

## *Evaluation of the Compost Produced from Mixed Sludge of Municipal Wastewater Treatment Plant and Pistachio Hull Waste*

Mohammad Malakootian<sup>1</sup>,  
Mohammad Mobini<sup>2</sup>,  
Golam Abbas Nekoonam<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Professor, Environmental Health Engineering Research Center, Department of Environmental Health, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran

<sup>2</sup> M.Sc in Environmental Health Engineering, Occupational Environment Research Center, Rafsanjan University of Medical Sciences, Rafsanjan, Iran

<sup>3</sup> M.Sc in Environmental Engineering, Environmental Health Engineering Research Center, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran

(Received March 20, 2013; Accepted August 9, 2014)

### **Abstract**

**Background and purpose:** Direct application of sewage sludge in agriculture is limited due to the presence of pathogens, improper fermentation of organic waste and heavy metals in the sludge. Co-composting of sewage sludge and other waste is a method for safe and healthy disposal to reuse sewage sludge. This study investigated the possibility of producing compost from sewage sludge and pistachio hull waste.

**Material and Methods:** A cross-sectional study was conducted in the winter of 2014 at the Environmental Health Engineering Research Center affiliated to Kerman University of Medical Sciences. First, a cylindrical reactor was made which was 30liters in volume, 30cmdiameter in dimensions, 45cm depth, and wall thickness of 6 mm. Pistachio hull waste with sewage sludge was mixed in a ratio of 1 to 4 and C/N ratio of 25. Reactor started with aeration rate of 5 liters per minute. The reactor content was mixed every five days, and the resulting compost samples were measured for moisture content, pH, electrical conductivity, organic carbon, total nitrogen, phosphorus, potassium, cadmium, and lead.

**Results:** After 30 days from the start of composting process, the carbon to nitrogen ratio decreased to 16.5. During the composting process, pH increased but the amounts of electrical conductivity, total nitrogen, organic carbon, phosphorus, potassium, lead, and cadmium decreased. The maximum temperature reached 63°.

**Conclusion:** The properties of the produced compost including temperature, pH, electrical conductivity, moisture ratio, C/N,P, K, and heavy metals were in category 1 and 2 of the standard compost of Iran.

**Keywords:** Sewage sludge, pistachio hull waste, compost, reactor

## بررسی تولید کمپوست از مخلوط لجن تصفیه خانه فاضلاب شهری با زائدات پوست پسته

محمد ملکوتیان<sup>۱</sup>

محمد مبینی<sup>۲</sup>

غلامعباس نکونام<sup>۳</sup>

### چکیده

**سابقه و هدف:** کاربرد مستقیم لجن فاضلاب در کشاورزی به علت حضور پاتوژن ها، تخمیر نامناسب زائدات آلی و وجود فلزات سنگین در لجن، محدود شده است. کمپوست مشترک لجن فاضلاب با زائدات دیگر روشی برای استفاده مجدد از زائدات است که دفع ایمن و بهداشتی لجن و زائدات را به دنبال دارد. هدف این مطالعه بررسی امکان تولید کمپوست از مخلوط لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته است.

**مواد و روش ها:** این مطالعه مقطعی در زمستان ۱۳۹۲ در مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط انجام شد. در ابتدا، راکتوری استوانه‌ای شکل با حجم ۳۰ لیتر و به قطر ۳۰ سانتی متر، عمق ۴۵ سانتی متر وضخامت دیواره ۶ میلی متر ساخته شد. لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته به نسبت ۱ به ۴ مخلوط گردید تا نسبت کربن به ازت مخلوط اولیه ۲۵ شود. راکتور با میزان هوادهی ۵ لیتر در دقیقه شروع به کار نمود. راکتور هر پنج روز یکبار زیرورو شد و نمونه برداری از کمپوست حاصل جهت اندازه گیری رطوبت، pH، هدایت الکتریکی، کربن آلی، ازت کل، فسفر، پتاسیم، کادمیوم، سرب، انجام گرفت.

**یافته ها:** پس از گذشت ۳۰ روز از شروع فرایند کمپوست سازی، نسبت کربن به ازت به ۱۶/۵ رسید. در طی فرایند کمپوست سازی، pH روند افزایشی داشت و میزان هدایت الکتریکی، ازت کل، کربن آلی، فسفر، پتاسیم، سرب و کادمیوم کاهش یافت. حداکثر دمای فرایند به ۶۳ درجه سانتی گراد رسید.

**استنتاج:** مشخصات کمپوست تولیدی از نظر دما، pH، هدایت الکتریکی، رطوبت، نسبت، فسفر، پتاسیم و فلزات سنگین در محدوده استاندارد کمپوست رده ۱ و ۲ ایران قرار دارد، لذا برای کاربرد کشاورزی توصیه می شود.

**واژه های کلیدی:** لجن فاضلاب، زائدات پوست پسته، کمپوست، راکتور

### مقدمه

کمبود مواد آلی خاک در مناطق خشک و نیمه خشک و اهمیت مواد آلی در مدیریت پایدار اکوسیستم های کشاورزی این مناطق، باعث توجه محققان و کشاورزان این مناطق به کودهای آلی شده

**مؤلف مسئول:** محمد ملکوتیان - کرمان - ابتدای بزرگراه هفت باغ مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی کرمان - دانشکده بهداشت

E-mail: m.malakootian@yahoo.com

۱. استاد مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط و گروه بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران
  ۲. کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات محیط کار، دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان، رفسنجان، ایران.
  ۳. کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران
- تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۳۹۳/۴/۱۰ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۵/۱۸

است (۱). لجن فاضلاب یکی از زائدات آلی است که حاوی منابع با ارزشی از مواد آلی و مواد مغذی (نوترینت‌ها) است (۲) از حدود یک‌صد سال پیش در کشورهای اروپایی و امروزه در بسیاری از کشورها از لجن فاضلاب در کشاورزی استفاده می‌شود (۳). کاربرد مستقیم لجن فاضلاب در کشاورزی به علت حضور پاتوژن‌ها، تخمیر نامناسب زائدات آلی و وجود فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی و معدنی در لجن، موجب اثرات نامطلوب زیست محیطی و بهداشتی می‌گردد (۴،۵). لازم است لجن فاضلاب به نحوی مناسب تثبیت شود. کمپوست‌سازی از جمله فرایندهای تثبیت لجن است. کمپوست‌سازی یک فرایند تجزیه بیولوژیکی است که طی آن مواد آلی تحت شرایط کنترل شده به محصول پایدار و تثبیت شده شبه هومیکی تبدیل می‌شوند (۶). انتخاب روش کمپوست‌سازی به تجهیزات و هزینه بهره برداری، زمان برای دستیابی به محصول پایدار و رسیده، قابلیت دسترسی به زمین و مواد خام اولیه بستگی دارد. در بین روش‌های کمپوست‌سازی در دسترس، تکنولوژی در مخزن که یک سیستم بسته است به عنوان سیستم کنترل کننده محیط کمپوست سازی تعریف می‌شود. این روش می‌تواند به طور موفقیت آمیزی به عنوان تسهیلات با ظرفیت بالا در مناطق پرجمعیت و متراکم، اجرا و عملیاتی شود. دمای بالای ۵۵ درجه سانتی‌گراد برای سه روز متوالی یا بیش تر باقی می‌ماند که خود ضمانتی جهت نابودی پاتوژن‌ها و تولید محصولی عاری از پاتوژن است (۷-۹).

آب و اکسیژن برای فعالیت میکروبی در طی فرایند کمپوست سازی ضروری است. قابلیت دسترسی میکروارگانسیم‌ها به آب و اکسیژن مستقیماً با تخلخل کل و تخلخل پر شده با هوا (Air-filled porosity) AFP) ارتباط دارد. بنابراین استفاده از عوامل حجیم کننده در کمپوست سازی لجن فاضلاب مورد نیاز است زیرا که تخلخل پر شده با هوای لجن، پائین است (۱۰). کمپوست سازی لجن فاضلاب با استفاده از عوامل

حجیم کننده می‌تواند پایداری مواد آلی، غیر فعال سازی پاتوژن‌ها و انگل‌ها را تشدید نماید و هم‌چنین کیفیت محصول نهایی به عنوان سبک کننده خاک یا کود آلی افزایش دهد. لجن فاضلاب با مواد حجیم کننده‌ای مانند پسماندهای شهری، زائدات کشاورزی، زائدات جنگلداری و کودهای حیوانی مخلوط می‌شود تا هم شرایط لجن (موجب کاهش رطوبت لجن و تعدیل نسبت کربن به ازت لجن) و هم شرایط اصلاح کننده کمپوست را تنظیم و تعدیل نماید (۱۱، ۱۲). نتایج بیشتر مطالعات کمپوست‌سازی لجن فاضلاب به علت انواع مختلف مواد اولیه و مواد حجیم کننده و نیز شرایط کمپوست سازی (مانند دما، pH، مقدار رطوبت، نوع هوادهی و اندازه تسهیلات) متفاوت است در جدول شماره ۱، به تعدادی از مطالعات در خصوص کمپوست‌سازی لجن فاضلاب با مواد حجیم دهنده که بر دمای فراین اثر دارند، اشاره شده است.

جدول شماره ۱: مطالعات کمپوست سازی لجن فاضلاب با مواد حجیم دهنده متفاوت

روش کمپوست سازی (رفرنس)	مواد حجیم دهنده	نسبت لجن فاضلاب به مواد حجیم دهنده	دمای تولیدی (درجه سانتی‌گراد)	زمان کمپوست سازی (روز)
کمپوست سازی سرعت بالا (۲)	زائدات آب‌جو و کاه برنج	۵:۵	۶۵	۷
کمپوست سازی سرعت بالا (۱۱)	برگ چغندر قند	۱:۰۹۲	۵۸	۲۹
کمپوست سازی سرعت بالا (۱۳)	خرده چوب، نی خرده شده، چمن مواد زائد شهری	۶۰:۲۲:۱۵:۶۰	۶۰	۴۰
کمپوست سازی سرعت بالا (۱۴)	و کمپوست رسیده	۱:۳	۵۵	۳۰
کمپوست سازی سرعت بالا (۱۵)	زائدات پارک‌ها و باغچه‌ها، زائدات کاغذ	۳۵:۳۰:۳۵	۴۰±۲	۱۰۹
ویندرو (۳)	خاک اره	۱:۳	۵۵	۱۰۰
ویندرو (۱۳)	خرده چوب، نی خرده شده، چمن	۱۵:۷:۱۵:۶۰	۴۴	۴۰
توده هوادهی ساکن (۴)	زائدات گیاهان سبز	۱:۲	۷۲	۱۳۵
توده هوادهی ساکن (۱۶)	خاکستر فرار	۵۰:۵۰	۶۵	۷۰

زائدات پوست پسته به عنوان زائدات کشاورزی طبقه‌بندی می‌شوند که موجب آلودگی باغات پسته و محصول پسته به قارچ اسپریژیلوس می‌شود. تخلیه این مواد در محیط موجب انتشار بوهای آزاردهنده و رشد و

۱- تهیه لجن فاضلاب تصفیه خانه فاضلاب شهری و زائدات پوست پسته

لجن فاضلاب مورد نیاز جهت کمپوست سازی از تصفیه خانه فاضلاب شهر کرمان برداشت شد. تصفیه خانه فاضلاب کرمان به روش لجن فعال کار می کند. لجن اولیه و لجن ثانویه این تصفیه خانه وارد هاضم هوازی شده و سپس تغلیظ می شود و در انتها وارد بسترهای لجن خشک کن می شود. لجن فاضلاب مورد استفاده در این پژوهش از قسمت بستر لجن خشک کن که سه روز در معرض آفتاب بودند، برداشت شد. زائدات پوست پسته مورد نیاز از محل تلنبار این زائدات از حومه شهر رفسنجان جمع آوری شد. با توجه به اینکه زائدات پوست پسته در اثر خشک شدن شکسته و ریز شده بودند، از الک یک سانتیمتری عبور داده شدند و پسماند الک با لجن فاضلاب مخلوط شد.

۲- مشخصات راکتور کمپوست سازی

راکتوری استوانه‌ای شکل با حجم ۳۰ لیتر و به قطر ۳۰ سانتی‌متر، عمق ۴۵ سانتیمتر و ضخامت دیواره ۶ میلی‌متر ساخته شد. برای جلوگیری از هدر رفت گرما، در حین کار، از فویل آلومینیومی و فوم برای پوشش دیواره راکتور استفاده گردید. برای جمع آوری شیرابه و کمک به جریان هوا در راکتور، در ارتفاع ۵ سانتیمتری از کف آن، یک توری قرار داده شد. برای هوادهی توده کمپوست از پمپ هوا استفاده شد. هوا توسط لوله پلاستیکی که در کف راکتور نصب شده، وارد توده شد. برای خروج شیرابه تولیدی از فرایند، شیری در کف راکتور نصب گردید (۲۲).

۳- روش انجام فرایند کمپوست سازی

ابتدا نسبت کربن به ازت لجن فاضلاب و زائدات پوست پسته محاسبه شد و سپس به نسبت ۱ به ۴ لجن فاضلاب به زائدات پسته مخلوط شد که نسبت کربن به ازت بهینه ۲۵ برای مواد اولیه جهت شروع کمپوست

تکثیر مگس می گردد. از سوئی دیگر اکثر کشاورزان پوست پسته را در باغات پسته دفن می نمایند که به علت وجود مواد آلی ناپایدار در آن، موجب آسیب رساندن به ریشه و در نتیجه توقف رشد گیاه می شود (۱۷). ترکیب فیزیکی زائدات فراوری پسته شامل پوست نرم رویی، خوشه، برگ درخت و مغز و پوسته استخوانی می باشد که البته نسبت این اجزاء با یکدیگر در شرایط مختلف متفاوت است. طی اندازه گیری های انجام شده در این رابطه میانگین نسبت اجزاء مختلف زائدات پسته شامل ۴۶/۵ درصد پوسته نرم رویی، ۲۵ درصد خوشه، ۱۰ درصد برگ و ۰/۵ درصد مغز و پوست استخوانی است (۱۸). اندازه زائدات پوست پسته بسته به ترکیب فیزیکی آن بین ۵ میلی متر تا چند سانتیمتر است. بنابراین برای دفع و بازچرخش زائدات فراوری پسته می توان از آن ها به عنوان عامل حجیم کننده لجن فاضلاب استفاده نمود.

کیفیت کمپوست تولیدی با تکنیک های مختلفی ارزیابی می گردد ولی پایداری و رسیدگی دو جنبه اساسی آن می باشد که باید قبل از کاربرد کمپوست در زمین مورد بررسی قرار گیرد. پارامترهای مهم برای ارزیابی رسیدگی کمپوست شامل تعیین دما، PH، هدایت الکتریکی، کربن آلی، کل ازت، نسبت C/N، شاخص جوانه زنی، میزان فلزات سنگین می باشد (۲۱-۱۹). هدف از این مطالعه تولید کمپوست از لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته جهت حل مشکلات دفن لجن تولیدی تصفیه خانه های فاضلاب و نیز برای بازیافت زائدات پوست پسته جهت کاهش اثرات مضر بهداشتی آن و از طرفی حاصل خیزی خاک است.

## مواد و روش ها

این مطالعه مقطعی در زمستان ۱۳۹۲ در مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط، طی یک دوره سه ماهه جهت تولید کمپوست از مخلوط لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته انجام گرفت.

توسط دستگاه pH metre (HANNA211) و EC metre (HANNA 8301) قرائت شد.

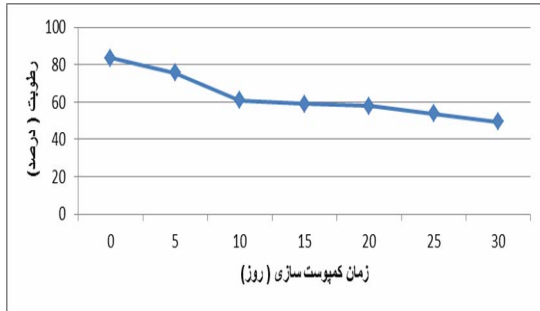
تعیین درصد کربن آلی به روش اصلاح شده والی بلاک (Walkley-Black) انجام شد به این ترتیب که ابتدا ۰/۱ گرم نمونه کمپوست خشک، آسیاب شده و به آن محلول دی کرومات پتاسیم نرمال و اسید سولفوریک غلیظ اضافه شد و به مدت سه ساعت در دمای آب جوش حرارت داده شد. سپس شناساگر اورتوفانترویلین اضافه و با محلول فرو آمونیوم سولفات تیترا گردید. درصد کربن آلی از مقدار مصرفی فرو آمونیوم سولفات محاسبه شد. درصد ازت کل به روش کجلدال (Kjeldahl Method) توسط دستگاه تمام اتوماتیک ۱۲ خانه ای Buchi49 اندازه گیری شد. از تقسیم کربن آلی بر ازت کل نسبت کربن به ازت محاسبه شد. برای اندازه گیری فسفر و پتاسیم، ۱ گرم نمونه آسیاب شده را در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد تا به خاکستر تبدیل گردد. سپس به خاکستر حاصله، اسید کلریدریک اضافه شد و به حجم ۱۰۰ رسانده شد. میزان فسفر به روش اولسن (Olsen) اندازه گیری شد به این ترتیب که از محلول حاصل از مرحله قبل، ۱۰ میلی لیتر برداشته و به آن ۱۰ میلی لیتر محلول زرد اضافه شد و با استفاده از اسپکتوفتومتر (SHIMADZU UV-1800) در طول موج ۴۷۰ نانومتر، میزان فسفر به دست آمد. پتاسیم به روش فلیم فتومتری (Fater electric) اندازه گیری شد.

برای تعیین میزان کادمیوم و سرب، ابتدا ۱ گرم نمونه به مدت یک ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد. سرب و کادمیوم در نمونه کمپوست حرارت دیده با اضافه نمودن ۷/۵ میلی لیتر اسید هیدروکلریدریک غلیظ و ۲/۵ میلی لیتر اسید نیتریک هضم و استخراج شدند. سپس کادمیوم در طول موج ۲۲۸/۸ نانومتر و سرب در طول موج ۲۸۳/۳ نانومتر با اسپکتوفتومتر جذب اتمی (AAS 8000Series. YOUNGLNINSTRUMENT) اندازه گیری شد.

سازی به دست آمد. راکتور با میزان هوادهی ۰/۵ لیتر در دقیقه (میزان هوادهی بر اساس مطالعاتی که در خصوص کمپوست سازی سرعت بالا لجن فاضلاب انجام شده بود، انتخاب شد) شروع به کار نمود که هر یک ساعت پمپ هواده به طور خودکار به مدت یک ساعت خاموش می شد.

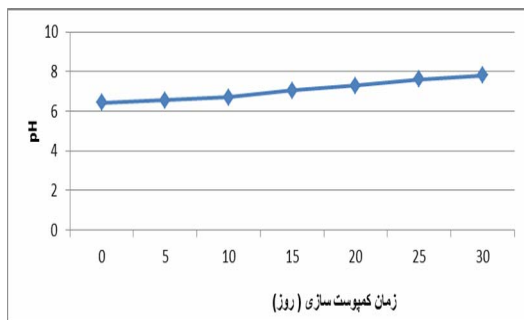
۴- نمونه برداری و اندازه گیری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی توده کمپوست

محتویات راکتور هر پنج روز یک بار زیر و رو می شد و نمونه برداری جهت انجام آزمایشات برداشت انجام شد. قبل از نمونه برداری، مواد موجود در راکتور با بیلچه ای به خوبی همزده می شد تا مخلوط همگنی به دست آید. سپس ۲۰۰ گرم نمونه از مواد راکتور برداشته شد تا آزمایشات شیمیایی و فیزیکی روی آن با سه بار تکرار انجام شود. در مجموع نمونه برداری در روزهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ انجام شد. آزمایشات تعیین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی کمپوست در آزمایشگاه پژوهشی مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط دانشکده بهداشت کرمان انجام شد. مواد مصرفی جهت انجام آزمایشات دارای خلوص تجزیه ای بود و ساخت شرکت مرک آلمان بود. اندازه گیری دما در عمق ۲۵ سانتیمتری از عمق کمپوست توسط دماسنج شیشه ای به صورت روزانه انجام گرفت. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی کمپوست شامل رطوبت، pH، هدایت الکتریکی، کربن آلی، ازت کل، فسفر، پتاسیم، کادمیوم، سرب و شاخص جوانه زنی طبق دستورالعمل کمپوست، نمونه برداری و روش های آزمون فیزیکی و شیمیایی به شماره ۱۳۳۲۰، سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران اندازه گیری شد (۲۳). درصد رطوبت کمپوست از طریق خشک کردن نمونه در دمای ۱۰۳ تا ۱۰۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت به دست آمد. برای اندازه گیری pH و EC ابتدا سوسپانسیون از نمونه کمپوست، ۱/۱۰ وزن به حجم کمپوست به آب مقطر تهیه و سپس به مدت ۳۰ دقیقه شیکر شده و در نهایت

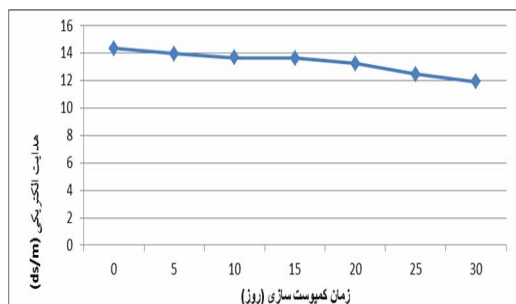


نمودار شماره ۲: روند تغییرات رطوبت در طی کمپوست سازی لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته

نمودار شماره ۳، روند تغییرات pH در طی کمپوست سازی لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته را نشان می‌دهد، میزان pH در طی کمپوست سازی روندی افزایشی دارد.



نمودار شماره ۳: روند تغییرات pH در طی کمپوست سازی لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته



نمودار شماره ۴: روند تغییرات هدایت الکتریکی در طی کمپوست سازی لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته

روند تغییرات EC در طی کمپوست سازی لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته در نمودار شماره ۴، نشان داده شده است. EC مخلوط لجن با پوست پسته از ۱۱/۹۱ ds/m پس از ۳۰ روز به ۱۴/۳۲ ds/m کاهش یافت. در

برای تعیین شاخص جوانه زنی، سوسپانسیون ۱/۵ کمپوست به آب مقطر تهیه نموده و سپس ۱۰ میلی لیتر از محلول حاصله را در پلیت استریل که در کف آن کاغذ قرار داده شده ریخته و در آن ۱۰ عدد بذر تر تیزک قرار داده و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد. برای نمونه شاهد نیز به همین ترتیب اقدام شد. سپس دانه های جوانه زده شمارش و طول ریشه اندازه گیری شد شاخص جوانه زنی با معادله زیر محاسبه شد:

$$CH_{Sg} = [(\%Sg \times R_I)_{compost} \div (\%Sg \times R_I)_{water}] \times 100$$

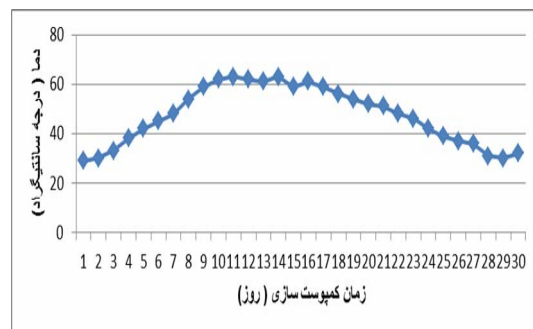
$CH_{Sg}$  = شاخص جوانه زنی

$Sg$  = درصد تعداد بذر جوانه زده

$R_I$  = طول ریشه

## یافته ها

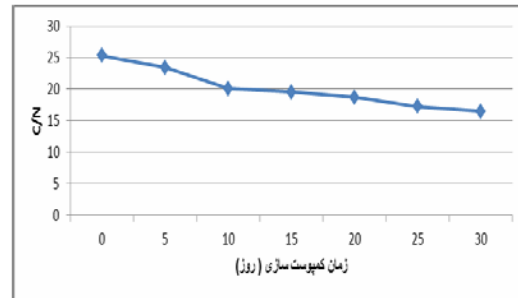
نمودار شماره ۱، روند تغییرات دما در طی کمپوست سازی لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته را نشان می‌دهد. حداکثر دمای توده کمپوست ۶۳ درجه سانتی‌گراد شد.



نمودار شماره ۱: روند تغییرات دما در طی کمپوست سازی لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته

روند تغییرات رطوبت در طی کمپوست سازی لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته در نمودار شماره ۲ نشان داده شده است. رطوبت اولیه مخلوط لجن با زائدات پوست پسته ۸۲ درصد و رطوبت کمپوست تولیدی ۴۹ درصد می‌باشد.

نمودار شماره ۵، روند تغییرات C/N در طی کمپوست سازی لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته را نشان می دهد، نسبت C/N مخلوط لجن با پوست پسته در طی کمپوست سازی روندی کاهشی دارد.



نمودار شماره ۵: روند تغییرات نسبت C/N در طی کمپوست سازی لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته

سازی است که در کاهش پاتوژن‌ها تأثیر به‌سزایی دارد (۲۴). حداکثر دمای تولیدی ۶۳ درجه سانتیگراد است. در این دما کلیه پاتوژن‌ها و بذر علف‌های هرز موجود در کمپوست نابود می‌شود. این یافته با نتایج تحقیقات Kulikowaski و همکاران در لهستان (۱۳) در سال ۲۰۱۱، که حداکثر دما را ۶۲ درجه سانتیگراد گزارش کردند، Lu و همکاران در چین (۱۴) در سال ۲۰۰۹ که حداکثر دما ۶۹ درجه سانتیگراد بود و Grigatti و همکاران در ایتالیا (۲۵) در سال ۲۰۱۱، که حداکثر دما ۶۵ درجه سانتیگراد بود، مطابقت دارد. دمای ۶۳ درجه سانتیگراد به مدت سه روز در محدوده استانداردهای بهداشتی کمپوست کشورهای استرالیا (برای همه روش‌های کمپوست‌سازی دما به مدت حداقل ۳ روز بیش از ۵۵ درجه سانتیگراد باشد)، اتریش (برای همه روش‌های کمپوست‌سازی دما به مدت ۶ روز بیش از ۶۰ درجه سانتیگراد باشد یا به مدت ۳ روز بیش از ۶۵ درجه سانتیگراد باشد)، سوئیس (برای همه روش‌های کمپوست‌سازی دما به مدت یک هفته بیش از ۶۰ درجه سانتیگراد باشد) و آلمان (برای روش بسته یا در محفظه دما به مدت یک هفته بیش از ۶۰ درجه سانتیگراد باشد) قرار داشته و با استاندارد سازمان محیط زیست آمریکا برای کنترل پاتوژن‌ها و

در جدول شماره ۲ میانگین و انحراف معیار پارامترهای فیزیکی و شیمیایی لجن فاضلاب، زائدات پوست پسته شامل pH، هدایت الکتریکی، کربن آلی، ازت کل، نسبت C/N، پتاسیم، فسفر، سرب و کادمیوم و همین پارامترها در مخلوط اولیه لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته و کمپوست تولیدی نشان داده شده است.

## بحث

دما یک عامل کلیدی برای پایش فرایند کمپوست

جدول شماره ۲: میانگین و انحراف معیار پارامترهای فیزیکی و شیمیایی لجن فاضلاب، زائدات پوست پسته مخلوط اولیه لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته و کمپوست تولیدی

پارامتر	لجن فاضلاب		زائدات پوست پسته		مخلوط اولیه لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته		کمپوست تولیدی	
	میانگین ± انحراف معیار	حداقل	حداکثر	میانگین ± انحراف معیار	حداقل	حداکثر	میانگین ± انحراف معیار	حداقل
pH	۶/۹۱ ± ۰/۱۱	۶/۷۵	۷/۳۸	۶/۱۷ ± ۰/۰۴	۵/۷۱	۶/۵۹	۶/۴۳ ± ۰/۰۶	۶/۰۲
هدایت الکتریکی (dS/m)	۸/۴۶ ± ۰/۲۳	۷/۹۱	۹/۲۶	۱۷/۱ ± ۱/۶	۱۵/۳۹	۱۹/۰۲	۱۴/۳۲ ± ۲/۰۵	۱۱/۸۵
کربن آلی (درصد)	۲۷/۲۷ ± ۲/۰۲	۲۱/۰۴	۳۰/۰۶	۷۴/۳ ± ۳/۸۵	۶۵/۴	۸۰/۱۹	۶۳/۰۲ ± ۱/۰۵	۵۸/۳
ازت کل (درصد)	۴/۰۲ ± ۰/۰۸	۲/۸	۶/۰۵	۱/۸ ± ۰/۰۳	۱/۰۴	۲/۵۸	۲/۴۹ ± ۰/۰۷	۲/۰۵
نسبت C/N	۶/۴۷	۷/۶۴	۵/۰۵	۴۱/۲	۶۲/۸۸	۳۱/۰۸	۲۵/۳	۲۸/۲
فسفر (درصد)	۲/۰۵ ± ۰/۱۵	۱/۷۵	۳/۱	۰/۴ ± ۰/۰۸	۰/۳۵	۰/۶۷	۰/۸۸ ± ۰/۰۵	۰/۵۴
پتاسیم (درصد)	۰/۷۱ ± ۰/۰۹	۰/۵۹	۰/۸۴	۱/۶ ± ۰/۱	۱/۲۷	۰/۶۷	۰/۹۲ ± ۰/۰۳	۰/۷۸
کادمیوم (mg/kg)	۰/۹۷ ± ۰/۰۳	۰/۸۱	۱/۱	-	-	-	۰/۶۳ ± ۰/۰۲	۰/۴۹
سرب (mg/kg)	۱۰۲ ± ۴/۱۷	۸۶	۱۲۴	-	-	-	۸۹/۳ ± ۱/۹	۷۸
شاخص جوانه زنی (درصد)	-	-	-	-	-	-	-	-

اسپانیا (۲۹) در سال ۲۰۱۱، که رطوبت از ۶۰ درصد به ۳۵ درصد رسید، مطابقت داشت. میزان رطوبت کمپوست تولیدی در محدوده استانداردهای کمپوست درجه A و B دپارتمان اکولوژی واشنگتن بود ولی از استاندارد کمپوست ایران بیش تر بود (۲۶).

pH یکی از مهم ترین فاکتورهای اثر گذار بر جنس و فعالیت میکروبی فرایند کمپوست سازی است (۲۴). میزان pH در طی کمپوست سازی روندی افزایشی دارد. افزایش pH به علت تولید آمونیاک در اثر تجزیه مواد پروتئینی و تجزیه اسیدهای آلی است (۲۸). این یافته با نتایج تحقیقات Lu و همکاران که pH از ۷/۵ در روز اول کمپوست سازی به ۸/۷ افزایش یافت، Hacket و همکاران در کانادا (۱۶) در سال ۱۹۹۹ که pH از ۸/۲ در روز اول کمپوست سازی به ۹/۱ افزایش یافت و Himmanen و همکاران در فنلاند (۳۰) در سال ۲۰۱۰، که pH اولیه از ۴/۵ به ۶ افزایش یافت، مطابقت داشت. pH کمپوست تولیدی با استاندارد کمپوست رده ۱ و ۲ ایران، استاندارد کشور کانادا، رهنمود سازمان جهانی بهداشت و استانداردهای درجه B دپارتمان اکولوژی واشنگتن برای کمپوست قابل عرضه به بازار مطابقت داشت (۲۶). EC (هدایت الکتریکی) نشان دهنده غلظت نمک های محلول در کمپوست است. کاربرد کمپوست با سطوح بالای EC موجب شوری خاک و مشکلات سمیت بیولوژیکی می شود (۲۴). EC مخلوط لجن با پوست پسته از ۱۴/۳۲ ds/m پس از ۳۰ روز به

استاندارد کشور کانادا ( برای روش های در مخزن و توده ثابت با هوادهی ساکن دما به مدت سه روز بیش از ۵۵ درجه سانتیگراد باشد) نیز مطابقت دارد (۲۶). در جدول شماره ۳، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی کمپوست تولیدی از مخلوط لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته در مقایسه با استانداردهای کمپوست ایران، WHO World Health Organization (WHO) دپارتمان اکولوژی واشنگتن و کشور کانادا آورده شده است.

رطوبت برای حمل مواد مغذی محلول مورد نیاز جهت فعالیت های متابولیکی و فیزیولوژیکی میکروارگانیسم ها اهمیت دارد (۲۷). کاهش رطوبت در طی فرایند کمپوست سازی به عنوان شاخصی از مقدار تجزیه مطرح است. زیرا که تولید گرما با تجزیه همراه بوده و منجر به تبخیر آب می شود (۲۸). رطوبت اولیه مخلوط لجن و پوست پسته ۸۲ درصد است که بعد از طی ۳۰ روز فرایند کمپوست سازی به ۴۹ درصد کاهش یافت. این امر بیانگر روند خوب تجزیه مواد آلی توسط میکروارگانیسم ها است. این یافته با نتایج تحقیقات Lu و همکاران در تایلند (۲) در سال ۲۰۰۸، که گزارش کردند رطوبت اولیه از ۷۵ درصد به ۴۰ درصد کاهش یافت، Rihani و همکاران در مراکش (۱۱) در سال ۲۰۱۰ که رطوبت اولیه توده کمپوست ۷۲ درصد نهایتاً به ۴۳ درصد کاهش یافت، Tandy و همکاران در انگلستان (۱۵) در سال ۲۰۰۹ که رطوبت کمپوست از ۷۲ درصد به ۶۳ درصد کاهش یافت و Villaseñor و همکاران در

جدول شماره ۳: پارامترهای فیزیکی و شیمیایی کمپوست تولیدی از مخلوط لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته در مقایسه با سایر استانداردها

پارامتر	کمپوست تولیدی از مخلوط لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته		رهنمودهای WHO	استاندارد کمپوست ایران		استانداردهای کمپوست دپارتمان اکولوژی واشنگتن		استانداردهای کمپوست کشور کانادا
	پسته	لجن فاضلاب با زائدات پوست		رده یک	رده دو	درجه A	درجه B	
رطوبت (درصد)	۴۹	۷۲	۳۰-۵۰	حد اکثر ۱۵	حد اکثر ۳۵	۴۰-۶۰	۳۰-۷۰	۳۰-۵۰
pH	۷/۸	۱۱/۱۹	۶-۹	۶-۸	۶-۸	۵-۸	۵-۸	۵/۵-۸/۵
هدایت الکتریکی (ds/m)	۱۱/۱۹	۱۶/۵	-	۱۴	۱۴	<۲	<۳	۲۳/۵
نسبت C/N	۱۶/۵	۱۶/۵	-	۱۰-۱۵	۱۰-۱۵	۱۵	۲۰	۱۳-۲۲
فسفر (درصد)	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۲-۳/۸	۰/۳-۳/۸	۰/۳-۳/۸	-	-	۰/۲۵
پتاسیم (درصد)	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۱-۲/۸	۰/۵-۱/۸	۰/۵-۱/۸	-	-	۰/۲
کادمیوم (mg/kg)	۰/۴۷	۰/۴۷	۱۵-۴۰	۱۰	۱۰	-	-	۳
سرب (mg/kg)	۶۲/۱	۶۲/۱	۲۰۰-۴۰۰	۲۰۰	۲۰۰	-	-	۱۵۰
شاخص جوانه زنی (درصد)	۷۹/۲	۷۹/۲	-	حد اقل ۷۰	حد اقل ۷۰	۹۵	۹۰	-



۲۱ به ۱۸ کاهش یافت، Hacket و همکاران (۱۶)، نسبت C/N از ۶۲ به ۴۰ کاهش یافت، Grigati و همکاران (۲۵)، نسبت C/N اولیه ۱۹/۴ در طی کمپوست سازی به ۱۴ کاهش یافت، Himmanen و همکاران (۳۰) در فنلاند در سال ۲۰۱۰ که کاهش نسبت C/N از ۲۰ به ۱۳ گزارش داد، مطابقت داشت. نسبت C/N کمپوست تولیدی در محدوده استاندارد کمپوست رده ۱ ایران و درجه B دپارتمان اکولوژی واشنگتن قرار داشت (۲۶).

فسفر و پتاسیم از مواد معدنی ضروری برای رشد گیاهان هستند. میزان فسفر و پتاسیم کمپوست تولیدی در محدوده استاندارد کمپوست رده ۱ ایران و رهنمودهای سازمان جهانی بهداشت قرار داشت (۲۶). بنابراین کاربرد این کمپوست جهت کشاورزی توصیه می شود. وجود غلظت بالای فلزات سنگین در کمپوست، یکی از مهم ترین دلایل نگرانی در خصوص کاربرد کمپوست در زمین است. فلزات سنگین می توانند بر رشد و سلامت گیاه، سلامت دام ها و در نهایت بر سلامت انسان تأثیر گذار باشند (۱۱). بنابراین پایش میزان آن ها در کمپوست اهمیت دارد. میزان کادمیوم و سرب در طی فرایند کمپوست سازی کاهش می یابد که علت آن آبشویی، آن ها است. این یافته با نتایج تحقیق Hacket و همکاران (۱۶) در کانادا در سال ۱۹۹۹ که میزان کادمیوم از ۰/۵ به ۰/۰۶ و سرب از ۳ به ۲ کاهش یافت، Villaseñor و همکاران (۲۹) در اسپانیا در سال ۲۰۱۱، میزان سرب اولیه از ۸۸/۲ میلی گرم در کیلوگرم در کمپوست تولیدی قابل تشخیص نبود، مطابقت داشت. میزان سرب و کادمیوم کمپوست تولیدی در محدوده استاندارد ایران و سازمان بهداشت جهانی قرار دارد (۲۶).

شاخص جوانه زنی جهت تعیین سمیت گیاهی در کاربرد کمپوست برای گیاهان به کار می رود و نشانگر حضور یا عدم حضور ترکیبات فیتوتوکسیک در کمپوست است (۱۲، ۲۲). شاخص جوانه زنی کمپوست تولیدی ۷۹/۲ درصد است که در محدوده استاندارد

۱۱/۹۱ کاهش یافت. این کاهش به دلیل آبشویی نمک ها از توده کمپوست و نیز به علت کاهش مواد محلول در آب، تبخیر آمونیاک و ترسیب نمک های معدنی در طی فرایند کمپوست سازی است (۲۰). این یافته با نتایج تحقیقات Grigati و همکاران در ایتالیا (۲۵) در سال ۲۰۱۱ که گزارش کردند EC از ۱/۶ ds/m به ۰/۷ ds/m کاهش یافت، مطابقت داشت و با نتایج تحقیق Tandy و همکاران در انگلستان (۱۵) در سال ۲۰۰۹ که EC از ۲/۶۷ ds/m به ۲/۸۴ ds/m افزایش یافت، مطابقت نداشت، که علت آن تولید ترکیبات معدنی و افزایش نسبی غلظت یون ها به دلیل کاهش جرم توده بر اثر تجزیه مواد آلی و هم چنین مواد اولیه برای کمپوست سازی می باشد. EC کمپوست تولیدی در محدوده استاندارد ایران و استاندارد کشور کانادا قرار دارد، ولی از استاندارد دپارتمان اکولوژی واشنگتن بیش تر است (۲۶).

نسبت C/N اولیه از مهم ترین فاکتورهای مؤثر بر کیفیت کمپوست است. این نسبت بر ترکیب جمعیت میکروبی فرایند کمپوست سازی به شدت اثر می گذارد. در مجموع نسبت C/N اولیه ۳۰ - ۲۵ به طور قابل توجهه ای برای کمپوست سازی ایده ال است (۲۷). نسبت C/N مخلوط لجن با پوست پسته در محدوده بهینه جهت شروع کمپوست سازی قرار دارد. نسبت C/N مخلوط لجن با پوست پسته در طی کمپوست سازی روندی کاهشی دارد. این کاهش به علت افت کربن به صورت دی اکسید کربن و تبدیل ازت کل توسط میکروارگانسیم ها به آمونیاک، بود (۲۸). نسبت C/N ۱۵ یا پائین تر، رسیدگی مناسب کمپوست را نشان می دهد ولی بین مقادیر آن و ساختار بیوشیمیایی محصول، ارتباط و همبستگی وجود نداشت (۲۷). در بعضی موارد نسبت C/N شاخص خوبی برای رسیدگی کمپوست نیست زیرا قیل از اینکه کمپوست به پایداری برسد، این نسبت به سطح مطلوب خود می رسد (۲۴). این یافته با نتایج تحقیقات Lu و همکاران (۱۴) که نسبت C/N از

محیطی مرتبط با دفع نامناسب لجن و زائدات پوست پسته را برطرف می نماید.

### سپاسگزاری

این تحقیق حاصل طرح تحقیقاتی با عنوان بررسی تولید کمپوست از مخلوط لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته، مصوب مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی، درمانی کرمان در سال ۹۲ است که با حمایت معاونت تحقیقات و فناوری این دانشگاه اجرا شده است. نویسندگان از همکاری دست اندر کاران سپاسگزاری می نماید.

کمپوست رده ۱ و ۲ ایران قرار دارد (۲۶). این یافته با نتایج تحقیق Ponsa و همکاران (۱۲) در اسپانیا در سال ۲۰۰۹، که شاخص جوانه زنی ۱۰۰ درصد بود، مطابقت ندارد. این تفاوت به علت مواد اولیه ای است که به عنوان حجیم دهنده به لجن اضافه شده اند و نیز نسبت اختلاط لجن با مواد حجیم دهنده می باشد.

کیفیت کمپوست تولیدی در اغلب موارد در محدوده استاندارد کمپوست ایران قرار دارد لذا کمپوست تولیدی جهت کاربرد به عنوان اصلاح کننده خاک مناسب و جایگزین خوبی برای کودهای شیمیایی می باشد. بنابراین کمپوست لجن فاضلاب با زائدات پوست پسته، مشکلات بهداشتی و زیست

### References

1. Shirani H, Abolhasani Zrraatkar M, Lakzian A, Akhgar A. Decomposition rate of municipal wastes compost, vermi compost, manure and Pistaco compost in different soil texture and salinity in laboratory condition. *J Water Soil*. 2011; 25(1): 84-93 (persian).
2. Lu LA, Kumar M, Tsai JC, Lin JG. High-rate composting of barley dregs with sewage sludge in a pilot scale bioreactor. *Bioresour Technol*. 2008; 99 (7): 2210-2217. PMID: 17606369.
3. Alidadi H, Najafpoure AA. Determining the Compost Maturity Time in Biosolids of Municipal Wastewater Treatment plant. *J Mazandaran Univ Med Sci*. 2011; 21(85): 85-90 (persian).
4. Jouraiphy A, Amir S, Gharous ME, Revel JC, Hafidib M. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste. *Int Biodeter Biodegr*. 2005; 56(2): 101-108.
5. Wei YS, Fan YB, Wang MJ. A cost analysis of sewage sludge composting for small and mid-scale municipal wastewater treatment plants. *Resour Conserv Recy* 2001; 33(3): 203-216.
6. Amouei A, Asgharnia HA, Khodadi A. Study of compost quality from rural solid wastes (Babol, Iran). *J Mazandaran Univ Med Sci*. 2010; 19 (74): 55-61 (Persian).
7. Hachicha R, Rekik O, Hachicha S, Ferchichi M, Woodward S, Moncef N, et al. Co-composting of spent coffee ground with olive mill wastewater sludge and poultry manure and effect of *Trametes versicolor* inoculation on the compost maturity. *Chemosphere*. 2012; 88 (6): 677-682.
8. Turovskiy IS, Mathai PK [translated by] Yaghmaeean K, Jafarzadeh Haghhighifard N, Jorfi S, Khalili A. Wastewater sludge processing. Tehran: Khaniran; 2012. (Persian).
9. Puyuelo B, Gea T, Sánchez A. A new control strategy for the composting process based on

- the oxygen uptake rate. *Chem Eng J.* 2010; 165(1): 161-169.
10. Ruggieri L, Artol A, Gea T, Sa'nchez A. Biodegradation of animal fats in a co-composting process with wastewater sludge. *Int Biodeter Biodegr.* 2008; 62(3): 297-303.
  11. Rihani M, Malamis D, Bihaoui B, Etahiri S, Loizidou M, Assobhei O. In-vessel treatment of urban primary sludge by aerobic composting. *Bioresour Technol.* 2010; 101(15): 5988-5995. PMID:20335022
  12. Ponsa' S, Pagans E, Sa'nchez A. Composting of dewatered wastewater sludge with various ratios of pruning waste used as a bulking agent and monitored by respirometer. *Biosyst Engine.* 2009; 102(4): 433-443.
  13. Kulikowska D, Klimiuk E. Organic matter transformations and kinetics during sewage sludge composting in a two-stage system. *Bioresour Technol.* 2011; 102(23): 10951-10958. PMID: 21978622.
  14. Lu Y, Wu X, Guo J. Characteristics of municipal solid waste and sewage sludge co-composting. *Waste Manag.* 2009; 29(3): 1152- 1157. PMID: 18783931.
  15. Tandy S, Healey JR, Nason MA, Williamson JC, Jones DL. Heavy metal fractionation during the co-composting of biosolids, deinking paper fibre and green waste. *Bioresour Technol.* 2009; 100(18): 4220-4226. PMID: 19386494.
  16. Hackett GAR, Easton CA, Duff SJB. Composting of pulp and paper mill fly ash with wastewater treatment sludge. *Bioresour Technol.* 1999; 70(3): 217-224.
  17. Malakootian M, Yaghmaeian K, Mobini M. Feasibility of the Compost Production Using Pistachio Hull and Mixed of Pistachio Hull and Broiler Litter. *Tolooe Behdasht (TB).* 2014; 12 (4): 24-35 (Persian).
  18. Shakeri P. Pistachio hull residues on foods containing plates using lamb feedlot performance. *kerman: Institute of Animal Science pub,* 2009. (Persian)
  19. Doublet J, Francou C, Poitrenaud M, Houot S. Sewage sludge composting: Influence of initial mixtures on organic matter evolution and N availability in the final composts. *Waste Manag.* 2010; 30(10): 1922-1930. PMID: 20627507
  20. Manios T, Stentiford EI. Heavy Metals Fractionation During the Thermophilic Phase of Sewage Sludge Composting in Aerated Static Piles. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng.* 2006; 41(7): 1235-1244. PMID: 16854797
  21. Paredes C, Bernal MP, Cegarra J, Roig A. Bio-degradation of olive mill wastewater sludge by its co-composting with agricultural wastes. *Bioresour Technol.* 2002; 85(1): 1-8.
  22. An CJ, Huang GH, Yao Y, Sun W, Anb K. Performance of in-vessel composting of food waste in the presence of coal ash and uric acid. *J Hazard Mater* 2012; 15(203- 204): 38- 45. PMID:22188789
  23. Compost- Sampling and Physical and Chemical Test Methods. 1st.Edition, Standard Number: 13320. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. Tehran:2011. Availableat: <http://www.isiri.org/portal/files/std/13320.PDF>. Accessed Jun 26, 2014 (Persian).
  24. Zhang J, Zeng G, Chen Y, Yu M, Yu Z, Li H, et al. Effects of physic-chemical parameters on the bacterial and fungal communities during agricultural waste composting. *Bioresour Technol.* 2011; 102(3): 2950- 2956. PMID: 21146982
  25. Grigatti M, Cavani L, Ciavatta C. The evaluation of stability during the composting of different starting materials: Comparison of

- chemical and biological parameters. *Chemosphere*. 2011; 83(1): 41-48. PMID: 21277001.
26. Zazooli MA, Bagheri Ardebilian M, Ghahremani E, Ghorbanian Elaheabd M. Principles of compost technology. Tehran: Khaniran; 2012. (Persian).
27. Guo R, Li G, Jiang T, Schuchardt F, Chen T, Zhao Y, et al. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresour Technol*. 2012; 112: 171-178. PMID: 22437050.
28. Liu D, Zhang R, Wu H, Xu D, Tang Z, Yu G, et al. Changes in biochemical and microbiological parameters during the period of rapid composting of dairy manure with rice chaff. *Bioresour Technol*. 2011; 102(19): 9040-9049. PMID: 21835612.
29. Villaseñor J, Rodríguez L, a FJF. Composting domestic sewage sludge with natural zeolites in a rotary drum reactor. *Bioresour Technol*. 2011; 102(2): 1447-1454.
30. Himanen M, Hänninen K. Composting of bio-waste, aerobic and anaerobic sludges—Effect of feedstock on the process and quality of compost. *Bioresour Technol*. 2011; 102(3): 2842-2852.