

Nutrient Recovery from Urban Municipal Sewage Sludge: Production of a Liquid Fertilizer and Investigation of its Physicochemical and Biological Properties

Mohamadreza Fadaei Tehrani¹ , Mehrdad Heydari² 

1. Corresponding Author, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Water, Niroo Research Institute (NRI), Isfahan, Iran, Email: mfadaei@nri.ac.ir
2. Department of Civil and Environmental Engineering, Daneshpajooan Pishro Higher Education Institute (DHEI), Isfahan, Iran, E-mail: heidarimehrdad100@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 9 August 2025

Received in revised form:
23 October 2025

Accepted: 26 October 2025

Available online:
16 December 2025

Keywords:

*Biological Sludge,
Liquid Fertilizer,
Nutrients,
Sustainable Development,
Waste Management.*

ABSTRACT

Objective: The principles of a circular economy and sustainable development emphasize the critical need for effective waste management, particularly for urban wastewater sludge. Although often viewed as a hazardous pollutant, this sludge is a rich source of essential nutrients for plants, presenting a significant opportunity for conversion into a valuable biofertilizer. This research aimed to address this challenge by presenting a comprehensive laboratory-scale investigation.

Method: In this research, dewatered sludge from the Tiran municipal wastewater treatment plant was subjected to alkaline hydrolysis, which involved chemical digestion using a 0.25 M sodium hydroxide solution. Following a controlled digestion period, the mixture was centrifuged to separate the solid residue from the nutrient-rich liquid fraction. The resulting liquid fertilizer was thoroughly characterized to assess its agricultural potential by meticulously measuring key physicochemical parameters (pH, EC, TOC, N, P, K), as well as quantifying micronutrients, heavy metals, and indicator pathogens in both the raw sludge and the final product. Finally, using sulfuric acid to adjust the high pH and potassium sulfate to enrich the low potassium content, a post-treatment step was implemented to optimize the fertilizer's quality and create a balanced nutrient profile.

Results: The alkaline hydrolysis process proved highly effective, yielding a liquid fertilizer with high concentrations of phosphorus and organic carbon. These components are crucial for enhancing soil fertility, improving soil structure, and stimulating microbial activity. Although the initial potassium concentration was found to be below the optimal level for plant growth, our post-processing step successfully enriched it to the desired range, thus demonstrating the feasibility of producing a complete and balanced fertilizer. Another significant finding of this research was the low concentration of both microbial load and heavy metals. Consequently, the final product met the stringent U.S. Environmental Protection Agency (EPA) Class A standards for pathogen safety, thereby ensuring its suitability for unrestricted use in agricultural applications.

Conclusions: This study successfully demonstrated a sustainable and effective solution for transforming urban wastewater sludge into a value-added liquid fertilizer. The developed method not only provides a viable pathway for the recovery of valuable nutrients but also ensures the production of an environmentally safe and agriculturally beneficial product. This approach contributes significantly to the development of sustainable agriculture by closing the nutrient loop and offers a reproducible model for urban waste management systems seeking to transition towards more circular and resource-efficient practices.

Cite this article: Fadaei Tehrani, M., & Heydari, M. (2025). Nutrient Recovery from Urban Municipal Sewage Sludge: Production of a Liquid Fertilizer and Investigation of its Physicochemical and Biological Properties, *Journal of Environmental Studies*, 51 (3), 335- 350. <http://doi.org/10.22059/jes.2025.400053.1008627>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/jes.2025.400053.1008627>

Introduction

Rapid population growth and urbanization have led to a significant increase in urban wastewater sludge. Although rich in valuable plant nutrients, this sludge poses a major environmental and economic challenge due to its content of pathogens, heavy metals, and persistent organic compounds. Traditional disposal methods like landfilling and incineration cause water/soil pollution and greenhouse gas emissions. Sustainable waste management increasingly focuses on nutrient recovery from sludge and its conversion into agricultural fertilizer. This strategy is a sustainable and cost-effective way to reduce waste volume, supply agricultural nutrients, and promote the closing of nutrient cycles. Producing liquid fertilizer is particularly effective due to its ease of application and rapid plant absorption. In arid regions like Isfahan, Iran, utilizing wastewater sludge is a compelling solution for agricultural nutrient supply.

Research in this field initially utilized physicochemical methods (chemical hydrolysis, thermal treatments) to release nutrients. Subsequent efforts included biological methods (fermentation) to decompose organics and reduce pathogens/odors. Current research focuses on hybrid and innovative techniques like ultrasound and electric fields to maximize extraction efficiency and product safety. Iranian studies have also confirmed the agricultural potential of wastewater sludge, stressing the need for continuous heavy metal monitoring. This research aims to produce and comprehensively characterize a liquid fertilizer from the biological sludge of the Tiran urban wastewater treatment plant. This study seeks to evaluate the sludge's potential as a fertilizer source, analyze the physicochemical and biological properties of the final product, and ultimately contribute to developing sustainable, local methods for sludge management and the production of efficient biofertilizers.

Method

This study aimed to produce a liquid fertilizer from biological wastewater sludge via an alkaline digestion process. All chemicals used were of laboratory-grade, and all experiments were performed in triplicate with the results analyzed using SPSS statistical software. Initially, 50 kg of biological sludge, which was gravity-dewatered after stabilization in lagoons at the Tiran urban treatment plant (processing only domestic wastewater), was collected. This sludge was then processed into a homogeneous powder by grinding, milling, and passing it through a 0.85 mm sieve.

The fertilizer production involved three steps. First, during alkaline hydrolysis, the powdered sludge was combined with a sodium hydroxide (NaOH) solution and stirred for 24 hours, alongside a control prepared with distilled water. Next, for liquid phase separation, the samples were centrifuged to isolate the raw liquid fertilizer from the solid residue. Finally, an enrichment step was completed by adding potassium sulfate (K₂SO₄) to address the detected potassium deficiency in the raw product.

The final liquid fertilizer was comprehensively characterized. Its physicochemical properties, including pH, electrical conductivity (EC), total organic carbon (TOC), and macro/micro-nutrient concentrations (N, P, K), were measured using standard methods and instruments such as a pH meter, spectrophotometer, and atomic absorption spectroscopy (AAS). To ensure product safety, heavy metal concentrations (e.g., lead, cadmium, and arsenic) were quantified using AAS and compared against international standards. Furthermore, the biological safety was assessed by determining the total microbial load, including counts of aerobic bacteria, fungi, and yeasts, as well as the enumeration of coliforms and *E. coli* for fecal contamination, using specific culture media.

Results

This study investigated the phytochemical and biological properties of a liquid fertilizer produced from Tiran urban wastewater sludge, confirming its high potential for agricultural use, provided nutrient enrichment and pH adjustment were performed.

Phytochemical Properties

The initial liquid fertilizer had a very high pH (~ 11.7) due to alkaline hydrolysis, but this was successfully reduced to 7.6 by adding sulfuric acid, a crucial step for improving nutrient availability. The high electrical conductivity (EC) of ~ 4.7 dS/m suggests a high concentration of soluble salts, requiring cautious application in saline-sensitive soils. Regarding nutrients, the raw fertilizer was rich in total organic carbon (TOC) and phosphorus but deficient in potassium, initially only 0.3 g/L. Enrichment with potassium sulfate successfully raised the potassium concentration to 53.7 g/L. Concentrations of micronutrients (Fe, Zn, Cu, Mn) were below optimal, indicating a need for further supplementation.

Heavy Metal Properties

The concentrations of harmful heavy metals (Pb, Cd, Zn, Cu) in the produced liquid fertilizer were significantly lower than national and international standards (e.g., US EPA and Iranian National Standard). For example, the lead concentration (~ 22 mg/L) was far below the Iranian minimum standard of 100 mg/kg. This safety is attributed to the domestic wastewater source, which lacks industrial pollutants, and the treatment process that avoided chemical dewatering agents like ferric chloride. These results confirmed that biological sludge from urban areas lacking industrial wastewater was a safe and valuable resource.

Biological Properties

Microbial analysis showed the alkaline hydrolysis process was highly effective in disinfection. The total count of aerobic bacteria drastically decreased from 1059 in the dry sludge to 98 in the liquid fertilizer, with coliforms and *E. coli* numbers similarly reduced. By meeting the stringent US EPA "Class A" safety criteria, the final product was safe for unrestricted agricultural use, including on food crops, minimizing the risk of disease transmission. This significant reduction in microbial load is directly attributable to the very high pH of the alkaline hydrolysis process.

Conclusions

This study comprehensively demonstrates that urban wastewater biological sludge is a valuable source for producing an organo-mineral liquid fertilizer. The research confirms the high potential of this process for nutrient recovery, enhancing hygienic safety, and reducing the environmental impact of wastewater sludge.

The produced liquid fertilizer possesses desirable physicochemical properties, being particularly rich in phosphorus and organic carbon. High phosphorus levels are crucial for root development and soil fertility, while the organic carbon content significantly enhances soil structure, improves water/nutrient retention, and stimulates beneficial microbial activity. To create a complete and balanced fertilizer, however, enrichment with key elements like potassium is essential. This research successfully addressed this deficiency by adjusting the pH with sulfuric acid and enriching the fertilizer with potassium sulfate, providing an effective solution. A key achievement is the confirmation of the fertilizer's hygienic safety. The alkaline hydrolysis process resulted in a significant reduction of the microbial load, including indicator pathogens like *E. coli*.

The final product meets the stringent US EPA Class A standards, ensuring its safety for unrestricted agricultural use, even for raw food crops, and minimizing the risk of disease transmission.

Author Contributions

Mehrdad Heydari: Data collection, **Mohammad Reza Fadaei-Tehran;** Research report preparation, Data analysis.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors

Acknowledgements

The authors would like to thank the Isfahan Provincial Water and Wastewater Company and the Tiran City Wastewater Treatment Plant Management for their valuable cooperation in providing access to sludge samples.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

The study was funded by the Power Research Institute (NRI).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

استخراج مواد مغذی از لجن فاضلاب شهری: تولید کود مایع و بررسی خواص فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی آن

محمدرضا فدائی تهرانی^۱✉، مهرداد حیدری^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه آب و محیط زیست، استادیار و عضو هیات علمی، پژوهشگاه نیرو، اصفهان، ایران، رایانامه: mfadaei@nri.ac.ir
۲. گروه عمران و محیط زیست، موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو، اصفهان، ایران، رایانامه: heidarimehrdad100@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: اصول اقتصاد چرخشی و توسعه پایدار بر نیاز حیاتی به مدیریت مؤثر پسماند، به ویژه لجن فاضلاب شهری، تأکید دارند. اگرچه این لجن اغلب به عنوان یک آلاینده خطرناک در نظر گرفته می شود، اما در واقع یک منبع غنی از مواد مغذی ضروری گیاهی است که فرصتی مهم برای تبدیل آن به یک زیست کود با ارزش فراهم می آورد. این پژوهش با هدف پرداختن به این چالش، به ارائه یک بررسی جامع در مقیاس آزمایشگاهی پرداخته است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵	روش: در این تحقیق، لجن آبگیری شده از تصفیه خانه فاضلاب شهری تبران تحت هیدرولیز قلیایی قرار گرفت. این فرآیند شامل هضم شیمیایی با استفاده از محلول هیدروکسید سدیم ۰/۲۵ مولار بود. پس از یک دوره هضم کنترل شده، مخلوط سانتریفیوژ شد تا بقایای جامد از بخش مایع غنی از مواد مغذی جدا گردد. کود مایع حاصل، تحت فرآیند مشخصه یابی کامل قرار گرفت تا پتانسیل کشاورزی آن ارزیابی شود. پارامترهای کلیدی فیزیکوشیمیایی (شامل pH، EC، TOC، و غلظت K، P، N)، ریزمغذی ها، فلزات سنگین و پاتوژن های شاخص، در لجن خام و محصول نهایی به دقت اندازه گیری شدند. علاوه بر این، غلظت ریزمغذی ها، فلزات سنگین و پاتوژن های شاخص در هر دو لجن خام و محصول مایع نهایی کمی سازی شدند. در نهایت، با استفاده از اسید سولفوریک برای تنظیم pH بالا و سولفات پتاسیم برای غنی سازی محتوای پتاسیم پایین، یک مرحله پس تصفیه برای بهینه سازی کیفیت کود و ایجاد یک پروفایل مغذی متعادل اجرا شد.
کلیدواژه ها: توسعه پایدار، کود مایع، لجن بیولوژیک، مدیریت پسماند، مواد مغذی.	نتایج: فرایند هیدرولیز قلیایی مؤثر عمل کرد و کود مایع با غلظت های بالایی از فسفر و کربن آلی تولید نمود. این اجزاء برای افزایش حاصلخیزی خاک، بهبود ساختار خاک و تحریک فعالیت میکروبی حیاتی هستند. اگرچه غلظت اولیه پتاسیم کمتر از سطح بهینه برای رشد گیاه بود، اما مرحله پس فراوری آن را به محدوده مورد نظر غنی سازی کرد و امکان پذیری تولید یک کود کامل و متعادل را به اثبات رساند. یافته مهم دیگر این پژوهش، غلظت پایین بار میکروبی و فلزات سنگین بود. به طوری که، محصول نهایی ایمنی میکروبی لازم بر مبنای استانداردهای سخت گیرانه کلاس A آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده (U.S. EPA) برای پاتوژن ها را برآورده کرد و بدین ترتیب ایمنی آن برای استفاده نامحدود در کاربردهای کشاورزی تضمین شد.
	نتیجه گیری: این مطالعه با موفقیت یک راه حل پایدار و مؤثر برای تبدیل لجن فاضلاب شهری به کود مایع با ارزش افزوده را نشان می دهد. روش توسعه یافته نه تنها یک مسیر ساده برای بازیابی مواد مغذی ارزشمند فراهم می کند، بلکه تولید یک محصول ایمن از نظر محیط زیستی و مفید از نظر کشاورزی را نیز تضمین می نماید. این رویکرد به طور قابل توجهی به توسعه کشاورزی پایدار از طریق بستن چرخه مواد مغذی کمک کرده و یک مدل قابل تکرار برای سیستم های مدیریت پسماند شهری ارائه می دهد که به دنبال انتقال به شیوه های چرخشی تر و کارآمدتر از نظر منابع هستند.
استناد: فدائی تهرانی، محمدرضا؛ و حیدری، مهرداد. (۱۴۰۴). استخراج مواد مغذی از لجن فاضلاب شهری: تولید کود مایع و بررسی خواص فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی آن. نشریه محیط شناسی، ۵۱(۳)، ۳۳۵-۳۵۰. http://doi.org/10.22059/jes.2025.400053.1008627	
ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.



مقدمه

با افزایش جمعیت و توسعه شهرنشینی، حجم تولید فاضلاب شهری نیز به طور چشمگیری افزایش یافته است (Alalayah et al., 2017; Tehrani & Besalatpour, 2024). تصفیه فاضلاب، اگرچه برای حفظ بهداشت عمومی و محیط‌زیست ضروری است، اما به تولید مقادیر قابل توجهی لجن بیولوژیک منجر می‌شود. این لجن، که محصول جانبی فرایند زیستی تصفیه فاضلاب است، حاوی طیف وسیعی از مواد آلی، معدنی و عناصر غذایی ضروری برای رشد گیاه است (Bratina et al., 2016). با این حال، به دلیل وجود پاتوژن‌ها، فلزات سنگین و ترکیبات آلی پایدار، دفع و مدیریت صحیح این پسماند به یکی از چالش‌های عمده محیط‌زیستی و اقتصادی در سراسر جهان تبدیل شده است (Junling et al., 2011). روش‌های سنتی دفع لجن، مانند دفن در زمین یا سوزاندن، اغلب با مشکلات محیط‌زیستی از جمله آلودگی آب و خاک، انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های بالا همراه هستند (Chen et al., 2021; Derco et al., 2024).

در سال‌های اخیر، رویکردهای نوین بر مبنای توسعه پایدار برای مدیریت لجن فاضلاب مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. یکی از امیدبخش‌ترین این رویکردها، بازیابی مواد مغذی از لجن و تبدیل آن به محصولات با ارزش افزوده بالا، به ویژه کودهای کشاورزی است (Botte et al., 2024; Chojnacka et al., 2023; Pöykiö et al., 2019). این استراتژی نه تنها به کاهش حجم پسماند و مسائل محیط‌زیستی ناشی از آن کمک می‌کند، بلکه می‌تواند منبعی پایدار و ارزان قیمت از مواد مغذی برای بخش کشاورزی فراهم آورد. تولید کود از لجن فاضلاب، علاوه بر صرفه‌جویی در منابع طبیعی و کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی، به بسته شدن چرخه مواد مغذی و ترویج کشاورزی پایدار نیز کمک می‌کند.

هدف اصلی این پژوهش، تولید کود مایع از لجن بیولوژیک فاضلاب شهری جوامع کوچک و بررسی جامع خصوصیات آن است. برای دستیابی به این هدف، پتانسیل لجن فاضلاب خروجی از تصفیه‌خانه فاضلاب شهری تیران به عنوان یک منبع پایدار برای تولید کود مایع مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، خصوصیات فیتوشیمیایی و بیولوژیکی کود تولیدی به دقت شناسایی و بررسی شد. ویژگی منحصر به فرد این پژوهش، استفاده از لجنی است که فاقد مواد شیمیایی (نظیر فاضلاب صنعتی یا پلیمرهای آبرگیری لجن) بوده و از یک جامعه کوچک (با جمعیتی کمتر از ۵۰ هزار نفر) جمع‌آوری شده است. علاوه بر این، در فرآیندهای آبرگیری و فرآوری اولیه لجن از روش‌های ساده و کم‌هزینه استفاده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به توسعه روش‌های پایدار و بومی برای مدیریت لجن فاضلاب و تولید کودهای زیستی کارآمد کمک کند که در نهایت منجر به افزایش حاصلخیزی خاک، بهبود عملکرد محصولات کشاورزی و توسعه پایدار در سطح منطقه و کشور خواهد شد.

پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی در زمینه استفاده از لجن فاضلاب به عنوان کود انجام شده است، ولی هنوز پتانسیل تولید کود مایع از لجن بیولوژیک، با توجه به سهولت کاربرد، جذب سریع توسط گیاهان و امکان غنی‌سازی با عناصر غذایی خاص، رویکردی نوین و مؤثر محسوب می‌شود (Hasan et al., 2024; Sugurbekova et al., 2023; Zhou et al., 2024). با توجه به چالش‌های محیط‌زیستی و اقتصادی ناشی از دفع لجن، تبدیل آن به محصولات با ارزش افزوده بالا، نظیر کودهای کشاورزی، به راهبردی پایدار تبدیل شده است. در دو دهه اخیر، محققان مختلفی در سطح ملی و بین‌المللی به بررسی جنبه‌های مختلف این موضوع پرداخته‌اند.

– مطالعات داخلی

در سال‌های اخیر، رویکردهای نوین بر مبنای توسعه پایدار برای مدیریت لجن فاضلاب مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. یکی از امیدبخش‌ترین این رویکردها، بازیابی مواد مغذی از لجن و تبدیل آن به محصولات با ارزش افزوده بالا، به ویژه کودهای کشاورزی است (Botte et al., 2024; Chojnacka et al., 2023; Pöykiö et al., 2019). این استراتژی نه تنها به کاهش حجم پسماند و مسائل محیط‌زیستی ناشی از آن کمک می‌کند، بلکه می‌تواند منبعی پایدار و ارزان قیمت از مواد مغذی برای بخش کشاورزی فراهم آورد. تولید

کود از لجن فاضلاب، علاوه بر صرفه‌جویی در منابع طبیعی و کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی، به بسته شدن چرخه مواد مغذی و ترویج کشاورزی پایدار نیز کمک می‌کند.

در ایران، با توجه به معضل مدیریت لجن فاضلاب به ویژه در شهرهای بزرگ، پژوهش‌های قابل توجهی در این حوزه صورت گرفته است. در سال ۲۰۲۳، نامداری و اتابکی در یک پژوهش دانشگاهی به تولید و مشخصه‌یابی کود مایع از لجن بیولوژیک فاضلاب شهری پرداختند. بر اساس نتایج ایشان، میزان نیتروژن کل، پتاسیم محلول و غلظت فلزات سنگین با افزایش مراحل استخراج کود مایع آلی از لجن کاهش یافت، در صورتی که میزان فسفر قابل جذب، میزان سدیم کل، pH و هدایت الکتریکی افزایش یافت (Atabaki, 2023). گودرزی و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به بررسی ترکیب شیمیایی لجن فاضلاب برخی شهرهای بزرگ ایران پرداختند و پتانسیل آن را برای استفاده در کشاورزی ارزیابی کردند. آن‌ها به وجود مقادیر قابل توجهی از عناصر غذایی در لجن اشاره کردند، اما بر لزوم پایش مداوم فلزات سنگین تأکید داشتند (Goodarzi et al., 2024). کوشافر و فدائی تهرانی (۲۰۲۴)، در پژوهشی به بررسی تأثیر کمپوست حاصل از لجن فاضلاب بر رشد گوجه‌فرنگی پرداختند و نتایج مثبتی را در خصوص جذب مواد غذایی، افزایش رشد گیاه و عملکرد تولید محصول گزارش کردند (Koushavar, 2024).

– مطالعات خارجی

در طول دهه‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای بر توسعه و بهینه‌سازی روش‌های تولید کود مایع از منابع مختلف، از جمله لجن فاضلاب، متمرکز شده است. در ابتدا، بسیاری از مطالعات بر روش‌های فیزیکی شیمیایی مانند هیدرولیز شیمیایی (اسیدی یا قلیایی) و تیمارهای حرارتی متمرکز بودند. هدف اصلی این روش‌ها، شکستن ساختارهای پیچیده آلی موجود در مواد اولیه و تبدیل عناصر غذایی به اشکال محلول و قابل دسترس برای گیاهان بود (Ge, 2017; Lovitt et al., 2012; Wang et al., 2014). به عنوان مثال، شیا و فریمن (۲۰۱۶) نشان دادند که بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیز قلیایی، مانند pH و زمان واکنش، می‌تواند به طور قابل توجهی حلالیت فسفر و نیتروژن را در کود مایع حاصل از لجن فاضلاب افزایش دهد (Shiba & Freeman, 2016). این تحقیقات پایه و اساس درک از آزادسازی مواد مغذی و قابلیت فراهمی زیستی آن‌ها را فراهم آورد.

با پیشرفت دانش بیوتکنولوژی، روش‌های بیولوژیکی نیز به سرعت جایگاه خود را در تولید کود مایع پیدا کردند. فرایندهای میکروبی مانند تخمیر بی‌هوازی و هضم هوازی، نه تنها به تجزیه مواد آلی و آزادسازی عناصر غذایی کمک می‌کنند، بلکه در کاهش بار پاتوژنی و بوی نامطبوع مواد اولیه نیز مؤثر هستند (Srivastava et al., 2020). کومار و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای بر جنبه‌های بیولوژیکی کودهای تولیدی از لجن، از جمله وجود میکروارگانیسم‌های مفید و پاتوژن‌ها، تمرکز کرده و روش‌هایی برای کاهش بار میکروبی پیشنهاد دادند (Kumar et al., 2023). علاوه بر این، پژوهش‌ها به سمت ترکیب روش‌های مختلف (هیبرید) نیز سوق پیدا کرده‌اند، به عنوان مثال، پیش‌تیمار حرارتی یا شیمیایی لجن برای افزایش کارایی فرایندهای بیولوژیکی بعدی. این رویکردهای ترکیبی، به دنبال حداکثرسازی استخراج مواد مغذی و در عین حال اطمینان از ایمنی و کیفیت محصول نهایی هستند (Tang et al., 2022).

تمرکز تحقیقات جدید طی چند سال گذشته، بر روش‌های نوآورانه و پایدارتر معطوف شده است. این روش‌ها شامل استفاده از تکنیک‌های پیشرفته مانند امواج فراصوت، میدان‌های الکتریکی (الکتروکینتیک)، و فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) است. هدف این تکنیک‌ها، تسریع در تجزیه مواد آلی و افزایش راندمان آزادسازی مواد مغذی با کاهش زمان فرآیند و مصرف انرژی کمتر است (Balkrishna et al., 2025; Zhou et al., 2024). آریامپا و همکاران (۲۰۲۵) در بررسی خود، تأثیر کود مایع حاصل از لجن فاضلاب را بر رشد و عملکرد چندین محصول زراعی ارزیابی کردند. یافته‌های آن‌ها حاکی از بهبود چشمگیر پارامترهای رشدی و عملکرد محصول در مقایسه با تیمارهای کنترل بود. با این حال، آن‌ها نیز به لزوم بررسی دقیق میزان فلزات سنگین و پاتوژن‌ها در کودهای تولیدی برای اطمینان از ایمنی محصولات کشاورزی اشاره کردند (Aryampa et al., 2025).

روش‌شناسی پژوهش

این مطالعه به‌صورت آزمایشگاهی و با هدف تولید کود مایع از لجن بیولوژیک فاضلاب از طریق فرآیند هضم قلیایی انجام شد. کلیه مواد شیمیایی استفاده شده در این تحقیق با خلوص بالا و از نوع گرید آزمایشگاهی از شرکت‌های معتبر تهیه گردید. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد و نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار در نرم‌افزار آماری SPSS به لحاظ معناداری مطابق بر مبنای شاخص P-value تجزیه و تحلیل گردید.

– فرآیند تولید کود مایع

لجن بیولوژیک خشک شده از بسترهای خشک‌کن تصفیه‌خانه فاضلاب شهری تیران، واقع در استان اصفهان، جمع‌آوری شد. این تصفیه‌خانه از سیستم لجن فعال برای تصفیه فاضلاب شهری استفاده می‌کند. مطابق شکل ۱، فرآیند تولید کود مایع شامل چهار گام اصلی بود:

گام اول) فراوری فیزیکی لجن: برای این مرحله پس از برداشت ۵۰ کیلوگرم لجن از بسترهای خشک‌کن، به منظور همگن‌سازی کامل، ابتدا لجن با استفاده از یک خردکن به ذرات کوچک‌تر تبدیل شده و از الک شماره ۱۰ (اندازه مش ۲ میلی‌متر) عبور داده شد. سپس ذرات عبور کرده مجدداً با استفاده از آسیاب پودر شده و از الک شماره ۲۰ (اندازه مش ۰/۸۵ میلی‌متر) عبور داده شدند تا پودری کاملاً یکنواخت برای آزمایش‌ها فراهم گردد.

گام دوم) هیدرولیز قلیایی: برای این مرحله، سوسپانسیونی با غلظت ۱۰ درصد (وزنی/حجمی) از لجن آماده شده با استفاده از ۱۰۰ گرم پودر لجن و ۱۰۰۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۲۵ مولار هیدروکسید سدیم تهیه شد (نمونه اصلی) (Namdari & Atabaki, 2023). نمونه دوم بدون افزودن NaOH و صرفاً با افزودن آب مقطر به عنوان نمونه شاهد مورد استفاده قرار گرفت. هر دو نمونه به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق و با استفاده از همزن مغناطیسی به طور مداوم هم زده شدند تا هیدرولیز کامل انجام گیرد. این فرآیند باعث شکستن ساختارهای آلی پیچیده و آزادسازی مواد مغذی از ماتریکس لجن می‌شود.

گام سوم) جداسازی فاز مایع: پس از هیدرولیز، هر دو سوسپانسیون به مدت ۲۴ ساعت ساکن گذاشته شدند تا فاز جامد ته‌نشین شود. سپس، برای جداسازی کامل فاز مایع از جامد، هر دو نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در دور ۵۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. فاز مایع بالایی به عنوان کود مایع خام جمع‌آوری و تفاله باقیمانده در ته ظرف دور ریخته شد.

گام چهارم) غنی‌سازی کود مایع: بر اساس نتایج تجزیه شیمیایی، غلظت پتاسیم در کود مایع خام کمتر از حد مطلوب تشخیص داده شد. بنابراین، pH نمونه اصلی با افزودن اسید سولفوریک تنظیم و سپس با افزودن سولفات پتاسیم (K_2SO_4)، غنی‌سازی تکمیلی آن با موفقیت انجام شد. این نمونه غنی‌شده به عنوان کود مایع نهایی در نظر گرفته شد.

– مشخصه‌یابی کود مایع

الف) خصوصیات فیزیکوشیمیایی: pH و هدایت الکتریکی (EC) کود مایع به ترتیب با استفاده از pH متر مدل Sension 3 pH Lab و HACH COMPANY EC متر مدل WTW GmbH D-82362 Wellheim Cond 3110 اندازه‌گیری شد. کربن آلی با آنالیزر Shimadzu TOC-L CSH/CSN تعیین گردید. غلظت عناصر غذایی ماکرو و میکرو شامل نیتروژن کل (Total N)، فسفر محلول (P_2O_5)، پتاسیم محلول (K_2O) سدیم (Na)، آهن (Fe)، روی (Zn)، مس (Cu) و منگنز (Mn) اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری نیتروژن کل از روش کجلدال، برای فسفر محلول از روش اسپکتروفتومتری و برای سایر عناصر فلزی، پس از هضم اسیدی نمونه (بر اساس روش EPA 200.7)، از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (AAS) مدل PerkinElmer AAnalyst 400 استفاده شد.

ب) فلزات سنگین: به منظور ارزیابی ایمنی محصول، غلظت فلزات سنگین مضر شامل سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، نیکل (Ni)، کبالت (Co) و آرسنیک (As) در کود مایع اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی به روش هضم اسیدی (بر اساس روش EPA 200.7) با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (AAS) مدل PerkinElmer AAnalyst 400 مورد آنالیز قرار گرفتند. نتایج با استانداردهای

بین‌المللی مربوط به کودهای آلی و لجن فاضلاب (مانند مقررات سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا EPA) مقایسه شد. (ج) خصوصیات بیولوژیکی: برای ارزیابی بار میکروبی و تضمین ایمنی بیولوژیکی، شمارش کل باکتری‌های هوازی مزوفیل با استفاده از محیط کشت پلیت کانت آگار (PCA) و شمارش کل قارچ‌ها و مخمرها با استفاده از محیط کشت ساپورو دکستروز آگار (SDA) انجام شد. همچنین، برای ارزیابی آلودگی مدفوعی، حضور و شمارش کلیفرم کل و اشریشیا کلی با استفاده از روش MPN^۱ و محیط‌های کشت اختصاصی لاکتوز برات و بویلون EC تعیین گردید.



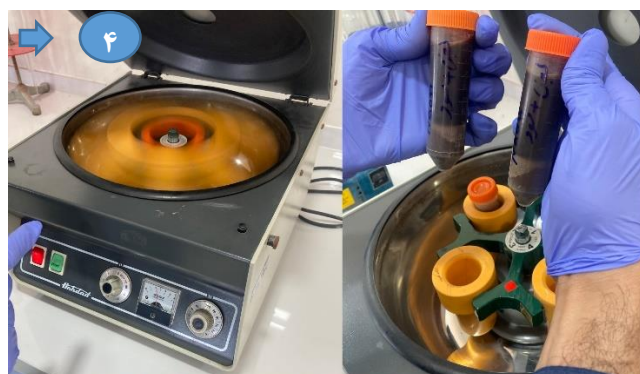
خرد کردن، آسیاب و یکنواخت‌سازی



آبگیر ثقلی و هضم لجن در تصفیه‌خانه تیران



هضم قلیائی لجن



سائریفیوز و جداسازی کود مایع

شکل ۱. فرایند پردازش و فراوری لجن و تولید کود مایع در این پژوهش

یافته‌های پژوهش و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از مشخصه‌یابی فیتوشیمیایی و بیولوژیکی کود مایع تولید شده از لجن بیولوژیک فاضلاب شهری تیران ارائه شده است. این نتایج در سه بخش اصلی شامل ریزمغذی‌های مفید، عناصر فلزی سنگین و بار میکروبی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

— خصوصیات فیتوشیمیایی

جدول ۱، مقادیر مواد مغذی کلیدی برای رشد گیاهان را بر اساس نتایج تجزیه فیتوشیمیایی برای سه نمونه، لجن خشک اولیه، کود مایع

1. Most Probable Number

اولیه (نمونه ۱) و کود مایع غنی‌شده (نمونه ۲)، نشان می‌دهد. همچنین، محدوده‌های مطلوب برای هر یک از این مواد مغذی برای استفاده در کشاورزی به عنوان مرجع ارائه شده است. ارقام و محدوده‌های مطلوب ارائه شده، بر اساس بهترین شیوه‌های کشاورزی و توصیه‌های تخصصی در زمینه تغذیه گیاهی و کشاورزی گلخانه‌ای از منابع معتبر علمی مختلف استخراج و جمع‌آوری شده‌اند (Grobela et al., 2023; Zaib et al., 2024). این مقادیر، به عنوان استانداردهای اجباری قانونی تلقی نمی‌شوند، بلکه به عنوان محدوده‌های بهینه برای دستیابی به بالاترین کیفیت و عملکرد محصول در شرایط گلخانه‌ای هدف‌گذاری شده‌اند.

جدول ۱. خصوصیات فیتوشیمیایی کود مایع حاصل از لجن فاضلاب شهری (میانگین $\pm$ انحراف معیار، n=3)

دامنه مطلوب	مقدار اندازه‌گیری شده			واحد	متغیر
	کود مایع (نمونه ۲)	کود مایع (نمونه ۱)	لجن خشک		
۱/۵ - ۳/۰	$4/1 \pm 0/6$	$4/71 \pm 0/4$	۲/۱۲	dS/m	هدایت الکتریکی (EC)
۵/۵ - ۶/۵	$7/6 \pm 0/2$	$11/7 \pm 0/2$	۶/۴	-	pH
۵۰ - ۱۵۰	$33/1 \pm 0/9$	$32/4 \pm 1/8$	۲۱/۷	g/L	کربن آلی کل (TOC)
۳۰ - ۷۰	$2/2 \pm 0/6$	$1/2 \pm 0/1$	۴/۲۸	g/L	نیترژن کل (Total N)
۱۰ - ۳۰	$7/9 \pm 0/4$	$8/9 \pm 0/5$	۳/۴	g/L	فسفر کل (Total P)
۴۰ - ۸۰	$53/7 \pm 0/8$	$0/03 \pm 0/5$	۱/۷	g/L	پتاسیم (K)
۵۰۰ - ۱۵۰۰	119 ± 16	125 ± 10	۶۰	mg/L	آهن (Fe)
۵۰ - ۲۰۰	34 ± 5	31 ± 3	۰/۸۷	mg/L	روی (Zn)
۲۰ - ۱۰۰	16 ± 4	12 ± 1	۰/۱۳	mg/L	مس (Cu)
۱۰۰ - ۵۰۰	93 ± 6	88 ± 2	۱۱۵	mg/L	منگنز (Mn)

الف) تأثیر pH و EC بر کیفیت کود: همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، pH کود مایع اولیه (نمونه ۱) با مقدار $11/7 \pm 0/2$ بسیار قلیایی است. این امر به دلیل ماهیت قلیایی فرایند هیدرولیز قلیایی با سدیم هیدروکسید است. چنین pH بالایی می‌تواند منجر به رسوب برخی ریزمغذی‌ها، کاهش جذب عناصر توسط ریشه گیاه و حتی آسیب به ریشه‌ها شود. برای حل این مشکل، در نمونه ۲، با افزودن اسید سولفوریک، pH به $7/6 \pm 0/2$ تعدیل یافت. این کاهش، اگرچه در مقایسه با محدوده مطلوب (۵/۵ - ۶/۵) هنوز بالاتر است، اما یک گام مهم برای افزایش دسترسی گیاه به مواد مغذی است. کاهش بیشتر pH با افزایش مقدار بیشتر اسید سولفوریک امکان‌پذیر است.

هدایت الکتریکی (EC) نمونه ۱ نیز با مقدار $4/71$ dS/m نسبتاً بالا بود که نشان‌دهنده غلظت بالای نمک‌های محلول (مانند نمک‌های آمونیومی) و مواد مغذی است. این EC بالا، اگرچه در محدوده قابل قبول برای برخی از کودهای مایع قرار دارد، می‌تواند در خاک‌های شور یا در غلظت‌های بالا، باعث ایجاد تنش اسمزی برای گیاهان و کاهش جذب آب شود. افزودن اسید سولفوریک در نمونه ۲، تغییر چندانی در EC ایجاد نکرد ($4/1 \pm 0/6$ dS/m)، که این موضوع نیاز به مدیریت دقیق میزان مصرف این کود در خاک‌های حساس به شوری را نشان می‌دهد.

ب) غنی‌سازی عناصر مغذی: نتایج نشان داد که کود مایع تولیدی از نظر کربن آلی کل (TOC)، نیترژن کل (Total N) و فسفر کل (Total P) غنی است. مقادیر (۳۲/۴ g/L) TOC و فسفر (۸/۹ g/L) در نمونه ۱ به ترتیب در محدوده‌های قابل‌توجهی قرار دارند. با این حال، غلظت نیترژن کل (۱/۲ g/L) نسبت به محدوده مطلوب پایین بود. فسفر یکی از حیاتی‌ترین عناصر برای فرآیندهای متابولیکی، انتقال انرژی (به شکل ATP) و توسعه ریشه است. مقادیر بالای فسفر در این کود، آن را به گزینه‌ای مناسب برای بهبود

حاصلخیزی خاک و تحریک رشد ریشه تبدیل می‌کند. کربن آلی نیز نقش مهمی در بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی و همچنین تحریک فعالیت میکروبی مفید خاک ایفا می‌کند.

با این حال، نتایج نمونه ۱ نشان داد که این کود از نظر برخی ریزمغذی‌ها و به‌ویژه پتاسیم (K)، دچار کمبود است. غلظت پتاسیم تنها 0.3 g/L بود که بسیار پایین‌تر از محدوده مطلوب ($80 - 40 \text{ g/L}$) است. پتاسیم برای تنظیم تعادل اسمزی، فعال‌سازی آنزیم‌ها، سنتز پروتئین و مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی ضروری است. برای رفع این کمبود، در نمونه ۲ با افزودن سولفات پتاسیم، غلظت پتاسیم به 53.7 g/L افزایش یافت که نشان‌دهنده موفقیت این روش غنی‌سازی است.

علاوه بر این، غلظت ریزمغذی‌های حیاتی مانند آهن (Fe)، روی (Zn)، مس (Cu) و منگنز (Mn) اگرچه در مقادیر قابل‌توجهی در کود مایع حضور داشتند، اما در مقایسه با محدوده‌های مطلوب، نیاز به غنی‌سازی بیشتر دارند. این ریزمغذی‌ها در فرآیندهای کلیدی بیوشیمیایی گیاه نقش کاتالیزوری دارند و کمبود آن‌ها می‌تواند منجر به اختلال در رشد و کاهش عملکرد محصول شود.

خصوصیات فلزات مضر

فلزات سنگین موجود در لجن فاضلاب می‌توانند برای محیط‌زیست و سلامت انسان خطرآفرین باشند. از این‌رو، بررسی غلظت این عناصر در کود مایع تولیدی از اهمیت بالایی برخوردار است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین (شامل روی، مس، سرب و کادمیوم) در نمونه‌های مختلف لجن و کود مایع در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. خصوصیات فلزات سنگین کود مایع حاصل از لجن فاضلاب شهری تیران (میانگین $\pm$ انحراف معیار، $n=3$)

متغیر	واحد	مقدار اندازه‌گیری شده		
		لجن خشک	کود مایع نمونه ۱	کود مایع نمونه ۲
روی (Zn)	mg/L	9 ± 4	31 ± 3	34 ± 5
مس (Cu)	mg/L	3 ± 6	12 ± 1	16 ± 4
سرب (Pb)	mg/L	7 ± 9	22 ± 1	18 ± 2
کادمیوم (Cd)	mg/L	5 ± 3	8 ± 2	9 ± 4

اگرچه یک استاندارد جهانی واحد برای «حد مجاز فلزات سنگین در کودهای مایع» وجود ندارد، اما می‌توان با مقایسه نتایج به‌دست آمده با استانداردهای مربوط به لجن فاضلاب قابل استفاده در کشاورزی (جدول ۳)، پتانسیل ایمنی و کاربردی این کود را ارزیابی کرد. این استانداردها، که توسط سازمان‌های معتبری مانند اتحادیه اروپا (دستورالعمل EEC278/86)، آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده (EPA Part 503 Rule) (US) و استاندارد ملی ایران (استاندارد INSO 22967 با موضوع جامدات زیستی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری - ویژگی‌ها و پایش) تدوین شده‌اند، هدفشان جلوگیری از تجمع این فلزات در خاک، ورود به زنجیره غذایی و آسیب به سلامت انسان و اکوسیستم است. این مقادیر معمولاً بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم (mg/kg) وزن خشک لجن بیان می‌شوند. در این پژوهش، با فرض چگالی تقریباً ۱ برای کود مایع تولیدی، مقادیر mg/L به طور مستقیم با مقادیر mg/kg مقایسه شده‌اند تا زمینه ارزیابی اولیه فراهم شود.

جدول ۳. حدود مجاز فلزات سنگین در کودهای کشاورزی مطابق استانداردهای مختلف

(منبع: EEC278/86، US EPA Part 503 Rule، استاندارد INSO 22967)

عنصر	حدود مجاز (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک لجن)		
	اتحادیه اروپا	آمریکا	استاندارد ایران
روی (Zn)	$4000 - 2500$	$10000 - 7500$	چندصد تا چندهزار
مس (Cu)	$1750 - 1000$	4300	چند صد
سرب (Pb)	$1200 - 750$	$1000 - 840$	$150 - 100$
کادمیوم (Cd)	$40 - 50$	85	$5 - 1$

مقایسه نتایج جدول ۲ با محدوده‌های مجاز در جدول ۳ نشان می‌دهد که غلظت فلزات سنگین در کود مایع تولیدی از لجن فاضلاب شهری تیران، به طور قابل توجهی کمتر از استانداردهای سختگیرانه ملی و بین‌المللی است. به عنوان مثال، غلظت سرب در کود مایع (حدود ۲۲ mg/L) بسیار پایین‌تر از حداقل استاندارد ایران (۱۰۰ mg/kg) و سایر استانداردهای بین‌المللی است. همین روند برای روی، مس و کادمیوم نیز مشاهده می‌شود. این یافته، یکی از مهم‌ترین مزیت‌های کود تولیدی را نمایان می‌سازد. این نتایج در تضاد با برخی از مطالعاتی است که غلظت بالای فلزات سنگین در لجن فاضلاب را گزارش کرده‌اند (Balkrishna et al., 2025; Dadrasnia et al., 2021). می‌توان این تفاوت را به دو عامل کلیدی زیر مرتبط دانست:

الف) منبع فاضلاب عاری از آلاینده‌های صنعتی: همان‌طور که ذکر شد، منبع اصلی لجن در شهر تیران فاضلاب خانگی است. فقدان صنایع بزرگ فلزی، آبکاری، یا صنایع شیمیایی در این منطقه، از ورود مقادیر بالای فلزات سنگین به سیستم فاضلاب جلوگیری کرده است. این امر به طور مستقیم با غلظت بسیار پایین این فلزات در لجن اولیه و به تبع آن در کود مایع تولیدی مرتبط است.

ب) فرآیند تصفیه و عدم استفاده از مواد شیمیایی آلودگی: در برخی تصفیه‌خانه‌ها، از مواد شیمیایی مانند کلریدفریک یا سولفات آلومینیوم برای افزایش کارایی فرآیند آبگیری لجن استفاده می‌شود. این مواد می‌توانند باعث افزایش غلظت برخی فلزات سنگین در لجن نهایی شوند. عدم استفاده از چنین مواد شیمیایی در فرآیند تصفیه لجن در تصفیه‌خانه تیران، به حفظ کیفیت بالای لجن و جلوگیری از آلودگی احتمالی کمک کرده است.

این نتایج نشان می‌دهند که لجن بیولوژیک فاضلاب شهری مناطقی نظیر تیران که فاقد فاضلاب صنعتی است، می‌تواند به عنوان یک منبع ایمن و ارزشمند برای تولید کود مایع مورد استفاده قرار گیرد. این امر پتانسیل بالایی برای توسعه کشاورزی پایدار و مدیریت پسماند شهری در مناطق مشابه فراهم می‌کند.

خصوصیات بیولوژیکی

ارزیابی بار میکروبی لجن فاضلاب برای تضمین سلامت مصرف‌کنندگان و جلوگیری از انتشار پاتوژن‌ها حیاتی است. جدول ۴ نتایج حاصل از بررسی بیولوژیکی لجن خشک اولیه و کود مایع تولیدی را نشان می‌دهد. این نتایج شامل شمارش کلی باکتری‌های هوازی مزوفیل، قارچ و مخمر، کلیفرم‌های کل و اشریشیاکلی (E. coli) است.

جدول ۴. خصوصیات میکروبی کود مایع حاصل از لجن فاضلاب شهری تیران (میانگین $\pm$ انحراف معیار، n=3)

متغیر	واحد	مقدار اندازه‌گیری شده	
		لجن خشک	کود مایع - نمونه ۱
شمارش کل باکتری‌های هوازی مزوفیل	CFU/mL	1059 ± 25	98 ± 7
شمارش کل قارچ و مخمر	CFU/mL	101 ± 6	4 ± 3
کلیفرم کل	MPN/100mL	1650 ± 43	85 ± 6
اشریشیاکلی (E. coli)	MPN/100mL	870 ± 15	31 ± 5

نتایج نشان می‌دهد که فرآیند هیدرولیز قلیایی نقش بسیار مؤثری در کاهش بار میکروبی لجن داشته است. مقایسه لجن خشک اولیه با کود مایع (نمونه ۱) به وضوح این کاهش را تأیید می‌کند. به عنوان مثال، تعداد باکتری‌های هوازی مزوفیل از 1059 ± 25 به 98 ± 7 CFU/mL کاهش یافته است. این کاهش شدید نه تنها به افزایش ایمنی محصول کمک می‌کند، بلکه نشان‌دهنده اثربخشی فرآیند تولید کود مایع در از بین بردن پاتوژن‌هاست. برای تعیین ایمنی کود مایع تولیدی، مقایسه نتایج با استانداردهای بهداشتی بین‌المللی و ملی ضروری است. کلیفرم‌ها و به‌ویژه اشریشیاکلی (E. coli)، شاخص‌های اصلی آلودگی مدفوعی و وجود پاتوژن‌ها محسوب می‌شوند. استانداردهای آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (US EPA) لجن را بر اساس ایمنی به دو دسته کلاس A و کلاس B تقسیم می‌کند:

- استاندارد کلاس A (ایمن‌ترین): این استاندارد برای استفاده نامحدود، حتی برای محصولات خام، حد مجاز E. coli را کمتر از ۱۰۰۰ MPN/g وزن خشک تعیین می‌کند.

• استاندارد کلاس B (کاربردهای محدود): این استاندارد برای کاربردهایی که خطر کمتری برای سلامت انسان دارند، حد مجاز کلیفرم‌های مدفوعی را کمتر از ۲,۰۰۰,۰۰۰ MPN/g وزن خشک تعیین می‌کند.

با مقایسه نتایج پژوهش حاضر با این استانداردها، مشاهده می‌شود که تعداد E. coli در کود مایع (نمونه ۱) برابر با 5 ± 31 MPN/100mL است که با فرض این که چگالی کود مایع تقریباً برابر ۱ است (بنابراین MPN/g هم تقریباً همین مقدار است)، این مقدار بسیار کمتر از حد مجاز ۱۰۰۰ MPN/g برای کلاس A است. این نتیجه نشان می‌دهد که کود مایع تولیدی از لحاظ بهداشتی در رده کلاس A قرار می‌گیرد. این امر به این معنی است که کود تولیدی می‌تواند با اطمینان در طیف گسترده‌ای از کاربردهای کشاورزی، از جمله در مزارع محصولات غذایی، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، مطابق استاندارد ملی ایران با شماره ۲۲۹۶۷ مصوب ۱۴۰۰ با عنوان «جامدات زیستی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری - ویژگی‌ها و پایش»، کود مایع تولیدی در دسته P1 (تعداد بسیار کم عوامل بیماری‌زا با حداقل امکان رشد دوباره آنها) قرار دارد و کاربرد بدون محدودیت آن را مجاز می‌داند.

کاهش چشمگیر بار میکروبی، از جمله E. coli و کلیفرم‌ها، به دلیل اثر گندزدایی pH بسیار بالای فرایند هیدرولیز قلیایی است. قلیایی شدید ($pH > 11$) باعث تخریب دیواره سلولی و پروتئین‌های میکروارگانیسم‌ها شده و در نتیجه، آن‌ها را از بین می‌برد. این مکانیسم کلیدی، عامل اصلی رسیدن به استاندارد کلاس A است و پتانسیل بالای این فرآیند را برای تولید کودی ایمن و بهداشتی تأیید می‌کند. این یافته اهمیت به کارگیری فرآیندهای تثبیت مؤثر در مدیریت لجن فاضلاب را برای استفاده در کشاورزی پایدار دوچندان می‌کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

لجن بیولوژیک فاضلاب شهری، منبعی ارزشمند برای تولید یک کود مایع آلی - معدنی است و نتایج حاصل از این پژوهش، پتانسیل بالای فرایند مورد استفاده در تولید کود مایع را در زمینه بازیابی مواد مغذی، افزایش ایمنی بهداشتی، و کاهش اثرات محیط‌زیستی لجن فاضلاب تأیید می‌کند.

کود مایع تولیدی در این پژوهش، دارای خصوصیات فیتوشیمیایی مطلوبی است؛ به ویژه از نظر فسفر و کربن آلی غنی است. مقادیر بالای فسفر، که عنصری حیاتی برای توسعه ریشه و فرآیندهای متابولیکی گیاه است، این کود را به گزینه‌ای عالی برای تقویت حاصلخیزی خاک تبدیل می‌کند. همچنین، کربن آلی موجود در کود به بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی و تحریک فعالیت میکروبی مفید کمک شایانی می‌کند. این نتایج همخوانی کامل با مطالعات مشابه نظیر (Balkrishna et al., 2025; Namdari & Atabaki, 2023; Chojnacka et al., 2023) دارد. با این حال، به منظور دستیابی به یک کود کامل و بالانس‌شده، غنی‌سازی آن با عناصر کلیدی مانند پتاسیم ضروری است. در این پژوهش، تعدیل pH با اسیدسولفوریک و غنی‌سازی موفقیت‌آمیز کود با سولفات پتاسیم، راهکاری مؤثر برای رفع این کمبود ارائه می‌دهد.

یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این مطالعه، تأیید ایمنی بهداشتی کود تولیدی است. فرآیند هیدرولیز قلیایی منجر به کاهش چشمگیر بار میکروبی، از جمله پاتوژن‌های شاخص مانند اشریشیاکلی (E. coli) شد، به طوری که محصول نهایی با استانداردهای سختگیرانه کلاس A آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (US EPA) و درجه تثبیت P1 استاندارد شماره ۲۲۹۶۷ ایران، مطابقت دارد. این امر اجازه می‌دهد که کود با اطمینان خاطر در کشاورزی، حتی برای محصولات غذایی که به صورت خام مصرف می‌شوند، استفاده شود و خطر انتقال بیماری را به حداقل می‌رساند. به علاوه، نتایج نشان داد، عدم تخلیه فاضلاب صنعتی به شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهر تیران و استفاده نکردن از مواد شیمیایی در فرایند تصفیه فاضلاب و آبگیری لجن، تاثیر قابل‌توجهی در کاهش فلزات مضر داخل لجن داشته است.

در نهایت، این پژوهش فراتر از یک مطالعه موردی بوده و از نتایج آن می‌توان به عنوان یک الگو برای مدیریت پایدار پسماندهای زیستی و تبدیل آن‌ها به محصولات با ارزش افزوده بالا در جوامع کوچک بهره‌برداری نمود. تحقیقات آتی می‌تواند بر بهینه‌سازی بیشتر فرآیندهای غنی‌سازی، ارزیابی میدانی تأثیر این کود بر رشد و عملکرد گیاهان مختلف و بررسی اثرات بلندمدت آن بر خصوصیات

فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک تمرکز کند تا جایگاه آن به عنوان یک کود زیستی- معدنی کارآمد و سازگار با محیط‌زیست تثبیت شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

مهرداد حیدری: جمع‌آوری داده‌ها و انجام آزمایش‌ها، محمدرضا فدائی‌تهرانی: تهیه گزارش پژوهش، تحلیل داده‌ها

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی پژوهشگاه نیرو انجام شد.

سیاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان و مدیریت تصفیه‌خانه فاضلاب شهر تیران بابت همکاری ارزنده در دسترسی به نمونه‌های لجن تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

- نامداری، مریم و اتابکی، محمدرضا. (۱۴۰۳). تولید و بررسی خصوصیات کود مایع از لجن بیولوژیکی فاضلاب شهری. *مجله تحقیقات بهداشت محیط*، ۹(۲)، ۱۶۰-۱۶۸. <https://doi.org/10.22038/jreh.2023.66549.1528>
- فائزی رازی، دادمهر؛ کنعانی، شهیر؛ اختیارزاده، زهره؛ امیرنژاد، رضا؛ حسین‌زاده، وحید؛ و یوسفی‌صدر، سینا. (۱۴۰۰). جامدات زیستی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری - ویژگی‌ها و پایش. سازمان ملی استاندارد ایران، شماره ۶۶۹۲۲ چاپ اول، ICS: 13.060.30;13.030.020

References

- Alalayah, W., Demirbaş, A., & Edris, G. (2017). Sludge production from municipal wastewater treatment in sewage treatment plant. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 39. <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1283551>
- Aryampa, S., Stuetz, R., Fisher, R., Luo, J., & Wiedmann, T. (2025). Integrated recovery of nutrients during municipal wastewater treatment and biosolids management. *Journal of Cleaner Production*, 494, 144984. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144984>
- Balkrishna, A., Kaushik, P., Singh, S., Agrahari, P., Kumar, B., Kumar, P., & Arya, V. (2025). Potential Use of Sewage Sludge as Fertilizer in Organic Farming. *Cleaner Waste Systems*, 10, 100245. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100245>
- Botte, G., Donneys Victoria, D., Alvarez Pugliese, C. E., Adjei, J., Sahin, S., Wilson, N., Millerick, K., Hardberger, A., Furst, A., Hu, N., & Medford, A. (2024). Innovative Approach to Sustainable Fertilizer Production: Leveraging Electrically Assisted Conversion of Sewage Sludge for Nutrient Recovery. *ACS Omega*, 9. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c07926>
- Bratina, B., Sorgo, A., Kramberger, J., Ajdnik, U., Zemljic, L., Ekart, J., & Safaric, R. (2016). From municipal/industrial wastewater sludge and FOG to fertilizer: A proposal for economic sustainable sludge management. *Journal of Environmental Management*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.063>
- Chen, Y.-J., Wang, L.-P., & Babel, S. (2021). Sustainable Utilization of Sewage Sludge through the Synthesis of Liquid Fertilizer. *Sustainability*, 14, 387. <https://doi.org/10.3390/su14010387>
- Chojnacka, K., Skrzypczak, D., Szopa, D., Izydorczyk, G., Moustakas, K., & Witek-Krowiak, A. (2023). Management of biological sewage sludge: Fertilizer nitrogen recovery as the solution to fertilizer crisis. *Journal of Environmental Management*, 326, 116602. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116602>
- Dadrasnia, A., Muñoz, I., Hernandez, E., Uald Lamkaddam, I., Mora, M., Ponsá, S., Ahmed, M., Argelaguet, L. & , Oatley-Radcliffe, D. (2021). Sustainable nutrient recovery from animal manure: A review of current best practice technology and the potential for freeze concentration. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128106. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128106>
- Derco, J., Gulasova, P., Legan, M., Zakhar, R., & Gotvajn, A. (2024). Sustainability Strategies in Municipal Wastewater Treatment. *Sustainability*, 16, 9038. <https://doi.org/10.3390/su16209038>
- Faezirazi, D.; Kanaani, Sh.; Ekhtiardzadeh, Z.; Hosseinzadeh, V. (1400). Municipal wastewater treatment plant biosolids- Specifications and Monitoring. National Standards Organization of Iran, No. 66922, First Edition. ICS: 13.060.30;13.030.020. [In Persian]
- Ge, S. (2017). Cultivation of the Marine Macroalgae Chaetomorpha linum in Municipal Wastewater for Nutrient Recovery and Biomass Production. *Environmental science & technology*, 51, 3558–3566. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06039>
- Goodarzi, H., Tehrani, M., Zadeh, S., Rezaei, H., Karimi, A., & Ostad-Ali-Askari, K. (2024). Investigation regarding assessment of potentially toxic elements (PTEs) contamination risk in Rasht city with emphasis on the two rivers, Goharroud and Zarjoub, Gilan province, Iran. *Sustainable Water Resources Management*, 10. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-01025-8>
- Grobelak, A., Calus-Makowska, K., Jasińska, A., Klimasz, M., Wypart-Pawul, A., Augustajtys, D., Baor, E., Sławczyk, D., & Kowalska, A. (2024). Environmental Impacts and Contaminants Management in Sewage Sludge-to-Energy and Fertilizer Technologies: Current Trends and Future Directions. *Energies*, 17, 4983. <https://doi.org/10.3390/en17194983>
- Hasan, M., Hasan, M. R., Khan, R., & Rashid, T. (2024). Sewage Sludge: Is It a Sustainable Fertilizer or a Source of Contaminants? In (pp. 101-131). https://doi.org/10.1007/978-3-031-58441-1_4
- Junling, N., Lei, L., & Binguo, Z. (2011). Study on the characteristics and utilization of urban sewage sludge. <https://doi.org/10.1109/CECNET.2011.5769440>
- Koushfar, M., & Fadaei Tehrani, M. (2024). The effect of vermicompost leachate and split root system of tomato on the growth and crop per drop. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 13(2). <https://doi.org/doi.org/10.57647/j.ijrowa.2024.1302.23>
- Kumar, V., Khan, M. S., Ghosh, P., & Kumar, V. (2023). Municipal Wastewater Sludge as a Sustainable Bioresource in Developed Countries. In (pp. 51-68). <https://doi.org/10.1201/9781003354765-5>
- Lovitt, R. B., Zacharof, M.-P., & Gerardo, M. (2012). *Nutrient recovery from sludge using filtration systems*.
- Namdari, M., & Atabaki, M. R. (2023). Production and characterization of liquid fertilizer from biological sludge of municipal wastewater. *Journal of Research in Environmental Health*, 9(2), 160-168. <https://doi.org/10.22038/jreh.2023.66549.1528> [In Persian]

- Pöykiö, R., Watkins, G., & Dahl, O. (2019). Characterisation of Municipal Sewage Sludge as a Soil Improver and a Fertilizer Product. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 26, 547-557. <https://doi.org/10.1515/eces-2019-0040>
- Shiba, N., & Freeman, N. (2016). Extraction and precipitation of phosphorus from sewage sludge. *Waste Management*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.031>
- Srivastava, V., Vaish, B., Singh, A., & Singh, R. (2020). Nutrient recovery from municipal waste stream: status and prospects. In (pp. 265-297). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820730-7.00015-X>
- Sugurbekova, G., Nagyzbekkyzy, E., Sarsenova, A., Danlybayeva, G., Anuarbekova, S., Kudaibergenova, R., Frochot, C., Acherar, S., Zhatkanbayev, Y., & Moldagulova, N. (2023). Sewage Sludge Management and Application in the Form of Sustainable Fertilizer. *Sustainability*, 15, 6112. <https://doi.org/10.3390/su15076112>
- Tang, Y.-F., Xie, H., Sun, J., Li, X., Zhang, Y., & Dai, X. (2022). Alkaline Thermal Hydrolysis of Sewage Sludge to Produce High-Quality Liquid Fertilizer Rich in Nitrogen-containing Plant-growth-promoting Nutrients and Biostimulants. *Water Research*, 211, 118036. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.118036>
- Tehrani, M., & Besalatpour, A. A. (2024). A combined landfarming-phytoremediation method to enhance remediation of mixed persistent contaminants. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33606-1>
- Wang, Y., Zheng, S.-J., Pei, L.-Y., Ke, L., Peng, D.-C., & Xia, S. (2014). Nutrient release, recovery and removal from waste sludge of a biological nutrient removal system. *Environmental Technology*, 35. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.920048>
- Zaib, M., Zubair, M., Aryan, M., Abdullah, M., Manzoor, S., Masood, F., & Saeed, S. (2023). A Review on Challenges and Opportunities of Fertilizer Use Efficiency and Their Role in Sustainable Agriculture with Future Prospects and Recommendations. 1-14.
- Zhou, X., Zhang, B., & Lingmei, L. (2024). From Waste to Resource: Assessing the Feasibility of Municipal Sludge as a Fertilizer from a Soil and Microbial Perspective. *Chemical Engineering Journal Advances*, 19, 100630. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.100630>