

مبانی تعیین بیشینه مجاز غلظت عناصر سنگین در کمپوست حاصل از پسماند شهری (مقاله مروری)

چکیده

افزایش جمعیت و تغییر سبک زندگی، تولید زباله را به معضلی جهانی تبدیل کرده است. کمپوست سازی به عنوان راهکاری برای مدیریت پسماندهای آلی مطرح است، اما حضور عناصر سنگین در کمپوست می تواند تهدیدی برای محیط زیست و سلامت انسان باشد. این پژوهش با هدف ارائه روشی علمی و مناسب برای تعیین حدود مجاز فلزات سنگین در کمپوست زباله شهری قابل مصرف در زمین های کشاورزی ایران انجام شد. بررسی ها نشان داد دو رویکرد اصلی برای تعیین حدود مجاز وجود دارد: پذیرش استانداردهای خارجی یا تعیین استانداردهای بومی. با توجه به تفاوت های چشمگیر در ترکیب زباله ها، روشهای تولید و قوانین ملی کشورها، استفاده از استانداردهای خارجی بدون تطابق با شرایط کشور فاقد وجاهت علمی است. در این مقاله، روش بیان عنصری به عنوان روش مناسب برای ایران پیشنهاد شد. در این روش، حد مجاز هر عنصر بر اساس سقف غلظت پس از ۴۵ سال استفاده مداوم و با در نظر گرفتن نرخ مصرف ۲۵ تن در هکتار در سال محاسبه می شود. بر این اساس، حدود مجاز پیشنهادی (میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک) برای عناصر سنگین در کمپوست شهری ایران به شرح زیر است: آرسنیک: ۵، کادمیم: ۱۰، کروم: ۱۵۰، سرب: ۱۰۰، نیکل: ۱۲۰، کبالت: ۲۵، مس: ۶۵۰، روی: ۱۳۰۰، مولیبدن: ۵، و جیوه: ۵. نتایج نشان می دهد بازنگری استانداردهای کروم و نیکل خاک به دلیل غلظت طبیعی زیاد آنها در خاکهای ایران ضروری است. این مطالعه بر لزوم مدیریت یکپارچه تولید و مصرف کمپوست با در نظر گرفتن شرایط بومی و پایش مستمر برای حفظ سلامت محیط زیست تأکید دارد.

کلمات کلیدی: کمپوست شهری، عناصر سنگین، استانداردهای کیفیت، مدیریت پسماند، بیان عنصری

Principles for Setting Threshold Limits of Heavy Metal Concentrations in Municipal Solid Waste Compost: A Comprehensive Review

Abstract:

Population growth and lifestyle changes have turned waste production into a global challenge. Composting serves as a solution for organic waste management, but heavy metals in compost may threaten both the environment and human health. This study aimed to develop a scientific methodology for determining permissible limits of heavy metals in municipal waste compost for agricultural use in Iran. The research identified two primary approaches for setting limits: adopting foreign standards or developing localized standards. Given significant variations in waste composition, production methods, and national regulations across countries, directly applying foreign standards without local adaptation lacks scientific validity. This paper proposes the "elemental balance method" as the most suitable approach for Iran. In this method, permissible limits for each element are calculated based on: 1) maximum allowable soil concentration after 45 years of continuous use, and 2) an application rate of 25 tons per hectare annually. The proposed limits (mg/kg dry weight) for heavy metals in Iranian municipal compost are: Arsenic: 5, Cadmium: 10, Chromium: 150, Lead: 100, Nickel: 120, Cobalt: 25, Copper: 650, Zinc: 1300, Molybdenum: 5, and Mercury: 5. Findings highlight the need to revise current standards for chromium and nickel in Iranian soils due to their naturally high background concentrations. The study emphasizes the importance of integrated compost management - from production to application - with continuous monitoring to ensure environmental safety. Implementing these science-based, locally-adapted standards while maintaining proper application rates can enable safe agricultural use of municipal compost while protecting soil health and food safety.

Keywords: Municipal compost, Heavy metals, Quality standards, Waste management, Elemental balance method

Extended Abstract

Introduction

The rapid increase in population, urbanization, and changes in lifestyle has led to a global surge in waste production, making municipal solid waste (MSW) management a critical challenge. Countries

employ various methods—such as landfilling, recycling, incineration, and composting—to manage urban waste, depending on factors like waste composition, socioeconomic conditions, and technological capabilities. Composting, introduced post-World War II, has gained traction as a sustainable waste management strategy, with some countries composting up to 25% of their MSW. However, while compost derived from organic waste can enhance soil fertility by improving organic matter content, water retention, and nutrient availability, it also poses risks due to potential heavy metal contamination. These metals, such as lead (Pb), cadmium (Cd), and chromium (Cr), can accumulate in soil, enter the food chain, and threaten ecosystem health and human safety. Given these concerns, many nations have established stringent standards for compost quality, particularly for agricultural use. However, these standards vary widely due to differences in local conditions, waste composition, and regulatory frameworks. In Iran, composting initiatives date back to 1969, with the first national compost standard published in 2007. Recent reports of substandard compost quality and heavy metal contamination have prompted calls for revising these standards to align with scientific and environmental safety principles.

Purpose

This study aims to:

- Review international approaches to setting heavy metal limits in municipal compost for agricultural use.
- Propose a scientifically grounded method for determining permissible heavy metal concentrations in compost, for application in agricultural lands of Iran, ensuring environmental and human health protection.

Research Method

The study employs a comparative literature review and data collection methodology:

- Literature review: reviewing global standards for heavy metals in compost, focusing on countries like the U.S., Germany, Canada, and the EU, which use either risk assessment or elemental balance approaches, and compare it with their national surveys. Also assessing Iranian compost quality, soil heavy metal background and national standard, effect of long-term heavy metal accumulation in soil under continuous compost use was done. In addition, application rate of municipal solid waste compost in agricultural lands of Iran, was considered.
- The research identified two primary approaches for setting limits: adopting foreign standards or developing localized standards. Given significant variations in waste composition, production methods, and national regulations across countries, directly applying foreign standards without local adaptation lacks scientific validity. Studies revealed that countries generally employ two main approaches to determine permissible limits of pollutants in compost. The first method is based on risk assessment and is primarily used by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA). The second method is based on the mass balance of pollutant inputs into the receiving environment (agricultural soil), with Canada's environmental protection agency being among those that utilize this approach.

Results

This paper concluded the "elemental balance method" as the most suitable approach for Iran. In this method, permissible limits for each element are calculated based on: 1) maximum allowable soil concentration after 45 years of continuous use, and 2) an application rate of 25 tons per hectare annually. The proposed limits (mg/kg dry weight) for heavy metals in Iranian municipal compost are: Arsenic: 5,

Cadmium: 10, Chromium: 150, Lead: 100, Nickel: 120, Cobalt: 25, Copper: 650, Zinc: 1300, Molybdenum: 5, and Mercury: 5. Findings highlight the need to revise current standards for chromium and nickel in Iranian soils due to their naturally high background concentrations. The study emphasizes the importance of integrated compost management - from production to application - with continuous monitoring to ensure environmental safety. Implementing these science-based, locally-adapted standards while maintaining proper application rates can enable safe agricultural use of municipal compost while protecting soil health and food safety.

Conclusion

This study demonstrates that setting national standards for agricultural compost forms an integral part of comprehensive urban waste management systems. The mass balance approach - calculating cumulative elemental loading in agricultural soils - emerges as the most scientifically valid method for determining heavy metal thresholds in Iran's context, though its precision depends critically on accurate input data. Notably, natural background concentrations of nickel and chromium exceed proposed regulatory limits in significant portions of Iran's agricultural soils, creating a paradox that demands either standard revision or explicit usage restrictions in affected areas. Parallel measures must include:

1. Source-segregation to reduce contaminant levels
2. Dynamic standard refinement through ongoing research
3. Strict enforcement of application rates
4. Stakeholder education programs

International best practices confirm that integrated approaches combining improved collection systems with advanced processing technologies can yield compost products with heavy metal concentrations below regulatory thresholds, enabling safer agricultural utilization while maintaining soil organic matter benefits.

Author Contributions

“Mojgan Yeganeh: literature review, data collecting, original draft preparation, finalize the manuscript, Kambiz Bazargan: Conceptualization, literature review, draft preparation, finalize the manuscript, Karim Shahbazi: finalize the manuscript. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.” All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data will be available based on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The study was approved by the Ethics Committee of the University of ABCD (Ethical code: IR.UT.RES.2024.500). The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

مقدمه

افزایش جمعیت، افزایش شهرنشینی، تغییر سبک زندگی و افزایش تولید زباله، امروزه به معضلی جهانی تبدیل شده است. کشورهای مختلف با توجه به عوامل متعددی مانند ترکیب و سهم اجزاء زباله شهری، شرایط اقتصادی-اجتماعی و زیست محیطی، وضعیت تولید و مصرف انرژی، شرایط منابع خاک و آب بخش کشاورزی و امکانات و سطح برخورداری از فناوری‌های مناسب، پسماند شهری تولیدی را به نسبت‌های مختلف از طریق دفن، بازیافت، سوزاندن و تهیه کمپوست مدیریت می‌نمایند. با آغاز صنعت کمپوست سازی بعد از جنگ جهانی دوم، به تدریج موضوع کیفیت و خصوصیات کمپوست زباله شهری برای کاربردهای مختلف، در کشورهای پیشرفته مورد بحث قرار گرفت. اکنون بسیاری از کشورها از کمتر از یک تا حدود ۲۵ درصد از زباله تولیدی شهرها را به روش کمپوست سازی مدیریت می‌نمایند (Cao et al., 2023; Rules, 2000). با پیشرفت فناوری، کیفیت کمپوست‌های حاصل از پسماند زباله شهری مرتباً ارتقاء یافته و در این مسیر فرایند جدا سازی انواع زباله از مبدأ کمک شایانی به ارتقای کیفیت کمپوست حاصله در این کشورها نموده است (Biala & Wilkinson, 2020).

تولید کمپوست از بخش تجزیه پذیر زباله یکی از راه‌های مدیریت زباله است. اما معرفی کمپوست به عنوان یک ماده کودی قابل کاربرد در خاک به سال‌ها قبل برمی‌گردد. اساساً مهمترین مزیت کمپوست حاصل از پسماندهای شهری برای کاربرد در اراضی کشاورزی محتوای مواد آلی آن است که در طی فرآیند پوسیدگی به ترکیبات آلی پایدار تبدیل شده است. این ترکیبات می‌توانند در افزایش محتوای مواد آلی خاک مفید بوده و به تبع آن ظرفیت نگهداری آب در خاک و کارایی جذب عناصر غذایی خاک برای گیاهان را بهبود بخشند (Zahariev et al., 2014). اما این نوع کمپوست به دلیل مواد اولیه منشأ تولید، می‌تواند تهدیدی بر سلامت خاک بوده و محدودیت‌هایی برای خدمات زیست بوم خاک و از جمله رشد و تولید گیاهان ایجاد نمایند. لذا کشورهای مختلف تلاش نموده‌اند تا به موازات معرفی کمپوست حاصل از پسماندهای شهری، ضوابط و استانداردهایی برای ویژگی‌های کیفی کمپوست قابل کاربرد در اراضی کشاورزی تعیین نمود و به معرض اجرا گذارند. یکی از مهمترین دغدغه‌ها و مشکلات احتمالی استفاده از کمپوست زباله شهری در خاک، افزایش غلظت عناصر سنگین در خاک و گیاه و تهدید سلامت محیط زیست و مصرف کنندگان محصولات کشاورزی از این طریق است (Kupper et al., 2014).

بررسی‌ها نشان می‌دهد موضوع مدیریت تولید و مصرف بخشی از زباله‌های شهری، به عنوان کمپوست قابل کاربرد در اراضی کشاورزی، یک سیستم چند بعدی است و از تولید تا مصرف و حتی پایش شرایط پس از مصرف، اجزاء متعددی دارد که کارکرد درست سیستم وابسته به کارکرد درست هر یک از این اجزا است. لذا تدوین حدود مجاز استاندارد یکی از اجزای این سیستم است و نباید انتظار داشته باشیم تمامی مسئولیت تولید و مصرف صحیح این مواد را یک سند استاندارد به انجام رساند.

الف- مدیریت تولید

گزارش‌ها تاثیر معنی‌دار فرآیند جداسازی از مبدأ را بر کیفیت کمپوست تولیدی به ویژه از منظر باقیمانده عناصر سنگین، اثبات می‌نمایند. مقایسه کیفیت کمپوست زباله شهری مخلوط و کمپوست تولید شده از زباله‌های آلی تفکیک شده در مبدأ در کشور آلمان، کاهش مقادیر عناصر سنگین تا میزان یک پنجم را نشان داد (Brinton, ۲۰۰۰; Ding et al., ۲۰۱۷).

ب- مدیریت مصرف

کمپوست حاصل از پسماند زباله شهری می‌تواند کاربردهای متفاوتی داشته باشد اما آنچه به بخش کشاورزی مرتبط است شامل کاربرد در باغبانی؛ در ترکیب با انواع کودهای دیگر و خاک، بعنوان بستر کاشت درختان هنگام احداث باغ، در چالکود یا در نزدیکی نهال‌ها و درختان بالغ با هدف تسهیل رشد ریشه‌ها و تهویه محیط آنها، حرکت بهتر آب و غذا است. در زراعت، کاربرد کمپوست

مناسب معمولاً به عنوان یکی از منابع مواد آلی و بهبوددهنده ویژگی‌های فیزیکی خاک، توصیه می‌شود تا پیش از کشت، به خاک مزرعه افزوده و با لایه سطحی خاک مخلوط شوند.

با توجه به احتمال افزایش غلظت بیش از حد عناصر سنگین در خاک، از طریق مصرف کمپوست حاصل از پسماند شهری و ورود این عناصر به آب، گیاهان و سپس چرخه غذایی موجودات زنده، در بعضی از کشورها، کاربرد این مواد متناسب با شرایط خاک میزبان تعیین گردیده است. مثلاً در آلمان در شرایطی که حداکثر مجاز سرب در کمپوست ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نظر گرفته شده، انجمن باغبانی آلمان برای کاربرد این مواد در زمین‌های سبزیکاری متراکم، با مقدار سرب خاک ۱۲ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، حداکثر غلظت سرب ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کمپوست را توصیه نموده است. همین‌طور برای سایر عناصر سنگین نیز حدود مجاز توصیه شده‌گاهی تا یک پنجم حدود استاندارد ملی همان کشور است (Brinton, 2000; Ding et al., 2017).

جدول ۱- توصیه حدود مجاز غلظت عناصر سنگین در کمپوست برای کاربرد مقدار زیاد کمپوست در کشت سبزیجات در خاک‌هایی با غلظت معمول، در کشور آلمان (Brinton, 2000)

عنصر	غلظت حداکثر توصیه شده برای کاربرد مکرر کمپوست (mg/kg)	مقادیر در خاک‌های معمول (mg/kg)
Pb	۷۵	۱۲ - ۱۰۰
Cu	۵۰	۳ - ۲۰
Zn	۲۰۰	۱۴ - ۱۲۵
Cr	۷۵	۵ - ۱۰۰
Ni	۳۰	۴ - ۵۰
Cd	۰/۷۵	۰/۳ - ۰/۷
Hg	۰/۵	۰/۰۵ - ۰/۴۰

از طرف دیگر در بعضی از کشورها برای جلوگیری از افزایش بیش از حد غلظت عناصر سنگین در خاک، کاربرد کمپوست حاصل از پسماندهای شهری در خاک‌هایی که محتوای اولیه عناصر سنگین آنها از حد معینی بیشتر باشد، خاک‌های آلی، خاک‌هایی با pH اسیدی و خاک‌هایی که سفره آب زیرزمینی کم عمق دارند و یا به رودخانه‌ها نزدیک هستند ممنوع گردیده است (AORA, 2020).

سابقه استفاده از زباله‌های شهری برای تولید کود در ایران به سال ۱۳۴۸ هجری شمسی در شهر اصفهان بازمی‌گردد (Seilsepour, 2021) و از دهه ۸۰، تسهیل مصرف کمپوست زباله شهری در زمین‌های کشاورزی ایران مورد توجه قرار گرفته است. به تبع کشورهای دیگر، اولین استاندارد ملی کمپوست زباله شهری برای کاربرد در زمین‌های کشاورزی، در ایران در سال ۱۳۸۶ تدوین و به شماره ۱۰۷۱۶ منتشر شد. مبنای تعیین حدود مجاز غلظت عناصر سنگین در این استاندارد، انتخاب اعداد حدود مجاز از بین استاندارد کشورهای مختلف، بر اساس توافق ذینفعان، بوده است. اما از اواسط دهه ۹۰ با استناد به گزارش‌های رسیده به معاونت زراعت وقت وزارت جهاد کشاورزی مبنی بر کیفیت ظاهری نامناسب برخی کمپوست‌های عرضه شده در بعضی از استان‌ها و هم‌زمان با الزام قانونی ثبت انواع مواد کودی در وزارت جهاد کشاورزی، موضوع احتمال خطر تجمع فلزات سنگین در خاک و ورود آن به چرخه مصرف موجودات زنده، در اثر مصرف کمپوست زباله شهری در زمین‌های کشاورزی مورد توجه ویژه قرار گرفت. در همین راستا، موضوع بازنگری استاندارد کمپوست زباله شهری برای مصرف در اراضی کشاورزی در دستور کار قرار گرفت. هدف از نگارش این مقاله، بررسی روش‌های مورد استفاده در کشورهای مختلف، به‌ویژه کشورهای پیشرو و ارائه روشی علمی و مناسب برای تعیین حدود مجاز فلزات سنگین در کمپوست زباله شهری قابل مصرف در زمین‌های کشاورزی ایران است، به‌گونه‌ای که سلامت محیط زیست، گیاهان، حیوانات و یا انسان را تهدید ننماید.

روش کار

برای دستیابی به اهداف این مقاله، ابتدا به بررسی شرایط موجود در کشور و مقایسه آن با وضعیت سایر کشورها، بررسی اصول مورد استفاده در دنیا برای تعیین حدود مجاز آلاینده‌ها در کمپوست حاصل از زباله شهری، پرداخته می‌شود و سپس با توجه به جمع بندی حاصل از این بررسی‌ها حدود مجاز پیشنهادی غلظت عناصر سنگین، به عنوان استاندارد ملی ایران پیشنهاد می‌گردند. بنابراین روش تحقیق انجام شده در این پژوهش، شامل موارد زیر است:

مروری بر مقادیر حداکثر مجاز عناصر سنگین در کمپوست برای کاربرد در زمین‌های کشاورزی در کشورهای مختلف

مقادیر حداکثر غلظت مجاز عناصر سنگین در کمپوست تولیدی از پسماندهای شهری بر اساس استاندارد ملی تعدادی از کشورها برای مصرف این مواد در اراضی کشاورزی در جدول ۲، ارائه گردیده است. همانطور که اعداد جدول نشان می‌دهد، حدود مجاز استاندارد در کشورهای مختلف، متفاوت بوده و دارای محدوده گسترده‌ای است. این موضوع نشان می‌دهد که حدود مجاز بسته به شرایط حاکم بر آن کشور و سایر قوانین و دستورالعمل‌ها تعیین می‌گردد. به عنوان نمونه برای عنصر سرب در همین چند کشور حد مجاز غلظت از حداقل ۴۵ میلی گرم در کیلوگرم برای کمپوست درجه A^+ در کشور اتریش تا حداکثر ۳۰۰ میلی گرم در کیلوگرم در کشور آمریکا متغیر است. همانطور که دیده می‌شود معمولاً بیشترین حدود مجاز برای این عناصر مربوط به کشور آمریکا است. بررسی‌های بعدی نشان داد فقط در آمریکا است که این اعداد بر مبنای ارزیابی ریسک محاسبه می‌شوند. این موضوع نشان می‌دهد این کشور در کنار بانک اطلاعات قوی در رابطه با شاخص‌های سلامت و کیفیت منابع پایه و محیط زیست، و جریان اطلاعات پایش این منابع، به اتکای اختیارات قانونی زیاد آژانس حفاظت محیط زیست (EPA) توانسته است این استاندارد را برای کاربرد کمپوست زباله شهری و لجن فاضلاب در زمین‌های کشاورزی پیاده کند.

با دقت در اعداد جدول ۲، در می‌یابیم که بعضی از کشورهایی که دارای شرایط اقلیمی و احتمالاً کیفیت خاک مشابه یکدیگرند، حدود مجاز کاملاً متفاوتی را برای استاندارد عناصر سنگین در کمپوست تعیین نموده‌اند. این بدین معنی است که کشورها به ویژه کشورهای پیشرفته، حدود مجاز را نه عیناً مشابه سایر کشورها بلکه بر اساس مبانی معین علمی، با در نظر گرفتن همه جوانب موضوع و شرایط کشور خود تعیین می‌نمایند.

بررسی مستندات و سوابق نشان می‌دهد که تعیین حدود پیشنهادی مجاز غلظت عناصر سنگین در کمپوست در استاندارد ملی هر کشور تابع عوامل متعددی است که مهمترین آنها عبارتند از:

- وضعیت خاک کشور از نظر غلظت زمینه هر یک از عناصر سنگین
- کیفیت کمپوست تولیدی

- محل مصرف (مزارع، باغات، پارک‌ها، گلخانه‌ها و ...)
- نرخ مصرف،
- حدود مجاز آلودگی عناصر سنگین در خاک

وضعیت انباشت عناصر سنگین (افزوده شده از طریق کاربرد کمپوست) در خاک و انتقال به محصولات

بنابراین برای تعیین بیشینه مجاز غلظت عناصر سنگین در کمپوست حاصل از زباله شهری در اراضی کشاورزی کشور باید نسبت به عوامل فوق آگاهی لازم وجود داشته باشد و بر اساس این متغیرها تصمیم‌گیری شود، که در ادامه به هر یک از این موارد پرداخته می‌شود.

پژوهش‌های
در دسترس

جدول ۲- مقایسه حدود بیشینه مجاز عناصر سنگین در استاندارد کمپوست قابل مصرف تعدادی از کشورها

استاندارد کیفیت کشورها (mg/kg)										عناصر سنگین
ترکیه (Akinci, 2008)	هند (Rules, 2000)	آلمان (Brinton, 2000)	کانادا (Biala & Wilkinson, 2020)	آمریکا (EPA Part 503 Biala & Wilkinson, 2020)	انگلستان (PAS 100 Biala & Wilkinson, 2020)	ایتالیا (CIC Biala & Wilkinson, 2020)	اتریش (قانون کمپوست) (Biala & Wilkinson, 2020)	اروپا (برنامه تضمین کیفیت) (Biala & Wilkinson, 2020)	استرالیا (Biala & Wilkinson, 2020)	
۳	۵	۳	۲۰ (B) ۳ (A)	۳۹	۱/۵	۱/۵	۳/۰ (B) ۱/۰ (A) ۰/۷ (A ⁺)	۱/۳	۳	کادمیم
۳۵۰	۵۰	۱۵۰	۱۰۶۰ (B) ۲۱۰ (A)		۱۰۰	۰/۵ (Cr) (VI)	۲۵۰ (B) ۷۰ (A) ۷۰ (A ⁺)	۲۰	۱۰۰	کروم (کل)
		۱۵۰	۷۵۰ (B) ۴۰۰ (A)	۱۵۰۰	۲۰۰	۲۳۰	۵۰۰ (B) ۱۵۰ (A) ۷۰ (A ⁺)	۱۱۰ (۳۰۰)	۱۰۰ (۱۵۰)	مس
۱۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۵۰۰ (B) ۱۵۰ (A)	۳۰۰	۲۰۰	۱۴۰	۲۰۰ (B) ۱۲۰ (A) ۴۵ (A ⁺)	۱۳۰	۱۵۰	سرب
		۳	۵ (B) ۰/۸ (A)	۱۷	۱	۱/۵	۳/۰ (B) ۰/۷ (A) ۰/۴ (A ⁺)	۰/۴۵	۱	جیوه
۱۲۰	۵۰	۵۰	۱۸۰ (B) ۶۲ (A)	۴۲۰	۵۰	۱۰۰	۱۰۰ (B) ۶۰ (A) ۲۵ (A ⁺)	۴۰	۶۰	نیکل
		۵۰۰	۱۸۵۰ (B) ۷۰۰ (A)	۲۸۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۱۸۰۰ (B) ۵۰۰ (A) ۲۰۰ (A ⁺)	۴۰۰ (۶۰۰)	۲۰۰ (۳۰۰)	روی

وضعیت خاک‌های کشور از نظر غلظت زمینه هر یک از عناصر سنگین

در ایران پژوهش‌های متعددی در زمینه وضعیت عناصر سنگین در خاک‌های مناطق مختلف کشور انجام گرفته است. یکی از جامع‌ترین این مطالعات، مقاله مرورری شهبازی و همکاران، در سال ۱۴۰۱ است. در این مقاله با بررسی علمی و نقادانه همه پژوهش‌های قبلی و با استفاده از روش‌های مرسوم تعیین غلظت زمینه، غلظت زمینه عناصر آلاینده در خاک‌های کشاورزی کشور محاسبه گردیده است. در جدول ۳، مقادیر غلظت زمینه عناصر آلاینده در خاک‌های ایران، در مقایسه با برخی کشورهای دیگر و نیز میانگین جهانی آمده است.

جدول ۳- مقایسه غلظت زمینه عناصر سنگین در خاک‌های ایران (عمق ۰ تا ۳۰ سانتیمتر) و سایر کشورها (شهبازی و همکاران، ۱۴۰۱)

منطقه	Zn	Pb	Ni	Cu	Cr	Co	Cd	As
mg/kg								
ایران	۱۳۰/۹	۴۶/۶	۱۱۶/۹	۴۳/۸	۱۳۹/۵	۲۶/۱	۰/۴۴	۲۱/۹
انگلستان	-	۱۸۰	۴۲	۶۲	-	-	۱	۳۲
چین	۷۴/۲	۲۴	۲۶/۹	۲۲/۶	۶۱	-	۰/۰۹۷	۱۱/۲
استرالیا	۵۵	۱۱	۲۱	۲۴	۴۴	۱۴	۰/۱	۳/۴
جهان	۷۰	۲۷	۲۹	۳۸/۹	۵۹/۵	۱۱/۳	۰/۴۱	۶/۸۳

به نظر می‌رسد در مقطع فعلی این مقادیر معتبرترین اعداد قابل استناد برای غلظت زمینه عناصر آلاینده در خاک‌های کشاورزی کشور است، به همین دلیل در پژوهش حاضر، از این اعداد، به عنوان غلظت زمینه فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی ایران، استفاده شد.

کیفیت کمپوست‌های زباله شهری تولیدی کشور در مقایسه با سایر کشورها

کیفیت کمپوست‌های تولیدی از زباله‌های شهری مناطق مختلف کشور، در پژوهشی تحت عنوان "تعیین خطرپذیری استفاده از کمپوست زباله شهری در کشاورزی ایران" در موسسه تحقیقات خاک و آب بررسی گردید (مگانده، ۱۴۰۲). نتایج این بررسی نشان داد خصوصیات کیفی کمپوست‌های تولیدی هر یک از کارخانه‌ها به ویژه غلظت عناصر سنگین، در طول مدت بررسی بسیار متغیر بوده و نوسانات زیادی داشتند، به نحوی که در موارد متعدد هر یک از این خصوصیات نسبت به حدود استاندارد (استاندارد ملی ایران)، انحراف داشتند. از جمله موارد انحراف از حدود مجاز استاندارد در غلظت عناصر سنگین، عبارت بودند از: کادمیم: کارخانه با کد ۱؛ کروم: کارخانه با کد ۲؛ نیکل: کارخانه با کد ۱؛ سرب: کارخانه با کد ۷ و کد ۸؛ مقادیر کربن آلی: کارخانه با کد ۱ و کد ۹؛ و مواد خارجی: کارخانه با کد ۷، کد ۸ و کد ۳. جدول ۴، وضعیت کمپوست تولیدی کشور را از نظر محتوای فلزات سنگین نشان می‌دهد.

جدول ۴- درصد عدم انطباق کمپوست تولیدی در کشور با استاندارد ملی ایران از نظر محتوای فلزات سنگین (تعداد نمونه= ۱۶۹)
(Veganeh et al., ۲۰۲۵)

پارامتر	میانگین (mg/kg dry weight)	محدوده غلظت (mg/kg dry weight)	حد مجاز	درصد عدم انطباق
Cd	۳/۲۷**	۰/۵۱ - ۱۷۵/۴	۱۰	۶/۵
Pb	۱۳۴**	۳۸/۸ - ۳۷۶/۸	۲۰۰	۱۶
Ni	۶۹**	۱/۵۳ - ۷۰۶/۵	۱۲۰	۱۱/۲
Cr	۷۶**	۸/۳۵ - ۲۲۳/۶	۱۵۰	۹/۴۷
Co	۷/۹۰**	۳/۴۹ - ۵۶/۴	۲۵	۰/۵۹
As	۳**	۰/۱۶ - ۹/۱۸	۱۰	۰

**- اختلاف معنی دار در سطح یک درصد با استاندارد ملی

در رابطه با سایر کشورها، بررسی‌ها نشان داد کیفیت کمپوست‌های تولیدی در کشورهای مختلف در قالب یک سیستم معین مورد ارزیابی و پایش مداوم قرار می‌گیرد. در گزارشی از نتایج اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین در ۳۶۵۹ نمونه کمپوست در ایالات متحده، میانگین غلظت سرب در نمونه‌ها، ۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم ارائه گردیده، درحالی که حداکثر مجاز بر اساس استاندارد ملی این کشور ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده است (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه نتایج بررسی کیفیت ۳۶۵۹ نمونه کمپوست با حدود استاندارد تعیین شده در ایالات متحده آمریکا (Evanylo, 2020)

عنصر سنگین	میانگین غلظت (mg/kg)	حد استاندارد ۵۰۳ (mg/kg)
As	۷/۲	۴۱
Cd	۲/۴	۳۹
Cr	۳۰	۱۲۰۰
Cu	۱۲۱	۱۵۰۰
Pb	۲۵	۳۰۰
Hg	۰/۴	۱۷
Ni	۱۷	۴۲۰

بر اساس گزارشی که توسط انجمن فدرال کیفیت کمپوست آلمان منتشر گردیده است، در پایش کیفی که طی سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ انجام گرفت، غلظت سرب در مجموع ۲۷۵۴ نمونه، از ۴ تا ۱۶۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بوده و میانگین غلظت سرب در نمونه‌های کمپوست این دو سال به ترتیب ۳۷ و ۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک کمپوست بوده است (جدول ۶).

جدول ۶- ویژگی‌های کمپوست تولیدی از پسماندهای شهری در آلمان طی دو سال ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ (Siebert, Thelen Jüngling, 2020)

ویژگی	میانگین غلظت (mg/kg) ۲۰۰۶	میانگین غلظت (mg/kg) ۲۰۰۷	غلظتی که ۹۰ درصد نمونه‌ها از آن کمترند (mg/kg)	حداقل و حداکثر غلظت (mg/kg)
Pb	۳۷/۰	۳۶/۰	۶۵/۵	۴/۰ - ۱۶۶/۰
Cd	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۷۲	۰/۰۰ - ۲/۰۰
Cr	۲۱/۱	۲۱/۲	۳۲/۰	۳/۷۲ - ۳۰۷/۰
Cu	۴۵/۸	۴۳/۳	۷۷/۰	۲/۲۰ - ۱۰۰۴/۰
Ni	۱۳/۱	۱۳/۱	۲۳/۰	۱/۷۶ - ۸۷/۹
Zn	۱۶۹/۰	۱۶۸/۰	۲۴۹/۰	۲۲/۰ - ۸۳۵/۰
Hg	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۲۲	۰/۰۰ - ۰/۹۷

این درحالی است که حدود بیشینه مجاز سرب بر اساس استاندارد ملی آلمان برای کمپوست درجه یک و دو به ترتیب اعداد ۱۰۰ و ۱۵۰ بوده و مهم‌تر اینکه در مجموع در ۹۰ درصد نمونه‌هایی که در این دو سال مورد بررسی قرار گرفته‌اند، غلظت سرب کمتر از ۶۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کمپوست بوده است. گزارش پایش سال ۲۰۱۳ همین انجمن از کمپوست‌های تولیدی از زباله‌های شهری آلمان، که در ۲۸۳۴ نمونه انجام گرفته، میانگین غلظت سرب را در نمونه‌ها ۳۳/۹۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیان نموده و نشان داده است که در ۹۵ درصد نمونه‌ها، غلظت سرب کمتر از ۶۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده است (Siebert and Thelen Junglin, 2020).

این گزارش‌ها به‌طور روشن نشان می‌دهند حداقل در رابطه با دو کشور ایالات متحده و آلمان، میانگین غلظت سرب در کمپوست‌های تولیدی کمتر از یک سوم حد بیشینه مجاز تعریف شده در استانداردهای ملی این کشورها است و در مورد آلمان، غلظت سرب در ۹۵ درصد نمونه‌ها بسیار کمتر از حد بیشینه مجاز تعریف شده است. جدول ۷، میانگین و P.95 غلظت آلاینده‌ها در کمپوست‌های تولیدی کشور را نشان می‌دهد:

جدول ۷- میانگین و P.95 غلظت آلاینده‌ها (فلزات سنگین) در کمپوست‌های تولیدی کشور (یگانه، ۱۴۰۳)

آلاینده	میانگین	P.95
As	۳	۶/۸۰
Cd	۴	۱۰/۸
Cr	۷۶	۱۸۸/۵
Pb	۱۳۴	۲۵۴/۴
Ni	۶۹	۱۵۷/۸
Co	۷	۱۳/۰
Cu	۱۷۰	۲۱۶
Zn	۴۱۰	۸۸۴

محل مصرف کمپوست در کشور

کمپوست عمدتاً در زمین‌های کشاورزی، باغات و فضای سبز، به منظور بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش کربن آلی خاک و تامین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه استفاده می‌شود از دیگر موارد استفاده کمپوست، استفاده به عنوان مالچ به

منظور کنترل فرسایش بادی، آب و علف‌های هرز می‌باشد (Rynk et al., 2021). البته، موضوع این بررسی روش‌هی تعیین حدود مجاز آلاینده‌ها (فلزات سنگین) در کمپوست زباله شهری قابل استفاده در زمین‌های کشاورزی است.

نرخ مصرف کمپوست زباله شهری در زمین‌های کشاورزی

یکی از موضوعات دیگر که مستقیماً بر میزان ورود عناصر و ترکیبات آلاینده از طریق کاربرد کمپوست در اراضی تاثیرگذار است، نرخ مصرف کمپوست است. در بسیاری از کشورها پیش از تعیین نرخ مصرف، میزان مجاز بارگذاری عناصر سنگین بر حسب کیلوگرم عنصر در هر هکتار خاک کشاورزی در هر سال تعیین می‌شود. اتحادیه اروپا علاوه بر حدود مجاز معرفی شده، قوانین سختگیرانه‌ای برای کنترل نرخ مصرف پسماندها وضع نموده، از جمله می‌توان به کشورهای سوئیس و آلمان اشاره کرد که صراحتاً این موضوع را در متن قوانین خود ذکر کرده‌اند. در آلمان بر اساس قانون، حداکثر مقدار کمپوست (بر حسب ماده خشک) ورودی به هر هکتار خاک در طول ۳ سال نباید از ۳۰ تن در هکتار برای کمپوست درجه یک (بیشینه سرب ۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم) و از ۲۰ تن در هکتار کمپوست خشک برای کمپوست درجه ۲ (بیشینه سرب ۱۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم) فراتر رود (BioAbfV, 2023).

آنچه مسلم است نرخ مصرف ترکیباتی که خطر آلاینده‌گی دارند مانند کمپوست حاصل از پسماند های شهری، می‌بایست با در نظر گرفتن کلیه شرایط از جمله بار مجاز عناصر سنگین در خاک در هر سال تعیین (با داشتن برنامه پایش) و در قالب قوانین و مقررات بالا دستی، توسط دستگاه‌های ذیربط ابلاغ گردد. به نحوی که کاربرد این مواد بیش از نرخ مجاز اعلامی تنبیهات یا جرائم معینی را برای فرد در پی داشته باشد. در ایران اما این نرخ تاکنون تعیین نگردیده و البته اطلاعات روشن و مستندی هم از نرخ رایج مصرف کمپوست حاصل از پسماند شهری در اراضی کشاورزی توسط هیچ یک از دستگاه‌های ذیربط ارائه نگردیده است. به همین منظور بررسی نرخ مصرف کمپوست حاصل از زباله شهری در مناطق مختلف کشور، در بخشی از پروژه تحقیقاتی تعریف شده در موسسه تحقیقات خاک و آب، (تعیین خطرپذیری استفاده از کمپوست زباله شهری در کشاورزی ایران)، پیگیری شد (یگانه، ۱۴۰۳). با توجه به هدف این پروژه، در هر استان مزارع کشاورزی که برای چند سال (۳ تا ۵ سال) متوالی کمپوست زباله شهری دریافت کرده بودند، شناسایی شدند و اطلاعات مربوط به کاربرد کمپوست در هر یک از این مزارع، از طریق پرسش‌نامه‌ای از کشاورزان اخذ گردید. در مجموع ۵ استان، تعداد ۹۶ پرسشنامه تکمیل گردید. نمودار توزیع فراوانی نرخ مصرف کمپوست در مجموع استان‌های مورد بررسی در شکل ۱ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بیشترین فراوانی نرخ مصرف، مربوط به دامنه ۲۷/۵-۲۲/۵ تن در هکتار در سال می‌باشد.



شکل ۱- توزیع فراوانی نرخ مصرف کمپوست در استان‌های مورد بررسی

حدود مجاز آلودگی عناصر سنگین در خاک

حدود مجاز آلودگی عناصر سنگین در خاک کشورها متناسب با شرایط زمین شناسی، اقلیم، کاربری اراضی و مدیریت کشاورزی، معمولاً توسط سازمان‌های متولی محیط زیست تعیین می‌گردند. در واقع معنای حدود اعلامی این است که افزایش غلظت عناصر سنگین در خاک از این حدود، منجر به اعمال محدودیت‌های قانونی برای بهره‌برداری از خاک گردیده و عاملین این افزایش غلظت، مشمول مجازات‌های قانونی خواهند شد. بنابراین هر گونه بهره‌برداری از خاک و یا کاربرد هر ماده بیرونی مانند انواع کودها، مواد به‌ساز خاک، آفت‌کش‌ها، فاضلاب و غیره، حتی در زمان‌های طولانی نباید غلظت عناصر سنگین مورد نظر در خاک را از حدود تعیین شده مجاز آلودگی، بالاتر ببرد. در ایران حدود مجاز آلودگی خاک به عناصر سنگین برای کاربری‌های مختلف توسط سازمان حفاظت محیط زیست تعیین گردیده. در جدول ۸، مقادیر حدود مجاز برای تعدادی از عناصر در خاک کشاورزی ایران، در مقایسه با برخی کشورهای دیگر آورده شده است.

جدول ۸- مقدار استاندارد عناصر سنگین در خاک‌های کشاورزی ایران و سایر کشورها (Shahbazi, Marzi, & Rezaei, 2020)

منطقه	Zn	Pb	Ni	Cu	Cr	Co	Cd	As
mg/kg								
ایران*	۵۰۰	۷۵	۱۱۰	۲۰۰	۱۱۰	۵۰	۵	۴۰
چین	۲۰۰	۸۰	۶۰	۵۰	۲۵۰	-	۰/۳	۳۰
استرالیا	۲۰۰	۳۰	۶۰	۱۰۰	۵۰	-	۳	۲۰
آلمان	۶۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۵۰۰	-	۵	۵۰
کانادا	۵۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۵۰	-	۳	۲۰
WHO و FAO	۳۰۰	۱۰۰	۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۰	۳	۲۰
انگلستان	-	-	۲۳۰	-	-	-	۱/۸	۴۳
اتحادیه اروپا	۲۰۰	۶۰	۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۰	۱	-

* حد مجاز آلاینده‌ها در خاک‌های کشاورزی ایران در سال ۱۳۹۲، توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایران تعیین شده است.

وضعیت تجمع عناصر سنگین در خاک و محصولات پس از مصرف کمپوست

خلاصه ای از نتایج تعدادی از پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه تاثیر کاربرد کمپوست حاصل از پسماندهای شهری بر غلظت و قابلیت جذب عناصر سنگین در خاک و نیز مقادیر عناصر سنگین در گیاهان کشت شده تحت این شرایط، در کشورهای مختلف در جدول ۹ درج گردیده است. همانطور که دیده می‌شود نتایج این پژوهش‌ها تجمع عناصر سنگین در خاک و در بعضی موارد، افزایش جذب آنها در گیاهان کشت شده در این اراضی را نشان می‌دهد.

جدول ۹- نتایج کلی ارزیابی ریسک کاربرد کمپوست زباله شهری در خاک و گیاه (Cao, et al, 2023)

کشور	تأثیرات	عنصر سنگین	محیط کاربرد
تونس	غلظت عناصر سنگین در خاک سطحی افزایش یافت (بدون هیچ انتقال عمودی).	Cd, Pb, Zn, Cu	خاک
اسپانیا	اگرچه محتوای عناصر سنگین خاک افزایش یافت اما تأثیر ناچیزی بر دانه ذرت داشت.	Cd, Pb, Zn	خاک
ترکیه	با افزایش مقدار کاربرد کمپوست، مقدار عناصر سنگین افزایش یافت، به ویژه در خاک‌های قلیا.	Cu, Zn, Ni, Cr, Cd, Pb	خاک
ایتالیا	با کاربرد مقادیر بیشتر از کمپوست زباله شهری، رشد گیاهان بطور معنی داری محدود شد، همچنین این موضوع، جذب بیشتر یونهای Ni^{2+} ، Pb^{2+} ، Cu^{2+} و Zn^{2+} را در برگ‌های گندم باعث گردید.	Ni, Pb, Cu, Zn	خاک
ایتالیا	ابتدا عناصر سنگین در خاک سطحی تغلیظ شدند و به مرور زمان، شکل‌های آلی آنها افزایش یافت.	Cu, Zn, Pb	خاک
برزیل	با کاربرد کمپوست در خاک، غلظت همه فلزات از حد تجویز شده برای کمپوست فراتر رفت و در نتیجه کاهوی کشت شده با همان کمپوست، آلوده شد.	Cd, Pb	خاک
تونس	کاربرد مقادیر بیشتر کمپوست منجر به غلظت‌های بالاتر Cu ، Cd و Zn در بافت گیاهی شد بدون اینکه عملکرد گندم را متأثر نماید.	Cu, Cd, Zn	خاک
برزیل	در شهرهای بزرگتر که کمپوست زباله آنها غلظت بالاتری از عناصر سنگین داشت، مقادیر بالاتر pH و قابلیت استفاده عناصر سنگین دیده شد.	Zn, Cu, Pb, Ni	خاک
اسپانیا	افزایش معنی داری در غلظت جیوه در خاک (۷/۶ برابر بیشتر از شاهد) دیده شد.	Hg	خاک
ایتالیا	قابلیت دسترسی زیستی آرسنیک، در روده افزایش معنی داری داشت.	As	خاک
کانادا	با کاربرد سالانه کمپوست زباله شهری، غلظت عناصر بور، مس، مولیبدن و روی در خاک بطور معنی داری افزایش یافت.	B, Cu, Mo, Zn	خاک

در ایران بررسی تأثیر کاربرد متناوب کمپوست زباله شهری بر خصوصیات خاک و گیاه نشان داد کاربرد مداوم کمپوست زباله شهری باعث افزایش غلظت نیکل، کروم، کادمیم و سرب در خاک می‌شود، اگرچه همچنان غلظت این آلاینده‌ها در خاک کمپوست خورده کمتر از مقادیر حداکثر مجاز اعلام شده از طرف سازمان حفاظت محیط زیست برای خاک‌های کشاورزی بود. استفاده از کمپوست در مزارع سبزیکاری، باعث افزایش معنی دار هدایت الکتریکی و غلظت نیکل، کروم، سرب و کادمیم در خاک گردید. در یکی دیگر از مناطق، استفاده از کمپوست زباله شهری به مدت سه الی چهار سال، غلظت مس، روی، منگنز و آهن قابل جذب را در خاک افزایش داد و باعث افزایش معنی دار هدایت الکتریکی و غلظت آلاینده‌های نیکل، کروم، سرب و آرسنیک در خاک گردید. بررسی غلظت آلاینده‌های مورد بررسی در بخش خوراکی تعدادی از گیاهان کشت شده نیز نشان داد که استفاده از کمپوست در مناطق مختلف افزایش معنی دار غلظت سرب، کادمیم و کروم در دانه گندم، حبوبات، سبزیجات برگی، گوجه فرنگی و پیاز و غلظت آرسنیک در سبزیجات برگی شد (یگانه ۱۴۰۳). همچنین نتایج مدلسازی با استفاده از مدل HYDRUS1D نشان داد که با توجه به تفاوت مدیریت زراعی در مناطق مختلف، کیفیت متفاوت کمپوست‌ها و تنوع اقلیم، بین ۲۰ تا ۳۰ سال طول می‌کشد تا غلظت سرب در خاک‌های مناطق مختلف، به حد بحرانی ۷۵ میلی گرم بر کیلوگرم خاک برسند. این مدت در مورد کروم تا ۴۵ سال و در مورد نیکل تا ۵۰ سال برآورد می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده مداوم از کمپوست زباله شهری می‌تواند در طولانی مدت سلامت محیط زیست را (از طریق افزایش غلظت آلاینده‌ها فراتر از حدود مجاز) تهدید نماید. بیشترین میزان تهدید در این زمینه مربوط به عناصر سرب، کروم و نیکل است. همچنین می‌تواند از طریق ورود به زنجیره غذایی انسان تهدید کننده سلامت نیز باشد. در این بین بیشترین میزان ریسک تهدید سلامت در مورد سبزیجات و عناصر سرب، آرسنیک و کادمیم می‌باشد (یگانه، ۱۴۰۳).

روشهای برآورد حدود مجاز غلظت عناصر سنگین در کمپوست

بررسیها نشان داد دو روش کلی برای استخراج اعداد حدود مجاز آلاینده‌ها در کمپوست توسط کشورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی روشی است که بر مبنای ارزیابی ریسک استوار است و عمدتاً توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا مورد

استفاده قرار می‌گیرد. روش دوم بر مبنای بیلان عنصر آلاینده ورودی به محیط پذیرنده (خاک کشاورزی) است و از جمله کشورهایی که از این روش استفاده می‌نماید، سازمان حفاظت محیط زیست کانادا است.

روش اول- بر مبنای ارزیابی ریسک (مورد استفاده توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA)):

بدین منظور EPA، ۱۴ مسیر احتمالی تهدید سلامت انسان، گیاهان، حیوانات و ارگانیسم‌های زنده خاک ناشی از ورود آلاینده-های موجود در پسماندهای مورد نظر، به بدن این گروه‌های هدف را مورد بررسی قرار داده است (جدول ۱۰) و ارزیابی ریسک برای کاربرد(تخلیه) پسماند را در زمین‌های کشاورزی و غیرکشاورزی (جنگل، زمین‌های قابل احیا، مکان‌های عمومی تماس، صنعتی) بر مبنای آن انجام می‌دهد. مسیرهای تماس در جدول ۱۰، در نشان داده شده‌است.

حساس‌ترین موجود منفرد مورد تماس (Highly Exposed Individual) که EPA به عنوان ارگانیسم هدف برای حمایت استفاده کرده است بستگی به مسیر تماس دارد و HEI می‌تواند یک انسان، حیوان، گیاه و یا اجزای زیست‌محیطی مثل آب سطحی یا زیرزمینی باشد. HEI، موجودی است که برای مدت طولانی در یا نزدیکی مکانی که حداکثر تماس رخ می‌دهد باقی می‌ماند.

جدول ۱۰- خلاصه مسیرهای مواجهه مورد بررسی در ارزیابی ریسک استفاده از پسماندها در زمین

توصیف ^۱ HEI	مسیر
انسان (بجز باغدار یا کشاورز) مصرف کننده از گیاه رشد یافته در خاک‌های حاوی پسماند است.	۱-بار آلودگی ← خاک ← گیاه ← انسان
انسان (باغدار یا کشاورز) مصرف کننده از گیاه رشد یافته در خاک‌های حاوی پسماند است.	۲-بار آلودگی ← خاک ← گیاه ← انسان
کودک بلع کننده پسماند است	۳-بار آلودگی ← انسان (کودک)
کسی که از محصولات حیواناتی که از گیاهان رشد یافته در خاک‌های تیمار شده با پسماند تغذیه می‌کند، استفاده می‌کند	۴-بار آلودگی ← خاک ← گیاه ← حیوان ← انسان
انسان‌های مصرف کننده از غذاهای حیوانی (حیواناتی که مستقیماً از پسماند تغذیه می‌کنند)	۵-بار آلودگی ← خاک ← حیوان ← انسان
حیوان اهلی مصرف کننده گیاهان رشد یافته در زمین‌های دریافت کننده پسماند است	۶-بار آلودگی ← خاک ← گیاه ← حیوان
حیوان چراکننده بلع کننده پسماند است.	۷-بار آلودگی ← خاک ← حیوان
گیاهان رشد یافته در خاک‌های حاوی پسماند است	۸-بار آلودگی ← خاک ← گیاه
موجودات زنده خاکزی که از پسماند ترکیب خاک و پسماند تغذیه می‌کنند.	۹-بار آلودگی ← خاک ← موجودات زنده خاکزی
شکارچی موجودات زنده خاکزی که از خاک تیمار شده با پسماند تغذیه کرده‌اند.	۱۰-بار آلودگی ← خاک ← موجودات زنده خاکزی ← شکارچی موجودات خاکزی
انسانی است که ذرات گرد و غبار (برخاسته از زمین‌های کمپوست خورده) را تنفس می‌کند.	۱۱-بار آلودگی ← خاک ← گرد و غبار ← انسان
شخصی که از آب سطحی و ماهی موجود در آب سطحی (آلوده به پسماند) تغذیه می‌کند.	۱۲-بار آلودگی ← خاک ← آب سطحی ← انسان
انسانی که از هوایی تنفس می‌کند که حاوی آلاینده‌های موجود در پسماند است (به شکل بخار)	۱۳-بار آلودگی ← خاک ← هوا ← انسان
انسانی که از آب آلوده شده چاه با آلاینده‌های آبشویی شده از خاک حاوی پسماند به آب زیر زمینی تغذیه می‌کند.	۱۴-بار آلودگی ← خاک ← آب زیرزمینی ← انسان

^۱ Highly Expected Individual

در این روش، هر یک از این مسیرهای مواجهه (جدول ۱۰)، برای هر یک از آلاینده‌های مورد بررسی، با استفاده از الگوریتم‌های ریاضی به صورت کمی مدل‌سازی می‌شوند. برای انجام این محاسبات، پارامترهای پیچیده و متعددی مورد نیاز است. به عنوان مثال، در مسیر ۲، گروه‌های غذایی که باید در نظر گرفته شوند عبارتند از: سیب زمینی، سبزیجات برگی، سبزیجات ریشه‌ای، میوه‌های باغی، غلات. پارامترهای ورودی که لازم است برای هر یک از آلاینده‌ها و هر یک از گروه‌های غذایی به دقت استخراج و یا حسب مورد محاسبه گردد، به شرح زیر می‌باشد:

شیب جذب آلاینده در بافت گیاهی برای هر یک از گروه غذایی (میکروگرم آلاینده در گرم بافت گیاهی وزن خشک) (کیلوگرم آلاینده بر اساس وزن خشک در هکتار) - ۱، نرخ مصرف روزانه هر یک از گروه‌های غذایی (گرم رژیم غذایی بر اساس وزن خشک بر روز)، بخشی از هریک از گروه‌های غذایی مورد بررسی تولید شده در خاک‌های تیمار شده با پسماندهای آلی (بدون واحد)، مقدار مرجع هر آلاینده (رفرنس دوز) (میلی گرم بر کیلوگرم در روز)، وزن بدن انسان (کیلوگرم)، ضریب اثر نسبی مسیر خوردن (بدون واحد)، کل مصرف زمینه آلاینده از سایر منابع مواجهه (میلی گرم آلاینده بر روز).
خروجی الگوریتم‌ها، حد آلاینده - ارزیابی ریسک (Risk Assessment Pollutant Limit)، نامیده می‌شود که برای مسیرهای مختلف مواجهه واحد یکسانی ندارد. حد محاسبه شده برای مسیرهای ۱، ۲، ۴، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نرخ تخلیه آلاینده

^۱ بر حسب کیلوگرم آلاینده در هکتار (Pollutant Loading Rate, PLR) است که بار مجاز تخلیه نیز نامیده می‌شود. خروجی الگوریتم محاسباتی ارزیابی خطر در مسیرهای مواجهه ۳، ۵ و ۷، غلظت آلاینده است (میلی گرم آلاینده در کیلوگرم پسماند). زیرا مسیر مواجهه در این موارد بلغ مستقیم پسماند است.
الگوریتم‌ها برای تک تک مسیرهای ذکر شده در جدول ۱۰، و برای هر یک از آلاینده‌ها محاسبه می‌گردد. محدود کننده - ترین مسیر (که برای عناصر مختلف متفاوت است) به عنوان مبنای محاسبه استاندارد انتخاب می‌شود (USEPA, 1995). سپس، بار مجاز تخلیه، با استفاده از فرمول زیر به بیشینه مجاز غلظت آلاینده (میلی گرم آلاینده در کیلوگرم کمپوست) تبدیل می‌گردد:

$$\text{بار مجاز تخلیه} = \frac{\text{بیشینه مجاز غلظت آلاینده}}{0.001 \times \text{سایت لایف} \times \text{نرخ کاربرد کمپوست}}$$

بار مجاز تخلیه بر حسب کیلوگرم آلاینده بر هکتار، نرخ کاربرد کمپوست بر حسب کیلوگرم بر هکتار بیان می‌شود. در این گونه محاسبات ارزیابی خطر، سایت لایف را ۱۰۰ سال در نظر می‌گیرند و ۰/۰۰۱ ضریب تبدیل می‌باشد (USEPA, 1995).

روش دوم - تعیین حدود مجاز بر اساس بیلان هر یک از عناصر آلاینده در خاک (مورد استفاده توسط سازمان حفاظت محیط زیست کانادا):

اساس تعیین حدود مجاز در اینجا پیشگیری از انباشت آلاینده‌ها در خاک در اثر استفاده مستمر از کمپوست در زمان طولانی است.

در این روش حد استاندارد بیشینه مجاز هر یک از عناصر آلاینده در خاک که برای کشور تعیین گردیده است، به عنوان سقف غلظت آلاینده پس از ۴۵ سال استفاده مداوم از کمپوست در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعد، با داشتن غلظت زمینه عنصر در خاک، اختلاف بین حد بیشینه مجاز در خاک و میانگین غلظت زمینه فعلی عنصر در خاک تعیین می‌شود. این مقدار در واقع حداکثر میزان مجاز ورود عنصر آلاینده در خاک در طول ۴۵ سال است. حال با داشتن نرخ کاربرد کمپوست بر حسب تن (وزن خشک) در هکتار در سال، تنها یک مجهول باقی می‌ماند و آن غلظت عنصر در وزن خشک کمپوست است که کاربرد آن با نرخ معین تعیین شده در طول ۴۵ سال، غلظت آن عنصر در خاک را به حداکثر غلظت مجاز آلاینده در خاک برساند (CCME, 2005).

^۱ - برای آلاینده‌های آلی غیر قابل تجزیه و آلاینده‌های غیر آلی موجود در پسماند کاربرد دارد.

لازم به ذکر است در کشور کانادا و بعضی کشورهای دیگر دو (یا حتی بعضاً سه) نوع کمپوست با درجات کیفی مختلف می-تواند مورد استفاده قرار گیرد؛ در این موارد با بهبود کیفیت کمپوست، محدودیت‌های نرخ مصرف و محل‌های مصرف کمتر می-شود. مثلاً بر اساس قوانین کانادا، آنچه در رابطه با حد بیشینه مجاز غلظت عناصر سنگین به روش بالا تعیین می‌شود، برای کمپوست درجه دو (B) است. در این کشور، کمپوست درجه یک (A) نیز تولید می‌شود که طبعاً حدود مجاز غلظت عناصر آلاینده در آن سخت‌گیرانه‌تر از کمپوست نوع B بوده، به عنوان کمپوست با کیفیت بسیار خوب شناخته می‌شود و می‌تواند بدون محدودیت در همه انواع کاربری و با هر نرخ مصرف، مورد استفاده قرار گیرد. برای تعیین حدود مجاز در این نوع کمپوست، دو عدد غلظت محاسبه و از بین اینها هر کدام بیشتر بود به عنوان حد بیشینه مجاز در نظر گرفته می‌شود.

الف- عدد غلظت بر مبنای تخریب خالص صفر «no net degradation»؛

در اینجا اصل بر این است که غلظت آلاینده در کمپوست نباید بیشتر از غلظت نرمال آن آلاینده در خاک (P.98 غلظت زمینه) باشد. بنابراین غلظت زمینه آلاینده‌ها در خاک‌های کشاورزی، به عنوان غلظت بیشینه مجاز کمپوست ورودی به خاک در نظر گرفته می‌شود.

ب- عدد غلظت بر مبنای بهترین فناوری قابل دسترس «best achievable technology»؛

در اینجا کمترین غلظت آلاینده در کمپوست که با بهترین فناوری‌ها پس از جداسازی زباله‌های شهری از مبدا حاصل گردیده، به عنوان غلظت بیشینه مجاز معرفی می‌شود.

به عنوان نمونه در تعیین حدود مجاز کمپوست درجه یک در کشور کانادا عدد حاصل از این دو روش الف و ب مقایسه و هر کدام بیشتر بود به عنوان حد مجاز آن آلاینده در کمپوست معرفی می‌شود. تعیین حدود مجاز با استفاده از این روش، کاملاً براساس سیاستگذاری است و اساس ارزیابی ریسک ندارد (CCME, 2005).

از آنجایی که در حال حاضر کمپوست زباله شهری ایران، بدون جداسازی از مبدا و با تکنولوژی معمول تولید می‌شود، بنابراین چنانچه بخواهیم از این روش برای تدوین استاندارد استفاده کنیم، ناگزیر به بسنده کردن به اعداد زمینه آلاینده‌ها در خاک هستیم که اعداد زمینه غلظت آلاینده‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

نتایج

با توجه به آنچه در قسمت‌های بالا شرح داده شد، برای تعیین استاندارد ملی حدود مجاز غلظت عناصر سنگین در کمپوست حاصل از پسماندهای شهری، قابل مصرف در اراضی کشاورزی، می‌توان یکی از دو راهبرد اساسی «پذیرش عینی حدود مجاز تعیین شده توسط سایر کشورها» و یا «تعیین حدود مجاز، متناسب با شرایط کشور و از طریق محاسبه با استفاده از اطلاعات موجود» را پیش گرفت. مرور مستندات نشان داد که مقادیر حدود مجاز تعیین شده برای کشورهای مختلف بسیار متفاوتند، از طرف دیگر تفاوت‌ها در ترکیب پسماند، شرایط جمع‌آوری و کیفیت کمپوست تولیدی، نوع و شرایط مصرف کمپوست، شرایط خاک و گیاه و نیز قوانین و مقررات مرتبط در کشورهای مختلف، اتخاذ راهبرد اول و پذیرش عینی حدود بیشینه مجازی که متناسب با شرایط کشور دیگری تعیین گردیده است را اساساً فاقد وجهت علمی می‌نماید. بنابراین معقول‌تر و بهتر این است که از راهبرد دوم پیروی نموده و حدود مجاز متناسب با شرایط کشور تعیین شود. این راهبرد خود می‌تواند به دو روش انجام پذیرد، در روش اول حدود مجاز با توجه به ریسک تعیین می‌شود مانند آنچه در ایالات متحده و توسط EPA انجام پذیرفته است. همانطور که نشان داده شد، برای محاسبه حدود مجاز به این روش به بانک اطلاعات گسترده‌ای نیاز است که بسیاری از آنها برای شرایط کشور ما تعیین نگردیده و استفاده از داده‌های خام تعیین شده برای کشور آمریکا نیز می‌تواند منجر به نتایج نامناسب گردد. از جمله این پارامترها می‌توان به شیب جذب آلاینده در بافت گیاهی، کل مصرف زمینه آلاینده از همه منابع دیگر مورد تماس و مقدار خاک بلع شده اشاره نمود. نکته قابل توجه دیگر در رابطه با روش ریسک مبنا که فقط در کشور آمریکا مورد استفاده قرار گرفته، قوانین و مقررات متفاوت این کشور در پایش و نحوه برخورد با آلاینده‌ها و آلودگی‌های محیط زیستی از جمله پشتوانه قانونی قوی، نهاد قدرتمند دولتی EPA است.

در روش دوم، همانطور که نشان داده شد محاسبه حدود مجاز غلظت عناصر آلاینده بر مبنای بیلان عنصر در خاک انجام می‌پذیرد. شواهد نشان می‌دهد این روش از منطق قابل قبولی برخوردار بوده و با توجه به قوانین و مقررات حاکم بر کشور ما، قابلیت اجرایی بیشتری دارد. خوشبختانه در شرایط ایران با مجموعه پژوهش‌های انجام شده، غلظت زمینه عناصر سنگین در خاک مشخص گردیده، حدود آلاینده‌گی این عناصر در خاک نیز رسماً توسط سازمان حفاظت محیط زیست اعلام شده است. لذا با داشتن نرخ مصرف، حدود بیشینه مجاز بر اساس روش بیلان عناصر قابل تعیین خواهد بود.

محاسبه حدود مجاز غلظت عناصر آلاینده برای شرایط ایران به روش بیلان عناصر

نمونه محاسبه حدود مجاز براساس این روش برای عنصر سرب به شرح زیر است:

بار مجاز تخلیه = اختلاف حد استاندارد آلاینده در خاک با غلظت زمینه (BC)

بار مجاز تخلیه Pb در خاک: با توجه به اینکه غلظت زمینه سرب در خاک‌های ایران ۴۸ میلی گرم بر کیلوگرم (شه‌بازی و همکاران، ۱۴۰۱)، و استاندارد آن ۷۵ میلی گرم بر کیلو گرم (استاندارد معرفی شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایران) می باشد، بنابراین

$$(mg Pb/kg soil) = 75 - 48 = 28$$

خواهد شد

$$28 \frac{mg Pb}{kg Soil} = 70 \frac{kg Pb}{ha}$$

محاسبه استاندارد Pb در کمپوست:

$$\text{عدد استاندارد} = \frac{\text{بار مجاز تخلیه}}{0.001 \times \text{سایت لایف} \times \text{نرخ کاربرد کمپوست}}$$

نرخ کاربرد کمپوست: با توجه به بررسی‌های انجام شده (در قسمت مواد و روش‌ها توضیح داده شد)، نرخ کاربرد معادل ۲۵ تن در هکتار در سال در نظر گرفته شده است.

$$\text{استاندارد Pb} = \frac{70}{0.001 \times 25 \times 45} = 62 \frac{mg Pb}{kg compost}$$

باید توجه نمود که واحد عدد ۶۲ به دست آمده از این محاسبات بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم کمپوست مرطوب می‌باشد. با توجه به درصد رطوبت معمول و حدود استاندارد درصد رطوبت، با اعمال ۳۵ درصد رطوبت وزنی، عدد حد مجاز بر حسب وزن خشک کمپوست معادل ۹۵/۳۸ میلی گرم بر کیلوگرم، به دست می‌آید.

نکته مهم اینکه طبعاً چون این حدود مجاز برای کمپوست استاندارد، با داده های ورودی بالا محاسبه گردیده، مصرف کمپوست استاندارد تولیدی نیز باید تابع شرایط و داده های محاسبه شده باشد. این بدین معنی است که محل مصرف این کمپوست در اراضی کشاورزی پیش بینی شده و نرخ مصرف سالانه این کمپوست استاندارد، نباید بیشتر از ۲۵ تن در هکتار در سال باشد. حال اگر سیاست کشور بر معرفی کمپوست استاندارد برای هر نوع کاربری (مثلاً بستر کشت) و بدون محدودیت نرخ کاربرد باشد، باید مشابه برخی کشورهای پیشرفته که در بالا توضیح داده شد، نسبت به تعیین حدود مجاز غلظت عناصر آلاینده در کمپوست کلاس A اقدام نمود. با توجه به نبود سیستم تفکیک پسماندهای شهری از مبدأ در شرایط فعلی، بهترین راه برای تعیین حدود مجاز عناصر آلاینده در کمپوست نوع A، استفاده از روش «تخریب خالص صفر» است. در این روش همان طور که پیشتر توضیح داده شد، غلظت زمینه عنصر آلاینده در خاک، مبنا قرار گرفته و حدود مجاز غلظت آلاینده‌ها معادل غلظت زمینه تعیین می‌شود.

همانند نمونه محاسبه بالا و براساس داده‌های غلظت زمینه آلاینده‌ها در خاک‌های ایران (جدول ۳)، اعداد محاسبه شده به این روش برای کمپوست نوع A و نوع B برای شرایط ایران به شرح جدول ۱۱ می‌باشد.

^۱Background concentration

جدول ۱۱- اعداد حدود مجاز غلظت عناصر سنگین محاسبه شده برای شرایط ایران به روش بیلان عناصر

عنصر	غلظت زمینه (mg/kg)	حد مجاز کمپوست نوع A (mg/kg)	بار مجاز تخلیه تجمعی (کیلوگرم آلاینده بر هکتار)	حد مجاز کمپوست نوع B (mg/kg)
آرسنیک	۲۲	۲۲	۴۵	۵۰
کادمیم	۰/۴۴	۰/۴۴	۱۱	۱۲
کبالت	۲۶	۲۶	۶۰	۶۴
کروم	۱۴۰	۱۴۰	×	قابل محاسبه نیست**
مس	۴۴	۴۴	۳۹۰	۴۱۶
سرب	۴۷	۴۷	۷۰	۹۶
جیوه	-	-	-	-
موئیدین	-	-	-	-
نیکل	۱۱۷	۱۱۷	×	قابل محاسبه نیست**
سلنیوم	-	-	-	-
روی	۳۱	۱۳۱	۹۲۲	۹۸۴

* با احتساب ۳۵ درصد رطوبت وزنی

** با این روش، امکان تعیین حدود مجاز برای کروم و نیکل وجود ندارد، زیرا داده ها نشان می دهد غلظت زمینه این عناصر در خاک، از استاندارد آن ها بالاتر است.

نتیجه گیری

بررسی ها نشان می دهد تعیین حدود مجاز در استاندارد ملی کمپوست قابل مصرف در اراضی کشاورزی بخشی از نظام مدیریت جامع پسماندهای شهری از تولید تا مصرف و پایش تبعات مصرف است. برای کاهش خطر بروز آلودگی های محیط زیستی یا آلودگی محصولات و تضمین سلامت گیاهان، حیوانات و انسان، ضروری است در کنار سند استاندارد به سایر اجزاء مدیریت پسماند توجه شود. مرور منابع نشان می دهد مناسبترین روش تعیین حدود بیشینه غلظت مجاز عناصر سنگین در کمپوست های تولیدی کشور بر مبنای بیلان این عناصر در خاک کشاورزی است. البته به موازات مسئولیت تولید کنندگان و عرضه کنندگان کمپوست، واحدهای مصرف کننده نیز باید ملزم شوند تا حداکثر نرخ مصرف تعیین شده را رعایت نمایند. شواهد بین المللی نشان داده است که در مسیر بهبود مدیریت جامع پسماندهای شهری، اصلاح مدیریت جمع آوری پسماندها با جدا سازی از مبدأ و ارتقاء کیفیت تولید در کارخانه ها منجر به کاهش قابل توجه غلظت عناصر سنگین در کمپوست های تولیدی حتی کمتر از حدود تعیین شده در استاندارد ملی خواهد شد. بهبود کیفیت کمپوست های تولیدی به تبع به افزایش نرخ مصرف و گسترده تر کردن انواع مصارف بدون خطر آلودگی، کمک خواهد نمود. در کنار این موارد افزایش آگاهی و دانش مصرف کنندگان نیز برای دستیابی به سلامت جامع بسیار مفید و موثر است. طبعاً دقت در تعیین داده های خام ورودی این روش محاسبه نیز بسیار حائز اهمیت بوده و مستقیماً حد مجاز را تحت تأثیر قرار خواهند داد. لذا ضروری است مراجع ملی، موسسات پژوهشی و دانشگاه ها در تدقیق این داده ها بیش از پیش بکوشند.

نکته مهم دیگری که باید در نظر داشت این است که در درصد قابل توجهی از خاکهای کشور، غلظت طبیعی دوعنصر نیکل و کروم بیش از حدود استاندارد تعیین شده برای خاکهای ایران می باشد. در این رابطه بررسی های بیشتر و در صورت تشخیص، بازنگری استانداردها ضروری است. در صورتی که این استاندارد پابرجا باشد بایستی حتماً کاربرد کمپوست در خاکهایی که مقدار کروم و نیکل آنها از این مقدار بیشتر است ممنوع گردد.

به موازات این موضوع البته بایستی با انجام بررسی های دقیق علمی و دستیابی به مستندات بیشتر، راهکارهای کاهش غلظت عناصر سنگین در این پسماندها عملیاتی و فراگیر شود، حدود مجاز مرتباً با توجه به مستندات بهبود داده شود، نرخ مصرف و شرایط مصرف در کشور قانون مندتر گردد تا کشور بتواند با حفظ ایمنی از خطرات عناصر آلاینده، از مزایای استفاده از کمپوست در اراضی کشاورزی به ویژه ارتقاء محتوای مواد آلی خاک برخوردار شود.

منابع:

- ۱- بی نام، ۱۳۹۲. استاندارد آلودگی منابع خاک و راهنمای آن، سازمان حفاظت محیط زیست.
 - ۲- شهبازی، کریم، فتحی گردلیدانی، ارژنگ و مارزی، مصطفی. ۱۴۰۱. بررسی وضعیت عناصر سنگین در خاکهای ایران: مروری جامع و انتقادی بر مطالعات گزارش شده. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۳۳(۲): ۱۱۱۳-۱۱۱۳.
 - ۳- یگانه، مژگان. ۱۴۰۳. تعیین خطرپذیری استفاده از کمپوست زباله شهری در کشاورزی ایران. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی. شماره فروست: ۶۵۵۳۷. موسسه تحقیقات خاک و آب- کرج- ایران.
- Anonymous, 2012. Soil Pollution Sources Standard and Its Guidelines, Department of Environmental Protection (In Persian).
- Evanylo, G., 2020. Compost standards and quality, available at: https://www.clemson.edu/extension/camm/manuals/proceedings/camm_2020/07_compost_quality_and_standards_camm_jan_2020.pdf.
- Siebert, S., and Thelen Jüngling, M. 2020. The Environmental Partnership, Annual report 2020/21. available at: https://www.kompost.de/uploads/media/Compost_Course_gesamt_01.pdf
- Akinci, G., M. Bilgin, D. Guven and E. Erdin. (2008). Managing Organic Waste in Turkey: The Relation Among the Characterization, Properties and Results. *ORBIT*, 13 - 15th of Oct. , Wageningen, The Netherlands.
- AORA. (2020). Australian Organics Recycling Association (AORA) Hove, SA 5048-INTERNATIONAL COMPARISON OF THE AUSTRALIAN STANDARD FOR COMPOSTS, SOIL CONDITIONERS AND MULCHES (AS4454 – 2012).
- Biala, J., & Wilkinson, K. (2020). International Comparison of the Australian Standard for Composts, Soil Conditioners and Mulches (as4454-2012): Australian Organics Recycling Association: Hove, Australia.
- BioAbfV. (2023). Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf Böden, (Bioabfallverordnung - BioAbfV). *Ausfertigungsdatum: 21.09.1998, Neugefasst durch Bek. v. 4.4.2013 I 658; zuletzt geändert durch Art. 1 V v. 28.4.2022 I 700; 2023 I Nr. 153.*
- Brinton, W. F. (2000). Compost quality standards and guidelines: an international view. *Woods End Research Laboratory Inc., ME*, 10, 42.
- Cao, X., Williams, P. N., Zhan, Y., Coughlin, S. A., McGrath, J. W., Chin, J. P., & Xu, Y. (2023). Municipal solid waste compost: Global trends and biogeochemical cycling. *Soil & Environmental Health*, 1(4), 100038.
- CCME. (2005). Canadian Council of Ministers of the Environment- Guidelines for Compost Quality.
- Ding, F., He, Z., Liu, S., Zhang, S., Zhao, F., Li, Q., & Stoffella, P. J. (2017). Heavy metals in composts of China: historical changes, regional variation, and potential impact on soil quality. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 3194-3209.
- Rules, M. (2000). Municipal solid waste (management and handling) rules, 2000. *New Delhi: Government of India*.
- Rynk, R., Black, G., Gilbert, J., Biala, J., Bonhotal, J., Schwarz, M., & Cooperband, L. (2021). *The composting handbook: a how-to and why manual for farm, municipal, institutional and commercial composters*: Academic Press.
- Seilsepour, M. (2021). Municipal waste compost, application and challenges. *Technical publication, no: 609, Ministry of Agriculture- Jihad, Agricultural Research, Education and Extension, Soil and Water Research Institute*.
- Shahbazi, K., Marzi, M., & Rezaei, H. (2020). Heavy metal concentration in the agricultural soils under the different climatic regions: a case study of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 79(13), 324.

Shahbazi, K., Fathi-Gerdelidani, A., & Marzi, M. (2022) Investigation of the status of heavy metals in soils of Iran: A comprehensive and critical review of reported studies. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (5), 1163- 1210 (In Persian).

USEPA. (1995). A guide to the biosolid risk assessments for the EPA part 503 rule.

Yeganeh, M. 2024. Assessing the Risk Arising From Municipal Solid Waste Compost Application in Agriculture of Iran. Final Report of Research Project. Series Number: 65537. Soil and Water Research Institute - Karaj - Iran (In Persian).

Yeganeh, M., Bazargan, K., Shahbazi, K., Hamed, F., Keshavarz, P., Bybordi, A., . . . Hasheminasab, K. (2025). Monitoring the quality of municipal solid waste compost produced in Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(2), 293-307.

پایان کارشناسی ارشد