

Assessment of the efficacy and risks of using processed wastewater sludge in growing cucurbits

M. R. Fadaei Tehrani¹ and M. Heidari Savadjani^{2*}

Extended Abstract

Introduction:

Managing municipal sewage sludge has evolved into a critical environmental and economic challenge globally due to its constantly increasing volume and the complex issues surrounding its safe and cost-effective disposal. Conventional methods like landfilling or incineration are often expensive and carry significant environmental risks, including the release of greenhouse gases and potential contamination of soil and groundwater. This situation underscores the urgent need for finding sustainable and circular economy solutions for resource recovery. The utilization of processed sewage sludge (biosolids) as a soil amendment or agricultural fertilizer offers a promising sustainable pathway. This material is rich in essential macronutrients like nitrogen, phosphorus, and potassium, which are vital for plant growth. Furthermore, its high organic matter content effectively enhances the soil's physical structure, improves water retention capacity, and stimulates microbial activity. This practice not only provides a valuable outlet for waste management but also significantly reduces agriculture's reliance on costly synthetic fertilizers, contributing to greater overall system sustainability. However, potential risks, particularly the presence of heavy metals and pathogens, necessitate careful evaluation of its safety and efficacy before widespread agricultural application.

Material and Methods:

This study evaluated the effectiveness and risks of using sewage sludge from the wastewater treatment plant in the city of Tiran, Isfahan province, for growing summer vegetables. The research was conducted in 2024 using three different mixtures of soil and dried sludge at weight ratios of 0%, 20%, and 40% for the cultivation of tomatoes, eggplants, and peppers in a greenhouse. The Tiran wastewater treatment plant, located at 32°38'21.88" N and 51°11'12.20" E, uses an anoxic-aerobic biological process with an average flow of 864 cubic meters per day to treat the wastewater of its covered population. Plants were grown in pots with a height of 40 cm and a diameter of 30 cm, holding approximately 3.5 kg of soil. Seedlings of each vegetable were surface-sterilized with a 2% (w/v) sodium hypochlorite solution for 10 seconds before planting. For each scenario, four pots were initially cultivated. After one month, one pot with the least similarity to the others was removed, leaving nine pots per product for further research. During the growth period, weeds were manually removed, and no other fertilizers or chemicals were used. The pots were irrigated with municipal drinking water every three days for the first 30 days, and then every four to five days, until the soil reached its field capacity. Key soil characteristics, including pH, electrical conductivity (ECe), organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, and heavy metals (lead and cadmium), were analyzed. Standard methods such as the Kjeldahl method for total nitrogen and atomic absorption spectrophotometry (model B1100 Perkin Elmer) for heavy metals were used. Plant growth parameters, including the total number of fruits, total fresh fruit weight, number of branches, main stem diameter, and plant height, were measured during the harvest period, which began 60 days after planting and continued for 30 days. The data were statistically analyzed using SPSS software.

¹ Assistant Professor and Faculty Member, Higher Education and Research Complex, Power Research Institute, Isfahan, Iran.

² Master's Student at the Advanced Learners Higher Education Institute and Engineer at the Isfahan Provincial Water and Wastewater Company, Isfahan, Iran. 40292002OMA@daneshpajoohan.ac.ir

Received: 2025/07/10

Accepted: 2025/09/26

Results and Discussion:

Despite that sludge reduced the soil pH from 6.78 to 6.7 and 6.5 in the 20% and 40% sludge treatments, respectively, these changes were not statistically significant ($p > 0.05$). The application of 20% and 40% sludge increased organic carbon levels by 128% and 258%, respectively. Total nitrogen content also significantly increased from 0.08 g/kg in the control sample (0% sludge) to 1.82 g/kg in the 40% sludge treatment. The concentration of available phosphorus rose from 13 mg/kg to 3400 mg/kg, highlighting the sludge's potential as a rich source of nutrients. Statistical analysis revealed significant differences ($p < 0.005$) in growth parameters, including plant height and stem diameter, with increasing sludge percentage. Maximum plant height and stem diameter were recorded at 73 cm and 19 mm, respectively, in the 40% sludge treatment. Furthermore, plants grown in the 40% sludge mixture showed an average 70% increase in fruiting compared to the control group. The heavy metal content in the sludge, specifically lead and cadmium, was measured at 2.8 and 1.4 mg/kg, respectively, which were below permissible limits. The processing method involving aeration and sunlight exposure successfully reduced pathogen levels in the sewage sludge.

Conclusion:

The findings of this research indicated that applying sludge at concentrations of 20% and 40% not only enriches the soil with essential nutrients like nitrogen, phosphorus, and potassium but also improved its fertility. Higher sludge concentrations positively correlate with improved plant growth metrics, including total fruit production, plant height, and stem diameter, emphasizing its importance as a nutrient-rich organic amendment. This study alleviated concerns about heavy metal accumulation, as the observed levels were within safe limits, ensuring the safety of this agricultural practice. Overall, the processed sewage sludge effectively enhanced the growth of the three selected plants and improved soil fertility without increasing heavy metals or pathogens. The study highlighted the importance of preventing industrial wastewater and agricultural runoff from entering urban sewage networks and using physical dewatering processes without chemical polymers to produce safe sludge.

Keywords: Agriculture, Amendment, Heavy Metals, Pollution, Wastewater

Citation:

Fadaei Tehrani, M. R., Heidari Savadjani, M., 2026. Assessment of the efficacy and risks of using processed wastewater sludge in growing cucurbits. *Iranian Water Research Journal*.19(59): pp. 55-66.
<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15296.2698>

Copyright:

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



ارزیابی اثربخشی و مخاطرات کاربرد لجن فاضلاب فرآوری شده در پرورش صیفی جات

محمد رضا فدائی تهرانی^۱ و مهرداد حیدری سوادجانی^۲

چکیده

این مطالعه به ارزیابی اثربخشی و مخاطرات کاربرد لجن خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب بر پرورش صیفی جات، با تمرکز بر تأثیر آن روی ویژگی‌های خاک و عملکرد گیاه، می‌پردازد. برای این منظور، لجن خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب شهر تیران در استان اصفهان برای کشت گلخانه‌ای سه محصول گوجه‌فرنگی، بادمجان و فلفل در سه مخلوط مختلف خاک و لجن خشک با نسبت‌های وزنی ۰، ۲۰ و ۴۰ درصد استفاده شد. نتایج نشان داد، کاربرد ۲۰ و ۴۰ درصد وزنی لجن، سطح کربن آلی را به ترتیب ۱۲۸ و ۲۵۸ درصد افزایش داد. همچنین، محتوای نیتروژن کل نیز به طور چشم‌گیری از ۰/۰۸ گرم بر کیلوگرم (نمونه‌ی شاهد بدون لجن) به ۱/۸۲ گرم بر کیلوگرم در تیمار حاوی ۴۰ درصد لجن افزایش یافت. غلظت فسفر قابل جذب با افزودن لجن از ۱۳ میلی گرم بر کیلوگرم به ۳۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم رسید که پتانسیل آن را به عنوان منبعی غنی از مواد مغذی نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل آماری، تفاوت‌های معنی‌داری ($p < 0.005$) را در پارامترهای رشد شامل ارتفاع گیاه و قطر ساقه با درصد لجن افزوده شده به خاک نشان داد. بر اساس نتایج این مطالعه، لجن فاضلاب فرآوری شده می‌تواند به طور مؤثری رشد سه گیاه منتخب را افزایش داده و حاصل خیزی خاک را در محدوده افزایش مجاز فلزات سنگین و عوامل بیماری‌زا، بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، اصلاح خاک، فاضلاب، فلزات سنگین، کشاورزی

ارجاع: فدائی تهرانی، م.ر.، حیدری سوادجانی، م.، ۲۰۲۶. ارزیابی اثربخشی و مخاطرات کاربرد لجن فاضلاب فرآوری شده در پرورش صیفی جات. مجله پژوهش آب ایران. ۱۹ (۵۹). ص: ۶۶-۵۵. <https://dx.doi.org/10.22034/TWRJ.2025.15296.2698>

^۱ - استادیار و عضو هیئت علمی، مجتمع آموزش عالی و پژوهشی، پژوهشگاه نیرو، اصفهان، ایران.

^۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد در موسسه آموزش عالی دانش آموختگان پیشرفته و مهندس در شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان، اصفهان، ایران.

*نویسنده مسئول: 40292002OMA@daneshpajoohan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۹

مقدمه

مدیریت لجن خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، که به دلیل حجم رو به افزایش تولید و چالش‌های مرتبط با دفع آن به یک معضل محیط‌زیستی قابل توجه تبدیل شده است، نیازمند راهکارهای مؤثر و پایدار می‌باشد (Ramzanipour et al., 2023). در این میان، استفاده از لجن فاضلاب به عنوان کود کشاورزی، به دلیل غنی بودن آن از مواد مغذی ضروری برای رشد گیاهان از جمله نیتروژن، فسفر، پتاسیم و مواد آلی، به عنوان یک رویکرد بالقوه و پایدار مورد توجه محققان قرار گرفته است (Cucina et al., 2021; Kusvuran et al., 2015). این روش نه تنها می‌تواند وابستگی به کودهای شیمیایی و به تبع آن هزینه‌های تولید در بخش کشاورزی را کاهش دهد، بلکه به بهبود ساختار فیزیکی و شیمیایی خاک نیز کمک خواهد کرد (Raducanu et al., 2021).

کاربرد لجن خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری به عنوان یک منبع ارزشمند مواد مغذی در کشاورزی، موضوع پژوهش‌های گسترده‌ای بوده است (Buta-Hubeny et al., 2024; Elgarahy et al., 2021). این رویکرد، علاوه بر پتانسیل ارتقاء حاصل‌خیزی خاک و افزایش عملکرد محصولات کشاورزی، به مدیریت پایدارتر پسماندهای تولیدی در تصفیه‌خانه‌ها نیز کمک می‌کند.

یافته‌های پژوهش‌های اخیر نیز بر اثربخشی لجن فاضلاب بر رشد و عملکرد گیاهان از جمله صیفی‌جات تأکید دارند. برای نمونه، تحقیقی در سال ۲۰۲۴ نشان داد که استفاده از لجن فرآوری‌شده می‌تواند به طور معنی‌داری عملکرد گوجه‌فرنگی و جذب عناصر غذایی را بهبود بخشد (Chimi et al., 2024). مطالعه‌ای دیگر در ایران نیز اثرات مثبت مشابهی را در خصوص رشد و عملکرد خیار تحت تأثیر کاربرد لجن کمپوست‌شده گزارش کرد (Khan et al., 2014). افزون بر این، تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر به بررسی تأثیر لجن بر کیفیت میوه و محتوای آنتی‌اکسیدانی در صیفی‌جات نیز پرداخته‌اند (Ma et al., 2016; Radwaniecka et al., 2025). این یافته‌ها حاکی از آن است که لجن قادر به افزایش کمیت کیفیت محصولات کشاورزی است. شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که استفاده اصولی از لجن می‌تواند منجر به افزایش چشم‌گیر عملکرد محصول، بهبود کیفیت آن و ارتقاء سلامت خاک گردد. این مطالعات عموماً افزایش در متغیرهایی نظیر ارتفاع گیاه، تعداد برگ‌ها، وزن خشک اندام هوایی و زیرزمینی و همچنین عملکرد نهایی میوه را گزارش کرده‌اند.

با وجود مزایای بالقوه، کاربرد لجن فاضلاب در کشاورزی با مخاطرات و چالش‌هایی نیز همراه است که نیازمند توجه دقیق و اعمال مدیریت صحیح می‌باشد. یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها، حضور فلزات سنگین در ساختار لجن است که می‌تواند در خاک تجمع یافته و توسط گیاهان جذب و وارد چرخه غذایی انسان و دام شود. مطالعات متعددی به بررسی میزان غلظت فلزات سنگین نظیر کادمیوم، سرب، کروم و نیکل در انواع مختلف لجن و میزان جذب آن‌ها توسط گیاهان صیفی پرداخته‌اند (Schiptsova et al., 2020; Singh & Agrawal, 2007). یافته‌های این تحقیقات نشان می‌دهد که عواملی نظیر نوع لجن، pH خاک، گونه گیاهی و میزان کاربرد لجن می‌توانند بر میزان جذب فلزات سنگین تأثیرگذار باشند (Xiong et al., 2022). پژوهشی در سال ۲۰۲۳ به بررسی تجمع فلزات سنگین در خاک‌های زیر کشت صیفی‌جات با استفاده از لجن پرداخت و نشان داد که نوع فرآوری لجن و مدیریت خاک نقش بسزایی در کاهش این خطر ایفا می‌کند (Feng et al., 2023). همچنین، موضوع آلاینده‌های نوظهور از قبیل میکروپلاستیک‌ها و ترکیبات دارویی در لجن و پتانسیل جذب آن‌ها توسط گیاهان نیز در سال‌های اخیر مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است (Edo et al., 2025; Hassan et al., 2023; Tabatabaeiet al., 2024).

علاوه بر فلزات سنگین، حضور عوامل بیماری‌زا در لجن فاضلاب نیز به عنوان یک خطر بالقوه برای سلامت انسان و محیط‌زیست مطرح می‌باشد. باکتری‌ها، ویروس‌ها، انگل‌ها و تخم انگل‌ها قادر به بقا در لجن بوده و در صورت عدم اعمال فرآیندهای تصفیه و مدیریت صحیح، می‌توانند منجر به آلودگی خاک و محصولات کشاورزی شوند (Hua, 2025). از این رو، روش‌های مختلف گندزدایی و تثبیت لجن، از جمله هضم بی‌هوازی، کمپوست‌سازی، آهک‌زنی و تیمارهای حرارتی به منظور کاهش بار میکروبی و ایمن‌سازی لجن برای کاربرد در کشاورزی مورد بررسی و استفاده قرار می‌گیرند (Mokhtar et al., 2022; Sharma et al., 2021).

همچنین، وجود مواد شیمیایی خطرناک نظیر ترکیبات آلی پایدار (POPs) و مواد دارویی در فاضلاب و نهایتاً لجن فاضلاب نیز از جمله نگرانی‌های نوظهور در این حوزه به شمار می‌رود (Ashraf, 2017; Tabatabaei, et al., 2024).

به منظور مدیریت اصولی و کاهش مخاطرات ناشی از کاربرد لجن فاضلاب در کشاورزی، بسیاری از کشورها، قوانین و مقررات خاصی را تدوین نموده‌اند (Christodoulou and Stamatelatou, 2016; Hua, 2025). این مقررات عموماً

شامل استانداردهایی برای میزان مجاز فلزات سنگین، عوامل بیماری‌زا و سایر آلاینده‌ها در لجن و همچنین دستورالعمل‌هایی برای نحوه کاربرد آن در اراضی کشاورزی است.

مطالعات پیشین، اثرات متفاوتی از کاربرد لجن فاضلاب بر رشد و عملکرد صیفی‌جات را نشان داده‌اند. برخی از تحقیقات، افزایش عملکرد و بهبود کیفیت را گزارش کرده‌اند، در حالی که برخی دیگر بر خطرات تجمع آلاینده‌ها در خاک و گیاه تاکید داشته‌اند. از این رو، ارزیابی جامع اثربخشی لجن فاضلاب به عنوان کود برای صیفی‌جات، همراه با شناسایی و ارزیابی دقیق مخاطرات مرتبط، از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد.

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی همزمان اثربخشی لجن خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری بر رشد و عملکرد چند نوع صیفی‌جات رایج و همچنین تعیین میزان تجمع فلزات سنگین و حضور احتمالی عوامل بیماری‌زا در خاک و گیاهان تحت تیمارهای مختلف لجن انجام شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند به توسعه دانش موجود در این زمینه کمک نموده و راهنمایی‌های عملی برای کشاورزان و سیاست‌گذاران در خصوص استفاده ایمن و بهینه از لجن فاضلاب در تولید محصولات کشاورزی ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۳ در شهر تیران واقع در استان اصفهان انجام شد. تصفیه‌خانه فاضلاب تیران در موقعیت جغرافیایی $38^{\circ} 21' 11''$ شمالی و $51^{\circ} 12' 20''$ شرقی و ارتفاع ۱۷۶۸ متر از سطح دریا واقع شده است. این تصفیه‌خانه از فرآیند بیولوژیکی آنوکسیک-اکسیک با میانگین جریان ۸۶۴ مترمکعب بر روز استفاده می‌کند. لجن اضافی به منظور کاهش میزان آب به لاگون تغلیظ به عمق ۴ متر منتقل شده و پس از گذراندن زمان ماند متوسط ۳ ماه، با تخلیه روآب توسط پمپ شناور از سطح لاگون، لجن تغلیظ‌شده در بستر خشک‌کن آبیگیری می‌شود. در طول فرآیند تصفیه، از هیچ ماده منعقدکننده‌ای استفاده نمی‌شود.

در این مطالعه، لجن خشک شده ابتدا خرد و پودر گردید و سپس به مدت ۱۸۰ روز (از اردیبهشت تا آبان) در یک منطقه باز (خارج از محدوده تصفیه‌خانه فاضلاب) در معرض نور مستقیم خورشید قرار گرفت و به صورت ماهانه زیر و رو شد. استفاده از روش خشک کردن هوا مطابق با دستورالعمل آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده (EPA) می‌تواند میزان پاتوژن‌ها را کاهش داده و فلزات سنگین را در لجن تثبیت نماید، در نتیجه لجن تولید شده به عنوان لجن کلاس B طبقه‌بندی

می‌شود و برای استفاده کشاورزی ایمن‌تر خواهد بود (Fadaei, Tehrani and Bagheri 2025). در پایان فرآوری، کود از یک الک با اندازه چشمه ۲ میلی‌متر عبور داده شد.

خاک مورد استفاده از عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری از اراضی بیابانی منابع طبیعی واقع در ۵ کیلومتری حومه شهر تیران برداشت شد. این خاک که تا حدود زیادی عاری از مواد آلی بود، پس از عبور از الک استاندارد شماره ۴ با اندازه چشمه ۴/۷۵ میلی‌متر به محل تحقیق منتقل شد تا به عنوان بستر کشت استفاده شود. سپس، نمونه‌های خاک خشک شده در فضای باز، با درصدهای مختلف لجن خشک الک شده (تیمارهای ۱ و ۲ به ترتیب حاوی خاک با ۲۰ و ۴۰ درصد وزنی لجن) مخلوط شدند. در این تحقیق، مطابق شکل ۱، از گیاهان گوجه، بادمجان و فلفل در گلدان و در محیط کنترل‌شده گلخانه استفاده شد. گلدان‌های مورد استفاده دارای ارتفاع ۴۰ و قطر ۳۰ سانتی‌متر با ظرفیت تقریبی ۳/۵ کیلوگرم خاک بودند. قبل از پر کردن گلدان‌ها با تیمارهای خاک، یک لایه شن درشت به عنوان زهکش در پایین هر گلدان قرار داده شد و سپس گلدان‌ها با خاک آماده شده پر شدند. پس از تهیه نشاء، ریشه‌های آن‌ها با محلول ۲ درصد (وزنی/حجمی) هیپوکلریت سدیم به مدت ۱۰ ثانیه به صورت سطحی استریل شده و سپس کاشته شدند.

در این پژوهش، برای هر سناریو ۴ گلدان کشت شد و پس از گذشت یک ماه، یک گلدان از هر سری که کمترین شباهت را به دو گلدان دیگر داشت یا خشک شده بود، حذف گردید. بنابراین، برای هر محصول ۹ گلدان، شامل سه سری، برای تحقیقات بیشتر نگهداری شدند. سناریوهای طراحی آزمایش در جدول ۱ و خصوصیات خاک در هر آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

در طول دوره رشد گیاهان در گلخانه، وجین کردن به صورت دستی انجام شد و از هیچ کود یا ماده شیمیایی دیگری استفاده نگردید. گلدان‌ها با آب آشامیدنی شهری، هر سه روز یک مرتبه در طول ۳۰ روز اول پس از انتقال نشاء و سپس هر چهار تا پنج روز یک مرتبه، تا رسیدن به ظرفیت زراعی خاک (که با وزن کردن گلدان‌ها تعیین می‌شد)، آبیاری شدند. اسیدیته خاک (pH) با pH متر، هدایت الکتریکی عصاره اشباع (ECe) با هدایت‌سنج، درصد کربن آلی به روش Walkley و Black، کل نیتروژن با دستگاه Kjeldahl، پتاسیم قابل دسترس با فلیم فنومتري و فلزات سنگین سرب و کادمیوم با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

در طول دوره رشد گیاه و همزمان با برداشت محصول، ویژگی‌های رشد گیاهان شامل تعداد کل میوه‌ها، وزن کل میوه

جدول ۲- خصوصیات خاک تیمار شده با درصد های مختلف لجن

ویژگی	لجن خشک	درصد وزنی لجن در خاک			حدود مجاز*
		۰	۲۰	۴۰	
pH	۶/۴	۷/۶۸	۶/۷	۶/۵	۶ تا ۷/۵
ECe (ds/m)	۲/۱۲	۱/۷	۱/۸۳	۱/۸۷	۴
بافت خاک	-	لومی-سیلت	لومی-آلی	لومی-آلی	-
رطوبت (%)	۰/۲	۱/۱	۷/۵	۸/۸	-
کربن آلی (g/kg)	۲۱/۷	۳/۱۱	۷/۱	۱۱/۲	-
نیترژن کل (g/kg)	۴/۲۸	۰/۰۸	۱/۱	۱/۸۲	-
فسفر (mg/kg)	۳۴۰۰	۱۳/۰۹	۷۱۰	۱۳۴۵	-
پتاسیم (mg/kg)	۱۷۰۰	۲۱۰/۱۳	۴۹۵	۷۹۸	-
آهن (mg/kg)	۶۰	۷/۶۲	۱۷/۵	۲۹/۵	-
منگنز (mg/kg)	۱۱۵	۸/۸۱	۳۱	۵۰/۵	-
روی (mg/kg)	۰/۸۷	۲/۳۱	۱/۹	۱/۸	۲۰۰
مس (mg/kg)	۰/۱۳	۳/۰۲	۲/۵	۱/۹	۱۰۰
سرب (mg/kg)	۱/۱	۰/۷۹	۰/۸۵	۰/۸۱	۵۰
کادمیوم (mg/kg)	۰/۲۶	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۱۴	۱

* اقتباس از سازمان حفاظت محیط زیست و سازمان ملی استاندارد ایران

تازه، تعداد شاخه ها، قطر ساقه اصلی و ارتفاع گیاه اندازه گیری شد. برداشت محصول ۶۰ روز پس از کاشت آغاز و به مدت ۳۰ روز ادامه یافت. در پایان آزمایشات، نتایج به دست آمده با استفاده از تحلیل واریانس یک طرفه در نرم افزار SPSS تجزیه و تحلیل شدند.

جدول ۱- سناریوی های انجام آزمایش در شرایط مختلف

نام محصول	شماره سناریو	تعداد تکرار	مشخصات نمونه
بادمجان	۱	۳+۱	خاکی عاری از مواد آلی
	۲	۳+۱	خاک با ۲۰ درصد لجن خشک
	۳	۳+۱	خاک با ۴۰ درصد لجن خشک
گوجه	۴	۳+۱	خاکی عاری از مواد آلی
	۵	۳+۱	خاک با ۲۰ درصد لجن خشک
	۶	۳+۱	خاک با ۴۰ درصد لجن خشک
فلفل	۷	۳+۱	خاکی عاری از مواد آلی
	۸	۳+۱	خاک با ۲۰ درصد لجن خشک
	۹	۳+۱	خاک با ۴۰ درصد لجن خشک

نتایج و بحث

تحلیل میزان بهبود حاصل خیزی خاک

pH

این پژوهش بر اهمیت pH در تعیین فراهمی زیستی فلزات در خاک، به ویژه اشکال ناپایدار آن ها، تأکید دارد. به طور ایده آل، محصولات در خاک با pH بین ۶ و ۷ رشد می کنند، زیرا در این محدوده مواد مغذی در در دسترس ترین حالت قرار دارند. در این مطالعه، افزودن لجن، pH خاک را از ۶/۷۸ به ۶/۷ و ۶/۵ در تیمارهای ۲۰ و ۴۰ درصد لجن کاهش داد. با این حال، این تغییرات در سطح اطمینان ۹۵ درصد از نظر آماری معنی دار نبود، که نشان دهنده حداقل تأثیر لجن بر pH خاک است. pH لجن فاضلاب متغیر است اما به طور کلی بسته به فرآیند تصفیه و مواد افزودنی در محدوده کمی اسیدی تا خنثی قرار می گیرد. اغلب توصیه می شود pH خاک های اصلاح شده با لجن بالاتر از ۶/۵ حفظ شود (Henning et al., 2001). میانگین pH نمونه های لجن در این مطالعه ۶/۴ بود که نشان می دهد تثبیت بیشتر برای خاک هایی که بیش از حد اسیدی یا قلیایی نیستند، ضروری نمی باشد. (2014) Tiruneh در مطالعه ای نشان داد که pH نمونه های لجن معمولاً بین ۶ و ۷ متغیر است و این امر نشان می دهد که برای استفاده کشاورزی بدون تثبیت اضافی مناسب هستند. علاوه بر این، Iticescu et al. (2021) در بحث خود پیرامون استفاده از لجن فاضلاب به عنوان اصلاح کننده خاک، استفاده از



شکل ۱- مراحل فراوری لجن، آماده سازی خاک و کاشت گیاه (۱)- بستر خشک کردن لجن، ۲- فراوری فیزیکی لجن خشک، ۳- آماده سازی گلدان و پرورش گیاهان

دیگر، تنها بخش کوچکی از کل نیتروژن پس از استفاده از لجن فاضلاب به راحتی در دسترس گیاهان قرار می گیرد. با گذشت زمان و از طریق معدنی شدن، نیتروژن به اشکالی تبدیل می شود که گیاهان می توانند از آن استفاده کنند. این نتایج با سایر مطالعات که بر اهمیت استفاده متعادل از مواد مغذی برای سلامت مطلوب گیاه تأکید می کنند، مطابقت دارد (Angin et al., 2017; Roy et al., 2013).

در مطالعه حاضر، غلظت فسفر قابل جذب در لجن بسیار بیشتر از خاک است؛ لجن حاوی تقریباً $3/4$ گرم بر کیلوگرم فسفر است در حالی که این میزان در خاک نمونه حدود 13 میلی گرم بر کیلوگرم می باشد. هنگامی که لجن با نسبت 20 درصد در خاک مخلوط می شود، غلظت فسفر تقریباً 54 برابر افزایش می یابد و با نسبت 40 درصد لجن، حدود 102 برابر افزایش می یابد. این امر نشان دهنده فرصت استفاده از فسفر موجود در لجن به عنوان کود برای رشد گیاهان است. دسترسی فسفر تا حدودی به میزان تصفیه لجن بستگی دارد.

فسفر، با وجود اینکه یک ماده مغذی ضروری و پرنیاز برای گیاهان است، در خاک قابلیت تحرک کمی دارد. این نتیجه گیری با یافته های پژوهش های مشابه از جمله تحقیق (Roy et al., 2013) همسو است.

پتاسیم، آهن و منگنز

افزودن لجن به خاک با نسبت وزنی 20 و 40 درصد به طور معنی داری سطح پتاسیم را افزایش می دهد؛ به طوری که محتوای پتاسیم از حداقل 210 به 495 میلی گرم بر کیلوگرم در تیمار 20 درصد لجن و 798 میلی گرم در تیمار 40 درصد لجن افزایش می یابد. این افزایش به دلیل آن است که میزان پتاسیم لجن تقریباً هشت برابر بیشتر از خاک است. به طور مشابه، سطح آهن نیز با افزودن لجن به طور چشم گیری افزایش یافت. کمترین غلظت آهن ثبت شده $7/62$ میلی گرم بر کیلوگرم بود، در حالی که در تیمار 40 درصد لجن به $29/5$ میلی گرم بر کیلوگرم رسید. این نشان می دهد که استفاده از لجن می تواند به طور قابل توجهی محتوای آهن را در خاک بهبود بخشد. علاوه بر این، لجن سطح منیزیم را نیز افزایش می دهد که در کنار نیتروژن، فسفر و پتاسیم برای سلامت گیاه بسیار مهم است. شایان ذکر است که برخی خاک ها ممکن است با کمبود ریزمغذی هایی مانند منگنز مواجه باشند، به ویژه زمانی که pH خاک از $6/2$ فراتر می رود؛ زیرا قابلیت جذب این عنصر در شرایط قلیایی به طور محسوسی کاهش می یابد (Roy et al., 2013).

کلسیت و دولومیت را برای حفظ pH، کاهش تحرک فلزات سنگین و افزایش دسترسی مواد مغذی توصیه کردند. در مجموع، این یافته ها بر اهمیت مدیریت دقیق pH در کاربرد لجن به منظور به حداکثر رساندن دسترسی مواد مغذی و به حداقل رساندن خطرات محیط زیستی تأکید دارند.

ECe

نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن 20 و 40 درصد لجن به خاک، هدایت الکتریکی عصاره اشباع (ECe) آن را در سطح اطمینان 95 درصد به طور معنی داری تغییر نمی دهد. این امر نشان می دهد که غلظت نمک های محلول در خاک نیز تغییر قابل توجهی نکرده است. در نتیجه، انتظار نمی رود که پدیده پراکندگی یا تجمع ذرات رس در مقیاس قابل ملاحظه ای رخ داده باشد که بتواند بر خصوصیات هیدرولیکی خاک، به ویژه نفوذپذیری، تأثیر منفی بگذارد. افزایش EC خاک با استفاده از لجن عمدتاً به دلیل محتوای بالای نمک لجن است که می تواند مانع رشد گیاه شود.

کربن آلی

محتوای کربن آلی در نمونه های لجن $21/7$ گرم در کیلوگرم اندازه گیری شد، در حالی که این میزان در خاک نمونه تنها $3/11$ گرم در کیلوگرم بود. لجن مورد استفاده در این پژوهش که به صورت بی هوازی تا حدود زیادی هضم شده و تحت خشک کردن هوا قرار گرفته است، هنگام افزودن به خاک، پتانسیل مناسبی نشان می دهد. ترکیب لجن با نسبت وزنی 20 و 40 درصد به طور معنی داری سطح کربن آلی خاک را افزایش می دهد. این یافته ها با سایر تحقیقاتی که مزایای لجن فاضلاب را به عنوان اصلاح کننده خاک برجسته می کنند، همخوانی دارد و پتانسیل آن را برای غنی سازی پروفایل های مواد مغذی خاک و بهبود رشد گیاه نشان می دهد. در مطالعات مشابهی، اثر لجن فاضلاب بر رشد و ویژگی های بیوشیمیایی گوجه فرنگی و فلفل بررسی شده است (Casado-Vela et al., 2007; Eid et al., 2021). نتایج نشان داد که محتوای کربن آلی لجن فاضلاب به طور معنی داری بالاتر از خاک کشاورزی است، اگرچه دارای سطوح پایین تر پتاسیم و برخی مواد دیگر بود.

نیتروژن و فسفر

افزودن لجن به خاک با نسبت وزنی 20 و 40 درصد به طور معنی داری سطح نیتروژن را افزایش می دهد. محتوای نیتروژن از $0/08$ گرم بر کیلوگرم در خاک نمونه به $1/82$ گرم بر کیلوگرم با 40 درصد لجن رسید. این نشان می دهد که استفاده از لجن به طور قابل توجهی نیتروژن خاک را افزایش می دهد. از سوی

بررسی تأثیر بر رشد گیاه

نتایج این پژوهش نشان داد که لجن فرآوری شده فاضلاب می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر رشد گیاهان صیفی داشته باشد. این تأثیرات عمدتاً ناشی از مواد مغذی موجود در لجن، مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سایر عناصر ریزمغذی و همچنین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن است. مطابق مشاهدات از رشد سه گیاه کشت شده، استفاده از خاک مخلوط با لجن فرآوری شده می‌تواند به عنوان یک کود آلی عمل کرده و باعث افزایش رشد رویشی و زایشی گیاهان شود. شاخص‌های برداشت شده از رشد گیاهان در سناریوهای مختلف این پژوهش در جدول ۳ و شکل ۲ نشان داده شده است.

تعداد و وزن میوه‌ها

بر اساس جدول ۳، سه محصول کشت شده در خاک تیمار شده با ۴۰ درصد لجن بالاترین میزان میوه‌دهی را نشان دادند (برای بادمجان، گوجه و فلفل به ترتیب ۲۰/۳۳، ۲۲/۳۳ و ۲۴ عدد)، در حالی که گیاهان در خاک شاهد به طور متوسط به ترتیب ۸، ۲/۶۷ و ۳/۳۳ عدد میوه در هر گیاه تولید کردند. میوه‌های برداشت شده در پایان آزمایش وزن‌های متفاوتی داشتند. برای تیمار ۴۰ درصد لجن متوسط مجموع وزن میوه تولیدی در هر گیاه بادمجان، گوجه و فلفل به ترتیب ۱۹۵۷، ۷۵۲ و ۱۵۴۴ گرم، برای تیمار ۲۰ درصد لجن ۱۲۸۶، ۵۸۱ و ۹۵۰ گرم و برای گروه شاهد خاک ۱۹۰، ۵۳ و ۱۴۷ گرم مشاهده شد. همانطور که مشاهده می‌شود میزان میوه‌دهی در تیمارهای خاک با ۲۰ و ۴۰ درصد لجن نسبت به نمونه خاک شاهد به ترتیب ۷۲۲ و ۱۰۹۰ درصد افزایش داشته است. در تحقیقات مشابه، Nicholas et al. (2023) نشان دادند که استفاده از بیوپچار (زیست‌زغال) لجن مدفوع به طور معنی‌داری عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی را افزایش داده است. به گونه‌ای که پس از ترکیب بیوپچار با کود عملکرد ۲۹۸ درصد بیشتر از نمونه شاهد گردید، در حالی که بیوپچار به تنهایی عملکرد را ۱۰۶۰ درصد افزایش داد.

تعداد شاخه‌ها و قطر ساقه اصلی

تعداد شاخه‌ها شاخص مناسبی برای ارزیابی آبیاری مناسب، تغذیه معدنی و تولید زیست‌توده توسط گیاه است. در جدول ۴، بالاترین تعداد شاخه‌ها برای تیمار ۴۰ درصد لجن با میانگین ۱۰، ۲۰ و ۱۳ شاخه در هر گیاه بادمجان، گوجه و فلفل ثبت شده است. برای گیاهان در خاک شاهد، تعداد کمتری شاخه با میانگین ۳/۶۷، ۴/۳۳ و ۳/۳۳ شاخه در هر گیاه مشاهده شد. علاوه بر این میانگین قطر ساقه اصلی برای گیاهان رشد یافته در تیمارهای ۴۰ درصد، ۲۰ درصد و شاهد

به ترتیب ۱۶/۷۸، ۱۴ و ۶/۴۴ میلی‌متر است. برای افزایش رشد ساقه و ریشه، مواد مغذی موجود در لجن، به ویژه نیتروژن، نقش کلیدی ایفا می‌کنند. نیتروژن یکی از اجزای اصلی پروتئین‌ها و کلروفیل است و برای توسعه بافت‌های گیاهی، از جمله ساقه و برگ، ضروری می‌باشد. تأمین مناسب نیتروژن از طریق لجن می‌تواند منجر به افزایش طول و قطر ساقه و همچنین توسعه سیستم ریشه‌ای قوی‌تر و گسترده‌تر شود. ریشه‌های قوی‌تر قادر به جذب آب و مواد غذایی بیشتری از خاک هستند که این امر به نوبه خود به رشد بهتر قسمت‌های هوایی گیاه کمک می‌کند. علاوه بر نیتروژن، فسفر موجود در لجن نیز در توسعه سیستم ریشه‌ای نقش مهمی دارد و می‌تواند به استقرار بهتر گیاه در خاک کمک کند.

ارزیابی مخاطرات کاربرد لجن فاضلاب

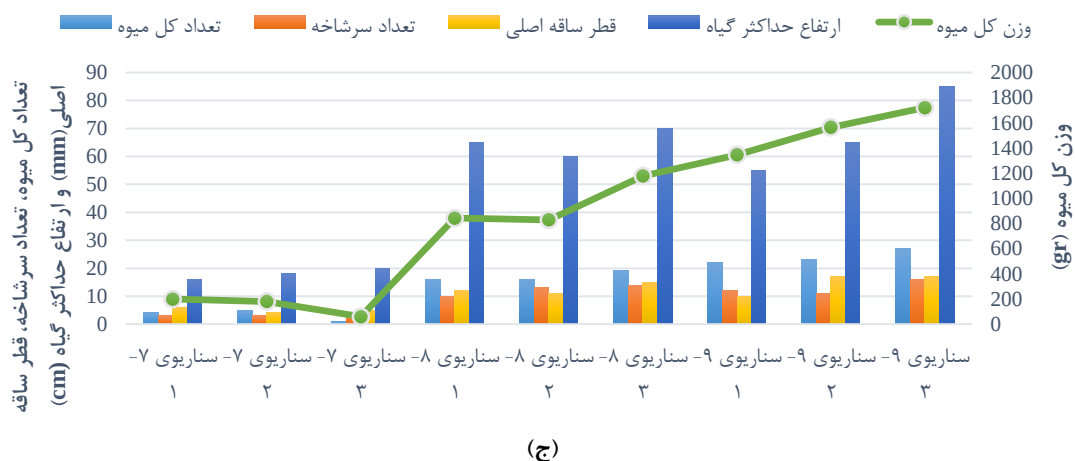
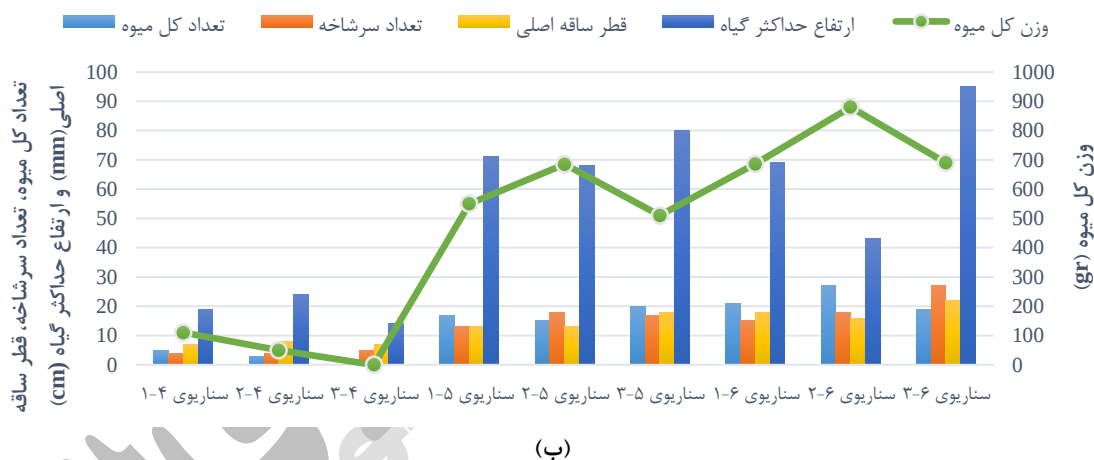
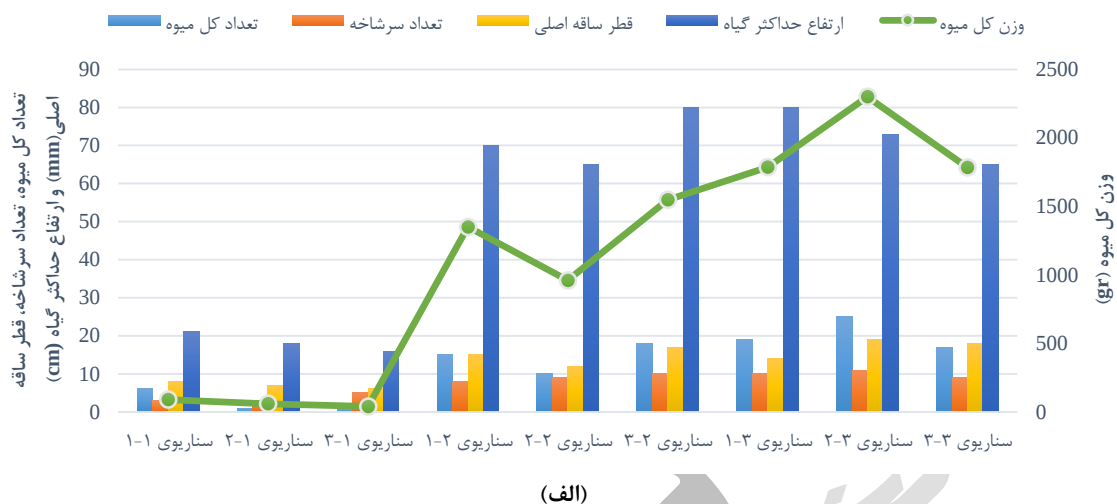
بنابر مطالعات پیشین، لجن فاضلاب ممکن است حاوی غلظت‌های متفاوتی از فلزات سنگین نظیر سرب، کادمیوم و آرسنیک باشد که قابلیت جذب توسط گیاهان را دارند و در بافت‌های خوراکی صیفی‌جات تجمع می‌یابند؛ به این ترتیب زنجیره غذایی انسان را آلوده ساخته و خطراتی چون سمیت مزمن، اختلالات عصبی و افزایش خطر سرطان را به دنبال دارند (Buta-Hubeny et al., 2021; Elgarahy et al., 2024). علاوه بر این، لجن تصفیه‌نشده یا با تصفیه ناکافی می‌تواند حاوی عوامل بیماری‌زای مختلف از جمله باکتری‌ها، ویروس‌ها، انگل‌ها و تخم انگل‌ها باشد که با انتقال به صیفی‌جات، سبب بروز بیماری‌های عفونی در مصرف‌کنندگان می‌گردند (Iticescu et al., 2021).

فلزات سنگین

در این مطالعه وجود روی، مس، کادمیوم و سرب به عنوان فلزات سنگین موجود در لجن فاضلاب به منظور ارزیابی سمیت بالقوه آن برای استفاده کشاورزی بررسی شد. لجن سطوح پایین‌تری از روی و مس را نشان داد، در حالی که کادمیوم و سرب در مقایسه با نمونه‌های خاک در میانگین‌های بالاتری یافت شدند. قابل توجه است که افزودن لجن فاضلاب محتوای روی خاک را کاهش داد. در ابتدا، میزان روی ۲/۳۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود و پس از افزودن ۲۰ درصد لجن به ۱/۹ میلی‌گرم و با افزودن ۴۰ درصد لجن بیشتر به ۱/۸ میلی‌گرم کاهش یافت. با این حال، این تغییرات در سطح اطمینان ۹۵ درصد از نظر آماری معنی‌دار نبود. سطح مس نیز با افزودن لجن کاهش یافت، اما تنها کاهش در تیمار ۴۰ درصد لجن از نظر آماری معنی‌دار بود. سطح سرب در خاک از ۳/۰۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ۲/۵ میلی‌گرم پس از افزودن ۲۰ درصد لجن و بیشتر به ۱/۹ میلی‌گرم با افزودن ۴۰

۱/۴ میلی گرم بر کیلوگرم) باقی ماندند. در حالی که روی، نیکل و مس در غلظت‌های بالا می‌توانند برای گیاهان مضر باشند، در لجن مورد استفاده در این مطالعه در سطوح پایینی قرار داشتند و خطر کمی برای کاربردهای کشاورزی ایجاد می‌کنند.

درصد لجن کاهش یافت، اما این تغییرات از نظر آماری معنی‌دار نبود. علاوه بر این، سطح کادمیوم با افزودن لجن افزایش یافت، به ویژه در سطح ۲۰ درصد در اولین آزمایش قابل توجه بود. نکته مهم این است که تمام غلظت‌های فلزات سنگین کمتر از حد مجاز EPA (به عنوان مثال، سرب در ۲/۸ و کادمیوم در



شکل ۲- مشخصات رشد گیاهان در تیمارهای مختلف، (الف) بادمجان، (ب) گوجه فرنگی، (ج) فلفل دلمه

بین ببرند. در مقابل، Hassan et al. (2023) گزارش کردند که در گوجه‌فرنگی‌های کشت‌شده در خاک‌های اصلاح‌شده با لجن، هیچ‌گونه باکتری بیماری‌زایی شناسایی نشد. این نتیجه حاکی از آن است که لجن فاضلاب تصفیه‌شده می‌تواند با اطمینان در فعالیت‌های کشاورزی به کار رود.

جدول ۳- تحلیل واریانس یک‌طرفه نمونه خاک تیمار شده با لجن فاضلاب

مقدار Pvalue		
تیمار ۲	تیمار ۱	خاک
۰/۷۲۹	۰/۱۱۲	۰/۱۷۱
۰/۸۰۴	۰/۳۰۹	۰/۴۱۸
۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۱
۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۹
۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۷
۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱
۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱
۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲۸
۰/۵۴۴	۰/۰۳۹	۰/۰۷۶
۰/۰۳۰	۰/۰۰۶	۰/۰۸۳
۰/۵۸۷	۰/۷۷۵	۰/۴۲۱
۰/۱۳۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۹

* مقادیر کمتر از ۰/۰۰۵ نشانگر معنی‌داری و مقادیر بالاتر نشانگر عدم معنی‌داری ارتباط متغیرها است.

جدول ۴- ارقام متوسط شاخص‌های رشد گیاهان مورد مطالعه

ویژگی	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
تعداد کل میوه (gr)	وزن کل میوه (gr)	تعداد سرشاخه اصلی (mm)	قطر ساقه اصلی (mm)	ارتفاع گیاه (cm)	متوسط
سناریوی ۱	۲/۶۷	۶۳/۳۳	۳/۶۷	۷/۰۰	۱۸/۳۳
سناریوی ۲	۱۴/۳۳	۱۲۸۶/۰۰	۹/۰۰	۱۴/۶۷	۷۱/۶۷
سناریوی ۳	۲۰/۳۳	۱۹۵۷/۰۰	۱۰/۰۰	۱۷/۰۰	۷۲/۶۷
سناریوی ۴	۲/۶۷	۵۳/۳۳	۴/۳۳	۷/۳۳	۱۹/۰۰
سناریوی ۵	۱۷/۳۳	۵۸۱/۶۷	۱۶/۰۰	۱۴/۶۷	۷۳/۰۰
سناریوی ۶	۲۲/۳۳	۷۵۲/۰۰	۲۰/۰۰	۱۸/۶۷	۶۹/۰۰
سناریوی ۷	۳/۳۳	۱۴۶/۶۷	۳/۳۳	۵/۰۰	۱۸/۰۰
سناریوی ۸	۱۷/۰۰	۹۵۰/۰۰	۱۲/۳۳	۱۲/۶۷	۶۵/۰۰
سناریوی ۹	۲۴/۰۰	۱۵۴۳/۰۰	۱۳/۰۰	۱۴/۶۷	۶۸/۳۳

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد لجن در سطوح ۲۰ و ۴۰ درصد، علاوه بر تأمین مواد مغذی ضروری مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم، به طور قابل توجهی شاخص‌های حاصل‌خیزی خاک را نیز بهبود بخشید.

برخلاف نتایج پژوهش حاضر، Schiptsova et al (2020) غلظت فلزات سنگین در لجن را فراتر از محدودیت‌های کشاورزی یافتند. اشکال متحرک فلزات مانند کادمیوم و سرب خطر آلودگی خاک را به همراه دارند که می‌تواند به عدم ورود فاضلاب صنعتی به شبکه فاضلاب و عدم کاربرد مواد شیمیایی در فرایند تصفیه‌خانه فاضلاب شهر تیران مربوط باشد. در راستای نتایج این پژوهش، Tiruneh (2014) نشان داد که غلظت فلزات سنگین در مخلوط‌های لجن کمتر از آستانه‌های نظارتی اروپا باقی مانده است که نشان‌دهنده خطر کمتر تجمع و آلودگی می‌باشد این نتایج متضاد بر اهمیت نظارت بر سطح فلزات سنگین در لجن قبل از استفاده از آن در کشاورزی تأکید دارد. البته با روش‌های می‌توان فلزات سنگین را در خاک تثبیت و از حرکت آنها به سمت گیاه جلوگیری کرد. Mirzaei et al., (2013).

عوامل بیماری‌زا

آزمایش‌های مربوط به وجود پاتوژن‌ها، روی عصاره محصولات کشت شده شامل گوجه‌فرنگی، بادمجان و فلفل دلمه‌ای انجام شد تا مشخص شود آیا آن‌ها با عوامل بیماری‌زا ناشی از لجن آلوده شده‌اند یا خیر. از آنجایی که لجن از تالاب لجن تصفیه‌خانه فاضلاب در فصل گرم برداشت می‌شود، بار میکروبی آن می‌تواند بیشتر از لجن برداشت شده در فصل سرد باشد. مقادیر آزمایش‌های میکروبیولوژیکی نشان می‌دهد که نمونه‌های خاک دارای بالاترین سطح کلی‌فرم مدفوعی و کلی‌فرم‌های کل هستند که به ترتیب ۵۸۳ و ۲۴۰ MPN در ۱۰۰ میلی‌لیتر اندازه‌گیری می‌شوند. این میزان بیش از دو برابر مقادیر اندازه‌گیری شده در خاک مخلوط با ۲۰ درصد لجن است. اگرچه افزودن لجن تا ۴۰ درصد، تعداد کلی‌فرم‌ها را افزایش می‌دهد، اما تیمار ۴۰ درصد لجن در نهایت به سطحی از این باکتری‌ها (۴۳۵ MPN در ۱۰۰ میلی‌لیتر) رسید که حدود ۲۵ درصد کمتر از خاک خالص بود. نکته قابل توجه است که تعداد تخم انگل‌ها در هر دو مخلوط خاک و لجن تقریباً صفر بود. Reddy et al. (2012) دریافتند که مواد ورمی کمپوست‌شده با Eichhornia crassipes و Parthenium hysterophorus تقریباً دو برابر لجن ساده میکروب دارند، اما هیچ E. coli شناسایی نشد که نشان‌دهنده کاهش پاتوژن‌ها است. به طور مشابه، Amoros et al. (2016) پروتوزوآهای بیماری‌زا را در لجن فاضلاب از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مختلف اسپانیا مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که ۸۶/۶ درصد از نمونه‌های لجن خام حاوی اووسیست‌های کریپتوسپوریدیوم و کیست‌های ژیاودییا هستند و فرآیندهای تثبیت نتوانستند به طور مداوم این پاتوژن‌ها را از

- 3- Ashraf, M., 2017. Persistent organic pollutants (POPs): a global issue, a global challenge. *Environmental science and pollution research international*, 24, pp.4223-4227. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5225-9>
- 4- Buta-Hubeny, M., Hubeny, J., Zieliński, W., Harnisz, M. and Korzeniewska, E., 2021. Sewage sludge in agriculture - the effects of selected chemical pollutants and emerging genetic resistance determinants on the quality of soil and crops-a review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 214, 112070. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112070>
- 5- Casado-Vela, J., Sellés-Marchart, S., Díaz-Crespo, C., Navarro-Pedreño, J., Mataix-Solera, J. and Gómez Lucas, I., 2007. Effect of composted sewage sludge application to soil on sweet pepper crop (*Capsicum annuum* var. *annuum*) grown under two exploitation regimes. *Waste management (New York, N.Y.)*, 27, pp.1509-1518. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.016>
- 6- Chimi, A., Martin, L., Guy Valerie, D., Nguetsop, V.-F. and Théophile, F., 2024. Treated Domestic Sewage as A Nutrient Source for Tomatoes (*Solanum Lycopersicum*) Growth and Yield in A Hydroponic System in Yaoundé – Cameroon. *Advances in Image and Video Processing*, 12, pp.338-352. <https://doi.org/10.14738/aivp.123.17104>
- 7- Christodoulou, A. and Stamatelatu, K., 2016. Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 73, pp.453-462. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.521>
- 8- Cucina, M., Nisi, P., Sordi, S. and Adani, F., 2021. Sewage Sludge as N-Fertilizers for Crop Production Enabling the Circular Bioeconomy in Agriculture: A Challenge for the New EU Regulation 1009/2019. *Sustainability*, 13.(23), 13165. <https://doi.org/10.3390/su132313165>
Edo, C., Gálvez Blanca, V., gonzalez pleiter, M., Fernández-Piñas, F., and Rosal, R., 2025. Microplastics in sewage sludge and municipal solid waste. *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection*, 13, pp. 219-243. <https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2024.10.001>
- 9- Eid, E., Shaltout, K., Alamri, S., Alrumman, S., Hussain, A., Sewelam, N. and Ragab, G., 2021. Sewage sludge enhances tomato growth and improves fruit-yield quality by restoring soil fertility. *Plant, Soil and Environment*, 67.(9), pp.514-523. <https://doi.org/10.17221/205/2021-PSE>
- 10- Elgarahy, A., Eloffy, M. G., Ak, P., Venkatraman, Y., Yang, Z., Al-wakeel, K. and López-Maldonado, E. A., 2024. Biosolids management and utilizations: A review. *Journal of Cleaner Production*, 451, 141974. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141974>
- 11- Feng, J., Burke, I., Chen, X. and Stewart, D., 2023. Assessing metal contamination and speciation in sewage sludge: implications for soil application and

نتایج نشان داد که غلظت‌های بالاتر لجن با افزایش معیارهای رشد گیاه، از جمله تولید کل میوه، ارتفاع گیاه و قطر ساقه، همبستگی مثبت دارد و بر اهمیت لجن به عنوان یک اصلاح‌کننده آلی غنی از مواد مغذی تأکید دارد. شایان ذکر است که این مطالعه نگرانی‌های مربوط به تجمع فلزات سنگین در خاک در منطقه مورد مطالعه را کاهش می‌دهد، زیرا سطوح مشاهده‌شده در محدوده‌ی مجاز قرار داشتند که ایمنی شیوه‌های کشاورزی مبتنی بر استفاده از لجن فرآوری‌شده‌ی فاضلاب را در این منطقه تضمین می‌کند. نکته‌ی حائز اهمیت این پژوهش، تأکید بر ضرورت جلوگیری از تخلیه فاضلاب صنعتی یا زهاب کشاورزی به شبکه‌ی جمع‌آوری فاضلاب شهری و همچنین استفاده از فرایندهای فیزیکی آگیری لجن بدون کاربرد پلیمرها و مواد شیمیایی است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق اصفهان، پژوهشگاه نیرو و شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان، به خاطر همکاری در این پژوهش، قدردانی می‌کنند.

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: هدایت و نظارت بر انجام آزمایش‌ها، تفسیر نتایج، نگارش و ویرایش نهایی مقاله
نویسنده دوم: انجام آزمایش‌ها

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- Amoros, I., Moreno, Y., Reyes Sosa, M., Moreno-Mesonero, L. and Alonso-Molina, J., 2016. Prevalence of *Cryptosporidium* oocysts and *Giardia* cysts in raw and treated sewage sludges. *Environmental Technology*, 37, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1168486>
- 2- Angin, I., Aslantaş, R., Gunes, A., Kose, M. and Ozkan, G., 2017. Effects of Sewage Sludge Amendment on Some Soil Properties, Growth, Yield and Nutrient Content of Raspberry (*Rubus idaeus* L.). *Erwerbs-Obstbau*, 59, pp.93-99. <https://doi.org/10.1007/s10341-016-0303-9>

- L.) Cultivar Micro-Tom. *Agronomy*, 13(5),1233. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051233>
- 23- Raducanu, D., Goldan, E., Rati, I., Henri, S., Voundi, S. and Lazar, I., 2021. The Use Of Sewage Sludge in Agriculture: A Swot analysis. *Studii Şi Cercetări de Fiziologie*, 24,(1), pp.1-9 .
- 24- Radwaniecka, E., Chwiałkowski, W., Mulkiewicz, E. and Kumirska, J., 2025. Impact of biochar from sewage sludge on vegetable growth and metal uptake: an example of radish and butterhead lettuce. *Nafta-Gaz*, 2, pp.117-127. <https://doi.org/10.18668/NG.2025.02.04>
- 25- Ramzanipour, M., Mousavi, S., and Forouhar Vajargah, M., 2023. An Overview of Municipal Wastewater and Sludge Treatment Process. *Ecology*, 2, pp.1-5. [In Persian]. <https://doi.org/10.19080/EOA.2023.02.555596>
- 26- Reddy, S., Akila, S. and Kale, R., 2012. Management of secondary sewage sludge by vermicomposting for use as soil amendment. *Glob. J. Biotechnol. Biochem*, 7, pp.13-18 .doi: 10.5829/idosi.gjbb.2012.7.1.61248
- 27- Roy, T., Singh, R., Biswas, D. and Patra, A., 2013. Effect of Sewage Sludge and Inorganic Fertilizers on Productivity and Micronutrients Accumulation by Palak (Beta vulgaris) and their Availability in a Typic Haplustept. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 61, pp. 207-218 .
- 28- Schiptsova, N., Larionov, G., Vasilyev, O., Fadeeva, N. and Terentyeva, M., 2020. Effect of sewage sludge application on heavy metals contamination in soil and carrot. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 604, 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/604/1/012034>
- 29- Sharma, L. D., Sarangthem, I., Thangjam, R., Sadhukhan, R., Oinam, N., et al., 2021. Sewage Sludge and Its Health Risk Assessment: Opportunities and Challenges, pp.205-225. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85226-9_10
- 30- Singh, R. and Agrawal, M., 2007. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of Beta vulgaris plants. *Chemosphere*, 67, pp.2229-2240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.019>
- 31- Tabatabaei, S.H., Nourmahnad, N., Golestani Kermani, S., Tabatabaei, S.A., Najafi, P. and Heidarpour, M., 2024. Urban wastewater reuse in agriculture for irrigation in arid and semi-arid regions A review. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 9(2), pp.193-220. [In Persian]. <https://doi.org/10.30486/ijrowa.2020.671672>
- 32- Tiruneh, A.T., 2014. Evaluation of the risk of heavy metals in sewage sludge intended for agricultural application in Swaziland. *International Journal of Environmental Sciences*, 5, pp.197-216. [In Persian]. <https://doi.org/10.6088/ijes.2014050100017>
- 33- Xiong, R., Gao, X., Tu, X., Mao, Y., Jiang, L., Zheng, L. and Du, Y., 2022. Heavy Metal Remediation in Sludge Compost: Recent Progress. *Journal of Renewable Materials*, 10, pp.469-486. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017226>
- environmental risk. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22, pp.1037 – 1058. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09675-y>
- 12- Hassan, F., Prasetya, K., Hanun, J., Bui, H., Rajendran, S., Kataria, N., Khoo, K. S., Wang, Y.-F., You, S.-J. and Jiang, J.J., 2023. Microplastic contamination in sewage sludge: Abundance, characteristics, and impacts on the environment and human health. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103176. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103176>
- 13- Henning, B., Snyman, H. and Aveling, T., 2001. Plant-soil interactions of sludge-borne heavy metals and the effect on maize (Zea mays L.) seedling growth .*Water SA*, 24(1), pp.71–78. <https://doi.org/10.4314/wsa.v27i1.5013>
- 14- Hua, S., 2025. Risk Assessment and Regulatory Overview of Sewage Sludge. *Applied and Computational Engineering*, 127, pp.200-215. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.20184>
- 15- Iticescu, C., Georgescu, L., Arseni, M., Adrian, R., Mihaela, T., Carp, G. and Cioca, L.I., 2021. Optimal Solutions for the Use of Sewage Sludge on Agricultural Lands. *Water*, 13, pp.1-16. <https://doi.org/10.3390/w13050585>
- 16- Khan, M., Al-Kabi, F., Al Said, F. and Al-Busaidi, A., 2014. Effect of Municipal Treated Sludge Compost on Cucumber (Cucumis sativus L.) Plant Growth and Yield .*International Agriculture Congress. Putrajaya, Malaysia*.
- 17- Kusvuran, A., Saruhan, V., Aydin, F. and Kokten, K., 2015. Effects of sewage sludge used as fertilizer on the yield and chemical contents of Lucerne (Medicago Sativa L.) and soil. *Fresenius Environmental Bulletin*, 24(3), pp.764-772 .
- 18- Ma, W., Sun, J., Hao, G., Lun, X. and Faridullah, F., 2016. Effects of Composted Sewage Sludge on Soil Properties and Vegetable Quality from Abandoned Quarries. *Journal of Residuals Science and Technology*, 13, pp.61-71. <https://doi.org/10.12783/issn.1544-8053/13/4/S9>
- 19- Mirzaei, S.M.J., Heidarpour, M., Tabatabaei, S.H., Najafi, P. and Heshami, S.H., 2013. Immobilization of leachate's heavy metals using soil-zeolite column. *Int J Recycl Org Waste Agricult*, 2, pp.1-20 [In Persian]. <https://doi.org/10.1186/2251-7715-2-20>
- 20- Fadaei Tehrani, M.R., Sayedbarzani, M. and Bagheri, H., 2025. Evaluating Treated Sewage Sludge as A Sustainable Fertilizer for Enhanced Tomato Growth. *J Plant Biol Crop Res*. 9(1), 1108. [In Persian]. <https://mail.meddocsonline.org/journal-of-plant-biology-and-crop-research/evaluating-treated-sewage-sludge-as-a-sustainable-fertilizer-for-enhanced-tomato.pdf>
- 21- Mokhtar, A., Mohd Zaini Makhtar, M., and Ahmad Mokhtar, A. M., 2022. Waste and Health: Sewage Sludge and Its Hazard to Human. *Waste Management, Processing and Valorisation*, pp. 135-158. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7653-6_8
- 22- Nicholas, L., Devine, A., Robertson, I., and Mabbett, I., 2023. The Effect of Faecal Sludge Biochar on the Growth and Yield of Tomato (Solanum lycopersicum