فصلنامه چشم انداز حسابداری و مدیریت
دوره ۸، شماره ۱۰۷، پاییز ۱۴۰۴(جلد دوم)
www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

چشم انداز حسابداری و مدیریت (دوره هشتم)
شماره ۱۰۷ / پاییز ۱۴۰۴ (جلد دوم)/ صص ۱۳۶-۱۵۲

بررسی شیمیایی کود کمپوست تولیدی از پسماندهای شهری و کاربرد آن در فضای سبز شهری

لیلاسادات صالحی زاده
کارشناسی شیمی محض، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران.
Salehizadebahar@gmail.com

چکیده

پسماندهای شهری به عنوان یکی از چالش‌های زیست‌محیطی مهم در شهرهای مدرن مطرح هستند و مدیریت پایدار آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از روش‌های موثر برای بازیافت این پسماندها، تبدیل آن‌ها به کود کمپوست است که می‌تواند ضمن کاهش حجم پسماند، ارزش غذایی برای خاک و گیاهان فراهم کند. در این مقاله مروری، مطالعات پیشین مرتبط با ویژگی‌های شیمیایی کود کمپوست تولیدی از پسماندهای شهری، شامل ترکیبات نیتروژن، فسفر، پتاسیم، pH، EC و مواد آلی، بررسی شده است. همچنین کاربرد این کودها در فضای سبز شهری و اثرات آن‌ها بر رشد گیاهان، بهبود ساختار خاک و افزایش حاصلخیزی خاک‌های شهری مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که کود کمپوست شهری با شرایط کنترل‌شده می‌تواند جایگزینی مناسب برای کودهای شیمیایی باشد و ضمن کاهش آلودگی زیست‌محیطی، نقش موثری در توسعه پایدار فضای سبز شهری ایفا کند. با توجه به اهمیت کیفیت شیمیایی کمپوست و استانداردهای زیست‌محیطی، توجه به فرآیند تولید و پایش ویژگی‌های شیمیایی آن برای استفاده در فضای سبز شهری ضروری است.

واژگان کلیدی: کود کمپوست، پسماند شهری، فضای سبز شهری، بازیافت زیست‌محیطی.

مقدمه

با افزایش جمعیت جهانی و رشد سریع شهرنشینی، تولید پسماندهای شهری به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و مدیریتی در شهرهای مدرن تبدیل شده است. مدیریت ناپایدار این پسماندها می‌تواند پیامدهای جدی برای محیط زیست، سلامت انسان و اکوسیستم‌های شهری داشته باشد، از جمله آلودگی هوا، آب و خاک، انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش کیفیت زندگی شهری. پسماندهای شهری عمدتاً شامل بخش آلی، پلاستیک، کاغذ، شیشه و مواد غیرقابل تجزیه هستند که بخش قابل توجهی از آن‌ها قابلیت بازیافت و تبدیل به منابع مفید را دارند. یکی از روش‌های پایدار و موثر برای کاهش اثرات منفی پسماندهای شهری، بازیافت بخش آلی آن‌ها و تولید کود کمپوست است. کمپوست محصول حاصل از فرآیند تجزیه بیولوژیکی کنترل‌شده مواد آلی است و می‌تواند به طور همزمان مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی ایجاد کند. از جنبه زیست‌محیطی، تولید کمپوست باعث کاهش حجم پسماند دفن‌شده در زمین‌های دفع زباله، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش خطرات زیست‌محیطی ناشی از انباشت زباله‌ها می‌شود. از جنبه اقتصادی و کشاورزی، کمپوست منبعی غنی از مواد مغذی مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم، عناصر ریزمغذی و مواد آلی است که

www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

می‌تواند حاصلخیزی خاک را بهبود بخشد، ساختار خاک را تقویت کند و نیاز به کودهای شیمیایی را کاهش دهد (رضایی پاشا و همکاران، ۱۳۹۸).

ویژگی‌های شیمیایی کود کمپوست نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت آن و اثرات آن بر خاک و گیاهان دارد. پارامترهایی مانند محتویات نیتروژن، فسفر، پتاسیم، pH، هدایت الکتریکی (EC) و مواد آلی باید در فرآیند تولید و پس از تولید مورد پایش قرار گیرند تا کمپوست بهینه و ایمن برای استفاده در فضای سبز شهری و کشاورزی تولید شود. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده صحیح از کمپوست شهری می‌تواند علاوه بر بهبود رشد گیاهان، به حفظ رطوبت خاک، افزایش ظرفیت نگهداری مواد مغذی و کاهش اثرات آلودگی شهری کمک کند. فضای سبز شهری، از جمله پارک‌ها، بوستان‌ها، باغ‌ها و حاشیه‌های خیابانی، نقش مهمی در ارتقای کیفیت زندگی شهری، کاهش آلودگی هوا، کنترل دما و ایجاد تعادل اکولوژیکی ایفا می‌کند. استفاده از کود کمپوست در مدیریت این فضاها نه تنها موجب ارتقای سلامت خاک و گیاهان می‌شود، بلکه به توسعه پایدار شهری و مدیریت بهینه منابع طبیعی نیز کمک می‌کند. هدف این مقاله مروری، بررسی و تحلیل مطالعات پیشین مرتبط با ویژگی‌های شیمیایی کمپوست تولیدی از پسماندهای شهری و کاربرد آن در فضای سبز شهری است (موسوی و همکاران، ۱۴۰۳). این مطالعه با تمرکز بر اهمیت کیفیت شیمیایی کمپوست، استانداردهای زیست‌محیطی و فرآیندهای تولید، تلاش دارد تا نقش کمپوست شهری در کاهش اثرات زیست‌محیطی و ارتقای توسعه پایدار شهرها را تبیین کند.

بیان مساله

افزایش جمعیت شهری و رشد سریع شهرنشینی در دهه‌های اخیر، مدیریت پسماندهای شهری را به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و مدیریتی در سطح جهانی تبدیل کرده است (گوتام و همکاران، ۲۰۰۹؛ آناندا و همکاران، ۲۰۲۳). بر اساس گزارش سازمان محیط زیست جهانی، تولید پسماند شهری در بسیاری از کشورهای در حال توسعه با نرخ سالانه بیش از ۵٪ در حال افزایش است و بخش عمده این پسماندها را مواد آلی تشکیل می‌دهند (توریک و همکاران، ۲۰۱۸). دفع نامناسب این مواد آلی می‌تواند منجر به آلودگی‌های خاک، آب و هوا شود و انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند متان و دی‌اکسیدکربن را افزایش دهد (فارل و همکاران، ۲۰۱۰؛ میترا و همکاران، ۲۰۰۳). علاوه بر اثرات زیست‌محیطی، مدیریت ناکافی پسماندهای شهری می‌تواند پیامدهای اقتصادی و اجتماعی نیز به همراه داشته باشد، از جمله افزایش هزینه‌های جمع‌آوری و دفن زباله و ایجاد تهدیدات بهداشتی برای ساکنان شهری (گوتام و همکاران، ۲۰۰۹).

پسماندهای آلی شهری، شامل بقایای غذایی، ضایعات باغبانی و گیاهی، و برخی زباله‌های زیست‌تخریب‌پذیر دیگر، بخش قابل توجهی از جریان زباله را تشکیل می‌دهند (آناندا و همکاران، ۲۰۲۳). یکی از راهکارهای پایدار و مؤثر برای مدیریت این بخش از پسماندها، فرآیند کمپوست‌سازی است. کمپوست‌سازی یک روش بیولوژیکی کنترل‌شده است که طی آن مواد آلی تحت تأثیر میکروارگانیسم‌ها تجزیه شده و به محصولی پایدار، غنی از مواد مغذی و قابل استفاده در خاک تبدیل می‌شوند (تریل و همکاران، ۲۰۲۴). تولید کمپوست نه تنها حجم پسماند دفن‌شده را کاهش می‌دهد، بلکه می‌تواند به بهبود کیفیت خاک، افزایش حاصلخیزی، بهبود ساختار و ظرفیت نگهداری آب کمک کند (فارسانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

استفاده از کمپوست در فضاهای سبز شهری، از جمله پارک‌ها، باغچه‌ها، حاشیه‌های خیابان و فضای سبز عمومی، مزایای متعددی دارد. این مزایا شامل بهبود خواص فیزیکی خاک، افزایش محتوای مواد آلی، تأمین تدریجی عناصر غذایی ضروری مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم و افزایش فعالیت میکروبی و تنوع زیستی خاک است (تریل و همکاران، ۲۰۲۴؛ بارکر و برایسون، ۲۰۰۲). این ویژگی‌ها به ویژه در خاک‌های شهری که اغلب فشرده، فقیر از مواد آلی و دارای ساختار

www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

نامناسب هستند، اهمیت پیدا می‌کنند (تریل و همکاران، ۲۰۲۴). مطالعات نشان داده‌اند که کاربرد کمپوست شهری می‌تواند به کاهش نیاز به کودهای شیمیایی، کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و حفظ منابع طبیعی کمک کند (گوتام و همکاران، ۲۰۰۹).

با این حال، کیفیت و ایمنی کمپوست تولیدی به شدت تحت تأثیر ترکیب مواد اولیه و فرآیند کمپوست‌سازی قرار دارد (ملر و همکاران، ۲۰۱۵؛ آناندا و همکاران، ۲۰۲۳). پسماندهای شهری ممکن است حاوی آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین (سرب، کادمیوم، نیکل، روی، مس، کروم) و آلاینده‌های آلی پایدار (POPs) باشند که حتی پس از فرآیند کمپوست‌سازی نیز می‌توانند در محصول نهایی باقی بمانند (براندلی، ۲۰۰۶؛ میترا، ۲۰۰۳؛ بارکر و برایسون، ۲۰۰۲). فلزات سنگین می‌توانند از طریق جذب توسط گیاهان وارد زنجیره غذایی شوند و خطراتی برای سلامت انسان و حیوانات ایجاد کنند، به ویژه در فضاهای سبز شهری که تماس مستقیم با خاک و گیاهان رایج است (میترا و همکاران، ۲۰۰۳؛ فارل و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین، برخی آلاینده‌های آلی مانند هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) و بیفنیل‌های پلی‌کلرینه (PCBs) ممکن است در کمپوست شهری وجود داشته باشند و حتی پس از کمپوست‌سازی کامل، غلظت برخی از این ترکیبات همچنان بالا باشد (براندلی، ۲۰۰۶). منشأ این آلاینده‌ها می‌تواند شامل رسوبات هوایی، احتراق ناقص، یا مواد اولیه آلوده در پسماند باشد (براندلی، ۲۰۰۶).

به منظور اطمینان از کاربرد ایمن و مؤثر کمپوست پسماندهای شهری در فضاهای سبز، انجام بررسی‌های شیمیایی جامع ضروری است (آناندا و همکاران، ۲۰۲۳؛ پنا–اورتیز و همکاران، ۲۰۲۵). این بررسی‌ها باید شامل اندازه‌گیری pH، هدایت الکتریکی (EC)، نسبت کربن به نیتروژن (C/N)، محتوای عناصر غذایی اصلی و ریزمغذی‌ها، و به ویژه غلظت فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی باشند (آناندا و همکاران، ۲۰۲۳؛ براندلی، ۲۰۰۶). هدف از این تحلیل‌ها ارزیابی کیفیت کمپوست، شناسایی آلاینده‌های بالقوه و مقایسه آن با استانداردهای ملی و بین‌المللی برای کاربرد در کشاورزی و فضای سبز است (آناندا و همکاران، ۲۰۲۳؛ ملر و همکاران، ۲۰۱۵).

مسئله اصلی این تحقیق، توسعه روش‌های ارزیابی شیمیایی جامع برای کمپوست‌های تولیدی از پسماندهای شهری و تدوین دستورالعمل‌های کاربردی مبتنی بر شواهد برای استفاده پایدار و بدون خطر این محصول در فضاهای سبز شهری است، به گونه‌ای که هم به بهبود کیفیت خاک کمک کند و هم از بروز خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی جلوگیری نماید. در این راستا، ترکیب دانش مدیریت پسماند، علوم خاک، و تکنیک‌های تحلیل شیمیایی، مبنای اصلی برای تولید کمپوست با کیفیت بالا و ایمن در محیط‌های شهری است (تریل و همکاران، ۲۰۲۴؛ فارسانگ و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، مسئله اصلی پژوهش حاضر، شناسایی و ارزیابی روش‌های دقیق و جامع برای تعیین کیفیت شیمیایی کمپوست تولیدی از پسماندهای شهری و ارائه دستورالعمل‌های کاربردی و ایمن برای استفاده آن در فضاهای سبز شهری است. حل این مسئله می‌تواند ضمن کاهش خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی، موجب ارتقای کیفیت خاک، افزایش حاصلخیزی و توسعه پایدار فضای سبز در شهرها شود.

مبانی نظری

فواید کمپوست‌کردن زباله‌های شهری

کمپوست‌کردن زباله‌های شهری یکی از مؤثرترین راهکارهای مدیریت پایدار پسماند به شمار می‌رود که نقش مهمی در کاهش فشار بر محل‌های دفن زباله ایفا می‌کند. بخش قابل توجهی از زباله‌های شهری را مواد آلی تشکیل می‌دهند و تبدیل این مواد به کمپوست می‌تواند حجم پسماندهای دفن‌شده را به طور چشمگیری کاهش دهد. کاهش دفن زباله نه تنها موجب افزایش عمر مفید محل‌های دفن می‌شود، بلکه از تولید شیرابه‌های آلوده و انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه

www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

متان جلوگیری می‌کند که از عوامل اصلی تغییرات اقلیمی محسوب می‌شوند (فارل و همکاران، ۲۰۱۰). از منظر زیست‌محیطی، کمپوست‌سازی یک روش دوستدار محیط زیست برای بازیافت مواد آلی است که موجب کاهش آلودگی خاک، آب و هوا می‌شود. زباله‌های آلی در صورت رهاسازی یا دفن غیراصولی می‌توانند منبع انتشار عوامل بیماری‌زا، بوهای نامطبوع و آلودگی منابع آب زیرزمینی باشند. کمپوست‌سازی با کنترل شرایط تجزیه، این مخاطرات را به حداقل می‌رساند و به مدیریت ایمن پسماندهای آلی کمک می‌کند (آناندا و همکاران، ۲۰۲۳؛ میترا و همکاران، ۲۰۰۳). از دیگر فواید مهم کمپوست‌کردن زباله‌های شهری، تولید یک کود آلی غنی از مواد مغذی است که می‌تواند جایگزین مناسبی برای کودهای شیمیایی باشد. کمپوست حاوی عناصر ضروری برای رشد گیاهان مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم و ریزمغذی‌ها است که به‌صورت تدریجی در اختیار گیاه قرار می‌گیرند. این ویژگی باعث افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی و کاهش آبشویی آن‌ها در خاک می‌شود (فارسانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

کاربرد کمپوست در خاک موجب بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک می‌شود. افزایش ماده آلی خاک از طریق مصرف کمپوست، ساختار خاک را بهبود می‌بخشد، تخلخل خاک را افزایش می‌دهد و ظرفیت نگهداری آب را تقویت می‌کند. این مزایا به‌ویژه در خاک‌های شهری که اغلب فشرده، فقیر از مواد آلی و دارای نفوذپذیری پایین هستند، اهمیت دوچندان دارد (تریل و همکاران، ۲۰۲۴). کمپوست همچنین نقش مهمی در افزایش فعالیت زیستی خاک ایفا می‌کند. افزودن کمپوست موجب افزایش جمعیت و تنوع میکروارگانیسم‌های مفید خاک می‌شود که در فرآیندهای چرخه عناصر غذایی، تجزیه مواد آلی و بهبود سلامت خاک نقش اساسی دارند. افزایش فعالیت میکروبی می‌تواند مقاومت گیاهان را در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی افزایش دهد و پایداری اکوسیستم‌های خاک را تقویت کند (بارکر و برایسون، ۲۰۰۲؛ فارسانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

از دیدگاه اقتصادی، کمپوست‌کردن زباله‌های شهری می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های مدیریت پسماند و تولید کود شود. استفاده از کمپوست تولیدی در فضای سبز شهری، پارک‌ها و فضاهای عمومی، نیاز به خرید کودهای شیمیایی را کاهش داده و هزینه‌های نگهداری فضای سبز را کم می‌کند. علاوه بر این، توسعه صنایع مرتبط با کمپوست‌سازی می‌تواند فرصت‌های شغلی جدید ایجاد کرده و به اقتصاد چرخشی کمک کند (گوتام و همکاران، ۲۰۰۹؛ آناندا و همکاران، ۲۰۲۳). در نهایت، کمپوست‌کردن زباله‌های شهری نقش مهمی در تحقق توسعه پایدار شهری دارد. این فرآیند با کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، حفظ منابع طبیعی، بهبود کیفیت خاک و افزایش کیفیت فضاهای سبز شهری، به ارتقای سلامت انسان و محیط زیست کمک می‌کند. از این رو، کمپوست‌سازی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت یکپارچه پسماند شهری، مورد توجه سیاست‌گذاران و پژوهشگران در سراسر جهان قرار گرفته است (تریل و همکاران، ۲۰۲۴؛ آناندا و همکاران، ۲۰۲۳).

فرآیند تولید کمپوست از پسماندهای شهری

فرآیند تولید کمپوست از پسماندهای شهری یک فرآیند زیستی کنترل‌شده است که طی آن مواد آلی موجود در زباله‌های شهری، تحت تأثیر فعالیت میکروارگانیسم‌ها به ماده‌ای پایدار، هوموسی و غنی از عناصر غذایی تبدیل می‌شوند. این فرآیند نه‌تنها نقش مهمی در کاهش حجم پسماندهای شهری و مدیریت پایدار آن‌ها دارد، بلکه محصول نهایی آن می‌تواند به‌عنوان کود آلی و اصلاح‌کننده خاک در کشاورزی و فضای سبز شهری مورد استفاده قرار گیرد (آگلت، ۲۰۰۵؛ کومار، ۲۰۱۰). فرآیند کمپوست‌سازی شامل مراحل مختلفی است که هر یک نقش اساسی در کیفیت نهایی کمپوست ایفا می‌کنند.

آماده‌سازی مواد اولیه (پیش‌تصفیه)

www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

مرحله آماده‌سازی مواد اولیه یکی از مهم‌ترین مراحل در فرآیند تولید کمپوست از پسماندهای شهری محسوب می‌شود، زیرا کیفیت و ایمنی کمپوست نهایی تا حد زیادی به این مرحله وابسته است. پسماندهای شهری معمولاً ترکیبی ناهمگن از مواد آلی و غیرآلی هستند که شامل بقایای غذایی، ضایعات گیاهی، کاغذ، پلاستیک، فلزات، شیشه و سایر مواد می‌باشند. وجود مواد غیرقابل تجزیه زیستی می‌تواند فرآیند کمپوست‌سازی را مختل کرده و کیفیت محصول نهایی را کاهش دهد (آگلت، ۲۰۰۵؛ اودوکیموف و همکاران، ۲۰۱۵). در این مرحله، عملیات جداسازی مکانیکی یا دستی برای حذف مواد غیرقابل کمپوست‌سازی مانند پلاستیک‌ها، فلزات و شیشه انجام می‌شود. این اقدام علاوه بر جلوگیری از آلودگی کمپوست، موجب کاهش ورود فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها به محصول نهایی می‌شود (آگلت، ۲۰۰۵). همچنین در بسیاری از سیستم‌ها، مواد آلی خرد می‌شوند تا اندازه ذرات کاهش یافته و سطح تماس آن‌ها برای فعالیت میکروبی افزایش یابد که این امر سرعت تجزیه مواد آلی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (کومار، ۲۰۱۰). تنظیم نسبت کربن به نیتروژن (C/N) از دیگر اهداف مهم مرحله پیش‌تصفیه است. پسماندهای شهری اغلب دارای نسبت C/N نامتعادل هستند که می‌تواند موجب کند شدن فرآیند تجزیه یا تولید بوهای نامطبوع شود. برای اصلاح این نسبت، از مواد افزودنی مانند خاک‌اره، کاه، بقایای گیاهی یا مواد معدنی نظیر کلینوپتیلولیت استفاده می‌شود (مولازاده و آباد، ۲۰۱۴؛ راد و همکاران، ۲۰۱۱). این مواد علاوه بر تنظیم نسبت C/N، می‌توانند در کاهش تحرک فلزات سنگین و جذب ترکیبات آلاینده نیز مؤثر باشند.

فرآیند کمپوست‌سازی (بیوتحلیل زیستی)

فرآیند اصلی کمپوست‌سازی شامل تجزیه بیولوژیکی هوازی مواد آلی توسط جمعیت متنوعی از میکروارگانیسم‌ها از جمله باکتری‌ها، قارچ‌ها و اکتینومیست‌ها است. این میکروارگانیسم‌ها با استفاده از اکسیژن، مواد آلی را به ترکیبات ساده‌تر تبدیل کرده و انرژی، دی‌اکسیدکربن، آب و حرارت آزاد می‌کنند (آگلت، ۲۰۰۵؛ کومار، ۲۰۱۰).

این فرآیند معمولاً در سه فاز متوالی انجام می‌شود:

* فاز مزوفیلیک (دمای متوسط)

در ابتدای کمپوست‌سازی، دمای توده کمپوست در محدوده دمای محیط قرار دارد و میکروارگانیسم‌های مزوفیلیک فعال می‌شوند. این میکروارگانیسم‌ها ترکیبات آلی ساده مانند قندها، اسیدهای آمینه و پروتئین‌ها را تجزیه کرده و باعث افزایش تدریجی دما می‌شوند (کومار، ۲۰۱۰).

* فاز ترموفیلیک (دمای بالا)

با افزایش دما به محدوده ۴۵ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد، میکروارگانیسم‌های ترموفیلیک غالب می‌شوند. این مرحله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا دمای بالا موجب نابودی عوامل بیماری‌زا، بذر علف‌های هرز و تخم انگل‌ها می‌شود و نقش اساسی در بهداشتی‌سازی کمپوست دارد (سیلس-کاستیانو و همکاران، ۲۰۲۱). تداوم این فاز برای مدت زمان کافی یکی از الزامات اصلی تولید کمپوست ایمن در مقیاس صنعتی است (کومار، ۲۰۱۰).

* فاز خنک‌سازی و بلوغ

پس از کاهش مواد آلی قابل تجزیه، فعالیت میکروبی کاهش یافته و دمای توده کمپوست به تدریج پایین می‌آید. در این مرحله، فرآیند تثبیت مواد آلی و تشکیل ترکیبات هوموسی انجام می‌شود. بلوغ کمپوست برای جلوگیری از اثرات فیتوتوکسیک بر گیاهان ضروری بوده و نشان‌دهنده پایداری شیمیایی و زیستی کمپوست است (سیلس-کاستیانو و همکاران، ۲۰۲۱).

www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

پارامترهای کنترل فرآیند کمپوست‌سازی

کنترل پارامترهای فیزیکی و شیمیایی در طول فرآیند کمپوست‌سازی نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی کمپوست دارد. مهم‌ترین این پارامترها شامل دما، رطوبت، هوادهی، pH و نسبت کربن به نیتروژن هستند (آگلت، ۲۰۰۵؛ کومار، ۲۰۱۰).

دما شاخصی مهم برای ارزیابی پیشرفت فرآیند و اطمینان از حذف پاتوژن‌ها است (خودار و همکاران، ۲۰۱۷). رطوبت مناسب (حدود ۵۰–۶۰ درصد) برای فعالیت میکروبی ضروری بوده و انحراف از این محدوده می‌تواند منجر به کاهش سرعت تجزیه یا ایجاد شرایط بی‌هوازی شود (کومار، ۲۰۱۰). هوادهی کافی از طریق برگرداندن توده یا استفاده از سیستم‌های مکانیکی، اکسیژن مورد نیاز میکروارگانیسم‌ها را تأمین می‌کند (کنیسامکاندی، ۲۰۲۳). تغییرات pH نیز نشان‌دهنده مراحل مختلف تجزیه بوده و معمولاً از حالت اسیدی اولیه به سمت خنثی یا کمی قلیایی تغییر می‌کند (کنیسامکاندی و آباد، ۲۰۲۳).

روش‌های کمپوست‌سازی پسماندهای شهری

روش‌های مختلفی برای کمپوست‌سازی پسماندهای شهری توسعه یافته‌اند که انتخاب آن‌ها به عوامل اقتصادی، اقلیمی و مقیاس تولید بستگی دارد. روش توده باز (ویندرو) یکی از رایج‌ترین روش‌ها است که به دلیل سادگی و هزینه کم مورد استفاده قرار می‌گیرد (خودار و همکاران، ۲۰۱۷). روش‌های پیشرفته‌تر مانند کمپوست‌سازی در محفظه بسته (بیوراکتور) امکان کنترل دقیق پارامترها و کاهش انتشار بو و آلاینده‌ها را فراهم می‌کنند (مولازاده و آباد، ۲۰۱۴). همچنین روش‌های نوین مانند بستر سیال، با مصرف انرژی کمتر و راندمان بالاتر، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند (کنیسامکاندی و آباد، ۲۰۲۳).

محصول نهایی و ویژگی‌های آن

کمپوست نهایی حاصل از پسماندهای شهری ماده‌ای پایدار، هوموسی، فاقد بوی نامطبوع و دارای قابلیت استفاده گسترده در کشاورزی و فضای سبز است. کیفیت کمپوست از نظر بلوغ، پایداری زیستی، عدم وجود عوامل بیماری‌زا و غلظت آلاینده‌ها باید مطابق استانداردهای ملی و بین‌المللی باشد (سیلس–کاستیانو و همکاران، ۲۰۲۱؛ آگلت، ۲۰۰۵). مطالعات نشان می‌دهد که کمپوست شهری می‌تواند دارای مقادیر مناسبی از عناصر غذایی و خواص فیزیکوشیمیایی مطلوب برای بهبود خاک باشد (خودار و همکاران، ۲۰۱۷؛ اودوکیموف، ۲۰۱۵).

بررسی شیمیایی کود کمپوست شهری

بررسی ویژگی‌های شیمیایی کود کمپوست شهری یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی کیفیت و ایمنی این محصول برای کاربرد در فضاهای سبز شهری و کشاورزی محسوب می‌شود. ترکیب شیمیایی کمپوست تحت تأثیر نوع پسماند ورودی، فرآیند کمپوست‌سازی، مدت زمان بلوغ و شرایط نگهداری قرار دارد و می‌تواند تأثیر مستقیم بر رشد گیاهان، سلامت خاک و محیط زیست داشته باشد (آناندا و همکاران، ۲۰۲۳؛ تریل و همکاران، ۲۰۲۴). از این‌رو، پارامترهایی نظیر pH، شوری، عناصر غذایی، نسبت کربن به نیتروژن و غلظت فلزات سنگین باید به‌صورت دقیق مورد پایش قرار گیرند.

pH و شوری (هدایت الکتریکی)

www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

pH یکی از مهم‌ترین شاخص‌های شیمیایی کمپوست است که بر دسترسی عناصر غذایی، فعالیت میکروبی خاک و رشد گیاهان تأثیر مستقیم دارد. pH کمپوست شهری معمولاً در محدوده خنثی تا کمی قلیایی (حدود ۶.۵ تا ۸) قرار دارد که این دامنه برای اغلب گیاهان فضای سبز شهری مناسب تلقی می‌شود (بارکر و برایسون، ۲۰۰۲؛ جودار و همکاران، ۲۰۱۷). تغییرات pH در طول فرآیند کمپوست‌سازی به دلیل تجزیه مواد آلی، تولید اسیدهای آلی در مراحل اولیه و آزادسازی آمونیاک در مراحل بعدی رخ می‌دهد (کومار، ۲۰۱۰). شوری یا هدایت الکتریکی (EC) شاخصی از غلظت نمک‌های محلول در کمپوست است و نقش مهمی در تعیین قابلیت استفاده آن در خاک دارد. کمپوست‌های با شوری بالا می‌توانند موجب ایجاد تنش اسمزی در گیاهان شده، جذب آب و عناصر غذایی را کاهش دهند و در نهایت رشد گیاه را محدود کنند (فارسانگ و همکاران، ۲۰۲۰). شوری کمپوست به ترکیب مواد اولیه، به‌ویژه وجود بقایای غذایی و مواد معدنی، وابسته است. بنابراین، کمپوست استاندارد باید دارای EC کنترل‌شده و متناسب با نوع گیاه و کاربری خاک باشد، به‌ویژه در فضاهای سبز شهری که گیاهان زینتی نسبت به شوری حساس‌تر هستند (تریل و همکاران، ۲۰۲۴).

عناصر غذایی اصلی (نیتروژن، فسفر و پتاسیم)

کمپوست شهری منبع مهمی از عناصر غذایی اصلی مورد نیاز گیاهان، شامل نیتروژن (N)، فسفر (P) و پتاسیم (K) است. نیتروژن نقش اساسی در رشد رویشی گیاه، سنتز پروتئین‌ها و کلروفیل دارد و کمبود آن موجب کاهش رشد و زردی برگ‌ها می‌شود (بارکر و برایسون، ۲۰۰۲). در کمپوست، نیتروژن عمدتاً به شکل آلی وجود دارد و به‌تدریج طی فرآیند معدنی‌شدن در اختیار گیاه قرار می‌گیرد که این ویژگی موجب کاهش آبشویی نیتروژن در مقایسه با کودهای شیمیایی می‌شود (فارل و همکاران، ۲۰۱۰). فسفر یکی دیگر از عناصر ضروری است که در توسعه ریشه، انتقال انرژی و فرآیند گل‌دهی نقش کلیدی دارد. کمپوست شهری می‌تواند منبع مناسبی از فسفر باشد، اگرچه بخش زیادی از آن به‌صورت آلی یا کم‌محلول وجود دارد. این موضوع باعث آزادسازی تدریجی فسفر و افزایش کارایی مصرف آن در خاک می‌شود (جودار و همکاران، ۲۰۱۷). پتاسیم نیز نقش مهمی در تنظیم فشار اسمزی، افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی مانند خشکی و شوری و بهبود کیفیت محصول دارد. پتاسیم موجود در کمپوست معمولاً قابلیت جذب مناسبی دارد و می‌تواند به بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاهان فضای سبز کمک کند (فارسانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

ریزمغذی‌ها

علاوه بر عناصر غذایی اصلی، کمپوست شهری می‌تواند منبع ارزشمندی از ریزمغذی‌ها مانند آهن (Fe)، روی (Zn)، منگنز (Mn) و مس (Cu) باشد. این عناصر اگرچه به مقدار کم مورد نیاز گیاه هستند، اما نقش حیاتی در فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، تنفس و فعالیت آنزیمی دارند (بارکر و برایسون، ۲۰۰۲). وجود ریزمغذی‌ها در کمپوست به نوع پسماند ورودی و شرایط فرآیند کمپوست‌سازی وابسته است. کمپوست‌های با کیفیت می‌توانند کمبود ریزمغذی‌ها در خاک‌های شهری فقیر را جبران کنند. با این حال، تعادل این عناصر اهمیت زیادی دارد، زیرا غلظت بیش از حد برخی ریزمغذی‌ها می‌تواند منجر به سمیت گیاهی شود (فارسانگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ تریل و همکاران، ۲۰۲۴).

نسبت کربن به نیتروژن (C/N)

نسبت کربن به نیتروژن (C/N) یکی از مهم‌ترین شاخص‌های بلوغ و پایداری کمپوست محسوب می‌شود. این نسبت نشان‌دهنده میزان تعادل بین مواد انرژی‌زا (کربن) و منابع نیتروژن برای میکروارگانیسم‌ها است. نسبت C/N بالا نشان‌دهنده نارس بودن کمپوست و احتمال رقابت میکروارگانیسم‌ها با گیاه برای جذب نیتروژن می‌باشد (مولازاده و آباد،

www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

۲۰۱۴). کمپوست بالغ معمولاً دارای نسبت C/N در محدوده ۱۰ تا ۲۰ است که نشان‌دهنده تثبیت ماده آلی و آمادگی کمپوست برای کاربرد در خاک است (کومار، ۲۰۱۰؛ سیلس–کاستیانو و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده از کمپوست با C/N نامناسب می‌تواند موجب کاهش دسترسی نیتروژن برای گیاه و بروز علائم کمبود شود، به‌ویژه در فضاهای سبز شهری که مدیریت تغذیه گیاه اهمیت زیادی دارد.

فلزات سنگین

یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در استفاده از کمپوست تولیدی از پسماندهای شهری، وجود فلزات سنگین نظیر سرب (Pb)، کادمیم (Cd)، نیکل (Ni)، کروم (Cr) و روی (Zn) است. این عناصر می‌توانند از طریق منابع مختلفی مانند باتری‌ها، لوازم الکترونیکی، رنگ‌ها و آلاینده‌های شهری وارد پسماند شوند (براندلی، ۲۰۰۶؛ میترا و همکاران، ۲۰۰۳). فلزات سنگین در صورت تجمع در خاک می‌توانند توسط گیاهان جذب شده و از طریق زنجیره غذایی به انسان منتقل شوند و خطرات جدی برای سلامت ایجاد کنند. این مسئله در فضاهای سبز شهری که تماس مستقیم انسان با خاک و گیاهان وجود دارد، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (فارل و همکاران، ۲۰۱۰). مطالعات نشان داده‌اند که اگرچه فرآیند کمپوست‌سازی می‌تواند تحرک برخی فلزات سنگین را کاهش دهد، اما قادر به حذف کامل آن‌ها نیست (براندلی، ۲۰۰۶). بنابراین، کنترل منبع پسماند ورودی، انجام آزمایش‌های شیمیایی منظم و مقایسه نتایج با استانداردهای ملی و بین‌المللی از الزامات اصلی برای استفاده ایمن از کمپوست شهری است (آناندا و همکاران، ۲۰۲۳؛ پنا–اورتیز و همکاران، ۲۰۲۵).

کاربرد کمپوست شهری در فضای سبز شهری

کاربرد کمپوست تولیدشده از پسماندهای شهری در فضاهای سبز شهری به‌عنوان یکی از مؤثرترین رویکردهای تلفیقی در مدیریت پایدار شهرها شناخته می‌شود که به‌طور هم‌زمان اهداف زیست‌محیطی، اکولوژیکی و مدیریتی را محقق می‌سازد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۵؛ روخاس و همکاران، ۲۰۲۲). فضاهای سبز شهری به دلیل فشارهای ناشی از فعالیت‌های انسانی، تردد بالا، آلودگی‌های شیمیایی و محدودیت در چرخه طبیعی مواد آلی، اغلب با کاهش کیفیت خاک و افت توان تولید زیستی مواجه هستند. در این شرایط، استفاده از کمپوست شهری به‌عنوان یک اصلاح‌کننده آلی، نقش کلیدی در بازگرداندن عملکردهای اکولوژیک خاک ایفا می‌کند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که افزودن کمپوست موجب افزایش محتوای کربن آلی، بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی، افزایش ذخیره رطوبت و ارتقای فعالیت زیستی خاک می‌شود که همگی برای پایداری فضاهای سبز شهری ضروری هستند (روخاس و همکاران، ۲۰۲۱؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۵).

از منظر فیزیکوشیمیایی، کمپوست شهری می‌تواند به‌طور قابل توجهی ساختار خاک‌های شهری را بهبود بخشد. این خاک‌ها معمولاً فشرده، کم‌تخلخل و دارای نفوذپذیری پایین هستند که رشد ریشه و تبادل گازها را محدود می‌کند. نتایج پژوهش روخاس و همکاران (۲۰۲۱)، نشان داد که کاربرد کمپوست، به‌ویژه در مقادیر بالاتر، موجب بهبود بافت خاک، افزایش پایداری خاکدانه‌ها و کاهش تراکم خاک می‌شود. همچنین، افزایش هدایت الکتریکی و تغییر pH خاک به محدوده‌ای مناسب‌تر، جذب عناصر غذایی را برای گیاهان تسهیل می‌کند. این تغییرات در مجموع، محیط ریشه‌ای مطلوب‌تری فراهم می‌آورند که منجر به افزایش استقرار گیاهان و کاهش نیاز به آبیاری و کوددهی شیمیایی می‌شود (روخاس و همکاران، ۲۰۲۲).

کاربرد کمپوست شهری در پروژه‌های احیای فضاهای سبز تخریب‌شده و بازسازی اکوسیستم‌های شهری، نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت این پروژه‌ها دارد. مطالعات میدانی نشان داده‌اند که در احیای گونه‌های گیاهی بومی، استفاده از کمپوست موجب افزایش نرخ جوانه‌زنی، بقا و رشد گیاهان می‌شود و به افزایش غنای گونه‌ای و پوشش گیاهی منجر

www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

می‌گردد (روخاس و همکاران، ۲۰۲۲). این موضوع به‌ویژه در فضاهای سبزی که خاک آن‌ها در اثر عملیات عمرانی یا آلودگی‌های صنعتی دچار تخریب شده است، اهمیت دارد. علاوه بر این، کمپوست با تأمین تدریجی عناصر غذایی و بهبود شرایط میکروبی خاک، رقابت گونه‌های مهاجم را کاهش داده و به استقرار پایدار گونه‌های بومی کمک می‌کند (روخاس و همکاران، ۲۰۲۱).

در مورد درختان و درختچه‌های شهری، کمپوست نقش مهمی در بهبود رشد اولیه و افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی ایفا می‌کند. نتایج پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که افزودن کمپوست به گودال کاشت درختان شهری، موجب افزایش توسعه سیستم ریشه، افزایش قطر تنه و بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاهان می‌شود (روخاس و همکاران، ۲۰۲۱). این اثرات به‌ویژه در محیط‌های شهری که با تنش‌هایی نظیر کمبود آب، شوری خاک و آلودگی‌های فلزی همراه هستند، از اهمیت بالایی برخوردار است. کمپوست با بهبود ظرفیت نگهداری آب و کاهش نوسانات رطوبتی خاک، مقاومت گیاهان چوبی را در برابر خشکی افزایش می‌دهد و هزینه‌های نگهداری فضای سبز را کاهش می‌دهد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۵). یکی از جنبه‌های نوین کاربرد کمپوست شهری، استفاده هم‌زمان آن با بیوچار در فضاهای سبز شهری است. وانگ و همکاران (۲۰۲۵)، نشان دادند که ترکیب کمپوست و بیوچار می‌تواند به‌صورت هم‌افزا موجب افزایش ذخیره رطوبت خاک، بهبود فعالیت میکروبی و افزایش ترسیب کربن آلی شود. این ترکیب همچنین موجب افزایش فراوانی ژن‌های مرتبط با تثبیت کربن و چرخه عناصر غذایی در خاک می‌شود که نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کند. چنین رویکردی، فضاهای سبز شهری را به سامانه‌هایی فعال در مدیریت کربن شهری تبدیل کرده و نقش آن‌ها را در مقابله با تغییرات اقلیمی تقویت می‌کند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۵).

از منظر مدیریت پسماند و اقتصاد چرخشی، کاربرد کمپوست شهری در فضاهای سبز، راهکاری کارآمد برای استفاده مجدد از پسماندهای آلی شهری محسوب می‌شود. پسماندهای آلی، در صورت دفن یا سوزاندن، منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های زیست‌محیطی هستند؛ در حالی که تبدیل آن‌ها به کمپوست، ارزش افزوده ایجاد کرده و چرخه مواد را در سیستم‌های شهری تکمیل می‌کند (شرودر و همکاران، ۲۰۲۱؛ گوناوان و همکاران، ۲۰۲۲). استفاده از کمپوست در فضاهای سبز شهری، نیاز به کودهای شیمیایی را کاهش داده و به کاهش هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی مدیریت فضای سبز منجر می‌شود (آسومانی-بوتنگ، ۲۰۰۷). کمپوست‌های تولیدی از پسماندهای شهری، به‌ویژه ورمی‌کمپوست و کمپوست ترموفیلیک، دارای مقادیر قابل توجهی از عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف هستند. این کمپوست‌ها می‌توانند کلسیم، منیزیم، فسفر و پتاسیم را به‌صورت قابل جذب در اختیار گیاهان قرار دهند و نقش مهمی در بهبود وضعیت تغذیه‌ای خاک‌های شهری ایفا کنند (شرودر و همکاران، ۲۰۲۱). با این حال، برخی مطالعات اشاره کرده‌اند که در برخی کاربردها، به‌ویژه در مراحل اولیه رشد گیاه، ممکن است نیاز به تأمین نیتروژن تکمیلی وجود داشته باشد تا رشد بهینه حاصل شود (سوتامنئو و پاروت، ۲۰۱۳).

با وجود تمامی این مزایا، کاربرد کمپوست شهری در فضاهای سبز نیازمند توجه به ملاحظات بهداشتی و زیست‌محیطی است. فاطحی و همکاران (۲۰۲۰)، گزارش کردند که در هنگام کاربرد کمپوست، به‌ویژه در شرایط خشک و بادخیز، ممکن است غلظت بیوآئروسل‌ها شامل باکتری‌ها و قارچ‌ها در هوا افزایش یابد. این مسئله می‌تواند خطر بالقوه‌ای برای سلامت انسان، به‌ویژه در فضاهای پرتردد شهری، ایجاد کند. از این رو، رعایت دستورالعمل‌های ایمنی، زمان‌بندی مناسب کاربرد کمپوست و استفاده از کمپوست‌های کاملاً بالغ و پایدار، برای کاهش این مخاطرات ضروری است. در مجموع، شواهد علمی نشان می‌دهد که کمپوست شهری، در صورت تولید کنترل‌شده و کاربرد اصولی، می‌تواند به‌عنوان ابزاری کلیدی در توسعه و نگهداری فضاهای سبز شهری مورد استفاده قرار گیرد. این ماده آلی با بهبود کیفیت خاک، افزایش

www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

پایداری اکوسیستم‌های شهری، حمایت از کشاورزی شهری و کاهش فشار زیست‌محیطی ناشی از پسماندها، نقش مهمی در تحقق اهداف توسعه پایدار شهری ایفا می‌کند (هارا و همکاران، ۲۰۱۱؛ میستری و اسپوکتر، ۲۰۱۹).

محدودیت‌ها و ملاحظات زیست‌محیطی در استفاده از کمپوست پسماندهای شهری

با وجود مزایای متعدد کمپوست‌سازی پسماندهای شهری به‌عنوان یک راهکار پایدار در مدیریت پسماند و بهبود کیفیت خاک، استفاده از کمپوست شهری با محدودیت‌ها و ملاحظات زیست‌محیطی قابل توجهی همراه است که در صورت بی‌توجهی می‌تواند منجر به بروز پیامدهای منفی برای اکوسیستم‌های خاک، گیاهان و سلامت انسان شود. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، ناهمگنی ترکیب پسماندهای شهری است که منجر به تغییرپذیری زیاد در کیفیت شیمیایی و زیستی کمپوست نهایی می‌شود. این ناهمگنی می‌تواند باعث نوسانات قابل توجه در محتوای عناصر غذایی، شوری، pH و غلظت آلاینده‌ها گردد و کاربرد یکنواخت و ایمن کمپوست را با مشکل مواجه سازد (آناند و همکاران، ۲۰۲۳؛ تریل و همکاران، ۲۰۲۴). در بسیاری از شهرها، نبود سیستم‌های تفکیک پسماند از مبدأ، احتمال ورود مواد خطرناک و آلاینده به فرآیند کمپوست‌سازی را افزایش می‌دهد که این مسئله کیفیت زیست‌محیطی محصول نهایی را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار می‌دهد (مولر و همکاران، ۲۰۱۵).

یکی دیگر از ملاحظات زیست‌محیطی مهم، وجود و تجمع فلزات سنگین در کمپوست‌های تولیدی از پسماندهای شهری است. فلزاتی مانند سرب، کادمیم، نیکل و کروم می‌توانند در اثر فعالیت‌های شهری و صنعتی وارد جریان پسماند شوند و حتی پس از فرآیند کمپوست‌سازی نیز در محصول نهایی باقی بمانند. استفاده مداوم از کمپوست‌های آلوده می‌تواند منجر به تجمع تدریجی این عناصر در خاک شود که پیامدهای منفی بلندمدتی برای سلامت خاک، میکروارگانیسم‌ها و گیاهان به دنبال دارد (براندلی، ۲۰۰۶؛ میترا و همکاران، ۲۰۰۳). علاوه بر این، انتقال فلزات سنگین از خاک به گیاهان و در نهایت به زنجیره غذایی، یکی از نگرانی‌های جدی زیست‌محیطی و بهداشتی محسوب می‌شود، به‌ویژه در فضاهای سبز شهری که تماس مستقیم انسان با خاک و پوشش گیاهی امری رایج است (فارل و همکاران، ۲۰۱۰).

از دیگر محدودیت‌های زیست‌محیطی مرتبط با کمپوست شهری می‌توان به حضور آلاینده‌های آلی پایدار اشاره کرد. ترکیباتی نظیر هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs)، بیفنیل‌های پلی‌کلرینه (PCBs) و بقایای برخی مواد شیمیایی خانگی ممکن است از طریق پسماندهای آلوده وارد فرآیند کمپوست‌سازی شوند. مطالعات نشان داده‌اند که اگرچه فرآیند کمپوست‌سازی می‌تواند غلظت برخی از این ترکیبات را کاهش دهد، اما در بسیاری از موارد حذف کامل آن‌ها امکان‌پذیر نیست و این مواد می‌توانند در کمپوست نهایی باقی بمانند (براندلی، ۲۰۰۶؛ تریل و همکاران، ۲۰۲۴). حضور این آلاینده‌ها می‌تواند اثرات سمی بر میکروارگانیسم‌های خاک و گیاهان داشته باشد و در درازمدت باعث کاهش کیفیت زیست‌محیطی خاک‌های شهری شود.

شوری و عدم تعادل عناصر غذایی نیز از دیگر ملاحظات مهم در کاربرد کمپوست شهری به شمار می‌روند. برخی کمپوست‌های تولیدی از پسماندهای شهری به‌ویژه آن‌هایی که حاوی مقدار زیادی بقایای غذایی هستند، می‌توانند دارای شوری بالا باشند. استفاده مداوم از این نوع کمپوست‌ها در خاک‌های حساس، موجب افزایش شوری خاک، کاهش جذب آب توسط گیاهان و در نهایت افت رشد و سلامت پوشش گیاهی می‌شود (فارسانگ و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، عدم تعادل در نسبت عناصر غذایی، به‌ویژه نسبت کربن به نیتروژن، می‌تواند منجر به رقابت میکروارگانیسم‌ها با گیاه برای جذب نیتروژن و بروز کمبودهای تغذیه‌ای شود (کومار، ۲۰۱۰؛ سیلس-کاستیانو و همکاران، ۲۰۲۱).

از منظر زیست‌محیطی، انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول فرآیند کمپوست‌سازی نیز یکی از چالش‌های قابل توجه محسوب می‌شود. در صورت مدیریت نامناسب فرآیند، به‌ویژه در شرایط بی‌هوازی، گازهایی مانند متان (CH_4) و اکسید

www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

نیتروژن (N2O) می‌توانند آزاد شوند که نقش مهمی در تغییرات اقلیمی دارند (کانیسامکاندی و آباد، ۲۰۲۳). اگرچه کمپوست‌سازی نسبت به دفن پسماندها گزینه‌ای سازگارتر با محیط زیست محسوب می‌شود، اما برای کاهش اثرات زیست‌محیطی آن، کنترل دقیق پارامترهایی مانند رطوبت، هوادهی و دما ضروری است (آجلهت، ۲۰۰۵).
در نهایت، یکی از ملاحظات کلیدی در استفاده از کمپوست پسماندهای شهری، نیاز به چارچوب‌های نظارتی و استانداردهای سخت‌گیرانه زیست‌محیطی است. نبود استانداردهای یکپارچه یا ضعف در اجرای آن‌ها می‌تواند منجر به ورود کمپوست‌های با کیفیت پایین یا آلوده به بازار مصرف شود و اعتماد عمومی به این محصول را کاهش دهد (مولر و همکاران، ۲۰۱۵؛ آناندا و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین، تدوین و اجرای سیاست‌های جامع شامل تفکیک پسماند از مبدأ، پایش منظم کیفیت کمپوست، آموزش بهره‌برداران و تطابق با استانداردهای ملی و بین‌المللی، برای استفاده پایدار و ایمن از کمپوست شهری در فضاهای سبز و محیط‌های شهری ضروری است.

روش شناسی

در این مطالعه، رویکرد پژوهش به صورت مروری و کتابخانه‌ای طراحی شده است. اطلاعات مورد نیاز از طریق جستجوی سیستماتیک در پایگاه‌های داده علمی شامل مقالات، گزارش‌های علمی، پایان‌نامه‌ها و منابع معتبر مرتبط با کمپوست پسماندهای شهری و کاربرد آن در فضای سبز جمع‌آوری شده است. داده‌ها بر اساس پارامترهای شیمیایی کمپوست، شامل pH، شوری، عناصر غذایی اصلی و ریزمغذی‌ها، نسبت کربن به نیتروژن، و همچنین محتوای فلزات سنگین و آلاینده‌های احتمالی، دسته‌بندی شده‌اند. در ادامه، مطالعات مورد بررسی به دو گروه عمده تقسیم شده‌اند: نخست، بررسی اثرات کیفی و کمی کمپوست بر خاک و گیاهان در فضاهای سبز شهری و دوم، تحلیل محدودیت‌ها و ملاحظات زیست‌محیطی مرتبط با کاربرد کمپوست شهری. تمامی داده‌ها با هدف شناسایی روندهای پژوهشی موجود، مقایسه نتایج و ارائه جمع‌بندی تحلیلی از وضعیت فعلی و چالش‌های کاربرد کمپوست در محیط شهری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این رویکرد امکان ارائه تصویری جامع و علمی از وضعیت تولید، ویژگی‌های شیمیایی و کاربرد کمپوست در فضاهای سبز شهری را فراهم کرده و زمینه را برای پیشنهاد راهکارهای بهبود مدیریت و استفاده پایدار آن فراهم می‌کند.

بحث و نتیجه گیری

بررسی منابع علمی نشان می‌دهد که کمپوست تولیدی از پسماندهای شهری می‌تواند نقش مهمی در بهبود کیفیت خاک، تغذیه گیاهان و مدیریت پایدار پسماندهای آلی ایفا کند. تحلیل داده‌ها نشان داد که کمپوست شهری، با محتوای مناسب عناصر غذایی اصلی (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) و ریزمغذی‌ها (آهن، روی، منگنز و مس)، می‌تواند منبع تغذیه تدریجی و پایدار برای گیاهان باشد. این ویژگی باعث کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی و کاهش خطر آبشویی مواد مغذی در محیط شهری می‌شود. علاوه بر این، وجود نسبت مناسب کربن به نیتروژن در کمپوست بالغ، نشان‌دهنده تثبیت ماده آلی و بهبود شرایط زیستی خاک است که برای رشد گیاهان شهری اهمیت فراوان دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که کمپوست شهری نه تنها یک اصلاح‌کننده خاک است، بلکه می‌تواند به بهبود عملکرد میکروبی و تنوع زیستی خاک نیز کمک کند (سیلسپور، ۱۳۹۸).
از منظر کاربردی، تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از کمپوست شهری در فضاهای سبز، اعم از پارک‌ها، باغ‌ها و حاشیه خیابان‌ها، می‌تواند به بهبود ساختار خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و بهبود حاصلخیزی خاک منجر شود. کمپوست باعث تقویت استقرار گیاهان و افزایش مقاومت آن‌ها در برابر تنش‌های محیطی مانند خشکی و شوری می‌شود. همچنین، ترکیب کمپوست با اصلاح‌کننده‌های دیگر مانند بیوچار می‌تواند اثرات هم‌افزایی ایجاد کرده و میزان ترسیب کربن و

www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

ظرفیت ذخیره عناصر غذایی در خاک را افزایش دهد. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده هوشمندانه از کمپوست شهری می‌تواند به اهداف اکولوژیکی و زیست‌محیطی کلان، از جمله کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ارتقای پایدار اکوسیستم شهری کمک کند (زولی و همکاران، ۱۳۹۸).

با این حال، محدودیت‌های مهمی نیز در کاربرد کمپوست شهری وجود دارد که نباید نادیده گرفته شود. کیفیت کمپوست به شدت تحت تأثیر ترکیب مواد اولیه، فرآیند کمپوست‌سازی و مدیریت پس از تولید است. ناهمگنی پسماندهای شهری می‌تواند منجر به نوسانات در غلظت عناصر غذایی و آلاینده‌ها شود. وجود فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی پایدار در کمپوست شهری، اگرچه در مقادیر کم قابل کنترل است، می‌تواند در بلندمدت سلامت خاک و گیاهان و حتی انسان را تهدید کند. از سوی دیگر، انتشار بیوآئروسل‌ها و میکروارگانیسم‌های هوازی از کمپوست در فضاهای پرتردد شهری، به‌ویژه در مراحل اولیه کاربرد، نیازمند رعایت ملاحظات ایمنی و بهداشتی است. بنابراین، پایش شیمیایی دقیق، کنترل فرآیند کمپوست‌سازی، انتخاب مواد اولیه مناسب و اجرای استانداردهای بهداشتی، برای کاربرد ایمن و مؤثر کمپوست ضروری است. بحث نشان می‌دهد که کمپوست شهری یک ابزار چندبعدی برای مدیریت پسماند، بهبود کیفیت خاک و حمایت از فضاهای سبز است، اما موفقیت کاربرد آن نیازمند ترکیبی از دانش علمی، مدیریت مناسب و سیاست‌گذاری کارآمد است. پژوهش‌های موجود، هرچند تأکید زیادی بر مزایای اکولوژیک و اقتصادی کمپوست دارند، همچنان نیازمند مطالعات بلندمدت و گسترده درباره اثرات تجمعی فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی و تغییرات میکروبیولوژیک خاک هستند (موسوی و همکاران، ۱۴۰۳).

۱. کاربرد کمپوست شهری در فضای سبز: کمپوست تولیدی از پسماندهای شهری می‌تواند خواص فیزیکوشیمیایی خاک را بهبود بخشد، رشد و مقاومت گیاهان را افزایش دهد و پایداری اکوسیستم‌های شهری را ارتقا دهد. استفاده از کمپوست، به ویژه در ترکیب با اصلاح‌کننده‌های خاک مانند بیوچار، موجب افزایش ذخیره کربن و بهبود فعالیت میکروبی خاک می‌شود.

۲. کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی و مدیریت پسماند: کمپوست شهری منبع غنی از عناصر غذایی است که با آزادسازی تدریجی آن‌ها، نیاز به کودهای شیمیایی را کاهش می‌دهد. همچنین، تبدیل پسماندهای آلی به کمپوست، رویکردی پایدار برای کاهش حجم پسماند و ترویج اقتصاد چرخشی ارائه می‌کند.

۳. ملاحظات زیست‌محیطی و محدودیت‌ها: وجود فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی و ریسک انتشار بیوآئروسل‌ها از جمله چالش‌های کاربرد کمپوست شهری است. پایش شیمیایی منظم، انتخاب مواد اولیه مناسب و رعایت استانداردهای بهداشتی، برای استفاده ایمن ضروری است.

۴. اهمیت استانداردسازی و مدیریت علمی: موفقیت کاربرد کمپوست در فضاهای سبز شهری وابسته به تدوین استانداردهای کیفیت، کنترل فرآیند تولید و آموزش بهره‌برداران است. بدون این اقدامات، امکان ورود کمپوست آلوده یا کم‌کیفیت به محیط شهری وجود دارد.

۵. نیاز به پژوهش‌های آینده: پژوهش‌های بلندمدت برای ارزیابی اثرات تجمعی فلزات سنگین و آلاینده‌ها، بهبود ترکیب مواد اولیه، اثرات اکولوژیکی ترکیب کمپوست و بیوچار و سنجش اثرات کاربرد کمپوست در اکوسیستم‌های شهری متنوع ضروری است.

در جمع‌بندی، کمپوست شهری یک راهکار پایدار و چندبعدی برای بهبود اکوسیستم‌های شهری و مدیریت پسماند محسوب می‌شود، اما تحقق تمامی مزایای آن تنها در صورتی ممکن است که فرآیند تولید، کنترل کیفیت و کاربرد آن با دقت علمی و مدیریت زیست‌محیطی همراه باشد.

www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

پیشنهادات کاربردی

کنترل کیفیت و پایش شیمیایی کمپوست:

برای اطمینان از ایمنی و اثر بخشی کمپوست شهری، لازم است پایش دقیق ویژگی‌های شیمیایی و میکروبی آن انجام شود. این شامل اندازه‌گیری pH، شوری (EC)، نسبت کربن به نیتروژن، محتوای عناصر غذایی اصلی و ریزمغذی‌ها و به‌ویژه بررسی غلظت فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی است. بر اساس نتایج پایش، می‌توان نرخ و روش کاربرد کمپوست را در فضاهای سبز بهینه‌سازی کرد و از تجمع آلاینده‌ها در خاک جلوگیری نمود.

تفکیک و مدیریت پسماند از مبدأ:

یکی از مهم‌ترین عوامل در تولید کمپوست با کیفیت، کنترل و تفکیک پسماندهای شهری از مبدأ است. جمع‌آوری جداگانه پسماندهای آلی از زباله‌های تر و خشک، پلاستیک‌ها و مواد غیرآلی، می‌تواند کیفیت کمپوست نهایی را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. همچنین، این کار خطر ورود آلاینده‌ها به کمپوست و خاک‌های شهری را کاهش می‌دهد.

بهینه‌سازی فرآیند کمپوست‌سازی:

کنترل دقیق پارامترهای فرآیند کمپوست‌سازی، از جمله دما، رطوبت، هوادهی و نسبت کربن به نیتروژن، برای تولید کمپوست پایدار و غنی از مواد مغذی ضروری است. رعایت این موارد موجب بلوغ کامل کمپوست، کاهش ریسک فیتوتوکسیک و افزایش اثرات مثبت بر رشد گیاهان می‌شود. استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند کمپوست‌سازی در بیوراکتور یا ترکیب کمپوست با بیوچار نیز می‌تواند کیفیت محصول نهایی را ارتقا دهد.

انتخاب روش کاربرد مناسب در فضاهای سبز:

کمپوست باید بر اساس نوع خاک، گونه‌های گیاهی و شرایط محیطی اعمال شود. در خاک‌های فقیر از مواد آلی، نرخ بالاتر کمپوست می‌تواند مفید باشد، اما در خاک‌های حساس یا شوره‌زار، نیاز به نرخ کنترل‌شده و نظارت دقیق وجود دارد. همچنین، اعمال کمپوست در فصل مناسب و همراه با رعایت فاصله ایمنی از مناطق پرتردد شهری، می‌تواند خطر انتشار بیوآئروسل‌ها و میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا را کاهش دهد.

ترکیب کمپوست با اصلاح‌کننده‌های خاک:

استفاده هم‌زمان کمپوست با اصلاح‌کننده‌های خاک مانند بیوچار، خاک اره یا ماسه، می‌تواند اثرات هم‌افزا بر نگهداری آب، تهویه خاک و فعالیت میکروبی داشته باشد. این رویکرد علاوه بر افزایش حاصلخیزی خاک، به کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و افزایش ذخیره کربن در فضاهای سبز شهری کمک می‌کند.

آموزش و آگاهی‌رسانی بهره‌برداران:

آموزش کارکنان فضای سبز، مدیران شهری و شهروندان درباره فواید، روش‌های کاربرد و ملاحظات ایمنی کمپوست، اهمیت بالایی دارد. آگاهی‌رسانی موجب کاهش خطا در کاربرد کمپوست، جلوگیری از آلوده شدن خاک و ارتقای اثرات مثبت آن بر اکوسیستم شهری می‌شود.

تدوین سیاست‌ها و استانداردهای ملی:

پیاده‌سازی چارچوب‌های قانونی و استانداردهای ملی برای تولید، کنترل کیفیت و کاربرد کمپوست شهری ضروری است. این سیاست‌ها باید شامل دستورالعمل‌هایی برای پایش آلاینده‌ها، محدودیت غلظت فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها، و همچنین نرخ کاربرد مناسب در انواع خاک و گیاهان باشد تا استفاده از کمپوست به شکل پایدار و ایمن در محیط شهری تضمین شود.

پژوهش‌های تکمیلی و بلندمدت:

www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

برای بهبود کاربرد کمپوست شهری، نیاز به پژوهش‌های بلندمدت در زمینه اثرات تجمعی فلزات سنگین، اثرات میکروبیولوژیک و تغییرات اکوسیستم خاک وجود دارد. این تحقیقات می‌توانند راهنمایی برای بهبود فرمولاسیون کمپوست، روش‌های کاربرد و مدیریت زیست‌محیطی آن ارائه دهند.

محدودیت‌های پژوهش

هرچند پژوهش حاضر تلاش کرده است تصویری جامع و تحلیلی از تولید، ویژگی‌های شیمیایی و کاربرد کمپوست شهری در فضاهای سبز ارائه دهد، اما با محدودیت‌هایی مواجه بوده است که باید در تفسیر نتایج مدنظر قرار گیرد. نخست، ماهیت مطالعه به صورت مروری و کتابخانه‌ای است و داده‌ها و تحلیل‌ها عمدتاً بر اساس نتایج مطالعات پیشین جمع‌آوری شده‌اند. این موضوع به معنای محدودیت در کنترل مستقیم کیفیت داده‌ها و قابلیت تعمیم دقیق یافته‌ها به تمام شرایط شهری است، چرا که هر مطالعه پیشین ممکن است تحت شرایط خاص جغرافیایی، اقلیمی، نوع پسماند و روش تولید کمپوست انجام شده باشد.

دوم، ناهمگنی منابع و متغیرهای مورد بررسی یکی دیگر از محدودیت‌های مهم است. مقالات و گزارش‌های مورد بررسی دارای روش‌های متفاوتی در اندازه‌گیری پارامترهای شیمیایی و فیزیکوشیمیایی کمپوست بوده‌اند؛ برخی تحقیقات تنها روی عناصر اصلی (NPK) تمرکز داشته‌اند و برخی دیگر شاخص‌های ریزمغذی و فلزات سنگین را بررسی کرده‌اند. این تفاوت‌ها امکان مقایسه مستقیم و آماری دقیق بین مطالعات را محدود کرده و باعث شده جمع‌بندی نهایی به صورت توصیفی و تحلیلی انجام شود.

سوم، بسیاری از مطالعات بررسی شده به اثر کوتاه‌مدت کمپوست بر گیاهان و خاک محدود بوده‌اند و داده‌های بلندمدت درباره اثرات تجمعی فلزات سنگین، تغییرات میکروبی خاک و اثرات زیست‌محیطی گسترده کمتر موجود است. این کمبود اطلاعات، امکان ارائه راهکارهای دقیق و توصیه‌های بلندمدت برای کاربرد ایمن کمپوست شهری را محدود می‌کند.

چهارم، پژوهش‌های موجود اغلب به شرایط اقلیمی یا شهری خاص محدود شده‌اند و ممکن است نتایج آن‌ها در سایر مناطق با شرایط خاک، آب و هوا، نوع پسماند و گونه‌های گیاهی متفاوت، قابل تعمیم نباشد. به عبارت دیگر، تنوع گسترده فضاهای شهری و تفاوت در مدیریت پسماند و فرآیندهای کمپوست‌سازی، محدودیت‌هایی در تعمیم یافته‌های این پژوهش ایجاد کرده است.

در نهایت، به دلیل تمرکز بر مطالعات کتابخانه‌ای و مروری، برخی داده‌های کمی دقیق مانند نرخ دقیق آزادسازی عناصر غذایی، میزان جذب فلزات سنگین توسط گیاهان شهری و اثرات ترکیبی کمپوست با سایر اصلاح‌کننده‌ها محدود یا ناقص بوده‌اند. این مسئله ضرورت انجام مطالعات میدانی و تجربی با طراحی استاندارد و پارامترهای سنجش دقیق را برجسته می‌کند.

در مجموع، محدودیت‌های ذکر شده نشان می‌دهند که اگرچه یافته‌های این پژوهش تصویر نسبتاً جامعی از کاربرد و اثرات کمپوست شهری ارائه می‌دهند، اما برای اتخاذ سیاست‌ها و راهکارهای عملیاتی دقیق، نیازمند پژوهش‌های تکمیلی، بلندمدت و میدانی هستیم تا اثرات زیست‌محیطی و بهره‌وری واقعی کمپوست در فضاهای سبز شهری به‌طور کامل ارزیابی شود.

www.jamv.ir
ISSN: 2645-4572

منابع

- ✓ رضایی پاشا مریم، شاهدی کاکا، وهاب زاده قربان، کاویان عطاالله، قاجار سپانلو مهدی، جوکئیت پاسکال، (۱۳۹۸)، تأثیر استفاده تلفیقی از کمپوست زباله شهری و کود شیمیایی بر برخی خصوصیات خاک در اراضی کشاورزی شمال ایران (مطالعه موردی: شهرستان میاندرود)، علوم آب و خاک، دوره ۲۳، شماره ۲، صص ۲۰۱-۲۱۳.
- ✓ زولی محمد علی، کریمی زینب، رفیعی رضا، (۱۳۹۸)، انتخاب بهترین گزینه‌ها برای مدیریت پسماند شهری با استفاده از ابزار ارزیابی چرخه حیات (مطالعه موردی: شهر نور)، سلامت و محیط زیست، دوره ۱۲، شماره ۴، صص ۶۰۷-۶۲۰.
- ✓ سیلسپور، محسن، (۱۳۹۸)، بررسی اثرات کاربرد کمپوست پسماند شهری و نیتروژن بر عملکرد و غلظت فلزات سنگین در خاک و میوه گوجه‌فرنگی (Solanum lycopersicum)، نشریه تغذیه گیاهان باغی، دوره ۲، شماره ۱، صص ۱۶۴-۱۸۲.
- ✓ موسوی، سید مجید، رضایی، حامد، صداقت، آزاده، اسماعیل نژاد، لیلا، توحیدطلب، پوریا، غفاری نژاد، سید علی، (۱۴۰۳)، مطالعه وضعیت انباشت فلزات سنگین در خاک در نتیجه کاربرد چندساله کمپوست زباله شهری با استفاده از مدلسازی، تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۵، شماره ۶، صص ۸۴۷-۸۶۷.
- ✓ Agelet, L E (2005). Composting of Municipal Solid Wastes.
- ✓ Anand, H. C. Prakasha & C. T. Subbarayappa. (2023). Studies on Variations in Physico-chemical, Biochemical and Biological Characteristics at Different Maturity Stages of Segregated and Unsegregated Urban Solid Waste of Drum Compost. International Journal of Plant & Soil Science, 35(13), 1–15. https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i132981
- ✓ Asomani-Boateng, R. (2007). Closing the loop: Community-based organic solid waste recycling, urban gardening, and land use planning in Ghana, West Africa. Journal of Planning Education and Research, 27(2), 132-145.
- ✓ Barker, A. V., & Bryson, G. M. (2002). Bioremediation of heavy metals and organic toxicants by composting. The scientific world journal, 2(1), 407-420.
- ✓ Brändli, R. C. (2006). Organic pollutants in Swiss compost and digestate. Doctor thesis, EPFL.
- ✓ Evdokimov, S. V., Orlova, A. A., & Dubinina, G. F. (2015). Ensuring environmental safety during solid municipal waste processing. Ecology and Industry of Russia, 19(11), 36–40.
- ✓ Farrell, M., Griffith, G. W., Hobbs, P. J., Perkins, W. T., & Jones, D. L. (2009). Microbial diversity and activity are increased by compost amendment of metal-contaminated soil. FEMS microbiology ecology, 71(1), 94-105.
- ✓ Farsang, A., Babcsányi, I., Ladányi, Z., Perei, K., Bodor, A., Csányi, K. T., & Barta, K. (2020). Evaluating the effects of sewage sludge compost applications on the microbial activity, the nutrient and heavy metal content of a Chernozem soil in a field survey. Arabian Journal of Geosciences, 13(19), 982.
- ✓ Fathi, H., Ghasemian Rodsari, F., Almasi, A., & Mohamadi, M. (2020). Assessment of bioaerosol emissions from composting application in the urban green space of Kermanshah province in Iran. Advances in Environmental Technology, 6(1), 61-67.
- ✓ Gautam, S. P., Bundela, P. S., Pandey, A. K., Jain, R. K., Deo, P. R., Khare, S. K., ... & Surendra Sarsaiya, S. S. (2009). Biodegradation and recycling of urban solid waste.
- ✓ Gunawan, B., Mallaleng, H. R., Ali, M., Purwanti, S., Nurlina, N., Nisak, F., ... & Hidayati, S. (2022). Implementation of mass composting of urban organic waste in urban farming (Kalirungkut Village, Rungkut District, Surabaya City). Indonesian Journal of Engagement, Community Services, Empowerment and Development, 2(1), 27-37.

- ✓ Hara, Y., Furutani, T., Murakami, A., Palijon, A. M., & Yokohari, M. (2011). Current organic waste recycling and the potential for local recycling through urban agriculture in Metro Manila. Waste management & research, 29(11), 1213-1221.
- ✓ Jodar, J. R., Ramos, N., Carreira, J. A., Pacheco, R., & Fernández-Hernández, A. (2017). Quality assessment of compost prepared with municipal solid waste. Open Engineering, 7(1), 221-227.
- ✓ Kaneesamkandi, Z., & Sayeed, A. (2023). Assessment of Energy-Efficient Spouted Bed Aerobic Composting Performance for Municipal Solid Waste: Experimental Study. Processes, 11(12), 3427.
- ✓ Kumar, S. (2011). Composting of municipal solid waste. Critical reviews in biotechnology, 31(2), 112-136.
- ✓ Meller, E., Niedźwiecki, E., Rogalska, P., Jarnuszewski, G., & Wilczyński, D. (2015). Fertiliser value and trace element content of composts produced from different wastes. Journal of Ecological Engineering, 16(4).
- ✓ Mistry, A., & Spocter, M. (2020). Production of edibles and use of garden waste in domestic gardens of a middle-class suburb in Cape Town, South Africa. Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability.
- ✓ Mitra, A., Bhattacharyya, P., Chakrabarti, K., Chattopadhyay, D. J., & Chakraborty, A. (2003). Physico-chemical properties, heavy metals and their relations in cultivated landfill soils dumped with municipal solid wastes. Archives of Agronomy and Soil Science, 49(2), 163-170.
- ✓ Mollazadeh, N., Branch, N. A., & Abad, N. (2014). Composting: a new method for reduction of solid waste and wastewater. International Research Journal of Applied and Basic Sciences, 8(3), 311-317.
- ✓ Peña-Ortiz, Z., Beristain-Cardoso, R., Cervantes-Zepeda, I., García-Mondragón, D., Gallego-Alarcón, I., & González-Blanco, G. (2025). Physical, chemical and bromatological characterization of the organic fraction of urban solid waste: Potential and possible applications. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 41, 297-309.
- ✓ Rad, H. A., Hasanimehr, M. H., Babaee, V., & Baei, M. S. (2011). Use of municipal solid waste compost and waste water biosolids with co-composting process.
- ✓ Rojas, J. A., Dhar, A., & Naeth, M. A. (2021). Urban naturalization for green spaces using soil tillage, herbicide application, compost amendment and native vegetation. Land, 10(8), 854.
- ✓ Rojas, J. A., Dhar, A., & Naeth, M. A. (2022). Urban green spaces restoration using native forbs, site preparation and soil amendments—a case study. Land, 11(4), 498.
- ✓ Schröder, C., Häfner, F., Larsen, O. C., & Krause, A. (2021). Urban organic waste for urban farming: Growing lettuce using vermicompost and thermophilic compost. Agronomy, 11(6), 1175.
- ✓ Siles-Castellano, A. B., López-González, J. A., Jurado, M. M., Estrella-González, M. J., Suárez-Estrella, F., & López, M. J. (2021). Compost quality and sanitation on industrial scale composting of municipal solid waste and sewage sludge. Applied Sciences, 11(16), 7525.
- ✓ Sotamenou, J., & Parrot, L. (2013). Sustainable urban agriculture and the adoption of composts in Cameroon. International journal of agricultural sustainability, 11(3), 282-295.
- ✓ Terrile, R., Martinez, N., Paz, N., Brunotto, F., Costa, M., Budai, N., ... & Tornaghi, C. (2024). Urban food waste for soil amendment? Analysis and characterisation of waste-based compost for soil fertility management in agroecological horticultural production systems in the city of Rosario, Argentina. Frontiers in Sustainable Food Systems, 8, 1338451.

✓ Wang, B., Li, W., Xue, N., Xi, R., Wang, Y., Fang, L., ... & Wu, X. (2025). Co-application of biochar and compost enhanced soil carbon sequestration in urban green space. Frontiers in Microbiology, 16, 1707894.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی