علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره شانزدهم، شماره ویژه ۹۳

بررسی تأثیر مقادیر مختلف خاک اره بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی کمپوست حاصل از پسماند شهری

جواد یوسفی [۱]

حبیب اله یونسی [۲*]

hunesi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۸۹/۷/۱۰ **تاریخ پذیرش:۸۹/۱۲/۱۲**

چکیده

زمینه و هدف: کمپوست‌سازی یکی از مناسب‌ترین روش‌های دفع پسماندهای شهری محسوب می‌شود، بنابراین تلاش برای بهبود فرایند آن و تولید محصولات با کیفیت بالا ضروری است. هدف از مطالعه حاضر بررسی اثر افزودن خاک اره بر فرایند کمپوست‌سازی پسماند شهری و نیز برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی کمپوست شامل درجه حرارت، pH، EC، غلظت فلزات سنگین و محتوای عناصر غذایی می‌باشد.

روش بررسی: ۴ توده پسماند تهیه و مقادیر ۰، ۱۶ ، ۳۲ و ۷۰ درصد خاک اره به آن‌ها افزوده شد. درجه حرارت توده‌ها به صورت روزانه ثبت گردید، میزان pH و EC به صورت هفتگی و غلظت فلزات سنگین و عناصر غذایی در محصول نهایی اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: توده بدون خاک اره نوسانات زیادی در درجه حرارت ترموفیلیک نشان داد و کاهش تدریجی درجه حرارت از روز ۳۳ آغاز شد. در حالی که در تیمارهای ۱۶ و ۳۲٪ از روز ۱۸ کاهش تدریجی درجه حرارت آغاز گردید. pH کلیه توده‌ها تا روز ۲۱ افزایش و سپس تا پایان فرایند کاهش ناچیز نشان داد. pH محصول نهایی در تیمار ۰٪ با میزان ۸/۱ بیشترین و در تیمار ۷۰٪ با میزان ۷/۷۳ کمترین بوده است. میزان EC نیز در کلیه تیمارها طی فرایند به میزان ناچیز افزایش یافت و تیمارهای دارای خاک اره میزان EC کمتری را در محصول نهایی نشان دادند به گونه‌ای که تیمار ۰٪ با میزان ۴/۸۸۴ بیشترین و ۳۲٪ با میزان ۴/۲۳۵ کمترین EC را دارا بودند. غلظت کلیه فلزات سنگین و عناصر غذایی به جز سدیم و پتاسیم با افزودن خاک اره کاهش یافت که دلیل این کاهش اثر رقیق‌سازی خاک اره به دلیل محتوای کم فلزات بوده است. غلظت سدیم با افزودن خاک اره افزایش نشان داد که دلیل آن غلظت بالای سدیم در خاک اره و آب مورد استفاده جهت آبیاری می‌باشد.

نتیجه‌گیری: افزودن خاک اره به توده کمپوست سبب کنترل نوسانات درجه حرارت توده و حفظ درجه حرارت ترموفیلیک در مرحله فعال کمپوست-سازی می‌گردد. هم چنین سبب بهبود کیفیت کمپوست جهت استفاده در کشاورزی ، کاهش غلظت فلزات سنگین و در نتیجه کاهش اثرات منفی آن بر سلامتی می‌شود.

واژه های کلیدی: پسماند شهری، خاک اره، کمپوست‌سازی، کیفیت، زاهدان.

۱- عضو هیأت علمی دانشگاه ولایت

۲- عضو هیأت علمی گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس*(مسوول مکاتبات)

مقدمه

یکی از معضلات جامعه شهرنشین امروز رشد سریع جمعیت، افزایش مواد مصرفی و در نتیجه تولید روز افزون پسماندهای شهری است که نیازمند برنامه‌ریزی اصولی جهت دفع صحیح می‌باشد. فرایند کمپوست‌سازی یکی از مناسب‌ترین اقدامات جهت دفع پسماندهای شهری به نظر می‌رسد و هم‌اکنون به عنوان یک روش زیست‌محیطی و اقتصادی در مجامع علمی و اجرایی مطرح است (۱ و ۲). کمپوست‌سازی یک فرایند بیولوژیک هوازی است که از میکروارگانیسم‌ها برای تبدیل مواد آلی تجزیه پذیر به محصول هوموس مانند استفاده می کند. تجزیه زیستی مواد آلی سبب تبدیل نیتروژن ناپایدار به شکل آلی پایدار می‌گردد، از بین رفتن عوامل بیماری‌زا را به دنبال دارد و سبب کاهش حجم پسماند می‌شود (۳). کمپوست حاصل از این فرایند می‌تواند سطح مواد آلی موجود در خاک را بهبود بخشد، شرایط لازم جهت رشد گیاه را مهیا نماید، ظرفیت نگهداری آب را در خاک افزایش دهد و در نتیجه باروری طولانی مدت آن را تضمین کند (۴). بهبود فرایند کمپوست‌سازی پسماند شهری برای تولید محصولات با کیفیت بالا جهت کاربرد موفق آن در کشاورزی ضروری است. معیارهای کیفیت شامل پارامترهای مختلفی نظیر درجه حرارت، رطوبت، نسبت کربن به نیتروژن، pH، هدایت الکتریکی (EC) و غلظت فلزات سنگین و عناصر غذایی می‌باشد (۵، ۶ و ۷).

درجه حرارت یکی از پارامترهای اصلی مورد استفاده برای پایش فرایند کمپوست‌سازی است، زیرا تغییرات آن به بسیاری از واکنش‌های بیولوژیکی درون توده کمپوست بستگی دارد (۸). در نتیجه ی تجزیه سریع مواد آلی و ترکیبات نیتروژنی توسط میکروارگانیسم‌ها مقدار قابل ملاحظه‌ای حرارت آزاد می‌شود و زباله‌ای که دارای درجه تجزیه نسبتاً خوب و مناسبی برای کودسازی است می‌تواند درجه حرارت حاصل از فعل و انفعال بیولوژیکی را در خود نگه داشته و به تدریج بالا ببرد (۹). بنابراین از عامل درجه حرارت برای بررسی رسیدگی و پایداری کمپوست نیز می‌توان استفاده کرد. بدین ترتیب که کمپوست رسیده و پایدار دارای درجه حرارت ثابتی در حدود درجه حرارت محیط اطراف است و با آبدهی و یا هوادهی توده درجه حرارت آن افزایش چشم‌گیری پیدا نمی‌کند (۱۰). pH و EC دو پارامتر مهم هستند و هنگامی که مواد به عنوان کود آلی به خاک افزوده می‌شود، واکنش‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۱۱). میزان pH دسترس‌پذیری فلزات سنگین و عناصر غذایی را برای ریشه گیاهان در خاک تحت تأثیر قرار می‌دهد، EC نیز نشان دهنده میزان شوری کمپوست و اثر فیتوتکسیسیتی آن بر گیاه است (۱۲ و ۱۳). علاوه بر این موارد، یک نگرانی عمده در مورد کمپوست این است که کاربرد مکرر آن ممکن است سبب تجمع فلزات سنگین در خاک شود (۱۴). حضور فلزات سنگین مهم‌ترین دلیل اثر نامطلوب کمپوست بر سلامتی انسان است که از طریق زنجیره غذایی، آب زیرزمینی و گیاه به انسان منتقل می‌شود. بنابراین اندازه‌گیری، پایش، ارزیابی خطر و پیشنهاد راه-کارهایی برای کاهش غلظت آن‌ها بسیار حایز اهمیت است. (۱۵). در رابطه با کاربرد کمپوست، مهم ترین عناصری که معمولاً مورد توجه هستند عبارتند از: سرب، کادمیوم، کروم، نیکل، مس، جیوه و روی (۱۶) و برای تضمین استفاده بی‌خطر از کمپوست محتوای فلزات سنگین آن باید محدود شود (۱۴).

بدیهی است تفاوت میان کمپوست‌های تولید شده در کیفیت و پایداری آن‌هاست که این امر به ترکیب مواد اولیه مورد استفاده، روش به کار گرفته شده و کنترل فرایند کمپوست‌سازی وابسته است (۱۷). خاک اره در گذشته به عنوان ماده زاید کارخانه های چوب‌بری به شمار می‌رفت و مورد مصرف چندانی نداشت، اما در حال حاضر به کمک تحقیقات و بررسی‌های فراوان موارد مصرف متعدد آن در صنایع با ارزش افزوده بالا مانند تخته خرده، کاغذ سازی، تخته فیبر و ... پیشنهاد گردیده است. همچنین خاک اره به دلیل EC پایین، محتوای کم فلزات سنگین و نیز توانایی ایجاد خلل و فرج و هوادهی بهتر، می‌تواند به عنوان یک گزینه مناسب جهت بهبود کیفیت کمپوست به ماده اولیه تولید کمپوست افزوده گردد (۱۸). هدف از مطالعه حاضر استفاده از پسماند خاک اره تولید شده در کارگاه‌های چوب‌بری و نجاری‌ها جهت بهبود کیفیت کمپوست، مطالعه اثر آن بر میزان pH، EC، فلزات سنگین، عناصر غذایی و همچنین بررسی روند تغییرات درجه حرارت در توده‌های کمپوست با افزودن خاک اره می‌باشد.

روش بررسی

مطالعه حاضر در کارخانه بیوکمپوست شهر زاهدان، در محیطی سرباز انجام شد. ۴ توده زباله خام با اندازه ۱ متر مکعب پس از تفکیک توسط سرند ۳۰ میلی‌متری در کارخانه و جداسازی مواد فلزی، پلاستیک، شیشه و غیره تهیه گردید. یک توده به عنوان شاهد و بدون خاک اره در نظر گرفته شد (MSW0[1]) و به ۳ توده باقیمانده هر کدام به ترتیب ۱۶ (MSW16)، ۳۲ (MSW32) و ۷۰ درصد خاک اره (MSW70) اضافه گردید. توده‌ها در تصویر ۱ نشان داده شده است (البته یک توده خاک اره بدون پسماند نیز تهیه شد که به دلیل عدم پیشرفت فرایند، نمونه‌برداری از این توده به عمل نیامد).

1- Municipal Solid Waste

توده‌ها آبدهی شده تا رطوبت آن‌ها یکسان شود و به حدود ۵۵ تا ۶۰ درصد برسد.

تصویر ۱- توده‌های تهیه شده جهت مطالعه

درجه حرارت توده‌ها به صورت روزانه حدود ساعت ۷:۰۰ الی ۹:۰۰ صبح و پیش از زیر و رو کردن توده ها جهت هوادهی، اندازه‌گیری و ثبت شد. اندازه‌گیری درجه حرارت توسط دماسنج دیجیتالی و از مرکز توده به عمل آمد. هفته‌ای یک بار نمونه‌برداری از توده‌ها انجام شد و در هر بار نمونه برداری از هر توده ۳ نمونه گرفته شد که هر کدام از این نمونه‌ها مخلوطی از ۳ نمونه است که به صورت تصادفی از نقاط مختلف هر توده گرفته شده است. نمونه‌ها در هوای آزاد خشک شده، سپس خرد گردیده و از الک ۱ میلی‌متری عبور داده شدند تا نمونه یکنواختی به دست آید. میزان pH، EC در این نمونه‌ها به طریقی که به آن اشاره خواهد شد اندازه‌گیری گردید. نمونه‌برداری از توده‌های نهایی نیز به همین صورت انجام گرفت و غلظت فلزات سنگین و عناصر غذایی در این نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

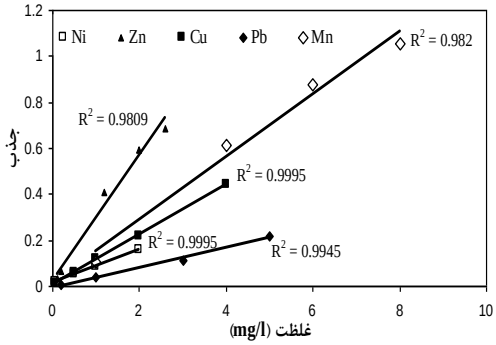
۲-۱- روش اندازه‌گیری pH و EC

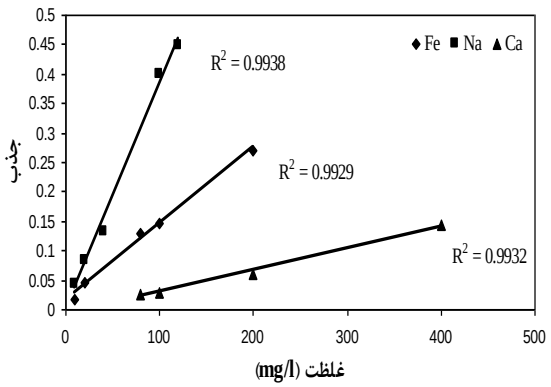
۱۰ گرم نمونه وزن و داخل ارلن ریخته شد، ml ۱۰۰ آب مقطر به آن اضافه گردید و به مدت ۳۰ دقیقه در auto shaker قرار داده شد. سپس pH و EC نمونه ها توسط pH متر و EC متر دیجیتالی در عصاره حاصل اندازه گیری گردید (۱۹).

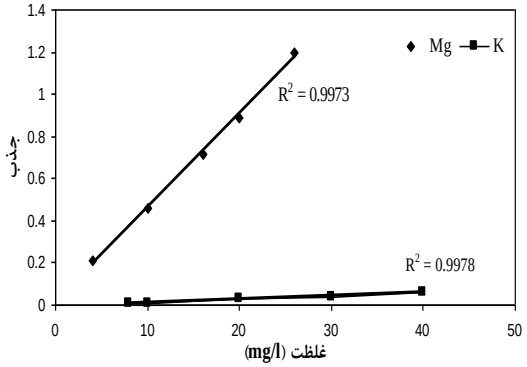
۲-۲- روش اندازه‌گیری فلزات سنگین و عناصر غذایی

۱ گرم از نمونه خشک و خرد شده وزن و داخل ظرف هضم ریخته شد و به هر نمونه ml ۱۶ مخلوط اسید نیتریک و اسید کلریدریک با نسبت ۱ به ۳ اضافه گردید (۱۵). ظرف هضم روی حمام آبی با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت قرار گرفت. سپس نمونه‌های هضم شده از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ عبور داده شد و در بالن ژوژه توسط آب یون‌زدایی شده به حجم ml ۲۵ رسانده شد. میزان عناصر غذایی و فلزات سنگین (Na, K, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Ca, Pb, Cd, Cr, Ni) این نمونه‌های هضم، فیلتر و رقیق شده پس از رسم منحنی کالیبراسیون توسط دستگاه جذب اتمی فیلیپس مدل PU9400 اندازه‌گیری گردید (۱۴). منحنی‌های کالیبراسیون هر یک از عناصر در نمودار ۱ نشان داده شده است.

مقادیر جیوه نمونه خشک شده با استفاده از دستگاه LECO AMA 254 Advanced Mercury Analyzer (USA) طبق استاندارد ASTM شماره D-6722 اندازه‌گیری شد. این دستگاه یک جذب اتمی منحصر به فرد است که تنها برای تعیین جیوه کل طراحی شده است. ۰/۰۵ گرم نمونه که توسط دستگاه فریز درایر خشک شده توزین و به دستگاه داده شد. در این دستگاه نمونه توسط سیستم Combustion/Catalyst tube در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه می‌شود و آمالگاتور طلایی جیوه را روی مجرای سرامیکی به دام می‌اندازد. توسط سیستم Cuvette که بر اساس اسپکترومتری جذب اتمی طراحی شده، میزان جیوه اندازه‌گیری می‌شود.







نمودار ۱- خطوط کالیبراسیون رسم شده توسط دستگاه جذب اتمی جهت تعیین غلظت فلزات سنگین و عناصر غذایی

۳- یافته‌ها و تفسیر

۳-۱- درجه حرارت

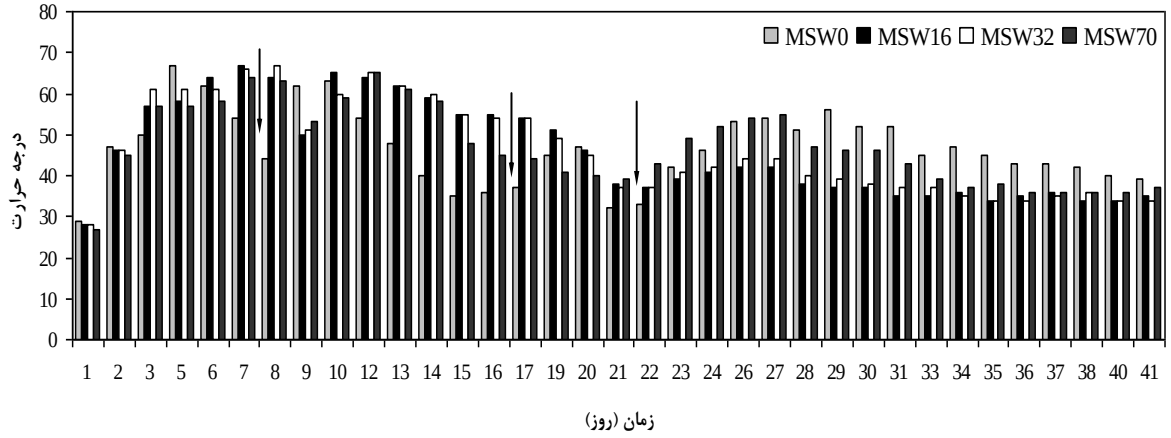
درجه حرارت در کمپوست‌سازی عامل بسیار مهمی به شمار می‌رود، به ویژه اگر عملیات کودسازی در شرایط هوازی انجام گیرد. در نتیجه تجزیه سریع مواد آلی و ترکیبات نیتروژنی توسط میکروارگانیسم‌ها مقدار قابل ملاحظه‌ای حرارت آزاد می‌شود. پسماندی که دارای درجه تجزیه نسبتاً خوب و مناسبی برای کودسازی است می‌تواند درجه حرارت حاصل از فعل و انفعالات بیولوژیکی را در خود نگه داشته و به تدریج بالا ببرد (۹).

نمودار (۲) تغییرات درجه حرارت توده‌ها را طی فرایند کمپوست‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشخص است دمای هر ۴ توده پس از ۳ روز به درجه حرارت ترموفیلیک (۵۰ درجه سانتی‌گراد) رسید که این امر نشان‌دهنده برقراری سریع فعالیت میکروبی در کلیه توده‌ها است (۲۰). درجه حرارت ترموفیلیک به مدت ۱۵ روز در توده‌ها حفظ شد. بیشینه درجه حرارت کلیه توده‌ها در مرحله ترموفیلیک ۶۵-۶۷ درجه سانتی‌گراد بود، اما توده بدون خاک اره (MSW0) نوسانات زیادی را در درجه حرارت ترموفیلیک نشان داد. پس از روزهای ۵، ۱۰ و ۲۰ کاهش ناگهانی در درجه حرارت این توده مشاهده شد. کاهش ناگهانی درجه حرارت قبل از اینکه توده به مرحله تثبیت برسد، نشانه بعضی معایب مثل اکسیژن ناکافی، رطوبت زیاد و یا رطوبت کم است که احتیاج به توجه فوری دارد (۲۱). این کاهش ناگهانی در توده شاهد به دلیل بی‌بهره بودن این توده از اثرات مثبت خاک اره می‌باشد. خاک اره هم به عنوان یک عامل حجیم[1] سبب بهبود هوادهی توده می‌شود و هم به دلیل ظرفیت نگهداری بالای آب سبب حفظ رطوبت توده‌ها می گردد (۱۸). در این مورد به نظر می‌رسد این کاهش درجه حرارت بیشتر به دلیل کاهش محتوای رطوبت توده‌ها بوده است، زیرا آبدهی توده در روزهای ۸، ۱۷ و ۲۲ (که در نمودار نشان داده شده است) سبب بازیابی درجه حرارت‌های ترموفیلیک در توده گردید (از آنجا که آزمایش در تابستان انجام شد میزان کاهش رطوبت بسیار سریع بوده است). بنابراین میزان آب شویی و تبخیر در توده شاهد بیشتر از سایر توده‌های مورد آزمایش می‌باشد. در کاربرد درجه حرارت به عنوان یک پارامتر عملی باید به خاطر داشت که درجه حرارت ترموفیلیک (۵۰ – ۷۰)، درجه حرارت

1- Bulking agent

مطلوب برای فرایند کمپوست‌سازی است (۲۱)، زیرا تنها در این درجه حرارت است که عوامل بیماری‌زا و بذر علف‌های هرز از بین می‌روند. بنابراین حفظ درجه حرارت ترموفیلیک در توده‌ها همواره حایز اهمیت بوده و مدنظر متصدیان کودسازی می‌باشد.

اندازه‌گیری درجه حرارت یک راه آسان و سریع برای ارزیابی بلوغ و پایداری کمپوست به شمار می‌رود (۱۰). هنگامی که مواد آلی پایدار می‌شوند، میزان فعالیت‌های میکروبی و تجزیه مواد آلی کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه درجه حرارت توده به صورت تدریجی شروع به کم شدن می‌کند تا زمانی که به درجه حرارت محیط برسد (۹). در این مطالعه در تیمار MSW0 بعد از نوسانات زیاد از روز ۳۳ کاهش تدریجی درجه حرارت آغاز شد و در روز ۴۱ به حدود درجه حرارت محیط رسید. در تیمار MSW70 از روز ۲۸ کاهش تدریجی درجه حرارت آغاز شد و در روز ۳۷ به حدود درجه حرارت محیط رسید. برعکس دو تیمار فوق، در تیمارهای MSW16 و MSW32 کاهش تدریجی درجه حرارت بسیار زودتر و از روز ۱۸ آغاز گردید و در روز ۲۸ به حدود درجه حرارت محیط رسید. این امر نشان می‌دهد تیمارهای MSW16 و MSW32 سریع‌تر از دو تیمار دیگر به مرحله بلوغ و پایداری رسیده و سرعت فرایند کمپوست‌سازی در این دو تیمار بسیار بالاتر از سایر تیمارها بوده است. سرعت فرایند در تیمار MSW0 به دلیل عدم برخورداری از اثرات مثبت خاک اره (هوادهی بهتر و حفظ رطوبت) و در تیمار MSW70 به دلیل بالا بودن نسبت کربن به نیتروژن و کاهش میزان مواد آسان تجزیه‌پذیر، کاهش چشم‌گیری نسبت به دو توده دیگر داشته است.

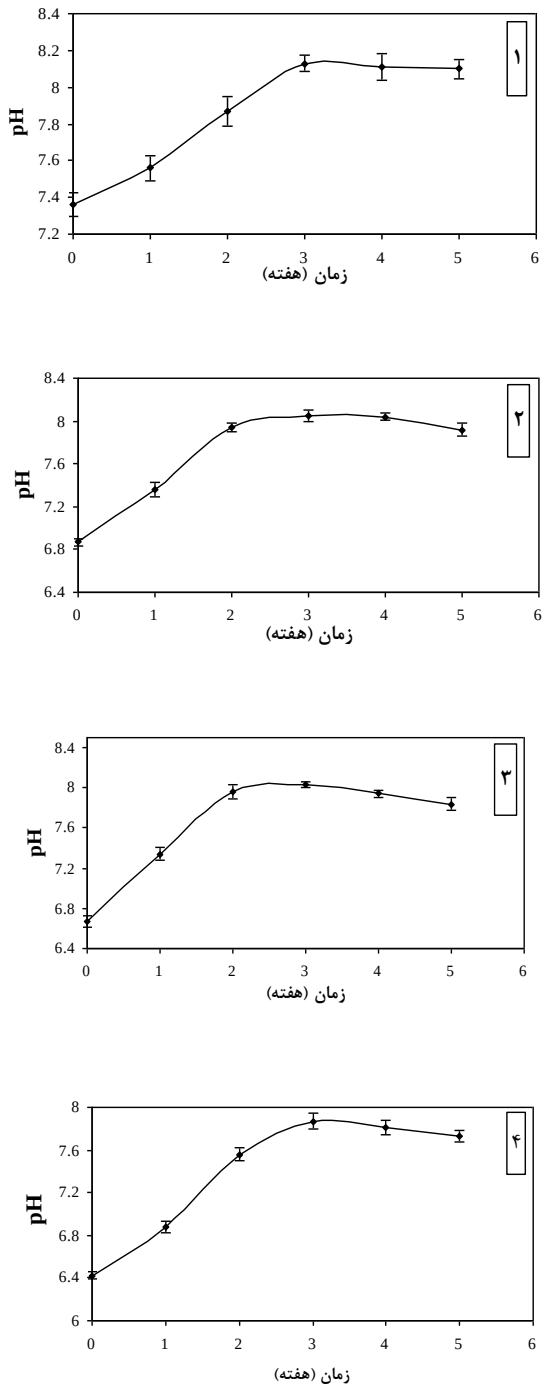


نمودار ۲- تغییرات درجه حرارت توده‌ها طی فرایند کمپوست‌سازی

۳-۲- pH و EC

معمولاً مواد آلی با محدوده گسترده‌ای از pH (از ۳ تا ۱۱) می‌توانند تبدیل به کمپوست شوند، اما محدوده بهینه آن ۵/۵ تا ۸ است (۲۲). پس از ۲ الی ۴ روز معمولاً pH محیط شروع به افزایش کرده به طوری که در پایان عملیات، pH کمپوست به ۸ – ۸/۵ خواهد رسید (۱۰ و ۲۳). یکی از مزایای مهم کمپوست این است که وقتی به خاک افزوده می‌شود سبب بالا رفتن pH می‌گردد (۱۳).

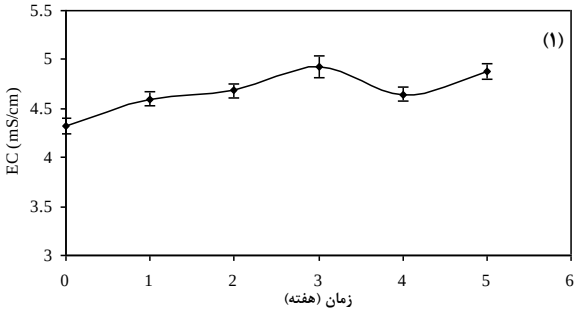
نمودار (۳) تغییرات میزان pH را در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. pH کلیه تیمارها در روزهای نخست فرایند افزایش پیدا کرد. پس از ۲۱ روز pH تیمار MSW0 به ۸/۱۳، تیمار MSW16 به ۸/۰۵، تیمار MSW32 به ۸/۰۳ و تیمار MSW70 به ۷/۸۷ رسید، سپس به تدریج از میزان آن ها کاسته شد و در محصول نهایی به حدود ۷/۷۳ تا ۸/۱ در تیمارهای مختلف رسید. این افزایش ابتدایی pH و کاهش متعاقب آن توسط Sanchez-Monedero و همکاران (۲)، Zhu (۳) و همچنین Zorpas و Loizidou (۲۴) مشاهده شده است. هم چنین نتایج مشابهی در کمپوست‌سازی هم زمان کود خوک و خاک اره گزارش گردیده است (۲۰). فعالیت شدید میکروبی و تجزیه مواد آلی در هفته‌های نخست سبب تشکیل آمونیوم و افزایش pH در توده کمپوست می‌شود (۲ و ۲۵). در انتهای فرایند کمپوست‌سازی به دلیل کاهش میزان آمونیوم، از میزان pH کاسته می‌شود (۲۵). خاک اره به کار رفته سبب کاهش pH در محصولات نهایی شده است، به طوری که تیمار MSW70 پایین‌ترین میزان (۷/۷۳) و تیمار MSW0 بیشترین میزان pH (۸/۱) را دارا بودند. پایین‌ترین میزان pH محصول نهایی در تیمار تراشه‌های چوبی توسط Tognetti و همکاران (۷) نیز گزارش شده است.

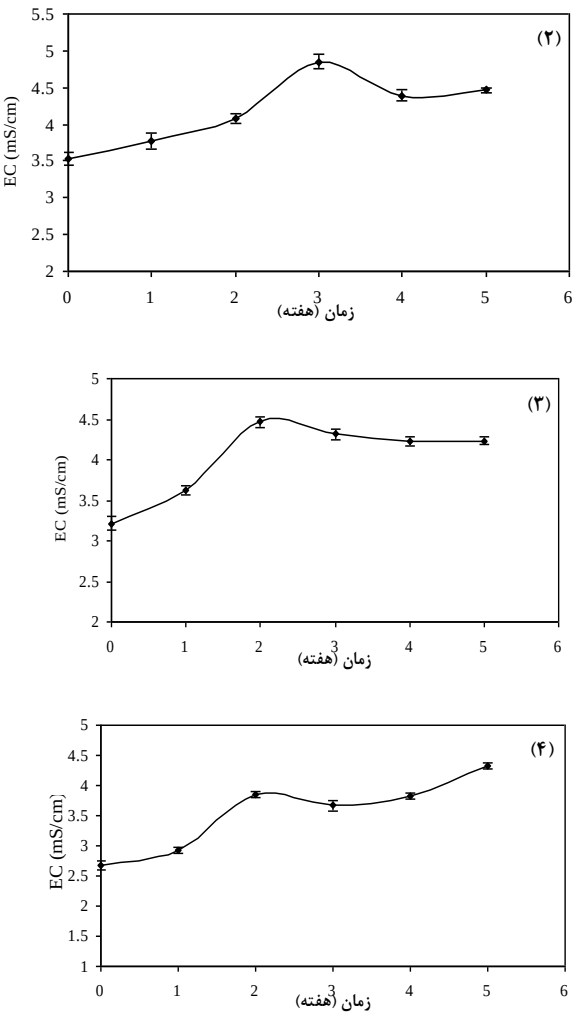


نمودار ۳- تغییرات pH توده‌ها: تیمار MSW0 (۱)، MSW16 (۲)، MSW32 (۳) و MSW70 (۴)

هدایت الکتریکی (EC) معمولاً طی فرایند کمپوست‌سازی اندازه‌گیری می‌شود، زیرا نشان‌دهنده میزان شوری محصولات و اثر آن بر رشد گیاه است (۲۴). شوری بالا در خاک، جمعیت میکروبی و فعالیت آن‌ها را کاهش می‌دهد (۱۱)، هم چنین سبب کاهش نفوذپذیری و پایداری ساختار خاک می‌گردد (۲۶). مطالعه کمپوست حاصل از پسماندهای جامد شهری مشخص کرده است که EC کمپوست بسیار بیشتر از مقدار آن در خاک کشاورزی است (۱۳). EC بالا نشان‌دهنده اثرات بازدارندگی و یا مسمومیت احتمالی کمپوست بر رشد گیاه است (۱۲)، بنابراین EC پایین در فرایند کمپوست‌سازی و محصول نهایی مطلوب است. محققان مختلف اعداد متفاوتی را به عنوان حد مجاز هدایت الکتریکی در کمپوست ارایه داده اند. Soumare و همکاران (۲۷)، میزان $mS\ cm^{-1}$ ۳ و Lasaridi و همکاران (۶)، میزان $mS\ cm^{-1}$ ۴ (استاندارد یونان) را حد قابل تحمل برای گیاهان با حساسیت متوسط بیان کردند.

نمودار (۴) تغییرات EC را طی فرایند کمپوست‌سازی در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. در این مطالعه افزایش ناچیز EC بین اولین و آخرین نمونه‌برداری در تمام تیمارها مشاهده شد. هدایت الکتریکی طی فرایند در تیمار MSW0 از ۴/۳۲ تا $mS\ cm^{-1}$ ۴/۸۸۴، در تیمار MSW16 از ۳/۵۳۹ تا $mS\ cm^{-1}$ ۴/۴۶۶، در تیمار MSW32 از ۳/۲۱۳ تا $mS\ cm^{-1}$ ۴/۲۳۵ و در تیمار MSW70 از ۲/۶۷۱ تا $mS\ cm^{-1}$ ۴/۳۲۲ افزایش پیدا کرد. افزایش EC همچنین در کمپوست‌سازی هم زمان خاک اره و زئولیت با لجن فاضلاب مشاهده شده است (۲۴). افزودن خاک اره سبب کاهش EC در توده کمپوست نهایی شد به گونه‌ای که تیمار MSW0 بیشترین میزان EC (۴/۸۸۴) و تیمار MSW32 کمترین مقدار (۴/۲۳۵) را دارا بودند. این کاهش هم چنین توسط Tognetti و همکاران (۷) گزارش شده است. البته با وجود این، باز هم میزان EC در کلیه توده‌ها از میزان مجاز تعیین شده بالاتر بوده، زیرا آب مورد استفاده جهت آبیاری توده‌ها دارای EC بسیار زیادی بوده است. دلیل بالا بودن میزان EC در تیمار MSW70 نیز استفاده از حجم بیشتر آب دارای EC بسیار بالا در این تیمار نسبت به سایر توده‌ها جهت آبیاری است.





نمودار ۴- تغییرات EC توده‌ها: تیمار MSW0 (۱)، MSW16 (۲)، MSW32 (۳) و MSW70 (۴)

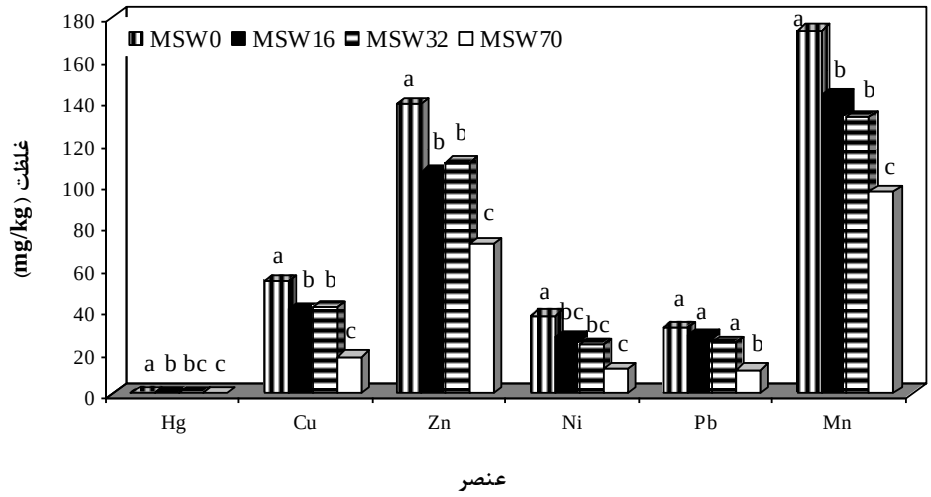
۳-۳- فلزات سنگین

فلزات سنگین به صورت طبیعی در محیط زیست، خاک و غذا وجود دارند و به صورت گسترده در فرایندهای تولیدی استفاده می‌شوند، در نتیجه می‌توانند در کمپوست حاصل از پسماندها حضور داشته باشند. منابع فلزات سنگین در کمپوست فراوان هستند مثل گرد و غبار خانگی، باطری‌ها، پلاستیک‌ها، رنگ‌ها، جوهرها، داروها و حشره‌کش-های خانگی (۱۶). میزان فلزات سنگین و ترکیبات آلی در زباله‌ها بسیار مهم است، مخصوصاً زمانی که از کمپوست به عنوان کود استفاده می‌شود (۲۸).

از ویژگی‌های فلزات سنگین که آن‌ها را مشکل‌زا می‌کند، غیر قابل تجزیه بیولوژیکی بودن، احتمال سمیت حتی در غلظت‌های پایین و تمایل آن‌ها به تجمع در زنجیره غذایی است که انسان آخرین مصرف‌کننده آن می‌باشد (۲۹). به همین دلیل مطالعات فراوانی برای حذف فلزات سنگین از کمپوست تهیه شده از پسماندهای شهری انجام شده است. در بعضی از این مطالعات از موادی نظیر کلینوپتیلولایت[۵]، زئولیت[۶] و پرلیت[۷] برای حذف فلزات از توده استفاده شده و اثر معنادار این مواد در حذف فلزات نیز گزارش شده است (۲۴، ۳۰ و ۳۱). در برخی از مطالعات نیز از موادی با محتوای پایین فلزات سنگین مثل خاک اره، خاکستر چوب و امثال آن، به دلیل اثر رقیق‌سازی آن‌ها جهت کاهش غلظت فلزات استفاده شده است (۷ و ۳۲). در مطالعه حاضر برای مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین در تیمارهای مختلف از آزمون آنالیز واریانس (ANOVA) بهره گرفته شد و در مواردی که میزان F-value معنادار بود از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) برای مقایسه دو به دو میانگین‌ها استفاده گردید. همچنین میزان فلزات سنگین و عناصر غذایی موجود در تیمارها با استفاده از آزمون One sample T-test با میزان استاندارد مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به این که استاندارد کشور هلند نسبت به سایر کشورها سختگیرتر بوده و محدودیت بیشتری برای فلزات سنگین قایل شده است، از این استاندارد برای مقایسه فلزات استفاده شد.

محتوای فلزات سنگین و مقایسه غلظت آن‌ها در تیمارهای مختلف در نمودار (۵) نشان داده شده است. جیوه (Hg)، روی (Zn)، مس (Cu) و منگنز (Mn) در کلیه تیمارها (MSW16، MSW32 و MSW70) کاهش معناداری نسبت به تیمار شاهد (MSW0) نشان دادند. در مورد نیکل (Ni) و آهن (Fe) اختلاف معناداری بین MSW0 و MSW16 مشاهده نشد، اما MSW32 و MSW70 به طور معناداری کمتر از MSW0 بودند. در مورد سرب (Pb) تنها بین MSW70 و سایر تیمارها اختلاف وجود دارد.

1- Clinoptilolite
2- Zeolite
3- Perlite



نمودار ۵- مقایسه غلظت فلزات سنگین در تیمارهای مختلف

غلظت فلزات سنگین در خاک اره، تیمارهای مختلف و هم چنین میزان استاندارد تعیین شده در جدول (۱) نشان داده شده است. MSW0 کمترین و MSW70 بیشترین غلظت فلزات سنگین را در بین تیمارها دارا می‌باشند. دلیل کاهش غلظت بعضی از فلزات سنگین اثر رقیق‌سازی خاک اره افزوده شده بوده است که در نتیجه غلظت پایین فلزات در خاک اره به وجود می‌آید (۷). غلظت نیکل تنها در تیمار MSW70 کمتر از میزان استاندارد و در سایر تیمارها غلظت آن بالاتر از میزان استاندارد بوده است. غلظت جیوه در تیمار MSW0 بالاتر از میزان استاندارد و در سایر تیمارها پایین‌تر از آن قرار دارد. محتوای سایر فلزات سنگین در تیمارهای آزمایش کمتر از میزان استاندارد کشور هلند می‌باشد.

جدول ۱- غلظت فلزات سنگین در خاک اره، تیمارها و نیز استاندارد تعیین شده

عنصر	واحد	خاک اره	محصول نهایی				استاندارد هلند[1]
			MSW0	MSW16	MSW32	MSW70	
Fe	(%)	۰/۰۱±۰/۰۰	۰/۷۸±۰/۰۱	۰/۵۲±۰/۱	۰/۳۵±۰/۰۲	۰/۱۶±۰/۰۲	-
Cu	(mg kg^{-1})	۱/۴±۰/۲۶	۵۳/۷۱±۷/۸۲	۴۰/۴۶±۵/۱۳	۴۱/۵±۷	۱۷/۶±۱/۰۸	۶۰
Zn	(mg kg^{-1})	۱۹/۶۶±۲/۱	۱۳۸/۷۴±۲۰/۱۶	۱۰۶/۱۷±۸/۲۸	۱۱۰/۴۴±۴/۰۲	۷۱/۵۴±۸/۸۴	۲۰۰
Mn	(mg kg^{-1})	۲۳/۴۶±۱/۶۵	۱۷۳/۹۸±۱/۳۸	۱۴۳/۰۷±۱۳/۴۷	۱۳۲/۲۳±۶/۹۳	۹۶/۵۷±۸/۶	-
Ni	(mg kg^{-1})	۰/۶±۰/۱۳	۳۷/۴۱±۱۰/۰۷	۲۶/۹۱±۳/۲۲	۲۳/۷۴±۶/۱۰	۱۱/۹۲±۳/۱۸	۲۰
Cr	(mg kg^{-1})	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	۵۰
Pb	(mg kg^{-1})	n.d.	۳۱/۳۳±۶/۲۸	۲۷/۸۳±۳/۳۷	۲۴/۴۱±۳/۵۴	۱۱/۳۳±۱/۴۲	۱۰۰
Cd	(mg kg^{-1})	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	۱
Hg	(mg kg^{-1})	۰/۰۳±۰/۰۰	۰/۳۴±۰/۰۳	۰/۲۵±۰/۰۱۶	۰/۲۳±۰/۰۴	۰/۱۹±۰/۰۱	۰/۳

n.d: خارج از حد تشخیص دستگاه، ۱: (۱۴)

اگرچه محتوای فلزات سنگین کمتر از میزان استاندارد تعیین شده بوده است، اما همواره غلظت پایین‌تر فلزات مطلوب بوده و مد نظر می‌باشد. با وجود این که خاک اره سبب کاهش غلظت فلزات سنگین در توده کمپوست شد، اما بهترین راه برای کاهش محتوای فلزات در کمپوست تهیه شده از پسماند شهری تفکیک در مبدأ زباله‌هاست (۱۳ و ۲۸).

۳-۴- عناصر غذایی

سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم عناصری هستند که جهت استفاده کمپوست به عنوان کود بسیار با اهمیت می‌باشند (۳۳). میزان عناصر

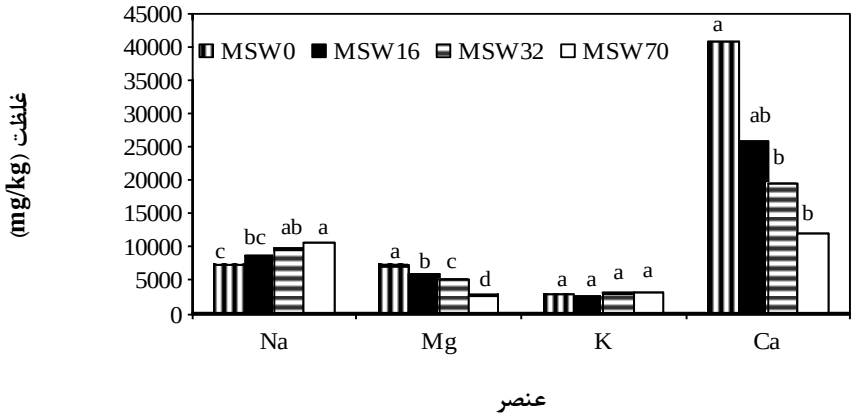
غذایی تیمارهای مختلف، خاک اره و آب مورد استفاده جهت آبیاری توده‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است. غلظت پتاسیم و کلسیم کمتر و غلظت سدیم و منیزیم بیشتر از مقادیر گزارش شده در انواع مشابه کمپوست‌های تهیه شده بوده است (۲۷). محتوای تمامی عناصر در کلیه تیمارها به جز عنصر سدیم در مقایسه با استاندارد آلمان برای خاک گلدانی در حدود مناسب قرار دارد (۳۴) و به نظر می‌رسد که تیمار MSW16 در مقایسه با سایر تیمارها شرایط مناسب‌تری برای استفاده در خاک گلدان داشته باشد.

جدول ۲- غلظت عناصر غذایی در خاک اره، آب مورد استفاده، توده نهایی کمپوست و استاندارد آلمان بر حسب درصد

عنصر	واحد	خاک اره	آب مورد استفاده	کمپوست	استاندارد آلمان[1]
Na	(%)	۰/۰۹±۰/۰۱	۰/۰۸۶±۰/۰۰	۰/۷۳۵±۰/۱۲	۰/۲-۰/۵
K	(%)	۰/۰۲۵±۰/۰۰	۰/۰۰۱±۰/۰۰	۰/۲۹۰±۰/۰۴	۰/۴-۱/۲
Mg	(%)	۰/۰۱۸±۰/۰۰	۰/۰۱۴±۰/۰۰	۰/۷۱۶±۰/۰۶	۰/۲-۰/۸
Ca	(%)	۰/۱±۰/۰۰	۰/۰۵۱±۰/۰۰	۴/۰۸±۰/۱۲	۲-۸

۱: (۳۴)

محتوای عناصر غذایی و مقایسه غلظت آن‌ها در تیمارهای مختلف در نمودار (۶) نشان داده شده است. منیزیم در کلیه تیمارها کاهش معناداری نسبت به تیمار شاهد نشان داد. در مورد کلسیم اختلاف معناداری بین MSW0 و MSW16 مشاهده نشد، اما سایر تیمارها به طور معناداری کمتر از تیمار شاهد بودند. غلظت سدیم در MSW0، MSW16، MSW32 و MSW70 به ترتیب عبارت بود از ۰/۷۳ (٪)، ۰/۸۲ (٪)، ۰/۹۶ (٪) و ۱/۰۶ (٪). بر عکس سایر عناصر، سدیم افزایش معناداری در MSW32 و MSW70 نسبت به تیمار شاهد نشان داد. افزایش غلظت سدیم در این مطالعه به دلیل محتوای بالای سدیم در خاک اره و آب مورد استفاده بوده است. گزارش شده است که غلظت سدیم و پتاسیم در کمپوست سازی، هم زمان با پسماند و زئولیت افزایش پیدا می‌کند که دلیل آن توانایی زئولیت در تبادل یون‌های سدیم و پتاسیم است (۳۰، ۳۵ و ۳۶). غلظت پتاسیم نیز با افزودن خاک اره افزایش ناچیزی نشان داد اما اختلاف معناداری بین غلظت پتاسیم در تیمارهای مختلف و تیمار شاهد مشاهده نشد.



نمودار ۶- مقایسه میزان عناصر غذایی در تیمارهای مختلف

نتیجه‌گیری

رشد روزافزون پسماند شهری، استفاده از روش‌هایی مانند کمپوست-سازی را جهت کاهش حجم پسماندها ضروری می‌سازد. از آن‌جا که کود آلی تهیه شده در این فرایند به مصارف کشاورزی و باغبانی می-رسد و تا حدی با سلامت جامعه در ارتباط است، بررسی خصوصیات کیفی کمپوست و تلاش برای بهبود کیفیت آن باید همواره مد نظر دست‌اندرکاران باشد. استفاده از خاک اره با اصلاح شرایط فیزیکی و شیمیایی کمپوست تا حد زیادی به این امر کمک می‌کند. با توجه به نتایج حاصله، افزودن خاک اره به توده کمپوست سبب کنترل نوسانات درجه حرارت توده و حفظ درجه حرارت ترموفیلیک در مرحله فعال کمپوست‌سازی می‌گردد، بنابراین سبب تخریب مؤثرتر عوامل بیماری-زا و بذر علف‌های هرز می‌گردد. هم چنین کاهش تدریجی درجه حرارت در پایان فرایند در توده‌های دارای خاک اره زودتر از توده

بدون خاک اره آغاز می‌شود که این امر نشان دهنده بالاتر بودن سرعت فرایند در این توده‌هاست. با افزودن خاک اره به توده کمپوست از میزان pH و EC آن کاسته می‌شود. با توجه به این که EC پایین نشان‌دهنده شوری کمتر و اثرات بازدارندگی کمتر برای رشد گیاهان است، اثر مطلوب افزودن خاک اره از این نظر نیز مشهود است. در نهایت کمپوست‌سازی هم زمان پسماند شهری و خاک اره سبب کاهش غلظت فلزات سنگین در توده کمپوست می‌گردد. محتوای بسیار کم فلزات سنگین در خاک اره باعث می‌شود که افزودن آن به توده کمپوست با ایجاد رقیق‌سازی، غلظت فلزات را در کل توده کاهش دهد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از همکاری صمیمانه مدیریت و کارکنان محترم سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری زاهدان، هم چنین از کارگران زحمت‌کش کارخانه بیوکمپوست شهر زاهدان به دلیل کمک‌های بی‌شائبه شان کمال تشکر را داشته باشند.

منابع

1. Castaldi P., Garau G., Melis P., 2008. Maturity Assessment of Compost from Municipal Solid Waste Through the Study of Enzyme Activites and Water-Soluble Fractions, Waste Management, vol. 28, pp. 534-540.
2. Sanchez-Monedero M. A., Roig A., Paredes C., Bernal M. P., 2001. Nitrogen Transformation During Organic Waste Composting by the Rutgers System and its Effects on pH, EC and Maturity of the Composting Mixtures, Bioresource Technology, vol. 78, pp. 301-308.
3. Zhu N., 2007. Effect of Low Initial C/N Ratio on Aerobic Composting of Swine Manure With Rice Straw, Bioresource Technology, vol. 98, pp. 9-13.
4. Korner I., Saborit-Sanchez I., Aguilera-Corrales Y., 2008. Proposal for the Integration of Decentralised Composting of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste into the Waste Management System of Cuba, Waste Management, vol. 28, pp. 64-72.
5. Wei Y. S., Fan Y. B., Wang M. J., Wang J. S., 2000. Composting and Compost Application in China, Resources, Conservation and Recycling, vol. 30, pp. 277-300.
6. Lasaridi K., Protopapa I., Kotsou M., Pilidis G., Manios T., Kyriacou A., 2006. Quality Assessment of Composts in the Greek Market: The Need for Standards and Quality Assurance, Journal of Environmental Management, vol. 80, pp. 58-65.
7. Tognetti C., Mazzarino M. J., Laos F., 2007. Improving the Quality of Municipal Organic Waste Compost, Bioresource Technology, vol. 98, pp. 1067-1076.
8. Bustamante M. A., Paredes C., Marhuenda-Egea F. C., Perez-Espinosa A., Bernal M. P., Moral R., 2008. Co-Composting of Distillery Wastes With Animal Manures: Carbon and Nitrogen Transformation in the Evaluation of Compost Stability, Chemosphere, vol. 72, pp. 551-557.
9. Raut M. P. Prince William S. P. M., Bhattacharyya J. K., Chakrabarti T., Devotta s., 2007. Microbial Dynamics and Enzyme Activity During Rapid Composting of Municipal Solid Waste – A Compost Maturity Analysis Perspective, Bioresource Technology, doi: 10.1016/j.biortech.2007.11.030.
10. Diaz L.F., de Bertoldi M., Bidlingmaier W., Stentiford E., 2007. Compost Science and Technology. Waste Management Series, Elsevier.
11. Banegas V., Moreno J. L., Moreno J. I., Garcia c., Leon G., Hernandez T., 2007. Composting Anaerobic and Aerobic Sewage Sludges Using Two Proportions of Sawdust, Waste Management, vol. 27, pp. 1317-1327.
12. Zhang Y. and He y., 2006. Co-Composting Solid Swine Manure With Pine Sawdust as Organic Substrate, Bioresource Technology, vol. 97, pp. 2024-2031.
13. Hargreaves J. C., Adl M. S., Warman P. R., 2008. A Review of the Use of Composted Municipal Solid Waste in

Agriculture, Agriculture, Ecosystem and Environment, vol. 123, pp. 1-14.

14. Veeken A., Hamelers B., 2002. Sources of Cd, Cu, Pb and Zn in Biowaste, The Science of the Total Environment, vol. 300, pp. 87-98.
15. Hseu Z. Y., 2004. Evaluating Heavy Metal Contents in Nine Composts Using Four Digestion Methods, Bioresource Technology, vol. 95, pp. 53-59.
16. Smith S. R., 2009. A Critical Review of the Bioavailability and Impacts of Heavy Metals in Municipal Solid Waste Composts Compared to Sewage Sludge, Environment International, vol. 35, pp. 142-156.
17. Goyal S., Dhull S. K., Kapoor K. K., 2005. Chemical and Biological Changes During Composting of Different Organic Wastes and Assessment of Compost Maturity, Bioresource Technology, vol. 96, pp. 1584-1591.
18. Imbeah M., 1997. Composting Piggery Waste: A Review, Bioresource Technology, vol. 63, pp. 197-203.
19. Campitelli P. and Ceppi S., 2008. Chemical, Physical and Biological Compost and Vermicompost Characterization: A Chemometric Study, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, vol. 90, pp. 64-71.
20. Huang G. F., Wong J. W. C., Wu Q. T., Nagar B. B., 2004. Effect of C/N on Composting of Pig Manure With Sawdust, Waste Management, vol. 24, pp. 805-813.
21. Tchobanoglous G., Kreith F., 2002. Handbook of Solid Waste Management, McGraw-Hill, Second Edition.
22. Dougherty M., 1998. Composting for Municipalities, Planning and Design Considerations. Natural Resource, Agriculture and Engineering Service, New York. Pp.126.
23. Turan N. G., 2008. The Effects of Natural Zeolite on Salinity Level of Poultry Litter Compost, Bioresource Technology, vol. 99, pp. 2097-2101.
24. Zorpas A. A., Loizidou M., 2008. Sawdust and Natural Zeolite as a Bulking Agent for Improving Quality of a Composting Product from Anaerobically Stabilized Sewage Sludge, Bioresource Technology, vol. 99, pp. 7545-7552.
25. Saludes R. B., Iwabuchi K., Miyatake F., Abe Y., Honda Y., 2008. Characterization of Dairy Cattle Manure/Wallboard Paper Compost Mixture, Bioresource Technology, vol. 99, pp. 7285-7290.
26. Lakhdar A., Hafsi C., Rabhi M., Debez A., Montemurro F., Abdelly C., Jedidi N., Ouerghi Z., 2008. Application of Municipal Solid Waste Compost Reduces the Negative Effects of Saline Water in *Hordeum maritimum* L., Bioresource Technology, vol. 99, pp. 7160-7167.
27. Soumare M., Demeyer A., Tack F. M. G., Verloo M. G., 2002. Chemical Characteristics of Malian and Belgian Solid Waste Composts, Bioresource Technology, vol. 81, pp. 97-101.
28. Jordening H. J., Winter J., 2005. Environmental Biotechnology: Concepts and Applications, First Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
29. Haroun M., Idris A., Omar S., 2009. Analysis of Heavy Metals During Composting of the Tannery Sludge Using Physicochemical and Spectroscopic Techniques, Journal of Hazardous Materials, vol. 165, pp. 111-119.
30. Turan N. G., Ergun O. N., 2008. Improving the Quality of Municipal Solid Waste Compost by Using Expanded Perlite and Natural Zeolite, Clean, vol. 36(3), pp. 330-334.
31. Stylianou M. A., Inglezakis V. J., Moustakas K. G., Loizidou M. D., 2008. Improvement Of the Quality Of Sewage Sludge Compost by Adding Natural Clinoptilolite, Desalination, vol. 224, pp. 240-249.
32. Kuba T., Tscholl A., Partl C., Meyer K., Insam H., 2008. Wood Ash Admixture to Organic Wastes Improves Compost and its

Performance, Agriculture, Ecosystems and Environment, doi: 10.1016/jagee.2008.02.012.

33. Amir S., Hafidi M., Merlina G., Revel J. C., 2005. Sequential Extraction of Heavy Metals During Composting of Sewage Sludge, Chemosphere, vol. 59, pp. 801-810.

34. Hogg d., Barth J., Favoino E., Centemero M., Caimi V., Amlinger F., Devliegher F., Brinton W., Antler S., 2002. Comparison of Compost Standards within the EU, North America and Australasia, The Waste and Resources Action Programme, main report, p. 97.

35. Zorpas A. A., Constantinides T., Vlyssides A. G., Haralambous I., Loizidou M., 2000. Heavy Metal Uptake by Natural Zeolite and Metals Partitioning in Sewage Sludge Compost, Bioresource Technology, vol. 72, pp. 113-119.

36. Cai Q-Y., Mo C-H., Wu Q-t., Zeng Q-y., Katsoyiannis A., 2007. Concentration and Speciation of Heavy Metals in Different Sewage Sludge-Compost, Journal of Hazardous Materials, vol. 147, pp. 1063-1072.