



Investigation of the Role of Fern in the Removal of Heavy Metal Lead from Aquatic Environments Using the Phytoremediation Process

Farzad Hashemzadeh^{1✉} | Farshad Hashemzadeh² | Mahsa Jabbari³ | Samira Darvish⁴

1. Corresponding Author, Water and Wastewater Research Center, Water Research Institute, Tehran, Iran. E- mail: farzad.hashemzadeh@srbiau.ac.ir
2. Department of Health, Safety and Environmental Engineering, Faculty of Energy and Environmental Engineering, Saveh Institute of Higher Energy Education, Saveh, Iran. E-mail: farshad.h59@gmail.com
3. Environment Department, Hydraulics and Water Structures Research Institute, Water Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: mahsa.jabbari@ut.ac.ir
4. Department of Health, Safety and Environmental Engineering, Faculty of Energy and Environmental Engineering, Saveh Institute of Higher Energy Education, Saveh, Iran. E-mail: samira.darvish88@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 14 April 2025 Received in revised form 13 May 2025 Accepted 8 June 2025 Published online 11 October 2025 Keywords: <i>Ferns</i> <i>Lead</i> <i>Phytoremediation</i> <i>Water and wastewater treatment</i>	This study aimed to explore the potential of phytoremediation for removing lead, a heavy metal, using fern plants. The experiment was designed as a completely randomized trial with five replications under greenhouse conditions. The treatment levels comprised four concentrations of lead in water: 0, 100, 200, and 300 mg/L. Data analysis was performed using SPSS V21, and mean comparisons were conducted with Duncan's test at a significance level of 0.05, while graphs were generated using Excel software. The results from the variance analysis indicated that lead treatment significantly influenced electrical conductivity, nitrogen, phosphorus, potassium, soluble sodium, and total hardness at the 1% significance level, as well as pH and iron content at the 5% level. However, the effect of lead concentration on the lead content in various drainage treatments was not statistically significant. Overall, the findings suggest that the lead concentrations tested in this study did not adversely affect the growth of fern plants. This conclusion is further supported by the transfer and bioaccumulation factors observed. Therefore, it can be inferred that fern plants exhibited resistance to lead concentrations in water, indicating that levels up to 300 mg/L had no significant impact on the length and weight of leaves and stems.

Cite this article: Hashemzadeh, F., Hashemzadeh, F., Jabbari, M., & Darvish, S. (2025). Investigation of the Role of Fern in the Removal of Heavy Metal Lead from Aquatic Environments Using the Phytoremediation Process. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (2), 379-392. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.393438.1220>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.393438.1220>

Publisher: University of Tehran Press.



بررسی نقش گیاه سرخس در حذف فلز سنگین سرب از محیط‌های آبی با استفاده از فرایند گیاه‌پالایی

فرزاد هاشم‌زاده^۱ | فرشاد هاشم‌زاده^۲ | مهسا جباری^۳ | سمیرا درویش^۴

۱. نویسنده مسئول، مرکز تحقیقات آب و فاضلاب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. رایانامه: farzad.hashemzadeh@srbiau.ac.ir
۲. گروه مهندسی بهداشت، ایمنی و محیط زیست، دانشکده مهندسی انرژی و محیط زیست، مؤسسه آموزش عالی انرژی ساوه، ساوه، ایران. رایانامه: farshad.h59@gmail.com
۳. گروه محیط زیست، پژوهشکده هیدرولیک و سازه‌های آبی، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. رایانامه: mahsa.jababri@ut.ac.ir
۴. گروه مهندسی بهداشت، ایمنی و محیط زیست، دانشکده مهندسی انرژی و محیط زیست، مؤسسه آموزش عالی انرژی ساوه، ساوه، ایران. رایانامه: samira.darvish88@gmail.com

چکیده	اطلاعات مقاله
این پژوهش با هدف استفاده از روش گیاه‌پالایی برای حذف فلز سنگین سرب توسط گیاه سرخس انجام پذیرفته است. آزمایش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با پنج تکرار در شرایط گلخانه اجرا شد. سطوح نمونه شامل چهار سطح سرب (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ mg/L آب) بود. برای تعیین تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS V21 استفاده و مقایسات میانگین به‌روش دانکن در سطح احتمال و رسم نمودارها به‌کمک نرم‌افزار Excel انجام گرفت. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که نمونه سرب بر هدایت الکتریکی، محتوای نیتروژن، فسفر، پتاسیم، سدیم محلول و سختی کل در سطح ۱ درصد و pH و محتوای آهن در سطح ۵ درصد تأثیر معنی‌داری دارد، اما تأثیر آن بر محتوای سرب در نمونه‌های مختلف زه‌آب معنی‌دار نبود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که غلظت‌های سرب به‌کاررفته در این پژوهش، بر رشد گیاه سرخس مؤثر نبوده است. این نتایج با استفاده از اعداد حاصل از فاکتورهای انتقال و تجمع زیستی نیز قابل‌توجیه است. بنابراین، گیاه سرخس در برابر این میزان سرب آب مقاوم بوده و یا به‌عبارت بهتر، مقادیر سرب تا حد ۳۰۰ mg/L آب تأثیری بر طول، وزن برگ و ساقه نداشت.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹ کلیدواژه‌ها: تصفیه آب و فاضلاب سرب سرخس گیاه‌پالایی

استناد: هاشم‌زاده، فرزاد؛ هاشم‌زاده، فرشاد؛ جباری، مهسا و درویش، سمیرا (۱۴۰۴). بررسی نقش گیاه سرخس در حذف فلز سنگین سرب از محیط‌های آبی با استفاده از فرایند گیاه‌پالایی. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۲)، ۳۷۹-۳۹۲. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.393438.1220>



۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین عوامل آلودگی محیط‌زیست، پساب‌های صنعتی هستند که آلاینده‌های مختلفی، از جمله فلزات سنگین، را به محیط وارد می‌کنند. یون‌های فلزات سنگین در موجودات آبی تجمع یافته و به دلیل سمیت بالا، نفوذپذیری زیاد و تجزیه‌ناپذیری، اختلالات فیزیولوژیکی و رشدی ایجاد کرده و در نهایت تهدیدی جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم محسوب می‌شوند (Roa-Fuentes *et al.*, 2020). اهمیت فلزات سنگین به دلیل تمایل آن‌ها به تجمع زیستی، سمی بودن، سرطان‌زا و کشنده بودن حتی در غلظت‌های پایین، عدم دفع آسان از بدن و عدم تخریب سریع آن‌ها در طبیعت است (Khan *et al.*, 2015, Izah *et al.*, 2016). از این‌رو، توسعه یک روش مناسب برای حذف مؤثر فلزات سنگین، به‌ویژه سرب، باید یکی از اولویت‌های جامعه علمی در سطح جهانی باشد. فناوری‌های مختلفی در صنعت آب و فاضلاب برای حذف آلاینده‌های خاص به کار می‌روند، از جمله جذب (Hashemzadeh *et al.*, 2018)، انعقاد-لخته‌سازی (Kooijman *et al.*, 2020)، اسمز معکوس (Kapepula and Luis, 2024)، اکسیداسیون پیشرفته (Hashemzadeh and Borghei, 2021) و گیاه‌پالایی. در میان این روش‌ها، گیاه‌پالایی به دلیل ویژگی‌هایی چون سادگی، طراحی آسان، هزینه کم‌تر و راندمان بالا، یکی از مناسب‌ترین و عملیاتی‌ترین روش‌ها برای حذف یا کاهش آلودگی فلزات سنگین از منابع آبی به‌شمار می‌رود (Hashemzadeh *et al.*, 2020).

گیاه‌پالایی به معنای استفاده از گیاهان برای حذف، کاهش یا تجزیه آلاینده‌ها از محیط زیست است. گیاهان با خاصیت جذب و تجمع مواد آلاینده از خاک و آب‌وهوا می‌توانند به‌عنوان بیوفیلترها عمل کرده و به تصفیه آلاینده‌ها در محیط کمک کنند. گیاهان پالایش‌گر با قرارگیری در معرض آلاینده‌ها، از طریق فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، این آلاینده‌ها را جذب و تجزیه می‌کنند (Simmer and Schnoor, 2022). گیاه‌پالایی یک روش مؤثر و پایدار برای حذف فلزات سنگین از محیط زیست است که بازدهی بالا، هزینه کم‌تر و انعطاف‌پذیری بیش‌تری نسبت به روش‌های دیگر دارد. نوآوری‌های گیاه‌پالایی برای محیط‌های مختلف و انواع آلاینده‌ها در دسترس هستند (Chanu and Gupta, 2016; Jeevanantham *et al.*, 2019; Gołda and Korzeniowska, 2016; Muthusaravanan *et al.*, 2018; Hauptvogel *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020; Devi and Kumar, 2020; Bhat *et al.*, 2022).

Laghlimi *et al.* (2015) مکانیسم‌های گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین را موردبررسی قرار دادند. آن‌ها عوامل اصلی مؤثر بر جذب فلزات سنگین توسط گونه‌های گیاهی را مورد بحث قرار دادند. آن‌ها همچنین روش‌های مختلفی را برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بیان کردند (Laghlimi *et al.*, 2015; Şevik, 2020). (Laghlimi *et al.*, 2015; Şevik, 2020).

Şevik (2020) تغییر تجمع فلزات سنگین را در برخی از گیاهان فضای سبز شهر کاستامونو در کشور ترکیه با توجه به نوع گیاه، ارگانیزم گیاهی، وضعیت شست‌وشو و تراکم ترافیک تعیین کردند. نتایج نشان داد که غلظت سرب در شاخه‌ها نسبت به برگ برای همه گونه‌ها بیش‌تر بود. ستین و جاوید تجمع غلظت باریم را در برخی از گیاهان رشدیافته در پاکستان بررسی کردند. تغییرات غلظت باریم در برگ‌ها و شاخه‌های گونه‌های *Ficus bengalensis* و *Ziziphus Azadirechta indica* بسته به تراکم ترافیک تعیین شد. آن‌ها دریافتند که مناسب‌ترین گونه برای پایش غلظت باریم *Azadirechta indica* و مناسب‌ترین اندام‌ها برگ *Azadirechta indica* بود (Cetin and Jawed, 2024). با این‌حال، انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب و شرایط مناسب برای رشد آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (Danyal *et al.*, 2023).

Siyar *et al.* (2022) در پژوهش خود پتانسیل گیاه‌پالایی گیاهان بیش از حد انباشته بومی در حال رشد در خاک

آلوده به فلزات سنگین کارخانه ذوب و پالایش مس خاتون‌آباد در ایران را بررسی کردند. بررسی شاخص‌ها برای عناصر مختلف نشان داد که آکاتندهای *Launaea* دارای مقدار BCF بیش‌تر از یک و مقدار TF کم‌تر از یک هستند. بنابراین، می‌توان از این گیاه در گیاه‌پالایی آرسنیک از طریق تکنیک تثبیت گیاهی استفاده کرد. علاوه بر این، مس در این گونه‌های گیاهی فراهمی زیستی بسیار کمی دارد.

یکی از گونه‌های گیاهی که در گیاه‌پالایی به کار می‌رود، سرخس است (Ansari *et al.*, 2020). گیاه سرخس (Polypodiopsida) یک گونه از خانواده سرخسان (Polygonaceae) است که در مناطق مختلف جهان یافت می‌شود. این گونه شامل گیاهان علفی و چند ساله است و دارای برگ‌های بزرگ و خزنده است. گیاه سرخس به‌عنوان یک گونه پالایش‌گر معروف است و توانایی جذب و کاهش فلزات سنگین از محیط زیست را دارد. این گیاه قادر است فلزات سنگین مانند کادمیوم، سرب، مس، روی و نیکل را از خاک و آب جذب کرده و آن‌ها را در اجزای مختلف خود متمرکز کند. گیاه سرخس می‌تواند فلزات سنگین را به‌صورت شیمیایی با استفاده از مواد شیمیایی موجود در بافت خود کلیسه‌سازی کند. این فرایند باعث تخریب فلزات سنگین و کاهش قابلیت جذب آن‌ها توسط گیاه می‌شود. همچنین، ریشه‌های گیاه سرخس می‌توانند فلزات سنگین را از خاک و آب جذب کنند که این فرایند به‌واسطه روند جذب و جمع‌آوری فلزات در ساقه‌ها و برگ‌ها صورت می‌گیرد (Fierascu *et al.*, 2021). پژوهشی در سال ۲۰۲۳ درخصوص پتانسیل گیاه‌پالایی گیاه سرخس آبی یا آزولا در تالاب انزلی انجام شد. نتایج نشان داد که آزولا می‌تواند سرب را از ریشه به اندام‌های هوایی منتقل کند، به‌طوری که فاکتور انتقال بیش از یک را دارد. از این رو، به‌عنوان یک ابر تجمع‌دهنده شناخته می‌شود. این گیاه تمایل دارد سرب را در اندام‌های هوایی و منگنز و روی را در ریشه جمع‌آوری کند (Jonoubi and Karimi Limanjoubi, 2023). Lintern *et al.* (2024) به بررسی پتانسیل گیاه‌پالایی گیاه آزولا در جذب سمیت مواد پرفلوئوروآلکیل و پلی فلوئوروآلکیل^۱ پرداخت. نتایج نشان داد آزولا برای گیاه‌پالایی PFAS در محیط‌های آبی برای کاهش قابل‌ملاحظه غلظت PFAS کافی نیست. Shrestha *et al.* (2019) در پژوهشی گیاه‌پالایی خاک آلوده به فلزات سنگین توسط Switchgrass از طریق یک مطالعه تطبیقی با استفاده از کمپوست‌های مختلف و فیبر گشنیز در اصلاح آلودگی، بهره‌وری گیاه و شست‌وشوی مواد مغذی پرداختند. نتایج نشان داد که اصلاحات باعث کاهش میزان فلزات زیستی در خاک شد. اصلاحات آلی باعث افزایش pH خاک، هدایت الکتریکی و وضعیت مواد مغذی خاک شد. بیوماس اندام هوایی و ریشه سوچ گراس در خاک‌های اصلاح‌شده در مقایسه با شاهد غیر اصلاح‌شده به‌طور معنی‌داری بیش‌تر بود. نمونه‌های اصلاح‌شده سطوح قابل تشخیص جذب فلزات سنگین را در شاخه‌های چمن سوئیچ نشان داد، درحالی‌که نمونه کنترل، زیست‌توده علف سوئیچ کافی برای اندازه‌گیری جذب تولید نکرد. جذب علف تعویضی برخی از فلزات سنگین و غلظت برخی از مواد مغذی شیرابه به‌طور قابل‌توجهی در بین نمونه‌های اصلاح‌شده متفاوت بود. با بهبود خواص خاک و بهره‌وری گیاه و کاهش حلالیت فلزات سنگین که در غیر این صورت می‌تواند بقای گیاه را مختل کند، اصلاحات آلی می‌تواند گیاه‌پالایی را در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین تا حد زیادی افزایش دهد.

این پژوهش با هدف بررسی کارایی گیاه‌پالایی در حذف فلز سنگین سرب توسط گیاه سرخس از محیط‌های آبی انجام پذیرفته است. مطالعه فوق با ارائه رویکردی جامع به ارزیابی میزان انباشت سرب در اندام‌های مختلف گیاه از جمله ریشه، ساقه و برگ، تأثیر این فلز بر شاخص‌های فیزیولوژیکی رشد مانند ارتفاع و وزن خشک و میزان کاهش غلظت سرب پس از فرایند گیاه‌پالایی پرداخته است. از سوی دیگر، مقاومت گیاه سرخس در برابر غلظت‌های بالای سرب، همراه با تحلیل شاخص‌های تجمع زیستی و انتقال فلز، بررسی شده است تا کارایی این گیاه در تصفیه

محیط‌های آلوده بهتر مشخص شود. با توجه به افزایش آلودگی فلزات سنگین در منابع آبی، این پژوهش تلاش دارد تا خلأ علمی و کاربردی موجود را با ارائه یافته‌های قابل استفاده در راهبردهای مدیریتی و زیست‌محیطی پایدار برطرف سازد. برخلاف پژوهش‌های پیشین که بیش‌تر بر جنبه‌های محدود گیاه‌پالایی متمرکز بوده‌اند، پژوهش پیش‌رو با بررسی چندبعدی و دقیق‌تر، می‌تواند به طراحی راه‌کارهای بهینه برای استفاده از گیاه‌پالایی در مقیاس‌های صنعتی و زیست‌محیطی کمک کند.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. آماده‌سازی نمونه‌ها

آزمایش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با پنج تکرار در شرایط گلخانه اجرا شد. سطوح نمونه شامل چهار سطح سرب (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ mg/L آب) بود. از نمک نیترات سرب $Pb(NO_3)_2$ ساخت شرکت مرک آلمان برای اعمال نمونه سرب در آب استفاده شد. قبل از کشت بذر به آماده‌سازی آب و خاک موردنظر پرداخته شد. به این منظور آب و خاک‌های وزن‌شده برای هر گلدان را در کیسه‌های پلاستیکی ریخته و برای ایجاد آلودگی در آب و خاک عنصر سرب را به‌صورت نمک موردنظر (نیترات سرب) به‌طور یکنواخت با آب و خاک در هم آمیخته تا مخلوط یکنواخت و یک‌دستی حاصل شود. در گام بعد آب و خاک آماده شده در ۲۰ گلدان به قطر ۲۰ سانتی‌متر و ظرفیت سه کیلوگرم ریخته شد. سپس مخلوط آب و نمک سرب موجود در گلدان‌ها دوبار به‌وسیله آب مقطر آب‌شویی شد و در نهایت به‌مدت دو روز برای تثبیت سرب در آب دست‌نخورده باقی ماند.

۲.۲. تهیه و کاشت گیاه سرخس

دانه‌های گیاه سرخس تهیه و پس از پرکردن گلدان‌ها توسط آب و خاک مورد استفاده در پژوهش، تعداد ده عدد از بذرهای گیاه با فواصل منظم در عمق دو سانتی‌متری کشت شد. بعد از جوانه‌زنی بذرهای تعدادی از بوته‌های سالم و قوی برای کامل‌شدن مراحل رشد نگه داشته شد و بقیه جوانه‌ها تنک شدند. در پایان دوره رشد رویشی گیاه به آرامی به‌طوری که به ریشه‌ها آسیب نرسد از آب و خاک جدا شد. پس از شست‌وشو با آب مقطر بخش برگ و ساقه جدا گردید و در ادامه وزن تر و طول اندام گیاهی، در هر یک از بخش‌های برگ و ساقه اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌های گیاهی به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک و توزین شدند.

۲.۳. اندازه‌گیری صفات مورد مطالعه در گیاه در شرایط آبی

به‌منظور به حداقل رساندن کاهش وزن تر اندام‌های گیاهی، بلافاصله پس از برداشت نمونه‌های گیاهی، وزن تر برگ‌ها و اندام هوایی با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد (شکل ۱). برای اندازه‌گیری سطح برگ نیز، پس از انتقال بوته‌ها به آزمایشگاه، برگ‌های بوته‌ها جدا شده و قطعات برگ بر روی صفحه دستگاه اندازه‌گیری شاخص سطح برگ پخش شدند. سپس طلق شفاف بر روی برگ‌ها قرار داده شد تا برگ‌ها کاملاً بر روی صفحه پخش شوند و سطح برگ ثبت شود. پس از اندازه‌گیری وزن تر، نمونه‌ها در آون با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد تا زمان خشک‌شدن کامل (۷۲ ساعت) قرار گرفتند. پس از خروج از آون، دوباره نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتالی (۰/۰۰۱ گرم) توزین شدند. در نهایت، پس از تهیه محلول مادر (استوک) و محلول‌های استاندارد نمک عناصر در غلظت‌های مختلف، مقادیر سرب در برگ و اندام هوایی گیاه با استفاده از دستگاه جذب اتمی تعیین شد (Shah and Nongkynrih, 2007).



Figure 1. A view of preparing research samples

۴.۲. اندازه‌گیری میزان پتاسیم، سدیم و فسفر برگ و اندام هوایی

برای اندازه‌گیری میزان پتاسیم و سدیم به یک گرم بافت خشک برگ و بخش هوایی نیتریک‌اسید غلیظ اضافه شد و بعد از حدود ۴۸ تا ۷۲ ساعت با استفاده از اجاق برقی، محلول‌ها تا دمای تبخیر حرارت داده شدند و در انتها میزان پتاسیم و کلسیم محلول به‌وسیله دستگاه نورسنج اندازه‌گیری شد. با استفاده از تهیه محلول‌های استاندارد غلظت عناصر پتاسیم و سدیم در محلول بافت گیاهی تعیین و در نهایت درصد عناصر مزبور در بافت موردنظر محاسبه شد. هم‌چنین، برای تعیین میزان فسفر برگ و بخش هوایی از روش کالریمتری^۲ یا رنگ‌سنجی استفاده شد. پس از تهیه عصاره در نهایت جذب آن در طول موج ۷۳۰ نانومتر با استفاده از محلول‌های استاندارد فسفر در محدوده ۱۰-۱۰۰ ppm اندازه‌گیری و نتایج براساس درصد فسفر در بافت موردنظر محاسبه شد.

۵.۲. اندازه‌گیری غلظت سرب گرافیتی

برای سنجش عناصر ریز مغذی و عناصر سنگین در آب و عصاره‌های آب و گیاه از روش طیف‌سنجی کوره گرافیتی^۳ استفاده شده است. در این روش از یک تیوب گرافیتی که با استفاده از نیروی الکتریسیته گرم می‌شود، استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری عناصر ابتدا محلول غلیظ‌تر استاندارد عنصر مربوطه در محل مربوطه قرار داده می‌شود. نمونه به‌طور مستقیم در داخل تیوب تزریق می‌شود از (پنج تا ۱۰۰ میکرولیتر) جایی که بعد از آن با استفاده از یک سری برنامه دمایی در گام‌های مختلف حلال آن خشک می‌شود و ماتریس اصلی ترکیب، جدا می‌شود در نهایت اتم‌های آزاد آنالیت در حالت گازی درون تیوب گرافیتی با نیروی قوی جریان الکتریکی به سرعت گرم شده در دمای بین ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و تقریباً تمامی آنالیت به اتم تبدیل می‌گردد در تمام مدت بیم نور از داخل تیوب عبور می‌نماید و در همین حین اتم‌های آزاد در داخل تیوب تشکیل می‌شوند و برای مدت ۰/۲ تا ۰/۵ ثانیه در تیوب باقی می‌مانند. لازم به ذکر است که شرکت سازنده دستگاه کمپانی GBC مدل Avant p کشور استرالیا می‌باشد.

۶.۲. محاسبه شاخص شاخص فاکتور انتقال^۴ و تجمع زیستی^۵

به‌منظور تعیین میزان واقعی جذب عناصر سنگین توسط اندام گیاه سرخس، ضریب انتقال عناصر محاسبه گردید. ضریب انتقال عبارت است از رابطه (۱) به‌دست می‌آید (Ghosh and Singh, 2005):

$$\text{رابطه (۱)} = \frac{\text{غلظت فلز در اندام هوایی}}{\text{غلظت فلز در برگ}} = \text{فاکتور انتقال}$$

و برای تعیین میزان انباشت سرب در گیاه شاخص تجمع زیستی از رابطه زیر محاسبه شد (MacFarlane et al., 2007):

$$\text{رابطه (۲)} = \left(\text{فاکتور تجمع زیستی} \right) = \frac{\text{غلظت فلز در برگ}}{\text{غلظت فلز در آب}}$$

برای تعیین تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS V21 استفاده و مقایسات میانگین به‌روش دانکن^۶ در سطح احتمال و رسم نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel انجام گرفت.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. نتایج حاصل از بررسی خواص فیزیکی شیمیایی آب آبیاری

ابتدا به تجزیه آزمایشگاهی آب آبیاری گلدان‌ها پرداخته شد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جدول (۱) آمده است.

Table 1. Physico-chemical properties of irrigation water used in fern cultivation

Water		Water	
Feature	Value	Feature	Value
Organic Carbon (%)	1.79	Total Nitrogen (mg/L)	3.68
Lead (ppm)	11.12	Phosphor (mg/L)	0.07
Iron (%)	1.96	Potassium (mg/L)	2.13
Magnesium (mg/L)	25.30	Iron (mg/L)	3.60
Calcium (mg/L)	13.55	Sodium Solution (mg/L)	75.40
Phosphor (mg/L)	15.12	Total Hardness (mg/L)	292.51
Potassium (mg/L)	642	Electrical Conductivity (µm/cm)	901
Total Nitrogen (%)	0.10		7.32
pH	7.55		
Electrical conductivity (ds/cm)	4.10	Lead (mg/L)	<0.10

۳.۲. تجزیه واریانس نمونه‌های زه‌آب خارج‌شده از گلدان

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر نمونه سرب بر هدایت الکتریکی، محتوای نیتروژن، فسفر، پتاسیم، سدیم محلول و سختی کل در سطح احتمال ۱ درصد و بر pH و محتوای آهن در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار است. با این حال، تفاوت معنی‌داری در محتوای سرب بین نمونه‌های مختلف زه‌آب مشاهده نشد (جدول ۲).

Table 2. Analysis of variance of the samples of the drainage water taken out of the pot

Sources of changes	df	Mean Square								
		EC (µm/cm)	pH	Nitrogen content (mg/L)	Phosphorus content (mg/L)	Potassium content (mg/L)	Sodium Solution content (mg/L)	TH (mg/L)	Iron content (mg/L)	Lead (mg/L)
Treatment	3	34421568**	0.082**	36140**	0.0612**	196184**	51233**	6825621**	9.38*	0.000008**
Error	8	1320	0.0313	6.16	0.0033	91.30	50.30	6126	0.036	0.0000007
Coefficient of Variation (%)		1.75	2.02	1.35	7.65	2.82	3.34	2.92	12.19	31.25

ns, * and ** are non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

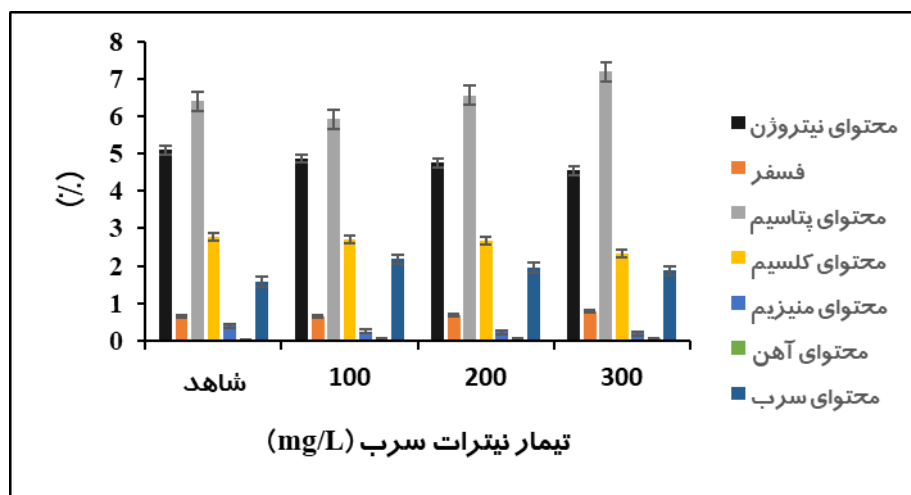
۳.۳. اثر سرب بر ویژگی‌های رویشی و محتوای عناصر گیاه سرخس در شرایط آبی

نتایج مقایسه میانگین اثر نمونه سرب بر غلظت عناصر در برگ گیاه سرخس در شرایط آبی در جدول (۳) نشان داده شده است. براساس جدول (۳)، اثر نمونه سرب بر محتوای نیتروژن کل برگ در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. بیش‌ترین مقدار نیتروژن کل در نمونه نیترات سرب ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (۴/۳۹ درصد) و کم‌ترین مقدار در نمونه نیترات سرب ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (۳/۷۰ درصد) به‌دست آمد. نتایج مقایسه میانگین نشان می‌دهد که با افزایش غلظت سرب در آب، میزان نیتروژن برگ کاهش می‌یابد و همچنین بین نمونه‌های نیترات سرب ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر از نظر آماری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین، مطابق با نتایج تجزیه واریانس، اثر نمونه سرب بر محتوای فسفر برگ در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. بیش‌ترین مقدار فسفر کل (۰/۷۰ درصد) در نمونه نیترات سرب ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و کم‌ترین مقدار (۰/۵۷ درصد) در نمونه شاهد مشاهده شد. نتایج مقایسه میانگین نشان می‌دهد که بین غلظت‌های مختلف سرب اختلاف معنی‌داری در فسفر برگ وجود ندارد. براساس نتایج تجزیه واریانس، آلودگی سرب اثر معنی‌داری بر محتوای پتاسیم برگ نداشت.

Table 3. Results of the comparison of the average effect of lead treatment on the concentration of elements in fern leaves under water conditions

Lead nitrate treatment (mg/L)	Nitrogen content (%)	Phosphorus content (%)	Potassium content (%)	Calcium content (%)
Witness	0.065ab ± 4.020	0.007b ± 0.576	0.096a ± 7.360	0.027c ± 1.163
100	0.08a ± 4.397	0.08a ± 0.656	0.032a ± 7.633	0.110b ± 2.183
200	0.126b ± 3.830	0.011a ± 0.671	0.384a ± 7.490	0.109a ± 2.657
300	0.182a ± 3.730	0.004a ± 0.709	0.086a ± 7.250	0.170a ± 2.740
Lead nitrate treatment (mg/L)	Magnesium content (%)	Sodium content (%)	Iron content (%)	Lead content (ppm)
Witness	0.020a ± 0.523	0.041c ± 1.703	0.003b ± 0.386	0.038a ± 3.911
100	0.006b ± 0.480	0.021a ± 2.277	0.003c ± 0.305	0.012d ± 1.988
200	0.006c ± 0.410	0.107b ± 1.987	0.005a ± 0.402	0.033c ± 2.754
300	0.006c ± 0.400	0.065c ± 1.753	0.003a ± 0.407	0.042b ± 2.911

در شکل (۲)، نتایج مقایسه میانگین اثر نمونه سرب بر غلظت عناصر در ساقه گیاه سرخس در شرایط آبی ارائه شده است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر نمونه سرب بر غلظت نیتروژن ساقه در سطح احتمال ۵ درصد در شرایط آبی معنی دار است. بیشترین مقدار نیتروژن کل در نمونه شاهد (۵/۱۰ درصد) و کمترین مقدار در نمونه سرب ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر (۴/۵۵ درصد) به دست آمد. نتایج مقایسه میانگین نشان می دهد که با افزایش غلظت سرب، محتوای نیتروژن ساقه کاهش می یابد.

**Figure 2.** Results of the comparison of the average effect of lead treatment on the concentration of elements in the fern stem under water conditions

همچنین براساس نتایج تجزیه واریانس جدول فوق، اثر نمونه سرب بر غلظت فسفر ساقه در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار شد. بیشترین مقدار فسفر (۰/۷۸۶ درصد) در نمونه سرب ۳۰۰ mg/L و کمترین مقدار فسفر (۰/۴۶۵ درصد) در نمونه شاهد مشاهده شد. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که غلظت های پایین سرب تاثیری بر مقدار فسفر ساقه نداشت، اما غلظت بالای سرب موجب افزایش غلظت فسفر در ساقه شد. براساس نتایج تجزیه واریانس، اثر نمونه سرب بر غلظت منیزیم ساقه در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود. بیشترین مقدار منیزیم (۰/۳۹۳ درصد) در نمونه شاهد به دست آمد و کمترین مقدار منیزیم (۰/۱۸۷ درصد) مربوط به نمونه سرب ۳۰۰ mg/L بود. با این وجود به نظر می رسد با افزایش غلظت، سرب غلظت منیزیم در ساقه کاهش پیدا نمود، اما نتایج مقایسه میانگین نشان می دهد این اختلاف معنی دار نیست.

۴.۳. ارزیابی توان گیاه سرخس در گیاه‌پالایی فلز سنگین سرب در شرایط آبی

برای ارزیابی توانمندی گیاه به‌منظور پالایش آلودگی بعد از مشخص کردن مقدار فلزات سنگین قابل استخراج در نمونه گیاهی و آب، فاکتور انتقال در جدول (۴) و فاکتور تجمع زیستی ساقه در جدول (۵) محاسبه شد.

Table 4. Values of Elemental Transfer Factor in Fern Plants under Aquatic Conditions

Lead nitrate treatment (mg/L)	Element						
	Nitrogen	Phosphorus	Potassium	Calcium	Magnesium	Iron	Lead
Witness	1.27	1.12	0.87	2.38	0.75	0.06	0.40
100	1.11	1.00	0.78	1.24	0.51	0.22	1.09
200	1.25	1.03	0.88	1.01	0.55	0.17	0.71
300	1.23	1.11	0.99	0.85	0.47	0.16	0.64

شاخص فاکتور انتقال توانایی گیاه در انتقال فلزات سنگین از برگ به اندام‌های هوایی در شرایط آبی را نشان می‌دهد. اگر این شاخص بزرگ‌تر از یک باشد، نشان می‌دهد که انتقال فلز از برگ به اندام هوایی انجام شده است و میزان تجمع عنصر در بخش هوایی بیش‌تر از برگ بوده است طبق جدول فوق گیاه سرخس توانایی انتقال عناصر نیتروژن، فسفر و کلسیم را دارد، اما قادر به انتقال فلزی همانند سرب از برگ به ساقه نیست. همچنین طبق جدول (۵) گیاه سرخس توانایی استخراج فلزاتی چون آهن و سرب را دارد و این گیاه از توانایی لازم برای گیاه‌پالایی فلز سرب برخوردار است.

Table 5. Bioconcentration Factor for the stem under aqueous conditions

Lead nitrate treatment (mg/L)	Element						
	Nitrogen	Phosphorus	Potassium	Calcium	Magnesium	Iron	Lead
Witness	22.33	191.89	93.19	581.67	130.83	314.30	198.21
100	22.36	218.78	88.60	727.78	160.00	326.25	201.19
200	25.93	223.78	85.11	1328.33	205.00	361.26	154.16
300	18.52	354.50	84.30	913.33	133.33	340.20	187.64

۵.۳. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین اثر سرب بر خصوصیات رویشی سرخس در شرایط آبی

نتایج تجزیه واریانس اثر نمونه سرب بر صفات رویشی گیاه سرخس در شرایط آبی در جدول (۶) ارائه شده است. نتایج حاصل نشان داد که اثر نمونه سرب بر طول برگ، وزن خشک برگ و سطح برگ در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. همچنین نمونه سرب بر طول ساقه، وزن تر ساقه، وزن تر برگ و وزن خشک برگ در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است.

Table 6. Results of analysis of variance of the impact of lead on the vegetative characteristics of fern in water conditions

Sources of changes	df	Mean Square						
		Leaf length (cm)	Stem length (cm)	Leaf fresh weight (g)	Stem fresh weight (g)	Leaf dry weight (g)	Stem dry weight (g)	Leaf area (cm ²)
Treatment	3	47.824*	182.978**	2.053**	4.232**	0.001**	0.025*	2060.585*
Error	16	50.160	169.364	1.115	2.326	0.001	0.029	2877.224
Coefficient of Variation (%)		15.30	17.56	31.48	16.86	23.75	18.778	24.68

ns, * and **: are non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

براساس نتایج این پژوهش، رابطه مثبت یا منفی معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد بین غلظت فلز سرب در برگ و ساقه با صفات رویشی گیاه سرخس مشاهده نشد. این یافته نشان می‌دهد که غلظت‌های سرب به‌کاررفته در این پژوهش، اثر قابل‌توجهی بر گیاه سرخس نداشته است. این نتیجه با استفاده از اعداد حاصل از فاکتورهای انتقال و تجمع زیستی نیز قابل‌توجه است. بنابراین، گیاه سرخس در برابر این میزان سرب در آب مقاوم بوده و یا به‌عبارت بهتر، مقادیر سرب تا حد ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در آب، تأثیری بر طول و وزن برگ و ساقه نداشته است. همچنین، مقایسه داده‌های مربوط به مقادیر عناصر در برگ و ساقه نشان داد که با افزایش غلظت سرب در برگ، مقادیر آهن، سدیم و سرب در

ساقه کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، یک رابطه منفی بین مقدار سرب موجود در برگ و مقدار سرب در ساقه وجود دارد. بنابراین، با افزایش سرب در آب، گیاه سرخس سرب را در برگ تجمع داده و از انتقال آن به ساقه جلوگیری می‌کند. این رابطه بین غلظت سرب در برگ و غلظت آهن در ساقه نیز بیانگر این است که افزایش سرب در برگ، مانع از انتقال آهن از برگ به بخش هوایی گیاه شده و در نتیجه، آهن کم‌تری به ساقه انتقال می‌یابد. به عبارت دیگر، بین آهن و سرب اثر آنتاگونیستی وجود دارد. در نتیجه، می‌توان بیان داشت که گیاه سرخس از توانایی لازم برای گیاه‌پالایی فلز سرب برخوردار است.

Gul *et al.* (2020) در پژوهش خود سرب را مانع جذب عناصری مانند آهن از طریق ممانعت از ورود و یا تشکیل پیوند با ناقلین این عناصر شده دانسته که در نهایت مانع جذب آن توسط برگ و برگ شده است. یافته فوق با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت. در تشریح گیاه‌پالایی فلز سرب باید بیان داشت که این فرایند از طریق برگ‌هایش اتفاق می‌افتد. برگ‌ها دارای سلول‌های جذبی است که توانایی جذب یون‌های سرب را دارند.

Testa *et al.* (2023) و Shen *et al.* (2022) در پژوهش خود بیان داشتند که تجمع سرب در بخش‌های هوایی گیاه تجمع می‌یابد. این بخش‌ها شامل ساقه، برگ‌ها و سایر اجزای هوایی گیاه می‌شوند. سرب می‌تواند در سلول‌های این اجزا ذخیره شود و یا به صورت آزاد در داخل فضای خلوص هوایی گیاه حضور داشته باشد. تجمع سرب در این بخش‌ها می‌تواند به علت فعالیت سلول‌های جذبی و ذخیره‌کننده گیاه، تجمع سرب در فضای خلوص هوایی در اثر ترشح و تراوش و ترکیب سرب با ترکیبات دیگری مانند پروتئین‌ها یا سایر ذخایر گیاهی رخ دهد که این یافته با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت. Simmer and Schnoor (2022) در پژوهش خود به این نتیجه رسید که سرب که در بخش‌های هوایی گیاه تجمع کرده است، در اجزای مختلف گیاهی ذخیره می‌شود. سرب می‌تواند به صورت محلول در سلول‌ها ذخیره شود، به عنوان مثال، در واکوئل‌ها که ذخیره‌گاه‌های سلولی هستند. همچنین، سرب می‌تواند به صورت آزاد در فضای خلوص سلول‌ها حضور داشته باشد یا با ترکیب با ترکیبات گیاهی مانند فیتات‌ها، سیترات‌ها، پکتین‌ها و سایر ترکیبات آلی در سلول‌ها ترسیب شود. این ذخیره سرب در اجزای گیاهی می‌تواند به عنوان مکانیسم دفاعی در برابر سموم و یا به عنوان نتیجه بیش‌فعالی و غلبه بر فرایندهای دفع سرب در گیاه رخ دهد که این یافته با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت. همچنین Sidhu *et al.* (2016)، Khan *et al.* (2016)، Ashraf *et al.* (2017) و Tang *et al.* (2017) نیز در پژوهش خود گزارش کردند که با افزایش غلظت سرب در محیط برگ تجمع سرب در برگ گیاه افزایش یافت. بررسی مقدار جذب آهن در برگ گیاه سرخس نشان داد که با افزایش غلظت سرب در آب، مقدار جذب آهن در برگ افزایش یافت. همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد که با افزایش غلظت سرب در آب، غلظت نیتروژن در برگ و ساقه کاهش یافت.

Pidlisnyuk *et al.* (2019) در پژوهش خود بیان کردند که ساقه‌ها و برگ‌های گیاهان توانایی جذب فلزات سنگین را دارند. فلزات سرب جذب‌شده به عنوان یون‌های محلول در سیستم رویشی گیاه عمل می‌کنند و سپس به ساقه و برگ گیاه منتقل شده و در آنجا تجمع می‌یابند. این اندام‌ها قادر به انجام فرایند گیاه‌پالایی فلزات سنگین هستند، به این معنا که می‌توانند فلزات را در بافت‌های خود تجمع و ذخیره کنند. این فرایند به کاهش میزان فلز سرب موجود در آب کمک کرده و در نتیجه به تصفیه منابع آبی یاری می‌رساند.

همچنین در این پژوهش، برای ارزیابی توانایی گیاهان و معرفی آن‌ها به منظور پالایش آلودگی، پس از تعیین مقدار فلزات سنگین قابل استخراج در نمونه‌های گیاهی و آب، معمولاً از دو فاکتور انتقال و فاکتور تجمع زیستی در برگ و ساقه استفاده می‌شود. براساس نتایج محاسبه فاکتور انتقال، گیاه سرخس توانایی لازم برای انتقال سرب از برگ به ساقه را دارد و این رفتار به طور واضح‌تری با افزایش غلظت سرب در آب نمایان می‌شود.

Farnezi et al. (2022) هم در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که ساقه و برگ گیاهان از طریق سطح خارجی قادر به جذب فلز سنگین سرب از آب هستند. پس از جذب فلز سرب توسط برگ‌ها، فلزات سنگین به‌عنوان یون‌های محلول در سیستم رویشی گیاه عمل می‌کنند. این یون‌ها از طریق برگ‌ها و ساقه‌ها به ریشه‌ها منتقل می‌شوند. این انتقال می‌تواند به‌وسیله روند انتقال آب و عملکرد سیستم عروقی گیاه اتفاق بیفتد. ساقه و برگ گیاهان قادر به تجمع فلز سرب هستند. این فرایند به‌عنوان استفاده از نشانگرهای گیاهی برای تشخیص میزان آلودگی شناخته می‌شود. در این فرایند، فلز سرب به‌صورت یونی درون بافت‌های ساقه و برگ گیاه تجمع می‌یابد. این تجمع می‌تواند در بافت‌های خارجی و داخلی ساقه و برگ رخ دهد. همچنین نتایج نشان داد که غلظت سرب برگ بیش‌تر از بخش هوایی بود این امر نشان‌دهنده توانایی قابل‌توجه بخش برگ در ذخیره و انباشت سرب و مقاومت گیاه در انتقال سرب از برگ به اندام هوایی است.

Nojabae et al. (2017) بیان کردند که یکی از دلایل تحمل نسبی گیاهان نسبت به مقادیر سرب، تشکیل ترکیبات نامحلول پیروفسفات در دیواره سلولی است که مانع از انتقال این عنصر به اندام‌های هوایی و بخش‌های دیگر می‌شود. این امر نشان‌دهنده نقش برگ‌ها در نگهداری سرب اضافی است. پژوهش‌گران، راه‌های متعددی را برای محدود کردن انتقال سرب از برگ به اندام‌های هوایی بیان کرده‌اند که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد؛ جلوگیری از تحرک سرب از طریق پکتین‌های دارای بار منفی در دیواره سلولی، رسوب کردن سرب در فضاهای بین‌سلولی به‌صورت نمک‌های نامحلول سرب، تجمع سرب در غشای پلاسمایی و دفع سرب از طریق پروتئین‌های انتقال‌دهنده در سلول‌های پوست برگ به بیرون از سلول. براساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش، با افزایش غلظت سرب، اثر نمونه سرب بر طول برگ، وزن خشک برگ و سطح برگ در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد. همچنین اثر نمونه سرب بر طول ساقه، وزن تر ساقه، وزن تر برگ و وزن خشک برگ در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که طول برگ، طول ساقه، وزن تر برگ، وزن تر ساقه و وزن خشک ساقه در گیاهان تحت تأثیر نمونه سرب نسبت به نمونه شاهد کاهش پیدا کرده است. این امر می‌تواند به‌دلیل اثر سمی سرب بر گیاه باشد. کاهش وزن خشک و تر در اثر افزایش غلظت سرب، احتمالاً مربوط به اثر منفی سرب بر متابولیسم گیاه است. سمیت سرب موجب ایجاد تنش اکسیداتیو و از بین رفتن آمینواسیدها، پروتئین‌ها، نوکلئیک‌اسیدها و تحریک پراکسیداسیون لیپیدها می‌شود. سرب همچنین موجب کاهش فتوسنتز در گیاهان می‌شود که دلیل آن می‌تواند به تغییر شکل کلروپلاست، جلوگیری از سنتز کلروفیل، ممانعت از انتقال الکترون، جلوگیری از فعالیت آنزیم‌های چرخه کربن و کمبود دی‌اکسیدکربن به‌دلیل بسته‌شدن روزنه‌ها مربوط باشد. به‌طور کلی، می‌توان بیان کرد که یون‌های سرب از طریق برهم‌زدن تعادل آبی، باعث کمبود آب می‌شوند و این مهم‌ترین دلیل برای کاهش رشدونمو گیاه است.

در خصوص طول برگ باید اذعان کرد که تفاوت در نرخ رشد این بخش از گیاه، به‌عنوان شاخصی مهم از مقاومت گیاه در برابر فلزات سنگین به‌شمار می‌آید. از آنجاکه برگ‌های گیاهان نخستین نقطه تماس با عوامل سمی ناشی از فلزات هستند، زمانی که گیاه در معرض نمونه‌های مختلف سرب قرار می‌گیرد، کاهش طول برگ نسبت به رشد اندام‌های هوایی بیش‌تر نمایان می‌شود. بر پایه مطالعات انجام‌شده، این کاهش در رشد برگ ممکن است ناشی از آسیب به دیواره سلولی تحت تأثیر تنش ناشی از فلز سنگین یا تأثیر مستقیم تنش سرب بر هسته سلولی باشد.

از نظر وزن تر و خشک در برگ و ساقه باید گفت که مطابق با نتایج پژوهش حاضر، در تمامی نمونه‌ها وزن تر برگ نسبت به شاهد کاهش یافت. این یافته با نتایج پژوهش Zaier et al. (2010) مطابق داشت، زیرا این پژوهش‌گران هم گزارش کردند که افزایش غلظت فلزات سنگین در گیاه موجب کاهش جذب آب توسط برگ و یا کاهش انتقال آب به اندام‌های هوایی می‌شود. در نتیجه فلزات سنگین بر گیاهان اثر سو داشته و باعث کاهش حجم و وزن برگ گیاهان می‌شود. سطح برگ در نمونه‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ mg/L سرب در مقایسه با نمونه شاهد تغییر معنی‌داری نداشت، اما در

نمونه نیترات سرب 300 mg/L کاهش معنی‌دار بود. نتیجه به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که سطح برگ به‌عنوان یک عامل اساسی و تأثیرگذار بر فرایندهای رشدونمو گیاه، به تنش‌های محیطی حساس است. در راستای نتایج پژوهش حاضر، کاهش زیست‌توده اندام هوایی و برگ و همچنین سطح برگ بر اثر مسمومیت سرب در گیاهان مختلفی مانند گل کلم در پژوهش (Chen et al., 2018)، گیاه بامیه (Hussain et al., 2017)، گیاه اطلسی در پژوهش Chehregani Rad et al. (2017) و سه گیاه مرتعی بنگ دانه، خار پنبه و گل گندم در پژوهش Karimi et al. (2017) گزارش شده است.

۴. نتیجه‌گیری

براساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش، به‌طور کلی آلودگی آب به سرب بر برخی صفات رویشی گیاه سرخس اثری بازدارنده داشت و موجب کاهش سطح برگ، وزن تر و همچنین وزن خشک در ساقه و برگ گردید. در صفات مورد مطالعه مشاهده گردید که مقادیر مربوط به نمونه شاهد در مقایسه با نمونه‌های سرب بیش‌تر بود. بررسی مقدار غلظت سرب در گیاه نیز نشان داد که غلظت سرب در برگ بیش‌تر از ساقه بود. آلودگی سرب همچنین باعث کاهش غلظت نیتروژن و منیزیم ساقه و برگ در مقایسه با نمونه شاهد شد. آلودگی سرب غلظت فسفر و پتاسیم ساقه را افزایش و غلظت آهن ساقه را کاهش داد. در بخش برگ، غلظت فسفر، کلسیم و آهن در نمونه سرب در مقایسه با نمونه شاهد بیش‌تر بود. اثر آلودگی سرب بر پتاسیم برگ و کلسیم ساقه معنی‌دار نبود. با توجه به سمی‌بودن عنصر سرب و اثراتی که بر گیاه می‌تواند داشته باشد، در صورتی که هدف از کشت گیاه در مناطق آلوده عدم انتقال فلزات سنگین به گیاه و در نهایت عدم ورود به زنجیره غذایی باشد، پیشنهاد می‌شود از گیاه سرخس بدین منظور استفاده شود.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)
2. Calorimetry
3. Graphite Furnace Atomic Spectroscopy (GFAAS)
4. Transfer Factor (TF)
5. Bioconcentration Factor (BCF)
6. Duncan's Multiple range test

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

1. Ansari, A. A., Naeem, M., Gill, S. S., & AlZuaibr, F. M. (2020). Phytoremediation of contaminated waters: An eco-friendly technology based on aquatic macrophytes application. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 46(4), 371-376.
2. Ashraf, U., Hussain, S., Anjum, S. A., Abbas, F., Tanveer, M., Noor, M. A., & Tang, X. (2017). Alterations in growth, oxidative damage, and metal uptake of five aromatic rice cultivars under lead toxicity. *Plant physiology and biochemistry*, 115, 461-471.
3. Bhat, S.A., Bashir, O., Haq, S.A.U., Amin, T., Rafiq, A., Ali, M., Américo-Pinheiro, J.H.P. and Sher, F. (2022). Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. *Chemosphere*, 303, 134788.
4. Cetin, M., & Jawed, A. A. (2024). Variation of Ba concentrations in some plants grown in Pakistan depending on traffic density. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(3), 3785-3791.
5. Chanu, L. B., & Gupta, A. (2016). Phytoremediation of lead using *Ipomoea aquatica* Forsk. in hydroponics solution. *Chemosphere*, 156, 407-411.
6. Chehregani Rad, A., Farzan, S., & Shirkhani, Z. (2017). Effect of lead treatment on some morphological

- and physiological parameters of *Petunia hybrida* L.. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 30(1), 47-57.
7. Chen, Z., Yang, B., Hao, Z., Zhu, J., Zhang, Y., & Xu, T. (2018). Exogenous hydrogen sulfide ameliorates seed germination and seedling growth of cauliflower under lead stress and its antioxidant role. *Journal of Plant Growth Regulation*, 37, 5-15.
 8. Danyal, Y., Mahmood, K., Ullah, S., Rahim, A., Raheem, G., Khan, A. H., & Ullah, A. (2023). Phytoremediation of industrial effluents assisted by plant growth promoting bacteria. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(3), 5296-5311.
 9. Devi, P., & Kumar, P. (2020). Concept and application of phytoremediation in the fight of heavy metal toxicity. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 12(6), 795-804.
 10. Farnezi, M.M.D.M., Silva, E.D.B., Santos, L.L.D., Silva, A.C., Graziotti, P.H., Alleoni, L.R.F., Silva, W.C., Santos, A.A., Alves, F.A.F., Bezerra, I.R.S., & Miranda, L.C. (2022). Potential of Forage Grasses in Phytoremediation of Lead through Production of Phytoliths in Contaminated Soils. *Land*, 12(1), 62.
 11. Fierascu, I., Fierascu, R. C., Ungureanu, C., Draghiceanu, O. A., & Soare, L. C. (2021). Application of polypodiopsida class in nanotechnology-potential towards development of more effective bioactive solutions. *Antioxidants*, 10(5), 748.
 12. Ghosh, M., & Singh, S. (2005). A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products. *Asian J Energy Environ*, 6(4), 18.
 13. Gołda, S., & Korzeniowska, J. (2016). Comparison of phytoremediation potential of three grass species in soil contaminated with cadmium. *Environ. Prot. Nat. Resour*, 27(1), 8-14.
 14. Gul, I., Manzoor, M., Kallerhoff, J., & Arshad, M. (2020). Enhanced phytoremediation of lead by soil applied organic and inorganic amendments: Pb phytoavailability, accumulation and metal recovery. *Chemosphere*, 258, 127405.
 15. Hashemzadeh, F., Hasani, A., Ahmad Panahi, H., & Borghei, S. M. (2018). Evaluation of the removal of heavy metals (cadmium lead, and zinc) from aqueous solutions using multi-walled carbon nanotubes modified with chitosan. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab (in persian)*, 29, 31-41.
 16. Hashemzadeh, F., Hasani, E., & Qeyoumi, R. (2020). Evaluation of basil plant efficiency in removing mercury from aquatic environments. *Journal of Water and Wastewater*, 31, 128-137.
 17. Hashemzadeh, F., Hassani, A. H., & Ghaioimi, R. (2020). Studying Efficiency of Basil Plant in Removal of Mercury Metal from Aqueous Solution. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab (in persian)*, 31(3), 128-137. doi:10.22093/wwj.2019.186355.2869
 18. Hauptvogel, M., Kotrla, M., Prčík, M., Pauková, Ž., Kováčik, M., & Lošák, T. (2019). Phytoremediation potential of fast-growing energy plants: challenges and perspectives—a review. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(1), 505-516.
 19. Hussain, I., Siddique, A., Ashraf, M.A., Rasheed, R., Ibrahim, M., Iqbal, M., Akbar, S. and Imran, M. (2017). Does exogenous application of ascorbic acid modulate growth, photosynthetic pigments and oxidative defense in okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) under lead stress? *Acta Physiologiae Plantarum*, 39, 1-13.
 20. Izah, S. C., Chakrabarty, N., & Srivastav, A. L. (2016). A review on heavy metal concentration in potable water sources in Nigeria: human health effects and mitigating measures. *Exposure and health*, 8, 285-304.
 21. Jeevanantham, S., Saravanan, A., Hemavathy, R., Kumar, P. S., Yaashikaa, P., & Yuvaraj, D. (2019). Removal of toxic pollutants from water environment by phytoremediation: a survey on application and future prospects. *Environmental technology & innovation*, 13, 264-276.
 22. Jonoubi, P., & Karimi Limanjoubi, S. L. (2023). Phytoremediation Potential, Anatomical and Reproductive Changes of *Azolla Filiculoides* L. Fern in a Polluted Area of Anzali Wetland, Iran. Fern in a Polluted Area of Anzali Wetland, Iran.
 23. Kapepula, V. L., & Luis, P. (2024). Removal of heavy metals from wastewater using reverse osmosis. *Frontiers in Chemical Engineering*, 6, 1334816.
 24. Karimi, A., Khodaverdiloo, H., & Rasouli Sadaghiani, M. (2017). Plant tolerance, accumulation and remediation of Pb by three rangeland plant species in a calcareous soil in west Azerbaijan province. *Journal of Natural Environment*, 70(4), 907-922.
 25. Khan, A., Khan, S., Khan, M. A., Qamar, Z., & Waqas, M. (2015). The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 13772-13799.
 26. Khan, I., Iqbal, M., Ashraf, M. Y., Ashraf, M. A., & Ali, S. (2016). Organic chelants-mediated enhanced lead (Pb) uptake and accumulation is associated with higher activity of enzymatic antioxidants in spinach (*Spinacea oleracea* L.). *Journal of Hazardous Materials*, 317, 352-361.
 27. Kooijman, G., De Kreuk, M., Houtman, C., & Van Lier, J. (2020). Perspectives of coagulation/flocculation for the removal of pharmaceuticals from domestic wastewater: A critical view at experimental procedures. *Journal of Water Process Engineering*, 34, 101161.
 28. Laghlimi, M., Baghdad, B., El Hadi, H., & Bouabdli, A. (2015). Phytoremediation mechanisms of heavy metal contaminated soils: a review. *Open journal of Ecology*, 5(8), 375-388.

29. Li, R., Dong, F., Yang, G., Zhang, W., Zong, M., Nie, X., Zhou, L., Liu, J., Fan, C., & Zeng, Y. (2020). Characterization of Arsenic and Uranium Pollution Surrounding a Uranium Mine in Southwestern China and Phytoremediation Potential. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(1).
30. Lintern, G., Scarlett, A.G., Gagnon, M.M., Leeder, J., Amhet, A., Lettoof, D.C., Leshyk, V.O., Bujak, A., Bujak, J., & Grice, K. (2024). Phytoremediation Potential of *Azolla filiculoides*: Uptake and Toxicity of Seven Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) at Environmentally Relevant Water Concentrations. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 43(10), 2157-2168.
31. MacFarlane, G. R., Koller, C. E., & Blomberg, S. P. (2007). Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies. *Chemosphere*, 69(9), 1454-1464.
32. Muthusaravanan, S., Sivarajasekar, N., Vivek, J.S., Paramasivan, T., Naushad, M., Prakashmaran, J., Gayathri, V., & Al-Duaij, O.K. (2018). Phytoremediation of heavy metals: mechanisms, methods and enhancements. *Environmental chemistry letters*, 16, 1339-1359.
33. Nojabace, S. A., Ghajar Sepanlou, M., & Bahmanyar, M. A. (2017). Concentration of lead and chromium in leaves of cress and parsley in soils irrigated with contaminated water. *Journal of Water Research in Agriculture*, 31(2), 181-194.
34. Pidlisnyuk, V., Erickson, L., Stefanovska, T., Popelka, J., Hettiarachchi, G., Davis, L., & Trögl, J. (2019). Potential phytomanagement of military polluted sites and biomass production using biofuel crop *Miscanthus x giganteus*. *Environmental Pollution*, 249, 330-337.
35. Roa-Fuentes, C. A., Heino, J., Zeni, J. O., Ferraz, S., Cianciaruso, M. V., & Casatti, L. (2020). Importance of local and landscape variables on multiple facets of stream fish biodiversity in a Neotropical agroecosystem. *Hydrobiologia*, 1-18.
36. Şevik, H. (2020). Change of Cu concentration in some edible landscape plants grown in Ankara City Center. *Kastamonu university journal of engineering and sciences*, 6(1), 1-7.
37. Shah, K., & Nongkynrih, J. (2007). Metal hyperaccumulation and bioremediation. *Biologia plantarum*, 51, 618-634.
38. Shen, X., Dai, M., Yang, J., Sun, L., Tan, X., Peng, C., Ali, I., & Naz, I. (2022). A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: Performance and challenges. *Chemosphere*, 291, 132979.
39. Shrestha, P., Bellitürk, K., & Görres, J. H. (2019). Phytoremediation of heavy metal-contaminated soil by switchgrass: A comparative study utilizing different composts and coir fiber on pollution remediation, plant productivity, and nutrient leaching. *International journal of environmental research and public health*, 16(7), 1261.
40. Sidhu, G. P. S., Singh, H. P., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2016). Effect of lead on oxidative status, antioxidative response and metal accumulation in *Coronopus didymus*. *Plant physiology and biochemistry*, 105, 290-296.
41. Simmer, R. A., & Schnoor, J. L. (2022). Phytoremediation, bioaugmentation, and the plant microbiome. *Environmental science & technology*, 56(23), 16602-16610.
42. Siyar, R., Doulati Ardejani, F., Norouzi, P., Maghsoudy, S., Yavarzadeh, M., Taherdangkoo, R., & Butscher, C. (2022). Phytoremediation potential of native hyperaccumulator plants growing on heavy metal-contaminated soil of Khatunabad copper smelter and refinery, Iran. *Water*, 14(22), 3597.
43. Tang, C., Song, J., Hu, X., Hu, X., Zhao, Y., Li, B., Ou, D., & Peng, L. (2017). Exogenous spermidine enhanced Pb tolerance in *Salix matsudana* by promoting Pb accumulation in roots and spermidine, nitric oxide, and antioxidant system levels in leaves. *Ecological Engineering*, 107, 41-48.
44. Testa, G., Corinzia, S. A., Cosentino, S. L., & Ciaramella, B. R. (2023). Phytoremediation of cadmium-, lead-, and nickel-polluted soils by industrial hemp. *Agronomy*, 13(4), 995.
45. Zaier, H., Ghnaya, T., Lakhdar, A., Baioui, R., Ghabriche, R., Mnasri, M., Sghair, S., Lutts, S., & Abdelly, C. (2010). Comparative study of Pb-phytoextraction potential in *Sesuvium portulacastrum* and *Brassica juncea*: tolerance and accumulation. *Journal of Hazardous Materials*, 183(1-3), 609-615.