FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHER)

Journal of Environmental Sciences Studies (JESS)
Volume 11, Number 3, Autumn (2026)

Journal Homepage: www.jess.ir
Print ISSN: 2588-6851 Online ISSN: 2645-520X

Efficiency of rice (Oryza sativa) and wheat (Triticum aestivum) in the absorption of potential elements

Fatemeh Jaberi[1], Nasrin Gharahi[2]*, Leila Fathi[3], Elham Ghehsareh Ardistani[4], Mohsen Bahmani[5]

1. MSc Graduate, Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord
*2. Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord
3. Assistant Professor, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord
4. Associate Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord
5. Associate Professor, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord

*Email Address: nasrin.gharahi@nres.sku.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:
2026/05/13
Revised Date:
2026/06/14
Accepted Date:
2026/08/16
Published Date:
2026/10/28

Keywords:
Potentially toxic elements,
heavy metals,
soil-to-plant transfer,
bioaccumulation,
food safety

ABSTRACT

Contamination of agricultural soils with potentially toxic elements is one of the most important environmental and health issues in recent decades. Due to their high stability, relative mobility in soil, and ability to be transferred to edible parts of plants, these elements can enter the human body through the food chain and pose numerous risks. The aim of this study is to identify the type and amount of heavy metals present in agricultural soils and to investigate the ability of rice (Oryza sativa) and wheat (Triticum aestivum) plants to absorb these metals. In this study, soil samples were taken from agricultural lands located in the south and southwest of Isfahan from the surface to semi-deep soil layer in the range of 5 to 30 cm. Soil and plant samples were taken in the spring of 2024**.** After sample preparation, element concentrations were measured using standard laboratory methods and statistical indices including minimum, maximum, mean, standard deviation, and skewness were calculated. The results of soil measurements showed that the average element concentrations were in most cases within the normal range; so that in rice-cultivated soils, the average copper concentrations were 33.54, lead 22.9, and molybdenum 0.60 mg/kg. This indicates the dominance of the terrestrial origin of elements and the absence of severe pollution in the region, although spatial variations of some elements were observed. Simultaneous examination of soil and plants showed that the distribution pattern of elements is influenced by terrestrial and anthropogenic factors. Although the concentration of most heavy metals was within the permissible range, local accumulation of elements such as lead, zinc, arsenic, and strontium was observed, which could pose environmental and health risks if improper agricultural management continues. Therefore, the current status of the region is assessed as relatively favorable, but to prevent the gradual accumulation of elements, periodic monitoring of soil and plants, control of irrigation water quality, management of fertilizer consumption, and the use of sustainable methods such as phytoremediation are necessary. These measures can, while maintaining soil health, prevent the gradual transfer of heavy metals into the human food chain and help improve the safety of agricultural products

Cite this article: Fatemeh Jaberi, Nasrin Gharahi, Leila Fathi, Elham Ghehsareh Ardistani, Mohsen Bahmani (2026) Efficiency of rice (Oryza sativa) and wheat (Triticum aestivum) in the absorption of potential elements, Journal of Environmental Sciences Studies, 11(3), Pages 11404-11414.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Contamination of agricultural soils with potentially toxic elements is considered one of the most important environmental and public health issues in recent decades. These elements can enter the human food chain through plants and cause numerous health risks. The absorption and accumulation of these elements depend on the plant species and its physiological characteristics. The aim of this study was to identify the type and concentration of heavy metals present in agricultural soils and to investigate the ability of different edible vegetables to absorb these metals, as well as to propose strategies for reducing the negative environmental impacts of these pollutants and minimizing risks to human health. The aim of this study is to identify the type and amount of heavy metals present in agricultural soils and to investigate the ability of rice (Oryza sativa) and wheat (Triticum aestivum) plants to absorb these metals.

Materials and methods

In this study, soil samples were taken from agricultural lands located in the south and southwest of Isfahan from the surface to semi-deep soil layer in the range of 5 to 30 cm. Soil and plant samples were taken in the spring of 2024. After sample preparation, element concentrations were measured using standard laboratory methods and statistical indices including minimum, maximum, mean, standard deviation, and skewness were calculated.

Results and discussion

The results of soil measurements showed that the average element concentrations were in most cases within the normal range; so that in rice-cultivated soils, the average copper concentrations were 33.54, lead 22.9, and molybdenum 0.60 mg/kg. This indicates the dominance of the terrestrial origin of elements and the absence of severe pollution in the region, although spatial variations of some elements were observed. Simultaneous examination of soil and plants showed that the distribution pattern of elements is influenced by terrestrial and anthropogenic factors. Although the concentration of most heavy metals was within the permissible range, local accumulation of elements such as lead, zinc, arsenic, and strontium was observed, which could pose environmental and health risks if improper agricultural management continues

Conclusion

Investigation of plant tissues showed that element uptake strongly depends on plant type .To prevent the gradual accumulation of these elements, periodic monitoring of soil and plants, control of irrigation water quality, proper fertilizer management, and the use of sustainable methods such as phytoremediation are essential.

مجله مطالعات علوم محیط زیست
جلد ۱۱، شماره ۳
Journal Homepage: www.jess.ir
شاپای چاپی: 2588-6851 شاپای الکترونیکی: 2645-520X

FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHER)

کارایی برنج (Oryza sativa) و گندم (Triticum aestivum) در جذب عناصر بالقو ه سمی

فاطمه جابری[۱]، نسرین قرهی[۲*]، لیلا فتحی[۳]، الهام قهساره اردستانی[۴]، محسن بهمنی[۵]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
*۲- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
۳- استادیار گروه مهندسی صنایع مبلمان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
۴- دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
۵- دانشیار گروه مهندسی صنایع مبلمان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
*ایمیل نویسنده مسئول nasrin.gharahi@nres.sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۵/۰۲/۲۳
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۵/۰۳/۲۴
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۵/۰۵/۲۵
تاریخ انتشار:
۱۴۰۵/۰۸/۰۶

کلید واژه ها:
عناصر بالقوه سمی،
فلزات سنگین،
انتقال خاک به گیاه،
انباشت زیستی،
سلامت غذایی

چکیده

آلودگی خاک‌های کشاورزی به عناصر بالقوه سمی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی و بهداشتی در دهه‌های اخیر به‌شمار می‌رود. این عناصر به دلیل پایداری زیاد، تحرک‌پذیری نسبی در خاک و قابلیت انتقال به اندام‌های خوراکی گیاهان، می‌توانند از طریق زنجیره غذایی وارد بدن انسان شوند و مخاطرات متعددی ایجاد کنند. هدف این پژوهش شناسایی نوع و میزان فلزات سنگین موجود در خاک‌های زراعی و بررسی توانایی گیاه برنج (Oryza sativa) و گندم (Triticum aestivum) در جذب این فلزات است. در این مطالعه نمونه‌برداری از خاک زمین‌های کشاورزی واقع در جنوب و جنوب‌غربی اصفهان از لایه سطحی تا نیمه‌عمقی خاک در محدوده ۵ تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت شدند. نمونه های خاک و گیاه در فصل بهار ۱۴۰۲ برداشت شدند. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، غلظت عناصر با روش‌های آزمایشگاهی استاندارد اندازه‌گیری و شاخص‌های آماری شامل حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار و چولگی محاسبه شد. نتایج اندازه‌گیری در خاک نشان داد میانگین عناصر در اغلب موارد در محدوده طبیعی قرار دارد؛ به‌طوری‌که در خاک‌های زیر کشت برنج میانگین مس ۳۳/۵۴، سرب ۲۲/۹ و مولیبدن ۰/۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. این موضوع بیانگر غالب بودن منشأ زمین‌زاد عناصر و نبود آلودگی شدید منطقه است، هرچند تغییرات مکانی برخی عناصر مشاهده شد. بررسی همزمان خاک و گیاه نشان داد الگوی توزیع عناصر تحت تأثیر عوامل زمین‌زاد و انسان‌زاد قرار دارد. اگرچه غلظت اغلب فلزات سنگین در محدوده مجاز قرار داشت، اما تجمع موضعی عناصری مانند سرب، روی، آرسنیک و استرانسیوم مشاهده شد که در صورت تداوم مدیریت نامناسب کشاورزی می‌تواند خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی ایجاد کند.

ناشر: انتشارات فن پایا

DOI: 10.22034/jess.2026.581498.2454

۱-مقدمه

فلزات سنگین و شبه فلزات از آلاینده‌های محیطی خاک‌های کشاورزی هستند که می‌توانند سلامت و تولید محصول را در صورت حضور در سطوح بالا به خطر بیندازند. این فلزات به دلیل مقاومت در برابر تجزیه، در خاک انباشته شده و برای مدت طولانی باقی می‌مانند. برخی از این عناصر مانند کادمیوم، سرب، آرسنیک، جیوه و کروم بسیار سمی هستند و حتی در مقادیر کم می‌توانند به‌سلامت گیاهان آسیب برسانند. درحالی‌که برخی از فلزات برای رشد گیاهان ضروری هستند، اما تجمع بیش از حد آنها نیز می‌تواند مضر باشد. آلودگی فلزات سنگین در خاک کشاورزی یک مشکل جهانی است که به دلیل فعالیت‌های انسانی مانند صنعتی‌سازی و شهرنشینی تشدید می‌شود و در کشورهای درحال‌توسعه بیشتر دیده می‌شود (Rashid et al., 2023). منابع آلودگی به عناصر سمی بالقوه شامل استفاده از مواد شیمیایی در کشاورزی و فاضلاب‌های صنعتی است. این فلزات از طریق خاک به گیاهان منتقل می‌شوند و می‌توانند به زنجیره غذایی انسان نیز راه یابند (Lin et al., 2022; Islam, 2024). مسمومیت گیاهان با فلزات سنگین می‌تواند به دلیل اختلال در فرایندهای فیزیولوژیکی، غیرفعال‌شدن آنزیم‌ها، مسدودشدن گروه‌های عملکردی مولکول‌ها، جایگزینی عناصر ضروری و آسیب به غشاء باشد. مسیرهای ورود عناصر بالقوه سمی به بدن انسان استفاده از آب و غذا است که یکی از مسیرهای اصلی آن استفاده از سبزیجات خوراکی است که مصرف طولانی مدت آنها باعث تهدید سلامت انسان می‌شود (Mohammadi et al., 2019; Sikakwe et al., 2024). آلودگی خاک کشاورزی به‌وسیله عناصر بالقوه سمناک، تهدید جدی برای محصولات کشاورزی، و تندرستی مصرف‌کنندگان است. باتوجه‌به اهمیت حفظ سلامت عمومی و کنترل منابع آلاینده در زنجیره غذایی، به‌ویژه زمانی که محصول موردنظر گندم یا برنج باشد که سرانه مصرف بالایی را به خود اختصاص داده‌اند. ازاین‌رو به‌دست‌آوردن الگوی پراکندگی عناصر در خاک و گیاه، بررسی انتقال عناصر از خاک به زیست‌توده گیاهی، و یافتن آلودگی‌های عنصری احتمالی در سبزیجات خوراکی از مهم‌ترین اهداف مطالعه سبزیجات کشت شده در یک منطقه است. موضوع نگران‌کننده زمانی است که بخش زیادی از این فلزات از طریق گیاهانی که به‌صورت روزمره استفاده می‌شود. در واقع، گیاهان به‌عنوان اولین حلقه زنجیره غذایی، مستقیماً در معرض جذب این عناصر از خاک قرار دارند و همین مسأله می‌تواند سلامت انسان را در معرض خطر قرار دهد (Islam et al., 2020; Clemens et al., 2022). مطالعات اخیر در ایران و سایر کشورها نشان می‌دهد برخی از گیاهان خوراکی، در مناطقی که خاک آن‌ها به دلایل مختلف دچار آلودگی است، مقادیر قابل‌توجهی از این عناصر را جذب می‌کنند. این موضوع می‌تواند پیامدهای خطرناکی برای سلامت مصرف‌کنندگان داشته باشد؛ چرا که فلزاتی مانند کادمیوم، سرب و آرسنیک، به‌شدت سمی هستند و در درازمدت می‌توانند موجب بروز بیماری‌هایی نظیر سرطان، مشکلات کلیوی و اختلالات عصبی شوند (Genchi et al., 2020a; Genchi et al., 2020b; WHO, 2021; Tchounwou et al., 2020). از همین رو، لازم است پژوهش‌هایی انجام شود که به‌طور مشخص، میزان جذب این فلزات را در گونه‌های خوراکی بررسی کند و گیاهانی را که هم مصرف غذایی دارند و هم می‌توانند در مدیریت خاک‌های آلوده نقش داشته باشند، شناسایی کند. هدف این پژوهش شناسایی نوع و میزان فلزات سنگین موجود در خاک‌های زراعی و بررسی توانایی گیاه گندم (Triticum aestivum) و برنج (Oryza sativa) در جذب این فلزات، راهکارهایی برای کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی این آلاینده‌ها و کاهش خطرات مرتبط با سلامت انسان است.

۲-روش انجام تحقیق

در مرحله نخست نمونه‌برداری، تلاش شد زمین‌های کشاورزی واقع در جنوب و جنوب‌غربی اصفهان به‌صورت جامع و بدون ایجاد نقاط کور پوشش داده شود تا تمامی تغییرات مکانی و ناهمگونی‌های احتمالی در منطقه منعکس گردد. برای این منظور، محل‌های نمونه‌برداری خاک به شکلی انتخاب شدند که از یک‌سو، پراکندگی مناسب جغرافیایی در سطح منطقه برقرار باشد و از سوی دیگر، نمونه‌ها از مکان‌هایی برداشت شوند که مستقیماً تحت تأثیر فعالیت‌های انسان‌زاد نظیر تخلیه فاضلاب، محل انباشت زباله، مجاورت کارگاه‌های صنعتی یا مسیرهای عبور وسایل نقلیه سنگین نباشند. این رویکرد تضمین می‌کند که داده‌های به‌دست‌آمده بیشتر معرف شرایط طبیعی منطقه بوده و اثرگذاری عوامل بیرونی حداقل باشد. از نظر عمق نمونه‌برداری، تمامی نمونه‌های خاک زیر پوشش گیاه برنج و گندم از لایه سطحی تا نیمه‌عمقی خاک یعنی در محدوده ۵ تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت شدند. انتخاب این عمق به این دلیل است که بخش عمده جذب عناصر غذایی و همچنین تجمع آلاینده‌ها معمولاً در همین لایه‌ها اتفاق می‌افتد. عمق کمتر از پنج سانتی‌متر ممکن است تحت تأثیر آلودگی‌های سطحی موقت قرار گیرد و عمق بیشتر از ۳۰ سانتی‌متر معمولاً کمتر در تعامل مستقیم با ریشه‌های فعال گیاهان زراعی است؛ بنابراین انتخاب عمق ۵ تا ۳۰ سانتی‌متر استانداردترین محدوده برای پژوهش‌های آلودگی محسوب می‌شود.برای برداشت نمونه‌های خاک، از بیلچه فولادی ضدزنگ استفاده شد. انتخاب این ابزار به دلیل جلوگیری از هرگونه آلودگی یا ورود فلزات اضافی به نمونه‌ها صورت گرفت، زیرا ابزارهای آهنی یا رنگ‌شده ممکن است در تماس با خاک، عناصر فلزی را به نمونه منتقل کرده و غلظت‌های اندازه‌گیری‌شده را تحت تأثیر قرار دهند. استفاده از ابزارهای استریل، تمیز و فاقد پوشش رنگی از اصول استاندارد نمونه‌برداری در مطالعات ژئوشیمی و محیط‌زیست است. پس از برداشت، نمونه‌های خاک در کیسه‌های پلاستیکی ضخیم و مقاوم قرار داده شدند. این کیسه‌ها مانع نفوذ رطوبت و تبادل هوا بوده و از تماس نمونه با نور مستقیم خورشید جلوگیری می‌کردند. نگهداری نمونه‌ها در شرایط به‌دور از نور و جریان هوا، از اکسیداسیون، تبخیر رطوبت، تجزیه مواد آلی یا هرگونه تغییر شیمیایی ناخواسته جلوگیری می‌کند. تمام نمونه‌ها بلافاصله کدگذاری شدند تا امکان ردیابی و تحلیل صحیح داده‌ها فراهم باشد.مرحله

آماده‌سازی نمونه‌ها در آزمایشگاه شامل خشک‌کردن، همگن‌سازی و عبور دادن نمونه‌ها از غربال استاندارد بود. در این مطالعه، نمونه‌ها پس از خشک شدن هوازی، از الک فولادی ضدزنگ با مش ۴۳ میکرون عبور داده شدند. استفاده از غربال با اندازه روزنه مشخص باعث می‌شود اندازه ذرات خاک یکنواخت شده و عوامل مربوط به اختلاف اندازه دانه‌ها در نتایج آزمایشگاهی اثر نگذارد. همچنین غربال فولادی ضدزنگ از آلودگی فلزی جلوگیری می‌کند و برای آماده‌سازی نمونه‌ها در مطالعات عناصر کمیاب مناسب است. در نهایت، تمامی نمونه‌ها برای سنجش غلظت عناصر مورد نظر، به روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) تجزیه شدند. این روش یکی از دقیق‌ترین و حساس‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری عناصر کم‌مقدار و آثار در حد ppb و ppt است و امکان شناسایی طیف گسترده‌ای از عناصر را به‌طور همزمان فراهم می‌آورد. انتخاب روش ICP-MS به دلیل حساسیت بالا، سرعت عملکرد، دقت مناسب و توانایی تشخیص عناصر با غلظت‌های بسیار پایین کاملاً با ماهیت مطالعه همخوان است.یکی از مهم‌ترین ملاحظات در این مطالعه، انتخاب صحیح گونه‌های گیاهی و تعیین اندام مناسب برای نمونه‌برداری بود؛ زیرا دقت و صحت نتایج تا حد زیادی به این انتخاب اولیه وابسته بود. بر این اساس، در زمین‌های کشاورزی واقع در جنوب و جنوب‌غربی اصفهان، یک شبکه نمونه‌برداری دقیق و بهینه با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناختی منطقه طراحی و پیاده‌سازی شد. پیش از آغاز نمونه‌برداری اصلی، یک بازدید مقدماتی جهت شناسایی تقریبی فراوانی، پراکندگی و وضعیت رشد گونه‌های گیاهی منتخب انجام گرفت. پس از این مرحله، نمونه‌برداری پراکنده از گونه‌های زراعی برنج و گندم به‌منظور بررسی غلظت عناصر بالقوه سمی در اندام‌های خوراکی گیاهان انجام شد. معیارهای انتخاب این گونه‌ها شامل طول دوره رشد، توانایی جذب و انتقال عناصر، اطلاعات حاصل از مطالعات پیشین و میزان مصرف بخش‌های مختلف گیاه توسط انسان بود.

- **نمونه برداری و آماده‌سازی نمونه گیاهی**

با توجه به اینکه عناصر شیمیایی در زمان‌های مختلف سال در اندام‌های گوناگون گیاه تجمع می‌یافتند، انتخاب فصل نمونه‌برداری اهمیت ویژه‌ای داشت. بر اساس اصول جابه‌جایی عناصر در گیاه و همچنین گزارش‌های پیشین (علی‌پور، ۱۳۶۵)، فصل بهار به‌عنوان مناسب‌ترین زمان برای برداشت نمونه‌ها انتخاب شد.نمونه های خاک و گیاه در فصل بهار ۱۴۰۲ برداشت شدند. پس از برداشت، نمونه‌های گیاهی در کیسه‌های پلاستیکی روشن قرار داده شدند. برای جلوگیری از فساد ناشی از گرما و رطوبت، درِ کیسه‌ها تا زمان انتقال به آزمایشگاه بسته نشد. در آزمایشگاه، مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها شامل شست‌وشوی اولیه با آب مقطر و آب دوبار تقطیر، خشک‌کردن در دمای کنترل‌شده، و جداسازی اندام‌ها (از جمله تفکیک دانه از سایر بخش‌ها، جدا کردن برگ‌های خشک از ساقه‌ها و جداسازی ریشه از اندام‌های هوایی) انجام گرفت.در نهایت دانه گیاه، پس از آماده‌سازی به آزمایشگاه تخصصی ارسال شدند تا تجزیه عنصری به روش ICP-MS بر روی آنها انجام گیرد. در نهایت، داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه عناصر در دانه گیاهی با استفاده از نرم‌افزار اکسل تحلیل شد.

۳- نتایج

- **بررسی فلزات سنگین اندازه گیری شده در خاک**

بر اساس داده‌های حاصل از ۱۰ نمونه خاک از اراضی زیر کشت برنج، نتایج آماری عناصر مورد بررسی شامل میانگین، انحراف معیار، چولگی و کشیدگی در جدول ۱ ارائه شده است. مقادیر میانگین نشان می‌دهد که بیشترین غلظت مربوط به عنصرآهن Fe)) با میانگین ۲/۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین مقدار متعلق به عنصر فسفر (P) با میانگین ۰/۰۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. عناصر روی (Zn)، نیکل (Ni) و کروم (Cr) نیز دارای میانگین‌های نسبتاً بالایی هستند که نشانگر حضور طبیعی این عناصر در خاک و احتمالاً تأثیر مواد مادری سنگی منطقه است. میانگین غلظت عناصر مس (Cu) و سرب (Pb) به ترتیب برابر با ۳۳/۵۴ و ۲۲/۸۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست‌آمده است. این مقادیر و نشان‌دهنده نبود آلودگی شدید است؛ بااین‌حال، به دلیل چولگی مثبت بالا (به ترتیب ۳/۲ و ۲/۴۹)، به نظر می‌رسد که توزیع این دو عنصر در منطقه یکنواخت نبوده و احتمالاً در برخی نقاط غلظت‌های غیرعادی مشاهده می‌شود.در مقایسه با حدود مجاز ارائه‌شده توسط سازمان FAO/WHO (به ترتیب ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) پایین‌تر بوده چنین الگوهایی معمولاً ناشی از مصرف مداوم کودها و سموم شیمیایی حاوی فلزات سنگین یا فعالیت‌های انسانی موضعی مانند سوزاندن بقایای گیاهی و تردد ماشین‌آلات کشاورزی است. عنصر روی (Zn) با میانگین ۸۷/۸۶ و انحراف معیار ۱۶/۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم، تغییرپذیری متوسطی را در نمونه‌ها نشان می‌دهد (چولگی ۰/۷۹ و کشیدگی ۱/۰۳)، که بیانگر توزیع نسبتاً نرمال این عنصر در خاک است.عنصر نیکل (Ni) نیز با میانگین ۶۸/۷۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کشیدگی کم (۱/۰۱)، در محدوده طبیعی خاک‌های زراعی قرار دارد. عنصر کبالت (Co) با میانگین ۱۵/۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم دارای توزیع متعادل و چولگی اندک است (۰/۵۵)، که حاکی از پایداری غلظت آن در منطقه می‌باشد.

جدول ۱ - مقدار فلزات سنگین در خاک مربوط به اراضی زیرکشت برنج (Oryza sativa)

عنصر	حداقل	حداکثر	انحراف معیار ± میانگین	چولگی	کشیدگی
Mo	۰/۳۳۰	۰/۹۷۰	۰/۶۰۳ ± ۰/۱۵۵	۰/۹۹۱	۰/۸۶۸
Cu	۲۴/۲۴۰	۶۷/۳۱۰	۳۳/۵۴ ± ۶/۸۴	۳/۲۰	۱۶/۱۲
Pb	۱۴/۲۸۰	۴۹/۵۶۰	۲۲/۸۷ ± ۵/۸۵	۲/۴۹	۱۰/۸۶۵
Zn	۶۴/۲۰۰	۱۳۶/۴۰۰	۸۷/۸۶ ± ۱۶/۲۷	۰/۷۹	۱/۰۳
Ni	۵۶/۸۰۰	۸۸/۶۰۰	۶۸/۷۶ ± ۷/۴۳	۰/۵۷	۱/۰۱
Co	۱۲/۰	۲۰/۱۰۰	۱۵/۲۶ ± ۱/۸۴	۰/۵۵	۰/۸۳
Mn	۳۹۷	۷۶۱	۶۰۳ ± ۸۰/۷۴	−۰/۲۲۶	۰/۰۴۲
Fe	۲/۵۴۰	۳/۵۶۰	۲/۹۲ ± ۰/۲۵	۱/۰۶	۰/۶۹۰
As	۵/۴۰۰	۱۵/۹۰۰	۱۰/۳۸ ± ۲/۶۰	۰/۰۵۶	−۰/۴
Sr	۲۲۱	۶۴۷	۴۳۰/۷ ± ۱۰۴/۲	−۰/۳	−۰/۲
Cd	۰/۲۶۰	۰/۵۳۰	۰/۳۳۶ ± ۰/۰۷۶	۱/۰۷۳	۰/۱۳۷
P	۰/۰۵۱	۰/۱۸۰	۰/۰۹۸ ± ۰/۰۳۰	۰/۳۸۹	۰/۳۱۱
Cr	۷۵/۰۰	۱۰۹/۰	۸۹/۹۲ ± ۷/۷۰	۰/۰۹	۰/۰۶
Mg	۱/۳۱۰	۲/۲۸۰	۱/۶۶۷ ± ۰/۱۹۰	۱/۳۳۱	۲/۴۴۱
Ti	۰/۲۷۰	۰/۳۴۵	۰/۳۰۲ ± ۰/۰۲۱	۰/۳۱۳	−۰/۶۲۵
S	۰/۰۴۰	۰/۲۴۰	۰/۰۷۰ ± ۰/۰۵۶	۲/۴۳۱	۵/۱۸۹

در میان عناصر مورد بررسی، منگنز (Mn) با میانگین ۶۰۳و چولگی منفی اندک (۰/۲۲۶-) از توزیعی تقریباً متقارن برخوردار است و غلظت آن در محدوده طبیعی خاک‌های کشاورزی قرار دارد. عنصرآهن (Fe)که از عناصر پرتحرک و ضروری برای رشد گیاهان است، با میانگین ۲/۹۳۰ و چولگی .۱/۰۶، نشان‌دهنده حضور طبیعی در خاک و غلظت نسبتاً بالا اما غیرآلوده‌کننده است. عنصر آرسنیک (As) با میانگین ۱۰/۳۸ و چولگی نزدیک به صفر (۰/۰۵)، نشان‌دهنده توزیع نسبتاً نرمال در نمونه‌ها است. با این حال، مقدار میانگین آن در مقایسه با محدوده طبیعی خاک‌های غیرآلوده (معمولاً کمتر از ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) اندکی بالاتر است، که می‌تواند ناشی از کاربرد کودهای فسفاته یا آبیاری با آب آلوده باشد. این موضوع از منظر ایمنی غذایی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا آرسنیک قابلیت انتقال به دانه برنج را دارد. عنصر کادمیوم (Cd) با میانگین ۰/۳۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و چولگی مثبت (۱/۰۷۳) در محدوده پایین قرار دارد و از حد مجاز جهانی (۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) کمتر است، که نشان‌دهنده نبود آلودگی خطرناک از این فلز است. عنصر کروم (Cr) با میانگین ۸۹/۹۲ و کشیدگی پایین (۰/۰۶) توزیعی تقریباً نرمال داشته و در محدوده غلظت‌های طبیعی خاک‌های با منشأ سنگی مشابه قرار دارد. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه ۱۰ نمونه‌های خاک مربوط به اراضی زیرکشت گیاه گندم، شاخص‌های آماری عناصر شامل حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار در جدول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲- مقدار فلزات سنگین در خاک اراضی زیر کشت گیاه گندم (Triticum aestivum)

عنصر	حداقل	حداکثر	انحراف معیار ± میانگین	چولگی	کشیدگی
Mo	۰/۴۲۰	۱/۷۹۰	۰/۰±۴۲۶/۹۵۷	۰/۶۲۱	۰/۲۹۲
Cu	۲۷/۱۳۰	۵۸/۱۵۰	۳۵/۵۷۹ ± ۹/۵۸۰	۱/۶۹۴	۲/۹۰۸
Pb	۱۵/۷۹۰	۱۱۱/۰۰	۳۱/۵۲۲ ± ۲۸/۳۲۴	۲/۹۹۶	۹/۲۴۸
Zn	۶۹/۶۰۰	۱۹۰/۳۰۰	۹۹/۰۱۰ ± ۳۴/۵۶۲	۲/۳۶۵	۶/۵۳۳
Ni	۵۳/۰۰	۷۸/۵۰۰	۶۴/۶۶۰ ± ۹/۲۹۱	-۰/۰۰۳	-۱/۳۹۲
Co	۱۲/۰۰	۱۷/۰۰	۱۴/۴۷۰ ± ۱/۷۴۶	-۰/۳۲۱	-۱/۲۲۲
Mn	۵۶۸/۰۰	۷۹۶/۰۰	۶۵۵/۳۰۰ ± ۷۰/۱۰۳	۰/۷۳۱	۰/۵۶۰
Fe	۲/۵۴۰	۳/۴۷۰	۲/۹۰۳ ± ۰/۲۹۱	۰/۵۳۰	۰/۰۹۵
As	۷/۷۰۰	۱۷/۹۰۰	۱۲/۳۹۰ ± ۳/۱۹۶	-۰/۰۳۸	-۰/۱۸۹
Sr	۳۹۵/۰۰	۱۵۵۲/۰۰	۶۳۳/۲ ± ۳۴۶/۰۶۲	۲/۴۶۳	۶/۶۵۲
Cd	۰/۲۲۰	۰/۴۶۰	۰/۲۹۸ ± ۰/۰۷۳	۱/۲۵۵	۱/۷۶۹
P	۰/۰۸۰	۰/۱۲۰	۰/۰۹۵ ± ۰/۰۱۵	۰/۷۸۳	-۱/۱۳۱
Cr	۷۳/۰۰	۸۸/۰۰	۸۰/۸۰۰ ± ۵/۴۳۲	-۰/۱۱۸	-۱/۴۷۴
Mg	۱/۳۱۰	۲/۷۹۰	۱/۹۵۳ ± ۰/۴۹۹	۰/۲۲۸	-۰/۸۸۵
Ti	۰/۲۵۰	۰/۳۲۲	۰/۲۹۴ ± ۰/۰۲۷	-۰/۸۰۳	-۰/۳۱۳
S	۰/۰۷۰	۱/۰۶۰	۰/۴۵۷ ± ۰/۴۱۳	۰/۸۸۳	-۱/۱۲۳

بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه نمونه‌های زیر کشت خاک گیاه گندم، بررسی مقادیر میانگین نشان می‌دهد که بیشترین غلظت مربوط به عنصر Mn با میانگین ۶۵۵/۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. این مقدار بالا نشان‌دهنده فراوانی طبیعی منگنز در خاک‌های زراعی و نقش زمین‌زاد آن می‌باشد. پس از منگنز، Sr با میانگین ۶۳۳/۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار دارد که با توجه به انحراف معیار بالا (۳۴۶/۰۶۲)، نشان‌دهنده نوسان قابل توجه و ناهمگونی شدید غلظت آن است. غلظت Zn نیز با میانگین ۹۹/۰۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مقدار نسبتاً بالایی داشته و دامنه تغییر وسیع آن (۶۹/۶۰۰ تا ۱۹۰/۳۰۰) حاکی از توزیع غیریکنواخت این عنصر در خاک است. عنصر Cr با میانگین ۸۰/۸۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیز در سطح قابل توجهی قرار دارد و می‌تواند نشان‌دهنده حضور کانی‌های آهن‌دار یا ویژگی‌های زمین‌شیمیایی محیط باشد. در میان عناصر کم‌مقدار، Mo با میانگین ۰/۹۵۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و Cd با ۰/۲۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در محدوده طبیعی قرار دارند. با این حال، Pb با میانگین ۳۱/۵۲۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و انحراف معیار بالا (۲۸/۳۲۴) نشان‌دهنده پراکنش نامنظم و احتمال وجود نقاط با آلودگی موضعی است که می‌تواند ناشی از مصرف طولانی‌مدت کودها، سموم یا فعالیت‌های انسانی باشد. مقادیر Ni با میانگین ۶۴/۶۶۰ و Co با ۱۴/۴۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم از یکنواختی نسبی برخوردارند، زیرا انحراف معیار پایین آن‌ها بیانگر منشأ طبیعی و تثبیت‌شده این عناصر در خاک است. همچنین غلظت As با میانگین ۱۲/۳۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در محدوده طبیعی خاک‌های زراعی قرار دارد، هرچند کنترل دوره‌ای آن به دلیل قابلیت انتقال این عنصر به گیاه ضروری است. در میان عناصر ماکرو، P با میانگین ۰/۰۹۵ و S با ۰/۴۵۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار دارند که دامنه تغییر نسبتاً گسترده آن‌ها بیانگر اثرگذاری مدیریت، نوع محصول و میزان مصرف کودهای شیمیایی است. همچنین Mg با میانگین ۱/۹۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و Ti با ۰/۲۹۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در محدوده طبیعی قرار دارند. به‌طور کلی، توزیع عناصر در نمونه‌های خاک گندم از الگوی طبیعی تبعیت کرده و تجمع نگران‌کننده فلزات سنگین مشاهده نمی‌شود. با این حال، نوسانات زیاد در غلظت Sr، Pb و Zn می‌تواند نشان‌دهنده ناهمگونی در منطقه و اثر احتمالی فعالیت‌های انسانی باشد.

- **بررسی فلزات سنگین اندازه گیری شده در بافت گیاهی**

بر اساس داده‌های حاصل از اندازه‌گیری غلظت عناصر در ده نمونه‌های دانه برنج و گندم (جدول۴و۳)، شاخص‌های آماری شامل حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار، چولگی و کشیدگی برای هر عنصر بررسی شده‌اند.

جدول ۳ -مقدار فلزات سنگین در دانه برنج

عنصر	حداقل	حداکثر	میانگین ± انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
Mo	۰/۱۲	۲/۹۵	۰/۶۶۷ ± ۰/۶۷۱	۱/۹۶۴	۳/۲۱۹
Cu	۱/۱۷	۸/۰۶	۱/۴۰۶ ± ۲/۹۷۲	۱/۴۶۶	۲/۵۷۱
Pb	۰/۰۰	۱۴/۵۸	۰/۷۴۳ ±۲/۲۰۲	۵/۳۹۸	۳۳/۰۲۲
Zn	۱۲/۸۰	۱۰۱/۷۰	۲۷/۰۶ ± ۱۴/۳۷	۳/۸۳۷	۱۷/۰۵۶
Ni	۰/۰۱	۱۰/۱۰	۰/۹۴۶ ± ۱/۵۷۰	۴/۴۳۶	۲۳/۹۹۱
Co	۰/۰۰	۲/۰۰	۰/۱۶۹ ± ۰/۳۲۹	۴/۰۷۸	۲۰/۱۱۷
Mn	۹/۰۰	۱۱۸/۰۰	۲۹/۰۶ ± ۲۴/۷۹	۱/۸۲۹	۲/۸۲۶
Fe	۰/۰۰۱	۰/۶۴۴	۰/۰۳۶ ± ۰/۱۰۵	۴/۸۱۸	۲۵/۱۹۱
As	۰/۰۱	۱/۵۰	۰/۱۹۹ ± ۰/۳۲۱	۲/۵۱۱	۶/۸۸۵
Sr	۰/۰۷	۱۳۴۰/۵۰	۲۱۳/۰۳± ۴۱۴/۶	۱/۷۲۷	۱/۴۷۲
Cd	۰/۰۰۱	۰/۶۰۰	۰/۰۳۶ ± ۰/۰۹۶	۴/۵۷۷	۲۵/۰۲۳
P	۰/۱۸	۰/۴۰	۰/۲۸۱ ± ۰/۰۵۷	۰/۱۲۷	−۰/۷۳۶
Cr	۰/۰۱	۱۳/۲۰	۲/۳۱۲ ± ۱/۷۶۶	۵/۰۶۳	۳۰/۴۶۲
Mg	۰/۰۵	۱/۰۳	۰/۲۴۲ ± ۰/۲۸۶	۱/۴۹۱	۰/۶۶۰
Ti	۱۰/۰۰	۶۵/۰۰	۱۸/۴۴۰ ± ۸/۹۱	۳/۲۸۷	۱۴/۸۵۳
S	۰/۰۷	۲/۵۵	۰/۵۸۷ ± ۰/۷۷۲	۱/۴۳۴	۰/۳۴۷

در دانه برنج، بیشترین غلظت عناصر به Sr (میانگین ۲۱۳/۰۳۶ mg/kg، دامنه وسیع ۰/۰۷–۱۳۴۰/۵۰) تعلق داشت، پس از آن Mn(۲۹/۰۶۰)، Zn (۲۷/۰۶۰)، Ti(۱۸/۴۴)، Cu (۲/۹۷۲)، Cr (۲/۳۱۲) و Ni (۰/۹۴۶) عناصر سنگین مانند Pb (۰/۷۴۳)، Co (۰/۱۶۹)، Cd (۰/۰۳۶) و As (۰/۱۹۹) غلظت کم اما با چولگی مثبت بالا را نشان دادند. P متقارن‌ترین توزیع (میانگین ۰/۲۸۱) را داشت. نوسانات شدید اغلب ناشی از خاک، آب، کودها یا ویژگی‌های زمین‌شناختی است. در گندم، Sr (۱۰۳/۶۷) بیشترین میانگین را داشت، سپس Mn (۳۹/۷۷)، Zn (۳۷/۸۸)، Cu (۷/۳۵)، Mo (۱/۳۱)، Ni (۱/۰۸) ، Cr (۱/۶۲)، Mg (۰/۱۸) و S (۰/۲۹)،Fe (۰/۰۲)، Cd (۰/۰۱) و As (۰/۱۱) کمترین مقادیر را داشتند. به‌طور کلی، بیشترین میانگین غلظت عناصر در گیاه گندم به‌ترتیب متعلق به Sr، Mn و Zn است .مقادیر پایین Fe، Cd، Pb و As نشان‌دهنده نبود تجمع نگران‌کننده عناصر سنگین است. نوسانات شدید در Sr، Ni، Co و Cr بیانگر تفاوت قابل توجه در دسترسی عناصر در نمونه‌های مختلف است.

جدول ۴- مقدار فلزات سنگین در دانه گندم

عنصر	حداقل	حداکثر	میانگین ± انحراف معیار	چولگی	کشیدگی
Mo	۰/۱۹	۴/۲۲	۱/۳۱±۱/۰۳	۱/۵۶	۱/۳
Cu	۱/۹۹	۱۷/۶	۷/۳۵±۴/۲۴	۱/۴۴	۲/۱۱
Pb	۰/۰۳	۱/۱۱	۰/۲۷±۰/۳۸	۱/۶۰	۱/۰۸
Zn	۱۸/۴	۶۲/۰۰	۳۷/۸۸±۱۳/۲۹	۰/۴۹	−۰/۵۴
Ni	۰/۲	۵/۶	۱/۰۸±۱/۴۶	۲/۸۵	۸/۸۳
Co	۰/۰۰۱	۱/۳۶	۰/۲۳±۰/۴۳	۲/۰۹	۳/۵۵
Mn	۱۴/۰۰	۸۹/۰	۳۹/۷۷±۲۱/۲۲	۰/۹۱	۱/۰۲
Fe	۰/۰۰۲	۰/۰۹۲	۰/۰۲±۰/۰۳	۲/۴۵	۵/۸
As	۰/۰۱	۰/۴۰	۰/۱۱±۰/۱۳	۱/۰۰۸	−۰/۰۶
Sr	۱/۴	۴۶۵	۱۰۳/۶±۱۷۶/۵	۱/۵۱	۰/۴۶
Cd	۰/۰۰۱	۰/۰۴	۰/۰۱±۰/۰۱	۱/۱۹	۰/۶۲
P	۰/۲۳۶	۰/۴۲۴	۰/۳۳±۰/۰۵	−۰/۶۳	۰/۲۱
Cr	۱/۱۰۰	۳/۷	۱/۶۲±۰/۷	۲/۵۸	۷/۱۵
Mg	۰/۱۰	۰/۴۳	۰/۱۸±۰/۱۲	۱/۶۰	۰/۹۷
Ti	۱۴/۰	۳۴/۰	۲۰/۰۸±۵/۰۷	۱/۸۲	۴/۴۳
S	۰/۱۷	۰/۶۳	۰/۲۹±۰/۱۸	۱/۳۹	۰/۰۷

۴- نتیجه‌گیری

بررسی غلظت فلزات سنگین در خاک برنج و گندم زراعی منطقه مورد مطالعه نشان داد که الگوی توزیع عناصر تحت تأثیر ترکیبی از عوامل زمین‌زاد و انسان‌زاد قرار دارد. به‌طور کلی، مقادیر میانگین بیشتر عناصر اندازه‌گیری‌شده در خاک‌های زراعی منطقه در محدوده طبیعی و پایین‌تر از حدود مجاز بین‌المللی و ملی قرار داشت که نشان‌دهنده نبود آلودگی شدید و گسترده در منطقه است. این یافته با نتایج گزارش‌شده توسط رزمجو (۱۳۹۹) و Bhat و همکاران (۲۰۲۲) مبنی بر غالب‌بودن منشأ طبیعی عناصر در بسیاری از خاک‌های کشاورزی هم‌خوانی دارد. نتایج مشابهی توسط Kicińska و همکاران (۲۰۲۲) گزارش شده است که نقش ویژگی‌های ذاتی خاک و pH را در تحرک و فراوانی این عناصر تأیید می‌کند. یکنواختی نسبی Fe و Mn در اغلب نمونه‌ها نیز بیانگر پایداری این عناصر و نقش محدود فعالیت‌های انسانی در افزایش غلظت آن‌هاست. در مقابل، عناصر بالقوه سمی نظیر سرب، کادمیوم و روی نوسانات بیشتری را نشان دادند. هرچند میانگین غلظت Pb و Cd در خاک‌ها پایین‌تر از حدود مجاز FAO/WHO گزارش شد، اما چولگی مثبت و دامنه تغییرات وسیع این عناصر در گندم و برنج می‌تواند بیانگر وجود آلودگی‌های موضعی باشد. این الگو با یافته‌های Jalali و Meyari در غرب ایران مطابقت دارد که انتقال و تجمع موضعی فلزات سنگین را وابسته به نوع کاربری زمین، مدیریت زراعی و کیفیت آب آبیاری دانسته‌اند. آرسنیک از

جمله عناصری است که در برخی خاک‌ها، به‌ویژه در اراضی زیر کشت برنج، میانگینی نزدیک یا اندکی بالاتر از محدوده طبیعی خاک‌های غیرآلوده نشان داد. این موضوع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا آرسنیک قابلیت تحرک بالا در شرایط غرقابی خاک‌های شالیزاری دارد و می‌تواند به‌راحتی به گیاه برنج منتقل شود. نتایج این پژوهش در این زمینه با گزارش‌های Mojiri (۲۰۱۱) و همچنین Jalali و Meyari(۲۰۲۲). هم‌راستاست که نقش شرایط هیدرولوژیکی خاک و نوع محصول را در افزایش جذب آرسنیک تأیید کرده‌اند. در گیاه برنج، استرانسیم، منگنز و روی بیشترین غلظت را نشان دادند. دامنه بسیار وسیع غلظت Sr و انحراف معیار بالای آن بیانگر جذب انتخابی این عنصر و تأثیر عوامل زمین‌شناسی و کیفیت آب آبیاری است. نتایج مشابهی توسط Luthansa و همکاران (۲۰۲۱) و Lu و همکاران (۲۰۲۱) در اکوسیستم‌های ساحلی و مناطق معدنی گزارش شده است. غلظت عناصر سرب، کادمیوم و آرسنیک در بافت گیاهان به‌طور کلی پایین بوده است، با این حال وجود چولگی مثبت بالا در این عناصر نشان می‌دهد که در برخی نمونه‌ها تجمع بیشتری رخ داده است. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه غلظت اغلب فلزات سنگین در خاک و گیاهان منطقه در محدوده مجاز قرار دارد، اما نوسانات مکانی و تجمع موضعی برخی عناصر نظیر Pb، Zn، As و Sr می‌تواند در صورت تداوم مدیریت نامناسب زراعی، به افزایش ریسک زیست‌محیطی و بهداشتی منجر شود (Brahma et al., 2025). این یافته با نتایج Thakur و همکاران (۲۰۲۲) و Bhat و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد که بر ضرورت پایش مستمر خاک‌های کشاورزی و استفاده از راهکارهای پایدار نظیر گیاه‌پالایی تأکید کرده‌اند. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که وضعیت کنونی خاک‌ها و محصولات زراعی منطقه از نظر فلزات سنگین نسبتاً مطلوب است، اما به‌منظور پیشگیری از انباشت تدریجی عناصر بالقوه سمی، کنترل کیفیت آب آبیاری، مدیریت مصرف کودها و پایش دوره‌ای خاک و گیاه ضروری است. این رویکرد می‌تواند ضمن حفظ سلامت خاک، از انتقال فلزات سنگین به زنجیره غذایی انسان جلوگیری کند.

منابع

- 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 (Part 1): 134788.
- Brahma, S., Pegu, L., Saikia, B., Chintey, R., & Sonowal, D. 2025. Heavy metal contamination in vegetables and their amelioration: A review. Agricultural Reviews. https://doi.org/10.18805/ag.R-2737
- Clemens, S., & Ma, J. F. 2022. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods. Annual Review of Plant Biology, 73, 159–181. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-012911
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Carocci, A., Lauria, G., & Catalano, A. 2020a. The effects of cadmium toxicity. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(11), 3782. https://doi.org/10.3390/ijerph17113782
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. 2020b. Lead toxicity: Impact on human health. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(12), 4312. https://doi.org/10.3390/ijerph17124312
- Islam, M. S. 2024. Heavy metals in agricultural soils: Uptake by crops and human health implications. Environmental Pollution, 327, 121234. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.121234
- Islam, M. S., Ahmed, M. K., Habibullah-Al-Mamun, M., & Masunaga, S. 2020. Potential toxic elements in food crops: Uptake, bioaccumulation and human health risk assessment. Environmental Monitoring and Assessment, 192, 1–15. https://doi.org/10.1007/s10661-020-8208-7
- Jalali, M., Meyari, A. 2022. Heavy metal contents, soil-to-plant transfer factors, and associated health risks in vegetables grown in western Iran. Journal of Food Composition and Analysis, 106: 104316.
- Kicińska, A., Pomykała, R., & Izquierdo-Diaz, M. 2022. Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. European Journal of Soil Science 73(1): e13203.
- Lin, H., Wang, Z., Liu, C., and Dong, Y. 2022. Technologies for removing heavy metals from contaminated soils on farmland: A review. Chemosphere, 305: 135457.
- Lu, N., Li, G., Sun, Y., Wei, Y., He, L., and Li, Y. 2021. Phytoremediation potential of four native plants in soils contaminated with lead in a mining area. Land, 10 (11): 1129.
- Luthansa, U. M., Sulistiyaning Titah, H., and Pratikno, H. 2021. The ability of mangrove plant on lead phytoremediation at Wonorejo Estuary, Surabaya, Indonesia. Journal of Ecological Engineering, 22 (6): 268-253.
- Mohammadi, A. A., Zarei, A., Majidi, S., Ghaderpoury, A., Hashempour, Y., Saghi, M. H., & Ghaderpoori, M. 2019. Carcinogenic and non-carcinogenic health risk assessment of heavy metals in drinking water of Khorramabad, Iran. MethodsX, 6, 1642-1651.
- Mojiri, A. 2011. The potential of corn (Zea mays) for phytoremediation of soil contaminated with cadmium and lead. Journal of Biological and Environmental Sciences, 5 (13): 22-17.

- Rashid, A., Schutte, B. J., Ulery, A., Deyholos, M. K., Sanogo, S., Lehnhoff, E. A., and Beck, L. 2023. Heavy metal contamination in agricultural soil: Environmental pollutants affecting crop health. Agronomy, 13 (6): 1521.
- Sikakwe, G. U., Briggs, D. C., & Iwegbue, C. M. A. 2024. Mercury exposure and human health risks: Neurotoxicity, nephrotoxicity and developmental effects. Environmental Toxicology and Pharmacology, 105, 104345. https://doi.org/10.1016/j.etap.2024.104345
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. 2020. Heavy metal toxicity and the environment. EXS, 101, 133–164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Thakur, R., Sarvade, S., and Dwivedi, B. S. 2022. Heavy metals: Soil contamination and its remediation. AATCC Review, 10 (2): 76-59.
- World Health Organization. 2021. Mercury and health / Lead poisoning and health / Arsenic. World Health Organization. https://www.who.int
- رزمجو، ا. ۱۳۹۹. بررسی حذف فلزات سنگین از خاک‌های آلوده با تکنیک گیاه‌پالایی .تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۰:(۲) ۳۴۹-۳۴۵.