Advanced Technologies in Water Efficiency
homepage:https://atwe.razi.ac.ir
Online ISSN:2783-4964

Effects of irrigation with Kermanshah municipal reclaimed wastewater on the content and distribution of heavy metals in faba bean plant (*Vicia faba* L.)

Houshang Ghamarnia [1], Mohammad Rasoul Abbasi [2]✉, Milad Farmanifard [3]

[1] Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: hghamarnia@razi.ac.ir
[2] Corresponding Author, Postdoctoral fellowship, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: m.abasi@razi.ac.ir
[3] Ph.D. graduated of Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: milad.farmanifard@gmail.com

ABSTRACT

The reduction of renewable water resources in arid and semi-arid regions of the world and on the other hand, the increase in the demand for high-quality water resources has forced the dicision makers to allocate water resources of higher quality for urban and drinking purposes and water resources of lower quality (such as municipal reclaimed wastewater) to be allocated for purposes such as agriculture, industry and green spaces. However, the situation of accumulation of heavy metals in various parts (tissues) of crops irrigated with wastewater is still unclear and due to the risk of these metals entering the human food cycle, it should be measuered and monitored regularly. In this research, the effects of irrigation with treated municipal wastewater on the accumulation of heavy metals in the roots, aerial parts and seeds of the faba bean plant (*Vicia faba* L.) were investigated and compared with concentration of heavy metals in the faba bean plant irrigated with well water (as a control treatment).The results showed that the concentration of all the heavy metals in different parts of the faba bean plant under the wastewater treatment was significantly higher than the well water treatments, so that the concentration of iron and cadmium in the root (non-edible part) of the faba bean plant was higher than the standards' limits. The concentration of copper and manganese in different parts of faba beans was lower than the permissible limits. The concentration of cadmium and zinc in the grain is higher than the standards' limits, so measures should be taken to reduce the concentrations of these metals in the effluent.

Key.words: Environmental pollution, Treated wastewater, Unconventional waters, Water resources crisis, Accumulation of copper, Iron, Zinc, Cadmium and Manganese in plants

Article Type: Research Article
Article history: Received: 03 January 2024 **Revised:** 10 March 2024 **Accepted:** 21 March 2024 **ePublished:** 26 March 2024

1.Introduction

On the one hand, like the arid and semi-arid regions of the world, Iran is facing a decrease in renewable water resources and on the other hand an increase in the demand for high-quality water.This has forced the dicision makers to preserve better quality water resources for urban and drinking purposes and less quality water resources (such as municipal reclaimed wastewater) to be allocated for purposes such as irrigation of agricultural crops, vegetables and green spaces. In the meantime, the situation of the accumulation of heavy metals in different parts of the crops and vegetables irrigated with reclaimed wastewater, is still unclear. Therefore, the concentration of these metals in plants should be measured and monitored, regularly due to their risk of entering the human food cycle and bringing about diseases. Therefore, in this study, the effects of irrigation with treated municipal wastewater on the accumulation of heavy metals in the roots, aerial parts and seeds of the faba bean plant (*Vicia faba* L.) were investigated and compared with concentration of heavy metals in the faba bean plant irrigated with well water (as a control treatment).

2. Methodology

2.1. Experimental site and Kermanshah municipal wastewater treatment plant

This research was conducted in Kermanshah city with a semi-arid-cold climate. The average long term annual temperature and precipitation of this city is 14.3 degrees Celsius and 444 mm, respectively, where most of the precipitation occurs between the months of November and May. Kermanshah municipal wastewater treatment plant is located in the southwest of the city with an area of 78 hectares. This treatment plant collects waste water from a population of 400,000 people, so that its daily discharge capacity is 60,000 cubic meters. The treatment process in this waste water treatment plant is a conventional activated sludge method, which includes primary, secondary and tertiary treatment stages. In this research, the fields under faba bean cultivation were located at the downstream of the treatment plant, each with an area of nearly 5 hectares. The lands under irrigation with treated waste water were always irrigated with the effluents of the treatment plant using the traditional surface irrigation method for nearly 10 years, and the control treatments, were also irrigated with well water for many years.

2.2. Collecting and preparing plant samples

At the time of crop harvesting, a number of whole faba bean plants (roots, aerial parts and seeds) from different parts of each treatment (farm) were randomly harvested in three replicates. Afterwards, the different parts of each plant were washed with "triple distilled water" in order to

eliminate possible pollutants. After the washing process, the drying process of the plant samples was carried out in the vicinity of the open air. Then, different parts of each plant, such as the seeds, aerial parts and roots were crushed and ground and packed in plastic bags as plant samples.

2.3. Measurement of heavy metal concentration

Plant samples were digested using the method described by Batarse et al. (2011). An atomic absorption device (Spectra AA 220 model) [made by VARIAN factory in Australia] was used to measure the concentration of heavy metals in each sample.

2.4. Statistical Analysis Statistical Analysis

The statistical analysis was carried out in the form of a completely randomized design (CRD) with three replications and two irrigation treatments viz, treated waste water and well water (as control). The measured parameters were analyzed and evaluated using MiniTab 17.0, SAS 9.1 and MSTATC statistical softwares. After performing the test of normality of the data, comparison of means tests was performed at 1 and 5 percent of probability levels using Duncan's method.

3. Results and discussion

The results showed that the concentration of all the heavy metals in different parts of the faba bean plant under the wastewater treatment was significantly higher than the well water treatments, so that the concentration of iron and cadmium in the root (non-edible part) of the faba bean plant was higher than the standards' limits. The concentration of copper and manganese in different parts of faba beans was lower than the permissible limits. The concentration of cadmium and zinc in the grain is higher than the standards' limits, so measures should be taken to reduce the concentrations of those metals in the effluent.

4. Conclusions

Understanding the accumulation of heavy metals in plant tissues is critical to address environmental and food safety concerns. By comparing the concentration of heavy metals with existing standards, potential risks can be identified and strategies can be developed to minimize the impact of heavy metal pollution. This research is very important and necessary to maintain the health of the ecosystem and human well-being in the face of increasing demand for the use of non-conventional water in arid and semi-arid regions due to successive droughts and the crisis of water resources. Efforts to reduce the pollution of heavy metals cadmium and zinc in the effluent of treated wastewater, which in this research were found to be hazardous to human health, include specific and additional treatment of these two metals from the effluent, implementation of appropriate waste management practices, improvement of industrial processes, regulating the use of specific products and using effective technologies for wastewater treatment. Supervisory and management measures are also necessary to control the release of heavy metals in water resources.

5. References

Batarseh, M. I.., Rawajfeh, A., Ioannis, K. K., & Prodromos, K. H. (2011). Treated municipal wastewater irrigation impact on olive trees (*Olea Europaea* L.) at Al-Tafilah, Jordan. Water, Air, & Soil Pollution, 217, 185-196. https://www.academia.edu/6357678/Treated_Municipal_Wastewater_Irrigation_Impact_on_Olive_Trees_Olea_Europaea_L_at_Al_Tafilah_Jordan

6. Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to declare.

7. Acknowledgments

The authors would like to thank Razi University for providing the facilities to carry out the lysimetric and laboratory experiments of this study.

Cite this article: Ghamarnia, H., Abbasi, M.R., & Farmanifard, M. (2024). Effects of irrigation with Kermanshah municipal reclaimed wastewater on the content and distribution of heavy metals in faba bean plant (*Vicia faba* L.), *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(1), 1-18, DOI: 10.22126/atwe.2024.10069.1070

Publisher: Razi University

© The Author(s).

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب

وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

اثرات آبیاری با پساب تصفیه‌شده فاضلاب شهری کرمانشاه بر غلظت و توزیع فلزات سنگین در گیاه باقلا

هوشنگ قمرنیا[۱]، محمد رسول عباسی[۲]✉، میلاد فرمانی‌فرد[۳]

[۱] استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: hghamarnia@razi.ac.ir

[۲] نویسنده مسئول، پژوهشگر پسادکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: m.abasi@razi.ac.ir

[۳] دانش‌آموخته دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: milad.farmanifard@gmail.com

چکیده

کاهش منابع آب تجدیدپذیر در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا از یک‌سو و افزایش حجم تقاضا برای دستیابی به آب باکیفیت از سویی دیگر سبب شده است که منابع آب باکیفیت مناسب‌تر برای مصارف شهری و شرب حفظ‌شده و منابع آب باکیفیت پایین‌تر (مثل فاضلاب تصفیه‌شده) برای مصارفی همچون کشاورزی، صنعت و فضای سبز بکار گرفته شوند. اما وضعیت تجمع فلزات سنگین در اندام‌های مختلف محصولات زراعی آبیاری شده با پساب همچنان نامشخص است و به دلیل خطر ورود این فلزات به چرخه غذایی انسان بایستی پایش شود. در این پژوهش اثرات آبیاری با پساب تصفیه‌شده شهری در مقایسه با آب چاه به‌عنوان تیمار شاهد بر تجمع فلزات سنگین در ریشه، اندام هوایی و دانه گیاه باقلا بررسی شد. نتایج نشان داد که تجمع تمام فلزات سنگین در اندام‌های گیاه باقلا تحت تیمار پساب به‌صورت معنی‌داری بیشتر از تیمارهای آب چاه بود که حتی غلظت آهن و کادمیوم در ریشه (اندام غیرخوراکی) باقلا بالاتر از استانداردها قرار داشت. غلظت مس و منگنز در اندام‌های مختلف باقلا پایین تر از حدود مجاز بود. غلظت کادمیوم و روی در دانه بالاتر از استاندارد بود که در صورت مصرف مکرر توسط انسان برای سلامتی خطرساز خواهد شد و لزوماً باید تمهیداتی برای کاهش این دو فلز در پساب اندیشید.

واژه‌های کلیدی: آلودگی محیطزیست، فاضلاب تصفیه‌شده، آب‌های نامتعارف، بحران منابع آب، تجمع مس، آهن، روی، کادمیم و منگنز در گیاه

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۳ دی ۱۴۰۲ **اصلاح:** ۲۰ اسفند ۱۴۰۲ **پذیرش:** ۰۲ فروردین ۱۴۰۳ **چاپ الکترونیکی:** ۰۷ فروردین ۱۴۰۳

استناد: قمرنیا، ه.، عباسی، م.ر.، و فرمانی‌فرد، م. (۱۴۰۳). اثر آبیاری با پساب تصفیه‌شده فاضلاب شهری کرمانشاه بر غلظت و توزیع فلزات سنگین در گیاه باقلا ، *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۴(۱)، ۱۸-۱، شناسه دیجیتال: 10.22126/atwe.2024.10069.1070

ناشر: دانشگاه رازی

© نویسندگان.

مقدمه

منابع آب شیرین برای حفظ حیات و حمایت از اکوسیستم‌های مختلف، کشاورزی، صنعت و فعالیت‌های انسانی حیاتی هستند. اهمیت منابع آب شیرین را نمی‌توان نادیده گرفت، زیرا آب برای آشامیدن، بهداشت، تولید غذا، تولید انرژی و حفظ تعادل اکولوژیکی ضروری است. بااین‌حال، با رشد فزاینده جمعیت، شهرنشینی و تغییرات آب و هوایی، تقاضا برای آب به‌طور پیوسته در حال افزایش است و بر منابع آب شیرین موجود فشار وارد می‌کند. به‌طوری‌که استفاده جهانی از آب شیرین از سال ۱۹۰۰ شش برابر شده است (سانتوس و همکاران [۱]، ۲۰۲۳). در سال ۲۰۱۴، حدود ۴ تریلیون مترمکعب از منابع آب شیرین جهان برای کشاورزی، صنعت و مصارف خانگی استفاده شد (ریچی و رزر [۲]، ۲۰۲۳). بااین‌حال، برای حفظ سطوح پایدار این منبع حیاتی، میزان برداشت آب شیرین باید کمتر از نرخ تجدید طبیعی باشد. در این میان ایران نیز مانند بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به دلیل افزایش جمعیت، خشک‌سالی‌های پیاپی و بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب شیرین با چالش کاهش و کمبود منابع آب شیرین برای آبیاری محصولات کشاورزی مواجه شده است (عباسی و سپاس خواه [۳]، ۲۰۲۲).

از منظر استفاده مجدد از آب، امکان بازیابی آب از منابع مختلف و تصفیه و استفاده مجدد از آن برای اهداف مفید و احیای محیط‌زیست وجود دارد. این استراتژی می‌تواند منابع آب جایگزینی برای تأمین آب موردنیاز فراهم کرده و امنیت و پایداری آب را بهبود بخشد. منابع آب واجد شرایط برای استفاده مجدد عبارت‌اند از فاضلاب شهری، فاضلاب صنعتی، آب‌های شوری که توسط سیستم‌های مختلف آب‌شیرین‌کن نمک‌زدایی شده‌اند، استحصال آب باران و رواناب کشاورزی و منابع طبیعی (سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا [۴]، ۲۰۲۲ و کریستنسن و همکاران [۵]، ۲۰۱۸). لذا، از این میان یکی از راهکارها برای مقابله با چالش کمبود و کاهش منابع آب شیرین می‌تواند بهره‌برداری مؤثر از منابع آب غیرمتعارف همچون فاضلاب تصفیه‌شده شهری برای آبیاری گیاهان زراعی، باغات و فضای سبز باشد. تقریباً تخمین زده می‌شود که حدود ۲۰ میلیون هکتار از زمین‌های زراعی در سطح جهان با فاضلاب آبیاری می‌شود که تقریباً ۱۰ درصد از زمین‌های کشاورزی آبی دنیا را تشکیل می‌دهد (گویال [۶]، ۲۰۱۶) که با توجه به روند صعودی کاهش منابع آب شیرین در بخش کشاورزی می‌توان پیش‌بینی کرد که در سال‌های آتی اقبال جهانی برای استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده به‌عنوان یک‌راه حل پایدار برای جبران کمبود آب در بخش کشاورزی افزایش یابد (انسینک و همکاران [۷]، ۲۰۰۲ و کیزیلوغلو و همکاران [۸]، ۲۰۰۸). با این نرخ افزایشی استفاده از پساب‌های تصفیه‌شده خانگی برای آبیاری محصولات کشاورزی مقداری از مشکلات آلودگی حال حاضر آب‌های سطحی که ناشی از رهاسازی فاضلاب به درون آن‌ها است کاهش پیدا می‌کند چراکه حجم و غلظت کمتری از فاضلاب و آلاینده‌های آن به درون آب‌های سطحی ریخته می‌شود که نه‌تنها به حفظ منابع آب شیرین کمک می¬کند بلکه امکان استفاده از مواد مغذی موجود در پساب (عمدتاً نیتروژن (N) و فسفر (P)) جهت پرورش محصولات کشاورزی که به‌نوبه خود منافع اقتصادی زیادی برای کشاورزان (درنتیجه استفاده کمتر از کودهای شیمیایی) دارد را فراهم می‌آورد (گروه اروپایی [۹]، ۲۰۲۰). همچنین سایر مواد ریزمغذی باارزش و مواد آلی موجود در پساب مزایای بسیاری را برای اراضی کشاورزی خواهند داشت (پیوتروووسکا و همکاران [۱۰]، ۲۰۰۶)؛ اما از سویی دیگر در کنار مزایای استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده برای کشاورزی نگرانی‌هایی همچون حضور احتمالی میکروارگانیسم‌ها، فلزات سنگین بالقوه سمی و میکروپلاستیک‌ها در فاضلاب به‌عنوان یک خطر بالقوه برای سلامتی انسان و دام وجود دارد (سانتس [۱۱]، ۲۰۲۰؛ و لانگاس [۱۲]، ۲۰۲۰). در این میان، فلزات سنگین که به دلیل ماندگاری و سمی بودن شناخته می‌شوند، می‌توانند در اندام‌های مختلف محصولات

---

[1] Santos et al
[2] Ritchie and Roser
[3] Abbasi and Sepaskhah
[4] US EPA
[5] Kristensen et al
[6] Goyal
[7] Ensink et al
[8] Kiziloglu et al
[9] European Comission
[10] Piotrowska et al
[11] Santos
[12] Langaas

کشاورزی آبیاری شده با پساب خانگی انباشته شوند و خطراتی جدی برای سلامت انسان و محیطزیست به وجود آورند (حسن و همکاران[۱]، ۲۰۱۵). لذا، برای مدیریت صحیح آبیاری محصولات کشاورزی با پساب شهری به جهت حفظ سلامت انسان و محیطزیست بسیار حیاتی است که وضعیت تجمع و توزیع فلزات سنگین در بافت‌ها و اندام‌های مختلف گیاهی به‌ویژه قسمت خوراکی آن‌ها (چه برای انسان و چه دام) به‌صورت پژوهش‌های محلی برای هر گیاه سنجش و ارزیابی شود.

معمولاً فاضلاب آلوده به عناصر نادر و کمیابی همچون مس، روی، آهن، کادمیم، منگنز، بر، کبالت، آرسنیک و سرب است که تعداد زیادی از این عناصر برای رشد گیاه غیر ضرری هستند (موچووتی و همکاران[۲]، ۲۰۰۶). فلزات سنگین در فاضلاب می‌تواند از منابع مختلفی ازجمله فاضلاب خانگی که حاوی مواد شوینده، بقایای ناشی از خوردگی سیستم‌های لوله‌کشی فرسوده و محصولات آرایشی و بهداشتی است، رواناب ناشی از نزولات جوی که در مسیر خود از منابع آلوده به فلزات سنگین مثل جاده‌ها، پشت‌بام‌ها و سایر سطوح غیرقابل نفوذ عبور نموده، تخلیه صنعتی پساب کارخانه‌ها و شهرک‌های صنعتی، فعالیت‌های کشاورزی همچون استفاده از کودها و آفت‌کش‌ها که مقادیر قابل‌توجهی فلزات سنگین در ترکیبات خوددارند، هوازدگی سنگ‌ها و فعالیت‌های آتش‌فشانی منشأ بگیرد (آفتاب و همکاران[۳]، ۲۰۲۳).

تلاش برای کاهش آلودگی فلزات سنگین در فاضلاب شامل اجرای شیوه‌های مناسب مدیریت پسماند، بهبود فرآیندهای صنعتی، تنظیم استفاده از محصولات خاص و به‌کارگیری فناوری‌های مؤثر تصفیه فاضلاب است. اقدامات نظارتی و مدیریتی نیز برای کنترل رهاسازی فلزات سنگین در منابع آبی ضروری است. به کار بردن طولانی‌مدت پساب تصفیه‌شده برای آبیاری می‌تواند منجر به جذب و تجمع مقادیر متناهی از فلزات سنگین در خاک و اندام‌های گیاهی شود که در صورت وارد شدن این فلزات به زنجیره غذایی انسان از طریق مصرف طولانی این محصولات کشاورزی ممکن است سلامت را تهدید نماید (قویش و همکاران[۴]، ۲۰۱۲) زیرا که این آلاینده‌ها در بدن غیرقابل تجزیه هستند و تجمع آن‌ها در بدن باعث ایجاد بیماری خواهد شد (کریستو و همکاران[۵]، ۲۰۱۴).

ورود فلزات سنگین به درون گیاه عمدتاً از طریق ریشه صورت می‌گیرد و این فلزات بسته به نوع فلز سنگین می‌توانند در آوندهای گیاهی حرکت کرده و به دیگر اندام‌های گیاه همچون اندام هوایی و بخش‌های خوراکی مثل میوه و دانه منتقل شوند (یونس و همکاران[۶]، ۲۰۱۶). با بالا رفتن تجمع فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی احتمال کاهش جذب مواد مغذی ضروری در گیاه بالا می‌رود که درنهایت این مسئله می‌تواند منجر به کاهش کیفیت محصول شود (خان و همکاران[۷]، ۲۰۱۶). بااین‌حال نرخ تجمع فلزات سنگین در گیاهان بستگی به نوع گیاه، واریته، غلظت این فلزات در آب آبیاری و خاک دارد.

در پژوهش حاضر تجمع فلزات سنگین همچون مس، آهن، روی، کادمیم و منگنز در اندام‌های مختلف گیاهی (ریشه، اندام هوایی و دانه) گیاه باقلا (که در منطقه موردبررسی به‌صورت وسیع کشت می‌شود) تحت آبیاری با تیمار پساب تصفیه‌شده شهری در مقایسه با تیمار آب چاه به‌عنوان تیمار شاهد (کنترل) در سه تکرار و قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی‌شده است که نتایج آن پس از مقایسه با استانداردهای بهداشتی و پژوهش‌های پیشین در مدیریت صحیح استفاده از پساب شهری برای آبیاری گیاه باقلا برای حفظ سلامتی انسان و دام بسیار حائز اهمیت است و می‌تواند خلأ موجود در پژوهش‌های پیشین را در این رابطه پر نماید.

[1] Hasan et al
[2] Muchuweti et al
[3] Aftab et al
[4] Ghosh et al
[5] Christou et al
[6] Younis et al
[7] Khan et al

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی در مورداستفاده از آب بازیافتی برای آبیاری اراضی کشاورزی انجام‌شده است. در این مطالعات از پساب تصفیه‌شده برای بهبود رشد محصول و درعین‌حال حفظ خاک و کیفیت محصول نهایی استفاده کرده‌اند. طبق مطالعه انجام‌شده توسط بدبابیس و همکاران[1] (۲۰۱۵) استفاده از آب بازیافتی باعث افزایش PH و مقدار مواد آلی، مواد درشت مغذی، نمک‌ها و فلزات بالقوه سمی (Mn، Zn و Fe) در خاک می‌شود. بااین‌حال، مقدار فلزات سنگین منگنز، روی و آهن از استانداردهای مجاز ارائه‌شده توسط دولت تونس تجاوز نکرد. همان‌طور که انتظار می‌رفت به دلیل عناصر غذایی مقوی موجود در فاضلاب، زمان رسیدن میوه زیتون با افزایش شوری خاک سریع‌تر شد. مطالعه تجمع کروم، آهن، منگنز، مس، نیکل، روی، کبالت و سرب در سبزی‌های خوراکی همچون گوجه‌فرنگی، بادمجان، سیر و پیاز نشان داد که انباشت این فلزات در سبزی‌های آبیاری شده با فاضلاب به‌طور معنی‌داری بیش از تیمار آب چاه است که در بسیاری از موارد مقادیر این فلزات در گیاه بالاتر از مقادیر بیشینه مجاز ارائه‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی و فائو بود (رینولدز و همکاران[2]، ۲۰۰۹). فرمانی فرد و همکاران (۱۳۹۵) تجمع فلزات سنگین را در اندام‌های مختلف گیاهان ذرت، جو، بامیه و جعفری را که با استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده شهری شهر کرمانشاه آبیاری می‌شدند بررسی کردند. نتایج نشان داد که اثر آبیاری با پساب بر تجمع فلزات سنگین آهن، روی و کادمیم در تمام‌اندام‌های محصولات موردبررسی به‌صورت معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد آبیاری با آب چاه بود بطوریکه غلظت برخی از فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی بالاتر از حدود مجاز استانداردهای توصیه‌شده قرار داشت. علاوه بر این تجمع فلزات سنگین در ریشه بیش از اندام‌های دیگر گزارش شد. خان و همکاران [3] (۲۰۲۳) اثرات آبیاری با منابع مختلف فاضلاب بر تجمع فلزات سنگین در نمونه‌های نارنگی پاکستانی و گریپ‌فروت و خطرات سلامتی ناشی از مصرف آن‌ها را بررسی کردند. در این مطالعه غلظت سرب، کروم، کادمیوم و نیکل در قسمت‌های خوراکی گریپ‌فروت و نارنگی آبیاری شده با آب فاضلاب، آب چاه و آب کانال اندازه‌گیری شد. غلظت تمام فلزات موردمطالعه در میوه نارنگی و گریپ‌فروت آبیاری شده با فاضلاب نسبت به نمونه‌های آبیاری شده با آب چاه و آب کانال بیشتر بودند. غلظت سرب در محدوده ۰/۰۲۳ تا ۰/۱۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نمونه‌های میوه هر دو رقم تعیین شد. محدوده کروم از ۰/۰۵۴ تا ۰/۷۸۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نمونه‌های میوه هر دو رقم متغیر بود. محدوده کادمیوم از ۰/۰۱۲ تا ۰/۱۳۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نمونه‌های میوه هر دو رقم متغیر بود. دامنه نیکل از ۰/۰۲۸ تا ۱/۴۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در نمونه‌های میوه هر دو رقم متغیر بود. ضریب غلظت زیستی، فاکتور غنی‌سازی، دریافت روزانه فلز و مقادیر شاخص خطر سلامتی برای همه فلزات در محدوده‌های مجاز بود که نشان‌دهنده عدم خطرات فوری سلامتی مرتبط با مصرف این میوه‌ها است. نتایج بررسی مقادیر انباشت فلزات سنگین در گیاهان علوفه‌ای آبیاری شده با فاضلاب در جنوب تهران نشان داد که مقدار فلزات سنگین تجمع یافته در بوتهٔ ذرت تحت تیمار آبیاری با فاضلاب ۱/۵ برابر بوتهٔ ذرت آبیاری شده با آب چاه است. به‌غیراز روی و منگنز انباشت سایر فلزات در بوته ذرت بیش‌ازحد استاندارد مجاز و در دانه و بلال ذرت مقادیر کروم، سرب، نیکل و روی کمتر از حد استاندارد مجاز و منگنز و کادمیم بیشتر از حد استاندارد مجاز گزارش شد (یارقلی، ۱۳۸۷).آنجِلوا و همکاران[4] (۲۰۰۴) و جیناداسا و همکاران[5] (۱۹۹۷)، در مطالعات خود برای مقایسه مقدار فلزات سنگین انباشت شده در گونه‌ها و واریته های مختلف گیاهی تحت شرایط مشابه زیست‌محیطی نتیجه گرفتند که توانایی گیاهان در جذب و تجمع فلزات سنگین متفاوت است و این تفاوت بین اندام‌های مختلف گیاهان نیز وجود دارد.

[1] Bedbabis et al
[2] Reynolds et al
[3] Khan et al
[4] Angelova et al
[5] Jinadasa et al

روش پژوهش

مشخصات منطقه موردپژوهش و تصفیه‌خانه فاضلاب شهری کرمانشاه

این پژوهش در شهر کرمانشاه با ارتفاع متوسط ۱۲۹۱ متر از سطح دریا که بر اساس تقسیم‌بندی آمبرژه اقلیم آن نیمه‌خشک – سرد است انجام شد. میانگین دما و بارش سالانه این شهر به ترتیب ۱۴/۳ درجه سانتی‌گراد و ۴۴۴ میلی‌متر است که بیشتر بارش‌ها بین ماه‌های آبان تا اردیبهشت رخ می‌دهد. تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شهر کرمانشاه در جنوب غربی شهر با مساحتی در حدود ۷۸ هکتار و مختصاتی به طول جغرافیایی ″۲۷ ′۱۸ °۳۴ و عرض جغرافیایی ″۱۸ ′۰۸ °۴۷ واقع‌شده است. این تصفیه‌خانه، فاضلاب جمعیتی برابر ۴۰۰ هزار نفر را جمع‌آوری می‌نماید به‌طوری‌که ظرفیت دبی روزانه آن ۶۰ هزار مترمکعب است. فرآیند تصفیه در این تصفیه‌خانه به روش لجن فعال از نوع متعارف است که شامل مراحل تصفیه‌های مقدماتی، اولیه و ثانویه و در پایان گندزدایی پساب است. دبی فاضلاب تصفیه‌شده این تصفیه‌خانه ۷۰۰ لیتر در ثانیه یا ۶۰ هزار مترمکعب در روز است. شکل (۱)، کانال جمع‌آوری و خروجی آب تصفیه‌شده تصفیه‌خانه کرمانشاه را نشان می‌دهد.

در این پژوهش که در شرایط واقعی انجام شد اراضی تحت کشت باقلا چه در حالت آبیاری با پساب چه در حالت آبیاری با آب چاه (شاهد) هر یک مساحتی نزدیک به ۵ هکتار، در پایین‌دست تصفیه‌خانه واقع‌شده بود. دراین‌بین اراضی تحت آبیاری با پساب در یک‌سوی رودخانه قره‌سو واقع‌شده بود که به مدت‌زمانی نزدیک به ۱۰ سال همیشه با پساب خروجی تصفیه‌خانه به روش سنتی و سطحی آبیاری و اراضی شاهد (کنترل) که دقیقاً در آن‌سوی دیگر رودخانه قره‌سو و درست روبروی اراضی تحت آبیاری با پساب واقع گردیده نیز از سال‌های دور همیشه با آب چاه آبیاری شده بود. مشخصات فیزیکی خاک اراضی موردمطالعه در جدول (۱) و غلظت فلزات سنگین موجود در آب پساب و آب چاه و مقایسه آن‌ها با حدود استانداردهای معتبر در جدول (۲) ارائه‌شده است. استانداردهای جهانی ارائه‌شده در جدول (۲) مربوط به سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی (FAO)، سازمان بهداشت جهانی (WHO) و آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA) در رابطه باکیفیت مجاز پساب ازلحاظ غلظت فلزات سنگین برای آبیاری است. شکل (۲)، موقعیت تصفیه‌خانه و تیمارهای موردنظر را نشان می‌دهد.

شکل ۱. کانال جمع‌آوری و خروجی آب تصفیه‌شده تصفیه‌خانه کرمانشاه

شکل ۲. موقعیت تصفیه‌خانه و تیمارهای موردنظر

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک اراضی موردمطالعه

تیمار آبیاری	لایه خاک، cm	ρ_b, g cm^{-3}	Ks, mm h^{-1}	η , %	کلاس بافت خاک
پساب تصفیه‌شده	۰ – ۳۰	۱/٦٤	۳۸/۰۲	۳۵/۸۳	Sandy Loam
	۳۰ – ٦۰	۱/۵۸	۳٤/۱۸	۲۷/۱۱	Sandy Clay Loam
	٦۰ – ۹۰	۱/۷۲	۳٦/۰٦	۳۳/۱۹	Sandy Loam
چاه	۰ – ۳۰	۱/۷۰	۱۸/۱۹	۳۷/۰۰	Sandy Loam
	۳۰ – ٦۰	۱/۸۰	۲۷/۱٦	۲۹/۹۰	Sandy Loam
	٦۰ – ۹۰	۱/٦۹	۲۰/٦۰	۲۵/۷۳	Sandy Loam

جدول ۲. غلظت فلزات مختلف در تیمارهای آب بکار رفته برای آبیاری و مقایسه با حدود بالایی استانداردهای معتبر

عنصر	غلظت در آب (mg l^{-1})					
	قبل از اولین آبیاری		بعد از آخرین آبیاری			
	پساب	چاه	پساب	چاه	EPA[۳]	WHO[۲]	FAO[۱]
مس (Cu)	۰/۰۳	۰/۰	۰/۱۱	۰/۰	۰/۲	۰/۲	۰/۲
آهن (Fe)	۱۵/۷	۱/۳۲	۳٦/۲	۱/۰٦	۵	۵	۵
روی (Zn)	۱/۲۵	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۰۷	۱	۲	۲
کادمیم (Cd)	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
منگنز (Mn)	۲/۱	۰/۰۰	۱۱/۱	۰/۰۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲

[۱] استاندارد ارائه‌شده توسط سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی (FAO).

[۲] استاندارد ارائه‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی (WHO).

[۳] استاندارد ارائه‌شده توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA).

جمع‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌های گیاهی برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین

در زمان رسیدن و برداشت محصول، تعدادی بوته کامل (ریشه، اندام هوایی و دانه) از قسمت‌های مختلف هر مزرعه (هر تیمار) به‌طور تصادفی و در سه تکرار انتخاب و برداشت شد. پس از جمع‌آوری نمونه‌های گیاهی و ریختن آن‌ها در کیسه‌های پلی‌اتیلن و انتقال آن‌ها به آزمایشگاه، اندام‌های مختلف هر گیاه با آب مقطر سه بار تقطیر شستشو داده شد تا از وجود آلاینده‌های احتمالی موجود در آب‌وخاکی که در تماس با گیاه بوده زدوده شوند. پس از فرایند شستشو فرایند خشک‌کردن نمونه‌ها گیاهی در مجاورت هوای آزاد انجام شد که پس‌ازآن قسمت-های مختلف گیاه اعم از دانه، اندام هوایی و ریشه خرد و آسیاب شد و در پلاستیک‌های نایلونی کوچک برای اندازه‌گیری فلزات سنگین به آزمایشگاه منتقل شد (باتارسه و همکاران[۱]، ۲۰۱۱).

[1] Batarseh et al

هضم نمونه‌های گیاهی و اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین

برای هضم نمونه‌های گیاهی مقدار ۲ گرم از هر نمونه آسیاب شده را داخل بالون ته گرد ریخته و سپس به آن به ترتیب ۴ میلی‌لیتر اسید پرکلریک غلیظ، ۲ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک غلیظ و ۲۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ اضافه شد و سپس محلول را جوشانده تا حجم کل آن کم شود. در مرحله بعد به آن ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه کرده تا رسوبات حل شوند و مجدداً حرارت داده شد تا حجم کل کم گردد. سپس محلول با استفاده از کاغذ صافی شماره ۴۱ واتمن صاف شد و در ادامه حجم آن با آب مقطر به ۲۵۰ میلی‌لیتر رسانیده شد (باتارسه[1] و همکاران، ۲۰۱۱). در پایان برای سنجش غلظت هر فلز در هر نمونه از دستگاه جذب اتمی مدل Spectra AA 220 (ساخت کارخانه VARIAN کشور استرالیا) استفاده گردید.

تجزیه‌وتحلیل آماری

تجزیه‌وتحلیل آماری مربوط به مطالعه تجمع فلزات سنگین در اندام‌های مختلف گیاه باقلا در قالب یک طرح آماری کاملاً تصادفی (CRD) در سه تکرار با دو تیمار آبیاری با پساب تصفیه‌شده و آب چاه (به‌عنوان تیمار شاهد) انجام شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزارهای آماری MiniTab 17.0، SAS 9.1 و MSTATC تحلیل و ارزیابی شدند. پس از انجام تست نرمال بودن داده‌ها آزمون مقایسه میانگین در سطوح احتمالی ۱ و ۵ درصد به روش دانکن انجام شد.

یافته‌ها

نتایج تحلیل آماری غلظت فلزات سنگین در اندام‌های مختلف گیاه باقلا

جدول ۳ خلاصه‌ای از جدول آنالیز واریانس (ANOVA) را برای تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر غلظت فلزات سنگین در اندام‌های مختلف گیاه باقلا (ریشه، اندام هوایی و دانه) به تصویر کشیده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که اثر تیمار کیفیت آب آبیاری (پساب و آب چاه) بر روی غلظت فلزات سنگین در گیاه باقلا در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بوده است. همچنین این جدول نشان می‌دهد که غلظت فلزات سنگین در اندام‌های مختلف این گیاه به‌صورت معنی‌داری ($p=0.01$) با یکدیگر متفاوت بوده است. علاوه بر این، اثر متقابل این دو عامل (تیمار کیفیت آب و اندام گیاهی) بر غلظت فلزات سنگین معنی‌دار شد.

[1] Batarseh

جدول ۳. خلاصه جدول آنالیز واریانس (ANOVA) برای غلظت فلزات سنگین در اندام مختلف باقلا تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری

تیمار	درجه آزادی	میانگین مربعات اصلاح‌شده (Adj. MS)				
		مس	آهن	روی	کادمیوم	منگنز
آب	۱	٤۰۳٥**	٥٦۱۹٤۱**	۱۰۳۰٤**	۰/۲۹۹**	۲٥٥۷٤**
خطا	٤	۲۲/۳۸	٥٤٥٤	٦۰/۳۸	۰/۰۰٥	۱۸/٤۰
اندام گیاهی	۲	۲٤٦۰**	۳٤۸۷٦۳**	۱٥۲۰**	۰/۷۱۸**	٦۱۲۷**
آب* اندام گیاهی	۲	۳۲۱/۳**	۱٦۹٤۳۹**	۱۲۸/۲**	۰/۰۱۸**	۳۲٥۷**
خطا	۸	۸/٥۲۱	۱٥۷٦	۱۳/۸٤	۰/۰۰۱	۷۱/۹۱
ضریب تغییرات (٪)	–	۹/۹۸	۱٤/۲۷	۸/٦۷	۸/۳٥	۱٦/۰۰

** نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ازنظر آماری در سطح یک درصد به روش دانکن است.

جدول (۴) مقایسه میانگین‌های غلظت فلزات سنگین مختلف را در اندام‌های مختلف گیاه باقلا را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌های به‌دست‌آمده برای این گیاه، غلظت هر یک از فلزات سنگین (مس، آهن، روی، کادمیوم و منگنز) در تمام‌اندام‌های گیاه باقلای تحت تیمار آبیاری پساب به‌صورت معنی‌داری ($p=0.01$) بیشتر از غلظت همان فلز در تیمار آب چاه بوده است. با توجه به جدول (۴) مشاهده می‌شود که در هر دو تیمار آبیاری (پساب و آب چاه) بیشترین غلظت فلزات سنگین آهن و کادمیوم (۸۹۸ و ۰/۹۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب برای آهن و کادمیوم در پساب و ۱۷۴ و ۰/۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای تیمار آب چاه) در ریشه گیاه باقلا اتفاق افتاده است به‌طوری‌که غلظت این دو فلز در ریشه گیاه باقلای آبیاری شده با پساب بسیار بیشتر از حدود استانداردهای موجود (جدول (۵)) است. با توجه به نتایج (جدول (۴)) می‌توان مشاهده نمود که غلظت کادمیوم و روی در دانه بالاتر از استاندارد (جدول (۵)) است (۰/۴۶ و ۸۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب برای کادمیوم و روی).

بیشترین مقدار غلظت مس و منگنز در هر دو تیمار آبیاری در قسمت هوایی باقلا مشاهده شد (۷۲ و ۱۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب برای مس و منگنز در پساب و ۲۹ و ۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب برای مس و منگنز در تیمار آب چاه) و کمترین مقدار منگنز در هر دو تیمار آبیاری دردانه باقلا (۲۹ و ۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب برای تیمارهای پساب و آب چاه) و کمترین غلظت فلز مس برای تیمارهای پساب و آب چاه به ترتیب ۲۲ و ۳/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در ریشه باقلا به‌دست‌آمده است.

جدول ٤. مقایسه میانگین‌های غلظت فلزات سنگین در اندام‌های مورد مطالعه گیاه باقلا تحت تاثیر تیمارهای مختلف آبیاری

تیمار آبیاری	اندام گیاهی	مس ($mg\ kg^{-1}$)	آهن ($mg\ kg^{-1}$)	روی ($mg\ kg^{-1}$)	کادمیم ($mg\ kg^{-1}$)	منگنز ($mg\ kg^{-1}$)
پساب	ریشه	۲۲/۳۳$^{c+}$	۸۹۸/۱^{a}	٦٥/۸۸^{b}	۰/۹۳^{a}	۱۰۷/۲^{b}
	اندام هوایی	۷۲/۱۷^{a}	۳۷٤/۱^{b}	٤٦/۹۱^{c}	۰/۲۰^{d}	۱۳٥/۷^{a}
	دانه	۳٥/۱۳^{b}	۹۲/٥۳^{de}	۸۷/۷۷^{a}	۰/٤٦^{c}	۲۹/۲۰^{c}
آب چاه	ریشه	۳/٦۰^{d}	۱۷٤/۲^{c}	۲۰/۳۳^{d}	۰/٦٥^{b}	۱۳/٦۰^{cd}
	اندام هوایی	۲۸/٦۷^{bc}	۱۰٥/۹^{cd}	٦/۹۳۳^{e}	۰/۰٦^{e}	۲٥/٥۳^{c}
	دانه	۱۰/٥۳^{d}	۲٤/٤۷^{e}	۲۹/۷۳^{d}	۰/۱۰^{e}	٦/۷۷^{d}

+ در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک باشند با هم اختلاف معنی‌داری ندارند ($P < ۰/۰٥$).

بررسی تجمع فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی در مقایسه با استانداردهای موجود

هدف از این قسمت از پژوهش مقایسه غلظت فلزات سنگین در بافت‌های گیاه باقلا با استانداردها و دستورالعمل‌های موجود است. با انجام این کار می‌توان خطرات بالقوه مرتبط با سطوح بالای غلظت فلزات سنگین در گیاه باقلا را بهتر درک نموده و پایه‌ای را برای توسعه استراتژی‌های کاهش خطر سمیت این فلزات ایجاد کرد؛ زیرا که نظارت و درک انباشت فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی برای ارزیابی بهداشت محیط و اطمینان از ایمنی مواد غذایی بسیار مهم است. برای ارزیابی خطرات احتمالی تجمع فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی، سازمان‌های مختلف ملی و بین‌المللی استانداردها و دستورالعمل‌هایی را ایجاد کرده‌اند. این استانداردها معمولاً باهدف حفظ سلامت انسان و محیط‌زیست، محدودیت‌های مجاز را برای غلظت فلزات سنگین خاص در محیط‌های مختلف ازجمله خاک، آب و گیاه تعیین می‌کنند. با مقایسه غلظت فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی با این استانداردها پژوهشگران و سیاست‌گذاران می‌توانند خطرات احتمالی را ارزیابی نموده و اقدامات مناسب را برای کاهش اثرات نامطلوب انجام دهند. در این پژوهش غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در هر یک از اندام‌های گیاه باقلا با استانداردهای مندرج در جدول ۵ مورد مقایسه قرارگرفته است.

جدول ۵. حدود بالایی استانداردهای مجاز برای هر فلز در بافت‌های گیاهی

استاندارد	مس ($mg\ kg^{-1}$)	آهن ($mg\ kg^{-1}$)	روی ($mg\ kg^{-1}$)	کادمیم ($mg\ kg^{-1}$)	منگنز ($mg\ kg^{-1}$)
FAO/WHO (2007)	٤۰	٤۵۰	٦۰ – ۱۰۰	۰/۲	۵۰۰
FAO/WHO (2001)	۷۳	NL	۱۰۰	۰/۱	NL
EU (2006)	٤۰	٤۲۵	٦۰	۰/۰۵ – ۰/۲	NL
SEPA (2005)	۲۰	NL	۱۰۰	۰/۲	NL

FAO/WHO کمیته مشترک سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد و سازمان بهداشت جهانی.

EU مجله رسمی اتحادیه اروپا.

SEPA اداره حفاظت از محیط‌زیست ایالتی چین.

NL محدودیتی ندارد (Not limited).

مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر (جدول (۴)) با حدود مجاز در استانداردهای ارائه‌شده (جدول (۵)) نشان می‌دهد که سطوح غلظت مس در اندام‌های مختلف باقلا پایین‌تر از مقادیر حداکثر پیشنهادی FAO/WHO بوده و تنها مقدار تجمع این فلز در اندام هوایی باقلا بالاتر از استاندارد SEPA و EU است.

برای آهن به‌استثنای مقادیر بالای آن برای گیاهان سمیتی گزارش نشده است. تنها FAO/WHO و EU به ترتیب حدود پیشنهادی ۴۵۰ و ۴۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم را برای غلظت آهن در اندام‌های گیاهی ارائه کرده‌اند و استانداردهای دیگر حدومرزی برای این فلز ارائه ننموده‌اند (جدول (۵)). ولی اگر قرار باشد که گیاه به مصرف تغذیه دام برسد غلظت آستانه سمیت این فلز در گیاه ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم پیشنهادشده است (آلووی[1]، ۱۹۹۵). در پژوهش حاضر مقایسه میزان غلظت آهن اندازه‌گیری شده در گیاه باقلا نشان می‌دهد که مقدار تجمع این فلز در ریشه باقلای آبیاری شده با پساب تصفیه‌شده بالاتر از حد مجاز استانداردها است؛ اما با توجه به پایین بودن مقدار آن در دانه (۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) این گیاه که در جیره غذایی انسان نقش دارد نگرانی خاصی وجود ندارد.

در تیمار آبیاری با پساب تصفیه‌شده مقدار تجمع روی در گیاه باقلا پایین‌تر از حدود پیشنهادی استانداردهای SEPA و FAO/WHO به دست آمد؛ اما غلظت این عنصر در ریشه و دانه گیاه باقلای تحت تیمار آبیاری با پساب بالاتر از حداکثر مجاز استاندارد EU است. این در حالی است که در خاک‌های ایران با کمبود روی مواجه هستیم (هاشمی نصب و همکاران[2]، ۲۰۲۳) و شاید این موضوع زیاد نگران‌کننده نباشد.

در مورد منگنز نیز نتایج نشان‌دهنده شرایط مناسبی از غلظت این فلز در اندام‌های گیاه باقلا است بطوریکه مقدار غلظت منگنز در این گیاه بسیار کمتر از حد پیشنهادی توسط استانداردFAO/WHO (۲۰۰۷) است. اگرچه شاید مهم‌ترین دلیل برای عدم تعیین حدود مجاز برای غلظت فلز منگنز در گیاهان زراعی کم‌خطر بودن این فلز در صورت تجمع در بافت‌های گیاهی باشد.

در پژوهش حاضر مهمترین عنصر در میان پنج فلز سنگین موردمطالعه قرارگرفته کادمیوم است. بالا بودن غلظت این عنصر در آب آبیاری، خاک و درنتیجه جذب و تجمع آن در اندام‌های گیاهی نگران‌کننده است. به‌طورکلی در بین فلزات سنگین تعدادی از آن‌ها همچون مس، روی در غلظت‌های مناسب و مجاز ازنظر استانداردها برای بیشتر سیستم‌های بیولوژیکی همچون انسان لازم و ضروری هستند (آدریانو[3]، ۲۰۰۱) درحالی‌که تعدادی از فلزات

[1] Alloway
[2] Hasheminasab et al
[3] Adriano

سنگین همچون کادمیم، آرسنیک و سرب برای انسان‌ها، حیوانات و گیاهان بسیار خطرناک و سمی هستند (کاباتاپندیاس و پندیاس[1]، ۲۰۰۱ و لین و همکاران[2]، ۲۰۰۴). نتایج اندازه‌گیری غلظت کادمیوم انباشت شده در اندام‌های مختلف باقلا نشان می‌دهد که میزان تجمع کادمیوم در تمام‌اندام‌های تیمار آبیاری شده با پساب تصفیه‌شده و حتی در ریشه باقلا در تیمار آب چاه بیشتر از حدود مجاز در استانداردهای پیشنهادشده است. بطوریکه؛ غلظت بسیار بالای این فلز در ریشه و دانه باقلا (به ترتیب برابر با ۰/۹۳ و ۰/۴۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) نگران‌کننده و خطرناک است زیرا که کادمیوم به‌عنوان یک عامل سرطان‌زا در سلامت انسان شناخته‌شده است (واکس[3] ۲۰۰۳ و تورکدوغان و همکاران[4]، ۲۰۰۳) و به نظر می‌رسد عاملی اثرگذار در ایجاد بیماری‌های قلبی و عروقی و فشارخون نیز باشد (ادموندز و سمدلی[5]، ۱۹۹۶).

میزان کادمیوم جذب‌شده توسط گیاه به مقدار کل کادمیوم موجود در خاک و قابلیت جذب این فلز در خاک و گیاه بستگی دارد. دیویس و کارلتون اسمیت[6] (۱۹۸۰) نشان دادند که کرفس، کاهو، اسفناج و کلم تمایل زیادی به جذب و تجمع کادمیوم در اندام‌های خوددارند در صورتیکه ذرت، سیب‌زمینی، لوبیا و نخود فقط مقدار کمی کادمیوم در خود انباشت می‌کنند.

بحث

از یک‌سو با کاهش منابع آب تجدیدشونده در مناطق خشک و نیمه¬خشک دنیا که کشور ایران از آن مستثنا نیست و از سویی دیگر افزایش حجم تقاضا برای دستیابی به آب باکیفیت سبب شده است که منابع آب باکیفیت بهتر برای مصارف شهری و شرب حفاظت‌شده و منابع آب باکیفیت پایین‌تر (مثل فاضلاب تصفیه‌شده) برای مصارفی مانند کشاورزی، صنعت و فضای سبز بکار گرفته شوند؛ اما در صورت استفاده از پساب تصفیه‌شده برای آبیاری اراضی کشاورزی همچنان وضعیت تجمع فلزات سنگین در اندام‌های مختلف محصولات زراعی و باغی آبیاری شده با پساب همچنان نامشخص و در هاله‌ای از ابهام قرار داشته و به دلیل خطر ورود این فلزات به چرخه غذایی انسان بایستی دائماً مقادیر این فلزات در پساب، خاک و اندام‌های مختلف گیاهی رصد و پایش شود. این پژوهش باهدف بررسی اثرات آبیاری با پساب تصفیه‌شده شهری در مقایسه با آب چاه به‌عنوان تیمار شاهد بر تجمع فلزات سنگین در ریشه، اندام هوایی و دانه گیاه باقلا انجام شد. لذا برای انجام این پژوهش غلظت فلزات سنگین (مس، آهن، روی، کادمیوم و منگنز) در اندام‌های مختلف گیاه باقلا که در اراضی کشت‌شده زیردست تصفیه‌خانه فاضلاب شهر کرمانشاه قرار داشت و توسط پساب تصفیه‌شده این تصفیه‌خانه آبیاری می‌شد اندازه‌گیری و با غلظت فلزات سنگین تجمع یافته در اندام‌های مختلف گیاه باقلا که با آب چاه آبیاری شده بود و در همان منطقه و در زیردست تصفیه‌خانه مذکور قرار داشت مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، غلظت اندازه‌گیری شده تمام فلزات سنگین در اندام¬های گیاه باقلا تحت تیمار پساب به‌صورت معنی‌داری بیشتر از تیمارهای آب چاه بود که این نتیجه دور از ذهن نبوده زیرا که غلظت این فلزات در پساب استفاده‌شده برای آبیاری بسیار بیشتر از غلظت این فلزات در آب چاه استفاده‌شده برای آبیاری بود (جدول (۲)). همچنین بالاتر بودن غلظت فلزات سنگین در تیمار پساب می‌تواند به دلیل اثر تجمعی آبیاری‌های مکرر با پساب در بالابردن تجمعی غلظت این فلزات در خاک یا به علت مصرف بیش‌ازاندازه کودهای شیمیایی ازته و فسفاته که عموماً حاوی این نوع فلزات سنگین هستند (تانگ و همکاران[7]، ۲۰۲۲) باشد که نهایتاً سبب بالا رفتن و تجمع تدریجی این فلزات در محلول خاک و درنتیجه در دسترس قرار قرار گرفتن این فلزات برای جذب شدن توسط ریشه گیاه و درنهایت تجمع آن‌ها در اندام‌های گیاهی باشد. لذا درصورتی‌که غلظت فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی از حدود مجاز استاندارد ارائه‌شده توسط سازمان‌ها و اورگان‌های مربوطه تجاوز نماید، در صورت تکرر مصرف این اندام‌های گیاهی توسط انسان می‌تواند برای سلامتی خطرساز شود. نتایج این قسمت با نتایج پژوهش‌های فرمانی‌فر و همکاران (۱۳۹۵) بر روی ذرت، جو، بامیه و جعفری

[1] Kabata-Pendias and Pendias
[2] Lin et al
[3] Waalkes
[4] Türkdoğan et al
[5] Edmunds and Smedley
[6] Daivis and Carlton-Smith
[7] Tang

و نتایج خان و همکاران [1] (۲۰۲۳) بر روی نارنگی پاکستانی و گریپ‌فروت هم‌راستا بود که در هر دو پژوهش مذکور غلظت فلزات سنگین در تیمارهای آبیاری با پساب تصفیه‌شده بیشتر از تیمارهای آب چاه گزارش‌شده است.

علاوه بر این در هر دو تیمار آبیاری (پساب و آب چاه) بیشترین غلظت فلزات سنگین آهن و کادمیوم در ریشه گیاه باقلا اتفاق افتاده است به‌طوری‌که غلظت این دو فلز در ریشه گیاه باقلای آبیاری شده با پساب بسیار بیشتر از حدود استانداردهای موجود (جدول (۵)) است. ولی ازآنجاکه ریشه به مصرف تغذیه انسان نمی‌رسد در یک نگاه ساده‌انگارانه اولیه شاید چنین به نظر برسد که بالا بودن فلزات کادمیوم و آهن در ریشه در کوتاه‌مدت نمی‌تواند ازنظر مصرف تغذیه‌ای برای انسان مشکل‌ساز باشد ولی در طولانی‌مدت در اثر آبیاری‌های متوالی با پساب ممکن است این فلزات به سمت اندام‌های هوایی و دانه انتقال پیداکرده و در آن‌ها انباشت شود که در صورت تکرر مصرف اندام‌های خوراکی گیاه باقلا برای انسان خطرساز خواهد شد.

علاوه بر این غلظت کادمیوم و روی دردانه نیز بالاتر از استانداردهای توصیه‌شده بود و ازآنجاکه دانه باقلامستقیما به مصرف تغذیه انسان می‌رسد لزوماً باید تمهیداتی برای کاهش این دو فلز در پساب فاضلاب تصفیه‌شده شهری اندیشید؛ زیرا که در صورت تکرار آبیاری با این پساب در طولانی‌مدت احتمال افزایش و انتقال بیشتر این فلزات به اندام خوراکی دانه این گیاه و ایجاد خطرات جدی برای سلامت انسان در صورت مصرف آن افزایش می‌یابد. تلاش برای کاهش آلودگی فلزات سنگین در فاضلاب شامل اجرای شیوه‌های مناسب مدیریت پسماند، بهبود فرآیندهای صنعتی، تنظیم استفاده از محصولات خاص و به‌کارگیری فناوری‌های مؤثر تصفیه فاضلاب است. همچنین اقدامات نظارتی و مدیریتی نیز برای کنترل رهاسازی فلزات سنگین در منابع آبی ضروری است.

بیشترین مقدار غلظت منگنز در هر دو تیمار آبیاری در قسمت هوایی باقلا مشاهده شد ولی مقدار آن بسیار کمتر از استانداردهای موجود است. لذا تجمع این فلز در درون بافت ها و اندام‌های گیاهی باقلا هیچ‌گونه تهدیدی را برای سلامتی انسان ایجاد نمی‌کند.

بیشترین مقدار غلظت مس نیز در هر دو تیمار آبیاری در قسمت هوایی باقلا مشاهده شد که مقدار آن در تیمار پساب بیشتر از برخی حدود ذکرشده استانداردهای موجود است. هرچند اندام هوایی گیاه باقلا به‌صورت مستقیم به مصرف انسان نمی‌رسد ولی درصورتی‌که از اندام هوایی این گیاه در طولانی‌مدت برای تغذیه دام مصرف شود می‌تواند وارد چرخه غذایی انسان شده و سلامت او را به خطر اندازد. در این مقوله گزارش‌شده است که اولین منبع برای ورود فلزات سنگین به درون بافت گیاهان خاک اطراف ریشه است و هر چه غلظت این فلزات در محیط خاک بیشتر باشد برای گیاه نیز بیشتر در دسترس بوده و احتمال جذب شدن توسط ریشه گیاه بالاتر می‌رود (دی پائولو و رینالدی [2]، ۲۰۰۸).

در تیمار آبیاری با پساب، غلظت کادمیوم در تمام‌اندام‌های گیاه باقلا بالاتر از حدود استانداردهای موجود است. لذا استفاده مکرر از پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شهر کرمانشاه برای آبیاری اراضی کشت باقلا منجر به تجمع بیش‌ازحد نرمال این فلز سنگین در اندام‌های گیاه باقلا می‌شود که به جد سلامت انسان را به خطر انداخته و می‌بایستی برای این مسئله تمهیدات و راه‌حل‌هایی مناسب همچون تصفیه‌های تکمیلی برای زدودن و یا جلوگیری از ورود این عنصر به درون پساب خروجی از تصفیه‌خانه و همچنین مدیریت مصرف کودهای شیمیایی ازته و فسفاته از سوی کشاورزان برگزید.

ازنظر مقدار غلظت مجاز آهن در گیاه بر طبق تمام استانداردهای سلامت موجود، به‌غیراز ریشه (اندام غیرخوراکی) در بقیه اندام‌های گیاه باقلا غلظت آهن انباشت شده در محدوده مجاز قرار داشت که نتیجه با نتایج فرمانی‌فرد و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت داشت. این پژوهشگران نیز بیشترین میزان غلظت آهن را برای ذرت، جو، بامیه و جعفری در اندام ریشه این گیاهان گزارش نمودند.

غلظت روی نیز در اندام‌های مختلف باقلا عموماً پایین‌تر از حدود مجاز بود؛ که ازنظر سلامت برای انسان مشکلی ایجاد نخواهد کرد. ضمناً باید خاطرنشان کرد که افزایش غلظت یک فلز در گیاه باقلا نشان‌دهنده تحرک بالای آن فلز در خاک و تمایل بالای گیاه به جذب آن عنصر است. آلن و همکاران [3] (۱۹۹۵) نشان دادند که نوع گونه گیاهی و مدت‌زمان قرارگیری گیاه در معرض فلزات سنگین بر غلظت آلاینده¬ها در گیاه اثرگذار بوده و درنتیجه بر شاخص انتقال گیاهی این عناصر اثر می‌گذارد.

[1] Khan et al
[2] Di Paolo & Rinaldi
[3] Allen et al

در این بررسی‌ها و تحلیل‌ها باید این نکته را در نظر داشت که فلزات سنگین می‌توانند از یک منبع به محیطی دیگر منتقل و در محصولات کشاورزی تجمع یابند. لذا حتی اگر غلظت این فلزات در محصول مصرفی زیر حداکثر محدوده مجاز استانداردها باشد، برآورد کلی از دریافت روزانه این فلزات از کل منابع غذایی مصرفی لازم و ضروری است (اسماعیلی و همکاران[1]، ۲۰۱۴).

نتیجه‌گیری

ایران مانند بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به دلیل افزایش جمعیت، خشک‌سالی‌های پیاپی و بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب شیرین با چالش کاهش و کمبود منابع آب شیرین برای آبیاری محصولات کشاورزی مواجه شده است. یکی از راهکارها برای مقابله با چالش کمبود و کاهش منابع آب شیرین می‌تواند بهره‌برداری مؤثر از منابع آب نامتعارف همچون فاضلاب تصفیه‌شده شهری برای آبیاری گیاهان زراعی، باغات و فضای سبز باشد.

اما وضعیت تجمع فلزات سنگین در اندام‌های مختلف محصولات زراعی آبیاری شده با پساب همچنان نامشخص است و به دلیل خطر ورود این فلزات به چرخه غذایی انسان بایستی دائماً مقدار غلظت آلاینده‌ها در پساب تصفیه‌شده و اندام‌های گیاهی اندازه‌گیری، رصد و پایش شود. درک انباشت فلزات سنگین در بافت های گیاهی برای رسیدگی به نگرانی‌های زیست‌محیطی و ایمنی مواد غذایی حیاتی است. با مقایسه غلظت فلزات سنگین با استانداردهای موجود، می‌توان خطرات بالقوه را شناسایی کرده و استراتژی‌هایی برای به حداقل رساندن تأثیر آلودگی فلزات سنگین ایجاد نمود. این پژوهش برای حفظ سلامت اکوسیستم و رفاه انسان در مواجهه با افزایش تقاضا برای استفاده از آب‌های نامتعارف در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل خشک‌سالی‌های پیاپی و بحران منابع آب بسیار مهم و ضروری است. لذا در این مطالعه اثرات آبیاری با پساب تصفیه‌شده شهری تصفیه‌خانه شهر کرمانشاه در مقایسه با آب چاه به‌عنوان تیمار شاهد (کنترل) بر تجمع فلزات سنگین در ریشه، اندام هوایی و دانه گیاه باقلا بررسی شد. نتایج نشان داد که تجمع تمام فلزات سنگین در اندام‌های گیاه باقلا تحت تیمار آبیاری با پساب تصفیه‌شده به‌صورت معنی‌داری بیشتر از تیمار آبیاری با آب چاه بود که حتی غلظت آهن و کادمیوم در ریشه (اندام غیر خوراکی) گیاه باقلا بالاتر از استانداردهای توصیه‌شده برای سلامت تغذیه‌ای محصولات کشاورزی قرار داشت. غلظت مس و منگنز در اندام‌های مختلف باقلا پایین‌تر از حدود مجاز بود. همچنین غلظت کادمیوم و روی دردانه بالاتر از استاندارد بود که در صورت مصرف مکرر توسط انسان برای سلامتی خطرساز خواهد شد و لزوماً باید تمهیداتی برای کاهش این دو فلز در پساب اندیشید.

در این بررسی و تحلیل‌ها باید این نکته را در نظر داشت که فلزات سنگین می‌توانند از یک منبع به محیطی دیگر منتقل و در محصولات کشاورزی تجمع یابند. لذا حتی اگر غلظت این فلزات در محصول مصرفی زیر حداکثر محدوده مجاز استانداردها باشد، برآورد کلی از دریافت روزانه این فلزات از کل منابع غذایی مصرفی لازم و ضروری است.

درک انباشت فلزات سنگین در بافت های گیاهی برای رسیدگی به نگرانی‌های زیست‌محیطی و ایمنی مواد غذایی حیاتی است. با مقایسه غلظت فلزات سنگین با استانداردهای موجود، می‌توان خطرات بالقوه را شناسایی کرده و استراتژی‌هایی برای به حداقل رساندن تأثیر آلودگی فلزات سنگین ایجاد نمود. این پژوهش برای حفظ سلامت اکوسیستم و رفاه انسان در مواجهه با افزایش تقاضا برای استفاده از آب‌های نامتعارف در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل خشک‌سالی‌های پیاپی و بحران منابع آب بسیار مهم و ضروری است. تلاش برای کاهش آلودگی فلزات سنگین کادمیوم و روی در خروجی فاضلاب تصفیه‌شده که در این پژوهش برای سلامت انسان خطرساز تشخیص داده شد، شامل تصفیه اختصاصی و تکمیلی این دو فلز از فاضلاب خروجی، اجرای شیوه‌های مناسب مدیریت پسماند، بهبود فرآیندهای صنعتی، تنظیم استفاده از محصولات خاص و به‌کارگیری فناوری‌های مؤثر تصفیه فاضلاب است. اقدامات نظارتی و مدیریتی نیز برای کنترل رهاسازی فلزات سنگین در منابع آبی ضروری است.

تقدیر و تشکر

از گروه مهندسی آب دانشگاه رازی برای فراهم نمودن امکانات و شرایط لازم برای انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌گردد.

[1] Esmaeili et al

منابع

فرمانی فرد، میلاد.، قمرنیا، هوشنگ.، پیرصاحب، مقداد.، و فتاحی، نظیر. (۱۳۹۵). مطالعه تجمع فلزات سنگین در محصولات مختلف تحت تاثیر آبیاری با فاضلاب تصفیه شده شهری کرمانشاه. مدیریت آب و آبیاری، ۶(۲)، ۳۶۵-۳۴۷. https://sid.ir/paper/240087/fa

یارقلی، بهمن. (۱۳۸۷). بررسی میزان جذب کادمیم از محیط ریشه و میزان تجمع آن در اندام محصولات زراعی. رساله دکتری، دانشگاه تهران، ایران.

References

Abbasi, M. R., & Sepaskhah, A. R. (2022). Evaluation of saffron yield affected by intercropping with winter wheat, soil fertilizers and irrigation regimes in a semi-arid region. International Journal of Plant Production, 16(3), 511-529. https://doi.org/10.1007/s42106-022-00194-4

Adriano, D.C. (2001). Bioavailability of Trace Metals. Trace Elements in Terrestrial Environments. 61-89. https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5_3

Aftab, K., Iqbal, S., Khan, M. R., Busquets, R., Noreen, R., Ahmad, N., & Ouladsmane, M. (2023). Wastewater-irrigated vegetables are a significant source of heavy metal contaminants: toxicity and health risks. Molecules, 28(3), 1371. https://doi.org/10.3390/molecules28031371

Allen, H.E., Huang, C.P., Bailey, G.W., & Bowers, A.R. (1995). Metal Speciation and Contamination of Soil. Lewis Publishers, USA. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=7uGkJ5APOrkC&oi=fnd&pg=IA7&dq=Allen,+H.E.,+Huang,+C.P.,+Bailey,+G.W.+and+Bowers,+A.R.+(1995).+Metal+Speciation+and+Contamination+of+Soil.+Lewis+Publishers,+USA.&ots=LY2STEdLZF&sig=o_XbgV7flWHE4YvD9S1S8qBmEKk#v=onepage&q=doi&f=false

Alloway, B. J. (1995). Heavy metals in soils. Blackie Academic and Professional. An Imprint of Chapman & Hall, Glasgow. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1984896

Angelova, V., Ivanova, R., Delibaltova, V., & Ivanov, K. (2004). Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). Ind. Crops. Prod, 19(3), 197–205. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.10.001

Batarseh, M. I., Rawajfeh, A., Ioannis, K. K., & Prodromos, K. H. (2011). Treated municipal wastewater irrigation impact on olive trees (Olea Europaea L.) at Al-Tafilah, Jordan. Water, Air, & Soil Pollution, 217, 185-196. https://www.academia.edu/6357678/Treated_Municipal_Wastewater_Irrigation_Impact_on_Olive_Trees_Olea_Europaea_L_at_Al_Tafilah_Jordan

Bedbabis, S., Trigui, D., Ahmed, C. B., Clodoveo, M. L., Camposeo, S., Vivaldi, G. A., & Rouina, B. B. quality. Agricultural Water Management, 160, 14-21. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.023

Christou, A., Maratheftis, G., Eliadou, E., Michael, C., Hapeshi, E., & Fatta-Kassinos, D. (2014). Impact assessment of the reuse of two discrete treated wastewaters for the irrigation of tomato crop on the soil geochemical properties, fruit safety and crop productivity. Agriculture, ecosystems & environment, 192, 105-114. https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.04.007

Di Paolo, E., & Rinaldi, M. (2008). Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. Field Crops Research, 105(3), 202-210. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.10.004

Edmunds, W.M., & Smedley, P.L. (1996). Environmental Geochemistry and Health. London: Geological Society, 113, 91-105. https://people.wou.edu/~taylors/es420_med_geo/med_geo/edmunds_smedley_1996.pdf

Ensink, J. H., Van Der Hoek, W., Matsuno, Y., Munir, S., & Aslam, M. R. (2002). Use of untreated wastewater in peri-urban agriculture in Pakistan: Risks and opportunities. IWMI, 64. https://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/pub064/Report64.pdf

Esmaeili, A., Moore, F., Keshavarzi, B., Jaafarzadeh, N., & Kermani, M. (2014). A geochemical survey of heavy metals in agricultural and background soils of the Isfahan industrial zone, Iran. Catena, 121, 88-98. https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.003

EU, (2006). Commission regulation (EC) No. 1881/2006, setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Official Journal of the European Union, 364, 5-24. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1115775

European Comission. (2020). Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on Minimum Requirements for Water Reuse. Available online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0741

FAO/WHO, (2001). Codex Alimentarius Commission, Food additives and contaminants. Geneva: Joint FAO/WHO Food Standards Program. https://www.fao.org/input/download/report/27/Al0112Ae.pdf

FAO/WHO, (2007). Joint FAO/WHO, Food Standard Programme Codex Alimentarius Commission, 13th Session. Report of the Thirty Eight Session of the Codex Committee on Food Hygiene. Houston, TX, USA. https://www.fao.org/input/download/report/116/al03_13e.pdf

Farmanifard, M., Ghamarnia, H., Pir-saheb, M., & Fattahi, N. (2015). Study of the accumulation of heavy metals in different crops under the influence of irrigation with Kermanshah municipal reclaimed wastewater. Journal of Water and irrigation management, 6(2), 347-365. https://sid.ir/paper/240087/fa [In Persian]

Ghosh, A. K., Bhatt, M. A., & Agrawal, H. P. (2012). Effect of long-term application of treated sewage water on heavy metal accumulation in vegetables grown in Northern India. Environmental monitoring and assessment, 184, 1025-1036. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2018-6

Goyal, M. R. (Ed.). (2016). Wastewater management for irrigation: principles and practices. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b18967

Hasan, H., Battikhi, A., & Qrunfleh, M. (2015). Impacts of treated wastewater reuse on some soil properties and production of Gladiolus communis. Jordan Journal of Agricultural Sciences, 11(4). https://archives.ju.edu.jo/index.php/jjas/article/view/11040

Hasheminasab, K. S., Shahbazi, K., Marzi, M., Zare, A., Yeganeh, M., Bazargan, K., & Kharazmi, R. (2023). A study on wheat grain zinc, iron, copper, and manganese concentrations and their relationship with grain yield in major wheat production areas of Iran. Journal of Agriculture and Food Research, 100913. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100913

Jinadasa, K.B.P.N., Milham, P.J., Hawkins, C.A., Cornish, P.S., Williams, P.A. & Kaldor, C.J. (1997). Survey of cadmium levels in vegetables and soils of Greater Sydney, Australia. J. Environ. Qual, 26(4), 924–933. https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600040002x

Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). Trace elements in soils and plants. 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, FL. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1544363

Khan, A., Khan, S., Alam, M., Khan, M. A., Aamir, M., Qamar, Z., & Perveen, S. (2016). Toxic metal interactions affect the bioaccumulation and dietary intake of macro-and micro-nutrients. Chemosphere, 146, 121-128. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.014

Khan, Z. I., Haider, R., Ahmad, K., Alrefaei, A. F., Mehmood, N., Memona, H., & Ugulu, I. (2023). The Effects of Irrigation with Diverse Wastewater sources on Heavy Metal Accumulation in Kinnow and Grapefruit samples and Health Risks from Consumption. Water, 15(19), 3480. https://doi.org/10.3390/w15193480

Kiziloglu, F.M., Turan, M., Sahin, U., Kuslu, Y., & Dursun, A. (2008). Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (Brassica olerecea L. var. botrytis) and red cabbage (Brassica olerecea L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey. Agricultural Water Management, 95, 716 -724. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.01.008

Kristensen, P., Whalley, C., Zal, F. N. N., & Christiansen, T. (2018). European waters assessment of status and pressures. EEA Report. https://www.eea.europa.eu/publications/state-of-water

Langaas, S. (2020). Microplastics (MP) in Sewage Sludge and Agriculture. Available online: https://phosphorusplatform.eu/images/download/ESPP-meeting-sludge-2018/ESPP-4-12-2018-Langaas.pdf

Lin, C., Shacahr, Y., & Banin, A. (2004). Heavy metal retention and partitioning in a large-scale soil-aquifer treatment (SAT) system used for wastewater reclamation. Chemosphere, 57(9), 1047-1058. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.08.049

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 & environment, 112(1), 41-48. https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.028

Piotrowska, A., Iamarino, G., Rao, M.A., & Gianfreda L. (2006). Short-term effects of olive mill waste water (OMW) on chemical and biochemical properties of semi-arid Mediterranean soil. Soil Biology and Biochemistry, 38, 600-610. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.06.012

Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., & Yang, X. M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. Geoderma, 152(3-4), 252-263. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009

Ritchie, H., & Roser, M. (2022). Water Use and Stress. Available online: https://ourworldindata.org/water-use-stress

Santos, A. F., Alvarenga, P., Gando-Ferreira, L. M., & Quina, M. J. (2023). Urban wastewater as a source of reclaimed water for irrigation: barriers and future possibilities. Environments, 10(2), 17. https://doi.org/10.3390/environments10020017

Santos, A.F., Santos, C.P., Matos, A.M., Cardoso, O., & Quina, M.J. (2020). Effect of Thermal Drying and Chemical Treatments with Wastes on Microbiological Contamination Indicators in Sewage Sludge. Microorganisms, 8(3), 376. https://doi.org/10.3390/microorganisms8030376

SEPA, (2005). The limits of pollutants in food. China: State Environmental Protection Administration. GB2762-2005. https://www.codeofchina.com/standard/GB2762-2005.html

Tang, G., Zhang, X., Qi, L., Li, L., Guo, J., Zhong, H., & Huang, J. (2022). Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Increases the Uptake of Soil Heavy Metal Pollutants by Plant Community. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 109(6), 1059-1066. https://doi.org/10.1007/s00128-022-03628-x

Türkdoğan, M. K., Kilicel, F., Kara, K., Tuncer, I., & Uygan, I. (2003). Heavy metals in soil, vegetables and fruits in the endemic upper gastrointestinal cancer region of Turkey. Environmental toxicology and pharmacology, 13(3), 175-179. https://doi.org/10.1016/S1382-6689(02)00156-4

US EPA. (2022). Basic Information about Water Reuse. Available online: https://www.epa.gov/waterreuse/basic-information-about-water-reuse

Waalkes, M. P. (2003). Cadmium carcinogenesis. Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis, 533(1-2), 107-120. https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2003.07.011

Yargholi, B. (2007). Investigating the amount of cadmium absorption from the root environment and its accumulation in the different parts of the crops. doctoral dissertation, University of Tehran, Iran. [in Persian]

Younis, U., Malik, S. A., Rizwan, M., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Shah, M. H. R., & Ahmad, N. (2016). Biochar enhances the cadmium tolerance in spinach (Spinacia oleracea) through modification of Cd uptake and physiological and biochemical attributes. Environmental Science and Pollution Research, 23, 21385-21394. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7344-3