

Investigation of the effect of irrigation with treated municipal wastewater on soil chemical properties, nutrient element concentrations, and soil contamination with heavy metals

Khosro Parvizi^{1*}, Ali Ghadami firoozabadi² and Mohammad Yazdandoost Hamedani³

Extended Abstract

Introduction:

The limited water resources of Hamedan Province and the decline in groundwater levels will lead to the risk of drying up of the wells that supply water as a source of irrigation for the province's important crops, including garlic and potatoes. This issue, in turn, can seriously threaten the sustainability and durability of their cultivation and work in the suburbs of Hamedan. Therefore, the possibility of using treated urban wastewater in a legal and healthy manner, in addition to providing part of the water needs of these products, will help maintain and sustain the cultivation, especially two important crops of garlic and potatoes, in the suburbs of Hamedan. However, wastewater is considered an unconventional source of water, and its use in agriculture requires careful and necessary management in controlling and purifying it to ensure the health of soil, plants and humans while avoiding environmental hazards. Therefore, the present study was conducted to use treated wastewater from Hamedan city to irrigate two crops, garlic and potato, by investigating its effect on soil chemical properties, distribution, and soil contamination with heavy metals such as copper, cadmium, chromium, lead, nickel, and arsenic.

Materials and Methods:

Initially, before planting the crops, samples were taken from the soil, treated wastewater, and water extracted from a well that was used to irrigate the two crops of garlic and potato. In order to enable the practical application of treated wastewater for the irrigation of garlic and potato cultivation, a suitable land parcel was identified, and a farm with convenient access to the treated wastewater supply was chosen. In the next step, soil samples, treated wastewater samples, and water extracted from the well were transferred to the laboratory and various tests were performed on them. Twenty soil samples from the designated cultivation area for both crops, along with twenty samples each of well water and treated wastewater, were collected randomly and in equal quantities. Irrigation was applied by driple tape irrigation system, using 16 mm diameter tubes with dripper spacing of 33 cm and a discharge rate of 1.6 liters per hour, placed on the ridges. The amount of water consumed was measured using calibrated flowmeters. In these tests, the amount of nitrogen and nitrate, EC value, acidity level, exchangeable sodium percentage (SAR_{dj}), saturation index, amount of B⁻, Cl⁻, Na⁺ and So₄²⁻ ions, and levels of heavy metals such as chromium, arsenic, cadmium, copper, nickel, zinc and lead were determined. At the end of the growing season and after harvesting the crops, soil samples were taken from the studied farm and the physical and chemical properties of the soil were also determined. Other chemical properties of the soil, such as salinity levels, pH changes, nitrate nitrogen levels, and heavy metal levels of chromium, cadmium, arsenic, copper, nickel, zinc, and lead, were also measured.

Results and Discussions:

By evaluating the results of the chemical characteristics of well water and treated wastewater, it was determined that well water and treated wastewater were close in terms of electrical conductivity (EC) and pH, and based on the standards proposed by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2004) and the World Health Organization (WHO), there are no restrictions for irrigation and growth of the

1- Associate Professor, Horticulture Crops Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Hamedan, Iran.

2- Associate Professor, Agricultural Engineering Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Hamedan, Iran.

3- Assistant Professor, Seed and Plant Certification and Registration Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Hamedan, Iran.

* Corresponding Author: k.parvizi@areeo.ac.ir

Received: 2026/02/25

Accepted: 2026/04/15

studied crops. The amount of bicarbonate in well water and treated wastewater was found to be 5.25 and 1.75 milliequivalents per liter, respectively. The much lower bicarbonate content of treated wastewater compared with well water is an important advantage, especially in this regard, in the soil of the area in question, which also has a relatively high pH, it has a positive effect on reducing the fixation of cations such as calcium and magnesium, and there is less inhibition of phosphorus absorption in irrigation with treated wastewater water. The amount of sulfate ion in treated wastewater was significantly higher at 3.6 milliequivalents per liter than in well water (average 0.9 milliequivalents per liter). This amount of sulfate is considered an important advantage, especially since it can also be useful in the absorption and transport of elements such as iron, manganese, and zinc by helping to lower the pH of the root environment. The concentrations of calcium and magnesium, as well as the trace elements iron, zinc, and manganese, were significantly lower in well water than in treated wastewater. The high levels of all these elements in treated wastewater also contribute to its value as a source of essential plant nutrients and can be very useful in providing part of the nutritional needs of crops, especially garlic and potatoes. By examining the results of measuring the amount of heavy metals in treated wastewater, it was determined that all five heavy metals that are considered sources of contamination of wastewater are, fortunately, present in very small amounts in the treated wastewater. There was no significant increase in EC, saturated soil reaction, and bicarbonate in the soil in both garlic and potato crops after harvest in the plot where treated wastewater was used. In contrast, the amount of chlorine, sulfate, and copper ions in the soil, in two stages before planting and after harvest, showed a different situation compared with other nutrients, so that after harvest, their amount in the soil increased relatively. The amount of phosphorus, potassium, and nitrogen in the soil, as well as micronutrients, decreased relatively after harvesting of the both crops. The concentration of heavy metal pollutants in the soil in both plots dedicated to garlic and potato cultivation, especially nickel and arsenic, was higher than copper, chromium, and cadmium. However, in terms of pollution and necessary standards, they were lower than the maximum permissible and harmful levels and were of less concern.

Conclusion:

The findings of this experiment collectively demonstrate that the treated wastewater effluent from the Hamadan Province treatment plant is of a satisfactory quality. It meets acceptable standards for EC, sodic salinity, bicarbonate, and chloride. Crucially, levels of heavy metal contaminants, specifically arsenic, nickel, chromium, and cadmium, were below the established maximum limits, indicating no adverse impact on soil pollution or the accumulation of harmful residues. Thus, this treated effluent can serve as a viable alternative water source for irrigating both garlic and potato crops, complementing existing groundwater resources.

Keywords: Soil pollution, Sewage effluent, Soil analysis, Mineral elements

Citation: Parvizi, Kh., Ghadami firoozabadi, A., Yazdandoost Hamedani, M., 2026. Investigation of the effect of irrigation with treated municipal wastewater on soil chemical properties, nutrient element concentrations, and soil contamination with heavy metals .Iranian Water Research Journal, 20(61), pp. 81-94. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14954.2637>

Copyright: © Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY 4.0 (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



بررسی تاثیر آبیاری با پساب شهری بر برخی ویژگی‌های شیمیایی، فلزات سنگین و غلظت عناصر غذایی خاک

خسرو پرویزی^{*}، علی قدمی فیروزآبادی^۲ و محمد یزداندوست همدانی^۳

چکیده

به منظور مقایسه تاثیر استفاده از پساب شهری همدان بر ویژگی‌های شیمیایی، غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین در خاک، آبیاری دو محصول سیر و سیب‌زمینی به صورت قطره‌ای (تیپ) با پساب تصفیه شده و آب چاه انجام شد. نمونه‌گیری از آب چاه و پساب تصفیه شده و همچنین خاک محل آزمایش در هر دو محصول آبیاری شده با پساب قبل از کاشت و پس از برداشت محصولات به منظور تجزیه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی انجام شد. داده‌های حاصل از تجزیه آزمایشگاهی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آب چاه، پساب تصفیه شده و خاک محل آزمایش قبل از کاشت و پس از برداشت محصولات به صورت دو جانبه با آزمون t انجام و تجزیه و تحلیل شد. نتایج آزمایش مشخص کرد که تفاوت محسوس و معنی‌داری در ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد بررسی از نظر EC، واکنش گل‌اشباع، مجموع آنیون‌ها، ظرفیت تبادل کاتیونی و درصد مواد خنثی شونده در قطعات خاک کشت شده از هر دو محصول قبل از کاشت و پس از برداشت محصولات ایجاد نشد. نتایج اندازه‌گیری میزان فسفر، پتاسیم و نیتروژن خاک و همچنین عناصر کم مصرف روی، آهن و منگنز خاک پس از برداشت محصولات مشخص کرد که غالباً میزان آنها در نمونه‌های خاک پس از برداشت در هر دو قطعه از محصولات کاشته شده سیر و سیب‌زمینی کاهش یافته است. مقدار یون‌های کلر، سولفات، کلسیم و مس در خاک پس از برداشت محصولات نسبت به سایر عناصر غذایی افزایش پیدا کرد، هر چند میزان افزایش در قطعه اختصاص داده شده به کشت سیر بیشتر بود. غلظت فلزات سنگین خاک در هر دو قطعه اختصاص یافته به کشت سیر و سیب‌زمینی و به‌ویژه نیکل و آرسنیک به ترتیب به میزان ۴۸/۲۴ و ۲۳/۰۸ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بیشتر از عناصر مس، کروم و کادمیوم (با متوسط ۱/۷۱، ۰/۵۰ و صفر میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) بود. هرچند از لحاظ آلاینده‌گی و استانداردهای لازم، همگی پائین‌تر از میزان بیشینه حد مجاز و زبان‌بار بودند. همچنین مقدار آنها در خاک پس از برداشت محصولات تغییرات معنی‌داری ایجاد نشد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، پساب فاضلاب، تجزیه خاک، عناصر معدنی

ارجاع: پرویزی، خ، قدمی فیروزآبادی، ع، یزداندوست همدانی، م، ۱۴۰۵. بررسی تاثیر آبیاری با پساب شهری بر برخی ویژگی‌های شیمیایی، فلزات سنگین و غلظت عناصر غذایی خاک. مجله پژوهش آب ایران، ۲۰(۶۱)، صص. ۸۱-۹۴. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14954.2637>

۱- دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات گیاهان زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران.
۲- دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران.
۳- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران.

* نویسنده مسئول: k.parvizi@areeo.ac.ir

مقدمه

در صورت استفاده از پساب‌های تصفیه شده فاضلاب برای آبیاری در بخش کشاورزی از مقدار استخراج آب از منابع طبیعی و فشار بر منابع آبهای زیرزمینی کاسته می‌شود. ضمن این‌که با تصفیه فاضلاب از تخلیه پساب خام به محیط زیست و آلودگی‌های زیست محیطی نیز جلوگیری می‌شود (Pedrero et al., 2011). تصفیه فاضلاب خام در نهایت منجر به تولید پساب می‌شود. اگر پساب تولید شده استانداردهای مورد نظر از لحاظ سطح آلودگی را کسب کند، می‌تواند جایگزین مناسبی برای آب آبیاری محصولات مختلف باشد (Taghvaeen et al., 2007).

برای استفاده مجدد از پساب در کشاورزی و در راستای حفظ سلامت عمومی و بهداشت جامعه در کشورهای مختلف جهان استانداردهای مختلفی به تصویب رسیده است تا استفاده از آنها حداقل تأثیر منفی را بر خاک، گیاه و انسان داشته باشد (Anonymous, 1989). علاوه بر رعایت استانداردهای تدوین شده در زمینه کاربرد پساب تصفیه شده، لازم است با توجه به درجه تصفیه آن، نوع سیستم آبیاری و احتمالاً میزان آلودگی، اثرات پساب بر محیط زیست، خاک، آب زیرزمینی و محصول نیز به طور مرتب ارزیابی و بررسی شود (Yargholi and Taran, 2024). غلظت بالای فلزات سنگین در پساب (به‌ویژه پساب‌های صنعتی) می‌تواند در خاک تجمع نموده و باعث کاهش محصول شده و یا موجب افزایش غلظت فلزات سنگین در گیاهان شود که در نهایت سلامت انسان را با خطر مواجه می‌نماید (Behbahani-Nia and Sadeghian, 2010).

Lauver (2000) در تحقیق خود بیان جرمی نیتروژن را در منطقه آریزونا بررسی و مقدار آن را در نتیجه استفاده از فاضلاب تصفیه نشده بالاتر از حد استاندارد گزارش کرده است. Oron et al. (1992) در فلسطین اشغالی با بکارگرفتن پساب فاضلاب در دو سیستم آبیاری بارانی و قطره‌ای نتیجه گرفتند که میزان آلودگی نیترات در خاک و گیاه با استفاده از آبیاری قطره‌ای کمتر از آبیاری بارانی می‌باشد. همچنین Oron et al. (1992) در پژوهش دیگری نشان دادند که در صورت استفاده از پساب فاضلاب با آبیاری زیر سطحی نسبت به آبیاری سطحی میزان آلودگی بیولوژیک در سطوح فوقانی خاک کاهش یافته و بنابراین خطرات آلودگی کارگران در سطح مزرعه به شدت کاهش می‌یابد.

Albaji and Asgari (2017) امکان کاربرد پساب تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب شهرکرد را برای کشاورزی و تعیین میزان محدودیت کاربرد پساب در سیستم آبیاری قطره‌ای بررسی کردند. بر اساس نتایج کنترل کیفی پساب مشخص شد که مقدار متوسط غلظت بی‌کربنات پساب تصفیه شده در دوره مورد بررسی دارای ۱۶۴/۴ میلی‌اکی‌والان بر لیتر می‌باشد که برای رشد گیاهان در محدودیت کم تا متوسط تلقی می‌گردد. لذا پساب تصفیه خانه فاضلاب شهری شهرکرد را می‌توان برای آبیاری گیاهان علوفه‌ای و صنعتی مقاوم به غلظت‌های بالای بی‌کربنات استفاده کرد.

Boush et al. (2021) با استفاده از پنج نوع منبع آب (فاضلاب خام، فاضلاب تصفیه شده، مخلوط ۵۰٪ آب شهری و ۵۰٪ فاضلاب خام، مخلوط ۵۰٪ آب شهری و ۵۰٪ فاضلاب تصفیه شده) به عنوان عامل اصلی و سه سطح آبیاری (۴۰٪، ۷۰٪ و ۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه) به عنوان عامل فرعی به بررسی صفات بیوشیمیایی و مورفولوژی گیاه گوجه‌فرنگی در گلخانه پرداختند. نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که اثر کم‌آبیاری بر برخی صفات مورفولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه گوجه‌فرنگی تفاوت معنی‌دار داشته است. اثرات متقابل سطوح آبیاری و کیفیت مورد استفاده معنی‌دار شد. اغلب صفات رشد با کاهش سطح آبیاری در استفاده از مخلوط آبی در مقایسه با آب شهری وضعیت بهتری نشان دادند.

پساب‌های تصفیه شده از فاضلاب علاوه بر اینکه ممکن است حاوی برخی فلزات سنگین خطرناک از قبیل سرب، کادمیوم، کبالت و آرسنیک باشند، معمولاً حاوی مقدار قابل توجهی از عناصر غذایی مطلوب از قبیل نیتروژن، پتاسیم، فسفر، سولفور، منیزیم، کلسیم، آهن، روی و بر نیز می‌باشند. لذا استفاده از آنها ضمن اینکه با افزایش حاصلخیزی خاک می‌تواند به رشد و نمو محصولات کمک کرده و به افزایش عملکرد منجر شود، ممکن است سلامت خاک و گیاه را نیز تهدید نماید (Gatta et al., 2018).

در بررسی تأثیر استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده شهری کرمان در افزایش بهره‌وری آب گیاه پنبه در شرایط کم آبیاری مشخص شد که استفاده از پساب تصفیه شده ضمن بهبود صفات مورفولوژیک آن، عملکرد و بهره‌وری آب را نیز به میزان ۹ درصد نسبت به استفاده از آب چاه افزایش می‌دهد (Karimi-Googhari and Asadi, 2014). در سال‌های اخیر، به دلیل بحران آب و کمبود منابع آبی استفاده از پساب‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. چنانچه این پساب‌ها تصفیه شده و از استانداردهای لازم در کاهش

حد قابل قبول برای شبکه فاضلاب شهری تصفیه می‌نمایند. تصفیه‌خانه فاضلاب همدان در دو بخش مایع و لجن با استفاده از فرایند تغذیه مرحله‌ای و هاضم‌های بی‌هوازی برای تثبیت لجن در ۴ مدول طراحی شده و در مرحله بهره‌برداری قرار دارد. به منظور عملیاتی نمودن استفاده از فاضلاب تصفیه شده در آبیاری دو محصول سیر و سیب زمینی اقدام به جانمایی زمین و انتخاب زارعی نمودیم که دسترسی آسان‌تری به آب (فاضلاب تصفیه شده) داشته باشد. در ابتدا و قبل از کاشت محصولات از خاک مورد نظر، فاضلاب تصفیه شده و آب استحصال از چاهی که اختصاص به آبیاری دو محصول سیر و سیب‌زمینی داشت، نمونه‌گیری شد. تعداد ۲۰ نمونه از خاک اختصاص یافته به کشت دو محصول و ۲۰ نمونه از آب چاه و پساب به صورت تصادفی تهیه شد. در مرحله بعد نمونه‌های خاک، نمونه‌های فاضلاب تصفیه شده و آب استحصال از چاه به آزمایشگاه منتقل و آزمایش‌های لازم به منظور تعیین میزان نیترات، EC، اسیدیته، نسبت جذبی سدیم اصلاح شده (SARadj)، میزان یون‌های Cl، Na و SO_4^{2-} و سطوح فلزات سنگین از قبیل کروم، آرسنیک، کادمیم، مس، نیکل، روی و سرب انجام شد. در انتهای فصل زراعی و پس از برداشت محصولات نیز از خاک مزرعه مورد مطالعه نمونه‌گیری به عمل آمده و همانند مرحله قبل تعداد ۲۰ نمونه به طور تصادفی از هر یک از خاک‌های کشت شده دو محصول سیر و سیب‌زمینی تهیه و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بررسی شد. ویژگی‌های فیزیکی شامل بافت به روش هیدرومتری، توزیع اندازه ذرات ثانویه با استفاده از شیکر الک و سری الک در دو حالت تر و خشک و رطوبت اشباع با استفاده از آون اندازه‌گیری شد (Page et al., 1992). ویژگی‌های شیمیایی خاک که مورد اندازه‌گیری قرار گرفت شامل سطح شوری، تغییرات pH، میزان نیتروژن نیتراته و میزان فلزات سنگین کروم، کادمیم، آرسنیک، مس، نیکل، روی و سرب بود (Vice-Presidency for Strategic Planning and Supervision., 2010).

آبیاری به صورت قطره‌ای نواری با لوله‌های ۱۶ میلی‌متری با فاصله قطره‌چکان‌های ۳۳ سانتی‌متر و دبی ۱/۶ لیتر بر ساعت در فشار ۱/۲ بار روی پشته‌ها قرار انجام شد. مقدار آب مصرفی نیز توسط کنتورهای کالیبره شده اندازه‌گیری شد. برای محاسبه نیاز آبیاری، ابتدا با استفاده از رابطه پنمن مانیتیت اصلاح شده، تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET₀) محاسبه و سپس با در نظر گرفتن ضریب گیاهی در مراحل

آلودگی برخوردار باشند، اهمیت بیشتری پیدا کرده و می‌توانند جایگزین مناسبی برای تأمین بخش قابل توجهی از نیاز آبی محصولات زراعی و به‌ویژه سبزی و صیفی باشند. مصرف آب در بخش کشاورزی در مقایسه با صنعت و مصارف خانگی درصد قابل توجهی (حدود ۸۳ درصد) را به خود اختصاص داده است. این در شرایطی است که در بسیاری از نقاط کشور کمبود آب و تشدید آن در اثر خشکسالی‌های اخیر به وضعیت حاد و بحرانی رسیده است؛ به‌گونه‌ای که برنامه‌ریزان و مدیران منابع آب کشور را مجبور ساخته تا در برنامه‌ریزی‌های استفاده از منابع آبی به‌ویژه در بخش کشاورزی به کلیه منابع متعارف و غیرمتعارف (پساب‌های شهری و خانگی) که می‌توانند به صورت اقتصادی در دسترس قرار گیرند، توجه نمایند (Mohammadzadeh, 2006; Jamali et al., 2008). محدودیت منابع آبی استان همدان و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، خطر خشک شدن چاه‌های تأمین کننده آب آبیاری محصولات مهم استان و از جمله سیر و سیب‌زمینی را در پی خواهد داشت. این مسئله به نوبه خود می‌تواند پایداری و دوام کاشت آن‌ها را در حومه شهر همدان با تهدید جدی مواجه نماید. لذا امکان استفاده قانون‌مند و صحیح از پساب تصفیه‌شده فاضلاب شهری علاوه بر تأمین بخشی از نیاز آبی این محصولات، به حفظ و پایداری کشت دو محصول مهم سیر و سیب‌زمینی در حومه شهر همدان کمک کرده و می‌تواند نقش قابل توجهی در اقتصاد زارعین منطقه داشته باشد. از طرفی پساب‌ها جز منابع غیرمتعارف آب محسوب می‌شوند که کاربرد آن‌ها در کشاورزی نیازمند دقت و مدیریت لازم در کنترل و تصفیه استاندارد آن‌ها می‌باشد که ضمن بهره‌گیری مطلوب از آنها، با پرهیز از مخاطرات زیست محیطی، سلامت خاک، گیاه و انسان را نیز تضمین نمایند (Yargholi and Taran, 2024). لذا مطالعه حاضر به منظور استفاده از فاضلاب تصفیه شده شهرستان همدان در آبیاری دو محصول سیر و سیب‌زمینی و بررسی تأثیر آن بر توزیع عناصر غذایی، خصوصیات شیمیایی و آلودگی خاک به فلزات سنگین از قبیل مس، کادمیم، کروم، سرب، نیکل و آرسنیک اجرا شد.

مواد و روش‌ها

فاضلاب شهر همدان مجموعه‌ای از فاضلاب خانگی، صنعتی و بیمارستانی می‌باشد. فرض بر این است که واحدهای صنعتی و بیمارستان‌ها بر اساس مشخصات فاضلاب تولیدی دارای تصفیه‌خانه‌های جداگانه‌ای هستند و فاضلاب را تا

مختلف رشد و راندمان آبیاری، نیاز آبیاری با استفاده از روابط زیر محاسبه شد (ASCE-EWRE, 2005).

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (۱)$$

$$D_i = \left(\frac{ET_c - P_e}{E_i} \right) \quad (۲)$$

در روابط فوق ET_c تبخیر و تعرق گیاه (میلی‌متر)، K_c ضریب گیاهی، ET_0 تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر)، D_i میزان نیاز آبیاری (میلی‌متر)، E_i راندمان آبیاری و P_e میزان بارندگی موثر (میلی‌متر) است.

داده‌های حاصل از اندازه‌گیری صفات مد نظر از آب چاه و پساب تصفیه شده و نیز خاک محل آزمایش قبل و پس از کاشت محصولات با نرم‌افزار SAS و با آزمون مقایسه میانگین t به صورت دو جانبه تجزیه و تحلیل شد.

نتایج و بحث

الف - ویژگی‌های شیمیایی پساب تصفیه شده و آب چاه

بر اساس جدول ۱ و با ارزیابی نتایج حاصل از ویژگی‌های شیمیایی آب چاه و فاضلاب تصفیه شده مشخص شد که آب چاه و پساب از نظر میزان هدایت الکتریکی (EC) و pH به هم نزدیک بوده و تفاوت معنی‌داری با همدیگر ندارند. بر اساس استانداردهای پیشنهادی سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 2004) و نیز سازمان بهداشت جهانی (WHO) محدودیتی برای آبیاری و رشد محصولات مورد مطالعه ندارند. میزان هدایت الکتریکی و pH آب تصفیه شده در میانگین نمونه‌های آزمایش با انحراف نسبتاً کمی بیشتر از آب چاه بود. هدایت الکتریکی آب چاه و فاضلاب تصفیه شده به ترتیب ۱/۱۰ و ۱/۳۵ دسی‌زیمنس بر متر (dS/m) به دست آمد که عملاً مانعی در بروز تنش شوری و مسمومیت هر دو محصول سیب زمینی و سیر ایجاد نمی‌کند. در مورد سیب‌زمینی و سیر آستانه شوری مجاز به ترتیب ۱/۵ و ۲ دسی‌زیمنس بر متر (dS/m) است (Sadegi et al., 2014). بنابراین میزان شوری فاضلاب تصفیه شده در آستانه مجاز قرار گرفته و آبیاری با آن برای رسیدن به حداکثر پتانسیل عملکرد در دو محصول سیر و سیب زمینی محدودیتی ایجاد نخواهد کرد.

مقدار بی‌کربنات موجود در آب چاه به میزان قابل توجهی بیشتر از مقدار آن در پساب بود. به گونه‌ای که به ترتیب با میانگین ۵/۲۵ و ۱/۷۵ میلی‌اکی والان در لیتر از نظر آماری نیز تفاوت معنی‌دار در سطح ۱ درصد از همدیگر

نشان دادند. دامنه تغییرات در هر دو نوع آب نیز بسیار پائین بود. بالا بودن مقدار بی‌کربنات بیشتر از ۳ میلی‌اکی والان در لیتر در آب آبیاری قابلیت آن را برای آبیاری در اغلب محصولات کاهش می‌دهد (Albaji and Asgari, 2017).

میزان بسیار کمتر بی‌کربنات فاضلاب تصفیه شده در مقایسه با آب چاه، یک مزیت مهم به شمار می‌آید؛ به‌ویژه از این لحاظ که در خاک منطقه مورد نظر (که pH نسبتاً بالایی نیز دارد)، تأثیر مثبتی در کاهش تثبیت کاتیون‌هایی مثل کلسیم و منیزیم داشته و ممانعت کمتری برای جذب فسفر در آبیاری با آب فاضلاب تصفیه شده ایجاد می‌کند. ضمن اینکه بی‌کربنات بالا عملاً در رسوب‌گذاری لوله‌ها و اتصالات انتقال آب و قطره‌چکان‌های آبیاری قطره‌ای نیز مشکل ایجاد می‌کند. لذا میزان پائین بی‌کربنات در فاضلاب تصفیه شده نسبت به آب چاه یک مزیت به حساب می‌آید که نیاز به سیستم فیلتراسیون قوی نیز نخواهد داشت. محصولات سبزی و صیفی حساسیت بسیار بالاتری به میزان بی‌کربنات آب آبیاری نسبت به گیاهان علوفه‌ای و صنعتی دارند. لذا با توجه به الگوی کشت تعریف شده در منطقه و نظر به پائین بودن میزان بی‌کربنات پساب تصفیه شده، امکان بهره‌برداری از آن برای کشت سبزیجات برگی، غده‌ای و همچنین سایر سبزیجات میوه‌ای از قبیل خیار، گوجه‌فرنگی و فلفل نیز وجود دارد.

با مقایسه میزان سولفات در آب چاه و فاضلاب تصفیه شده مشخص شد که مقدار یون سولفات در پساب تصفیه شده (۳/۶ میلی‌اکی والان در لیتر) به میزان قابل توجهی بیشتر از مقدار آن در آب چاه (متوسط ۰/۹ میلی‌اکی والان در لیتر) است. این میزان سولفات در عین حال که از مقدار استاندارد و حد مجاز سولفات در فاضلاب تصفیه شده کمتر می‌باشد، یک مزیت مهم محسوب می‌شود. با رفتن غلظت یون‌های سولفات در محلول خاک و مخصوصاً در pH قلیایی اگرچه جذب سولفور به صورت خطی افزایش پیدا نمی‌کند، اما می‌تواند با پائین آوردن pH محیط ریشه، در جذب و انتقال عناصری مثل آهن، منگنز و روی مفید باشد (Sokolova, 2008 and Chaudhary et al., 2023).

همچنین، عنصر گوگرد یک عنصر با خاصیت ضدباکتریایی است که می‌تواند در کنترل بیماری‌های مهم سیب‌زمینی مانند اسکب سیب‌زمینی مفید باشد (Bagheri, 2022). علاوه بر این، گوگرد به عنوان یک عامل مهم در دریافت

سیب‌زمینی می‌تواند بسیار مفید باشد. به عبارت دیگر از نظر تامین عناصر غذایی کم مصرف که امروزه از طریق برنامه کودی و تزریق در سیستم آبیاری بکار گرفته می‌شوند اثربخشی قابل توجهی در رشد و نمو گیاهان و افزایش عملکرد آنها دارند.

میزان مس در فاضلاب تصفیه‌شده نسبت به آب چاه تا حدودی بیشتر بود ($p \leq 0.05$). مقدار مس در آب چاه و فاضلاب تصفیه شده به ترتیب 0.01 و 0.075 میلی گرم در لیتر به دست آمد که مقدار آن بر اساس استانداردهای معرفی شده پائین‌تر از حد نرمال بود و مشکلی از نظر سلامتی انسان، موجودات زنده و گیاه ایجاد نمی‌کند. عنصر مس اگرچه جزو فلزات سنگین می‌باشد، اما از نظر غذایی و فعالیت متابولیسمی گیاه به‌ویژه به‌عنوان کوآنزیم در فعال‌سازی آنزیم‌های تیروسیناز و آسکوربیک اکسیداز و پراکسیداز نقش حیاتی داشته و در حد کم مورد نیاز گیاه می‌باشد و میزان آن در گیاهان مختلف بر حسب نیاز و شرایط رشدی گیاه و نوع محصول تولیدی از ۲ تا ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم متغیر می‌باشد (Fouad et al., 2014). ضمن اینکه عنصر مس یک ماده ضد باکتری است که می‌تواند در تامین سلامت و ممانعت از بروز برخی بیماری‌های گیاهی از قبیل شانکر باکتریایی و بیماری اسکب باکتریایی در سیب‌زمینی مفید باشد (Parvizi and Bagheri, 2025). همچنین مس به عنوان سیگنال مهمی در دریافت اثرات تنش و به‌ویژه تنش حرارتی و خشکی نیز عمل کرده و با افزایش فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز و نیز پراکسیداز با مهار آنزیمی گونه‌های اکسیژن فعال قادر است هیدروژن پراکسید تولید شده در کلروپلاست را تحت تنش اکسیداتیو ناشی از کمبود آب و تنش حرارتی از بین برده و بدین صورت در ایجاد مقاومت به تنش حرارتی و خشکی موثر باشد (Miller et al., 2010).

سیگنال مقاومت به سرما نیز عمل کرده و تا حدودی در ایجاد مقاومت به تنش سرمایی نیز موثر می‌باشد.

مطابق جدول ۱ تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد در میزان غلظت کلر اندازه‌گیری شده در پساب تصفیه شده و آب چاه وجود داشت. مقدار کلر پساب به صورت نسبی با اختلاف $1/62$ میلی اکسی والان در لیتر بیشتر از مقدار آن در آب چاه (متوسط $3/63$ میلی اکسی والان در لیتر) بود، اما از میزان حد مجاز آن در پساب تصفیه شده به مراتب کمتر بود. مقدار حد مجاز یون کلر در فاضلاب تصفیه شده 15 میلی اکسی والان در لیتر می‌باشد (Ayers and Westcot, 1985).

در حالت کلی غلظت آنیون‌ها در هر دو منبع آبی به هم نزدیک بوده و اختلاف معنی‌داری با هم نشان ندادند. متوسط مجموع غلظت آنیون‌ها در دو منبع آب آبیاری با چاه و فاضلاب تصفیه شده به ترتیب $13/96$ و $14/15$ میلی اکسی والان در لیتر حاصل گردید (جدول ۱).

میزان سدیم و نسبت جذبی سدیم (SARadj) در آب چاه و فاضلاب تصفیه شده به ترتیب $2/76$ ، $1/16$ و $5/75$ و $2/81$ میلی اکسی والان در لیتر بود که در مقام مقایسه و به طور نسبی مقدار هر دو در فاضلاب تصفیه شده نسبت به آب چاه بالاتر بود و از نظر آماری نیز تفاوت معنی‌داری با همدیگر نشان دادند. این مقدار سدیم در فاضلاب تصفیه شده در حد بسیار پائین‌تری از آستانه قابل قبول آن در استاندارد ارائه شده سازمان خوارو بار و کشاورزی ملل متحد (FAO) قرار دارد. حد مجاز تعیین شده سدیم در فاضلاب تصفیه شده طبق دستورالعمل ارائه شده توسط FAO، 9 میلی اکسی والان در لیتر است (FAO, 2004).

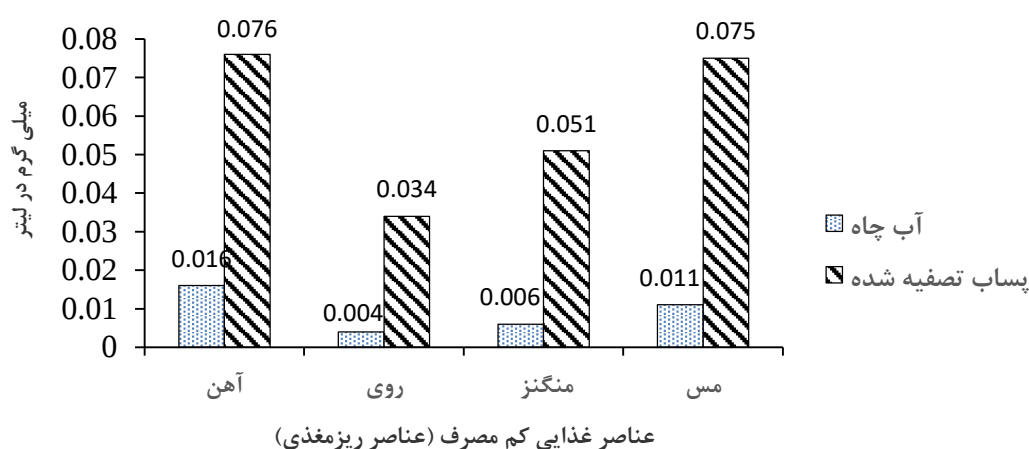
بر اساس استانداردهای سازمان خوارو بار و کشاورزی ملل متحد در شرایطی که EC آب آبیاری یا عصاره اشباع خاک بیش از $2/9$ دسی‌زیمنس بر متر (ds/m) و نسبت جذبی سدیم (SARadj) در آب آبیاری یا آب خاک در محدوده $20-$ $12/1$ باشد، احتمال تخریب ساختمان خاک و بروز مشکل در نفوذپذیری خاک وجود ندارد (FAO, 2004).

غلظت عناصر کلسیم و منیزیم و همچنین عناصر کم مصرف آهن، روی و منگنز در آب چاه نسبت به فاضلاب تصفیه شده به میزان قابل توجهی کمتر بود و در مقام مقایسه و از نظر آماری نیز دو منبع آب تفاوت معنی‌داری ($p \leq 0.01$) با همدیگر داشتند (جداول ۱ و شکل ۱). بالا بودن همه این عناصر در پساب تصفیه شده به ارزش آن به عنوان منبع عناصر غذایی ضروری گیاه کمک کرده و از نظر تامین بخشی از نیاز تغذیه‌ای محصولات زراعی و به‌ویژه دو محصول سیر و

جدول ۱- مقایسه میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده پس‌آب تصفیه شده شهری و آب چاه با آزمون t دوجانبه

پارامتر	میانگین $\pm$ انحراف معیار	پس‌آب تصفیه شده شهری میانگین $\pm$ انحراف معیار	مقدار t	آستانه مجاز تعیین شده (سازمان بهداشت جهانی، WHO)
هدایت الکتریکی EC (dS/m)	۱/۱۰ $\pm$ ۰/۰۸	۱/۳۵ $\pm$ ۰/۰۴	۲/۲۶ ns	۱/۷
pH	۷/۱۴ $\pm$ ۰/۰۵	۷/۵۶ $\pm$ ۰/۱۲	۲/۳۶ ns	۶/۸-۸/۵
کربنات CO_3^{2-} (میلی اکی والان در لیتر)	.	.	.	-
بی‌کربنات HCO_3^- (میلی اکی والان در لیتر)	۵/۲۵ $\pm$ ۰/۰۹	۱/۷۵ $\pm$ ۰/۱۵	۱۴/۵۶ **	۸-۸/۵
سولفات SO_4^{2-} (میلی اکی والان در لیتر)	۰/۹ $\pm$ ۰/۰۳	۳/۶ $\pm$ ۰/۱۲	۲۰/۵۰ **	۴/۵-۵
کلر CL^- (میلی اکی والان در لیتر)	۳/۶۳ $\pm$ ۰/۱۵	۵/۲۵ $\pm$ ۰/۰۴	۴/۲۳ *	۱۴-۱۵
مجموع آنیون‌ها (میلی اکی والان در لیتر)	۱۳/۹۶ $\pm$ ۰/۱۴	۱۴/۱۵ $\pm$ ۰/۲۸	۲/۲۸ ns	-
کلسیم Ca^{2+} (میلی اکی والان در لیتر)	۳/۴۰ $\pm$ ۰/۰۸	۵/۰۰ $\pm$ ۰/۴۲	۹/۰۱ **	-
منیزیم Mg^{2+} (میلی اکی والان در لیتر)	۲/۰۰ $\pm$ ۰/۰۷	۵/۴۰ $\pm$ ۰/۵۶	۷/۵۷ **	۱۲-۱۲/۵
سدیم Na^+ (میلی اکی والان در لیتر)	۲/۷۶ $\pm$ ۰/۱۶	۵/۷۵ $\pm$ ۰/۱۸	۵/۱۳ **	۸/۵-۹
نسبت جذبی سدیم SARadj	۱/۱۶ $\pm$ ۰/۰۴	۲/۸۱ $\pm$ ۰/۱۴	۳/۵۷ *	متناسب با میزان شوری
مجموع کاتیون‌ها (میلی اکی والان در لیتر)	۱۱/۱۵ $\pm$ ۰/۰۸	۱۳/۹۶ $\pm$ ۰/۱۷	۵/۶۷ **	-

ns، * و ** به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار، وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد بین دو میانگین می‌باشد.



شکل ۱- مقایسه میانگین غلظت عناصر غذایی ریز مغذی اندازه‌گیری شده پس‌آب تصفیه شده شهری و آب چاه

با مقایسه میانگین غلظت نیترات پساب و آب چاه مشخص شد که تفاوت‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار بوده است. میزان نیترات آب چاه با متوسط ۳/۷۵ میلی گرم در لیتر در مقایسه با مقدار آن در فاضلاب تصفیه شده با مقدار ۶/۵۵ میلی گرم در لیتر کمتر بود (جدول ۲). مقدار قابل قبول نیتروژن نیتراتی در پساب تصفیه شده حاصل از فاضلاب شهری طبق استانداردهای سازمان جهانی بهداشت و سازمان خوارو بار و کشاورزی ملل متحد ۳۰ میلی گرم در لیتر است (FAO, 2020). مقدار اندازه‌گیری شده نیترات در پساب از مقدار مجاز آن به مراتب کمتر بوده است. این مسئله اگرچه هیچ مخاطره‌ای در آلودگی آب و خاک ایجاد نمی‌کند، اما می‌تواند به عنوان یک منبع غذایی مهم در تامین بخش قابل توجهی از نیتروژن مورد نیاز محصولات زراعی مفید باشد.

تفاوت میزان غلظت فلزات سنگین پساب و آب چاه از نظر آماری در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). با بررسی

مقایسه میانگین‌های حاصل از اندازه‌گیری میزان فلزات سنگین در آب چاه و پساب تصفیه شده (جدول ۲) مشخص شد که اگرچه میزان آنها در پساب بیشتر بوده است، اما هر پنج فلز سنگین که به عنوان منبع آلوده کننده فاضلاب در نظر گرفته می‌شوند، خوشبختانه به مقدار بسیار ناچیزی در پساب تصفیه شده وجود دارند. مقدار آنها پائین‌تر از آستانه آلودگی بوده و از میزان مجاز اعلام شده توسط سازمان جهانی بهداشت به میزان قابل توجهی کمتر است (WHO, 2006). لذا هیچ نگرانی در مورد استفاده از پساب تصفیه شده این تصفیه‌خانه در مصارف کشاورزی از نظر فلزات سنگین وجود ندارد. از میان پنج فلز سنگین اندازه‌گیری شده، دو فلز سرب و کادمیوم در آب چاه وجود نداشته و مقدار ناچیزی از سه فلز سنگین دیگر (نیکل، آرسنیک و کروم) در آب چاه بدست آمد.

جدول ۲- مقایسه میانگین میزان فلزات سنگین آلاینده و نیترات پساب تصفیه شده شهری و آب چاه (میلی گرم بر لیتر) با آزمون t دو جانبه

عنصر غذایی	میانگین $\pm$ انحراف معیار	پساب تصفیه شده	میانگین $\pm$ انحراف معیار	مقدار t	آستانه مجاز تعیین شده (سازمان جهانی بهداشت، WHO)
آرسنیک (As)	۰/۰۰۵ $\pm$ ۰/۰۰۰۹	۰/۰۸۵ $\pm$ ۰/۰۱۷	۸/۳۹ **	۰/۰۱ >	
سرب قابل جذب (Pb)	۰	۰/۰۶۸ $\pm$ ۰/۰۱۴	۹/۱۶ **	۰/۱ >	
نیکل (Ni)	۰/۰۰۶ $\pm$ ۰/۰۰۰۵	۰/۰۵۲ $\pm$ ۰/۰۰۴۷	۷/۳۲ **	۰/۲ >	
کادمیوم قابل جذب (Cd)	۰	۰/۰۰۴ $\pm$ ۰/۰۰۰۸	۸/۴۸ **	۰/۰۵ >	
کروم قابل جذب (Cd)	۰/۰۰۲ $\pm$ ۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۵ $\pm$ ۰/۰۰۰۵	۷/۱۹ **	۰/۰۲ - ۰/۰۵	
نیترات (NO ₃)	۳/۷۵ $\pm$ ۰/۱۷	۶/۵۵ $\pm$ ۰/۵۸	۶/۴۰ *	۱۰ >	

ns، * و ** به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار، وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد بین دو میانگین می‌باشد.

ب- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک محل اجرای آزمایش بافت خاک مورد مطالعه که برای کشت محصولات استفاده شد، با توجه به ترکیب ۴۶ درصد شن، ۳۸ درصد سیلت و ۱۶ درصد رس در گروه بافت لوم با ساختمان نسبتاً مناسب قرار دارد.

ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد بررسی از نظر EC و واکنش گل اشباع نشان داد که دو قطعه مورد نظر برای کشت دو محصول سیر و سیب‌زمینی از ناهمگنی نسبتاً بالایی برخوردارند، اما در مجموع خاک از نظر شوری،

نتایج اندازه‌گیری میزان فسفر، پتاسیم، نیتروژن خاک و همچنین عناصر کم مصرف قبل از کاشت و پس از برداشت محصولات مشخص کرد که غالباً میزان آنها در نمونه‌گیری پس از برداشت کاهش پیدا کرده است. البته میزان آن محصول سیب‌زمینی به مراتب بالاتر از محصول سیر بوده است (جداول ۴ و ۵).

اندازه‌گیری مقدار یون‌های کلسیم و مس در خاک و در دو مرحله قبل از کاشت و پس از برداشت محصول نسبت به سایر عناصر غذایی وضعیت متفاوت‌تری را نشان داد. به گونه‌ای که پس از برداشت محصول مقدار آنها در خاک نسبتاً افزایش پیدا کرد. هر چند میزان افزایش در قطعه اختصاص داده شده به کشت سیر بیشتر بود (جداول ۳ و ۴). این تفاوت در برداشت عناصر از خاک، علاوه بر اندوخته بیشتر آنها در محلول خاک، می‌تواند ناشی از فراهمی بیشتر این عناصر در پساب تصفیه شده نسبت به سایر عناصر باشد. این موضوع عملاً مقدار زیادی از تخلیه عناصر توسط محصولات را جبران می‌کند.

محدودیتی برای هیچ یک از دو محصول سیر و سیب‌زمینی نداشت (جدول ۳). از نظر میزان EC خاک، هر دو محصول آبیاری شده با آب چاه و فاضلاب تصفیه‌شده وضعیت بسیار نزدیکی به همدیگر داشته و داده‌های حاصل تفاوت مشهود و معنی‌داری با همدیگر نشان ندادند. همچنین میزان EC خاک قبل از کشت و پس از برداشت محصول در هر دو قطعه از کشت محصولات نیز به یکدیگر نزدیک بود. افزایش محسوس و معنی‌داری در میزان EC و واکنش گل اشباع در خاک در هر دو محصول سیر و سیب‌زمینی پس از برداشت محصول در قطعه‌ای که فاضلاب تصفیه شده مورد استفاده قرار گرفته بود، ایجاد نشد. ثابت ماندن نسبی مقدار EC خاک پس از برداشت هر دو محصول سیر و سیب‌زمینی که با آب چاه و فاضلاب تصفیه‌شده آبیاری شده‌اند، با داده‌های حاصل از نزدیکی میزان EC و غلظت یون‌های کلر و سدیم در پساب تصفیه شده و آب چاه (جدول ۴) همخوانی داشته و تأییدی بر عدم تأثیر فاضلاب تصفیه شده بر مقدار شوری خاک است.

(Safari Sanjabi 1995) با بررسی زمین‌های برخوار اصفهان که به مدت ۷ سال با فاضلاب تصفیه شده آبیاری شده بودند، نتیجه گرفت که آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده نه تنها مشکلی از لحاظ شوری حاصل از سدیم در خاک منطقه ایجاد نکرد، بلکه میزان شوری خاک را نیز تا حدودی کاهش داد.

خاک مورد آزمایش از نظر قلیائیت و میزان بی‌کربنات، اگرچه با شرایط مطلوب دو محصول سیر و به‌ویژه سیب‌زمینی فاصله دارد، اما محدودیت زیادی ایجاد نمی‌کند. ضمن اینکه، اکثر خاک‌های منطقه از سطح مشابهی از نظر قلیائیت و کربنات‌ها برخوردار هستند. از نظر ماده آلی با کمتر از ۱ درصد، خاک مورد مطالعه معمولاً وضعیتی مشابه با سایر خاک‌های منطقه داشت. هر چند مقدار ماده آلی در هر دو قطعه پائین بود، اما مقدار اندکی بالاتر در قطعه مربوط به کاشت سیر مشاهده شد که به دلیل کشت گندم در سال قبل و رعایت بهتر برنامه تناوب در آن قطعه است. یکی از دلایل مهم کاهش ماده آلی خاک، عدم رعایت تناوب مناسب، کشت و کار مداوم، حذف بقایا و عدم مدیریت دقیق آنها است (Dou, 2005).

نتایج حاصل از سایر ویژگی‌های شیمیایی خاک (جدول ۴) به خصوص از نظر عناصر غذایی پرمصرف و همچنین ریزمغذی‌ها مشخص کرد که خاک مورد آزمایش در مجموع در هر دو قطعه از ظرفیت مناسبی در میزان عناصر غذایی قابل تبادل برخوردار است. با این حال، بالا بودن pH و سطوح بالای بی‌کربنات ممکن است در جذب آنها مشکل ایجاد کند.

جدول ۳- مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک محل آزمایش قبل از کاشت و پس از برداشت محصول با آزمون دو t جانبی

نوع محصول	زمان تهیه نمونه	هدایت الکتریکی EC (dS/m)		واکنش گل اشباع pH		درصد مواد خنثی شونده T.N.V%		درصد کربن آلی OC%	
		(میانگین)	مقدار t	(میانگین)	مقدار t	(میانگین)	مقدار t	(میانگین)	مقدار t
سیب‌زمینی	قبل از کاشت	۱/۸۲	۲/۱۶ ^{ns}	۸/۲۶	۲/۷۳ ^{ns}	۴/۵۲	۱/۷۳ ^{ns}	۰/۵۵	۲/۱۸ ^{ns}
	پس از برداشت محصول	۲/۱۴		۸/۱۷		۴/۵۸		۰/۵۸	
سیب	قبل از کاشت	۲/۰۵	۱/۳۳ ^{ns}	۸/۲۲	۲/۸۵ ^{ns}	۴/۸۱	۲/۱۹ ^{ns}	۰/۷۲	۲/۶۹ ^{ns}
	پس از برداشت محصول	۱/۹۳		۸/۳۵		۵/۱۷		۰/۶۸	
نوع محصول	زمان تهیه نمونه	کلر CL^- میلی اکی والان در ۱۰۰ گرم خاک	سولفات SO_4^{2+} میلی اکی والان در ۱۰۰ گرم خاک	مجموع آنیون‌ها	کلسیم Ca^{2+} تبادل میلی اکی والان در ۱۰۰ گرم خاک	نوع محصول	زمان تهیه نمونه	کلر CL^- میلی اکی والان در ۱۰۰ گرم خاک	سولفات SO_4^{2+} میلی اکی والان در ۱۰۰ گرم خاک
		(میانگین)	مقدار t	(میانگین)	مقدار t			(میانگین)	مقدار t
سیب‌زمینی	قبل از کاشت	۱/۲۸	۳/۲۸ ^{ns}	۶/۱۷	۲/۸۹ ^{ns}		۳/۱۸ ^{ns}	۱۶/۷۲	۱/۲۸ ^{ns}
	پس از برداشت محصول	۱/۱۴		۶/۴۶				۱۶/۶۸	
سیب	قبل از کاشت	۳/۶۳	۲/۹۶ ^{ns}	۶/۲۰	۲/۶۴ ^{ns}		۳/۷۶ ^{ns}	۱۵/۸۸	۳/۵۶*
	پس از برداشت محصول	۳/۸۵		۶/۳۵				۱۶/۷۶	
نوع محصول	زمان تهیه نمونه	آهن قابل جذب Fe (p.p.m)		روی قابل جذب Zn (p.p.m)		مس قابل جذب Cu (p.p.m)		منگنز قابل جذب Mn (p.p.m)	
		(میانگین)	مقدار t	(میانگین)	مقدار t	(میانگین)	مقدار t	(میانگین)	مقدار t
سیب‌زمینی	قبل از کاشت	۱۳/۸۲	۲/۶۹ ^{ns}	۸/۸۲	۱/۸۹ ^{ns}	۱/۶۵	۵/۶۹*	۹/۲۱	۶/۶۹*
	پس از برداشت محصول	۱۳/۴۷		۸/۲۸		۱/۹۳		۸/۶۱	
سیب	قبل از کاشت	۱۳/۴۳	۱/۹۶ ^{ns}	۱۰/۷۲	۲/۶۹ ^{ns}	۱/۳۶	۶/۹۷*	۱۲/۸۱	۲/۹۶ ^{ns}
	پس از برداشت محصول	۱۳/۱۶		۱۰/۱۴		۱/۹۲		۱۲/۶۴	

ns، * و ** به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار، وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد بین دو میانگین می‌باشد.

جدول ۴- مقایسه میانگین غلظت عناصر غذایی ریز مغذی خاک محل آزمایش قبل از کاشت و پس از برداشت محصول با آزمون t دو جانبه

نوع محصول	زمان تهیه نمونه	فسفر قابل جذب P (p.p.m)	پتاسیم قابل جذب K (p.p.m)	درصد ازت کل TotalN%	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC
		(میانگین) مقدار t	(میانگین) مقدار t	(میانگین) مقدار t	(میانگین) مقدار t
سیب زمینی	قبل از کاشت	۵۸/۳۸	۵۸۴/۴۶	۰/۱۶	۷/۱۵
	پس از برداشت محصول	۵۲/۴۸	۵۲۴/۲۳	۰/۰۸	۷/۳۵
سیر	قبل از کاشت	۴۸/۴۲	۵۱۴/۱۲	۰/۱۸	۱۴/۲۰
	پس از برداشت محصول	۴۴/۶۵	۵۰۸/۳۸	۰/۱۲	۱۴/۶۸

با مقایسه غلظت فلزات سنگین در خاک در هر دو قطعه اختصاص یافته به کشت سیر و سیب زمینی مشخص شد که اگرچه میزان آنها در خاک پس از برداشت محصولات و انجام آبیاری با پساب به صورت نسبی افزایش یافت، اما تفاوت‌ها ناچیز بوده و از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد اختلاف معنی داری مشاهده نشد (جدول ۵). با مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین در خاک محل آزمایش و در هر محصول پس از برداشت محصول مشخص شد که میزان آنها و به‌ویژه میزان نیکل و آرسنیک بیشتر از عناصر مس، کروم و کادمیوم بود (جدول ۵). این آلاینده‌ها از نظر میزان آلاینده‌گی و استانداردهای لازم، پائین‌تر از حداکثر حد مجاز و زیان‌بار هستند و نگرانی کمتری ایجاد می‌کنند. با اندازه‌گیری میزان عنصر سنگین کادمیوم در نمونه‌های خاک در هر دو مرحله قبل از کاشت و پس از برداشت محصولات سیر و سیب زمینی مشخص شد که اساساً میزان این عنصر بسیار پائین و ناچیز و حتی از حدود تشخیص دستگاه اندازه‌گیری خارج بوده است. به نظر می‌رسد بالا بودن نسبی عناصر سنگین نیکل و آرسنیک و تا حدودی نیز سرب در خاک منطقه مورد آزمایش، ناشی از استفاده از پساب تصفیه نشده در سال‌های قبل باشد. چرا که قبل از احداث تصفیه‌خانه و برنامه‌ریزی مدیریت مصرف آب آن، فاضلاب خام توسط کشاورزان برای آبیاری محصولات توسط زارعین استفاده می‌شده است. از طرفی بر اساس نتایج جدول ۳ میزان

این عناصر سنگین در پساب تصفیه‌شده بسیار پائین است. لذا دلیل روشن دیگر بر افزایش موجودی و یا ثبات نسبی مقدار آنها در خاک پس از برداشت محصولات، می‌تواند ناشی از استفاده قبلی از پساب خام باشد. البته نبایستی فراموش کنیم که علاوه بر فاضلاب، منابع دیگری مانند کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، پسماند کارخانجات صنعتی، سوخت‌های فسیلی و برخی از کودهای آلی از جمله کمپوست نیز سبب ورود فلزات سنگین به خاک‌های زراعی می‌شوند. (Edelstein and Ben-Hur, 2018; Tong et al., 2022) در ارتباط با عنصر کادمیوم خوشبختانه میزان اندازه‌گیری شده در خاک بسیار ناچیز و در حد صفر بوده است. این موضوع با توجه به متحرک بودن بیشتر عنصر کادمیوم در بین فلزات سنگین بسیار قابل تأمل بوده و به عنوان یک نقطه مثبت می‌تواند مد نظر قرار گیرد؛ چرا که بر اساس اعلام سازمان جهانی بهداشت کادمیوم خطرناک‌ترین عنصر سنگین است که بالا بودن آن می‌تواند پیامدهای ناگواری را در چرخه آب، گیاه، موجودات زنده و انسان ایجاد کند (Klay et al., 2010). غلظت عنصر کروم در مقایسه با سه عنصر نیکل، آرسنیک و سرب بسیار کمتر بود. در هر دو قطعه مورد نظر و در هر دو مرحله قبل از کاشت و پس از برداشت محصولات مقدار آن تغییر کمی داشته و نسبتاً ثابت مانده است (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین خاک محل آزمایش قبل از کاشت و پس از برداشت محصول با آزمون t دو جانبه

نوع محصول	زمان تهیه نمونه	سرب قابل جذب Pb (p.p.m)	نیکل قابل جذب Ni (p.p.m)	آرسنیک As (p.p.m)	کادمیوم قابل جذب Cd (p.p.m)	کروم قابل جذب Cr (p.p.m)
		(میانگین) مقدار t	(میانگین) مقدار t	(میانگین) مقدار t	(میانگین) مقدار t	(میانگین) مقدار t
سیب زمینی	قبل از کاشت	۳/۷۲	۴۸/۶۲	۲۳/۴۵	ناچیز	۰/۴۸
	پس از برداشت محصول	۳/۶۷	۴۷/۸۶	۲۲/۷۲	ناچیز	۰/۵۰
سیر	قبل از کاشت	۳/۹۸	۴۸/۷۲	۲۲/۳۵	ناچیز	۰/۵۲
	پس از برداشت محصول	۴/۱۱	۴۸/۷۷	۲۱/۶۸	ناچیز	۰/۵۳

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که پساب تصفیه‌شده تصفیه‌خانه شهر همدان، از کیفیت قابل قبولی از نظر EC، شوری سدیمی، بی‌کربنات و کلر برخوردار است. همچنین میزان آلاینده‌های فلزات سنگین (آرسنیک، نیکل، کروم و کادمیوم) در این پساب پائین‌تر از حداکثر مجاز بوده و اثر نامطلوبی بر آلودگی خاک و باقیمانده مجاز آنها در خاک ندارد. بنابراین، این پساب می‌تواند به عنوان منبع جایگزین آب زیرزمینی در آبیاری هر دو محصول سیر و سیب‌زمینی استفاده شود. همچنین، پساب تصفیه شده فاضلاب به دلیل برخورداری از عناصر غذایی مفید و ریزمغذی‌ها نقش قابل توجهی در تامین بخشی از نیاز غذایی دو محصول داشته و می‌تواند در بهبود رشد و نمو و افزایش عملکرد آنها نیز تاثیر مثبت داشته باشد.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی و سفارش سازمان جهاد کشاورزی استان همدان انجام پذیرفت. بدین‌وسیله از ریاست سازمان جهاد کشاورزی استان همدان جناب آقای دکتر بهراملو و همچنین مدیریت اجرایی معاونت محترم تولیدات گیاهی استان سپاسگزاریم. همچنین از مساعدت و همکاری سازمان آب و فاضلاب استان و نیز امور آب همدان که همکاری لازم را در تامین پساب تصفیه شده مبذول داشته‌اند، کمال سپاسگزاری و قدردانی را داریم.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافع وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: انجام مراحل مزرعه‌ای، آزمایشگاهی و جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها، تدوین مقاله
نویسنده دوم: کمک در تجزیه و تحلیل داده‌ها و تدوین مقاله
نویسنده سوم: اندازه‌گیری صفات مورد بررسی پژوهش و ویرایش مقاله

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

منابع

- 1- Albaji, M. and Asgari, A., 2017. Investigation of the possibility of using of wastewater for agriculture (Case study: Shahrekord's municipal sewage treatment plant). *Water and Soil Conservation*, 24 (2), pp. 303-308. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.11825.2632> [In Persian]
- 2- Anonymous., 1989. Health guideline for the use of wastewater in agriculture, Technical Report N.778, *World Health organization, Geneva*, 74p
- 3- Albaji, M. and Asgari, A., 2017. Investigation of the possibility of using of wastewater for agriculture (Case study: Shahrekord's municipal sewage treatment plant). *Water and Soil Conservation*, 24 (2), pp. 303-308. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.11825.2632> [In Persian]
- 4- ASCE-EWRI., 2005 The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Technical Committee Report to the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration, ASCE-EWRI, 1801 Alexander Bell Drive, Reston. 115 p.
- 5- Ayers, R. S. and Westcot, D. W., 1985. Water quality for agriculture. FAO, irrigation and drainage paper 29, Rev. 1, FAO, Rome, 147 p.
- 6- FAO., 2020. The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming Water Challenges in Agriculture. FAO, Rome.
- 7- Karimi-Googhari, S. and Asadi, R., 2014. The Increase in water use efficiency of Cotton by using municipal wastewater. *Iranian Water Research Journal*, 8(2), pp. 167-175. [In Persian]
- 8- Bagheri, A., 2022. Integrated management of bacterial potato scab disease. *Journal of Applied Potato Science*, 1(2), pp. 1-8. [In Persian].
- 9- Behbahani-Nia, A., Azadi, A. and Sadeghian, S., 2010. Effect of irrigation with wastewater from treatment plants on the accumulation of heavy metals in some vegetables of the Rudehen region. *Crop Production Research (Environmental Stresses in Plant Sciences)*, 2 (2), pp. 165-173. [In Persian]
- 10- Boush, M., Banejad, H., Goldani, M. and Metanat, M., 2021. Evaluation of the effect of different wastewater qualities on some biochemical and morphological traits of tomato plant under deficit irrigation. *Iranian Water Research Journal*, 15(4), pp. 55-67. <https://doi.org/10.22034/iwrj.2021.11172>. [In Persian]
- 11- Chaudhary, S., Singh Sindhu, S., Dhanker, R. and Kumari, A., 2023. Microbes-mediated sulphur

- 22- Oron, G., Demalach, y., Hoffman., Z. and Manor, Y., 1992. Effect of effluent quality and application method on agricultural Productivity and environmental control. *Water Science Technology*, 26 (718), pp. 1593-1601.
- 23- Page, A.L., Miller, R.H. and Jeeney, D.R. 1992. *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical properties*. SSSA Pub., Madison. 1750 p.
- 24- Parvizi, K. and Bagheri, A., 2025. Evaluation of the effectiveness of the combined fungicide-bactericide "Nordoxyl" on major bacterial and fungal diseases and on potato growth traits. Scientific-Technical Report, Seed and Plant Improvement Institute, ISBN No. 67383, 54 pp. [In Persian].
- 25- Pedrero, F., Kalavrouziotis, L., Alarcón, J., Koukoulakis, P. and Asano, T. 2011. Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture—Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management*, 97, pp. 1233–1241.
<http://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.03.003>
- 26- Sadegi, A., Valizade, M., Asghari-Zakaria, R. and Hassanpanah, D. 2014. 10th Iranian Congress of Agricultural Sciences and Plant Breeding, Karaj. Iran, pp. 168-203. [In Persian].
- 27- Safari Sanjabi, A., 1995. Effects of irrigation with wastewater on some chemical properties of soils in the Barkhar region of Isfahan and the accumulation of certain elements in alfalfa. M.Sc. Thesis in Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, 125 pp. (In Persian)
- 28- Sokolova, T. and Alekseeva, S., 2008. Adsorption of sulfate ions by soils (A Review). *Eurasian Soil Science*, 41, pp. 140-148.
<https://doi.org/10.1134/S106422930802004X>.
- 29- Taghvaeian, S., Alizadeh, A. and Danesh, Sh., 2007. Effect of wastewater application in irrigation on soil physical properties and some chemical characteristics. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 1(1), pp. 50–60. [In Persian].
- 30- Tong, Y., Gong, W., Li, Yu, L. and Nima, D., 2022. Bioaccumulation characteristics, transfer model of heavy metals in soil-crop system and health assessment in plateau region, China. *Ecotoxicology*
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113733>.
- 31- Vice-Presidency for Strategic Planning and Supervision., 2010. Environmental regulations for the reuse of return flows and wastewater. Publication No. 535, 155p.
- 32- WHO (World Health Organization), 2006. *Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater: Volume 2: Wastewater Use in Agriculture*. WHO Press, Geneva, Switzerland.
- 33- Yargholi, B. and Taran, F., 2024. Investigating the Potential of Using Effluent of Sewage Treatment Plant in Irrigation and Drainage Networks; A Case Study of Buin Zahra. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 25(94), pp.83-96.
<https://doi.org/10.22092/idser.2024.366616.1585>
- cycling in soil: Impact on soil fertility, crop production and environmental sustainability production and environmental sustainability. *Microbiological Research*, 271. pp. 127- 140.
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127340>.
- 12- Dou, F., 2005. Long-term tillage, cropping sequence and nitrogen fertilization effects on soil carbon and nitrogen dynamics. PhD thesis. Texas A & M University.
- 13- Edelstein, M. and Ben-Hur, A. 2018. Heavy metals and metalloids: Sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops. *Scientia Horticulture*, 234: pp.431-444.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.039>
- 14- FAO. 2004. *Wastewater Treatment and Use in Agriculture*. Irrigation and Drainage Paper, No 47, FAO, Rome, Italy.
- 15- Fouad, M.O. Essahibi, A. Benhiba, A. and Qaddoury, A., 2014. Effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi in the protection of olive plants against oxidative stress induced by drought. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12, pp. 763–771. <https://doi.org/10.5424/sjar/2014123-4815>.
- 16- Gatta, G., Gagliardi., A., Disciglio, G., Lonigro., A., Francavilla, M., Tarantino, E. and Giuliani, M.M., 2018. Irrigation with Treated Municipal Wastewater on Artichoke Crop: Assessment of Soil and Yield Heavy Metal Content and Human Risk. *Water Journal*, 10, 255. pp. 3-18.
<https://doi.org/10.3390/w10030255>.
- 17- Jamali, M.K., Kazi, T.G., Arain, M.B., Afridi, I., Jalbani, N., Kandhro, G.A., Shah, Q. and Baig, A., 2008. Heavy metal accumulation in different varieties of wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in soil amended with domestic sewage sludge. *Journal of Hazardus Materials*, 2. pp. 1386-1391.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.056>.
- 18- Klay S.A., Charef A., Ayed, B. and Rezgu, F., 2010. Effect of irrigation with treated wastewater on geochemical properties (saltiness, C, N and heavy metals) of isohumic soils (Zaouit Sousse perimeter, Oriental Tunisia). *Desalination*, 253, pp. 180-187.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.10.019>
- 19- Lauver, L., 2000. Nitrogen mass balance for municipal waste water. *Practice periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management*, 4(1), pp. 36-38.
- 20- Miller, G., Suzuki, N. and Ciftci-Yilmaz, S., 2010. Reactive oxygen species homeostasis and signaling during drought and salinity stresses. Drought stress responses in plants, oxidative stress, and antioxidant defense. *Climate*, 33, pp. 453-467.
<https://doi: 10.1111/j.1365-3040.2009.02041.x>.
- 21- Mohammadzadeh, A. R., 2006. Investigation of the effects of using domestic treated wastewater on wheat growth and yield and on soil properties. In: *Proceedings of the Conference on Soil, Environment, and Sustainable Development*, Karaj, 8–9 November 2006, pp. 131–132. (In Persian)