

Research Paper

Ecological Risk Evaluation of Sewage Sludge to Some Heavy Metals from Municipal Wastewater Treatment Plant in Southern Tehran

Yousef Reza Bagheri¹ Ahmad Golchin^{2*} Hamed Rezaei³ Leila Esmaeelnejad⁴

¹ Ph.D candidate, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran, Email: bagheriyo@yahoo.com

^{2*} Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran
Email: agolchin2011@yahoo.com

³ Associate professor, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
Email: rezaei_h@yahoo.com

⁴ Assistant professor, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
Email: esmaeelnejad.leila@gmail.com



10.22125/IWE.2024.428680.1775

Received:
December 6, 2023

Accepted:
July 7, 2024
Available online:
June 29, 2024

Keywords:
Environmental Risk,
Geoaccumulation Index,
heavy metals,
Nemerowsyntheticpollution
index, potential ecological
risk index

Abstract

This study investigates the pollution status and environmental risk posed by heavy metals in Sewage Sludge (SS) from the south Tehran wastewater treatment plant. Nine samples were collected and analyzed for Cu, Cr, Pb, As, Ni, Co, and Cd content. Concentrations of Cu (274 mg/kg), Cr (183 mg/kg), and Pb (100 mg/kg) exceeded authorized limits for C1 and C2 sludge grades. Environmental indicators assessed the risk associated with these metals. Single-factor indices (Geoaccumulation and potential ecological risk) identified Cu and Pb as the primary contributors to sludge pollution based on I_{geo} , while Cd and Cu were most responsible according to E_{r}^i . All stations received "low level of contamination" grades for Cr, Cu, and Pb based on the PI value index. Combined indices revealed slight pollution at all stations, as indicated by the Nemerow synthetic pollution index (PN). Potential ecological risk index (RI) indicated low risk for stations 5 and 6, and moderate risk for others. Comparison of combined indices showed differing risk classifications across stations, and trends between indices were not always consistent. High variability in SS composition across stations suggests that applying SS from the south Tehran plant as agricultural fertilizer or soil amendment is not generally recommended.

1. Introduction

Sludge, a byproduct of urban sewage treatment plants, is continuously accumulating, making appropriate disposal solutions essential. Current methods include ocean dumping, landfilling, incineration, and agricultural use. However, environmental safety concerns necessitate a comprehensive risk assessment before utilizing sewage sludge in any capacity. This research aims to: Investigate the current state of sewage sludge management in south Tehran. Measure heavy metal concentrations in sludge samples collected from different areas of the south Tehran treatment plant storage facility. Assess

* Corresponding author: Ahmad Golchin

Address: Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Email: agolchin2011@yahoo.com
Zanjan University, Zanjan, Iran.

the bio-environmental risks associated with utilizing this sludge on agricultural land.

2. Materials and Methods

Due to the large volume of deposited sludge, sampling was conducted on September 22, 2019, at the sludge depot of the south Tehran sewage treatment plant. Nine samples were collected from various locations within the depot, and a composite sample was created for further analysis. Sludge samples were air-dried at room temperature, sieved through a 0.5 mm mesh, and analyzed for various parameters. Heavy metals (Cu, Cr, Pb, Ni, As, Co, Cd, Fe, Zn): Microwave digestion with nitric acid (65%), hydrochloric acid (32%), and hydrofluoric acid (38-40%) followed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) using a PerkinElmer Optima 2100DV model. Nitrogen: Kjeldahl method. Carbon: Elemental analysis device (CHNSO). Phosphorus and potassium: Dry oxidation method. Cation exchange capacity (CEC): Ammonium acetate exchange method. Sludge acidity and electrical conductivity: Measured in a 1:5 (distilled water/sludge) ratio. Apparent specific gravity (ρ_b): Pycnometer method.

3. Results

The sewage sludge samples exhibited: Low specific gravity. No salinity. Alkaline pH. High carbon content (16.6%) and phosphorus content (>2%). These characteristics suggest potential for using the sludge to increase soil organic carbon and address phosphorus deficiencies in phosphorus-poor soils. The average heavy metal concentrations were (mg/kg): Cu (274), Pb (100), Cr (183.3), Ni (71.2), As (15.8), Co (5.32), and Cd (0.88). The Igeo values showed the following ranking for heavy metal contamination: Cu > Pb > Cd > Cr > As > Ni > Co. PN values for all stations exceeded 1, classifying the sludge as "low pollution," but indicating potential leaching of heavy metals into the environment, necessitating caution during agricultural application. Based on E_r^i values, the heavy metals were ranked in descending order of environmental risk: Cd > Cu > Pb > As > Ni > Cr > Co. RI values indicated the following risk ranking for the stations: 2 > 9 > 4 > 1 > 3 > 8 > 7 > 6 > 5. Stations 5 and 6 displayed low potential ecological risk (RI < 150), while stations 1, 2, 3, 4, 7, 8, and 9 exhibited medium risk (RI 150-300).

4. Discussion and Conclusion

The average concentrations of Cu, Cr, and Pb exceeded permissible limits for C1 and C2 grade sludge. Multi-element composite indices like PN and RI provide a more holistic assessment of heavy metal contamination. While most stations fell into the "low pollution" category for PN and "medium risk" category for RI, heavy metal management and reduction remain crucial for safe agricultural application. Notably, stations 5 and 6 demonstrated lower ecological risk compared to the others.

Analysis of sewage sludge samples from different stations revealed significant variation in quality, impacting both their characteristics and pollution risk assessment indicators. The stations exhibited a range of risk classifications, spanning from low to medium. Given this heterogeneity, formulating a universal recommendation for the use of sewage sludge as a fertilizer or soil amendment is not feasible.

Instead, meticulous evaluation of each individual sample is crucial before any potential application. This assessment should focus on determining whether the sludge meets the relevant standards for heavy metal concentrations and, if necessary, implementing appropriate techniques for heavy metal reduction.

5. Six important references

- 1) Abraham, G.M., and R.J. Parker. 2008 Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136, 227–238.
- 2) Hakanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach. *Water Research*, 14, 975–1001.

- 3) Iran's National Standards Organization, 2021. Biosolids in urban wastewater treatment plants - characteristics and monitoring. Standard 22967
- 4) Kendir, E., Kentel, E., and F.D. Sanin. 2015. Evaluation of heavy metals and associated health risks in a metropolitan wastewater treatment plant's sludge for its land application. *Hum. Ecological Risk Assessment. Int.* 21, 1631–1643.
- 5) Mazurek, R., Kowalska, J., Gałsiorek, M., Zadroz'ny, P., Józefowska, A., Zaleski, T., Kepke, W., Tymczuk, M., and K. Orłowska. 2017. Assessment of heavy metals contamination in surface layers of Roztocze National Park Forest soils (SE Poland) by indices of pollution. *Chemosphere*, 168, 839–850.
- 6) Xiao, Z.H., Yuan, X.Z., Leng, L.J., Jiang, L.B., Chen, X.H., Wu, Z.B., Peng, X., Zhang, J.C., and M.Z. Guang. 2016. Risk assessment of heavy metals from combustion of pelletized municipal sewage sludge. *Environmental Sciences Pollution. Res.* 23, 3934–3942.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to thank all staff members of the Soil and Water Research Laboratory Department for providing the necessary facilities to conduct the laboratory experiments for this PhD thesis.

ارزیابی خطر زیست‌محیطی لجن فاضلاب به برخی عناصر سنگین تصفیه‌خانه فاضلاب شهری جنوب تهران

یوسف‌رضا باقری^۱، احمد گلچین^{۲*}، حامد رضایی^۳، لیلا اسماعیل نژاد^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹

مقاله پژوهشی

چکیده

به منظور ارزیابی وضعیت آلودگی و خطر زیست‌محیطی برخی فلزات سنگین در لجن‌های تصفیه‌خانه فاضلاب شهری جنوب تهران، غلظت عناصر مس، کروم، سرب، آرسنیک، نیکل، کبالت و کادمیم در لجن فاضلاب تهیه شده از ۹ ایستگاه تصفیه‌خانه اندازه‌گیری شد. براساس مقادیر مجاز استاندارد مصرف جامدات زیستی، مقادیر میانگین مس (274 mg.kg^{-1})، کروم (183 mg.kg^{-1}) و سرب (100 mg.kg^{-1}) بیش از مقادیر مجاز برای لجن درجه C1 و دارای درجه C2 بودند. برای ارزیابی خطرات فلزات سنگین از شاخص‌های زیست‌محیطی استفاده شد. میانگین شاخص‌های تک عاملی زمین انباشتگی (Igeo) و ضریب خطر اکولوژیکی بالقوه (E_r^I) نشان داد که مس و سرب برای شاخص Igeo و کادمیم و مس برای ضریب E_r^I مهمترین فلزات تاثیرگذار در آلودگی لجن بودند. مقدار شاخص آلودگی تک عاملی (PI) کروم، مس و سرب کلیه ایستگاه‌ها در کلاس آلودگی کم قرار داشتند. از نظر شاخص‌های ترکیبی، شاخص آلودگی ترکیبی نمره (PN)، کلیه ایستگاه‌ها، کلاس آلودگی کم داشتند. شاخص خطر بالقوه اکولوژیکی (RI)، ایستگاه‌های ۵ و ۶، کم‌خطر و سایر ایستگاه‌ها دارای خطر متوسط بودند. مقایسه شاخص‌های ترکیبی نشان داد که ایستگاه‌های مختلف دارای کلاس‌های متفاوتی هستند و روند کلاسها در دو شاخص الزاما همراستا نیستند. با توجه به جامعیت شاخص RI می‌توان گفت لجن کلیه ایستگاهها بغیر از ۵ و ۶ دارای خطر متوسط می‌باشند. همچنین با توجه به کیفیت متفاوت نمونه‌های لجن فاضلاب، استفاده از لجن جنوب تهران به عنوان کود یا بهساز توصیه نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، خطر زیست‌محیطی، شاخص زمین انباشتگی، شاخص آلودگی ترکیبی نمره، شاخص خطر بالقوه اکولوژیکی

^۱ دانشجوی دکتری، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، پست الکترونیکی: bagheriyo@yahoo.com

^۲ استاد، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، پست الکترونیکی: agolchin2011@yahoo.com (نویسنده مسئول)

^۳ دانشیار، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج، کرج، ایران، پست الکترونیکی: rezaei_h@yahoo.com

^۴ استادیار، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج، کرج، ایران، پست الکترونیکی: esmaeelnejad.leila@gmail.com

مقدمه

لجن، محصول جانبی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری است که تولید روز افزون آن ارائه راهکارهای مناسب را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید (Li et al., 2015). تخلیه در اقیانوس‌ها و دریا، دفن، سوزاندن و مصرف در اراضی از جمله راه‌های دفع لجن به شمار می‌رود. پس از تخلیه در دریا، استفاده لجن فاضلاب در اراضی به عنوان ماده بهساز خاک و یا کود، به دلیل بالابودن مواد آلی، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سایر مواد مغذی به رایج‌ترین روش دفع تبدیل شده است (Kendir et al., 2015). در آمریکا، تقریباً ۶۰ درصد از لجن فاضلاب برای بهسازی خاک یا به عنوان کود استفاده می‌شود (Li et al., 2011). در کشورهای اتحادیه اروپا مانند فرانسه، بلژیک و بریتانیا بیش از ۵۰ درصد لجن به صورت کاربرد در زمین دفع می‌شود (Li et al., 2015). استفاده از لجن فاضلاب در اراضی کشاورزی می‌تواند ویژگی‌های خاک مانند pH، مواد آلی، مواد مغذی، تخلخل، پایداری خاکدانه‌ها، جرم مخصوص ظاهری و حفظ و حرکت آب در خاک را بهبود بخشیده و رشد و نمو گیاهان را افزایش دهد. لجن حاوی آلاینده‌های مختلف از جمله فلزات سنگین است که می‌تواند سبب آلودگی محیط‌زیست شود (Mazurek et al., 2017). فلزات سنگین به دلیل آسیب‌هایی که به سیستم خاک-گیاه وارد می‌کنند عامل محدودکننده‌ای در استفاده از لجن فاضلاب محسوب می‌شوند. هم‌چنین لجن ممکن است خطرات جدی برای سلامت انسان داشته باشد (Grotto et al., 2015). برای جلوگیری از این خطرات، چین، آمریکا، اروپا و برخی از کشورهای دیگر معیارهایی را برای غلظت فلزات سنگین در لجن فاضلاب مورد استفاده برای کاربردهای زمینی تعیین کرده‌اند. ارزیابی ریسک فلزات سنگین به ارزیابی خواص خطرناک این آلاینده‌های زیست‌محیطی و تخریب اراضی در معرض آنها می‌پردازد. برای ارزیابی خطر زیست‌محیطی فلزات سنگین در لجن فاضلاب، از شاخص‌های مختلفی همانند شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo)^۱، شاخص آلودگی تک عاملی (PI)^۲، شاخص آلودگی ترکیبی (PN)^۳ و شاخص خطر بالقوه

اکولوژیکی (RI)^۴ استفاده می‌شود (Birch, 2017). شاخص‌های مختلف بر جنبه‌های گوناگونی تمرکز دارند: شاخص زمین‌انباشتگی و شاخص آلودگی تک عاملی، هر دو بر سطوح تجمع هر یک از فلزات سنگین در نمونه‌ها بدون توجه به سمیت آنها تمرکز می‌کنند (Fatoba et al., 2016). شاخص آلودگی ترکیبی (PN) و شاخص خطر بالقوه اکولوژیکی (RI) که برای ارزیابی جامع خطرات زیست-محیطی استفاده می‌شوند، عوامل بیشتری را نسبت به مقدار کل فلزات سنگین در نظر می‌گیرند (Qin et al., 2016). شاخص آلودگی ترکیبی (PN) بر میانگین و حداکثر آلودگی فلزات سنگین تمرکز دارد (Kouidri et al., 2016) و شاخص خطر بالقوه اکولوژیکی (RI) سمیت فلزات سنگین را در نظر می‌گیرد (Müller, 1969; Xiao et al., 2016). به این ترتیب، آنها با هم، یک شاخص کلی برای ارزیابی ریسک ارائه می‌دهند (Müller, 1969; Kouidri et al., 2016). لجن فاضلاب حاوی ترکیبات مختلفی است که برای کشت گیاهان ضروری است. استفاده از لجن فاضلاب در اراضی نه تنها حاصلخیزی خاک را بهبود می‌بخشد، بلکه روش موثری برای دفع مقادیر انبوه لجن ارائه می‌دهد. برای استفاده از لجن فاضلاب به صورت ایمن از نظر زیست‌محیطی، باید ارزیابی ریسک اجرا شود. به عبارتی ارزیابی خطر زیست‌محیطی فلزات سنگین در لجن فاضلاب برای پیش‌بینی خطرات استفاده از آن در اراضی حیاتی است (Cole et al., 2001). این پژوهش با اهداف (الف) بررسی وضعیت لجن فاضلاب در جنوب تهران، (ب) اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در لجن فاضلاب جمع‌آوری شده از قسمت‌های مختلف محل انبارش در تصفیه‌خانه جنوب تهران، و (ج) ارزیابی خطر زیست‌محیطی فلزات سنگین در لجن فاضلاب برای استفاده در زمین‌های کشاورزی انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

موقعیت تصفیه‌خانه

تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران شامل ۸ واحد به منظور تصفیه بخشی از فاضلاب جمع‌آوری شده شهر تهران، برای تحت پوشش قراردادن جمعیتی معادل ۴ میلیون و

^۱ Geoaccumulation Index

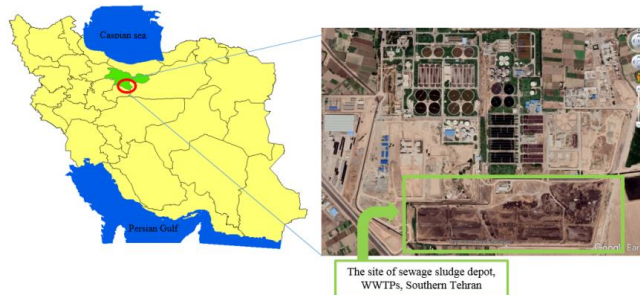
^۲ Pollution Index

^۳ Nemerow synthetic pollution index

^۴ Potential ecological risk index

کانال ورامین به شبکه آبیاری دشت ورامین منتقل می‌شود و برای آبیاری حدود ۹۰ هزار هکتار زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد (شرکت آب و فاضلاب استان تهران، ۱۴۰۲). موقعیت تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران در شکل ۱ نشان داده شده است

۲۰۰ هزار نفر در نظر گرفته شده است. مساحت زمین تصفیه‌خانه جنوب تهران برابر ۱۱۰ هکتار است و در جنوب غربی شهر ری قرار دارد. شش واحد این تصفیه‌خانه برای تحت پوشش قرار دادن جمعیتی معادل ۳ میلیون و ۳۵۰ هزار نفر با ظرفیت ورودی ۶۷۵ هزار مترمکعب در شبانه‌روز به بهره‌برداری رسیده است. پساب حاصل پس از تخلیه به



شکل (۱): موقعیت تصفیه‌خانه جنوب تهران و محل‌های دپوی لجن فاضلاب.

گیری شد. حد تعیین کمی (LOQ) در این روش برای سرب (≥ 2)، کادمیم (≥ 0.5)، مس ($\geq 1/5$)، آرسنیک (≥ 3)، کروم (≥ 2)، کبالت (≥ 2) و نیکل (≥ 2) میلی گرم در کیلوگرم تعیین گردید. مقادیر نیتروژن با استفاده از روش کج‌لدال و کربن با استفاده از دستگاه تجزیه عنصری (CHNSO)، فسفر و پتاسیم کل با استفاده از روش اکسایش خشک، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با استفاده از روش تبادل با استات آمونیوم اسیدیته لجن و هدایت الکتریکی در نسبت ۱:۵ (آب مقطر: لجن) و جرم مخصوص ظاهری (pb) با استفاده از روش پیکنومتر اندازه‌گیری شد (Jones, 2001).

شاخص‌های ارزیابی آلودگی فلزات سنگین

شاخص زمین انباشت (Igeo): این شاخص ابتدا به روش مولر (۱۹۷۹) برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در اندازه ۲ میکرون رسوبات (Birch, 2017) استفاده شد. از شاخص Igeo برای ارزیابی سطح آلودگی خاک، لجن و رسوب در مقایسه با غلظت زمینه یک عنصر در نمونه مورد مطالعه با غلظت آن در غلظت زمینه خاک استفاده شده و به صورت زیر تعریف شده است (رابطه ۱) (Suanon et al., 2017).

رابطه ۱:

نمونه‌برداری و تجزیه لجن فاضلاب

باتوجه به حجم عظیم لجن فاضلاب دپو شده نمونه‌برداری در تاریخ ۲۲ شهریور ۱۳۹۹ از محل دپو لجن فاضلاب تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران انجام شد. بدین منظور تعداد ۹ نمونه از نقاط مختلف محل دپوی تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران تهیه شد. بدین منظور در هر نقطه نمونه‌برداری، پنج زیرنمونه فرعی جمع‌آوری و با هم مخلوط و یک نمونه مرکب تهیه شد. این روش برای افزایش دقت و نماینده بودن نمونه‌ها انجام گردید. همچنین به منظور بررسی برخی ویژگی‌های لجن یک نمونه مرکب از ۹ ایستگاه تهیه شد. نمونه‌های لجن در دمای اتاق هوا خشک شده، و از الک ۰/۵ میلی‌متری رد شدند. سپس غلظت کل فلزات سنگین آلاینده مس، کروم، سرب، نیکل، آرسنیک، کبالت، کادمیم و عناصر ریز مغذی آهن و روی با استفاده از دستگاه ماکروویو و روش هضم با اسیدنیتریک ۶۵ درصد، هیدروکلریدریک اسید ۳۲ درصد و هیدروفلوریک اسید ۴۰-۳۸ درصد (ISO, 2001; Abraham, 2008) و بوسیله‌ی دستگاه طیف‌سنج پلاسمای جفت القائی ICP¹ مدل (Perkin Elmer Optima 2100DV) اندازه-

¹ Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer

رابطه ۳:

$$PN = \sqrt{(P_{i\text{ave}}^2 + P_{i\text{max}}^2) / 2}$$

که در آن PN شاخص آلودگی ترکیبی است. $P_{i\text{ave}}$ مقدار میانگین شاخص آلودگی تک عاملی فلز سنگین i ام است. $P_{i\text{max}}$ حداکثر مقدار شاخص آلودگی تک عاملی فلز سنگین i ام است که براساس مقادیر PN مربوطه به پنج سطح طبقه‌بندی می‌شود: ایمن (کمتر از ۰/۷)، هشدار آلودگی (بین ۰/۷-۱)، سطح آلودگی کم (۱-۲)، سطح آلودگی متوسط (۲-۳) و سطح آلودگی شدید (بیشتر از ۳). در این روش، شاخص آلودگی ترکیبی بر وضعیت کلی آلودگی ناشی از همه فلزات مورد بررسی تمرکز می‌کند. یعنی نه تنها میانگین شاخص آلودگی تک عاملی بلکه حداکثر مقادیر آن را نیز در نظر می‌گیرد (Guo et al., 2014).

ارزیابی خطرات اکولوژیکی بالقوه

شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه (RI) پیشنهاد شده توسط هاکانسون به طور گسترده‌ای در ارزیابی آلودگی فلزات سنگین استفاده می‌شود و معادلات محاسبه این شاخص به شرح زیر است (Hakanson, 1980) (رابطه ۴).

رابط ۴:

$$C_i^f = C_i^s / C_i^n$$

$$E_i^f = C_i^f \times T_i^f$$

$$RI = \sum E_i^f$$

که در آن C_i^f عامل آلودگی فلزی است. C_i^s غلظت فلز سنگین i ام در نمونه‌ها، mg.kg^{-1} است. C_i^n مقادیر زمینه فلز سنگین i ام (میانگین غلظت فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی ایران)، mg.kg^{-1} است. E_i^f ضریب خطر اکولوژیکی بالقوه است. T_i^f عامل واکنش سمی فلز است و بر اساس مطالعات هاکانسون، مقادیر T_i^f هر عنصر به شرح زیر است:

$$\text{Cr (2) < Cu (5) = Ni (5) = Co (5) = Pb (5) < As (10) < Cd (30)}$$

طبقه‌بندی آلودگی فلزات براساس ضریب خطر اکولوژیکی بالقوه (E_i^f) به شرح زیر است: کم خطر (کمتر از ۴۰)، خطر متوسط (۴۰-۸۰) خطر بالا (۸۰-۱۶۰)، ریسک خیلی زیاد (۱۶۰-۳۲۰) و ریسک بسیار زیاد (>۳۲۰)، طبقه بندی آلودگی‌های فلزی بر اساس شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه (RI) به شرح زیر است: کم خطر (کمتر از ۱۵۰)، خطر متوسط (۱۵۰-۳۰۰)، خطر زیاد (۳۰۰-۶۰۰)، خطر بسیار

$$I_{geo} = \text{Log}_2(C_n / 1.5B_n)$$

که C_n غلظت فلز سنگین در نمونه‌های لجن برحسب mg.kg^{-1} است. B_n غلظت زمینه است. در اینجا غلظت زمینه را برای فلزات سنگین از میانگین غلظت فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی ایران استفاده گردید که برای مس (۲۸/۱)، کروم (۸۸/۶)، سرب (۳۲/۳)، نیکل (۶۷/۷)، آرسنیک (۱۰/۸)، کبالت (۱۹/۹) و کادمیم (۰/۳۷) میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد (شهبازی و همکاران، ۱۴۰۱). ضریب ۱/۵ یک عامل ثابت برای تصحیح اثرات لیتوسفر است. براساس این شاخص خاک از نظر درجه آلودگی به هفت کلاس (غیر آلوده، کمتر از صفر، غیر آلوده تا کمی آلوده: ۱-۰، کمی آلوده: ۲-۱، کمی آلوده تا خیلی آلوده: ۳-۲، خیلی آلوده: ۴-۳، شدت آلوده: ۵-۴، به شدت آلوده: بیشتر از ۵) طبقه‌بندی می‌شود (Birch, 2017).

شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین

شاخص آلودگی تک عاملی (PI) برای ارزیابی حضور یک فلز سنگین منفرد، و سطوح آلودگی آن (رابطه ۲) تعریف شد.

$$PI = C_i / S_i$$

رابطه ۲:

که در آن PI شاخص آلودگی تک عاملی فلز سنگین مورد نظر است. C_i غلظت فلز سنگین i ام در لجن فاضلاب، بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم؛ S_i غلظت استاندارد فلز سنگین در خاک i ام بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم است. طبق استانداردهای سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران (بی‌نام، ۱۳۹۰) برای خاک‌های کشاورزی با pH بیشتر از ۷، مقادیر استاندارد متناظر (S_i) برای سرب، مس، نیکل، کروم، کادمیم، آرسنیک و کبالت به ترتیب ۷۵، ۲۰۰، ۱۱۰، ۱۱۰، ۵، ۴۰ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است.

وضعیت آلودگی فلزات سنگین بر اساس مقادیر PI مربوطه به پنج سطح طبقه‌بندی می‌شود: بدون آلودگی (کمتر از یک)، سطح آلودگی کم (بین ۱-۲)، سطح آلودگی متوسط (۲-۳)، سطح آلودگی قوی (۳-۵) و سطح بسیار قوی آلودگی (بیشتر از ۵) (Fatoba et al., 2016).

شاخص آلودگی ترکیبی نمره (PN) برای ارزیابی ترکیبی آلودگی فلزات سنگین استفاده شده است، و به طور گسترده برای منعکس کردن کیفیت و سطح آلودگی کل استفاده شده است. این شاخص به صورت زیر تعریف شده است (Hakanson, 1980) (رابطه ۳).

^۱ Potential ecological risk factor



زیاد (بیش از ۶۰۰) (Kouidri et al., 2016). همچنین در مقایسه با سایر روش‌های ارزیابی آلودگی فلزات سنگین، شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه عمدتاً به غلظت، نوع، کمیت، سمیت و حساسیت آلاینده‌های فلزی و غیره مرتبط است (Chen et al., 2003).

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لجن

نتایج ویژگی‌های عمومی نمونه مرکب لجن فاضلاب در جدول یک آمده است. نمونه لجن فاضلاب جرم مخصوص ظاهری کمی داشته، فاقد شوری بوده، پهاش قلیایی داشته و درصد کربن (۱۶/۶ درصد) و فسفر کل آن بسیار بالا (بیش از ۲ درصد) بود. لذا لجن فاضلاب می‌تواند بعنوان ماده‌ای برای افزایش کربن آلی خاک و تامین فسفر خاک در خاک‌های دچار کمبود فسفر استفاده شود. همچنین با توجه به میزان نیتروژن، آهن و روی آن می‌تواند بعنوان منبع تامین این عناصر برای رشد گیاه مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به سنگین را کاهش دهد

جدول (۱): ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لجن مورد مطالعه

واحد	g/cm ³	-	dS.m ⁻¹	%	mg/kg					
ویژگی	ρb	pH	EC	C	Ntotal	Ptotal	Ktotal	Fe total	Zn total	مقدار
	۰/۷۶	۷/۴۳	۱/۴	۱۶/۶۶	۲/۷۵	۲۰۴۰۰	۱۱۵۴۴	۱۹۴۰۱	۷۸۷	

غلظت فلزات سنگین در لجن فاضلاب

غلظت فلزات سنگین ۹ نمونه برداشت شده از ایستگاه‌های محل دپوی لجن فاضلاب جنوب تهران در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲): غلظت برخی فلزات سنگین (mg.kg⁻¹) در نمونه های لجن فاضلاب از ۹ ایستگاه دپوی تصفیه خانه جنوب تهران.

شماره ایستگاه نمونه برداری	کادمیم	کبالت	آرسنیک	نیکل	سرب	کروم	مس
۱	۰/۹	۴/۸	۱۸	۷۹	۹۵	۱۸۹	۲۹۵
۲	۰/۹۹	۵/۳	۱۸	۶۹	۹۸	۱۸۰	۲۶۷
۳	۰/۹۷	۵/۹	۱۶/۱	۶۵	۱۰۲	۱۸۱	۲۶۹
۴	۰/۹۹	۴/۸	۱۴/۶۳	۷۹	۹۷	۲۰۳	۲۶۹
۵	۰/۷	۵/۳	۱۵	۸۱	۸۷	۱۸۹	۲۸۰
۶	۰/۷۶	۵/۴	۱۵	۶۱	۱۰۳	۱۸۵	۲۵۹
۷	۰/۷۹	۵/۶	۱۶/۸	۶۵	۱۰۷	۱۸۳	۲۷۴
۸	۰/۸۴	۵/۹	۱۳	۷۱	۱۱۱	۱۸۰	۲۷۴
۹	۰/۹۸	۴/۹	۱۶	۷۱	۱۰۰	۱۶۰	۲۷۹
میانگین	۰/۸۸	۵/۳۲	۱۵/۸	۷۱/۲	۱۰۰	۱۸۳/۳	۲۷۴
بیشینه	۰/۹۹	۵/۹	۱۸	۸۱	۱۱۱	۲۰۳	۲۹۵
کمینه	۰/۷	۴/۸	۱۳	۶۱	۸۷	۱۶۰	۲۶۷
انحراف معیار	۲/۶۵	۲/۳	۲/۵	۶/۲۱	۸/۷۳	۵/۰۵	۵/۸۷

در جدول ۳ مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در لجن با مقادیر حدود مجاز آلودگی خاک (سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران، ۱۳۹۰) و استاندارد سازمان ملی استاندارد برای مصرف جامدات زیستی (استاندارد ۲۲۹۶۷ (بی نام، ۱۴۰۰) آمده است. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود غلظت فلزات سنگین در درجه C1 با حدود مجاز آن در خاک یکسان لحاظ شده است. درجه C1 بیانگر کیفیتی از لجن است که سختگیرانه بوده و بدون محدودیت می‌توان آنها را در کاربری‌های مختلف کشاورزی و باغداری، محوطه‌سازی و فضای سبز، جنگل کاری و احیای زمین و... استفاده نمود.

نتایج آنالیز نمونه‌های لجن نشان داد که غلظت میانگین فلزات سنگین مس، کروم و سرب لجن به ترتیب ۲۷۴، ۱۸۳/۳ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که از حدود ذکر شده در استاندارد لجن بالاتر است. بنابراین شرایط درجه C1 را ندارد. البته در مورد فلزات سنگین آرسنیک، کادمیم و نیکل کمتر از حدود مجاز ذکر شده در استاندارد بود.

در مقایسه غلظت فلزات سنگین با درجه C2 هیچکدام از فلزات سنگین محدودیتی نداشتند (جدول ۳). در درجه C2 غلظت مواد شیمیایی بیشتر از درجه C1 در نظر گرفته شده و برای استفاده ایمن آن نرخ و چگونگی کاربرد جامدات زیستی در اراضی بایستی مدیریت شود. یعنی برای استفاده از لجن بایستی تعداد دفعات استفاده و کیفیت خاک در محل استفاده کنترل شود. لذا بدین منظور بررسی اولیه برای لجن‌های مورد بررسی و شاخص‌های مختلف آن انجام گرفت.

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد مقدار میانگین فلزات سنگین مس (۲۷۴)، کروم (۱۸۳/۳)، سرب (۱۰۰)، نیکل (۷۱/۲)، آرسنیک (۱۵/۸)، کبالت (۵/۳۲) و کادمیم (۰/۸۸) میلی‌گرم در کیلوگرم در لجن بود. دامنه غلظت مس (۲۹۵-۲۶۷)، کروم (۱۶۰-۲۰۳)، سرب (۸۷-۱۱۱)، نیکل (۸۱-۶۱)، آرسنیک (۱۳-۱۸)، کبالت (۵/۹-۴/۸) و کادمیم (۰/۷-۰/۹۹) میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر بود.

از آنجایی که لجن فاضلاب از مناطق مختلف جمع‌آوری شد، غلظت فلزات سنگین متغیر و دارای دامنه نسبتاً وسیع با انحراف معیار زیاد بود. به نظر می‌رسد علیرغم برنامه‌ریزی‌های انجام شده در مراحل طراحی و اجرای سیستم‌های جمع‌آوری، فاضلاب شهری ناخواسته با مقادیری فاضلاب صنعتی، رواناب شهری و... همراه بوده است. صنایع فلزی باعث آلودگی محلی مس، روی، نیکل، کادمیم و کروم می‌شود (Yao et al., 2010). کادمیم نیز می‌تواند ناشی از صنایع الکترونیک باشد (Guo et al., 2014). آلودگی کروم می‌تواند ناشی از صنایع رنگ‌آمیزی، پوشش‌دهی، دباغی چرم و صنایع تولید سیمان باشد (Wu et al., 2015). ترافیک منبع مهمی در آلودگی سرب است (Yao et al., 2010). انتشار سوسپانسیون‌های سرب ناشی از بنزین از طریق رواناب وارد فاضلاب می‌شود (Harrison et al., 2003). فاضلاب‌های خانگی نیز می‌توانند در آلودگی فلزات سنگین نقش داشته باشند. استفاده از مواد شوینده حاوی آرسنیک یکی دیگر از دلایل آلودگی به این فلز است (Yao et al., 2010).

جدول (۳): مقایسه بین میانگین غلظت فلزات سنگین در لجن فاضلاب (بر حسب میلی گرم در کیلوگرم) با استاندارد ملی ایران برای جامدات زیستی (استاندارد ۲۲۹۶۷) و حدود مجاز آلودگی خاک سازمان حفاظت محیط زیست ایران

حدود مجاز آلودگی خاک سازمان حفاظت محیط زیست	استاندارد ملی ایران برای جامدات زیستی (استاندارد ۲۲۹۶۷)	میانگین غلظت در لجن (میلی گرم در کیلوگرم)	فلز سنگین
$pH \geq 7$	درجه C2 برای کاربرد جامدات زیستی در خاک‌های با $pH \geq 7$	درجه C1	
۴۰	۶۰	۴۰	آرسنیک
۱۱۰	۵۰۰	۱۱۰	کروم
۵۰	-	-	کیالت
۲۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰	مس
۱۱۰	۳۰۰	۱۱۰	نیکل
۵	۲۰	۵	کادمیم
۷۵	۷۵۰	۷۵	سرب

ایستگاه ۲، ۳، ۴، ۶، ۷، ۸، و ۹ بین ۱ تا ۲ بود که نشان می‌دهد سرب در این ایستگاه‌ها در سطح کمی آلوده می‌باشد. مقادیر Igeo مس در کلیه ایستگاه‌ها بین ۲ تا ۳ بود که نشان داد مس در کلیه ایستگاه‌ها در سطح کمی آلوده تا خیلی آلوده قرار داشت. با توجه به این نتایج مقادیر Igeo مس در کلیه ایستگاه‌ها و بعد از آن سرب، کادمیم و کروم در اغلب ایستگاه‌ها عامل تعیین کننده در آلودگی لجن می‌باشند و می‌توان نتیجه گرفت که مس بیشترین آلودگی را از لحاظ شاخص Igeo دارد. در لجن فاضلاب شهری، وجود مس و روی عمدتاً با خوردگی لوله‌های مسی و گالوانیزه مرتبط است و همچنین نتیجه استفاده از مکمل‌های غذایی، لوازم آرایشی یا داروها توسط انسان است (Yakameran and Aygün., 2021).

مقادیر شاخص زمین‌انباشتی برای فلزات سنگین در لجن فاضلاب

مقادیر Igeo برای هفت فلز سنگین در جدول ۴ آورده شده است. مقادیر میانگین Igeo، برای فلزات سنگین در نمونه‌های لجن به ترتیب $Cu > Pb > Cd > Cr > As > Ni > Co$ بود. مقادیر Igeo کیالت و نیکل در کلیه ایستگاه‌ها و آرسنیک (به جز ایستگاه‌های ۱، ۲ و ۷) کمتر از صفر بود. مقادیر منفی شاخص زمین‌انباشتی نشانگر عدم انباشتی ناشی از مصرف لجن و عدم خطر آلودگی می‌باشد. مقادیر Igeo کادمیم و کروم در کلیه ایستگاه‌ها، سرب در ایستگاه ۱ و ۵ و آرسنیک در ایستگاه ۱ و ۲ بین صفر و ۱ بودند، که نشان می‌دهد سطح آلودگی این فلزات در این ایستگاه‌ها از غیرآلوده تا نسبتاً آلوده متغیر است. مقادیر Igeo سرب در

جدول (۴): شاخص زمین‌انباشتی فلزات سنگین در لجن فاضلاب

شماره ایستگاه نمونه-برداری	کادمیم	آرسنیک	کروم	نیکل	کیالت	مس	سرب
۱	۰/۶۹	۰/۱۵	۰/۵	-۰/۳۶	-۲/۶	۲/۸	۰/۹۷
۲	۰/۸۳	۰/۱۵	۰/۴۳	-۰/۵۵	-۲/۴	۲/۶	۱/۰۱
۳	۰/۸۰	-۰/۰۰۸	۰/۴۴	-۰/۶۴	-۲/۳	۲/۶	۱/۰۷
۴	۰/۸۳	-۰/۱۴	۰/۶۱	-۰/۳۶	-۲/۶	۲/۶	۱/۰۱
۵	-۰/۳۳	-۰/۱۱	۰/۵۰	-۰/۳۲	-۲/۴	۲/۷	۰/۸۴
۶	۰/۴۵	-۰/۱۱	۰/۴۷	-۰/۷۳	-۲/۴	۲/۶	۱/۰۸
۷	۰/۵۰	۰/۰۵	۰/۴۶	-۰/۶۴	-۲/۴	۲/۷	۱/۱۴
۸	۰/۵۹	-۰/۳	۰/۴۳	-۰/۵۱	-۲/۳	۲/۷	۱/۱۹
۹	۰/۸۲	-۰/۰۱	۰/۲۶	-۰/۵۱	-۲/۶	۲/۷	۱/۰۴
میانگین	۰/۶۵	-۰/۰۳	۰/۴۶	-۰/۵۱	-۲/۵	۲/۷	۱/۰۴
بیشینه	۰/۸۳	۰/۱۵	۰/۶۱	-۰/۳۲	-۲/۳	۲/۸	۱/۱۹
کمینه	۰/۳۳	-۰/۰۰۸	۰/۲۶	-۰/۷۳	-۲/۶	۲/۶	۰/۸۴



انحراف معیار	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۱
--------------	------	------	------	------	------	------	-----

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین

مقادیر این شاخص، فلزات کادمیم، آرسنیک، نیکل و کبالت در کلاس بدون آلودگی قرار گرفتند.

با توجه به شاخص آلودگی ترکیبی نمره (PN)، ایستگاهها به ترتیب نزولی زیر بودند: $۴ < ۱ < ۵ < ۶=۷ < ۸=۳ < ۲$ ، و مقادیر PN برای همه ایستگاهها بیشتر از ۱ بود که نشان می‌دهد لجن فاضلاب در کلیه ایستگاهها در کلاس آلودگی کم قرار داشتند که از نظر انتشار فلزات سنگین به محیط زیست ایمن نبودند و در هنگام استفاده از لجن فاضلاب در زمین، توجه به مسائل آلودگی فلزات سنگین را می‌طلبد.

شاخص آلودگی تک عاملی (PI) فلزات سنگین در جدول ۵ خلاصه شده است. میانگین شاخص PI برای هفت فلز سنگین به ترتیب نزولی زیر بود: $Cr > Cu > Pb > Ni > As > Cd > Co$. بر اساس مقادیر PI، لجن فاضلاب در کلیه ایستگاهها به ترتیب از لحاظ کروم، مس و سرب در کلاس سطح آلودگی کم قرار داشت. همچنین در کلیه ایستگاهها از لحاظ

جدول (۵): نتایج شاخص آلودگی تک عاملی (PI) و شاخص آلودگی مصنوعی (PN) برای فلزات سنگین در لجن فاضلاب.

شماره ایستگاه نمونه برداری	کادمیم	آرسنیک	کروم	نیکل	کبالت	مس	سرب	PN
۱	۰/۱۸	۰/۴۵	۱/۷۲	۰/۷۲	۰/۰۹	۱/۴۷	۱/۲۶	۱/۳۵
۲	۰/۱۹	۰/۴۵	۱/۶۳	۰/۶۲	۰/۱	۱/۳۳	۱/۳۰	۱/۲۸
۳	۰/۱۹	۰/۴۰	۱/۶۴	۰/۵۹	۰/۱۱	۱/۳۴	۱/۳۶	۱/۲۹
۴	۰/۱۹	۰/۳۶	۱/۸۴	۰/۷۲	۰/۰۹	۱/۳۴	۱/۲۹	۱/۴۲
۵	۰/۱۴	۰/۳۷	۱/۷۲	۰/۷۳	۰/۱	۱/۴	۱/۱۶	۱/۳۴
۶	۰/۱۵	۰/۳۷	۱/۶۸	۰/۵۵	۰/۱	۱/۲۹	۱/۳۷	۱/۳۱
۷	۰/۱۵	۰/۴۲	۱/۶۶	۰/۵۹	۰/۱۱	۱/۳۷	۱/۴۲	۱/۳۱
۸	۰/۱۶	۰/۳۲	۱/۶۳	۰/۶۴	۰/۱۱	۱/۳۷	۱/۴۸	۱/۲۹
۹	۰/۱۹	۰/۴۰	۱/۴۵	۰/۶۴	۰/۰۹	۱/۳۹	۱/۳۳	۱/۱۶
میانگین	۰/۱۷	۰/۳۹	۱/۶۷	۰/۶۵	۰/۱	۱/۳۷	۱/۳۳	۱/۳۱
انحراف معیار	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۱	۰/۰۶	۰/۰۰۸	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۷

کاهشی طبقه بندی شدند: $Cd > Cu > Pb > As > Ni > Cr > Co$. مقادیر E_i^r برای سرب، کبالت، نیکل، کروم و آرسنیک در همه ایستگاهها کمتر از ۴۰ بود که نشان می‌دهد لجن موجود در این ایستگاهها خطر اکولوژیکی بالقوه‌ای برای استفاده در کشاورزی ندارند. مقادیر E_i^r برای کادمیم و مس نشان می‌دهد که همه ایستگاهها دارای ریسک بالقوه اکولوژیکی متوسط از لحاظ آلودگی هستند با توجه به مقادیر RI، ایستگاهها را می‌توان به ترتیب کاهشی زیر رتبه بندی کرد: $۲ < ۹ < ۴ < ۱ < ۳ < ۸ < ۷ < ۶ < ۵$ و به ۲ دسته طبقه بندی کرد: برای ایستگاههای ۵ و ۶، مقدار RI کمتر از ۱۵۰ بود، که نشان می‌دهد خطر اکولوژیکی بالقوه کم دارد. برای ایستگاههای ۱، ۲، ۳، ۴، ۷، ۸ و ۹ مقادیر RI

به دلیل پیچیدگی ترکیبات لجن فاضلاب، شاخص PI نمی‌تواند سطح آلودگی را به خوبی شاخص PN منعکس کند، زیرا شاخص PN سطوح آلودگی همه فلزات را ترکیب می‌کند تا به طور دقیق سطوح آلودگی لجن فاضلاب را در یک ایستگاه نشان دهد (Wu et al., 2015). با استفاده از PN، لجن کلیه ایستگاهها در کلاس آلودگی کم قرار داشتند، احتمالاً به این دلیل که لجن دیو شده در این ایستگاهها بیشتر تحت تاثیر صنایع شیمیایی هستند (Pan et al., 2016).

خطر بالقوه اکولوژیکی

با توجه به رویکرد هاکانسون، نتایج E_i^r و RI برای هر ایستگاه مورد مطالعه در جدول ۶ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر میانگین E_i^r ، فلزات سنگین به ترتیب



and Cote, 2015). مانند بسیاری مناطق جهان، آلودگی ناشی از کادمیم در لجن فاضلاب ممکن است ناشی از فاضلاب‌های صنعتی باشد (Fang et al., 2013). برای این مطالعه، کادمیم و مس عامل تأثیرگذار و حیاتی بود و به افزایش خطر بالقوه اکولوژیکی در همه ایستگاه‌های نمونه-برداری کمک کرد.

بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ بود که نشان داد این ایستگاه‌ها دارای ریسک بالقوه اکولوژیکی متوسط هستند. برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین به محیط‌زیست، E_i^r و RI عمدتاً با سمیت فلزات سنگین مرتبط هستند. سایر شاخص‌ها بر این جنبه تمرکز ندارند (Wu et al., 2015). از آنجایی که فلزات سنگین سمیت متفاوتی دارند، ریسک اکولوژیکی بسته به تأثیر فلزات خاص تغییر می‌کند (Liu, Li et al., 2015).

جدول (۶): نتایج ارزیابی ریسک اکولوژیکی بالقوه فلزات سنگین در لجن فاضلاب.

RI	E_i^r						شماره ایستگاه نمونه برداری	
	سرب	مس	کبالت	نیکل	کروم	آرسنیک	کادمیم	
۱۶۸/۱۴	۱۴/۷۰	۵۲/۴۹	۱/۲۰	۵/۸۳	۴/۲۶	۱۶/۶۷	۷۲/۹۷	۱
۱۷۰/۱۰	۱۵/۱۷	۴۷/۵۰	۱/۳۳	۵/۰۹	۴/۰۶	۱۶/۶۷	۸۰/۲۷	۲
۱۶۷/۵۸	۱۵/۷۹	۴۸/۸۷	۱/۴۸	۴/۸۰	۴/۰۸	۱۴/۹۰	۷۸/۶۴	۳
۱۶۸/۳۲	۱۵/۰۱	۴۷/۸۷	۱/۲۱	۵/۸۳	۴/۵۸	۱۳/۵۵	۸۰/۲۷	۴
۱۴۵/۵	۱۳/۴۷	۴۹/۸۲	۱/۳۳	۵/۹۸	۴/۲۷	۱۳/۸۸	۵۶/۷۵	۵
۱۴۷/۵۹	۱۵/۹۴	۴۶/۰۸	۱/۳۶	۴/۵۰	۴/۱۸	۱۳/۸۸	۶۱/۶۲	۶
۱۵۵/۲۶	۱۶/۵۶	۴۸/۷۵	۱/۴۱	۴/۸۰	۴/۱۳	۱۵/۵۶	۶۴/۰۵	۷
۱۵۶/۸۷	۱۷/۱۸	۴۸/۷۵	۱/۴۸	۵/۲۴	۴/۰۶	۱۲/۰۴	۶۸/۱۰	۸
۱۶۹/۴۸	۱۵/۴۸	۴۹/۶۴	۱/۲۳	۵/۲۴	۳/۶۱	۱۴/۸۱	۷۹/۴۶	۹
۱۶۰/۹۸	۱۵/۴۸	۴۸/۷۵	۱/۳۴	۵/۲۶	۴/۱۴	۱۴/۶۶	۷۱/۳۵	میانگین
۹/۸۳	۱/۰۸	۱/۸۱	۰/۱۱	۰/۵۲	۰/۲۶	۱/۵	۹/۰۲	انحراف معیار

اکولوژیکی (E_i^r) برای عناصر کادمیم و مس دارای "خطر متوسط" بودند و بقیه عناصر دارای "خطر کم" بودند. از نظر شاخص تک عاملی PI عناصر کروم، مس و سرب در کلاس "آلودگی کم" قرار داشتند و سایر عناصر دارای کلاس "بدون آلودگی" بودند (جدول ۷).

با توجه به شاخص‌های فوق‌الذکر، نتایج در جدول ۷ خلاصه شده و کلاس آلودگی هر یک از آنها ذکر شده است. نتایج میانگین شاخص‌های تک عاملی نشان داد که شاخص زمین انباشتگی (Igeo) عنصر مس دارای خطر "کمی آلوده" تاخیلی آلوده"، سرب "کمی آلوده"، کادمیم "غیرآلوده" تا کمی آلوده" و بقیه عناصر "غیر آلوده" بودند. ضریب خطر

جدول (۷): مقایسه میانگین شاخص‌های تک عاملی زمین انباشتگی، آلودگی و ضریب خطر اکولوژیکی در ایستگاه‌های مختلف برای عناصر مختلف در لجن فاضلاب

شاخص/فلز سنگین Igeo	کادمیم	سرب	کروم	نیکل	کبالت	آرسنیک	مس
۰/۶۵	۱/۰۴	۰/۴۶	-۰/۵۱	-۲/۵	-۰/۰۳	۲/۷	
غیر آلوده تا کمی آلوده	کمی آلوده	غیر آلوده	غیر آلوده	غیر آلوده	غیر آلوده	غیر آلوده	کمی آلوده تا خیلی آلوده
PI	۰/۱۷	۱/۳۳	۱/۶۷	۰/۶۵	۰/۱	۰/۳۹	۱/۳۷
کلاس آلودگی	بدون آلودگی	آلودگی کم	آلودگی کم	بدون آلودگی	بدون آلودگی	بدون آلودگی	آلودگی کم
E _T	۷۱/۳۵	۱۵/۴۸	۴/۱۳	۵/۲۶	۱/۳۴	۱۴/۶۶	۴۸/۷۵
کلاس آلودگی	خطر متوسط	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	کم خطر	خطر متوسط

مختلف دارای کلاس‌های متفاوتی از نظر خطر آلودگی در دو شاخص PN و RI بوده و روند کلاس خطر در دو شاخص، الزاما همراستا نیستند. چندان که شاخص PN در همه ایستگاه‌ها دارای کلاس "آلودگی کم" بودند. در حالی که شاخص RI (به جز ایستگاه‌های ۵ و ۶) دارای خطر متوسط بودند. به عبارتی شاخص RI ایستگاه‌های ۵ و ۶ در کلاس "کم خطر" بودند. این تفاوت بین دو شاخص ترکیبی به علت لحاظ نمودن ضریب خطر سمیت برای هر یک از عناصر در شاخص RI می باشد (جدول ۸).

شاخص‌های ترکیبی (همانند PN و RI)، شاخص‌هایی هستند که همه عناصر مورد مطالعه را در قالب یک شاخص بیان می‌نمایند. البته در شاخص RI علاوه بر لحاظ نمودن همه عناصر در یک شاخص، به سمیت جداگانه هر یک از فلزات سنگین توجه دارد. برای ارزیابی جامع خطرات زیست-محیطی، شاخص‌های ترکیبی PN و RI به همراه کلاس آلودگی آنها به تفکیک ایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری لجن فاضلاب در جدول ۸ خلاصه شده است. مقایسه نتایج محاسبات شاخص‌های ترکیبی نشان داد که ایستگاه‌های

جدول (۸): نتایج شاخص آلودگی ترکیبی و شاخص خطر بالقوه اکولوژیکی در ایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری لجن فاضلاب.

شماره ایستگاه نمونه برداری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
شاخص PN	۱/۳۵	۱/۲۸	۱/۲۹	۱/۴۲	۱/۳۴	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۲۹	۱/۱۶
کلاس آلودگی	آلودگی کم	آلودگی کم	آلودگی کم	آلودگی کم	آلودگی کم	آلودگی کم	آلودگی کم	آلودگی کم	آلودگی کم
شاخص RI	۱۶۸/۱۴	۱۷۰/۱۰	۱۶۷/۵۸	۱۶۸/۳۲	۱۴۵/۵	۱۴۷/۵۹	۱۵۵/۲۶	۱۵۶/۸۷	۱۶۹/۴۸
کلاس آلودگی	خطر متوسط	خطر متوسط	خطر متوسط	خطر متوسط	کم خطر	کم خطر	خطر متوسط	خطر متوسط	خطر متوسط

نتیجه گیری

مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین در ایستگاه‌های گانه با مقادیر آستانه مجاز سازمان ملی استاندارد برای

لجن و جامدات زیستی (استاندارد شماره ۲۲۹۶۷) نشان داد غلظت فلزات سنگین مس، کروم و سرب در محدوده بیشتر از حد استاندارد بوده و ویژگی‌های لجن درجه C1 را ندارد و



منظور کاهش و مدیریت فلزات سنگین آنها می‌باشد. در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه از نظر شاخص RI، ایستگاه‌های ۵ و ۶ دارای کلاس کم خطر در میان ایستگاه‌ها بودند. در جمع‌بندی کلی می‌توان گفت نمونه‌های لجن فاضلاب در ایستگاه‌های مختلف دارای کیفیت متفاوتی از نظر ویژگی‌ها و شاخص‌های ارزیابی خطر آلودگی هستند. چندان که نمونه‌های ایستگاه‌های مختلف دارای کلاس‌های کم خطر تا خطر متوسط بودند. از این رو برای استفاده از لجن فاضلاب به عنوان کود یا اصلاح‌کننده نمی‌توان توصیه کلی و عمومی را ارائه کرد. برای هر بار استفاده لازم است نسبت به تجزیه فلزات سنگین اقدام نموده تا در صورت دارا بودن ویژگی‌های استاندارد از آن استفاده نمود.

پیشنهادات

کیفیت لجن فاضلاب متغیر بوده که می‌تواند ناشی از تغییرات فصلی، زمان نگهداشت لجن و تغییرات کیفیت فاضلاب ورودی به تصفیه خانه باشد. فلزات سنگین از جمله آلاینده‌های خاک هستند که در صورت وقوع آلودگی خاک، پاکسازی آن بسیار پرهزینه بوده (فن‌آوری‌های تصفیه مناسب همانند فناوری الکتروکینتیک، بیولیچینگ، استخراج شیمیایی و گیاه پالایی) و عملاً تنها راه، پیشگیری از آلوده شدن خاک است. لذا اگر میزان فلزات سنگین در لجن فاضلاب در حد بالایی باشد، باید آن را در کاربردهای دیگری غیر از کشاورزی (ساخت ابنیه، دفن، سوزاندن و...) مدیریت کرد. بهترین شیوه برای بررسی امکان‌پذیری استفاده از لجن در اراضی کشاورزی، انجام مطالعات ارزیابی ریسک با لحاظ نمودن وضعیت منابع آب، خاک و کیفیت لجن می‌باشد تا آثار تغییرات لجن را کنترل نمود. به عبارتی بایستی ظرفیت زیست‌محیطی خاک ارزیابی شود تا برای استفاده لجن تصمیم‌گیری شود.

در مورد فلزات سنگین آرسنیک، کادمیم و نیکل کمتر از حد مجاز ذکر شده در استاندارد بود. اما در مقایسه غلظت فلزات سنگین با معیارهای لجن درجه C2، همه فلزات سنگین مقداری کمتر از حدود غلظت مجاز درجه C2 بودند. برای استفاده ایمن از لجن فاضلاب درجه C2 بایستی نحوه مدیریت آن در اراضی مورد توجه قرار گیرد. بدین منظور بررسی اولیه‌ای با شاخص‌های مختلف انجام گرفت. بر اساس مقادیر میانگین Igeo، فلزات سنگین به ترتیب زیر رتبه‌بندی شدند: $Cu > Pb > Cd > Cr > As > Ni > Co$ که مس در کلیه ایستگاه‌ها و بعد از آن سرب، کادمیم و کروم در اغلب ایستگاه‌ها عامل تعیین‌کننده در آلودگی لجن فاضلاب بودند. مقادیر میانگین شاخص PI فلزات سنگین برای کروم، مس و سرب دارای کلاس آلودگی کم و مابقی در کلاس بدون آلودگی و به ترتیب نزولی زیر بودند:

$Cr > Cu > Pb > Ni > As > Cd > Co$

مقادیر میانگین شاخص E_{tr} تمام فلزات سنگین (به جز کادمیم و مس) دارای ضریب خطر بالقوه اکولوژیکی کم بوده و به ترتیب زیر کاهش یافتند:

$Cd > Cu > Pb > As > Ni > Cr > Co$

شاخص‌های ترکیبی چند عنصری با توجه به در نظر گرفتن تمام فلزات مورد بررسی در قالب یک شاخص، امکان مقایسه بهتری را ارائه می‌دهند.

لجن فاضلاب همه ایستگاه‌ها دارای مقادیر شاخص PN بالاتر از یک بودند که بیشتر از سطح مورد نظر برای استفاده " ایمن " در اراضی زراعی می‌باشند. مقادیر شاخص‌های RI ایستگاه‌ها به ترتیب کاهشی به صورت $۲ < ۹ < ۴ < ۱$ و $۸ < ۷ < ۶ < ۵$ بوده و ریسک ایستگاه‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۷ و ۹ دارای خطر متوسط هستند.

بر اساس کلاس‌های آلودگی دو شاخص PN و RI اکثر ایستگاه‌ها (دارای کلاس آلودگی کم و خطر متوسط) بودند. لذا به منظور استفاده آن در کشاورزی نیاز به تمهیداتی به

منابع

بلالی، م.، ح. رضایی و ف. مشیری. ۱۳۹۳. وضعیت حاصلخیزی خاک‌های کشور و ضرورت ارتقای توان آن برای خدمات‌رسانی به



- تولیدات کشاورزی. ص. ۱۷-۴۸ در کتاب: خاوازی، ک. و همکاران (نویسندگان). برنامه جامع حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه در راستای افزایش خود اتکایی محصولات زراعی راهبردی ۱۳۹۳-۱۴۰۴ جلد اول، موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران.
- بی‌نام، سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران، معاونت محیط‌زیست انسانی. ۱۳۹۰. حدود مجاز آلودگی خاک و آلاینده‌های ورودی به آن برای کاربری های مختلف خاک و راهنماهای آن. نشانی اینترنتی: <http://wsm.doe.ir>
- بی‌نام، سازمان ملی استاندارد ایران، ۱۴۰۰. جامدات زیستی تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری- ویژگی‌ها و پایش. استاندارد ۲۲۹۶۷
- بی‌نام، شرکت آب و فاضلاب استان تهران. ۱۴۰۲. تاسیسات کلان آب‌فای استان تهران. نشانی اینترنتی: <https://www.tpww.ir/fa/projeh>
- شهبازی، ک. ا.، فتحی گردلیدانی و م. مارزی. ۱۴۰۱. بررسی وضعیت عناصر سنگین در خاک‌های ایران: مروری جامع و انتقادی بر مطالعات گزارش شده. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. دوره ۵۳، شماره ۵. صص ۱۱۶۳-۱۲۱۰.
- Abraham, G.M. and R.J. Parker. 2008 Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136, 227-238.
- Birch, G.F. 2017. Determination of sediment metal background concentrations and enrichment in marine environments—A critical review. *Science of The Total Environment*, 580, 813-831.
- Chen, T.B., Q.F. Huang., D. Gao., Y.Q. Zheng and J.F. Wu. 2003. Heavy metal concentrations and their decreasing trends in sewage sludges of China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 23, 561-569.
- Cole, L.J., D.I. Mccracken., G.N. Foster and M.N. Aitken. 2001. Using Collembolato assess the risks of applying metal-rich sewage sludge to agricultural land in western Scotland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 83, 177-189.
- Eid, E.M. and K.H. Shaltout. 2016. Bioaccumulation and trans-location of heavy metals by nine native plant species grown at a sewage sludge dump site. *Phytoremediation*. 18:1075-1085.
- Fatoba, P.O., C.O. Ogunkunle., O.O. Folarin and F.A. Oladele. 2016. Heavymetal pollution and ecological geochemistry of soil impacted by activities of oil industry in the Niger Delta, Nigeria. *Environmental Earth Sciences*, 75, 297.
- Fang, X.S. and H. Luo. 2013. Spatial and industrial distribution pattern of heavy metals emission in industrial waste water. *China Environmental Science*, 33, 655-662.
- Grotto, D., B.L. Batista., J.M.O. Souza., M.F.H. Carneiro., D.D. Santos., W.J. Melo and F. Barbosa. 2015. Essential and nonessential element translocation in corn cultivated under sewage sludge application and associated health risk. *Water Air and Soil Pollution*, 226, 261.
- Guo, G.H., T. Chen., J.Yang., G. Zheng and G. Ding. 2014. Regional distribution characteristics and variation of heavymetals in sewage sludge of China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 34, 2455-2461.
- Hakanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach. *Water Research*, 14, 975-1001 .
- Harrison, R.M., R. Tilling., M.S.C. Romero., S. Harrad and K. Jarvis. 2003. A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment. *Atmospheric Environment*, 37, 2391-2402.
- ISO .2001. Soil quality e dissolution for the determination of total element content e part 1: dissolution with hydrofluoric and perchloric acids, ISO 14869-1, pp 1-5
- Jones, J.B. 2001. Laboratory guide for conduction soil tests and plant analysis. CRC Press, 256p.
- Kendir, E., E. Kentel and F.D. Sanin. 2015. Evaluation of heavy metals and associated health risks in a metropolitan wastewater treatment plant's sludge for its land application. *Hum. Ecological Risk Assessment*. Int. 21, 1631-1643.
- KeRpka, W., J. Antonkiewicz., C. Jasiewicz., F. Gambus and R. Witkowicz. 2016. The effect of municipal sewage sludge on the chemical composition of spring barley. *Soil Science Annual*. 67:124-130.



- Kouidri, M., N.D. Youcef., I. Benabdellah., R. Ghoubali., A. Bernoussi and A. Lagha. 2016. Enrichment and geoaccumulation of heavy metals and risk assessment of sediments from coast of AinTemouchent (Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 354.
- Li, Q., L. Hua., X.H. Xu., D.P. Wei and Y.B. Ma. 2011. A review on environmental effects and control criteria of biosolidagricultural application. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 19, 468–476.
- Li, T., W. Li., X.M. Li., Z.X. Dong., F.W. Liu., W.P. Zhang and Y.S. Bu. 2015. Agricultural potential and security application of sewage sludge in Shanxi Province. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 9, 3455–3460.
- Liu, C.H. and R.P. Cote. 2015. Controlling chromium slag pollution utilizing scavengers: A case of Shandong Province, China. *Waste Management and Research*, 33, 363–369.
- Mazurek, R., J. Kowalska., M. Ga siorek., P. Zadroz'ny., A. Józefowska., T. Zaleski., W. Kepke., M. Tymczuk and K. Orłowska. 2017. Assessment of heavy metals contamination in surface layers of Roztocze National Park forest soils (SE Poland) by indices of pollution. *Chemosphere*, 168, 839–850.
- Müller, G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geo Journal*, 2, 108–118.
- Pan, L.B., J. Ma., Y. Hu., B.Y. Su., G.L. Fang., Y. Wang., Z.S. Wang., L. Wang and B. Xiang. 2016. Assessments of levels, potential ecological risk, and human health risk of heavy metals in the soils from a typical county in Shanxi Province, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 19330–19340.
- Qin, F.X., C.F. Wei., S.Q. Zhong., X.F. Huang., W.P. Pang and X. Jiang. 2016. Soil heavy metal (loid)s and risk assessment in vicinity of a coal mining area from southwest Guizhou, China. *Central South University*, 23, 2205–2213.
- Suanon, F., Q. Sun., X. Yang., Q. Chi., S.I. Mulla., D. Mama and C.P. Yu. 2017. Assessment of the occurrence, spatiotemporal variations and geoaccumulation of fifty-two inorganic elements in sewage sludge: A sludge management revisit. *Scientific Reports*, 7(1), p.5698.
- Wu, J.G., Z.N. Zhao and Y.X. Cai. 2015. Analysis of chromium pollution for the leather processing industry. *Environmental Sciences. Impact Assess*, 37, 64–77.
- Xiao, Z.H., X.Z. Yuan., L.J. Leng., L.B. Jiang., X.H. Chen., Z.B. Wu., X. Peng. J.C. Zhang and M.Z. Guang. 2016. Risk assessment of heavy metals from combustion of pelletized municipal sewage sludge. *Environmental Sciences Pollution. Res*, 23, 3934–3942.
- Yakameran, E., & Aygün, A. (2021). Ecological risk assessment of domestic sewage sludge: A case study. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 39-422-433.
- Yao, J.L., H.Y. Wang., Y.J. Yu., Q. Wang and X.R. Wang. 2010. Pollution status and characteristics of heavy metals in sewage sludge from municipal wastewater treatment plants. *Environmental Sciences*, 23, 696–702.
- Yari, M., G. Rahimi., E. Ebrahimi., S. Sadeghi., M. Fallah and E. Ghesmatpoor. 2016. Effect of three types of organic fertilizers on the heavy metals transfer factor and maize biomass. *Waste Biomass Valorization*. 8: 2681–2691.