



Studying the Effect of Microbial and Heavy Metal Contamination on Barley Seed Plants Irrigated with Urban Sewage Effluent

Hamid Molahoseini¹ 

1. Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran. Email: h.molahoseini@areeo.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: May. 17, 2026

Revised: June. 8, 2026

Accepted: Jily. 2, 2026

Published online: Sep. 2026

Keywords:

**Agriculture,
Bioaccumulation,
Heavy elements,
Unconventional waters**

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the effects of microbial contamination and heavy metals resulting from wastewater effluent irrigation on soil and barley in Isfahan. To statistically evaluate the effects of wastewater on soil and barley plants in terms of heavy metals and microbial contamination, composite soil and plant samples were collected at harvest time for each crop under wastewater and well-water irrigation conditions, with ten samples taken from each treatment and sent to the laboratory for analysis. Statistical analysis of soil and plant results using a paired-samples t-test showed that the concentrations of cadmium, nickel, chromium, cobalt and arsenic in soil and plants did not show significant differences compared with well-water irrigation. The enrichment factor for lead and cadmium in plants was greater than 2, while other metals showed weak enrichment for transfer to roots and aerial plant parts. The bioconcentration factor for lead, cadmium, nickel, chromium, cobalt, and arsenic in aerial plant parts was also less than 1, while the translocation factor for lead was greater than 1 and for other heavy metals under both wastewater and well-water irrigation conditions was less than 1. Microbial contamination, including total coliforms and fecal coliforms in soil and plant samples collected twenty-one days after the last irrigation, showed no significant differences between wastewater and well-water treatments, indicating that microbial contamination was reduced to levels comparable with well-water-irrigated lands after twenty-one days. Therefore, it is recommended that seed harvesting should be carried out at least twenty-one days after the final irrigation event.

Cite this article: Molahoseini, H. (2026) Studying the Effect of Microbial and Heavy Metal Contamination on Barley Seed Plants Irrigated with Urban Sewage Effluent, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (7), 1745-1764. <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.414523.670143>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.414523.670143>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Isfahan Province, as one of the arid and semi-arid regions of Iran, is facing a reduction in water resources, and water scarcity has been increasing in this province. This issue has led to the use of unconventional water resources, particularly municipal wastewater effluent, for agricultural irrigation purposes. Improper management in the use of wastewater effluents, in addition to causing health problems and risks for humans and animals, also results in various forms of soil and water resource contamination. Studies have shown that irrigation water containing heavy metals and soil salinity are among the important environmental factors that have significant effects on barley yield, growth, and salt uptake. Irrigation with wastewater (treated or untreated) may lead to the accumulation of heavy metals in the soil as well as in different parts of barley, including grains, shoots, and roots. Such accumulation may affect barley growth and development and may pose health risks to consumers. The accumulation of toxic heavy metals in barley depends on various factors, including barley species, the type of heavy metals, and other related factors.

Materials and Methods

Considering the importance of the potential risk of toxic heavy metals and microbial contamination entering the human food chain, the present study was conducted to investigate the effects of microbial contamination and heavy metals resulting from wastewater effluent irrigation on soil and seed barley plants compared with well-water irrigation in Isfahan. For this purpose, following soil and plant sampling, chemical analyses including salinity, pH, organic carbon, concentrations of available nutrients such as nitrogen, potassium, and phosphorus, total concentrations of manganese, iron, zinc, copper, cadmium, lead, nickel, chromium, and cobalt, as well as several microbial analyses including total coliforms, fecal coliforms, *Salmonella*, *Escherichia coli* (*E. coli*), and helminth eggs were performed on the collected samples.

Results and Discussion

The results of this study showed that the wastewater effluent contained approximately 6–8 times higher concentrations of total nitrogen and phosphorus, while chloride, sulfate, calcium–magnesium, sodium, and potassium levels were approximately 5%, 12%, 30%, and 15% lower than, or similar to, those in well water, respectively. Furthermore, the concentrations of cadmium (Cd), cobalt (Co), chromium (Cr), arsenic (As), nickel (Ni), lead (Pb), copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn), and zinc (Zn), as well as the biochemical oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD) parameters in the wastewater effluent, were below the permissible limits of national and international standards. Regarding microbial contamination, total coliforms, fecal coliforms, and *Escherichia coli* concentrations exceeded the permissible limits established by the Iranian Department of Environment standards.

The results related to soil and plant samples also indicated that cadmium, nickel, chromium, cobalt, and arsenic concentrations in soil and plants did not differ significantly compared with well-water irrigation. In contrast, lead concentrations in soil showed no significant differences, whereas a significant increase was observed in plant tissues. Based on the enrichment factor results, this parameter for lead and cadmium in plant tissues exceeded 2, indicating that soils irrigated with wastewater exhibited moderate enrichment with respect to lead and cadmium, whereas weak enrichment was observed for the other heavy metals in terms of transfer to roots and aerial plant parts. The bioconcentration factor for lead, cadmium, nickel, chromium, cobalt, and arsenic in aerial plant parts was lower than 1. The translocation factor for lead was greater than 1, whereas the translocation factor for the other heavy metals under both wastewater and well-water irrigation conditions remained below 1. Regarding microbial contamination, no significant differences in total coliforms and fecal coliforms were observed in soil and plant samples between wastewater and well-water treatments. Twenty-one days after the final irrigation event, the differences in total and fecal coliform counts in soil were 0 and 2.5 (MPN/g), respectively, while in aerial plant tissues the differences in total coliforms and fecal coliforms were 1.3 and 0.4 (MPN/g), respectively. These findings indicate the reduction of microbial contamination to levels comparable with those observed in lands irrigated with well water after twenty-one days.

Conclusion

To reduce the effects of wastewater effluent on soil and plants, it is recommended that at least twenty-one days should elapse after the final irrigation event, and that seed harvesting should be carried out thirty days after the last irrigation according to Standard No. 21786. Furthermore, based on the same standard, the entry of animals into the field should be prevented for up to twenty-four hours after the final irrigation event. Therefore, under the current conditions of water scarcity in Isfahan, wastewater effluent with relatively low salinity and the presence of certain nutrient elements may be used for seed barley production, provided that the aforementioned environmental and public health considerations are properly observed.

Funding

Financial support for this research was provided by the private sector, namely the North Espadana

Brewery Company, in the form of a research project of the first author.

Authorship contribution

Conceptualization, methodology, software, validation, formal analysis, investigation, resources, data curation, writing—original draft preparation, writing—review and editing, visualization, supervision, project administration: Hamid Molahoseini. The author has read and agreed to the published version of the manuscript.

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

There is no use of any type of artificial intelligence-based technology in this paper.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The author would like to thank the esteemed Research Vice President of the Soil and Water Research Institute/Isfahan Province Agricultural and Natural Resources Research and Education Center for their moral support and cooperation in carrying out this research.

The author would like to thank Dr. Maryam Moosavi for reviewing the text of the article and providing structural comments.

The author would like to thank reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

The author would like to thank Dr. Babak Khayyam Bashi for reading the text of this article and providing valuable comments.

Ethical considerations

The author avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

بررسی تأثیر آلودگی میکروبی و فلزات سنگین گیاه جو بذری تحت آبیاری با پساب فاضلاب شهری

حمید ملاحسینی^۱^۱. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،اصفهان، ایران. رایانامه: h.molahoseini@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۲/۲۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۳/۱۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۱۱	
تاریخ انتشار: مهر ۱۴۰۵	
واژه‌های کلیدی: آب‌های نامتعارف، تجمع زیستی، عناصر سنگین، کشاورزی.	پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات آلودگی میکروبی و فلزات سنگین ناشی از آبیاری با پساب فاضلاب بر خاک و گیاه جو بذری در اصفهان انجام شد. برای بررسی آماری تأثیر پساب بر خاک و گیاه جو از نظر فلزات سنگین و میکروبی، نمونه‌گیری مرکب از خاک و گیاه برای هر محصول در زمان برداشت برای پساب و آب چاه هر کدام تا ده نمونه برداشت و به آزمایشگاه ارسال شدند. بررسی آماری نتایج خاک و گیاه به روش تی تست جفت نمونه‌ای نشان داد که میزان کادمیوم، نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک در خاک و گیاه اختلاف معنی‌داری در مقایسه با آب چاه نداشتند. فاکتور غنی‌سازی سرب و کادمیوم در گیاه بیش از ۲ بود و از نظر سایر فلزات دارای غنی‌سازی ضعیف برای انتقال به ریشه‌ها و اندام‌های هوایی می‌باشد. فاکتور تجمع زیستی سرب، کادمیوم، نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک نیز در اندام هوایی نیز کمتر از یک و فاکتور انتقال برای سرب بیش‌تر از یک و برای سایر فلزات سنگین برای پساب فاضلاب و چاه کمتر از یک بود. آلودگی‌های میکروبی کلیفرم کل و گوارشی در خاک و گیاه بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری تفاوت معنی‌داری بین پساب و آب چاه نداشتند که بیانگر حذف آلودگی میکروبی تا سطح اراضی تحت آبیاری با آب چاه بعد از بیست و یک روز می‌باشد. بنابراین توصیه می‌شود که زمان برداشت بذر حداقل بیست و یک روز پس از آخرین آبیاری انجام شود.
استناد: ملاحسینی، حمید: (۱۴۰۵) بررسی تأثیر آلودگی میکروبی و فلزات سنگین گیاه جو بذری تحت آبیاری با پساب فاضلاب شهری، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۷)، ۱۷۴۵-۱۷۶۴. http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.414523.670143	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران. © نویسندگان.	
DOI: http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.414523.670143	



مقدمه

دسترسی به آب از عوامل مهم برای تولید و توسعه پایدار محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک می باشد (Sawalhah et al., 2018). خشکسالی های مکرر، رشد سریع جمعیت در این مناطق و شیوه های مدیریتی ضعیف استفاده از منابع محدود آب را افزایش می دهند و نیاز روزافزون به بهره برداری بهینه از منابع جایگزین احساس می شود (Vettera and Rieger, 2019; Sawalhah et al., 2018). اکثر رویکردهای حفاظت از آب، گران و ناکارآمد هستند و ممکن است نیاز به تخصص برای شناسایی چالش های آب، به ویژه در کشورهای در حال توسعه داشته باشند. کمبود آب و بارندگی غیرقابل اعتماد، شیوه های مدیریت آب مانند جمع آوری آب باران و استفاده از آب های غیرمتعارف با کیفیت پایین تر (شور و فاضلاب)، سرمایه گذاری مناسبی برای تأمین آب و تولید مواد غذایی در مناطق خشک ایجاد می کند (Muriu-Ng'ang'a et al., 2017; Al-Mefleh et al., 2021).

استفاده از فاضلاب در آبیاری محصولات کشاورزی، روشی رایج در چندین بخش از جهان می باشد که در کشورهای در حال توسعه به ویژه مناطق خشک و نیمه خشک به عنوان یک استراتژی سازگاری برای حفظ منابع آب محسوب می شود (Qishlaqi et al., 2008; Pourmohammadali et al., 2019; Radingoana et al., 2020; Al-Mefleh et al., 2021). مصرف مستقیم از فاضلاب شهری تصفیه شده و تصفیه نشده برای اهداف آبیاری اخیراً در سراسر جهان برای جبران بحران های کمبود آب افزایش یافته است. در سراسر جهان، کل مساحت آبیاری شده مجهز به استفاده مستقیم از فاضلاب حدود ۸/۴۲ میلیون هکتار است که از این مقدار فاضلاب تصفیه نشده ۴/۱۴ میلیون هکتار و فاضلاب تصفیه شده ۴/۲۸ میلیون هکتار می باشد (WHO, 2006; FAO, 2018). کشاورزان استفاده مجدد از فاضلاب را برای آبیاری محصولات خود را به دلایلی همچون قیمت پایین فاضلاب، استفاده کمتر از کود (در مقایسه با آب شیرین) (Jodar-Abellan et al., 2019; Sohail et al., 2021)، گسترش مناطق کشت برای محصولات کشاورزی (Ali et al., 2019; Sohail et al., 2021) و منبع قابل اعتماد انرژی تجدیدپذیر ترجیح می دهند. هم چنین با توجه به محدودیت منابع آب به دلیل تغییرات اقلیمی و افزایش تصاعدی رشد جمعیت، استفاده از فاضلاب برای آبیاری محصولات غذایی و حفظ پایدار آب در مناطق خشک اجتناب ناپذیر است (WHO, 2006). با این حال، مطالعات طولانی مدت در مورد استفاده مجدد از فاضلاب نشان داد که فلزات سنگین در طول سال ها به طور قابل توجهی افزایش می یابند و منجر به آلودگی بالقوه خاک می شوند. با توجه به تجزیه و تحلیل میکروبی و شیمیایی فاضلاب تصفیه نشده و تصفیه شده این عناصر در برخی از مناطق جهان از حد استاندارد جهانی فراتر رفته است و هم چنین توصیه های مطالعات قبلی نشان دادند که استفاده از فاضلاب تصفیه نشده باید محدود شود (تصفیه فاضلاب ضروری است) و تجزیه و تحلیل دوره ای آب برای کاهش انتقال فلزات سنگین به محصولات کشاورزی، حیوانات و انسان ها انجام شود. هنگامی که فاضلاب برای استفاده مجدد در نظر گرفته می شود، معمولاً طبق استانداردهای کیفی خاص آزمایش می شود تا از تهدید محیط زیست و انسان جلوگیری شود (Li et al., 2009; Leal et al., 2012). استانداردهای مورد استفاده برای کیفیت آب از لحاظ شیمیایی و هم میکروبیولوژیکی می باشد. با این حال، در آزمایش ها برخی متغیرهای خاص اندازه گیری می شوند و احتمال وجود مواد سمی اندازه گیری نشده زیاد است (Leal et al., 2012; Craddock et al., 2020). فلزات سنگین مانند کادمیوم، کروم، سرب و نیکل، عناصر فلزی هستند که وزن نسبتاً بالاتری نسبت به آب دارند. این عناصر در محیط های آبی بسیار محلول هستند و در نتیجه، می توانند به راحتی توسط موجودات زنده (گیاه، حیوان، انسان) جذب شوند (Kinuthia et al., 2020). بنابراین، به منظور استفاده از پساب فاضلاب برای آبیاری زمین های کشاورزی باید بر اساس ویژگی های آب، خاک، گیاه و محیط هر محل مورد ارزیابی قرار گیرد.

پیشینه پژوهش

پژوهش های مختلفی بر روی استفاده از پساب برای آبیاری اراضی زیر کشت محصولات کشاورزی انجام شده است. در این پژوهش ها از پساب برای بهبود رشد گیاه، حفظ خاک و کیفیت محصول استفاده شده است. قمرنیا و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی بر روی گیاه گشنیز نشان دادند که استفاده از پساب تصفیه شده شهری می تواند به عنوان یک منبع آب مطمئن و پایدار برای آبیاری اراضی وسیع کشت گشنیز مورد استفاده قرار گیرد به طوریکه تجمع فلزات سنگین در گیاه برای سلامت انسان خطرناک نباشد. صالحی و جلالی (۱۴۰۴) نیز نشان دادند که آبیاری با فاضلاب صنعتی و کاربرد لجن فاضلاب ضمن افزایش حاصلخیزی خاک، باعث افزایش خطر تجمع عناصر سنگین در گیاه و انتقال آنها به زنجیره غذایی می شود و به پایش دقیق و مستمر نیاز دارد. سیدآبادی و همکاران (۱۴۰۴) نشان دادند که استفاده از گیاه



مقاوم به آلودگی عناصر با پتانسیل سمیت و پایش غلظت عناصر در خاک در دوره‌های زمانی مختلف مورد اهمیت می‌باشد. پتانسیل تجمع فلزات سنگین بین گونه‌های گیاهی متفاوت است. مقادیر فلزات سنگین گزارش شده در پساب در کشورهای مختلف بسیار متفاوت گزارش شده است. در نتایج یک تحقیق بر مقدار فلزات سنگین جیوه، سرب، کادمیوم، کروم و نیکل در کشور کنیا گزارش شده است که میزان این فلزات در محدوده ۰/۰۱۵-۰/۰۰۰ پی پی ام بوده که در محدوده مجاز سازمان بهداشت جهانی بوده است در حالی که میانگین غلظت همین عناصر در خاک‌های تحت آبیاری در محدوده ۰/۰۸۵-۱۹۹/۹۹ قرار داشته که بر اساس مقادیر مجاز سازمان استاندارد جهانی برای تمامی عناصر فوق در محدوده غیر مجاز برای کشاورزی قرار گرفته است (Kinuthia et al., 2020). در مطالعه‌ای که بر روی جو انجام شد، مشاهده گردید که مدیریت صحیح آبیاری با فاضلاب و نظارت دوره‌ای بر پارامترهای حاصلخیزی و کیفیت خاک برای اطمینان از استفاده مجدد موفق، ایمن و طولانی مدت از فاضلاب برای آبیاری ضروری است. همچنین فاکتور تجمع زیستی در این گیاه نشان داد که جو توانایی غنی‌سازی بیولوژیکی قوی برای تجمع انواع عناصر کمیاب دارد (Haddad et al., 2023). پژوهش مجیری و حمیدی (۲۰۱۱) بر روی اثرات پساب فاضلاب بر روی تجمع فلزات سنگین در خاک و گیاه گندم را با دو روش آبیاری کرتی و قطره‌ای در منطقه‌ی فریدون‌شهر واقع در استان اصفهان نشان داد که فاضلاب شهری منجر به افزایش فلزات سنگین در گندم در هر دو روش آبیاری کرتی و قطره‌ای شد، همچنین تجمع فلزات سنگین در روش آبیاری کرتی دارای اهمیت بیش‌تری نسبت به روش آبیاری قطره‌ای داشت. جعفر نژادی و همکاران (۱۳۹۳) در زمینه‌ی بررسی اثرات فاضلاب تصفیه‌شده بر آلودگی میکروبی و شیمیایی خاک و گیاه گندم نشان دادند که میانگین غلظت کادمیوم قابل جذب گیاه نسبت به خاک اولیه اندکی کاهش یافت و تیمارهای فاضلاب در مقایسه با آب معمولی تأثیر معنی‌داری بر غلظت عناصر دانه و غلظت کادمیوم بذر نداشت. در مطالعه‌ای بر روی کیفیت پساب تصفیه‌خانه شمال اصفهان با آب چاه‌های منطقه در طی سال ۱۳۹۸-۹۹ مشاهده شد که کیفیت شیمیایی پساب خروجی تصفیه‌خانه با استانداردهای سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران از جنبه کاربرد آن در کشاورزی همخوانی داشت و از نظر پارامترهای شوری و اسیدیته نسبت به آب چاه شیرین‌تر و به ترتیب ۱/۳ دسی ریمنس بر متر و ۷/۴ بود؛ همچنین میزان نیتروژن و فسفر بیش‌تری از آب چاه داشت (ملاحسینی، ۱۴۰۰). بررسی نتایج تأثیر آبیاری بلند مدت پساب تصفیه‌خانه شمال اصفهان (۲۶ سال) بر برخی عناصر غذایی و آلاینده خاک نیز در مقایسه با اراضی تحت آبیاری با آب چاه (شاهد) در طی سال ۱۳۹۸-۹۹ نشان داد که کاربرد پساب باعث افزایش معنی‌دار فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، مس، روی، سرب و اسیدیته خاک نسبت به شاهد گردید ولی بر سایر ویژگی‌های خاک نظیر کربن آلی، نیتروژن، کادمیوم و شوری تأثیر معنی‌داری نسبت به شاهد نداشت. همچنین بررسی میزان آلودگی فلزات سنگین کادمیوم و سرب در اراضی تحت کاربرد پساب نشان داد که بر اساس استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران و کانادا کلیه اراضی منطقه مورد مطالعه از نظر تجمع سرب و کادمیوم بدون آلودگی هستند (ملاحسینی، ۱۴۰۰). پژوهش فیضی (۲۰۰۱) بر روی کاربرد پساب فاضلاب تصفیه شده و آب چاه به مدت ۷ سال در مزرعه‌ای در شمال اصفهان نیز نشان داد که میزان روی، منگنز، مس و آهن در خاک‌های آبیاری شده با پساب فاضلاب بیش‌تر از میزان این عناصر در خاک‌های آبیاری شده با آب چاه بود. همچنین غلظت سرب و کادمیوم در خاک‌های آبیاری شده با هر دو نوع آب نیز تقریباً یکسان بود (Feizi, 2001). آبیاری طولانی مدت اراضی کشاورزی در جنوب تهران با فاضلاب شهری نیز باعث افزایش غلظت قابل استفاده کربن آلی، فسفر، پتاس، روی، مس، کادمیوم، سرب و نیکل در این اراضی نسبت به اراضی تحت آبیاری با آب چاه یا قنات شد (ملاحسینی، ۱۳۸۱). کاربرد دو نوع فاضلاب شامل پساب تصفیه شده و فاضلاب خام تصفیه‌خانه شمال اصفهان نشان داد که این پساب‌ها از نظر آبیاری بدون پیامد هستند و میزان بیکربنات فاضلاب خام و پساب تصفیه شده به ترتیب دارای درجه پیامد بالا و متوسط و از نظر شوری پیامد کاربرد این دو نوع فاضلاب ضعیف تا متوسط بود (ایگدرنژاد و مطیع‌زاده، ۱۳۸۷).

استفاده از پساب جهت آبیاری علاوه بر غلظت فلزات سنگین، عناصر غذایی می‌تواند از طریق آلودگی میکروبی نقش موثری در رشد گیاهان داشته باشد (Yadav et al., 2002). تأثیر آلودگی بیولوژیکی و شیمیایی در مناطق تحت آبیاری با پساب فاضلاب در تغییر الگوی کشت و حفظ سلامت جامعه اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. از سوی دیگر پیشنهاد الگوی جدید علاوه بر مصرف غیر خوراکی باید بازده اقتصادی بیش‌تری نسبت به محصولات معمول داشته باشد. اگرچه فاضلاب تصفیه شده از نظر باکتریایی بی‌خطر است و تأثیر مثبتی بر رشد گیاه دارد، آلودگی میکروبی محصولات سبزیجات آبیاری شده با فاضلاب در بسیاری از مناطق جهان گزارش شده است (Ahemad and Malik, 2011; Williams and Dimbu, 2015). در بررسی نتایج پژوهش عالی‌نژاد و همکاران در سال ۱۳۹۲ بر روی تأثیر آب آبیاری با پساب شهری بر میزان تجمع برخی باکتری‌های شاخص آلودگی در خاک و گیاه ذرت مشاهده شد که تعداد باکتری‌های لاکتوز مثبت، کلیرم کل و مدفوعی در عمق ۵-۰ سانتی‌متری تقریباً ۴۲ درصد بیش‌تر از عمق ۱۵-۵ سانتی‌متری بود که باگذشت زمان تعداد این

باکتری‌ها در خاک به مقدار ۳۵ درصد کاهش یافتند. مشاهدات در بررسی اثرات فاضلاب بر آلودگی میکروبی و شیمیایی خاک و گندم نشان داد که از نظر جمعیت میکروبی در طی مراحل مختلف رشد گندم، در تیمارهای فاضلاب، تفاوت آماری بین تیمارهای فاضلاب و آب معمولی مشاهده نشد (جعفر نژادی و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین پژوهش‌ها نشان دادند که سطوح میکروبی به منابع فاضلاب بستگی دارد و ممکن است حاوی عوامل بیماری‌زایی مانند سودوموناس، سالمونلا، آئروموناس و استافیلوکوکوس باشد. بنابراین، نباید بدون تصفیه برای آبیاری دوباره استفاده شود (Leong et al., 2019). اشیریشیا کلی یک گروه کلیفرم از باکتری‌ها است که برای نشان دادن پاتوژن‌های باکتریایی در فاضلاب استفاده مجدد می‌شود و انتظار می‌رود رفتار آن‌ها منعکس کننده پاتوژن‌های روده‌ای باشد (سازمان بهداشت جهانی، ۲۰۰۶). در این بررسی، میانگین کل اشیریشیا کلی در خاک آبیاری شده با فاضلاب حدود $10^6 \times 2$ (CFU g⁻¹) و در قسمت‌های خوراکی سبزیجات (برگ، پیاز، غده و میوه) حدود ۱۵ (CFU g⁻¹) یافت شد. علاوه بر این، میانگین کل کلیفرم‌ها در خاک حدود $10^6 \times 1/4$ (CFU g⁻¹) و در قسمت‌های خوراکی سبزیجات حدود ۵۵ (CFU g⁻¹) بود. با توجه به این پژوهش تمام سبزیجات آبیاری شده با فاضلاب، سطوح مختلفی از بار میکروبی را در قسمت خوراکی خود داشتند.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران استفاده مجدد از پساب می‌تواند وسیله‌ای برای جبران کمبود آب باشد. بهره‌گیری از این منبع در کشت تولید بذر گیاه جو می‌تواند ضمن کاهش مصرف آب‌های محدود، به بهبود فرآیندهای کشاورزی و کاهش میزان فاضلاب‌های وارد شده به منابع آب طبیعی کمک کند. علاوه بر این، پساب‌های شهری در صورت تیمار و تصفیه مناسب، دارای ویژگی‌هایی هستند که می‌توانند در رشد و جوانه‌زنی بذر تأثیر مثبت داشته باشند. پساب‌های فاضلاب غیر از تأمین آب جهت گیاهان و صرفه‌جویی در منابع آبی، به‌عنوان یک منبع کودی نیز محسوب می‌شوند (Feigin et al., 2012). استفاده از فاضلاب برای آبیاری ممکن است اثرات مفیدی برای گیاهان داشته باشد زیرا سطح برخی از عناصر غذایی را در خاک افزایش می‌دهد (Abdoulkader et al., 2015). جو چهارمین محصول مهم غلات در جهان پس از گندم، ذرت و برنج می‌باشد. مشابه سایر غلات، گیاهان جو در طول رشد و نمو، تنش خشکی شدیدی را تجربه می‌کنند که به عنوان محدودیت اصلی بهره‌وری محصول در نظر گرفته می‌شود (Sabagh et al., 2019). همچنین سطح کشت جو در کشور و استان اصفهان به طور میانگین سالیانه به ترتیب ۱/۸-۱/۶ میلیون هکتار و ۵۵-۵۰ هزار هکتار می‌باشد که در مقایسه با سایر محصولات زراعی بعد از کشت گندم قرار دارد (Gland et al., 2009). پژوهش‌ها نشان دادند که آب آبیاری حاوی فلزات سنگین و شوری خاک از عوامل مهم محیطی هستند که تأثیر جدی بر عملکرد، رشد و جذب نمک توسط جو دارند. آبیاری با فاضلاب (تصفیه شده یا خام) ممکن است فلزات سنگین را در خاک و همچنین بخش‌های مختلف جو از جمله دانه‌ها، شاخه‌ها و ریشه‌ها تجمع دهد. این تجمع ممکن است بر رشد و نمو جو تأثیر بگذارد و خطری برای سلامتی مصرف‌کنندگان داشته باشد (Mohammed et al., 2021). در صورتی که باید ارزیابی‌های دقیقی در خصوص میزان و نوع آلاینده‌های غیرمطلوب، از جمله آلودگی میکروبی و فلزات سنگین انجام شود تا خطرهای زیستی و محیطی کاهش یافته و سلامت محصول تضمین گردد. اثرات فیزیکیوشیمیایی پساب نظیر اسیدیته، میزان هدایت الکتریکی و غلظت نمک‌ها از جمله عوامل موثر بر روی جوانه‌زنی و توسعه گیاه است که نیازمند بررسی دقیق است. همچنین، نقش فعالیت‌های میکروبی و مؤلفه‌های زیستی در بهبود یا تضعیف کیفیت بذر و رشد گیاه باید در نظر گرفته شود. پژوهش‌های زیادی به منظور تأثیر پساب فاضلاب در افزایش عملکرد گیاهان انجام شده است. در صورتی که مطالعات کمی بر روی آلودگی به وجود آمده توسط میکروارگانیسم‌ها و عناصر سنگین در خاک و گیاه جو صورت گرفته است، همچنین اطلاعات کمی درباره تجمع میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا در اعماق مختلف در خاک بعد از آبیاری در دوره فصل رشد گیاه جو موجود می‌باشد. از این‌رو در کنار جنبه‌های فنی و زیستی، ارزیابی‌های اقتصادی و محیط‌زیستی باید از شاخص‌های کلیدی در تعیین قابلیت پایدار و امن بهره‌برداری از پساب برای تولید بذر جو استفاده شود. بنابراین، هدف از مطالعه حاضر ارزیابی اثرات آلودگی میکروبی و فلزات سنگین ناشی از آبیاری طولانی‌مدت با پساب فاضلاب بر خاک و گیاه جو و تعیین فاکتورهای غنی‌سازی، تجمع زیستی و انتقال در این گیاهان می‌باشد.

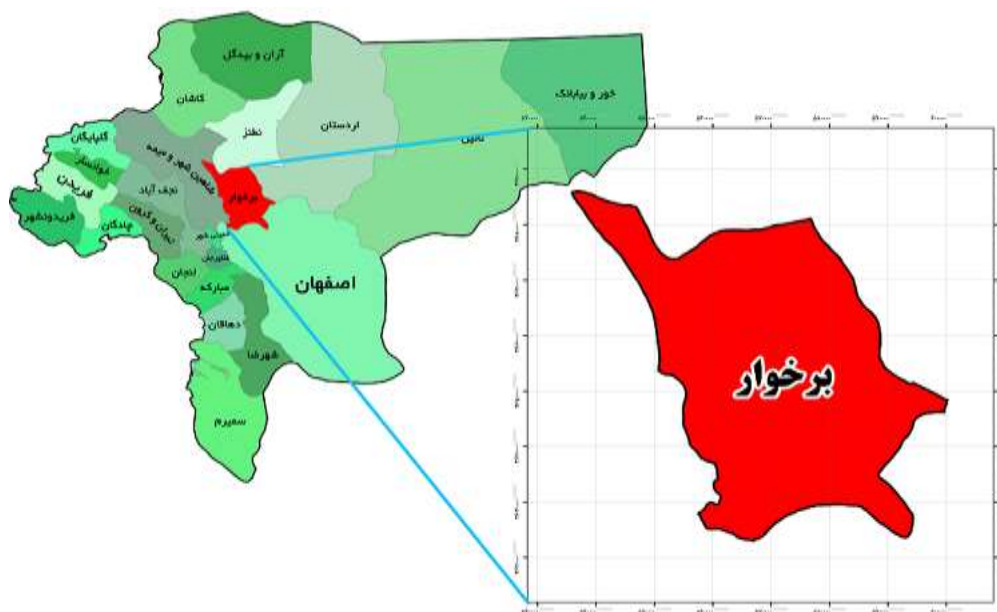
مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر باهدف ارزیابی اثرات آلودگی میکروبی و فلزات سنگین ناشی از آبیاری با پساب فاضلاب بر خاک و گیاه جو به مدت سه

سال در طی سال‌های ۱۴۰۴-۱۴۰۱ اجرا شد.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده منطقه مورد مطالعه در شهرستان برخوار بین طول جغرافیایی $51^{\circ} 44' 50''$ تا $51^{\circ} 48' 43''$ شرقی و عرض جغرافیایی $35^{\circ} 06' 45''$ تا $33^{\circ} 52' 48''$ شمالی قرار دارد (شکل ۱ و ۲). این شهرستان با $1952/77$ کیلومترمربع وسعت در شمال و شمال شرقی شهر اصفهان واقع شده و بیش از ۹۵ درصد آن دشت و دارای کاربری کشاورزی است. شهرستان برخوار دارای ۵ شهر بنام‌های دولت‌آباد، حبیب‌آباد، گُم‌شِچِه، خُورزوق و دستگرد و ۹ روستا به نام‌های سین، شاهپور آباد، علی‌آباد مرغ و دُنبی، محسن‌آباد، علی‌آبادچی و ... می‌باشد. برابر با سرشماری سال ۱۳۹۵ هجری شمسی جمعیت این شهرستان $122'419$ نفر است که از این میان $113'875$ نفر در نقاط شهری و $8'544$ نفر در نقاط روستایی ساکن هستند. تصفیه‌خانه شمال اصفهان در مناطق نزدیک به شهر حبیب‌آباد احداث شده است. حبیب‌آباد در ۱۰ کیلومتری شمال شرقی شهر اصفهان در مسیر اصفهان به اردستان واقع شده است. وجود مزارع کشاورزی و دامداری‌های زیاد و کمبود آب در این شهر، کشاورزی منطقه را تحت تأثیر قرار داده است و موجب نگرانی کشاورزان و دامداران شده است (اداره کل میراث فرهنگی و گردشگری استان اصفهان). در حال حاضر بیش‌ترین مصرف پساب در کشاورزی اصفهان مربوط به پساب تصفیه‌خانه شمال (منطقه حبیب‌آباد) است. بر اساس آمار سال ۱۳۹۶ شش هزار هکتار از اراضی کشاورزی با پساب آبیاری شده بودند که از این مساحت ۵۰۰۰ هکتار آن زیر کشت گندم، جو و ذرت علوفه‌ای بوده است (شهابی و همکاران ۱۳۹۹). بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دوماستن، اقلیم منطقه شرق اصفهان (نزدیک به منطقه مورد مطالعه) از نوع فرا خشک سرد و بر طبق تقسیم‌بندی آمبرژه از نوع خشک سرد و بر اساس تقسیم‌بندی گوسن نیمه بیابانی است. بررسی‌های بلندمدت آماری در طی سال‌های ۱۳۷۷-۲۰۱۵ نشان دادند که میانگین سالانه دمای ایستگاه شرق اصفهان $15/3^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین بیش‌ترین و کم‌ترین دمای هوا به ترتیب 24°C درجه سانتی‌گراد و 6°C درجه سانتی‌گراد است. همچنین اختلاف دمای بین گرم‌ترین و سردترین ماه سال $27/5^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با توجه به اطلاعات ایستگاه شرق اصفهان مجموع میانگین بارش سالانه، $105/4$ میلی‌متر است و طبق منحنی آمبروترمیک، طول دوره خشکی از اواخر اسفند تا اوایل آبان می‌باشد که در دوره خشکی تقریباً میزان دما در بین ۶ تا ۷ ماه از سال بیش‌تر از مقدار بارش بود. طبق اطلاعات هواشناسی فرودگاه شرق اصفهان تعداد روزهای بارانی در این منطقه ۴۰ روز در سال می‌باشد که در زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب ۱۷ روز، ۱۰ روز، ۱ روز و ۱۲ روز است. وجود اقلیم خشک و بیابانی و کمبود آب در این منطقه و همچنین تصفیه‌خانه شمال اصفهان در نزدیکی اراضی کشاورزی واقع در جنوب و جنوب غربی شهرستان برخوار باعث مصرف غیرقانونی پساب در اراضی کشاورزی شده است. به‌طوری‌که بیش‌ترین مصرف پساب در اراضی کشاورزی استان اصفهان مربوط به پساب تصفیه‌خانه شمال (منطقه برخوار) می‌باشد.



شکل ۱. موقعیت شهرستان برخوار در استان اصفهان



شکل ۲. محدوده اراضی اطراف تصفیه‌خانه پساب شمال اصفهان

انتخاب اراضی

ابتدا یک مزرعه برای کشت با پساب با سطح ۱/۵ هکتار و یک مزرعه برای کشت با آب چاه در سطح ۱/۵ هکتار انتخاب گردید، سپس در فصل پاییز (آذرماه) گیاه جو از ارقام زودرس (رقم به‌رخ) برای اصفهان کاشته شد.

بررسی پساب و آب چاه مورد استفاده در مزارع

به منظور بررسی کیفیت پساب و آب چاه مورد استفاده، در ابتدا نمونه‌برداری فصلی (جمعا ۸ نمونه) صورت گرفت. آنالیز شیمیایی شوری و اسیدیته به ترتیب از روش مقاومت سنجی و پتانسیومتری، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر، فسفر قابل جذب به روش اولسن، پتاسیم قابل جذب به روش طیف‌سنج نشر شعله و مقدار کل عناصر سنگین ضروری آهن، منگنز، روی و مس و عناصر سنگین آلاینده کادمیم، سرب، نیکل، کروم و کبالت به روش هضم تر با اسید و دستگاه جذب اتمیک استفاده شده است. آنالیز میکروبی شامل کلیفرم کل، کلیفرم گوارشی، سالمونلا، ایکالای و تخم انگل بر روی نمونه‌ها انجام شد.

بررسی خاک مزرعه

به منظور بررسی وضعیت عناصر غذایی و توصیه کودی، نمونه‌گیری مرکب خاک قبل از کشت از کل قطعات تحت آبیاری با پساب و آب چاه از عمق ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. همچنین برای بررسی آماری تأثیر پساب بر روی خاک، نمونه‌های مرکب از خاک در زمان برداشت در قطعات تحت آبیاری با پساب (پنج نمونه خاک) و قطعات تحت آبیاری با آب چاه (پنج نمونه خاک) جمع‌آوری شد. به این ترتیب جمع نمونه‌های خاک برای محصول جو در قبل از کشت ۲ نمونه و در زمان برداشت محصول ۱۰ نمونه و جمعا ۱۲ نمونه خاک می‌باشد. آنالیز شیمیایی شوری و اسیدیته به ترتیب از روش مقاومت سنجی و پتانسیومتری در عصاره گل اشباع، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر، نیتروژن به روش برآورد از کربن آلی ($\%N = 0.05 * \%O.M$ ، $\%O.M = \%O.C * 1.724$)، فسفر قابل جذب به روش اولسن، پتاسیم قابل جذب به روش طیف‌سنج نشر شعله و مقدار کل عناصر سنگین ضروری آهن، منگنز، روی و مس و عناصر سنگین آلاینده کادمیم، سرب، نیکل، کروم و کبالت به روش هضم تر با اسید و دستگاه جذب اتمیک استفاده شده است. آنالیز میکروبی شامل شمارش کلیفرم کل، کلیفرم گوارشی، سالمونلا، ایکالای و تخم انگل بر روی نمونه‌ها انجام شد. برای آنالیز نمونه‌های خاک، ابتدا خاک‌ها را خشک و پس از کوبیدن و عبور از الک دو میلی‌متری جهت بررسی ویژگی‌های خاک مورد آزمایش قرار گرفتند (جدول ۱).

اندازه‌گیری عناصر سنگین گیاه

برای بررسی تأثیر پساب بر آلودگی عناصر سنگین، گیاهان جو ۲۱ روز پس از آخرین آبیاری برداشت شدند. نمونه‌گیری گیاهان به صورت مرکب در زمان برداشت و در قطعات تحت آبیاری با پساب (پنج نمونه گیاه از هر کدام از اجزا اندام هوایی و ریشه) و قطعات تحت آبیاری با آب چاه (پنج نمونه گیاه از هر کدام از اجزا بذر، اندام هوایی و ریشه) انجام شد. به این ترتیب جمع نمونه‌های گیاه در زمان برداشت ۱۰ نمونه می‌باشد. سپس آنالیزهای شیمیایی گیاه شامل غلظت کل عناصر کم مصرف آهن، مس، روی، منگنز و غلظت کل عناصر سنگین کادمیم، سرب، نیکل، کروم، و کبالت در اندام هوایی و ریشه به روش هضم تر با اسید و توسط دستگاه اتمیک واریان زیمان مدل ۲۲۰ با



کوره مورد بررسی قرار گرفتند.

اندازه‌گیری بار میکروبی گیاه

برای بررسی تاثیر پساب بر آلودگی میکروبی گیاه، نمونه‌گیری مرکب از گیاه انجام شد و برای هر گیاه از زمان آخرین آبیاری تا برداشت حداقل در دو نوبت با فاصله ۱۰ روز در قطعات تحت آبیاری با پساب (پنج نمونه گیاه از هر کدام از اندام هوایی) و قطعات تحت آبیاری با آب چاه (پنج نمونه گیاه از هر کدام از اندام هوایی) صورت گرفت، به این ترتیب تعداد نمونه‌های گیاه ۱۰ نمونه بود. سپس آنالیز میکروبی شامل شمارش کلیفرم کل، کلیفرم گوارشی، سالمونلا، ایکالای و تخم انگل در نمونه‌های بذر و اندام هوایی انجام شد.

جدول ۱. مشخصات خاک اراضی مورد مطالعه

نوع خاک	هدایت الکتریکی	اسیدیته کل اشباع	کربن آلی	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	مس قابل جذب	روی قابل جذب	منگنز قابل جذب	کوبالت قابل جذب	نیترات	تیتر	تیتر	تیتر	تیتر
	dS m ⁻¹	pH	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	%	%	%
چاه	۹/۱	۷/۱	۰/۴	۲۱	۱۹۵	۰/۸	۱	۷/۷	۴/۶	۷۵	۱۴	۱۱	لوم شنی	
پساب	۷	۷/۵	۰/۵	۶۰/۳	۳۲۵	۰/۷	۱	۶/۵	۴	۶۷	۱۸	۱۵	لوم شنی	جو

اندازه‌گیری فاکتورهای غنی‌سازی (EF)، تجمع زیستی (BCF) و انتقال (TF):

از فاکتور غنی‌سازی برای ارزیابی غلظت فلز مورد بررسی در نمونه نسبت به غلظت همان فلز در منطقه غیرآلوده استفاده می‌شود (Wei and Yang, 2010). در این معادله Cn: غلظت فلز اندازه‌گیری شده در خاک، Cref: غلظت فلز مرجع، Bn: غلظت زمینه می‌باشد. اگر شاخص غنی‌شدگی کمتر از دو در کلاس تهی یا کمی غنی‌شده، بین دو تا پنج در کلاس غنی‌شدگی متوسط، بین پنج تا ۲۰ در کلاس غنی‌شدگی زیاد، بین ۲۰ تا ۴۰ در کلاس غنی‌شدگی شدید و بیش‌تر از ۴۰ در کلاس غنی‌شدگی بسیار شدید قرار می‌گیرد.

$$EF = \frac{(Cn/Cref \text{ sample})}{(Bn/Cref) \text{ Background}}$$

از فاکتور تجمع زیستی برای ارزیابی انتقال عناصر با پتانسیل سمیت از خاک به انواع گیاهان زراعی است که Cc و Cs به ترتیب غلظت کل فلزات در گیاه و خاک است (Saraswat and Rai, 2009).

$$BCF = \frac{(Cc)}{(Cs)} \dots$$

از فاکتور انتقال جهت ارزیابی توانایی گیاه در انتقال فلز از ریشه به ساقه مورد استفاده قرار می‌گیرد و از تقسیم غلظت عنصر در بخش هوایی به غلظت عنصر در ریشه محاسبه می‌شود (Yeganeh et al., 2013).

تجزیه و تحلیل و روش آماری پروژه

مقایسه آماری میانگین پارامترهای پساب، آب چاه، خاک و گیاه به روش تی تست جفت نمونه‌ای انجام شد. جهت اجرای آزمون t از نرم‌افزار MSTATC استفاده شد.

نتایج و بحث

پارامترهای شیمیایی آب چاه‌های منطقه و پساب تصفیه‌خانه شمال اصفهان

بررسی برخی پارامترهای شیمیایی آب چاه‌های منطقه و پساب تصفیه‌خانه شمال اصفهان مطابق جدول ۲ نشان می‌دهد که از نظر میانگین عناصر غذایی نیتروژن کل و فسفر در پساب به ترتیب حدود ۶ و ۸ برابر بیش‌تر از آب چاه ولی از نظر میانگین پتاسیم برابر می‌باشند. همچنین میانگین غلظت آنیون‌های کلر و سولفات در پساب به ترتیب ۵ و ۱۲ درصد کم‌تر از آب چاه و میانگین غلظت کاتیون‌های کلسیم - منیزیم و سدیم پساب به ترتیب ۳۰ و ۱۵ درصد کم‌تر از آب چاه می‌باشند که باعث کاهش میانگین شوری و نسبت جذب سدیم پساب به ترتیب ۲۰ و ۲۵ درصد کم‌تر از آب چاه‌ها شده است. نتایج مشابهی توسط عبدالقادر و همکاران (۲۰۱۵)، فی جین و همکاران (۲۰۱۲) و

ملاحسینی، ۱۴۰۰ مبنی بر اینکه پساب فاضلاب علاوه بر شوری کم‌تر به عنوان یک محلول غذایی حاوی برخی عناصر غذایی نظیر نیتروژن و فسفر می‌باشد و استفاده آن در اراضی کشاورزی مصرف کودها را حداقل ۲۵ درصد کاهش می‌دهد (ملاحسینی، ۱۳۸۳ و ۱۳۸۵).

جدول ۲. میانگین برخی پارامترهای شیمیایی آب چاه‌های منطقه و پساب تصفیه‌خانه شمال اصفهان

پارامتر	آب چاه		پساب		حدود مجاز
	۶ ماهه اول	۶ ماهه دوم	۶ ماهه اول	۶ ماهه دوم	
نیتروژن آمونیاکی (mg L^{-1})	۰	۰	۴۶/۲	۴۸/۳	۳۰*
نیتروژن نیتراتی (mg L^{-1})	۹	۹/۸	۷/۱	۵/۶	۳۰-۴۵*
نیتروژن کل (mg L^{-1})	۹	۹/۸	۵۳/۳	۵۳/۹	۳۰*
فسفر کل (mg L^{-1})	۰/۲	۰/۵	۲/۴	۲/۵	۱۰*
هدایت الکتریکی (dS/m)	۵/۳۹	۵/۱۷	۱/۲۶	۱/۱۷	۰/۷*
اسیدیته	۷/۷	۷/۸	۷/۵۵	۷/۶	۶/۰-۸/۵*
بی‌کربنات (meq L^{-1})	۴/۵	۵	۷	۶/۹۵	۶*
کلر (meq L^{-1})	۳۵/۸۵	۳۴/۹۵	۴/۹	۴/۲	۱۷**
سولفات (meq L^{-1})	۱۳/۵	۱۱/۷	۰/۶۵	۰/۷	۱۰/۴**
کلسیم منیزیم (meq L^{-1})	۲۰/۰۵	۲۰/۳	۶/۶	۴/۹۵	۱۲/۵-۱۸/۵*
سدیم (meq L^{-1})	۳۳	۳۳/۵	۴/۵	۴/۹	۱*
پتاسیم (meq L^{-1})	۱۷	۱۶/۴	۱۷	۲۱	۰/۵*
مواد معلق (TSS) (mg L^{-1})	-	-	۴۴	۳۵	۱۰۰**
املاح محلول (TDS) (mg L^{-1})	۳۴۴۹	۳۳۰۹	۸۰۶/۴	۷۴۸/۸	۴۵۰***
SAR	۱۰/۴۲	۱۰/۵۰	۲/۴۷	۳/۱۱	۳***

* حدود مجاز کشور کره (۲۰۰۶)، ** استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران (۱۳۸۲)، *** آریز و وستکات (۱۹۸۵)

آلودگی‌های فلزات سنگین پساب تصفیه‌خانه شمال اصفهان

بررسی آلودگی فلزات سنگین پساب تصفیه‌خانه شمال اصفهان با استانداردهای داخلی و خارجی مطابق جدول ۳ نشان می‌دهد که میانگین غلظت فلزات سنگین کادمیوم، کبالت، کروم، آرسنیک، نیکل، سرب، مس، آهن، منگنز و روی در شش ماهه اول و دوم کم‌تر از حدود مجاز استاندارد سازمان سازمان حفاظت محیط زیست ایران، سازمان بهداشت جهانی (WHO)، آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) می‌باشد نتایج مشابهی توسط کینوتیا و همکاران (۲۰۲۰)، قشلاقی و همکاران (۲۰۰۸) و ملاحسینی (۱۴۰۰) مبنی بر وجود فلزات سنگین در پساب ارائه شده است ولی مقادیر آن‌ها کم‌تر از حدود مجاز استانداردهای مورد اشاره بوده است.

جدول ۳. میانگین غلظت فلزات سنگین در پساب شمال اصفهان (میلی گرم در لیتر) سال ۱۴۰۳

Zn	Mn	Fe	Cu	Pb	Ni	As	Cr	Co	Cd	
≤۰/۰۰۱	۰/۰۶۳	۰/۱۱۷	≤۰/۰۰۱	≤۰/۰۰۱	۰/۰۱۵	۰/۰۳۴	≤۰/۰۰۱	≤۰/۰۰۱	≤۰/۰۰۱	۶ ماهه اول
≤۰/۰۰۱	۰/۰۴۸	۰/۰۲۶	≤۰/۰۰۱	≤۰/۰۰۱	۰/۰۸۸	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۵	≤۰/۰۰۱	≤۰/۰۰۱	۶ ماهه دوم
۲	۱	۳	۰/۲	۱	۲	۰/۱	۲	۰/۰۵	۰/۰۵	استاندارد ^۱
۲	۰/۲	۵	۰/۲	۵	-	۰/۱	-	-	۰/۰۱	استاندارد ^۲
۱	۰/۲	۵	۰/۲	۵	۰/۲	-	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۱	استاندارد ^۳

استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران (۱۳۸۲)^۱، سازمان بهداشت جهانی (WHO)^۲،

آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (United States Enviromental Protection Agency)^۳

کیفیت پساب تصفیه‌خانه شمال اصفهان از نظر پارامترهای BOD^1 ، COD^2 و آلودگی‌های میکروبی

بررسی کیفیت پساب تصفیه‌خانه شمال اصفهان از نظر پارامترهای BOD و COD در مقایسه با استانداردهای داخلی و خارجی مطابق

1. Oxygen demand biological

2. Oxygen demand chemical



جدول ۴ نشان می‌دهد که پارامترهای BOD و COD در چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان کم‌تر از حدود مجاز استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران و کمی بیش‌تر از استاندارد آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) می‌باشد. همچنین بررسی کیفیت پساب تصفیه‌خانه شمال اصفهان از نظر آلودگی‌های میکروبی در مقایسه با استانداردهای داخلی و خارجی مطابق جدول ۵ نشان می‌دهد که میانگین پارامترهای آلودگی توتال کلیفرم (TC)، فکال کلر فرم (FC) و اشرشیا کلی (E.coli) در چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان بیش‌تر از حدود مجاز استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران می‌باشند. بنابراین با توجه به این‌که پساب فاضلاب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب استان اصفهان تحت تصفیه اولیه و ثانویه بوده و تصفیه تکمیلی ندارند نتایج فوق دور از انتظار نیست. همچنین نتایج مشابهی توسط محققین، قشلاقی و همکاران (۲۰۰۸)، کریستو و همکاران (۲۰۱۴)، قریشی و همکاران (۲۰۱۶)، اریکسون و همکاران (۲۰۲۰)، بونو و همکاران (۲۰۲۰) و آل مقله و همکاران (۲۰۲۱) مبنی بر نتایج متفاوت BOD و COD پساب فاضلاب تصفیه‌خانه‌ها و فراتر از حد استاندارد جهانی گزارش شده است.

جدول ۴. میزان پارامترهای BOD و COD پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان

فصل	نوبت نمونه‌برداری	مقادیر اندازه‌گیری شده BOD (mg L^{-1})	حد مجاز (mg/l)	مقادیر اندازه‌گیری شده COD (mg L^{-1})	حد مجاز (mg L^{-1})
بهار	۱	۸۲/۴	۱۱۰۰	۱۶۶/۵	۱۲۰۰
تابستان	۲	۵۳/۴	۲۳۰	۱۷۷/۸	۲۱۲۰
پاییز	۳	۵۱/۳		۱۷۶/۲	
زمستان	۴	۶۷		۱۳۳	

استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران (۱۳۸۲)^۱، آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA)^۲

جدول ۵. شاخص‌های میکروبی در پساب فاضلاب شمال اصفهان در سال ۱۴۰۳

زمان نمونه‌برداری	نمونه	TC MPN/100ml	FC MPN/100ml	E.Coli
بهار	۱	۲۴۰۰۰	۱۲۰۰۰	مثبت
تابستان	۲	۴۶۰۰۰	۲۴۰۰۰	مثبت
پاییز	۳	۴۶۰۰۰	۴۶۰۰۰	مثبت
زمستان	۴	۷۵	۴۳	منفی
حد مجاز		۱۱۰۰۰	۱۴۰۰	-

استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران (۱۳۸۲)^۱

تأثیر پساب تصفیه‌خانه شمال اصفهان بر برخی آلودگی‌های شیمیایی خاک و گیاه

نتایج این پژوهش نشان داد که در زمان بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری مقادیر فلزات سنگین سرب، کادمیوم، نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک در خاک تحت آبیاری با پساب فاضلاب نسبت به خاک تحت آبیاری با آب چاه افزایش معنی‌داری نداشت ولی فلزات مذکور در اراضی تحت آبیاری با پساب فاضلاب به ترتیب به میزان ۱۰، ۲/۷، ۱/۶، ۴/۹، ۲/۴ و ۲ میلی‌گرم در لیتر افزایش ولی کم‌تر از استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران (IRANDOE) و وزارت محیط‌زیست کانادا (CME) می‌باشند (جدول ۶). نتایج مشابهی توسط ملاحسینی و همکاران (۱۴۰۰) و قشلاقی و همکاران (۲۰۰۸) و قریشی و همکاران (۲۰۱۶) مبنی بر افزایش فلزات سنگین در ارضی تحت آبیاری با فاضلاب گزارش شده است.

بررسی نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که در زمان برداشت محصول (بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری) مقدار فلز سنگین سرب در ریشه گیاه جو تحت آبیاری با پساب فاضلاب نسبت به ریشه گیاه جو تحت آبیاری با چاه در سطح ۵ درصد افزایش معنی‌دار داشته و به میزان ۹/۱ میلی‌گرم بر لیتر افزایش داشته است. در صورتی‌که افزایش مقادیر فلزات سنگین کادمیوم، نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک به ترتیب به میزان ۰/۴، ۱/۵، ۲/۱، ۰/۸ و ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر معنی‌داری نبوده‌اند. به طور کلی، افزایش تجمع غلظت فلزات سنگین در ریشه جو به خصوص فلز سنگین سرب به عنوان پاسخی به کاربرد مداوم پساب حاوی فلزات مذکور و افزایش آن‌ها در خاک می‌باشد. با این حال، افزایش فلزات سنگین مذکور بر رشد، ظاهر و عملکرد گیاه تأثیری نداشت. نتایج مذکور با نتایج پژوهش‌های انجام شده توسط محمد و بلدوی (۲۰۲۱) مبنی بر تجمع فلزات سنگین در ریشه گیاه جو تحت آبیاری با پساب فاضلاب همخوانی دارد.

جدول ۶. نتایج آزمون تی تست فلزات سنگین در نمونه‌های خاک کشت جو تحت آبیاری با چاه و پساب فاضلاب در زمان برداشت (بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری)

ردیف	پارامتر	خاک تحت آبیاری با آب		خاک تحت آبیاری با پساب فاضلاب		t value	درجه آزادی	ارزیابی در سطح ۵ درصد
		چاه (mg kg ⁻¹)	شاهد	پساب فاضلاب (mg kg ⁻¹)	تیمار			
۱	سرب	۳/۴		۱۳/۳		-۲/۲۹	۴	۰/۰۸ ^{ns}
۲	کادمیوم	۲/۹		۵/۶		-۰/۵۵	۴	۰/۶۱ ^{ns}
۳	نیکل	۱۰/۸		۱۲/۴		-۰/۵۲	۴	۰/۶۳ ^{ns}
۴	کروم	۳/۱		۸		-۱/۶	۴	۰/۱۸ ^{ns}
۵	کبالت	۴/۵		۶/۹		-۰/۸۱	۴	۰/۴۶ ^{ns}
۶	آرسنیک	۰/۲۵		۲/۲		-۱/۰۰۲	۴	۰/۳۷ ^{ns}

جدول ۷. نتایج فلزات سنگین در نمونه‌های ریشه گیاه جو تحت آبیاری با چاه و پساب فاضلاب در زمان برداشت (بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری)

ردیف	پارامتر	ریشه جو تحت آبیاری با آب چاه		ریشه جو تحت آبیاری با پساب فاضلاب		t value	درجه آزادی	ارزیابی در سطح ۵ درصد
		آبیاری با آب چاه (mg L ⁻¹)	شاهد	پساب فاضلاب (mg L ⁻¹)	تیمار			
۱	سرب	۲/۳		۷/۱		-۳/۵۸	۴	۰/۰۳*
۲	کادمیوم	۰/۵		۰/۹		-۰/۴۷	۴	۰/۶۶ ^{ns}
۳	نیکل	۱/۴		۲/۹		-۲/۵۶	۴	۰/۰۶ ^{ns}
۴	کروم	۱/۳		۳/۴		-۲/۷۶	۴	۰/۰۵۱ ^{ns}
۵	کبالت	۱/۱		۱/۹		-۱/۴	۴	۰/۲۳ ^{ns}
۶	آرسنیک	۰/۶۴		۰/۶۵		-۰/۰۱	۴	۰/۹۹ ^{ns}

با توجه به نتایج جدول ۸ مشاهده می‌شود که در زمان برداشت محصول (بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری) مقدار فلز سنگین سرب در اندام هوایی گیاه جو تحت آبیاری با پساب فاضلاب نسبت به اندام هوایی گیاه جو تحت آبیاری با چاه در سطح ۵ درصد افزایش معنی‌دار داشته اما افزایش مقادیر فلزات سنگین کادمیوم، نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک به ترتیب به میزان ۰/۳۲، ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۲ و ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر تفاوت معنی‌داری نداشتند. نتایج مذکور با نتایج پژوهش‌های محمد و بلدوی (۲۰۲۱) مبنی بر تجمع فلزات سنگین در اندام هوایی گیاه جو تحت آبیاری با پساب فاضلاب همخوانی دارد.

جدول ۸. نتایج فلزات سنگین در نمونه‌های اندام هوایی گیاه جو تحت آبیاری با چاه و پساب فاضلاب در زمان برداشت (بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری)

ردیف	پارامتر	اندام هوایی جو تحت آبیاری با آب چاه		اندام هوایی جو تحت آبیاری با پساب فاضلاب		t value	درجه آزادی	ارزیابی در سطح ۵ درصد
		آبیاری با آب چاه (mg L ⁻¹)	شاهد	پساب فاضلاب (mg L ⁻¹)	تیمار			
۱	سرب	۰/۹۴		۸/۵		-۳/۰۵	۴	۰/۰۳*
۲	کادمیوم	۰/۱		۰/۴۲		-۱/۰۷	۴	۰/۳۴ ^{ns}
۳	نیکل	۰/۹۷		۱		-۰/۶۸	۴	۰/۵۳ ^{ns}
۴	کروم	۰/۷۴		۰/۷۹		-۰/۱۱	۴	۰/۹۲ ^{ns}
۵	کبالت	۰/۵		۰/۷		-۱/۰۵	۴	۰/۳۵ ^{ns}
۶	آرسنیک	۰/۲		۰/۳		-۲/۲۵	۴	۰/۰۸۷ ^{ns}



بررسی آلودگی خاک و توانایی گیاه جو تحت آبیاری با پساب تصفیه‌خانه شمال اصفهان در جذب و انباشت فلزات سنگین با هدف گیاه پالایی

به منظور درک آلودگی خاک، فاکتور غنی‌سازی (EF) از طریق نسبت غلظت فلزات سنگین در گیاه جو تحت آبیاری با پساب فاضلاب به غلظت فلزات سنگین در گیاه جو تحت آبیاری با چاه در ریشه و اندام هوایی گیاه جو تعیین و در جدول ۹ ارائه گردید. نتایج نشان داد که فاکتور غنی‌سازی در ریشه گیاه جو برای فلزات سنگین سرب، نیکل و کروم بیش از ۲ و برای فلزات سنگین کادمیوم، کبالت و آرسنیک کمتر از ۲ می‌باشد و فاکتور غنی‌سازی در اندام هوایی گیاه جو برای فلزات سنگین سرب و کادمیوم بیش از ۲ و برای فلزات سنگین نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک کمتر از ۲ می‌باشند و میانگین مقدار فاکتور غنی‌سازی در اندام ریشه و هوایی گیاه جو برای فلزات سنگین سرب و کادمیوم بیش از ۲ و برای فلزات سنگین نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک کمتر از ۲ می‌باشد که بیانگر این است که خاک تحت آبیاری با پساب از نظر فلزات سنگین سرب و کادمیوم دارای غنی‌سازی متوسط و از نظر فلزات سنگین نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک دارای غنی‌سازی ضعیف برای انتقال به ریشه‌ها و اندام‌های هوایی جو می‌باشد. همچنین میانگین کلی فاکتور غنی‌سازی فلزات سنگین برای اندام‌های هوایی ۳ و ریشه‌ها ۲ بود که نشان دهنده غنی‌سازی بیش‌تر فلزات سنگین در اندام هوایی جو نسبت به اندام ریشه است. این نتایج با یافته‌های مالوریزیو (۲۰۱۶) مطابقت دارد.

جدول ۹. فاکتور غنی‌سازی فلزات سنگین در ریشه و اندام هوایی گیاه جو

عناصر	فاکتورها	سرب	کادمیوم	نیکل	کروم	کبالت	آرسنیک
	فاکتور غنی‌سازی ریشه (EF)	۳	۱/۸	۲/۱	۲/۶	۱/۷	۱
	فاکتور غنی‌سازی اندام هوایی (EF)	۹	۴/۲	۱	۱	۱/۴	۱/۵
	میانگین	۶	۳	۱/۶	۱/۸	۱/۶	۱/۳

در این پژوهش برای بررسی توانایی گیاه جو در جذب و انباشت فلزات سنگین و ارزیابی پتانسیل گیاه جو در گیاه‌پالایی از فاکتور تجمع زیستی (BCF) و فاکتور انتقال (TF) استفاده شد. به همین منظور برای تعیین فاکتور تجمع زیستی نسبت غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی گیاه جو به غلظت فلزات سنگین در خاک و برای فاکتور انتقال نسبت غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی به غلظت فلزات سنگین در ریشه جو در نظر گرفته شد (جدول ۱۰). با توجه به نتایج جدول ۹، مقادیر فاکتور تجمع زیستی فلزات سنگین سرب، کادمیوم، نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک اندازه‌گیری شده در اندام هوایی گیاه جو کمتر از یک می‌باشد که بیانگر توانایی ضعیف گیاه جو در تجمع انواع فلزات سنگین می‌باشد. این نتایج با یافته‌های میرزایی و همکاران (۱۳۹۵) مبنی بر این که فاکتور تجمع زیستی در گیاه گندم و جو کمتر از ۱ می‌باشد و عدم توانایی این دو گیاه جذب فلزات سنگین و همچنین توانایی بیش‌تر جو در جذب فلز سرب نسبت به گندم همخوانی دارد. به طور کلی فاکتور تجمع زیستی کمتر یا برابر یک نشان می‌دهد که گیاه مورد نظر قادر به جذب فلزات سنگین هست اما در بافت‌های خود انباشته نمی‌کند زیرا تجمع در بافت‌ها زمانی رخ می‌دهد که فاکتور تجمع زیستی بیش‌تر یک باشد. براساس اعلام نظر سازمان خوار و بار جهانی و سازمان بهداشت جهانی (۲۰۱۱)، غلات و حبوبات با فاکتور تجمع زیستی بالاتر از ۰/۲ برای فلز سنگین کادمیوم به شدت توسط فعالیت‌های انسانی آلوده شده و برای سلامتی انسان زیان آورند. مقادیر فاکتور تجمع زیستی ذکر شده در خاک برای اندام‌های هوایی گیاه جو نشان می‌دهد که انتقال سرب، کادمیوم، نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک از خاک تحت آبیاری با پساب فاضلاب نسبت به خاک تحت آبیاری با چاه افزایش داشته است که بیانگر همبستگی مستقیم آن با افزایش غلظت فلزات سنگین در آب و خاک دارد.

مطابق نتایج جدول ۱۰ مقدار فاکتور انتقال (TF) فقط برای فلز سنگین سرب در گیاه جو تحت آبیاری با پساب فاضلاب بیش‌تر از یک و برای سایر فلزات سنگین کادمیوم، نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک در گیاه جو تحت آبیاری با پساب فاضلاب و چاه کمتر از یک بوده است. مقادیر فاکتور انتقال بیش‌تر از یک نشان‌دهنده تحرک بالای فلزات از خاک و ریشه‌ها به بخش‌های هوایی است. بنابراین جو با فاکتور انتقال بیش‌تر از یک برای فلز سنگین سرب دارای توانایی بالایی در تجمع فلز مذکور می‌باشد. براساس نتایج پژوهش ملهم و همکاران (۲۰۱۲)، مقادیر فاکتور انتقال نزدیک به صفر نشان‌دهنده حفظ بالای فلز سنگین در خاک و در نتیجه حرکت کمتر آن به گیاهان است. بنابراین، سطح پایین فاکتور انتقال مشاهده شده برای فلزات سنگین کادمیوم (۰/۴۷-۰/۲)، نیکل (۰/۶۹-۰/۳۴)، کروم (۰/۵۷-۰/۲۳)، کبالت (۰/۴۵-۰/۳۷) و آرسنیک (۰/۴۶-۰/۳۱) در گیاه جو تحت آبیاری با پساب فاضلاب و چاه نشان می‌دهد که تنها بخش کوچکی از این فلزات

در بخش‌های رویشی گیاه موجود خواهد بود. این نتایج با یافته‌های حداد و همکاران (۲۰۲۳) مبنی بر توانایی گیاه جو در تجمع برخی فلزات سنگین از جمله سرب همخوانی دارد.

جدول ۱۰. فاکتور تجمع زیستی (BCF) و فاکتور انتقال (TF) در ریشه و اندام هوایی گیاه جو

عناصر						فاکتورها
سرب	کادمیوم	نیکل	کروم	کبالت	آرسنیک	
۰/۴۱	۰/۲	۰/۶۹	۰/۵۷	۰/۴۵	۰/۳۱	شاهد
۱/۲	۰/۴۷	۰/۳۴	۰/۲۳	۰/۳۷	۰/۴۶	فاکتور انتقال (TF) پساب
۰/۲۸	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۲۴	۰/۱	۰/۸	اندام هوایی شاهد
۰/۶۴	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱	۰/۱	۰/۱۴	فاکتور تجمع زیستی (BCF) اندام هوایی پساب

تأثیر پساب تصفیه‌خانه شمال اصفهان بر برخی آلودگی‌های میکروبی خاک و گیاه

نتایج این پژوهش نشان داد، بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری، میانگین مقادیر کلیفرم کل (TC) و کلیفرم گوارشی (FC) در خاک تحت آبیاری با پساب فاضلاب نسبت به خاک تحت آبیاری با چاه تفاوت معنی داری نداشتند و اختلاف آنها بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری در اراضی تحت آبیاری با پساب فاضلاب و اراضی تحت آبیاری با آب چاه برای کلیفرم کل صفر و کلیفرم گوارشی ۲/۵ (MPN/g) بوده است که بیانگر حذف آلودگی میکروبی تا سطح اراضی تحت آبیاری با آب چاه بعد از بیست و یک روز می‌باشد (جدول ۱۱). بنابراین به منظور حفظ ایمنی بهره برداران توصیه می‌شود که ورود بهره برداران به اراضی تحت آبیاری با پساب فاضلاب حداقل بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری انجام شود و زمان برداشت بذر مطابق استاندارد ۲۱۷۸۶ سی روز پس از آخرین آبیاری انجام شود. همچنین بر اساس استاندارد مذکور تا بیست و چهار ساعت بعد از آخرین آبیاری از ورود حیوانات به مزرعه جلوگیری شود که با نتایج گزارش شده توسط ملاحسینی و همکاران (۱۴۰۰) مبنی بر کاهش کلیفرم کل و کلیفرم گوارشی در اراضی تحت آبیاری با پساب تا سطح اراضی تحت آبیاری با آب چاه پس از گذشت سه روز از زمان آخرین آبیاری همخوانی دارد.

جدول ۱۱. نتایج آزمون تی تست کلیفرم کل (TC) و کلیفرم گوارشی (FC) نمونه‌های خاک کشت جو تحت آبیاری با آب چاه و پساب فاضلاب (بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری)

ردیف	پارامتر	خاک تحت آبیاری	خاک تحت آبیاری با پساب فاضلاب	درجه آزادی	t value	ارزیابی در سطح ۵ درصد
		شاهد (MPN/g)	تیمار (MPN/g)			
۱	کلیفرم کل (TC)	۹/۱	۹/۱	۹	۰/۰۰۲	۰/۹۹ ^{ns}
۲	کلیفرم گوارشی (FC)	۲/۲	۴/۷	۹	-۰/۷۳	۰/۴۹ ^{ns}

با توجه به جدول ۱۲ مشاهده می‌شود که در زمان برداشت محصول (بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری) میانگین مقادیر کلیفرم کل (TC) و کلیفرم گوارشی (FC) در اندام هوایی جو تحت آبیاری با پساب فاضلاب نسبت به اندام هوایی جو تحت آبیاری با آب چاه تفاوت معنی داری نداشتند و اختلاف آن‌ها بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری در اراضی تحت آبیاری با پساب فاضلاب و اراضی تحت آبیاری با آب چاه برای کلیفرم کل ۱/۳ و کلیفرم گوارشی ۰/۴ (MPN/g) بود که بیانگر حذف آلودگی میکروبی تا سطح اراضی تحت آبیاری با آب چاه بعد از بیست و یک روز می‌باشد. بنابراین به منظور حفظ ایمنی بهره برداران توصیه می‌شود که ورود بهره برداران به اراضی تحت آبیاری با پساب فاضلاب حداقل بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری انجام شود و زمان برداشت بذر مطابق استاندارد ۲۱۷۸۶ سی روز پس از آخرین آبیاری انجام شود. همچنین براساس استاندارد مذکور تا بیست و چهار ساعت بعد از آخرین آبیاری از ورود حیوانات به مزرعه جلوگیری شود که با نتایج گزارش شده توسط ملاحسینی و همکاران (۱۴۰۰) مبنی بر کاهش کلیفرم کل و کلیفرم گوارشی در اراضی تحت آبیاری با پساب تا سطح اراضی تحت آبیاری با آب چاه پس از گذشت سه روز از زمان آخرین آبیاری همخوانی دارد.



جدول ۱۲. نتایج آزمون تی تست کلیفرم کل (TC) و کلیفرم گوارشی (FC) نمونه‌های اندام هوایی جو تحت آبیاری با آب چاه و پساب فاضلاب (بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری)

ردیف	پارامتر	اندام هوایی جو تحت آبیاری با آب چاه (MPN/g) شاهد	اندام هوایی جو تحت آبیاری با پساب فاضلاب (MPN/g) تیمار	درجه آزادی	t value	ارزیابی در سطح ۵ درصد
۱	کلیفرم کل (TC)	۱۴/۹	۱۶/۲	۹	-۰/۰۹	۰/۹۳ ^{ns}
۲	کلیفرم گوارشی (FC)	۹/۹	۱۰/۳	۹	-۰/۰۲	۰/۹۹ ^{ns}

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این مطالعه نشان داد که پارامترهای شیمیایی، عناصر سنگین و BOD و COD پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان مطابق حدود مجاز استانداردهای داخلی و خارجی می‌باشد ولی از لحاظ بار میکروبی فراتر از حدود مجاز استانداردهای داخلی و خارجی می‌باشد. همچنین نتایج تأثیر کلیه پارامترهای پساب فوق بر روی خاک و گیاهان جو بذری نشان داد که آبیاری با پساب فاضلاب باعث افزایش غلظت عناصر سنگین در خاک و گیاهان شد. در صورتی که غلظت آن‌ها کمتر از حدود مجاز استانداردهای داخلی و خارجی می‌باشد. بررسی وضعیت آلودگی خاک تحت آبیاری با پساب به فلزات سنگین و توانایی غنی‌سازی آن‌ها در گیاهان جو بذری نیز نشان داد که خاک تحت آبیاری با پساب از نظر فلزات سنگین سرب و کادمیوم دارای غنی‌سازی متوسط و از نظر فلزات سنگین نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک دارای غنی‌سازی ضعیف برای انتقال به ریشه‌ها و اندام‌های هوایی گیاهان جو می‌باشد. فاکتور غنی‌سازی فلزات سنگین در گیاه جو در اندام هوایی بیش‌تر از ریشه بود. همچنین توانایی گیاهان جو در جذب و انباشت فلزات سنگین و ارزیابی پتانسیل گیاهان در گیاه پالایی نشان داد که مقادیر فاکتور تجمع زیستی فلزات سنگین سرب، کادمیوم، نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک اندازه‌گیری شده در اندام هوایی گیاهان جو کمتر از یک و بیانگر توانایی ضعیف گیاهان جو در تجمع انواع فلزات سنگین می‌باشد و فاکتور انتقال در گیاهان نیز تحت آبیاری با پساب فاضلاب به ترتیب فقط برای فلز سنگین سرب و کادمیوم بیش‌تر از یک و برای سایر فلزات سنگین نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک کمتر از یک بود که بیانگر توانایی بالای گیاهان جو برای انتقال فلز سنگین سرب و کادمیوم می‌باشد. در حالی که برای سایر فلزات سنگین نیکل، کروم، کبالت و آرسنیک فاکتور انتقال پایین است. بررسی اثرات استفاده از پساب تصفیه‌خانه بر برخی آلودگی‌های میکروبی خاک و گیاه نیز نشان داد که بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری، میانگین مقادیر کلیفرم کل و کلیفرم گوارشی در خاک و اندام هوایی گیاهان جو بذری نسبت به آبیاری با چاه تفاوت معنی‌داری نداشتند. بنابراین حذف آلودگی میکروبی در خاک و اندام هوایی گیاهان فوق تحت آبیاری با پساب فاضلاب تا سطح اراضی تحت آبیاری با آب چاه بعد از بیست و یک روز می‌باشد. به‌طور کلی نتیجه می‌شود که استفاده از پساب فاضلاب برای کشت گیاهان جو بذری از نظر انتقال و تجمع عناصر سنگین در بافت‌های گیاهی محدودیتی ندارد ولی از نظر بار میکروبی برای خاک و اندام هوایی گیاهان جو دارای محدودیت می‌باشد. از این رو توصیه می‌شود ورود حیوانات به مزرعه تحت آبیاری با پساب فاضلاب حداقل سه روز بعد از آخرین آبیاری، ورود بهره‌برداران به مزرعه حداقل بیست و یک روز بعد از آخرین آبیاری و برداشت بذرها حداقل سی روز بعد از آخرین آبیاری انجام شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف بخش خصوصی به نام شرکت آبجویان شمال اسپادانا در قالب پروژه پژوهشی نویسنده اول انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

تمامی مراحل پژوهش شامل ایده پردازی، طراحی و اجرای آزمایش‌ها، جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها، بررسی منابع، نگارش پیش نویس اولیه، بررسی، نگارش نهایی، نظارت و مدیریت پژوهش توسط حمید ملاحسینی انجام شده است.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در این مقاله از هوش مصنوعی و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده نشده است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی موسسه تحقیقات خاک و آب/ مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان به خاطر حمایت معنوی و همکاری در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

از خانم دکتر مریم موسوی به خاطر بازبینی متن مقاله و ارائه نظرهای ساختاری تشکر و قدردانی می‌شود.

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

از آقای دکتر بابک خیام باشی به خاطر مطالعه متن مقاله حاضر و ارائه نظرهای ارزشمند سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید می‌باشد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسنده این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- ایگدرنژاد، اصلان و مطیع زاده، معصومه. (۱۳۸۷). ارزیابی کیفیت فاضلاب خام و پساب تصفیه شده تصفیه‌خانه شمال اصفهان برای استفاده مجدد در کشاورزی، سومین کنگره ملی بازیافت و استفاده از منابع آلی تجدید شونده در کشاورزی، خوراسگان، دانشگاه آزاد واحد خوراسگان.
- جعفر نژادی، علیرضا و موسوی فضل، سید محمد هادی. (۱۳۹۳). بررسی اثرات فاضلاب تصفیه‌شده بر آلودگی میکروبی و شیمیایی خاک و گندم. *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*، ۲۸ (۳)، ۵۱۷-۵۲۵.
- صالحی، زهرا و جلالی، محسن. (۱۴۰۴). بررسی فراهمی زیستی عناصر سنگین در خاک و گیاه خرفه در اثر آبیاری با فاضلاب صنعتی و کاربرد لجن فاضلاب، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶ (۱۲)، ۳۳۳۱-۳۳۵۰.
- های آبیاری. اسناد شماره ۲۱۸۷۶، تجدید نظر اول. سازمان ملی استاندارد ایران. (۱۴۰۱). استفاده از فاضلاب تصفیه شده برای پرژه سیدآبادی، زهرا؛ امامی، حجت، فتوت، امیر و قرایی، علی. (۱۴۰۴) تاثیر فعالیت‌های معدنی بر کروم، نیکل و کبالت در خاک‌ها و گیاه شال‌دم (*Stipa barbata*) اطراف معدن کرومیت سبزوار. *مجله روابط خاک و گیاه*، ۱۶ (۴)، ۵۱-۵۷.
- عالی نژادیان، افسانه؛ محمدی، جهنگرد؛ کریمی، احمد و نیکوخواه، فرزانه. (۱۳۹۲). تأثیر آبیاری با پساب شهری بر تجمع باکتریهای شاخص آلودگی و برخی فلزات سنگین در خاک و گیاه. *مجله پژوهش‌های سولوی و مولکولی (مجله زیست‌شناسی ایران)*. ۲۶ (۴)، ۵۲۳-۵۰۸.
- قمرنیا، هوشنگ؛ عباسی، محمد رسول؛ و فرمانی‌فرد، میلاد. (۱۴۰۳). انباشت و توزیع فلزات سنگین در گیاه گشنیز (*Coriandrum sativum*. L) تحت تأثیر آبیاری با پساب تصفیه‌شده شهری، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۵)، ۷۸۰-۷۶۷.
- ملاحسینی، حمید. (۱۳۸۱). بررسی شدت و گستردگی آلودگی خاک‌ها به عناصر سنگین و گیاهان آبیاری شده با فاضلاب در جاده ورامین. مرکز تحقیقات کشاورزی ورامین، گزارش نهائی ۸۱/۳۶۵.
- ملاحسینی، حمید. (۱۳۸۳). بررسی اثرات تغذیه‌ای ازت، فسفر و پتاس و تراکم کاشت روی خصوصیات کمی و کیفی ذرت علوفه‌ای (۷۰۴) تحت آبیاری با فاضلاب در جاده ورامین. مرکز تحقیقات کشاورزی ورامین، گزارش نهائی ۸۳/۱۲۵۲.
- ملاحسینی، حمید. (۱۳۸۵). بررسی نقش کیفیت فاضلاب در تامین ازت، فسفر و پتاس در زراعت گندم. مرکز تحقیقات کشاورزی ورامین، گزارش نهائی ۸۵/۱۲۹۰.
- ملاحسینی، حمید. (۱۴۰۰). بررسی اثرات کاربرد بلند مدت پساب فاضلاب شهری بر برخی خصوصیات خاک و گیاه. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، گزارش نهائی ۶۱۴۸۷.
- ملاحسینی، حمید؛ هراتی، مجید؛ اکبری، غلام علی و حریری، ناهید. (۱۳۸۴). تجمع فلزات سنگین در اندام‌های ذرت علوفه‌ای تحت آبیاری با فاضلاب. *مجموعه مقالات نهمین کنگره علوم خاک ایران*.
- میرزایی تختگاهی، حسین؛ قمرنیا، هوشنگ؛ پیر صاحب، مقداد و فتاحی، نظیر. (۱۳۹۵). بررسی تأثیر آبیاری با آب آلوده بر تجمع فلزات سنگین برگندم



REFERENCES

- Abdoulkader, B.A., Mohamed, B., Nabil, M., Alaoui-Sossé, B., Eric, C., & Aleya, L. (2015). Wastewater use in agriculture in Djibouti: Effectiveness of sand filtration treatments and impact of wastewater irrigation on growth and yield of *Panicum maximum*. *Ecological Engineering*, 84, 607–614.
- Ahemad, M., & Malik, A. (2011). Bioaccumulation of heavy metals by zinc resistant bacteria isolated from agricultural soils irrigated with wastewater. *Bacteriology Journal*, 2, 12–21.
- Ali, M., Ali, Z., & Ayyash, A. (2019). The effect of reuse of treated wastewater in irrigation on some chemical properties of soil and the growth of wheat yield. *Journal of Misurata University for Agricultural Sciences*, 1, 196–208.
- Alinezhadian, A., Mohammadi, J., Karimi, A., & Nikookhah, F. (2014) Effect of municipal effluent irrigation on accumulation of indicator bacteria and some of heavy metal in soil and plant. *Journal of Cellular and Molecular Research (Iranian Journal of Biology)*, 26, 523-508. (In Persian).
- Al-Mefleh, N.K., Othman, Y.A., Tadros, M.J., Al-Assaf, A., & Talozi, S. (2021). An assessment of treated greywater reuse in irrigation on growth and protein content of *Prosopis* and *Albizia*. *Horticulturae*, 7, 38.
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., Gavão, A., Pisoeiro, J., Rizzo, A., & Masi, F. (2020). A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of the total environment*, 711, 134731.
- Christou, A., Eliadou, E., Michael, C., Hapeshi, E., & Fatta-Kassinos, D. (2014). Assessment of long-term wastewater irrigation impacts on the soil geochemical properties and the bioaccumulation of heavy metals to the agricultural products. *Environmental monitoring and assessment*, 186, 4857–4870.
- Craddock, H., Panthi, S., Rjoub, Y., Lipchin, C., Sapkota, A., & Sapkota, A. (2020). Antibiotic and herbicide concentrations in household greywater reuse systems and pond water used for food crop irrigation: West Bank, Palestinian Territories. *Science of the Total Environment*, 699, 134205.
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A. (2020). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, 4, 85–104.
- FAO. AquaStat, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). Available online: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html>.
- Feigin, A., Ravina, I. and Shalhevet, J. (2012). Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection. Springer Science & Business Media, (Vol. 17).
- Feizi, M. (2001). "Effect of Treated wastewater on Accumulation of Heavy metals in plants and soil". International workshop on wastewater Reuse Management. ICID International workshop on wastewater Reuses management. 19-20 sept. Seoul; Rep.Korea. PP: 137-146.
- Ghamarnia, H., Abbasi, M. R., & Farmanifard, M. (2024). Accumulation and distribution of heavy metals in coriander plant (*Coriandrum sativum* L.) under the influence of irrigation with treated municipal wastewater. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55, 767-780. (In Persian).
- Gland, A., Ahmad, I., & Ahmad, N. (2009). Cotton crop as a source of food and feed. *Pakistan Journal of Botany*, 41(2), 899-906.
- Haddad, M., Nassar, D., & Shtaya, M. (2023). Heavy metals accumulation in soil and uptake by barley (*Hordeum vulgare*) irrigated with contaminated water: *Scientific Reports*.
- Igdernezhad, A., & Motiizadeh, M. (2009). Quality assessment of raw wastewater and treated wastewater from the North Isfahan Treatment Plant for reuse in agriculture, Third National Congress on Recycling and Use of Renewable Organic Resources in Agriculture, Khorasgan, Khorasgan Branch of Azad University. (In Persian).
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran. (2022). Use of treated wastewater for irrigation projects. Standard No. 21876, 1st Revision. (In Persian).
- Jafarnazhadi, A.R., & Mousavi fazl, S.M.H. (2015). Effects of Treated Wastewater on Soil Microbial and Chemical Contamination and Wheat. *Journal of Water Research in Agriculture*, 28, 517-525. (In Persian).
- Jodar-Abellan, A., López-Ortiz, M.I., & Melgarejo-Moreno, J. (2019). Wastewater Treatment and Water Reuse in Spain. Current Situation and Perspectives. *Water*, 11, 1551.
- Khalid, S., Shahid, M., Natasha, I., Sarwar, T., Shah, A., & Niazi, N. (2018). A Review of Environmental Contamination and Health Risk Assessment of Wastewater Use for Crop Irrigation with a Focus on Low and High-Income Countries. *International journal of environmental research and public health*, 15, 895.
- Kinuthia, G., Ngure, V., Beti, D., Lugalia, R., Wangila, A., & Kamau, L. (2020). Levels of heavy metals in wastewater and soil samples from open drainage channels in Nairobi, Kenya: Community health

- implication. *Scientific reports*, 10, 8434.
- Leal, L., Soeter, A., Kools, S., Kraak, M., Parsons, J., Temmink, H., Zeeman, G., & Buisman, C. (2012). Ecotoxicological assessment of greywater treatment systems with *Daphnia magna* and *Chironomus riparius*. *water research*, 46, 1038–1044.
- Leong, J., Oh, K., Poh, P., & Chong, M. (2019). Prospects of hybrid rainwater-greywater decentralised system for water recycling and reuse: A review. *Journal of cleaner production*, 142, 3014–3027.
- Li, F.Y., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2009). Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the total environment*, 407, 3439–3449.
- Ling, L., Xuyu, Y., Juan, L., Yashan, T., & Pan, R. (2021). Advances in Cotton Tolerance to Heavy Metal Stress and Applications to Remediate Heavy Metal-Contaminated Farmland Soil. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*.
- Liu, X.M., Nie, J.H., & Wang, Q.R. (2002). Research on lead uptake and tolerance in six plants. *Acta Phytocologica Sinica*, 26(5), 533–537.
- Lu, Y. (2015). Heavy metal residues in soil and accumulation in maize at long-term wastewater irrigation area in Tongliao, China. *Journal of Chemistry*, 2015, 628280.
- Maurizio Barbieri, M. (2016). The importance of enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (Igeo) to evaluate the soil contamination. *Journal of Geology & Geophysics*, 5, 1.
- Meng, W., Wang, Z., Hu, B., Wang, Z., Li, H., & Goodman, R.C. (2016). Heavy metals in soil and plants after long-term sewage irrigation at Tianjin China: A case study assessment. *Agricultural water management*, 171, 153–161.
- Mellem, J., Baijnath, H., & Odhav, B. (2012). Bioaccumulation of Cr, Hg, As, Pb, Cu and Ni with the ability for hyper accumulation by *Amaranthus dubius*. *African Journal of Agricultural Research*, 7, 591–596.
- Michałkiewicz, M. (2018). Comparison of wastewater treatment plants based on the emissions of microbiological contaminants. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 640.
- Mirzaei Takhtgahi, H.; Qamarnia, H.; Pirsahib, M., & Fattahi, N. (2017). Studying the effect of irrigation with contaminated water on the accumulation of heavy metals in bergamot and parsley. *Water and Irrigation Management*, 6, 329–315. (In Persian).
- Mohammed, A.H., Morrison, J.I. & Baldwin, B.S. (2021). Preliminary screening of domestic barley and wild barley genotypes for salt tolerance. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 4(2), p.e20151.
- Mojiri, A., & Hamidi, A.A. (2011). Effects of municipal wastewater on accumulation of heavy metals in soil and wheat (*Triticum aestivum* L.) with two irrigation methods. *Romanian Agricultural Research*, 28, 217–222.
- Molahoseini, H. (2003). Investigation of the intensity and extent of soil contamination by heavy elements and plants irrigated with wastewater on Varamin Road. Varamin Agricultural Research Center, Final Report 365/81. (In Persian).
- Molahoseini, H. (2005). Study of the nutritional effects of nitrogen, phosphorus and potassium and planting density on the quantitative and qualitative characteristics of forage corn (704) under wastewater irrigation on Varamin road. Varamin Agricultural Research Center, Final Report 1252/83. (In Persian).
- Molahoseini, H. (2007). Studying the role of wastewater quality in providing nitrogen, phosphorus and potassium in wheat cultivation. Varamin Agricultural Research Center, Final Report 1290/85. (In Persian).
- Molahoseini, H. (2021). Studying the effects of long-term use of urban wastewater on some soil and plant properties. Isfahan Province Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Final Report 61487. (In Persian).
- Molahoseini, H.; Herati, M.; Akbari, G.A., & Hariri, N. (2006). Accumulation of heavy metals in forage corn organs under wastewater irrigation. Proceedings of the 9th Iranian Soil Science Congress. (In Persian).
- Muriu-Ng'ang'a, F.W., Mucheru-Muna, M., Waswa, F., & Mairura, F.S. (2017). Socio-economic factors influencing utilisation of rain water harvesting and saving technologies in Tharaka South, Eastern Kenya. *Agricultural Water Management*, 194, 150–159.
- National Standards Organization of Iran. (2022). Use of treated wastewater for irrigation projects. Standard No. 21876, First Revision. (In Persian).
- Nezar H. Samarah, N. H., Bashabsheh, Khaled Y., & Mazahrih, Naem T. (2020). Treated wastewater outperformed freshwater for barley irrigation in arid lands. *Italian Journal of Agronomy*, 15, 183–193.
- Pourmohammadali, B., Hosseini, S.J., Salehi, M.H., Shirani, H., & Boroujeni, I.E. (2019). Effects of soil properties, water quality and management practices on pistachio yield in Rafsanjan region, southeast of Iran. *Agricultural water management*, 213, 894–902.



- Qishlaqi, A., Moore, F., & Forghani, G. (2008). Impact of untreated wastewater irrigation on soils and crops in Shiraz suburban area, SW Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 141, 257–273.
- Qureshi, A., Hussain, I., Ismail, S., & Khan, Q. (2016). Evaluating heavy metal accumulation and potential health risks in vegetables irrigated with treated wastewater. *Chemosphere*, 163, 54–61.
- Radingoana, M., Dube, T., & Mazvimavi, D. (2020). Progress in greywater reuse for home gardening: Opportunities, perceptions and challenges. *Physics and Chemistry of the Earth*, 116, 102853.
- Sabagh, A.E., Hossain, A., Islam, M.S., Barutcular, C., Hussain, S., Hasanuzzaman, M., Akram, T., Mubeen, M., Nasim, W., & Fahad, S. (2019). Drought and salinity stresses in barley: Consequences and mitigation strategies. *Australian Journal of Crop Science*, 13, 810.
- Salehi, Z., & Jalali, M. (2025) Assessment of the Bioavailability of Heavy Metals in Soil and Purslane (*Portulaca oleracea* L.) under Irrigation with Industrial Wastewater and Application of Sewage Sludge. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (12), 3331-3350. (In Persian).
- Saraswat S., & Rai J.P.N. (2009). Phytoextraction potential of six plant species grown in multimetal contaminated soil. *Chemistry and Ecology*, 25, 1–11.
- Sawalhah, M., Al-Kofahi, S., Othman, Y.A., & Cibils, A. (2018). Assessing rangeland cover conversion in Jordan after the Arab spring using a remote sensing approach. *Journal of Arid Environments*, 157, 97–102.
- SeyedAbadi, Z., Emami, H., Fotovat, A., & Gharaei, A. (2025). Effect of mining practices on chromium, nickel and cobalt in margin soils and feather grass (*Stipa barbata*) of chromite mine in Sabzevar. *Journal of Soil and Plant Interactions*, 16, 57–71 (In Persian).
- Sohail, M., Xuan, L., Lizhi, L., Rizwanullah, M., Nasrullah, M., Xiuyuan, Y., Manzoor, Z., & Elis, R. (2021). Farmers' awareness about impacts of reusing wastewater, risk perception and adaptation to climate change in Faisalabad District, Pakistan. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30, 4663–4675.
- Udayanga, W., Veksha, A., Giannis, A., Lisak, G., Chang, V., & Lim, T. (2018). Fate and distribution of heavy metals during thermal processing of sewage sludge. *Fuel*, 226, 721–744.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2014). Cleaning up the Nation's Hazardous Wastes Sites. <http://www.epa.gov/superfund/>
- Vettera, T., & Rieger, A. (2019). Ancient water harvesting in the Old World Dry Belt synopsis and outlook. *Journal of Arid Environments*, 169, 42–53.
- WHO. (2006). Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater; World Health Organization: Geneva, Switzerland; Volume 2.
- Williams, J., & Dimbu, P. (2015). Research article effect of Abbatoir waste water on soil microbial communities. *Scholars academic journal of biosciences*, 5, 452–455.
- Wei, B., & Yang, L. (2010) A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical journal*, 94, 99–107.
- Yadav, R.K., Goyal, B., Sharma, R.K., Dubey, S.K., & Minhas, P.S. (2002). Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops and ground water—a case study. *Environment international*, 28, 481–486.
- Yeganeh, M., Afyuni, M., Khoshgoftarmanesh, A.H., Khodakarami, L., Amini, M., Soffyanian, A.R., & Schulín, R. (2013). Mapping of human health risks arising from soil nickel and mercury contamination. *Journal of hazardous materials*, 244, 225–239.