

تغییرات غلظت فلزات سنگین طی فرایند تولید ورمی کمپوست از پسماندهای آلی

سیده‌مریم خرازی^۱، حبیب‌الله یونسی*^۲، جواد عابدینی طرفه^۳

Ma.kharrazi@yahoo.com

۱. کارشناس ارشد مهندسی منابع طبیعی، محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی پردیس نور، دانشگاه تربیت مدرس

۳. سازمان مدیریت پسماند شهرداری مشهد، دانشجوی دکتری شیمی آلی، دانشگاه فردوسی مشهد

abedini_chem@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۲۵

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۱/۴/۱۲

چکیده

این پژوهش در راستای بررسی تغییرات غلظت فلزات سنگین طی فرایند تولید ورمی کمپوست از پسماندهای کشاورزی و ارزیابی تغییرات این فلزات در اثر تلقیح این ضایعات آلی از طریق باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و فسفر در قالب لجن فعال فاضلاب انجام شد. این باکتری‌ها موجب بهبود کیفیت ورمی کمپوست می‌شوند. به این منظور بسترهایی با ترکیبات مدنظر از ضایعات آلی آماده شدند و پس از اتمام مرحله پیش کمپوست، این بسترها تحت تیمار لجن فعال فاضلاب و تلقیح کرم‌های خاکی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان دادند، افزایش ضایعات ذرت در بستر به علت محتوای کم فلزات سنگین آن، سبب رقیق‌سازی این عناصر در توده ورمی کمپوست شد. سدیم و پتاسیم در این مورد استثنا بودند و با افزایش ضایعات ذرت، میزان سدیم تغییری نشان نداد، اما میزان پتاسیم افزایش یافت. همچنین، افزایش غلظت لجن فعال فاضلاب، به علت تسریع تجزیه مواد آلی و کاهش وزن خشک ضایعات بستر، موجب افزایش معنی‌داری در غلظت فلزات سنگین شد. بیشترین غلظت نیکل، مس و روی در تیمارهای این تحقیق به ترتیب برابر با 543 ± 3 ، 129 ± 9 و 594 ± 19 mg/kg به دست آمد. همچنین، بیشترین غلظت مشاهده‌شده از کروم و سرب نیز 49 ± 5 و 129 ± 9 mg/kg بود. در نهایت با مقایسه غلظت این فلزات با استانداردهای ارائه‌شده نشان داده شد که ورمی کمپوست تهیه‌شده در این تحقیق، از لحاظ فلزات سنگین در دامنه استاندارد قرار دارد و قابلیت استفاده در کاربردهای کشاورزی را داراست.

کلیدواژه

ضایعات ذرت، لجن فعال فاضلاب، فلزات سنگین، ورمی کمپوست.

۱. سرآغاز

(2001). تولید ورمی کمپوست، روشی آسان برای کاهش ضایعات آلی است که باید در لندفیل‌ها دفن، در زباله‌سوزها سوزانده یا گاهی به اقیانوس‌ها ریخته شود (Martin and Lavelle, 1992) و نیاز گیاهان را به مواد مغذی در فرم قابل دسترس آن‌ها تأمین می‌کند. مواد دفعی کرم‌های خاکی که همان کود آلی ورمی کمپوست نام دارد، قابلیت انحلال بالایی در آب دارد و به راحتی از طریق گیاهان جذب می‌شود. کاربرد ورمی کمپوست در زمین‌های کشاورزی، نه تنها سبب افزایش حاصل‌خیزی خاک می‌شود، بلکه قابلیت نگهداری آب را در خاک افزایش

امروزه مدیریت مواد زاید جامد، از عمده‌ترین بحران‌های محیط‌زیستی به شمار می‌رود که به علت رشد سریع جمعیت و شهرنشینی بروز کرده است (Nair, et al., 2006). علاوه بر این، نگرش جهانی بر بازیافت زایدات آلی برای دستیابی به کشاورزی پایدار و محیط‌زیست‌عاری از آلودگی است و برای توسعه کشاورزی پایدار، غنی‌سازی ضایعات ضرورت دارد. استفاده از کرم‌های خاکی برای تجزیه مواد زاید و تولید ورمی کمپوست برای دستیابی به این مقصود، مورد توجه است (Kumar and Singh, 2006).

می‌دهد (Latifah, et al., 2009). ورمی کمپوست، محصول تجزیه هوازی غیرگرم‌مازای مواد آلی از طریق ارتباط متقابل کرم‌ها و میکروارگانیسم‌ها، ماده‌ای پیت‌مانند با تخلخل، هوادهی، زهکشی، ظرفیت نگهداری آب و فعالیت میکروبی بالا و شامل اکثر عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان است (Latifah, et al., 2009). کود آلی ورمی کمپوست به علت دارا بودن هورمون‌های رشد گیاهی و آنزیم‌های خاک، همچنین ساختار فیزیکی مناسب و جمعیت میکروبی غنی، موجب افزایش عملکرد محصولات زراعی می‌شود. ورمی کمپوست موجب افزایش وزن خشک گیاهان می‌شود (Edwards, 1995). قابلیت دسترسی نیتروژن، کربن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در ورمی کمپوست بیشتر از قابلیت دسترسی آن‌ها در مواد اولیه استفاده‌شده در بستر تولید ورمی کمپوست است (Orozco, et al., 1996). نقش کرم‌های خاکی در رشد گیاهان، به علت حضور مواد مغذی میکرو و ماکرو در مدفوعات کرمی است. کرم‌های خاکی، متابولیت‌های مشخص، ویتامین‌ها و مواد مشابهی در خاک تولید می‌کنند که احتمالاً در ویتامین‌های گروه D و B جای می‌گیرند (Nielson, 1965). رشد گیاهان با ورمی کمپوست همان‌طور که Dominguez (Dominguez, et al., 1997) اشاره کرده تحت تأثیر کاهش قابلیت دسترسی فلزات سنگین و حذف پاتوژن‌ها نیز است (Riggle and Holmes, 1994). کیفیت خاک تحت تأثیر میزان متراکم شدن آن است و این تراکم، اغلب از طریق میزان نگهداری و جابه‌جایی آب، انتشار گازها، رشد و توسعه ریشه گیاهان در خاک تعیین می‌شود. کرم‌های خاکی نقش حیاتی در جلوگیری از فرسایش خاک و متراکم شدن آن ایفا می‌کنند (Wright and Upadhyaya, 1998).

از دیگر محدودیت‌های تولید ورمی کمپوست می‌توان به حساسیت بالای کرم‌های خاکی نسبت به شرایط محیطی اشاره کرد. چنانچه شرایط محیطی مناسبی در بستر ورمی کمپوست فراهم نباشد، کرم‌های خاکی از محیط فرار می‌کنند یا از بین خواهند رفت. از مهم‌ترین مواردی که باید

در این زمینه به آن توجه کرد، اکسیژن کافی، تهویه مناسب برای ایجاد شرایط هوازی و رطوبت مناسب در بستر مواد آلی است. دمای بهینه در محدوده تحمل کرم‌های خاکی و pH در محدوده خنثی از دیگر مواردی است که باید به آن توجه کرد (Gupta, 2008; Latifah, et al., 2009). نسبت C/N مواد آلی بستر نیز باید در حدود ۲۵ باشد تا بتوان حداکثر تجزیه میکروبی و فعالیت کرم‌های خاکی را در اختیار گرفت (Ndegwa and Thompson, 2000).

کود آلی کمپوست و ورمی کمپوست برای حفظ و بهبود ساختار و مواد مغذی خاک، سودمند است (Gigliotti, et al., 1996)، اما اگر فلزات سنگین در آن‌ها حضور داشته باشند، از طریق ورود به چرخه غذایی از خاک، آب زیرزمینی و گیاهان آثار ناخوشایندی بر سلامت انسان‌ها و حیوانات خواهند داشت (Senesil, et al., 1999). حضور بسیاری از فلزات سنگین در مقدار کم، برای رشد گیاهان ضروری است، اما در غلظت‌های بالاتر می‌تواند آثار سوئی در رشد آن‌ها داشته باشد (Whittle and Dyson, 2002). بنابراین، قبل از کاربرد ورمی کمپوست در خاک، ارزیابی غلظت این فلزات در ورمی کمپوست ضروری است (Gupta and Garg, 2008). در مطالعات مختلف، تغییرات غلظت فلزات سنگین طی فرایند تولید ورمی کمپوست از ۲ روزه پیروی می‌کنند. در برخی مراجع کاهش غلظت فلزات سنگین به علت نشت شیرابه (Kaushik and Garg, 2003) و جذب فلزات در مواد بستر از طریق کرم‌های خاکی و تجمع آن در بافت‌هایشان (Sharma, et al., 2005) گزارش شده است. کرم‌های خاکی مقدار زیادی خاک را فرو می‌برند و از طریق بلع در معرض فلزات سنگین قرار می‌گیرند. همچنین، از پوست بدنشان نیز می‌توانند این فلزات را جذب کنند (Morgan, et al., 1999). از طرف دیگر، می‌توان گفت هنگام فرایند تولید ورمی کمپوست، به علت کاهش حجم و وزن مواد بستر در نتیجه تجزیه مواد آلی، غلظت فلزات سنگین افزایش می‌یابد (Deolalikar, et al., 2005). Dominguez و همکاران (Dominguez, et al., 1997) نیز بیان کرده‌اند با

سانتی‌متر، وزن ۱ کیلوگرم و حجم تقریبی ۱۵ لیتر استفاده شد. پس از فراوری و آماده‌سازی مواد اولیه، داخل هر یک از ظروف ۲/۵ کیلوگرم مواد بستر (بر اساس وزن خشک) که شامل درصدهای مختلفی از ضایعات گیاه ذرت، کود گاوی، کمپوست و کارتن بودند، ریخته شد و هر ظرف به‌منزله یک واحد آزمایشی به شمار آمد. این تحقیق به صورت طرح فاکتوریل با ۳ نوع ترکیب بستر (۶۰، ۴۰ و ۸۰ درصد ضایعات ذرت و مابقی کمپوست، کود گاوی و کارتن)، ۴ سطح لجن فعال (غلظت‌های ۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۶۰۰۰ mg/l) به‌منزله تلقیح میکروبی و ۳ تکرار برای هر تیمار طی ۷۰ روز انجام شد. در این مطالعه جمعاً ۳۶ واحد آزمایشگاهی (۳×۴×۳) طرح‌ریزی و طی اجرای طرح داخل سالن ورمی‌کمپوست کارخانه کمپوست مشهد نگهداری شدند.

۳.۲. تلقیح تیمارها از طریق کرم‌های خاکی

پس از آماده‌سازی تیمارهای مختلف و تنظیم رطوبت آن‌ها در حدود ۷۰ درصد وزنی، به مدت ۳۰ روز در حال کمپوست‌شدن قرار داده شدند تا مرحله پیش‌کمپوست‌سازی سپری شود. پس از اتمام این مرحله، کلیه تیمارها تحت تیمار لجن فعال فاضلاب قرار گرفتند. انتخاب این زمان برای تلقیح، به منظور پایین‌آمدن نسبت کربن به نیتروژن طی دوره پیش‌کمپوست و بهبود شرایط برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها در لجن فعال بود. در همین زمان، عمل تلقیح کلیه تیمارها از طریق کرم‌های خاکی نیز با افزودن ۱۵۰ جفت کرم خاکی بالغ با وزن تقریبی ۳۰۰ میلی‌گرم از گونه *Eisenia fetida* به هر ظرف انجام شد. هنگام انجام فرایند، رطوبت بسترها در محدوده ۶۰-۷۰ درصد و دمای آن‌ها نیز که تابعی از درجه حرارت محل پروژه (سالن ورمی‌کمپوست) است، در محدوده ۱۵-۲۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. به منظور ممانعت از هدررفتن رطوبت مواد بستر و جلوگیری از تابش مستقیم نور به بستر کرم‌های خاکی، سطوح تیمارها با گونی‌های نخی و نایلونی پوشیده شدند.

وجودی که در نتیجه تثبیت کربن طی فرایند معدنی شدن در فرایند تولید ورمی‌کمپوست، مقدار کل فلزات سنگین (حدود ۲۵-۳۰ درصد) افزایش می‌یابد، مقدار قابل دسترس آن‌ها (حدود ۳۵-۵۵ درصد) کاهش خواهد یافت.

لذا، هدف از این مطالعه، بررسی تغییرات غلظت فلزات سنگین هنگام بازیافت پسماندهای کشاورزی و تولید ورمی‌کمپوست و مقایسه کود آلی تولیدشده با معیارهای جهانی است تا بتوان موارد کاربرد این کود را در صنعت کشاورزی و میزان سودمندی این روش بازیافت را در مدیریت ضایعات آلی معین کرد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. فراوری و آماده‌سازی مواد اولیه

مواد اولیه مورد استفاده شامل ضایعات مزارع ذرت، کود گاوی، کارتن و کمپوست زباله شهری بودند. کود گاوی، از محل دپوی کود در سایت کارخانه کمپوست مشهد و کود کمپوست نیز از سالن تولید کمپوست در کارخانه تهیه شد که با توجه به گذشت ۲ ماه از انجام دپو، نسبتاً تثبیت‌شده و فاقد تخم علف‌های هرز بود. کود گاوی نیز به منظور جداکردن ذرات با سایز درشت از طریق الک سایز ۳ میلی‌متر سرنده شد. به منظور حذف املاح مضر و کاهش EC نیز با پخش کردن روی یک صفحه فلزی سوراخ‌دار و پاشیدن آب در ۳ مرحله شستشو شد. ضایعات ذرت از مزارع ذرت تهیه و شسته و در هوای آزاد به مدت چند روز پهن شدند. کارتن نیز از زباله‌های در کارخانه تهیه شد. کارتن‌ها نیز شسته و خرد شدند. لجن فعال فاضلاب که به‌منزله منبع میکروارگانیسم‌ها استفاده شد، از تصفیه‌خانه فاضلاب شهری بجنورد تهیه شد. قبل از ساخت تیمارهای اصلی، از مواد اولیه جداگانه نمونه‌برداری و غلظت فلزات سنگین آن‌ها تعیین شد که در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است.

۲.۲. ساخت و آماده‌سازی تیمارها

در این تحقیق، برای ساخت واحدهای آزمایشی از سطل‌های پلاستیکی بیضوی شکل با ابعاد ۳۷×۴۹

جدول ۱. غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین در مواد اولیه تشکیل دهنده بستر (mg/kg)

| Cd | Fe | K | Mn | Na | Ni | Cr | Ca | Zn | Cu | Mg | Pb | مواد اولیه |
|----------|-----------|-----------|--------|----------|-------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|------------|
| n.d | ۲۲۶۱±۷۵۶ | ۱۰۵۱۶±۵۸۳ | ۱۷۰±۵۶ | ۹۹۹±۹۸ | ۵±/۲۵ | ۱۲±/۷۸ | ۱۰۶۳۴±۵۲۹ | ۱۰۰±۱۶ | ۲۱±۴ | ۴۶۳۴±۶۸۷ | ۶±/۳۲ | ضایعات ذرت |
| ۰/۱۲±/۰۳ | ۱۲۶۰۶±۵۷۵ | ۲۷۲۰±۱۹۶ | ۴۶۰±۶۷ | ۱۱۶۴±۱۱۲ | ۷۵±۸ | ۷۱±۸ | ۱۵۱۳۴±۵۴۱ | ۹۰۰±۴۴ | ۱۹۶±۲۳ | ۱۳۳۳۴±۱۴۲۸ | ۱۱۳±۱۲ | کمیوست |
| n.d | ۱۰۷۸±۴۳۶ | ۲۵۳۳±۲۷۶ | ۴۵۵±۵۶ | ۱۴۳۰±۸۷ | ۴۱±۵ | ۳۸±۵ | ۷۰۵۰۹±۱۴۳۲ | ۱۵۰±۱۱ | ۲۶±۶ | ۷۶۹۶±۴۹۸ | ۵±/۷۴ | کود گاوی |
| n.d | ۸۷۶±۲۷۹ | ۹۵۰±۷۸ | ۵۵±۱۲ | ۸۰۰±۵۲ | ۴±/۴۲ | ۷±/۸۵ | ۱۷۰۰۹±۸۶۳ | ۵۰±۶ | ۳۱±۴ | ۱۲۸۴±۸۶ | ۹±/۷۱ | کازن |

n.d.: not detected

اعداد گزارش شده به صورت میانگین ± انحراف معیارند (n=۳)

جدول ۲. غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین در لجن فعال فاضلاب (mg/l)

| Cd | Fe | K | Mn | Na | Ni | Cr | Ca | Zn | Cu | Mg | Pb | غلظت لجن فعال (mg/l) |
|-----|-------------|------------|------------|-------------|-----|-----|------------|------------|------------|------------|-----|----------------------|
| n.d | ۴/۳۲±/۲ | ۲/۳۱±/۲۴ | ۰/۸±/۰/۱ | ۴/۸۷±/۴۲ | n.d | n.d | ۱/۸۷±/۰/۸ | ۰/۸۰±/۰/۲ | ۰/۷۵±/۰/۲ | ۱/۳۴±/۰/۱۲ | n.d | ۲۰۰۰ |
| n.d | ۱۲/۷±/۰/۳۷ | ۴/۸۳±/۰/۸۶ | ۰/۲۱±/۰/۰۳ | ۱۲/۵۳±/۰/۸۱ | n.d | n.d | ۲/۸۳±/۰/۸۱ | ۰/۷۲±/۰/۰۲ | ۰/۵۱±/۰/۰۲ | ۱/۴±/۰/۰۶ | n.d | ۴۰۰۰ |
| n.d | ۱۶/۵۲±/۰/۸۸ | ۵/۷۵±/۰/۱۷ | ۰/۳۸±/۰/۰۵ | ۱۴/۵۴±/۰/۸۵ | n.d | n.d | ۴/۵±/۰/۰۷ | ۰/۷۵±/۰/۰۴ | ۰/۷۲±/۰/۰۲ | ۲/۰۱±/۰/۰۹ | n.d | ۶۰۰۰ |

n.d.: not detected

اعداد گزارش شده به صورت میانگین ± انحراف معیارند (n=۳)

برای فلزات سدیم و نیکل برابر ۰/۲، برای کلسیم برابر ۰/۳ و برای پتاسیم برابر ۱ به دست آمد.

۷.۲. تجزیه و تحلیل آماری

آماده‌سازی داده‌ها در برنامه Excel انجام شد. نتایج حاصل از هر مرحله با نرم‌افزار SPSS در قالب یک طرح فاکتوریل تجزیه و تحلیل شد. مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA)، آزمون چنددامنه‌ای دانکن انجام شد تا اثر نوع بستر و تلقیح لجن در کیفیت کود نهایی مشخص شود. نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار SigmaPlot رسم شدند.

۳. نتایج و بحث

با گذشت زمان، غلظت فلزات سنگین و عناصر غذایی مورد بررسی در مواد بستر در کلیه تیمارها به صورت پیوسته طی مدت تحقیق از روز اول (مواد اولیه) تا ۷۰ (ورمی‌کمپوست تولیدشده) افزایش یافت که ناشی از تجزیه مواد آلی و کاهش وزن خشک مواد در بستر بود. به طوری که روند رو به رشد غلظت فلزات سنگین و عناصر غذایی با مقایسه غلظت آن‌ها در مواد اولیه (روز ۱) و ورمی‌کمپوست نهایی (روز ۷۰) در جداول ۴ و ۵ مشهود است. بیشترین غلظت نیکل، مس و روی در تیمارهای این تحقیق به ترتیب برابر با ۵۴ ± ۳ ، ۱۲۹ ± ۹ و ۵۹۴ ± ۱۹ به دست آمد. همچنین، بیشترین غلظت مشاهده‌شده از کروم و سرب نیز ۴۹ ± ۵ و ۱۲۹ ± ۹ mg/kg بود. تثبیت‌سازی لجن فعال فاضلاب طی فرایند تولید ورمی‌کمپوست، افزایش غلظت فلزات سنگین Cu، Fe، Cr، Zn را به دنبال داشت (Gupta and Garg, 2008). در بررسی بازیافت لجن فعال فاضلاب و تولید ورمی‌کمپوست از آن، افزایش غلظت عناصر مغذی ماکرو شامل K، Ca، Na و Fe و کاهش در غلظت فلزات سنگین شامل Cu، Mn، Pb و Zn مشاهده و کاهش غلظت فلزات سنگین به علت تجمع این فلزات در بدن کرم‌های خاکی گزارش شد (Khwairakpam and Bhargava, 2009).

۴.۲. نمونه‌گیری برای انجام آزمایش‌ها

به منظور اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین، نمونه‌های همگنی از هر تیمار در ابتدا (روز ۱) و انتهای فرایند (روز ۷۰) تهیه شدند. نمونه‌های تهیه‌شده ابتدا به مدت ۲۳ ساعت داخل آون و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به طور کامل خشک، سپس آسیاب شدند.

۵.۲. جداسازی کرم‌های خاکی و آماده‌سازی محصول

پس از گذشت ۷۰ روز از ساخت تیمارها و آماده‌شدن ورمی‌کمپوست در تمامی واحدهای آزمایشگاهی، عملیات جداسازی کرم‌های خاکی از بستر به صورت دستی انجام شدند. پس از جداسازی کرم‌های خاکی به منظور حذف مواد درشت، ورمی‌کمپوست تولیدشده از هر واحد آزمایشگاهی به صورت دستی از طریق یک الک با سایز منافذ ۳ میلی‌متر سرند و بدین ترتیب محصول نهایی تیمارهای مختلف آماده شد.

۶.۲. تعیین عناصر غذایی و فلزات سنگین

۱ گرم از نمونه خشک و خردشده داخل ظرف هضم ریخته و به آن ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک اضافه شد. ظرف هضم ابتدا ۴۵ دقیقه در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد، سپس ۸ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا محلول شفافی به دست آمد. طی فرایند هضم، ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ در ۳ مرحله به نمونه‌ها اضافه شد و هضم تا رسیدن به حجم ۱ میلی‌لیتر ادامه یافت. پس از سرد شدن نمونه‌ها، ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۱ درصد به آن‌ها اضافه شد. نمونه‌های هضم‌شده صاف شدند و در بالن ژوژه از طریق آب دیونایز به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسیدند. مقدار فلزات سنگین و عناصر غذایی نمونه‌های آماده‌شده، به وسیله دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد (Campitelli and Ceppi, 2008). حد تشخیص (LOD) در اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین برای منگنز برابر ۰/۰۰۹، برای روی برابر ۰/۰۱، برای مس برابر ۰/۰۳، برای آهن برابر ۰/۰۵، برای منیزیم، سرب و کروم برابر ۰/۱،

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر مقدار ذرت در بستر و غلظت لجن فعال فاضلاب بر میانگین مربعات غلظت فلزات سنگین

| ورمی کمپوست | مواد اولیه | ورمی کمپوست | مواد اولیه | ورمی کمپوست | مواد اولیه | df | منبع تغییرات |
|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|----|----------------------|
| Mn | | Ca | | Fe | | | |
| **۲۶۱۱۸ | **۶۰۱۹۲ | **۶۰۵۷۹۴۸۱ | **۳۷۰۸۷۷۶۵۸ | **۲۵۶۱۱۴۳۷ | **۲۲۸۶۳۰۰۵ | ۲ | مقدار ذرت بستر |
| **۴۱۲۵/۴۲ | ns۴۶/۴۳ | **۹/۸۰ | ns۷۱۸۹۹۹۷ | **۳۰۵۲۰۷۷ | ns۱۶۳۰۶ | ۲ | غلظت لجن فعال فاضلاب |
| ns۳۴۴/۷۱ | ns۵۸/۲۰ | ns۳۷۸۱۳۷۷ | ns۴۴۵۷۰۸۶ | ns۱۶۶۱۴۳ | ns۹۶۵۹ | ۶ | مقدار ذرت × غلظت لجن |
| ۷۲۲/۶۶ | ۱۵۸۷/۰۸ | ۹۰۲۳۶۷۶ | ۱۲۷۷۴۵۶۶ | ۲۷۴۳۸۲ | ۱۷۸۹۴۹ | ۱۲ | خطا |
| Mg | | K | | Na | | | |
| **۴۱۹۹۶۳۲۸ | **۴۲۴۱۶۲۰۴ | **۵۱۹۱۴۳۱۱ | **۲۰۳۱۵۸۳۴ | ns۷۶۱۶ | **۲۹۶۱ | ۲ | مقدار ذرت بستر |
| *۱۷۷۳۷۹۶ | ns۴۸۲۹۶ | *۳۲۵۳۷۵۱ | ns۱۶۸۳۱ | **۸۶۹۹۰۷ | ns۶۰۹/۲۴ | ۳ | غلظت لجن فعال فاضلاب |
| ns۲۴۹۸۹۶ | ns۱۲۴۲۲۶ | ns۱۱۴۶۸۷ | ns۴۴۲۸۲ | ns۶۳۲۴ | ns۴۵۹۵ | ۶ | مقدار ذرت × غلظت لجن |
| ۴۰۲۱۰۹ | ۶۸۴۶۴۹ | ۶۴۸۰۰۵ | ۲۴۶۰۶۹ | ۳۵۵۳۸ | ۴۶۹۲ | ۱۲ | خطا |
| Ni | | Zn | | Cu | | | |
| **۱۷۳۲ | **۱۷۶۹ | **۷۰۹۷۴ | **۲۴۲۰۶۹ | **۱۹۳۴ | **۵۴۹۰ | ۲ | مقدار ذرت بستر |
| **۱۸۲/۲۳ | ns۸/۴۲ | *۹۹۰۳ | ns۱۱۲۴ | **۴۴۰/۹۴ | ns۸۱/۵۳ | ۳ | غلظت لجن فعال فاضلاب |
| *۸۲/۴۱ | ns۶/۱۷ | ns۱۷۵۸ | ns۴۰۶/۵۳ | *۱۵۱/۷۳ | ns۳۹/۴۴ | ۶ | مقدار ذرت × غلظت لجن |
| ۲۷/۶۳ | ۲۹/۰۶ | ۲۱۱۶ | ۲۱۹۴ | ۵۰/۲۰ | ۷۹/۲۸ | ۱۲ | خطا |
| | | Cr | | Pb | | | |
| | | **۲۵۴۲ | **۲۸۱۸ | **۴۵۳۹ | **۲۸۱۴ | ۲ | مقدار ذرت بستر |
| | | **۲۳۲/۵۲ | ns۸/۴۱ | *۱۶۰/۷۶ | ns۲۱/۰۹ | ۳ | غلظت لجن فعال فاضلاب |
| | | *۹۶/۷۹ | ns۶/۱۷ | ns۲۷/۲۶ | ns۱۶/۴۶ | ۶ | مقدار ذرت × غلظت لجن |
| | | ۳۱/۳۱ | ۲۹/۰۶ | ۴۱/۰۶ | ۳۰/۸۵ | ۱۲ | خطا |

* و ** به ترتیب نشانگر معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ns بیانگر نبود اختلاف معنی دار است.

در مطالعه‌ای که به بررسی غلظت فلزات سنگین در ورمی کمپوست تولیدشده از لجن صنایع کاغذسازی و کارخانه‌های تصفیه فاضلاب پرداخت، افزایش در غلظت این فلزات در کود نهایی تولیدشده گزارش شد (Elvira, et al., 1998). در مطالعه‌ای دیگر افزایش غلظت فلزات سنگین در ورمی کمپوست نهایی را به علت فرایند تثبیت‌سازی مواد آلی بیان کردند (Hartenstein and Hartenstein, 1981). همچنین، در مطالعه‌ای افزایش ۱۰ درصدی پتاسیم هنگام تولید ورمی کمپوست از ضایعات شهری گزارش شد (Kaviraj and Sharma, 2003). در مقایسه کمپوست و ورمی کمپوست، افزایش غلظت در Cr، Zn، Pb و Cd و کاهش غلظت در Cu، Ni، K، Na و Ca مشاهده و بیان شد که غلظت تمام فلزات ذکر شده (جز Cl) در ورمی کمپوست کمتر از کمپوست است.

در مطالعه‌ای که به بررسی غلظت فلزات سنگین در ورمی کمپوست تولیدشده از لجن صنایع کاغذسازی و کارخانه‌های تصفیه فاضلاب پرداخت، افزایش در غلظت این فلزات در کود نهایی تولیدشده گزارش شد (Elvira, et al., 1998). در مطالعه‌ای دیگر افزایش غلظت فلزات سنگین در ورمی کمپوست نهایی را به علت فرایند تثبیت‌سازی مواد آلی بیان کردند (Hartenstein and Hartenstein, 1981). همچنین، در مطالعه‌ای افزایش ۱۰ درصدی پتاسیم هنگام تولید ورمی کمپوست از ضایعات شهری گزارش شد (Kaviraj and Sharma, 2003). در مقایسه کمپوست و ورمی کمپوست، افزایش غلظت در Cr، Zn، Pb و Cd و کاهش غلظت در Cu، Ni، K، Na و Ca مشاهده و بیان شد که غلظت تمام فلزات ذکر شده (جز Cl) در ورمی کمپوست کمتر از کمپوست است.

مواد اولیه کاهش یافته است (Elvira, et al., 1996). کاهش غلظت Ni, Cr, Pb در تبدیل لجن شهری به ورمی کمپوست به علت تجمع در بافت‌های کرم‌های خاکی گزارش شد (Srivastava, et al., 2005).

نتایج تجزیه واریانس داده‌های آزمایش (جدول ۳) بیانگر این است که اثر مقدار ذرت در بستر تولید ورمی کمپوست در ابتدا و انتهای فرایند در غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین معنی‌دار بود. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش میزان ذرت و در نتیجه کاهش میزان کمپوست در تیمارها، غلظت این عناصر و فلزات در بستر، تغییراتی را بر اساس میزان مواد تشکیل‌دهنده بسترها نشان دادند (جدول ۴)، زیرا غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین در ورمی کمپوست، به غلظت آن‌ها در مواد اولیه در بستر وابسته است. افزایش ضایعات ذرت، به علت کم‌تر بودن محتوی فلزات سنگین در آن نسبت به سایر مواد آلی در بستر (جدول ۱) موجب رقیق‌سازی و کاهش غلظت فلزات سنگین در بستر و کود تولیدی می‌شود. شایان یادآوری است که با توجه به میزان سدیم در مواد تشکیل‌دهنده بستر (جدول ۱)، غلظت سدیم تغییر معنی‌داری نشان نداد. اما به علت بیشتر بودن میزان پتاسیم در ضایعات ذرت نسبت به سایر مواد تشکیل‌دهنده بستر (جدول ۱)، با افزایش آن، غلظت پتاسیم نیز در بستر افزایش معنی‌داری نشان داد. این مطلب در تحقیق دیگری تأیید شد (Kaushik and Garg, 2004). همچنین، در فرایند تولید ورمی کمپوست از لجن صنایع نساجی و کود گاوی به اهمیت غلظت این فلزات در مواد اولیه در بستر و تأثیر آن در غلظت این فلزات در ورمی کمپوست اشاره شده است. گزارش شد که حضور کود در بستر تولید ورمی کمپوست، موجب افزایش غلظت N, P, K, Mg و Na در ورمی کمپوست می‌شود و علت این امر را غلظت بیشتر این عناصر در کود اضافه‌شده به بستر اعلام کردند (Kostecka and Kaniuczak, 2008).

(Frederickson, et al., 2007). همچنین، در مطالعه‌ای که در تولید ورمی کمپوست از ضایعات قهوه انجام گرفت، افزایش در غلظت Ca و Mg و کاهش در غلظت K مشاهد شد (Orozco, et al., 1996). در ورمی کمپوست‌سازی از ضایعات صنعت تولید پنبه همراه کود گوسفندی، افزایش در غلظت Na و K را گزارش کردند (Albanell, et al., 1988). همچنین، افزایش در غلظت K و Ca نیز مشاهده شد (Sangwan, et al., 2008). در بررسی بازیافت لجن صنایع کشاورزی از طریق فرایند تولید ورمی کمپوست، افزایش در غلظت K, Ca, Mg, Fe و Zn گزارش شد (Suthar, 2010). البته در برخی مقالات ارائه شده است که فرایند تولید ورمی کمپوست، از طریق تولید ترکیبات هیومیکی و باندشدن این ترکیبات به فلزات سنگین، قابلیت دسترسی این فلزات را کاهش می‌دهد (Kostecka and Kaniuczak, 2008). همچنین، بیان شد با وجودی که در نتیجه تثبیت کربن طی فرایند معدنی‌شدن در فرایند تولید ورمی کمپوست، مقدار کل فلزات سنگین (حدود ۲۵-۳۰ درصد) افزایش می‌یابد، مقدار قابل دسترس آن‌ها (حدود ۳۵-۵۵ درصد) کاهش خواهد داشت (Dominguez, et al., 1997). در برخی مراجع نیز کاهش غلظت فلزات سنگین به علت نشت شیرابه (Kaushik and Garg, 2003)، جذب فلزات از طریق کرم‌های خاکی و تجمع آن در بافت‌هایشان (Sharma, et al., 2005) گزارش شده است. کاهش غلظت Ca و K هنگام تولید ورمی کمپوست از ضایعات صنایع نساجی و کود گاوی در اثر نشت شیرابه گزارش شده است (Kaushik and Garg, 2003). در تولید ورمی کمپوست از عدسک آبی و کود گاوی، کاهش در غلظت فلزات سنگین شامل Fe, Cu, Cd, Cr, Pb و Zn نسبت به مواد اولیه مشاهده شد و علت آن را نشت شیرابه و تجمع فلزات در بدن کرم‌های خاکی گزارش کردند (Gupta, et al., 2007). در بررسی توانایی کرم‌های خاکی در تجزیه زیستی لجن صنایع کاغذسازی اعلام کردند که قابلیت دسترسی فلزات سنگین در ورمی کمپوست نسبت به

جدول ۴. غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین تحت اثر مستقل درصد ذرت در بستر (mg/kg)

| درصد ضایعات ذرت بستر | | | زمان نمونه‌گیری | فلزات سنگین |
|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|-------------|
| ۸۰ | ۶۰ | ۴۰ | | |
| ^a ۱۴۵±۹۱۹۷ | ^b ۱۵۴±۸۳۸۰ | ^c ۱۲۹±۷۳۶۱ | مواد اولیه | K |
| ^a ۲۲۳±۱۲۳۱۰ | ^b ۱۷۶±۱۰۸۸۰ | ^c ۱۷۹±۹۳۶۹ | ورمی کمپوست | |
| ^a ۱۳±۱۵۹۶ | ^a ۱۵±۱۵۹۸ | ^a ۱۲±۱۵۷۸ | مواد اولیه | Na |
| ^a ۵۸±۲۴۵۵ | ^a ۶۰±۲۴۲۱ | ^a ۵۲±۲۴۲۷ | ورمی کمپوست | |
| ^c ۳۹۷±۱۱۶۵۲ | ^b ۶۰۷±۱۶۰۰۶ | ^a ۵۳۰±۱۹۴۹۸ | مواد اولیه | Ca |
| ^c ۵۳۹±۲۰۲۹۳ | ^b ۴۴۷±۲۵۰۵۶ | ^a ۴۹۶±۲۹۰۴۳ | ورمی کمپوست | |
| ^c ۱۸۸±۶۴۴۲ | ^b ۱۳۸±۸۳۰۸ | ^a ۱۴۵±۹۰۱۶ | مواد اولیه | Mg |
| ^c ۱۱۱±۱۰۵۳۵ | ^b ۱۷۸±۱۱۷۴۱ | ^a ۱۰۸±۱۲۹۹۹ | ورمی کمپوست | |
| ^c ۸۴±۷۴۹۱ | ^b ۵۰±۸۲۰۱ | ^a ۱۱۴±۹۴۲۱ | مواد اولیه | Fe |
| ^c ۹۲±۹۵۶۹ | ^b ۱۱۲±۱۰۷۲۳ | ^a ۱۷۶±۱۱۶۳۰ | ورمی کمپوست | |
| ^c ۴±۲۴ | ^b ۷±۳۳ | ^a ۵±۴۲ | مواد اولیه | Ni |
| ^c ۷±۳۷ | ^b ۵±۴۶ | ^a ۳±۵۴ | ورمی کمپوست | |
| ^c ۷±۶۳ | ^b ۸±۸۴ | ^a ۹±۹۳ | مواد اولیه | Cu |
| ^b ۹±۱۱۲ | ^a ۶±۱۲۶ | ^a ۹±۱۲۹ | ورمی کمپوست | |
| ^c ۱۹±۲۱۰ | ^b ۱۷±۲۵۲ | ^a ۲۰±۴۰۱ | مواد اولیه | Zn |
| ^c ۱۸±۴۸۷ | ^b ۲۴±۵۲۶ | ^a ۱۹±۵۹۴ | ورمی کمپوست | |
| ^c ۴±۲۵ | ^b ۴±۳۶ | ^a ۵±۴۷ | مواد اولیه | Cr |
| ^c ۶±۲۸ | ^b ۵±۳۹ | ^a ۵±۴۹ | ورمی کمپوست | |
| ^c ۷±۶۳ | ^b ۸±۸۴ | ^a ۹±۹۳ | مواد اولیه | Pb |
| ^c ۱۲±۱۱۲ | ^b ۶±۱۲۶ | ^a ۹±۱۲۹ | ورمی کمپوست | |
| ^c ۱۸±۲۵۱ | ^b ۱۷±۳۱۵ | ^a ۱۵±۳۴۵ | مواد اولیه | Mn |
| ^c ۱۹±۳۸۷۸ | ^b ۱۹±۴۱۷ | ^a ۲۱±۴۵۳ | ورمی کمپوست | |

باکتری‌های تجزیه‌کننده مواد آلی به بستر تولید ورمی کمپوست همراه کرم‌های خاکی موجب تسریع فرایند تجزیه زیستی مواد آلی می‌شود (Saha, et al., 2008). حضور این باکتری‌ها، به علت تثبیت مواد آلی و کاهش کربن آلی بستر، موجب افزایش درصد عناصر غذایی و فلزات سنگین در ورمی کمپوست می‌شود. همچنین، این باکتری‌ها به صورت فعال با تجمع زیستی^۱ و غیرفعال با جذب زیستی^۲ موجب کاهش قابلیت دسترسی فلزات سنگین برای کرم‌های خاکی می‌شوند و در نتیجه این فلزات جذب بافت‌های کرم‌های خاکی نمی‌شوند و در محیط می‌مانند (Maboeta and Rensburg, 2003)

تجزیه واریانس داده‌های آزمایش (جدول ۲) نشان می‌دهد که غلظت لجن فعال فاضلاب افزوده شده به بستر، در ابتدا و انتهای فرایند بر غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین داده‌های آزمایش نشان دادند که با افزایش غلظت لجن، غلظت فلزات سنگین افزایش یافت (جدول ۵). به طوری که بیشترین میزان تثبیت مواد آلی و در نتیجه بیشترین غلظت فلزات سنگین و عناصر غذایی در کود ورمی کمپوست تولیدشده در بسترهایی با تلقیح ۶۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر لجن فعال فاضلاب و کمترین غلظت این فلزات در تیمارهایی با تلقیح ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر لجن فاضلاب مشاهده شد. در مطالعه‌ای گزارش شده است که تلقیح

جدول ۵. غلظت عناصر غذایی و فلزات سنگین تحت اثر مستقل غلظت لجن تلقیح شده (mg/kg)

| غلظت لجن (میلی گرم در لیتر) | | | | زمان نمونه گیری | فلزات سنگین |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|-------------|
| ۶۰۰۰ | ۴۰۰۰ | ۲۰۰۰ | ۰ | | |
| ۸۳۵۷±۲۲۱ ^a | ۸۲۸۶±۲۰۶ ^a | ۸۳۰۲±۲۱۶ ^a | ۸۳۰۶±۲۰۸ ^a | مواد اولیه | K |
| ۱۱۳۱۳±۳۴۲ ^a | ۱۱۰۶۷±۳۲۲ ^{ab} | ۱۰۶۸۶±۳۶۹ ^b | ۱۰۳۴۶±۳۳۳ ^b | ورمی کمپوست | |
| ۱۵۹۶±۱۶ ^a | ۱۵۹۳±۱۵ ^a | ۱۵۸۳±۱۶ ^a | ۱۵۹۰±۱۶ ^a | مواد اولیه | Na |
| ۲۶۲۶±۴۸ ^a | ۲۵۳۵±۴۴ ^{ab} | ۲۴۵۵±۲۷ ^b | ۲۱۲۲±۲۰ ^c | ورمی کمپوست | |
| ۱۶۰۷۴±۴۱۸ ^a | ۱۶۰۴۷±۳۱۳ ^a | ۱۵۹۸۱±۶۳۵ ^a | ۱۴۷۷۳±۵۸۷ ^a | مواد اولیه | Ca |
| ۲۷۷۱۰±۴۹۶ ^a | ۲۵۵۴۰±۳۱۰ ^{ab} | ۲۳۵۱۹±۵۷۱ ^{bc} | ۲۲۴۱۹±۴۳۱ ^c | ورمی کمپوست | |
| ۷۹۲۲±۲۹۱ ^a | ۷۹۸۷±۳۰۶ ^a | ۷۸۶۱±۳۵۲ ^a | ۷۹۱۷±۳۳۳ ^a | مواد اولیه | Mg |
| ۱۲۰۲۲±۲۸۷ ^a | ۱۱۸۸۷±۲۸۲ ^a | ۱۱۵۴۸±۲۹۴ ^{ab} | ۱۱۳۳۴±۳۲۹ ^b | ورمی کمپوست | |
| ۸۳۸۸±۲۲۰ ^a | ۸۳۵۹±۲۰۰ ^a | ۸۴۰۲±۲۲۳ ^a | ۸۳۳۵±۲۱۴ ^a | مواد اولیه | Fe |
| ۱۱۱۱۱±۲۸۱ ^a | ۱۰۷۱۳±۲۰۰ ^b | ۱۰۶۲۹±۲۴۰ ^b | ۱۰۱۰۹±۲۱۷ ^c | ورمی کمپوست | |
| ۳۳±۴ ^a | ۳۲±۸ ^a | ۳۴±۴ ^a | ۳۳±۵ ^a | مواد اولیه | Ni |
| ۴۹±۶ ^a | ۴۷±۶ ^a | ۴۷±۷ ^a | ۴۲±۶ ^b | ورمی کمپوست | |
| ۷۷±۵ ^a | ۸۱±۴ ^a | ۸۰±۴ ^a | ۸۳±۴ ^a | مواد اولیه | Cu |
| ۱۲۸±۴ ^a | ۱۲۵±۴ ^{ab} | ۱۲۱±۳ ^{bc} | ۱۱۷±۵ ^c | ورمی کمپوست | |
| ۲۸۹±۲۴ ^a | ۲۹۵±۲۴ ^a | ۲۷۷±۲۰ ^a | ۲۸۹±۲۰ ^a | مواد اولیه | Zn |
| ۵۵۷±۱۷ ^a | ۵۴۳±۱۴ ^a | ۵۴۰±۱۷ ^a | ۵۰۲±۱۳ ^b | ورمی کمپوست | |
| ۳۶±۴ ^a | ۳۵±۴ ^a | ۳۷±۵ ^a | ۳۶±۳ ^a | مواد اولیه | Cr |
| ۴۳±۴ ^a | ۳۹±۵ ^a | ۳۹±۳ ^a | ۳۴±۴ ^b | ورمی کمپوست | |
| ۷۷±۴ ^a | ۸۱±۴ ^a | ۸۰±۵ ^a | ۸۳±۵ ^a | مواد اولیه | Pb |
| ۱۲۸±۴ ^a | ۱۲۵±۳ ^a | ۱۲۱±۴ ^{ab} | ۱۱۷±۵ ^b | ورمی کمپوست | |
| ۳۰۱±۱۱ ^a | ۳۰۳±۱۳ ^a | ۳۰۰±۱۲ ^a | ۳۰۲±۱۴ ^a | مواد اولیه | Mn |
| ۴۳۲±۹ ^a | ۴۲۹±۸ ^{ab} | ۴۱۳±۸ ^b | ۴۰۲±۹ ^b | ورمی کمپوست | |

viridae و P. caryosporium و باکتری تثبیت کننده نیتروژن B. polymyxa بررسی شدند و اعلام شد که تلقیح این میکروارگانیسم‌ها موجب افزایش پتاسیم می‌شود (Pramanik et al., 2007). تولید اسید طی تجزیه مواد آلی از طریق میکروارگانیسم‌ها، مهم‌ترین عامل در محلول کردن پتاسیم غیر محلول در بستر است. همچنین، حضور تعداد زیاد میکروفلور در روده کرم‌های خاکی، عامل مهمی در افزایش پتاسیم در ورمی کمپوست گزارش شده است (Kaviraj and Sharma, 2003; Pramanik et al., 2007). در تحقیقی دیگر، بررسی تولید ورمی کمپوست از مواد زاید جامد شهری از طریق کرم خاکی E. fetida همراه تلقیح باکتری‌های A. chroococcum، Penicillium و chrysogenum و P. funiculosum افزایش درصد پتاسیم در نتیجه تلقیح این باکتری‌ها اعلام شد و بیشترین میزان آن را در تیمارهایی گزارش کردند که تحت تأثیر تلقیح هر سه میکروارگانیسم قرار گرفته بودند (Saha, et al., 2008).

در تولید ورمی کمپوست از چپس چوب و لجن فاضلاب همراه تلقیح محلول تجاری EM شامل میکروارگانیسم‌های Pseudomonas، Lactobacillus و Saccharomyces spp افزایش غلظت فلزات سنگین شامل Al، Cu و Ni طی فرایند ورمی کمپوست گزارش شد. علت آن را کاهش مواد آلی بستر و کاهش دسترسی این فلزات تحت تأثیر این باکتری‌ها گزارش کردند (Maboeta and Rensburg, 2003). در بررسی محتوی مواد مغذی و فعالیت‌های میکروبی در ورمی کمپوست حاصل از باگاس و الیاف نارگیل با تلقیح T. viridae، A. niger و B. megaterium، افزایشی در حدود ۵۹ تا ۷۷ درصد در میزان پتاسیم ورمی کمپوست نسبت به مواد بستر تحت تأثیر این میکروارگانیسم‌ها گزارش شد (Pramanik, 2010). همچنین، ویژگی‌های ورمی کمپوست تولیدی از ضایعات آلی شامل زباله‌های جامد شهری، گیاهان آبی، علف و کود گاوی تحت تیمار قارچ‌های تجزیه کننده لیگنین T.

۴. نتیجه گیری

فناوری تولید ورمی کمپوست تکنولوژی مناسبی برای مدیریت ضایعات آلی به شمار می‌رود. کود آلی ورمی کمپوست از لحاظ عناصر میکرو و ماکرو غنی است و موجب افزایش عملکرد محصولات زراعی می‌شود. از آنجا که بسترهای آلی متفاوتی برای تولید ورمی کمپوست استفاده می‌شوند، ارزیابی غلظت فلزات سنگین قبل از کاربرد آن در کشاورزی امری ضروری است. نتایج این تحقیق نشان داد که با سپری شدن زمان، غلظت فلزات سنگین به علت کاهش وزن خشک مواد بستر در نتیجه تثبیت مواد آلی افزایش یافت. با مقایسه غلظت این فلزات با استانداردهای ارائه شده می‌توان بیان کرد که ورمی کمپوست تولید شده در این تحقیق از لحاظ فلزات سنگین در دامنه استاندارد است و می‌تواند در کشاورزی استفاده شود.

آن‌ها علت این امر را فرایند معدنی شدن مواد آلی بستر و کاهش کربن و در نتیجه افزایش پتاسیم طی فرایند ورمی کمپوست اعلام کردند. در مطالعه‌ای نیز ۵ درصد افزایش در میزان پتاسیم در اثر تلقیح میکروبی *L. mauritii* در تولید ورمی کمپوست از ضایعات شهری گزارش شد (Kaviraj and Sharma, 2003).

جدول ۶ استاندارد ملی ایران و سایر کشورها در زمینه حد مجاز فلزات در ورمی کمپوست برای مقایسه داده‌های تحقیق حاضر با میزان استاندارد را نشان می‌دهد. بر اساس استانداردهای ملی ایران، کشورهای اروپایی، امریکا و اسپانیا مشهود است که میزان غلظت فلزات سنگین در ورمی کمپوست تولید شده در این تحقیق، در محدوده مجاز ارائه شده و برای کاربرد در زمینه کشاورزی مفید و بدون خطر است. شایان یادآوری است که ورمی کمپوست تولید شده در این تحقیق، در استاندارد ملی ایران از بین ۲ طبقه در کلاس ۱ و در استاندارد اسپانیا در بین ۳ طبقه در کلاس ۳ قرار گرفت.

جدول ۶. حد مجاز فلزات سنگین در ورمی کمپوست

| فلزات سنگین | استاندارد ملی ایران ^۱ ، mg/kg | استاندارد اروپایی ^۲ ، mg/kg | استاندارد کشورهای اروپایی ^۲ ، mg/kg | استاندارد امریکا ^۲ ، mg/kg | استاندارد اسپانیا ^۳ ، mg/kg |
|-------------|--|--|--|---------------------------------------|--|
| Ni | ۱۰۰ | ۲۰-۲۰۰ | ۲۰-۲۰۰ | ۴۲۰ | ۱۰۰ |
| Cu | ۳۰۰ | ۷۰-۶۰۰ | ۷۰-۶۰۰ | ۱۵۰۰ | ۴۰۰ |
| Zn | ۱۴۰۰ | ۲۱۰-۴۰۰۰ | ۲۱۰-۴۰۰۰ | ۲۸۰۰ | ۱۰۰۰ |
| Cr | ۱۰۰ | ۷۰-۲۰۰ | ۷۰-۲۰۰ | ۱۲۰۰ | ۳۰۰ |
| Pb | ۱۵۰ | ۷۰-۱۰۰۰ | ۷۰-۱۰۰۰ | ۳۰۰ | ۲۰۰ |
| Cd | ۵ | ۰/۷-۱۰ | ۰/۷-۱۰ | ۳۹ | ۳ |

1) The Iranian governmental institution for standardization and certification, 2007

2) Gupta and Garg, 2008)

3) Barral and Paradelo, 2011)

یادداشت‌ها

1. Bioaccumulation

2. Biosorption

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت مالی شهرداری مشهد و مساعدت‌های پرسنل کارخانه کود آلی (کمپوست) مشهد تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

Albanell, E., Plaixats, J., Cabrero, T. 1988. Chemical changes during vermicomposting (*Eisenia fetida*) of sheep manure mixed with cotton industrial wastes. *Biology and Fertility of Soils* 6, 266-269.

Barral, M.T., Paradelo, R. 2011. Trace elements in compost regulation: The case of Spain. *Waste Management* 31, 407-410.

- Campitelli, P., Ceppi, S. 2008. Chemical, physical and biological compost and vermicompost characterization: A chemometric study. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 90, 64-71.
- Deolalikar, A.V., Mitra, A., Bhattacharyee, S., Chakraborty, S. 2005. Effect of vermicomposting process on metal content of paper mill solidwaste. *Journal of Environal Scince & Engineering* 47, 81-84.
- Dominguez, J., Edwards, C.A., Subler, S. 1997. A comparison of vermicomposting and composting. *Biocycle* 38, 57-59.
- Edwards, C., 1995. Historical overview of vermicomposting. *Biocycle* 36, 56-58.
- Elvira, C., Goicoechea, M., Sampedro, L., Mato, S., Nogales, R. 1996. Bioconversion of solid paper-pulp mill sludge by earthworms. *Bioresource Technology* 57, 173-177.
- Elvira, C., Sampedro, L., Benítez, E., Nogales, R. 1998. Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with *Eisenia andrei*: A pilot-scale study. *Bioresource Technology* 63, 205-211.
- Frederickson, J., Howell, G., Hobson, A.M. 2007. Effect of pre-composting and vermicomposting on compost characteristics. *European Journal of Soil Biology* 43, S320-S326.
- Gigliotti, G., Businelli, D., Giusquiani, P.L. 1996. Trace metals uptake and distribution in corn plants grown on a 6-year urban waste compost amended soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 58, 199-206.
- Gupta, P.K. 2008. *Vermicomposting for Sustainable Agriculture*. Agrobios, India.
- Gupta, R., Garg, V.K. 2008. Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting. *Journal of Hazardous Materials* 153, 1023-1030.
- Gupta, R., Mutiyar, P.K., Rawat, N.K., Saini, M.S., Garg, V.K. 2007. Development of a water hyacinth based vermireactor using an epigeic earthworm *Eisenia foetida*. *Bioresource Technology* 98, 2605-2610.
- Hartenstein, R., Hartenstein, F. 1981. Physicochemical Changes Effected in Activated Sludge by the Earthworm *Eisenia foetida*. *Journal of Environmental Quality* 10, 377-381.
- Kaushik, P., Garg, V.K. 2003. Vermicomposting of mixed solid textile mill sludge and cow dung with the epigeic earthworm *Eisenia foetida*. *Bioresource Technology* 90, 311-316.
- Kaushik, P., Garg, V.K. 2004. Dynamics of biological and chemical parameters during vermicomposting of solid textile mill sludge mixed with cow dung and agricultural residues. *Bioresource Technology* 94, 203-209.
- Kaviraj, Sharma, S. 2003. Municipal solid waste management through vermicomposting employing exotic and local species of earthworms. *Bioresource Technology* 90, 169-173.
- Khwairakpam, M., Bhargava, R. 2009. Vermitechnology for sewage sludge recycling. *Journal of Hazardous Materials* 161, 948-954.
- Kostecka, J., Kaniuczak, J. 2008. Vermicomposting of duckweed (*Lemna minor L.*) biomass by *Eisenia fetida* (SAV.) earthworm. *J. Elementol* 13, 571-579.
- Kumar, V., Singh, K.P. 2001. Enriching vermicompost by nitrogen fixing and phosphate solubilizing bacteria. *Bioresource Technology* 76, 173-175.
- Latifah, A.M., Mohd Lokman, C.J., Mohd Kamil, Y., Tengku Hanidza, T.I., Rosta, H., Hafizan, J. 2009. Influences of bedding material in vermicomposting process. *International Journal of Biology* 1, 81-91.

- Maboeta, M.S., Rensburg, L.v. 2003. Vermicomposting of industrially produced woodchips and sewage sludge utilizing *Eisenia fetida*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 56, 265-270.
- Martin, A., Lavelle, P. 1992. Effect of soil organic matter quality on its assimilation by *Millsionia anomala*, a tropical geophagous earthworm. *Soil Biology and Biochemistry* 24, 1535-1538.
- Morgan, A., Sturzenbaum, S., Winters, C., Kille, P. 1999. Cellular and Molecular aspects of metal sequestration and toxicity in earthworms. *Invertebrate Reproduction & Development* 36, 17-24.
- Nair, J., Sekiozoic, V., Anda, M. 2006. Effect of pre-composting on vermicomposting of kitchen waste. *Bioresource Technology* 97, 2091-2095.
- Ndegwa, P.M., Thompson, S.A. 2000. Effects of C-to-N ratio on vermicomposting of biosolids. *Bioresource Technology* 75, 7-12.
- Nielson, R.L. 1965. Presence of Plant Growth Substances in Earthworms demonstrated by Paper Chromatography and the Went Pea Test. *Nature* 208, 1113-1114.
- Orozco, F.H., Cegarra, J., Trujillo, L.M., Roig, A. 1996. Vermicomposting of coffee pulp using the earthworm *Eisenia fetida*: Effects on C and N contents and the availability of nutrients. *Biology and Fertility of Soils* 22, 162-166.
- Pramanik, P. 2010. Changes in microbial properties and nutrient dynamics in bagasse and coir during vermicomposting: Quantification of fungal biomass through ergosterol estimation in vermicompost. *Waste Management* 30, 787-791.
- Pramanik, P., Ghosh, G.K., Ghosal, P.K., Banik, P. 2007. Changes in organic - C, N, P and K and enzyme activities in vermicompost of biodegradable organic wastes under liming and microbial inoculants. *Bioresource Technology* 98, 2485-2494.
- Riggle, D., Holmes, H. 1994. Expanding horizons for commercial vermiculture : Earthworms and composting. *Biocycle* 35, 58-62.
- Saha, S., Pradhan, K., Sharma, S., Alappat, B.J. 2008. Compost production from Municipal Solid Waste (MSW) employing bioinoculants. *International Journal of Environment and Waste Management* 2, 572-583.
- Sangwan, P., Kaushik, C.P., Garg, V.K. 2008. Feasibility of utilization of horse dung spiked filter cake in vermicomposters using exotic earthworm *Eisenia foetida*. *Bioresource Technology* 99, 2442-2448.
- Senesil, G.S., Baldassarre, G., Senesi, N., Radina, B. 1999. Trace element inputs into soils by anthropogenic activities and implications for human health. *Chemosphere* 39, 343-377.
- Sharma, S., Pradhan, K., Satya, S., Vasudevan, P. 2005. Potentiality of Earthworms for Waste Management and in Other Uses – A Review. *American Science* 1, 4-16.
- Srivastava, R., Kumar, D., Gupta, S.K. 2005. Bioremediation of municipal sludge by vermitechnology and toxicity assessment by *Allium cepa*. *Bioresource Technology* 96, 1867-1871.
- Suthar, S. 2010. Recycling of agro-industrial sludge through vermitechnology. *Ecological Engineering* 36, 1028-1036.
- The Iranian governmental institution for standardization and certification. 2007. Vermicompost- Physical and chemical Specification (13724). Institute of standards and industrial research of Iran (ISIRI), Iran.
- Whittle, A., Dyson, A. 2002. The fate of heavy metals in green waste composting. *The Environmentalist* 22, 13-21.
- Wright, S.F., Upadhyaya, A. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198, 97-107.