علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره نوزدهم، شماره چهار، زمستان ۹۶

بررسی تولید کمپوست از زباله شهری با استفاده از بیوراکتور بستر جامد

(مطالعه موردی: آمل)

محمد حسین حیدرزاده [۱]

حسین امانی [۲*]

Hamani@nit.ac.ir

بهزاد جوادیان [۳]

حسن کریمی نژاد [۴]

مجتبی نوایی [۵]

تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۲۳ تاریخ پذیرش:۹۵/۴/۲

چکیده

زمینه و هدف: به خاطر حجم بالای تولید زباله در شهر آمل و نزدیکی این شهر به دریا و جنگل، نیاز به مدیریت صحیح زباله‌های شهری به‌منظور ممانعت از آلودگی محیط‌زیست بیش‌ازپیش احساس می‌شود. از سوی دیگر با توجه به این‌که مواد آلی فسادپذیر حدود ۸۰ درصد زباله‌های جمع‌آوری‌شده این شهر را تشکیل می‌دهند، بنابراین ارایه راه‌کاری جدید جهت تولید کمپوست از زباله‌های شهری و مقایسه کیفیت محصول بر طبق استانداردهای سازمان ملی استاندارد ایران از اهداف این مقاله می‌باشد.

روش بررسی: در این مقاله، تولید کمپوست در شرایط بسته و کنترل‌شده گل‌خانه‌ای به‌عنوان یک روش نوین به همراه طراحی و ساخت یک دستگاه خردکن زباله و یک راکتور بستر جامد هوادهی شونده نوین مورد بررسی قرار گرفت. در این راکتور عمل هوادهی و هم زدن توده با کنترل دقیق قابل انجام است و می‌توان از این راکتور در مقیاس‌های بزرگ استفاده نمود. هم‌چنین در حین تولید، پارامترهایی مانند دما، pH، میزان کربن، میزان نیتروژن و نیز میزان خاکستر اندازه‌گیری شد. برای نمونه‌گیری‌ها نیز از روش نمونه‌گیری مرکب استفاده شد.

۱- کارشناسی ارشد، گروه بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی – دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- استادیار، گروه بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل [*](مسوول مکاتبات)

۳- مربی، دانشکده پیراپزشکی آمل، دانشگاه علوم پزشکی مازندران

۴- استاد یار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۵- مدیر عامل، شرکت صنعتی خزر الکتریک، آمل

یافته ها: نتایج نشان داد تولید کمپوست حاصل از این تحقیق در مدت‌زمان ۲۵ روز به دست آمد که کم‌تر از فرآیندهای رایج مشابه می‌باشد. در این بررسی، نسبت کربن به نیتروژن محصول نهایی ۱۹/۸۹، pH ۷/۲۹ و میزان هدایت الکتریکی dS/m ۷/۷ به دست آمد که نشان می‌دهد کمپوست حاصل از این تحقیق دارای مشخصات کمپوست درجه‌یک مورد تایید سازمان ملی استاندارد ایران می‌باشد.

بحث و نتیجه گیری: با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان روش پیشنهادی حاصل از این تحقیق را برای تولید کمپوست مرغوب تجاری از زباله‌های شهری پیشنهاد داد.

واژه های کلیدی: بیوراکتور، خردکن، زباله جامد شهری، کمپوست، نسبت کربن به نیتروژن

J.Env. Sci. Tech., Vol 19, No.4, Winter, 2018

Investigation of compost production from municipal solid waste using solid state bioreactor (Case study: Amol)

Mohammad Hossein Heidarzadeh [1]
Hossein Amani [2*]
Hamani@nit.ac.ir
Behzad Javadian[3]
Hasan Kariminezhad[4]
Mojtaba Navaei[5]

Admission Date: May 8, 2016 Date Received: November 2, 2016

Abstract

Background and Objective: Due to the large volume of waste produced in Amol and the proximity of the city to the sea and the forest, a proper waste management is urgent necessary to prevent environmental pollution. On the other hand, organic waste occupies more than 80% of the Amol municipal solid waste. Therefore, a new method for compost production from municipal solid waste and a suitable quality comparison of the produced compost with Iranian National Standards Organization are aims of this study.

Method: In this paper, compost production at a greenhouse closed and controlled condition as a novel method using of homemade designed crusher was studied. In this work also a new design of solid state bioreactor was used. In this reactor, aeration and stirring were carefully controlled; therefore, this reactor can be used in a large scale. Also parameters such as temperature, pH, C/N and ash were measured during the compost production.

Findings: The results showed that the production of compost from this study obtained during 25 days that is less than the current processes. The ratio of carbon to nitrogen of the final product, pH and the electrical conductivity were 19.89, 7.29 and 7.7 dS/m, respectively. Also, results showed that the produced compost parameters are in agreement with first class compost based on the Iranian National Standards Organization.

Discussion & Conclusion: According to the results, the method of this research can be proposed in high scale and high quality compost production from municipal waste.

Keywords: Bioreactor, Crusher, Municipal Solid Waste, Compost, the Ratio of Carbon to Nitrogen

1- MSc. Student of Biotechnology Engineering, Department of Chemical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
2- Assistant Prof., Department of Chemical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. *(Corresponding Author)
3- Instructor, Faculty of Paramedical, Mazandaran University of medical sciences, Amol, Iran
4- Assistant Prof., Department of Basic Sciences, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
5- CEO, Khazar Electric Co, Amol, Iran

مقدمه

همگام با افزایش جمعیت و تغییر الگوی مصرف و ایجاد معضلی به نام زباله، نیاز به انتخاب روش صحیح مدیریت زباله بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از این روش‌ها، تولید کمپوست از زباله‌های فسادپذیر است. در طی فرآیند تولید کمپوست، مواد آلی به محصولی یکنواخت‌تر و با پایداری بیولوژیکی بیش‌تر تبدیل می‌شوند که می‌توانند به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک کشاورزی مورداستفاده قرار گیرند(۱). طبق تعریف سازمان ملی استاندارد ایران،کمپوست، کود آلی جامد پایدار و بهداشتی حاصل از تجزیه بیولوژیکی مواد آلی (زباله شهری) تحت تیمار انواع مختلف ریزجانداران می‌باشد که می‌تواند از فرآوری مخلوطی از چند ماده آلی قابل‌تجزیه تشکیل شود (۲). فرآیند تولید کمپوست یک فرآیند هوازی است که توسط میکروارگانیسم‌ها و در حضور اکسیژن انجام می‌شود. زباله‌های آلی موجود در زباله‌های جامد شهری قابلیت استفاده به‌عنوان ماده اولیه برای تولید کمپوست را دارند. علاوه بر مواد تجزیه‌پذیر، مواد غیر قابل‌تجزیه مانند فلزات، پلاستیک و منسوجات وجود دارند که باید قبلاً جداسازی شوند. میکروارگانیسم‌های شرکت‌کننده در فرآیند تولید کمپوست، باکتری‌ها، قارچ‌ها و اکتینو مایست ها هستند(۳). در ابتدای فرآیند تولید کمپوست، مواد ساده‌تر تجزیه و مورد مصرف میکروارگانیسم‌ها قرار می‌گیرند و در طی این فرآیند وجود اکسیژن الزامی است (۳). جریان هوا در داخل توده زباله را می‌توان به‌صورت مکانیکی و اجباری برقرار کرد. معمولاً ۶ برابر مقدار هوای موردنیاز برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها، هوا برای تبخیر آب موجود در توده نیاز است(۴). متغیرهای مهم و تأثیرگذاری مانند دما، رطوبت، pH، نسبت کربن به نیتروژن، اندازه ذرات و اکسیژن وجود دارند که کنترل آن‌ها در طی انجام فرآیند به بهبود کیفیت محصول و کاهش زمان انجام فرآیند کمک می‌کند(۵). در بسیاری از کشورهای پیشرفته درزمینه تولید کمپوست مانند امریکا و ژاپن، تلاش می‌شود تا متغیرهای مهم و تأثیرگذار در حالت بهینه قرار بگیرند و به‌منظور کنترل بیش‌تر در محیط بسته فرآیند را انجام می‌دهند. در جدول (۱) محدوده بهینه تغییرات این متغیرها که در منابع مرجع بیان‌شده است، آورده شده است(۳):

جدول۱- محدوده بهینه تغییرات متغیرهای مهم در تولید کمپوست(۳)

Table 1.The optimum range of important variables in the production of compost (3)

متغیر	کمپوست سازی فعال[1]	فرآوری[2]	نگهداری
غلظت اکسیژن	۱۳ تا ۱۸ درصد	۱۳ تا ۱۸ درصد	۱۳ تا ۱۸ درصد
اندازه ذرات	۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر	۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر	۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر
نسبت کربن به نیتروژن	۲۵-۳۰	۱۸-۲۳	۱۵-۲۰
رطوبت	۵۵-۶۵ درصد	۴۵-۵۵ درصد	۴۰-۴۵ درصد
دما	۵۵-۶۵ درجه سانتی‌گراد	کم‌تر از ۵۰ درجه سانتی‌گراد	دمای محیط
pH	۶/۵ تا ۸	۶/۵ تا ۸	۶/۵ تا ۸

۱.در این مرحله از فرآیند تولید کمپوست، مواد آسان تجزیه شونده با سرعت زیاد تجزیه می‌شوند.

۲. در این مرحله از فرآیند تولید کمپوست، مواد با ساختار پیچیده‌تر تجزیه و تثبیت می‌شوند.

از جمله مشکلات پیش روی فرآیند تولید کمپوست در استان مازندران، رطوبت بالای هوا و باران‌های زیاد است. شهرستان آمل در مرکز استان مازندران واقع‌شده است و طبق آخرین آمار سال ۱۳۸۵ سازمان آمار، ۳۴۳۸۵۸ نفر جمعیت دارد(۶)و دارای آب‌وهوای معتدل خزری است. میزان زباله جمع‌آوری‌شده در روز در شهرستان آمل در حدود ۲۵۰ تن می‌باشد که تقریباً ۸۰ درصد این زباله‌های جمع‌آوری‌شده، مواد فسادپذیر هستند (۷). در بررسی‌هایی که دانش‌کده محیط‌زیست دانش‌گاه تهران در

سال‌های ۱۳۷۳ و ۱۳۸۱ بر روی زباله‌های استان مازندران انجام داد، مشخص گردید که مواد فسادپذیر حجم زیادی از زباله را شامل می‌شوند. نتایج آن‌ها نشان داد، زباله مازندران شرایط مناسبی را برای استفاده درروش زباله‌سوزی ندارد و از ارزش حرارتی پایینی برخورداراست(۸). بنابراین با توجه به موارد ذکرشده در بالا و نیز کشاورزی بودن استان مازندران، تولید کمپوست برای از بین بردن زباله‌های شهری این استان امری ضروری و توجیه‌پذیر می‌باشد.

امروزه در جهان، بیش‌تر فعالیت‌های تحقیقاتی در این زمینه، به‌منظور افزایش کیفیت محصول و کاهش زمان انجام فرایند صورت می‌گیرد که از آن جمله، می‌توان به تحقیقی که برای بررسی امکان تولید کمپوست باکیفیت از زباله‌های شهری و ضایعات سلولزی توسط هوبی و همکاران انجام شد اشاره کرد (۹). هم‌چنین وی و همکاران(۱۰) اثر تلقیح مجموعه‌ای از میکروارگانیسم‌ها را بر کیفیت کمپوست زباله شهری بررسی کردند و گزارش دادند که تلقیح میکروبی باعث شتاب گرفتن و کاهش زمان انجام فرآیند تولید کمپوست می‌شود. در ایران هم روح‌الله دهقانی و همکاران (۱۱) روند تغییرات پارامترهایی مانند رطوبت و میزان کربن و نیتروژن را در تولید کمپوست از زباله شهری کاشان بررسی کردند. حسینی و همکاران (۱۲) به بررسی اثر دمای محیط فرآیند بر سرعت فرآیند تولید کمپوست پرداختند و گزارش دادند که اعمال شرایط دمایی ترموفیلیک در طول فرآیند می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش زمان فرآیند داشته باشد. کومار و همکاران(۱۳)اثر نسبت‌های متفاوت C/N از ۱۳/۹ تا ۱۹/۶ را بر روی تولید کمپوست از زباله‌های غذایی و کشاورزی بررسی کردند. برای این کار از یک رآکتور استوانه دوار کوچک استفاده گردید و در این تحقیق مشخص گردید فرآیند تولید کمپوست از ضایعات غذایی در C/N ۱۹/۶ بهتر از C/N های پایین‌تر انجام می‌شود. کابزا و همکاران(۱۴) نیز با کنترل عوامل مؤثر بر فرآیند تولید کمپوست مانند C/N و رطوبت و هوادهی توانستند به سرعت بیش‌تری در تجزیه و مواد تولید کمپوست دست پیدا کنند.

در تحقیق حاضر بررسی تولید کمپوست در شهرستان آمل به‌عنوان یک مطالعه موردی بررسی می شود. با توجه به مشکلات تولید کمپوست در استان مازندران، در این تحقیق سعی شد تا با کنترل بهتر شرایط، به محصول باکیفیت در مدت‌زمانی کم‌تر در مقایسه با فرآیندهای رایج دست یافته شود. در همین راستا از محیط بسته گل‌خانه‌ای جهت کنترل بهتر شرایط محیطی و هم‌چنین دستگاه خردکن برای کاهش اندازه ذرات زباله استفاده شد که می‌تواند موجب بهبود فرآیند و همگن‌تر شدن نمونه‌ها شود. از طرفی، یک رآکتور بستر جامد نوین طراحی شد که با استفاده از آن زمان انجام فرآیند به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت.

روش بررسی

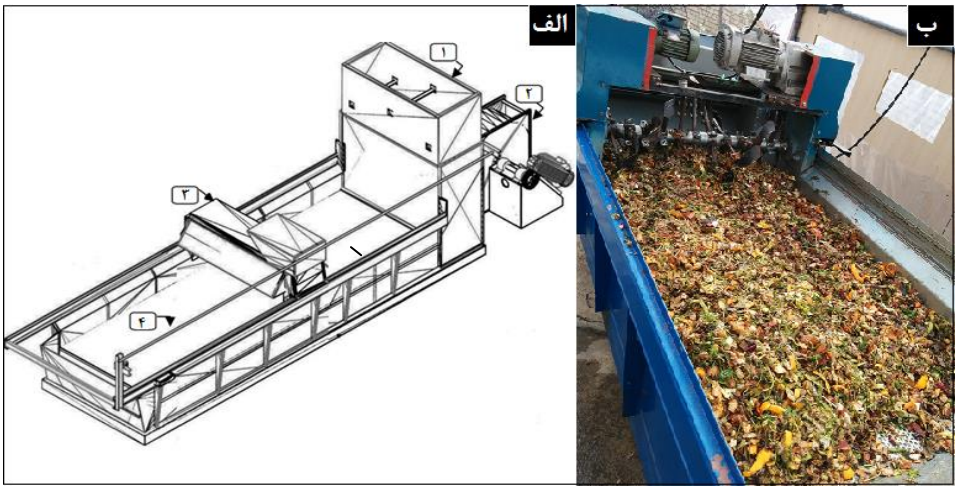
مقدار ۱۲۰ کیلوگرم زباله شهری آمل که از فلزات و پلاستیک و منسوجات عاری شده بود، از محل دپوی موقت زباله (واقع در کیلومتر ۵ جاده آمل به تهران) جداسازی و جمع‌آوری شد. هم‌چنین برای بررسی کیفیت زباله شهر آمل در چندین مرحله جداگانه تفکیک دستی زباله انجام شد و زباله‌های تفکیک‌شده به‌صورت جداگانه توزین گردید که در جدول(۲) مشخصات به‌دست‌آمده از زباله شهری آمل آورده شده است.

جدول۲- ترکیب زباله شهری آمل

Table 2. Municipal solid waste composition in amol

مواد تشکیل دهنده	فلزات	منسوجات	شیشه	لاستیک و پلاستیک	چوب و کاغذ	مواد فسادپذیر	سایر (سنگ، نخاله.....)
درصد وزنی	۲/۸	۰/۷۵	۲/۰۴	۶/۹	۳/۲	۸۳/۲	۱/۱۱

این مقدار زباله توسط دستگاه خردکن (طراحی‌شده توسط شرکت صنعتی خزر الکتریک، آمل، شهرک صنعتی بابکان) خرد شد. در طراحی جدید خردکن، فاصله بین تیغه‌های دستگاه طوری تنظیم شد تا اندازه قطعات زباله خروجی در محدوده ۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر باشد. در حین عملیات خرد کردن زباله، مقداری از رطوبت آن جداشده و وزن زباله خردشده به ۱۱۲ کیلوگرم رسید. برای انجام فرآیند تولید کمپوست، از بیورآکتور بستر جامد نوین در محیط بسته گل‌خانه‌ای استفاده شد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده‌شده است، این دستگاه شامل بستری است که مواد آلی در داخل آن ریخته می‌شود. عرض این بستر ۱ متر و طول آن ۲ /۲ متر می‌باشد. کالسکه‌ای بر روی این بستر طراحی‌شده که به‌وسیله ریلی که در دو طرف بستر قرار دارد، قادر است طول بستر را بپیماید. در زیر این کالسکه پاروهایی قرار دارد که در حین عبور از سطح بستر، عمل برگرداندن توده مواد آلی را انجام می‌دهد. کف این بستر از ورق فلزی مشبکی با سوراخ‌های ۵ میلی‌متری تشکیل‌شده است. وجود این بستر مشبک باعث می‌شود هوا به‌صورت یکنواخت به توده دمیده شود. هم‌چنین در زیر بستر محفظه‌ای مخروطی رو به پایین تعبیه‌شده و به‌وسیله آن شیرابه‌ها جمع‌آوری می‌شود. عمل هوادهی در این دستگاه توسط دمنده‌ای که در دستگاه تعبیه‌شده، انجام می‌شود. هوا از طریق ورق مشبک کف بستر به داخل توده دمیده می‌شود تا هوای موردنیاز برای انجام فرآیند بیولوژیکی هوازی و هم‌چنین متعادل‌سازی دما و کاهش رطوبت تأمین شود.



شکل(۱-الف)- تصویر شماتیک دستگاه تولید کمپوست ۱-محل ورود زباله ۲- دمنده ۳- کالسکه و پارو ۴- سطح زیرین بستر (ب)-تصویر واقعی از دستگاه بارگذاری شده با زباله

Figure 1. A- Schematic picture of Compost Producer 1. Waste inlet 2. Fan 3. Carriage 4. Bed B- Actual image of the device is loaded with waste

برای کنترل بهتر شرایط محیط انجام کار، دستگاه در داخل محیط بسته گل‌خانه‌ای قرار گرفت که رطوبت و دمای آن به‌صورت مداوم اندازه‌گیری می‌شد. تهویه‌ای هم برای کنترل هوای داخل اتاقک گل‌خانه نصب شد که رطوبت هوای داخل اتاقک به‌وسیله آن کنترل می‌شد. برای اطلاع از میزان دقیق رطوبت و دمای محیط از حس‌گرهایی با نمای‌شگر دیجیتالی (مدلTika TD-1209) استفاده شد. در حین فرآیند متغیرهای مهم و تأثیرگذار مانند دما، pH، میزان کربن، میزان نیتروژن و هم‌چنین میزان خاکستر اندازه‌گیری شد. برای انجام این نمونه‌برداری‌ها و آزمون‌های مربوطه، از روش‌های سازمان ملی استاندارد به شماره ۱۳۳۲۰ استفاده گردید(۱۵). در این روش از ۶ نقطه نمونه‌برداری گردید و بعد از مخلوط کردن کامل نمونه‌ها، مقداری از نمونه مخلوط شده برای انجام آزمون‌ها انتخاب شد. برای اندازه‌گیری رطوبت هر۴ روز یک‌بار نمونه‌گیری

انجام شد و نمونه موردنظر در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شد. سپس از کاهش وزن توده، رطوبت اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری میزان خاکستر هم از کوره الکتریکی(مدل Azarfurnace FL-1720) استفاده گردید. میزان نیتروژن کل به روش هضم در سیستم کجلدال (مدل Automatic Kjeldahl Analyzer Apparatus K1100) اندازه‌گیری شد. به‌منظور اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و pH، عصاره کمپوست صاف‌شده تهیه و اندازه‌گیری به‌وسیله pH متر و هدایت سنج (مدل AZ -86505) بر روی عصاره انجام گردید. برای اندازه‌گیری کربن از روش تخمین کربن بر اساس میزان خاکستر استفاده شد. در این روش با توجه به تحقیقات متعدد بر روی مواد آلی موجود در زباله مشخص‌شده که با تقریب بسیار خوبی می‌توان میزان کربن نمونه را ۵۵ درصد جامدات فرار در نظر گرفت. معادله (۱) و معادله (۲) برای محاسبه خاکستر و تخمین میزان کربن مورداستفاده قرار گرفتند(۱۶).

$$\%VS = 100 - \%Ash \qquad (۱)$$

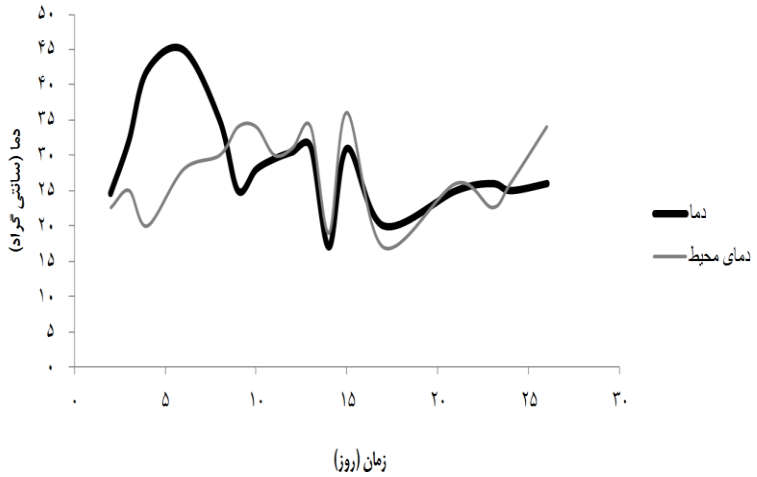
$$\%\ Carbon = \frac{(\%\ VS)}{۱/۸} \qquad (۲)$$

که در این رابطه Vs جامدات فرار و Ash خاکستر می باشد.

یافته‌ها و بحث

بررسی تغییرات دمای کمپوست در حین تولید

ابتدا تغییرات دمای توده زباله برحسب زمان اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در شکل (۲) نمایش داده‌شده است، در ۵ روز اول فرآیند روند افزایش دما وجود داشت و دمای توده به ۴۵ درجه سانتی‌گراد رسید. اما بعدازآن روند کاهش دما آغاز شد. روند کاهش دما تا روز یازدهم ادامه داشت و از آن روز به بعد دمای توده متناسب با دمای محیط تغییر کرد. در ابتدای فرآیند با توجه به فراوانی مواد قابل‌تجزیه در دسترس و سرعت زیاد فرآیند، انرژی زیادی آزاد شده که منجر به افزایش دما می‌شود. در ادامه با گذشت زمان، از میزان مواد آسان تجزیه شونده کم می‌شود و درنتیجه سرعت فرآیند کاهش‌یافته و دمای توده به‌مرور کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، بعد از روز یازدهم دمای توده با دمای محیط به تعادل می‌رسد.



شکل۲- نمودار تغییرات دمای کمپوست

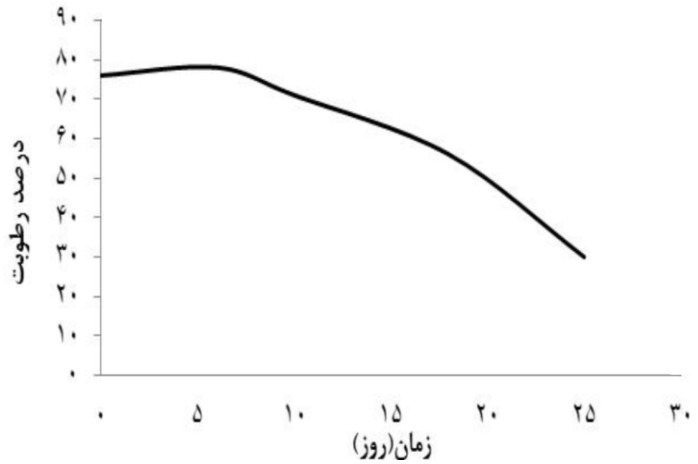
Figure 2. Temperature shift of compost

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان گفت در ابتدای فرآیند، باکتری‌ها به خاطر وجود مواد آسان تجزیه شونده فعالیت بیش‌تری دارند و می‌توانند دمای توده را به بیش از ۵۵ درجه سانتی‌گراد برسانند. اما بالاترین دمای توده در طول دوره فرآیند که ۲۵ روز به طول انجامید، ۴۵ درجه سانتی‌گراد بود. با توجه به این‌که سطح در تماس با هوا نسبت به حجم زیادتر از حد معمول بود و توده از عمق کمی برخوردار بود، انتقال حرارت از توده به محیط به سهولت انجام می‌شد و تجمع حرارتی کم‌تر رخ می‌داد که منجر به کاهش دمای بیشینه در طول فرآیند می‌شد. ازطرفی رطوبت زیاد اولیه (تقریباً ۸۰ درصد) و تبخیر

سریع آن در روزهای ابتدایی منجر به مصرف انرژی گرمایی تولیدشده، می‌شد و این خود عامل دیگری است که مانع رسیدن به دمای بیشینه مناسب می‌شود. نرسیدن به بیشینه دمای بالاتر در مطالعه کارنچاناونگ و همکاران نیز با دلایل مشابه ذکرشده است (۱۷). هم‌چنین دهقانی و همکاران در تحقیقی که بر روی تولید کمپوست از قسمت تجزیه‌پذیر زباله شهری انجام دادند، روند تغییرات دمای مشابهی را ذکر نمودند، با این تفاوت که دمای بیشینه در تحقیق آن‌ها در روز نهم رخ داد و در تحقیق حاضر در روز ششم و بعدازآن روند کاهش دما آغاز شد(۱۱).

بررسی تغییرات رطوبت کمپوست در حین تولید

روند تغییرات رطوبت توده در طول فرآیند در شکل(۳) نمایش داده‌شده است. رطوبت زباله ورودی به دستگاه در ابتدای فرآیند ۷۶ درصد وزنی بود. تبخیر رطوبت در حین انجام فرآیند باعث کاهش میزان آب توده با گذشت زمان می‌شود. هم‌چنین در حین انجام فرآیند در کنار تولید دی‌اکسید کربن در فرآیند هوازی، آب هم تولید می‌شود. در ابتدای فرآیند افزایش ناچیزی در میزان رطوبت توده مشاهده شد.به نظر می‌رسد در ابتدا به دلیل سرعت بالای فرآیند، افزایش رطوبت به دلیل تولید آب بر کاهش رطوبت به دلیل تبخیر غلبه می‌کند و به همین دلیل افزایش رطوبت به چشم می‌خورد. هم‌چنین روند کاهش رطوبت تا زیر ۳۰ درصد در مدت‌زمان ۲۵ روز ادامه پیدا کرد. نتایج مشابه نتایج به‌دست‌آمده در مطالعه کومار و همکاران بر روی تولید کمپوست از ضایعات سبز و زباله‌های غذایی ذکرشده است(۱۸).



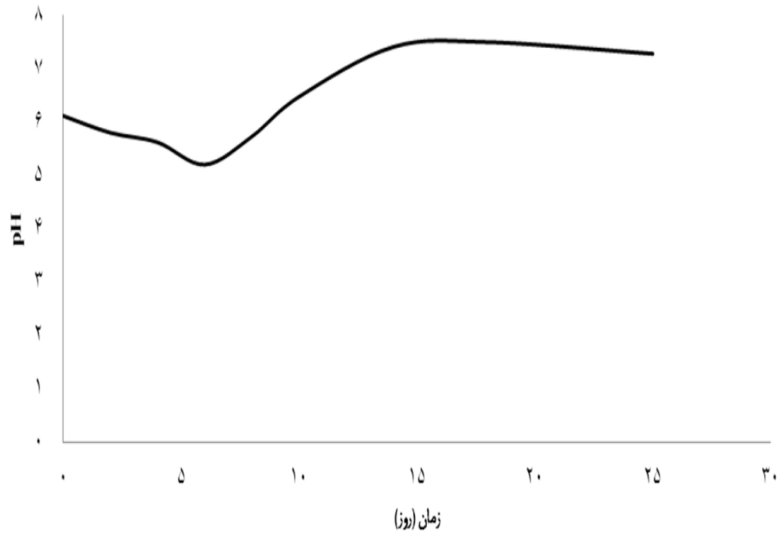
شکل۳- نمودار تغییرات رطوبت

Figure 3. Changes of moisture content

بررسی تغییرات pH کمپوست در حین تولید

میزان pH هم ازجمله متغیرهای مهمی است که در طول فرآیند در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری pH برحسب زمان در شکل (۴) نشان داده‌شده است. در ابتدای فرآیند میزان pH، در محدوده اسیدی قرار داشت و در چند روز اول مقداری کاهش داشت که این نشانه حضور و فعالیت باکتری‌های اسیدساز در ابتدای فرآیند است. نتایج این قسمت نیز با سایر تحقیقات سازگاری دارد(۲).

بعدازآن تغییرات pH سیر صعودی یافت و تا محدوده pH نزدیک به ۷ ادامه پیدا کرد و درنهایت در روز هفدهم تثبیت شد. کاهش ابتدایی pH در تحقیق بنجوان و همکاران که در مورد تولید کمپوست از زباله شهری مطالعه کردند، هم دیده‌شده است. از روز پانزدهم در این تحقیق میزان pH ثابت شد که زمان تثبیت pH در تحقیق حاضر نیز تقریباً از روز پانزدهم بوده است(۱۹).



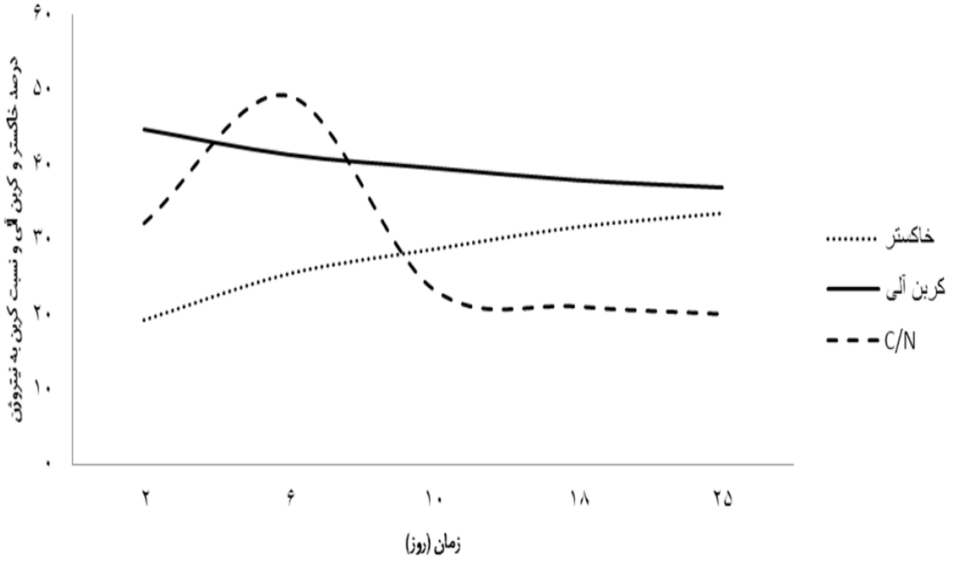
شکل ۴- تغییرات pH کمپوست نسبت به زمان

Figure 4. Compost pH changes over time

بررسی تغییرات کربن، خاکستر، نیتروژن کل و نسبت کربن به نیتروژن کمپوست در حین تولید

روند تغییرات کربن و نیتروژن به‌صورت نسبت کربن به نیتروژن در شکل (۵) نمایش داده‌شده است. هم‌چنین در این شکل تغییرات کربن و میزان خاکستر نیز نشان داده‌شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با گذشت زمان میزان کربن آلی کاهش می‌یابد که به دلیل فعل‌و انفعالات بیولوژیکی رخ می‌دهد. متناسب با این کاهش کربن، درصد خاکستر هم افزایش می‌یابد.



شکل ۵- نمودار تغییرات خاکستر، کربن و C/N

Figure 5. Changes of ash, carbon and C / N

همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده‌شده است، درصد نیتروژن کل (نسبت وزنی نیتروژن به وزن خشک نمونه) در ابتدای تولید کمپوست کاهش می‌یابد که این کاهش در زمان رشد زیاد میکروارگانیسم‌ها رخ می‌دهد که نشان‌گر خروج نیتروژن به شکل آمونیاک در ابتدای فرآیند است. با گذشت زمان و تثبیت جمعیت زنده میکروبی، خروج نیتروژن در قالب آمونیاک کم‌تر

خواهد بود و افزایش کمی در درصد نیتروژن کل برحسب وزن خشک توده رخ می‌دهد. یکی از پارامترهای مهم و مؤثر در بلوغ و کیفیت کمپوست، میزان نسبت کربن به نیتروژن است که معمولاً در حین فرآیند کاهش می‌یابد. در این تحقیق C/N زباله اولیه ۳۲/۳۳ بوده است که بعد از مدت ۲۵ روز با کاهش ۳۸/۷ درصدی به ۱۹/۸۹ رسید. آواستهی و همکاران که بررسی اثر تلقیح قارچی بر فرآیند تولید کمپوست از زباله شهری را انجام دادند گزارش کردند که در مدت ۳۵ روز C/N برای فرآیند بدون تلقیح ۲۴/۲۶ و برای فرآیند با تلقیح ۵۲/۷۷ درصد بوده است(۲۰). از طرفی، در تحقیقی که دهقانی و همکاران در مورد تولید کمپوست از زباله شهری کاشان انجام دادند و از روش تولید کمپوست غیر رآکتوری استفاده نمودند، مشخص گردید در مدت‌زمان ۲۸ روز ۳۴/۲۷ درصد کاهش در میزان کربن به نیتروژن رخداده است(۱۱). فورتی در مطالعه‌ای که بر روی بلوغ کمپوست تولیدی از زباله شهری یکی از شهرهای شمالی کشور تونس انجام داد، بیان کرد که با استفاده از روش ویندرو در مدت ۱۲۰ روز C/N زباله شهری خالص از ۳۲ به ۱۴٫۶ درصد رسید که ۵۴٫۳۷ درصد کاهش داشته است(۲۱).

به‌منظور بررسی بیش‌تر، در جدول (۳) خلاصه‌ای از مقایسه ویژگی‌های کمپوست تولیدشده در این تحقیق با کمپوست استاندارد نشان داده‌شده است. با توجه به نتایج این مقایسه مشخص شد، در بسیاری از متغیرهای مهم و تأثیرگذار، کمپوست حاصل را می‌توان در زمره کمپوست درجه ۱ قرارداد. برای به دست آوردن شاخص جوانه‌زنی کمپوست از روش سازمان ملی استاندارد ایران و از بذر تره تیزک استفاده شد که نتیجه آن نشان‌دهنده کیفیت بالای کمپوست ازنظر شاخص جوانه‌زنی می‌باشد (جدول۳). با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از کمپوست حاصل از این تحقیق با استانداردهای ملی ایران، مشخص شد کمپوست به‌دست‌آمده از شرایط مطلوب و مناسبی برای استفاده به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک کشاورزی برخوردار می‌باشد. هم‌چنین زمان تولید کمپوست حاصل از این پروژه با فرآیندهای موجود در ایران مقایسه شد و نتایج نشان داد کمپوست حاصل از این تحقیق در زمان کم‌تری تولید می‌شود. به‌طور مثال می‌توان به واحد تولید کمپوست در مشهد اشاره کرد که در مدت‌زمان تقریبی ۸۰ روز، فرآیند تکمیل می‌شود(۲۲)، درحالی‌که در روش ارایه شده در تحقیق، این فرآیند در ۲۵ روز انجام می گیرد.

جدول ۳- مقایسه کمپوست حاصل با کمپوست استاندارد

Table 3. Comparison of compost and standard

نوع ویژگی	کمپوست درجه ۱ (استاندارد)	کمپوست درجه ۲ (استاندارد)	کمپوست زباله شهری آمل حاصل از این تحقیق	کیفیت کمپوست
مواد آلی(وزن خشک)	کمینه ۳۵ درصد	کمینه ۲۵ درصد	۳۶/۵۳درصد	درجه ۱
کربن آلی (وزن خشک)	کمینه ۲۵ درصد	کمینه ۱۵ درصد	۳۶/۹درصد	درجه ۱
میزان ازت کل	۱-۱/۶۶ درصد	۱-۱/۵ درصد	۱/۸۴ درصد	اختلاف کمی با میزان مطلوب دارد
نسبت کربن به نیتروژن	۱۵-۲۰	۱۰-۱۵	۱۹/۸۹	درجه ۱
هدایت الکتریکی	بیشینه ۸ dS/m[۱]	بیشینه ۱۴ dS/m	۷/۷ dS/m	درجه ۱
pH	۶-۸	۶-۸	۷/۲۹	درجه ۱
رطوبت	بیشینه ۱۵ درصد	بیشینه ۳۵ درصد	۳۰ درصد	درجه ۲
میزان خاکستر	بیشینه ۵۰ درصد	بیشینه ۵۰ درصد	۴۷/۳۳ درصد	درجه ۱
شاخص جوانه‌زنی	کمینه ۷۰	کمینه ۷۰	۱۳۴/۵	درجه ۱

۱. دسی زیمنس بر متر، واحد هدایت الکتریکی است.

نتیجه‌گیری

برخلاف تمام واحدهای تولید کمپوست در ایران، برای تولید کمپوست از زباله شهری در این تحقیق، از محیط کاملاً بسته استفاده شد. به نظر می‌رسد استفاده از محیط گل‌خانه‌ای بسته منجر به کنترل دقیق‌تر شرایط محیط اطراف می‌شود. کنترل دقیق رطوبت محیط و نیز تأمین دمای بالاتر از محیط آزاد به دلیل گل‌خانه‌ای بودن از مزایای این روش است. هم‌چنین برای رسیدن به‌اندازه ذرات مناسب از دستگاه خردکن استفاده شد که باعث بهبود شرایط فرآیند و یکنواخت‌تر شدن توده می‌شود. از طرفی، استفاده از بیورآکتور بستر جامد طراحی‌شده که قابلیت کنترل دقیق میزان هوادهی یکنواخت و هم زدن توده در آن وجود دارد، در کاهش زمان تولید کمپوست اثر قابل‌توجهی نشان داد. درنتیجه‌ی این نوآوری‌ها، در مدت‌زمان کم‌تری نسبت به روش‌های مرسوم، کمپوست تولید شد. با توجه به کشاورزی بودن منطقه آمل و نیاز به کود کشاورزی در سطح وسیع و قابلیت این سیستم برای استفاده در ابعاد بزرگ، می‌توان از روش تولید کمپوست ارایه‌شده در این تحقیق برای حل مشکلات زیست‌محیطی زباله شهری استفاده نمود.

Reference

1. Razikordmahalleh, L.,2014.Production of compost with useful microorganisms from sugar cane Bagasse enriched with rock Phosphate, Urea and Sulphur, Journal of Environmental Research and Management, Vol.7, pp.119-124
2. Institute of Standards and Industrial Research of Iran, ISIRI 10716, Compost-Physical and chemical specification, 1st Edition.
3. Gamble S.,2013.Technical Document on Municipal Solid Waste Organics Processing, Environment Canada publication
4. Kulikowska D., Gusiatin Z., 2015. Sewage sludge composting in a two-stage system: Carbon and nitrogen transformations and potential ecological risk assessment, Waste Management,Vol 38 ,pp. 312-320
5. Cabeza I., López R., Ruiz M., Montoya M., Díaz G., 2013.optimization, Journal of Environmental Management,Vol.128 , pp. 266-273
6. Statistical Centre of Iran, 2006
7. Amol Waste Management Organization, Amol waste management master plan, 2007
8. Karbasi A., Baghvand A., 2007. Us of biogas energy from urban waste as alternative fuel, 3 rd National Conference on Waste Management, Tehran.(In Persian)
9. Hubbe M., Nazhad M., Sanchez C.,2013.Composting as a way to convert Cellulosic biomass and organic waste into high-value soil amendments, Bioresource,Vol 5 ,pp. 2080-2854.
10. Wei Z., Xi B., Zhao Y.,Wang S., Liu H., Jiang Y., 2007.Effect of inoculating microbes in municipal solid waste composting on characteristics of humic acid,Chemosphere,Vol.68 ,pp.368–374
11. Dehghani R., Charkhloo E., Mostafaii GH., Asadi M., Mousavi G., Saffari, M.,2012.A study on the variations of temperature, moisture, pH and carbon to nitrogen ratio in producing compost by stack method, Feyz, Vol.15 ,pp. 359-65.
12. Hosseini, S.M. and Aziz, H.A., 2013. Evaluation of thermochemical pretreatment and continuous thermophilic condition in rice straw composting process enhancement.

Bioresource technology, 133, pp.240-247.
13. Kumar, M., Ou, Y.L. and Lin, J.G., 2010. Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. Waste Management, 30(4), pp.602-609.
14. Cabeza, I.O., López, R., Ruiz-Montoya, M. and Díaz, M.J., 2013. Maximising municipal solid waste–Legume trimming residue mixture degradation in composting by control parameters optimization. Journal of environmental management, 128, pp.266-273.
15. Institute of Standards and Industrial Research of Iran, ISIRI 13320, Compost-Sampling and Physycal and chemical Test Methods, 1st Edition .
16. Adam R., MacLean F., Dixon J., Bennett F., Martin G., Lough R.,1951.The utilization of organic wastes in N.Z.: Second interim report of the inter-departmental committee. New Zealand Engineering,pp. 396-424
17. Karnchanawong, S. and Nissaikla, S., 2014. Effects of microbial inoculation on composting of household organic waste using passive aeration bin. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 3(4), pp.113-119.
18. Kumar, M., Ou, Y.L. and Lin, J.G., 2010. Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. Waste Management, 30(4), pp.602-609.
19. Benjawan, L., Sihawong, S., Chayaprasert, W. and Liamlaem, W., 2015. Composting of biodegradable organic waste from Thai household in a semi-continuous composter. Compost Science & Utilization, 23(1), pp.11-17.
20. Awasthi, M.K., Pandey, A.K., Khan, J., Bundela, P.S., Wong, J.W. and Selvam, A., 2014. Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting. Bioresource technology, 168, pp.214-221.
21. Fourti, O., 2013. The maturity tests during the composting of municipal solid wastes. Resources, Conservation & Recycling, 72, pp.43-49.
22. Abedini T., Najafi J., Adenenia A., Javid N.,2009. Investigation of the process of compost production at the Mashhad Composting Plant, the first congress of fertilizer challenges in Iran, Tehran.(In Persian)