علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و یکم، شماره هفت، مهر ماه ۹۸

تأثیر ترکیب مواد ورودی بر کیفیت کمپوست تولیدی به روش توده‌های استاتیک با هوادهی فعال در مناطق روستایی

(مطالعه موردی: روستای سولقان)

قاسمعلی عمرانی[۱]

محمد علی عبدلی[۲]

مهیار صفا[۳*]

Mahyarsafa77@yahoo.com

تاریخ دریافت:۹۵/۱۱/۱۹ **تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۳/۰۱**

چکیده

زمینه و هدف: بررسی فرایند تولید کمپوست از پسماندهای تفکیک شده روستایی به روش توده‌های ساکن با هوادهی فعال از نظر درصد ترکیب مواد تشکیل‌دهنده آنها، شرایط و مدت زمان فرایند عمل‌آوری، تحلیل پارامترهای کلیدی حاکم بر فرایند، کیفیت محصول نهایی و نیز ارزیابی اقتصادی هزینه‌ها و درآمد، از مهم‌ترین اهداف این تحقیق می‌باشد.

روش بررسی: در این مطالعه پس از تفکیک پسماندهای روستایی، دو توده کمپوست یکی شامل ۱۰۰ درصد پسماند فسادپذیر و توده دیگر شامل ۷۵ درصد پسماند فسادپذیر و ۲۵ درصد فضولات گاوی ایجاد گردید. برای تخمین بهتر متغیرهای مربوط به فرایند رسیدگی و شناسایی خطاهای مشاهده، از سه تکرار استفاده گردید. چهار متغیر اصلی رطوبت، اسیدیته، دمای محیط و درون توده و نسبت C/N برای هر یک از توده‌ها اندازه‌گیری شد. تحلیل آماری جامع از نظر مقایسه پارامترها، بررسی همبستگی متغیرها و تحلیل واریانس یک طرفه بر روی پارامترهای اندازه‌گیری شده، انجام گرفت.

یافته‌ها: میزان کاهش کل کلیفرم‌ها در هر دو بستر در حدود log۳ ملاحظه گردید. میزان کاهش تخم انگل در توده‌های حاوی ۱۰۰ درصد پسماند در حدود ۷۵/۸ درصد و در توده‌های مخلوط با فضولات گاوی در حدود ۹۵ درصد بدست آمد. فلزات سنگین سرب، کادمیوم و نیکل در هیچ کدام از توده‌ها، شناسایی نشدند. میانگین نسبت C/N در محصول نهایی در این روش برابر با ۱۲/۳۵ و میانگین pH نیز برای کمپوست رسیده برابر ۸/۰۵ ثبت گردید.

۱- استاد گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- دکتری مهندسی محیط زیست/ گرایش مواد زائد جامد، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران* (مسوول مکاتبات).

بحث و نتیجه‌گیری: مقایسه محصول نهایی با استانداردهای ایران، آمریکا و کانادا نشان می‌دهد که روش استاتیک در هر دو ترکیب سبب تثبیت پسماندهای جامد و در نهایت منجر به تولید کمپوست مناسب شده است. از نظر ارزیابی اقتصادی ملاحظه شد که نرخ بازده داخلی برای تولید کمپوست به روش استاتیک برابر با ۱۲/۴ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کمپوست، توده‌های استاتیک، نسبت کربن به ازت، pH، ارزش فعلی خالص

J. Env. Sci. Tech., Vol 21, No.7, September, 2019

The Impact of Input Material on Compost Quality Using Aerated Static Piles in Rural Areas

(Case Study: Sooleghan Village)

Ghasemali Omrani[1]
Mohammad Ali Abdoli [2]
Mahyar Safa[3]
Mahyarsafa77@yahoo.com

Accepted: 2017.05.22 Received: 2017.02.07

Abstract

Background and objective: In this study the process of producing bio-compost from rural separated solid wastes using aerated static piles method was investigated. The combination of waste ingredients, conditions and duration of processing, analysis of key parameters governing the process, the quality of the final product as well as economic assessment of costs and revenues were the most important parameters that were considered.

Materials and Methods: After the separation of rural wastes, two compost piles, one containing 100 percent of putrescible wastes and another one containing 75% putrescible wastes and 25% of cow dung were created. To better estimating the variables related to process maturity and identifying the errors, three replications were applied. Four main variables including: moisture, pH, temperature and carbon to nitrogen ratio were measured for each of the piles. Comprehensive statistical analysis including the comparison of the variables, correlation between variables and analysis of one-way variance was performed for the measured parameters.

Findings: Total Coliform reduction in both kinds of waste compositions observed in approximately about 3log. Reduction of parasite eggs in piles containing 100% organic wastes was about 75.8% and in piles containing 75% organic wastes & 25% cow dung obtained about 95%. Heavy metals such as lead, cadmium and nickel, were not found in the piles. For finished compost the average of C/N and pH were recorded 12.35 & 8.05 respectively.

Discussion and Conclusion: Comparing the final product by Iranian, American and Canadian standards showed that static method stabilized solid wastes in both kinds of piles and eventually was led to the production of good compost. The economic evaluation showed that the internal rate of return (IRR) for producing compost, using aerated static piles method, is equal to 12.4%.

Key words: compost, aerated static piles, carbon to nitrogen ratio, pH, net present value

1-Professor of Environmental Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

2-Professor of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

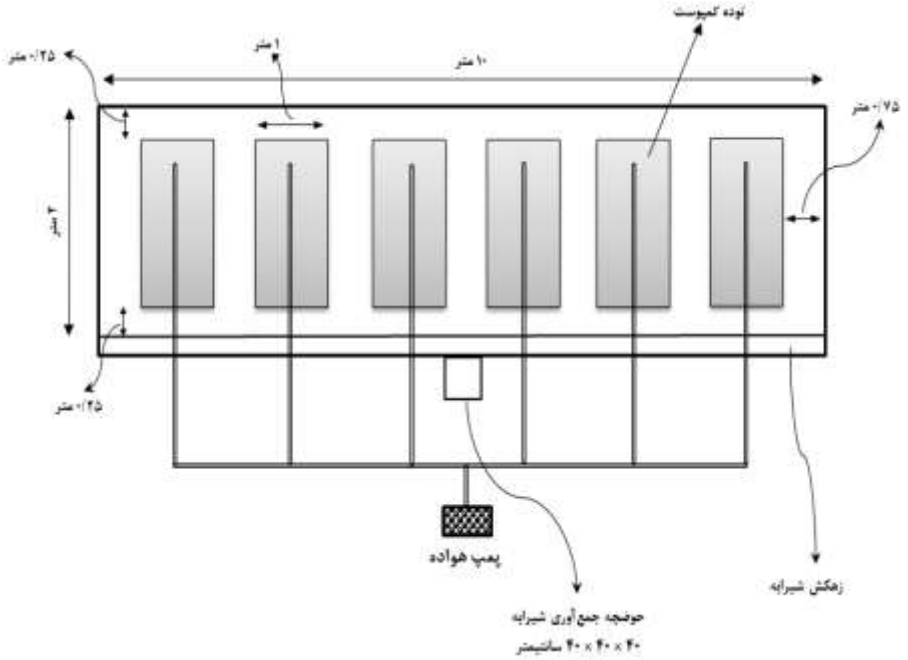
3-PhD of Environmental Engineering (Solid Waste Branch), Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran (Corresponding Author).

مقدمه

در حال حاضر بیش از ۱۰۰۰۰ تن پسماند عادی در مناطق روستایی کشور در روز تولید می‌شود که در حدود ۵۲/۴ درصد آن را اجزای فسادپذیر و مواد آلی تشکیل می‌دهند که قابلیت خوبی برای تبدیل به بیوکمپوست را دارا می‌باشد. یکی از مباحث مهم و مورد توجه در مدیریت پسماندهای جامد روستایی در کشور به ویژه در سال‌های اخیر، استفاده از همین پتانسیل برای بازیابی بخش فسادپذیر پسماندهای تولیدی (بیش از ۵۰۰۰ تن در روز) در راستای کمک به ساماندهی سیستم مدیریت پسماند روستایی توسط دهیاری‌ها می‌باشد (۱). انتقال پسماندهای فسادپذیر در اغلب مناطق به داخل محل‌های غیر اصولی دفن زباله، سبب افزایش آلودگی‌های مختلف در محیط زیست گردیده است. بازیافت و تبدیل پسماندهای فسادپذیر به ماده آلی (کمپوست) و کاهش حجم زباله‌های دفنی، نقش قابل ملاحظه‌ای را در کاهش آلودگی‌های محیط زیست در مناطق روستایی به ویژه در روستاهای واقع در مناطق ساحلی کشور، ایفا می‌نماید (۲،۱). از آنجا که تولید کمپوست به روش توده‌های ساکن هوادهی شده از کیفیت خوبی برخوردار بوده و همچنین به هزینه‌های کارگری و راهبری کم‌تری نیز نیاز دارد (۴)، لذا محور پژوهش حاضر برای بازیابی پسماندهای روستایی قرار گرفته است. روش ASP برای کمپوست‌سازی زایدات فضای سبز و پسماندهای آشپزخانه به ویژه در شرایط ترکیب با فضولات حیوانی روش ایده‌آلی است. با کمپوست‌سازی با هوادهی فعال، شرایط هوازی در سرتاسر توده کمپوست حفظ می‌شود و درجه حرارت توده قابل کنترل خواهد بود. این مسأله به نوبه خود فرآیند کمپوست‌سازی را تسریع و به تشکیل محصول کمپوست با کیفیت و عاری از پاتوژن ها، پارازیت‌ها و علف‌های هرز، منجر می‌شود. با کمپوست‌سازی به این روش، امکان کنترل بوهای نامطبوع و حشرات وجود دارد (۳،۷،۱۴). انتخاب روش مناسب برای تهیه کمپوست اهمیت زیادی از نظر کیفیت ماده آلی تولیدی، مدت زمان مورد نیاز برای عمل‌آوری کمپوست، سهولت تهیه، هزینه‌های کمتر و ... برای مدیریت‌های اجرایی در مناطق روستایی کشور دارد (۱)، بر همین اساس در این مطالعه چگونگی عملکرد روش ASP جهت تهیه کمپوست در مناطق روستایی با دو درصد مختلف مواد اولیه و از نظر رسیدگی کمپوست، خصوصیات فیزیکو شیمیایی و میکروبی محصول نهایی و همچنین ارزیابی اقتصادی آن، مورد بررسی و پایش قرار گرفته است.

روش بررسی

پایلوت مورد استفاده در این مطالعه شامل ۲ توده یکی شامل ۱۰۰ درصد پسماند فسادپذیر و توده دیگر شامل ۷۵ درصد پسماند فسادپذیر و ۲۵ درصد فضولات گاوی می‌باشد که در محل روستای سولقان واقع در شهرستان تهران ایجاد گردید. برای تخمین بهتر متغیرهای مربوط به فرایند رسیدگی و شناسایی خطاهای مشاهده، از سه تکرار استفاده گردید (مجموعاً ۶ توده برای بررسی بکار گرفته شد). توده‌های با شماره فرد (۱، ۳ و ۵) با ۱۰۰ درصد پسماند فسادپذیر و توده‌های با شماره زوج (۲، ۴ و ۶) با ترکیب ۷۵ درصد پسماند فسادپذیر و ۲۵ درصد فضولات گاوی و به شکل مثلث بارگیری شدند. برای ایجاد توده‌ها، در ابتدا پد کمپوست به طول ۱۰ متر و عرض ۲ متر و با شیب مناسب به سمت زهکش جمع‌آوری شیرابه احتمالی احداث گردید. ابعاد توده‌های بارگیری شده برابر با ۱/۵×۱×۰/۹ متر می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱- پلان واحد تولید کمپوست به روش توده‌های استاتیک با هوادهی فعال

Fig 1- ASP composting site plan

قابل ذکر است که برای جلوگیری از ورود رطوبت اضافی از راه بارندگی یا کاهش آن به دلیل تبخیر، از سقف و سرپوش مناسب استفاده گردید. برای تعیین آنالیز عنصری بر روی سه نمونه اخذ شده از پسماند ورودی و تعیین فرمول مواد اولیه (پسماند فسادپذیر روستایی) از دستگاه آنالیز عنصری حرارتی Costech Analytical Technologies آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تهران استفاده شد. تعداد، فواصل و قطر سوراخ‌ها و همچنین قطر لوله هوادهی، بر اساس دستورالعمل کمپوست‌سازی مقیاس متوسط آلبرتای کانادا محاسبه گردید (۱۲). به منظور جلوگیری از انسداد سوراخ‌های ایجاد شده، بر روی هر یک از لوله‌های هوادهی در هر توده به عرض ۲۵ سانتی‌متر شن‌ریزی انجام شد. در نهایت پس از بارگیری ۶ توده، فرایند کمپوست‌سازی در مدت ۱۱۲ روز تا زمان رسیدگی محصول مورد پایش و بررسی قرار گرفت. در ۲۵ روز غیر متوالی، چهار متغیر رطوبت، pH، درجه حرارت محیط و دمای درون توده‌ها توسط تجهیزات آزمایشگاهی (رطوبت‌متر لوترون مدل MS-7011، pH متر پرتابل قلمی مدل ۸۶۸۵ ساخت شرکت AZ و ترمومتر لوترون مدل TM-914C) در محل مورد بررسی قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری متغیرهای نامبرده از پروتکل روش‌های آزمایش ارائه شده توسط TMECC استفاده گردید (۱۶). برای تعیین نسبت C/N نیز تعداد ۲۵ نمونه در تاریخ‌های مورد نظر اخذ و برای اندازه‌گیری به آزمایشگاه ارسال شدند. آزمایشات لازم برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پسماند ورودی و کمپوست رسیده نیز بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. اندازه‌گیری گاز آمونیاک خروجی از توده‌ها توسط تیوب دتکتور آمونیاک و پمپ GASTEC مدل ۸۰۱ صورت پذیرفت. برای کنترل زمان‌بندی منظم هوادهی بر اساس میزان هوای مورد نیاز طراحی شده (کارکرد پمپ هواده در دو نوبت صبح و بعدازظهر)، از یک دستگاه تایمر آنالوگ ۲۴ ساعته theben استفاده شد. به منظور نمونه‌برداری صحیح از توده‌های کمپوست از پروتکل ارائه شده توسط «TMECC-02.01 » تحت عنوان «نمونه‌برداری میدانی از ترکیبات کمپوست» زیر بخش (02.01-A) با عنوان «عملیات و مبانی نمونه‌برداری

کمپوست»، ورژن ۲۰۰۲ استفاده گردید (۱۲،۱۵و۱۶). به منظور بررسی آمار توصیفی داده‌ها (میانگین و انحراف معیار) و میزان همبستگی پارامترهای اندازه‌گیری شده در فرایند کمپوست‌سازی (از طریق آزمون‌های پارامتریک پیرسون و ناپارامتریک اسپیرمن)، از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۳ استفاده گردید. همچنین برای مقایسه و ارتباط بین پارامترهای اندازه‌گیری شده در مراحل مختلف کمپوست‌سازی، آنالیز واریانس یک طرفه مورد استفاده قرار گرفت.

یافته‌ها

بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده میانگین مقدار چگالی پسماند فسادپذیر خام ورودی برابر با ۳۸۳ کیلوگرم بر مترمکعب و برای مخلوط ۷۵ درصد پسماند فسادپذیر و ۲۵ درصد فضولات گاوی (۵ روز پوسیده) این مقدار در حدود ۴۲۲ کیلوگرم بر مترمکعب اندازه‌گیری شد. به منظور تعیین مشخصات و ویژگی‌های مواد ورودی، چهار نمونه مشتمل بر دو نمونه از هر ترکیب و همچنین یک نمونه از فضولات گاوی برداشته و به آزمایشگاه منتقل شدند. نتایج بدست آمده در جداول (۱) و (۲) آمده است. آنالیز فیزیکی پسماندهای تولید شده در روستا با توجه به نمونه‌برداری انجام شده در فصل تابستان به شرح جدول (۳) می‌باشد. با توجه به درصد توزیع اجزای عناصر موجود در پسماند و ترکیب مولار آن‌ها بدون در نظر گرفتن خاکستر، فرمول شیمیایی بدون آب برای پسماندهای ورودی به صورت $C_{24.5}\ H_{36.8}\ O_{28.8}\ N$ تعیین گردید. با استفاده از رابطه تثبیت هوازی پسماند آلی و فسادپذیر (۴)، ظرفیت پمپ هواده برابر با ۷۴ cfm محاسبه شد.

جدول ۱- مشخصات و ویژگی‌های پسماند اولیه ورودی به پایلوت پس از تفکیک

Table 1- Specifications of input wastes after separation

شماره نمونه	وزن نمونه (Kg)	مشخصات نمونه	رطوبت (٪)	pH	نسبت C/N	شمارش کل کلیفرم‌ها (MPN/gww)	شمارش کل کلیفرم‌های مدفوعی (MPN/gww)	سالمونلا	شمارش تخم انگل (N/gww)
۱	۱	۱۰۰ درصد پسماند فسادپذیر خانگی	۷۸	۵/۴	۳۱	$۲/۳\times۱۰^{۷}$ (>۱۰۰۰)	۲×۱۰^{۴} (>۱۰۰۰)	منفی	مشاهده شد (۳۳ عدد)
۲	۱	۱۰۰ درصد پسماند فسادپذیر خانگی	۷۸	۵/۶					

۳	۱	۷۵ درصدپسماند فسادپذیر خانگی و ۲۵ درصد فضولات گاوی	۷۶	۶/۳	۲۹/۱	$۱/۴\times۱۰^{۸}$ (>۱۰۰۰)	$۱/۱\times۱۰^{۶}$ (>۱۰۰۰)	منفی	مشاهده شد (۴۱ عدد)
۴	۱	۷۵ درصدپسماند فسادپذیر خانگی و ۲۵ درصد فضولات گاوی	۷۷	۶/۱					

جدول ۲- مشخصات و ویژگی‌های فضولات گاوی مورد استفاده در تحقیق

Table 2- Specifications of cow dung used in the investigation

درصد رطوبت	pH	N کل	K_2O %	P_2O_5 %	EC (Ds/m)
۴۵	۷/۸	۱/۸۱	۱/۴۲	۰/۵۴	۱۸/۹

آمار توصیفی داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت، pH، دمای درون توده‌ها و نسبت C/N در جدول (۴) ارایه شده است. در این جدول مقادیر مورد نظر به تفکیک درصد اجزای تشکیل‌دهنده پسماند (۱۰۰ درصد پسماند/ ۷۵ درصد پسماند و ۲۵ درصد فضولات گاوی) آمده است. نتایج تغییرات رطوبت و pH در طی فرایند کمپوست بصورت مقایسه بین توده‌های مختلف فرد و زوج در شکل (۲) آمده است.

جدول ۳- نتایج بدست آمده از آنالیز فیزیکی پسماند اولیه ورودی به پایلوت کمپوست

Table 3- The results of the physical analysis of input wastes used in composting site

سایر مواد	لاستیک	چوب	نخاله‌های ساختمانی	منسوجات	شیشه	فلزات	مواد فسادپذیر	پلاستیک	کاغذ	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	سرانه تولید پسماند (گرم در روز)
۲/۵	۲	۶	۵	۴	۳/۵	۷/۵	۵۸	۷/۵	۴	۳۸۳	۷۰۰

جدول ۴- خلاصه نتایج مقادیر میانگین و انحراف معیار متغیرهای اندازه‌گیری شده در طول فرایند کمپوست‌سازی

Table 4- Results of mean values and standard deviations of the measured parameters during the composting process

درصد پسماند	رطوبت (%)		pH		دمای توده		نسبت C/N	
	Mean	Std. Deviation	Mean	Std. Deviation	Mean	Std. Deviation	Mean	Std. Deviation
۱۰۰ ٪ پسماند	۵۴/۹۳۳	۹/۱۶۵۶	۶/۹۸۳	۰/۹۶۶۰	۲۶/۳۰	۱۶/۴۶۲	۱۹/۴۸	۶/۴۵۱
۷۵ ٪ پسماند	۵۴/۶۵۳	۸/۹۲۳۸	۷/۰۰۹	۰/۸۳۳۰	۲۷/۴۱	۱۷/۷۳۴	۱۸/۹۳	۵/۹۰۹
Total	۵۴/۷۹۳	۹/۰۱۶۲	۶/۹۹۶	۰/۸۹۹۰	۲۶/۸۵	۱۷/۰۶۲	۱۹/۲۰	۶/۱۶۷

برای بررسی میزان همبستگی متغیرهای اندازه‌گیری شده (رطوبت، pH و میانگین تغییرات دمای توده) با نسبت کربن به ازت و نشان دادن ارتباط این متغیرها با متغیر وابسته C/N، با توجه به نرمال نبودن داده‌ها که از طریق آزمون کلموگروف اسمیرنوف مشخص گردید، نمودار پراکندگی آن‌ها ترسیم شد و برای بررسی معنی‌داری رابطه بین متغیرها از دو آزمون پارامتریک پیرسون و ناپارامتریک اسپیرمن استفاده گردید. نتایج حاصل از این تحلیل در جدول شماره (۵) آمده است.

جدول ۵- نتایج آزمون پارامتریک پیرسون و ناپارامتریک اسپیرمن برای بررسی رابطه بین متغیر وابسته نسبت کربن به ازت و سایر متغیرها

Table 5- Pearson parametric and non-parametric Spearman test results for studying the relationship between the dependent variable C/N ratio and other variables

متغیر وابسته	آزمون		رطوبت	pH	میانگین تغییرات دمای توده
نسبت C/N	پیرسون (پارامتریک) Pearson Correlation	Pearson Correlation	۰/۸۵۴	-۰/۹۳۳	۰/۸۸۶
		Sig. (2-tailed)	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
		N	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶
	اسپیرمن (ناپارامتریک) Spearman's rho	Spearman's rho	۰/۹۰۹	-۰/۹۱۲	۰/۸۷۸
		Sig. (2-tailed)	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
		N	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶

برای تعیین کیفیت میکروبی محصول نهایی، تعداد دو نمونه از توده‌های شماره ۵ و ۶ گرفته شد. بررسی کیفیت میکروبی نمونه‌های مورد نظر نشان می‌دهد که کاهش میزان کل کلیفرم‌ها و کلیفرم‌های مدفوعی در هر دو نوع ترکیب تشکیل‌دهنده توده‌ها رخ داده است. میزان کل کلیفرم‌های مدفوعی در پسماند خام ورودی بطور معنی‌داری بیش‌تر از ۱۰۰۰MPN/g بود (در نمونه‌های حاوی ٪ ۱۰۰ پسماند فسادپذیر در حدود ۲/۳ ×۱۰^{۷} MPN/gdw و در نمونه‌های مخلوط پسماند و فضولات گاوی در حدود ۱/۴ ×۱۰^{۸} MPN/gdw اندازه‌گیری و شمارش شد). این مقدار در کمپوست نهایی به میزان زیادی کاهش یافت و به کمتر از ۳ رسیده است. در ارتباط با باکتری سالمونلا، این باکتری در محصول نهایی مشاهده نگردید. کیفیت شیمیایی محصول نهایی مورد مطالعه به صورت میانگین اندازه‌گیری‌ها در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول ۶- خصوصیات شیمیایی کمپوست رسیده

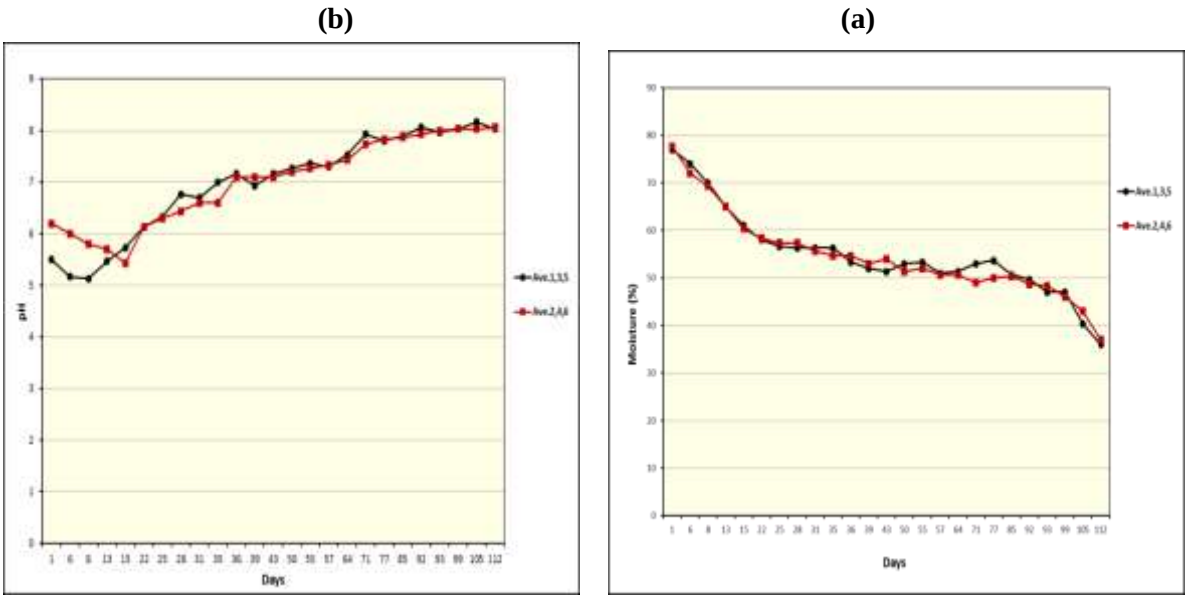
Table 6- Chemical properties of the final compost

مشخصات	مواد آلی %	K_2O %	P_2O_5 %	EC Ds/m	Cu ppm	Pb ppm	Cd ppm	Ni ppm	CEC meq/100g
روش آزمایش	گراویمتری	فلیم‌فتومتری	اسپکتروفتومتری	کنداکتومتر	اتمیک	اتمیک	اتمیک	اتمیک	فلیم‌فتومتری
ASP	۳۸/۱۶	۱/۷۵	۱/۸۴	۸/۱۳	۲۱/۲	ND	ND	ND	۹۶

بحث و نتیجه‌گیری

الف- تجزیه و تحلیل آماری داده‌های اندازه‌گیری شده

بر اساس داده‌های بدست آمده از اندازه‌گیری رطوبت توده‌ها در طول فرایند، ملاحظه می‌شود که رطوبت توده‌های استاتیک در آغاز فرایند ۷۵ الی ۸۰ درصد با توجه به هر توده متغیر بوده است. این رطوبت در انتهای فرایند سیر نزولی را طی نموده و به محدوده ۳۵ الی ۳۸ درصد می‌رسد.



شکل ۲- مقایسه میانگین تغییرات (a) رطوبت و (b) pH بین توده‌های مختلف (۱۰۰ و ۷۵ درصد پسماند)

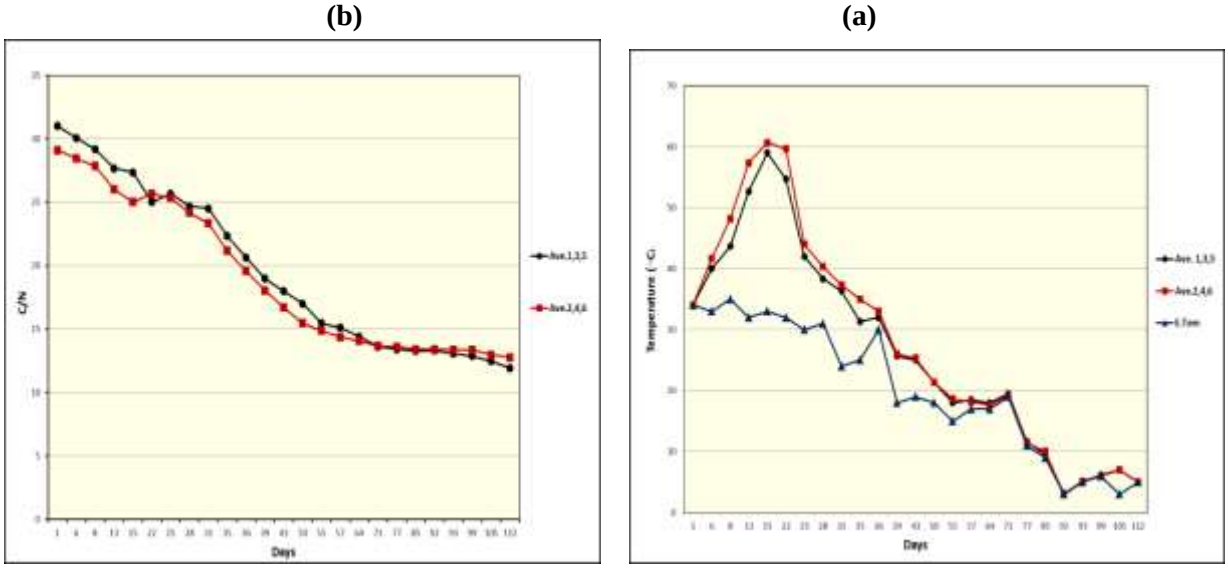
Fig 2: Mean changes in (a) moisture and (b) pH between different piles (100% wastes & 75% wastes)

شکل (۲-a) نشان می‌دهد که در توده‌های استاتیک رطوبت به تدریج کاهش یافته و تا پایان کار به مرز ۴۰٪ رسیده است که رطوبتی بسیار مناسب برای عملیات مختلف بر روی کمپوست از قبیل: سرند کردن محصول، مخلوط کردن و بسته‌بندی آن است. از طرف دیگر میزان pH توده‌های استاتیک از ۵/۵ برای مواد اولیه شامل ۱۰۰ درصد پسماند و ۶/۲ برای مواد اولیه حاوی ۷۵ درصد پسماند و ۲۵ درصد فضولات گاوی در ابتدای فرایند (شروع بارگیری واحد) متغیر بود. حداکثر افزایش مقدار pH برای توده‌های فرد به میزان ۸/۱ در انتهای فرایند بود (۴۷ درصد افزایش pH). حداکثر افزایش مقدار pH برای توده‌های زوج به میزان ۸/۲ در انتهای فرایند بود (۳۲ درصد افزایش pH). میانگین تغییرات pH برای توده‌های فرد برابر با ۶/۹۸ و انحراف معیار استاندارد برای این توده‌ها برابر با ۰/۹۷ می‌باشد. میانگین تغییرات pH برای توده‌های زوج برابر با ۷/۰۱ و انحراف معیار استاندارد برای این توده‌ها برابر با ۰/۸۳ می‌باشد. میانگین pH برای کل توده‌های روش استاتیک برابر با ۷/۰۰ و انحراف معیار استاندارد برای کل توده‌ها برابر با ۰/۹۰ می‌باشد. نتایج تغییرات درجه حرارت درون توده‌ها (همراه با تغییرات دمای محیط) و نسبت C/N در طی فرایند کمپوست بصورت مقایسه بین توده‌های مختلف فرد و زوج در شکل (۳) ارایه شده است.

در این روش ضمن حفظ رطوبت در محدوده مناسب، ملاحظه می‌شود که زمان تشکیل فاز ترموفیلیک و طول مدت آن (روزهای هشتم تا بیست و چهارم) بخوبی امکان‌پذیر شده است و در شرایط بهینه دمایی باکتریهای ترموفیل قرار دارند (در فاز ترموفیلیک

دمای توده‌ها به مرز ۶۰ درجه سلسیوس رسید). در این ارتباط میانگین درجه حرارت توده‌های شماره زوج (حاوی ۲۵ درصد فضولات گاوی)، اندکی بیش‌تر از توده‌های شماره فرد (شامل فقط پسماند فسادپذیر)، بودند. درجه حرارت توده‌ها در ابتدای فرایند (شروع بارگیری واحد) ۳۴ درجه سلسیوس برابر با دمای محیط بود. در انتهای فرایند پس از سرد شدن توده‌ها و ادامه فاز رسیدگی کمپوست، دمای توده‌ها تقریباً با دمای محیط یکسان گردید. میانگین تغییرات دما برای توده‌های فرد برابر با ۲۶/۳۰ درجه سلسیوس و انحراف معیار استاندارد برای این توده‌ها برابر با ۱۶/۴۶ می‌باشد. میانگین تغییرات دمای توده برای توده‌های زوج برابر با ۲۷/۴۱ درجه سلسیوس و انحراف معیار استاندارد برای این توده‌ها برابر با ۱۷/۷۳ می‌باشد. میانگین تغییرات درجه حرارت برای کل توده‌ها در روش استاتیک برابر با ۲۶/۸۵ درجه سلسیوس و انحراف معیار استاندارد برای کل توده‌ها برابر با ۱۷/۰۶ می‌باشد.

نسبت کربن به ازت توده‌ها از ۳۱ برای مواد اولیه شامل ۱۰۰ درصد پسماند و ۲۹/۱ برای مواد اولیه حاوی ۷۵ درصد پسماند و ۲۵ درصد فضولات گاوی در ابتدای فرایند (شروع بارگیری واحد) متغیر بود. حداکثر کاهش مقدار نسبت کربن به ازت برای توده‌های فرد به میزان ۱۰/۲ در انتهای فرایند بود (۶۷ درصد کاهش). حداکثر کاهش مقدار نسبت کربن به ازت برای توده‌های زوج به میزان ۱۱/۴ در انتهای فرایند بود (۶۱ درصد کاهش). میانگین تغییرات نسبت کربن به ازت برای توده‌های فرد برابر با ۱۹/۴۸ و انحراف معیار استاندارد برای این توده‌ها برابر با ۶/۴۵ می‌باشد. این مقدار برای توده‌های زوج برابر با ۱۸/۹۳ با انحراف معیار استاندارد برابر با ۵/۹۱ می‌باشد. میانگین تغییرات نسبت کربن به ازت برای کل توده‌ها در روش استاتیک برابر با ۱۹/۲۰ و انحراف معیار استاندارد برای کل توده‌ها برابر با ۶/۱۷ می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه میانگین تغییرات (a) دمای توده و (b) نسبت C/N بین توده‌های مختلف (۱۰۰ و ۷۵ درصد پسماند)

Fig 3- Mean changes in (a) temperature and (b) C/N ratio between different piles (100% wastes & 75% wastes)

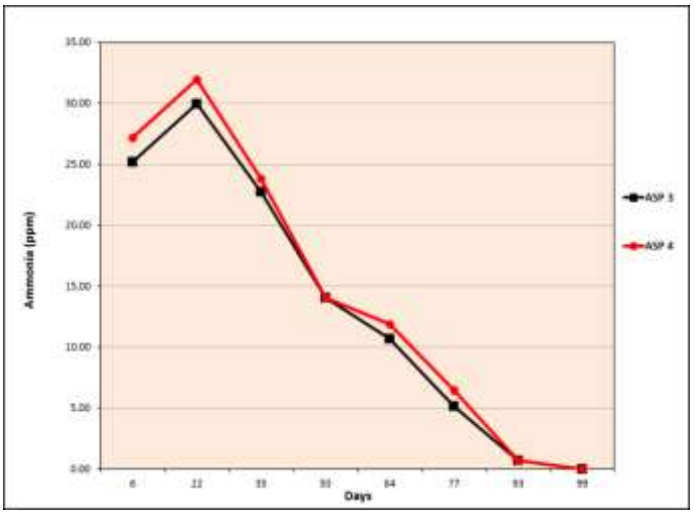
با انجام تحلیل واریانس عاملی و با بکارگیری نرم افزار SPSS، اثر همزمان عوامل بر روی هر یک از متغیرها بررسی شد. بر این اساس با بررسی مقدار سطح معنی‌داری آزمون فیشر، ملاحظه گردید که تأثیر جداگانه عامل هوادهی (Sig.=۰/۰۰۰ و

F=۱۸/۷۳۰) بر متغیر وابسته رطوبت معنی‌دار می‌باشد. یعنی به لحاظ آماری، متوسط رطوبت بین سطوح مختلف عامل هوادهی یکسان نبوده بلکه متفاوت بوده است. تأثیر جداگانه عامل درصد پسماند (Sig.=۰/۹۲۰ و F=۰/۰۱۰) بر متغیر وابسته میزان رطوبت و تأثیر تعاملی بین دو عامل هوادهی و پسماند نیز بر متغیر وابسته میزان رطوبت معنی‌دار نمی‌باشد. لذا به لحاظ آماری، میانگین رطوبت در سطح مختلف و توأم دو عامل هوادهی و پسماند متفاوت نبوده‌اند زیرا مقدار .Sig آن بیش‌تر از ۰/۰۵ و برابر ۰/۸۴۱ شده است. علاوه بر آن ضریب "R Squared" که مقدار تعدیل شده آن برابر با ۰/۰۵ می‌باشد، نشان می‌دهد که این عوامل به طور مشترک توانسته‌اند حدود ۵ درصد از واریانس متغیر رطوبت را تبیین کنند.

تأثیر جداگانه عامل هوادهی (Sig.=۰/۰۳۴ و F=۴/۵۳۲) بر متغیر وابسته pH نیز معنی‌دار می‌باشد. به عبارت دیگر با اطمینان ۹۵ درصد مقدار pH در سطوح مختلف هوادهی متفاوت است. تأثیر جداگانه عامل درصد پسماند (Sig.=۰/۴۱۶ و F=۰/۶۶۳) بر متغیر وابسته میزان pH و تأثیر تعاملی بین دو عامل هوادهی و پسماند نیز بر متغیر وابسته میزان pH معنی‌دار نمی‌باشد. در نتیجه به لحاظ آماری، میانگین pH در سطح مختلف و توأم دو عامل هوادهی و پسماند متفاوت نبوده‌اند زیرا مقدار .Sig آن بیش‌تر از ۰/۰۵ و برابر ۰/۵۷۳ شده است. تأثیر جداگانه عامل هوادهی (Sig.=۰/۰۲۳ و F=۵/۲۰۹) بر متغیر وابسته میانگین تغییرات دمای توده معنی‌دار می‌باشد. در نتیجه به لحاظ آماری، متوسط میانگین تغییرات دمای توده بین سطوح مختلف عامل هوادهی یکسان نیست. همچنین تأثیر جداگانه عامل درصد پسماند (Sig.=۰/۶۳۸ و F=۰/۲۲۱) بر متغیر وابسته میزان میانگین تغییرات دمای توده و تأثیر تعاملی بین دو عامل هوادهی و پسماند نیز بر متغیر وابسته میزان میانگین تغییرات دمای توده معنی‌دار نمی‌باشد. مقدار تعدیل شده " R Squared" در این بررسی برابر با ۰/۰۰۸ بدست آمد.

تأثیر جداگانه عامل هوادهی، تأثیر جداگانه عامل درصد پسماند و تأثیر تعاملی بین دو عامل هوادهی و پسماند بر متغیر وابسته میزان نسبت C/N معنی‌دار نمی‌باشد. مقدار تعدیل شده ضریب "R Squared" در این بررسی برابر با ۰/۰۰۳ بدست آمد. نتایج حاصل از جدول شماره (۵) نشان می‌دهد که بین نسبت کربن به ازت و رطوبت توده‌ها و نیز میانگین تغییرات دمای توده‌ها؛ رابطه مستقیم وجود دارد. در مقابل بین نسبت C/N و pH رابطه معکوس ملاحظه می‌شود. برای مشخص شدن این موضوع که تفاوت‌های موجود بین میانگین‌ها حاصل شانس نبوده و ناشی از تأثیر عمل آزمایش می‌باشد، از تحلیل واریانس یک طرفه استفاده گردید. مقدار آزمون فیشر در این مطالعه در سطح خطای ۰/۰۵ و با اطمینان ۹۵ معنی‌دار است زیرا مقدار .Sig بدست آمده برابر ۰/۰۰۰ و کم‌تر از ۰/۰۵ شده است. به عبارتی مقدار نسبت C/N در سطوح مختلف عامل دوره فرآیند کمپوست‌سازی برای روش استاتیک با اطمینان ۹۵ درصد متفاوت می‌باشد.

در طول دوره فرایند کمپوست‌سازی تعداد ۸ نمونه از طریق دتکتور تیوب گاز آمونیاک، برداشته و میزان انتشار این گاز قرائت گردید. نتایج حاصل از قرائت مقادیر آمونیاک منتشر شده پس از اعمال ضرایب تصحیح درجه‌حرارت، رطوبت و فشار در شکل (۴) ترسیم شده است



شکل ۴- مقایسه غلظت گاز آمونیاک خروجی از دو توده با درصد ترکیب پسماند متفاوت

Fig 4: Comparison of NH_3 emissions from two kinds of piles with different waste composition

باکتری‌های نیتروزوموناس آمونیوم را بـه نیتریـت و بـاکتری‌هـای نیتروباکتر نیتریت را به نیتـرات تبـدیل مـی‌کننـد. بـاکتری‌هـای نیتروزوموناس رشدشان آهسـته بـوده و در دماهـای بـیش از ۴۰ درجه سلسیوس غیرفعال می‌شوند (۱۰). بالا رفتن میـزان انتشـار گاز آمونیاک با بالا رفتن میزان دمای توده‌ها در فاز ترموفیلیـک را می‌توان به این امر مرتبط دانست. در ادامه و در طول مدت زمـان فرایند تولید کمپوست (فاز مزوفیلیک) همان‌طور که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود، میزان انتشار گاز آمونیاک سیر نزولی دارد. ایـن مسأله به علت آن است که در دوره فراینـد از نیتـروژن آمونیـاکی کاسته شده و برعکس بر مقدار نیتروژن نیتراتی به علـت فعالیـت نیتروباکترها افزوده می‌گردد. از طرف دیگر میزان غلظت آمونیاک خروجـی در طـول فراینـد در تـوده‌هـای زوج انـدکی بـیش‌تـر از توده‌های فرد است. این امر را می‌توان بـه دلیـل وجـود فضـولات گـاوی حـاوی نیتـروژن بـالاتر در تـوده‌هـای زوج در مقایسـه بـا توده‌های فرد دانست.

حداکثر تمرکز آمونیوم و تولید آمونیاک در توده‌ها در هفتـه‌هـای اولیه و زمانی است که درصد مواد آلی در توده‌ها بیشـترین اسـت. میزان انتشار گاز امونیاک در توده‌ها در حالت حداکثری خـود بـه مرز ppm ۳۲ نزدیک شده و در انتهای فرایند به صـفر رسـید. بـا روند کاهشی رطوبت در طول مدت فرایند تولید کمپوست، میزان انتشار گاز آمونیاک و غلظت آن پس از فاز ترموفیلیک نیز کـاهش پیدا نمود. نتایج تحقیق بیـانگر رابطـه معکـوس غلظـت آمونیـاک منتشر شده در مقابل افزایش میزان قلیائیت توده‌هـای کمپوسـت بویژه پس از سپری شدن فاز ترموفیلیک است. قابل ملاحظه است که میزان انتشار گاز آمونیاک بـا نمـودار میـانگین رونـد تغییـرات دمای توده‌ها تطابق خوبی دارد. از طرف دیگـر تغییـرات کاهشـی نسبت کربن بـه ازت نیـز بـا رونـد کـاهش غلظـت گـاز آمونیـاک خروجی از توده‌ها پس از گذشت تقریباً سه هفته مطابقت دارد.

ب- بررسی کیفیت میکروبی کمپوست رسیده

میـزان کـاهش کـل کلیفـرم‌هـا در بسـترهای دارای ۱۰۰ درصـد پسماند در حدود ۳log و در بسترهای دارای ۷۵ درصد پسماند و ۲۵ درصد فضولات گاوی در حدود ۴log ملاحظه شد. عـلاوه بـر آن میزان کـاهش تخـم انگـل در تـوده‌هـای حـاوی ۱۰۰ درصـد پسـماند در حـدود ۷۵/۸ درصـد و در تـوده‌هـای حـاوی مخلـوط پسماند و فضولات گاوی در حدود ۹۵ درصد بدست آمد. محصول نهایی بدست آمده از نظر کیفیت میکروبی، در محدوده اسـتاندارد شماره ۱-۱۳۳۲۱ ایـران (از نظـر میکروبـی در ردیـف کمپوسـت درجه «یک» استاندارد ایران قرار می‌گیرد و قابلیت استفاده بدون

محدودیت بهداشتی در کشاورزی را دارد)، استاندارد آمریکا (USEPA 40CFR, part 503) و استاندارد کانادا (CCME) قرار می‌گیرند (۱،۱۷،۱۲،۶). در ارتباط با شرایط دمای توده که در هر دو استاندارد آمریکا و کانادا مورد تأکید قرار گرفته است (دمای بالای ۵۵ درجهٔ سلسیوس برای حداقل ۳ روز برای توده‌های استاتیک)، ملاحظه می‌شود که تغییرات دمایی ثبت شده برای توده‌های استاتیک هر دو استاندارد را پاس می‌کنند.

ج- بررسی کیفیت شیمیایی کمپوست رسیده

میانگین هدایت الکتریکی برابر با ۸/۱۳ بدست آمد. میانگین فلز سنگین مس در توده‌ها برابر با ppm ۲۱/۲ بوده و در محدوده مجاز استانداردهای ملی و بین‌المللی قرار دارد. سایر فلزات سنگین (سرب، کادمیوم و نیکل) به دلیل کمبود مقادیرشان در توده‌ها، قابل شناسایی نبودند. علت مهم عدم وجود و یا پایین مقدار فلزات سنگین، عدم ورود پسماندهای صنعتی به جریان زباله‌های عادی و نیز جداسازی و تفکیک پسماندهای فسادپذیر از سایر اجزای زباله روستا می‌باشد. میزان ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) کمپوست رسیده meq/100g ۹۶ حاصل گردید. میزان تغییرات نسبت کربن به ازت برای محصولات نهایی در محدوده ۱۰/۲ تا ۱۴/۶ قرار دارد. میانگین کل نسبت C/N توده‌ها نیز برابر با ۱۲/۳۵ می‌باشد. تغییرات کربن آلی برای توده‌ها از ۲۰/۴ تا ۲۷/۸۶ درصد با میانگین ۲۴/۸۵ درصد و تغییرات نیتروژن کجلدال نیز از ۱/۸ تا ۲/۲ درصد با میانگین کل ۲/۰۲ درصد، بر اساس نتایج کسب شده از آزمایشگاه بدست آمد. همچنین تغییرات pH برای کمپوست رسیده در محدوده ۷/۹ الی ۸/۲ و با میانگین ۸/۰۵ ثبت گردید. جمع‌بندی تغییرات نسبت C/N و pH در جدول (۷) ارایه شده است.

جدول ۷- مقایسه میانگین مقادیر کربن آلی، نیتروژن کجلدال، نسبت کربن به ازت و pH در کمپوست رسیده

Table 7- Comparison of the average of organic carbon, Kjeldahl nitrogen, C/N and pH values in the matured compost

نوع توده	کربن آلی	نیتروژن کجلدال	نسبت کربن به ازت	pH
میانگین توده‌های فرد استاتیک	۲۳/۴۱	۱/۹۷	۱۱/۹۴	۸/۰۳
میانگین توده‌های زوج استاتیک	۲۶/۲۹	۲/۱۷	۱۲/۸۰	۸/۰۷
میانگین کل	**۲۴/۸۵**	**۲/۰۲**	**۱۲/۳۵**	**۸/۰۵**

همان‌طور که ملاحظه می‌شود میانگین کربن آلی برای توده‌های با شماره زوج بیش‌تر از حد قابل قبول استاندارد ۱۰۷۱۶ بوده و در رده «یک» قرار می‌گیرد ولی میانگین کربن آلی برای توده‌های فرد اندکی کم‌تراز حد مورد نظر بوده (۲۳/۴۱ درصد) و در محدوده رده «دو» استاندارد واقع می‌شود. از نقطه‌نظر میزان ازت کل و pH هر دو گروه فرد و زوج مشابه بوده و در محدوده رده «یک» استاندارد ۱۰۷۱۶ ایران طبقه‌بندی می‌شوند. با مقایسه کمپوست حاصله با استاندارد آمریکا مشخص می‌شود که محصولات نهایی از نظر میزان مواد آلی، نسبت کربن به ازت، pH، رطوبت و حدود مجاز فلزات سنگین این استاندارد را پاس می‌کند. از منظر هدایت الکتریکی در رده M-High واقع می‌شود (شوری بین ۵ تا ۱۰ میلی‌موهوس بر سانتی‌متر) و در نتیجه نیاز به رقیق‌سازی تا محدوده ۳ الی ۱۰ برابر، جهت استفاده در اغلب کاربری‌ها دارد. نسبت نیتروژن آمونیاکی به نیتروژن نیتراتی برای روش استاتیک ۱/۹۵ اندازه‌گیری شد که در محدوده کمپوست رسیده از نظر طبقه‌بندی آمریکا قرار می‌گیرند. مقایسه کمپوست

حاصله با استانداردهای کانادا مشخص می‌شود که محصولات نهایی از نظر میزان مواد آلی، نسبت کربن به ازت، pH، رطوبت و حدود مجاز فلزات سنگین این استانداردها را نیز پاس می‌کند. باید در نظر گرفت که از منظر میزان مواد آلی کل در استاندارد BNQ کمپوست بدست آمده در گروه B طبقه‌بندی می‌شوند ولی میزان حداقل مواد آلی کل در استاندارد کیفیت کمپوست اونتاریو را پوشش می‌دهد. از منظر هدایت الکتریکی محصول نهایی در محدوده مجاز استاندارد کیفیت کمپوست اونتاریو کانادا قرارنمی‌گیرد. مقایسه محصولات نهایی بدست آمده در این تحقیق با استاندارد ملی شماره ۱۰۷۱۶ ایران حکایت از آن دارد که این محصولات در محدوده کمپوست رده «یک» این استاندارد قرار می‌گیرند.

د- ارزیابی اقتصادی تولید کمپوست به روش توده‌های استاتیک با هوادهی فعال

به منظور بررسی و ارزیابی اقتصادی فرایند تولید کمپوست در این روش، در ابتدا هزینه‌های راه‌اندازی (سرمایه‌گذاری اولیه) و راهبری تعیین و برآورد گردید. سپس ضمن بکارگیری روش ارزش فعلی خالص (NPV) و تعیین نرخ بازده داخلی و با استفاده از نرم‌افزار کامفار، مقدار NPV برای نرخ تنزیل ٪ ۶ ، نرخ مالیات ٪۷ و طول عمر ۱۰ سال کارکرد، برای فرایند کمپوست‌سازی محاسبه گردید. با توجه به مثبت شدن این مقدار برای فرایند (۱۶۸۱۱۳۳۹+)، می‌توان بیان نمود که در این نرخ تنزیل، تولید کمپوست به روش استاتیک برای سرمایه‌گذار بخش خصوصی جذابیت خواهد داشت. با توجه به انجام تحلیل حساسیت، مقدار NPV برای فرایند کمپوست‌سازی در نرخ‌های متفاوت تنزیل، به شرح جدول (۸) حاصل می‌گردد.

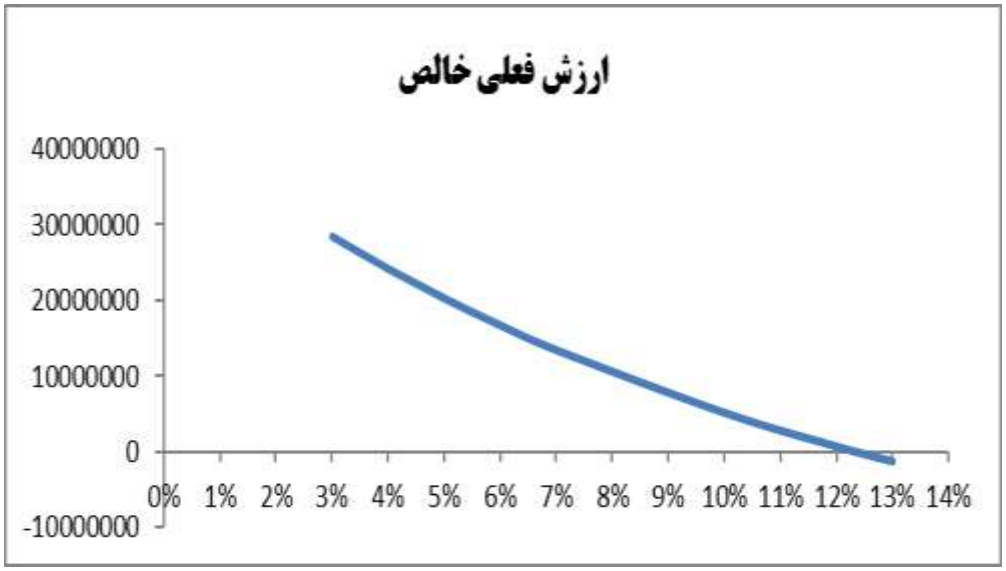
همان‌طور که در جدول (۸) مشاهده می‌شود، در نرخ‌های تنزیل ٪ ۱۳ و بالاتر، ارزش فعلی خالص پروژه منفی می‌شود و در نتیجه نشان می‌دهد که اگر سرمایه‌گذاران و بخش خصوصی از مبلغ سرمایه‌گذاری خود، بازدهی معادل ٪ ۱۳ یا بیش‌تر انتظار داشته باشند، تمایلی به سرمایه‌گذاری در تولید کمپوست به روش استاتیک با هوادهی فعال ندارند. اما اگر بازده مورد انتظار آن‌ها از مبلغ سرمایه‌گذاری، حدود ٪ ۱۲ و یا کم‌تر (یعنی در نرخ‌هایی که ارزش فعلی خالص پروژه مثبت است) باشند، با رضایت بیش‌تری در تولید کمپوست به روش استاتیک با هوادهی، سرمایه‌گذاری خواهند نمود.

جدول ۸- ارزیابی اقتصادی تولید کمپوست برای نرخ‌های مختلف تنزیل

Table 8-Economic evaluation of composting process in different discount rates

نرخ تنزیل (٪)	مقدار NPV
۳	۲۸۵۲۶۱۴۹
۴	۲۴۲۶۸۰۳۹
۵	۲۰۳۷۴۷۲۶
۶	۱۶۸۱۱۳۳۹
۷	۱۳۵۴۶۷۳۷
۱۰	۵۲۸۱۳۳۴
۱۲	۸۲۵۷۶۲
۱۳	-۱۱۴۰۰۷۸

شکل (۵) نشان می‌دهد که ارزش فعلی خالص پروژه در نرخ‌های تنزیل بالاتر از ٪ ۱۲/۴ منفی می‌شود و دارای توجیه اقتصادی نمی‌باشد. نرخ بازده داخلی (IRR) در روش استاتیک با هوادهی فعال معادل ٪ ۱۲/۴ می‌باشد که بیان‌کننده این موضوع است که اگر سرمایه‌گذاران از مبالغ سرمایه‌گذاری خود بازدهی بیش از ٪ ۱۲/۴ انتظار داشته باشند، این طرح برای آن‌ها توجیه اقتصادی نخواهد داشت.



شکل ۵- نمودار تغییرات ارزش فعلی خالص برای فرایند تولید کمپوست به روش استاتیک

Fig 5- Changes in the net present value for ASP composting method

در مجموع کمپوست نهایی تولید شده در روش توده‌های استاتیک، رنگ قهوه‌ای تیره مایل به سیاه داشته و فاقد بوی نامطبوع بود. محصولات نهایی از کیفیت خوب و رضایت‌بخشی برخوردار بودند و از نظر عدم جذب حشرات عملکرد خوبی از خود نشان دادند. مقایسه محصولات نهایی با استانداردهای ایران، آمریکا و کانادا نشان می‌دهد که روش بکار گرفته شده در این تحقیق سبب تثبیت پسماندهای جامد (در هر دو ترکیب ۱۰۰ درصد پسماند و ۷۵ درصد پسماند) و در نهایت منجر به تولید کمپوست مناسب شده است. بوی منتشره از توده‌های در حال کمپوست شدن به همراه اندازه‌گیری نسبت نیتروژن آمونیاکی به نیتروژن نیتراتی، اندازه‌گیری تغییرات دمایی و رطوبت توده‌ها و نیز اندازه‌گیری میزان انتشار گاز آمونیاک، این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد.

تشکر و قدردانی

بخشی از هزینه‌های انجام این تحقیق بویژه تأمین زمین، مصالح و نیروی انسانی مورد نیاز برای راه‌اندازی و راهبری واحدهای تولید کمپوست از طریق دهیاری روستای سولقان امکان‌پذیر گردید که بدین وسیله از دهیار محترم آن روستا جناب آقای مهندس عسگری تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Omrani, Gh, Ghafghazi, L., 2012. The principle of bicompost production in small communities. Tehran university press, chapter 2 & 7. (In persian)
2. Iranian Municipalities and Rural Municipalities Organization, 2010.

Comprehensive studies of rural wastes. (In persian)

3. Abdoli, M.A., Roshani, M.R., 2007. Vermicompost: design, build and implementation. Tehran university press. (In persian)
4. Tchobanoglous, G, Theisen, H, Vigil, S., 1993. Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill, Inc.
5. Brinton, William, F., 2000. Compost Quality Standards & Guidelines. Woods End Research Laboratory, Inc, Prepared for: New York State Association of Recyclers.
6. Bertoldi, M., Sequi, P., Lemmes, B., Papi, T., 1996. The Science of Composting. Chapman & Hall, Vol.1 & 2.
7. Brown, M.B., Gage, J., 2015. Lessons Learned in Aerated Static Pile (ASP) Composting. Compost Design Services, Olympia, WA, USA.
8. Dehghani, R., Charkhloo, E., Mostafaii, Gh., Asadi, Ma., Mousavi, G., Saffari, M., Pourbabaei, M., 2012. A study on the variations of temperature, moisture, pH and carbon to nitrogen ratio in producing compost by stack method. Journal of Kashan University of Medical Sciences, Vol. 15, No 4.
9. PN 1340, 2005. Guidelines for Compost Quality. CCME: Canadian Council of Ministers of the Environment.
10. Haug, R.T., 1996. Composting Plant Design and Process Management. Chapman & Hall, USA.
11. Ministry of the Environment- Ontario, 2004. Interim Guidelines for the Production and Use of Aerobic Compost in Ontario.
12. Alberta Environment & Olds College, 1999. Midscale Composting Manual. First Edition.
13. Ontario Ministry of the Environment, 2012. Ontario Compost Quality Standards. Waste Management Policy Branch.
14. Pichtel, J., 2005. Waste Management Practices; Municipal, Hazardous and Industrial. Taylor & Francis Group, CRC press.
15. Woods End Laboratories, 2016. Principals and Practice: Compost Sampling for Lab Analysis. Inc, USA.
16. Joint Project of the United States Department of Agriculture and The United States Composting Council, 2001. Test Methods for the Examination of Composting and Compost.