مجله علوم و فنون هسته‌ای، دوره ۴۵، شماره ۲، جلد ۱۰۸، تابستان ۱۴۰۳

Journal of Nuclear Science and Technology
Vol. 45 (3), Serial Number 108, 2024

کاربرد پرتو گاما در بازیافت و غیرفعال‌سازی ریزجانداران بیماری‌زا در لجن فاضلاب شهری تصفیه‌خانه جنوب تهران برای تولید کود آلی خاک

ابراهیم مقیسه*[۱]، فائزه کیان‌بخت[۲]، خدیجه باقری[۲]، سمیرا شهبازی[۱]
۱. پژوهشکده‌ی کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۴۹۸-۳۱۴۶۵، کرج- ایران
۲. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، صندوق پستی: ۴۵۱۹۵-۳۱۳، زنجان - ایران
*Email: emoghiseh@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۹   تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱/۲۶

چکیده

لجن یک محصول جانبی اجتناب‌ناپذیر تصفیه‌خانه فاضلاب شهری و منبع عناصر غذایی مورد نیاز گیاه است و با غیرفعال‌سازی ریزجانداران بیماری‌زای آن با پرتوتابی گاما، به عنوان کود آلی قابل بازیافت است. هدف اصلی این پژوهش ارزیابی تیماردهی لجن فاضلاب تصفیه‌خانه جنوب تهران تحت تأثیر پرتو گاما با/ بدون حرارت‌دهی برای حذف شاخص‌های اصلی بیماری‌زا می‌باشد. شاخص‌های باکتریایی هم‌چون *کلی‌فرم گرماپای، استافیلوکوکوس، سالمونلا و ای‌کولای* با استفاده از پرتو گاما (دزهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگری)، حرارت‌دهی (دمای ۷۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد) و ترکیبی از آن‌ها، مورد بررسی قرار گرفتند. میزان شمارش برخی باکتری‌های بیماری‌زا، بیش از حد استاندارد و دارای محدودیت در استفاده به عنوان کود آلی بودند، تا جایی که براساس استاندارد آمریکا و استاندارد ایران در کلاس B و $P_۳$ (به ترتیب) قرار نگرفتند. استفاده از پرتوتابی گاما حداقل ۱۰ کیلوگری به تنهایی و ترکیب دو روش پرتوتابی گاما (حداقل ۱۰ کیلوگری) و حرارت‌دهی، برای غیرفعال‌سازی چهار شاخص باکتریایی کافی می‌باشد؛ در حالی که دو روش حرارت‌دهی به تنهایی، قادر به حذف کامل آن‌ها نبودند. در مجموع پرتوتابی لجن فاضلاب با گاما به تنهایی، برای تولید کود آلی خاک مطابق با استانداردهای ملی و بین‌المللی بوده و در مقایسه با ترکیب دو روش، کافی و مقرون به صرفه است.

کلیدواژه‌ها: پرتودهی گاما، بازیافت لجن فاضلاب، ریزجانداران بیماری‌زا، کود آلی خاک، تصفیه خانه جنوب تهران

Application of gamma irradiation in recycling and inactivation of pathogenic microorganisms of municipal sewage sludge in South of Tehran for production of soil organic fertilizer

E. Moghiseh*[1], F. Kiyanbakht[2], Kh. Bagheri[2], S. Shahbazi[1]
1. Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 31465-1498, Karaj – Iran
2. Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, P.O.Box: 313-45195, Zanjan – Iran

Research Article
Received 29.1.2023, Accepted 15.4.2023

Abstract

Sewage sludge is an inevitable byproduct of wastewater treatment plants and a valuable source of essential plant nutrients. With inactivation of its pathogenic microorganisms by gamma radiation can be recycled as soil organic fertilizer. This research evaluates the sludge treatment by gamma irradiation with/without pasteurization on the removal of main indicators pathogenic in the South of Tehran waste water treatment plant sludge (WWPTs). Gamma irradiation (0, 5, 10, 15, 20 kGy), pasteurization (70 and 180 °C) and their combination were used to examine bacterial indicators such as Fecal Coliform, Staphylococcus, Salmonella, and Escherichia (E. coli). There were some pathogenic bacteria in this organic fertilizer that exceeded the standards and could not be classified as class B or P3 according to the American and Iranian standards. Application of gamma irradiation at least 10 kGy dose, alone, and combination of gamma irradiation (at least 10 kGy) and pasteurization were sufficient for complete inactivation of four pathogenic bacteria indicators, However, the pasteurization methods alone were not able for removal them completely. Generally, gamma irradiation of sewage sludge to produce organic soil fertilizer is carried out in accordance with national and international standards. It is sufficient and cost-effective compared to two methods.

Keywords: Gamma Irradiation, Recycling Sewage sludge, Pathogenic microorganisms, Soil Organic Fertilizer, South of Tehran waste water treatment plant

۱. مقدمه

مناطق شهری حدود ۳ درصد از کل سطح زمین را تشکیل می‌دهند و بیش از ۵۵ درصد از جمعیت جهان را در خود جای داده‌اند. تمایل بیش‌تر مردم به تمرکز در شهرهای بزرگ، هم‌چنان در دهه‌های آینده افزایش خواهد یافت. این امر منجر به این می‌شود که دو سوم جمعیت جهان، یعنی ۷ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰ در مناطق شهری زندگی کنند. این پدیده اجتماعی نیاز به حفظ کارآمد و پایدار سامانه‌های تصفیه آب و فاضلاب برای تضمین تأمین آب کافی در مراکز بزرگ شهری و جلوگیری از آلودگی زیست‌بوم‌های طبیعی را مضاعف می‌کند [۱].

لجن فاضلاب[1] (SS) به عنوان محصول جانبی و مخلوط ناهمگن تصفیه فاضلاب‌ها، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن ۲۱ می‌باشد [۲]. تصفیه یا تثبیت لجن فاضلاب تا ۶۰ درصد از کل هزینه‌های عملیاتی تصفیه‌خانه فاضلاب را در برمی‌گیرد؛ لذا این فرایند پیچیده، سخت و هزینه‌بر می‌باشد [۳]. استفاده از لجن فاضلاب در زمین‌های کشاورزی، بهترین راه برای بازیافت مواد مغذی موجود در آن است به طوری‌که حدود ۳۵ درصد لجن فاضلاب، به عنوان کود آلی خاک در اروپا و آمریکا استفاده می‌شود [۴]. لجن فاضلاب شامل یک بخش آلی غیرسمی (ریزجانداران، مواد آلی)، عناصر مغذی (فسفر، پتاسیم، نیتروژن و ...) و اجزای خطرناک هم‌چون ریزجانداران بیماری‌زا، آلودگی‌های پایدار آلی و فلزات سنگین می‌باشد [۵]. غلظت آلاینده‌های لجن فاضلاب، از جمله عوامل بیماری‌زا و فلزات سنگین، ممکن است پیامدهای قابل توجهی برای ایمنی غذای انسان و سلامت گیاه داشته باشند [۶]. بنابراین، نیازمند تیماردهی قبل از مصرف می‌باشد تا ریزجانداران بیماری‌زا به دقت حذف شوند و خطرات احتمالی برای آب، خاک و سلامت انسان تا حد امکان به حداقل برسد [۷]. استاندارد حفاظت محیط زیست آمریکا و استاندارد ملی ایران در خصوص تصفیه یا تثبیت لجن فاضلاب و استفاده از آن در کشاورزی تدوین شده است [۸، ۹].

روش‌های تثبیت یا تصفیه لجن، شامل پاستوریزاسیون حرارتی، هضم هوازی و بی‌هوازی، تثبیت قلیایی (آهک‌زنی)، کمپوست‌سازی، خشک کردن از طریق هوا، ذخیره‌سازی طولانی‌مدت، پیرولیز (بیوچار یا زغال زیستی)، هیدرولیز (هیدروچار)، پرتودهی گاما و باریکه الکترون می‌باشد [۱۰-۱۶]. تیمارهای شیمیایی مانند تثبیت قلیایی (آهک‌زنی) سبب کاهش قابل توجهی در باکتری‌ها و احتمالاً ویروس‌ها به سبب تولید گرما بر اثر افزودن آهک به لجن می‌شوند [۱۷] ولی نیاز به افزایش و نگه‌داری pH در مقادیر بالای ۱۲، ایجاد بوی نامطلوب به علت تولید گاز آمونیاک [۱۱]، عدم امکان استفاده به عنوان کود آلی باتوجه به pH بالای لجن می‌باشد [۱۷]. در داخل کشور فرزادکیا و همکاران [۱۸] با استفاده از آهک‌زنی به لجن فاضلاب تصفیه‌خانه اهواز، ریزجاندارن بیماری‌زا را کاهش داده و لجن فاضلاب را به کلاس B ارتقاء دادند. خشک کردن یا حرارت‌دهی در کاهش جمعیت ریزجانداران بیماری‌زا مؤثر است، ولی به‌دلیل زمان‌بر بودن و وابسته بودن به سوخت و هزینه زیاد آن، صرفه اقتصادی ندارد [۱۱، ۱۷]. کمپوست‌سازی برای حذف بو و رطوبت و کاهش قابل توجه ریزجانداران بیماری‌زا مؤثر است، ولی عدم حذف کامل و امکان رشد مجدد ریزجانداران بیماری‌زا [۱۷] و لزوم رسیدن همه توده لجن به دمای مناسب برای حذف ریزجانداران بیماری‌زا از معایب این روش می‌باشد [۱۱]. پرتوتابی با پرتوهای یون‌ساز به عنوان یک ابزار قدرتمند در حذف ریزجانداران بیماری‌زا به دلیل کارآیی آن برای ریزجانداران مقاوم و امکان کاربرد در مقیاس تجاری در آب، فاضلاب، لجن، و ... مورد حمایت و پیشنهاد قرار گرفته است [۱۶، ۱۹-۲۲]. رانکوک و همکاران [۱۶] دز ۱۰ کیلوگری، ناخاله و همکاران [۱۹] دز بالاتر از ۵ کیلوگری، و جبری و همکاران [۲۰] دز ۷ کیلوگری پرتو گاما را برای غیرفعال‌سازی برخی ریزجانداران بیماری‌زا را کافی دانسته‌اند. در داخل کشور بت عیشو و همکاران [۲۱] دز ۱۰ کیلوگری پرتو گاما را بر غیرفعال‌سازی دو گروه باکتری کلی‌فرم و سالمونلا پیشنهاد نموده‌اند. عسگری و همکاران [۲۲] با استفاده از پرتوتابی گاما، دز ۲۰ کیلوگری را برای کاهش جمعیت کلی‌فرم در لجن فاضلاب گزارش نموده‌اند.

لجن فاضلاب بر اساس میزان آلایندگی عوامل زیستی بیماری‌زای باکتریایی به خصوص *کلیفرم گرمایای* و ... به دو دسته سطح A (بدون محدودیت استفاده از لحاظ بیماری‌زاها) و B (محدودیت در برخی موارد استفاده) جهت کاربرد در کشاورزی تقسیم‌بندی شده‌اند. به طوری‌که عدم وجود و یا تراکم حداقلی و کم‌تر از ۱۰۰۰ سلول بر گرم ماده خشک، لجن فاضلاب را در کلاس A و محدودیت‌هایی هم‌چون کم‌تر از ۲ میلیون سلول بر گرم ماده خشک، لجن فاضلاب را در کلاس B قرار داده است [۸]. براساس استاندارد ملی ایران [۹] دو دسته P۱ و P۲ معادل سطح A تقسیم‌بندی آمریکا، و دسته P۳ معادل سطح B درجه‌بندی آمریکا، در نظر گرفته شده‌اند.

مؤسسه تحقیقات خاک و آب وزرات جهاد کشاورزی [۲۳] الزامات و شاخص‌هایی را برای استفاده از لجن فاضلاب به عنوان کود آلی در خاک و کشاورزی تدوین و ابلاغ کرده است. براساس ماده ۱۷ شیوه نامه ثبت مواد کودی مؤسسه خاک و آب، مهم‌ترین شاخص‌های اولیه بررسی انواع مواد کودی آلی،

1. Sewage Sludge (SS)

آلودگی‌های زیستی بوده به طوری‌که مواد و ترکیبات آلی موردنظر، نباید خطر بیماری‌زایی برای انسان، دام و گیاهان داشته باشند. عوامل بیماری‌زای باکتریایی هم‌چون *سالمونلا*، *کلی‌فرم و ایکولای* نباید وجود داشته باشند و یا در حد غیرقابل اندازه‌گیری باشند (کم‌تر از ۱۰۰۰ سلول در هر گرم از وزن خشک لجن فاضلاب).

براساس بند ۲ ماده ۳۲ قانون برنامه ششم توسعه کشور، دولت مکلف شده است در جهت اصلاح و بهبود خاک‌های کشاورزی و افزایش کربن (ماده آلی) خاک، سالانه پانصد هزار هکتار از خاک‌ها را تحت اقدام خود قرار دهد؛ یکی از راه‌کارها در این خصوص استفاده از کودهای آلی است. از آن‌جایی که منابع مرسوم مواد آلی مانند کودهای دامی کافی برای مصرف در این خاک‌ها وجود ندارد؛ استفاده از لجن فاضلاب و ... یکی از راه‌کارهای افزایش ماده آلی خاک کشور سودمند خواهد بود. در ایران سالیانه حدود ۶۵۰ هزار تن لجن فاضلاب [۱] تولید می‌شود؛ از این مقدار در تصفیه‌خانه بزرگ جنوب تهران روزانه حداقل ۳۰۰ تن در روز (سالیانه حداقل ۱۱۰ هزار تن) لجن تولید می‌شود [۲۴]. براساس جمع‌بندی نتایج مقالات، کارآیی روش‌های مرسوم تصفیه و تثبیت لجن هم‌چون آهک‌زنی، هضم هوازی و بی‌هوازی، کمپوست‌سازی، پاستوریزاسیون حرارتی و ... در حذف یا غیرفعال‌سازی عوامل زیستی بیماری‌زا کم‌تر از روش پرتوتابی گاما بوده است. تلفیق روش پرتوتابی و حرارت‌دهی در برخی مطالعات خارج از کشور هم‌چون پریادارشینی و همکاران [۲۵] انجام شده است؛ لکن استفاده از روش پرتوتابی به تنهایی یا در تلفیق با روش حرارت‌دهی، در تحقیقات کشور، کم‌تر مشاهده شده است و اگر هم تحقیقی انجام شده تنها از روش پرتوتابی استفاده شده است [۲۱، ۲۲]. لذا هدف این تحقیق ارزیابی جداگانه و تلفیقی اثرات پرتو گاما و پاستوریزاسیون حرارتی بر برخی ویژگی‌های زیستی هم‌چون باکتری‌های *کلی‌فرم گرماپای، استافیلوکوکوس، سالمونلا، و ایکولای* در لجن تصفیه‌خانه شهری جنوب تهران و دست‌یابی به دز گندزدایی در لجن فاضلاب با پرتو گاما همراه یا بدون پاستوریزاسیون حرارتی در راستای تولید و معرفی کود آلی بر پایه لجن فاضلاب پرتوتابی شده منطبق بر استاندارد ملی و استاندارد آمریکا [۸، ۹] و شیوه‌نامه معرفی و ثبت کود [۲۳] برای اولین بار در کشور می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ پرتوتابی و حرارت‌دهی لجن فاضلاب

پس از هماهنگی و نمونه‌برداری از تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران، و آماده‌سازی نمونه‌های لجن فاضلاب، پرتودهی بدون هیچ‌گونه پیش‌تیماری با استفاده از دستگاه پرتودهی گاماسل با چشمه کبالت-۶۰ با اکتیویته ۴۱۲۰ کوری و آهنگ دز ۰/۹۶ گری بر ثانیه، در ظروف دربسته با دزهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگری انجام شد (جدول ۱). ترکیب روش‌های پاستوریزاسیون حرارتی (حرارت‌دهی) و پرتوتابی شامل حرارت‌دهی نمونه‌های لجن در دمای ۷۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ و ۳۰ دقیقه (به ترتیب) طبق روش باگ و همکاران [۲۶] و سپس پرتودهی طبق دزهای فوق‌الذکر انجام شد (جدول ۱).

۲.۲ کشت‌های میکربی و شمارش جمعیت ریزجانداران بیماری‌زا لجن فاضلاب

تجزیه‌های زیستی بلافاصله بعد از ورود به آزمایشگاه صورت گرفت. مقدار ۵ گرم نمونه با ۴۵ میلی لیتر سرم فیزیولوژی (۸/۵ گرم نمک در یک لیتر آب مقطر) مخلوط و به صورت تعلیق یکنواخت شد. هر میلی‌لیتر از این نمونه نشان‌دهنده یک گرم (رقت ۰/۱) نمونه جامد است. سوسپانسیون به مدت ۲۰ دقیقه روی شیکر (۱۵۰ دور در دقیقه) تکان داده شد. رقت‌های ده-دهی تا $۱۰^{-۷}$ در سرم فیزیولوژی تهیه و از هر رقت ۰/۵ میلی لیتر روی محیط کشت نوترینت آگار؛ به صورت افتراقی کشت شدند و سپس پلیت‌ها در دمای ۳۰-۲۰ درجه سانتی‌گراد درون انکوباتور نگه‌داری شدند. شمارش تعداد کلنی‌ها در ظرف مدت ۴۸-۲۴ ساعت بعد از زمان کشت انجام شد.

جدول ۱. تیمارهای لجن فاضلاب

شماره	عنوان	جزییات تیمار لجن فاضلاب
۱.	SS۱	پرتوتابی نشده و بدون حرارت
۲.	SS۲	پرتوتابی‌شده با دز ۵ کیلوگری
۳.	SS۳	پرتوتابی‌شده با دز ۱۰کیلوگری
۴.	SS۴	پرتوتابی‌شده با دز ۱۵ کیلوگری
۵.	SS۵	پرتوتابی‌شده با دز ۲۰ کیلوگری
۶.	SS۱P۱	حرارت‌دهی °C ۷۰ (P۱)، ۶۰ دقیقه- بدون پرتوتابی
۷.	SS۲P۱	حرارت‌دهی °C ۷۰ + پرتوتابی با دز ۵ کیلوگری
۸.	SS۳P۱	حرارت‌دهی °C ۷۰ + پرتوتابی با دز ۱۰ کیلوگری
۹.	SS۴P۱	حرارت‌دهی °C ۷۰ + پرتوتابی با دز ۱۵ کیلوگری
۱۰.	SS۵P۱	حرارت‌دهی °C ۷۰ + پرتوتابی با دز ۲۰ کیلوگری
۱۱.	SS۱P۲	حرارت‌دهی °C ۱۸۰ (P۲)، ۳۰ دقیقه- بدون پرتوتابی
۱۲.	SS۲P۲	حرارت‌دهی °C ۱۸۰ + پرتوتابی با دز ۵ کیلوگری
۱۳.	SS۳P۲	حرارت‌دهی °C ۱۸۰ + پرتوتابی با دز ۱۰ کیلوگری
۱۴.	SS۴P۲	حرارت‌دهی °C ۱۸۰ + پرتوتابی با دز ۱۵ کیلوگری
۱۵.	SS۵P۲	حرارت‌دهی °C ۱۸۰ + پرتوتابی با دز ۲۰ کیلوگری

کشت و شمارش باکتری‌های *کلی‌فرم گرماپای* روی محیط ویولترد بایل لاکتوز آگار (VRB) و انکوباسیون در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، کشت و شمارش باکتری *اشرشیاکلی (ایکولای)* در محیط *ائوزین متیلن بلو (EMB)*، *باکتری استافیلوکوکوس* آرئوس روی محیط کشت بردپارکر آگار (BPA)، باکتری *سالمونلا*، در محیط کشت سالمونلا شیگلا آگار (SS Agar)، و انکوباسیون این سه گروه باکتری به مدت ۲۴ تا ۴۸ ساعت در انکوباتور با دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد انجام شد [۲۷].

۳.۲ تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه واریانس و تحلیل آماری تأثیر پرتو گاما و حرارت‌دهی بر ویژگی‌های زیستی لجن فاضلاب به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با ۱۵ تیمار (جدول ۱) در ۹ تکرار با استفاده از نرم‌افزار SPSS ver.۲۲ انجام گردید. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم شد. ترسیم نقشه حرارتی[1] جهت خوشه‌بندی[2] نتایج به صورت بَرخَط [۲۸] انجام شد. هم‌چنین در محیط اکسل روش قالب‌بندی مشروط[3] داده‌ها (رنگی‌سازی جداول براساس تغییرات داده‌ها)، به منظور شناسایی سریع تغییرات داده‌ها، در محدوده مقادیر انجام شد.

۳. یافته‌ها و بحث

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر تعداد کلونی‌های باکتری‌های *کلی‌فرم، ایکولای، سالمونلا و استافیلوکوکوس* در سطح احتمال ۰٫۰۱ درصد معنی‌دار در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج CFU[4] یا تراکم کلنی‌های باکتری به صورت Log CFU در گرم لجن خشک گزارش شده است. نتایج تأثیر تیمارهای مختلف پرتوتابی، حرارت‌دهی و تلفیق آن‌ها، بر میزان شمارش کلنی چهار شاخص زیستی مهم باکتری‌های *کلی‌فرم، ایکولای، سالمونلا و استافیلوکوکوس* برحسب Log CFU در گرم خشک لجن فاضلاب در جدول ۳ نشان داده شده است. تراکم *کلی‌فرم‌ها* در تیمار شاهد لجن فاضلاب (SS۱) بیش از دو میلیون سلول در هر گرم لجن خشک شمارش گردید ($۳٫۲×۱۰^{۷}$ سلول یا $۷٫۵۱ \log_{۱۰}$.CFU/g dry SS). براساس میزان شمارش *کلی‌فرم‌ها*، لجن فاضلاب تصفیه‌خانه جنوب تهران را از نظر استاندارد حفاظت محیط زیست آمریکا [۸] در کلاس B قرار نمی‌دهد، هم‌چنین از نظر استاندارد ملی ایران پایین‌تر از دسته P۳ و در دسته P۴ قرار گرفتند. با حرارت‌دهی در دمای ۷۰ درجه به مدت یک ساعت (تیمار SS۱P۱)، تعداد باکتری‌های *کلی‌فرم* افزایش یافته و تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نشان دادند ($p<۰٫۰۵$). افزایش مقادیر کلی‌فرم در تیمار حرارت‌دهی احتمالاً ناشی از فراهم شدن شرایط دمایی برای رشد این گروه باکتریایی بوده است. از طرفی دیگر با پرتودهی گاما با دز ۵ کیلوگری (تیمار SS۲)، باکتری‌های *کلی‌فرم*، نسبت به شاهد تفاوت معنی‌دار داشته و کاهش یافتند ($۱٫۹×۱۰^{۵}$ سلول یا ۵٫۲۷ Log CFU در هر گرم لجن خشک) و لجن فاضلاب را در سطح B استاندارد آمریکا و سطح P۳ استاندارد ملی ایران قرار می‌دهد. با حداقل پرتودهی ۱۰ کیلوگری (به تنهایی، تیمار SS۳)، ترکیب حرارت ۷۰ درجه سانتی‌گراد + پرتوتابی ۵ کیلوگری (تیمار SS۲P۱)، و تیمار حرارت در دمای ۱۸۰ درجه (تیمار SS۱P۲) کل جمعیت باکتری‌های *کلی‌فرم* حذف شدند و از نظر شاخص کلی‌فرم، در سطح A یا دسته P۱ و بدون محدودیت در استفاده قرار گرفتند. از نظر شاخص باکتری *سالمونلا*، در تیمار شاهد (SS۱) ($۴٫۶۱ \log_{۱۰}$.CFU/g dry SS) و تیمار حرارت ۷۰ درجه سانتی‌گراد (SS۱P۱) ($۴٫۴۳ \log_{۱۰}$.CFU/g dry SS) آلودگی مشاهده شده و تفاوت معنی‌داری بین شاهد و تیمار حرارت مشاهده شد ($p<۰٫۰۵$) و مقداری کاهش نشان داد؛ ولی هم‌چنان آلودگی زیادی در محیط کشت مشاهده گردید. با حرارت ۱۸۰ درجه (SS۱P۲) و پرتوتابی حداقل ۵ کیلوگری (تیمار SS۲) و تیمارهای ترکیب پرتوتابی (حداقل ۵ کیلوگری) + حرارت، جمعیت باکتری‌های *سالمونلا*، حذف شدند (جدول ۳).

جدول ۲. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارهای پرتودهی و حرارت-پرتودهی بر Log CFU /g dry SS برخی شاخص‌های زیستی مهم لجن فاضلاب

منبع تغییر	درجه آزادی	*E. coli*	*F. coliform*	*Salmonella*	Staphylococcus
تیمار	۱۴	۴٫۱۲۲***	۷۵٫۳۳۲***	۲۲٫۷۸۱***	۵۵٫۶۸۷***
خطا	۱۲۰	۰٫۰۰۶	۰٫۰۶۳	۰٫۰۲۱	۰٫۱۴۳

*** تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۰٫۰۱ درصد

1. Heat Map
2. Clustering
3. Conditional Formatting
4. Colony Forming Unit

جدول ۳. اثر پرتوتابی و پاستوریزاسیون بر Log۱۰ CFU ریزجانداران بیماری‌زا باکتریایی در گرم لجن فاضلاب خشک

تیمارهای لجن فاضلاب	باکتری‌ها			
	E. coli	*Coliform*	*Salmonella*	*Staphylococcus*
SS۱	۲٫۶۲*a	۷٫۵۱b	۴٫۶۱ a	۵٫۷۴ a
SS۱P۱	۰٫۰۰b	۷٫۸۳ a	۴٫۴۳ b	۵٫۸۸ a
SS۱P۲	۰٫۰۰b	۰٫۰۰d	۰٫۰۰c	۳٫۷۹ d
SS۲	۰٫۰۰b	۵٫۲۷ c	۰٫۰۰c	۵٫۳۳ b
SS۲P۱	۰٫۰۰b	۰٫۰۰d	۰٫۰۰c	۴٫۲۴ c
SS۲P۲	۰٫۰۰b	۰٫۰۰d	۰٫۰۰c	۰٫۰۰e
SS۳	۰٫۰۰b	۰٫۰۰d	۰٫۰۰c	۰٫۰۰e
SS۳P۱	۰٫۰۰b	۰٫۰۰d	۰٫۰۰c	۰٫۰۰e
SS۳P۲	۰٫۰۰b	۰٫۰۰d	۰٫۰۰c	۰٫۰۰e
SS۴	۰٫۰۰b	۰٫۰۰d	۰٫۰۰c	۰٫۰۰e
SS۴P۱	۰٫۰۰b	۰٫۰۰d	۰٫۰۰c	۰٫۰۰e
SS۴P۲	۰٫۰۰b	۰٫۰۰d	۰٫۰۰c	۰٫۰۰e
SS۵	۰٫۰۰b	۰٫۰۰d	۰٫۰۰c	۰٫۰۰e
SS۵P۱	۰٫۰۰b	۰٫۰۰d	۰٫۰۰c	۰٫۰۰e
SS۵P۲	۰٫۰۰b	۰٫۰۰d	۰٫۰۰c	۰٫۰۰e

با قالب‌بندی در محیط اِکسل (conditional formatting) بین نتایج، وضعیت نتایج تیمارها سریعاً به خواننده منعکس می‌شود. حروف مشابه تفاوت معنی‌داری با یک‌دیگر از نظر آماری ندارند.

باکتری‌های *استافیلوکوکوس* بعد از باکتری‌های *کلی‌فرم*، بیش‌ترین آلودگی را در لجن فاضلاب نشان دادند؛ به طوری‌که در تیمار SS۱ (۵٫۷۴ log۱۰CFU/g dry SS) و SS۱P۱ (۵٫۸۸ log۱۰CFU/g dry SS)، آلودگی قابل توجه مشاهده گردید ولی تفاوت معنی‌داری با یک‌دیگر نداشتند (p>۰٫۰۵). در تیمار پرتوتابی با دز ۵ کیلوگری (SS۲) جمعیت باکتری‌های *استافیلوکوس* کاهش معنی‌داری نشان و در ادامه با ترکیب پرتوتابی ۵ کیلوگری و حرارت ۷۰ درجه جمعیت نسبت به شاهد کاهش معنی‌دار شد، لکن هنوز در تیمار حرارت ۱۸۰ درجه آلودگی *استافیلوکوکوس* مشاهده شده است. با ترکیب تیمار پرتوتابی ۵ کیلوگری و ۱۸۰ درجه جمعیت *استافیلوکوکس* کاملاً حذف و غیرفعال شدند.

در نهایت با حداقل پرتوتابی ۱۰ کیلوگری به تنهایی (SS۳) به بالاتر، و ترکیب پرتوتابی حداقل ۱۰ کیلوگری و حرارت‌های ۷۰ یا ۱۸۰ درجه کل جمعیت باکتری‌های *استافیلوکوکوس* حذف و غیرفعال شدند.

مقدار شمارش شده باکتری *ایکولای* نسبت به سایر شاخص‌های باکتریای بیماری‌زا در لجن فاضلاب مطالعه شده مقادیر کم‌تری را نشان داده است (۲٫۶۲ log۱۰CFU/g dry SS) و با انجام تیمارهای پرتوتابی یا حرارت کاملاً حذف شدند.

در مجموع پرتوتابی حداقل دز ۱۰ کیلوگری (به تنهایی) یا در ترکیب با حرارت‌های ۷۰ و ۱۸۰ درجه سبب حذف کامل و ۱۰۰ درصدی باکتری‌های *کلی‌فرم*، *سالمونلا*، *ایکولای* و *استافیلوکوکوس* شده است (جدول ۳). حذف باکتری‌های *کلیفرم*، *سالمونلا* و *ایکولای* به‌عنوان شاخص باکتری‌های بیماری‌زا پس از پرتوتابی گاما در سایر پژوهش‌ها نیز گزارش گردیده است [۱۱، ۱۴، ۲۹، ۳۰]. اثرات غیرمستقیم پرتوهای یون‌ساز بر ریزجانداران بیماری‌زا شامل اثر رادیکال‌های آزاد تولید شده با رادیولیز آب هم‌چون رادیکال هیدروکسیل، هیدروژن، الکترون هیدراته و غیره برای واکنش با مولکول‌های زیستی موجود در لجن سبب غیرفعال‌سازی آن‌ها در لجن فاضلاب می‌گردد [۳۱]. بخش دیگر اثرهای پرتوهای یون‌ساز به‌صورت مستقیم شامل برخورد پرتو به ماده ژنتیکی و ایجاد تغییراتی مانند شکست RNA و DNA در یک یا هر دو زنجیره و هم‌چنین، ایجاد تغییرات کروموزومی می‌باشد [۳۲]. از آن‌جا که اثرهای مستقیم پرتو توسط ویژگی‌های فیزیکی مانند تعداد ذرات جامد متأثر می‌گردد [۲۹]؛ لذا، با در نظر گرفتن مقدار ذرات جامد بیش‌تر در لجن و نقش این ذرات در افزایش حفاظت از ریزجانداران از اثرهای مستقیم پرتو، بالابودن دز حذف ریزجانداران را توجیه می‌نماید؛ هر چند که رادیکال‌های تشکیل شده بر اثر رادیولیز نقش مهم‌تری نسبت به اثرهای مستقیم در حذف ریزجانداران دارد [۳۲].

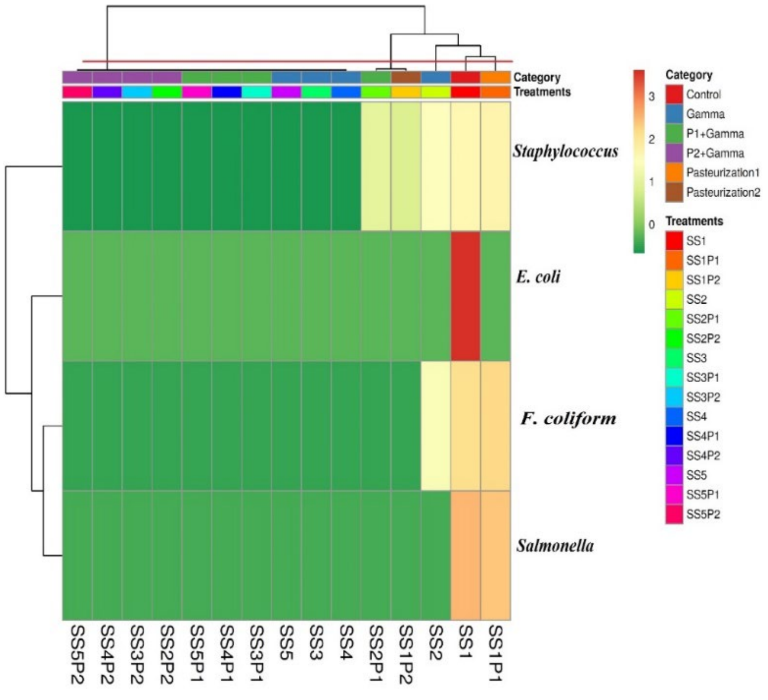
سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا [۸] و سازمان ملی استاندارد ایران [۹]، رانکویک و همکارن [۱۶]، بت عیشو [۲۱]، استفاده از پرتو گاما با دز ۱۰ کیلوگری را برای کاهش، حذف و غیرفعال‌سازی ریزجانداران بیماری‌زا در لجن فاضلاب شهری توصیه نموده‌اند. طبق نتایج این تحقیق و مطابق استانداردهای ملی و آمریکا، پایین بودن تراکم *کلی‌فرم*، *ایکولای* و *سالمونلا* کم‌تر از ۱۰۰۰ سلول بر گرم کل ماده خشک، لجن فاضلاب تحت تیمار پرتوتابی ۱۰ کیلوگری، در کلاس A یا دسته P۱ یا P۲ بدون محدودیت استفاده از لحاظ باکتری‌های بیماری‌زا طبقه‌بندی می‌شوند (جدول ۳). نتایج این تحقیق مطابق شیوه نامه مؤسسه خاک و آب [۲۳] برای ثبت کود آلی از نظر شاخص‌های زیستی مدنظر می‌باشد. بالا بودن جمعیت میکربی پایین‌تر از کلاس B و P۳ در لجن فاضلاب مورد مطالعه، احتمالاً به دلیل عدم توانایی روش‌های متداول هم‌چون هضم بی‌هوازی لجن تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران می‌باشد.

پس از ترسیم نقشه حرارتی تیمارهای مختلف پرتوتابی و پاستوریزاسیون حرارتی (شکل ۱) پنج دسته یا خوشه ایجاد شد؛ در دسته اول تیمار شاهد (SS۱)، چهار شاخص باکتریایی *کلی‌فرم*، *استافیلوکوکس*، *سالمونلا* و *ایکولای* در محیط کشت شمارش شدند. در دسته دوم تیمار حرارت ۷۰ درجه (SS۱P۱) دارای آلودگی *کلی‌فرم*، *استافیلوکوکوس* و *سالمونلا* شمارش شدند ولی همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده گردید، اغلب مقادیر شمارش باکتری‌ها کم‌تر از تیمار شاهد می‌باشند. در

دسته سوم تیمار پرتوتابی ۵ کیلوگری (SS۲)، آلودگی *کلی‌فرم* و *استافیلوکوکوس* هنوز مشاهده شده و شمارش شدند و نتوانسته این شاخص‌ها را به پایین‌تر از ۱۰۰۰ CFU برساند. دسته چهارم شامل تیمارهای ترکیب پرتوتابی (دز ۵ کیلوگری) با درجه ۷۰ درجه (SS۲P۱) و تیمار حرارت ۱۸۰ درجه (SS۱P۲) دارای آلودگی باکتری‌های *استافیلوکوکوس* می‌باشند. در دسته پنجم تیمارهای پرتوتابی به تنهایی با دزهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگری (SS۳، SS۴ و SS۵)، تیمارهای پرتوتابی (با دزهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگری) + حرارت ۷۰ درجه (SS۳P۱، SS۴P۱ و SS۵P۱) و تیمارهای پرتوتابی (دزهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوگری) + حرارت ۱۸۰ درجه (SS۲P۲، SS۲P۳ و SS۳P۲) موفق به حذف چهار شاخص مهم منتخب و منطبق بر شیوه نامه یا دستورالعمل معرفی کود آلی شده‌اند (جدول ۳، شکل ۱). در مجموع از میان ۱۵ تیمار استفاده شده در این تحقیق، ۱۰ تیمار به طور کامل عوامل بیماری‌زا را حذف نمودند. از طرفی دیگر، با در نظر گرفتن هزینه‌های بالاتر و هم‌زمان ترکیب دو روش پرتوتابی و حرارت‌دهی، پیشنهاد می‌شود که تنها با استفاده از پرتوتابی گاما حداقل با دز ۱۰ کیلوگری به بالا (تیمار SS۳)، گندزدایی لجن فاضلاب انجام شود و آن‌را در کلاس بی‌خطر یا بدون محدودیت برای کشاورزی و کود آلی طبق جدول ۳ و الزامات سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (۲۰۰۳)، استاندارد ملی ایران (۱۴۰۰) و شیوه‌نامه مؤسسه خاک و آب (۱۳۹۳) قرار می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

به دلیل افزایش جمعیت و تولید روز افزون لجن فاضلاب و کاهش حجم مخازن برای نگه‌داری لجن فاضلاب و هم‌چنین به دلیل این‌که لجن فاضلاب غنی از عناصر غذایی است، لازم است تا این ماده خطرناک برای محیط زیست و حیات جانداران به ماده‌ای مفید و با هزینه کم‌تر فرآوری و بازیافت گردد. لذا با توجه به معایب و ناکارآمدی روش‌های مرسوم تثبیت و تصفیه لجن فاضلاب، بر اساس نتایج این تحقیق، پرتوتابی لجن با حداقل دز ۱۰ کیلوگری پرتوگاما به تنهایی، شاخص‌های مهم باکتریایی بیماری‌زا هم‌چون *کلی‌فرم*، *استافیلوکوکوس*، *سالمونلا* و *ایکولای* را حذف می‌نماید و لجن فاضلاب دارای محدودیت از نظر شاخص‌های زیستی (دسته P۴ بر اساس استاندارد ملی ایران و پایین‌تر از کلاس B استاندارد حفاظت محیط زیست آمریکا) را به لجن فاضلاب در کلاس P۱ و A و بدون محدودیت در استفاده تبدیل می‌نماید، لذا بر اساس نتایج این تحقیق و منطبق بر استانداردهای ملی و بین‌المللی، پرتوتابی گاما به تنهایی در مقایسه با ترکیب پرتوتابی با روش‌های پاستوریزاسیون حرارتی، در جهت تولید کود آلی بر پایه لجن فاضلاب و حذف ریزجانداران بیماری‌زا، کافی و همراه با صرفه اقتصادی می‌باشد. بدیهی است که ارزیابی گلخانه‌ای و مزرعه‌ای کود آلی بر پایه لجن فاضلاب پرتوتابی شده جزء اقدامات و برنامه تحقیقاتی بعدی جهت حصول نتیجه نهایی و قابلیت کاربردی نمودن فن‌آوری پرتوتابی هسته‌ای در تهیه کود آلی از لجن فاضلاب خواهد بود.



شکل ۱. نقشه حرارتی و خوشه‌بندی تیمارهای مختلف پرتوتابی و تلفیق با حرارت بر چهار شاخص مهم زیستی در لجن فاضلاب (با ترسیم خط قرمز، ۵ دسته یا خوشه تیمارها در نقشه حرارتی، مشخص شده است).

تشکر و قدردانی

این مقاله، بخشی از نتایج پروژه درون پژوهشگاهی بوده و کلیه منابع مالی از محل پروژه تأمین شده است و نویسندگان بدین‌وسیله از حمایت‌های مالی پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای و پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای و هم‌چنین خدمات پرتودهی پژوهشکده کاربرد پرتوها تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

1. Regitano J.B, Rodrigues M.M, Lucio M.G, Flávio O.J, Gomes V.D, José de S.A. Sustainable Management and Utilization of Sewage Sludge. Edited by V.D. Rajput, A.N. Yadav, H.S. Jatav, S.K. Singh, and T. Minkina (Springer I, Switzerland AG) 2022;1-28.
2. Muter O, Laila D, Oleg K, Jana C, Ina A. Hazardous Waste Management; Edited by R.B. Jeyakumar, K. Sankarapandian and Y.K. Ravi. (IntechOpen. Com) 2022.
3. Grubel K, Machnicka A, Nowicka E, Wacławek S. Mesophilic-thermophilic fermentation process of waste activated sludge after hybrid disintegration. Eco. Chem. and Engin. 2014;21:125-136.
4. Ghorbani M, Konvalina P, Walkiewicz A, Neugschwandtner R.W, Kopecký M, Zamanian K, Chen W.H, Bucur D. Feasibility of biochar derived from sewage sludge to promote sustainable agriculture and mitigate GHG emissions—A Review. Int. J. Environ. Res. Public Health. 2022;19:12983.
5. Tasca A.L, Puccini M, Gori R, Corsi I, Galletti A.M.R, Vitolo S. Hydrothermal carbonization of sewage sludge: A critical analysis of process severity, hydrochar properties and environmental implications. Waste Manage. 2019;93:1–13.
6. Buta M, Hubeny J, Zieliński W, Harnisz M, Korzeniewska E. Sewage sludge in agriculture—The effects of selected chemical pollutants and emerging genetic resistance determinants on the quality of soil and crops—A review. Ecotoxi. and Environ. Safety. 2021;214:112070.
7. Li M, Song G, Liu R, Huang X, Liu H. Inactivation and risk control of pathogenic microorganisms in municipal sludge treatment: A review. Front. Environ. Sci. Eng. 2022;16(6):70.
8. US EPA. Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge. Office of Research and Development. EPA/625/R-92/013. 2003.
9. Iranian National Standardization Organization. Municipal wastewater treatment plant biosolids-Specifications and Monitoring. INSO, 22967, 1st Edition. 2021 [In Persian].
10. Lessel T. Sewage sludge and wastewater for use in agriculture. Edited by IAEA. TECDOC-971. 1997.
11. El-Motaium R. Proceedings of the 2nd Environmental Physics Conference In (Alexandria, Egypt). 2006:169-182.
12. Wang J, Wang J. Application of radiation technology to sewage sludge processing: a review. J. of Hazard. Mat. 2007;143:2-7.
13. Engohang-Ndong J, Uribe R.M, Gregory R, Gangoda M, Nickelsen M.G, Loar P. Effect of electron beam irradiation on bacterial and Ascaris ova loads and volatile organic compounds in municipal sewage sludge. Radiat. Phys. Chem. 2015;112:6–12.
14. Limam R.D, Limam I, Clerandeau C, Khouatmia M, Djebali W, Cachot J, Chouari R. Assessment of the toxicity and the fertilizing power from application of gamma irradiated anaerobic sludge as fertilizer: effect on Vicia faba growth. Radiate. Phys. Chem. 2018;150:163–168.
15. Chmielewski A.G, Sudlitz M. Zero energy electron beam technology for sludge hygienization. Nukleonika. 2019;64:55–63.
16. Ranković B, Sagatova A, Vujčić I, Mašić S, Veljović Đ, Pavićević V, Kamberović Ž. Utilization of gamma and e-beam irradiation in the treatment of waste sludge from a drinking water treatment plant. Radiate. Phys. Chem. 2020;177:109174.
17. Watanabe H, Takehisa M. Disinfection of sewage sludge cake by gamma-irradiation. Radiate. Phys. Chem. 1984;24(1):41-54.
18. Farzadkia M, Jafarzadeh N, Loveimi asl L, Ghalambor A. Wastewater sludge stabilization using lime a case study of west Ahwaz wastewater treatment plant. J. Water and Wastewat. 2009;19(4):67-71 [In Persian].
19. Nakhla S.F, Arafa A, Naga I.S, Mohamed M, Alsherbeny H.A, Fahmi N.M, Hosny H, Moussa S. Primary and secondary sludge treatment using ionizing radiation technology in Alexandria. Egypt. App. Rad. Is. 2022;181:110101.
20. Jebri S, Yahya M, Rahmani F, Amri I, Hamdi M, Hmaied F. Inactivation of biohazards in healthcare wastewater by E-Beam and Gamma irradiation: a comparative study. Environ. Sci. and Pol. Res. https://doi.org/10.1007/s11356-022-21159-0. 2022.
21. Betesho R, Ghotbikohan K, Nabardi F, Rafiee R. A Study on the Effect of Gamma Rays on Reducing the Burden of Some Pathogens in Sewage Sludge. J. Nu. Sci. and Tech. 2017;78:24-33.
22. Asgari Lajayer B, Najafi N, Moghiseh E, Mosaferi M, Hadian J. Effects of gamma irradiation on physicochemical and biological characteristics of wastewater effluent and sludge. Inter. J. Environ. Sci. Tech. 2020;17:1021–1034.
23. Soil and Water Research Institute, Methodology for registration of fertilizers. Fourth Season. Registration of organic fertilizers. 2016 [In Persian].
24. https://www.tpww.ir/fa. 2020.
25. Priyadarshini J, Roy P, Mazumdar A. Qualitative and quantitative assessment of sewage sludge by Gamma irradiation with pasteurization as a tool for hygienization. J. Inst. Engine. Series A. 2014;95(1):49-54.

26. Bagge E, Sahlström L, Albihn A. The effect of hygienic treatment on the microbial flora of biowaste at biogas plants. Water Res. 2005;39:4879–4886.
27. Merck E. Microbiology Manual. Darmstadt. 1991.
28. https://biit.cs.ut.ee/clustvis/ 2022.
29. Li B, Ju F, Cai L, Zhang T. Profile and fate of bacterial pathogens in sewage treatment plants revealed by high-throughput metagenomic approach. Environ. Sci. & Tech. 2015;49(17):10492–10502.
30. International Atomic Energy Agency (IAEA). Irradiated sewage sludge for application to cropland. Results of a coordinated research project, International Atomic Energy Agency Press. Vienna, Austria. 2002.
31. Tahri L, Elgarrouj D, Zantar S, Mouhib M, Azmani A, Sayah F. Wastewater treatment using gamma irradiation: Tétouan pilot station. Morocco. Radiate. Phys. and Chem. 2010;79:424-428.
32. Da Silva Aquino K.A. Sterilization by gamma irradiation. (Intech Open Access Publisher) 2012.

COPYRIGHTS
©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

استناد به این مقاله
مقیسه، ابراهیم، کیان‌بخت، فائزه، باقری، خدیجه، شهبازی، سمیرا. (۱۴۰۳)، کاربرد پرتو گاما در بازیافت و غیرفعال‌سازی ریزجانداران بیماری‌زا در لجن فاضلاب شهری تصفیه‌خانه جنوب تهران برای تولید کود آلی خاک. مجله علوم و فنون هسته‌ای، ۱۰۸(۲)، ۱۶۲-۱۶۹. DOI: https://doi.org/10.24200/nst.2024.1564
Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1564.html