

Co-composting of Chicken Manure and Organic Fraction of Solid Wastes of Mashhad Medical Sciences Dining Hall

Fatemeh Sadat Khatibi

MSc in Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Iran

Hosein Alidadi

Professor, Department of Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Iran

Behnam Barikbin

Professor, Department of Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Iran

Najmeh Afshar Kohan

Environmental Science and Technology Research Center, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Shahid Sadoughi University Of Medical Sciences, Yazd, Iran

Aliakbar Dehghan

* Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Iran. **(Corresponding Author)** Dehghanaa@mums.ac.ir

Abstract

Background and purpose: Rapid population growth, increased consumption, and the continuous rise in municipal waste generation pose significant challenges for modern urban society, necessitating a structured waste disposal strategy. Co-composting of organic waste has emerged as an effective method for treating multiple waste streams while mitigating the limitations of conventional composting. This study investigates key stabilization and maturity indicators in the composting process of organic waste and poultry manure.

Materials and Methods: In this experimental study, organic waste was collected from a university cafeteria, poultry manure was sourced from the Ferdowsi University poultry farm, and sawdust, used as a bulking agent, was obtained from various urban locations. The composting process was monitored through 52 sampling events, assessing variations in physical (temperature, electrical conductivity (EC), organic matter content, and moisture), chemical (total organic carbon (TOC), total Kjeldahl nitrogen (TKN), C/N ratio, and pH), and biological (germination index (GI), total coliforms, and fecal coliforms) parameters across four 12-liter reactors. Weekly turning of the compost piles facilitated aeration. The poultry manure, organic waste, and sawdust ratios in reactors A1–A4 were 7.6:0:2.4, 7:1.5:1.5, 5:3:2, and 3:6:1, respectively. Final data analysis was conducted using SPSS 16.

Results: Composting mass temperatures increased across all reactors following the loading process. The final organic matter content was lower in reactors A2 and A3 than the others. After 90 days, organic matter reduction ranged between 31.5% and 36.5% across all reactors. Final pH values varied from 7.1 to 7.9. EC increased in all reactors throughout the composting process, ranging between 4.2 and 4.84 dS/m. The C/N ratio progressively declined, reaching standard limits by the end of the composting process. Regarding the germination index, reactors A4, A3, A1, and A2 exhibited the highest seed root growth rates and germination indices.

Conclusion: Findings indicate that week 10 marks all reactors' optimal compost maturity period. Reactors A3 and A4 demonstrated superior performance regarding the C/N ratio and GI. These results highlight co-composting poultry manure and municipal organic waste as a feasible, cost-effective, and sustainable approach for managing waste generated by university dining halls and poultry farms.

Keywords: Chicken Manure, Waste, Composting, Maturation, Toxicity

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

► **Citation:** Khatibi F.S, Alidadi H, Barikbin B, Afshar Kohan N, Dehghan A.A. Co-composting of Chicken Manure and Organic Fraction of Solid Wastes of Mashhad Medical Sciences Dining Hall. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Spring 2025; 11(1):53-67.

Received: 2024/11/05

Accepted: 2025/03/17

Doi:10.22038/jreh.2025.25809

کمپوست‌سازی مشترک فضولات مرغی و بخش آلی پسماند سلف‌سرویس دانشگاه علوم پزشکی مشهد

چکیده

زمینه و هدف: یکی از معضلات جامعه‌ی شهرنشین امروز رشد سریع جمعیت، افزایش موادمصرفی و در نتیجه تولید روزافزون پسماندهای شهری است که نیازمند برنامه‌ریزی اصولی جهت دفع صحیح می‌باشد. کمپوست‌سازی هم‌زمان ضایعات آلی به‌عنوان روشی موثر برای دفع دو یا چند زباله به‌طور هم‌زمان و به حداقل رساندن معایب کمپوست شناخته شده است. این مطالعه بر روی شاخص‌های مختلف تثبیت و رسیدن فرآیند کمپوست هم‌زمان پسماند آلی و فضولات مرغی تمرکز دارد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه‌ی تجربی، پسماند آلی از سلف دانشگاه، فضولات مرغی از مرغداری دانشگاه فردوسی و عامل حجیم‌کننده خاکاره از سطح شهر تهیه و فرایند کمپوست‌سازی هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش به‌طور کلی ۵۲ بار نمونه برداشته شد و تغییرات پارامترهای فیزیکی شامل دما، EC، مواد آلی و رطوبت، پارامترهای شیمیایی شامل TOC، TKN C/N و pH، پارامترهای بیولوژیکی شامل شاخص جوانه‌زنی، کلی‌فرم کل و لیفرم مدفوعی در چهار راکتور ۱۲ لیتری سنجش شد. هوادهی با زیرورکردن توده‌ها به‌صورت هفته‌ای انجام شد. نسبت میزان فضولات مرغی و پسماند آلی شهری و خاکاره در راکتورهای A1-A4 به‌ترتیب به‌صورت ۲:۴، ۷:۶، ۱:۵، ۵:۱، ۲:۳ و ۱:۳ بارگزاری گردید و در پایان داده‌ها توسط نرم‌افزار SPSS16 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

یافته‌ها: دمای توده در راکتور ها پس از بارگزاری افزایش یافت. مواد آلی نهایی در راکتور A2 و A3 کمتر از راکتورهای دیگر بود. پس از طی ۹۰ روز، حذف مواد آلی در ۴ راکتور بین ۳۶/۵ تا ۳۱/۵ درصد بود. مقادیر نهایی pH برای راکتورهای A1-A4 بین ۷/۱ تا ۷/۹ بود. در طی فرآیند، هدایت الکتریکی در هر چهار راکتور افزایش یافت و در محدوده‌ی ۴/۸۴ تا ۴/۲ دسی‌زیمنس بر متر قرار گرفت. به‌طور کلی C/N در طول زمان در راکتورها دارای روند کاهشی بود و در نهایت در انتهای فرایند کمپوست‌سازی، نسبت C/N در همه‌ی راکتورها در محدوده‌ی استاندارد قرار داشت. از نظر شاخص جوانه‌زنی به‌ترتیب راکتور A1، A3، A4 و A2 بیشترین سرعت رشد ریشه بذر و شاخص جوانه‌زنی را داشتند.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که هفته‌ی دهم در فرایند کمپوست‌سازی زمان مناسبی برای رسیدن تمام توده‌ها است. راکتورهای A3 و A4 از نظر نسبت C/N و شاخص جوانه‌زنی، بهترین راکتورها معرفی شدند. بنابراین مطابق نتایج کمپوست مشترک فضولات مرغی و پسماند آلی شهری یک راه‌حل ساده، امکان‌پذیر و مقرون به‌صرفه برای مدیریت پسماند سلف سرویس و فضولات مرغی مرغداری‌ها است.

کلید واژه‌ها: کود مرغی، زایدات، کمپوست‌سازی، رسیدن، سمیت

◀ **استناد:** خطیبی ف.س، علیدادی ح، باریک‌بین ب، افشار کهن ن، دهقان ع.ا. کمپوست‌سازی مشترک فضولات مرغی و بخش آلی پسماند سلف‌سرویس دانشگاه علوم پزشکی مشهد. فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط. بهار ۱۴۰۴؛ ۱۱(۱): ۵۳-۶۷.

فاطمه‌سادات خطیبی

کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، ایران

حسین علیدادی

استاد گروه مهندسی بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، ایران.

بهنام باریک‌بین

استاد گروه مهندسی بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، ایران.

نجمه افشار کهن

مرکز تحقیقات علوم و فناوری محیطی، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی، یزد، ایران.

علی‌اکبر دهقان

* استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، ایران. (نویسنده مسئول)

Dehghanaa@mums.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

نوع مقاله: پژوهشی

یکی از معضلات جامعه‌ی شهرنشین امروز رشد سریع جمعیت، افزایش مواد مصرفی و در نتیجه تولید روزافزون پسماندهای شهری است که این افزایش پسماند موجب بروز مشکلاتی چون: یافتن محل دفع مناسب، تولید شیرابه سمی، بو و تجمع حشرات می‌شود که نیازمند برنامه‌ریزی اصولی جهت دفع صحیح می‌باشد. ضایعات کشاورزی و صنعتی می‌توانند پس از فراوری لازم به‌عنوان یک منبع غذایی متنوع به کار گرفته شوند. فرایند کمپوست‌سازی یکی از مناسب‌ترین اقدامات جهت دفع پسماندهای شهری به‌نظر می‌رسد و هم‌اکنون به‌عنوان یک روش زیست محیطی و اقتصادی در مجامع علمی و اجرایی مطرح است (۱، ۲). بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد^۱، سالانه ۱/۳ میلیارد تن ضایعات غذایی در جهان تولید می‌شود. دفع ضایعات مواد غذایی در محل‌های دفن زباله، پیامدهای زیست‌محیطی زیادی به‌ویژه انتشار گازهای گلخانه‌ای از تخریب مواد آلی را به‌دنبال داشت که بسیاری از کشورهای اروپایی دفع پسماندهای غذایی را با دفن پسماند ممنوع کرده‌اند (۳).

زباله‌های آشپزخانه^۲ بخش بزرگ و مهمی از زباله‌های جامد شهری هستند که با توجه به ماهیت فاسدشدنی و پتانسیل جداسازی از منبع، می‌توانند به‌طور جداگانه برای بازیابی منابع پردازش شوند. زباله‌های آشپزخانه بسیار فاسد شدنی هستند، بنابراین بدون تصفیه کافی می‌توانند شیرابه تولید کنند، ترکیبات مضر مانند فلزات سنگین، ویروس‌ها و عوامل بیماری‌زا را تکثیر کنند و بوی بد را آزاد کنند (۴). در ایران نیز طبق آمار سازمان مدیریت پسماند شهرداری مشهد، آخرین گزارشی که در سال ۱۴۰۰ ارائه شد نشان داد که میزان پسماندخانگی تولیدشده ۵۵۹۵۵۷ تن در سال می‌باشد (۵). در حال حاضر دفن زباله، کمپوست‌سازی، هضم بدون اکسیژن و سوزاندن، متداول‌ترین تکنیک‌ها برای مدیریت پسماند می‌باشد. پیش از این، بیشتر پسماندهای آشپزخانه در محل‌های دفن پسماند دفع می‌شد که ظرفیت کاهشی

بالایی دارند، اما به‌دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای و شیرابه‌های پربار، ته‌نشینی آن بعداً دشوار شد (۶). کود مرغی^۳ یک ماده‌ی مغذی آلی غنی برای رشد گیاه است، زیرا حاوی بسیاری از عناصر درشت مغذی ضروری مانند نیتروژن (N)، فسفر (P) و میکرو عناصر مانند مس، منگنز، کلسیم، کلر، بور، آهن، روی و غیره است. افزایش مرغداری‌ها نیز موجب تولید حجم عظیمی از فضولات مرغی شده که خود سبب افزایش گازهای گلخانه‌ای، آلوده کردن خاک و منابع آب با عوامل بیماری‌زا و ایجاد بوی نامطبوع شده است. کود مرغی تولیدی نیز علاوه بر بهبود خواص فیزیکی خاک، حاوی مواد غذایی مهم برای تغذیه‌ی گیاه است و دارای حدود ۳ درصد نیتروژن، ۲/۶۳ درصد فسفر و ۱/۴ درصد پتاسیم است (۷). اگر فضولات مرغی به‌درستی تصفیه و اصلاح نشوند، باقیمانده‌هایی چون موادمسمی، فلزات سنگین و آنتی‌بیوتیک‌ها ممکن است در نهایت به زنجیره‌ی غذایی راه پیدا کنند و تهدیدی برای سلامتی انسان باشند (۸). طبق آمار سازمان برنامه و بودجه کشور در سال ۱۴۰۱، تعداد سالن‌های پرورش مرغ گوشتی در سطح کشور ۴۶۴۹۶ عدد و در خراسان رضوی ۴۵۹۸ عدد می‌باشد. خراسان رضوی از نظر تولید مرغ گوشتی در رتبه‌ی دوم کشور قرار دارد (۹).

با توجه به مطالعات مشابه هم‌چون مطالعه‌ی هوانگ و همکاران که در سال ۲۰۲۰ انجام شد، به بررسی کمپوست کود مرغی با کود گاوی، کود خاکی و بقایای گیاهی و قارچ در انتشار گازهای گلخانه‌ای و آمونیاک، تعیین کیفیت کمپوست و بلوغ آن‌ها پرداخته شد. نتایج نشان داد که برای کمپوست‌سازی کود مرغی، ترکیب کود مرغی با کود گاوی می‌تواند روشی برای کمپوست‌سازی و بهبود کیفیت کمپوست و به حداقل رساندن تلفات گازی باشد و نیز سریع‌تر از سایر توده‌ها به مرحله‌ی بلوغ می‌رسد (۱۰). در نتیجه به‌طور کلی هدف در این مطالعه تعیین زمان رسیدن و انتخاب بهترین نسبت از مخلوط مواد اولیه جهت کمپوست‌سازی مشترک و بررسی تغییرات پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی طی فرایند کمپوست‌سازی مشترک پسماندهای آلی سلف سرویس و فضولات مرغی می‌باشد.

^۱ Food and Agriculture Organization of the United Nations

^۲ Khitchen Waste

^۳ Chicken Manure

روش کار

تهیه مواد خام اولیه

نمونه فضولات مرغی از واحد پرورش مرغ گوشتی مرکز تحقیقات دام و طیور گروه علوم دامی دانشگاه فردوسی مشهد، نمونه پسماند شهری از سلف سرویس پردیس دانشگاه علوم پزشکی مشهد و خاکاره نیز از نجاری‌های سطح شهر مشهد تهیه گردید. فضولات مرغی با استفاده از

آسیاب، خرد و از الک ۰/۵ میلی‌متر عبور داده شد. پسماندهای خام سلف سرویس که عمدتاً شامل کاهو، پوست خیار، گوجه، پوست سیب‌زمینی و پوست سیب بودند نیز با دستگاه خردکن ریز شدند. قبل از تهیه‌ی مخلوط اولیه جهت توده‌ها، مشخصات اولیه‌ی مواد خام اندازه‌گیری شد که در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد اولیه

مواد اولیه	رطوبت (%)	pH	EC (mS/cm)	مواد آلی (%)	TOC (%)	TKN (%)	C/N
پسماند	۱۲	۵/۶	۶/۶	۹۱	۴۹/۵	۲/۳	۲۱/۲۴
فضولات مرغی	۴	۸/۵	۴/۹۷	۳۸/۴	۱۱/۳	۱/۱۴	۱۰
خاکاره	۳/۷	۷/۳	۰/۴۹	۷۶	۵۶	۰/۰۷	۸۰۰

طراحی راکتورها

این آزمایش با استفاده از چهار راکتور از جنس پلاستیکی با حجم ۱۲ لیتر (ابعاد ۲۳/۵×۲۳/۵×۲۸ سانتی‌متر) صورت گرفت. برای هوادهی سوراخ‌هایی در اطراف راکتور ایجاد شد و نیز به‌صورت دستی هفته‌ای یک‌بار فرایند زیرورو کردن انجام گردید. قبل از کمپوست‌سازی، نسبت کربن به نیتروژن مواد خام به همراه خاکاره در محدوده‌ی ۲۵ تنظیم شد. رطوبت اولیه ۵۰-۶۰ درصد به‌عنوان رطوبت بهینه‌ی کمپوست انتخاب شد و تا پایان

کمپوست‌سازی حفظ شد. این فرآیند به‌مدت ۹۰ روز ادامه داشت و هفته‌ای یک‌بار نمونه‌برداری انجام شد. برای ارزیابی زمان رسیدن کمپوست، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مخلوط‌های کمپوست به‌صورت هفتگی طی مدت ۱۳ هفته اندازه‌گیری شد.

بارگذاری راکتورها

برای بارگذاری راکتورها از ترکیب فضولات مرغی، پسماند سلف سرویس و خاکاره با نسبت‌های تعیین‌شده در جدول ۲ استفاده شد.

جدول ۲. جدول تعیین نسبت مواد در هر راکتور با استفاده از سایت مورد نظر

متغیر	شاهد A1 (برحسب کیلوگرم)	A2 (برحسب کیلوگرم)	A3 (برحسب کیلوگرم)	A4 (برحسب کیلوگرم)
فضولات مرغی	۳/۸	۳/۵	۲/۵	۱/۵
خاکاره	۱/۲	۰/۷۵	۱	۰/۵
پسماند	۰	۰/۷۵	۱/۵	۳
C/N محدوده	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵
کودمرغی ۷۶٪ خاکاره ۲۴٪ / پسماند آلی ۱۵٪ فضولات مرغی ۷۰٪ خاکاره ۱۵٪ / پسماند آلی ۳۰٪ فضولات مرغی ۶۰٪ خاکاره ۱۰٪				

نمونه‌برداری مرکب نمونه در حداقل پنج نقطه در امتداد توده راکتور، و در سه عمق (۱۰ سانتی‌متر از بالا، وسط و پایین) برداشته شد. فواصل نمونه‌گیری به‌منظور تعیین اثرات پارامترهای مختلف متفاوت بود. از آن‌جایی که میزان رطوبت به‌طور قابل توجهی بر فعالیت‌های بیولوژیکی تأثیر می‌گذارد، به‌صورت هفتگی اندازه‌گیری شد. برای توقف فعالیت میکروبی، نمونه‌ها در دمای یخچال نگهداری گردید. هر نمونه به دو قسمت تقسیم

شد: یک قسمت به‌طور مستقیم با استفاده از نمونه‌های کمپوست تازه برای تعیین سمیت گیاهی در نمونه‌ی اصلی استفاده شد. قسمت باقی‌مانده در آون خشک، آسیاب و الک شد و محتویات برای تعیین pH، EC^۱، مواد آلی، رطوبت، نیتروژن کل، کل کربن آلی استفاده شد. این فواصل زمانی، به این علت انتخاب شد که گرفتن نمونه‌های بیشتر (هر هفته) می‌تواند فرآیند

^۱Electrical Conductivity

تحلیل داده‌ها

برای تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده در این مطالعه از نرم‌افزار اکسل و SPSS استفاده شد. جهت تعیین میانگین مقدار متغیرهای کمی از تحلیل توصیفی ساده استفاده شد. از آنالیز واریانس یک‌طرفه جهت مقایسه‌ی مقادیر میانگین هر یک از پارامترها (در $P < 0.05$) استفاده شد. همگنی واریانس‌ها و نرمال‌بودن داده با استفاده از آزمون توکی و آزمون شاپیرو بررسی شد. علاوه بر این، جهت یافتن ارتباط بین پارامترهای مختلف از همبستگی پیرسون و اسپیرمن استفاده گردید.

یافته‌ها

تغییرات پارامترهای فیزیکیوشیمیایی و بیولوژیکی

تغییرات دما

تغییرات دمایی راکتورها در در نمودار ۱ ب نشان داده شده است. الگوی تغییرات دما به‌طور کلی برای هر ۴ راکتور یکسان بود. به‌ترتیب حداکثر دما در راکتور A1، A2، A3 و A4 به‌میزان ۴۵/۹ درجه، ۴۸/۲ درجه، ۴۲/۷ درجه و ۳۹/۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. دمای محیط در طول ۹۱ روز نسبتاً پایدار باقی ماند و در محدوده‌ی ۲۰ الی ۲۳ درجه‌ی سانتی‌گراد بود. در طول فاز تجزیه‌ی فعال، نوسانات دما بیشتر مشاهده شد، که در نتیجه نیاز به چرخش‌های بیشتری برای حفظ فرآیند در فاز بهداشتی داشت. عدم افزایش دما از هفته‌ی هشتم به بعد، کاهش فعالیت میکروبی را تایید کرد. دما از هفته‌ی ۷ تا ۱۰ تقریباً به دمای محیط رسید که نشان‌دهنده‌ی فاز رسیدن است. در هفته‌ی اول راکتور A2 به بالاترین دما رسید در حالی که راکتور A4 کمترین دما را داشت. از نظر آماری تفاوت معنی‌داری در رژیم دما بین راکتورها وجود نداشت ($P > 0.05$).

تغییرات رطوبت

میزان رطوبت بر فعالیت میکروبی، فضای آزاد هوا، انتقال اکسیژن و دمای فرآیند تأثیر می‌گذارد. با توجه به نمودار ۱ الف، رطوبت در راکتورها ابتدا روند افزایشی و سپس در یک محدوده تثبیت گردید. بعد از هفته‌ی اول با افزایش دما و اسپری‌کردن آب، میانگین میزان رطوبت ۵۰/۶۴٪ (راکتور A1)، ۴۹٪/۸۱ (راکتور A2) و ۵۱/۴۹٪ (راکتور A3) و ۵۳/۷۳٪ (راکتور A4) متغیر بود. محتوای رطوبت در طول فرآیند تجزیه‌ی فعال تا هفته‌ی دهم

کمپوست‌سازی را مهار کند. پارامترهایی که برای کاربردهای کشاورزی حیاتی‌تر هستند مانند سمیت گیاهی در ابتدا، وسط و انتهای فرایند و نیز کلی‌فرم مدفوعی تنها در پایان فرآیند اندازه‌گیری شدند.

اندازه‌گیری پارامترها

درجه حرارت و رطوبت توده‌ها به‌صورت روزانه با استفاده از پروب دما و دماسنج و رطوبت‌سنج دیجیتال سنسوردار تعیین و ثبت گردید. میزان pH و EC با استفاده از روش استاندارد ملی ایران شماره ۱۳۳۲۰ توسط دستگاه pH متر و EC متر دیجیتال اندازه‌گیری شد (۱۱، ۱۲). مقدار ماده آلی با استفاده از روش کاهش در اثر سوختن و خاکسترشدن کامل در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت تعیین گردید (۱۳). اندازه‌گیری میزان کربن آلی کل به‌روش احتراق تر (والکلی بلک) ۱ (۱۹) و میزان نیتروژن کل نیز به‌روش کجلدال اندازه‌گیری شد (۱۴). تعیین کلی‌فرم کل در خاک و کمپوست به روش MPN^2 بر اساس استاندارد متد و تعیین کلی‌فرم‌های مدفوعی بر اساس EPA^3 متد ۱۶۸۰ انجام شد (۱۵).

برای انجام آزمایش شاخص جوانه‌زنی ابتدا عصاره‌ی کمپوست با مخلوط‌کردن ۱۰ گرم کمپوست جامد تازه با ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه تهیه شد. سپس ۵ میلی‌لیتر از مایع رویی به بذر شاهی (۱۰ عدد) اضافه شد و بذرها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت در تاریکی انکوبه شدند. در نهایت تعداد بذرهای جوانه‌زده، ثبت و طول ریشه‌چه اندازه‌گیری شد. در نهایت سرعت جوانه‌زنی (GR)، طول ریشه‌چه (RL) و شاخص جوانه‌زنی (GI) با استفاده از معادلات زیر (۳-۱) محاسبه شد (۱۶):

$$GR (\%) = \frac{\text{تعداد بذر جوانه‌های زده در عصاره کمپوست}}{\text{تعداد بذر جوانه‌های زده در شاهد}} \times 100 \quad (1)$$

$$RL (\%) = \frac{\text{طول ریشه ها همه بذر در عصاره کمپوست}}{\text{طول ریشه همه بذر شاهد های}} \times 100 \quad (2)$$

$$GI (\%) = \frac{GR \times RL}{100} \quad (3)$$

¹Wet Combustion (Walkley and Black)

²Most Probable Number

³United States Environmental Protection Agency

نزدیک به ۵۰٪ نکه داشته شد. تفاوت آماری بین مقادیر رطوبت در هر چهار راکتور وجود نداشت ($P > ۰/۰۵$).

تخریب مواد آلی

با توجه به نمودار ات، کاهش مواد آلی راکتورهای A1، A2، A3 و A4 به ترتیب ۳۶/۵، ۳۱/۵، ۳۱/۵ و ۳۵ درصد بود. مواد آلی طی کمپوست سازی، عمدتاً به دلیل تجزیه ی ترکیبات توسط میکروارگانیسم ها به عنوان منابع کربن و نیتروژن مورد استفاده قرار می گیرند. میکروارگانیسم ها در حالی که ترکیبات آلی را تجزیه می کنند، ۶۰ تا ۷۰ درصد کربن را به دی اکسید کربن تبدیل می کنند و ۳۰ تا ۴۰ درصد باقی مانده را به عنوان اجزای سلولی در بدن خود استفاده می کنند (۱۷). تفاوت آماری معنی داری بین محتوای مواد آلی برای همه ی راکتورها وجود داشت ($P < ۰/۰۵$).

تغییرات pH

فعالیت میکروبی در خاک و در دسترس بودن مواد مغذی مختلف برای ریشه ی گیاه به طور قابل توجهی تحت تأثیر pH محیط رشد قرار دارد. از ابتدای فرآیند، pH ابتدا به سمت خنثی و سپس قلیایی حرکت کرد. افت معمولی در مقدار pH در هیچ مخلوطی مشاهده نشد زیرا مخلوط های اولیه کاملاً اسیدی بودند. pH مخلوط ها در راکتورها برای ۸ روز اول به طور قابل توجهی افزایش یافت. حداکثر مقدار pH برای راکتورهای A1، A2، A3 و A4 به ترتیب ۸/۳، ۸/۵، ۸/۷ و ۸/۹ در روز چهارم و پنجم بود. پس از رسیدن به حداکثر، pH در هر سه راکتور کمی کاهش یافت. مقادیر نهایی pH برای راکتورهای A1، A2، A3 و A4 به ترتیب ۷/۷، ۷/۹، ۷/۵ و ۷/۷ بود. از نظر آماری تفاوت معنی داری در pH بین راکتورها وجود ندارد ($P > ۰/۰۵$).

تغییرات هدایت الکتریکی

تغییرات هدایت الکتریکی در مخلوط ها برای همه ی راکتورها در نمودار ج نشان داده شده است. مقدار EC منعکس کننده ی درجه شوری در کمپوست است که نشان دهنده اثرات احتمالی فیتوتوکسیک یا بازدارنده گیاهی آن بر رشد گیاه در صورت اعمال به خاک است. در طی فرآیند، هدایت الکتریکی در هر چهار راکتور از ۳/۸ به ۴/۸۴ دسی زیمنس بر متر در راکتور A1، از ۳/۹ به ۴/۷۸ دسی زیمنس بر متر در راکتور A2، از ۳/۵۵ به ۴/۲۷

دسی زیمنس بر متر در راکتور A3 و از ۴/۲۸ به ۴/۷۵ دسی زیمنس بر متر در راکتور A4 افزایش یافت. مشاهده شد که تفاوت معنی داری در EC بین راکتور A1 و A3 و بین راکتور A2 و A3 وجود دارد ($P < ۰/۰۵$).

شاخص جوانه زنی

در بررسی میکروبی کمپوست، تعیین شاخص جوانه زنی یا همان سمیت گیاهی نشان داد که به ترتیب راکتور A4، A3، A1 و A2 بیشترین سرعت رشد نسبی ریشه ی بذر (RRG) و شاخص جوانه زنی (GI) را داشتند. آزمایش سمیت گیاهی برای توصیف درجه رسیدن محصول نهایی استفاده می شود. با توجه به شکل ۱، کلیه ی راکتورها تقریباً از یک الگو مشابه پیروی می کنند. درصد جوانه زنی راکتور A1 تا A4 در هفته ۱۲ به ترتیب به مقدار ۷۰/۹۷، ۵۳/۵۵، ۹۷/۴۲ و ۱۰۴/۵۲ رسید. راکتور A3 و A4 دارای بالاترین GI در پایان دوره هستند درحالی که A2 کمترین درصد جوانه زنی را در بین گروه ها داشت.

تغییرات کربن آلی کل و نیتروژن کج دال

نمودار اچ درصد کربن آلی کل^۱ و نمودار ح درصد نیتروژن کل^۲ را برای چهار راکتور مورد مطالعه نشان می دهد. راکتور A1 با درصد کربن آلی حدود ۳۵ درصد همانند A2 شروع می شود و در نهایت روند کاهشی را نشان می دهد و تا هفته ۱۱ در مقدار ۱۷/۶ درصد تثبیت می شود. A2 نزدیک به A1 شروع می شود و هم چنین روند نزولی دارد، اما به طور کلی تا پایان دوره ی کمپوست سازی، به مقدار حدود ۱۷/۲ درصد (نزدیک به A1) می رسد. A3 کاهش تدریجی TOC را نشان می دهد که از حدود ۳۳/۲۳ درصد شروع می شود و تا هفته ۱۱ با کاهش نسبتاً ثابت مشابه A4 به ۱۸/۱ درصد می رسد. A4 نیز از ۳۱ درصد شروع می شود (در سطحی مشابه A3) شروع می شود و در نهایت به طور کلی روند کاهشی را مانند دیگر گروه ها طی می کند.

نیتروژن کل راکتور A1 از حدود ۰/۹۹ درصد شروع می شود و به ۱/۲۳ درصد می رسد، A2 با ۱/۱ درصد شروع و تا هفته ۱۱ با مقدار ۱/۲۵ درصد تثبیت می شود. راکتور A3 از درصد بالای TKN و بالاتر از A1 و A4، با ۱/۱ درصد شروع می شود و ابتدا کاهش ثابتی را نشان می دهد و تا در انتهای دوره ی کمپوست سازی با

¹ Total Organic Carbon

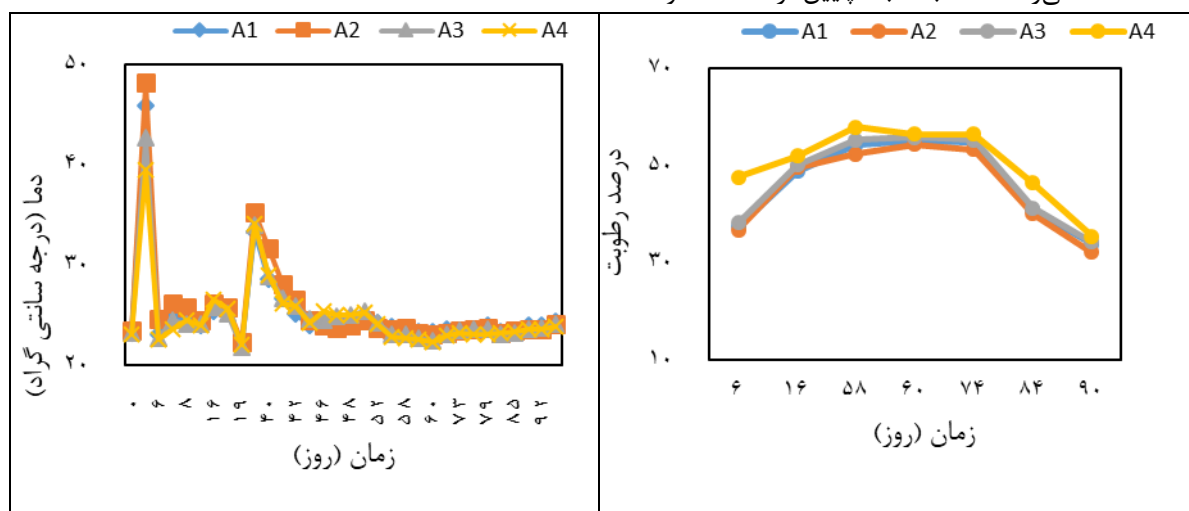
² Total Kjeldahl

شروع می‌شود و در هفته ۱۱ به نقطه ۱۳/۶ می‌رسد. نسبت C/N برای A3 کاهش تدریجی را نشان می‌دهد که از ۲۶ شروع شده و به طوری کلی کاهش یافته و در انتهای دوره‌ی کمپوست‌سازی نسبت به گروه‌های دیگر، به بالاترین عدد و حدود ۱۵/۳۹ می‌رسد. نسبت C/N در راکتور A4 از مقدار ۲۴/۵ شروع شده و در طول زمان با وجود نوسانات در هفته‌ی ۸ام به کمترین مقدار خود می‌رسد و سپس تا پایان دوره همانند A3 روند افزایشی جزئی را تجربه می‌کند و در نهایت به میزان ۱۴/۱۲ می‌رسد. طبق نتایج A3 پایدارترین و بالاترین نسبت C/N را نشان داد و A4 در رتبه‌ی بعدی قرار گرفت. در حالی که A1 و A2 بیشترین کاهش را نشان می‌دهند. تفاوت آماری در بین مقادیر رطوبت در هر چهار راکتور وجود نداشت ($P > 0.05$).

مقدار ۱/۱۶ درصد به پایان می‌رسد. A4 با ۱/۰۲ شروع شده ابتدا روند صعودی سپس ثابت شده و تا پایان دوره فرآیند با مقدار ۱/۲۹ درصد تثبیت می‌شود.

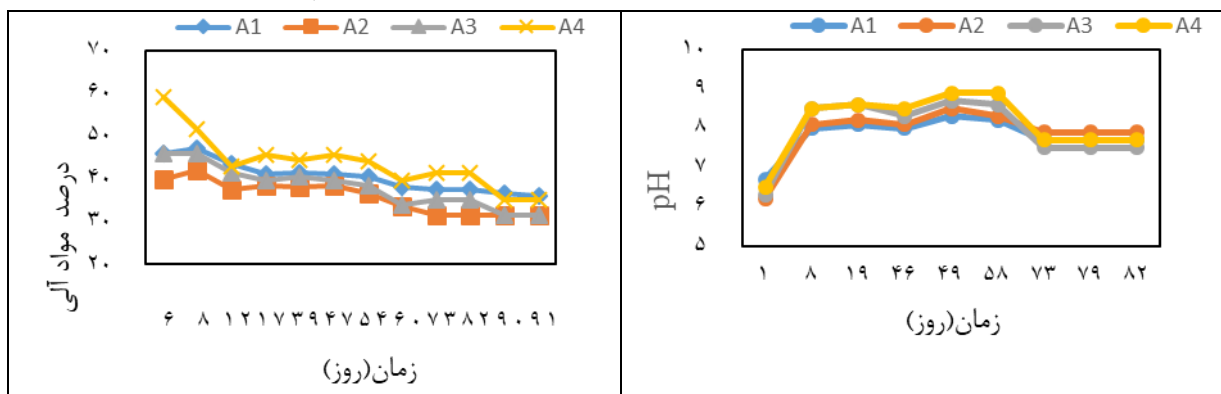
تغییرات نسبت C/N

نسبت C/N به‌طور قابل‌توجهی بر چرخه کمپوست‌سازی تأثیر می‌گذارد و نسبت صحیح اولیه C/N باید حدود ۲۵:۱ برای کمپوست‌سازی هوازی زباله‌های آلی باشد. همان‌طور که در نمودار ۱۸ مشاهده شد مقادیر نسبت کربن به نیتروژن در طول زمان در راکتور A1 بیشترین و در راکتور A4 کمترین بود و در نهایت در انتهای فرایند کمپوست‌سازی همه‌ی راکتورها در محدوده استاندارد C/N قرار گرفتند که راکتور A3 با عدد ۱۵/۳۹ بهترین حالت در نسبت کربن به نیتروژن داشت. راکتور A1 با نسبت C/N برابر ۲۵/۵ شروع می‌شود و در هفته ۷ روند کاهشی زیادی را تجربه کرده و این نسبت در نهایت به ۱۴/۰۳ می‌رسد. A2 با نسبت پایین‌تر C/N حدود ۲۴



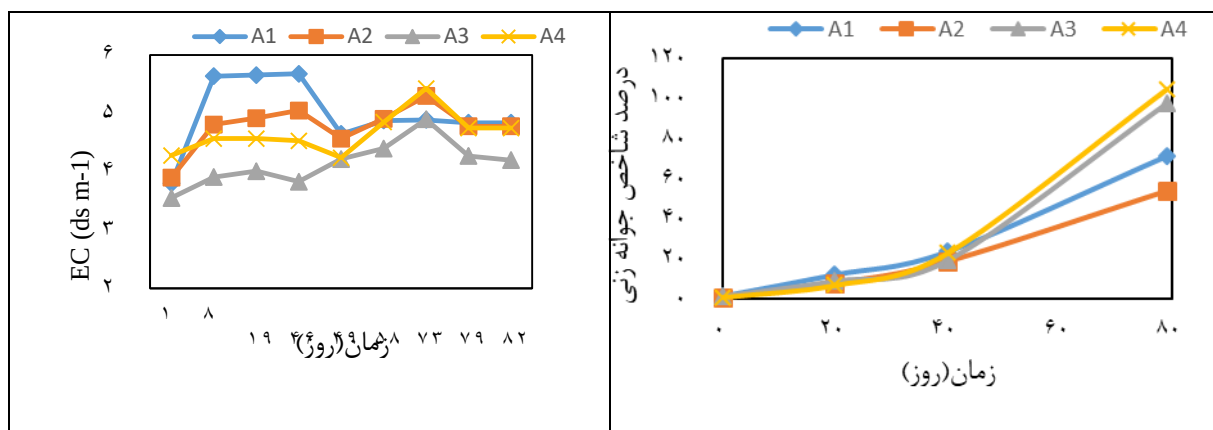
(ب)

(الف)



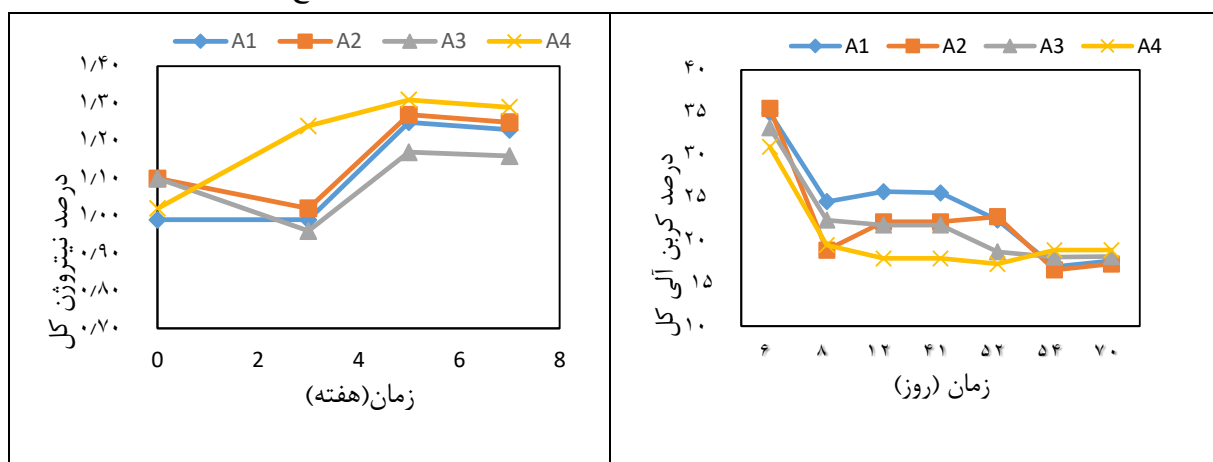
(ت)

(پ)



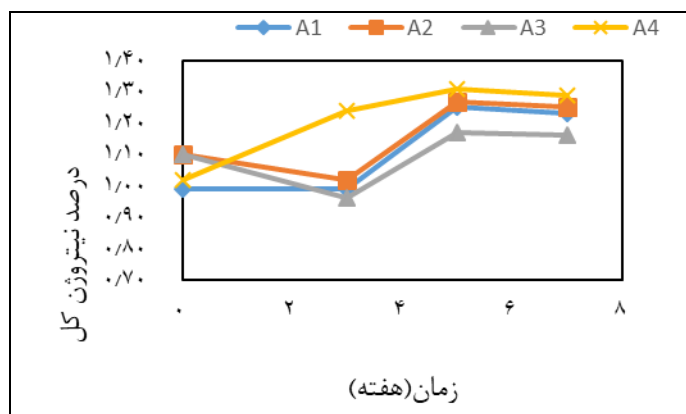
(ج)

(ث)



(ح)

(چ)



(خ)

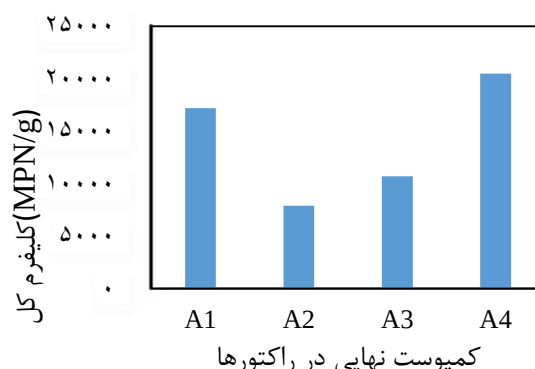
نمودار ۱. تغییرات الف) رطوبت ب) دما پ) pH ت) مواد آلی ث) شاخص جوانه زنی ج) هدایت الکتریکی چ) کربن آلی کل
 ح) نیتروژن کل خ) نسبت کربن به نیتروژن در طول فرایند کمپوست سازی

جدول ۳. مقایسه‌ی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی استاندارد کمپوست ایران با راکتورهای مورد مطالعه در هفته‌ی یازدهم

ردیف	نوع ویژگی	حدود قابل قبول استاندارد کمپوست درجه یک	حدود قابل قبول استاندارد کمپوست درجه دو	راکتور A1	راکتور A2	راکتور A3	راکتور A4
۱	مواد آلی (براساس وزن ماده خشک)	کمینه ۳۵ درصد	کمینه ۲۵ درصد	۳۶/۵ درصد	۳۱/۵ درصد	۳۱/۵ درصد	۳۵ درصد
۲	کربن آلی (براساس وزن ماده خشک)	کمینه ۲۵ درصد	کمینه ۱۵ درصد	۱۷/۶۷۵ درصد	۱۷/۲۸۵ درصد	۱۸/۱۶ درصد	۱۸/۹۱ درصد
۳	میزان ازت کل (براساس وزن ماده خشک)	۱/۲۵-۱/۶۶ درصد	۱/۱۰-۱/۵ درصد	۱/۲۶ درصد	۱/۲۷ درصد	۱/۱۸ درصد	۱/۳۴ درصد
۴	نسبت کربن به نیتروژن (C/N)	۱۵-۲۰	۱۰-۱۵	۱۴/۰۲۸	۱۳/۶۱	۱۵/۳۹	۱۴/۱۱۲
۵	هدایت الکتریکی (در محلول ۱۰ درصد از ماده خشک)	۸ ds/m	بیشینه ۱۴ ds/m	۶/۸۴ ds/m	۶/۷۸ ds/m	۶/۲ ds/m	۶/۷۵ ds/m
۶	pH (در محلول ۱۰ درصد از ماده خشک)	۶-۸	۶-۶/۸	۷/۷	۷/۹	۷/۵	۷/۷
۷	شاخص جوله زنی	کمینه ۷۰ درصد	کمینه ۷۰ درصد	۷۰/۹۶۸ درصد	۵۳/۵۴۸ درصد	۹۷/۴۱۹ درصد	۱۰۴/۵۱۶ درصد

مقدار کلی فرم مدفوعی در انتهای فرآیند

ارگانایسم‌های کلی فرم کل شاخص خوبی جهت تعیین آلودگی خاک و آب هستند، زیرا عموماً فراوانی بالاتری نسبت به سایر پاتوژن‌ها دارند و تشخیص آن‌ها ساده‌تر است (۱۸). مقادیر کلی فرم کل در نمودار ۲، برای چهار راکتور در انتهای فرآیند کمپوست‌سازی نشان داده شده است. به‌طور کلی راکتور A2 در انتهای فرآیند در هفته ۱۳م مقدار ۲۰۰۰ MPN/g برحسب وزن خشک را دارد که از سایر گروه‌ها بیشتر می‌باشد.



نمودار ۲. نمودار مقادیر کلی فرم کل اندازه‌گیری شده به روش MPN در راکتورها (MPN/g)

مقایسه راکتورها از نظر پارامترهای کیفی و زمان رسیدن

با توجه به دو پارامتر موثر C/N و GI در رسیدن کمپوست، تغییرات C/N نشان می‌دهد که راکتور شماره A4 در هفته ۵ام و راکتورهای دیگر در هفته ۹ام به کمپوست رسیده تبدیل شده‌اند. در هفته‌ی ۱۱ام راکتورهای A4، A3 و A1 با GI بالاتر از ۷۰ درصد،

مرحله رسیدن و پایداری کمپوست را نشان دادند. با در نظر گرفتن تغییرات خواص فیزیک و شیمیایی چهار راکتور به‌نظر می‌رسد که مخلوط در راکتور A3 (۳۰٪ پسماند آلی، ۵۰٪ کود مرغی و ۲۰٪ خاکاره) و راکتور A4 (۶۰٪ پسماند آلی، ۳۰٪ کود مرغی و ۱۰٪ خاکاره) مناسب‌ترین شرایط را برای فاز فعال فراهم کرده است. میزان کلی فرم مدفوعی این دو راکتور در محدوده‌ی استاندارد قرار داشت. بیشترین کاهش مواد آلی در راکتور A3 و بالاترین دما در راکتور A2 مشاهده شد، مقادیر نهایی pH (۷/۵) و EC (۴/۲۷ دسی‌زیمنس بر مترمربع) در راکتور A3 در بین سایر راکتورها کمترین مقدار را داشت. با توجه به آزمون پیرسون و بررسی ضریب همبستگی، در راکتور A1 بین پارامتر C/N و GI همبستگی قوی منفی (۰/۹۳۷-) و معناداری وجود دارد (P < ۰/۰۵). به‌طوری‌که با افزایش C/N در راکتور A1، میزان GI کاهش یافت. هم‌چنین بین پارامترهای مواد آلی و GI (۰/۹۳۰-)، رطوبت و GI (۰/۰۹) همبستگی قوی و ارتباط معنادار وجود داشت. در راکتور A2 بین پارامتر pH و هدایت الکتریکی همبستگی قوی (۰/۷۳۵) و معناداری وجود داشت (P < ۰/۰۵). به‌طوری‌که با افزایش pH در راکتور A2، میزان EC افزایش یافت. هم‌چنین بین پارامترهای رطوبت و GI (۰/۰۹) همبستگی قوی و ارتباط معنادار وجود دارد. در حالی‌که در راکتور A3 بین پارامتر pH و رطوبت همبستگی قوی (۰/۷۷۶) معناداری وجود دارد (P < ۰/۰۵) و با افزایش pH در راکتور A3، میزان رطوبت افزایش می‌یابد. هم‌چنین بین پارامترهای C/N و GI (۰/۸۹۵-) همبستگی قوی منفی و ارتباط

معنادر وجود دارد. راکتور A4 بین C/N و pH همبستگی منفی قوی (-0.939) و معناداری وجود دارد ($P < 0.05$). به طوری که با افزایش C/N در راکتور A3، میزان pH کاهش می یابد. همچنین بین پارامترهای C/N و مواد آلی (0.963) و نیز C/N و رطوبت (-0.960) همبستگی قوی و ارتباط معنادار وجود دارد.

مقایسه راکتورها با استاندارد

باتوجه به جدول ۳، مطابق با نتایج به دست آمده از شاخص های PH، EC، C/N، GI، کربن آلی و نیتروژن کل در این قسمت به مقایسه هر پارامتر با استاندارد موجود پرداخته می شود. در استاندارد شماره ۱۰۷۱۶ ایران، کمپوست به دو درجه «یک» و «دو» طبقه بندی می شود. این طبقه بندی بر اساس فاکتورهای کیفی صورت گرفته است و رده ی یک دارای کیفیت بهتری می باشد.

بحث

دمای مخلوط کمپوست در راکتورها بلافاصله پس از رسیدن به حداکثر کاهش یافت. این احتمالاً به دلیل محتوای رطوبت اولیه کمتر و در نتیجه فضای آزاد بیشتر است. در مطالعه ی سوهارتینی و همکاران، دما هم زمان افزایش یافت که نشان دهنده تخریب مواد آلی و متابولیسم هوازی فعالیت های میکروبی بود. پس از آن با کاهش تدریجی دما در محدوده ی ۲۸ تا ۳۰ درجه سانتی گراد قرار داشت که دلیل آن کاهش میزان ماده آلی و فعالیت میکروارگانیسم گزارش شده است (۱۹).

کمبود رطوبت^۱ (MC) در مراحل اولیه کمپوست باعث مهار متابولیسم میکروبی و سبب از دست دادن گرمای بیش از حد توده به دلیل تخلخل بالا می شود. MC بیش از حد بالا باعث کاهش تخلخل کمپوست به دلیل توده ای که به راحتی فشرده می شود، انتقال جرم اکسیژن را مهار می کند و توده را بی اکسیژن می کند و منجر به کاهش سرعت تجزیه و افزایش انتشار بو می شود. MC اولیه می تواند بر تجزیه ی مواد آلی و انتشار گازهای مضر با تأثیر بر استفاده از اکسیژن میکروارگانیسم ها، همچنین بر دمای توده و حذف پاتوژن ها و مواد سمی موثر و بر ایمنی کمپوست تأثیر می گذارد (۱۳).

لی و همکاران در مطالعه ای، ۵۳ درصد بهترین رطوبت اولیه برای افزایش زیستی عامل میکروبی در کمپوست سازی کود مرغی تعیین کردند که بسیار کمتر از تحقیقات قبلی بود (۲۰). در مطالعه ی سوهارتینی میزان رطوبت در طی فرآیند کمپوست سازی به ترتیب از حدود ۶۰ درصد به ۴۲/۸۶ - ۴۵/۳۳ درصد کاهش یافته است (۲۱). این نتیجه توسط مطالعه ی قبلی که نشان دهنده ی روندهای مشابه بود پشتیبانی می شود. در استاندارد ایران رطوبت کمپوست رسیده در نوع درجه یک حداکثر ۱۵ درصد و در نوع درجه دو حداکثر ۳۵ درصد می باشد. در این مطالعه در انتهای دوره ی کمپوست سازی، درصد رطوبت بین ۳۳ تا ۳۵ درصد بود که در محدوده ی استاندارد کمپوست رسیده ی نوع درجه دو قرار داشت.

با توجه به روند کاهشی و نتایج به دست آمده از مواد آلی^۲ در این مطالعه، مطالعه ی مشابه قاسیم و همکاران نشان داد، محتوای OM در همه ی راکتورها نیز کاهش یافته است که نشان دهنده ی تجزیه ی زیستی کمپوست است. درصد OM کمپوست به تدریج از ۸۵٪ اولیه در همه ی راکتورها به ۶۱، ۶۴ و ۶۵ درصد در روز ۳۰ کاهش یافت (۲۲). در استاندارد ایران درصد مواد آلی کمپوست رسیده در نوع درجه یک با حداقل ۳۵ درصد و در نوع درجه دو با حداقل ۲۵ درصد می باشد. باتوجه به نتایج به دست آمده در هفته ی آخر، درصد مواد آلی بین ۳۱/۵ تا ۳۵ درصد بود که در محدوده ی استاندارد کمپوست رسیده ی نوع درجه دو قرار داشت.

فعالیت میکروبی در خاک و در دسترس بودن مواد مغذی مختلف به ریشه ی گیاه به طور قابل توجهی تحت تأثیر pH محیط رشد قرار دارد. مقدار pH پایین تر ممکن است در اثر تشکیل اسیدهای چرب در مراحل اولیه ی فرآیند کمپوست ایجاد شود. متعاقباً، در طی فاز مزوفیل، کانی سازی ترکیبات نیتروژن دار، مقدار pH را از طریق تجزیه ی ماده ی آلی و تشکیل آمونیاک و آمونیوم، افزایش می دهد (۲۳). فن و همکاران گزارش کردند که مقادیر pH اولیه برای هر دو کمپوست حدود ۷/۳ بود و سپس در ۳ روز اول به سرعت به ۸ افزایش یافت که ممکن است در نتیجه تجمع ترکیبات قلیایی در طول فرآیند تخریب آلاینده های آلی باشد. متعاقباً، از روز ۴ تا ۱۳، کاهش

² Organic Materials

¹ Moisture Content

شهری نیز گزارش شده است (۲۵، ۲۶).

در مطالعه‌ی قاسیم و همکاران، در طول ۳۰ روز کمپوست را نشان می‌دهد. نتایج GI در تمام راکتورها در فاز اولیه کاهش یافته است که شوری نسبتاً بالایی را در آغاز نشان می‌دهد. پس از ۵ روز، GI همه‌ی راکتورها به‌دلیل تجزیه‌ی مواد سمی شروع به افزایش تدریجی کرد که نشان‌دهنده‌ی رسیدن کمپوست است (۲۲). در استاندارد ایران، GI کمپوست رسیده در نوع درجه یک و درجه دو حداقل ۷۰ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در هفته‌ی آخر، GI در راکتور A1-A4 به‌ترتیب برابر با ۷۰/۹۷ درصد، ۵۳/۵۵ درصد، ۹۷/۴۲ درصد و ۱۰۴/۵۲ درصد بود و راکتورهای A1، A3 و A4 در محدوده‌ی استاندارد کمپوست رسیده نوع درجه یک قرار داشت.

با توجه به روند کاهشی درصد کربن آلی کل در این مطالعه، مشابه با مطالعه‌ی آواستی و همکاران بود که نشان دادند TOC محصولات نهایی کمپوست کود مرغی به‌همراه بیوپار به‌ترتیب ۳۷/۹۶، ۴۰/۲۹، ۳۸/۸۶، ۳۷/۷۸، ۳۷/۲ و ۳۷/۰۳ درصد از T1 تا T6 بودند. غلظت TOC با غلظت‌های بالاتر بیوپار به‌شدت کاهش یافته زیرا بیوپار سبب تسریع میکروب‌های ترموفیل فعال برای تجزیه‌ی مواد کربن آلی به دی‌اکسیدکربن و آب شده است. همچنین گزارش دادند، کاهش ثابت در محتوای TKN در بین ۱۰-۱۴ روز اول کمپوست‌سازی با تأخیر آمونیاک تا پایین‌ترین پیک، با ۱/۰۵، ۱/۳۶، ۱/۴۸، ۱/۶۴، ۱/۷۸ و ۱/۷٪ از T1 تا T6 (غلظت‌های مختلف بیوپار بامبو در کمپوست مرغی و کاه گندم) مشاهده شد. با ادامه‌ی کمپوست، محتوای TKN به‌تدریج با تثبیت نیتروژن افزایش یافت و محتوای کمپوست نهایی ۱/۶۶، ۱/۶۲، ۱/۸، ۱/۸۲، ۱/۹۵ و ۱/۹۶ درصد بود (۲۷).

نسبت کربن به نیتروژن یکی از پارامترهای اصلی در کنترل تعادل مواد مغذی در فرآیند کمپوست است. در استاندارد ایران، درصد C/N کمپوست رسیده در نوع درجه یک ۱۵-۲۰ و در نوع درجه دو ۱۰-۱۵ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در هفته‌ی آخر، C/N در راکتور A3 در محدوده‌ی استاندارد کمپوست رسیده نوع درجه یک و دیگر راکتورها در نوع درجه دو قرار داشت. در نسبت C/N مقدار کاهش پس از دوره‌ی کمپوست‌سازی مشهود بود که به‌دلیل تجزیه و کانی‌سازی مواد آلی بود که باعث از دست‌دادن حداکثر

شدید pH به‌دلیل تجمع اسیدهای آلی تولیدشده توسط فعالیت‌های تخریب زیستی شدید در طول فرآیند کمپوست رخ داد. این منجر به کاهش مواد آمین‌دار به‌دلیل انتشار NH_3 در مرحله‌ی ترموفیل شد (۲۴). در استاندارد ایران pH کمپوست رسیده در نوع درجه یک و نوع درجه دو ۶-۸ می‌باشد که بدین‌ترتیب pH نهایی در محدوده‌ی کمپوست نهایی درجه یک قرار می‌گیرد.

افزودن کمپوست با EC بالا به خاک تجمع نمک را در ناحیه‌ی ریشه افزایش می‌دهد و از جذب آب توسط ریشه جلوگیری می‌کند. تخریب مواد آلی توسط نمک‌های محلول آزادشده توسط فعالیت میکروبی در طی فرآیند کمپوست، مقدار EC را افزایش می‌دهد (۱۱). در طی فرآیند کمپوست، کاهش EC (درجه شوری) به تأخیر آمونیاک نسبت داده می‌شود که باعث تجمع نمک‌های معدنی در مواد کمپوست می‌شود. خاک کشاورزی، مقدار EC بیش از ۴ دسی‌زیمنس بر متر را در کمپوست می‌پذیرد (۳۱). در استاندارد ایران EC کمپوست رسیده در نوع درجه یک حداکثر ۸ و در نوع درجه دو حداکثر ۱۴ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در هفته‌ی آخر، EC بین ۴/۲۸ تا ۴/۸۴ دسی‌زیمنس بر متر بود که در محدوده‌ی استاندارد کمپوست رسیده نوع درجه یک قرار داشت.

آزمایش سمیت گیاهی برای توصیف درجه‌ی رسیدن محصول نهایی استفاده می‌شود. رشد بذر به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر وجود مواد سمی گیاهی مانند آمونیاک، اسیدهای آلی و فلزات سنگین و غیره است. چندین مطالعه عدم وجود سمیت گیاهی را با $\text{GI} \geq ۸۰\%$ گزارش کردند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که توده آزمایشی تحت یک مرحله رسیدن کامل قرار گرفته است و کمپوست تولید شده را می‌توان با خیال راحت برای اهداف کشاورزی استفاده کرد (۱۱). به‌طور کلی بیان شده است که موادی با مقادیر GI کمتر از ۵۰ درصد بسیار سمی گیاهی، بین ۵۰ تا ۸۰ درصد گیاه سمی متوسط، بالاتر از ۸۰ درصد فاقد سمیت گیاهی هستند و مواد با GI بالاتر از ۱۰۰ درصد دارای اثر محرک گیاهی هستند. به‌طور کلی، مقادیر GI از ابتدای فرآیند کمپوست روند افزایشی نشان داد، همان‌طور که در کمپوست‌سازی کود مرغی و سایر کودهای حیوانی و نیز کمپوست‌سازی مشترک لجن فاضلاب و بخش آلی پسماندهای جامد

کربن و افزایش غلظت نیتروژن می‌شود. نسبت C/N به‌طور قابل‌توجهی بر چرخه‌ی کمپوست‌سازی تأثیر می‌گذارد و نسبت صحیح اولیه C/N باید حدود ۲۵:۱ برای کمپوست هوازی زباله‌های آلی باشد. در مطالعه‌ی جلیلی و همکاران برای مدیریت ضایعات پسته، کود دامی نسبت از ۲۵:۱ به ۱۳:۱ کاهش یافت (۲۸). برای تمام فرآیندهای کمپوست‌سازی، مقدار C/N با پیشرفت فرایند کمپوست کاهش می‌یابد. در مقابل، تحقیق ژانگ و همکاران (۲۶)، نشان داد که مقدار C/N در تیمارها با کاربرد بیوجار و حتی بدون آن به‌دلیل کانی‌شدن بسترها یا افزایش غلظت نیتروژن کل پس از تجزیه‌ی کربن کاهش می‌یابد.

کلی‌فرم مدفوعی تنها در نمونه راکتور A2 یافت شد. با توجه به استاندارد میزان کلی‌فرم‌های مدفوعی در کمپوست درجه یک باید کمتر از ۱۰۰۰ MPN در گرم بر اساس وزن خشک و در کمپوست درجه دو کمتر از ۲×۱۰۶ MPN در گرم بر اساس وزن خشک باشد (۲۹). در این صورت میزان کلی‌فرم مدفوعی در محدوده‌ی استاندارد بوده و استفاده از این کمپوست در زمین‌های کشاورزی، چمن‌ها و باغ‌ها از نظر میکروبی بلامانع است (۳۰). در کمپوست‌سازی زایدات باغبانی و لجن هضم‌شده (به سه نسبت ۱ به ۱، ۱ به ۲ و ۱ به ۳) نتایج نشان داد که توده ۱ به ۲ و ۱ به ۳ در دستیابی به فاز ترموفیلیک و نابودی میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا (کلی‌فرم مدفوعی، استرپتوکوک مدفوعی و سالمونلا) موفق‌تر بودند در نتیجه در مقدار کلی‌فرم‌های نهایی عواملی چون؛ دمای بالا، نوع مواد زاید مورد استفاده اولیه جهت کمپوست‌سازی و فراهم‌شدن شرایط جهت رشد مجدد بعضی باکتری‌های آسیب‌دیده موثر هستند (۳۱).

نتیجه‌گیری

این پروژه به‌منظور اتخاذ روشی عملی برای تصفیه‌ی موثر فضولات مرغی تولیدی در مرغداری‌های شهر مشهد انجام شد. این مطالعه با بررسی زمان رسیدن کمپوست مشترک پسماند آلی و فضولات مرغی و تعیین نسبت بهینه اختلاط مواد انجام شد. این مواد با نسبت‌های مختلف به وزن نهایی ۵ کیلوگرم در راکتورهای ساخته‌شده از جنس پلاستیک قرار گرفتند و چهار نسبت از پسماند آلی؛ کود مرغی؛ خاکاره تهیه شد. اندازه‌گیری دما در محل

به‌صورت روزانه انجام شد. هوادهی در توده‌ها با زیرورو کردن انجام شد. نمونه‌گیری به‌صورت دوره‌ای و هفتگی انجام شد. پارامترهای مختلف ازجمله تغییرات دما، رطوبت، pH، EC، OM، TOC، TKN، C/N، GI مورد ارزیابی قرار گرفت. همه‌ی گروه‌ها در طی فرایند کمپوست‌سازی از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی در محدوده‌ی بهینه طبق استاندارد ملی قرار داشتند. این روش توانست مواد آلی را در ۱۱ هفته به محصولی با ارزش افزوده تبدیل کند. محصول نهایی همه راکتورها پایدار به‌نظر می‌رسند مناسب می‌کند.

تشکر و قدردانی: بدین‌وسیله از معاونت پژوهشی دانشکده بهداشت علوم پزشکی مشهد و کارشناس محترم آزمایشگاه شیمی که در اجرای این پژوهش ما را یاری کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع: نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی: این مقاله با کد اخلاق IR.MUMS.FHMPM.REC.1401.150 در دانشگاه علوم پزشکی مشهد تصویب و با حمایت مالی این دانشگاه انجام شد.

ملاحظات اخلاقی: این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد با عنوان "بررسی فرایند کمپوست‌سازی مشترک فضولات مرغی و بخش آلی پسماند سلف سرویس دانشگاه علوم پزشکی مشهد" مصوب دانشگاه علوم پزشکی مشهد با کد ۴۰۲۱۹۹ است. نویسندگان کلیه‌ی نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. هم‌چنین هر گونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

سهم نویسندگان: مشارکت نویسندگان محترم در این مقاله به شرح زیر می‌باشد: -جناب دکتر علی اکبر دهقان در ارایه ایده پژوهشی، طراحی مطالعه و آنالیز و تفسیر داده‌ها. -خانم مهندس فاطمه سادات خطیبی در طراحی مطالعه، جمع‌آوری داده‌ها و آنالیز و تفسیر داده‌ها. -جناب آقای دکتر علیدادی، آقای دکتر باریک بین در طراحی مطالعه و آنالیز و تفسیر داده‌ها. -خانم مهندس

افشار در آنالیز و تفسیر داده‌ها. همچنین تمامی نویسندگان در بازبینی و مرور همکاری کرده‌اند.

References

1. Castaldi P, Garau G, Melis P. Maturity assessment of compost from municipal solid waste through the study of enzyme activities and water-soluble fractions. *Waste Management*. 2008;28(3):534-40. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.002> PMID:17382530
2. Sánchez-Monedero M, Roig A, Paredes C, Bernal M. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresource technology*. 2001;78(3):301-8. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00031-1) PMID:11341692
3. Xu Z, Qi C, Zhang L, Ma Y, Li G, Nghiem LD, et al. Regulating bacterial dynamics by lime addition to enhance kitchen waste composting. *Bioresource technology*. 2021;341:125749. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125749> PMID:34416657
4. Gao X, Xu Z, Li Y, Zhang L, Li G, Nghiem LD, et al. Bacterial dynamics for gaseous emission and humification in bio-augmented composting of kitchen waste. *Science of The Total Environment*. 2021;801:149640. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149640> PMID:34416604
5. Organization WM. Amount of waste produced in Mashhad city 1400 [Available from: https://planning.mashhad.ir/fa/file_manager/608520.html. (In Persian).
6. Li H, Tan L, Liu W, Li X, Zhang D, Xu Y. Unraveling the effect of added microbial inoculants on ammonia emissions during co-composting of kitchen waste and sawdust: Core microorganisms and functional genes. *Science of The Total Environment*. 2023;874:162522. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162522> PMID:36868270
7. Awasthi MK, Liu T, Chen H, Verma S, Duan Y, Awasthi SK, et al. The behavior of antibiotic resistance genes and their associations with bacterial community during poultry manure composting. *Bioresource technology*. 2019;280:70-8.

- <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.030> PMID:30754007
8. Qian X, Gu J, Sun W, Wang X-J, Su J-Q, Stedfeld R. Diversity, abundance, and persistence of antibiotic resistance genes in various types of animal manure following industrial composting. *Journal of Hazardous materials*. 2018;344:716-22. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.11.020> PMID:29154097
9. Organization. National Program and Budget. Statistical Center of Iran 1401 [Available from: <https://amar.org.ir/salnameh-amar>. (In Persian).
10. Hwang HY, Kim SH, Kim MS, Park SJ, Lee CH. Co-composting of chicken manure with organic wastes: characterization of gases emissions and compost quality. *Applied biological chemistry*. 2020;63:1-10. <https://doi.org/10.1186/s13765-019-0483-8>
11. Jalalipour H, Jaafarzadeh N, Morscheck G, Narra S, Nelles M. Potential of producing compost from source-separated municipal organic waste (A case study in Shiraz, Iran). *Sustainability*. 2020;12(22):9704. <https://doi.org/10.3390/su12229704>. (In Persian).
12. Standard. National Iranian No. 13320. Compost-Sampling and Physical and Chemical Test Methods. Iranian Standards and Industrial Research Organization. 1386. (In Persian).
13. Thomas C, Idler C, Ammon C, Amon T. Effects of the C/N ratio and moisture content on the survival of ESBL-producing *Escherichia coli* during chicken manure composting. *Waste Management*. 2020;105:110-8. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.031> PMID:32044549
14. Oviedo-Ocaña ER, Hernández-Gómez A, Dominguez I, Alexis Parra-Orobio B, Soto-Paz J, Sánchez A. Evaluation of Co-Composting as an Alternative for the Use of Agricultural Waste of Spring Onions, Chicken Manure and Bio-Waste Produced in Moorland Ecosystems. *Sustainability*. 2022;14(14):8720. <https://doi.org/10.3390/su14148720>
15. Association APH. Standard methods for the examination of water and wastewater: American Public Health Association.; 1926.

16. Wang G, Yang Y, Kong Y, Ma R, Yuan J, Li G. Key factors affecting seed germination in phytotoxicity tests during sheep manure composting with carbon additives. *Journal of Hazardous Materials*. 2022;421:126809. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126809> PMid:34388932
17. Seidmohammadi A, Asgari G, Torabi L. Removal of Metronidazole using ozone activated persulfate from aqua solutions in presence of ultrasound. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*. 2016;26(143):160-73. (In Persian).
18. Lew S, Glińska-Lewczuk K, Burandt P, Grzybowski M, Obolowski K. Fecal bacteria in coastal lakes: An anthropogenic contamination or natural element of microbial diversity? *Ecological Indicators*. 2023;152:110370. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110370>
19. Awasthi MK, Wang M, Chen H, Wang Q, Zhao J, Ren X, et al. Heterogeneity of biochar amendment to improve the carbon and nitrogen sequestration through reduce the greenhouse gases emissions during sewage sludge composting. *Bioresource technology*. 2017;224:428-38. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.014> PMid:27843087
20. Li M-X, He X-S, Tang J, Li X, Zhao R, Tao Y-Q, et al. Influence of moisture content on chicken manure stabilization during microbial agent-enhanced composting. *Chemosphere*. 2021;264:128549. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128549> PMid:33065328
21. Suhartini S, Wijana S, Wardhani N, Muttaqin S, editors. Composting of chicken manure for biofertiliser production: a case study in Kidal Village, Malang Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*; 2020: IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/524/1/012016>
22. Qasim W, Lee MH, Moon BE, Okyere FG, Khan F, Nafees M, et al. Composting of chicken manure with a mixture of sawdust and wood shavings under forced aeration in a closed reactor system. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2018;7:261-7. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0212-z>
23. Kauser H, Pal S, Haq I, Khwairakpam M. Evaluation of rotary drum composting for the management of invasive weed *Mikania micrantha* Kunth and its toxicity assessment. *Bioresource Technology*. 2020;313:123678. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123678> PMid:32570078
24. Fan H, Liao J, Abass OK, Liu L, Huang X, Li J, et al. Concomitant management of solid and liquid swine manure via controlled co-composting: Towards nutrients enrichment and wastewater recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021;168:105308. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105308>
25. Young BJ, Rizzo PF, Riera NI, Della Torre V, López VA, Molina CD, et al. Development of phytotoxicity indexes and their correlation with ecotoxicological, stability and physicochemical parameters during passive composting of poultry manure. *Waste management*. 2016;54:101-9. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.001> PMid:27185192
26. Zhang D, Luo W, Li Y, Wang G, Li G. Performance of co-composting sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste at different proportions. *Bioresource technology*. 2018;250:853-9. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.136> PMid:30001593
27. Awasthi MK, Duan Y, Awasthi SK, Liu T, Zhang Z. Influence of bamboo biochar on mitigating greenhouse gas emissions and nitrogen loss during poultry manure composting. *Bioresource technology*. 2020;303:122952. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122952> PMid:32050126
28. Jalili M, Mokhtari M, Eslami H, Abbasi F, Ghanbari R, Ebrahimi AA. Toxicity evaluation and management of co-composting pistachio wastes combined with cattle manure and municipal sewage sludge. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2019;171:798-804. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.056> PMid:30660973 . (In Persian).
29. EPA U. Method 1680: Fecal Coliforms in Sewage Sludge (Biosolids) by Multiple-Tube Fermentation Using Lauryl Tryptose Broth (Ltb) and Ec Medium. Washington, DC, US EPA. 2010.
30. Manga M, Muoghalu C, Camargo-Valero MA, Evans BE. Effect of turning frequency on

the survival of fecal indicator microorganisms during aerobic composting of fecal sludge with sawdust. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023;20(3):2668.

<https://doi.org/10.3390/ijerph20032668>

PMid:36768034 PMCID:PMC9915456

31. Kadkhodaei S, Nikaeen M, Hatamzadeh M, Nafez AH, Hassanzadeh A. Monitoring of indicator and pathogenic bacteria during sewage sludge composting process. Journal of Health System Research. 2016;12(2):160-5. (In Persian).