

## ساخت و ارزیابی دستگاه خانگی تولید کمپوست از ضایعات گیاهی

روزبه عبدی<sup>۱</sup>، سیدجعفر هاشمی<sup>۲\*</sup> و سیدرضا طباطبایی کلور<sup>۳</sup>

۱ و ۲ - به ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد؛ و دانشیاران گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۵/۶/۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۹

### چکیده

به منظور تبدیل پسماند مواد غذایی به کمپوست، دستگاه جدیدی برای تولید کمپوست مجهز به سامانه‌های هوادهی تحت فشار، حرارت‌دهی و همزنی به منظور تسریع در فرآیند تجزیه میکروارگانیسم‌ها ساخته شد. آزمایش‌ها در سه سطح هوادهی (۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ لیتر در دقیقه کیلوگرم - ماده خشک) در نسبت C/N برابر ۲۸، در دور ثابت همزن (یک دور در دقیقه) و ۶ سطح زمانی (۰، ۱۹، ۳۸، ۵۷، ۷۶ و ۹۶ ساعت)، در دمای ۵۵ درجه سلسیوس و رطوبت اولیه ۶۰ تا ۶۵ درصد روی پسماند مواد غذایی با افزودن ماده معدنی زئولیت و سبوس دو کوب برنج اجراء شد. به منظور ارزیابی عملکرد سامانه تولید کمپوست، آزمایش‌های اندازه‌گیری نسبت C/N، هدایت الکتریکی، pH و شاخص جوانه‌زنی، برای تعیین کیفیت و بلوغ کمپوست حاصل انجام گردید. با توجه به نتایج و بر اساس تحلیل آماری، تغییرات هدایت الکتریکی، شاخص جوانه‌زنی و نسبت کربن به نیتروژن معنی‌دار بوده است. مقدار هدایت الکتریکی طی فرآیند در محیط راکتور و خارج آن از ۲/۰۳ به ترتیب به ۱/۵۶ و ۱/۶۸ میلی‌زیمنس در سانتی‌متر رسید. میانگین نسبت C/N از ۲۸ به ۲۰/۹ و در شرایط خارج از محیط راکتور (نمونه شاهد) از ۲۸ به ۱۹/۸ رسید. بیشترین مقدار درصد شاخص جوانه‌زنی در محیط راکتور در سرعت هوادهی ۰/۴ لیتر در دقیقه کیلوگرم - ماده خشک، برابر ۸۵ درصد به دست آمد. ظرفیت کاری دستگاه ۳۵ کیلوگرم پسماند در هر چهار روز و بازده کمپوست تولیدی توسط دستگاه حدود ۳۴ درصد است.

### واژه‌های کلیدی

پسماند غذایی، تجزیه سریع، دستگاه تولید کمپوست، کود آلی

### مقدمه

و زیرزمینی و انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند متان (عامل اصلی گرم شدن) و ... (Palmiotto *et al.*, 2014). یکی از روش‌های صحیح مدیریت پسماند غذایی بازیافت و تبدیل آن به کمپوست است که به علت بالا بودن نسبت مواد آلی در محصولات کشاورزی و پسماند غذایی، برای تولید کمپوست مناسب است (Chang & Hsu, 2008). مواد قابل کمپوست شدن به طور عادی حاوی انواع مختلف باکتری‌ها، قارچ‌ها و سایر میکروارگانیسم‌های زنده هستند. معمولاً با مساعد بودن شرایط محیطی، میکروارگانیسم‌ها به خوبی رشد می‌کنند و با این عمل

با افزایش سرعت رشد شهرنشینی در ایران، میزان تولید پسماند مواد غذایی نیز رو به افزایش است. پسماند مواد غذایی سوزانده یا در محل دفن زباله، همراه با پسماندهای دیگر شهری، دفن می‌شود. سوزاندن، حجم پسماندها را بسیار پایین می‌آورد، اما به دلیل تولید گازهای سمی مانند دی‌اکسیدین‌ها، تهدیدی برای محیط زیست محسوب می‌شود (Kim & Kim, 2010). دفن زباله‌ها دارای معایبی است از جمله نیاز به وسعت بالایی از زمین، تولید شیرابه و نفوذ آن به آب‌های سطحی

ژئولیت آزاد می‌شوند و گیاه از آنها استفاده می‌برد (Stylianou *et al.*, 2004).

بررسی‌ها در کارخانه‌های تولید کمپوست ایران نشان می‌دهد که درصد بالایی از مواد قابل بازیافت در فرآیند سرند و جداسازی هدر می‌رود ضمن اینکه جداسازی مواد قابل بازیافت از درون پسماند مخلوط با توجه به متکی بودن به نیروی انسانی بازدهی کاملی ندارد. استفاده از خردکن موجب تسریع در فرآیند تولید کمپوست می‌شود اما وجود پسماند مخلوط (کاغذ، پلاستیک، شیشه و ...) و ورود این مواد به درون خردکن موجب می‌شود تا این مواد خرد و وارد خط تولید کمپوست شوند؛ نتیجه این کار کاهش کیفیت کمپوست تولیدی است (Tchobonoglous & Kreith, 2002). علاوه بر مسائلی از قبیل بالا بودن درصد مواد متفرقه، تهیه کمپوست از پسماندهای مخلوط شهری، به سبب داشتن فلزات سنگین و تولید بوهای نامطلوب، رونق چندانی ندارد و کارخانه‌های فعال در زمینه تولید کمپوست به دنبال راهکارهایی برای بازیافت پسماندهای غذایی در مبدا هستند (Salehi *et al.*, 2008). بازیافت پسماندهای غذایی در مبدا، علاوه بر آثار بلندمدت بر محیط زیست منجر به کاهش هزینه‌های حمل و نقل زباله، کاهش تعداد کارکنان خدمات شهری، کاهش ماشین‌آلات مورد نیاز جهت دفن زباله و... می‌شود. در تحقیقی، یک رآکتور در مقیاس آزمایشی از نوع خودگرم‌کنی، به منظور شبیه‌سازی و مطالعه سیستماتیک فرآیند تولید کمپوست، شامل سه مخزن استوانه‌ای (مخازن داخلی، خارجی و پایه) طراحی و ساخته شد (Dadashi *et al.*, 2012).

در این پژوهش سعی شد تا با ساخت و ارزیابی عملکرد دستگاهی جدید برای تجزیه سریع پسماندهای غذایی در مبدا، بتوان علاوه بر تولید کود آلی با کیفیت، از آلودگی محیط زیست نیز جلوگیری کرد.

تولید کمپوست سریع و دوره آن کوتاه می‌شود. میکروارگانیسم‌ها در توسعه فرآیند تولید کمپوست مطابق با دمای مواد در مراحل مختلف فرآیند درگیر می‌شوند (Keener *et al.*, 2000). باکتری‌ها به آسانی در طول فرآیند تولید کمپوست نفوذ دارند، قارچ‌ها در سراسر فرآیندها حاضر هستند اما در رطوبت کمتر از ۳۵ درصد و در دمای بالای ۶۰ درجه سلسیوس فعالیت ندارند. اکتینومیست‌ها در زمان پایداری و رسیدگی<sup>۱</sup> نفوذ داشته و به همراه قارچ‌ها می‌توانند پلیمرهای مقاوم را تجزیه کنند (Bernal *et al.*, 2009).

به منظور توازن سطح برای رشد میکروارگانیسم‌ها و نگهداری تخلخل مناسب برای هوادهی، توزیع و اندازه ذرات مهم است. ذرات بزرگتر، نسبت به جرم، سطح کمتری دارند. بنابراین، کمپوست با ذرات بزرگتر به طور مناسب تجزیه نمی‌شوند، زیرا دسترسی به داخل ذرات برای میکروارگانیسم‌ها به این دلیل مشکل است که در حین تجزیه ذرات ممکن است سطح مواد با لایه‌ای نمدار شده غیر قابل نفوذ باشد (Bernal *et al.*, 2009). ذراتی که خیلی کوچک هستند، ممکن است توده مواد را متراکم کنند و تخلخل را کاهش دهند. از این رو این فاکتورها به خصوص توزیع و اندازه ذرات، شکل، فشردگی، میزان رطوبت و تخلخل آهنگ تجزیه مواد کمپوست‌شونده را کنترل می‌کنند.

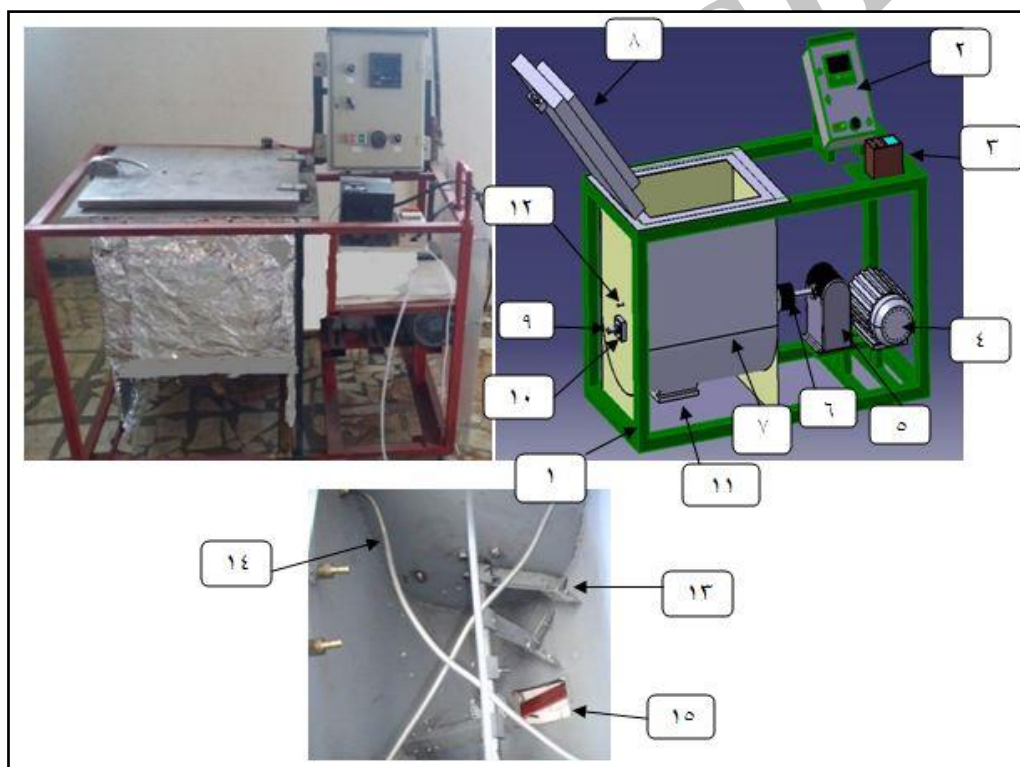
میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده نیز مانند همه گیاهان و جانوران، نیازمند مواد غذایی متعادل هستند تا دوباره رشد کنند. میکروارگانیسم‌ها به نیتروژن و اکسیژن نیاز دارند تا کربن را تجزیه کنند و آن را به دی‌اکسید کربن تبدیل کنند. افزودن موادی مانند ژئولیت<sup>۱</sup> به کمپوست تولیدی می‌تواند در نگهداری طولانی مدت نیتروژن، پتاسیم، کلسیم و عناصر ریزمغذی مؤثر باشد. ژئولیت‌ها این عناصر را در محیط ریشه نگه می‌دارند و هنگامی که گیاه به این عناصر احتیاج دارد، عناصر از

## مواد و روش‌ها

### الف) طراحی و ساخت دستگاه

سرعت دورانی محور شفت رآکتور نیز با یک تاکومتر نوری (Lutron, DT-2230, Taiwan) اندازه‌گیری شد. برای خروج شیرابه، کف رآکتور صفحه‌ای است مشبک با سوراخ‌هایی به قطر یک میلی‌متر که از خروج مواد نیز جلوگیری می‌کند. به‌منظور تأمین حرارت مورد نیاز و در نتیجه تسریع در رشد و فعالیت میکروارگانیسم‌ها، از المنت‌های حرارتی، استفاده گردید و دمای محفظه نیز با ترموستات دیجیتالی و پروب متصل به آن، که در تماس با مواد قرار دارد، قابل کنترل است.

مشخصات دستگاه: طول، عرض و ارتفاع دستگاه تولید کمپوست به ترتیب ۱۱۰، ۶۶، و ۷۰ سانتی‌متر (متناسب با حجم رآکتور و ملزومات) است (شکل ۱). در داخل محفظه (رآکتور) دستگاه، شفت فولادی به قطر ۲۰ میلی‌متر با پنج تیغه V شکل قرار دارد که حرکت خود را از گیربکس متصل به الکتروموتور می‌گیرد؛ سرعت دورانی آن با استفاده از یک مبدل فرکانسی قابل تنظیم است.



شکل ۱- دستگاه تولید کمپوست خانگی و قسمت‌های مختلف آن

(۱) شاسی، (۲) تابلو برق، (۳) اینورتر، (۴) الکتروموتور، (۵) گیربکس، (۶) کوپلینگ گیربکس و شفت همزن، (۷) محفظه رآکتور، (۸) درپوش رآکتور، (۹) شفت همزن، (۱۰) بلبرینگ، (۱۱) کمپرسور هوا، (۱۲) سنسور دما، (۱۳) تیغه V شکل همزن، (۱۴) المنت‌های حرارتی و (۱۵) درپوش تخلیه مواد رآکتور

محفظه کمپوست‌سازی (رآکتور): رآکتور قسمت اصلی دستگاه است، محفظه‌ای U شکل که ضایعات مواد غذایی در آن قرار می‌گیرد. طول و عرض محفظه به ترتیب ۵۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر و ارتفاع آن از پایین‌ترین قسمت دایره‌ای محفظه تا انتهای آن ۶۰۰ میلی‌متر است. تمامی

همچنین به‌منظور هوادهی مناسب و بهتر در تمامی عمق مواد موجود در رآکتور، از کمپرسور هوا استفاده گردید. هوا از طریق لوله مسی سوراخ‌کاری شده، پیوسته از کف مخزن به درون مواد موجود دمیده می‌شود (شکل ۱).

گردد. لذا با توجه به استفاده از گیربکس با نسبت تغییر دور ۱:۱۰۰ به دلیل نیازمندی به دور پایین، گشتاور ورودی گیربکس ( $T_{in}$ ) طبق رابطه (۲)، ۶/۳۵ نیوتن. متر محاسبه شد (Shadravan, 2006).

$$\frac{T_{in}}{T_{out}} = \frac{n_{out}}{n_{in}} \quad (2)$$

که در آن،  $n_{in}$  و  $n_{out}$  = به ترتیب دور ورودی و خروجی گیربکس؛ و  $T_{in}$  و  $T_{out}$  = به ترتیب گشتاور ورودی و خروجی گیربکس. با در نظر گرفتن حداکثر دور مورد نیاز موتور ( $N$ ) که ۱۵۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شد و با استفاده از رابطه ۳، توان مورد نیاز موتور ۰/۹۹ کیلووات محاسبه گردید.

$$P = \frac{2\pi NT}{60} \quad (3)$$

با توجه به افت توان حاصل از تسمه، پولی‌ها، گیربکس و کوپلینگ، مقدار توان موتور با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۱/۵ طبق رابطه ۴، ۱/۴۸ کیلووات محاسبه شد.

$$P' = P \times 1.5 \quad (4)$$

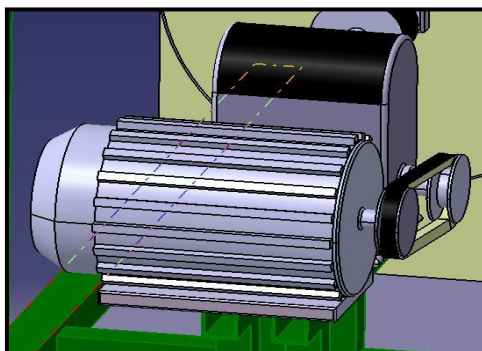
انتخاب تسمه و پولی در سامانه انتقال قدرت: برای انتقال قدرت از الکترو موتور به همزن از دو سیستم انتقال قدرت تسمه - پولی و گیربکس (شکل ۲) استفاده گردید.

قسمت‌های رآکتور از ورق گالوانیزه است؛ ضخامت ورق  $U$  شکل و صفحات کناری به ترتیب ۲ و ۴ میلی‌متر است (شکل ۱). حجم رآکتور با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$V = \frac{\pi \times r^2}{2} l + abl \quad (1)$$

که در آن،  $d$ ،  $a$  و  $b$  به ترتیب طول، عرض و ارتفاع محفظه است. حجم داخلی طبق رابطه ۱، ۰/۱۱ متر مکعب محاسبه گردید. ظرفیت دستگاه نیز با محاسبه طول تیغه و نیز با پر و خالی کردن از پسماندهای از قبل خرد شده و وزن کردن آنها تعیین گردید که ۳۵ کیلوگرم شد.

**منبع توان دستگاه:** توان مورد نیاز در این سامانه باید به اندازه‌ای باشد که بتواند گشتاور لازم را برای به حرکت درآوردن قسمت‌های مختلف دستگاه شامل همزن، شفت انتقال قدرت، گیربکس و پولی‌ها تأمین کند. برای محاسبه توان موتور ابتدا گشتاور راه‌اندازی اجزای موجود، به صورت تجربی محاسبه شد. بدین معنا که رآکتور دستگاه تا ۳۰ کیلوگرم، متناسب با حجم رآکتور، از پسماندهای غذایی پر شد. برای اندازه‌گیری گشتاور، از گشتاورسنج (مدل AQL-N6980، ساخت شرکت LICOTA با محدوده اندازه‌گیری ۱۴۰ تا ۹۸۰ نیوتن.متر) استفاده شد. پس از قرارگیری گشتاورسنج در وضعیت مناسب، گشتاور مورد نیاز برای گردش همزن ۶۳۵ نیوتن.متر اندازه‌گیری گردید. با توجه به استفاده از گیربکس در انتقال قدرت به شفت همزن، باید گشتاور ورودی گیربکس (نسبت دور ۱:۱۰۰) که با تسمه و پولی به پولی منبع توان متصل می‌شود، محاسبه



شکل ۲- سیستم انتقال قدرت

از رابطه ۵ طول تسمه برابر ۶۵۵/۵ میلی متر به دست آمد و با توجه به شرایط بازار تسمه ۷ شکل نوع B، با طول استاندارد ۲۶ اینچ معادل ۶۶۱ میلی متر انتخاب گردید.

سامانه حرارتی و توان مصرفی: برای حرارت دهی به مواد و ثابت نگه داشتن دمای محفظه داخلی رآکتور و مواد موجود در آن، از یک سامانه حرارتی شامل دو المنت حرارتی ۱۰۰۰ وات استفاده گردید. انتخاب توان هیترها بر این اساس بود که این هیترها بتوانند طی حداکثر ۱ ساعت ۳۰ کیلوگرم پسماند مواد غذایی را به دمای حداکثر ۶۵ درجه سلسیوس برسانند. دمای اولیه مواد ۲۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد. طبق رابطه ۷ میزان حرارت مورد نیاز برای انتخاب المنت های حرارتی محاسبه گردید.

$$Q = MC\Delta T \quad (7)$$

که در آن،  
 $M$  = جرم مواد داخل رآکتور که حداکثر ۳۰ کیلوگرم در نظر گرفته شد.  $C$  = ظرفیت گرمایی ویژه که برابر ظرفیت گرمایی ویژه آب ۴۲۰۰ ژول بر کیلوگرم کلون فرض گردید زیرا بیش از ۸۰ درصد وزن پسماند مواد غذایی را آب تشکیل می دهد.  $\Delta T$  = میزان تغییرات دما و از این رو میزان انرژی مورد نیاز برای رساندن مواد داخل رآکتور به دمای مورد نظر، ۵۶۷۰ کیلوژول محاسبه گردید و توان

طبق رابطه ۵ پارامترهای مهم در انتخاب تسمه و پولی برای این سیستم شامل قطر پولی ها، نوع تسمه و زاویه تماس تسمه و پولی و فاصله بین مراکز پولی هاست.

$$L = \sqrt{4C^2 - (D-d)^2} + \frac{1}{2}(D \times a_D + d \times a_d) \quad (5)$$

که در آن،  
 $L$  = طول تسمه (میلی متر)؛  $D$  = قطر پولی بزرگ (میلی متر)؛  $d$  = قطر پولی کوچک (میلی متر)؛  $C$  = فاصله بین مراکز پولی ها (میلی متر)؛  $\gamma$  = زاویه تمایل تسمه و پولی (رادیان)؛  $a_D$  = زاویه تماس تسمه و پولی در پولی متحرک (رادیان)؛  $a_d$  = زاویه تماس تسمه و پولی در پولی محرک (رادیان).

با توجه به توان مورد نیاز برای راه اندازی دستگاه، قطر پولی طبق رابطه ۶، برابر ۷۰ میلی متر به دست آمد که با توجه به پولی های استاندارد موجود در بازار، پولی با قطر ۷۵ میلی متر برای موتور و گیربکس انتخاب گردید.

$$D = \sqrt{\frac{P}{n}} \quad (6)$$

که در آن،  
 $D$  = قطر پولی (بزرگ یا کوچک) (بر حسب متر)؛  
 $n$  = سرعت دورانی پولی (بزرگ یا کوچک) (دور بر دقیقه)؛  
 $P$  = توان موتور (اسب بخار).

غذایی با مواد افزودنی زئولیت و سبوس دو کوب برنج<sup>۱</sup> بررسی شد و میزان تغییرات هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH)، شاخص جوانه‌زنی و نسبت کربن به نیتروژن (C/N) مواد کمپوست در طی فرآیند تولید کمپوست و در انتها بازدهی دستگاه مورد ارزیابی قرار گرفت. در تحلیل داده‌ها، از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار، توسط نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

**اندازه‌گیری pH و EC:** برای اندازه‌گیری pH و EC ابتدا، حجم مشخصی از کمپوست با حجم مشخصی از آب (نسبت ۱:۱۰ کمپوست به آب) مخلوط و پس از ۲۴ ساعت به مدت ۳۰ دقیقه با تکان‌دهنده، تکان داده شد. سپس pH و EC به ترتیب توسط pH متر رومیزی مدل (AZ 86552) و EC متر مدل (Milwakey, EC-6010, Romania) اندازه‌گیری گردید (Yang et al., 2015).

**اندازه‌گیری کربن آلی و نیتروژن کل مواد کمپوست:** مواد کمپوست در محیط راکتور هر ۱۹ ساعت از ۳ ناحیه مختلف و در نمونه شاهد هر دو روز نمونه‌برداری شد. بعد از خشک کردن نمونه‌ها در آون مقدار کربن آلی به روش سوزاندن در کوره الکتریکی و مقدار نیتروژن کل به روش کلدال اندازه‌گیری شد (Anon, 1998).

**شاخص جوانه‌زنی:** برای بررسی شاخص جوانه‌زنی<sup>۳</sup> (GI) کمپوست ابتدا نمونه تازه تهیه شده از کمپوست با نسبت ۱:۱۰ (یک وزن کمپوست با ده واحد حجمی آب) با آب مقطر ترکیب و بعد از ۲۴ ساعت با تکاننده، ۳۰ دقیقه تکان داده شد. پس از آن، ۱۰ میلی‌لیتر از عصاره تهیه شده در پتری دیش<sup>۳</sup>، به قطر ۱۰ سانتی‌متر ریخته و روی آن کاغذ صافی قرار داده شد که متناسب با قطر ظرف بریده شده بود. سپس، ۱۰ عدد دانه گندم روی کاغذ صافی پراکنده و در دمای ۲۰ درجه سلسیوس برای مدت ۴۸ ساعت در محیط تاریک قرار داده شدند. از آب مقطر به‌عنوان نمونه شاهد استفاده شد. درصد شاخص جوانه‌زنی

حرارتی طبق رابطه ۸ برابر ۱/۶ کیلووات محاسبه شد و با توجه به اتلاف حرارتی ناشی از هوادهی از کف مخزن و در نظر گرفتن المنت‌های موجود در بازار، از دو المنت حرارتی ۱۰۰۰ وات به‌عنوان هیتر استفاده شد. به‌منظور جلوگیری از اتلاف حرارتی، دیواره راکتور با استفاده از پشم شیشه فویل‌دار آلومینیومی عایق‌بندی شد.

$$P = \frac{Q}{t} \quad (8)$$

### ب) ارزیابی

برای ارزیابی عملکرد راکتور تولید کمپوست، آزمایش‌های تعیین نسبت کربن به نیتروژن، هدایت الکتریکی، pH و شاخص جوانه‌زنی به‌منظور تعیین کیفیت و بلوغ کمپوست حاصل اجرا شد. از پسماندهای کدو حلواپی، کدو مسمایی، سیب زمینی و کلم در ۴ تیمار (T<sub>1</sub> تا T<sub>4</sub>) استفاده شد؛ تیمارهای T<sub>1</sub> تا T<sub>3</sub> در راکتور با ماده افزودنی زئولیت و سبوس دو کوب برنج در نسبت کربن به نیتروژن ۲۸، به‌ترتیب در سرعت هوادهی ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ لیتر در دقیقه کیلوگرم- ماده خشک مورد آزمایش قرار گرفت. در تیمار T<sub>4</sub> پسماند غذایی در شرایط طبیعی (خارج از راکتور) و با ماده افزودنی زئولیت و سبوس دو کوب برنج، به‌عنوان نمونه شاهد مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه شاهد در فضای آزاد به‌صورت کپه‌ای در حال تجزیه بود و برای هوادهی توده در هر دو روز، مواد کمپوست به‌هم زده شد. در این آزمایش‌ها از زئولیت برای تنظیم درصد رطوبت و از سبوس دو کوب برنج برای تنظیم نسبت کربن به نیتروژن استفاده گردید. در این آزمون تأثیر متغیر مستقل C/N ۲۸، سه سرعت هوادهی (۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ لیتر در دقیقه کیلوگرم- ماده خشک) و ۶ سطح زمانی (۰، ۱۹، ۳۸، ۵۷، ۷۶ و ۹۶ ساعت)، در یک دور همزن (یک دور در دقیقه) در دمای ۵۵ درجه سلسیوس و رطوبت اولیه ۶۰ تا ۶۵ درصد بر پسماند

از رابطه ۹ محاسبه شود (Zucconi et al., 1981).

$$GI = \frac{S_1 \times r_1}{S_2 \times r_2} \times 100 \quad (9)$$

که در آن،

$S_1$  = تعداد دانه جوانه زده تیمار؛  $S_2$  = تعداد دانه جوانه زده کنترل؛  $r_1$  = طول ریشه تیمار؛ و  $r_2$  = طول ریشه کنترل.

### نتایج و بحث

جدول شماره ۱ نتایج تجزیه واریانس شاخص‌های

ارزیابی مواد کمپوست را در شرایط مختلف به‌وسیله راکتور تولید کمپوست نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده آن است که اثر فاکتور زمان بر نیتروژن کل، کربن آلی، نسبت کربن به نیتروژن، هدایت الکتریکی و شاخص جوانه‌زنی تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد دارد. اثر سرعت هوادهی بر تغییرات کربن آلی مواد کمپوست تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد دارد. مطابق جدول، اثر متقابل زمان و سرعت هوادهی بر تغییرات نیتروژن کل، pH و درصد شاخص جوانه‌زنی مواد کمپوست معنی‌دار نیست.

جدول ۱- تجزیه واریانس مربوط به عوامل اصلی و اثر متقابل آنها بر شاخص‌های ارزیابی مواد کمپوست

منابع تغییر	درجه آزادی	نیتروژن کل	کربن آلی	نسبت کربن به نیتروژن	هدایت الکتریکی	pH	شاخص جوانه‌زنی
زمان فرآیند	۵	۶/۵۷**	۲۸/۶۹**	۱۲۶/۵۵**	۲۷۴/۰۴**	۲۰۲/۷۵*	۳۲۹/۲۳**
سرعت هوادهی	۲	۴۸/۵*	۱۲/۶۷**	۱۴۰/۴*	۴۰۶/۰۲**	۰/۱۲۲ n.s	۱۶/۷۹*
زمان × سرعت هوادهی	۱۰	۰/۱۷۶ n.s	۴۶/۷۳*	۱۴/۰۴*	۴۵/۸۹*	۰/۳۷۵ n.s	۰/۶۵۱ n.s
خطای آزمایش (درصد)	۵۴	۰/۰۴۹	۱/۸۱	۰/۰۹۳	۰/۰۵۳	۰/۰۱۶	۱۵/۶۵

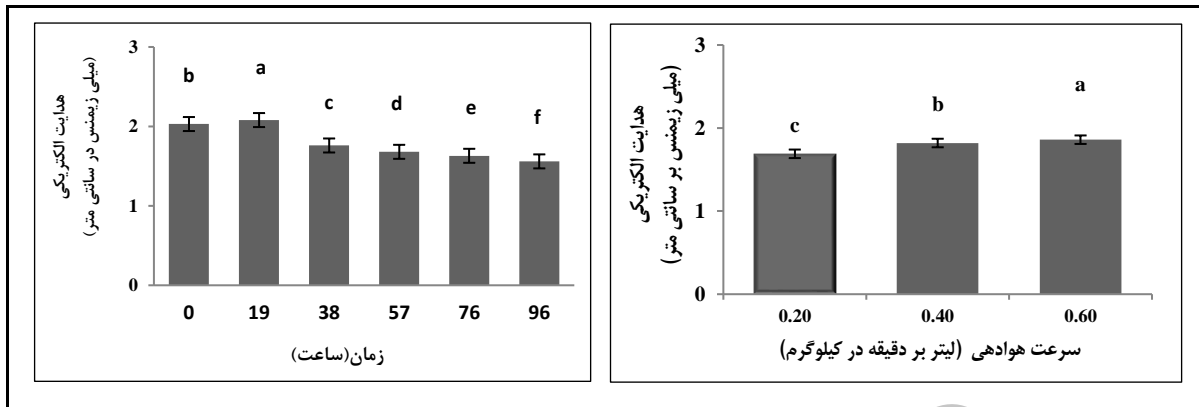
\* اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، \*\* اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و n.s نبود اختلاف معنی‌دار

### تغییرات هدایت الکتریکی مواد کمپوست

هدایت الکتریکی از شاخص‌های مهم کمپوست است که نشان‌دهنده سمیت کمپوست برای محصولات است. هدایت الکتریکی معرف میزان تجمع کل یون‌های متمرکز شامل نمک‌های انحلال‌پذیر است (Chen et al., 2014). مقادیر زیاد نمک در کمپوست بر جوانه‌زنی بذر و سلامت ریشه اثر می‌گذارد (Razi-Kordmahale et al., 2006).

شکل ۳ میانگین مقادیر هدایت الکتریکی را در زمان‌ها و سرعت‌های هوادهی مختلف نشان می‌دهد. میانگین مقدار هدایت الکتریکی در ابتدای فرآیند افزایش

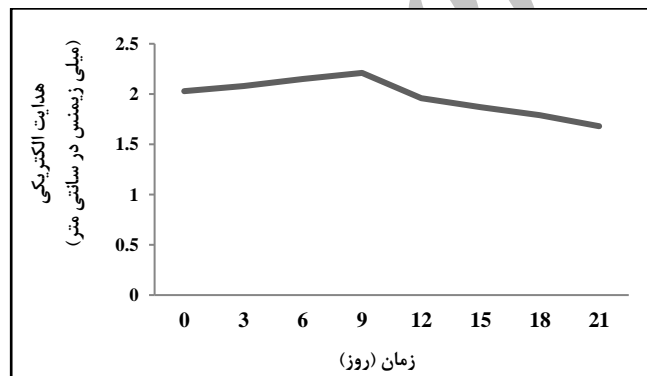
و پس از آن کاهش داشت و از ۲/۰۳ در ساعت ۰ به ۱/۵۶ میلی‌زیمنس در سانتی‌متر در ساعت ۹۶ رسید. مقدار هدایت الکتریکی کمتر از ۳/۵ میلی‌زیمنس در سانتی‌متر به‌عنوان مقدار قابل قبول برای استفاده کمپوست به‌عنوان کود در کشاورزی پیشنهاد شده است (Chen et al., 2014). همچنین، مطابق شکل ۳ میانگین مقادیر هدایت الکتریکی با افزایش سرعت هوادهی، افزایش یافت. افزایش در هدایت الکتریکی ممکن است به‌دلیل تجزیه مواد آلی و همچنین تلفات وزن و آزاد شدن نمک‌های معدنی مانند یون‌های فسفات و آمونیوم طی تجزیه مواد آلی باشد (Abid & Sayadi, 2006).



شکل ۳- نتایج مقایسه میانگین اثر زمان و سرعت هوادهی بر تغییرات هدایت الکتریکی مواد کمپوست در محیط راکتور

میزان هدایت الکتریکی در محیط راکتور نسبت به خارج آن می‌تواند ناشی از فرآیند هوازی و ذخیره کافی اکسیژن در محیط راکتور و تجزیه بیشتر اسیدهای آلی باشد (Placha *et al.*, 2013).

شکل ۴ تغییرات هدایت الکتریکی مواد کمپوست را در شرایط طبیعی (خارج از راکتور) نشان می‌دهد که مقدار آن از ۲/۰۳ در زمان ابتدای شروع فرآیند به ۱/۶۸ میلی‌زیمنس در سانتی‌متر در روز ۲۱ رسید. کاهش



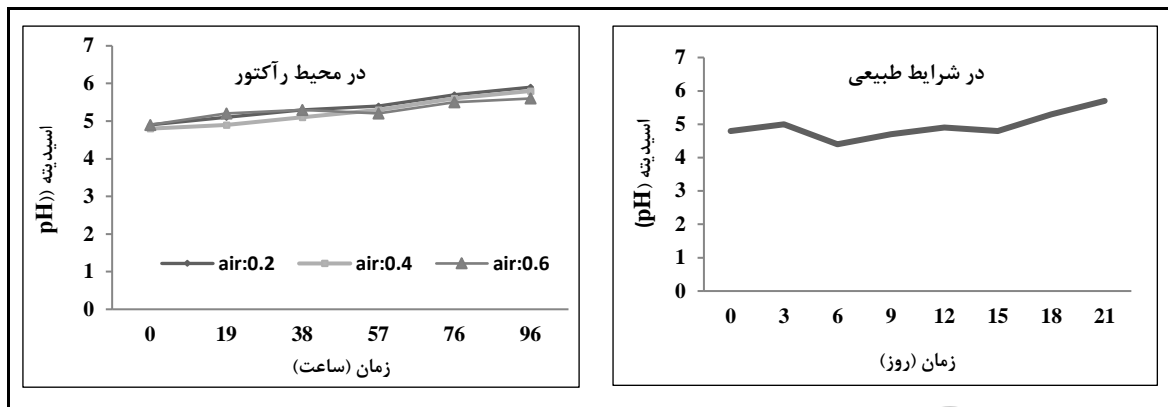
شکل ۴- تغییرات هدایت الکتریکی در شرایط طبیعی تولید کمپوست در زمان‌های مختلف

است. مقدار pH در محیط راکتور از مقدار اولیه ۴/۹ در نرخ‌های هوادهی ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ لیتر در دقیقه کیلوگرم- ماده خشک به ترتیب به مقدار پایانی ۵/۹، ۵/۸ و ۵/۶ رسید و در شرایط طبیعی مقدار pH از ۴/۸ به ۵/۷ رسید. همان‌طور که از شکل ۵ پیداست، کاهش در مقدار pH در ساعات بین ۵۶- ۳۸ در راکتور و در روزهای ۳ تا ۱۵ در شرایط طبیعی اتفاق افتاده است که ناشی از تجمع اسیدهای آلی تحت شرایط بی‌هوازی و تبخیر آمونیاک می‌باشد. لذا با تجزیه اسیدهای آلی مقدار pH به نرمی شروع به افزایش می‌کند (Said-Pullicino *et al.*, 2007).

#### تغییرات pH مواد کمپوست

pH یکی از شاخص‌های مهم ارزیابی کمپوست می‌باشد چرا که میکروارگانیسم‌ها فقط در محدوده خاصی از pH می‌توانند زنده بمانند. pH منعکس کننده تمرکز اسیدهای آلی و دیگر اسیدها یا بازها می‌باشد که برای رشد و نمو محصولات مضر است. pH نهایی کمپوست به شدت تحت تأثیر مواد آلی، مراحل تجزیه کمپوست و افزایش مواد اصلاحی است (Yang *et al.*, 2015). مطابق شکل ۵ مقدار pH در هر دو حالت تولید کمپوست در شرایط طبیعی و راکتور در پایان فرآیند افزایش یافته



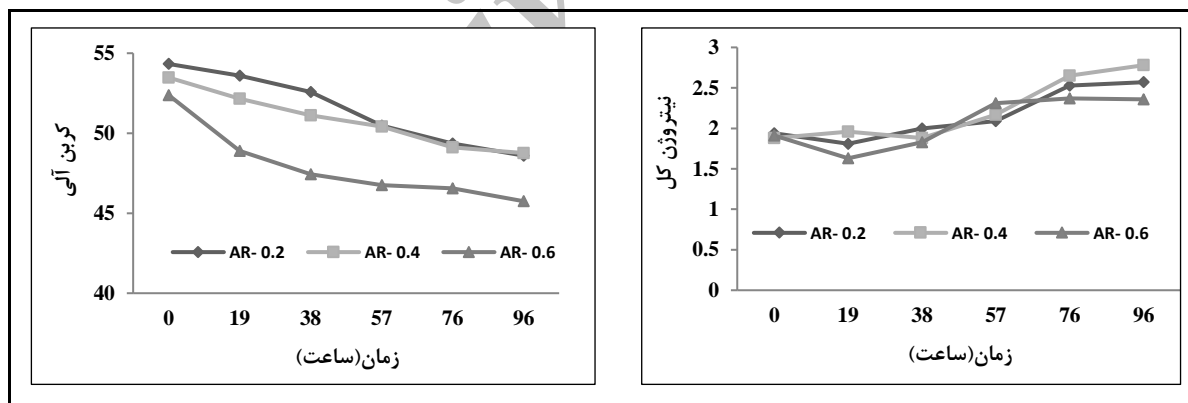


شکل ۵- تغییرات pH مواد کمپوست در محیط راکتور و در شرایط طبیعی

تلفات نیتروژن، کاهش بازدهی و افزایش انتشار گازهای نیتروژنی است (Fukumoto *et al.*, 2003). همان‌طور که از شکل ۶ پیداست نیتروژن آلی کل برای تمامی عملیات در پایان فرآیند افزایش یافته است که دلیل آن آهسته‌تر بودن سرعت تلفات نیتروژن به‌صورت آمونیاک، نسبت به سرعت تلفات ماده خشک به‌صورت کربن دی‌اکسید و بخار آب است (Eklind & Kirchmann, 2000).

### تغییرات نیتروژن و کربن آلی مواد کمپوست

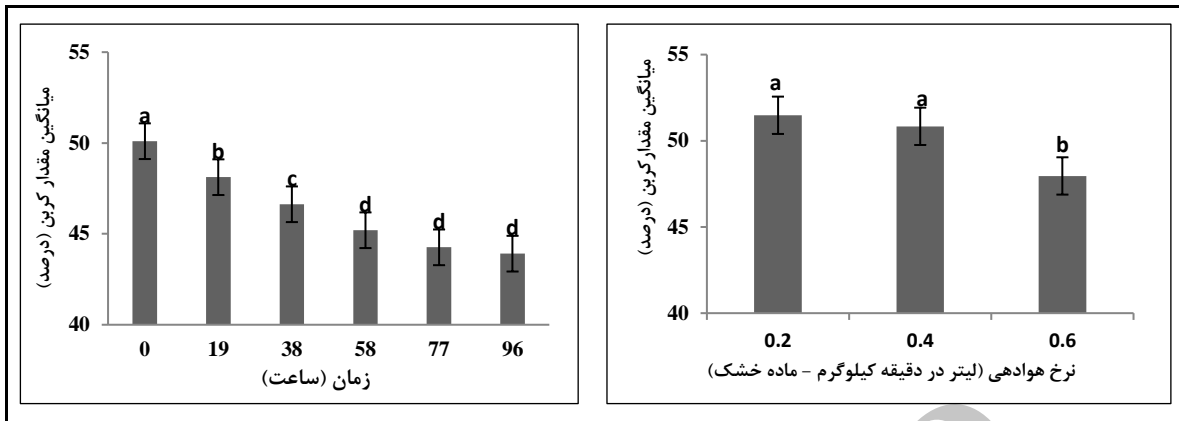
هر دو عنصر کربن و نیتروژن منبع انرژی ضروری برای رشد میکروارگانیسم‌ها هستند (Anon, 2002). در فرآیند تجزیه پسماند مواد آلی، نیتروژن پارامتر مهم و کلیدی موثر بر کیفیت کمپوست تولیدی است. مقادیر بالای نیتروژن در پسماند آلی به سادگی می‌تواند منجر به تلفات نیتروژن در فرآیند تولید کمپوست گردد. نتیجه



شکل ۶- تغییرات نیتروژن کل و کربن آلی مواد کمپوست در محیط راکتور

کربن دی‌اکسید و سایر ترکیبات کربن‌دار مانند متان افزایش و مقدار کربن مواد کمپوست برای تمامی عملیات در پایان فرآیند کاهش یافته است (Abbasnezhad, 2013).

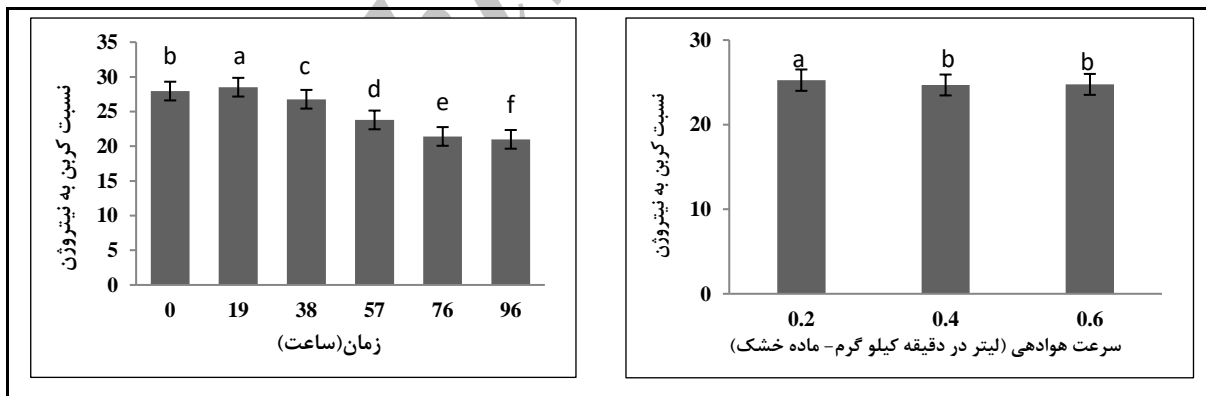
شکل ۷ میانگین مقدار کربن را در زمان و سرعت‌های هوادهی مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل، میانگین مقدار کربن در پایان عملیات کاهش یافته است زیرا با گذشت زمان در طول فرآیند تولید کمپوست، انتشار



شکل ۷- میانگین تغییرات کربن آلی مواد کمپوست در زمان‌ها و سرعت‌های هوادهی مختلف در محیط راکتور

نیترژن (C/N) برای ارزیابی درجه بلوغ کمپوست استفاده می‌شود (Bernal et al., 1998). تحقیقات گذشته نشان داده است که نسبت C/N کمتر از ۲۰ به عنوان کمپوست بالغ در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل ۸، میانگین نسبت کربن به نیترژن در طول زمان، ابتدا روند افزایشی و پس از آن کاهشی نشان می‌دهد؛ این نسبت از ۲۷/۹ به ۲۰/۹ در پایان فرآیند در محیط راکتور رسید.

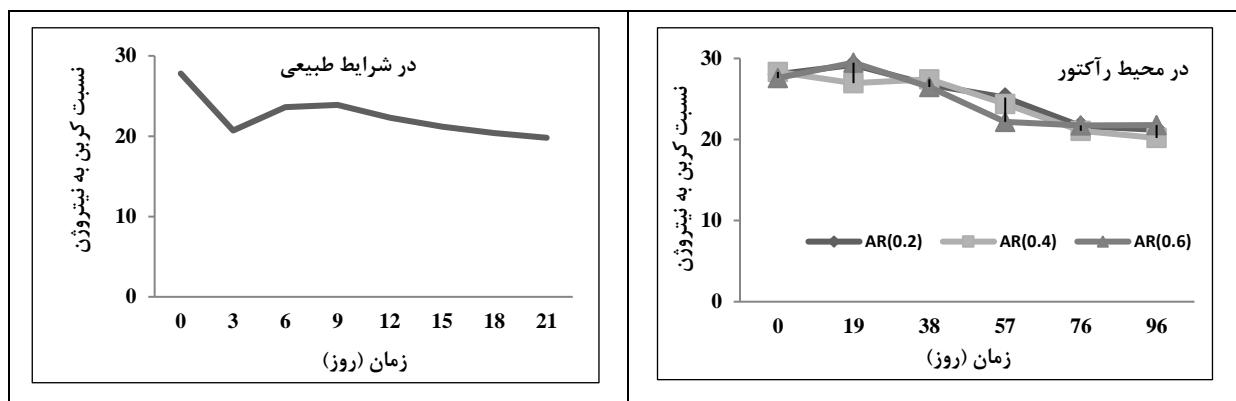
مطابق شکل ۷، تلفات بیشتر کربن در سرعت‌های هوادهی ۰/۴ و ۰/۶ لیتر در دقیقه کیلوگرم- ماده خشک ناشی از تجزیه بهتر میکروارگانیسم‌ها در عملیات با این سرعت هوادهی و انتشار کربن دی‌اکسید بیشتر است. تغییرات نسبت کربن به نیترژن مواد کمپوست هر دو عنصر کربن و نیترژن منبع انرژی ضروری برای رشد میکروارگانیسم‌ها هستند. نسبت کربن به



شکل ۸- میانگین تغییرات نسبت کربن به نیترژن در زمان‌ها و سرعت‌های هوادهی مختلف در محیط راکتور

C/N از ۲۸ به ۲۰/۱ رسید؛ در محیط خارج از راکتور (نمونه شاهد) این نسبت طی ۲۱ روز از ۲۸ به ۱۹/۸ رسید.

در بین تیمارها، میانگین نسبت کربن به نیترژن در سرعت هوادهی ۰/۴ لیتر در دقیقه کیلوگرم- ماده خشک کمتر است تا در دیگر تیمارها که مطابق شکل ۹، نسبت

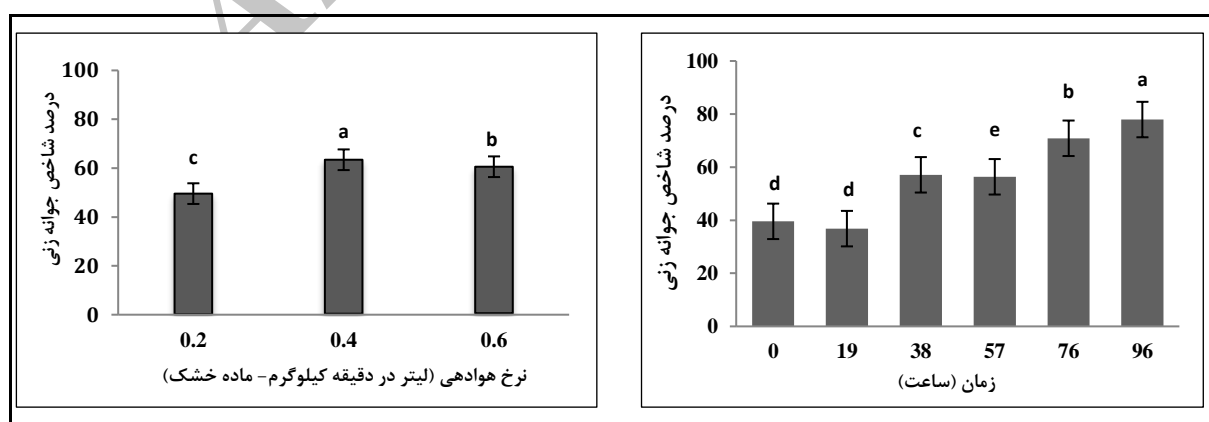


شکل ۹- تغییرات نسبت کربن به نیتروژن مواد کمپوست در محیط رآکتور و در شرایط طبیعی

شامل مقادیر وسیع اسیدهای آلی در این مرحله از فرآیند هوازی کمپوست است. با گذشت زمان و تجزیه این ترکیبات، درصد شاخص جوانه‌زنی نیز تغییر می‌کند و افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۱۰، میانگین درصد شاخص جوانه‌زنی در سرعت‌های هوادهی ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ لیتر در دقیقه کیلوگرم- ماده خشک به ترتیب برابر ۴۹/۳، ۶۳/۰۳ و ۵۶/۹ است. در سرعت هوادهی ۰/۴ لیتر در دقیقه کیلوگرم- ماده خشک و در نسبت C/N برابر ۲۸ در رآکتور، درصد شاخص جوانه‌زنی از ۳۷/۲ به ۸۵ درصد در پایان ۹۶ ساعت رسیده است. درصد بالای شاخص جوانه‌زنی در سرعت هوادهی ۰/۴ لیتر در دقیقه کیلوگرم- ماده خشک نشان‌دهنده تجزیه بیشتر اسیدهای آلی است.

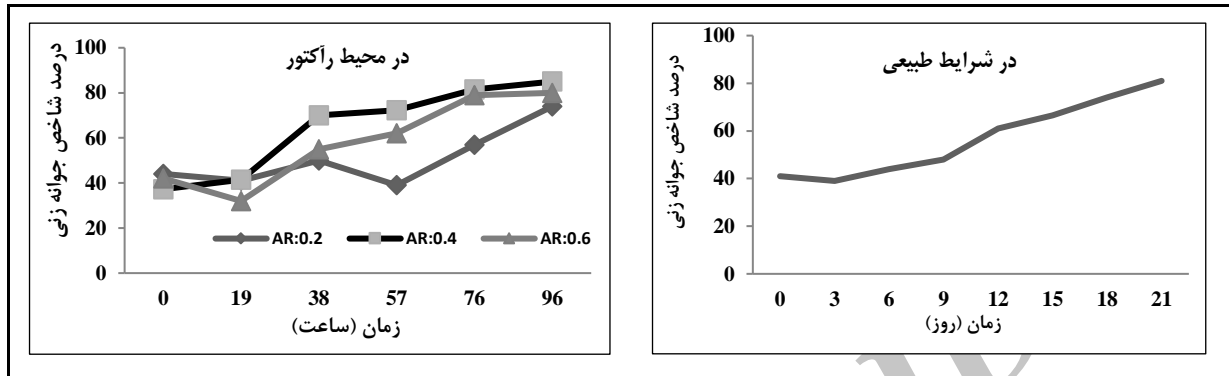
### تغییرات شاخص جوانه‌زنی (GI) مواد کمپوست

مقدار قابل توجهی ترکیبات متابولیکی طی فرآیند تولید کمپوست آزاد می‌شود که برای گیاهان زیان دارد (Zucconi *et al.*, 1981). برای ارزیابی آثار این کار، از شاخص جوانه‌زنی در تشخیص سمیت کمپوست استفاده می‌شود. کمپوست با شاخص جوانه‌زنی بالاتر از ۸۰ درصد نشان‌دهنده سمی نبودن و همچنین بلوغ مواد کمپوست است (Nakhshiniev *et al.*, 2014). میانگین شاخص جوانه‌زنی مواد کمپوست در رآکتور طی زمان افزایش یافت و از ۳۹/۵ درصد در ابتدا به ۷۷/۹ درصد در پایان ۹۶ ساعت رسید (شکل ۱۰). درصد پایین شاخص جوانه‌زنی در ابتدای فرآیند به دلیل تولید ترکیبات واسطه متنوع



شکل ۱۰- میانگین درصد شاخص جوانه‌زنی مواد کمپوست در زمان‌ها و سرعت‌های مختلف در محیط رآکتور

در شرایط طبیعی تولید کمپوست، شاخص جوانه‌زنی جوانه‌زنی در بین تیمارها، نشان‌دهنده زمان طولانی‌تر از ۴۱ به ۸۱ در پایان ۲۱ روز رسید. کمتر بودن شاخص برای رسیدن به بلوغ است.



شکل ۱۱- تغییرات شاخص جوانه‌زنی مواد کمپوست در محیط راکتور و شرایط طبیعی

بازده تولید کمپوست راکتور در سرعت‌های هوادهی مختلف و در شرایط طبیعی جدول ۲، بازده کمپوست تولیدی را در محیط نشان می‌دهد.

جدول ۲- بازده کمپوست تولیدی در محیط راکتور و شرایط طبیعی

بازده (درصد)	جرم کمپوست تولیدی (کیلوگرم)	جرم پسماند ورودی (کیلوگرم)	رطوبت نهایی (درصد)	رطوبت اولیه (درصد)	تیمار
۳۴	۱۰/۲	۳۰	۵۳	۶۵	T <sub>1</sub>
۳۳/۳	۱۰	۳۰	۵۱	۶۵	T <sub>2</sub>
۳۳/۶	۱۰/۱	۳۰	۵۱	۶۵	T <sub>3</sub>
۴۱	۱۲/۳	۳۰	۵۸	۶۵	T <sub>4</sub>

### نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی کمپوست تولیدی با استفاده از راکتور تولید کمپوست نشان‌دهنده تسریع در فرآیند تجزیه کمپوست با دارا بودن سیستم‌های حرارتی، هوادهی تحت

میانگین بازده کمپوست تولیدی حدود ۳۴ درصد به‌دست آمد که در شرایط طبیعی ۴۱ درصد است. بازده بالاتر تولید کمپوست در شرایط طبیعی، می‌تواند ناشی از رطوبت بالاتر کمپوست تولیدی باشد.

است. از این رو رآکتور تولید کمپوست موجب تسریع چشمگیر در فرآیند تجزیه مواد کمپوست شده است. میانگین شاخص جوانه‌زنی مواد کمپوست طی زمان افزایش یافته است. بیشترین درصد جوانه‌زنی در محیط رآکتور در سرعت هوادهی ۰/۴ لیتر در دقیقه کیلوگرم- ماده خشک و برابر ۸۵ درصد است و شاخص جوانه‌زنی مواد کمپوست در شرایط کنترل بعد از ۲۱ روز ۸۱ و بازدهی دستگاه حدود ۳۴ درصد به دست آمد. دستگاه با کنترل بر دبی هوا، حرارت و عملکرد مکانیکی، موجب تسریع در تجزیه پسماند مواد غذایی شده است و در این شرایط کاری بهترین عملکرد از لحاظ کیفیت کمپوست تولیدی در دبی هوا ۰/۴ لیتر در دقیقه کیلوگرم- ماده خشک، دمای ۵۵ درجه سلسیوس، سرعت دورانی یک دور در دقیقه و رطوبت ۶۵ درصد مواد اولیه به دست آمده است.

فشار و همزدن در طراحی دستگاه است. اثر زمان فرآیند بر شاخص‌های ارزیابی مواد کمپوست شامل C, N, C/N, EC و شاخص جوانه‌زنی (GI) تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد دارد. اثر سرعت هوادهی بر تمام شاخص‌های ارزیابی مواد کمپوست به جز pH معنی‌دار است. میانگین مقدار هدایت الکتریکی در محیط رآکتور در طول زمان کاهش یافته و به ۱/۵۶ میلی‌زیمنس در سانتی‌متر رسیده است که این مقدار برای استفاده کمپوست به‌عنوان کود در کشاورزی قابل قبول است. pH مواد کمپوست در پایان فرآیند برای تمامی عملیات افزایش یافته است که ناشی از فرآیند هوازی و ذخیره کافی اکسیژن طی فرآیند است. نسبت C/N در محیط رآکتور در سرعت هوادهی ۰/۴ لیتر در دقیقه کیلوگرم- ماده خشک طی ۹۶ ساعت از ۲۸ به ۲۰/۱ و در شرایط کنترل در طول ۲۱ روز از ۲۸ به ۱۹/۸ رسیده

## مراجع

- Abbasnezhad, H. 2013. Investigating the effect of aeration rate, initial moisture content and C/N ratio on composting properties of cow manure and rice bran. M. SC. Thesis. Faculty of Agriculture. Agricultural and Natural Resources University of Sari. Sari. Iran. (in Persian)
- Abid, N. and Sayadi, S. 2006. Detrimental effects of olive mill wastewater on the composting process of agricultural wastes. *Waste Manage.* 26(10): 1099-1107.
- Anon. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association (APHA). 20<sup>th</sup> Ed. Washington, D. C.
- Anon. 2002. Use of Composting for Biosolids Management. Biosolids Technology Fact Sheet. U. S. Environmental Protection Agency. US EPA. 832-F-02-024. Office of Water. Washington, D. C.
- Bernal, M. P., Albuquerque, J. A. and Moral, R. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresour. Technol.* 100, 5444-5453
- Bernal, M. P., Paredes, C., Sanchez-Monedero, M. A. and Cegarra, J. 1998. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresour. Technol.* 63, 91-99.
- Chang, J. I. and Hsu, T. E. 2008. Effects of composition on food waste composting. *Bioresour. Technol.* 99, 8068-8074.
- Chen, Y., Yu, F., Liang, S., Wang, Z., Liu, Z. and Xiong, Ya. 2014. Utilization of solar energy in sewage sludge composting: fertilizer effect and application. *Waste Manage.* 34, 2014-2021.

- Dadashi, D., Ghasemzadeh, H. R. and Gandoshmin, T. M. 2012. Design and manufacturing of advanced reactor for studying composting process. 7<sup>th</sup> National Conference on Agricultural Machinery and Mechanization. Shiraz University. Sep. 4-6. Shiraz, Iran. (in Persian)
- Eklind Y. and Kirchmann, H. 2000. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. II: Nitrogen turnover and losses. *Bioresour. Technol.* 74(2): 125-133
- Fukumoto, Y., Osada, T., Hanajima, D. and Haga, K. 2003. Patterns and quantities of NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions during swine manure composting without forced aeration - effect of compost pile scale. *Bioresour. Technol.* 89(2): 109-114.
- Keener, H. M., Dick, W. A. and Hoitink, H. A. J. 2000. Composting and beneficial utilization of composted by-product materials. In: Dick, W. A. (Ed.) *Land Application of Agricultural, Industrial, and Municipal By-products*. Soil Science Society of America, Inc. Madison.
- Kim, M. H. and Kim, J. W. 2010. Comparison through a LCA evaluation analysis of food waste disposal options from the perspective of global warming and resource recovery. *Sci. Total Environ.* 408(19): 3998-4006.
- Nakhshinie, B., Biddinika, M. K., Gonzales, H. B., Sumida, H. and Yoshikawa, K. 2014. Evaluation of hydrothermal treatment in enhancing rice straw compost stability and maturity. *Bioresour. Technol.* 151, 306-313.
- Palmiotto, M., Fattore, E., Paiano, V., Celeste, G., Colombo, A. and Davoli, E. 2014. Influence of a municipal solid waste landfill in the surrounding environment: toxicological risk and odor nuisance effects. *Environ. Int.* 68, 16-24.
- Placha, D., Raclavska, H., Kucerova, M. and Kucharova, J. 2013. Volatile fatty acid evolution in biomass mixture composts prepared in open and closed bioreactors. *Waste Manage.* 33, 1104-1112.
- Razi-Kordmahalle, L., Asgharzadeh, A., Malakouti, MJ. 2006. Increasing the rate of decomposition of cane bagasse by parasitic fungus and azotobacter auxiliary bacteria. The 1<sup>st</sup> Scientific Conference on the Management of Plant Remains. Nov. 25. Tehran, Iran. (in Persian)
- Said-Pullicino, D., Erriquens, F. G. and Gigliotti, G. 2007. Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity. *Bioresour. Technol.* 98, 1822-1831.
- Salehi, S., Jonidi, A., Farzad-Kia, M., Nabizadeh, R. and Amini, S. 2008. Heavy metal khomein factory products. The 4<sup>th</sup> Conference and Exhibition on Environmental Engineering. (in Persian)
- Shadravan, I. 2006. *Mechanical Engineering Design*. Translation. First Ed. Noorpardazan Pub. (in Persian)
- Stylianou, M., Inglezakis, V. and Loizidou, M. 2004. Effects of zeolite addition on soil chemistry open field experiments. *Proceedings of the International Conference for the Protection and Restoration of the Environment VII*. June 28-July 1. Mykonos, Greece.
- Tchobonoglaous, G. and Kreith, F. 2002. *Hand book of solid waste management*. Second Ed. McGRAW-Hill, International Pub.

- Yang, J., Meiting, J., Weizun, L., Qingbin, R., Le, L., Yu, C., Qian, Y., Qidong, H. and Yiliang, L. 2015. Rapid production of organic fertilizer by dynamic high-temperature aerobic fermentation (DHAF) of food waste. *Bioresour. Technol.* 197, 7-14.
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M. E. and de Bertoldi, M. 1981. Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle.* 22, 54-57.

Archive of SID

## **Fabrication and Evaluation of House Scale Green Waste Composting Machine**

**R. Abdi, S. J. Hashemi\* and S. R. Tabatabaei-Kolour**

\* Corresponding Author: Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Agricultural and Natural Resources University of Sari, Mazandaran, Iran. Email: szhash@yahoo.com

Received: 24 August 2016, Accepted: 30 October 2016

In this study, a U-shaped reactor with aeration, heating and stirring systems was designed for composting process. The length, width and height of reactor were 110, 66 and 70 cm respectively. The experiment was carried out at different aeration rate (0.2, 0.4 and 0.6 Lit/min.Kg DM) and time (0, 19, 38, 57, 76, 96 hour). The agitation speed and temperature for the purpose of this experiment was; 55 °C and 1 rpm respectively. In order to adjust the C/N ratio and humidity of compost, two additives namely; zeolites and rice bran was used. The initial moisture content of waste material was between 60 to 65 percent in all operations. Results showed that the changes in the EC, germination index, and C/N ratio were significant. The EC of compost declined and the pH value increased at the end of process for all operations. The average C/N ratio of compost materials changed from 28 to 20.9 after 96 hours in the reactor. In traditional method, the C/N ratio reached to 19.8 after 21 days. Composting process time has a significant effect on germination index. The maximum germination index occurred at the aeration rate of 0.4 Lit/min. Kg DM which was 85 percent. Also the results indicated that the designed reactor with continuous rotating agitator, heating and air pressure was able to convert the food waste to compost within 96 hours. Results indicate that the proposed composting system can create a suitable environment for the growth and performance of micro-organisms in order to accelerate the decomposition of food waste.

**Key words:** Composting Machine, Fast Decomposition, Food Waste, Organic Fertilizer