این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol.---, Issue ----, ------ ------

Heavy metal contamination and risk in soils irrigated with treated wastewater: a case study of Zabol

Fatemeh Sargolzaei[1], Fatemeh Einollahipeer[2*], Reza Dahmardeh Behrooz[3], Narjes Okati[4]

1. Master's degree in Environmental Pollution, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran

*2. **Corresponding Author,** Associated Prof., Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran*

***Email:** fatemeheinollahi@uoz.ac.ir **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-5998-6132*

3. Associated Prof., Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran

4. Assistant Prof., Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: ----------
Revised: ----------
Accepted: ----------
Published: ----------

Keywords:
Heavy metals, Physicochemical parameters, Water quality index, Accumulation, Sludge.

ABSTRACT

Freshwater scarcity in arid and semi-arid regions has led to the use of treated wastewater for irrigation. However, the continued practice may result in the accumulation of heavy metals in soil, thereby threatening human health and food security. This study is the first in the Zabol region to evaluate the quality of treated wastewater using the Canadian Water Quality Index (CWQI) combined with a comprehensive soil health risk assessment. In this study, the physicochemical parameters and heavy metal concentrations in the influent and effluent of the Zabol wastewater treatment plant were measured, and the suitability of the effluent was assessed using the CWQI. Additionally, heavy metal concentrations were determined in soil samples (0–20 cm depth), and the contamination factor (CF), geo-accumulation index (Igeo), pollution load index (PLI), as well as the average daily dose (ADD) and hazard quotient (HQ) were calculated for health risk assessment; dried sludge was also examined. The CWQI results indicated that the quality of the effluent fell into the poor category, making it suitable only for recreational uses and, with caution, for irrigation. In the soil, mercury showed the highest CF (CF ≥6), while all other metals had CF values below 1. The PLI was zero for all elements. According to the Igeo index, the contamination intensity followed the order: Hg < Co < Ni < Cr < Cu < Zn < V < Mn. Human health risk assessment revealed that HQ values for all metals were below the critical limit, indicating minimal adverse effects. Nevertheless, heavy metal concentrations in the dried sludge exceeded standard limits, representing a potential contamination source if mismanaged. Thus, with its novel approach (CWQI and risk assessment), this study goes beyond mere heavy metal concentration measurements. Overall, the use of treated wastewater (except for Hg) poses no significant risk to soil; however, under current conditions, non-agricultural uses and non-fruit-bearing tree planting are recommended, and improving treatment processes is essential to provide safer water during drought periods in Zabol.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

How to Cite: Last Name, Initial., Last Name, Initial., & Last Name, Initial. (2021). Title of paper. *Journal of Natural Environmental Hazards*, -- (--), ----.

© The Author/Authors

DOI: 0000000000000000000

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Freshwater scarcity is a growing global concern, particularly in arid and semi-arid regions where precipitation is low and water resources are limited. Rapid population growth, urban expansion, and intensive agriculture have intensified pressure on available freshwater. In response, wastewater reuse has emerged as a key strategy to address water shortages, especially in regions with limited freshwater availability. Municipal wastewater treatment plants (WWTPs) can provide treated effluent for agricultural irrigation, industrial use, and groundwater recharge. The safety and sustainability of such reuse depend on the quality of the effluent and its compliance with environmental and health standards. Wastewater is a complex mixture of organic matter, nutrients, suspended solids, and potentially toxic elements, including heavy metals. Conventional treatment processes are designed to remove organic matter and nutrients, but heavy metal removal is often inconsistent. If inadequately treated, wastewater effluent can degrade soil quality, accumulate metals in crops, and pose long-term risks to human health. Metals such as cadmium, lead, chromium, and nickel can reduce soil fertility, induce phytotoxicity, and enter the food chain, threatening both public health and food security. The municipal WWTP in Zabol was constructed to reduce environmental pollution and provide an alternative water source for agriculture. However, operational inefficiencies, including malfunctioning aeration systems and limited maintenance, raise concerns about effluent quality. This study aims to evaluate the performance of Zabol WWTP by analyzing the physicochemical properties of its effluent, assessing heavy metal concentrations in wastewater, soils, and sludge, and estimating potential environmental and health risks. Pollution indices and the Canadian Water Quality Index (CWQI) were employed to provide integrated assessments of effluent quality and its suitability for agricultural reuse. The findings aim to guide local authorities and policymakers toward sustainable wastewater management practices.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

DATA AND METHODOLOGY

The study was conducted in Zabol, located in Sistan and Baluchestan Province, southeastern Iran. The WWTP is situated in the southwestern part of the city. The region has an arid climate with high evaporation, low rainfall, and limited freshwater resources, making wastewater reuse important for agriculture. Sampling was conducted in spring 2024 to reflect typical operational conditions. Wastewater samples were collected from the inlet and the final effluent outlet. Soil samples were obtained from agricultural lands adjacent to the effluent discharge area, and sludge samples were collected from drying beds within the plant. Three subsamples from each site were collected. All samples were stored in acid-washed polyethylene containers at 4 °C until laboratory analysis. Effluent samples were analyzed for pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), biochemical oxygen demand (BOD5), chemical oxygen demand (COD), nitrate, nitrite, phosphate, alkalinity, and dissolved oxygen (DO). Soil and sludge samples were oven-dried at 80 °C and sieved through a 63-µm mesh. Two grams of the dried sample were digested with concentrated nitric acid. Effluent samples were similarly treated. Concentrations of cadmium (Cd), lead (Pb), chromium (Cr), nickel (Ni), zinc (Zn), and copper (Cu) were measured using inductively coupled plasma–optical emission spectrometry (ICP-OES). Soil contamination was evaluated using several indices:

- Contamination Factor (CF): ratio of measured metal concentration to background levels
- Pollution Load Index (PLI): geometric mean of CF values for all metals
- Geo-accumulation Index (Igeo): logarithmic comparison of observed concentrations to geochemical background
- Enrichment Factor (EF): metal concentrations normalized to a reference element

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

Human health risk assessment considered dermal exposure. Average daily dose (ADD) and hazard quotient (HQ) were calculated for each metal to evaluate potential risks. The Canadian Water Quality Index (CWQI) was applied to evaluate effluent quality. The index integrates the scope, frequency, and amplitude of parameter exceedances relative to irrigation standards, providing a comprehensive assessment of water suitability.

RESULTS AND DISCUSSION

Effluent analysis revealed significant deviations from recommended irrigation standards. BOD5 and COD were considerably higher than permissible limits, indicating poor organic matter removal. TDS and total suspended solids (TSS) exceeded standards, suggesting inefficient sedimentation and filtration. Effluent pH was slightly alkaline, occasionally exceeding recommended ranges. Dissolved oxygen was consistently low, reflecting limited biological activity due to inadequate aeration. Phosphate levels were elevated, while nitrate and nitrite were variable but mostly within acceptable limits. These findings indicate operational deficiencies, primarily the inoperative aeration system that limits biological treatment. Heavy metal levels in effluent, soils, and sludge were generally within safe limits. Effluent contained low concentrations of Ni, Cr, Pb, Cd, Zn, and Cu, below critical thresholds for irrigation. Soils near the WWTP exhibited minor metal enrichment. Sludge samples showed higher Hg, Zn, and Cu concentrations, consistent with their accumulation in solid waste during treatment. Pollution indices supported these findings. CF values indicated low contamination for most metals, with Zn approaching moderate contamination. PLI values remained near 1, suggesting minimal overall pollution. Igeo confirmed background to unpolluted conditions for most metals. EF identified Zn and Cu as enriched in soils, highlighting the need for ongoing monitoring. CWQI assessment classified the effluent as “poor to marginal,” indicating that unrestricted irrigation is unsafe. Elevated BOD, COD, TSS, TDS, and phosphate primarily contributed to poor water quality, while heavy metals had minimal impact on the overall index. This study highlights significant operational challenges at Zabol WWTP. High BOD, COD, TSS, and TDS levels indicate inadequate removal of organic matter and suspended solids, largely due to malfunctioning aeration, which is essential for biological treatment. Elevated phosphate levels pose a risk of nutrient imbalance and potential eutrophication in irrigated soils. Variable nitrate and nitrite concentrations suggest instability in treatment processes. Low heavy metal concentrations are encouraging, yet Hg, Zn, and Cu enrichment in sludge and soils suggests potential long-term accumulation. Pollution indices indicate minor current contamination but stress the importance of continuous monitoring to prevent future environmental and health risks. CWQI results show that, despite acceptable heavy metal levels, high organic and nutrient loads make effluent unsuitable for unrestricted irrigation. Improvements such as restoring aeration systems, applying advanced nutrient removal processes, and integrating tertiary treatment would enhance effluent quality. Regular monitoring of effluent, soil metal accumulation, and potential risks to crops and humans is essential for sustainable wastewater reuse. Wastewater reuse in arid regions like Zabol is feasible but requires technological upgrades, effective management, and continuous oversight. Such measures will safeguard soil health, protect agricultural productivity, and contribute to water resource resilience in drought-prone areas.

آماده انتشار (بدون شماره و حجم)

CONCLUSION

The Zabol WWTP shows low efficiency in removing organic matter, suspended solids, and nutrients, despite heavy metal concentrations remaining within safe limits. Elevated BOD, COD, TSS, TDS, and phosphate, along with low DO, indicate insufficient biological treatment due to inoperative aeration units. Pollution indices suggest minor soil contamination, with Zn and Cu exhibiting the highest enrichment. CWQI classified the effluent as “poor to marginal,” highlighting its unsuitability for unrestricted irrigation. Sustainable wastewater management in the region requires restoring aeration systems, implementing advanced nutrient removal technologies, integrating tertiary treatment, and conducting continuous monitoring of effluent and soils. These interventions will protect agricultural

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

productivity, maintain soil health, prevent environmental degradation, and enhance water resource resilience in the Sistan region.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflict of interest.

Ethical Statement: This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the support provided by the Research Institute of Zabol. They sincerely thank Dr. Sahel Pakzad-Toochaei for his valuable assistance with the laboratory analyses.

REFERENCES

References [in Persian]

Bagheri Ardebilian, P., Sadeghi, H., Nabaii, A., Bagheri Ardebilian, M. (2011). Assessment of wastewater treatment plant efficiency: *a case study in Zanjan Journal of Health*, 1(3), 67-75. [In Persian]

Ghoreishi, B., Aslani, H., Shakerkhatibi, M., Nemati Mansur, S., Mosaferi, M. (2020). Pollution potential and ecological risk of heavy metals in municipal wastewater treatment plants' sludge, Iranian Journal of Health and Environment, 13(1), 87-102. https://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6417-en.html. [In Persian]

Mehravaran, B., Ansary, H., Beheshti, A. A., Esmaili, K. (2015). Investigate the Feasibility of Using Wastewater Purification in Irrigation Due to Its Environmental Impacts (The effluent treatment plants parkandabad Mashhad. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 9(3), 439-446. https://idj.iaid.ir/article_55013.html?lang=en. [In Persian]

References [in English]

Alnuwaiser, M.A. (2022). Evaluation of heavy metals in the soil wastewater stream. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2022(1): 2522840 .doi.org/10.1155/2022/2522840.

Akter, S., Jolly, Y.N., Kabir, J., Mamun, K.M., Rahman, M.O., Hasan, M., Khandaker, M.U. (2024). Heavy metal contamination of surface soils by anthropogenic activities: concomitant ecological and health risk assessment. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-21. doi.org/10.1080/03067319.2023.2280180.

Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., El Azzi, D. (2023). A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts, and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 349-395. https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-023-09650-7.

Deblonde Rudaru, D.G., Lucaciu, I., Fulgheci, A.M. (2022). Correlation between BOD5 and COD–a biodegradability indicator of wastewater. *Romanian Journal of Ecology and Environmental Chemistry*, 4(2), 2022. nmental Chemistry, 4(2), 2022. doi.org/10.21698/rjeec.2022.207.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ----، شماره ----- ، -------- -----

آلودگی و ریسک فلزات سنگین در خاک‌های آبیاری‌شده با پساب تصفیه‌شده: مطالعه موردی زابل

فاطمه سرگلزائی[۱]، فاطمه عین الهی پیر[۲]*، رضا دهمرده بهروز[۳]، نرجس اکاتی[۴]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آلودگی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل ایران

۲. دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران (**نویسنده مسئول**)

ایمیل: fatemeheinollahi@uoz.ac.ir **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-5998-6132

۳. دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۴. استادیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: --/--/--

تاریخ ویرایش: --/--/--

تاریخ پذیرش : --/--/--

تاریخ انتشار : --/--/--

واژه‌های کلیدی:
فلزات سنگین، فاکتورهای فیزیکوشیمیایی، شاخص کیفی آب، انباشت، لجن.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

چکیده

کمبود آب در مناطق خشک، موجب استفاده از پساب تصفیه‌شده در آبیاری شده است، اما تداوم آن می‌تواند منجر به تجمع فلزات سنگین خاک و تهدید سلامت انسان شود. این مطالعه، در منطقه زابل بر روی کیفیت پساب تصفیه‌خانه با به‌کارگیری شاخص کیفیت آب کانادایی (CWQI) به همراه ارزیابی جامع ریسک سلامت خاک انجام شده است. در این مطالعه، فاکتورهای کیفی و غلظت فلزات سنگین در فاضلاب ورودی و خروجی تصفیه‌خانهٔ زابل اندازه‌گیری و قابلیت کاربری پساب با شاخص CWQI ارزیابی شد. همچنین غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک (عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری) تعیین و شاخص‌های CF، Igeo، PLI و نیز ADD و HQ برای ارزیابی ریسک سلامت محاسبه و لجن خشک نیز بررسی شد. نتایج CWQI نشان داد که کیفیت پساب خروجی در طبقهٔ ضعیف قرار دارد و تنها برای مصارف تفریحی و با احتیاط برای آبیاری مناسب است. در خاک، فلز جیوه بیشترین مقدار CF (CF ≥6) را نشان داد، در حالی که سایر فلزات دارای CF کمتر از ۱ بودند. مقدار شاخص PLI برای تمامی عناصر صفر محاسبه شد. بر اساس شاخص Igeo، شدت آلودگی فلزات به ترتیب Hg<Co<Ni<Cr<Cu<Zn<V<Mn به دست آمد. ارزیابی ریسک سلامت انسانی نشان داد که مقادیر HQ برای تمامی فلزات کمتر از حد بحرانی بوده و اثرات نامطلوب آن‌ها در حداقل سطح قرار دارد. با این حال، غلظت فلزات سنگین در لجن خشک تصفیه‌خانه بالاتر از حدود استاندارد بود که می‌تواند در صورت مدیریت نادرست، منبع بالقوهٔ آلودگی محسوب شود. به این ترتیب، این پژوهش با رویکرد نوین خود (CWQI و ارزیابی ریسک) گامی فراتر از اندازه‌گیری صرف غلظت فلزات برداشته است. در مجموع، استفاده از پساب تصفیه‌شده (به‌جزHg) خطر قابل‌توجهی برای خاک ندارد، اما در شرایط فعلی بیشتر برای مصارف غیرکشاورزی و درختکاری غیرمثمر توصیه می‌شود و بهبود فرآیندهای تصفیه برای تأمین آب ایمن‌تر در شرایط خشکسالی زابل ضروری است.

استناد: نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام؛ و نام خانوادگی، نام (۱۴۰۰). عنوان مقاله. *مخاطرات محیط طبیعی*، -- (--)، ----

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 00000000000000000000000000

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به دلیل فراهم آوردن منبع آب با هزینه‌ای نسبتاً پایین‌تر و دائمی‌تر و همچنین کاهش آثار محیط‌زیستی ناشی از دفع پساب به منابع آبی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. به طوری که برنامه‌ریزی برای اجرای طرح‌های تصفیهٔ فاضلاب و استفادهٔ مجدد از پساب‌ها در بسیاری از کشورهای جهان با سرعت بالایی در حال پیشرفت است (سیلوا[1]، ۲۰۲۳). از جمله کاربردهای اصلی پساب تصفیه‌شده می‌توان به آبیاری، تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، مصارف صنعتی، تأمین آب شرب و غیرشرب و سایر مصارف شهری اشاره کرد. در این میان، استفاده از پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در بخش کشاورزی تا حد زیادی رایج‌ترین و قدیمی‌ترین کاربرد به شمار می‌رود (خان[2] و همکاران، ۲۰۲۲؛ کریستو و همکاران[3]، ۲۰۲۴). کمبود منابع آب شیرین، هزینه‌های بالای تأمین آب و عدم تطابق ظرفیت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با رشد سریع شهرنشینی، همگی باعث افزایش تمایل به استفاده از منابع آب آلوده در آبیاری، به‌ویژه در کشاورزی شهری شده‌اند. این پدیده به‌طور چشمگیری در کشورهای کم‌درآمد و مناطق خشک و نیمه‌خشک که با تنش آبی شدید روبه‌رو هستند دیده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در این مناطق، استفاده از فاضلاب به عنوان یک منبع جایگزین آب به طور گسترده رایج شده است. اهمیت این موضوع در جوامعی دوچندان می‌شود که معیشت بخش عمده‌ای از جمعیت آن‌ها به کشاورزی وابسته است و این بخش نقش کلیدی در اشتغال و تأمین امنیت غذایی ایفا می‌کند (زاناکاکیس[4] و همکاران، ۲۰۲۳).

فاضلاب شهری معمولاً دارای طیف وسیعی از آلاینده‌ها شامل ترکیبات آلی تجزیه‌پذیر و مقاوم، نمک‌های معدنی، مواد مغذی نیتروژن‌دار و فسفردار و همچنین فلزات سنگین با غلظت‌های متفاوت است. در شرایطی که فرآیندهای تصفیه کارآمد نباشند یا به طور کلی وجود نداشته باشند، این آلاینده‌ها در پساب باقی مانده و با تخلیه به خاک و منابع آبی، می‌توانند پیامدهایی چون تغییرات نامطلوب در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، تجمع فلزات سنگین، ورود آلاینده‌ها به زنجیره غذایی و بروز آثار سمی در جانداران را به دنبال داشته باشند. افزون بر این، ادامه رهاسازی پساب تصفیه‌نشده به محیط زیست، نه تنها کیفیت منابع طبیعی و تنوع زیستی را تخریب می‌کند، بلکه تهدیدات جدی برای سلامت عمومی نیز ایجاد می‌نماید (سراوانان[5] و همکاران، ۲۰۲۳؛ تانیگاویل[6] و همکاران، ۲۰۲۳). فلزات سنگین از جمله روی، مس، نیکل، جیوه، کادمیم، سرب و کروم، همواره به عنوان یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های کلیدی در پساب‌ها مورد توجه ویژه پژوهشگران و نهادهای نظارتی بوده‌اند. این عناصر به دلیل سمیت بالا، پایداری طولانی‌مدت در محیط و قابلیت تجمع در بافت موجودات زنده، همواره نگرانی‌های جدی را برای سلامت اکوسیستم‌های آبی و خشکی ایجاد کرده‌اند. در سال‌های اخیر، با افزایش آگاهی محیط‌زیستی و سخت‌گیرانه‌تر شدن قوانین و مقررات مرتبط با تخلیهٔ پساب‌های صنعتی و شهری، این فلزات به عنوان آلاینده‌های اولویت‌دار[7] شناخته شده و مدیریت آن‌ها به یکی از چالش‌های عمده و فراگیر در سطح جهان تبدیل شده است (ساهو[8] و همکاران، ۲۰۲۵). از آنجا که فلزات سنگین قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری ندارند، تمایل بالایی به انباشت در بافت‌های موجودات

آماده انتشار (بدون شماره و مجله)

[1] Silva
[2] Khan
[3] Christou
[4] Tzanakakis
[5] Saravanan
[6] Thanigaivel
[7] Priority Pollutants
[8] Sahu

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

زنده داشته و بسیاری از آنها دارای اثرات سمی و سرطان‌زا هستند (کوکرر[1]، ۲۰۱۷؛ آلنووایزر[2]، ۲۰۲۲؛ رضایی کهخا[3] و همکاران، ۲۰۲۲). تجمع این عناصر در بافت‌ها و اندام‌های مختلف موجودات زنده، نه تنها یک تهدید جدی و مستمر برای سلامت انسان و سایر جانداران به شمار می‌رود، بلکه به دلیل پایداری بالا و عدم تجزیه‌پذیری آن‌ها، موجب انتقال مداوم و تدریجی این آلاینده‌ها در سطوح مختلف زنجیره غذایی شده و در نتیجه، غلظت آن‌ها در سطوح بالای هرم غذایی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

خاک‌های آلوده به فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین مسیرهای قرار گرفتن انسان در معرض این عناصر سمی هستند. در این میان، خاک‌های کشاورزی به‌طور ویژه اهمیت دارند، زیرا آلودگی آن‌ها به‌عنوان یک معضل رو به رشد و یکی از جدی‌ترین مشکلات اکولوژیکی در سطح جهانی مطرح است (هو[4] و همکاران، ۲۰۲۵؛ رضایی کهخا و همکاران، ۲۰۲۲). حضور فلزات سنگین در خاک، کیفیت و حاصلخیزی آن را به شدت کاهش داده و بهره‌وری گیاهان را مختل می‌سازد (لی[5] و همکاران، ۲۰۱۷). این آلودگی‌ها منجر به تغییرات اساسی در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک شده و پیامد آن بروز اختلالات فیزیولوژیکی در گیاهان، کاهش رشد و در نهایت افت عملکرد محصولات کشاورزی است (تاما[6] و همکاران، ۲۰۲۵؛ فصیحی و همکاران، ۱۳۹۶).

هدف از تصفیه فاضلاب، ارتقای کیفیت آن برای حفاظت از محیط زیست و منابع طبیعی، به‌ویژه آب و خاک است. تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل (تأسیس ۱۳۷۵) از نوع برکه تثبیت بوده و شامل برکه‌های هواده، حوضچه‌های جمع‌آوری و کانال تخلیه نهایی است که در حال حاضر با ۶ برکه فعال، فرآیند تصفیه در آن انجام می‌شود. با توجه به محدودیت منابع آبی در منطقه، استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده به‌عنوان منبع آب نامتعارف برای آبیاری کشاورزی و فضای سبز مورد توجه قرار گرفته است که می‌تواند موجب کاهش فشار بر منابع آب شیرین و کمک به بهره‌برداری پایدار شود. همچنین لجن حاصل از لایروبی استخرهای تصفیه پس از دپو، در برخی موارد به‌عنوان کود آلی در کشاورزی استفاده می‌شود و نقش مهمی در بازگرداندن مواد مغذی به خاک و مدیریت پسماند دارد (عین‌الهی پیر و همکاران، ۱۳۹۹).

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

مشاهدات میدانی نشان می‌دهد بخشی از پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب زابل به اراضی کشاورزی اطراف هدایت شده و برای آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌تواند پیامدهای محیط‌زیستی و بهداشتی به همراه داشته باشد (مونیرا[7] و همکاران، ۲۰۲۴). بطوریکه، رضایی کهخا و همکاران (۲۰۲۲) غلظت سرب، کادمیم و مس را در خاک و گیاهان سه روستای زابل (صادق، سه‌قلعه و فتح‌الله) که در محدوده اراضی متأثر از تصفیه‌خانه است، اندازه‌گیری کردند و نشان دادند که غلظت سرب در گیاهان مورد بررسی، بالاتر از حد مجاز است. بر این اساس، در مطالعه حاضر، کیفیت خاک زمین‌های مشرف به تصفیه‌خانه از منظر فلزات سنگین بررسی شدند. علاوه براین، جهت بررسی عملکرد تصفیه‌خانه و تعیین نوع کاربری احتمالی پساب، برای نخستین بار کیفیت پساب تصفیه‌خانه زابل و ریسک سلامت خاک مشرف به آن با استفاده از شاخص CWQI و شاخص‌های سلامت خاک ارزیابی شد.

داده ها و روش‌ها

[1] Kükrer
[2] Alnuwaiser
[3] Rezaei Kahkha
[4] Hou
[5] Li
[6] Tamma
[7] Monira

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مواد و تجهیزات دستگاهی

در این پژوهش، تمامی مواد شیمیایی مورد استفاده از محصولات شرکت مرک آلمان تأمین گردید. همچنین از کاغذ صافی واتمن با قطر منافذ ۴۲ میکرون، آب دیونیزه و آب مقطر استفاده شد. تجهیزات آزمایشگاهی شامل دستگاه طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی[۱]، اسپکتروفتومتر[۲]، فتومتر[۳]، آون[۴]، دستگاه سنجش اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD متر دیجیتال) و انکوباتور[۵]، هدایت‌سنج/اسیدیته‌سنج[۶] و ترازوی دیجیتال[۷] با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم مورد استفاده قرار گرفتند.

نمونه‌برداری

در این مطالعه نمونه‌برداری از تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهرستان زابل در بهار ۱۴۰۳ انجام شد. بدین ترتیب که بر طبق شرایط استاندارد ۳۰۱۰ و روش‌های استاندارد آب و پساب، از فاضلاب ورودی و پساب خروجی تصفیه‌خانهٔ زابل نمونه برداری انجام و نمونه‌ها در ظروف مخصوص، قرار داده شدند. در هر نوبت نمونه‌برداری، سه تکرار از هر نمونه برداشت گردید. نمونه‌های تهیه شده برای انجام آنالیزهای شیمیایی به آزمایشگاه منتقل شدند. به منظور حفاظت از نمونه‌ها تا زمان انجام برخی آنالیزها، pH نمونه‌ها با استفاده از اسید نیتریک رقیق به کمتر از ۲ کاهش یافت (ایتون[۸] و همکاران، ۱۹۹۵). برای تعیین غلظت فلزات سنگین در لجن فاضلاب، نمونه‌برداری از لجن خشک انجام شد. همچنین به منظور ارزیابی اثر فاضلاب بر تجمع فلزات سنگین و شاخص‌های آلودگی مرتبط در خاک‌های کشاورزی، نمونه‌های مرکب خاک از پنج موقعیت مختلف، به‌صورت سه‌تکراره و از لایه سطحی خاک (عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) برداشت گردید. مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری در جدول ۱ ارائه شده است.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

جدول ۱: مختصات جغرافیایی نقاط برداشت نمونهٔ خاک

نقاط	۱	۲	۳	۴	۵
مختصات	۳۱° ۰۱۹۶' ۸۲"	۳۱° ۰۲۳' ۸۸"	۳۱°۰۲' ۵۲"	۳۱°۰۲۴' ۷۷"	۳۱° ۰۲۵' ۸۲۴"
	۶۱° ۴۵/۳۱' ۴۲"	۶۱° ۴۵ '۶۰۰	۶۱° ۴۴ ' ۲/۴۸"	۶۱° ۴۵ '۵۶/۸۳"	۶۱° ۴۴ ' ۳۷/۷۵"

روش انجام آزمایش

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی فاضلاب ورودی و خروجی تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهرستان زابل، شامل pH، EC، COD، BOD، NO_3^-، PO_4^{-3} و قلیائیت، با استفاده از روش‌های استاندارد آب و پساب اندازه‌گیری شد. مقدار pH و EC با استفاده از دستگاه EC/pH متر مدل Eutech ۵۵۰۰ و الکترودهای مربوطه انداه‌گیری گردید. میزان نیتریت NO^-_2 فاضلاب ورودی و خروجی به روش رنگ‌سنجی و با استفاده از دستگاه Palintest 8000 در طول موج ۴۲۵ نانومتر و با روش ۸۰۳۸ شرکت Hack قرائت شد. میزان نیترات NO^-_3 نمونه‌های برداشت شده نیز به روش

[1] ICP-Aptima 2000DV, Perkin Elmer, USA
[2] DR2800, Hach, USA
[3] Palintest 8000, UK
[4] Memmert
[5] Lovibond, Germany
[6] EC/pH meter 5500
[7] L250AAA, UK
[8] Eaton

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

رنگ‌سنجی با دستگاه فتومتر Palintest 8000 در طول موج ۵۷۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. میزان فسفات PO_4^{-3}- نمونه‌های فاضلاب نیز با استفاده از روش رنگ‌سنجی اسید اسکوربیک (روش ۸۰۴۸ شرکت Hack) و با دستگاه اسپکتروفوتومتر Unico ۲۱۰۰ در طول موج ۸۸۰ نانومتر قرائت شد. همچنین میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی COD نمونه‌ها به روش رفلاکس[1] و بر اساس جذب محلول در طول موج ۶۰۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر Unico ۲۱۰۰ سنجش گردید (ایتون و همکاران، ۱۹۹۵).

جهت اندازه‌گیری BOD_5، در گام نخست نمونه‌ها با آبی که به مدت ۲۴ ساعت هوادهی شده و میزان اکسیژن محلول آن به حدود ۹ mg/l رسیده بود، بر اساس غلظت COD رقیق‌سازی شدند. سپس، محلول‌های تهیه‌شده در بطری‌های اختصاصی BOD منتقل گردید و حسگرهای دستگاه BOD متر بر روی آن‌ها نصب شد. بطری‌ها به‌مدت پنج روز در دمای ثابت ۲۰ درجه سلسیوس داخل انکوباتور مدل OxiTOP ساخت شرکت WTW آلمان قرار گرفتند. در پایان دوره انکوباسیون، مقدار BOD_5 اندازه‌گیری و ثبت شد (دبلونده‌رودارو[2] و همکاران، ۲۰۲۲).

تعیین مقادیر فلزات سنگین

پیش از انجام فرآیند هضم اسیدی، کلیهٔ ظروف آزمایشگاهی به‌منظور حذف آلودگی‌های احتمالی، به مدت ۱۲ ساعت در محلول ۵ درصد اسید نیتریک قرار داده شدند. به‌منظور اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین، مقدار ۵۰ میلی‌لیتر از نمونه‌های فاضلاب به لوله‌های شیشه‌ای منتقل و ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ (۶۵٪) به هر نمونه افزوده شد. نمونه‌ها برای انجام هضم کامل، ابتدا به مدت یک ساعت در دمای ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد و سپس به مدت یک ساعت در دمای ۱۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد در دستگاه ترموراکتور قرار گرفتند (کینوتیا[3] و همکاران، ۲۰۲۰). پس از اتمام هضم، محلول‌ها با استفاده از کاغذ صافی واتمن با اندازه منافذ ۴۲ میکرومتر صاف شدند تا ذرات معلق حذف شود. در ادامه، حجم نهایی نمونه‌ها با آب دیونیزه به ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین با استفاده از دستگاه ICP-OES (طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت‌شده القایی) مدل Perkin Elmer Optima DV2000 ساخت ایالات متحده آمریکا انجام گرفت و نتایج به صورت میکروگرم بر لیتر (µg/L) گزارش شد (کاظمی[4] و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین به‌منظور تعیین حد تشخیص دستگاه (LOD) و کاهش اثر خطاهای ناشی از آماده‌سازی نمونه، تعداد سه تکرار نمونه شاهد به همراه نمونه‌ها آماده‌سازی و به‌صورت همزمان آنالیز شدند. این نتایج در ارزیابی کیفیت پساب تصفیه‌شده مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت، غلظت عناصر و فلزات سنگین با استفاده از رابطهٔ ۱ محاسبه گردید:

$$M\left(\frac{mg}{l}\right) = \frac{(C \times V)}{v} \times A \qquad (۱)$$

که M غلظت نهایی عناصر و فلزات سنگین نمونه براساس mg/l، C غلظت بدست آمده از دستگاه برحسب mg/l، V حجم نهایی نمونه بر حسب ml (۵۰ml)، v حجم نمونه اولیه برای هضم اسیدی (۴۰ml) و A ضریب رقت است.

راندمان حذف مواد آلاینده (RE) فاضلاب نیز با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (دبلونده[5] و همکاران، ۲۰۱۱).

آماده انتشار (بدون شماره صفحه)

[1] Closed Reflux, Colorometric Method
[2] Deblonde Rudaru
[3] Kinuthia
[4] Kazemi
[1] Deblonde

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

$$RE\ (\%) = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100 \quad (۲)$$

در این رابطه C_{in} و C_{out} به ترتیب غلظت ورودی آلاینده به تصفیه‌خانه و خروجی از تصفیه خانه است.

شاخص بررسی کیفیت پساب تصفیه شده

بر اساس نتایج حاصل از ارزیابی فاکتورهای کیفی پساب تصفیه‌شده و غلظت برخی فلزات سنگین، نوع کاربرد بهینه پساب با استفاده از شاخص کیفیت آب کانادایی[1] مورد بررسی قرار گرفت (لامب[2] و همکاران، ۲۰۰۶). این شاخص با توجه به سه فاکتور اصلی F_1، F_2 و F_3 تعیین شد. فاکتور F_1 بیانگر درصد پارامترهای غیرقابل قبول نسبت به کل پارامترهای اندازه‌گیری شده است (رابطهٔ ۳). فاکتور F2 (رابطهٔ ۴) میزان فراوانی انطباق نداشتن نتایج آزمایشات مجزا با استانداردها را نشان می‌دهد و درصد آزمایشاتی را مشخص می‌کند که با مقادیر مرجع همخوانی نداشته‌اند. فاکتور F_3 به بزرگی انحراف مقادیر غیرقابل قبول از استاندارد مربوط می‌شود و شدت تخطی آزمایشات از حد مجاز را کمی می‌کند. ترکیب این سه فاکتور، شاخص CWQI را تشکیل می‌دهد و امکان تعیین نوع کاربرد مناسب پساب، از جمله آبیاری، استفادهٔ صنعتی یا سایر مصارف، را فراهم می‌سازد (رابطهٔ ۵). این روش به‌صورت جامع، علاوه بر ارزیابی تعداد پارامترهای انطباق‌نشده، شدت و فراوانی انحراف‌ها را نیز لحاظ می‌کند و امکان ارائهٔ یک ارزیابی دقیق و قابل اعتماد از کیفیت پساب را فراهم می‌آورد (وان‌بیچ[3]، ۲۰۲۰).

$$\mathrm{F1} = \frac{\text{Number of failed variables}}{\text{total number variables}} \times 100 \quad (۳)$$

$$\mathrm{F2} = \frac{\text{Number of failed tests}}{\text{total number variables}} \times 100 \quad (۴)$$

آماده انتشار (بدون شماره مجلد)

فاکتور F_3 به بزرگی انحراف مقادیر غیرقابل قبول از استاندارد مربوط می‌شود و از طریق یک فرآیند سه مرحله‌ای محاسبه شد (رابطه‌های ۵، ۶ و ۷). در مرحله اول، مقدار Excursion تعیین می‌شود. اگر مقدار شاخص‌های مورد بررسی از استاندارد تعیین‌شده بیشتر باشد، Excursion بر اساس رابطهٔ ۶ محاسبه می‌شود و در صورت کمتر بودن شاخص از استاندارد، رابطهٔ ۷ به کار گرفته می‌شود. در مرحلهٔ دوم، میزان انحراف شاخص‌های مختلف با استفاده از شاخص NSE[4] تعیین می‌شود که شدت تخطی مقادیر غیرقابل قبول از حد استاندارد را کمی می‌کند. ترکیب این سه فاکتور، شاخص CWQI را تشکیل می‌دهد و امکان تعیین نوع کاربرد مناسب پساب، از جمله آبیاری، استفاده صنعتی یا سایر مصارف را فراهم می‌آورد. این روش، علاوه بر ارزیابی تعداد پارامترهای غیرمطابق، شدت و فراوانی انحراف‌ها را نیز لحاظ می‌کند و امکان ارائهٔ یک ارزیابی دقیق و قابل اعتماد از کیفیت پساب را فراهم می‌سازد.

$$\mathrm{Excursion}i = \frac{\text{failed tests value i}}{\text{objective i}} - 1 \quad (۵)$$

$$\mathrm{Excursion}i = \frac{\text{Number of failed tests}}{\text{total number variables}} - 1 \quad (۶)$$

در مرحلهٔ سوم، فاکتور F_3 با بهره‌گیری از رابطهٔ ۸ محاسبه شد. در این رابطه، مجموع انحرافات طبیعی‌شدهٔ هر پارامتر از ۰ تا ۱۰۰ رتبه‌بندی می‌شود تا شدت کلی انحراف‌ها نسبت به استانداردها مشخص گردد. در نهایت، مقدار نهایی شاخص CWQI با استفاده از معادلهٔ ۹ به دست آمد که ترکیب فاکتورهای F_1، F_2 و F_3 را شامل می‌شود و امکان ارائه

[1] Canadian Water Quality Index, CWQI
[2] Lumb
[3] Van Bich
[4] Net Standard Error

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

یک ارزیابی جامع، کمی و دقیق از کیفیت پساب و تعیین کاربرد بهینه آن را فراهم می‌آورد. این روش جامع، علاوه بر ارزیابی تعداد پارامترهای منطبق‌نشده، شدت و فراوانی انحراف‌ها را نیز در نظر می‌گیرد و ابزار مناسبی برای تعیین کاربردهای بالقوهٔ پساب، از جمله آبیاری، استفادهٔ صنعتی یا سایر مصارف، فراهم می‌کند (عین‌الهی‌پیر و همکاران، ۱۳۹۹). نتایج این مدل از ۰ تا ۱۰۰ متغیر بوده که بر اساس مقدار به‌دست آمده، شاخص CWQI، نوع کاربری را نشان می‌دهد (رابطهٔ ۹).

$$F3 = \frac{nse}{0.01\ nse + 0.01} \quad (۸)$$

$$CWQI = 100 - \frac{\sqrt{F12 + F22 + F32}}{1.732} \quad (۹)$$

سنجش فلزات سنگین در نمونه‌های خاک و لجن خشک

جهت بررسی غلظت فلزات سنگین در لجن خشک و خاک زراعی اطراف تصفیه‌خانه، نمونه‌ها ابتدا در آون با گردش هوا در دمای ۸۰ °C خشک شدند و سپس با استفاده از الک فولادی ضدزنگ با اندازهٔ چشمهٔ ۶۳ میکرومتر الک گردیدند تا ذرات همگن و مناسب آنالیز فراهم شود. برای هضم نمونه‌های لجن، ۲ گرم از لجن خشک شده با اسید نیتریک غلیظ (مرک، ۶۵٪) هضم شد. در مورد نمونه‌های خاک، از مخلوط اسید نیتریک غلیظ و اسید پرکلریک (مرک، ۷۰٪) به نسبت ۴:۱ استفاده گردید. فرآیند هضم شامل یک ساعت در دمای ۴۰°C و سپس سه ساعت در دمای ۱۴۰°C بود تا فلزات سنگین به طور کامل آزاد شوند. پس از هضم، نمونه‌ها با آب مقطر دوبار تقطیر تا حجم نهایی ۵۰ میلی‌لیتر رقیق و با استفاده از کاغذ صافی واتمن با اندازه منافذ ۰/۴۵ میکرومتر فیلتر شدند. در نهایت، غلظت فلزات سنگین موجود در نمونه‌های هضم‌شده با استفاده از دستگاه ICP و در سه تکرار مستقل اندازه‌گیری شد تا دقت و صحت داده‌ها تضمین گردد (قریشی و همکاران، ۱۳۹۹؛ ان‌دی[1] و همکاران، ۲۰۲۴).

آماده انتشار (بدون شماره و مجله)

ارزیابی آلودگی خاک

فاکتور غنی‌شدگی (EF)، شاخص بار آلودگی (PLI)، فاکتور آلودگی (CF) و شاخص انباشتگی زمین (I_{geo}) برای فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک محاسبه شد. CF با تقسیم غلظت فلز در نمونهٔ خاک بر مقدار پایه به شرح زیر (رابطهٔ ۱۰) محاسبه شد (دیپتی[2] و همکاران، ۲۰۲۳؛ روستمی‌نیا[3] و همکاران، ۲۰۲۳؛ سایگین[4] و همکاران، ۲۰۲۴).

$$CF = \frac{C_{m\ Sample}}{C_{m\ Background}} \quad (۱۰)$$

PLI برحسبCF برای هر فلز به دست آمده و N نیز نشان دهنده تعداد فلزات مورد مطالعه است (رابطهٔ ۱۱).

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \ldots \times CF_N)^{1/N} \quad (۱۱)$$

I_{geo} ارزیابی آلودگی را با مقایسه سطح فلز با غلظت ژئوشیمیایی پس زمینهٔ فلز امکان پذیر می‌کند. مقدار ۱/۵ به عنوان ضریب تصحیح ماتریس پس زمینه به دلیل اثرات لیتوسفر اعمال می‌شود (رابطهٔ ۱۲).

---

[1] Nde
[2] Dipti
[3] Rostaminya
[4] Saygin

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

$$I_{geo} = \log_2[\frac{C_{m\,Sample}}{1.5 \times C_{m\,Background}}] \quad (۱۲)$$

EF محتوای فلز را به یک فلز (Al) مطابق معادلهٔ زیر استاندارد می کند (رابطهٔ ۱۳):

$$EF = \frac{[C_x/C_{ref}]Sample}{[C_x/C_{ref}]_{Background}} \quad (۱۳)$$

میانگین دوزهای روزانه (ADD_s) فلزات سمی از طریق مسیر پوستی (ADD_{derm}) برای بزرگسالان نیز به شرح زیر محاسبه شد (آکتر[1] و همکاران، ۲۰۲۴) (رابطهٔ ۱۴):

$$ADD_{derm} = C_m \times \frac{SA \times AF \times ABF \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6}\ [\text{mg/kg. day}] \quad (۱۴)$$

که در آن C_m غلظت فلز در رسوب است. سایر پارامترها در جدول ۲ تعریف شده‌اند. ضریب خطر (HQ) (رابطهٔ ۱۵) با نسبت ADD فلزات به دوز مرجع آنها (R_fD) به دست آمد. R_fD حداکثر دوز روزانه یک فلز را از یک طریق قرار گرفتن در معرض خاص نشان می دهد (آکتر[2] و همکاران، ۲۰۲۴؛ ووجچووسکا[3] و همکاران، ۲۰۱۹). توضیح واحدها و مقادیر لازم جهت محاسبهٔ مقادیر روزانه در جدول ۲ آورده شده است.

$$HQ = \frac{ADD}{R_fD} \quad (۱۵)$$

جدول ۲: توضیح واحدها و مقادیر برای محاسبهٔ میانگین دوزهای روزانه آلاینده

Skin surface area (SA)	۴۳۵۰ cm^2/event
Adherence factor (AF)	۰/۷ mg/cm^2
Absorption factor (ABF)	۰/۰۱
Exposure frequency (EF)	۰/۱ g/d
Exposure duration (ED)	۳۰ Years
Body weight (BW)	۷۰ Kg
Average time of exposure (AT)	۳۶۵ × ۳۰ = ۱۰۹۵۰ days

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

یافته‌های پژوهش

نتایج بررسی فاکتورهای فیزیکوشیمیایی پساب خروجی تصفیه‌خانهٔ فاضلاب زابل و مقایسهٔ آن با حدود استاندارد (جداول ۳ و ۴) نشان داد که برخی پارامترها در محدودهٔ مجاز و برخی دیگر فراتر از حدود تعیین‌شده قرار دارند. در بخش پارامترهای آلی، مقادیر BOD و COD در پساب خروجی به‌ترتیب ۸۷ و ۱۶۳ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد. همچنین، مقایسه با فاضلاب ورودی نشان داد که کاهش محسوسی در این پارامترها مشاهده نشده و مقادیر آن‌ها در خروجی اندکی افزایش یافته است. بررسی راندمان حذف پارامترها نشان داد که راندمان قلیائیت برابر با ۴۴/۵۷ درصد، راندمان حذف TSS برابر با ۴/۶۸ درصد و راندمان حذف BOD و COD منفی بوده است (جدول ۵). مقدار اکسیژن محلول (DO) از ۱/۳۲ به ۱/۲ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت. همچنین هدایت الکتریکی (EC) از ۲۳۸۰ به ۲۵۶۰ میکروموس بر سانتی‌متر افزایش نشان داد.

در ارتباط با ترکیبات مغذی، نیز غلظت فسفات از ۱/۸۲ به ۳/۷۱ میلی‌گرم بر لیتر و نیترات از ۰/۶۲ به ۰/۷۹ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافت. در بخش فلزات سنگین، غلظت عناصر نیکل، کبالت، کروم، روی، مس، سرب، کادمیم،

[1] Akter
[2] Akter
[3] Wojciechowska

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

آرسنیک و جیوه در پساب خروجی کمتر از حدود مجاز استانداردهای ملی گزارش شد. همچنین در برخی عناصر از جمله کبالت، سرب و کادمیم، افزایش نسبی غلظت در پساب خروجی نسبت به ورودی مشاهده گردید.

جدول ۳: استاندارد تعیین شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایران برای برخی فاکتورهای فیزیکوشیمیایی دفع فاضلاب و استفاده از پساب (رودباری و همکاران، ۱۳۹۶؛ مهرآوران و همکاران، ۱۳۹۴)

ردیف	عامل (mg/l)	تخلیه به آب‌های سطحی	تخلیه به چاه جاذب	مصارف کشاورزی و آبیاری	فاضلاب ورودی زابل	پساب خروجی زابل
۱	BOD	۳۰	۳۰	۱۰۰	۸۶	۸۷
۲	COD	۶۰	۶۰	۲۰۰	۱۶۰	۱۶۳
۳	TSS	۴۰	–	۱۰۰	۶۴	۶۱
۴	TDS	–	–	–	۱۵۶۲	۱۴۵۲
۵	EC	–	–	–	۲۳۸۰	۲۵۶۰
۶	pH	۶/۵-۸/۵	۵-۹	۶-۸/۵	۷/۶۲	۷/۸
۷	DO	۲	--		۱/۳۲	۱/۲
۸	(HR) PO_4^{3-}	۶	۶	–	۱/۸۲	۷۱/۳
۹	(LR) PO_4^{3-}	–	–	–	۳۲	۲۹
۱۰	نیترات	۵۰	۱۰	–	۰/۶۲۰	۰/۷۹۰
۱۱	نیتریت	۱۰	۱۰	–	۵/۹	۶/۸
۱۲	سولفات	–	–	–	۳۲۶	۳۱۰
۱۳	سولفیت	–	–	–	۷۳	۵۲
۱۴	قلیائیت	–	–	–	۴۱۵	۲۳۰
۱۵	آمونیاک	–	–	–	۰/۶۵	۰/۲۴
۱۶	کلرید	–	–	–	۳۴۲	۳۰۵
۱۷	سختی کل	–	–	–	۳۱۰	۲۹۰

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

جدول ۴: استاندارد تعیین شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایران برای فلزات سنگین و استفاده از پساب (رودباری و همکاران، ۱۳۹۶؛ مهرآوران و همکاران، ۱۳۹۴)

ردیف	عامل (mg/l)	تخلیه به آب‌های سطحی	تخلیه به چاه جاذب	مصارف کشاورزی و آبیاری	فاضلاب ورودی زابل	پساب خروجی زابل
۱	نیکل Ni	۲	۲	۲	۰/۰۱	۰/۰۱۶
۲	کبالت Co	۱	۱	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۳۶
۳	کروم Cr	۰/۵	۱	۱	۰/۰۲	۰/۰۱۹
۴	آهن Fe	۳	۳	۳	–	–
۵	روی Zn	۲	۲	۲	۰/۰۲۸	۰/۰۵
۶	مس Cu	۱	۱	۰/۲	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴
۷	منگنز Mn	۱	۱	۱	–	۰/۰۲
۸	سرب Pb	۱	۱	۱	۰/۰۲	۰/۰۲۹
۹	کادمیم Cd	۰/۱	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۲۵
۱۰	لیتیم Li	۱	۱	۰/۲	۰/۱۱	۰/۱۲۸
۱۱	مولیبدن Mo	۰/۰۱	۰/۰۱	۲	۰/۶۰۴	۰/۲۰۶
۱۲	سدیم Na	–	–	–	۴۱۴	۴۱۰
۱۳	پتاسیم K	–	–	–	۵۵/۰۲	۶۶/۹۷
۱۴	آرسنیک As	–	–	–	۰/۰۰۳	۰/۰۱۹

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

۱۵	جیوه Hg	-	-	-	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲۵

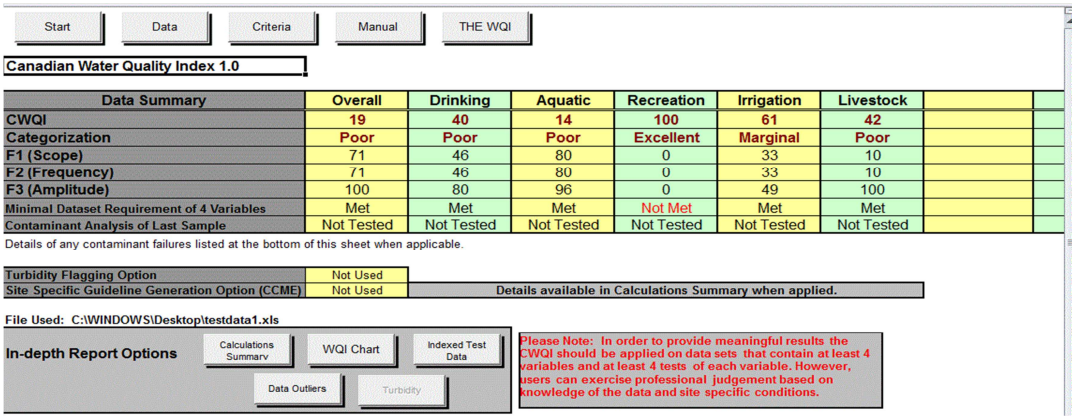
جدول ۵: راندمان تصفیه فاضلاب توسط تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل (mg/l)

	فسفات	نیتریت	نیترات	قلیائیت	COD	BOD_5	TDS	TSS	DO	EC	pH
ورودی	۳۲	۵/۹	۰/۶۲۰	۴۱۵	۱۶۰	۸۶	۱۵۶۰	۶۴	۱/۳۲	۲۳۸۰	۷/۶۲
خروجی	۹۹	۶/۸	۰/۷۹	۲۳۰	۱۶۳	۸۷	۱۴۵۲	۶۱	۱/۲	۲۵۶۰	۷/۸
RE (%)	-۲۰۹/۳۷	-۱۵/۲۵	-۲۷/۴۱	۴۴/۵۷	-۱۶/۶۰	-۱/۱۶	۶/۹۲	۴/۶۸	-	-۷/۰۳	-۲/۳۶

در ارزیابی کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهرستان زابل، مقادیر متفاوتی از شاخص CWQI برای کاربری‌های مختلف به‌دست آمد. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل‌های ۱ و ۲، کیفیت کلی پساب در سطح مطلوب قرار نداشته و تنها برای کاربری‌های تفریح و تفرج و تا حدودی آبیاری مناسب ارزیابی شد. به‌طوری‌که مقدار شاخص CWQI برای کاربری تفریحی برابر با ۱۰۰ و در سطح کیفیت عالی قرار داشت. این شاخص برای آبیاری با مقدار ۶۱ در محدوده شرایط مرزی قرار گرفت، درحالی‌که برای کاربری آشامیدن و دامداری به‌ترتیب با مقادیر ۴۲ و ۴۰، کیفیت ضعیفی را نشان داد. کمترین مقدار شاخص نیز مربوط به کاربری آبزی‌پروری با مقدار ۱۴ بود که بیانگر نامناسب بودن پساب برای این کاربرد است.

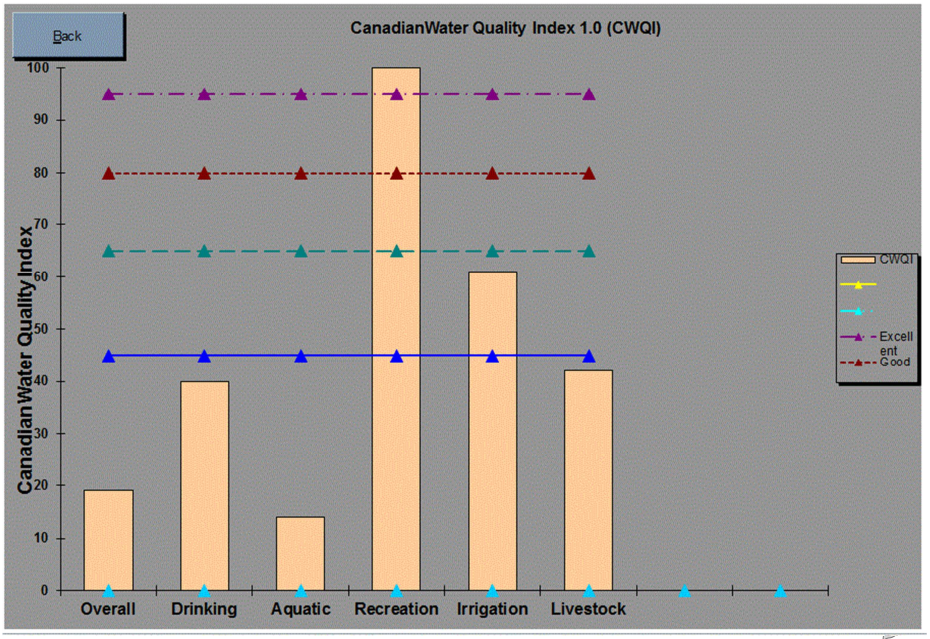
همچنین نتایج جدول ۶ نشان داد که فاکتورهای محدودکنندهٔ کیفیت پساب برای کاربری‌های مختلف متفاوت بوده است. به‌عنوان مثال، در ارزیابی کلی پساب، پارامترهایی نظیر کدورت (۴۷ mg/L)، اکسیژن محلول (۱/۱ mg/L)، سدیم (۴۱۰ mg/L)، آرسنیک (۰/۰۱۹ mg/L)، کادمیم (۰/۰۲۵ mg/L)، کروم (۰/۰۱۹ mg/L)، مس (۰/۰۲۴ mg/L)، مولیبدن (۰/۲۰۶ mg/L)، سرب (۰/۰۲۹ mg/L) و روی (۰/۰۵ mg/L) به‌عنوان عوامل محدودکننده کیفیت شناسایی شدند.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)



شکل ۱: درجه‌بندی کیفیت پساب جهت کاربری‌های مختلف

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۲: ارزش حاصل برای هریک از کاربری های مدنظر از پساب

آماده انتشار (پذیرش شماره مجله)

غلظت فلزات سنگین شامل Cr، Cu، Pb، Fe، Ni، Hg، Mn و Zn در خاک اراضی کشاورزی مجاور تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل و همچنین در لجن تولیدی اندازه‌گیری و ارزیابی شد (جدول ۷). مقایسه مقادیر اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌های خاک با حدود مجاز استانداردها نشان داد که غلظت فلزات Pb و Zn کمتر از حدود تعیین‌شده بوده و در محدوده پایین قرار دارد. در مقابل، غلظت آهن (Fe) در برخی نمونه‌ها بالاتر از حدود پیشنهادی سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده (EPA) گزارش شد. همچنین، غلظت نیکل (Ni) در محدوده آلودگی متوسط قرار گرفت. اگرچه رضایی کهخا و همکاران (۲۰۲۲) غلظت سرب خاک در روستاهای اطراف تصفیه‌خانه را فراتر از حد مجاز گزارش کرده‌اند، اما مطالعه حاضر در زمین‌های مشرف به تصفیه‌خانه غلظت پایین‌تری را نشان داد. این اختلاف می‌تواند ناشی از آبشویی سرب توسط آب آبیاری در زمین‌های نزدیک تصفیه‌خانه طی چهار سال، ویژگی‌های شیمیایی خاک (مانند بافت درشت‌تر، ماده آلی کمتر، CEC پایین یا pH متفاوت) و همچنین استفاده از آب چاه با کیفیت متفاوت و تراکم بیشتر آلاینده‌های انسانی و کشاورزی در روستاهای دورتر باشد. در مجموع، پراکنش مکانی سرب در منطقه یکنواخت نبوده و عواملی مانند فاصله از تصفیه‌خانه، نوع منبع آبیاری و خواص فیزیکوشیمیایی خاک در تجمع آن نقش تعیین‌کننده دارند.

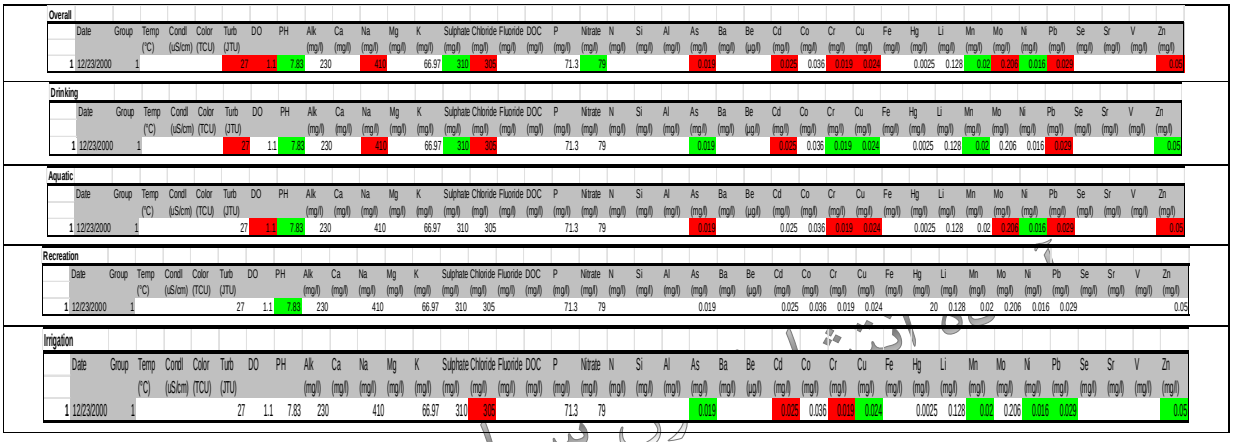
نتایج مطالعه حاضر همچنین نشان داد که غلظت جیوه (Hg) در نمونه‌های خاک از تمامی حدود استانداردهای مورد مقایسه فراتر بوده است. بررسی نمونه‌های لجن تصفیه‌خانه نیز نشان داد که میانگین غلظت فلزات Cr، Cu، Pb، Fe، Ni، Hg، Mn و Zn در لجن بالاتر از حدود مجاز استانداردها است. شاخص‌های کیفی خاک اراضی کشاورزی از نظر آلودگی به فلزات سنگین در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن در جداول ۷، ۸ و ۹ ارائه شده است. بر اساس مقادیر شاخص بار آلودگی (PLI)، تجمع قابل توجهی از فلزات سنگین در خاک‌های آبیاری‌شده با پساب خروجی تصفیه‌خانه مشاهده نشد. در میان عناصر مورد بررسی، فلز جیوه در تمامی ایستگاه‌ها بیشترین مقدار ضریب آلودگی (CF) را نشان داد و پس از آن، فلزات روی و سرب دارای مقادیر بالاتری از CF بودند. نتایج نشان داد که

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مقادیر CF مربوط به جیوه در تمامی ایستگاه‌ها در محدوده آلودگی بسیار بالا (CF≥6) قرار دارد، در حالی‌که برای سایر فلزات، مقادیر CF کمتر از یک گزارش شد.

مقدار شاخص بار آلودگی (PLI) برای تمامی عناصر مورد بررسی برابر با صفر محاسبه گردید. مقادیر شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo}) در بازهٔ ۴ تا ۱۷ متغیر بود. بر اساس میانگین مقادیر I_{geo}، ترتیب فلزات از نظر مقدار این شاخص در خاک به‌صورت Mn>V>Zn>Cu>Cr>Ni>Co>Hg به‌دست آمد. همچنین، مقادیر شاخص دوز متوسط دریافت روزانه (ADD) و نسبت خطر (HQ) بر اساس مقادیر مرجع (R_fD) محاسبه گردید که نتایج آن در جداول ۱۰، ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. مقادیر HQ برای عناصر منگنز، کبالت، نیکل و مس در مقایسه با سایر فلزات کمتر گزارش شد.

جدول ۶: مقدار هریک از فاکتورهای محدود کننده کاربرد ویژه (بر اساس نتیجهٔ CWQI)



جدول ۷: غلظت فلزات در ایستگاه‌های نمونه برداری به ازای میکروگرم بر گرم وزن خشک

فلزات	لجن	نمونهٔ ۱	نمونهٔ ۲	نمونهٔ ۳	نمونهٔ ۴	نمونهٔ ۵	حد استاندارد (ادریس[1] و همکاران، ۲۰۱۳)	MOEE LELb	MOEE SELc (اوستادوگلو[2] و همکاران، ۲۰۲۰)	SQGd (کووالسکو[3] و همکاران، ۲۰۱۸)		EPA (وایسمانوا[4] و همکاران، ۲۰۱۷)
										غیرآلوده	آلودگی متوسط	بسیار آلوده	
Cr	۷۸/۶	۲۸/۵	۲۵/۲	۱۹/۸۶	۱۹/۶	۲۳/۲	۴۳/۴	۲۶	۱۱۰	<۲۵	۲۵~۷۵	>۷۵	۲۵
Cu	۱۳۶	۱۵/۲	۱۵/۰۲	۱۴/۵۶	۱۵/۱۰	۱۴/۹۸	۳۱/۶	۱۶	۱۱۰	<۲۵	۲۵~۵۰	>۵۰	۱۶
Pb	۷۶/۶	۵/۸۵	۵/۲۳	۷/۲۰	۶/۴۰	۵/۸۵	۳۵/۸	۳۱	۲۵۰	<۴۰	۴۰~۶۰	>۶۰	۴۰
Fe	۲۰/۵	۱۱۸۱۵	۱۰۵۶۰	۱۰۲۰۰	۹۵۶۰	۱۱۹۰۰	-	۲۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	-	-	-	۳۰
Ni	۸۰/۸۵	۳۱/۸۰	۲۹/۶	۲۱/۶	۳۴/۹	۳۰/۶	-	-	-	<۲۰	۲۵~۵۰	>۵۰	۱۶
Hg	۸۰/۳	۵/۵۳	۶۲/۲	۵۲	۴۹	۵۲	-	۰/۲	۲	-	-	-	-
Mn	۴۷۸	۳۹۰	۳۷۵	۳۶۵	۳۴۲	۴۰۲	-	۴۶۰	۱۱۰۰	-	-	-	۳۰
Zn	۵۰۰/۶	۳۶/۰۵	۳۸/۰۵	۴۱	۵۱	۴۲	۱۲۱	۱۲۰	۸۲۰	<۹۰	۹۰~۲۰۰	>۲۰۰	۱۱۰

b Ministry of Environment and Energy (MOEE), Lowest Effect Level (LEL).
c Severe Effect Level (SEL).
d Sediment Quality Guidelines (SQG).

جدول ۸: مقادیر CF خاک زمین‌های کشاورزی

[1] Edris
[2] Ustaoglu
[3] Kowalsku
[4] Weissmannova

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

نقاط	CF								
	Co	Ni	Cr	Cu	Pb	V	Mn	Zn	Hg
۱	۰/۲۷۶	۰/۳۷	۰/۲۷	۰/۰۹۵	۰/۴۱	۰/۱۹	۰/۴۱	۰/۵۱	۴۳۲/۵
۲	۰/۲۵۶	۰/۳۵	۰/۲۴	۰/۰۹۳	۰/۳۷	۰/۱۸	۰/۳۹	۰/۵۴	۴۵۲
۳	۰/۲۴۸	۰/۲۵	۰/۱۹	۰/۰۹۱	۰/۵۱	۰/۱۹	۰/۳۸	۰/۵۵	۴۲۵/۳
۴	۰/۲۸۴	۰/۴۱	۰/۱۹	۰/۰۹۴	۰/۴۴	۰/۲۰	۰/۳۶	۰/۷۲	۴۱۶
۵	۰/۳۰۴	۰/۳۸	۰/۲۰	۰/۰۹۳	۰/۴۱	۰/۲۶	۰/۴۲	۰/۶۰	۴۲۳/۲

جدول ۹: مقادیر PLI و I_{geo} خاک زمین‌های کشاورزی

نقاط	PLI	Igeo								
		Co	Ni	Cr	Cu	Pb	V	Mn	Zn	Hg
۱	۰	۶/۸۴	۱۰/۷۹	۱۰/۹۲	۹/۲۵	۵/۷۷	۱۰/۸	۱۷/۹	۱۰/۷	۴/۲
۲	۰	۶/۷۳	۱۰/۸۲	۱۰/۷۴	۹/۲۳	۵/۶۰	۱۰/۷	۱۷/۸	۱۰/۸	۴/۱
۳	۰	۶/۷۱	۱۰/۶۹	۱۰/۳۹	۹/۱۸	۶/۰۷	۱۰/۸	۱۷/۸	۱۰/۸	۴/۳
۴	۰	۶/۸۶	۱۰/۲۴	۱۰/۳۸	۹/۲۲	۶/۱۱	۱۰/۹	۱۷/۷	۱۱/۲	۴/۱
۵	۰	۶/۹۰	۱۰/۸۳	۱۰/۵۰	۹/۱۵	۵/۷۷	۱۰/۹	۱۷/۹	۱۰/۹	۵/۲

جدول ۱۰: مقادیر EF خاک زمین‌های کشاورزی

نقاط	EF								
	Co	Ni	Cr	Cu	Pb	V	Mn	Zn	Hg
۱	۱/۹	۲/۶	۱/۹	۱/۷	۲/۹	۱/۳	۲/۸۵	۳/۵۷	۷۷۴
۲	۱/۶	۲/۲	۱/۵	۱/۵	۲/۳	۱/۴	۲/۴۵	۳/۳۸	۸۵۳
۳	۱/۶	۱/۷	۱/۳	۱/۶	۲/۴	۱/۳	۲/۵۲	۳/۶۲	۷۷۳
۴	۱/۶	۲/۴	۱/۱	۱/۷	۲/۶	۱/۳	۲/۰۲	۴/۲۸	۷۶۶
۵	۱/۹	۲/۵	۱/۵	۱/۶	۲/۷	۱/۳	۲/۷۷	۳/۹۱	۵۸۱

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

جدول ۱۱: مقادیر ADD در خاک

نقاط	ADD							
	Co	Ni	Cr	Cu	Pb	Mn	Zn	V
۱	$۲/۴۸\times۱۰^{-۸}$	$۱/۱۴\times۱۰^{-۷}$	$۱/۰۲\times۱۰^{-۷}$	$۵/۴۹\times۱۰^{-۸}$	$۲/۱۱\times۱۰^{-۸}$	$۲/۴۸\times۱۰^{-۸}$	$۱/۳\times۱۰^{-۸}$	$۸/۲\times۱۰^{-۱۱}$
۲	$۲/۳۰\times۱۰^{-۸}$	$۱/۰۷\times۱۰^{-۷}$	$۹/۰۷\times۱۰^{-۸}$	$۵/۴۱\times۱۰^{-۸}$	$۱/۸۸\times۱۰^{-۸}$	$۲/۴۸\times۱۰^{-۸}$	$۱/۳۷\times۱۰^{-۸}$	$۷/۶\times۱۰^{-۱۱}$
۳	$۲/۲۳\times۱۰^{-۸}$	$۷/۷۸\times۱۰^{-۸}$	$۷/۱۵\times۱۰^{-۸}$	$۵/۲۴\times۱۰^{-۸}$	$۲/۵۹\times۱۰^{-۸}$	$۲/۴۸\times۱۰^{-۸}$	$۱/۶۶\times۱۰^{-۸}$	$۷/۷\times۱۰^{-۱۱}$
۴	$۲/۵۵\times۱۰^{-۸}$	$۱/۲۶\times۱۰^{-۷}$	$۷/۰۵\times۱۰^{-۸}$	$۵/۴۴\times۱۰^{-۸}$	$۲/۳\times۱۰^{-۸}$	$۲/۴۸\times۱۰^{-۸}$	$۱/۸۴\times۱۰^{-۸}$	$۸/۳\times۱۰^{-۱۱}$
۵	$۲/۵۹\times۱۰^{-۸}$	$۱/۱۷\times۱۰^{-۷}$	$۸/۳۲\times۱۰^{-۸}$	$۵/۳۹\times۱۰^{-۸}$	$۲/۱۱\times۱۰^{-۸}$	$۲/۴۸\times۱۰^{-۸}$	$۱/۵۱\times۱۰^{-۸}$	$۸/۳\times۱۰^{-۱۱}$

جدول ۱۲: مقادیر HQ نمونه‌های خاک

نقاط	HQ						
	Co	Ni	Cr	Cu	Pb	Mn	Zn
۱	$۱/۳۵\times۱۰^{-۱۱}$	$۷/۶\times۱۰^{-۱۰}$	$۱/۹\times۱۰^{-۷}$	$۱/۳\times۱۰^{-۹}$	$۱/۷۵\times۱۰^{-۷}$	$۲/۳۴\times۱۰^{-۹}$	$۳/۶\times۱۰^{-۷}$
۲	$۱/۲۵\times۱۰^{-۱۱}$	$۷/۱۰\times۱۰^{-۱۰}$	$۱/۶\times۱۰^{-۷}$	$۱/۲۸\times۱۰^{-۹}$	$۱/۵۶\times۱۰^{-۷}$	$۲/۲۵\times۱۰^{-۹}$	$۳/۸\times۱۰^{-۷}$
۳	$۱/۲۱\times۱۰^{-۱۱}$	$۵/۱۸\times۱۰^{-۱۰}$	$۱/۳۲\times۱۰^{-۷}$	$۱/۲۴\times۱۰^{-۹}$	$۲/۱۶\times۱۰^{-۷}$	$۲/۲۴\times۱۰^{-۹}$	$۴/۶\times۱۰^{-۷}$
۴	$۱/۳۸\times۱۰^{-۱۱}$	$۸/۳۷\times۱۰^{-۱۰}$	$۱/۳۰\times۱۰^{-۷}$	$۱/۲۹\times۱۰^{-۹}$	$۱/۹۲\times۱۰^{-۷}$	$۲/۰۵\times۱۰^{-۹}$	$۵/۱\times۱۰^{-۷}$
۵	$۱/۴۰\times۱۰^{-۱۱}$	$۷/۸۲\times۱۰^{-۱۰}$	$۱/۵۴\times۱۰^{-۷}$	$۱/۲۸\times۱۰^{-۹}$	$۱/۷۵\times۱۰^{-۷}$	$۲/۴۵\times۱۰^{-۹}$	$۴/۲\times۱۰^{-۷}$

نتایج و بحث

بررسی عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

استفادهٔ مجدد از پساب تنها در صورتی امکان‌پذیر است که ایمنی بهداشتی و شرایطی بدون خطر برای اکوسیستم تأمین شود. این واقعیت مستلزم اجرای دقیق قوانین و مقررات و کاهش غلظت آلاینده‌ها طی فرایند تصفیه است (جارامیلو[1] و رسترپو[2]، ۲۰۱۷ اوفوری[3] و همکاران، ۲۰۲۱). با توجه به نتایج حاصل از راندمان تصفیهٔ فاضلاب در شهرستان زابل، کارایی تصفیه‌خانه در حذف آلاینده‌ها نامطلوب ارزیابی می‌شود؛ به‌طوری‌که برای هیچ‌یک از پارامترهای مورد بررسی، به‌ویژه ترکیبات آلی و شاخص‌های BOD و COD، راندمان قابل‌توجهی حاصل نشده است.

یکی از عوامل مؤثر در کاهش کارایی سیستم، غیرفعال بودن پمپ‌های هوادهی است. در این شرایط، برکه‌های تثبیت فاقد هوادهی مؤثر بوده و عملکرد آن‌ها بیشتر به‌صورت واحدهای نگهداشت عمل می‌کند تا راکتورهای بیولوژیکی هوازی. از آنجا که فرآیندهای بیولوژیکی نظیر لجن فعال برای تجزیه مواد آلی وابسته به تأمین اکسیژن هستند، عدم هوادهی مناسب موجب اختلال در این فرآیندها شده و در نتیجه، راندمان حذف آلاینده‌ها، به‌ویژه ترکیبات آلی (BOD و COD) و مواد مغذی، کاهش می‌یابد (مارائیس[4] و همکاران، ۲۰۱۷؛ واکاس[5]، ۲۰۲۳).

تأثیر فاضلاب بر خاک‌های کشاورزی عمدتاً ناشی از حضور مقادیر قابل‌توجهی از مواد مغذی نظیر نیتروژن و فسفر، به‌همراه پارامترهایی همچون هدایت الکتریکی (EC)، pH و فلزات سنگین است که در اثر کاربرد مداوم، به‌تدریج در خاک تجمع می‌یابند (کینوتیا[6] و همکاران، ۲۰۲۰). فاضلاب ممکن است حاوی مقادیر قابل‌توجهی از املاح محلول باشد که تجمع آن‌ها در ناحیه ریشه، می‌تواند اثرات نامطلوبی بر ویژگی‌های خاک و عملکرد محصولات کشاورزی ایجاد کند (منگ[7] و همکاران، ۲۰۱۶). انتقال این املاح به لایه‌های عمیق‌تر خاک از طریق آبشویی می‌تواند به آلودگی خاک و منابع آب زیرزمینی منجر شود. استفادهٔ بلندمدت از پساب‌های شور و غنی از سدیم به‌عنوان یک تهدید بالقوه برای خاک‌های کشاورزی مطرح است، زیرا می‌تواند موجب تخریب ساختمان خاک، کاهش نفوذپذیری و افت بهره‌وری شود. تداوم این روند به ناپایداری کاربری اراضی در بلندمدت می‌انجامد. هرچند شوری و سدیمی‌شدن خاک تا حدودی با روش‌های اصلاحی قابل کنترل است، اما احیای خاک معمولاً پرهزینه بوده و با وجود اقدامات اصلاحی، بازگشت کامل به سطح اولیه بهره‌وری در بسیاری از موارد امکان‌پذیر نیست (نتزر[8] و همکاران، ۲۰۱۴؛ گنجگونته[9] و همکاران، ۲۰۱۸؛ کالل[10] و همکاران، ۲۰۱۲). از این‌رو، استفاده از پساب تصفیه‌خانهٔ فاضلاب زابل برای آبیاری مستلزم رعایت ملاحظات ویژه است؛ زیرا مقادیر پارامترهایی نظیر pH، TDS، TSS و EC می‌تواند به افزایش شوری خاک منجر شده و پیامدهای اقتصادی بلندمدتی برای اراضی کشاورزی به همراه داشته باشد.

در راولپندی، بخش قابل‌توجهی از نمونه‌های فاضلاب دارای مقادیر هدایت الکتریکی (EC) و جامدات محلول کل (TDS) فراتر از حدود مجاز گزارش شد که کاربرد بلندمدت آن‌ها در آبیاری نامطلوب ارزیابی گردید. این نتایج به‌طور غیرمستقیم بیانگر کارایی پایین فرآیندهای تصفیه در آن منطقه است (مشتاق[11] و خان[12]، ۲۰۱۰). در مقابل، ارزیابی

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

[1] Jaramillo
[2] Restrepo
[3] Ofori
[4] Marais
[5] Waqas
[6] Kinuthia
[7] Meng
[8] Netzer
[9] Ganjegunte
[10] Kallel
[11] Mushtaq
[12] Khan

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

عملکرد یک تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهری در الجزایر نشان داد که اغلب پارامترهای آلاینده در پساب خروجی، در مقایسه با استانداردهای ملی، در محدوده مجاز یا پایین‌تر از آن قرار دارند (چرفی[1] و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین، در گابورونِ بوتسوانا، پساب تصفیه‌شده ثانویه با کیفیت مطلوب، برای آبیاری نامحدود محصولات کشاورزی مناسب ارزیابی شد (دیکینیا[2] و آرئولا[3]، ۲۰۱۰).

در یک مطالعه بر روی تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهر زنجان، راندمان حذف پارامترهای TSS، BOD_5 و COD به‌ترتیب ۷۷/۹۱، ۸۷/۲۵ و ۸۷/۲۹ درصد گزارش شد و میانگین غلظت آن‌ها در پساب خروجی به‌ترتیب ۲۰/۳۰، ۶۳/۱۸ و ۳۷/۳۳ میلی‌گرم بر لیتر به‌دست آمد، که نشان‌دهندهٔ انطباق با استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست ایران برای استفاده مجدد در کشاورزی است. در مقایسه، نتایج مطالعهٔ حاضر بیانگر راندمان به‌مراتب پایین‌تر و اختلاف قابل توجه در عملکرد تصفیه‌خانه زابل است (باقری‌اردبیلیان و همکاران، ۱۳۸۹).

همچنین، در مطالعهٔ انجام‌شده بر تصفیه‌خانهٔ فاضلاب اردکان، میانگین غلظت COD، BOD_5 و TSS در پساب خروجی به‌ترتیب ۳۶/۱۴، ۵۶/۴ و ۶/۲ میلی‌گرم بر لیتر و راندمان حذف آن‌ها به‌ترتیب ۹۶/۲۷، ۹۶/۸۱ و ۹۸/۸۴ درصد گزارش شد که بیانگر عملکرد مطلوب این سیستم و انطباق با استانداردهای مختلف بهره‌برداری مجدد است (زارعی‌محمودآبادی و همکاران، ۱۳۹۹). در مقابل، نتایج مطالعه حاضر نشان‌دهندهٔ عملکرد ضعیف‌تر تصفیه‌خانه زابل در حذف آلاینده‌ها است.

پایین بودن غلظت فلزات سنگین در پساب خروجی تصفیه‌خانهٔ فاضلاب زابل نسبت به حدود استاندارد، با نتایج برخی مطالعات پیشین همخوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که علی‌رغم نامطلوب بودن برخی شاخص‌های کیفی، غلظت فلزات سنگین در محدوده مجاز گزارش شده است. به‌عنوان نمونه، در منطقه ال‌ساف مصر، غلظت فلزاتی نظیر کادمیم، کروم، مس، سرب، نیکل و روی در پساب در محدوده توصیه‌شده توسط FAO و FAO/WHO برای آب آبیاری قرار داشت (فاراگ[4] و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین در الجزایر، مقادیر مس، روی، سرب و کروم در پساب تصفیه‌خانه شهری کمتر از حدود مجاز تخلیه گزارش شد. در مطالعه‌ای در عمان نیز، غلظت عناصر مس، نیکل، سرب و روی در نمونه‌های آب و خاک آبیاری‌شده با پساب تصفیه‌شده در سطح پایینی اندازه‌گیری شد.

با این حال، برخی مطالعات وجود غلظت‌های بالاتر از حد مجاز را نیز گزارش کرده‌اند؛ به‌طوری‌که در مواردی، حتی پساب‌های تصفیه‌شده حاوی فلزات سنگین در مقادیر فراتر از استاندارد بوده‌اند (عبدالرحمان[5] و آل-اجمی[6]، ۱۹۹۴). همچنین در یک تصفیه‌خانه در تونس، علی‌رغم قرارگیری اغلب فلزات در محدوده استانداردهای محلی، غلظت کادمیم به‌طور قابل توجهی بالاتر (بیش از ۱۷ برابر) و کروم نیز فراتر از حدود مجاز گزارش شد (داهمونی[7] و همکاران، ۲۰۱۸).

در ساهیوال پاکستان، فاضلاب‌های مورد استفاده برای آبیاری گندم دارای غلظت‌های بالایی از کادمیم، نیکل، آهن، منگنز، مس، کروم، روی و کبالت بوده و در اغلب موارد از حدود مجاز آب آبیاری فراتر گزارش شدند (خان[8] و

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

[1] Cherfi
[2] Dikinya
[3] Areola
[4] Farrag
[5] Abdelrahman
[6] Al-Ajmi
[7] Dahmouni
[8] Khan

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

همکاران، ۲۰۱۸). این امر نشان می‌دهد که در برخی موارد، علی‌رغم کارایی پایین در حذف برخی آلاینده‌ها، به‌ویژه مواد آلی در شرایط عدم هوادهی، غلظت فلزات سنگین در پساب می‌تواند به دلیل ویژگی‌های فاضلاب ورودی یا حدود مجاز مربوطه در محدوده قابل قبول باقی بماند. با این حال، در صورت عدم حذف مؤثر سایر آلاینده‌ها، استفاده ایمن از پساب مستلزم ملاحظات مدیریتی دقیق‌تری خواهد بود.

استفادهٔ مجدد از پساب، علاوه بر نقش آن در مدیریت منابع آب، به‌دلیل دارا بودن مواد مغذی می‌تواند موجب کاهش مصرف کودهای شیمیایی شود و در سال‌های اخیر در بسیاری از کشورها توسعه یافته است (مافتون[1] و همکاران، ۲۰۲۴). با این وجود، حضور آلاینده‌های باقیمانده در پساب می‌تواند پیامدهای نامطلوب بهداشتی و زیست‌محیطی به همراه داشته باشد (بقاپور و همکاران، ۱۳۹۳). در این راستا، شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی کیفیت پساب ارائه شده است که در میان آن‌ها، شاخص CWQI به‌عنوان یکی از ابزارهای جامع ارزیابی کیفیت آب و پساب شناخته می‌شود (رودباری و همکاران، ۱۳۹۶).

شاخص CWQI در بازه صفر تا ۱۰۰ تعریف شده و کیفیت آب را در طبقات مختلف از عالی تا نامطلوب دسته‌بندی می‌کند (رودباری و همکاران، ۱۳۹۶؛ چیدیاک[2] و همکاران، ۲۰۲۳). بر اساس این شاخص، کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه زابل برای کاربری‌های تفریحی و تا حدودی آبیاری مناسب، اما برای مصارف آشامیدن، دامداری و آبزی‌پروری نامناسب ارزیابی شد. این نتایج با یافته‌های رودباری و همکاران (۱۳۹۶) در برخی موارد همخوانی دارد؛ به‌طوری‌که مقدار CWQI برای آبیاری کشاورزی در تصفیه‌خانه اکباتان برابر با ۵۶ گزارش شد که بیانگر فاصله از شرایط مطلوب است. همچنین مقادیر این شاخص برای آشامیدن، پرورش آبزیان و تغذیه دام به‌ترتیب ۳۰، ۳۸ و ۵۳ به‌دست آمد. در این مطالعه، کدورت و جیوه به‌عنوان عوامل اصلی کاهش مقدار CWQI معرفی شدند و استفاده از پساب برای آبیاری کشاورزی با محدودیت‌هایی همراه دانسته شد. بررسی غلظت فلزات سنگین در خاک اراضی کشاورزی اطراف تصفیه‌خانهٔ زابل نشان داد که عناصری مانند آهن، نیکل و جیوه در سطوح بالاتری قرار دارند. تحرک و دسترس‌پذیری این فلزات در خاک به عواملی نظیر pH، ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و بافت خاک وابسته است (دیکینیا[3] و آرئولا[4]، ۲۰۲۰).

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که آبیاری طولانی‌مدت با فاضلاب می‌تواند موجب افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک شود. به‌عنوان مثال، نتایج مطالعه رضایی کهخا و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که آبیاری مزارع با فاضلاب شهری زابل منجر به تجمع قابل توجه فلزات سنگین، به ویژه سرب، در خاک و گیاهان شده است؛ به طوری که میانگین غلظت سرب در اسفناج وحشی، گندم و ذرت علوفه‌ای در هر سه ایستگاه بیشتر از حد مجاز (۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و میزان سرب خاک نیز فراتر از حد مجاز (۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. همچنین، مس در گیاهان کمتر از حد مجاز (۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) ولی در خاک بیش از حد مجاز و کادمیم در گندم و ذرت کمتر از حد تشخیص و در اسفناج نزدیک به حد مجاز قرار داشتند. آزمون ANOVA اختلاف معنی‌داری بین ایستگاه‌ها را برای هر سه فلز نشان داد ($p<0.05$). آنها عنوان کردند که استفاده از فاضلاب تصفیه‌نشده در زمان خشکسالی و کمبود آب هیرمند،

[1] Maffettone
[2] Chidiac
[3] Dikinya
[4] Areola

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

باعث تجمع سرب در زنجیره غذایی دام و انسان شده و پایش مستمر فلزات سنگین، احداث تصفیه‌خانه و آگاهی‌رسانی به کشاورزان ضروری است.

همچنین در بنو پاکستان نیز، غلظت Cd و Ni در خاک‌های آبیاری‌شده با فاضلاب از حدود مجاز فراتر گزارش شد و در مراکش نیز مقادیر بالایی از Zn، Cu، Pb و Cd اندازه‌گیری گردید که در مورد Cd تجاوز از حد مجاز مشاهده شد (چائوآ[1] و همکاران، ۲۰۱۹).

در مقابل، در ال‌ساف مصر، غلظت فلزات سنگین در خاک‌های آبیاری‌شده عمدتاً در محدوده مجاز FAO و FAO/WHO قرار داشت، در حالی‌که در مکزیکوسیتی، غلظت این عناصر به‌ویژه در لایه‌های سطحی خاک بیشتر گزارش شد (فلورس و همکاران، ۱۹۹۷). در اصفهان نیز تفاوت معنی‌داری بین خاک‌های آبیاری‌شده با پساب و آب شیرین از نظر فلزات سنگین مشاهده نشد (اصغری[2] و کورنلیس[3]، ۲۰۱۵). با این حال، در استان هبه‌ای چین، آبیاری طولانی‌مدت با فاضلاب منجر به انباشت و نفوذ عمقی فلزات سنگین در خاک شد، به‌طوری‌که عناصر As، Cd و Pb در عمق‌های بیش از ۳۰ متر نیز شناسایی شدند و غلظت آن‌ها در لایه‌های رسی-سیلتی بیشتر از لایه‌های شنی بود (یانگ[4] و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین در پاکستان و راولپندی، مقادیر برخی فلزات نظیر Cd، Ni، Zn و Cr از حدود مجاز فراتر گزارش شد (مشتاق و خان، ۲۰۱۰).

مطالعات انجام‌شده در هند نیز افزایش قابل توجه فلزات سنگین در خاک‌های آبیاری‌شده با فاضلاب را نشان داده‌اند (چوپرا[5] و پاتاک[6]، ۲۰۱۵). به‌طور کلی، استفاده بلندمدت از پساب می‌تواند منجر به تجمع فلزات سنگین در خاک شود، حتی در شرایطی که غلظت این عناصر در پساب کمتر از حدود استاندارد باشد. تأثیر پساب بر تجمع فلزات سنگین به عواملی نظیر کیفیت پساب، نوع فلز، ویژگی‌های خاک، نوع محصول و مدت زمان آبیاری وابسته است (چائوآ[7] و همکاران، ۲۰۱۹؛ دیکینیا[8] و آرئولا[9]، ۲۰۱۰ خان و همکاران، ۲۰۱۶؛ یانگ[10] و همکاران، ۲۰۲۱). به‌منظور کاهش انتقال فلزات، استفاده از روش‌های مناسب آبیاری، انتخاب محصول و پایش مستمر کیفیت خاک و پساب ضروری است.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

بر اساس شاخص‌های کیفی خاک در این مطالعه، فلزات جیوه، روی و سرب دارای مقادیر CF بالاتری بودند، در حالی‌که مقدار PLI بیانگر وضعیت کلی قابل قبول خاک از نظر آلودگی فلزی است. همچنین مقادیر HQ برای عناصر منگنز، کبالت، نیکل و مس پایین گزارش شد. این نتایج با مطالعه اصغری و کورنلیس (۲۰۱۵) همخوانی دارد که عدم تجمع قابل توجه فلزات را در خاک‌های آبیاری‌شده با پساب نشان دادند. لجن فاضلاب نیز می‌تواند به‌عنوان اصلاح‌کنندهٔ آلی مورد استفاده قرار گیرد، اما ممکن است موجب ورود فلزات سنگین به خاک شود (زاراگوئتا[11] و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات طولانی‌مدت نشان داده‌اند که استفاده مکرر از لجن می‌تواند موجب افزایش غلظت فلزاتی

[1] Chaoua
[2] Asgari
[3] Cornelis
[4] Yang
[5] Chopra
[6] Pathak
[7] Chaoua
[8] Dikinya
[9] Areola
[10] Yang
[11] Zaragüeta

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مانند Zn، Cu، Cr، Ni و Hg در خاک شود (زاراگوئتا و همکاران، ۲۰۲۱؛ منگ[1] و همکاران، ۲۰۱۶). بر این اساس، کاربرد لجن در کشاورزی مستلزم پایش مستمر و رعایت محدودیت‌های محیط‌زیستی است.

نتیجه گیری

این مطالعه به‌عنوان یک پژوهش جدید با رویکرد ارزیابی ریسک سلامت و به‌کارگیری شاخص کیفیت آب کانادایی (CWQI) برای نخستین بار در منطقه زابل انجام شد. نتایج نشان داد که کیفیت کلی پساب تصفیه‌خانه فاضلاب زابل بر اساس شاخص CWQI در سطح مطلوبی قرار ندارد. بطوریکه، این پساب تنها برای کاربری تفریحی مناسب و برای آبیاری در وضعیت مرزی ارزیابی شد، در حالی که برای مصارف آشامیدنی، دامداری و آبزی‌پروری کیفیتی ضعیف تا نامناسب دارد. از نظر فلزات سنگین، غلظت عناصر در پساب خروجی عموماً پایین‌تر از حدود استاندارد بود و خطر مستقیم چشمگیری برای خاک‌های کشاورزی مشاهده نشد. با این حال، نتایج حاصل از شاخص‌های آلودگی خاک نشان داد که اگرچه شاخص PLI بیانگر عدم تجمع کلی آلودگی است، شاخص‌های CF و I_{geo} وجود آلودگی موضعی را تأیید کرده و جیوه به‌عنوان مهم‌ترین آلاینده با سطح آلودگی بالا شناسایی شد. همچنین شاخص‌های ریسک سلامت (HQ و ADD) نشان دادند که خطر غیرسرطانی ناشی از تماس با خاک در حد پایین (HQ<1) قرار دارد. با وجود این، حضور برخی فلزات در لجن و خاک، ضرورت پایش مستمر و مدیریت دقیق‌تر پساب، به‌ویژه برای عناصر خطرناکی مانند جیوه، را آشکار می‌سازد. تمایز این مطالعه از پژوهش‌های پیشین در آن است که تحقیقات قبلی در منطقه زابل صرفاً به سنجش غلظت فلزات سنگین در خاک و گیاه بسنده کرده و فاقد رویکرد یکپارچه مبتنی بر ارزیابی ریسک سلامت و شاخص‌های جامع کیفیت آب مانند CWQI بوده‌اند. در مقابل، مطالعهٔ حاضر با ارائهٔ یک ارزیابی ترکیبی از کیفیت پساب، آلودگی خاک و ریسک سلامت، مبنای دقیق‌تری برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در زمینه استفاده مجدد از پساب فراهم می‌آورد. بنابراین، این پژوهش گامی فراتر از اندازه‌گیری صرف غلظت فلزات برداشته و رویکردی نوین برای ارزیابی ایمنی پساب در شرایط خشکسالی زابل ارائه می‌دهد.

آماده انتشار (بدون شماره مجلد)

عدم قطعیت و محدودیت‌ها

با وجود شواهد گسترده دربارهٔ مزایای استفادهٔ مجدد از پساب در مدیریت منابع آب و تأمین مواد مغذی برای گیاهان، این نتایج با برخی عدم قطعیت‌ها همراه است. نخست، ترکیب شیمیایی پساب تصفیه‌شده در مناطق مختلف و حتی در زمان‌های مختلف، متغیر بوده و این موضوع می‌تواند بر میزان مواد مغذی و آلاینده‌های همراه اثرگذار باشد. از سوی دیگر، اثرات بلندمدت استفاده از پساب بر خاک و تجمع تدریجی عناصر بالقوه خطرناک (مانند فلزات سنگین یا نمک‌ها) هنوز به‌طور کامل در همه اقلیم‌ها و سیستم‌های کشاورزی مشخص نشده است. همچنین تفاوت در استانداردهای تصفیه، روش‌های پایش و سیاست‌های مدیریتی بین کشورها، قابلیت مقایسه مستقیم نتایج را محدود می‌سازد. بنابراین، هرگونه نتیجه‌گیری دربارهٔ مزایا و میزان استفاده از پساب باید با در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها و شرایط محلی انجام شود.

[1] Meng

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی صمیمانه خود را از پژوهشگاه زابل به‌دلیل حمایت‌های ارزشمند ارائه‌شده از این پژوهش ابراز می‌دارند. همچنین از آقای دکتر ساحل پاکزاد توچایی به‌سبب همکاری‌های ارزنده و مساعدت‌های مؤثر ایشان در انجام آنالیزهای آزمایشگاهی صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

باقری اردبیلیان، پری، صادقی، هادی، نبئی، امیر و باقری اردبیلیان، مریم. (۱۳۸۹). ارزیابی کارآیی تصفیه خانهٔ فاضلاب: مطالعه موردی شهر زنجان. *سلامت و بهداشت اردبیل*، ۱(۳)، ۶۷-۷۵. SID. https://sid.ir/paper/226927/fa

رودباری، علی‌اکبر، جاوید، الهبخش و قمی مقصد، نیلوفر. (۱۳۹۶). ارزیابی کیفیت پساب تصفیه خانهٔ فاضلاب اکباتان جهت استفاده مجدد در آبیاری کشاورزی با استفاده از مدل CWQI. *مجلهٔ دانش و تندرستی*، ۱۲(۳)، ۳۴-۲۵.

زارعی محمودآبادی، طاهره، به نژاد، بهروز، پاسدار، پیروز، عمویی، سعید و به نژاد، بکتاش. (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد تصفیه خانهٔ فاضلاب شهر اردکان و امکان‌سنجی استفادهٔ مجدد از پساب خروجی جهت مصارف مختلف. *فصلنامهٔ پژوهش در بهداشت محیط*، ۶(۲)، ۱۴۴-۱۳۴.

عین الهی پیر، فاطمه، غفاری، مصطفی و دهمرده‌بهروز، رضا. (۱۳۹۹). امکان سنجی استفاده از پساب تصفیه خانهٔ فاضلاب شهری در کشاورزی و آبزی پروری با مدل CWQI (مطالعه موردی، شهرستان زابل، استان سیستان و بلوچستان، ایران). *فصلنامهٔ محیط زیست جانوری*، ۱۲(۴)، ۵۸۱-۵۹۲.

فصیحی، حبیب اله، حمیدی، محسن و استاد فرج، سعید. (۱۳۹۶). بررسی وضعیت آلودگی محیط از نظرترکیبات نفتی و فلزات سنگین در باقرشهر تهران. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۶(۱۲)، ۱۲۵-۱۴۰. doi: 10.22111/jneh.2017.3118

قریشی، بهاره، اصلانی، حسن، شاکرخطیبی، محمد، نعمتی منصور، سپیده و مسافری، محمد، (۱۳۹۹). پتانسیل آلودگی و ریسک اکولوژیکی فلزات سنگین در لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری. *مجلهٔ سلامت و محیط ایران*، ۱۳(۱)، ۱۰۲-۸۷. https://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6417-en.html

مهرآوران، بابک، انصاری، حسین، بهشتی، علی اصغر و اسماعیلی، کاظم. (۱۳۹۴). بررسی امکان استفاده از پساب تصفیه شده در آبیاری با توجه به اثرات زیست محیطی آن (مطالعه موردی پساب خروجی تصفیه خانهٔ پرکندآباد مشهد). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۳(۹)، ۴۳۹-۴۴۶. https://idj.iaid.ir/article_55013.html?lang=en

Abdelrahman, H.A., Al-Ajmi, H. (1994). Heavy metals in some water-and wastewater-irrigated soils of Oman. *Communications in soil science and plant analysis*, *25*(5-6), 605-613. doi.org/10.1080/00103629409369066

Alnuwaiser, M.A. (2022). Evaluation of heavy metals in soil wastewater stream. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2022(1): 2522840. doi.org/10.1155/2022/2522840

Akter, S., Jolly, Y.N., Kabir, J., Mamun, K.M., Rahman, M.O., Hasan, M., Khandaker, M.U. (2024). Heavy metal contamination of surface soils by anthropogenic activities: concomitant ecological and health risk assessment. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-21. doi.org/10.1080/03067319.2023.2280180

Asgari, K., Cornelis, W.M. (2015). Heavy metal accumulation in soils and grains, and health risks associated with use of treated municipal wastewater in subsurface drip irrigation. *Environmental monitoring and assessment*, 187(7), 410. https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-015-4565-8

Baghapour, M.A., Nasseri, S., Djahed, B. (2013). Evaluation of Shiraz wastewater treatment plant effluent quality for agricultural irrigation by Canadian Water Quality Index (CWQI). *Iranian journal of environmental health science and engineering*, 10, 1-9. https://link.springer.com/article/10.1186/1735-2746-10-27

Chaoua, S., Boussaa, S., El Gharmali, A., Boumezzough, A. (2019). Impact of irrigation with wastewater on accumulation of heavy metals in soil and crops in the region of Marrakech in Morocco. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(4), 429-436. doi.org/10.1016/j.jssas.2018.02.003

Cherfi, A., Achour, M., Cherfi, M., Otmani, S., Morsli, A. (2015). Health risk assessment of heavy metals through consumption of vegetables irrigated with reclaimed urban wastewater in Algeria. *Process safety and environmental protection*, 98, 245-252. doi.org/10.1016/j.psep.2015.08.004

Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., El Azzi, D. (2023). A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts, and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 349-395. https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-023-09650-7

آماده انتشار (بدون شماره مجلد)

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

Chopra, A.K., Pathak, C. (2015). Accumulation of heavy metals in the vegetables grown in wastewater irrigated areas of Dehradun, India, with reference to human health risk. Environmental monitoring and assessment, 187(7), 445. https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-015-4648-6

Christou, A., Beretsou, V.G., Iakovides, I.C., Karaolia, P., Michael, C., Benmarhnia, T., Fatta-Kassinos, D. (2024). Sustainable wastewater reuse for agriculture. *Nature Reviews Earth and Environment*, 5(7), 504-521.

Dahmouni, M., Hoermann, G., Jouzdan, O., Hachicha, M. (2018). Export of salt and heavy metals in an area irrigated with treated wastewater: a case study from Cebala Borj-Touil (Tunisia). *Desalination and Water Treatment*, 102, 61-70. doi.org/10.5004/dwt.2018.21825

Deblonde, T., Cossu-Leguille, C., Hartemann, P. (2011). Emerging pollutants in wastewater: a review of the literature. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 214(6): 442-448. doi.org/10.1016/j.ijheh.2011.08.002

Deblonde Rudaru, D.G., Lucaciu, I., Fulgheci, A. M. (2022). Correlation between BOD5 and COD–a biodegradability indicator of wastewater. *Romanian Journal of Ecology and Environmental Chemistry*, 4(2), 2022. nmental Chemistry, 4(2), 2022. doi.org/10.21698/rjeec.2022.207

Dikinya, O., Areola, O. (2010). Comparative analysis of heavy metal concentration in secondary treated wastewater irrigated soils cultivated by different crops. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 7(2), 337-346. https://link.springer.com/article/10.1007/BF03326143

Dipti, K.P., Sanjay, D., Pratap, S. R. (2023). Comprehensive assessment of heavy metal contaminations in agricultural soil through Pollution Indices from a rapidly developing city of India. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 27, 8. Doi.org/10.25303/2708rjce1150122

Eaton, A.D., Clesceri, L.S., Greenberg, A.E., Franson, M.A.H. (1995). APHA. AWWA, WEF, Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th edn, Washington, DC, USA.

Farrag, K., Elbastamy, E., Ramadan, A. (2016). Health risk assessment of heavy metals in irrigated agricultural crops, EL-Saff wastewater canal, Egypt. *Clean–Soil, Air, Water*, 44(9), 1174-1183. doi.org/10.1002/clen.201500715

Flores, L., Blas, G., Hernandez, G., Alcala, R. (1997). Distribution and sequential extraction of some heavy metals from soils irrigated with wastewater from Mexico City. *Water, Air, and Soil Pollution*, 98(1), 105-117. https://link.springer.com/article/10.1007/BF02128652

Ganjegunte, G., Ulery, A., Niu, G., Wu, Y. (2018). Organic carbon, nutrient, and salt dynamics in saline soil and switchgrass (Panicum virgatum L.) irrigated with treated municipal wastewater. *Land degradation and development*, 29(1): 80-90. doi.org/10.1002/ldr.2841

Hou, D., Jia, X., Wang, L., McGrath, S.P., Zhu, Y.G., Hu, Q., Nriagu, J. (2025). Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health. *Science*, 388(6744), 316-321.

Jaramillo, M.F., Restrepo, I. (2017). Wastewater reuse in agriculture: A review about its limitations and benefits. *Sustainability*, 9(10), 1734. doi.org/10.3390/su9101734

Kallel, M., Belaid, N., Ayoub, T., Ayadi, A., Ksibi, M. (2012). Effects of treated wastewater irrigation on soil salinity and sodicity at El Hajeb region (Sfax-Tunisia). *Journal of Arid Land Studies*, 22(1), 65-68. https://nodaiweb.university.jp/desert/pdf/JALS-C09_65-68.pdf

Kazemi, A., Esmaeilbeigi, M., Sahebi, Z., Shooshtari, S. J. (2022). Hydrochemical evaluation of groundwater quality and human health risk assessment of trace elements in the largest mining district of South Khorasan, Eastern Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(54), 81804-81829. https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-21494-2

Kahkha, M.R.R., Salarifar, A., Kahkha, B.R. (2022). Measurement of heavy metals in soil, plants, and water samples based on multi-walled carbon nanotube modified with Bis (triethoxysilylpropyl) tetrasulfide by flame atomic absorption spectrophotometry. *Analytical Methods in Environmental Chemistry Journal*, 5(1), 49-60. https://doi.org/10.24200/amecj.v5.i01.167

Khan, M.U., Muhammad, S., Malik, R.N., Khan, S.A., Tariq, M. (2016). Heavy metals' potential health risk assessment through consumption of wastewater irrigated wild plants: A case study. *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*, 22(1), 141-152. doi.org/10.1080/10807039.2015.1056292

Khan, Z.I., Ahmad, K., Iqbal, S., Ashfaq, A., Bashir, H., Mehmood, N., Dogan, Y. (2018). Evaluation of heavy metals uptake by wheat growing in sewage water irrigated soil. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(5), 1409-1420. doi.org/10.1080/10807039.2017.1412821

Khan, M. M., Siddiqi, S. A., Farooque, A. A., Iqbal, Q., Shahid, S. A., Akram, M. T., Khan, I. (2022). Towards sustainable application of wastewater in agriculture: a review on reusability and risk assessment. *Agronomy*, 12(6), 1397.

Kinuthia, G.K., 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 implications. *Scientific Reports*, 10(1), 8434. doi.org/10.1038s41598-020-65359-5

Kükrer, S. (2017). Pollution, source, and ecological risk assessment of trace elements in surface sediments of Lake Aktaş, NE Turkey. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 23(7), 1629-1644. doi.org/10.1080/10807039.2017.1332953

Li, Q., Tang, J., Wang, T., Wu, D., Busso, C.A., Jiao, R., Ren, X. (2017). Impacts of sewage irrigation on soil properties of farmland in China: A review. *Solid Earth Discussions*, 1-24. doi.org/10.5194/se-2017-116

Lumb, A., Halliwell, D., Sharma, T. (2006). Application of CCME Water Quality Index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie River basin, Canada. *Environmental Monitoring and assessment*, 113, 411-429. https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-005-9092-6

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

Maffettone, R., Manoli, K., Drei, P., Cacciatori, C., Bellini, R., Gawlik, B.M. (2024). Water reuse in the European Union: Risk Management approach according to the Regulation (EU) 2020/741. In Water Reuse and Unconventional Water Resources: A Multidisciplinary Perspective (pp. 413-442). *Cham: Springer Nature Switzerland*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67739-7_17

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. doi.org/10.1016/j.agwat.2016.03.013

Monira, U., Sattar, G.S., Mostafa, M.G. (2024). Assessment of surface water quality using the Water Quality Index (WQI) and multivariate statistical analysis (MSA), around tannery industry effluent discharge areas. *H_2Open Journal*, 7(2), 130–148. doi.org/10.2166/h2oj.2024.099

Mushtaq, N., Khan, K.S. (2010). Heavy metal contamination of soils in response to wastewater irrigation in Rawalpindi region. *Pakistan Journal of Agricultural Science*, 47(3), 215-224.

Netzer, Y., Shenker, M., Schwartz, A. (2014). Effects of irrigation using treated wastewater on table grape vineyards: dynamics of sodium accumulation in soil and plant. *Irrigation Science*, 32, 283-294. https://link.springer.com/article/10.1007/s00271-014-0430-8

Ofori, S., Puškáčová, A., Růžičková, I., Wanner, J. (2021). Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. *Science of the Total Environment*, 760, 144026. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026

Rostaminya, M., Jamzadeh, S., Mehrab, N., Mousavi, S.R., Valizadeh-Kakhki, F., Chabok, A. (2023). Assessment of heavy metal accumulation using soil pollution indices in an industrial town, landfill, and wastewater treatment plant of Ilam city, Iran. *Eurasian Soil Science*, 56(10), 1544-1556. https://link.springer.com/article/10.1134/S106422932360029X

Saravanan, A., Kumar, P.S., Duc, P.A., Biochem. Rangasamy, G. (2023). Strategies for microbial bioremediation of environmental pollutants from industrial wastewater: A sustainable approach. *Chemosphere*, 313, 137323. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137323

Saygın, F. (2024). Determination of heavy metal concentrations in cultivated soils and prediction of pollution risk ındices using the ANN approach. Rendiconti Lincei. *Scienze Fisiche e Naturali*, 35, 451–469. https://link.springer.com/article/10.1007/s12210-024-01240-1

Sahu, P., Patel, A.R., Pandey, A., Hait, M., Patra, G.K. (2025). Assessment of heavy metal ion toxicity in wastewater: A comprehensive review. *Inorganica Chimica Acta*, 585, 122751.

Silva, J.A. (2023). Wastewater treatment and reuse for sustainable water resources management: a systematic literature review. *Sustainability*, 15(14), 10940. https://doi.org/10.3390/su151410940

Tamma, A.A., Lejcuś, K., Fiałkiewicz, W., Marczak, D. (2025). Advancing phytoremediation: A review of soil amendments for heavy metal contamination management. *Sustainability*, 17(13), 5688. https://doi.org/10.3390/su17135688

Thanigaivel, S., Vickram, S., Dey, N., Jeyanthi, P., Subbaiya, R., Kim, W., Karmegam, N. (2023). Ecological disturbances and abundance of anthropogenic pollutants in the aquatic ecosystem: Critical review of impact assessment on the aquatic animals. *Chemosphere*, 313, 137475. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137475

Marais, G., Ekama, G.A., Wentzel, M.C. (2017). Application of the activated sludge model to aerated lagoons. *Water SA*, 43(2), 238-257. https://hdl.handle.net/10520/EJC-70c80b483

Nde, S.C., Felicite, O. M., Aruwajoye, G.S., Palamuleni, L.G. (2024). A meta-analysis and experimental survey of heavy metals pollution in agricultural soils. *Journal of Trace Elements and Minerals*, 9, 100180. doi.org/10.1016/j.jtemin.2024.100180

Van Bich, D.T. (2020). Modification of the Canadian Water Quality Index: Case Study Assessment of Groundwater Quality in Mekong Delta, Vietnam. 10.25534/tuprints-00014394

Wojciechowska, E., Nawrot, N., Walkusz-Miotk, J., Matej-Łukowicz, K., Pazdro, K. (2019). Heavy metals in sediments of urban streams: Contamination and health risk assessment of influencing factors. *Sustainability*, 11(3), 563. doi.org/10.3390/su11030563

Waqas, S., Harun, N.Y., Sambudi, N.S., Abioye, K.J., Zeeshan, M.H., Ali, A., Alsaadi, A.S. (2023). Effect of operating parameters on the performance of integrated fixed-film activated sludge for wastewater treatment. *Membranes*, 13(8), 704. doi.org/10.3390/membranes13080704

Yang, S., Feng, W., Wang, S., Chen, L., Zheng, X., Li, X., Zhou, D. (2021). Farmland heavy metals can migrate to deep soil at a regional scale: A case study on a wastewater-irrigated area in China. *Environmental Pollution*, 281, 116977. doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116977

Tzanakakis, V.A., Capodaglio, A.G., Angelakis, A.N. (2023). Insights into global water reuse opportunities. *Sustainability*, 15(17), 13007. https://doi.org/10.3390/su151713007

Zaragüeta, A., Enrique, A., Virto, I., Antón, R., Urmeneta, H., Orcaray, L. (2021). Effect of the long-term application of sewage sludge to a calcareous soil on its total and bioavailable content in trace elements, and their transfer to the crop. *Minerals*, 11(4), 356. doi.org/10.3390/min11040356.