مجله سلامت و محیط زیست، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی
انجمن علمی بهداشت محیط ایران
دوره هجدهم ، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۴، صفحات ۵۱۹ تا ۵۳۴

Available online: https://ijhe.tums.ac.ir

مقاله پژوهشی

بررسی پارامترهای شیمیایی و میکروبی لجن تولیدی در تصفیه خانه فاضلاب شهر خوی و ارزیابی کاربرد آن در کشاورزی

محمد آقانژاد[۱]، امیر شیخ محمدی[۱]، اسرافیل عسگری[۲*]، حمیدرضا تاجفر[۳]

۱- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی خوی، خوی، ایران
۲- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی زنجان، زنجان، ایران
۳- آزمایشگاه تصفیه خانه فاضلاب خوی، شرکت آب و فاضلاب خوی، خوی، ایران

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

واژگان کلیدی: کیفیت لجن فاضلاب، راکتور ناپیوسته متوالی، کاربرد در کشاورزی، استفاده مجدد، بهبود خاک

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
asgari.esrafil@zums.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: این مطالعه با هدف ارزیابی کیفیت شیمیایی و میکروبی لجن تولیدی در تصفیه‌خانه فاضلاب خوی (فرآیند SBR) و مقایسه آن با استانداردهای کشاورزی انجام شد.

روش بررسی: در این مطالعه نمونه‌های لجن ماهانه جمع‌آوری و با روش‌های استاندارد EPA (شامل تکنیک ۱۵ لوله‌ای برای کلیفرم‌ها، فلوتاسیون برای تخم آسکاریس و استخراج اسیدی برای فلزات سنگین) آنالیز شدند. داده‌ها با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۵ و آزمون‌های آماری همبستگی پیرسون (Pearson correlation test) تحلیل شدند.

یافته‌ها: لجن مورد بررسی دارای pH مناسب (۷/۱۴) و کربن آلی بالا (۲۷/۳۲ درصد) بود، اما شوری بالا (۹۸۹۱ µS/m) و نسبت پایین C/N برابر با ۶/۳۸ نشان‌دهنده ناپایداری و محدودیت مصرف مستقیم آن در کشاورزی است. فلزات سنگین آرسنیک (۱۰/۲۷ mg/kg)، مس (۱۳۴/۸۶ mg/kg) و روی (۵۳۰/۹۳ mg/kg) نیز از استاندارد ملی ایران فراتر بودند. تحلیل هیتمپ ارتباط معنادار بین شوری، Cl^- و SO_4^{2-} را تأیید کرد. به‌رغم ارزش تغذیه‌ای لجن، بدون اصلاحاتی مانند تثبیت، کاهش شوری و حذف پاتوژن‌ها، استفاده مستقیم آن توصیه نمی‌شود.

نتیجه‌گیری: با وجود ترکیبات مغذی قابل توجه در لجن مانند نیتروژن، فسفر و کربن آلی، کاربرد مستقیم آن در کشاورزی به دلیل شوری بالا، نسبت نامناسب C/N، آلودگی میکروبی شدید (تخم نماتودها) و تجاوز برخی فلزات سنگین از حدود مجاز، با محدودیت جدی مواجه است. استفاده ایمن از این لجن نیازمند انجام فرآیندهای اصلاحی نظیر تثبیت، ضدعفونی، نمک‌زدایی و پایش فلزات سنگین است. بنابراین، توصیه می‌شود مصرف لجن به‌صورت کنترل‌شده، پس از تصفیه مناسب و مطابق با نیاز خاک و نوع محصول انجام گیرد.

Please cite this article as: Aqanaghad M, Sheikhmohammadi A, Asgari E, Tajfar H. Investigation of the chemical and microbial parameters of sludge produced at the Khoy city municipal wastewater treatment plant and assessment of its agricultural application. Iranian Journal of Health and Environment. 2025;18(3):519-34.

Copyright © 2025 Iranian Association of Environmental Health، and Tehran University of Medical Sciences. Published by Tehran University of Medical Sciences. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Noncommercial uses of the work are permitted، provided the original work is properly cited.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

مقدمه

لجن تصفیه‌خانه فاضلاب، به‌عنوان یک محصول فرعی در فرآیند تصفیه فاضلاب، حاوی ترکیبات آلی، مواد مغذی و میکروارگانیسم‌های مفید و بیماری‌زا است (۱). مدیریت صحیح این ماده، از جنبه‌های بهداشتی، محیط‌زیستی و اقتصادی حائز اهمیت است (۲). هدف تصفیه لجن، کاهش حجم و بهبود کیفیت برای استفاده مجدد یا دفع ایمن است. روش‌های متداول شامل سوزاندن، دفن بهداشتی و کاربرد کشاورزی است که استفاده در کشاورزی به دلیل مزایای اقتصادی و پایداری، بیشتر مورد توجه قرار دارد (۳، ۴). به‌کارگیری لجن تصفیه‌خانه در کشاورزی می‌تواند مزایای متعددی از جمله افزایش ماده آلی خاک، بهبود ساختار خاک، کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی و مدیریت بهینه پسماندهای شهری را به همراه داشته باشد (۵، ۶). مواد مغذی موجود در لجن، مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم، به بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش تولید محصولات کشاورزی کمک می‌کند. با این حال، حضور میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و فلزات سنگین در لجن، نگرانی‌هایی در خصوص آلودگی محیط‌زیست و سلامت انسان و حیوانات ایجاد کرده است (۷). بنابراین، پیش از استفاده از لجن در کشاورزی، لازم است که پارامترهای شیمیایی و میکروبی آن به دقت بررسی شده و با استانداردهای ملی و بین‌المللی مقایسه گردد (۸). فلزات سنگین لجن در خاک تجمع یافته و سلامت انسان را از طریق زنجیره غذایی تهدید می‌کنند، لذا کنترل کیفیت میکروبی لجن برای پیشگیری از انتقال عوامل بیماری‌زا ضروری است (۹). مطالعه Ghoreishi و همکاران (۱۰) نشان داد لجن آذربایجان شرقی حاوی فلزات سنگین خطرناک بوده و از نظر میکروبی کلاس B دارد، لذا استفاده کشاورزی از آن نیازمند احتیاط است. تصفیه‌خانه فاضلاب خوی با راکتور ناپیوسته متوالی (Sequencing Batch Reactor (SBR))، روزانه ۲۰۰۰۰ m^3 فاضلاب تصفیه می‌کند و ۲۷۰۰ kg لجن مرطوب (۸۵-۹۰ درصد رطوبت) تولید می‌نماید. پس از تغلیظ و فیلتر پرس، این مقدار به ۱۸۰۰ kg لجن خشک (۲۵-۳۰ درصد رطوبت) کاهش می‌یابد که در محل دپو می‌شود. عدم وجود سیستم خشک‌کن مناسب باعث مشکلاتی مانند حجم بالای لجن، انتشار بو و جذب حشرات شده است. از طرفی، خاک‌های کشاورزی منطقه (۵۵۴۰ km^2) به دلیل فقر مواد آلی و مصرف زیاد کودهای شیمیایی، پتانسیل بالایی برای بهره‌برداری از مواد مغذی لجن دارند. اما استفاده از لجن به عنوان کود مستلزم ارزیابی دقیق پارامترهای کیفی شامل ترکیبات شیمیایی، آلاینده‌های میکروبی و تطابق با استانداردهای زیست‌محیطی می‌باشد. با توجه به نبود مطالعات جامع در استان آذربایجان غربی در زمینه کیفیت لجن تصفیه‌خانه و امکان استفاده از آن در کشاورزی، این پژوهش با هدف بررسی کیفیت میکروبی و شیمیایی لجن تصفیه‌خانه فاضلاب شهر خوی انجام شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند راهکارهای علمی و عملی را برای استفاده ایمن از لجن به‌عنوان یک کود آلی غنی ارائه داده و دستورالعمل‌های لازم برای کاهش مخاطرات محیط‌زیستی و بهداشتی را مشخص کند. به همین منظور، کیفیت لجن تولیدی با استانداردهای سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA) مقایسه شده تا امکان‌سنجی استفاده از آن در کشاورزی و اصلاح خاک مشخص گردد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه توصیفی-تحلیلی طی ۹ ماه (تابستان تا زمستان ۱۴۰۲) کیفیت شیمیایی و میکروبی لجن تصفیه‌خانه خوی را بررسی کرد. نمونه‌ها با روش‌های استاندارد (شامل سنجش pH، مواد آلی، نیتروژن، فسفر، فلزات سنگین و EC) آنالیز شدند. آزمون‌های میکروبی (کلیفرم‌های گرماپای و تخم انگل‌ها) مطابق استانداردهای EPA و ملی انجام شد. نتایج با استانداردهای کشاورزی ایران و EPA مقایسه شدند. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۵ و آزمون همبستگی پیرسون (Pearson correlation test) تحلیل شدند. این آزمون جهت بررسی روابط خطی بین متغیرهای فیزیکوشیمیایی، شیمیایی (فلزات سنگین) و میکروبی در

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

لجن فاضلاب به کار رفت. در این تحلیل (نمودار هیت‌مپ (ترسیم‌شده با Python))، از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شده است که همبستگی‌های مثبت و منفی را مشخص می‌کند. همبستگی مثبت قوی (۰/۷ < r با رنگ قرمز) نشان می‌دهد که دو پارامتر با یکدیگر افزایش می‌یابند، درحالی‌که همبستگی منفی قوی (۰/۷- > r با رنگ آبی) نشان‌دهنده رابطه معکوس بین آن‌هاست.

_ نمونه‌برداری

نمونه‌برداری با ظروف شیشه‌ای استریل از خروجی فیلترپرس به‌صورت ماهانه (۳ بار، هر ۱۰ روز) انجام شد. هر نمونه ۱ kg بود که در سایه خشک و در یخچال نگهداری شد. نمونه‌های ماهانه (۳ kg) پس از مخلوط شدن به آزمایشگاه‌های معتبر ارسال شدند. آنالیزهای میکروبی در آزمایشگاه علوم پزشکی خوی و شیمیایی در آزمایشگاه تأییدشده البرز انجام گرفت.

_ آماده‌سازی نمونه‌ها

در آزمایشگاه، نمونه‌های لجن از الک‌هایی با مش شماره ۷ و ۲۰ عبور داده شدند. سپس، با توجه به مخلوط کردن ۳۰ g نمونه خشک با ۲۷۰ mL محلول سرم نمکی (حاوی ۹ g NaCl/L آب مقطر)، غلظت سوسپانسیون اولیه تقریباً برابر با ۰/۱۱۱ g/mL محاسبه گردید. به‌منظور سهولت در محاسبات رقت و استانداردسازی، هر میلی‌لیتر از این سوسپانسیون معادل ۰/۱ g ماده خشک در نظر گرفته شد. این رویکرد امکان محاسبه نتایج میکروبی (نظیر TC، FC یا تخم نماتود) بر اساس واحد گرم ماده جامد خشک را فراهم می‌کند (۴).

_ انجام آزمایشات

_ آنالیز میکروبی

کلیفرم‌ها با روش EPA1680 (MPN ۱۵ لوله، رقت‌های 10^{-4} تا 10^{-6}) و محیط‌های کشت لاکتوز براث، BGB و EC اندازه‌گیری شدند (۱۱). تخم انگل‌ها با فلوتاسیون سولفات منیزیم و شمارش آسکاریس با لام مک‌مستر انجام گردید (۱۲).

_ آنالیز فلزات سنگین

برای اندازه‌گیری فلزات سنگین، از روش هضم اسیدی مرطوب بر اساس دستورالعمل استاندارد EPA3050B استفاده شد (۱۳). در این روش، نمونه‌ها ابتدا در آون با دمای ۱۰۵ °C خشک و از الک با مش ۲ mm عبور داده شدند. سپس حدود ۱ g از هر نمونه توزین و در بشر پیرکس ریخته شد. در ادامه، ۱۰ mL اسید نیتریک غلیظ به نمونه‌ها افزوده و برای هضم اولیه در دمای ۹۵ °C به مدت حداقل ۳۰ min روی هیتر قرار گرفتند. پس از سرد شدن، ۳ mL از H_2O_2 به‌آرامی اضافه و مجدداً حرارت داده شد تا واکنش کامل شود. در ادامه، ۵ mL از HCl غلیظ برای تکمیل فرایند هضم افزوده شد. مخلوط نهایی پس از هضم، با آب دی‌یونیزه تا حجم ۵۰ mL رقیق و سپس از صافی واتمن شماره ۴۲ عبور داده شد. محلول صاف‌شده برای اندازه‌گیری فلزات به دستگاه منتقل شد. اندازه‌گیری غلظت فلزات (از جمله As، Pb، Cd، Cu و Zn) با استفاده از دستگاه طیف‌سنج نشر اتمی با پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) مدل Agilent-5100 انجام گرفت. برای اطمینان از دقت و صحت روش به‌کاررفته، موارد زیر در اعتبارسنجی رعایت شد: ترسیم منحنی استاندارد برای هر عنصر در بازه‌های مشخص غلظتی (۱-۱۰ mg/L) با استفاده از محلول‌های استاندارد تجاری انجام شد. ضریب همبستگی (R^2) برای تمام عناصر ۰/۹۹۸< گزارش گردید. حد تشخیص (LOD) و حد تعیین کمی (LOQ) برای هر عنصر بر اساس سیگنال سه برابر و ده برابر نویز پس‌زمینه محاسبه گردید. برای نمونه مقادیر LOD و LOQ به ترتیب برای سرب ۰/۰۲ mg/L و ۰/۰۷ mg/L بود. میزان بازیابی (Recovery) با افزودن مقادیر مشخصی از عناصر هدف به نمونه‌های شاهد (spiked samples) و تکرار آنالیز ارزیابی شد. میانگین درصد بازیابی برای فلزات اندازه‌گیری‌شده ۱۲ ± ۹۶ درصد به‌دست آمد، که در محدوده قابل‌قبول روش‌های تجزیه‌ای قرار دارد. تمام نمونه‌ها در سه تکرار آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدند و میانگین ± انحراف معیار گزارش گردید.

_ آنالیز فیزیکوشیمیایی لجن

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی لجن شامل رطوبت، جامدات،

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

pH، کربن آلی، فسفر، ازت، کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، سولفات و کلرید با روش‌های استاندارد وزن‌سنجی، اسپکتروفتومتری، تیتراسیون و فلیم فتومتری اندازه‌گیری شدند (جدول ۱) (۱۴).

جدول ۱- خلاصه‌ای از روش‌های اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی لجن با ذکر روش، اصل کار، نیاز به منحنی استاندارد و توضیح مختصر آنها

ویژگی مورد اندازه‌گیری	روش اندازه‌گیری	اصل روش/توضیح مختصر	نیاز به منحنی استاندارد
رطوبت، جامدات کل، فرار و ثابت	وزن‌سنجی(Gravimetric)	خشک‌کردن نمونه و محاسبه کاهش وزن	ندارد
pH	pH متر	اندازه‌گیری مستقیم غلظت یون H^+	ندارد
کربن آلی	احتراقی یا واکنش شیمیایی (LOI یا Walkley-Black)	سوزاندن یا اکسیداسیون شیمیایی و اندازه‌گیری کاهش وزن یا مصرف معرف	روش اسپکتروفتومتری
فسفر (کل یا محلول)	اسپکتروفتومتری	واکنش با معرف مولیبدات، رنگ آبی، جذب نور در nm ۸۸۰	دارد
ازت کل (نیتروژن)	کجلدال + تیتراسیون	هضم نمونه با اسید، تقطیر آمونیاک و تیتر با اسید	ندارد
کلسیم، منیزیم	تیتراسیون با EDTA	سختی‌سنجی با معرف خاص و تیتر با محلول استاندارد EDTA	ندارد
سدیم، پتاسیم	فلیم‌فتومتری	اندازه‌گیری شدت نور ساطع‌شده از یون‌ها در شعله در طول موج خاص	دارد
سولفات	اسپکتروفتومتری یا وزن‌سنجی	رسوب‌دهی با باریم یا اندازه‌گیری جذب نوری کمپلکس	در روش نوری
کلرید	تیتراسیون با نیترات نقره	واکنش با $AgNO_3$ و نقطه پایانی با معرف کرومات	ندارد

بررسی تأثیر کود لجن بر خاک منطقه

به‌منظور ارزیابی اولیه اثرات کاربرد لجن فاضلاب بر ویژگی‌های خاک‌های کشاورزی منطقه خوی، نمونه‌برداری از خاک‌های مجاور تصفیه‌خانه فاضلاب خوی (به‌عنوان منطقه تحت تأثیر احتمالی مصرف لجن) انجام شد. همچنین به‌منظور تکمیل داده‌ها، اطلاعات مربوط به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک منطقه از اداره جهاد کشاورزی خوی دریافت گردید. این بررسی اولیه به شناسایی تغییرات احتمالی در پارامترهایی مانند pH، هدایت الکتریکی، عناصر سنگین و مواد آلی در خاک‌های منطقه کمک کرد.

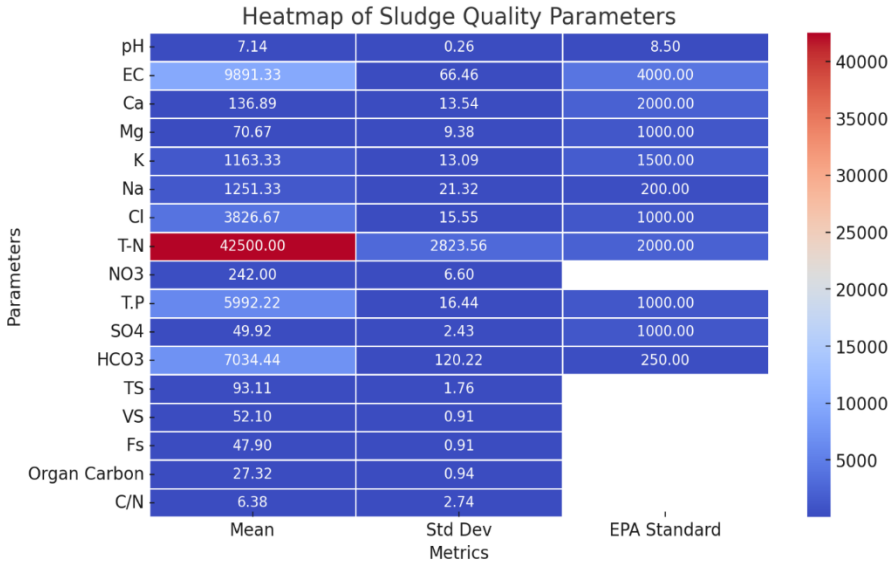
[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

یافته‌ها

یافته های مطالعه به دو بخش اصلی الف)پارامترهای فیزیکوشیمیایی و عناصر غذایی (جدول ۲)، ب) فلزات سنگین و شاخص‌های میکروبی (جدول ۳) تقسیم شده است. جدول ۴ روابط خطی بین پارامترهای مختلف لجن را با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون و مقدار احتمال را نشان می‌دهد. همچنین نمودار تحلیل بصری (هیت‌مپ) (نمودارهای ۱ تا ۳)، میزان همبستگی بین پارامترهای مختلف لجن را نشان می‌دهد. جدول ۵ تفسیر خاک کشاورزی منطقه مورد مطالعه (برای مقایسه با لجن) را نشان می‌دهد.

جدول ۲- پارامترهای فیزیکوشیمیایی و عناصر غذایی لجن مورد مطالعه و مقایسه با استاندارد EPA

پارامتر	میانگین (±انحراف معیار)	استاندارد EPA	نتیجه‌گیری
pH	۷/۱٤ ±۰/۲٦	٦–٦/٥	مطلوب
EC (µS/m)	۹۸۹۱/۳۳ ± ٦٦/٤٦	٤۰۰۰	بالاتر از حد مجاز (۲/٥ برابر استاندارد ایران)
Ca (mg/kg)	۱۳٦/۸۹ ± ۱۳/٥٤	۲۰۰۰	پایینتر از حد مجاز (کمبود کلسیم برای گیاهان ممکن است نیاز به اصلاح داشته باشد)
K (mg/kg)	۱۱٦۳/۳۳ ± ۱۳/۰۹	۱٥۰۰	نزدیک به حد مجاز (مناسب برای کشاورزی)
Na (mg/kg)	۱۲٥۱/۳۳ ± ۲۱/۳۲	۲۰۰	بسیار بالاتر از حد مجاز (٦ برابر استاندارد ایران – خطر شوری و سمیت سدیم برای گیاهان)
Cl (mg/kg)	۳۸۲٦/٦۷ ± ۱٥/٥٥	۱۰۰۰	۳/۸ برابر حد مجاز (ممکن است برای گیاهان کلر-حساس مشکل‌ساز باشد)
T-N (mg/kg)	٤۲٥۰۰ ± ۲۸۲۳/٥٦	۲۰۰۰	بسیار بالا
TP (mg/kg)	٥۹۹۲/۲۲ ± ۱٦/٤٤	۱۰۰۰	٦ برابر حد مجاز
کربن آلی (درصد)	۲۷/۳۲ ± ۰/۹٤	۲۰–٥۰	مطلوب
C/N	٦/۳۸ ± ۲/۷٤	-	پایین (نسبت ایده‌آل برای کمپوست ۲۰–۳۰ است)

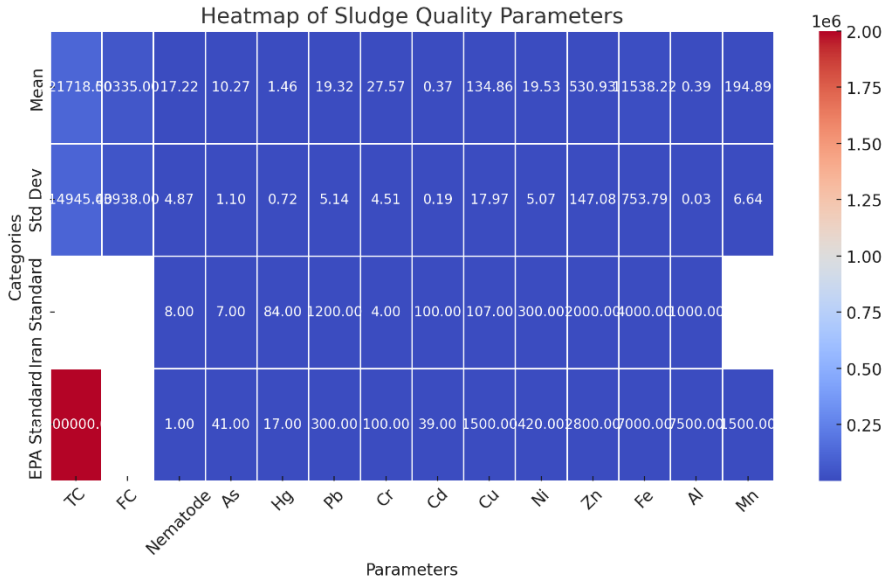


نمودار ۱- تحلیل بصری (heatmap) پارامترهای فیزیکوشیمیایی و عناصر غذایی لجن مورد مطالعه و مقایسه با استاندارد EPA

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

جدول ۳- فلزات سنگین و شاخص های میکروبی لجن مورد مطالعه و مقایسه با استانداردها

پارامتر	میانگین (±انحراف معیار)	استاندارد ایران	استاندارد EPA	نتیجه‌گیری
TC (MPN/g)	۱۲۱۷۱۸ ± ۱۱٤۹٤٥	-	۲۰۰۰۰۰۰	پایینتر از حدEPA
FC (MPN/g)	٥۰۳۳٥ ± ٤۳۹۳۸	-	-	بالا
Nematode egg (Number/g)	۱۷/۲۲ ± ٤/۸۷	۱	۱	۱۷ برابر حد مجاز (غیرقابل استفاده بدون تصفیه)
As (mg/kg)	۱۰/۲۷ ± ۱/۱۰	۸	٤۱	بالاتر از حد ایران (خطر سمیت آرسنیک)
Pb (mg/kg)	۱۹/۳۲ ± ٥/۱٤	۸٤	۳۰۰	پایینتر از حد مجاز
Cd (mg/kg)	۰/۳۷ ± ۰/۱۹	٤	۳۹	پایینتر از حد مجاز
Cu (mg/kg)	۱۳٤/۸٦ ± ۱۷/۹۷	۱۰۰	۱٥۰۰	بالاتر از حد ایران
Zn (mg/kg)	٥۳۰/۹۳ ± ۱٤۷/۰۸	۳۰۰	۲۸۰۰	بالاتر از حد ایران

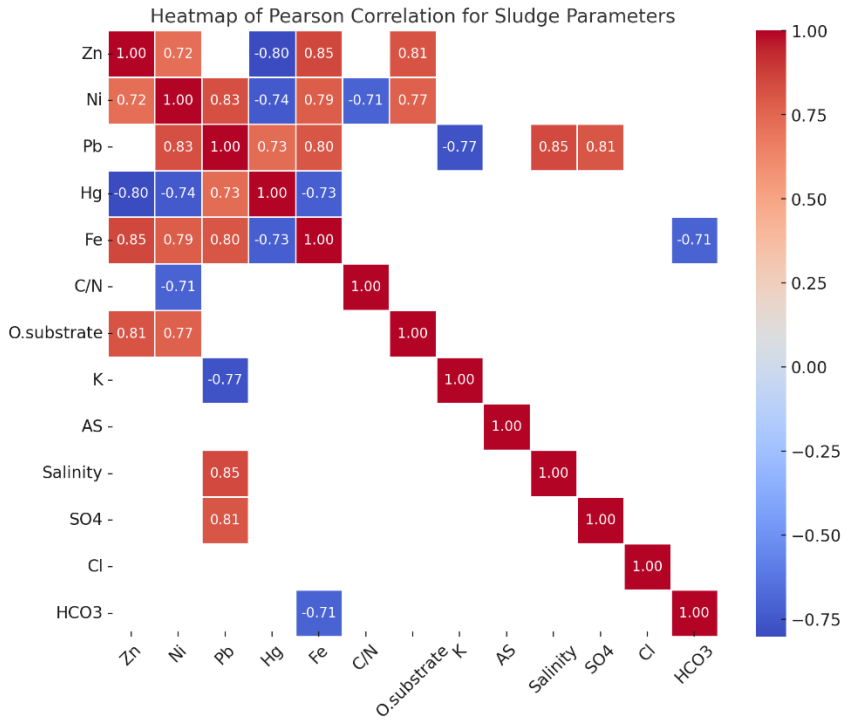


نمودار ۲- تحلیل بصری پارامترهای فلزات سنگین و شاخص‌های میکروبی لجن مورد مطالعه و مقایسه با استانداردهای ایران و EPA

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

جدول ۴- همبستگی پارامترهای لجن بر اساس آزمون پیرسون

پارامتر مستقل	پارامتر وابسته	ضریب همبستگی (R^2)	مقدار احتمال (PV)	تفسیر
EC	pH	۰/۸۸۵	۰/۰۰۲	همبستگی مثبت بسیار قوی – افزایش شوری موجب افزایش pH می‌شود
EC	Cl^-	۰/۹۹۵	۰/۰۰۱	همبستگی کامل – کلرید عامل اصلی شوری است
EC	SO_4^{2-}	۰/۸۲۸	۰/۰۰۶	همبستگی قوی – سولفات نیز در شوری مؤثر است
کلرید	-	۱	۰/۰۰۱	غلظت کلرید به تنهایی با خودش همبستگی دارد (تأیید کیفیت داده‌ها)
کربن آلی	K	۰/۸٤٥	۰/۰۰٤	مواد آلی منبع خوبی برای پتاسیم هستند
کربن آلی	SO_4^{2-}	۰/۷٤۸	۰/۰۲	احتمالاً ترکیبات آلی حاوی گوگرد وجود دارد
کربن آلی	شوری	– ۰/۷٥	۰/۰۲	همبستگی منفی – شوری بالا مواد آلی را کاهش می‌دهد
مواد فرار	شوری	– ۰/۸۰۲	۰/۰۰۹	شوری فعالیت میکروبی تجزیه‌کننده را کم می‌کند
سرب	نیکل	۰/۸٥۲	۰/۰۰٤	منشأ مشترک صنعتی احتمالی
سرب	منگنز	– ۰/۷۷	۰/۰۱٥	رقابت در جذب بین این فلزات
نیکل	-	۰/۸۳	۰/۰۰٦	همبستگی درونی نیکل
روی	-	۰/۷۲۲	۰/۰۲۸	غلظت روی به عوامل دیگر وابسته است
کروم	مس	۰/۸٥٤	۰/۰۰۳	احتمالاً از منابع صنعتی مشترک
آهن	-	– ۰/۷۱	۰/۰۳۲	رفتار معکوس با سایر فلزات
مس	-	۰/۸۱۳	۰/۰۰۸	غلظت مس مستقل از سایر عوامل



نمودار ۳- تحلیل بصری میزان همبستگی بین پارامترهای شیمیایی لجن تصفیه‌خانه مورد مطالعه

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

جدول ۵- تفسیر خاک کشاورزی منطقه مورد مطالعه (برای مقایسه با لجن)

پارامتر	مقدار	نتیجه‌گیری
pH	۷/٦	کمی قلیایی (مشابه لجن)
کربن آلی	۰/۹۹ درصد	بسیار پایینتر از لجن (۲۷/۳۲ درصد)-لجن می‌تواند ماده آلی خاک را بهبود بخشد.
فسفر	۷/۳ ppm	بسیار پایینتر از فسفر لجن- لجن منبع غنی فسفر است.
پتاسیم	۲۷۰ ppm	پایینتر از پتاسیم لجن- لجن می‌تواند کمبود پتاسیم را جبران کند.

بحث

مطابق با جدول ۲ و نمودار ۱، مقایسه پارامترهای فیزیکوشیمیایی و عناصر غذایی لجن با استانداردهای EPA نشان داد که pH لجن در محدوده مطلوب قرار دارد و محیط خنثی آن برای اغلب کاربردهای کشاورزی مناسب است. در مقابل، مقدار هدایت الکتریکی حدود ۲/۵ برابر بالاتر از حد مجاز استاندارد ایران بوده که نشان‌دهنده شوری بالا و خطر اختلال در جذب آب و مواد مغذی توسط گیاهان است. مقدار کلسیم بسیار پایین‌تر از حد توصیه‌شده بوده و می‌تواند نیاز به کودهای کلسیم‌دار یا اصلاح‌کننده‌های آهکی را ایجاب کند. پتاسیم در سطح نسبتاً مناسب و نزدیک به حد مجاز قرار دارد و می‌تواند نقش مؤثری در رشد گیاهان ایفا کند. در مقابل، مقادیر سدیم و کلرید به ترتیب حدود ۶ و ۳/۸ برابر بالاتر از حدود مجاز گزارش شده‌اند که می‌تواند موجب افزایش شوری خاک، سمیت یونی و آسیب به گیاهان حساس گردد. از نظر تغذیه‌ای، مقادیر نیتروژن کل و فسفر کل بسیار بالاتر از استانداردهای مرجع هستند و این لجن را از نظر تأمین عناصر غذایی برای خاک غنی نشان می‌دهد، اما در صورت مصرف بی‌رویه ممکن است باعث آلودگی منابع آبی (به‌ویژه نیترات و فسفر محلول) شود. کربن آلی در محدوده مطلوب قرار دارد، ولی نسبت پایین C/N حاکی از نیتروژن زیاد یا کربن کم و در نتیجه تجزیه سریع مواد آلی و احتمال بوی نامطبوع و ناپایداری لجن است. پارامترهای فیزیکوشیمیایی و عناصر غذایی و فاصله آنها از استانداردها به دو دسته زیر قابل تقسیم است: پارامترهای با مقادیر بیش از حد مجاز (هدایت الکتریکی، کلر، نیتروژن کل و فسفر کل) و پارامترهای با مقدار کمتر از حد استاندارد (نسبت کربن به نیتروژن، کلسیم و منیزیم). به‌طور کلی، اگرچه لجن دارای پتانسیل تغذیه‌ای بالایی است، اما مشکلات ناشی از شوری بالا، نسبت نامتعادل C/N و کمبود برخی عناصر (نظیر کلسیم) نیازمند اصلاحات پیش از مصرف در کشاورزی است.

مطابق با جدول ۳ و نمودار ۲، بررسی شاخص‌های میکروبی و فلزات سنگین در لجن تصفیه‌خانه فاضلاب خوی نشان داد که اگرچه مقدار کلیفرم کل کمتر از حد مجاز سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا است و از این نظر در محدوده قابل‌قبول قرار دارد، اما میزان کلیفرم مدفوعی نیز نسبتاً بالا بوده و به‌خصوص تعداد تخم نماتودها بسیار بالاتر از حد مجاز استانداردهای ایران و EPA (حداکثر ۱ Number/g) است. این موضوع نشان‌دهنده آلودگی انگلی قابل‌توجه و غیرقابل استفاده بودن لجن بدون ضدعفونی مناسب است. از نظر فلزات سنگین، غلظت آرسنیک بالاتر از حد مجاز ایران بوده و با توجه به سمیت بالای آرسنیک، این مقدار می‌تواند به تجمع خطرناک در خاک و زنجیره غذایی منجر شود، هرچند هنوز در محدوده مجاز EPA قرار دارد. فلزات سرب و کادمیوم پایین‌تر از حدود مجاز ملی و بین‌المللی بودند و نگرانی خاصی ایجاد نمی‌کنند. با این حال، مقدار مس و روی به‌طور قابل‌توجهی از حد مجاز استاندارد ملی ایران فراتر رفته‌اند، اگرچه همچنان در محدوده مجاز استانداردهای EPA قرار دارند. این موضوع بیانگر پتانسیل تجمع فلزات در خاک در صورت استفاده مکرر و بدون کنترل از لجن است. به‌طور کلی، این یافته‌ها نشان می‌دهند که لجن مورد مطالعه بدون انجام فرآیندهای تصفیه،

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

ضدعفونی و پایش مداوم فلزات سنگین برای کاربرد کشاورزی مناسب نیست و ممکن است تهدیدی برای سلامت خاک، گیاه و انسان محسوب شود.

نتایج فوق به طور مفصل در ادامه بحث می شود:

۱) pH و هدایت الکتریکی (EC): pH لجن (۷/۱۴) در محدوده خنثی-قلیایی قرار دارد، اما EC بالا نشان‌دهنده شوری شدید (۲/۵ برابر حد مجاز) است که کاربرد کشاورزی را محدود می‌کند. pH خنثی موجب کاهش حلالیت فلزات سنگین می‌شود، درحالیکه شوری بالا خطر کاهش بهره‌وری محصولات را افزایش می‌دهد (۱۵). لجن هدایت الکتریکی بسیار پایینی دارد که نشان‌دهنده غلظت کم املاح محلول و فلزات سنگین است (۱۶).

۲) غلظت عناصر مغذی: کلسیم و منیزیم در محدوده استاندارد بوده، برای سختی آب و پایداری لجن مناسبند، اما کاهش آنها ممکن است تعادل مواد مغذی خاک را مختل کند. سدیم بیش از حد استاندارد، نشانه شوری است، اما پتاسیم بالا در دوز کنترل‌شده می‌تواند برای خاک مفید باشد (۱۷). غلظت کلرید ۳ برابر حد استاندارد است که خطر شوری خاک و اختلال در فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک را افزایش می‌دهد (۱۸). لجن حاوی نیتروژن بالا است که می‌تواند جایگزین کودهای شیمیایی شده و حاصلخیزی خاک را افزایش دهد. مقدار بالای نیتروژن باید به دقت مدیریت شود تا از آلودگی منابع آبی جلوگیری شود (۱۹). نیترات در محدوده مجاز است، اما در صورت نشت به آب‌های زیرزمینی می‌تواند منجر به آلودگی نیتراتی شود. لجن حاوی فسفر بسیار بالا است که حاصلخیزی خاک را افزایش می دهد، اما خطر اوترفیکاسیون منابع آبی را در پی دارد (۲۰). با بررسی انحراف معیار و پایداری داده‌ها مشخص گردید که پارامترهایی مانند نیتروژن کل، فسفر کل و کلرید دارای نوسانات بالا هستند، که نشان می‌دهد مقدار این پارامترها در طول مطالعه دارای تغییرات زیادی بوده‌اند.

۳) بررسی ترکیبات آلی و پایداری لجن: بی‌کربنات بالا بر قلیائیت لجن تأثیر دارد، درحالیکه سولفات پایین احتمال تشکیل گازهای بدبو را کاهش می‌دهد. لجن حاوی ۹۳/۱۱ درصد جامدات با ۵۲/۱ درصد مواد فرار است که نشان‌دهنده محتوای آلی بالا و پایداری کم است. مواد آلی ناپایدار (۴۷/۹ درصد) زیست‌تخریب‌پذیری را کاهش می‌دهند. لجن حاوی ۲۷/۳۲ درصد کربن آلی مفید برای خاک است، اما نسبت C/N پایین نشان‌دهنده کمبود کربن نسبت به نیتروژن است که تجزیه بیولوژیکی را محدود و بوی نامطبوع ایجاد می‌کند (۲).

۴) آلودگی میکروبی و فلزات سنگین: نتایج مطالعه حاضر نشان داد میزان کلیفرم کل و مدفوعی در لجن پایین‌تر از حد مجاز EPA است که اثربخشی سیستم SBR در کاهش بار میکروبی را تأیید می‌کند. لجن از نظر میکروبی (کلیفرم‌ها) برای کاربردهای کشاورزی مناسب است، اما تعداد نماتودها (۱۷/۲۲ Number/g) بیش از حد استاندارد (Number/g ۸) بوده و نشان‌دهنده آلودگی انگلی است. این موضوع ضرورت ضدعفونی لجن پیش از استفاده کشاورزی را نشان می‌دهد (۲۱). مقایسه روند تغییرات و انحراف معیار بالای TC و FC نشان می‌دهد که مقدار آلودگی میکروبی در نمونه‌های مختلف تصفیه‌خانه به شدت متغیر بوده است (جدول ۳ و نمودار ۲). لجن حاوی فلزات سنگین در دو گروه است: ۱) عناصر با غلظت بالا (آرسنیک، سرب، آهن، روی و مس) که برخی از استاندارد ایران فراتر رفته‌اند و ۲) عناصر با غلظت پایین (جیوه، کادمیوم، کروم و آلومینیوم) که در محدوده مجاز هستند. آرسنیک اگرچه از حد EPA پایین‌تر است، اما نسبت به استاندارد ایران بالاتر بوده و می‌تواند خطراتی برای محیط‌زیست ایجاد کند. این آلودگی احتمالاً ناشی از ورود فاضلاب‌های صنعتی به سیستم تصفیه‌خانه است (۲۲). جیوه از حد ایران فراتر ولی پایین‌تر از EPA است. سرب کمتر از حد مجاز EPA و بالاتر از استاندارد ایران است. کادمیوم در محدوده مجاز هر دو استاندارد قرار دارد و خطری ایجاد نمی‌کند. کروم در حد مجاز است. مس نزدیک به حد ایران بوده و احتمال منشأ صنعتی دارد. نیکل در حد مجاز است، اما روی از استاندارد ایران فراتر رفته که

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

احتمالاً ناشی از فعالیت‌های صنعتی می‌باشد (۲۲). آهن از حد مجاز ایران فراتر رفته که ممکن است ناشی از خوردگی لوله‌ها یا زباله‌های فلزی باشد. آلومینیوم بسیار کمتر از حد استاندارد است که نشان‌دهنده عدم آلودگی ناشی از این فلز در لجن است و مشکلی ایجاد نمی‌کند (۲۳). منگنز کمتر از حد استاندارد EPA است. با مقایسه غلظت‌های نسبی فلزات سنگین مشاهده شد که از نظر توزیع فلزات سنگین، بیشترین غلظت مـربوط به Fe>Zn>Cu>Mn>Pb>Cr>As>Ni>Cd>Hg است. افزایش آهن، روی و مس ممکن است نشان‌دهنده ورود این عناصر از صنایع فلزی و کارخانه‌ها باشد (۱۶). مقدار سرب و کروم در سطح پایین‌تری نسبت به استانداردها قرار دارند، اما همچنان باید تحت نظارت باشند. مقایسه روند تغییرات و انحراف معیار برخی عناصر مانند آهن، روی و مس نشان می‌دهد که این پارامترها دارای نوسانات زیادی در نمونه‌های مختلف لجن هستند، که ممکن است به شرایط عملیاتی متفاوت تصفیه‌خانه مرتبط باشد.

همبستگی پارامترهای لجن بر اساس آزمون پیرسون

با بررسی داده های جدول ۴، همبستگی پارامترهای لجن بر اساس آزمون پیرسون و مطابق با نمودار ۳، میزان آلودگی و ویژگی‌های شیمیایی و میکروبی لجن تصفیه‌خانه فاضلاب خوی در مقایسه با استانداردهای ایران و EPA را می توان مشاهده کرد که در ادامه به بحث آن پرداخته می شود. همبستگی‌های مهم مشاهده شده به صورت زیر است: همبستگی مثبت قوی بین pH و هدایت الکتریکی مشاهده می شود که ممکن است به دلیل حضور نمک‌های قلیایی مانند کربنات‌ها باشد. افزایش pH می‌تواند منجر به تغییر در ساختار یونی محلول و در نتیجه افزایش هدایت الکتریکی شود (۲۴). این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده افزایش مواد معدنی محلول در لجن باشد. همبستگی مثبت بین کلرید و هدایت الکتریکی و بین کلرید و سولفات مشاهده شد. غلظت بالای کلرید در لجن باعث افزایش هدایت الکتریکی می‌شود. این همبستگی نشان‌دهنده حضور املاح محلول در لجن تصفیه‌شده است که بر کیفیت نهایی لجن تأثیر می‌گذارد (۱۸). شوری عمدتاً ناشی از کلرید و سولفات (نمک‌های محلول) است. همبستگی مثبت بین سرب و سولفات وجود دارد (۱۶). این همبستگی می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر ترکیبات سولفاته در تحرک و حلالیت سرب در محیط باشد. وجود یون‌های سولفات ممکن است در فرایند ته‌نشینی فلزات سنگین نقش داشته باشد. همبستگی منفی بین آهن و جیوه وجود دارد. مقدار آهن و جیوه رابطه معکوس دارند، یعنی افزایش آهن ممکن است باعث کاهش توانایی جذب سطحی فلزات دیگر در لجن شود (۲۴). سرب همبستگی مثبت با نیکل و همبستگی منفی با منگنز نشان داد. ممکن است منشأ مشترک صنعتی برای سرب و نیکل وجود داشته باشد. روی با نیکل همبستگی مثبت و کروم با مس همبستگی مثبت را نشان داد. منگنز همبستگی منفی با آهن دارد که احتمال رقابت جذب بین منگنز و فلزات دیگر در خاک را مطرح می کند. فلزات سنگین را بر اساس همبستگی می توان به صورت زیر گروه‌بندی کرد: الف- Pb-Ni-Cr-Cu (منشأ احتمالی صنعتی)، ب-Zn-Fe-Mn (رفتار متفاوت) و ج- Mn با Pb و Fe رابطه معکوس دارد (رقابت در جذب). مواد فرار با شوری همبستگی منفی دارند که ممکن است فعالیت میکروبی را کاهش دهد. کربن آلی با پتاسیم و سولفات همبستگی مثبت، اما با شوری همبستگی منفی را نشان داد. شوری بالا موجب کاهش مواد آلی می‌شود، اگرچه این مواد می‌توانند منبع پتاسیم باشند. کاهش مقدار مواد آلی و ناپایدار نشان‌دهنده تثبیت بهتر لجن است که در استانداردهای مدیریت پسماند اهمیت دارد (۲).

مقایسه کیفیت لجن با خاک منطقه

بررسی تأثیر لجن تصفیه‌خانه بر خاک کشاورزی (جدول ۵) و مقایسه پارامترهای اصلی در زیر بحث شده است:

۱- pH و تأثیر آن بر دسترسی به عناصر غذایی:pH لجن (۷/۱۴) و خاک (۷/۶۰) نزدیک است، بنابراین افزودن لجن تأثیر فوری بر اسیدیته ندارد، اما مصرف مداوم ممکن است جذب ریزمغذی‌ها را کاهش دهد (۲۵).

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

۲- افزایش کربن آلی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک: لجن حاوی کربن آلی بالا (۲۷/۳۲ درصد) موجب بهبود نگهداری آب، ساختار خاک و جذب مواد مغذی می‌شود که برای حاصلخیزی خاک در مناطق خشک بسیار مفید است (۲۵، ۲۶).

۳- نیتروژن کل و تأثیرات آن بر حاصلخیزی خاک: لجن حاوی نیتروژن بالا موجب رشد بهتر گیاهان و کاهش مصرف کود می‌شود، اما خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات و عدم تعادل غذایی را افزایش می‌دهد (۲۶).

۴- فسفر و خطرات تجمعی آن: لجن حاوی فسفر بالا است که می‌تواند نیاز به کود را کاهش دهد، اما خطر اشباع خاک، اختلال در جذب عناصر و آلودگی آب‌ها را افزایش می‌دهد (۲۷، ۲۸).

۵- پتاسیم و تأثیرات آن بر تعادل مواد مغذی: مقدار پتاسیم در لجن بیشتر از خاک کشاورزی است. پتاسیم برای رشد گیاهان ضروری است اما عدم تعادل آن می‌تواند موجب اختلال در جذب سایر عناصر مانند کلسیم و منیزیم شود. بنابراین، مدیریت صحیح میزان مصرف لجن ضروری است (۱۷).

۶- هدایت الکتریکی و احتمال افزایش شوری: هدایت الکتریکی لجن در مقایسه با خاک منطقه بسیار بالاتر است. لجن شور خطر شوری خاک و کاهش عملکرد محصولات کشاورزی را افزایش می‌دهد (۱۷). در بلندمدت، استفاده مکرر از لجن ممکن است موجب شور شدن خاک شود که اصلاح آن هزینه‌بر و دشوار خواهد بود.

پایداری لجن (Stability)

پایداری به میزان تجزیه‌شدگی مواد آلی لجن اشاره دارد و یکی از شاخص‌های کلیدی برای ایمنی کاربرد آن در کشاورزی است. در این مطالعه، پایداری به‌صورت مستقیم بررسی نشده است (یعنی هیچ آزمون تنفسی یا زیستی مانند AT4 یا SOUR انجام نشده)، اما نسبت C/N برابر با ۶/۳۸ است که به طور قابل توجهی کمتر از بازه ایده‌آل کمپوست (۳۰-۲۰) می‌باشد و این عدد نشان‌دهنده آن است که بیشتر مواد آلی لجن در حال حاضر تجزیه شده‌اند و فعالیت میکروبی کاهش یافته است. لذا لجن پایدار تلقی می‌شود و تجزیه ثانویه چندانی ندارد و کربن آلی با مقدار ۲۷/۳۲ درصد در بازه مطلوب (۵۰–۲۰ درصد) قرار دارد و این مقدار به تنهایی نشان‌دهنده ناپایداری نیست، چون پایداری به نسبت آن با نیتروژن نیز وابسته است. بنابراین، پایداری لجن به‌صورت غیرمستقیم و بر اساس شاخص‌های ترکیبی (C/N و کربن آلی) قابل ارزیابی بوده و وضعیت نسبتاً خوبی دارد.

اشباع‌شدگی لجن (Saturation)

اشباع‌شدگی به وضعیت بارگذاری بیش از حد لجن با مواد آلاینده (مخصوصاً فلزات سنگین) اشاره دارد. بررسی این مورد اهمیت بالایی دارد چون می‌تواند منجر به آلودگی ثانویه خاک شود. در طی این مطالعه، مقادیر فلزات سنگین در لجن، به‌ویژه آرسنیک، مس و روی، از حد مجاز استاندارد ایران بالاتر گزارش شدند که بیانگر اشباع نسبی لجن از این فلزات است. بررسی‌های اولیه خاک اطراف تصفیه‌خانه خوی نیز به عنوان ارزیابی اثرات تجمعی در مقیاس منطقه‌ای انجام شده، اما تحلیل کمی نتایج خاک برای اثبات یا رد آلودگی ثانویه ضروری است.

ارزیابی قابلیت استفاده مجدد از لجن

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از لجن تصفیه‌خانه خوی در کشاورزی تنها در صورتی امکان‌پذیر خواهد بود که میزان تخم نماتودها به‌طور مؤثر کاهش یابد و غلظت فلزات سنگین در محدوده مجاز باقی بماند. برای بهره‌گیری از لجن به‌عنوان یک ماده اصلاح‌کننده خاک، کنترل دقیق غلظت فلزاتی مانند آهن، روی و مس ضروری است تا از تجمع تدریجی این عناصر در خاک و ایجاد سمیت برای گیاهان جلوگیری شود. همچنین در شرایطی که امکان استفاده کشاورزی وجود نداشته باشد، دفن لجن در محیط‌زیست باید با کاهش قابل توجه میزان آرسنیک و تخم نماتودها همراه باشد تا از آلودگی منابع آب زیرزمینی پیشگیری شود (۲۹). از جمله مزایای بالقوه استفاده از این لجن می‌توان به بهبود محتوای آلی خاک، افزایش حاصلخیزی از طریق افزایش عناصر غذایی اصلی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم، و نیز بهبود ساختار فیزیکی

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب اشاره کرد (۱۹). با این حال، مخاطراتی نیز وجود دارد که نیازمند مداخلات مدیریتی هستند. از جمله این مخاطرات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: تجمع بیش‌ازحد نیتروژن و فسفر که ممکن است منجر به نشت این عناصر به منابع آبی شود؛ این مسئله با مدیریت مقدار و دفعات مصرف لجن قابل کنترل است. افزایش شوری خاک به دلیل بالابودن EC لجن، که با اختلاط لجن با مواد کم‌نمک یا کربن‌دار (مانند خاک‌اره یا بقایای گیاهی) می‌توان EC را کاهش داد (۳۰). خطر آلودگی فلزات سنگین و آلاینده‌های دیگر که با پایش دقیق کیفیت لجن پیش از مصرف و جلوگیری از مصرف بیش‌ازحد کاهش می‌یابد (۱۹). برای کاهش این مخاطرات، اجرای راهبردهای اصلاحی زیر توصیه می‌شود:

پایش دوره‌ای خاک از نظر pH، شوری و عناصر مغذی، کمپوست کردن لجن به منظور کاهش بار میکروبی و افزایش پایداری، شست‌وشوی لجن یا نمک‌زدایی اولیه برای کاهش شوری، پایش مستمر فلزات سنگین به‌ویژه آرسنیک، جیوه و سرب که در مقادیر نزدیک به حد مجاز قرار دارند، ضدعفونی لجن برای حذف تخم نماتودها و کاهش عوامل بیماری‌زا (۳۰). با توجه به اینکه لجن مورد بررسی دارای غلظت بالای آهن و روی است که می‌توانند اثر دوگانه‌ای بر رشد گیاهان داشته باشند (هم تغذیه‌ای و هم سمی در صورت تجمع)، استفاده از این لجن در مصارف کشاورزی باید با ارزیابی دقیق‌تر، پایش مستمر و تحت نظارت کارشناسی انجام گیرد تا اطمینان از ایمنی محیط‌زیستی و بهداشتی آن فراهم شود (۳۱، ۳۲).

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف ارزیابی کیفیت میکروبی، فیزیکوشیمیایی و شیمیایی (فلزات سنگین) لجن تولیدی تصفیه‌خانه فاضلاب خوی با فرآیند ناپیوسته متوالی (SBR) و بررسی قابلیت استفاده از آن در کشاورزی انجام شد. نتایج نشان داد که لجن مورد مطالعه از نظر ترکیبات تغذیه‌ای دارای ویژگی‌های مطلوبی بوده و حاوی مقادیر بالای نیتروژن (۴۲۵۰۰ mg/kg)، فسفر (۵۹۹۲ mg/kg)، پتاسیم (۱۱۶۳ mg/kg) و کربن آلی (۲۷/۳۲ درصد) بود. این عناصر می‌توانند نقش مهمی در افزایش حاصلخیزی خاک و کاهش مصرف کودهای شیمیایی ایفا کنند. با این حال، کاربرد مستقیم این لجن در اراضی کشاورزی با محدودیت‌های قابل توجهی روبه‌روست. میزان هدایت الکتریکی بسیار بالا (۹۸۹۱ µS/m) همراه با غلظت زیاد سدیم و کلرید، نشان‌دهنده شوری شدید لجن است که می‌تواند موجب کاهش عملکرد محصولات زراعی و تخریب ساختار خاک در بلندمدت شود. نسبت بسیار پایین C/N برابر با ۶/۳۸ و درصد بالای مواد آلی فرار نیز گویای ناپایداری زیستی لجن و لزوم تثبیت آن پیش از مصرف است. این موضوع ضرورت انجام فرآیندهایی مانند کمپوست‌سازی یا هضم بی‌هوازی برای کاهش فعالیت‌های میکروبی و تثبیت مواد آلی را برجسته می‌کند. از نظر ایمنی بهداشتی، اگرچه غلظت کلیفرم کل در محدوده مجاز استاندارد EPA قرار داشت، اما شمار بالای تخم نماتودها (میانگین ۱۷ Number/g) بسیار فراتر از حد مجاز استانداردهای ایران و بین‌المللی بود که نشان‌دهنده آلودگی انگلی جدی است. بنابراین، استفاده ایمن از این لجن بدون فرآیند ضدعفونی حرارتی یا شیمیایی امکان‌پذیر نیست. در بخش فلزات سنگین، غلظت برخی عناصر مانند آرسنیک (۱۰/۲۷ mg/kg)، روی (۵۳۰/۹۳ mg/kg) و مس (۱۳۴/۸۶ mg/kg) از حدود مجاز استاندارد ملی ایران فراتر رفت، اگرچه همچنان در محدوده مجاز استاندارد EPA قرار داشتند. سایر فلزات نظیر سرب، کادمیوم و نیکل در محدوده مجاز هر دو استاندارد بودند. این نتایج احتمال آلودگی ناشی از منابع صنعتی یا ورودی‌های خاص به سیستم تصفیه‌خانه را مطرح می‌کند. بررسی خاک‌های اطراف تصفیه‌خانه نیز نشان داد که لجن بر برخی خصوصیات خاک اثرگذار بوده و موجب افزایش نسبی فسفر، پتاسیم و کربن آلی شده است، با این حال، خطر اشباع خاک از نمک و فلزات در صورت مصرف مکرر لجن بدون اصلاحات قابل توجه است. در مجموع، با وجود ارزش

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

تغذیه‌ای بالای این لجن، استفاده مستقیم آن در کشاورزی به دلیل محدودیت‌های بهداشتی، شیمیایی و محیط‌زیستی توصیه نمی‌شود. انجام فرآیندهای اصلاحی شامل نمک‌زدایی، کمپوست‌سازی، ضدعفونی و پایش مستمر فلزات سنگین پیش از مصرف ضروری است. همچنین توصیه می‌شود مصرف لجن متناسب با نوع خاک، محصول و شرایط اقلیمی مدیریت شود تا از اثرات تجمعی و بلندمدت آن بر محیط زیست و سلامت انسان جلوگیری گردد.

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی پایداری زیستی لجن با آزمون‌هایی مانند AT4 و SOUR به‌طور دقیق ارزیابی شود و علاوه بر غلظت کل، زیست‌دسترس‌پذیری فلزات سنگین در شرایط مختلف خاک نیز بررسی گردد. مطالعه تأثیر فرآیندهای تثبیت مانند کمپوست‌سازی یا هضم بی‌هوازی بر کاهش بار میکروبی و بهبود کیفیت لجن، تحلیل اثرات تجمعی مصرف بلندمدت لجن بر خاک و گیاه، و ارزیابی اقتصادی- محیط‌زیستی استفاده از آن در مقایسه با روش‌های دیگر نیز ضروری است. همچنین تدوین دستورالعمل بومی برای مصرف لجن در منطقه خوی و بررسی ترکیب آن با مواد آلی مکمل برای کاهش شوری و بهبود شاخص‌های خاک توصیه می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. این مطالعه براساس مجوز شماره IR.KHOY.REC.1402.014 دانشکده علوم پزشکی خوی که در سامانه ملی اخلاق در پژوهش‌های زیست پزشکی وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی ثبت شده صورت گرفته است.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از طرح تحقیقاتی با عنوان "بررسی کیفیت میکروبی و شیمیایی لجن دفعی تصفیه فاضلاب با فرایند SBR و ارزیابی ریسک کاربرد آن برای کود کشاورزی (مطالعه موردی تصفیه خانه فاضلاب خوی)" مصوب دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی، درمانی در سال ۱۴۰۲ با کد ۴۰۱۰۰۰۰۰۴ است که با حمایت دانشکده علوم پزشکی و خدمات بهداشتی، درمانی خوی اجرا شده است. نویسندگان از شرکت آب و فاضلاب خوی بخاطر حمایت و مساعدت در انجام این طرح پژوهشی قدردانی و تشکر بعمل می آورند.

References

1. Ansari M, Farzadkia M. Feasibility of treating the produced sludge in municipal wastewater treatment plant using ozonation method. Iranian Journal of Health and Environment. 2021;14(2):351-62 (in Persian).
2. Mtshali JS, Tiruneh AT, Fadiran AO. Characterization of sewage sludge generated from wastewater treatment plants in Swaziland in relation to agricultural uses. Resources and Environment. 2014;4(4):190-99.
3. Latosińska J. Risk assessment of soil contamination with heavy metals from sewage sludge and ash after its incineration. Desalination and Water Treatment. 2020;199:297-306.
4. Aghanaghad M, Asgari E, Sheikhmohammadi A, Tajfar H. Health risk assessment of heavy metals/metalloid caused by using sewage sludge in agriculture. Desalination and Water Treatment.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

2025;321:100977.

5. Assefa S, Tadesse S. The principal role of organic fertilizer on soil properties and agricultural productivity-a review. Agricultural Research & Technology. 2019;22(2):1-5.
6. Barati Rashvanlou R, Farzadkia M, Moserzadeh AA. Evaluation of pre-treatment efficiency of fats, oils and greases using low frequency ultrasonic waves to accelerate the process of anaerobic digestion. Iranian Journal of Health and Environment. 2021;14(1):115-28 (in Persian).
7. Vaziri AS, Mahmoudabadi HZ. Feasibility of using dried sudge from wastewater treatment plant in Yazd for agricultural purposes based on environmental protection agency standards. Journal of Environmental Health and Sustainable Development. 2016;1(2):100-08.
8. Yakamercan E, Ari A, Aygün A. Land application of municipal sewage sludge: Human health risk assessment of heavy metals. Journal of Cleaner Production. 2021;319:128568.
9. Farzadkia M, Mirzaiee R, Ghaffarkhani M, Bagheri F. Microbial quality assessment of disposal effluent and sludge from four decentralized wastewater. Journal of Health in the Field. 2013;1(3):24-30 (in Persian).
10. Ghoreishi B, Aslani H, Khatibi MS, Mansur SN, Mosaferi M. Pollution potential and ecological risk of heavy metals in municipal wastewater treatment plants sludge. Iranian Journal of Health and Environment. 2020;13(1):87-102 (in Persian).
11. Fiello M, Mikell A, Moore M, Cooper C. Variability in the characterization of total coliforms, fecal coliforms and Escherichia coli in recreational water supplies of north Mississippi, USA. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2014;93:133-37.
12. Yousefi Z, Hezarjaribi HZ, Mousavinasab N, Soltani A. Identifying parasites in the outlet sludge of industrial wastewater treatment plant: a case study in Babolsar, Iran 2015. Journal of Mazandaran University of Medical Sciences. 2018;27(156):177-86 (in Persian).
13. Silva YJABd, Nascimento CWAd, Biondi CM, Preston W. Comparison of digestion methods to determine heavy metals in fertilizers. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2014;38:650-55.
14. Kanteraki A, Isari E, Zafeiropoulos I, Cangemi S, Bountla A, Kalavrouziotis I. Structural analysis and characterization of biosolids. A case study of biosolids from wastewater treatment plants in Western Greece. Science of The Total Environment. 2024;908:168425.
15. Król A, Mizerna K, Bożym M. An assessment of pH-dependent release and mobility of heavy metals from metallurgical slag. Journal of Hazardous Materials. 2020;384:121502.
16. Dong B, Liu X, Dai L, Dai X. Changes of heavy metal speciation during high-solid anaerobic digestion of sewage sludge. Bioresource Technology. 2013;131:152-58.
17. Baloch MYJ, Zhang W, Sultana T, Akram M, Al Shoumik BA, Khan MZ, et al. Utilization of sewage sludge to manage saline–alkali soil and increase crop production: Is it safe or not? Environmental Technology & Innovation. 2023;32:103266.
18. Di Costanzo N, Cesaro A, Di Capua F, Esposito G. Exploiting the nutrient potential of anaerobically digested sewage sludge: A review. Energies. 2021;14(23):8149.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

19. Delibacak S, Voronina L, Morachevskaya E. Use of sewage sludge in agricultural soils: Useful or harmful. Eurasian Journal of Soil Science. 2020;9(2):126-39.
20. Kumar V, Chopra A, Kumar A. A review on sewage sludge (Biosolids) a resource for sustainable agriculture. Archives of Agriculture and Environmental Science. 2017;2(4):340-47.
21. Fijalkowski K, Rorat A, Grobelak A, Kacprzak MJ. The presence of contaminations in sewage sludge–The current situation. Journal of Environmental Management. 2017;203:1126-36.
22. Afolalu SA, Ikumapayi OM, Ogedengbe TS, Kazeem RA, Ogundipe AT. Waste pollution, wastewater and effluent treatment methods–an overview. Materials Today: Proceedings. 2022;62:3282-88.
23. Tansel B, Zhang K. Effects of saltwater intrusion and sea level rise on aging and corrosion rates of iron pipes in water distribution and wastewater collection systems in coastal areas. Journal of Environmental Management. 2022;315:115153.
24. Nunes N, Ragonezi C, Gouveia CS, Pinheiro de Carvalho MÂ. Review of sewage sludge as a soil amendment in relation to current international guidelines: A heavy metal perspective. Sustainability. 2021;13(4):2317.
25. Mabrouk O, Hamdi H, Sayadi S, Al Ghouti MA, Abu Dieyeh MH, Zouari N. Reuse of sludge as organic soil amendment: Insights into the current situation and potential challenges. Sustainability. 2023;15(8):6773.
26. Melo W, Delarica D, Guedes A, Lavezzo L, Donha R, de Araújo A, et al. Ten years of application of sewage sludge on tropical soil. A balance sheet on agricultural crops and environmental quality. Science of The Total Environment. 2018;643:1493-501.
27. Kidd PS, Domínguez Rodríguez MJ, Díez J, Monterroso C. Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge. Chemosphere. 2007;66(8):1458-67.
28. Bhatt MK, Labanya R, Joshi HC. Influence of long-term chemical fertilizers and organic manures on soil fertility-A review. Universal Journal of Agricultural Research. 2019;7(5):177-88.
29. Kariab H, Emamjomeh MM, Zakariaie S. Risk assessment of exposure to heavy metals (Pb, Cd, Cr, and Ni) in the hazardous solid wastes identified in the wastewater treatment plant of industrial city. Iranian Journal of Health and Environment. 2023;15(4):601-16 (in Persian).
30. Seleiman MF, Santanen A, Mäkelä PS. Recycling sludge on cropland as fertilizer–Advantages and risks. Resources, Conservation and Recycling. 2020;155:104647.
31. Lamastra L, Suciu NA, Trevisan M. Sewage sludge for sustainable agriculture: contaminants' contents and potential use as fertilizer. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2018;5(1):1-6.
32. Hudcová H, Vymazal J, Rozkošný M. Present restrictions of sewage sludge application in agriculture within the European Union. Soil & Water Research. 2019;14(2):104-20.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]

Available online: https://ijhe.tums.ac.ir

Orginal Article

Investigation of the chemical and microbial parameters of sludge produced at the Khoy city municipal wastewater treatment plant and assessment of its agricultural application

Mohammad Aqanaghad[1], Amir Sheikhmohammadi[1], Esrafil Asgari[2,*], Hamidreza Tajfar[3]

1- Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Khoy University of Medical Sciences, Khoy, Iran
2- Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Zanjan University of Medical Sciences, Zanjan, Iran
3- Laboratory of Khoy Wastewater Treatment Plant, Khoy Water and Wastewater Company, Khoy, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 20 August 2025
Revised: 09 November 2025
Accepted: 15 November 2025
Published: 14 December 2025

Keywords: Sewage sludge quality, Sequencing batch reactor, Agricultural application, Reuse, Soil improvement

***Corresponding Author:**
asgari.esrafil@zums.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objective: This study aimed to assess the chemical and microbial quality of sludge generated at the Khoy wastewater treatment plant using an SBR process, and to compare the results with established agricultural standards.

Materials and Methods: In this study, monthly sludge samples were collected and analyzed using standard EPA methods, including the 15-tube technique for coliforms, flotation for Ascaris eggs, and acid digestion for heavy metals. Data were analyzed using SPSS v.25 and statistical analyses included Pearson correlation tests.

Results: The analyzed sludge exhibited an acceptable pH (7.14) and a high organic carbon content (27.32%). However, its elevated salinity (9891 µS/m) and low C/N ratio (6.38) indicated biological instability and limitations for direct agricultural application. The concentrations of heavy metals—including arsenic (10.27 mg/kg), copper (134.86 mg/kg), and zinc (530.93 mg/kg)— exceeded Iran's national standards. Heat-map analysis confirmed a significant correlation between salinity, and the levels of chloride (Cl-), and sulfate (SO_4^{2-}). Despite its nutritional value, the sludge is not recommended for direct agricultural use without prior treatments such as stabilization, salinity reduction, and pathogen removal.

Conclusion: Despite the substantial nutrient content of the sludge, including nitrogen, phosphorus, and organic carbon, its direct application in agriculture faces serious limitations due to high salinity, an imbalanced C/N ratio, severe microbial contamination (e.g., nematode eggs), and the exceedance of permissible levels for several heavy metals. Safe utilization of this sludge requires corrective treatments such as stabilization, disinfection, desalination, and regular monitoring of heavy metal concentrations.

Please cite this article as: Aqanaghad M, Sheikhmohammadi A, Asgari E, Tajfar H. Investigation of the chemical and microbial parameters of sludge produced at the Khoy city municipal wastewater treatment plant and assessment of its agricultural application. Iranian Journal of Health and Environment. 2025;18(3):519-34.

Copyright © 2025 Iranian Association of Environmental Health، and Tehran University of Medical Sciences. Published by Tehran University of Medical Sciences. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Noncommercial uses of the work are permitted، provided the original work is properly cited.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-21]