جمهوری اسلامی ایران

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
موسسه تحقیقات خاک و آب کشور

تعیین بیشینه مجاز غلظت عناصر سنگین در کمپوست حاصل از پسماند شهری در ایران

نگارندگان

مژگان یگانه، کامبیز بازرگان، کریم شهبازی

اعضای هیات علمی موسسه تحقیقات خاک و آب کشور

نشریه فنی: 670

1404

مشخصات اثر

عنوان: تعیین بیشینه مجاز غلظت عناصر سنگین در کمپوست حاصل از پسماند شهری در ایران

نگارندگان: مژگان یگانه، کامبیز بازرگان، کریم شهبازی

ناشر: موسسه تحقیقات خاک و آب کشور

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: انتشارات اسرار علم

کارشناس انتشارات: سمانه پورمنصور

ویراستار: آرش تافته

طراح جلد: سید هادی میرغیاثی

سال انتشار: 1404

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

این نشریه با شماره 68935 در تاریخ 1404/12/2 در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است.

نقل مطالب با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: کرج، میدان استاندارد، جاده مشکین‌دشت، بلوار امام خمینی (ره)، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور

کد پستی: 3177993545 **صندوق پستی:** 311-31785

نمابر : 02636210121 **تلفن:** 026 -36201900

وب‌سایت: http://www.swri.ir **پست الکترونیکی:** info.swri@areeo.ac.ir

مسئولیت صحت مطالب به عهده نگارندگان است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده 1
مقدمه 3
1- مروری بر مقادیر حداکثر مجاز عناصر سنگین در کمپوست برای کاربرد کشاورزی درکشورهای مختلف 4
2- وضعیت خاک کشور از نظر غلظت زمینه هر یک از عناصر سنگین 7
3- کیفیت کمپوست‌های زباله شهری تولیدی کشور 7
4- محل مصرف کمپوست زباله شهری 17
5- نرخ مصرف کمپوست زباله شهری 21
6- حدود مجاز آلودگی عناصر سنگین در خاک 22
7- وضعیت تجمع عناصرسنگین در خاک و محصولات پس از مصرف 23
8- راهکارهای تعیین استاندارد 27
9- نتیجه‌گیری 32
10- منابع 35

چکیده

با افزایش جمعیت، رشد شهرنشینی و تغییراتی که در سبک زندگی مردم ایجاد شده، تولید زباله به یک معضل جهانی تبدیل شده است. کشورهای مختلف برای مدیریت زباله‌های شهری خود، راهکارهای متنوعی دارند که شامل دفن، بازیافت، سوزاندن و کمپوست‌سازی است. پس از جنگ جهانی دوم، توجه به کیفیت کمپوست زباله‌های شهری در کشورهای پیشرفته اهمیت بیشتری پیدا کرد و اکنون حدود 1 تا 25 درصد از زباله‌ها به این روش (تبدیل به کمپوست) مدیریت می‌شود. در ایران، از دهه 80 موضوع کمپوست به‌تدریج موردتوجه قرار گرفت و اولین استاندارد ملی کمپوست در سال 1386 تهیه و منتشر شد. اما از اواسط دهه 90 نگرانی‌هایی در مورد کیفیت کمپوست و خطر تجمع فلزات سنگین به وجود آمد و این امر ضرورت بازنگری استانداردها را به همراه داشت. به همین دلیل، مؤسسه تحقیقات خاک و آب به بررسی خطرات استفاده از کمپوست در کشاورزی و اثرات آن بر زمین‌های زراعی پرداخت. نشریه حاضر نتیجه تحقیقات انجام شده را در زمینه تعیین حدود مجاز آلاینده‌ها در کمپوست زباله شهری ارائه می‌دهد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که برای تنظیم استانداردهای ملی، دو رویکرد اصلی وجود دارد: یکی پذیرش حدود مجاز تعیین‌شده توسط دیگر کشورها و دیگری تعیین حدودی متناسب با شرایط خاص ایران. باتوجه‌به اینکه اکثر کشورها دارای حدود مجاز متفاوتی هستند، پذیرش عینی این حدود از نظر علمی معتبر نیست. همچنین به دلیل تفاوت کیفیت تولید کمپوست، رویکرد اول توصیه نمی‌شود و بهتر است که حدود مجاز بر اساس شرایط کشور تعیین گردد. در ایران، باتوجه‌به داده‌های موجود، می‌توان این حدود را بر اساس روش کشور کانادا محاسبه کرد. همچنین مشخص شده که حدود مجاز در ایالات متحده به طور قابل‌توجهی بالاتر از استانداردهای اتحادیه اروپا است که ممکن است به دلیل قوانین و کنترل‌های سخت‌گیرانه‌تر در حفاظت از محیط‌زیست و ماهیت متفاوت خاک‌ها، باشد؛ بنابراین، روش سازمان حفاظت محیط‌زیست کانادا برای کمپوست نوع B (کمپوست با محدودیت در نرخ استفاده)، به‌عنوان یک مبنای علمی معتبر، به نظر می‌رسد که برای ایران مناسب باشد. در این روش، حد استاندارد هر عنصر آلاینده به‌عنوان سقف غلظت پس از 45 سال استفاده مداوم از کمپوست تعیین می‌شود. با محاسبه اختلاف بین حد مجاز غلظت آلاینده در خاک و غلظت زمینه‌ای آن عنصر در خاک، حداکثر میزان مجاز ورود آلاینده مشخص می‌گردد. سپس، با درنظرگرفتن نرخ کاربرد کمپوست (برای ایران بر اساس بررسی‌های انجام شده قبلی، 25 تن در هکتار در سال در نظر گرفته شد)، حد مجاز غلظت آلاینده در کمپوست

محاسبه می‌شود. در نهایت، با توجه به مطالب ذکر شده، و با در نظر گرفتن غلظت زمینه آلاینده‌ها در خاک‌های ایران، حدود مجاز آلاینده‌ها در خاک های ایران، و نرخ مصرف کمپوست در زمین‌های کشاورزی ایران حدود مجاز آرسنیک، کادمیم، کروم، سرب، نیکل، کبالت، مس، روی، مولیبدن و جیوه به ترتیب 5، 10، 150، 100، 120، 25، 650، 1300، 5 و 5 میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک به عنوان بیشینه رواداری این آلاینده‌ها در کمپوست زباله شهری جهت استفاده در زمین‌های کشاورزی ایران، پیشنهاد می‌گردد.

کلمات کلیدی: فلزات سنگین، استاندارد ملی، کمپوست زباله شهری، بیشینه رواداری

مقدمه

افزایش جمعیت، افزایش شهرنشینی، تغییر سبک زندگی و افزایش تولید زباله، امروزه به معضلی جهانی تبدیل شده است. کشورهای مختلف باتوجه‌به عوامل متعددی مانند ترکیب و سهم اجزاء زباله شهری، شرایط اقتصادی - اجتماعی و زیست‌محیطی، 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 کمپوست‌سازی بعد از جنگ جهانی دوم، به‌تدریج 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 25 درصد از زباله تولیدی شهرها را به روش کمپوست‌سازی مدیریت می‌نمایند. با پیشرفت فناوری، کیفیت کمپوست‌های حاصل از پسماند زباله شهری مرتباً ارتقایافته و در این مسیر فرایند جداسازی انواع زباله از مبدأ کمک شایانی به ارتقای کیفیت کمپوست حاصله در این کشورها نموده است.

در ایران موضوع کمپوست حاصل از زباله شهری و تسهیل مصرف آن در اراضی به‌ویژه در اراضی کشاورزی از دهه 80 مورد توجه قرارگرفته است. به تبع کشورهای دیگر، اولین استاندارد ملی کمپوست زباله شهری برای کاربرد در اراضی کشاورزی، در ایران در سال 1386 تدوین و به شماره 10716 منتشر گردیده است اما از اواسط دهه 90 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 هم زمان 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، و باتوجه‌به اهمیت موضوع، مؤسسه تحقیقات خاک و آب مأموریت یافت تا نسبت به بررسی موضوع اقدام نماید و مقرر گردید استاندارد ملی کمپوست بر مبنای این بررسی‌ها بازنگری شود. در همین راستا دو پروژه بزرگ و بلندمدت با عناوین " تعیین خطرپذیری استفاده از کمپوست زباله شهری در کشاورزی ایران" و "بررسی اثرات باقی‌مانده و تجمعی استفاده طولانی‌مدت از کمپوست زباله شهری در زمین‌های کشاورزی" در مؤسسه تحقیقات خاک و آب کلید خورد.

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

تولید کمپوست از بخش تجزیه‌پذیر زباله یکی از راه‌های مدیریت زباله است. اما معرفی کمپوست به‌عنوان 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 فرایند پوسیدگی به ترکیبات آلی پایدار تبدیل شده است. این ترکیبات می‌توانند در افزایش محتوای مواد آلی خاک مفید بوده و به‌تبع آن ظرفیت نگهداری آب در خاک و کارائی جذب عناصر غذائی خاک برای گیاهان را بهبود بخشند. اما این نوع کمپوست به دلیل مواد اولیه منشأ تولید، می توانند تهدیدی بر سلامت خاک بوده و محدودیت‌هایی برای خدمات زیست‌بوم خاک و از جمله رشد و تولید گیاهان ایجاد نمایند؛ لذا کشورهای مختلف تلاش نموده‌اند تا به‌موازات معرفی کمپوست حاصل از پسماندهای شهری، ضوابط و استانداردهایی برای ویژگی‌های کیفی کمپوست قابل کاربرد در اراضی کشاورزی تعیین نموده 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 محیط‌زیست و مصرف‌کنندگان محصولات کشاورزی از این طریق است.

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 1 ارائه گردیده است. همانطور که اعداد جدول نشان می‌دهد، حدود مجاز استاندارد در کشورهای مختلف، متفاوت بوده و بعنوان نمونه برای عنصر سرب در همین چند کشور از حداقل 70 میلی گرم در کیلوگرم تا حد اکثر 1000 میلی گرم در کیلوگرم متغیر است.

همان‌گونه که در جدول نشان‌داده‌شده، استاندارد آلاینده‌ها در کشورهای مختلف، متفاوت و دارای محدوده گسترده‌ای است و بسته به شرایط حاکم بر آن کشور و سایر قوانین و دستورالعمل‌ها تعیین می‌گردد. به‌عنوان‌مثال، در مورد سرب، بیشترین حد مربوط به قوانین کشور آمریکاست، مبنای محاسبات در این کشور ارزیابی ریسک است که در بخش 8 این گزارش به تفسیر در مورد آن صحبت شده‌است، این کشور با توجه به قوانین پایش مداوم خاک توانسته‌است این استاندارد را برای کاربرد کمپوست زباله شهری و لجن فاضلاب در زمین‌های کشاورزی استفاده کند. نکته حائز اهمیت این است که بعضی از این کشورها دارای شرایط اقلیمی و احتمالا کیفیت خاک مشابه، شرایط کشاورزی مشابه و شرایط اقتصادی و اجتماعی مشابه یکدیگر هستند. این بدین معنی است که حتی در

کشورهایی که شرایط کاملا مشابه دارند، این مقادیر متفاوت بوده و کشورها بر اساس مبانی، مستندات و شرایط کشور خود حدود مجاز را تعیین می‌نمایند.

بررسی مستندات و سوابق نشان می‌دهد که تعیین حدود بیشینه مجاز غلظت عناصر سنگین در کمپوست در استاندارد ملی تابع عوامل متعددی است که برخی از آنها عبارت‌اند از:

1- وضعیت خاک کشور از نظر غلظت زمینه هر یک از عناصر سنگین
2- کیفیت کمپوست تولیدی در آن کشور
3- محل مصرف (مزارع، باغات، پارک‌ها، گلخانه‌ها و ...)
4- نرخ مصرف،
5- حدود مجاز آلودگی عناصر سنگین در خاک
6- وضعیت تجمع عناصر سنگین در خاک و محصولات در اثر کاربرد کمپوست.

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.

جدول 1- مقایسه حدود بیشینه مجاز عناصر سنگین در استاندارد کمپوست قابل مصرف تعدادی از کشورها

عناصر سنگین	استاندارد کیفیت کشورها (mg/kg)								
	استرالیا[1]	اروپا[1] (برنامه تضمین کیفیت)	اتریش[1] (قانون کمپوست)	ایتالیا[1] CIC	انگلستان[1] PAS 100	آمریکا[1] EPA Part 503	کانادا[1]	آلمان[2]	هند[3]	ترکیه[4]
کادمیم	3	1/3	3/0 (B) 1/0 (A) 0/7 (A^+)	1/5	1/5	39	20 (B) 3 (A)	3	5	3
کروم(کل)	100	60	250 (B) 70 (A) 70 (A^+)	0/5 (Cr VI)	100		1060 (B) 210 (A)	150	50	350
مس	100 (150)	110 (300)	500 (B) 150 (A) 70 (A^+)	230	200	1500	750 (B) 400 (A)	150		
سرب	150	130	200 (B) 120 (A) 45 (A^+)	140	200	300	500 (B) 150 (A)	150	100	150
جیوه	1	0/45	3/0 (B) 0/7 (A) 0/4 (A^+)	1/5	1	17	5 (B) 0/8 (A)	3		
نیکل	60	40	100 (B) 60 (A) 25 (A^+)	100	50	420	180 (B) 62 (A)	50	50	120
روی	200 (300)	400 (600)	1800 (B) 500 (A) 200 (A^+)	500	400	2800	1850 (B) 700 (A)	500		

1-Biala, 2020 2- Brinton, 2000 3- Municipal Solid Wastes… Rules, 2000 4- Akinchi, et al., 2008

2- وضعیت خاک‌های کشور از نظر غلظت زمینه هریک از عناصر سنگین

در ایران پژوهش‌های متعددی در زمینه وضعیت عناصر سنگین در خاک‌های مناطق مختلف کشور انجام‌گرفته است که بررسی و تحلیل همه آنها در محدوده این گزارش نمی‌گنجد. شهبازی و همکاران، در سال 1401 ، مقاله مروری را در این رابطه منتشر کردند. در این مقاله با بررسی علمی و نقادانه همه پژوهش‌های قبلی و با استفاده از روش‌های مرسوم تعیین غلظت زمینه، مقادیری بعنوان غلظت زمینه عناصر آلاینده در خاک‌های کشاورزی کشور ارائه گردیده است. درجدول زیر مقادیر غلظت زمینه عناصر آلاینده در خاک‌های ایران در مقایسه با این مقادیر برای بعضی کشورهای دیگر و نیز میانگین جهانی آمده است.

جدول 2- غلظت زمینه عناصر سنگین در خاک‌های ایران (عمق 0 تا 30 سانتیمتر) و سایر کشورها (شهبازی و همکاران، 1401)

منطقه	Zn	Pb	Ni	Cu	Cr	Co	Cd	As
	mg/kg							
ایران	130/9	46/6	116/9	43/8	139/5	26/1	0/44	21/9
انگلستان	-	180	42	62	-	-	1	32
چین	74/2	26	26/9	22/6	61	-	0/097	11/2
استرالیا	55	14	21	24	44	14	0/1	3/4
جهان	70	27	29	38/9	59/5	11/3	0/41	6/83

به نظر می‌رسد در مقطع فعلی این مقادیر معتبرترین اعداد قابل‌استناد برای غلظت زمینه عناصر آلاینده در خاک‌های کشاورزی کشور است.

3- کیفیت کمپوست‌های زباله شهری تولیدی کشور

کیفیت کمپوست‌های تولیدی از زباله‌های شهری تولید شده در کشور، در پژوهشی تحت عنوان " تعیین خطرپذیری استفاده از کمپوست زباله شهری در کشاورزی ایران" در مؤسسه تحقیقات خاک و آب بررسی گردید. در این بررسی از کمپوست‌های تولید شده در مشهد، کرمانشاه، تهران (کهریزک)، تبریز، اصفهان (اصفهان، شاهین‌شهر، لنجان و نجف‌آباد) به‌صورت ماهیانه از زمستان 95 تا زمستان 97 نمونه‌برداری انجام و ویژگی‌های سرب کل، نیکل کل، کروم کل، کادمیم کل، آرسنیک کل،کبالت کل، درصد مواد خارجی، درصد رطوبت کل، هدایت الکتریکی و اسیدیته نمونه‌ها در آزمایشگاه ستاد مؤسسه

تحقیقات خاک و آب اندازه‌گیری شد. در هر استان مزارعی که به مدت 5-3 سال متوالی کمپوست دریافت نموده بودند و به طور متناظر در نزدیکی آنها مزارعی با شرایط مدیریتی مشابه و بدون دریافت کمپوست، به‌عنوان شاهد، انتخاب شدند. خصوصیات کیفی خاک (20-0 سانتیمتر سطحی خاک) و غلظت عناصر آلاینده در بخش خوراکی محصولات کشت شده در این مزارع اندازه‌گیری شد.

نتایج این بررسی (یگانه، 1403) 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 در استاندارد، در غلظت عناصر سنگین، عبارت بودند از: کادمیم: سایت با کد 1؛ کروم: سایت با کد 2؛ نیکل: سایت با کد 1؛ سرب: سایت با کد 7 و کد 8؛ کربن آلی: سایت با کد 1 و کد 9؛ مواد خارجی: سایت با کد 7، کد 8 و کد 3، اشاره نمود. نوسانات مربوط به محتوای رطوبت می‌تواند مربوط به زمان دپو شده کمپوست داشته باشد. نوسانات مشاهده شده در محتوای عناصر غذایی و فلزات سنگین کاملا به ترکیب زباله بستگی دارد و در این پژوهش همبستگی روشن و معنی‌داری بین فصل نمونه‌برداری و ترکیب کمپوست مشاهده نشد. این بررسی نشان داد هیچیک از کارخانه های تولید کمپوست مورد بررسی، در طول دوره بررسی، قادر به تولید پایدار کمپوست استاندارد نبوده اند (به منظور حفظ حقوق کارخانه های تولیدکننده، در ارائه نتایج سایت های تولید کمپوست با کد محرمانه مشخص شده اند).

جدول 3، برخی از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی کمپوست های مورد بررسی را نشان می دهد.

جدول 3- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کمپوست‌های مورد بررسی

متغیر	سایت	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	استاندارد ملی ایران	
						کمپوست درجه 1 (A)	کمپوست درجه2 (B)
pH (در محلول 10 درصد از ماده خشک)	1	7/18	7/65	7/38	0/16	6-8	6-8
	2	7/23	7/71	7/53	0/12		
	3	6/04	8/18	7/25	0/12		
	4	5/42	8/16	7/23	0/12		
	5	6/3	8/9	8/7	0/12		
	6	5/6	7/7	7/5	0/12		
	7	7	8/2	7/8	0/12		
	8	7/4	8	7/5	1/02		
	9	7/1	7/9	7/7	0/12		

ادامه جدول 3- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کمپوست‌های مورد بررسی

متغیر	سایت	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	استاندارد ملی ایران	
						کمپوست درجه 1 (A)	کمپوست درجه2 (B)
EC (dsm^{-1}) (در محلول 10 درصد از ماده خشک)	1	1/87	7/27	3/98	1/46	بیشینه 8	بیشینه 14
	2	3/17	11/8	6/06	1/8		
	3	5/2	7/34	4/95	1/8		
	4	4/02	7/27	5/53	1/8		
	5	4/60	7/81	5/74	1/8		
	6	4/46	8/01	5/75	1/8		
	7	4/6	7/75	5/7	1/25		
	8	4/36	7/39	5/6	1/37		
	9	4/51	8/36	5/25	1/8		
نسبت C:N	1	6/24	10/66	9/01	1/8	20-15 درصد	15-10 درصد
	2	1/08	21/17	10/55	1/02		
	3	11/5	12/4	11/4	1/5		
	4	10/75	15/7	13/18	1/4		
	5	16/7	9/75	14/9	1/1		
	6	18/3	11/6	14/2	1/3		
	7	13/2	12/2	10/8	3/4		
	8	12/7	14/5	15/2	4/2		
	9	7/4	7/02	7/64	1/65		
N % (بر اساس وزن خشک)	1	1/36	1/92	1/54	0/17	1/66-1/25درصد	1/5-1/0درصد
	2	1/92	2/42	2/21	1/3		
	3	1/40	2/40	1/87	1/3		
	4	2	2/22	2/11	1/3		
	5	1/1	2/8	1/5	1/3		
	6	1	1/93	1/5	1/3		
	7	1	1/8	1/6	0/3		
	8	1/1	1/74	1/3	0/1		
	9	0/89	1/31	1/05	1/00		

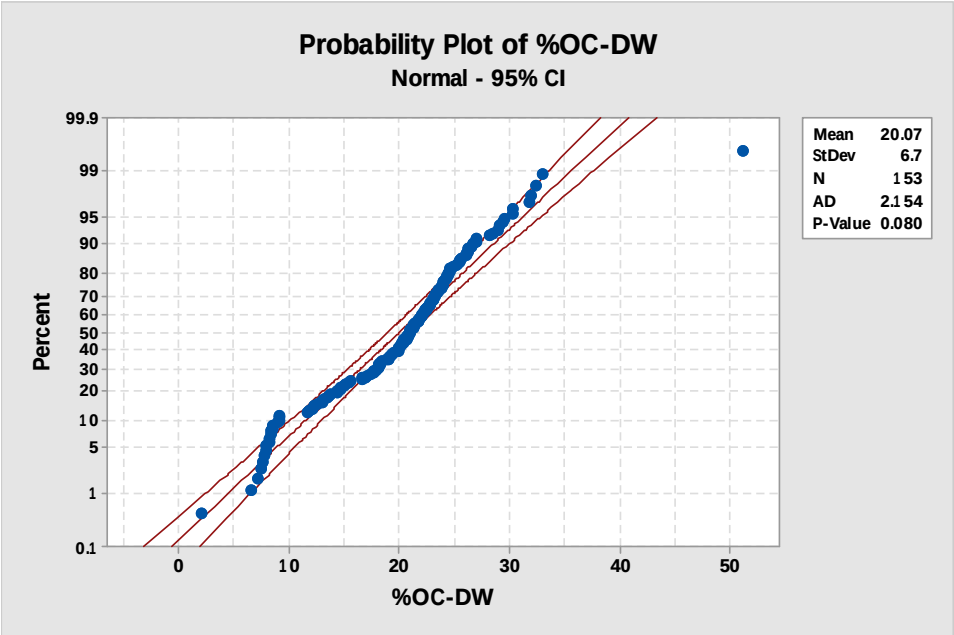
ادامه جدول 3- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کمپوست‌های مورد بررسی

متغیر	سایت	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	استاندارد ملی ایران	
						کمپوست درجه 1 (A)	کمپوست درجه2 (B)
P2O5 % (بر اساس وزن خشک)	1	1/14	1/36	1/54	0/09	1-3/8درصد	0/3-3/8درصد
	2	1/01	1/40	1/24	0/83		
	3	0/40	1/10	0/86	0/61		
	4	1/07	1/26	1/16	0/83		
	5	0/37	1/2	1	0/83		
	6	0/8	1/1	0/91	0/83		
	7	0/5	1/24	0/82	0/83		
	8	0/34	1/87	0/76	0/66		
	9	0/46	0/89	0/57	0/13		
K2O % (بر اساس وزن خشک)	1	0/70	1/06	0/84	0/8	0/5-1/8درصد	0/5-1/8درصد
	2	0/86	1/20	1/04	0/9		
	3	0/78	1/34	1/1	0/7		
	4	0/98	1/2	1/09	0/7		
	5	0/5	1/33	0/82	0/7		
	6	0/9	1/5	1/25	0/7		
	7	0/33	0/92	0/76	0/7		
	8	0/5	1/1	0/7	0/6		
	9	0/58	0/79	0/59	0/7		
رطوبت	1	3/53	29/82	22/66	3/45	بیشینه 15درصد	بیشینه 35درصد
	2	20/6	31/5	26/5	23		
	3	6/26	15/9	12/4	23		
	4	9/07	32/4	20	13		
	5	4/11	24/3	15	9		
	6	2/51	17/7	9	4		
	7	4/35	21	11/9	4/02		
	8	3/11	18/5	13	5/6		
	9	2/72	7/48	4/28	1/32		

به طور نمونه تغییرات محتوای کربن آلی به‌عنوان مهم‌ترین خصوصیت مثبت کمپوست و غلظت سرب به‌عنوان یکی از عناصر آلاینده مهم موجود در کل نمونه‌های کمپوست مورد بررسی، در ادامه ارائه شده است، لازم به ذکر است که عدد حد مجاز مورداستفاده برای مقایسه، بر اساس استاندارد فعلی کمپوست (استاندارد 10716) است.

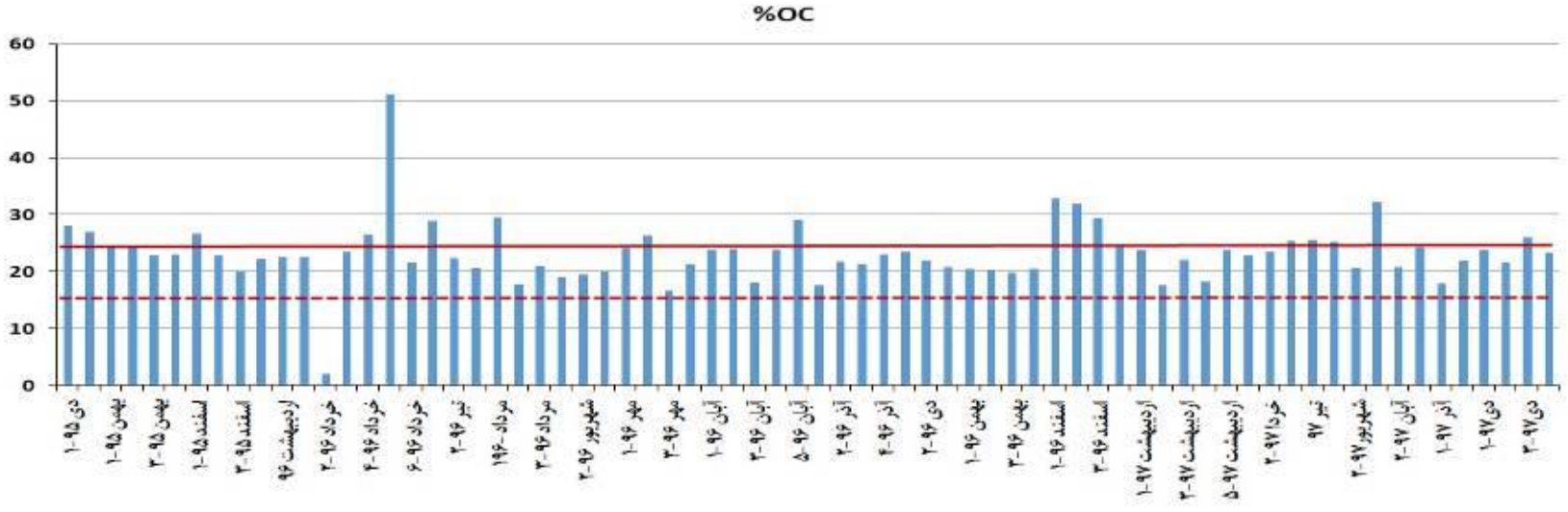
الف - نتایج بررسی وضعیت کربن آلی در کمپوست تولیدی کشور

منحنی توزیع مقادیر کربن آلی موجود در کمپوست‌های تولیدی کشور (همه استان‌های مورد بررسی)، در شکل زیر نشان‌داده‌شده است:



شکل 1- توزیع کل داده های مربوط به درصد کربن آلی در کمپوست های تولیدی کشور

همان‌گونه که از شکل 1 پیداست، بر اساس بررسی که طی سالهای 95 تا 97 انجام گرفته، با این پیش فرض که این نمونه‌ها با توجه به پراکندگی زمانی و مکانی معرف شرایط جامعه است، فقط 20 درصد از کمپوست‌های تولیدی این 8 کارخانه، از نظر محتوای کربن آلی، واجد شرایط کمپوست درجه یک (25%) بوده اند، 60 درصد واجد شرایط کمپوست درجه دو (15%)، بوده و حدود 20 درصد باقیمانده حتی حداقل محتوای کربن آلی لازم برای اخذ استاندارد درجه 2 را نیز نداشته‌اند. توزیع غلظت کربن آلی در نمونه های کمپوست تولید شده در یکی از سایت‌های مورد بررسی (کد 2)، در شکل 2، نشان داده شده است.

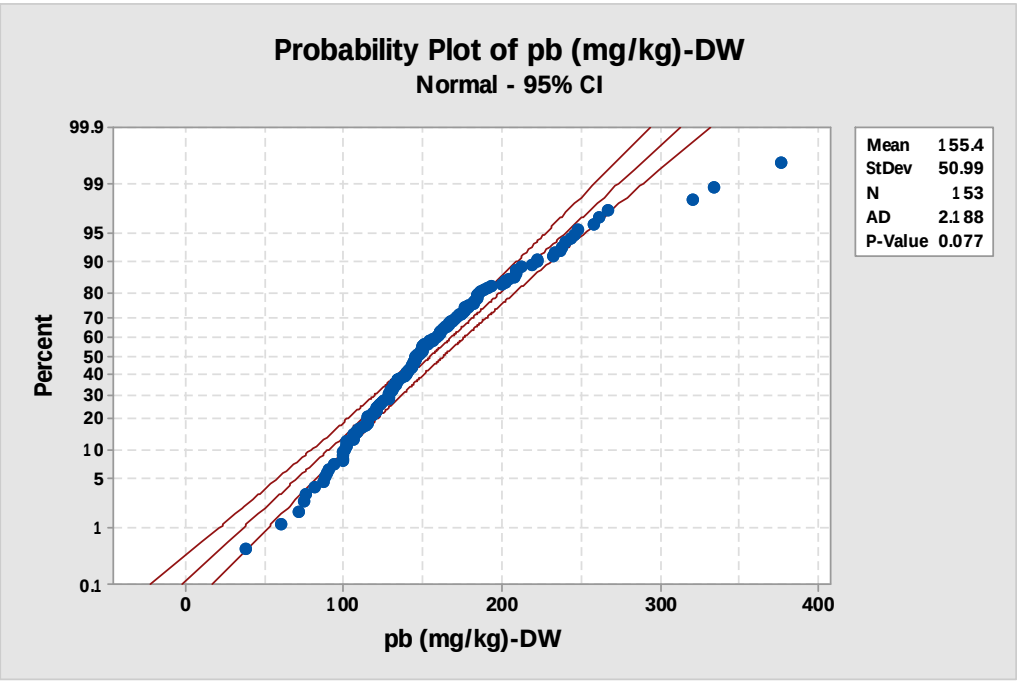


شکل 2- تغییرات غلظت کربن آلی در کمپوست تولیدی سایت با کد شماره 2.

خطوط توپر و خط‌چین به ترتیب حدود استاندارد ملی ایران برای کمپوست درجه یک (حداقل 25 درصد) و برای کمپوست درجه دو (حداقل 15 درصد) می‌باشند.

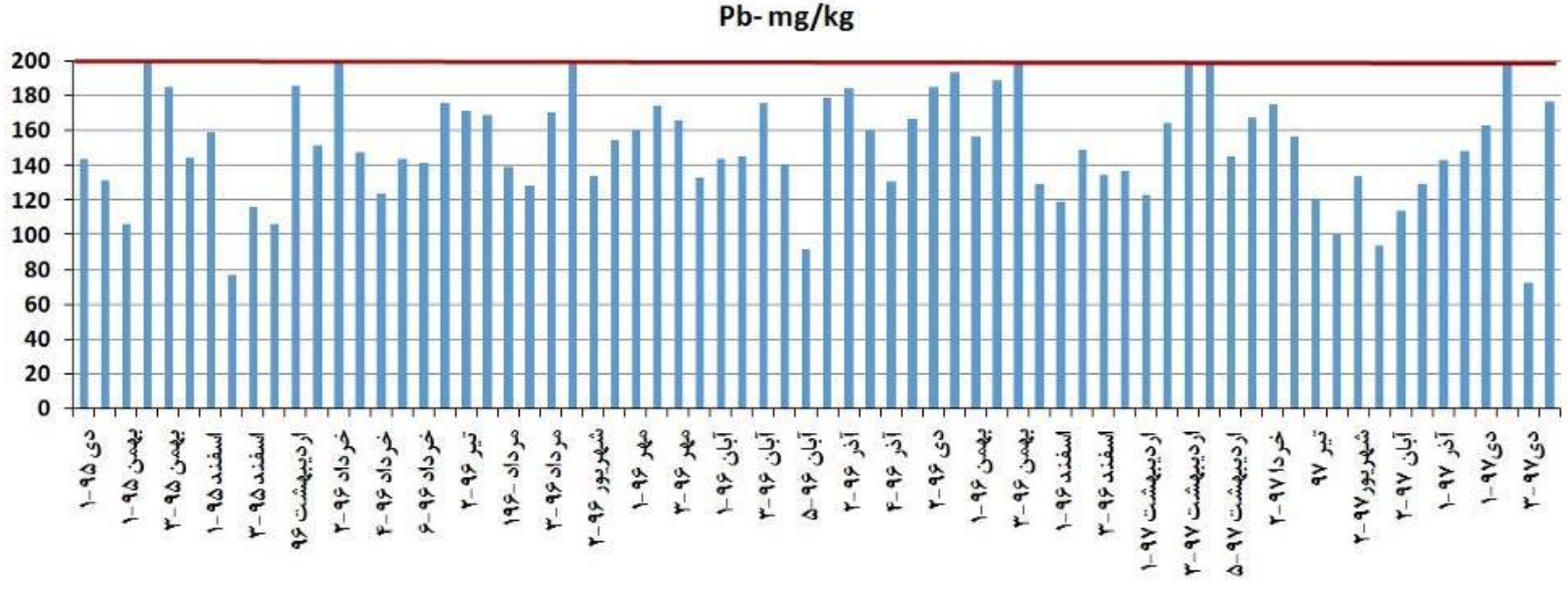
ب - نتایج بررسی وضعیت غلظت سرب در کمپوست تولیدی ایران

منحنی توزیع مقادیر سرب موجود در کمپوست‌های تولیدی کشور (همه استان‌های مورد بررسی)، در شکل زیر نشان‌داده‌شده است:



شکل 3- توزیع کل داده‌های مربوط به مقدار سرب در کمپوست‌های تولیدی کشور

همان‌گونه که شکل 3، نشان می‌دهد، از نظر محتوای سرب، 80 درصد کمپوست‌های تولیدی در این 8 کارخانه دارای سرب کمتر از 200 میلی گرم بر کیلوگرم (استاندارد فعلی) هستند. حال عدد 150 میلی گرم در کیلوگرم سرب تقریباً میانه نمونه‌ها است یعنی با فرض عدد 150 که در برخی کشورها مانند آلمان، کانادا و اسپانیا معیار ارزیابی است، فقط 50 درصد تولیدات محتوای سرب کمتر از 150 میلی گرم بر کیلو گرم دارند و اگر عدد 100 میلی گرم بر کیلو گرم را که حد استاندارد کشور هند برای کمپوست تولیدی از زباله شهری است را معیار قرار دهیم،کمتر از 20 درصد کمپوست‌های تولیدی کشور کیفیت قابل قبول خواهند داشت. توزیع غلظت سرب در نمونه‌های کمپوست تولید شده در یکی از سایت‌های مورد بررسی (کد 2)، در شکل 4، نشان داده شده است.



شکل 4- تغییرات غلظت سرب (میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) در کمپوست تولیدی توسط شهرداری کد شماره 2.

خط قرمزرنگ استاندارد ملی ایران (200 میلی گرم در کیلوگرم) می باشد.

حال سؤال این است که در کنار اعداد استاندارد، توزیع کیفی نمونه‌های کمپوست در دیگر کشورها چگونه است؟ بررسی‌ها نشان می‌دهد کیفیت کمپوست‌های تولیدی در کشورهای مختلف در قالب یک سیستم معین مورد ارزیابی و پایش مداوم قرار می‌گیرد. اگرچه پایش کیفیت کمپوست حاصل از پسماندهای تولیدی در هر کشور یکی از مراحل اصلی برای استخراج حدود مجاز است، ولی توجه به این نکته ضروری است که مهم‌ترین عامل در تعیین این حدود، حرکت در حاشیه محافظه‌کاری حداکثری برای حفظ سلامت محیط‌زیست و انسان است. در تأیید این موضوع کافی است به وضعیت پایش کیفیت پسماندهای تولیدی در هر کشور و حدود مجاز اعلام شده توسط آن کشور نگاهی بیندازیم. دراین‌رابطه اطلاعات زیادی در مقالات و ادبیات علمی منتشر نگردیده؛ اما همین اطلاعات موجود نیز بیانگر کیفیت متغیر و بعضاً بسیار خوب کمپوست‌های تولیدی در بعضی از کشورها است. در گزارشی از نتایج اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین در 3659 نمونه کمپوست در ایالات متحده، میانگین غلظت سرب در نمونه ها، 35 میلی‌گرم بر کیلوگرم ارائه گردیده، درحالی که حداکثرمجاز بر اساس استاندارد ملی این کشور 300 میلی‌گرم برکیلوگرم بوده است.

جدول 4- مقایسه نتایج بررسی کیفیت 3659 نمونه کمپوست با حدود استاندارد تعیین شده در ایالات متحده آمریکا (Evanylo, 2020)

عنصر سنگین	میانگین غلظت (mg/kg)	حد استاندارد 503 (mg/kg)
As	7/2	41
Cd	2/4	39
Cr	30	1200
Cu	121	1500
Pb	35	300
Hg	0/4	17
Ni	17	420

بر اساس گزارشی که توسط انجمن فدرال کیفیت کمپوست آلمان منتشر گردیده است، در پایش کیفی که طی سال‌های 2006 و 2007 انجام گرفت، غلظت سرب در مجموع 2754 نمونه، از 4 تا 166 میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بوده و میانگین غلظت سرب در نمونه‌های کمپوست این دو سال به ترتیب 37 و 36 میلی‌گرم بر کیلو گرم وزن خشک کمپوست بوده است (جدول 5).

جدول 5- ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در نمونه‌های کمپوست تولیدی از پسماندهای شهری در آلمان طی دو سال 2006 و 2007 (Siebert, et al)

ویژگی	میانگین غلظت (mg/kg) 2006	میانگین غلظت (mg/kg) 2007	غلظتی که 90 درصد نمونه ها از آن کمترند (mg/kg)	حداقل و حداکثر غلظت (mg/kg)
مواد ناخالص با قطر بیشتر از 2 میلی متر (درصد در وزن خشک)	0/09	0/08	0/38	0/00- 2/98
سنگ با قطر بیشتر از 5 میلی متر (درصد در وزن خشک)	1/36	1/32	3/32	0/00 – 17/95
Pb	37/0	36/0	65/5	4/0 – 166/0
Cd	0/42	0/42	0/72	0/00 – 2/00
Cr	21/1	21/2	32/0	3/72 – 307/0
Cu	45/8	43/3	77/0	2/20 – 1004/0
Ni	13/1	13/1	23/0	1/76 – 87/9
Zn	169/0	168/0	249/0	22/0 – 835/0
Hg	0/11	0/11	0/22	0/00 – 0/97

این در حالی است که حدود بیشینه مجاز بر اساس استاندارد ملی آلمان برای سرب در کمپوست اعداد 100 و 150 به ترتیب برای کمپوست درجه یک و دو بوده و مهم‌تر اینکه در مجموع در 90 درصد نمونه هائی که در این دو سال مورد بررسی قرار گرفته‌اند، غلظت سرب کمتر از 65/5میلی گرم بر کیلوگرم کمپوست بوده است. گزارش پایش سال 2013 همین انجمن از کمپوست‌های تولیدی از زباله‌های شهری آلمان،که در 2834 نمونه انجام گرفته، میانگین غلظت سرب را در نمونه‌ها 33/97میلی گرم بر کیلوگرم بیان نموده و نشان داده است که در 95 درصد نمونه‌ها، غلظت سرب کمتر از 63 میلی‌گرم برکیلوگرم بوده است.

این گزارش‌ها به طور روشن نشان می‌دهند حداقل دررابطه‌با دو کشور ایالات متحده و آلمان، میانگین غلظت سرب در کمپوست‌های تولیدی کمتر از یک‌سوم حد بیشینه مجاز تعریف شده در استانداردهای ملی این کشورها است و در مورد آلمان، غلظت سرب در 95 درصد نمونه‌ها بسیار کمتر از حد بیشینه مجاز تعریف شده است. جدول 5، میانگین و P.95 غلظت آلاینده‌ها در کمپوست های تولیدی کشور را نشان می‌دهد:

جدول 6- میانگین و P.95 غلظت آلاینده‌ها در کمپوست‌های تولیدی کشور (یگانه، 1403)

آلاینده	میانگین	P.95
As	3	6/80
Cd	4	10/8
Cr	76	188/5
Pb	134	254/4
Ni	69	157/8
Co	7	13/0
Cu	170	216
Zn	410	884

تأثیر جداسازی از مبدأ

در رابطه با کیفیت تولید، موضوع جداسازی منابع پسماند از مبدأ بسیار حائز اهمیت است. به‌نحوی که گزارش‌ها تأثیر معنی‌دار این فرایند را بر کیفیت کمپوست تولیدی به‌ویژه 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 یک‌پنجم را نشان داد.

4- محل مصرف کمپوست زباله شهری

کمپوست حاصل از پسماند زباله شهری می‌تواند کاربردهای کاملاً متفاوتی داشته باشد؛ اما آنچه به بخش کشاورزی مرتبط است شامل کاربرد در باغبانی؛ در ترکیب با انواع کودهای دیگر و خاک، به‌عنوان بستر کاشت درختان هنگام احداث باغ، در چال کود یا در نزدیکی نهال‌ها و درختان بالغ باهدف تسهیل رشد ریشه‌ها و تهویه محیط آنها، حرکت بهتر آب و غذا است. در زراعت، کاربرد کمپوست مناسب معمولاً به‌عنوان 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. کمپوست حاصل از پسماند شهری همچنین در اختلاط با مواد دیگر مانند شن، پرلیت، کوکوپیت و... به‌عنوان بستر کشت در گلخانه‌ها به کار می‌رود. یکی دیگر از کاربردهای کمپوست که در ارتباط با بخش کشاورزی و منابع خاک است، کاربرد آن در پارک‌ها و فضای سبز است. این نوع کاربرد البته از

نظر غیر مثمر بودن گیاهان میزبان با کاربردهای زراعت و باغبانی متفاوت است؛ اما باید توجه داشت که به دلیل رفت‌وآمد مکرر افراد در فضاهای سبز و پارک‌ها و به‌ویژه محل‌های بازی کودکان، امکان تماس مستقیم آنها با کمپوست کاربردی وجود دارد.

طبعاً کیفیت کمپوست موردقبول برای هر یک از کاربری‌های فوق متفاوت است. بر همین مبنا در برخی کشورها شرایط کمپوست برای مصارف متفاوت درون بخش کشاورزی نیز تفکیک گردیده است. به‌عنوان نمونه کمپوستی که به‌عنوان بستر کشت مورداستفاده قرار می‌گیرد، از نظر محتوای عناصر سنگین شرایط سخت‌گیرانه‌تری دارد.

باتوجه‌به احتمال افزایش غلظت بیش از حد عناصر سنگین در خاک، از طریق کمپوست حاصل از پسماند شهری به منابع آب‌وخاک و ورود این عناصر به گیاهان و سپس چرخه 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 150 میلی‌گرم بر کیلوگرم در نظر گرفته شده، انجمن باغبانی آلمان برای کاربرد این مواد در زمین‌های سبزیکاری متراکم، با مقدار سرب خاک 12 تا 100 میلی گرم در کیلو گرم خاک، حداکثر غلظت سرب 75 میلی گرم بر کیلوگرم کمپوست را توصیه نموده است. همین‌طور برای سایر عناصر سنگین نیز اعداد ارائه شده گاهی تا یک پنجم حدود استاندارد را توصیه کرده است (جدول 7).

جدول 7- 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	75	12 – 100
Cu	50	3 – 20
Zn	200	14 – 125
Cr	75	5 – 100
Ni	30	4 – 50
Cd	0/75	0/3 – 0/7
Hg	0/5	0/05 – 0/40

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 بالاتر باشد، ممنوع گردیده است (جدول 8). همانطور که در جدول دیده می شود، به عنوان نمونه در کشور آلمان کاربرد کمپوست در خاک های با سرب بالاتر از 100 میلی‌گرم بر کیلوگرم (برای خاک‌های رسی)، 70 میلی‌گرم بر کیلوگرم (برای خاک‌های سیلتی) و 40 میلی‌گرم بر کیلوگرم (برای خاک‌های شنی) ممنوع گردیده است.

جدول 8- مقادیر غلظت عناصر سنگین در خاک (mg/kg) بر اساس نوع خاک که کاربرد کمپوست در این اراضی محدود یا ممنوع گردیده است.[1]

کشور	نوع خاک	Cd	Pb	Cr	Cu	Hg	Ni	Zn
	رسی	1/5	100	100	60	1	70	200
آلمان	سیلتی	1	70	60	40	0/5	50	150
	شنی	0/4	40	30	20	0/1	15	60
هلند[2]		0/4 +0/007(T+3H)	50+T+H	50+2T	15+0/6(T+H)	0/2+0/0017*(2T+H)	10+T	50+1/5(2T+H)
ایتالیا		1/0	50	50	75	1/0	50	150
سوئیس[3]		0/03	1/0	-	0/7	-	0/2	0/5
کانادا		4	100	**	**	1	36	370

1 German Ministry of Environment (1998); Canadian Council of Ministers of Environment (1998)

2 Bavnick (1998)، حروف: T= درصد رس، H= درصد هوموس

3 عصاره گیری با اسید نیتریک 0/1 مولار

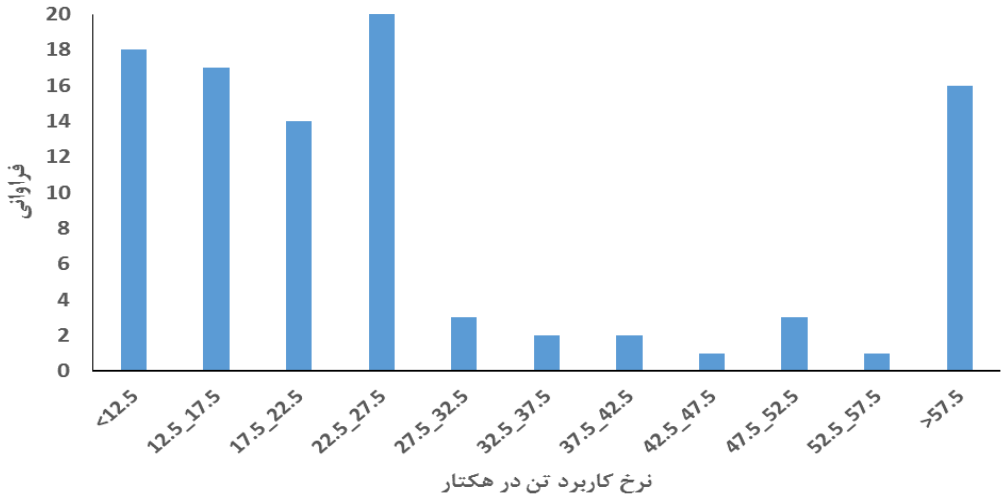
** این موارد توسط قانون کود کانادا پوشش داده می‌شود.

5- نرخ مصرف کمپوست زباله شهری

یکی از موضوعات دیگر که مستقیماً بر میزان ورود عناصر و ترکیبات آلاینده از طریق کاربرد کمپوست در اراضی تأثیرگذار است، نرخ مصرف 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 قوانین کشورهای سوئیس و آلمان اشاره کرد که صراحتاً این موضوع را در متن قوانین خود ذکر کرده‌اند. به طور مشخص در آلمان بر اساس قانون، حداکثر مقدار کمپوست (بر حسب ماده خشک) ورودی به هر هکتار خاک در طول 3 سال نباید برای کمپوست درجه یک (بیشینه سرب 100) از 30 تن در هکتار و برای کمپوست درجه 2 (بیشینه سرب 150) از 20تن در هکتار کمپوست خشک فراتر رود. در اسپانیا حداکثر مجاز نرخ کاربرد کمپوست کلاس C مقدار 5 تن در هکتار اعلام گردیده است.

آنچه مسلم است نرخ مصرف ترکیباتی که خطر آلایندگی دارند؛ مانند کمپوست حاصل از پسماندهای شهری، می‌بایست با درنظرگرفتن کلیه شرایط از جمله بار مجاز عناصر سنگین در خاک در هر سال تعیین (با داشتن برنامه پایش) و در قالب قوانین و مقررات بالادستی، توسط دستگاه‌های ذی‌ربط ابلاغ گردد. به‌نحوی 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 مؤسسه تحقیقات خاک و آب، (تعیین خطرپذیری استفاده از کمپوست زباله شهری در کشاورزی ایران)، پیگیری شد. باتوجه‌به هدف این پروژه، در هر استان، مزارع کشاورزی که برای چند سال (3 تا 5 سال) متوالی کمپوست زباله شهری دریافت کرده بودند، شناسایی شدند و اطلاعات مربوط به کاربرد کمپوست زباله شهری در هر یک از این مزارع، از طریق پرسش‌نامه‌ای از کشاورزان اخذ گردید. در مجموع 5 استان، تعداد 96 پرسش‌نامه تکمیل گردید. بر اساس نتایج پرسش‌نامه‌های تکمیل شده، نرخ مصرف در مزارع استان‌های مختلف، متغیر بود؛ لذا به‌منظور تحلیل و نتیجه‌گیری، با مشاوره کارشناسان صاحب‌نظر، از جمله میانه و سایر اطلاعات آماری از داده‌ها استخراج گردید. عدد میانه در کل داده‌های نرخ مصرف جمع‌آوری‌شده، 21 تن در هکتار در سال بود. همچنین فراوانی گروه‌های مختلف نرخ مصرف به تفکیک: کمتر از 10، 10-15، 15-20، 20-25، 25-30، 30-35، 35-40، 40-45، 45-50، 50-60

و بیش از 60 تن در هکتار، در همه استان‌ها استخراج و با یکدیگر مقایسه گردید. نمودار توزیع فراوانی نرخ مصرف کمپوست در مجموع استان‌های مورد بررسی درشکل 5 ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشترین فراوانی نرخ مصرف، مربوط به دامنه 25-21 تن در هکتار در سال می‌باشد.



شکل 5- توزیع فراوانی نرخ مصرف کمپوست در استان‌های مورد بررسی

6- حدود مجاز آلودگی عناصر سنگین در خاک

باتوجه‌به کاربری‌های متفاوت منابع خاک، از جمله کشاورزی، میزان غلظت عناصر سنگین در خاک بسیار حائز اهمیت است، چرا که افزایش غلظت این عناصر آلاینده در خاک می‌تواند از طریق آلوده‌کردن منابع آب، وارد چرخه زیستی گردد و سلامت محیط‌زیست و موجودات زنده را تحت‌تأثیر قرار دهد. به همین دلیل کشورها متناسب با شرایط زمین‌شناسی، اقلیم، کاربری اراضی و مدیریت کشاورزی، اعدادی را به‌عنوان حدود مجاز آلودگی عناصر سنگین در خاک اعلام می‌نمایند. این حدود معمولاً توسط سازمان‌های متولی محیط‌زیست کشورها تعیین و اعلام می‌گردد. در واقع معنای حدود اعلامی این است که بالاتر رفتن غلظت عناصر سنگین در خاک از حدود اعلامی، منجر به اعمال محدودیت‌های قانونی برای بهره‌برداری از خاک گردیده و عاملین این افزایش غلظت مشمول مجازات-های قانونی خواهند شد؛ بنابراین هر گونه بهره‌برداری از خاک و یا کاربرد هر ماده بیرونی مانند انواع کودها، مواد بهساز خاک، آفت‌کش‌ها و غیره حتی در زمان‌های طولانی نباید غلظت عناصر سنگین موردنظر در خاک را از حدود اعلامی مجاز آلودگی، بالاتر ببرد. در ایران حدود مجاز آلودگی خاک به

عناصر سنگین برای کاربری‌های مختلف توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست اعلام گردیده که از طریق وبگاه این سازمان به آدرس https://wsm.doe.ir/ قابل‌دسترس است. در جدول زیر حدود مجاز اعلامی برای تعدادی از عناصر توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران در مقایسه با سایر کشورها آورده شده است.

جدول 9- مقدار استاندارد عناصر سنگین در خاک‌های کشاورزی ایران و سایر کشورها (Shahbazi et al., 2020)

منطقه	Zn	Pb	Ni	Cu	Cr	Co	Cd	As
	mg/kg							
ایران*	500	75	110	200	110	50	5	40
چین	200	80	60	50	250	-	0/3	30
استرالیا	200	300	60	100	50	-	3	20
آلمان	600	1000	200	200	500	-	5	50
کانادا	500	200	100	150	250	-	3	20
FAO و WHO	300	100	50	100	100	50	3	20
انگلستان	-	-	230	-	-		1/8	43
اتحادیه اروپا	200	60	50	100	100	20	1	-

* حد مجاز آلاینده‌ها در خاک‌های کشاورزی ایران در سال 1392، توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایران تعیین شده‌است.

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

پژوهش‌های متعددی در زمینه تأثیر کاربرد کمپوست حاصل از پسماندهای شهری بر خصوصیات فیزیکی و شیمیائی خاک به‌ویژه غلظت عناصر سنگین در خاک و نیز مقادیر عناصر سنگین باقیمانده در گیاهان کشت شده، تحت این شرایط، در کشورهای مختلف انجام‌گرفته است به‌عنوان نمونه تعدادی از این نتایج در جدول زیر نشان‌داده‌شده است. همان‌طور که دیده می‌شود نتایج این پژوهش‌ها تجمع عناصر سنگین در خاک و بعضاً افزایش جذب آنها در گیاهان کشت شده در این اراضی را نشان می‌دهد.

جدول 10- نتایج کلی بررسی ریسک بالقوه کاربرد کمپوست زباله شهری در خاک و گیاه (Cao, et al, 2023)

محیط کاربرد	عنصر سنگین	تأثیرات	کشور
خاک	Cd, Pb, Zn, Cu	غلظت عناصر سنگین در خاک سطحی افزایش یافت (بدون هیچ انتقال عمودی).	تونس
خاک	Cd, Pb, Zn	اگرچه محتوای عناصر سنگین خاک افزایش یافت؛ اما تأثیر ناچیزی بر دانه ذرت داشت.	اسپانیا
خاک	Cu, Zn, Ni, Cr, Cd, Pb	با افزایش مقدار کاربرد کمپوست، مقدار عناصر سنگین افزایش یافت، به‌ویژه در خاک‌های قلیا.	ترکیه
خاک	Ni, Pb, Cu, Zn	با کاربرد مقادیر بیشتر از کمپوست زباله شهری، رشد گیاهان به طور معنی‌داری محدود شد، همچنین این موضوع، جذب بیشتر یون‌های Ni^{2+}، pb^{2+}، Cu^{2+} و Zn^{2+} را در برگ‌های گندم باعث گردید.	ایتالیا
خاک	Cu, Zn, Pb	ابتدا عناصر سنگین در خاک سطحی تغلیظ شدند و به‌مرورزمان، شکل‌های آلی آنها افزایش یافت.	ایتالیا
خاک	Cd, Pb	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.	برزیل
خاک	Cu, Cd, Zn	کاربرد مقادیر بیشتر کمپوست منجر به غلظت‌های بالاتر Cu، Cd و Zn در بافت گیاهی شد بدون اینکه عملکرد گندم را متأثر نماید.	تونس
خاک	Zn, Cu, Pb, Ni	در شهرهای بزرگ‌تر که کمپوست زباله آنها غلظت بالاتری از عناصر سنگین داشت، مقادیر بالاتر pH و قابلیت استفاده عناصر سنگین دیده شد.	برزیل
خاک	Hg	افزایش معنی‌داری در غلظت جیوه در خاک (7/6 برابر بیشتر از شاهد) دیده شد.	اسپانیا
خاک	As	قابلیت دسترسی زیستی آرسنیک، در روده افزایش معنی‌داری داشت	ایتالیا
خاک	B, Cu, Mo, Zn	با کاربرد سالانه کمپوست زباله شهری، غلظت عناصر بور، مس، مولیبدن و روی در خاک به طور معنی‌داری افزایش یافت.	کانادا
آب	Pb, Cr, Mn, Ni, Cu	با تخلیه فاضلاب محتوی عناصر سنگین و نیز کیفیت آب کاهش‌یافته و رسوبات کف رودخانه آلوده شده‌اند، در نتیجه مخاطرات زیست‌محیطی شدت یافته است.	ایران

همان‌گونه که گفته شد در ایران نیز در مؤسسه تحقیقات خاک و آب دو پژوهش باهدف بررسی تأثیر کاربرد متناوب کمپوست زباله شهری بر خصوصیات خاک و گیاه انجام گرفت. باتوجه‌به هدف این پروژه‌ها، در هر استان، مزارع کشاورزی که برای چند سال (5-3 سال) متوالی کمپوست زباله شهری دریافت کرده بودند، شناسایی شدند. به منظور امکان مقایسه خاک و محصول کمپوست خورده و کمپوست نخورده، مزارعی در نزدیکترین فاصله با مزرعه کمپوست خورده با همان محصول بدون دریافت کمپوست شناسایی شدند و نمونه های برداشت شده از این مزارع به عنوان شاهد در نظر گرفته شدند. بدلیل اینکه کیفیت کمپوست‌های تولیدی در استان‌های مختلف کشور جهت حفظ محرمانگی، بصورت کد بیان شده، جهت برقراری ارتباط بین بخش مربوط به کیفیت کمپوست‌های تولیدی و کیفیت محصولات برداشت شده از زمین‌های کشاورزی دریافت کننده آن کمپوست‌ها، در این بخش نیز به‌جای استفاده از نام شهر و استان از کد مربوطه (کدها مطابق با کدهای مربوط به سایت‌های تولیدکمپوست است) استفاده شد. نتایج پروژه " تعیین خطرپذیری استفاده از کمپوست زباله شهری در کشاورزی ایران" در سایت شماره 2، نشان داد که، استفاده از کمپوست زباله شهری این سایت، به مدت چهار الی پنج سال، باعث افزایش معنی دار درصد کربن آلی، نیتروژن، و غلظت مس و روی قابل جذب و نیز سرب در خاک شد. استفاده از کمپوست زباله شهری سایت‌های 6، 7، 8 و 9، به مدت چهار الی پنج سال، غلظت پتاسیم، مس و روی، آهن و منگنز قابل جذب و نیز مس، روی و منگنز کل را در خاک افزایش داد. البته این کمپوست باعث افزایش غلظت نیکل، کروم، کادمیم و سرب در خاک نیز شد، 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 زباله شهری 4 و 5، به مدت پنج سال، محتوای کربن آلی، مس، روی، منگنز و آهن قابل جذب، مس، روی و منگنز کل را در خاک کمپوست خورده نسبت به شاهد افزایش داد. در کنار این اثرات مثبت، مشاهده شد که استفاده از این کمپوست در مزارع سبزیکاری این استان، باعث افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی و غلظت نیکل، کروم، سرب و کادمیم در خاک گردید. در مورد کروم، غلظت در خاک شاهد و کمپوست خورده بیشتر از حد مجاز (110 میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. استفاده از کمپوست زباله شهری تولید شده در شهر با کد 3، به مدت سه الی چهار سال، غلظت مس، روی، منگنز و آهن قابل جذب را در خاک افزایش داد و باعث افزایش معنی‌دار 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 در استان 2، نشان داد که استفاده از کمپوست تولید شده در این استان، باعث افزایش معنی‌دار غلظت سرب در گندم، حبوبات و سبزیجات

برگی شد. غلظت سرب در دانه گندم و سبزیجات برگی رشد یافته در تیمار استفاده از کمپوست **کمتر از حداکثر مجاز** تعیین شده در استاندارد ملی ایران و در دانه حبوبات، **بیش از حد مجاز** استاندارد بود. همچنین کمپوست زباله شهری استان 2، غلظت کروم را در دانه گندم، سبزیجات برگی، غده‌ای و حبوبات افزایش معنی‌دار داد. در مناطق با کد 6، 7، 8 و 9 نیز افزایش معنی‌دار غلظت نیکل و کروم در سبزیجات رشد یافته در تیمار کمپوست خورده مشاهده شد. استفاده از کمپوست زباله شهری تولید شده در استان 4 و 5، غلظت پتاسیم، روی و آهن را در سبزیجات کمپوست خورده بطور معنی‌داری افزایش داد. همچنین باعث افزایش معنی‌دار غلظت کادمیم، سرب و آرسنیک در سبزیجات کمپوست خورده نسبت به شاهد شد به نحوی که غلظت کادمیم و سرب در سبزیجات تولید شده در اراضی کمپوست خورده، از حدود مجاز استاندارد ایران و اتحادیه اروپا فراتر رفت. در استان 3، استفاده از کمپوست زباله شهری تولید شده در این استان، باعث افزایش معنی‌دار غلظت مس، آهن و منگنز در سبزیجات، غلظت روی در گوجه فرنگی و سبزیجات، کادمیم در سبزیجات، کروم، در پیاز و گوجه فرنگی و آرسنیک در سبزیجات برگی شد. غلظت کادمیم در سبزیجات برگی کمپوست خورده این استان، از استاندارد ملی ایران فراتر رفت. غلظت کادمیم در سبزیجات میوه‌ای کمپوست خورده و شاهد این استان از استاندارد ملی ایران، اتحادیه اروپا و کدکس بالاتر بود.

با استفاده از مدل HYDRUS 1D، پیش‌بینی آلودگی خاک در زمین‌های دریافت کننده کمپوست زباله شهری برای چندین سال متوالی انجام شد. به‌جهت پیش‌بینی غلظت‌های فلزات سنگین موجود در خاک و گیاه در سال‌های آینده از مدل HYDRUS 1D استفاده می‌شود. در نرم‌افزار HYDRUS از الگوریتم بهینه‌سازی لونبرگ-مارکواردت برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک و انتقال گرما و املاح به روش حل معکوس با استفاده از داده‌های جریان گذرا و یا پایدار استفاده می‌شود (Marquardt, 1963). مدل HYDRUS 1D معادله یک بعدی ریچاردز[1] را برای جریان آب اشباع- غیراشباع و معادلات پراکندگی فرابرد مبتنی‌بر فیکین[2] را برای انتقال گرما و املاح حل می‌کند و به‌طور کلی برنامه HYDRUS یک مدل المان محدود برای شبیه‌سازی حرکت یک‌بعدی آب، گرما و املاح متعدد در محیط‌های اشباع متغیر است (Simunek et al., 1998). نتایج مدلسازی نشان داد که چنانچه شرایط مدیریت زراعی و کیفیت کمپوست‌ها و اقلیم ثابت بماند، غلظت سرب در خاک‌های استان 2، از سال بیستم، در سایت‌های 4، 5، 6، 7، 8 و 9، از سال سی‌ام به حد بحرانی 75 میلی‌گرم بر کیلوگرم خواهد رسید. در مورد کروم خاک‌های استان 3، از سال 45 به حد مجاز 110

[1] Richards' equation
[2] Fickian-based

میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌رسد و خاک‌های مورد بررسی استان 4و 5 در زمان صفر مدلسازی، دارای غلظت بیشتر از حد مجاز کروم بودند. در زمان نمونه‌برداری، میانگین غلظت نیکل در خاک های مورد بررسی در استان 2، بالاتر از حد مجاز 110 میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. غلظت نیکل در 20 سانتی‌متر سطحی خاک‌های سایت‌های 6، 7، 8 و 9، از سال پنجاهم از حد مجاز فراتر خواهد رفت. مدلسازی ریسک تهدید سلامت انسان (با استفاده از میانگین‌های غلظت شبیه‌سازی شده) در اثر استفاده طولانی مدت از پسماندهای آلی در زمین‌های کشاورزی نشان داد که، ریسک ناشی از آرسنیک و سرب موجود در سبزیجات و گندم کشت شده در مزارع کمپوست خورده استان 2، آرسنیک و سرب موجود در سبزیجات کمپوست خورده استان 3، به ترتیب از سال دهم و سی‌ام، ریسک ناشی از سرب موجود در سبزیجات استان 4 و 5، از سال دهم مشاهده خواهد شد. در استان 6، 7، 8 و 9، ریسک تهدید سلامت مصرف کنندگان در اثر کادمیم موجود در سبزیجات از سال دهم و در اثر سرب موجود در سبزیجات از سال چهلم پیش‌بینی می‌گردد.

نتایج این پروژه نشان داد که استفاده مداوم از کمپوست زباله شهری می‌تواند در طولانی‌مدت سلامت محیط‌زیست را تهدید نماید (بالاتر رفتن غلظت آلاینده‌ها از حدود مجاز)، بیشترین میزان تهدید در این زمینه مربوط به عناصر سرب، کروم و نیکل است. همچنین می‌تواند از طریق ورود به زنجیره غذایی انسان تهدیدکننده سلامت نیز باشد. دراین‌بین بیشترین میزان ریسک تهدید سلامت در مورد سبزی‌ها و عناصر سرب، آرسنیک و کادمیم می‌باشد.

8- راهکارهای تعیین استاندارد

در این بخش به استناد منابع علمی منتشر شده و قابل‌دسترس، مبانی و روش مورداستفاده برای استخراج اعداد حدود مجاز آلاینده‌ها توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا و سازمان حفاظت محیط‌زیست کانادا تشریح می‌شود. سپس تلاش می‌گردد با استفاده از داده‌ها و اطلاعات موجود کشور، اعداد حدود استاندارد برای شرایط ایران با هر یک از این دو روش، محاسبه گردد.

جزئیات روش مورداستفاده توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA)

حدود مجاز معرفی شده توسط EPA، کاملاً بر مبنای ریسک هستند و بر اساس ارزیابی ریسک محاسبه شده‌اند. بدین منظور EPA، 14 مسیر احتمالی تهدید سلامت انسان، گیاهان، حیوانات و

ارگانیسم‌های زنده خاک ناشی از ورود آلاینده‌های موجود در پسماندهای مورد بررسی به بدن گروه‌های مورد بررسی در نظر گرفته است. مسیرهای معرفی شده در جدول 11 نشان داده شده اند:

جدول 11- خلاصه مسیرهای مواجهه مورد بررسی در ارزیابی ریسک استفاده از پسماندها در زمین

مسیر	توصیف HEI[3]
1-بار آلودگی ← خاک ← گیاه ← انسان	انسان (به‌جز باغدار یا کشاورز) مصرف‌کننده از گیاه رشدیافته در خاک‌های حاوی پسماند است.
2-بار آلودگی ← خاک ← گیاه ← انسان	انسان (باغدار یا کشاورز) مصرف‌کننده از گیاه رشدیافته در خاک‌های حاوی پسماند است.
3-بار آلودگی ← انسان (کودک)	کودک بلع‌کننده پسماند است
4-بار آلودگی ← خاک ← گیاه ← حیوان ← انسان	کسی که از محصولات حیواناتی که از گیاهان رشدیافته در خاک‌های تیمار شده با پسماند تغذیه می‌کند، استفاده می‌کند
5-بار آلودگی ← خاک ← حیوان ← انسان	انسان‌های مصرف‌کننده از غذاهای حیوانی (حیواناتی که مستقیماً از پسماند تغذیه می‌کنند)
6-بار آلودگی ← خاک ← گیاه ← حیوان	حیوان اهلی مصرف‌کننده گیاهان رشدیافته در زمین‌های دریافت‌کننده پسماند است
7-بار آلودگی ← خاک ← حیوان	حیوان چراکننده بلع‌کننده پسماند است.
8-بار آلودگی ← خاک ← گیاه	گیاهان رشدیافته در خاک‌های حاوی پسماند است
9-بار آلودگی ← خاک ←موجودات زنده خاکزی	موجودات زنده خاکزی که از پسماند/ترکیب خاک و پسماند تغذیه می‌کنند.
10-بار آلودگی ← خاک ←موجودات زنده خاکزی←شکارچی موجودات خاکزی	شکارچی موجودات زنده خاکزی که از خاک تیمار شده با پسماند تغذیه کرده‌اند.
11-بار آلودگی ← خاک ←گرد وغبار← انسان	انسانی است که ذرات گردوغبار (بر خواسته از زمین‌های کمپوست خورده) را تنفس می‌کند.
12-بار آلودگی ← خاک ← آب سطحی ← انسان	شخصی که از آب سطحی و ماهی موجود در آب سطحی (آلوده به پسماند) تغذیه می‌کند.
13-بار آلودگی ← خاک ←هوا← انسان	انسانی که از هوایی تنفس می‌کند که حاوی آلاینده‌های موجود در پسماند است (به شکل بخار)
14-بار آلودگی ← خاک ← آب زیرزمینی ← انسان	انسانی که از آب آلوده شده چاه با آلاینده‌های آبشویی شده از خاک حاوی پسماند به آب زیر زمینی تغذیه می‌کند.

[3] Highly Expected Individual

بار مجاز تخلیه و غلظت مجاز هر یک از آلاینده‌های مورد بررسی برای تک‌تک این مسیرها محاسبه می‌شود و محدودکننده‌ترین مسیر (که برای عناصر مختلف متفاوت است)، به‌عنوان مبنای محاسبه استاندارد انتخاب می‌شود.

بررسی دقیق‌تر این روش نشان داد که برای محاسبه حدود مجاز با این روش به بانک اطلاعات گسترده‌ای نیاز است که بسیاری از آنها برای کشور ما تعیین نگردیده و در دسترس نیست؛ بنابراین برای استفاده از این روش باید از داده‌های خام آمریکا استفاده می‌شد که به دلیل عدم مشابهت شرایط و قوانین دو کشور، استفاده از این روش برای محاسبه اعداد حدود مجاز آلاینده‌ها در پسماندهای ایران مناسب نیست. از جمله این پارامترها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: شیب جذب آلاینده در بافت گیاهی، کل مصرف زمینه آلاینده از همه منابع دیگر مورد تماس، مقدار خاک بلع شده و.... نکته قابل‌توجه دیگر دررابطه‌با روش کشور آمریکا این است که در کشور آمریکا سازمان حفاظت محیط‌زیست با پشتوانه قانونی قوی، قدرتمندترین نهاد دولتی است و در هر زمان و هر مکان که تشخیص دهد کاربرد ماده‌ای که سلامت خاک، آب، محصولات کشاورزی یا موجودات زنده و به‌طورکلی محیط‌زیست را تهدید می‌کند، به‌راحتی می‌تواند از کاربرد آن جلوگیری کند. در کشور ما اما در مقطع فعلی باوجود قوانین و مقررات و اقدامات زیرساختی ارزشمند در زمینه کنترل آلودگی خاک و محیط‌زیست، همچنان تا نهادینه‌شدن توجه به اولویت‌های زیست‌محیطی در فعالیت‌های جاری فاصله است، لذا کماکان بخش اعظم بار کنترل آلودگی‌ها بر عهده استانداردها و حدود مجاز مورد توافق ملی است.

روش مورد استفاده توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست کانادا

در کشور کانادا، دو نوع کمپوست می‌تواند مورداستفاده قرار بگیرد:

1- کمپوست درجه یک (A)

این کمپوست، کمپوست باکیفیت بسیار خوب است و بدون محدودیت در همه انواع کاربری و با هر نرخ مصرف، می‌تواند مورداستفاده قرار بگیرد.

برای تعیین حدود مجاز در این نوع کمپوست، ابتدا به دو روش زیر حدود مجاز تعیین و هر کدام از این دو عدد بالاتر بود به‌عنوان حد بیشینه مجاز در نظر گرفته می‌شود.

الف- روش بدون کاهش خلوص ("no net degradation")،

اساس این روش این است که غلظت آلاینده در کمپوست نباید بیشتر از غلظت نرمال آن آلاینده در خاک (P.98 غلظت زمینه) باشد. در این روش غلظت زمینه آلاینده ها در خاک های کشاورزی بر اساس اندازه گیری‌ها تعیین و همان مقدار بعنوان غلظت بیشینه مجاز کمپوست ورودی به خاک در نظر گرفته می‌شود.

ب- روش بهترین فناوری قابل‌دسترسی ("best achievable technology")،

بنا بر تعریف، چنین پسماندی از کمپوست زباله شهری که جداسازی از مبدأ در آن صورت‌گرفته، یا فاضلاب تصفیه شده و تیمار شده شهری، پسماند کارخانه کاغذ و یا کود دامی به دست می‌آید.

بنابراین، این روش بر اساس بهترین تکنولوژی در دسترس برای تولید کمپوست با استفاده از پسماندهای جداسازی از مبدأ، شکل‌گرفته است. یعنی غلظت ماده آلاینده در چنین کمپوستی می‌تواند مبنای "best achievable technology" قرار گیرد.

در تعیین حدود مجاز کمپوست درجه یک کانادا عدد حاصل از این دو روش الف و ب مقایسه و هر کدام بیشتر بود به‌عنوان حد مجاز آن آلاینده در کمپوست معرفی می‌شود. تعیین حدود مجاز با استفاده از این روش، کاملاً بر اساس سیاست‌گذاری است و اساس ارزیابی ریسک ندارد.

ازآنجایی‌که در حال حاضر کمپوست زباله شهری ایران، بدون جداسازی از مبدأ 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. اعداد زمینه غلظت آلاینده‌ها در جدول 2 ارائه شده است.

2- کمپوست درجه 2 (B)

کمپوست باکیفیت خوب است. نسبت به کمپوست درجه 1 (A)، دارای مقادیر بالاتر آلودگی فلزات سنگین و مواد خارجی است. این کمپوست بایستی با **نرخ محدود مورداستفاده** قرار گیرد. اساس تعیین حدود مجاز در این نوع کمپوست 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، به‌عنوان سقف غلظت آلاینده پس از 45 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 45 سال است. حال با داشتن نرخ کاربرد کمپوست بر حسب تن (وزن خشک) در هکتار در سال(نرخ مورد استفاده در محاسبات کانادا: 4/4 تن (وزن خشک) در هکتار در سال و براساس نیاز ازت تعیین شده است)، تنها یک مجهول باقی می ماند و آن غلظت عنصر در کمپوست بر حسب کیلو گرم در وزن خشک کمپوست است که کاربرد آن با نرخ معین تعیین شده در طول 45 سال، غلظت آن عنصر در خاک را به حداکثر غلظت مجاز آلاینده در خاک برساند.

روش محاسباتی استاندارد سرب (به‌عنوان‌مثال) در کمپوست برای شرایط ایران بر مبنای کمپوست نوع B کانادا:

بار مجاز تخلیه= اختلاف استاندارد آلاینده در خاک با غلظت زمینه (BC^1) آن آلاینده در خاک

- ✓ **بار مجاز تخلیه Pb در خاک: باتوجه‌به اینکه غلظت زمینه سرب در خاک‌های ایران 48 میلی گرم بر کیلوگرم (شهبازی و همکاران، 1401)، و استاندارد آن 75 میلی گرم بر کیلو گرم (استاندارد معرفی شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایران) می باشد، بنابراین**

بار مجاز تخلیه سرب در خاک =75 - 47 = 28 (mg Pb/kg soil)

خواهد شد

$$\text{بار مجاز تخلیه} = 28 \ \frac{mg\ Pb}{Kg\ Soil} = 70 \ \frac{Kg\ Pb}{ha}$$

- ✓ **محاسبه استاندارد Pb در کمپوست:**

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

نرخ کاربرد کمپوست: باتوجه‌به بررسی‌های انجام شده، نرخ کاربرد معادل 25 تن در هکتار در سال در نظر گرفته شده است.

$$\text{استاندارد Pb} = \frac{70}{\text{0.001× سال 45× تن در هکتار 25}} = 62 \frac{mg\ Pb}{Kg\ compost}$$

باید توجه نمود که واحد عدد 62 به دست آمده از این محاسبات بر حسب میلی‌گرم بر کیلو گرم کمپوست مرطوب می‌باشد. با توجه به درصد رطوبت معمول و حدود استاندارد درصد رطوبت، با اعمال 35 درصد رطوبت وزنی، عدد حد مجاز بر حسب وزن خشک کمپوست معادل 95/38 میلی‌گرم بر کیلوگرم، به دست می آید.

[1] Background concentration

همانند نمونه محاسبه بالا و بر اساس داده‌های غلظت زمینه آلاینده‌ها در خاک‌های ایران جدول 2، اعداد محاسبه شده به این روش برای کمپوست نوع A و نوع B برای ایران به شرح زیر می‌باشد:

جدول 12- اعداد حدود مجاز غلظت عناصر سنگین محاسبه شده برای شرایط ایران براساس روش کانادا

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	22	22	45	50
کادمیم	0/44	0/44	11	12
کبالت	26	26	60	64
کروم	140	140	x	قابل‌محاسبه نیست
مس	44	44	390	416
سرب	47	47	70	96
جیوه	-	-	-	-
مولیبدن	-	-	-	-
نیکل	117	117	x	قابل‌محاسبه نیست
سلنیوم	-	-	-	-
روی	131	131	922	984

*با احتساب 35 درصد رطوبت وزنی

با این روش، امکان تعیین حدود مجاز برای کروم و نیکل وجود ندارد، زیرا غلظت زمینه این عناصر در خاک، از استاندارد آن‌ها بالاتر است.

9- نتیجه‌گیری

مرور مستندات نشان می‌دهد که برای تعیین حدود مجاز آلاینده‌ها در استاندارد ملی 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. در مقایسه این دو راهبرد، مشاهده می‌شود که حدود مجاز استاندارد تعیین شده در کشورهای مختلف بسیار متفاوت‌اند، لذا انتخاب و پذیرش عینی حدود بیشینه مجاز غلظت عناصر سنگین در کمپوست

حاصل از پسماند شهری که متناسب با شرایط کشور دیگری تعیین گردیده است اساساً فاقد وجاهت علمی خواهد بود. از طرف دیگر باتوجه‌به حساسیت چنین موضوعی و تفاوت‌ها در کیفیت تولیدات و شرایط و نحوه مصرف کمپوست و نیز شرایط خاک و گیاه در کشورهای مختلف، اتخاذ راهبرد اول بسیار پر خطر خواهد بود؛ بنابراین معقول‌تر و معتبرتر این است که از راهبرد دوم پیروی نموده و حدود مجاز متناسب با شرایط کشور تعیین شود.

تعیین حدود بیشینه مجاز عناصر سنگین در این مواد وابسته به عوامل متعددی است و برای این کار بایستی ابتدا داده‌ها و اطلاعاتی از شرایط عوامل تأثیرگذار بر این حدود در کشور به دست آید. خوشبختانه در شرایط ایران با مجموعه پژوهش‌های انجام شده، غلظت زمینه عناصر سنگین در خاک مشخص گردیده، حدود آلایندگی این عناصر در خاک نیز رسماً، توسط سازمان حفاظت از محیط‌زیست اعلام شده است؛ لذا با عنایت به نرخ مصرف، حدود بیشینه مجاز بر اساس روش کانادا قابل‌تعیین خواهد بود.

مطالعات نشان داد اعداد حدود بیشینه مجاز تعیین شده برای کاربرد در شرایط آمریکا تماماً بالاتر از اتحادیه اروپا (بعضاً تا 3 برابر) است. به نظر می‌رسد تاثیر بازدارندگی سایر قوانین مورد اجرا در آمریکا در رابطه با حفاظت محیط زیست و سلامت می تواند یکی از دلایل این موضوع باشد. ضمن اینکه پایش کیفی کمپوست‌های تولیدی در آمریکا و اروپا نشان داد که مقادیر غلظت عناصر سنگین در کمپوست‌های تولیدی این کشورها بسیار کمتر از حدود بیشینه اعلامی است.

باتوجه‌به مجموعه مباحث و بررسی‌های علمی منابع و نیز نظرات کارشناسان خبره، روش معرفی شده توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست کانادا برای کمپوست نوع B، از مبانی قوی علمی برخوردار بوده و مناسب‌ترین روش برای محاسبه حدود مجاز آلاینده‌ها در کمپوست حاصل از پسماند شهری در ایران است.

باتوجه‌به توضیحات گفته شده، با درنظرگرفتن میانگین و P95 غلظت این عناصر در کمپوست‌های تولیدی کشور (جدول 13) و قائل بودن به این حد که استاندارد پیشنهادی در هیچ آلاینده‌ای بیشتر از استاندارد فعلی نباشد، حدود مجاز آلاینده‌ها در کمپوست حاصل از پسماندهای شهری برای شرایط ایران به شرح زیر پیشنهاد می گردد:

جدول 13- حدود مجاز پیشنهادی (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) برای آلاینده‌های معدنی موجود در کمپوست*

آلاینده	استاندارد پیشنهادی	استاندارد فعلی
As	5	10
Cd	10	10
Cr	150**	150
Pb	100	200
Ni	120**	120
Co	25	25
Cu	650	650
Zn	1300	1300
Mo	5	5
Hg	5	5

*اعداد ارائه شده در ستون استاندارد پیشنهادی، صرفاً حاصل محاسبات نیستند و ملاحظاتی همچون اعداد پایش، عدم تجاوز از استاندارد فعلی نیز در آن لحاظ شده‌اند.

اعداد پیشنهادی در جدول 13 با در نظر گرفتن نرخ مصرف 25 تن در هکتار در سال به عنوان حدود مجاز بدون محدودیت مصرف، پیشنهاد شده‌اند. چنانچه این امکان فراهم بود که بتوان بر سقف مصرف، محدودیت اعمال کرد و با قوانین و مصوبات محکم آن را کنترل نمود، می‌شد اعداد بالاتری را نیز به عنوان حدود مجاز با محدودیت مصرف معرفی کرد. به عنوان مثال اگر نرخ مصرف کمپوست در 15 تن در هکتار در سال کنترل شود، حد مجاز با محدودیت مصرف برای عنصر سرب و کادمیم، به ترتیب 150 و 17 میلی‌گرم بر کیلوگرم محاسبه می‌شود، ولی از آن‌جایی که در حال حاضر ساز و کار قانونی برای کنترل سقف مصرف کمپوست در کشور وجود ندارد، نمی‌توان به راحتی حدود مجاز بالاتر را در نظر گرفت و اعداد بالاتر را به عنوان حدود مجاز استاندارد پیشنهاد کرد. امید است با پیشرفت روش‌های تهیه کمپوست از پسماندهای تجزیه پذیر شهری به ویژه استفاده فراگیر از روش جدا سازی پسماندها از مبدأ، کیفیت کمپوست‌های تولیدی کشور روز به روز ارتقا یابد و غلظت‌های عناصر سنگین در این کمپوست‌ها نه تنها در حدود استاندارد اعلامی بالا بلکه مانند کشورهای پیشرفته بسیار کمتر از این حدود باشد تا هیچ خطری از این محل، سلامت محیط زیست و مردم کشور را تهدید نکند. به موازات این موضوع البته بایستی با انجام بررسی‌های 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 قانونمندتر گردد تا کشور بتواند با حفظ ایمنی از خطرات عناصر آلاینده، از مزایای استفاده از کمپوست در اراضی کشاورزی به ویژه مواد آلی موجود در آنها برخوردار شود.

10- منابع

استاندارد آلودگی منابع خاک و راهنمای آن، سازمان حفاظت محیطزیست. 1392.

شهبازی، ک.، فتحی گردلیدانی، ا. و مارزی، م. 1401. بررسی وضعیت عناصر سنگین در خاک‌های ایران: مروری جامع و انتقادی بر مطالعات گزارش شده. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، 23(2)1211-1113.

یگانه، م. 1403. تعیین خطرپذیری استفاده از کمپوست زباله شهری در کشاورزی ایران. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی. شماره فروست: 65537. موسسه تحقیقات خاک و آب- کرج- ایران.

Akinci, G., Bilgin, M., Guven, D. and Erdin, E. 2008. Managing Organic Waste in Turkey: TheRelation Among the Characterization,PropertiesandResults.

Barral, M.T. and Nunez, R.P. 2011. Trace Elements in Compost Regulation: The Case of Spain, Waste Management 31 (2011) 407–410.

Biala, J. 2020. International Comparison of the Australian Standardfor Composts, Soil Conditionersand Mulches (AS4454 – 2012), Australian Organics Recycling Association (AORA), pp 48, Hove, SA 5048.

Brinton, W. 2000. Compost Quality Standards & Guidelines. Final report.

Cao, X., Williams, P.N., Zhan, Y., Coughlin, S.A., McGrath, J.W., Chin, J.P. and Xu, Y. 2023. Municipal solid waste compost: Global trends and biogeochemical cycling. Soil & Environmental Health 1 (2023) 100038.

Canadian Council of Ministers of the Environment, 2005. Guidelines for Compost Quality.

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.pd.

Municipal Solid Wastes (Management and Handling) Rules, 2000. Ministry of Environment and Forests, Govt. of India.

Presentation of the Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK), Available at: https://www.compostnetwork.info/wordpress/wp-content/uploads/Presentation-BGK-2014-03-12.pdf.

Siebert, S., and M. T. Jüngling, available at: https://www.kompost.de/uploads/media/Compost_Course_gesamt_01.pdf.

Shahbazi, K., Marzi, M. and Rezaei, H. 2020. Heavy metal concentration in the agricultural soils under the different climatic regions: a case study of Iran. Environmental Earth Sciences 79, 1-13.

USA Environmental Protection Agency (USEPA), 1995. A guide to the biosolid risk assessments for the EPA part 503 rule.