر به شناسایی گونه‌های گیاهی مناسب برای پایش و پالایش آلاینده‌های محیطی شود. بدین منظور، شاخص‌های BCF، BAF و TF به‌عنوان عوامل اصلی تعیین‌کننده توانایی گیاه در جذب و انتقال عناصر از بستر رشد (خاک یا رسوب)، مهم‌ترین ابزارها در فرآیند گیاه‌پالایی محسوب می‌شوند (۱۲، ۲۶، ۳۲، ۴۵). بر این اساس، گونه گیاهی با BCF بزرگ‌تر از یک و TF کوچک‌تر از یک، برای تثبیت گیاهی (Phytostabilization) و گونه گیاهی با BAF و TF بزرگ‌تر از یک، برای برداشت (استخراج) گیاهی (Phytoextraction) مناسب است (۳۰، ۴۵، ۵۹). نتایج این پژوهش نشان داد که لویی دارای مقادیر BCF بزرگ‌تر از یک برای عنصر آهن در همه مکان‌های نمونه‌برداری بود،

بوم‌سازگان آبی و انسان، پایش منظم و دوره‌ای نمونه‌های رسوب و همچنین مدیریت و کنترل منابع انتشار آلاینده‌های فلزی توصیه می‌شوند. در نهایت، با توجه به محدودیت‌های زمانی و کمبود منابع مالی در اختیار برای اجرای این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که در مطالعه‌های آتی نسبت به مطالعه سایر گونه‌های گیاهی رشد یافته در بوم‌سازگان‌های آبی آلوده برای شناسایی و معرفی گونه‌های زیست‌شناساگر با قابلیت گیاه‌پالایی آلاینده‌ها و به‌ویژه عناصر بالقوه سمی اقدام شود.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان همه نکات اخلاقی از جمله عدم سرقت ادبی، عدم انتشار مقاله در سایر نشریه‌ها، عدم تحریف داده‌ها و پرهیز از داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از رساله دکتری تخصصی محیط‌زیست مصوب واحد همدان دانشگاه آزاد اسلامی با عنوان "کنترل منابع آلودگی غیرنقطه‌ای حوضه‌های آبریز جاجرود و لار با استفاده از پوشش گیاهی بومی" و با کد ۱۷۱۴۸۰۰۶۲۶۵۶۲۲۸۱۶۲۲۹۱۸۳۸ است.

این خصوص، می‌توان اذعان داشت که این گیاهان از یک سیستم انتقال کارآمد برای عناصر مذکور برخوردار هستند که این موضوع در پژوهش Hosseini و همکاران (۲۰۲۰) نیز به تأیید رسیده است (۱۲).

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که محتوی عناصر آهن، سرب و مس در نمونه‌های رسوب و گیاه در امتداد پایین‌دست رودخانه به‌طور معنی‌داری روند افزایشی داشته است. از طرفی، میانگین محتوی همه فلزات مورد مطالعه در رسوبات رودخانه کم‌تر از غلظت زمینه بود. همچنین نتایج محاسبه شاخص PI در نمونه‌های رسوب، بیان‌گر آلودگی کم برای عناصر آهن، سرب و مس بوده است. از طرفی، مقادیر محاسبه شده شاخص‌های BCF, BAF و TF بیان‌گر آن بود که لویی، گونه‌ای مناسب برای تثبیت عنصر آهن در رسوب بوده است. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان‌دهنده تأثیر ورودی‌های انسانی بر محتوی فلزات سنگین رسوبات و گیاهان به‌ویژه در مناطق پایین‌دست رودخانه بود؛ هرچند که داده‌های به‌دست آمده برای مدیریت و سیاست‌های محیط‌زیستی از طریق اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی مفید خواهند بود، اما با توجه به اثرات محیط‌زیستی و بهداشتی فلزات سنگین بر سلامت

References

- Duan T, Liu S, Wang D, Feng J, Song N, Yu Y, et al. Seasonal variation and sources of heavy metals in urban street dusts and river sediments of Dongluo River Watershed in Ji'nan City, China. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2020;24:1400-10.
- Lacerda L, Campos R, Santelli R. Metals in water, sediments, and biota of an offshore oil exploration area in the Potiguar Basin, Northeastern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2013;185:4427-47.
- Sobhanardakani S, Jamalipour P. Determination of some organochlorine and organophosphorus pesticide residues in water of Gargar River. *Journal of Environmental Science and Technology*. 2017;19(4):223-36 (In Persian).
- Chen L, Yang Y, Ding M, Zhang H, Zou F, Wang P,

- et al. Scale effects of multi-medium heavy metals in response to landscape indices in the Yuan River, China. *Journal of Cleaner Production*. 2022;373:133784.
5. Kumar V, Sharma A, Kumar R, Bhardwaj R, Kumar Thukral A, Rodrigo-Comino J. 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*. 2020;26(1):1-16.
6. Sobhanardakani S, Kianpour M. Heavy metal levels and potential health risk assessment in honey consumed in the west of Iran. *Avicenna Journal of Environmental Health Engineering*. 2016;3(2):e7795.
7. Farzan M, Sobhanardakani S. Analysis of Fe, Pb, and Cd content of surface runoff in regions with high traffic intensity in Hamedan, Iran, in 2014. *Health Services Research*. 2016;12(2):208-13 (In Persian).
8. Raj ARA, Mysamy P, Sivasankar V, Kumar BS, Omine K, Sunitha T. Heavy metal pollution of river water and eco-friendly remediation using potent microalgal species. *Water Science and Engineering*. 2023.
9. Sobhanardakani S, Tayebi L, Farmany A, Cheraghi M. Analysis of trace elements (Cu, Cd, and Zn) in the muscle, gill, and liver tissues of some fish species using anodic stripping voltammetry. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2012;184:6607-11.
10. Yan C, Qu Z, Wang J, Cao L, Han Q. Microalgal bioremediation of heavy metal pollution in water: Recent advances, challenges, and prospects. *Chemosphere*. 2022;286:131870.
11. Cheraghi M, Sobhanardakani S, Zandipak R, Lorestani B, Merrikhpour H. Removal of Pb (II) from aqueous solutions using waste tea leaves. *Iranian Journal of Toxicology*. 2015;9(28):1247-53.
12. Hosseini NS, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B, Merrikhpour H. Heavy metal concentrations in roadside plants (*Achillea wilhelmsii* and *Cardaria draba*) and soils along some highways in Hamedan, west of Iran. *Environmental Science and Pollution Research* 2020;27(12):13301-14.
13. Khalijian A, Lorestani B, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Tayebi L. Potential ecological risk assessment of arsenic, cadmium, nickel and vanadium in the surface sediments of southern of Caspian Sea (case study: Khazar Abad, Sari Township). *Iranian Journal of Health and Environment*. 2022;14(4):665-82 (In Persian).
14. Li X, Wu P, Delang CO, He Q, Zhang F. Spatial-temporal variation, ecological risk, and source identification of nutrients and heavy metals in sediments in the peri-urban riverine system. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28:64739-56.
15. Sobhanardakani S, Ghoochian M, Taghavi L. Assessment of heavy metal contamination in surface sediment of the Darreh-Morad Beyg River. *Iranian Journal of Health Sciences*. 2016;4(3):22-34.
16. Sobhanardakani S, Habibi H. Investigation of heavy metals content in sediments of Shirin Su wetland, Western Iran. *Journal of Chemical Health Risks*. 2016;6(4):305-10.
17. Ustaoglu F, Kükrcer S, Taş B, Topaldemir H. Evaluation of metal accumulation in Terme River sediments using ecological indices and a bioindicator species. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(31):47399-415.
18. Liu E, Shen J, Yang L, Zhang E, Meng X, Wang J. Assessment of heavy metal contamination in

- the sediments of Nansihu Lake Catchment, China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2010;161:217-27.
19. Haghazadeh H, Hudson-Edwards KA, Kumar V, Pourakbar M, Mahdavianpour M, Aghayani E. Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability. *Chemosphere*. 2021;285:131446.
20. Li D, Pan B, Han X, Li G, Feng Z, Wang X. Human activities affect the concentrations and distributions of trace metals in the heavily sediment-laden Yellow River. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023;11(3):109714.
21. Sobhan Ardakani S, Taghavi L. Nickel, lead and zinc contamination in the surface sediments of Agh Gel Wetland, Iran. *Archives of Hygiene Sciences*. 2016;5(3):172-78.
22. Ali MM, Ali ML, Islam MS, Rahman MZ. Preliminary assessment of heavy metals in water and sediment of Karnaphuli River, Bangladesh. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2016;5:27-35.
23. Fural Ş, Kükürer S, Cürebal İ. Geographical information systems based ecological risk analysis of metal accumulation in sediments of İkizcetepeler Dam Lake (Turkey). *Ecological Indicators*. 2020;119:106784.
24. Kükürer S, Erginal AE, Kılıç Ş, Bay Ö, Akarsu T, Öztura E. Ecological risk assessment of surface sediments of Çardak Lagoon along a human disturbance gradient. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020;192:1-15.
25. Siddiqui E, Pandey J. 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*. 2019;26:10926-40.
26. Arshad K, Aqeel M, Noman A, Nazir A, Mahmood A, Rizvi ZF, et al. Ecological health risk assessment of microplastics and heavy metals in sediments, water, hydrophytes (*Alternanthera philoxeroides*, *Typha latifolia*, and *Ipomoea carnea*), and fish (*Labeo rohita*) in Marala wetlands in Sialkot, Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023:1-14.
27. Ghosn M, Mahfouz C, Chekri R, Ouddane B, Khalaf G, Guérin T, et al. Assessment of trace element contamination and bioaccumulation in algae (*Ulva lactuca*), bivalves (*Spondylus spinosus*) and shrimps (*Marsupenaeus japonicus*) from the Lebanese coast. *Regional Studies in Marine Science*. 2020;39:101478.
28. Serafini RJM, Arreghini S, Troiani HE, de Iorio ARF. Copper, zinc, and chromium accumulation in aquatic macrophytes from a highly polluted river of Argentina. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022:1-14.
29. Zamani-Ahmadmoodi R, Gharahi N, Martin JAR, Aazami J, Jafari A, Bahmani M, et al. Cd and Pb bioaccumulation in Eurasian watermilfoil (*Myriophyllum spicatum*) in relation to the role of metal contents in wetland sediments. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020;192:1-11.
30. Hosseini N, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B, Merrikhpour H. Expansive herbaceous species as bio-tools for elements detection in the vicinity of major roads of Hamedan, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022;19(3):1611-24.
31. Bonanno G, Cirelli GL. Comparative analysis of

- element concentrations and translocation in three wetland congener plants: *Typha domingensis*, *Typha latifolia* and *Typha angustifolia*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2017;143:92-101.
32. Hagh Nazar H, Sabbagh K, Johannesson KH, Pourakbar M, Aghayani E. Phytoremediation capability of *Typha latifolia* L. to uptake sediment toxic elements in the largest coastal wetland of the Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*. 2023;188:114699.
33. Klink A. A comparison of trace metal bioaccumulation and distribution in *Typha latifolia* and *Phragmites australis*: implication for phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017;24:3843-52.
34. Harguinteguy CA, Cirelli AF, Pignata ML. Heavy metal accumulation in leaves of aquatic plant *Stuckenia filiformis* and its relationship with sediment and water in the Suquia river (Argentina). *Microchemical Journal*. 2014;114:111-18.
35. Eid EM, Galal TM, Shaltout KH, El-Sheikh MA, Asaeda T, Alatar AA, et al. Biomonitoring potential of the native aquatic plant *Typha domingensis* by predicting trace metals accumulation in the Egyptian Lake Burullus. *Science of The Total Environment*. 2020;714:136603.
36. Jabłońska-Czapla M, Zerzucha P, Grygoyć K. Impact of river water and bottom sediment pollution on accumulation of metal (loid) s and arsenic species in the coastal plants *Stuckenia pectinata* L., *Galium aparine* L., and *Urtica dioica* L.: a chemometric and environmental study. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2020;79(1):60-79.
37. Outa JO, Kowenje CO, Plessl C, Jirsa F. Distribution of arsenic, silver, cadmium, lead and other trace elements in water, sediment and macrophytes in the Kenyan part of Lake Victoria: spatial, temporal and bioindicative aspects. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:1485-98.
38. Heisi HD, Awosusi AA, Nkuna R, Matambo TS. Phytoextraction of anthropogenic heavy metal contamination of the Blesbokspruit wetland: Potential of wetland macrophytes. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2023;253:104101.
39. Kakoei Dinaki F, Cheraghi M, Lorestani B, Sobhan Ardakani S, Chamani A. Investigating the potential of native plants in phytoremediation of heavy metals and nutrients in the Latian and Lar Dam Reservoirs. *Iran-Water Resources Research*. 2021;17(2):130-41 (In Persian).
40. Habibi H, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B, Sadr MK. Analysis, sources and health risk assessment of trace elements in street dust collected from the city of Hamedan, west of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 2022;15(2):1-17.
41. Sabet Aghlidi P, Cheraghi M, Lorestani B, Sobhanardakani S, Merrikhpour H. Analysis, spatial distribution and ecological risk assessment of arsenic and some heavy metals of agricultural soils, case study: South of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2020;18(2):665-76.
42. Hosseini NS, Sobhan Ardakani S. Evaluation of the impact of traffic volume on pollution and potential ecological risk of Zn, Pb, and Ni in suburban roadside soils in Hamedan, Iran. *Iranian Journal of Soil Research*. 2021;35(2):119-34 (In Persian).
43. Mohammadi SM, Lorestani B, Sobhan Ardakani S, Cheraghi M, Tayebi L. Source identification and ecological risk assessment of some heavy metals in surface soils collected from the vicinity of Arad-Kouh processing and disposal complex, Tehran,

- Iran. Environmental Sciences. 2021;19(3):1-22 (In Persian).
44. Hossain HZ. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sediments from the Brahmaputra River watershed in Bangladesh. Environmental Science and Pollution Research. 2022;29(54):81557-70.
45. Hosseini NS, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B, Merrikhpour H. Feasibility of using *Achillea wilhelmsii* and *Cardaria draba* for biomonitoring and bioremediation of heavy metals (Zn, Pb and Ni) in the roadside environments. Iranian Journal of Health and Environment. 2021;13(4):607-20 (In Persian).
46. Saleem M, Iqbal J, Shah MH. Seasonal variations, risk assessment and multivariate analysis of trace metals in the freshwater reservoirs of Pakistan. Chemosphere. 2019;216:715-24.
47. Jankowski K, Ciepiela A, Jankowska J, Szulc W, Kolczarek R, Sosnowski J, et al. Content of lead and cadmium in aboveground plant organs of grasses growing on the areas adjacent to a route of big traffic. Environmental Science and Pollution Research. 2015;22:978-87.
48. Malinowska E, Jankowski K, Wiśniewska-Kadžajan B, Sosnowski J, Kolczarek R, Jankowska J, et al. Content of zinc and copper in selected plants growing along a motorway. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2015;95:638-43.
49. Wang H, Nie L, Xu Y, Li M, Lv Y. Traffic-emitted metal status and uptake by *Carex meyeriana* Kunth and *Thelypteris palustris* var. *pubescens* Fernald growing in roadside turfy swamp in the Changbai Mountain area, China. Environmental Science and Pollution Research. 2018;25:18498-509.
50. Zhang H, Zhang Y, Wang Z, Ding M, Jiang Y, Xie Z. Traffic-related metal (loid) status and uptake by dominant plants growing naturally in roadside soils in the Tibetan plateau, China. Science of The Total Environment. 2016;573:915-23.
51. Li F-R, Kang L-F, Gao X-Q, Hua W, Yang F-W, Hei W-L. Traffic-related heavy metal accumulation in soils and plants in Northwest China. Soil & Sediment Contamination. 2007;16(5):473-84.
52. Taskila S, Tuomola M, Ojamo H. Enrichment cultivation in detection of food-borne Salmonella. Food Control. 2012;26(2):369-77.
53. Bhuyan M, Bakar MA, Rashed-Un-Nabi M, Senapathi V, Chung SY, Islam M. Monitoring and assessment of heavy metal contamination in surface water and sediment of the Old Brahmaputra River, Bangladesh. Applied Water Science. 2019;9(5):1-13.
54. Saroop S, Tamchos S. Monitoring and Impact Assessment Approaches for Heavy Metals. Heavy Metals in the Environment: Elsevier; 2021. p. 57-86.
55. Radhakrishnan N, Taneja S, Ambastha S, Pipil H, Haritash AK. Heavy metal profile, mobility, and source characterization in size-fractionated bed-sediments of River Ganga, India. Marine Pollution Bulletin. 2023;188:114650.
56. Pan B, Wang Y, Li D, Wang T, Du L. Tissue-specific distribution and bioaccumulation pattern of trace metals in fish species from the heavily sediment-laden Yellow River, China. Journal of Hazardous Materials. 2022;425:128050.
57. Ru X, Liao J, Liang L, Wen Z, Wei J, Wei C, et al. Quantification of the relationship between multiple metal (loid) distribution and integrated effect of internal-external factors in riverbed sediments across Xijiang River basin, South China. Science of The

- Total Environment. 2018;643:527-38.
58. Hosseini NS, Sobhan Ardakani S. Evaluation of bio-monitoring and remediation capacities of heavy metals (Co, Cr, and Mn) by some herbaceous species collected from roadside biotype. Environmental Researches. 2023;21-38 (In Persian).
59. Devi U, Taki K, Shukla T, Sarma KP, Hoque RR, Kumar M. Microzonation, ecological risk and attributes of metals in highway road dust traversing through the Kaziranga National Park, Northeast India: implication for confining metal pollution in the national forest. Environmental Geochemistry and Health. 2019;41(3):1387-403.
60. Torbati S, Kangarloi BA, Khataee A. Bioconcentration of heavy metals by three plant species growing in Golmarz wetland, in northwestern Iran: The plants antioxidant responses to metal pollutions. Environmental Technology & Innovation. 2021;24:101804.



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



Toxic elements (Fe, Pb, and Cu) contents in surface sediments and native aquatic plants (*Typha Latifolia* and *Nasturtium microphyllum*) tissues of Lar river: evaluation of biomonitoring and bioremediation capability

Fatemeh Kakouei Dinaki¹, Mehrdad Cheraghi^{1,*}, Bahareh Lorestani¹, Soheil Sobhanardakani¹, Atefeh Chamani²

1- Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

2- Department of Environmental Science and Engineering, Waste and Wastewater Research Center, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 21 May 2023

Revised: 11 July 2023

Accepted: 17 July 2023

Published: 06 December 2023

ABSTRACT

Background and Objective: Monitoring and remediation of metal contaminants in aquatic ecosystems is of particular importance to estimate, control, and reduce the level of threats to alive creatures and humans. Therefore, this study was conducted to evaluate metal contamination of surface sediments and the ability to monitor and bioremediation of iron, lead, and copper by aerial and underground tissues of *Typha Latifolia* and *Nasturtium microphyllum* located along the aquatic ecosystem of the Lar River, Tehran, Iran in 2021. **Materials and Methods:** In this descriptive study, after selecting four sampling sites, 48 plant samples and 12 sediment samples were collected. After preparation and acid digestion of the samples in the laboratory, the contents of the elements were determined using inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy (ICP-OES). Also, pollution index (PI), pollution load index (PLI), bioconcentration coefficient (BCF), bioaccumulation (BAF), and translocation factor (TF) were calculated. Statistical analyses of the results were performed using SPSS statistical software.

Results: The highest values of Fe, Pb, and Cu (mg/kg) in sediment samples were 11.8 ± 0.665 , 0.915 ± 0.030 , and 0.710 ± 0.026 , respectively, and belonged to station 4; and in plant tissues 11.4 ± 1.25 , 0.578 ± 0.180 , and 0.298 ± 0.095 , respectively, and were belonged to the roots of *T. Latifolia*. The PI values showed that the pollution of Fe, Pb, and Cu was "low" and the average PI values for the elements followed the descending order of $Pb > Cu > Fe$. The average values of PLI also vary from 0.003 to 0.006, indicating the quality conditions of "no pollution" in all the studied stations. On the other hand, *T. Latifolia* had a $BCF > 1$ and $TF < 1$ for Fe.

Conclusion: Based on the results obtained, it can be concluded that *T. Latifolia* is a suitable species for stabilizing Fe in sediments and could be used to monitor and remediate potentially toxic elements from polluted aquatic ecosystems.

Keywords: Heavy metals, Sediment, Macrophytes, Phytoremediation, Lar river

***Corresponding Author:**

cheraghi@iauh.ac.ir

Please cite this article as: Kakouei Dinaki F, Cheraghi M, Lorestani B, Sobhanardakani S, Chamani A. Toxic elements (Fe, Pb, and Cu) contents in surface sediments and native aquatic plants (*Typha Latifolia* and *Nasturtium microphyllum*) tissues of Lar river: evaluation of biomonitoring and bioremediation capability. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2023;16(3):413-32.

