



Assessment of Soil Contamination with Lead and Cadmium Under the Influence of Urban Wastewater Application in Fields under Coriander Plants

Iran Heydari¹ | Mohamad Rahmanian² | Nafiseh Rangzan³

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran. E-mail:

iran.heidary8816@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran. E-mail:

M.rahmanian10@yahoo.com

3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Khuzestan, Iran. E-mail: rangzan@asnrukh.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Feb. 25, 2026

Revised: June. 8, 2026

Accepted: June. 27, 2026

Published online: Aug. 2026

Keywords:

Soil contamination,

Lead,

Wastewater,

Cadmium,

Coriander.

ABSTRACT

High potential of the Weiss region for agricultural production and consequently, the impact of urban wastewater and agricultural activities, such as the use of various chemical fertilizers and pesticides, on the quality of soil, plants, and ultimately human health, reveals the need to do this research. This study aimed to investigate the effect of urban wastewater on the accumulation of lead and cadmium metals in fields under coriander plants. Random soil and plant samples were taken from an area irrigated with ground water and an area irrigated with wastewater. Soil and plant samples were digested after harvesting and heavy metals were measured using an atomic absorption spectrometer. The results showed that wastewater did not have a significant effect on the accumulation of lead and cadmium metals in soil. Although the concentrations of lead and cadmium in the soil irrigated with wastewater were higher than in the control soil (soil irrigated with ground water), the average concentrations of these metals in the soil irrigated with wastewater were lower than the international standard (FAO/WHO). Also, the concentration of cadmium in plants in soil irrigated with wastewater was lower than the standard, and the concentration of lead in plants was higher than the international standard. Since the average concentration of lead in coriander in the area irrigated with wastewater is higher than the standard, in order to prevent problems and protect the health of citizens, necessary planning should be implemented to reduce heavy metals in wastewater.

Cite this article: Heydari, I., Rahmanian, M., & Zangzan, N. (2026). Assessment of Soil Contamination with Lead and Cadmium Under the Influence of Urban Wastewater Application in Fields under Coriander Plants, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (6), 1273-1288. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.411886.670108>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.411886.670108>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Today, Iran is facing a shortage of renewable water resources, and as one of the government's socio-economic policies, the optimal use of renewable resources has been emphasized, especially water recycling and reuse, groundwater recharge, and the reuse of treated human and industrial wastewater. Due to the fact that the Weiss region has a high potential for agricultural production and subsequently the impact of urban sewage and agricultural activities, such as the use of fertilizers and various chemical poisons on the quality of soil, plants and ultimately human health, it reveals the need to conduct research. This research was conducted with the aim of investigating the effect of urban wastewater on the accumulation of lead and cadmium metals in fields cultivated with coriander.

Methods

In this study, 20 soil samples were collected from different fields under coriander cultivation in the Weiss region, 15 km north of Ahvaz, which had been irrigated with urban wastewater for consecutive years. Soil samples were transported to the laboratory and tested after preparation. A soil sample from fields irrigated with groundwater was taken as a control. To prepare plant samples, we collected 20 plant samples from the fields from which soil sampling was conducted and one plant sample from the fields irrigated with groundwater from which control soil samples were collected. They were washed with distilled water, dried at 70 degrees, powdered, and stored for analysis. Soil and plant samples after harvesting were digested with a combination of acids and heavy metals were measured using an atomic absorption device. Physical and chemical properties of the soil, including soil texture by hydrometric method (Gee and Bauder, 1986), soil pH and EC in 1:2 extract (Thomas, 1996), calcium carbonate equivalent percentage by neutralizing calcium carbonate with hydrochloric acid and titrating excess acid with sodium (Loeppert and Sparks, 1996), organic carbon percentage by wet oxidation method (Nelson and Summers, 1996), available lead and cadmium content by DTPA-TEA method (Lindsey and Norwell, 1978), and total lead and cadmium content of the soil with 4 M nitric acid (Esposito et al., 1982) were measured. Finally, the obtained data were analyzed with SPSS 20 software.

Results

The results showed that wastewater had no significant effect on the accumulation of lead and cadmium metals in the soil. Although the concentration of lead and cadmium in the treated soil was higher than that of the control soil, the average concentration of these metals in the soil irrigated with wastewater was lower than the international standard (FAO/WHO). Also, the cadmium concentration of the plant in the treated soil was lower than the standard and the lead concentration of the plant was higher than the international standard. The results of soil pollution indicators showed that according to the international shale standard, the soil of the region is in the non-contaminated category.

Conclusion

In this study, the findings from comparing cadmium and lead elements in soil with international standards showed that the amount of elements was less than the standard limit. But they were higher than the control soil. Based on soil pollution indices including enrichment index, pollution factor and accumulation index, the soil of the region is in the category of non-polluted soil and the use of wastewater has not increased the lead and cadmium metals in the soil to the level of pollution. Comparing the amount of cadmium and lead in the plant with the standard values showed that the amount of cadmium was lower and the amount of lead was higher than the international standard. One of the reasons for the increase in these elements in the plant could be the use of chemical fertilizers, especially phosphate fertilizers. Since the amount of lead in the plant exceeded the standard, and given that there is a possibility that these elements enter the body through other contaminated foods, water, and air, which can overall increase the risk of endangering the health of the community, environmental considerations in this regard must be properly observed.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

The study was funded by the Yasouj University, Iran, and Grant No. 991041029.

Authorship contribution

Iran Haydari, Department of Soil Science, College of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran.

Data curation; Formal analysis; Investigation; Resources; Software; Funding acquisition; Validation; Writing - original draft.

Mohamad Rahmadian (corresponding author), Department of Soil Science, College of Agriculture,

Yasouj University, Yasouj, Iran.

Methodology; Project administration; Resources; Supervision; Writing - review & editing.

Nafiseh Rangzan, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Khuzestan, Iran

Formal analysis; Validation; Writing - original draft.

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

No artificial intelligence tools were used in the article writing process.

Data availability statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors wish to express their deep thanks and gratitude to the Vice President of Yasouj University, who kindly participated in sponsoring this work.

Ethical considerations

The authors confirm that the study was conducted in accordance with ethical principles, and no data fabrication, falsification, plagiarism, or misconduct occurred.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی آلودگی خاک به سرب و کادمیوم تحت تأثیر کاربرد فاضلاب‌های شهری در مزارع تحت کشت گیاه گشنیز

ایران حیدری^۱، محمد رحمانیان^۲✉، نفیسه رنگ‌زن^۳

۱. گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران رایانامه: iran.heidary8816@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: m.rahmanian@yu.ac.ir

۳. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، خوزستان، ایران. رایانامه:

rangzan@asnrukh.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

برخورداری منطقه ویس از پتانسیل بالا برای تولیدات کشاورزی و متعاقباً تأثیر فاضلاب‌های شهری و فعالیت‌های کشاورزی، نظیر استفاده از کودها و سموم شیمیایی مختلف روی کیفیت خاک، گیاه و نهایتاً سلامت انسان، لزوم انجام پژوهش را آشکار می‌سازد. این پژوهش با هدف بررسی اثر فاضلاب شهری بر تجمع فلزات سرب و کادمیوم مزارع گیاه گشنیز صورت گرفت. نمونه برداری از یک منطقه آبیاری شده با آب چاه و یک منطقه آبیاری شده با آب فاضلاب به صورت تصادفی از خاک و گیاه صورت گرفت. نمونه‌های خاک و گیاه بعد از برداشت هضم شدند و فلزات سنگین با استفاده از دستگاه جذب اتمی مورد سنجش قرار گرفتند. نتایج حاصل نشان داد که فاضلاب اثر قابل توجهی بر مقدار تجمع فلزات سرب و کادمیوم در خاک نداشت. هر چند غلظت سرب و کادمیوم خاک آبیاری شده با فاضلاب بیشتر از خاک شاهد (خاک آبیاری شده با آب زیرزمینی) بود، اما میانگین غلظت این فلزات در خاک آبیاری شده با فاضلاب کمتر از استاندارد بین‌المللی (FAO/WHO) بودند. همچنین غلظت کادمیوم گیاه در خاک آبیاری شده با فاضلاب کمتر از استاندارد و غلظت سرب گیاه بیشتر از استاندارد بین‌المللی بود. از آنجایی که در منطقه آبیاری شده با فاضلاب متوسط غلظت فلز سرب در گشنیز بالاتر از حد استاندارد قرار دارد، بنابراین به منظور جلوگیری از بروز مشکلات و حفظ سلامتی شهروندان، برنامه ریزی لازم جهت کاهش فلزات سنگین در فاضلاب اجرا گردد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۶

تاریخ انتشار: شهریور ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

آلودگی خاک،

سرب،

فاضلاب،

کادمیوم،

گشنیز.

استناد: حیدری، ایران؛ رحمانیان، محمد و رنگ زن، نفیسه (۱۴۰۵). ارزیابی آلودگی خاک به سرب و کادمیوم تحت تأثیر کاربرد فاضلاب‌های شهری در مزارع تحت کشت گیاه گشنیز. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۶)، ۱۲۸۸-۱۲۷۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.411886.670108>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.411886.670108>

مقدمه

امروزه کشور ایران با کمبود منابع آب تجدیدشونده مواجه است و به عنوان یکی از سیاست‌های اقتصادی-اجتماعی دولت بر استفاده بهینه از منابع تجدیدپذیر، به ویژه بازچرخانی و استفاده مجدد آب، تغذیه آب‌های زیرزمینی و استفاده مجدد از فاضلاب‌های انسانی و صنعتی تصفیه شده تأکید شده است (عطاملکی و همکاران، ۱۳۹۸؛ افخمی و همکاران، ۱۴۰۰). آلاینده‌ها از جمله عوامل مختل کننده اکوسیستم به شمار می‌روند و در این میان فلزات سنگین به دلیل اثرات فیزیولوژیکی آن‌ها بر موجودات، گیاهان و محیط زیست حائز اهمیت شناخته شده‌اند (Zahir et al., 2021; Zhang et al., 2023). فلزات سنگین به طور طبیعی در مقادیر مختلف در محیط وجود دارند. فلزات سنگین از نظر زیستی تجزیه‌ناپذیر بوده و به سهولت در سطوح سمی تجمع پیدا کرده و به شدت در محیط زیست ماندگار می‌گردند (Sharma et al., 2007; Zahir et al., 2021). در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند بخش‌های وسیعی از ایران، محدودیت‌های اقلیمی، محدودیت منابع آب، خشکسالی‌های مکرر، رشد جمعیت و توسعه دامنه فعالیت‌های انسان در بخش‌های مختلف، استفاده از منابع آبی غیرمتعارف (از جمله پساب تصفیه‌خانه‌ها) در بخش‌های مختلف به ویژه در بخش کشاورزی که عمده مصرف آب را به خود اختصاص می‌دهد، روز به روز از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شود (کابوسی، ۱۳۹۳؛ سلگی و وقار، ۱۳۹۸). این روش ممکن است بهره‌وری محصول را افزایش داده و هزینه‌های کود را کاهش داده باشد، با این حال، خطرات جدی محیط زیستی و بهداشتی مرتبط با فلزات سنگین و سایر آلاینده‌های پایدار را به همراه دارد (Othman et al., 2021; Ullah et al., 2022). برخی از فلزات سنگین مرتبط با فاضلاب صنعتی عبارتند از کادمیوم (Cd)، کروم (Cr)، سرب (Pb)، نیکل (Ni)، مس (Cu) و روی (Zn). برخی از عناصر ضروری مانند مس، روی، منگنز و آهن، ریزمغذی هستند اما وقتی مقدار آنها از مقادیر مجاز فراتر رود، سمیت ایجاد می‌کنند (Mahfooz et al., 2020). با گذشت زمان، این آلاینده‌ها در خاک تجمع می‌یابند، کیفیت خاک را کاهش می‌دهند و از طریق جذب توسط گیاهان وارد زنجیره غذایی می‌شوند و در نتیجه خطراتی را برای سلامت انسان ایجاد می‌کنند، زیرا خطرات سرطان‌زا و غیرسرطان‌زا ایجاد می‌کنند (Nawab et al., 2023a). قرار گرفتن در معرض طولانی مدت این ماده مستقیماً با اختلالات عصبی، آسیب کلیوی و انواع سرطان‌ها مرتبط است (Nawab et al., 2023b). امروزه کاربرد پساب در کشاورزی در بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایالات متحده آمریکا، کانادا، فرانسه، آلمان، مکزیک، برزیل، مصر، مراکش، اردن، عربستان سعودی، قطر، چین و ... رایج است. در کشور ایران نیز در سال‌های اخیر، به دلیل محدودیت منابع آب، افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی، صنایع و کشاورزی و همچنین توسعه و اجرای طرح‌های متعدد جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب، کاربرد پساب در اراضی کشاورزی اهمیت ویژه‌ای یافته و در اولویت‌های برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب قرار دارد (Moretti et al., 2019). این مسئله به ویژه در مناطق کلان‌شهر که رشد جمعیت و صنعتی‌شدن سریع، مسائل ناشی از فاضلاب را تشدید می‌کند، بسیار حیاتی است. شرایط اقتصادی کشاورزان اغلب آنها را مجبور می‌کند تا از فاضلاب برای فعالیت‌های کشاورزی استفاده کنند و آگاهی خود را در مورد خطرات آن برای سلامتی افزایش دهند، زیرا این روش، گزینه‌های کوددهی و کم‌هزینه‌ای را ارائه می‌دهد (Ghani et al., 2023).

به کارگیری پساب در بخش کشاورزی هر چند با مزایای زیادی توأم است اما به دلیل اینکه این گونه آب‌ها حاوی املاح مختلف، میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، فلزات سنگین و یا ترکیبات آلی و معدنی مضر دیگری می‌باشند، کاربرد بدون برنامه‌ریزی آن‌ها می‌تواند تبعات محیط زیستی بسیار نامطلوبی مانند شورشیدن خاک‌ها، تخریب ساختمان خاک، مسمومیت گیاهان و کاهش عملکرد آن‌ها، آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و شیوع بیماری‌ها را به بار بیاورد. به همین جهت به منظور جلوگیری از اثرات سوء کوتاه‌مدت و طولانی‌مدت کاربری پساب، بایستی برنامه‌ریزی‌ها و تمهیدات خاصی در نظر گرفته شود (Gatta et al., 2018).

افخمی و همکاران در سال ۲۰۲۱ در پژوهشی تحت عنوان اثر آبیاری با پساب تصفیه‌شده شهری بر انباشت سرب و کادمیوم در خاک و گیاه فلفل دلمه‌ای بیان نمودند آبیاری با پساب سبب افزایش معنی‌دار غلظت سرب و کادمیوم در خاک و در شاخه، میوه و ریشه فلفل نشد. غلظت سرب و کادمیوم در خاک و در شاخه، میوه و ریشه فلفل در محدوده غلظت مجاز و استاندارد بود. تفاوت غلظت سرب و کادمیوم در خاک پیش از کشت معنی‌دار نبود، اما در پایان دوره مطالعه، غلظت سرب در فلفل بیشتر از غلظت کادمیوم بود (افخمی و همکاران، ۱۴۰۰). آبیاری با پساب بر افزایش غلظت سرب و کادمیوم در ریشه و اندام هوایی گیاه فلفل مؤثر نبود. چاگانتی و همکاران در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی تحت عنوان اثرات آبیاری پساب شهری تصفیه‌شده بر انرژی زیستی سورگوم و کیفیت خاک بیان نمودند بازده زیست‌توده سورگوم در هیچ یک از سال‌ها تفاوت معنی‌داری بین آب‌های شیرین و فاضلاب نداشت. تفاوت در کیفیت زیست‌توده در طول زمان مشاهده شد، اما به عنوان یک نتیجه غیرمستقیم افزایش شوری و یا سدیمی خاک پس از آبیاری فاضلاب مشاهده شد. تغییرات



کیفیت خاک با افزایش شوری و سدیمی در طول زمان با آبیاری آشکار بود، اما این اثر تحت آبیاری پساب مشهود بود. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که پساب تصفیه شده می تواند با موفقیت برای رشد سورگوم با انرژی زیستی در مناطق خشک مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، شیوه های مناسب مدیریت خاک باید برای مقابله با اثرات سدیم بالا در فاضلاب وجود داشته باشد (Chaganti et al., 2020). تولید و همکاران در سال ۲۰۲۰ با بررسی ارزیابی تأثیر آبیاری طولانی مدت فاضلاب تصفیه شده بر روی خاک و محصولات زراعی در الجزایر بیان نمودند تجمع نمک ها و برخی فلزات سنگین (Hg, Cu, Ni) در برخی از افق های خاک کرت های نمونه آبیاری شد، و همچنین کاهش جمعیت های میکرو فلور خاص (باکتری های کلستریدیوم و اعضای گروه کلیفرم) وجود داشت. این نتایج نشان داد که برای جلوگیری از آلودگی احتمالی خاک و خطرات برای جمعیت های میکرو فلور، کیفیت فاضلاب تصفیه شده باید به طور منظم مطابق با استانداردهای مربوطه برای استفاده مجدد از آب بررسی شود (Touil et al., 2020). گاتا و همکاران در سال ۲۰۱۸ با مطالعه ی آبیاری با فاضلاب شهری تصفیه شده در محصول کنگر فرنگی بیان نمودند که فلزات سنگین در بخش خوراکی محصول کنگر فرنگی تجمع نمی کنند. شاخص های خطر که بر اساس مصرف سر کنگر فرنگی بود، هم برای بزرگسالان و هم برای کودکان کمتر از ۱۰،۰ باقی ماند، بنابراین نتایج نشان داد که خطرات سلامتی مربوط به فلزات سنگین مختلف قابل توجه نیست (Gatta et al., 2018).

تحقیقات زیادی پیرامون ارزیابی محیط زیستی تأثیر آبیاری فاضلاب شهری اهواز بر خاک و گیاهان اهواز از گذشته تا کنون انجام گرفته است، اما موردی که این طرح را حائز اهمیت کرده است، بررسی تخصصی تأثیر آبیاری فاضلاب شهری اهواز بر گیاه گشنیز می باشد. تمامی بخش های این گیاه، خوراکی هستند و عمدتاً برگ ها و بذر این گیاه، به عنوان سبزی و ادویه مورد استفاده هستند. با توجه به کمبود آب در ایران، حاد شدن این وضعیت به دلیل پدیده خشکسالی، مصرف بخش اعظم منابع آب در بخش کشاورزی، افزایش جمعیت جوامع شهری، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، نیاز بیشتر به تولیدات کشاورزی، وارد شدن فشار زیاد بر منابع آب موجود، توسعه ی شهرها و افزایش مصرف آب، تبدیل بخش اعظم آب مصرفی شهرها به فاضلاب، غنی بودن فاضلاب از مواد مغذی مورد نیاز گیاهان (مثل نیتروژن و فسفر)، اثرات مثبت این مواد بر عملکرد گیاهان و ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، در شرایطی که کشور به شدت از لحاظ کمبود آب شیرین رنج می برد و مسئله بحران آب به صورت یک مسئله جدی مطرح می باشد، استفاده مجدد از فاضلاب یک گزینه کارآمد برای مدیریت مصرف آب محسوب می شود. هر چند پساب تصفیه شده در مقایسه با حجم آب آبیاری مورد نیاز مقدار ناچیزی است، اما بهره برداری از همین مقدار باعث می شود آب هایی با کیفیت بالاتر را در مصارف مهم تری به کار برد. از سویی، آبیاری اراضی کشاورزی با فاضلاب در طولانی مدت آن را در معرض خطر قابل توجه تجمع فلزهای سنگین قرار می دهد که طبعاً بر کشاورزی و سلامت انسان نیز تأثیر می گذارد. با توجه به این که در شهرستان اهواز سال هاست که از فاضلاب شهری برای آبیاری در زمینه کشاورزی استفاده می شود و تا به حال ارزیابی آلودگی خاک به فلزات سنگین تحت تأثیر کاربرد فاضلاب های شهری در مزارع تحت کشت گیاه گشنیز، بررسی نشده است، این پژوهش سعی دارد تا این عوامل و شرایط را به صورت علمی و میدانی مورد تحقیق و بررسی قرار دهد.

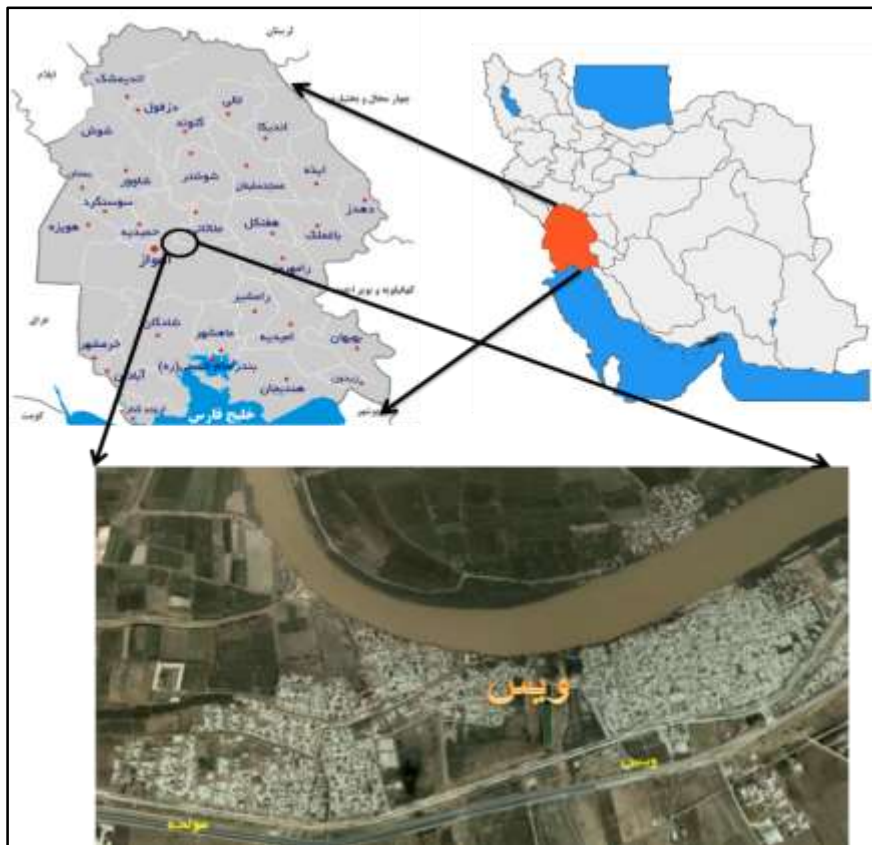
مواد و روش ها

مکان تحقیق در شهر ویس از توابع شهرستان اهواز در استان خوزستان می باشد. این شهر در بخش باوی و در فاصله ۱۵ کیلومتری شهر اهواز قرار گرفته و از شمال به شهر ملاثانی (مرکز بخش) و از جنوب به شهر شیبان منتهی می شود (شکل ۱). متوسط درجه حرارت سالیانه ۲۴ درجه سانتی گراد، متوسط رطوبت نسبی سالیانه ۵۵ درصد و متوسط بارندگی سالیانه ۱۴۵ میلی متر می باشد.

در این پژوهش ۲۰ نمونه خاک از مزارع مختلف تحت کشت گشنیز در منطقه ویس، ۱۵ کیلومتری شمال اهواز که برای سالیان متوالی با پساب شهری آبیاری شده، نمونه برداری شد. نمونه های خاک به آزمایشگاه منتقل شدند و پس از عملیات آماده سازی مورد آزمایش قرار گرفتند. یک نمونه خاک از مزارعی که با آب زیرزمینی آبیاری شده به عنوان شاهد برداشت شد. برای تهیه نمونه گیاه، ۲۰ نمونه گیاه از مزارعی که از آن ها نمونه برداری خاک انجام شده و یک نمونه گیاه از مزارع آبیاری شده با آب زیرزمینی که نمونه خاک شاهد از آن ها برداشت شده، برداشت شد و توسط آب مقطر شستشو داده شد و در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد خشک شد. سپس نمونه ها آسیاب شدند و برای آنالیز نگهداری شدند.

ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، pH و EC خاک در عصاره ۱:۲ (Thomas, 1996)، درصد کربن آلی به روش اکسایش تر (Nelson and Sommers, 1996) و مقدار سرب و کادمیوم قابل دسترس به روش DTPA-TEA (Lindsay and Norvell, 1978) اندازه گیری شدند. غلظت سرب و کادمیوم در اندام های هوایی و ریشه با

روش خشک سوزانی هضم شده (Campbell and Plank, 1998)، غلظت فلزات سنگین با روش هضم در نمونه‌های خاک و گیاه، توسط محلول اکویرجا دارای اسید کلریک و اسید نیتریک غلیظ (نسبت ۳:۱)، استفاده شد (Gupta., 2000). سپس غلظت سرب و کادمیوم در آن‌ها با استفاده از دستگاه جذب اتمی (شعله‌سنجی) مدل (Hitachi Z-2300) اندازه‌گیری گردید.



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS استفاده گردید. برای بررسی توزیع و آزمون نرمال بودن داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد، از آماره کلموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. در صورت نرمال نبودن توزیع داده‌ها، از روش تبدیل لگاریتم برای نرمال کردن آن استفاده شد. به منظور مقایسه ویژگی‌های خاک و گیاه در نمونه‌های شاهد و تیمار از آزمون T استفاده شد. همبستگی بین غلظت عناصر در خاک و گیاه نیز با ضریب پیرسون مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج میانگین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه شاهد و تیمار در جدول (۱) آورده شده است. مقدار EC در خاک منطقه شاهد و تیمار به ترتیب برابر ۳/۲۳ و ۵/۵۲ میلی زیمنس بر سانتی‌متر است که نشان می‌دهد بر اساس طبقه‌بندی علوم خاک آمریکا خاک منطقه شاهد در رده خاک غیرشور و خاک تیمار در رده شوری متوسط، pH خاک دو منطقه قلیایی و مقدار ماده آلی هر دو خاک کم می‌باشد. کلاس بافتی خاک‌ها لومی رسی بود.

استفاده از فاضلاب سبب افزایش pH، EC، غلظت کادمیوم و سرب در خاک منطقه تیمار گردید. همچنین مقدار مواد آلی در نتیجه کاربرد فاضلاب از ۰/۳۵ درصد به ۰/۲۷ درصد کاهش یافت. به دلیل نسبت بالای C/N فاضلاب و در نتیجه وجود ریزجانداران، مواد آلی تجزیه و معدنی شده در نتیجه مقدار مواد آلی خاک کاهش یافت (زارعی و همکاران، ۱۴۰۲). بخشی از کربن فعال موجود در لجن فاضلاب، پس از افزوده شدن به خاک تجزیه می‌شود و بخشی از کربن موجود در این کود به ذخایر کربن خاک پیوسته و تجمع می‌یابد (Mattiazzo, 2002). بیش از ۵۰ درصد کربن موجود در لجن فاضلاب در مدت ۶ روز نخست انکوباسیون تجزیه شد (Ajwa and Tabatabai, 2007).



جدول ۱. خلاصه‌ای از وضعیت آماری پارامترهای فیزیکی شیمیایی خاک منطقه شاهد و تیمار (n=۲۰)

متغیر	واحد	خاک منطقه شاهد	خاک منطقه تیمار
رس	%	۳۳	۳۵
شن	%	۲۸	۲۹
سیلت	%	۳۹	۳۶
pH	-	۷/۹۵	۸
EC	ms/cm	۳/۲۳	۵/۵۲
ماده آلی	%	۰/۳۵	۰/۲۷
کادمیوم	ppm	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۳
سرب	ppm	۰/۰۰۰۱	۰/۴۷

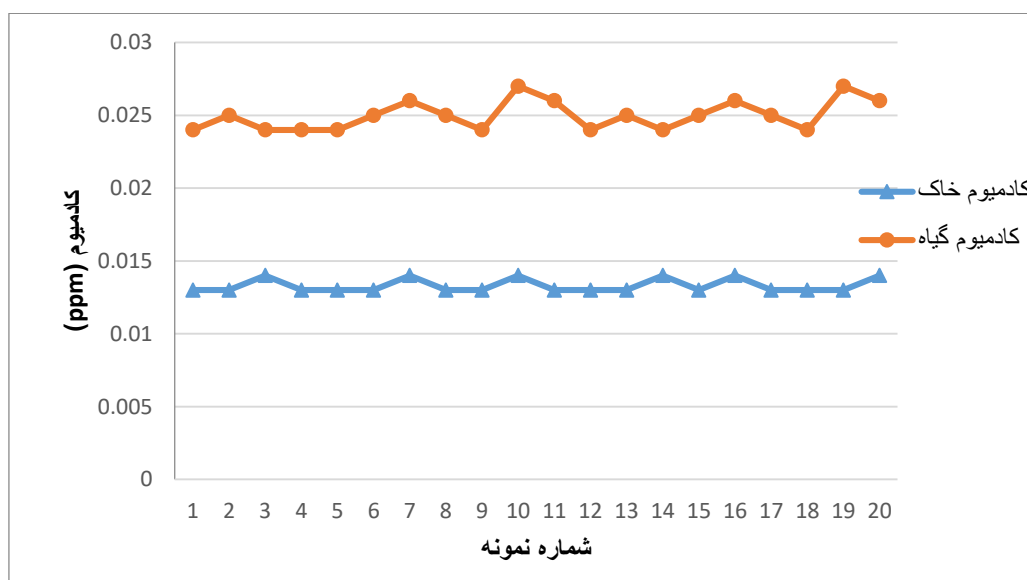
بررسی غلظت کادمیوم در منطقه تیمار و شاهد

نتایج خلاصه آماری غلظت کادمیوم در خاک و گیاه منطقه تیمار در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده میانگین کادمیوم در خاک و گیاه به ترتیب برابر ۰/۰۱۳۳ و ۰/۰۲۵ (ppm) بود که نشان می‌دهد مقدار کادمیوم در گیاه بیشتر از خاک می‌باشد.

جدول ۲. خلاصه آماری غلظت کادمیوم در خاک و گیاه منطقه مورد مطالعه (mg/kg)

عنصر	تعداد نمونه	میانگین	میان	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی	حداقل	حداکثر
کادمیوم خاک	۲۰	۰/۰۱۳۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰۴۷	۰/۰۰۰	۰/۹۴۵	-۱/۲۴۲	۰/۰۱	۰/۰۱
کادمیوم گیاه	۲۰	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۶۵۰	-۰/۶۷۱	۰/۰۲	۰/۰۳

حداکثر غلظت کادمیوم در خاک و گیاه به ترتیب برابر ۰/۰۱ (ppm) و ۰/۰۳ (ppm) وزن خشک می‌باشد. در شکل (۲) روند تغییرات غلظت کادمیوم در خاک و گیاه نشان داده شده است. بر اساس نمودار، روند تغییرات کادمیوم در خاک و گیاه تقریباً ثابت است.



شکل ۲. مقادیر محاسبه شده کادمیوم در نمونه‌های خاک و گیاه در منطقه تیمار

مقایسه کادمیوم با استانداردهای بین‌المللی و نمونه شاهد

جهت تعیین مقدار آلاینده‌ی خاک و گیاه به فلزات سنگین در یک منطقه، باید مقدار غلظت عناصر در آن منطقه را با یک استاندارد موجود در همان منطقه مقایسه کرد. زیرا شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی گوناگون در نقاط مختلف دنیا، غلظت‌های متفاوتی را ایجاد می‌کند. در

کشور ما به دلیل عدم وجود استانداردهای خاص برای درجه آلودگی خاک، از استانداردهای جهانی استفاده می‌شود. میانگین جهانی برای سرب و کادمیوم به ترتیب ۲۰ و ۰/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (Kabata and Pendias, 2001).

به منظور مقایسه غلظت کادمیوم در خاک و گیاه با استانداردهای بین‌المللی (FAO/WHO) و غلظت آن در نمونه شاهد از آزمون تی‌تک گروهی استفاده گردید. داده‌های مقایسه کادمیوم موجود در نمونه‌های خاک و گیاه با استاندارد مجاز در خاک ۵ (ppm) و گیاه ۰/۲ (ppm) و مقادیر کادمیوم نمونه شاهد ۰/۰۰۰۱ در جدول (۳) نشان داده شده است. با مقایسه داده‌ها می‌توان گفت متوسط غلظت کادمیوم خاک و گیاه کمتر از حد مجاز و بیشتر از مقدار شاهد می‌باشد. مقدار کادمیوم در خاک از ۰/۰۰۰۱ در منطقه شاهد به ۰/۱۳۳ (ppm) در منطقه تیمار و در گیاه از ۰/۰۰۰۱ در منطقه شاهد به ۰/۰۲۵ (ppm) در منطقه تیمار افزایش یافت. با اینکه مقدار کادمیوم کمتر از حد مجاز است، اما با توجه به قابلیت تجمع آن در محیط زیست و بدن موجودات زنده، می‌تواند به عنوان یک زنگ خطر مطرح باشد. چنین افزایشی در خاک کشاورزی نشان دهنده وخامت کیفیت خاک است که منجر به افزایش تجمع کادمیوم در محصول می‌شود و سپس با مصرف مواد غذایی رشد یافته در آن خاک، در بدن انسان تجمع می‌یابد و منجر به سرطان و سایر مشکلات مرتبط با سلامتی می‌شود. مطالعه‌ای در سوریه نشان داد که مقدار کادمیوم و کروم در خاک‌های کشاورزی نزدیک تأسیسات صنعتی از حد مجاز فراتر رفته و خطری برای تولیدات کشاورزی و سلامت انسان ایجاد کرده است (Ibrahim et al., 2023).

همچنین نتایج مقایسه میانگین کادمیوم در خاک و گیاه بین دو منطقه تیمار و شاهد و مقدار استاندارد با استفاده از آزمون تی مستقل نشان داد که بین تیمار و شاهد و مقدار استاندارد از نظر غلظت فلز کادمیوم تفاوت معنی‌دار وجود دارد ($F < 0.05$). گندمی و همکاران (۱۳۹۹) با بررسی ارتباط غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در خاک و دانه گیاه گندم در زمین‌های آلوده به فاضلاب بیان کردند مقدار سرب و کادمیوم در خاک کمتر از حد مجاز و در گیاه بیشتر از حد مجاز استاندارد ملی ایران بود. بین عناصر سرب و کادمیوم خاک و گیاه همبستگی مثبت بسیار قوی وجود داشت. بین میانگین عناصر سرب و کادمیوم در خاک و گیاه با مقادیر استاندارد تفاوت معنی‌دار وجود داشت (گندمی و همکاران، ۱۳۹۹). مطالعات، سطوح بالایی از فلزات سنگین مختلف، به ویژه کادمیوم (Cd)، نیکل (Ni)، سرب (Pb) و کروم (Cr) را در خاک‌ها و محصولات کشاورزی در مناطق مختلف نشان داده‌اند (Khan et al., 2013; Abbasi et al., 2014; Jamal and Sarim, 2018). فعالیت‌های صنعتی در آلودگی خاک نقش دارند و غلظت فلزات اغلب از حد مجاز فراتر می‌رود. انتقال فلزات سنگین از خاک به محصولات کشاورزی خطرات بالقوه‌ای برای سلامتی، به ویژه برای کادمیوم، ایجاد می‌کند (Khan et al., 2013). ویژگی‌های خاک، از جمله pH و محتوای مواد آلی، در مناطق مختلف متفاوت است و ممکن است بر مقدار دسترسی به فلزات تأثیر بگذارد (Jamal and Sarim, 2018). استفاده از فاضلاب حاوی کادمیوم، کروم، نیکل و سرب به طور قابل توجهی شوری، نیتروژن و غلظت فلزات سنگین خاک را افزایش داد، در حالی که pH، کربن آلی و سایر مواد مغذی تا حد زیادی بدون تغییر باقی ماندند (Halli et al., 2021). pH خاک به شدت بر تحرک فلزات سنگین تأثیر می‌گذارد، به طوری که غلظت فلزات قابل تبادل در pH 5 > افزایش می‌یابد. کربن آلی نیز بر غلظت فلزات تأثیر می‌گذارد، هرچند تأثیر آن کمتر از pH است (Khaledian et al., 2017).

سلگی و وقار (۱۳۹۸) در بررسی اثر آبیاری با فاضلاب بر انباشت کادمیوم در خاک و سبزیجات کشت‌شده، نشان دادند فاضلاب اثر قابل توجهی بر مقدار تجمع کادمیوم در خاک و سبزیجات دارد به طوری که میانگین غلظت این فلز در خاک و سبزیجات مناطق آبیاری‌شده با فاضلاب بیشتر از مناطق آبیاری‌شده با آب چاه بود. همچنین مشخص شد که مقادیر فلز کادمیوم در خاک هر دو منطقه شاهد و تیمار برابر با حد استاندارد قرار دارد (سلگی و وقار، ۱۳۹۸). کرمی و همکاران (۱۳۸۷) پژوهشی با عنوان اثرات تجمع و باقیمانده لجن فاضلاب شهری بر غلظت عناصر سرب و کادمیوم در خاک و گیاه گندم انجام دادند که نتایج تجزیه گیاه نشان داد که لجن فاضلاب اثر معنی‌داری بر تجمع کادمیوم در ریشه و ساقه گیاه داشته است. همچنین بیان کردند که لجن فاضلاب به صورت باقیمانده و تجمع، غلظت عناصر سنگین در خاک و گیاه را افزایش داده است (کرمی و همکاران، ۱۳۸۷). (Karami et al., 2008). سیماسووارانگ و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی توزیع مکانی و ارزیابی ریسک فلزات سنگین در خاک‌های سطحی استان رایونگ در تایلند نشان دادند که میانگین اکثر فلزات سنگین به جز آرسنیک پایین‌تر از مقدار استاندارد کیفیت خاک تایلند برای اهداف کشاورزی و زیستگاهی است که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد (Simasuwannarong et al., 2012).

جدول ۳. آزمون آماری تی تک گروهی فلز کادمیوم در نمونه خاک و گیاه

متغیر	تعداد نمونه	میانگین تجربی	مقدار استاندارد (ppm)	انحراف معیار تجربی	خطای معیار میانگین	T	درجه آزادی	سطح معنی-داری	تفاوت در سطح اطمینان ۹۵ درصد
									پایین تر
									بالا تر
خاک	شاهد	۲۰	۰/۰۰۰۱	۵	۰/۰۰۰۴۷	۰/۰۰۰۱۱	۱۹	۰/۰۰۰	-۴/۹۸۶
	تیمار	۲۰	۰/۰۱۳۳	۵	۰/۰۰۰۴۷	۰/۰۰۰۱۱	۱۹	۰/۰۰۰	۰/۰۱۳۴
گیاه	شاهد	۲۰	۰/۰۰۰۱	۰/۲	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۰۲	۱۹	۰/۰۰۰	-۰/۱۷۵
	تیمار	۲۰	۰/۰۲۵	۰/۲	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۰۲	۱۹	۰/۰۰۰	۰/۰۲۵۴

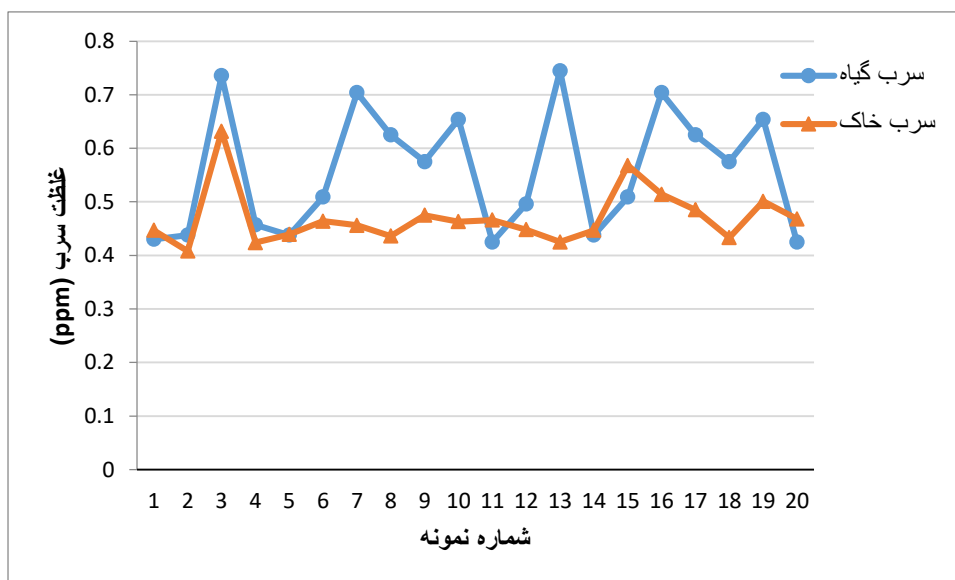
بررسی نتایج غلظت سرب در منطقه تیمار

نتایج خلاصه آماری غلظت سرب در خاک و گیاه منطقه تیمار در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده میانگین سرب در خاک و گیاه به ترتیب برابر ۰/۴۷۱ و ۰/۵۵۸ (ppm) بوده که نشان می‌دهد مقدار سرب در گیاه بیشتر از خاک می‌باشد. حداکثر غلظت سرب در خاک و گیاه به ترتیب برابر ۰/۶۳ و ۰/۷۴ (ppm) می‌باشد.

در شکل (۳) مقادیر سرب در ۲۰ نمونه خاک و گیاه منطقه تیمار را نشان می‌دهد که با توجه به نمودار مقدار سرب در نمونه‌های گیاه بیشتر از خاک می‌باشد و مقدار سرب در منطقه بین ۰/۴۱ تا ۰/۷۴ متغیر می‌باشد.

جدول ۴. خلاصه آماری غلظت سرب در خاک و گیاه منطقه مورد مطالعه (mg/kg)

عنصر	تعداد نمونه	میانگین	میان	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی	حداقل	حداکثر
سرب خاک	۲۰	۰/۴۷۱	۰/۴۵۹	۰/۰۵۲	۰/۰۰۳	۱/۹۱۷	۴/۲۲۸	۰/۴۱	۰/۶۳
سرب گیاه	۲۰	۰/۵۵۸	۰/۵۴۲	۰/۱۱۴	۰/۰۱۳	۰/۲۷۸	-۱/۴۷۵	۰/۴۲	۰/۷۴



شکل ۳. مقدار محاسبه شده سرب در نمونه‌های خاک و گیاه منطقه تیمار

مقایسه سرب با استانداردهای بین‌المللی و نمونه شاهد

به منظور مقایسه غلظت سرب در خاک و گیاه با استانداردهای بین‌المللی (FAO/WHO, 2001) و غلظت آن در نمونه شاهد از آزمون تی تک گروهی استفاده گردید. داده‌های مقایسه سرب موجود در نمونه‌های خاک و گیاه با استاندارد مجاز در خاک ۵۰ (ppm) و گیاه ۰/۳ (ppm) و مقادیر سرب نمونه شاهد ۰/۰۰۰۱ در جدول (۵) نشان داده شده است. با مقایسه داده‌ها می‌توان گفت متوسط غلظت سرب (۰/۴۷)

در خاک کمتر از حد مجاز (50 ppm) و بیشتر از مقدار نمونه شاهد می‌باشد. به طوری که مقدار سرب در خاک از $0/0001$ در منطقه شاهد به $0/47 \text{ ppm}$ در منطقه تیمار افزایش یافت. بنابراین استفاده از فاضلاب در آب آبیاری باعث تجمع فلزات سنگین در خاک می‌گردد. همچنین نتایج مقایسه میانگین بین مقدار سرب در نمونه خاک با مقادیر استاندارد و شاهد با استفاده از آزمون تی مستقل نشان داد که از نظر مقدار سرب تفاوت معنی‌دار ($\text{Sig} < 0.05$) وجود دارد.

میانگین سرب در گیاه با مقدار $0/558 \text{ ppm}$ بیشتر از استاندارد بین‌المللی ($0/3$) و بیشتر از مقدار شاهد ($0/0001$) می‌باشد. بنابراین مقدار سرب به دلیل استفاده از فاضلاب در آب آبیاری به بیش از حد مجاز آن در گیاه رسیده و سبب سمیت گیاه به فلز سرب شده است. بر اساس مقایسه میانگین حاصل از آزمون تی مستقل، بین مقدار سرب در نمونه گیاه و مقدار استاندارد و شاهد تفاوت معنی‌دار وجود دارد ($\text{Sig} < 0.05$).

نتایج به دست آمده با نتایج سلگی و وقار (1398) مطابقت دارد. ایشان در بررسی اثر آبیاری با فاضلاب بر انباشت سرب نشان دادند فاضلاب اثر قابل توجهی بر مقدار تجمع سرب در خاک و سبزیجات دارد به طوری که میانگین غلظت این فلزات در خاک و سبزیجات مناطق آبیاری شده با فاضلاب بیشتر از مناطق آبیاری شده با آب چاه بود. همچنین مشخص شد که مقادیر سرب در سبزیجات مطالعه شده برابر یا بیشتر از حد استاندارد بوده است و سرب در خاک هر دو منطقه شاهد و تیمار کمتر از حد استاندارد قرار دارد (سلگی و وقار، 1398). چراغی و قبادی (1392) در ارزیابی خطر سلامتی فلزات سنگین در برخی مزارع شهر همدان، نشان دادند که مقدار سرب در خاک کمتر از حد استاندارد، اما مقدار آن در سبزیجات بیشتر از حد استاندارد (WHO/FAO) بود (چراغی و قبادی، 1392). خاک‌های آبیاری شده با فاضلاب، سطوح بالاتر سرب را در مقایسه با مکان‌های غیرآلوده نشان داد (Irshad et al., 2021; Awan et al., 2023). به طور مشابه، خاک‌های کنار جاده غلظت‌های بالاتری از سرب، روی، کادمیوم، نیکل، مس، کروم و منگنز را در مقایسه با مکان‌های کنترل نشان دادند، و فلزات عمدتاً در 5 سانتی‌متر بالایی خاک متمرکز بودند (Alhaithloul et al., 2023; Al-Huqail et al., 2023). در مطالعه ای که توسط Demirezen و Aksoy (2006) بر روی مقدار فلزات سنگین در سبزیجات در منطقه کایسری ترکیه انجام دادند به این نتیجه دست یافتند که متوسط غلظت سرب از حد استاندارد بالاتر است که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد (Demirezen and Aksoy, 2006). Muchuweti و همکاران (2006) با بررسی مقدار فلزات سنگین در سبزیجات آبیاری شده با فاضلاب، نشان دادند که سبزیجات به فلزات کادمیوم، سرب، مس و روی آلوده بودند (Muchuweti et al., 2006). نتایج این تحقیق با پژوهش آلزوبی و همکاران (2008) که نشان دادند، تجمع فلزات سنگین خاک تیمار شده با لجن حداقل بوده است، مطابقت دارد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار کادمیوم و سرب در خاک تیمار شده با فاضلاب در حد مجاز می‌باشد (Al Zoubi et al., 2008).

جدول ۵. آزمون آماری تی تک گروهی سرب در نمونه خاک و گیاه

متغیر	تعداد نمونه	میانگین تجربی	مقدار استاندارد (ppm)	انحراف معیار تجربی	خطای معیار میانگین	T	درجه آزادی	سطح معنی-داری	تفاوت در سطح اطمینان ۹۵ درصد
سرب	۲۰	$0/0001$	۵۰	$0/524$	$0/117$	$-4/222E$	۱۹	$0/000$	$-49/505$
خاک	۲۰	$0/47$	۵۰	$0/524$	$0/117$	$40/046$	۱۹	$0/000$	$0/4944$
سرب	۲۰	$0/0001$	$0/3$	$0/1149$	$0/257$	$17/82$	۱۹	$0/000$	$0/5119$
گیاه	۲۰	$0/558$	$0/3$	$0/1149$	$0/257$	$21/70$	۱۹	$0/000$	$0/6118$

بررسی همبستگی بین فلزات و پارامترهای شیمیایی خاک

جدول (۶) نتایج همبستگی بین فلزات سنگین و پارامترهای شیمیایی خاک و جدول (۷) همبستگی بین فلزات سنگین خاک و گیاه را نشان می‌دهد. بین کادمیوم خاک با سرب، ماده آلی، EC و pH همبستگی کم وجود دارد. همچنین بین سرب و ماده آلی با ($r=0.55$) رابطه متوسط و با EC همبستگی کم دارد. اما با pH همبستگی معنی‌دار مشاهده نشد. به طور کلی در این مطالعه بین فلزات سنگین و ویژگی‌های خاک همبستگی قوی مشاهده نشد، این موضوع می‌تواند از تغییرات کم این پارامترها در ناحیه مطالعه شده ناشی باشد (Qishlaqi et al., 2009).



جدول ۶. بررسی همبستگی (ضریب پیرسون) بین فلزات مورد مطالعه و برخی ویژگی‌های خاک

متغیر	ضریب همبستگی	کادمیوم خاک	سرب خاک	ماده آلی	EC	pH
کادمیوم خاک	ضریب همبستگی پیرسون	۱	۰/۳۵۴	۰/۴۹۳	۰/۳۸۲	-۰/۳۵۱
سرب خاک	ضریب همبستگی پیرسون	۰/۳۵۴	۱	۰/۵۵	۰/۳۸	-۰/۱۱

با توجه به جدول (۷) بین کادمیوم و سرب خاک و کادمیوم گیاه همبستگی کم وجود دارد. اما بین کادمیوم و سرب خاک و سرب گیاه با ضریب بالاتر از ۰/۵ همبستگی متوسط تا قوی وجود دارد. نتایج چراغی و قبادی (۱۳۹۲) نشان دادند، همبستگی نسبتاً قوی میان غلظت فلزات سنگین در سبزی جعفری و غلظت فلزات در خاک‌های مربوطه که در آن‌ها کشت شده‌اند وجود دارد. این نتایج نشان دهنده انتقال بسیار ساده فلزات سنگین از خاک به گیاهان است (چراغی و قبادی، ۱۳۹۲). همچنین در تحقیقی که چنگ و همکاران (۱۹۸۴) تحت عنوان کاربرد پساب و تجمع عناصر سنگین در خاک، انجام دادند، نتایج بیانگر این بود که بین فلزات سنگین موجود در خاک و بافتهای گیاهی رابطه همبستگی وجود دارد که با این تحقیق مطابقت دارد (Cheng et al., 1984).

جدول ۷. بررسی همبستگی (ضریب پیرسون) بین فلزات مورد مطالعه در خاک و گیاه

متغیر	ضریب همبستگی	کادمیوم گیاه	سرب گیاه
کادمیوم خاک	ضریب همبستگی پیرسون	۰/۳۸۷	۰/۵۳۴
سرب خاک	ضریب همبستگی پیرسون	۰/۴۵۶	۰/۶۳۹

نتیجه گیری

این مطالعه خطرات محیط زیستی و بهداشتی مرتبط با استفاده از فاضلاب تصفیه نشده برای آبیاری محصولات کشاورزی را برجسته می‌کند. در این پژوهش یافته‌های حاصل از مقایسه کادمیوم و سرب در خاک با استاندارد بین‌المللی نشان داد که مقدار فلزات کمتر از حد استاندارد است، اما نسبت به خاک شاهد بیشتر بودند. مقایسه مقدار کادمیوم و سرب در گیاه با مقدار استانداردها گویای آن بود که مقدار کادمیوم کمتر و مقدار سرب بیشتر از حد استاندارد بین‌المللی است. یکی از علل افزایش این عناصر در گیاه می‌تواند استفاده از کودهای شیمیایی به ویژه کودهای فسفاته باشد. بر اساس نتایج همبستگی، بین فلزات خاک و ویژگی‌های شیمیایی خاک، ارتباط کم مشاهده شد. همچنین بین فلز کادمیوم و سرب در خاک و گیاه ارتباط کم تا متوسط وجود داشت که دلیل بر انتقال عناصر از خاک به گیاه می‌باشد. از آنجایی که مقدار سرب در گیاه بیش از حد استاندارد بود، با توجه به اینکه احتمال ورود این عناصر به بدن از طریق سایر مواد غذایی آلوده آب و هوا نیز وجود دارد، می‌تواند منجر به افزایش ریسک به خطر افتادن سلامت جامعه شود. با توجه به نتایج پیشنهاد می‌گردد برای استفاده مجدد از فاضلاب در کشاورزی مقررات سختگیرانه‌تر وضع شود، زیر ساخت‌های مناسب تصفیه ایجاد و آموزش جامعه در مورد شیوه‌های آبیاری با فاضلاب برای کاهش خطرات بهداشت عمومی و حفظ ایمنی مواد غذایی در مناطق آبیاری شده با فاضلاب ارائه شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه یاسوج انجام شد.

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه یاسوج دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش نویس مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور پایان نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش نویسندگان از هیچ نوع فناوری مبنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش استفاده نکرده اند.

بیانیه دسترسی به داده ها

داده هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه یاسوج به خاطر حمایت مالی / حمایت معنوی / همکاری در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می شود. از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این پژوهش نیازی به دریافت کد اخلاق از کمیته اخلاق دانشگاه نداشته است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- افخمی، ملیحه؛ امیری، فاضل و طباطبائی، طیبه (۱۴۰۰). اثر آبیاری با پساب تصفیه شده شهری بر انباشت سرب و کادمیوم در خاک و گیاه فلفل دلمه ای. سلامت و محیط زیست، ۱۱۴(۱)، ۹۹-۱۱۴.
- چراغی، مهرداد و قبادی، آزاده (۱۳۹۳). ارزیابی خطر سلامتی فلزات سنگین (کادمیوم، نیکل، سرب و روی) در سبزی جعفری برداشت شده از برخی مزارع شهر همدان. دوماهنامه علمی پژوهشی طلوع بهداشت یزد، ۱۱۳(۴)، ۱۲۹-۱۴۳.
- زارعی، لیلا؛ هاشمی، سهیلاسادات و نجفی قیری، مهدی (۱۴۰۲). توزیع مکانی برخی فلزات سنگین در کاربری های کشاورزی و مرتع (مطالعه موردی: شهر صنعتی شازند اراک). فصلنامه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۴(۲)، ۱۵-۳۷.
- سلگی، عیسی و وقار، سید علی (۱۳۹۸). بررسی اثر آبیاری با فاضلاب بر انباشت فلزات کادمیوم و سرب در خاک و سبزیجات کشت شده (مطالعه موردی: شهر همدان). علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۱(۲)، ۱۳۹-۱۵۰.
- عطاملکی، علی؛ نعیمی، نیره، فخری، یدالله، شریفی ملکسری، هاجر، نصرتی، حلیمه و فلاح، سودا (۱۳۹۸). بررسی تجمع فلزات سنگین در گیاه نعنای آبیاری شده با فاضلاب یک بررسی نظام مند و متاآنالیز. مجله سلامت و محیط زیست، فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران، ۱۲(۴)، ۶۷۹-۶۹۴.
- کابوسی، کامی (۱۳۹۳). ارزیابی اثر میان مدت آبیاری با پساب تصفیه شده بر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک (مطالعه موردی: تصفیه خانه فاضلاب شهر بندرگز). نشریه علمی مدیریت اراضی، ۲(۲): ۹۵-۱۱۰.
- کریمی، مهین؛ افیونی، مجید، رضایی نژاد، یحیی و خوشگفتارمنش، امیرحسین (۱۳۸۷). آثار تجمع و باقیمانده لجن فاضلاب شهری بر غلظت روی و مس در خاک و گیاه گندم. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۲(۴۶)، ۶۳۹-۶۵۳.
- گندمی، مریم؛ بهبهانی نیا، آریتا و فراهانی، مریم. (۱۳۹۹). بررسی ارتباط غلظت فلزات سنگین (سرب و کادمیوم) در خاک و دانه گیاه گندم و ارزیابی ریسک ناشی از مصرف آن. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۲(۱۱)، ۲۱۷-۲۲۹.

REFERENCES

- Abbasi, M. N., Muhammad Tufail, M.T., Azhar Mashiatullah, A. M., Chaudhary, M. Z. (2014). A review of heavy metal pollution in the soil of Pakistan.
- Afkhami, M., Amiri, F., & Tabatabaei, T. (2017). The effect of irrigation with treated urban wastewater on the accumulation of lead and cadmium in soil and bell pepper plants. *Iranian Journal of Health and Environment*, 14(1), 99-114. (In Persian)
- Ajwa, H. A. & Tabatabai, M. A. (2007). Decomposition of different organic materials in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 18, 175-182.



- Al Zoubi, M. M., Arslan, A., Abdelgawad, G., Pejon, N., Tabbaa, M., & Jouzdan, O. (2008). The Effect of sewage sludge on productivity of a crop rotation of wheat, maize and vetch and heavy metals accumulation in soil and plant in Aleppo governorate. *American- Eurasian Journal Agriculture and Environment Science*, 3(4), 618-625.
- Alhaithloul, H. A. S., Ali, B., Alghanem, S. M. S., Zulfiqar, F., Al-Robai, S. A., Ercisli, S., & Abeed, A. H. (2023). Effect of green-synthesized copper oxide nanoparticles on growth, physiology, nutrient uptake, and cadmium accumulation in *Triticum aestivum* (L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 268:115701, doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115701
- Al-Huqail, A. A., Alghanem, S. M. S., Abbas, Z. K., Al Aboud, N. M., Masood, N., Irshad, M. A., & Darwish, D. B. E. (2023). Evaluation of nanoceria on cadmium uptake in *Triticum aestivum* (L.) and its implications for dietary health risk. *Chemosphere*, 341:140115, doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140115
- Atamaleki, A., Naeimi, N., Fakhri, Y., Sharifi Malaksari, H., Nosrati, H., & Fallah, S. (2019). Investigation of heavy metal accumulation in mint plants irrigated with wastewater: a systematic review and meta-analysis. *Iranian Journal of Health and Environment*, 12(4), 679-694. (In Persian)
- Awan, S. A., Khan, I., Rizwan, M., Irshad, M. A., Xiaosan, W., Zhang, X., & Huang, L. (2023). Reduction in the cadmium (Cd) accumulation and toxicity in pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) by regulating physio-biochemical and antioxidant defense system via soil and foliar application of melatonin. *Environmental Pollution*, 328:121658, doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121658
- Campbell, C. R., & Plank, C. O. (1998). Preparation of plant tissue for laboratory analysis. In: *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. edited by Kalra, Y. P. CRC Press, Taylor and Francis Group. 37-50.
- Chaganti, G. G., Genhua, N., April, U., Robert, F., Juan, M., Enciso, M. N., Meki, J., & Kiniry, R. (2020). Effects of treated urban wastewater irrigation on bioenergy sorghum and soil quality. *Agricultural Water Management*, 228(1), 217-258.
- Cheng, A. C., Warknek, J. E., Page, A. L., & Land, A. J. (1984). Accumulation of heavy metal in sewage sludge treated soils. *Journal of Environmental Quality*, 13, 87-90.
- Cheraghi, M., & Ghobadi, A. (2014). Health risk assessment of heavy metals (cadmium, nickel, lead and zinc) in parsley harvested from some farms in Hamedan city. *Tolooebehdasht Journal*, 13(4), 129-143. (In Persian)
- Demirezen, D., & Aksoy, A. (2006). Heavy metal levels in vegetables in Turkey are within safe limits for Cu, Zn, Ni and exceeded for Cd and Pb. *Journal of Food Quality*, 29, 252-265.
- FAO/WHO. (2001). Food additives and contaminants, Joint Codex Alimentarius Commission, FAO/WHO. Food standards Programme, ALINORM 01/12A.
- Gandomi, M., Behbahaninia, A., & Farahani, M. (2019). Investigation of the relationship between heavy metal concentrations (lead and cadmium) in soil and wheat seeds and risk assessment from their consumption. *Environmental Science and Technology*, 22(11), 217-229. (In Persian)
- Gatta, G., Gagliardi, A., Disciglio, G., Lonigro, A., Francavilla, M., Tarantino, E., & Giuliani, M. M. (2018). Irrigation with treated municipal wastewater on artichoke crop: Assessment of soil and yield heavy metal content and human risk. *Water*, 10(3), 255-273.
- Gee, G. H. & Bauder, J. W. (1986). Partial size analysis. In: *Methods of Soil Analysis. Part 2: Physical Properties*. edited by Klute, A. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. 383-411.
- Ghani, J., Nawab, J., Ullah, Z., Rafiq, N., Hasan, S. Z., Khan, S., & Almutairi, M. H. (2023). Multivariate statistical methods and GIS-based evaluation of potable water in urban children's parks due to potentially toxic elements contamination: a children's health risk assessment study in a developing country. *Sustainability*, 15(17), 13177, <https://doi.org/10.3390/su151713177>
- Gupta, P.K. (2000). Soil, plant, water and fertilizer analysis. Agrobios, New Delhi, India.
- Halli, A. I., Singh, R., Golui, D., Gurjar, D. S., Singh, M., Lal, K., & Kumar, S. (2021). Changes in soil chemical properties as affected by application of wastewater spiked with heavy metals. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 91(4), 542-545.
- Ibrahim, R., Barguil, S., & Hesenow, S. (2023). Determination of cadmium levels in agricultural soils of some regions in Syria. *Indonesian Journal of Chemistry*, 23(5), doi.org/10.22146/ijc.84607
- Irshad, M. A., ur Rehman, M. Z., Anwar-ul-Haq, M., Rizwan, M., Nawaz, R., Shakoor, M. B., & Ali, S. (2021). Effect of green and chemically synthesized titanium dioxide nanoparticles on cadmium accumulation in wheat grains and potential dietary health risk: a field investigation. *Journal of Hazardous Materials*, 415, DOI:10.1016/j.jhazmat.2021.125585
- Jamal, A., & Sarim, M. (2018). Heavy metals distribution in different soil series of district Swabi, Khyber

- Pakhunkhawa, Pakistan. *World Science News*, 105:1-13.
- Kabata, A., & Pendias, H. (2001). Trace elements in soils and planets. CRC Press, Boca Raton, London, New York.
- Kabousi, K. (2014). Evaluation of the medium-term effect of irrigation with treated wastewater on the physical and chemical properties of soil (Case study: Bandargaz wastewater treatment plant). *Scientific Journal of Land Management*, 2(2): 95-110. (In Persian)
- Karami, M., Afyouni, M., Rezaeinejad, Y., & Khoshgofarmanesh, A. H. (2008). Cumulative and residual effects of urban sewage sludge on zinc and copper concentrations in soil and wheat plants. *Agricultural Sciences and Technologies and Natural Resources*, 12(46), 639-653. (In Persian)
- Khaledian, Y., Pereira, P., Brevik, E. C., Pundyte, N., & Paliulis, D. (2017). The influence of organic carbon and pH on heavy metals, potassium, and magnesium levels in Lithuanian Podzols. *Land Degradation and Development*, 28(1), 345-354.
- Khan, K., Lu, Y., Khan, H., Ishtiaq, M., Khan, S., Waqas, M., & Wang, T. (2013). Heavy metals in agricultural soils and crops and their health risks in Swat District, northern Pakistan. *Food and Chemical Toxicology*, 58, 449-458.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421-42.
- Mahfooz, Y., Yasar, A., Guijian, L., Islam, Q. U., Akhtar, A. B. T., Rasheed, R., & Naeem, U. (2020). Critical risk analysis of metals toxicity in waste- water irrigated soil and crops: a study of a semi-arid developing region. *Scientific Reports*, 10(1), 12845 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69815-0>
- Moretti, M., Van Passel, S., Camposeo, S., Pedrero, F., Dogot, T., Lebailly, P., & Vivaldi, G. A. (2019). Modelling environmental impacts of treated municipal wastewater reuse for tree crops irrigation in the Mediterranean coastal region. *Science of the Total Environment*, 660, 1513-1521.
- Muchuweti, M., Birkett, J.W., Chinyanga, E., Zvauya, R., Scrimshaw, M.D., & Lester, J. N. (2006). Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: Implications for human health. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 112, 41-48.
- Nawab, J., Idress, M., & Ullah, S. (2023a). Occurrence and distribution of heavy metals in mining degraded soil and medicinal plants: a case study of Pb/Zn sulfide terrain northern areas, Pakistan. *Bull Environ Contam Toxicol*, 110, 24, DOI: 10.1007/s00128-022-03673-6
- Nawab, J., Rahman, A., & Khan, S. (2023b). Drinking water quality assessment of government, non-government and self-based schemes in the disaster affected areas of Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Exponential Health*, 15:567-583.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total Carbon, organic carbon and organic matter. In: *Methods of soil analysis. Part 3: Chemical properties*. edited by Sparks, D. L. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. 961-1010.
- Oliviera, F. C., and Mattiazzo, M. E. (2002). Organic Carbon, Electrical Conductivity, pH and CEC Changes in a Dystrophic Yellow Latisol. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 2, 505-519.
- Othman, Y. A., Al-Assaf, A., Tadros, M. J., & Albalawneh, A. (2021). Heavy metals and microbes' accumulation in soil and food crops irrigated with wastewater and the potential human health risk: a metadata analysis. *Water*, 13(23), 3405, doi.org/10.3390/w13233405
- Qishlaqi, A., Moore, F., & Forghani, G. (2009). Characterization of metal pollution in soils under two land use patterns in the Angouran region, NW Iran; a study based on multivariate data analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 172, 374-384.
- Selgi, I., & Vaqar, S. A. (2019). Investigating the effect of wastewater irrigation on the accumulation of cadmium and lead metals in soil and cultivated vegetables (Case study: Hamadan city). *Environmental Science and Technology*, 21(2), 139-150. (In Persian)
- Sharma, R. K., Agrawal, M., & Marshall, F. (2007). Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 66 (2), 258-266.
- Simasuwannarong, B., Satapanajaru, T., & Khuntong, S. (2012). Spatial Distribution and Risk Assessment of As, Cd, Cu, Pb, and Zn in Topsoil at Rayong Province, Thailand. *Water Air Soil Pollution*, 223, 264-271.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In: *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Properties*. edited by Sparks, D. L. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. 475-483.
- Touil, S., Chabaca, M. N., & Hasbaia, O. (2020). Impact assessment of long treated wastewater irrigation on soil and crops in Algeria. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 5(65), <https://doi.org/10.1007/s41207-020-00187-7>



- Ullah, N., Ur Rehman, M., Ahmad, B., Ali, I., Younas, M., Aslam, M. S., & Rezakazemi, M. (2022). Assessment of heavy metals accumulation in agricultural soil, vegetables and associated health risks. *PLOS ONE* 17(6), doi.org/10.1371/journal.pone.0267719
- Zahir, M. H., Irshad, K., Rahman, M. M., Shaikh, M. N., & Rahman, M. M. (2021). Efficient capture of heavy metal ions and arsenic with a CaY-Carbonate Layered Double-Hydroxide Nanosheet. *ACS Omega*, 6(35), 22909-22921. DOI: 10.1021/acsomega.1c03294
- Zarei, L., Hashemi, S. S., & Najafi Gheiri, M. (2013). Spatial distribution of some heavy metals in agricultural and rangeland uses (Case study: Shazand Industrial City, Arak). *Journal of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources*, 14(2), 15-37. (In Persian)
- Zhang, P., Wei, X., Zhang, Y., Zhan, Q., Bocharnikova, E., & Matichenkov, V. (2023). Silicon-mediated alleviation of cadmium toxicity in soil-plant system: historical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(17), 48617-48627.