



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله مرور ساختار یافته

## بررسی روش‌های برآورد و سنجش انتشار گاز متان از محل‌های دفن پسماند (لندفیل‌ها): مطالعه مرور نظام‌مند

محمد حسن‌آبادی<sup>۲،۱</sup>، محمدصادق حسنونند<sup>۲،۱</sup>، محمد خان‌زاده<sup>۱</sup>، ساسان فریدی<sup>۲،۱</sup>، عادل مکمل<sup>۱</sup>، بیتا ملکیان اصفهانی<sup>۱</sup>، علی احمدی ارکمی<sup>۲</sup>، فاطمه مومنی‌ها<sup>۴،۱\*</sup>

- ۱- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
- ۲- مرکز تحقیقات آلودگی هوا، پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
- ۳- گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه سرا، گیلان، ایران
- ۴- مرکز تحقیقات مواد زائد جامد، پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

### چکیده

زمینه و هدف: تعیین میزان انتشار متان از محل‌های دفن پسماند (لندفیل‌ها)، اولین قدم در مدیریت آن است. هدف این مطالعه، مرور نظام‌مند روش‌های سنجش و برآورد انتشار گاز متان از محل‌های دفن پسماند است. روش بررسی: این مطالعه مرور نظام‌مند شامل مطالعات منتشر شده به زبان انگلیسی و فارسی طی بازه زمانی ژانویه سال ۲۰۰۵ تا ماه می سال ۲۰۲۳ در پایگاه داده‌های PubMed، Scopus و Web of Science (بررسی مقالات انگلیسی) و نیز SID، Magiran، و Google Scholar (بررسی مقالات فارسی) است.

یافته‌ها: پس از ارزیابی مطالعات، ۹۰ مطالعه ارائه دهنده اطلاعات در خصوص روش‌های سنجش و برآورد انتشار گاز متان در لندفیل‌های شهری انتخاب شد. نتایج حاصله نشان داد برآورد انتشار براساس مدل‌های پرکاربرد LandGEM و IPCC، با وجود هزینه کمتر و ارائه سریعتر نتایج، اغلب با عدم قطعیت نسبتاً زیادی همراه است. لذا روش‌های کمی و کیفی سنجش مستقیم جهت تعیین کمیت انتشار متان از لندفیل‌ها ترجیح داده می‌شود. سنجش میزان انتشار متان با تجهیزات قرائت مستقیم و چمبرهای تعیین شار بسته، برای اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای به ویژه متان از لندفیل‌ها بیشترین کاربرد را دارند.

نتیجه‌گیری: برآورد انتشار متان به عنوان یکی از گازهای گلخانه‌ای از منابع انتشار به مقامات مسئول این امکان را می‌دهد که از وضعیت موجود و آتی انتشار گاز متان آگاهی یافته و در نهایت استراتژی‌های کاهش را تدوین کنند. یافته‌های برآورد میزان انتشار متان از لندفیل‌ها، در برخی از شرایط دارای تفاوت معناداری با نتایج واقعی هستند و لذا گرچه این روش‌ها ابزاری مفید، سریع و به صرفه محسوب می‌شوند اما در استفاده از آنها بایستی به این امر توجه نمود.

### اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸  
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۷  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱  
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۲۱

واژگان کلیدی: انتشار متان، لندفیل، پسماند شهری، IPCC، LandGEM

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:  
fa.momeniha@gmail.com

Please cite this article as: Hssanabadi M, Hassanvand MS, Khanizadeh M, Faridi S, Mokammel A, Malekian Esfahani B, et al. Investigating methods of estimating and measuring methane emissions in municipal solid waste landfills: a systematic review. Iranian Journal of Health and Environment. 2024;17(3):595-630.

## مقدمه

بر اساس ماده دوم قانون مدیریت پسماند، به مواد جامد، مایع و گاز (غیر از فاضلاب) که به‌طورمستقیم یا غیرمستقیم حاصل از فعالیت انسان بوده و از نظر تولیدکننده آن زاید تلقی می‌شود، پسماند گفته می‌شود (۱). فعالیت‌های انسانی در شهرها منجر به تولید سالانه حدود بیش از ۲ میلیارد تن پسماند شهری می‌شود که در صورت مدیریت غیرعلمی و ناصحیح می‌تواند منجر به اثرات محیط‌زیستی و بهداشتی جبران‌ناپذیری شوند (۲-۶). در حقیقت، مدیریت صحیح پسماند بخش مهمی از برنامه سلامت عمومی جامعه و محیط‌زیست در نظر گرفته می‌شود (۶، ۷). یک سیستم مدیریت پسماند شامل اجزای مختلفی از تولید پسماند، تا جمع‌آوری، حمل و نقل، پردازش و دفع است (۵). رشد جمعیت، شهرنشینی و تغییر سبک زندگی عوامل مهمی هستند که اغلب منجر به افزایش نرخ تولید پسماند می‌شوند (۸). یکی از راه‌های مدیریت پسماند، دفن در زمین (لندفیل)ها است که مدیریت صحیح آن یکی از مسائل محیط‌زیستی در کشورهای با درآمد کم، متوسط و بالا است. کمبود زمین همراه با افزایش روزافزون تولید پسماند شهری و مخالفت جامعه با قرار گرفتن لندفیل‌ها در نزدیکی محل‌های مسکونی، مشکلاتی در زمینه دفع پسماند ایجاد کرده است. اغلب پسماند‌های شهری در لندفیل‌ها دفن می‌شوند که در صورت عدم مدیریت صحیح و اجرای لندفیل‌های مهندسی و بهداشتی، این گزینه مدیریت می‌تواند مشکلاتی نظیر آلودگی آب‌های زیرزمینی، انتشار بو، انتشار گازهای لندفیل همانند متان و خطر انتقال بیماری‌ها از طریق ناقلین بیماری را به همراه داشته باشد (۹، ۱۰).

گاز لندفیل یک محصول جانبی طبیعی از تجزیه مواد آلی در لندفیل‌ها تحت شرایط بی‌هوازی است. اجزای اصلی گاز لندفیل شامل، متان با ۴۵ تا ۶۰ درصد حجمی (جزء اصلی گاز طبیعی که در ابتدای فاز سوم شروع به تولید و انتشار می‌کند و در فاز چهارم به حداکثر مقدار خود می‌رسد)، دی‌اکسید کربن و مقادیر کمی نیتروژن ( $N_2$ )، اکسیژن ( $O_2$ )، آمونیاک ( $NH_3$ )،

سولفید هیدروژن ( $H_2S$ )، هیدروژن ( $H_2$ )، سولفید ( $S_2$ )، مونوکسید کربن ( $CO$ ) و همچنین ترکیبات آلی غیر متانی (Non Methane Organic Compounds) یا به اختصار (NMOCs) مانند تری‌کلرواتیلن، بنزن و وینیل کلرید است (۱۱-۱۵). متان، یک گاز گلخانه‌ای مهم به شمار می‌رود که بر دما و شرایط اقلیمی زمین تأثیر می‌گذارد (۱۶).

متان در فرآیند فتوشیمیایی از تروپوسفری نقش بسزایی دارد و علاوه بر اهمیت آن در گرمایش جهانی، به عنوان پیش‌ساز آلاینده از ن عمل خواهد کرد و سبب افزایش غلظت این آلاینده در هوای مناطق اطراف انتشار آن می‌گردد (۱۷، ۱۸). بر اساس مطالعات انجام شده در دنیا، لندفیل‌های شهری، سومین منبع بزرگ انتشار متان ناشی از فعالیت‌های انسانی محسوب می‌شوند (۱۹). متان نقش قابل توجهی در تغییرات اقلیم دارد و یک گاز گلخانه‌ای قوی با عمری کوتاه، دارای پتانسیل گرمایش جهانی ۱۰۰ ساله ۲۷-۳۰ (به‌طور میانگین ۲۸) و پتانسیل گرمایش جهانی ۲۰ ساله ۸۱-۸۳ (به‌طور میانگین ۸۲) برابر دی‌اکسیدکربن است (۲۰). طبق گزارش‌های هیئت بین دولتی تغییر اقلیم (Intergovernmental Panel on Climate Change) به اختصار (IPCC)، بعد از دی‌اکسیدکربن، حدود ۱۶ درصد از انتشارات جهانی گازهای گلخانه‌ای، مربوط به گاز متان است (۲۱، ۲۲). متان در طی تولید و حمل و نقل زغال‌سنگ، گاز طبیعی و نفت منتشر می‌شود. انتشار متان همچنین ناشی از دامداری‌ها و سایر شیوه‌های کشاورزی، استفاده از زمین و تجزیه پسماند‌های آلی در لندفیل‌های شهری است (۱۶). بنا به گزارش سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا (US. EPA) لندفیل‌های شهری، سومین منبع بزرگ انتشار متان ناشی از فعالیت‌های انسانی در ایالات‌متحده هستند (۱۹). از آنجایی که متان در مقایسه با دی‌اکسیدکربن هم یک گاز گلخانه‌ای با پتانسیل گرمایش جهانی بیشتر است و هم عمر کوتاهی دارد، کاهش میزان انتشار آن، تأثیر سریع و قابل توجهی بر پتانسیل گرمایش جهانی خواهد داشت (۲۲). کمی‌سازی انتشار گازهای لندفیل برای ارزیابی عملکرد پوشش

مربوط به تعیین میزان انتشار گاز متان تولید شده از لندفیل‌ها با تکیه بر تجربیات جهانی و (۲) معرفی مدل‌ها و روش‌های پرکاربرد در این زمینه انجام شده است.

## مواد و روش‌ها

### جستجو و شناسایی مطالعات

در مطالعه حاضر، یک مرور نظام‌مند بر روی مطالعات منتشر شده از ژانویه سال ۲۰۰۵ تا می سال ۲۰۲۳ میلادی با هدف بررسی روش‌های برآورد و سنجش انتشار گاز متان از لندفیل‌ها با استفاده از کلید واژه‌های مرتبط با موضوع (Landfill, Emission, CH<sub>4</sub>, Methane, Waste Disposal, Disposal Site, MSW, Monitor, Measurement, Municipal Solid Waste Estimate) انجام شد. بررسی مطالعات از پایگاه‌های جستجوی الکترونیکی استناد جهانی (PubMed, Web of Science, Scopus) و نیز SID, Magiran, Google Scholar (به منظور تعیین وضعیت مطالعات فارسی در این زمینه) جهت شناسایی مطالعات مربوطه صورت گرفت. در این مطالعه، مطالعاتی بررسی شد که با توجه به اهداف و معیارهای ورود (مقالات غیر مروری بر اساس هدف مطالعه با زبان انگلیسی و فارسی) و خروج (مقالات مروری و متاآنالیز، مقالات خط مشی، چکیده‌ها، نامه‌ها، ارتباطات کوتاه و فصل‌هایی در کتاب‌ها با زبان غیر انگلیسی و غیر فارسی)، واجد شرایط بودند. نتایج حاصل از جستجو، به نرم افزار EndNote21 برای پردازش منتقل شد.

### انتخاب مطالعات

پس از بررسی جامع، مطالعات ارائه دهنده اطلاعات در خصوص روش‌های برآورد و سنجش انتشار گاز متان از لندفیل‌ها انتخاب شدند. در این مطالعه پس از گردآوری مستندات، از روش reviews and meta-analyses (PRISMA) preferred reporting items for systematic طراحی مطالعه، استراتژی جستجو و انتخاب مطالعه استفاده

لندفیل و سیستم‌های جمع‌آوری گاز ضروری است (۲۳). در داخل یک لندفیل، فاکتورهای متعددی بر میزان متانی که تولید و منتشر می‌شود، تأثیر می‌گذارد. این فاکتورها عبارتند از (۳): (۱) مقدار کل مواد دفن شده و ترکیبات آن، به ویژه قسمت مواد آلی قابل تجزیه مانند پسماندهای غذایی؛ (۲) ویژگی‌های لندفیل، مانند اندازه، مواد پوششی، استفاده از سیستم‌های گردش مجدد شیرابه و شرایط آب و هوایی که در آن واقع شده است؛ (۳) برنامه زمان‌بندی استفاده از آن، گسترش و نگهداری سیستم جمع‌آوری گاز لندفیل پس از دفن پسماند؛ (۴) بخشی از متان که با عبور از مواد پوششی لندفیل پسماند اکسید می‌شود و قبل از رفتن به جو به دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شود. تا زمانی که بخش عمده‌ای از مواد آلی در ترکیبات پسماند دفن شده باشد، به طور مداوم گاز لندفیل و به طبع متان منتشر می‌شود (۳). تعیین مقدار دقیق و آگاهی از میزان تولید گاز لندفیل و انتشار گازهای گلخانه‌ای منتشر شده به جو به تصمیم‌گیران در عرصه مدیریت پسماند کمک می‌کند تا بینش بهتری بر کنترل اثرات محیط‌زیستی لندفیل داشته باشند. چنین اطلاعاتی در مورد تولید و راه‌اندازی سیستم‌های جمع‌آوری متان هنگام طراحی یا ارزیابی فرآیندهای انرژی مبتنی بر گازهای لندفیل ضروری است (۲۴). رویکرد مدل‌سازی برآورد انتشار به عنوان یکی از روش‌های موجود، هزینه کمتری دارند و نتایج نسبتاً سریعی را ارائه می‌دهد (۲۵). نتایج حاصل از مدل‌سازی اغلب با عدم قطعیت همراه است. به همین منظور، روش‌های مختلفی برای تعیین کمیت انتشار متان از لندفیل‌ها به صورت مستقیم وجود دارد، با این حال هیچ یک از آنها به عنوان یک روش مرجع بین‌المللی شناخته نشده است (۲۶).

در زمینه بررسی میزان انتشار متان روش‌های مختلفی (مدل‌سازی و سنجش مستقیم) وجود دارد (۲۷)؛ این در حالیست که تاکنون به صورت نظام‌مند، این موضوع بررسی نشده است. لذا با توجه به اهمیت موضوع و نبود مطالعه‌ای جامع و یکپارچه در خصوص روش‌های مختلف تعیین مقدار انتشار متان، مطالعه حاضر با هدف (۱) یکپارچه‌سازی اطلاعات

وسیله نمونه‌برداری، روش اندازه‌گیری مستقیم و روش برآورد میزان انتشار متان) براساس اهداف مطالعه و معیارهای لازم جهت انتخاب مقالات از مطالعات، در یک فایل مجزا جمع‌آوری گردید.

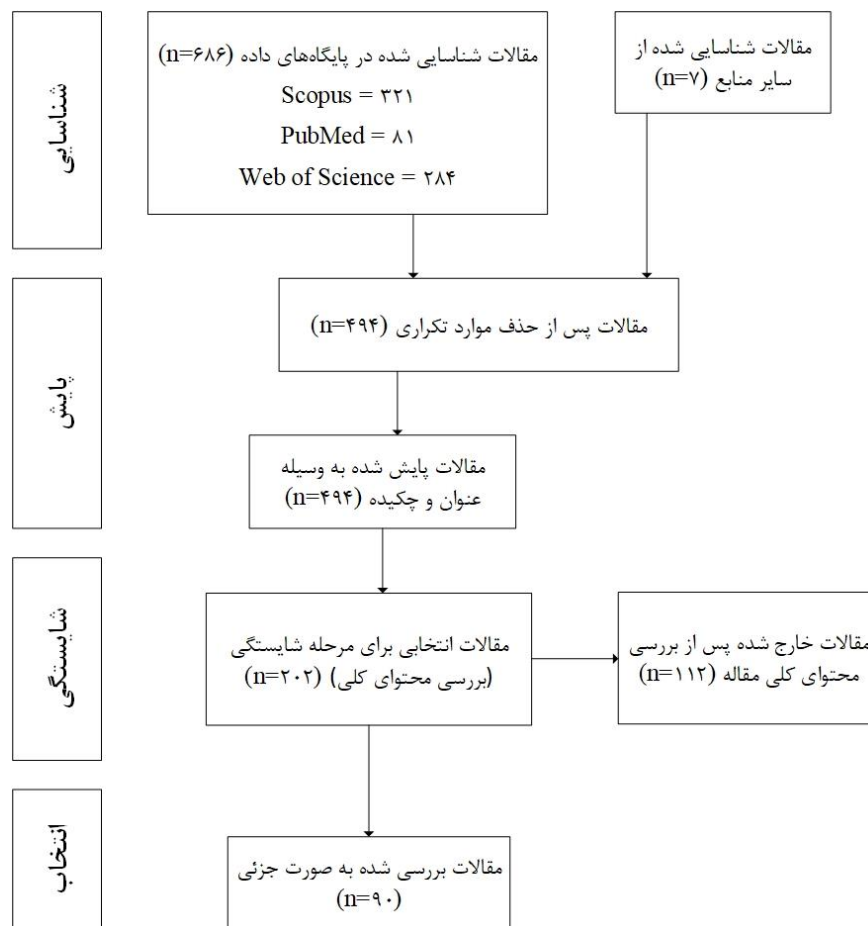
### یافته‌ها

در شکل ۱، نمودار موارد گزارش دهی ترجیحی جهت انتخاب مطالعات (PRISMA) با توجه به هدف مطالعه ارائه شده است.

گردید (۲۸). بر اساس الگوی جامع PRISMA، محققین پس از حذف مطالعات تکراری در پایگاه‌های مختلف، در ابتدا با بررسی عنوان و چکیده مطالعات شناسایی شده و در ادامه به‌طور جزئی‌تر با بررسی متن کامل، مطالعات متناسب با اهداف و سؤالات پژوهشی را انتخاب کردند.

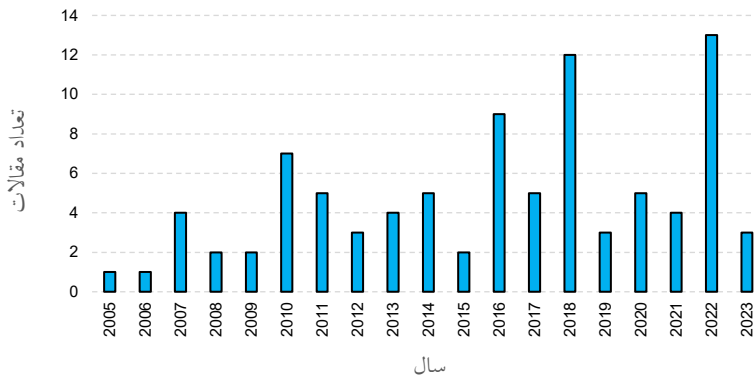
### استخراج داده

همچنین اطلاعات مورد نیاز عمومی (کشور و شهر مطالعه، عنوان مقاله، سال چاپ و نام نویسنده) و خاص (مساحت لندفیل مورد مطالعه، وضعیت لندفیل، سن لندفیل، مدت و



شکل ۱- مراحل ارزیابی مطالعات براساس الگوی PRISMA

در شکل ۲ مطالعات منتشر شده در خصوص برآورد و سنجش متان به ازای سال ارائه شده است.

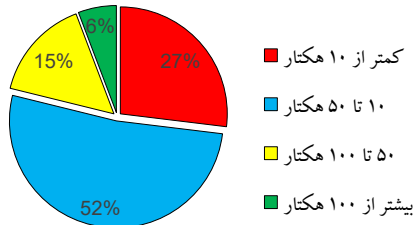


شکل ۲- مطالعات منتشر شده در خصوص برآورد و سنجش متان از لندفیل به ازای سال

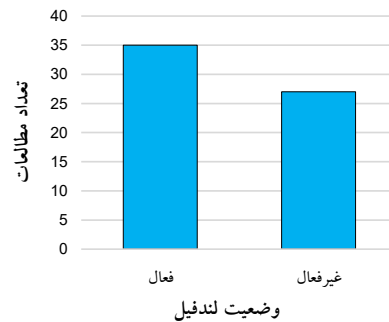
(وضعیت لندفیل، مساحت لندفیل و سن لندفیل) نشان می‌دهد.

شکل ۳، وضعیت مطالعات بررسی شده را بر اساس مشخصات لندفیل

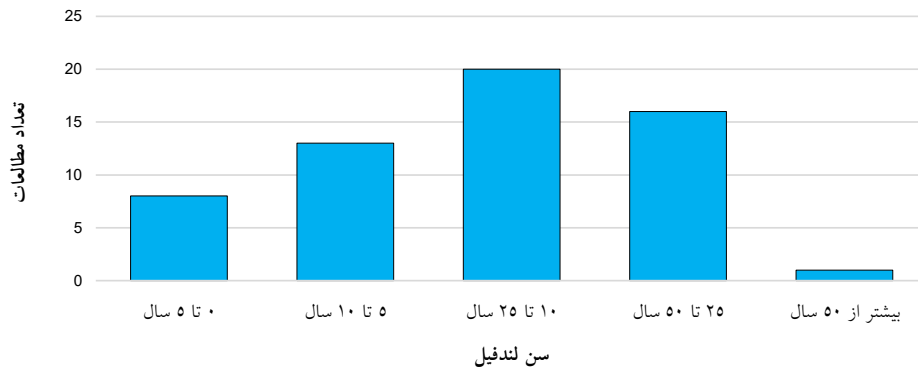
a طبقه بندی مقالات از نظر مساحت لندفیل



b



c



شکل ۳- مطالعات بررسی شده بر اساس مشخصات لندفیل: (a) وضعیت لندفیل، (b) مساحت لندفیل، (c) سن لندفیل

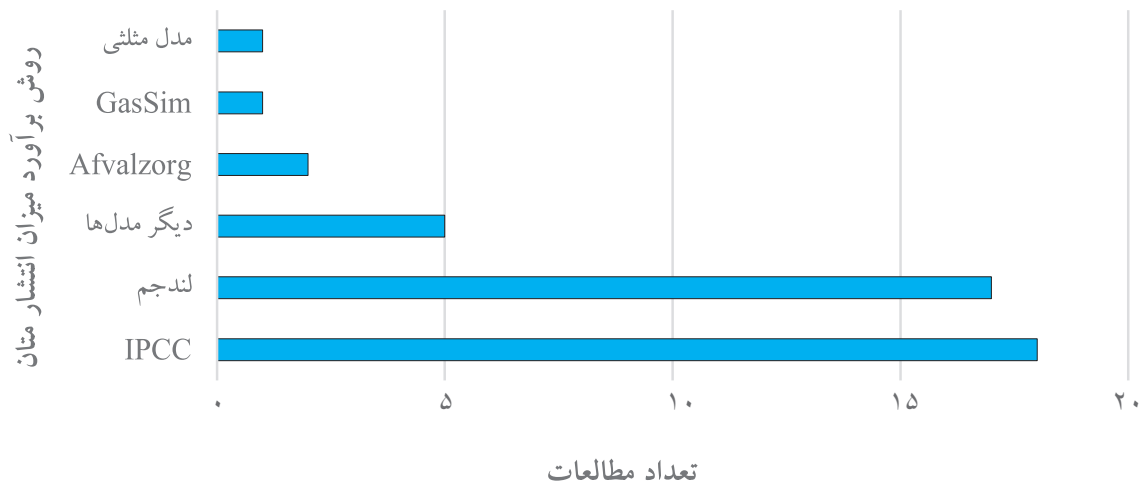
جدول ۱ مدل‌های استفاده شده جهت برآورد انتشار متان را در مطالعات بررسی شده نشان می‌دهد.

جدول ۱- مدل‌های استفاده شده جهت برآورد انتشار متان در مطالعات بررسی شده به ترتیب سال

رفرنس	روش برآورد متان از لندفیل‌ها					سال	شهر	کشور	نویسنده
	Other	Triangular Method (MTM)	GasSim	IPCC	LandGEM				
(۲۹)				*		۲۰۰۹	-	تایلند	Wangyao et. al.
(۳۰)					*	۲۰۱۰	رشت	ایران	Saeidi et. al.
(۳۱)			*	*	*	۲۰۱۰	توسکانی	ایتالیا	Raco et. al.
(۳۲)				*		۲۰۱۰	-	آلمان	Gebert et. al.
(۳۳)		*		*		۲۰۱۱	دهلی	هند	Chakraborty et. al.
(۳۴)	*a				*	۲۰۱۱	پالرمو	ایتالیا	Di Bella et. al.
(۳۵)				*	*	۲۰۱۱	بیروت	لبنان	El-Fadel et. al.
(۳۶)				*	*	۲۰۱۲	-	تایلند	Chiemchaisri et. al.
(۳۷)				*		۲۰۱۳	کوالا لامپور	مالزی	Abushammala et. al.
(۲۴)					*	۲۰۱۳	-	آمریکا	Amini et. al.
(۳۸)					*	۲۰۱۴	تهران	ایران	Atabi et. al.
(۳۹)				*	*	۲۰۱۴	-	دانمارک	Mou et. al.
(۱۵)	*b					۲۰۱۵	تهران	ایران	Pazoki et. al.
(۴۰)					*	۲۰۱۶	جهرم	ایران	Talaiekhazani et. al.
(۴۱)	*c			*		۲۰۱۶	تهران	ایران	Nojedehi et. al.
(۴۲)					*	۲۰۱۷	جیرفت	ایران	Ghasemzade et. al.
(۴۳)				*	*	۲۰۱۷	گوآهاتی	هند	Gollapalli et. al.
(۴۴)					*	۲۰۱۷	ادنسه	دانمارک	Aghdam et. al.
(۴۵)				*		۲۰۱۸	شاهین شهر	ایران	Rezaee et. al.
(۴۶)				*		۲۰۱۸	لانم چابانگ	تایلند	Sutthasil et. al.
(۴۷)				*		۲۰۱۸	مادرید	اسپانیا	Sánchez et. al.
(۴۸)					*	۲۰۲۰	رشت	ایران	Ahmadi Orkomi et. al.
(۴۹)					*	۲۰۲۰	تهران، شیراز، مشهد، اصفهان، کرج	ایران	Mohseni et. al.
(۵۰)					*	۲۰۲۰	اونتاریو	کانادا	Abdel Mohsen et. al.
(۵۱)				*	*	۲۰۲۰	هوشی مین	ویتنام	Ta Bui et. al.
(۵۲)				*	*	۲۰۲۱	-	ایران	Ahmadi Moghadam et. al.
(۵۳)				*		۲۰۲۱	-	ایسلند	Scheutz et. al.
(۵۴)				*		۲۰۲۲	کرج	ایران	Mohammad Hassani et. al.
(۵۵)				*		۲۰۲۲	-	اسپانیا	Delgado et. al.
(۵۶)	*d					۲۰۲۲	-	آمریکا	Yesiller et. al.
(۵۷)	*c					۲۰۲۲	کرج	ایران	Khazaei et. al.
(۵۸)					*	۲۰۲۳	قم	ایران	Jalayer et. al.

a. مدل Ehrig، b. مدل LMOP، c. مدل LEAP، d. مدل CALMIM، e. مدل ILGAM

در شکل ۴، مطالعات از نظر روش‌های برآورد میزان انتشار متان مقایسه شده است.



شکل ۴- مدل‌های مورد استفاده برآورد انتشار متان از لندفیل‌ها

شکل ۵، سهم و نوع ابزار نمونه‌برداری از لندفیل‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۵- روش‌های نمونه‌برداری مورد استفاده برای متان از لندفیل‌ها در مطالعات مورد بررسی

جدول ۲ روش‌های اندازه‌گیری مستقیم انتشار متان را در مطالعات بررسی شده نشان می‌دهد.

جدول ۲- روش‌های اندازه‌گیری مستقیم انتشار متان در مطالعات بررسی شده به ترتیب سال

نویسنده	کشور	شهر	سال	لندفیل‌ها					
				تعمیرات ساختمانی	کوارانایس گردابی	پراکنده‌گی گاز ردیاب	متان در زمین‌های آتالیور بر تایل	دوربین‌های حرارتی ماهواره	طیف‌سنجی‌های قابل حمل
McBain et. al.	کانادا	اونتاریو	۲۰۰۵						*a
Abichou et. al.	آمریکا	لئون	۲۰۰۶	*					
Chen et. al.	تایوان	تایپه	۲۰۰۷	*					
Rawat et. al.	هند	احمدآباد بنگلور چنای دهرادان کلکته دهلی	۲۰۰۷	*					
Lohila et. al.	فنلاند	هلسینکی	۲۰۰۷	*	*				
Chiemchaisri et. al.	تایلند	ناکون پاتوم	۲۰۰۷	*					
Sanderson et. al.	شیلی	سانتیاگو	۲۰۰۸	*		*			
Zhang et. al.	چین	هانگژو	۲۰۰۸	*					
Wangyao et. al.	تایلند	-	۲۰۰۹	*					
Xiaoli et. al.	چین	شانگهای	۲۰۰۹			*			
He'roux et. al.	کانادا	مترال	۲۰۱۰			*			*b
Abichou et. al.	آمریکا	-	۲۰۱۰	*					
Capaccioni et. al.	ایتالیا	فانو	۲۰۱۰	*		*			
Chanton et. al.	آمریکا	فلوریدا	۲۰۱۰	*					
Raco et. al.	ایتالیا	توسکانی	۲۰۱۰	*		*			
Gebert et. al.	آلمان	-	۲۰۱۰	*					
Chakraborty et. al.	هند	دهلی	۲۰۱۱	*					
Di Bella et. al.	ایتالیا	پالرمو	۲۰۱۱	*		*			
Scheutz et. al.	دانمارک	فاکس لادپالس	۲۰۱۱	*	*	*			
Schroth et. al.	سوئیس	لستل	۲۰۱۱	*	*	*			
El-Fadel et. al.	لبنان	بیروت	۲۰۱۱	*		*			
Chiemchaisri et. al.	تایلند	-	۲۰۱۲	*					
Pratt et. al.	نیوزلند	تآپو	۲۰۱۲	*					
Douglas Goldsmith Jr et. al.	آمریکا	-	۲۰۱۲			*	*		
Di Trapani et. al.	ایتالیا	پالرمو	۲۰۱۳	*		*			



ادامه جدول ۲- روش‌های اندازه‌گیری مستقیم انتشار متان در مطالعات بررسی شده به ترتیب سال

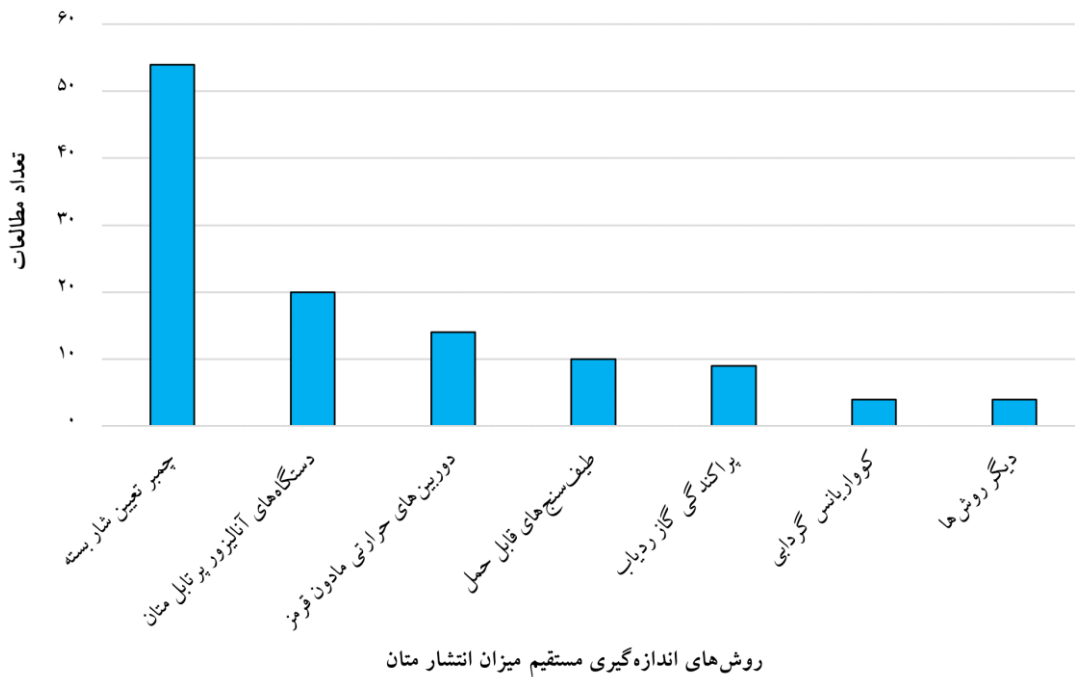
نویسنده	کشور	شهر	سال	لندفیل‌ها		رفرنس
				دوره‌های آنتی‌زور پر تایل متان دوره‌های حرارتی ماده‌ن قرمز طیف‌سنجی‌های قابل حمل دیگر روش‌ها	دوره‌های آنتی‌زور پر تایل متان دوره‌های حرارتی ماده‌ن قرمز طیف‌سنجی‌های قابل حمل دیگر روش‌ها	
Harborth et. al.	آلمان	هایده	۲۰۱۳	*		(۷۷)
Abushammala et. al.	مالزی	کوالا لامپور	۲۰۱۳	*		(۳۷)
Amini et. al.	آمریکا	-	۲۰۱۳		*c	(۲۴)
Scheutz et. al.	دانمارک	سووندبورگ	۲۰۱۴	*	*	(۷۸)
Gonzalez-Valencia et. al.	مکزیک	-	۲۰۱۴	*		(۷۹)
Jeong et. al.	کره جنوبی	-	۲۰۱۴	*	*	(۸۰)
Jakober et. al.	آمریکا	-	۲۰۱۵	*	*	(۸۱)
Lucernoni et. al.	ایتالیا	میلان	۲۰۱۶	*		(۸۲)
Lucernoni et. al.	ایتالیا	میلان	۲۰۱۶	*		(۸۳)
Park et. al.	کره جنوبی	آنسوئنگ	۲۰۱۶	*	*	(۸۴)
Riddick et. al.	انگلیس	سافک	۲۰۱۶		*	(۸۵)
Wang et. al.	چین	شیامن	۲۰۱۶	*		(۸۶)
Gonzalez-Valencia et. al.	مکزیک	-	۲۰۱۶	*	*	(۸۷)
Tabran Lando et. al.	اندونزی	ماکاسار	۲۰۱۶	*	*	(۸۸)
Lucernoni et. al.	ایتالیا	میلان	۲۰۱۷	*	*	(۸۹)
Gollapalli et. al.	هند	گوآهاتی	۲۰۱۷	*		(۴۳)
Allen et. al.	انگلیس	-	۲۰۱۷		*	(۹۰)
Aghdam et. al.	دانمارک	ادنسه	۲۰۱۷	*		(۴۴)
Ngwabie et. al.	کامرون	-	۲۰۱۸	*		(۹۱)
Obersky et. al.	استرالیا	ایپسویچ	۲۰۱۸	*		(۹۲)
Rees-White et. al.	انگلیس	-	۲۰۱۸	*	*	(۲۶)
Shen et. al.	چین	شی آن	۲۰۱۸	*		(۹۳)
Sutthasil et. al.	تایلند	لانی چابانگ	۲۰۱۸	*		(۴۶)
Fjelsted et. al.	دانمارک	راسکیله هولپاک	۲۰۱۸	*	*	(۹۴)
Izumoto et. al.	ژاپن	سایتامما	۲۰۱۸	*	*	(۹۵)
Bian et. al.	چین	شی آن شانگهای	۲۰۱۸	*		(۹۶)
Bourn et. al.	انگلیس	-	۲۰۱۸	*		(۹۷)

ادامه جدول ۲- روش‌های اندازه‌گیری مستقیم انتشار متان در مطالعات بررسی شده به ترتیب سال

ردیف	روش‌های اندازه‌گیری مستقیم انتشار متان از				سال	شهر	کشور	نویسنده
	دیگر روش‌ها	طیف‌سنجی‌های قابل حمل	دوربین‌های حرارتی مادون قرمز	لندفیل‌ها				
(۹۸)			*	*	۲۰۱۸	اتوکرا	اسپانیا	Castro Gámez et. al.
(۴۷)			*	*	۲۰۱۸	مادرید	اسپانیا	Sánchez et. al.
(۹۹)	*b				۲۰۱۹	کبک	کانادا	Faubert et. al.
(۱۰۰)			*	*	۲۰۱۹	-	کره جنوبی	Jeong et. al.
(۱۰۱)	*				۲۰۱۹	پاریس	فرانسه	Xueref-Remy et. al.
(۱۰۲)				*	۲۰۲۰	پکن	چین	Li et. al.
(۵۰)			*		۲۰۲۰	اونتاریو	کانادا	Abdel Mohsen et. al.
(۱۰۳)	*				۲۰۲۱	-	انگلیس	Bakkaloglu et. al.
(۵۳)	*		*		۲۰۲۱	-	ایسلند	Scheutz et. al.
(۱۰۴)				*	۲۰۲۱	-	استرالیا	Reinelt et. al.
(۱۰۵)	*			*	۲۰۲۲	-	انگلیس	Fraser-McDonald et. al.
(۱۰۶)	*			*	۲۰۲۲	-	انگلیس	Fraser-McDonald et. al.
(۱۰۷)			*	*	۲۰۲۲	هولیاک	دانمارک	Kissas et. al.
(۱۰۸)				*	۲۰۲۲	-	آمریکا	Delkash et. al.
(۱۰۹)			*	*	۲۰۲۲	-	اسپانیا	Delgado et. al.
(۵۵)				*	۲۰۲۲	-	اسپانیا	Delgado et. al.
(۱۱۰)				*	۲۰۲۲	مترال	کانادا	Williams et. al.
(۱۱۱)				*	۲۰۲۲	دلنا	کانادا	Wong et. al.
(۲۳)				*	۲۰۲۲	شی‌آن	چین	Xie et. al.
(۵۶)	*	*	*	*	۲۰۲۲	-	آمریکا	Yesiller et. al.
(۱۱۲)			*	*	۲۰۲۲	-	دانمارک	Duan et. al.
(۱۱۳)			*	*	۲۰۲۳	برازیلیا	برزیل	Rodrigues et. al.
(۱۱۴)				*	۲۰۲۳	لنکستر	انگلیس	Takriti et. al.

LIDAR. جذب افتراقی d. نقشه برداری ستون شعاعی، c. چمبر تعیین شار باز، b. موازنه جرمی، a.

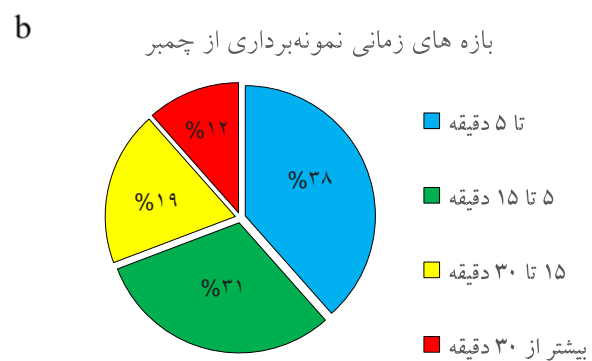
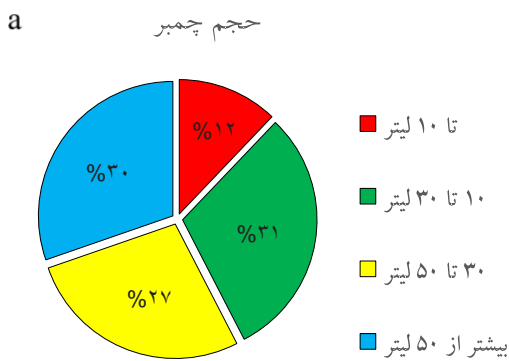
در شکل ۶، نمودار روش‌های اندازه‌گیری مستقیم انتشار متان در مطالعات مورد بررسی ارائه شده است.



شکل ۶- روش‌های اندازه‌گیری مستقیم انتشار متان در مطالعات مورد بررسی

میزان انتشار متان به وسیله چمبر تعیین شده است نشان می‌دهد.

شکل ۷، وضعیت طبقه‌بندی حجم چمبرهای تعیین شار بسته و بازه‌های نمونه‌برداری از آن را در بین مطالعاتی که



شکل ۷- سهم مطالعات براساس (a) حجم چمبر مورد استفاده و (b) بازه‌های زمانی نمونه‌برداری از چمبر

## بحث

نمودار موارد گزارش دهی ترجیحی جهت انتخاب مطالعات (PRISMA) با توجه به هدف مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. پس از جست‌وجو در پایگاه‌های داده، به منظور تعیین وضعیت مطالعات فارسی در این زمینه، ۷ مقاله از پایگاه Google Scholar به مطالعه افزوده شد. پس از شناسایی و حذف مطالعات تکراری در پایگاه‌های علمی مختلف ۴۹۴ مقاله باقی ماند. در این مرحله، عناوین مستندات توسط دو نفر از اعضای تیم مطالعه بررسی و مقالاتی که از لحاظ عنوان و چکیده متناسب و مطابق با موضوع بودند انتخاب شدند (تعداد مطالعه باقیمانده: ۲۰۲). در مرحله بعد، نویسندگان با نگاهی دقیق‌تر به بررسی کل محتوای مطالعات انتخابی از مراحل قبل پرداختند و مطالعاتی که با اهداف مطالعه و الگوی انتخاب مقالات همخوانی نداشت از ادامه روند مطالعه خارج شدند (تعداد مطالعه باقیمانده: ۹۰). در پایان، داده‌های مد نظر با تمرکز بر سنجش و برآورد میزان انتشار گاز متان تولید شده از لندفیل‌های شهری استخراج گردید.

مقدار پسماند دفن شده می‌تواند مستقیماً بر تولید گازهای لندفیل از جمله متان تأثیر بگذارد. بنابراین ویژگی‌های لندفیل، مانند اندازه و مساحت آن می‌تواند حاکی از مقدار پسماند دفن شده باشد (۳، ۱۱۵). بنابراین انتظار می‌رود در لندفیل‌هایی با مساحت بالاتر، میزان پسماند بیشتری دفن شده باشد و در نتیجه میزان پسماند بیشتر، منجر به تولید میزان گاز لندفیل بیشتری می‌شود. شکل ۳ قسمت (a)، سهم بندی لندفیل‌های مورد مطالعه را از لحاظ مساحت لندفیل نشان می‌دهد. از ۹۰ مطالعه مورد بررسی، ۵۲ مطالعه مساحت لندفیل سنجش شده را گزارش کرده بودند که در ۲۷ مطالعه، مساحت لندفیل بررسی شده بیشتر از ۱۰۰ ha گزارش شده است.

همانطور که اشاره شد، تا زمانی که مواد آلی بخش عمده ترکیبات پسماند دفن شده باشد، به طور مداوم گاز لندفیل و در نتیجه متان منتشر می‌شود (۳). بنابراین از آن جایی که در لندفیل‌های فعال همچنان دفن صورت می‌گیرد و به تبع

آن دفن پسماند آلی نیز اتفاق می‌افتد انتظار می‌رود که تولید متان در لندفیل‌های فعال پررنگ‌تر باشد. شکل ۳ قسمت (b)، وضعیت لندفیل‌های مورد مطالعه را از نظر فعال بودن یا غیر فعال بودن نشان می‌دهد. از ۹۰ مطالعه مورد بررسی، ۵۱ مطالعه وضعیت لندفیل‌ها را گزارش کرده بودند که در این مطالعات، میزان انتشار متان در ۳۵ لندفیل فعال و ۲۷ لندفیل غیرفعال گزارش شده بود. لازم به توضیح است از آنجایی که در برخی از مطالعات چند لندفیل بررسی شده بود، مجموع لندفیل‌ها به طبع بیشتر از تعداد کل لندفیل‌ها بود.

با بالاتر رفتن سن لندفیل در صورت عدم دفن پسماند، میزان انتشار متان مطابق نرخ تجزیه پسماند کاهش می‌یابد. از آن جایی که تجزیه پسماند و تولید متان زمان‌بر است (به طور مثال پنجاه درصد کربن موجود در پسماندهای غذایی طی ۳/۶ سال به گاز لندفیل تجزیه می‌شود)، ممکن است تا مدت‌ها پس از بسته شدن لندفیل، انتشار متان از آن صورت بگیرد؛ بنابراین زمان دفن یا به عبارتی سن لندفیل یک فاکتور مهم در بحث تعیین میزان انتشار متان به شمار می‌رود (۳). شکل ۳ قسمت (c)، وضعیت لندفیل‌های مورد مطالعه را از لحاظ سن لندفیل (سال‌هایی که دفن پسماند در لندفیل انجام شده است) نشان می‌دهد. از مجموع مطالعات، در ۴۵ مطالعه سن لندفیل مورد بررسی گزارش شده است که در این مطالعات، دفن پسماند عمدتاً در لندفیل‌هایی با سن ۱۰ تا ۲۵ سال صورت گرفته بوده است.

در بررسی روش‌های تعیین میزان انتشار متان در لندفیل‌ها، ۷۶ مطالعه از روش‌های اندازه‌گیری و ۳۱ مطالعه از روش‌های برآورد برای تعیین میزان انتشار متان استفاده کرده‌اند. لازم به توضیح است از آن جایی که در برخی از مطالعات چند روش تعیین میزان انتشار متان بررسی و مقایسه شده است، مجموع تعداد مطالعات گزارش شده در نمودارها، بیشتر از تعداد کل مطالعات است. در ادامه روش‌های برآورد و سنجش انتشار گاز متان در لندفیل‌ها در دو بخش بررسی شده است:

$$G = WL_0ke^{-kt} \quad (1)$$

که در آن  $G$  میزان حجم متان تولید شده در واحد زمان،  $W$  جرم پسماند در لندفیل،  $L_0$  پتانسیل تولید متان (حجم متان تولید شده به ازای جرم پسماند مصرفی)،  $k$  نرخ تولید متان یا نرخ تجزیه پسماند و  $t$  زمان سپری شده پس از دفن پسماند است.

اکثر مدل‌های درجه اول بر اساس دو پارامتر پتانسیل تولید متان و نرخ تجزیه پسماند هستند. چالش اصلی در مدل‌سازی برآورد این پارامترها است زیرا این دو پارامتر تحت تأثیر فاکتورهای متفاوتی از جمله میزان پسماند دفن شده، ترکیب پسماند، میزان رطوبت، دما و زمان تاخیر در تولید گاز هستند. در نتیجه، نتایج حاصل از مدل‌هایی که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند دارای عدم قطعیت زیادی هستند. این نتایج از ۵ تا ۱۱۰۹ درصد متفاوت است (۱۱۹). به همین دلیل، بررسی و برآورد خواص بیوشیمیایی پسماندها برای تعیین مقادیر پتانسیل تولید متان و نرخ تجزیه پسماند از اهمیت قابل توجهی برخوردار است (۱۱۶). به عنوان پارامترهای اساسی، مقادیر پتانسیل تولید متان و نرخ تجزیه پسماند برای پسماند شهری و هر یک از اجزای آن به طور گسترده در مطالعات مختلف گزارش شده است. علاوه بر این، مطالعات مروری مختلفی بر روی تجزیه بی‌هوازی، پتانسیل تولید متان از پسماند شهری، فرآیندهای تولید بیوگاز، مدل‌های تولید گاز لندفیل و فرآیندهای اکسیداسیون متان انجام شده است (۱۲۲-۱۳۱).

پتانسیل تولید متان ( $L_0$ ) به عنوان حجم متانی تعریف می‌شود که در اثر تجزیه جرم مشخصی پسماند در شرایط ایده‌آل تولید می‌شود (۱۲۷). این پارامتر اغلب برای اشاره به بازده نهایی متان، یعنی حداکثر متان تولید شده به ازای جرم پسماند در شرایط بی‌هوازی استفاده می‌شود. البته مقدار پتانسیل تولید متان تحت تأثیر فاکتورهای متعددی از جمله عوامل فیزیکی و محیطی (به عنوان مثال، رطوبت، دما و اندازه ذرات) است که بر تولید متان تأثیر می‌گذارند (۱۳۲). در متون مختلف، روش‌های

الف) روش‌های برآورد میزان انتشار متان از لندفیل‌ها با توجه به مشکلات در پایش دقیق انتشار گازهای گلخانه‌ای در کل لندفیل‌ها، رویکردهای مدل‌سازی اعمال می‌شوند (۱۱۶). رویکرد مدل‌سازی برآورد انتشار، به عنوان یکی از روش‌های موجود، هزینه کمتری دارند و نتایج نسبتاً سریعی را ارائه می‌دهد (۲۵). هدف نهایی مدل‌سازی ارائه میزان تولید گاز لندفیل نزدیک به شرایط واقعی است (۱۱۷). امروزه مدل‌های عددی و ریاضی زیادی جهت برآورد گازهای منتشره از لندفیل وجود دارد. این مدل‌ها عمدتاً به صورت درجه صفر، اول و دوم و یا چند فازی توسعه یافته‌اند. با این حال، مدل‌های درجه دوم یا مدل‌های چندفازی معمولاً مورد استفاده قرار نمی‌گیرند چرا که فرایند مدل‌سازی را پیچیده می‌کنند و پارامترهای مورد نیاز در هر مدل اغلب آنقدر نامطمئن هستند که بر دقت نتایج مدل تأثیر منفی می‌گذارند (۱۱۸). به همین ترتیب، مدل‌های درجه صفر، فرآیندهای تولید گاز لندفیل بیولوژیکی را منعکس نمی‌کنند. به دلیل این محدودیت‌ها، مدل‌های ساده‌سازی‌شده مبتنی بر تجزیه پسماند درجه اول (First-Order Waste Decay یا به اختصار FOD) توسعه یافته‌اند (۱۱۹).

مدل‌های تجزیه پسماند درجه اول به عنوان یکی از روش‌های پرکاربرد در برآورد میزان انتشار متان استفاده می‌شوند. برآورد به وسیله این مدل‌های درجه اول با فرض این اصل که بخش آلی پسماند طی سال‌های متمادی تجزیه شده و به متان و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شود، انجام می‌شود. اگر شرایط تجزیه ثابت باشد، نرخ تولید متان صرفاً به میزان کربن آلی باقیمانده در پسماند بستگی دارد. محاسبه میزان انتشار متان در این مدل‌ها با کسر بخشی از متان که جمع‌آوری و بازیابی می‌شود و بخشی که اکسید می‌شود بدست می‌آید (۱۲۰).

برای هر مقدار پسماند، مدل‌های مبتنی بر تجزیه پسماند درجه اول در نظر می‌گیرند که با افزایش زمان، نرخ تولید متان به صورت نمایی کاهش می‌یابد. معادله ۱ نمایشگر فرمول محاسبه میزان حجم متان تولید شده در مدل‌های درجه اول است (۱۲۱):

چندین مدل درجه اول که به صورت گسترده در مطالعات استفاده شده‌اند عبارتند از:

مدل LandGEM (Landfill Gas Emissions Model)، مدل اروپایی ثبت انتشار و انتقال آلاینده (European Pollutant Release and Transfer Register) یا به اختصار (E-PRTR)، مدل ایرانی (Iranian Landfill Gas Model) ILGAM، مدل IPCC، مدل GasSim، مدل Afvalzorg.

مدل‌های E-PRTR و LandGEM مدل‌های تک‌فازی هستند، در حالی که مدل‌های GasSim، IPCC و Afvalzorg مدل‌های چند فازی هستند که با دسته‌بندی پسماند به صورت دقیق‌تری عمل می‌کنند (۱۴۲، ۱۴۳). مدل ILGAM در محیط (VBA) نرم افزار Excel بر پایه یک مدل موازنه کربن در لندفیل با کاربری بسیار آسان طراحی شده است (۵۷). مدل‌های دیگری نیز مانند مدل انتشار کالیفرنایی (California Landfill Methane Inventory Model) یا به اختصار (CALMIM) به صورت محدود در مطالعات استفاده شده است (۵۶). همچنین، مدل‌های انتشار LMOP (Landfill Methane Outreach Program)، Ehrig و مدل مثلثی (Triangular Model) نیز از معادلات تجزیه درجه اول در تمامی معادلات تحلیلی استفاده می‌کنند تا میزان انتشار متان را پیش بینی کنند (۱۵، ۳۳، ۳۴) از طرفی دیگر مدل انتشار (Low Emissions Analysis Platform) LEAP نیز به بررسی برنامه‌های بهره‌وری انرژی با استفاده از برنامه‌ریزی جایگزین انرژی می‌پردازد (۱۴۴).

LandGEM یک مدل برآورد میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای با رابط مایکروسافت اکسل است که برای محاسبه میزان انتشار گاز لندفیل و ترکیب آن از لندفیل‌های شهری برای چند سال استفاده می‌شود. این مدل توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحد آمریکا توسعه داده شده است که به سادگی و با کمترین خطا نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده میزان انتشار

مختلفی برای اندازه‌گیری پتانسیل تولید متان استفاده می‌شود. مقادیر پتانسیل تولید متان در بین لندفیل‌های مختلف بسیار متفاوت است که عمدتاً به دلیل تفاوت بین ترکیبات پسماند آنها است (۱۲۴). به طور کلی، مقادیر پتانسیل تولید متان با روش‌های مختلفی تعیین شده است: روش استوکیومتری (۶۵)، ۱۳۳، ۱۳۴، روش‌های تجربی (۱۳۵-۱۳۷)، برازش مدل یا تحلیل رگرسیون با استفاده از داده‌های گاز (۱۱۹، ۱۳۲) و مدل IPCC (۱۳۸-۱۴۰).

نرخ تولید متان یا نرخ تجزیه پسماند (k)، مقدار نیمه عمر تجزیه زیستی پسماندهای دفن شده در لندفیل بر سال است (۱۴۰). در واقع نرخ تجزیه پسماند مربوط به مدت زمانی است که میزان کربن آلی در دسترس در پسماند تا نصف جرم اولیه خود («نیمه عمر» یا  $t_{1/2}$ ) تجزیه می‌شود (معادله ۲) (۱۲۰):

$$k = \ln 2 / t_{1/2} \quad (2)$$

به عبارت دیگر نرخ تولید متان، نشان‌دهنده سرعت تجزیه پسماند است؛ بنابراین هر چه نرخ تولید متان بیشتر باشد، متان با سرعت بیشتری تولید و پسماند با سرعت بیشتری تجزیه می‌شود (۱۳۳). به عنوان مثال، نرخ تجزیه ۰/۰۲ به این معنی است که نیمی از کربن در ۳۴/۷ سال به متان تجزیه شده است، در حالی که نرخ تجزیه ۰/۲ به این معنی است که نیمی از کربن در ۳/۴۷ سال تجزیه شده است (۳).

مقدار نرخ تولید متان در درجه اول تابعی از چهار عامل محتوای رطوبت توده پسماند، در دسترس بودن مواد مغذی برای میکروارگانیسم‌هایی که پسماندها را تجزیه می‌کنند تا متان و دی‌اکسیدکربن ایجاد کنند، pH توده پسماند و دمای توده پسماند است (۱۴۱). به طور کلی، هر جزء پسماند با نرخ متفاوتی تخریب می‌شود، با این حال مدل‌های تک‌فازی یک مقدار کلی را برای k فرض می‌کنند (۱۴۰).

معادله متان تولید شده در لندفیل بر اساس معادله تجزیه پسماند درجه اول (معادله ۵) است (۱۲۰):

(۵)

$$\text{متان تولید شده در لندفیل در سال } t \text{ (Gg/year)} = \sum_x [A \times k \times \text{MSW}_T(x) \times \text{MSW}_F(x) \times L_0(x) \times e^{-k(t-x)}]$$

که در آن:

$t$  = سال مورد نظر

$x$  = سال‌هایی که داده‌های ورودی باید اضافه شوند.

$A = (1 - e^{-k})/k$ ؛ عامل نرمال‌سازی که مجموع‌یابی را تصحیح می‌کند.

$k$  = نرخ تجزیه پسماند (1/year)

$\text{MSW}_T(x)$  = کل پسماندهای شهری تولید شده در سال  $x$  (Gg/year)

$\text{MSW}_F(x)$  = کسری از پسماندهای شهری دفن شده در لندفیل در سال  $x$

$L_0(x)$  = پتانسیل تولید متان (m<sup>3</sup>/ton)

در شکل ۴، مطالعات از نظر روش‌های برآورد میزان انتشار متان مقایسه شده است. از ۳۱ مطالعه‌ای که جهت برآورد میزان انتشار متان از مدل استفاده کرده‌اند، در ۱۸ مطالعه از مدل IPCC و در ۱۷ مطالعه مدل LandGEM استفاده شده بود. در برخی از مطالعات هم از مدل‌هایی مانند CALMIIM و Ehrig, LEAP, LMOP, ILGAM استفاده شده بود که در نمودار با عنوان "دیگر مدل‌ها" نشان داده شده است. لازم به توضیح است از آنجایی که در برخی از مطالعات به منظور مقایسه چند مدل بررسی شده است، مجموع این مطالعات بیشتر از تعداد کل مطالعاتی بوده که روش برآورد را گزارش کرده‌اند.

در بسیاری از مطالعات به منظور برآورد میزان تولید گازهای گلخانه‌ای از لندفیل، انواعی از مدل‌ها از نظر کاربرد آنها برای اهداف مختلف بررسی شده است. به طور مثال Wangyao و

از لندفیل را ارائه می‌دهد (۱۴۵). LandGEM از معادله تجزیه درجه اول (معادله ۳) برای برآورد انتشار سالانه در یک دوره زمانی مشخص استفاده می‌کند (۱۴۱):

(۳)

$$Q_{\text{CH}_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left( \frac{M_i}{10} \right) e^{-k t_{ij}}$$

که در آن:

$Q_{\text{CH}_4}$  = تولید سالانه متان در سال محاسبه (m<sup>3</sup>/year)

$i$  = یک سال افزایش زمان

$n$  = (سال محاسبه) - (اولین سال پذیرش پسماند)

$j$  = ۰/۱ سال افزایش زمان

$k$  = نرخ تجزیه پسماند (year/1)

$L_0$  = پتانسیل تولید متان (m<sup>3</sup>/ton)

$M_i$  = جرم پسماند پذیرفته شده در سال  $i$  ام (ton)

$t_{ij}$  = سن بخش  $j$  ام جرم پسماند  $M_i$  پذیرفته شده در سال  $i$  ام (سال‌های اعشاری، به عنوان مثال، ۳/۲ سال)

این مدل، علاوه بر برآورد میزان انتشار متان، انتشار سایر گازهای لندفیل مانند دی‌اکسیدکربن و مونوکسیدکربن را نیز مدل‌سازی می‌کند (۱۴۶).

از دیگر روش‌های برآورد و محاسبه میزان انتشار گازهای لندفیل، مدل IPCC است. این مدل چند فازی در سال ۲۰۰۶ توسط هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم معرفی شد (۴۳). این مدل، تولید متان از لندفیل را بر اساس مقادیر و ترکیبات پسماند دفن شده برآورد می‌کند (۱۴۷). بنابراین این مدل به شرط این که مقدار و ترکیب پسماندهای دفن شده ثابت باشد یا تغییرات نامحسوسی در طی چند دهه داشته باشد، می‌تواند برآوردهای معقولی از انتشار واقعی داشته باشد (۱۴۸).

میزان انتشار متان از لندفیل از طریق معادله ۴ برآورد می‌شود (۱۴۷):

(۴)

$$\begin{aligned} &= \text{میزان متان منتشر شده (Gg/year)} \\ &- \text{میزان متان تولید شده (Gg/year)} \\ &\times (\text{میزان متان بازیابی شده (Gg/year)} \\ &(\text{کسری از متان که اکسید شده - 1}) \end{aligned}$$

اندازه‌گیری میدانی به ترتیب ۱/۹، ۳/۳، ۱/۶ و ۱/۴ برابر گزارش شده است (۴۳).

Aghdam و همکاران در سال ۲۰۱۷ در مطالعه‌ای به مقایسه روش اندازه‌گیری مستقیم میزان انتشار متان به وسیله پراکندگی گاز ردیاب و برآورد آن با استفاده از مدل Afvalzorg پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که انتشار متان از دو لندفیل بین ۲۹/۱ تا ۴۹/۶ kg/h بود. همچنین تناسب خوبی بین میانگین نرخ کل تولید متان تعیین شده توسط اندازه‌گیری‌های میدانی (۱۴۷ kg/h) و برآورد کل میزان متان تولیدی با استفاده از مدل Afvalzorg (۱۵۴ kg/h) مشاهده شد (۴۴). Riham و همکاران در سال ۲۰۲۰ در مطالعه‌ای به اندازه‌گیری میزان انتشار سطحی گاز متان از لندفیل با استفاده از یک دستگاه سنجش غلظت متان قابل حمل و برآورد میزان انتشار متان به وسیله مدل LandGEM پرداخته و میزان کل متان تولیدی از طریق روش سنجش مستقیم را ۱۳،۳۱۹ m<sup>3</sup>/day گزارش کردند. این رقم تقریباً نزدیک به میزان انتشار متان برآورد شده به وسیله مدل LandGEM (۱۵،۶۱۶ m<sup>3</sup>/day) است (۵۰).

Scheutz و همکاران در سال ۲۰۲۱ در مطالعه‌ای به مقایسه داده‌های انتشار با روش‌های اندازه‌گیری و مدل‌سازی پرداختند که طی آن نتایج داده‌های اندازه‌گیری با روش تعیین پراکندگی گاز ردیاب و داده‌های انتشار مدل‌سازی شده با استفاده از مدل IPCC مقایسه شد. آنها به این نتیجه رسیدند که در سه لندفیل از پنج لندفیل، داده‌های انتشار مدل‌سازی شده بیشتر از داده‌های انتشار اندازه‌گیری شده بود. همچنین این مطالعه نشان داد که استفاده از مدل IPCC به جهت برآورد انتشار متان از لندفیل مناسب است (۵۳).

در مطالعه Chiemchaisri و همکار در سال ۲۰۰۸، میزان انتشار متان از طریق مدل IPCC، مدل LandGEM و روش چمبر تعیین شار بسته تعیین شد و در نهایت نتایج حاصله مقایسه شدند. مقادیر انتشار متان با استفاده از مدل IPCC ۳۶۶ Gg/year گزارش شد که بیشتر از برآورد مدل

همکاران در سال ۲۰۰۹ به مقایسه نتایج اندازه‌گیری و برآورد میزان انتشار متان از لندفیل با استفاده از روش چمبر تعیین شار بسته و مدل IPCC پرداختند و به این نتیجه رسیدند که برآورد انتشار متان با استفاده از مدل IPCC (از ۲۰/۶۰ تا ۲۰۶۵ ton/year) با اندازه‌گیری‌های میدانی (از ۲۰/۶۵ تا ۲۰۷۴/۸۷ ton/year) نتایج نزدیکی (از ۵۴/۳۹- تا ۶۵/۵۱ درصد) داشته است (۲۹). در مطالعه‌ای دیگر Mou و همکاران در سال ۲۰۱۵ در مطالعه‌ای به مقایسه نتایج برآورد میزان متان تولید شده در چهار لندفیل توسط سه مدل LandGEM، IPCC و Afvalzorg پرداختند و نتایج حاصله را با مطالعه‌ای که میزان متان منتشره را به وسیله روش رقیق‌سازی گاز ردیاب محاسبه کرده بود، مقایسه کردند. نتایج حاصله نشان داد که مدل LandGEM، به طور قابل توجهی تولید متان را بیش از مقدار واقعی برآورد کرد، چرا که مقادیر پیش‌فرض بسیار بالایی برای پارامترهای کلیدی اعمال شده بود. از سوی دیگر مدل Afvalzorg در مقایسه با مدل IPCC، برای برآورد تولید متان در لندفیل نتایج نزدیک‌تری ارائه کرده بود. همچنین داده‌های جمع‌آوری شده با اندازه‌گیری‌های میدانی مطابقت خوبی داشته که نشان دهنده این است که مدل اصلاح‌شده Afvalzorg می‌تواند برآورد عملی و دقیقی برای انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه دهد (۳۹).

Gollapalli و همکار در سال ۲۰۱۷ در مطالعه‌ای به مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف انتشار گاز لندفیل پرداختند. آنها در ابتدا به وسیله یک چمبر تعیین شار بسته در طول سپتامبر ۲۰۱۵ تا آگوست ۲۰۱۶، میزان انتشار متان را به صورت مستقیم اندازه‌گیری کردند، سپس به وسیله مدل‌های مثلثی، IPCC و LandGEM به برآورد میزان انتشار متان پرداختند. نتایج اندازه‌گیری‌های مستقیم نشان داد که میانگین نرخ شار متان و دی‌اکسیدکربن به ترتیب ۶۸ و ۹۲ mg/m<sup>2</sup>.min بوده است در حالی که در نتایج برآوردها، میزان انتشار به وسیله مدل‌های مثلثی، LandGEM با داده‌های قانون هوای پاک، LandGEM با داده‌های سیاهه انتشار و IPCC در مقایسه با



LandGEM بسیار راحت تر است و محیط کاربر پسندتری ارائه می‌کند. در عین حال این مدل، محاسبات پیچیده ریاضی دارد که از معایب آن محسوب می‌شود. از طرفی وجود صفحات و فرمول‌های زیاد در مدل IPCC باعث سخت‌تر شدن کاربری این مدل نسبت به LandGEM شده است (۱۵۰). همانطور که گفته شد، شرایط اقلیمی بر تولید متان تأثیر دارد. با این حال، مقادیر پیش‌فرض معرفی شده توسط مدل‌ها بیشتر مربوط به شرایط خاص هستند و زمانی که در سایر مناطق اعمال می‌شوند، دقت کمتری در برآورد دارند. از بین تمام مدل‌های ارائه شده، تنها مدل‌های IPCC و LandGEM تا حدودی بین مناطق آب‌وهوایی مختلف تمییز قائل می‌شوند که در مدل IPCC، تنوع مناطق اقلیمی بیشتری در نظر گرفته شده است (۱۳۰، ۱۵۰).

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مدل‌های IPCC و LandGEM، پرکاربردترین مدل‌های معرفی شده جهت برآورد میزان انتشار متان هستند. این موضوع می‌تواند به دلیل راحتی استفاده و دسترسی ساده کاربر به مدل و داده‌های ورودی مورد نیاز باشد (۱۵۰). به طور کلی اکثر مدل‌های برآورد میزان انتشار متان بر اساس مفروضات تجربی ساخته می‌شوند و نمی‌توان نتیجه گرفت که یک مجموعه از مفروضات تجربی برآورد دقیق‌تری از میزان انتشار نسبت به مجموعه دیگر دارد و نتیجه تحت تاثیر شرایط مختلف است (۱۳۰).

روش‌های اندازه‌گیری مستقیم میزان انتشار متان از لندفیل‌ها مقدار متان منتشر شده از لندفیل‌ها عمدتاً با استفاده از مدل‌های تئوری برآورد می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی اغلب با عدم قطعیت همراه است. به همین منظور، روش‌های مختلفی برای تعیین کمیت انتشار متان از لندفیل‌ها به صورت مستقیم وجود دارد، با این حال هیچ یک از آنها به عنوان یک روش مرجع بین‌المللی شناخته نشده است. چالش اصلی در اندازه‌گیری میزان انتشار متان از لندفیل‌ها، تغییرات زمانی و مکانی انتشار متان، در کنار مساحت بزرگ و توپوگرافی متغیر اکثر لندفیل‌ها است (۸۸).

LandGEM و روش چمبر تعیین شار بسته به ترتیب با مقادیر ۱۱۵ و  $103 \text{ Gg/year}$  بود که نتیجتاً مقدار انتشار متان برآورد شده نزدیکتر به نتایج اندازه‌گیری مستقیم به‌وسیله روش چمبر تعیین شار بسته بود (۳۶). از طرفی مطالعه Wang و همکاران در سال ۲۰۲۳ نشان داد که نتایج داده‌های مدل‌سازی شده به وسیله پارامترهای پیش‌فرض در مقایسه با پارامترهای محلی ممکن است نتایج بزرگتری را در هر دو مدل گزارش کنند (۱۴۹).

### مقایسه مدل‌های IPCC و LandGEM

به منظور بازیابی و مدیریت گاز لندفیل، اولین و مهمترین مرحله، ارائه یک برآورد مناسب از تولید گاز در لندفیل‌ها است. همانطور که گفته شد برای رسیدن به این هدف، مدل‌های متعددی وجود دارند. برآورد دقیق و نزدیکی داده‌های برآورد شده به داده‌های واقعی، هدف نهایی مدل‌سازی گاز لندفیل است. از پرکاربردترین و معتبرترین مدل‌های درجه اول برآورد میزان انتشار متان در مطالعات، مدل‌های LandGEM و IPCC هستند (۱۵۰). مدل LandGEM میزان انتشار متان، ترکیبات آلی غیر متانی، دی‌اکسید کربن و سایر گازها را در لندفیل‌ها برآورد می‌کند (۱۵۱). مدل IPCC نیز به منظور برآورد میزان انتشار متان از لندفیل‌ها معرفی شده است (۱۵۰). از نظر دسترسی، این امکان برای هر دو مدل بسیار ساده است و هر دو را می‌توان به راحتی از وبسایت‌های رسمی و معتبر دانلود کرد. هر دو مدل نیازمند دانش اولیه‌ای راجع به مدل‌سازی و فرایند انتشار متان از لندفیل‌ها هستند. ورودی مورد نیاز بیشتر به عنوان یک مزیت در نظر گرفته می‌شود. این امکان برآورد دقیق‌تری از تولید گاز لندفیل را فراهم می‌کند و انعطاف‌پذیری بیشتری برای شرایط خاص دارد. در مدل IPCC، پسماندها را می‌توان بر اساس ترکیب آن (مواد فاسد شدنی، کاغذ، پلاستیک و غیره) مشخص کرد اما ورودی‌های مدل LandGEM بیشتر در مورد مشخصات لندفیل است. بنابراین مدل IPCC، می‌تواند تغییرات در ترکیب پسماند را مدیریت کند ولی مدل LandGEM در این مورد مناسب نیست (۱۳۰). کار با مدل

مادون قرمز (IR) و یا طیف‌سنج‌های قابل حمل (portable cavity ring down spectrometer (CRDS)) نیز به منظور تعیین سایر گازهای لندفیل از جمله دی‌اکسیدکربن همراه باشد (۱۵۴). این روش در عین سادگی و سرعت، روش ارزان‌قیمتی است که فقط به یک دستگاه پرتابل و GPS نیاز دارد. باید در نظر داشت که غلظت متان با ارتفاع از سطح تحت تأثیر قرار می‌گیرد و داده‌های ثبت شده، نماینده داده‌های واقعی نیستند (۸۸).

از روش‌های دیگر کیفی مورد استفاده می‌توان به دوربین‌های حرارتی مادون قرمز به منظور تعیین دمای موجود در سطح لندفیل اشاره کرد (۳۴، ۵۰). از این روش برای تشخیص مناطقی که دمای بیشتری دارند استفاده می‌شود. بنابراین فرض بر این است که دمای فضای بالای سطح، ناشی از گازهای لندفیل است. اندازه‌گیری با این روش به صورت دستی و یا بر روی پهپاد (Unmanned Aerial Vehicle) یا به اختصار (UAV) صورت می‌گیرد. این روش نسبت به دیگر روش‌های میدانی ارزان محسوب شده و بهترین روش برای شناسایی مقادیر انتشار بالاست (۹۴، ۱۵۵) و می‌تواند در کنار یک پهپاد برای تعیین غلظت متان استفاده شود (۱۵۶).

از آنجایی که روش‌های کیفی سریع، ارزان و آسان هستند، می‌توانند به صورت دوره‌ای در لندفیل توسط کارکنان انجام شود. با این حال باید این مورد را اشاره کرد که هیچ یک از روش‌های کیفی نتایج دقیقی ارائه نمی‌دهند و برای مثال خوانش‌های نسبتاً کم لزوماً به معنای عدم وجود انتشار نیست. این روش‌ها می‌توانند در کنار روش‌های کمی (به طور مثال چمبرها به همراه دستگاه‌های پرتابل) استفاده شوند (۹۴، ۱۵۷، ۱۵۸).

#### روش‌های کمی

تکنیک‌های مختلفی به منظور اندازه‌گیری مستقیم میزان انتشار متان از لندفیل، در مقیاس‌های مختلف مکانی (از سطح لندفیل، تا چندین کیلومتر دورتر) و بازه‌های زمانی مختلف (از دقیقه، تا هفته یا ماه) معرفی شده‌اند. از این روش‌ها به منظور

اندازه‌گیری متان از سطح این مزیت را دارد که منابع انتشار دیگر متان در نزدیکی لندفیل را در نظر نمی‌گیرد. ناگفته نماند که اکثر روش‌های تعیین غلظت متان از سطح، صرفاً یک مساحت کوچکی را در نظر می‌گیرند و با برون‌یابی نتایج و نسبت دادن آن به باقی مناطق اندازه‌گیری نشده در لندفیل‌هایی که تنوع انتشار بالا دارند، دچار خطا می‌شود. از طرف دیگر روش‌هایی که غلظت متان را در ارتفاعات بالاتر و یا پراکنش آن را در پایین‌دست اندازه‌گیری می‌کنند، کل لندفیل را پوشش می‌دهند با این تفاوت که ممکن است باقی منابع را نیز دخالت دهند و از این حیث دچار خطا می‌شوند (۲۷).

به طور کلی روش‌های اندازه‌گیری مستقیم برای تعیین مقدار انتشار متان در لندفیل به دو دسته تقسیم می‌شوند:

#### روش‌های کیفی

این روش‌ها به منظور غربالگری و تعیین نقاط با انتشار بالا و یا تعیین الگوهای انتشار متان استفاده می‌شوند (۱۵۲). غربالگری می‌تواند با یک شناخت قبلی و یا با یک بازدید میدانی با استفاده از بوی ترکیبات، تغییر در پوشش گیاهی و بی‌نظمی در خاک (مانند شکاف‌ها) از محل و تقسیم‌بندی آن به چند منطقه صورت بگیرد. تعیین نقاط در این روش به صورت اندازه‌گیری نقطه‌ای یا تصادفی/سیستماتیک استفاده می‌شود (۷۲، ۱۵۳). از این روش‌ها می‌توان به دستگاه‌های قرائت مستقیم/آنالیزور پرتابل متان (Analyser Portable CH<sub>4</sub>) اشاره کرد که اندازه‌گیری کیفی یا نیمه کمی غلظت متان مستقیماً بالای سطح لندفیل را برعهده دارند. این روش به عنوان یک روش اندازه‌گیری نقطه‌ای با نمونه‌برداری تصادفی در نظر گرفته می‌شود (۱۵۲). این دستگاه‌ها می‌توانند بر مبنای اصول اندازه‌گیری نوری یا الکتروشیمیایی باشند. از این دستگاه‌ها می‌توان به Portable FID Analyzer اشاره کرد که از دقت قابل قبولی برخوردار است. این دستگاه‌ها صرفاً غلظت متان منتشره از سطح را بر حسب ppm گزارش می‌کنند. اندازه‌گیری با استفاده از این روش می‌تواند محدود به متان نباشد و با روش‌های مختلفی مثل دستگاه‌های پرتابل اشعه

تعیین غلظت متان استفاده می‌شود. از روش‌های اندازه‌گیری غلظت متان می‌توان به روش غلظت سنجی در یک برش عمودی اشاره کرد که در این روش با استفاده از یک پراب، به صورت نقطه‌ای غلظت گاز و گرادیان فشار در برش عمودی خاک را اندازه‌گیری می‌کنند. این روش به منظور شناخت جهت انتشار و شناسایی منابع و جاذب‌های متان در زیر سطح زمین انجام می‌شود اما از آنجایی که یک روش قدیمی‌تر است و به صورت نقطه‌ای غلظت را محاسبه می‌کند برای کل لندفیل یا یک لندفیل با تنوع انتشار بالا مناسب نیست (۷۲، ۱۵۳، ۱۵۴).

در میان روش‌های اندازه‌گیری کمی موجود، روش چمبر تعیین شار بدون جریان یا چمبر تعیین شار بسته به دلیل سادگی و هزینه نسبتاً کم، روش محبوب‌تری است (۲۳). این روش، متداول‌ترین روش مورد استفاده برای اندازه‌گیری شار گازهای گلخانه‌ای به ویژه متان و اکسید نیتروژن از خاک است. اصل اساسی این تکنیک پوشاندن یک ناحیه شناخته‌شده از خاک با یک چمبر بسته است که امکان تبادل گاز بین خاک زیر چمبر و فضای سر چمبر را فراهم می‌کند. تغییر غلظت گاز در طول زمان در فضای اصلی چمبر اندازه‌گیری می‌شود و به نرخ شار تبدیل می‌شود که نشان‌دهنده شار داخل چمبر یا خارج شده از خاک است (۱۵۹). افزایش تجمع غلظت گاز در چمبر منجر به اشباع شدن فضای چمبر و کاهش گرادیان غلظت طبیعی بین خاک و فضای چمبر می‌شود و ممکن است به طور قابل توجهی جریان گاز را کاهش دهد (۱۶۰-۱۶۳). به طور کلی با اندازه‌گیری نقطه‌ای متان از سطح به وسیله یک چمبر و محاسبه میزان انتشار با استفاده از تعیین شیب منحنی غلظت به زمان (به طور معمول زمان اندازه‌گیری کمتر از یک ساعت است)، این روش به یک تکنیک محبوب تبدیل شده است. البته لازم به توضیح است که در فرایند نمونه‌برداری ممکن است نقاط با انتشار بالا لحاظ نشوند که این خود باعث خطا می‌شود. همچنین با وجود این که این روش در مطالعات بسیاری استفاده شده است با این حال برای تعیین انتشار متان در کل لندفیل

مناسب نیست؛ اما در بعضی از مطالعات به دلیل نبود امکانات از این روش استفاده شده است (۱۵۳، ۱۶۴-۱۶۷). در کنار این روش، چمبرهای تعیین شار باز حضور داشتند با این تفاوت که به طور مداوم با جریان هوا یا گاز حامل شسته شده و تعیین شار بر اساس میزان جریان گاز حامل و تفاوت غلظت متان در جریان ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده است. شایان ذکر است که این روش‌ها به دلیل رقیق شدن گاز درون چمبر، برای تعیین غلظت‌های کم مناسب نیست (۱۶۸-۱۷۰).

از دیگر روش‌های موجود روش کوواریانس گردابی است که بر مبنای اختلاط گازهای ساطع شده به صورت عمودی توسط گرداب‌های متلاطم در لایه وارونگی اتمسفر است. این روش تفاوت غلظت بین سطح و اتمسفر و همچنین سرعت و جهت باد را اندازه‌گیری می‌کند. این روش اغلب برای اندازه‌گیری انتشار از سطوح بزرگتر مانند شار  $\text{CH}_4$ ،  $\text{N}_2\text{O}$  و  $\text{CO}_2$  از خاک‌های کشاورزی استفاده می‌شود (۱۷۱، ۱۷۲) اما در لندفیل‌های شهری نیز استفاده شده است (۱۷۳). این روش برای زمین‌های مسطح و یکنواخت مناسب است؛ همچنین از آن می‌توان برای مطالعات بلند مدت نیز استفاده کرد (۶۳، ۷۳).

در روش نقشه برداری ستون شعاعی از یک یا چند لیزر و آینه برای اندازه‌گیری غلظت در جهت باد استفاده می‌شود. این روش را می‌توان به دو صورت افقی یا عمودی استفاده کرد که با روش افقی اطلاعات کیفی در مورد مکان محل‌های انتشار ارائه می‌شود، در حالی که روش عمودی برای تعیین کمیت انتشار استفاده می‌شود. با این حال این روش بسیار تحت تأثیر جهت باد است و در یک لندفیل با تنوع توپوگرافی بالا مناسب نیست (۲۴).

در روش‌های موازنه جرمی، با اندازه‌گیری متان در بالای سطح لندفیل و دخالت دادن پارامترهای جوی اندازه‌گیری شده، می‌توان شار متان را محاسبه کرد. این روش به دو رویکرد ثابت و متحرک تقسیم می‌شود. در موازنه جرمی ثابت غلظت متان در ارتفاعات مختلف از سطح لندفیل اندازه‌گیری می‌شود. در

تعیین غلظت متان استفاده می‌شود. از روش‌های اندازه‌گیری غلظت متان می‌توان به روش غلظت سنجی در یک برش عمودی اشاره کرد که در این روش با استفاده از یک پراب، به صورت نقطه‌ای غلظت گاز و گرادیان فشار در برش عمودی خاک را اندازه‌گیری می‌کنند. این روش به منظور شناخت جهت انتشار و شناسایی منابع و جاذب‌های متان در زیر سطح زمین انجام می‌شود اما از آنجایی که یک روش قدیمی‌تر است و به صورت نقطه‌ای غلظت را محاسبه می‌کند برای کل لندفیل یا یک لندفیل با تنوع انتشار بالا مناسب نیست (۷۲، ۱۵۳، ۱۵۴).

در میان روش‌های اندازه‌گیری کمی موجود، روش چمبر تعیین شار بدون جریان یا چمبر تعیین شار بسته به دلیل سادگی و هزینه نسبتاً کم، روش محبوب‌تری است (۲۳). این روش، متداول‌ترین روش مورد استفاده برای اندازه‌گیری شار گازهای گلخانه‌ای به ویژه متان و اکسید نیتروژن از خاک است. اصل اساسی این تکنیک پوشاندن یک ناحیه شناخته‌شده از خاک با یک چمبر بسته است که امکان تبادل گاز بین خاک زیر چمبر و فضای سر چمبر را فراهم می‌کند. تغییر غلظت گاز در طول زمان در فضای اصلی چمبر اندازه‌گیری می‌شود و به نرخ شار تبدیل می‌شود که نشان‌دهنده شار داخل چمبر یا خارج شده از خاک است (۱۵۹). افزایش تجمع غلظت گاز در چمبر منجر به اشباع شدن فضای چمبر و کاهش گرادیان غلظت طبیعی بین خاک و فضای چمبر می‌شود و ممکن است به طور قابل توجهی جریان گاز را کاهش دهد (۱۶۰-۱۶۳). به طور کلی با اندازه‌گیری نقطه‌ای متان از سطح به وسیله یک چمبر و محاسبه میزان انتشار با استفاده از تعیین شیب منحنی غلظت به زمان (به طور معمول زمان اندازه‌گیری کمتر از یک ساعت است)، این روش به یک تکنیک محبوب تبدیل شده است. البته لازم به توضیح است که در فرایند نمونه‌برداری ممکن است نقاط با انتشار بالا لحاظ نشوند که این خود باعث خطا می‌شود. همچنین با وجود این که این روش در مطالعات بسیاری استفاده شده است با این حال برای تعیین انتشار متان در کل لندفیل

این روش ابزار دقیقی نیاز نیست و همانند روش کوواریانس گردابی برای زمین‌های مسطح و یکنواخت مناسب است. در رویکرد دوم موازنه جرمی با استفاده از اندازه‌گیری‌های هوایی صورت می‌گیرد (۱۷۴). در این روش غلظت متان با استفاده از یک وسیله هوایی (به طور مثال پهپاد) در جهت باد اندازه‌گیری شده و با ترکیب با شرایط جوی به صورت همزمان، با یک مدل، شار محاسبه می‌شود. در این روش تعیین سهم منابع نزدیک به هم از یکدیگر مشکل است (۹۰، ۱۷۵-۱۷۷).

یکی دیگر از روش‌های موجود، روش پراکندگی گاز ردیاب است که از اندازه‌گیری همزمان غلظت متان در اتمسفر و گاز ردیاب آزاد شده در منبع انتشار با سرعت مشخص استفاده می‌کند. در این روش فرض بر این است که در بازه زمانی نمونه برداری، متان و گاز ردیاب دچار سرنوشت یکسانی (پراکندگی، واکنش شیمیایی/فتوشیمیایی) در اتمسفر می‌شوند، بنابراین به همین دلیل، از گازهای ردیاب با طول عمر نسبتاً طولانی در اتمسفر استفاده می‌شود. این روش دو رویکرد ثابت و متحرک دارد. در روش ثابت، اندازه‌گیری غلظت متان و یک گاز ردیاب (به طور معمول  $N_2O$  و  $SF_6$ ) در یک یا چند نقطه در جهت باد که به صورت همزمان با سرعت مشخصی آزاد شده‌اند، انجام می‌شود. در روش متحرک اما گاز ردیاب آزاد شده به طور معمول  $N_2O$  و  $C_2H_2$  است. در روش ثابت در صورت وجود سایر منابع، اندازه‌گیری مشکل بوده و بسیار تحت تأثیر سرعت باد است. به همین علت این روش با روش پراکنش گاز ردیاب متحرک جایگزین شده است (۱۷۸-۱۸۱).

در روش جذب افتراقی (DIAL) LiDAR یک پرتو لیزر به اتمسفر شلیک می‌شود. سپس بخشی از این تابش توسط اجزای موجود در اتمسفر به عقب پراکنده می‌شود و می‌توان آن را توسط یک آشکارساز اندازه‌گیری کرد تا غلظت متان را اندازه‌گیری کند. این روش از دیگر منابع متان در اطراف تداخل بسیار کمی می‌پذیرد و می‌تواند اطلاعات دقیقی در مورد الگوهای انتشار ارائه دهد. با این حال مدیریت داده‌ها پیچیده است و بسیار تحت تأثیر مدل‌سازی دقیق باد است.

این روش بیشتر برای انتشارات VOCs استفاده می‌شود (۹۷). مدل‌سازی معکوس اما به اندازه‌گیری غلظت در باد متکی است. با ترکیب این اندازه‌گیری‌ها با داده‌های هواشناسی، نرخ انتشار از یک منبع شناخته شده را می‌توان با استفاده از جهت باد و تئوری پراکنش گاز در جو محاسبه کرد. روش مدل‌سازی معکوس را می‌توان به دو رویکرد با استفاده از اندازه‌گیری‌های ثابت یا متحرک تقسیم کرد. روش ثابت برای سری زمانی‌های طولانی مناسب است و می‌تواند تغییرات انتشار را ثبت کند اما به داده‌های هواشناسی با دقت بالا نیاز است و در صورت وجود سایر منابع و تنوع در توپوگرافی، مدل‌سازی مشکل است (۱۸۲-۱۸۵). همچنین تحلیل داده‌ها پیچیده است؛ با این حال در روش متحرک برآورد سریع انتشار از کل لندفیل صورت می‌گیرد اما روش پر کاربردی نیست (۱۸۶، ۱۸۷).

طول مدت نمونه برداری یکی از مسائل مهم در تعیین انتشار متان با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری است. مطالعات مختلفی نشان داده‌اند که میزان تولید و انتشار متان در فصل سرد به دلیل پایین بودن دما و فعالیت باکتریایی، به مراتب کمتر است (۱۸۸). انتخاب یک دوره اندازه‌گیری مناسب می‌تواند باعث خطا در تعیین میزان انتشار متان شود. نتایج بررسی مطالعات نشان داد که از ۶۶ مطالعه‌ای که از روش اندازه‌گیری مستقیم سنجش متان استفاده کرده‌اند، در ۶۰ مطالعه طول دوره نمونه برداری گزارش شده است. از این تعداد ۱۸ مطالعه، در دوره زمانی‌هایی با بازه بیش از یکسال، میزان انتشار متان را سنجیده بودند. این موضوع می‌تواند به دلیل مقایسه تغییرات انتشار سالیانه باشد. همچنین ۲۶ مطالعه، طی بازه‌های زمانی ۵ تا ۱۲ ماه، میزان انتشار متان را بررسی کردند که در این مدت امکان بررسی تغییرات فصلی میزان انتشار متان را داشتند. با این حال ۱۶ مطالعه، میزان انتشار متان را در یک دوره زمانی کمتر از ۴ ماه اندازه‌گیری کرده بودند که ممکن است قصد این مطالعات صرفاً یک بررسی مقطعی از شرایط لندفیل باشد.

شکل ۵، سهم و نوع ابزار نمونه‌برداری از لندفیل‌ها را نشان

مدت زمان جستجوی مقالات و عدم دسترسی به متن کامل برخی از مقالات اشاره کرد.

### نتیجه گیری

کمی‌سازی میزان انتشار متان، اولین قدم در بحث مدیریت آن است. رویکرد مدل‌سازی برآورد انتشار به عنوان یکی از روش‌های موجود، هزینه کمتری دارد و نتایج نسبتاً سریعی را ارائه می‌دهد. دو مدل LandGEM و IPCC از مدل‌های محبوب به جهت برآورد میزان انتشار متان به حساب می‌آیند. اکثر مدل‌های موجود بر اساس دو پارامتر پتانسیل تولید متان و نرخ تجزیه پسماند هستند. چالش اصلی در مدل‌سازی برآورد این پارامترها است زیرا این دو پارامتر تحت تأثیر فاکتورهای متفاوتی از جمله میزان پسماند دفن شده، ترکیب پسماند، میزان رطوبت، دما و زمان تاخیر در تولید گاز هستند، بنابراین نتایج حاصل از مدل‌سازی اغلب با عدم قطعیت همراه است. به همین منظور، روش‌های کمی و کیفی مختلفی برای تعیین کمیت انتشار متان از لندفیل‌ها به صورت مستقیم وجود دارد. از این روش‌ها می‌توان به سنجش میزان انتشار متان به وسیله اندازه‌گیری با دستگاه قرائت مستقیم متان و چمبرهای تعیین شار بسته اشاره کرد.

برآورد انتشار متان به عنوان یکی از گازهای گلخانه‌ای از منابع انتشار به مقامات مسئول این امکان را می‌دهد که از وضعیت موجود و آتی انتشار گاز متان آگاهی یافته و در نهایت استراتژی‌های کاهش را تدوین کنند. یافته‌های برآورد میزان انتشار متان از لندفیل‌ها، در برخی از شرایط دارای تفاوت معناداری با نتایج واقعی هستند و لذا گرچه این روش‌ها ابزاری مفید، سریع و به صرفه محسوب می‌شوند اما در استفاده از آنها بایستی به این امر توجه نمود.

### ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت

می‌دهد. از ۶۶ مطالعه‌ای که از روش اندازه‌گیری مستقیم استفاده کردند، در ۲۸ مطالعه (۴۲ درصد) ابزار نمونه‌برداری معرفی شده است. در این بین سرنگ‌های و کیوم با ۱۰ مطالعه، ویال با ۹ مطالعه و تدارک بگ با ۶ مطالعه، به عنوان پرکاربردترین ابزارهای نمونه‌برداری شناسایی شدند.

در شکل ۶ و جدول ۲، روش‌های اندازه‌گیری مستقیم انتشار متان در مطالعات مورد بررسی ارائه شده است. از ۷۵ مطالعه‌ای که از روش اندازه‌گیری مستقیم استفاده کرده‌اند، روش چمبر تعیین شار بسته با ۵۴ مطالعه، دستگاه‌های آنالیز پرتابل متان با ۲۰ مطالعه و دوربین‌های حرارتی مادون قرمز با ۱۴ مطالعه به عنوان محبوب‌ترین روش‌های اندازه‌گیری معرفی شدند. برخی از مطالعات هم از روش‌های دیگری مانند چمبر تعیین شار باز، موازنه جرمی، نقشه‌برداری ستون شعاعی و جذب افتراقی LiDAR استفاده کردند که در نمودار با عنوان "دیگر روش‌ها" نمایش داده شده است. لازم به توضیح است از آنجایی که در برخی از مطالعات به منظور مقایسه، چند روش بررسی شده است، مجموع این مطالعات به طبع بیشتر از تعداد کل مطالعاتی بوده است که روش اندازه‌گیری مستقیم را گزارش کرده‌اند.

شکل ۷ قسمت (a)، وضعیت طبقه‌بندی حجم چمبرهای تعیین شار بسته را در بین مطالعاتی که میزان انتشار متان به وسیله چمبر تعیین شده است نشان می‌دهد. از ۵۴ مطالعه‌ای که از روش اندازه‌گیری چمبر بسته استفاده شده است، در ۳۳ مطالعه حجم چمبر گزارش شده است. در این مطالعات حجم چمبر در ۲۹ مطالعه بالاتر از ۱۰ L بوده است. در شکل ۷ قسمت (b)، بازه‌های زمانی نمونه‌برداری از چمبرهای تعیین شار بسته در مطالعاتی که میزان انتشار متان را به وسیله چمبر تعیین کرده‌اند ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد، در ۲۶ مطالعه فواصل نمونه‌برداری از چمبر گزارش شده است که در ۱۰ مطالعه فاصله بین هر نمونه‌برداری تا ۵ min گزارش شده است.

از محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به عدم بررسی مقالات موجود در زمینه روش‌های برآورد و سنجش انتشار گاز متان از لندفیل‌ها به زبان‌هایی غیر از انگلیسی و فارسی، محدود کردن

و طرح تحقیقاتی با عنوان " اندازه‌گیری، پایش و مدل‌سازی انتشار گاز متان از مجتمع پردازش و دفع پسماند آرادکوه تهران" در سال ۱۴۰۲ با کد ۶۵۹۱۳-۱-۲۱۰-۱۴۰۲ است که با حمایت‌های مالی و فنی سازمان مدیریت پسماند تهران، پژوهشکده محیط‌زیست و دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران اجرا شده است.

کرده‌اند. این مطالعه طبق کد شناسه اخلاق IR.TUMS.SPH.REC.1402.073 مجوز کمیته اخلاق را دریافت کرده است.

## تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از پایان‌نامه در مقطع کارشناسی ارشد

## References

1. Law of waste management: Majlis Research Center; 2004. Available from: <https://rc.majlis.ir/fa/law/show/94060> - in persian.
2. (EPA) USEPA. Glossary of Terms: EPA. Available from: <https://archive.epa.gov/wastes/education/quest/quest/gloss1a.htm#msw>.
3. Max K, Shannon K, Jenny S, Amanda S. Quantifying methane emissions from landfilled food waste: U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2023.
4. Khan S, Anjum R, Raza ST, Ahmed Bazai N, Ihtisham M. Technologies for municipal solid waste management: Current status, challenges, and future perspectives. *Chemosphere*. 2022;288(Pt1):132403.
5. WHO. Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment - Chapter 4. Solid waste. 2021.
6. USEPA. Advancing sustainable materials management: 2018 tables and figures - assessing trends in materials generation and management in the United States U.S. Environmental Protection Agency (EPA): 2020.
7. USEPA. Criteria for the definition of solid waste and solid and hazardous waste exclusions. U.S. Environmental Protection Agency (EPA): 2024.
8. Tchobanoglous G, Kreith F. Handbook of Solid Waste Management. 2nd ed: McGraw-Hill Education; 2002.
9. Dos Santos RE, Dos Santos IF, Barros RM, Bernal AP, Tiago Filho GL, FD dS. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. *Journal of Environmental Management*. 2019;231:198-206.
10. Pham TP, Kaushik R, Parshetti GK, Mahmood R, R B. Food waste-to-energy conversion technologies: Current status and future directions. *Waste Management*. 2015;38:399-408.
11. USEPA. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks. U.S. Environmental Protection Agency (EPA): 2024.

12. Aydi A. Energy recovery from a municipal solid waste (MSW) landfill gas: A Tunisian case study. *Hydrol Current*. 2012;3(4):1-3.
13. Saral A, Demir S, Yıldız Ş. Assessment of odorous VOCs released from a main MSW landfill site in Istanbul-Turkey via a modelling approach. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;168(1):338-45.
14. (EPA) USEPA. Basic Information about Landfill Gas. U.S. Environmental Protection Agency, 2023.
15. Pazoki M, Delarestaghi RM, Rezvanian MR, Ghasemzade R, Dalaei P. Gas production potential in the landfill of Tehran by landfill methane outreach program. *Jundishapur Journal of Health Sciences*. 2015;7(4).
16. (EPA) USEPA. Overview of Greenhouse Gases. U.S. Environmental Protection Agency (EPA); 2023.
17. Hartmann DL, Tank AM, Rusticucci M, Alexander LV, Brönnimann S, Charabi YA, et al. Observations: atmosphere and surface. *Climate change 2013 the physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change: Cambridge University Press*; 2013. p. 159-254.
18. Dlugokencky E, Tans P. Trends in atmospheric carbon dioxide, National Oceanic & Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL). In: editor. ^editors. ed.: 2018. p.
19. (EPA) USEPA. Greenhouse Gas Reporting Program (GHGRP) - GHGRP Waste Sector Profile. U.S. Environmental Protection Agency (EPA); 2024.
20. (EPA) USEPA. Understanding Global Warming Potentials: U. S. E. P. A. (EPA); 2023. Available from: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>.
21. Change) IIPpC. AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change 2014. Available from: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>.
22. (EPA) USEPA. Global Methane Initiative- Importance of Methane. U.S. Environmental Protection Agency (EPA); 2023.
23. Xie H, Zuo X, Chen Y, Yan H, Ni J. Numerical model for static chamber measurement of multi-component landfill gas emissions and its application. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(49):74225-41.
24. Amini HR RD, Niskanen AAmini HR, , Reinhart DR, Niskanen A. Comparison of first-order-decay modeled and actual field measured municipal solid waste landfill methane data. *Waste Management*. 2013;33(12):2720-28.
25. Rose K, Steinbuchel A. Biodegradation of natural rubber and related compounds: recent insights into a hardly understood catabolic capability of microorganisms. *Applied and Environmental Microbiology*. 2005;71(6):2803-12.
26. Rees White T, Mønster J, Beaven R, Scheutz C. Measuring methane emissions from a UK landfill using the tracer dispersion method and the influence of operational and environmental factors. *Waste*

- management. 2019;87:870-82.
27. Mønster J, Kjeldsen P, Scheutz C. Methodologies for measuring fugitive methane emissions from landfills—A review. *Waste Management*. 2019;87:835-59.
  28. Moher D, Shamseer L, Clarke M, Ghersi D, Liberati A, Petticrew M, et al. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews*. 2015;4:1-9.
  29. Wangyao K, Towprayoon S, Chiemchaisri C, Gheewala SH, Nopharatana A. Application of the IPCC Waste Model to solid waste disposal sites in tropical countries: case study of Thailand. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2010;164:249-61.
  30. Zoghi, Saeidi. The effect of humidity on the rate of pollutant production in landfills and the control of output pollutants using a cap (In Persian). *Journal of Environmental Studies*. 2008 (in Persian).
  31. Raco B, Battaglini R, Lelli M. Gas emission into the atmosphere from controlled landfills: an example from Legoli landfill (Tuscany, Italy). *Environmental Science and Pollution Research*. 2010;17:1197-206.
  32. Gebert J, Rachor I, Gröngröft A, Pfeiffer EM. Temporal variability of soil gas composition in landfill covers. *Waste Management*. 2011;31(5):935-45.
  33. Chakraborty M, Sharma C, Pandey J, Singh N, Gupta PK. Methane emission estimation from landfills in Delhi: A comparative assessment of different methodologies. *Atmospheric Environment*. 2011;45(39):7135-42.
  34. Di Bella G, Di Trapani D, Viviani G. Evaluation of methane emissions from Palermo municipal landfill: Comparison between field measurements and models. *Waste Management*. 2011;31(8):1820-26.
  35. El Fadel M, Abi Esber L, Salhab S. Emission assessment at the Burj Hammoud inactive municipal landfill: Viability of landfill gas recovery under the clean development mechanism. *Waste Management*. 2012;32(11):2106-14.
  36. Chiemchaisri C, Visvanathan C. Greenhouse gas emission potential of the municipal solid waste disposal sites in Thailand. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2008;58(5):629-35.
  37. Abushammala MF, Basri NE, Elfithri R. Assessment of methane emission and oxidation at Air Hitam Landfill site cover soil in wet tropical climate. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2013;185:9967-78.
  38. Atabi F, Ehyaei MA, Ahmadi MH, editors. Calculation of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission rate in Kahrizak landfill site with LandGEM mathematical model. The 4th world sustainability forum; 2014.
  39. Mou Z, Scheutz C, Kjeldsen P. Evaluation and application of site-specific data to revise the first-order decay model for estimating landfill gas generation and emissions at Danish landfills. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2015;65(6):686-98.



40. Talaiekhosani A, Nasiri A. The modeling of carbon dioxide, methane and non-methane organic gases emission rates in solid waste landfill in city of Jahrom, Iran. *Journal of Air Pollution and Health*. 2016;1(3).
41. Nojedehi P, Heidari M, Ataei A, Nedaei M, Kurdestani E. Environmental assessment of energy production from landfill gas plants by using Long-range Energy Alternative Planning (LEAP) and IPCC methane estimation methods: A case study of Tehran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2016;16:33-42.
42. Ghasemzade R, Pazoki M. Estimation and modeling of gas emissions in municipal landfill (Case study: Landfill of Jiroft City). *Pollution*. 2017;3(4):689-700.
43. Gollapalli M, Kota SH. Methane emissions from a landfill in north-east India: Performance of various landfill gas emission models. *Environmental Pollution*. 2018;234:174-80.
44. Aghdam EF, Fredenslund AM, Chanton J, Kjeldsen P, Scheutz C. Determination of gas recovery efficiency at two Danish landfills by performing downwind methane measurements and stable carbon isotopic analysis. *Waste Management*. 2018;73:220-29.
45. Rezaee E, Hadi Abolhasani M. Evaluation of landfill gas generation for exploitation energy (case study: landfill of shahinshahr). *Journal of Environmental Health Engineering*. 2018;4(3):204-14(in Persian).
46. Sutthasil N, Chiemchaisri C, Chiemchaisri W, Wangyao K, Endo K, Ishigaki T, Yamada M. The effectiveness of passive gas ventilation on methane emission reduction in a semi-aerobic test cell operated in the tropics. *Waste Management*. 2019;87:954-64.
47. Sánchez C, de la Fuente MD, Narros A, Del Peso I, Rodríguez E. Comparison of modeling with empirical calculation of diffuse and fugitive methane emissions in a Spanish landfill. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2019;69(3):362-72.
48. Ahmadi Orkomi A, Malekpour M. Energy utilization potential of Saravan landfill in Rasht with life cycle assessment approach. *Environmental Sciences*. 2021;19(2):205-24(in Persian).
49. Mohseni N, Omrani GA, Harati SA. Potential prediction of Methane production from landfill in Iranian metropolises (Tehran, Shiraz, Mashhad, Esfahan, Karaj). *Sustainability, Development & Environment*. 2020;1(2):35-49.
50. Mohsen RA, Abbassi B, Zytner R. Investigation of fugitive methane and gas collection efficiency in Halton landfill in Ontario, Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020;192:1-12 (in Persian).
51. Bui LT, Nguyen PH. Integrated model for methane emission and dispersion assessment from landfills: A case study of Ho Chi Minh City, Vietnam. *Science of the Total Environment*. 2020;738:139865.
52. Moghadam MA, Feizi R, Panahi Fard M, Haghighi Fard NJ, Omidinasab M, Faraji M, Shenavar B. Estimating greenhouse emissions from sanitary landfills using Land-GEM and IPCC model

- based on realistic scenarios of different urban areas: a case study of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2021;19(1):819-30.
53. Scheutz C, Kjeld A, Fredenslund AM. Methane emissions from Icelandic landfills—A comparison between measured and modelled emissions. *Waste Management*. 2022;139:136-45.
54. Mohammad Hassani E, Moeinaddini M, Rafiee R. Methane dispersion from Halgheh-Dareh Using IPCC and AERMOD hybrid approach. *Journal of Natural Environment*. 2022;75(4):588-99.
55. Delgado M, López A, Esteban García AL, Lobo A. The importance of particularising the model to estimate landfill GHG emissions. *Journal of Environmental Management*. 2023;325:116600.
56. Yeşiller N, Hanson JL, Manheim DC, Newman S, Guha A. Assessment of methane emissions from a California landfill using concurrent experimental, inventory, and modeling approaches. *Waste Management*. 2022;154:146-59.
57. Khazaei SH, Moeinaddini M, Rafiee R, Khorasani N, Sattler ML. Development of ILGAM model to predict generation and methane emission from landfill. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2022;15(3):477-92 (in Persian).
58. Jalayer A, Heydari R. Estimating the amount of recoverable gases at the Alborz landfill site in Qom Province using LandGem software. *Journal of Urban Management & Environmental Engineering*. 2023;1(2):16-33.
59. McBain MC, Warland JS, McBride RA, Wagner Riddle C. Micrometeorological measurements of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from a municipal solid waste landfill. *Waste Management & Research*. 2005;23(5):409-19.
60. Abichou T, Chanton J, Powelson D, Fleiger J, Escoriaza S, Lei Y, Stern J. Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers. *Waste Management*. 2006;26(11):1305-12.
61. Chen IC, Hegde U, Chang CH, Yang SS. Methane and carbon dioxide emissions from closed landfill in Taiwan. *Chemosphere*. 2008;70(8):1484-91.
62. Rawat M, Singh UK, Mishra AK, Subramanian V. Methane emission and heavy metals quantification from selected landfill areas in India. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2008;137:67-74.
63. Lohila A, Laurila T, Tuovinen JP, Aurela M, Hatakka J, Thum T, et al. Micrometeorological measurements of methane and carbon dioxide fluxes at a municipal landfill. *Environmental Science & Technology*. 2007;41(8):2717-22.
64. Chiemchaisri C, Chiemchaisri W, Kumar S, Hettiaratchi JP. Solid waste characteristics and their relationship to gas production in tropical landfill. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2007;135:41-48.
65. Sanderson J, Hettiaratchi P, Hunte C, Hurtado O, A و K. Methane balance of a bioreactor landfill in Latin America. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2008;58(5):620-28.
66. Zhang H, He P, Shao L. Methane emissions

- from MSW landfill with sandy soil covers under leachate recirculation and subsurface irrigation. *Atmospheric Environment*. 2008;42(22):5579-88.
67. Xiaoli C, Ziyang L, Shimaoka T, Nakayama H, Ying Z, Xiaoyan C, et al. Characteristics of environmental factors and their effects on CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emissions from a closed landfill: An ecological case study of Shanghai. *Waste Management*. 2010;30(3):446-51.
68. Héroux M, Guy C, Millette D. A statistical model for landfill surface emissions. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2010;60(2):219-28.
69. Abichou T, Clark J, Chanton J. Reporting central tendencies of chamber measured surface emission and oxidation. *Waste Management*. 2011;31(5):1002-08.
70. Capaccioni B, Caramiello C, Tatàno F, Viscione A. Effects of a temporary HDPE cover on landfill gas emissions: Multiyear evaluation with the static chamber approach at an Italian landfill. *Waste Management*. 2011;31(5):956-65.
71. Chanton J, Abichou T, Langford C, Spokas K, Hater G, Green R, et al. Observations on the methane oxidation capacity of landfill soils. *Waste Management*. 2011;31(5):914-25.
72. Scheutz C, Fredenslund AM, Chanton J, Pedersen GB, Kjeldsen P. Mitigation of methane emission from Fakse landfill using a biowindow system. *Waste Management*. 2011;31(5):1018-28.
73. Schroth MH, Eugster W, Gomez KE, Gonzalez Gil G, Niklaus PA, Oester P. Above-and below-ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil. *Waste management*. 2012;32(5):879-89.
74. Pratt C, Walcroft AS, Deslippe J, Tate KR. CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> ratios indicate highly efficient methane oxidation by a pumice landfill cover-soil. *Waste management*. 2013;33(2):412-19.
75. Goldsmith Jr CD, Chanton J, Abichou T, Swan N, Green R, Hater G. Methane emissions from 20 landfills across the United States using vertical radial plume mapping. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2012;62(2):183-97.
76. Di Trapani D, Di Bella G, Viviani G. Uncontrolled methane emissions from a MSW landfill surface: Influence of landfill features and side slopes. *Waste Management*. 2013;33(10):2108-15.
77. Harborth P, Fuß R, Münnich K, Flessa H, Fricke K. Spatial variability of nitrous oxide and methane emissions from an MBT landfill in operation: Strong N<sub>2</sub>O hotspots at the working face. *Waste Management*. 2013;33(10):2099-107.
78. Scheutz C, Pedersen RB, Petersen PH, Jørgensen JH. Mitigation of methane emission from an old unlined landfill in Klintholm, Denmark using a passive biocover system. *Waste Management*. 2014;34(7):1179-90.
79. Gonzalez Valencia R, Magana Rodriguez F, Maldonado E, Salinas J, Thalasso F. Detection of hotspots and rapid determination of methane emissions from landfills via a ground-surface

- method. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2015;187:1-8.
80. Jeong S, Nam A, Yi SM, Kim JY. Field assessment of semi-aerobic condition and the methane correction factor for the semi-aerobic landfills provided by IPCC guidelines. *Waste Management*. 2015;36:197-203.
81. Jakober CA, Mara SL, Hsu YK, Herner JD. Mobile measurements of climate forcing agents: Application to methane emissions from landfill and natural gas compression. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2015;65(4):404-12.
82. Lucernoni F, Tapparo F, Capelli L, Sironi S. Evaluation of an Odour Emission Factor (OEF) to estimate odour emissions from landfill surfaces. *Atmospheric Environment*. 2016;144:87-99.
83. Lucernoni F, Rizzotto M, Tapparo F, Capelli L, Sironi S, Busini V. Use of CFD for static sampling hood design: An example for methane flux assessment on landfill surfaces. *Chemosphere*. 2016;163:259-69.
84. Park JK, Kang JY, Lee NH. Estimation of methane emission flux at landfill surface using laser methane detector: Influence of gauge pressure. *Waste Management & Research*. 2016;34(8):784-92.
85. Riddick SN, Hancock BR, Robinson AD, Connors S, Davies S, Allen G, et al. Development of a low-maintenance measurement approach to continuously estimate methane emissions: A case study. *Waste Management*. 2018;73:210-19.
86. Wang X, Jia M, Lin X, Xu Y, Ye X, Kao CM, Chen S. A comparison of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions from three different cover types in a municipal solid waste landfill. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2017;67(4):507-15.
87. Gonzalez Valencia R, Magana-Rodriguez F, Maldonado E, Salinas J, Thalasso F. Hotspot detection and spatial distribution of methane emissions from landfills by a surface probe method. *Waste Management*. 2016;55:299-305.
88. Lando AT, Nakayama H, Shimaoka T. Application of portable gas detector in point and scanning method to estimate spatial distribution of methane emission in landfill. *Waste Management*. 2017;59:255-66.
89. Lucernoni F, Rizzotto M, Capelli L, Busini V, Del Rosso R, Sironi S. Sampling method for the determination of methane emissions from landfill surfaces. *Waste Management & Research*. 2017;35(10):1034-44.
90. Allen G, Hollingsworth P, Kabbabe K, Pitt JR, Mead MI, Illingworth S, et al. The development and trial of an unmanned aerial system for the measurement of methane flux from landfill and greenhouse gas emission hotspots. *Waste Management*. 2019;87:883-92.
91. Ngwabie NM, Wirlen YL, Yinda GS, VanderZaag AC. Quantifying greenhouse gas emissions from municipal solid waste dumpsites in Cameroon. *Waste Management*. 2019;87:947-53.
92. Obersky L, Rafiee R, Cabral AR, Golding SD, Clarke WP. Methodology to determine the extent of anaerobic digestion, composting and CH<sub>4</sub> oxidation

- in a landfill environment. *Waste Management*. 2018;76:364-73.
93. Shen S, Chen Y, Zhan L, Xie H, Bouazza A, He F, Zuo X. Methane hotspot localization and visualization at a large-scale Xi'an landfill in China: effective tool for landfill gas management. *Journal of Environmental Management*. 2018;225:232-41.
94. Fjelsted L, Christensen AG, Larsen JE, Kjeldsen P, Scheutz C. Assessment of a landfill methane emission screening method using an unmanned aerial vehicle mounted thermal infrared camera – A field study. *Waste Management*. 2019;87:893-904.
95. Izumoto S, Hamamoto S, Kawamoto K, Nagamori M, Nishimura T. Monitoring of methane emission from a landfill site in daily and hourly time scales using an automated gas sampling system. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25:24500-06.
96. Bian R, Xin D, Chai X. Methane emissions from landfill: influence of vegetation and weather conditions. *Environmental Technology*. 2019;40(16):2173-81.
97. Bourn M, Robinson R, Innocenti F, Scheutz C. Regulating landfills using measured methane emissions: An English perspective. *Waste Management*. 2019;87:860-69.
98. Gámez AF, Maroto JM, IV, P. Quantification of methane emissions in a Mediterranean landfill (Southern Spain). A combination of flux chambers and geostatistical methods. *Waste Management*. 2019;87:937-46.
99. Faubert P, Belisle CL, Bertrand N, Bouchard S, Chantigny MH, Paré MC, et al. Land application of pulp and paper mill sludge may reduce greenhouse gas emissions compared to landfilling. *Conservation and Recycling*. 2019;150:104415.
100. Jeong S, Park J, Kim YM, Park MH, Kim JY. Innovation of flux chamber network design for surface methane emission from landfills using spatial interpolation models. *Science of the Total Environment*. 2019;688:18-25.
101. Xueref Remy I, Zazzeri G, Breon FM, Vogel F, Ciais P, Lowry D, Nisbet EG. Anthropogenic methane plume detection from point sources in the Paris megacity area and characterization of their  $\delta^{13}C$  signature. *Atmospheric Environment*. 2020;222:117055.
102. Li H, Meng B, Yue B, Gao Q, Ma Z, Zhang W, et al. Seasonal CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> effluxes in a final covered landfill site in Beijing, China. *Science of the Total Environment*. 2020;725:138355.
103. Bakkaloglu S, Lowry D, Fisher RE, France JL, Nisbet EG. Carbon isotopic characterisation and oxidation of UK landfill methane emissions by atmospheric measurements. *Waste Management*. 2021;132:162-75.
104. Reinelt T, McCabe BK, Hill A, Harris P, Baillie C, Liebetrau J. Field measurements of fugitive methane emissions from three Australian waste management and biogas facilities. *Waste Management*. 2022;137:294-303.
105. Fraser McDonald A, Boardman C, Gladding T, Burnley S, Gauci V. Methane emissions from trees

- planted on a closed landfill site. *Waste Management & Research*. 2022;40(11):1618-28.
106. Fraser McDonald A, Boardman C, Gladding T, Burnley S, Gauci V. Methane emissions from forested closed landfill sites: Variations between tree species and landfill management practices. *Science of the Total Environment*. 2022;838:156019.
107. Kissas K, Kjeldsen P, Ibrom A, Scheutz C. The effect of barometric pressure changes on the performance of a passive biocover system, Skellingsted landfill, Denmark. *Waste Management*. 2023;156:216-26.
108. Delkash M, Chow FK, Imhoff PT. Diurnal landfill methane flux patterns across different seasons at a landfill in Southeastern US. *Waste Management*. 2022;144:76-86.
109. Delgado M, López A, Esteban AL, Lobo A. Some findings on the spatial and temporal distribution of methane emissions in landfills. *Journal of Cleaner Production*. 2022;362:132334.
110. Williams JP, Ars S, Vogel F, Regehr A, Kang M. Differentiating and mitigating methane emissions from fugitive leaks from natural gas distribution, historic landfills, and manholes in Montréal, Canada. *Environmental Science Technology*. 2022;56(23):16686-94.
111. Wong CL, Zawadzki W. Emissions rate measurement with flow modelling to optimize landfill gas collection from horizontal collectors. *Waste Management*. 2023;157:199-209.
112. Duan Z, Scheutz C, Kjeldsen P. Mitigation of methane emissions from three Danish landfills using different biocover systems. *Waste Management*. 2022;149:156-67.
113. Rodrigues MC, Silveira EA, Junior AC. On the correlation between thermal imagery and fugitive CH<sub>4</sub> emissions from MSW landfills. *Waste Management*. 2023;166:163-70.
114. Takriti M, Ward SE, Wynn PM, McNamara NP. Isotopic characterisation and mobile detection of methane emissions in a heterogeneous UK landscape. *Atmospheric Environment*. 2023;305:119774.
115. Karanjekar RV, Bhatt A, Altouqui S, Jangikhatoonabad N, Durai V, Sattler ML, et al. Estimating methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: The CLEEN model. *Waste Management*. 2015;46:389-98.
116. Park JK, Chong YG, Tameda K, Lee NH. Methods for determining the methane generation potential and methane generation rate constant for the FOD model: a review. *Waste Management & Research*. 2018;36(3):200-20.
117. Scharff H, Jacobs J. Applying guidance for methane emission estimation for landfills. *Waste Management*. 2006;26(4):417-29.
118. Tintner J, Kühleitner M, Binner E, Brunner N, Smidt E. Modeling the final phase of landfill gas generation from long-term observations. *Biodegradation*. 2012;23:407-14.
119. Amini HR, Reinhart DR, Mackie KR. Determination of first-order landfill gas modeling

- parameters and uncertainties. *Waste management*. 2012;32(2):305-16.
120. IPCC I. guidelines for national greenhouse gas inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change-Chapter 5-Waste. In: editor.^editors. ed.: IPCC, London; 2006. p.
121. Rajaram V, Siddiqui FZ, Khan ME. From landfill gas to energy: Technologies and challenges: CRC press; 2011.
122. Abushammala MF, Basri NEA, Irwan D, Younes MK. Methane oxidation in landfill cover soils: a review. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2014;8(1):1-14.
123. Barlaz MA. Forest products decomposition in municipal solid waste landfills. *Waste Management*. 2006;26(4):321-33.
124. Fei X, Zekkos D, Raskin L. Quantification of parameters influencing methane generation due to biodegradation of municipal solid waste in landfills and laboratory experiments. *Waste Management*. 2016;55:276-87.
125. Gunaseelan VN. Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review. *Biomass and Bioenergy*. 1997;13(1-2):83-114.
126. Kamalan H, Sabour M, Shariatmadari N. A review on available Landfill Gas models. *Journal of Environmental Science and Technology*. 2011;4(2):79-92.
127. Krause MJ, W. Chickering G, Townsend TG, Reinhart DR. Critical review of the methane generation potential of municipal solid waste. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2016;46(13):1117-82.
128. Mao C, Feng Y, Wang X, Ren G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;45:540-55.
129. Micales JA, Skog KE. The decomposition of forest products in landfills. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 1997;39(2-3):145-58.
130. Oonk H. Literature review: methane from landfills. Final Report for Sustainable Landfill Foundation. 2010.
131. Scheutz C, Kjeldsen P, Bogner JE, De Visscher A, Gebert J, Hilger HA, et al. Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. *Waste Management & Research*. 2009;27(5):409-55.
132. Wang J, Zhu L, Wang Y, Gao S, Daut G. A comparison of different methods for determining the organic and inorganic carbon content of lake sediment from two lakes on the Tibetan Plateau. *Quaternary International*. 2012;250:49-54.
133. Machado SL, Carvalho MF, Gourc JP, Vilar OM, do Nascimento JC. Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results. *Waste Management*. 2009;29(1):153-61.
134. Mor S, Ravindra K, De Visscher A, Dahiya R, Chandra A. Municipal solid waste characterization and its assessment for potential methane generation: a case study. *Science of the Total Environment*.

- 2006;371(1-3):1-10.
135. Cho HS, Moon HS, Kim JY. Effect of quantity and composition of waste on the prediction of annual methane potential from landfills. *Bioresource Technology*. 2012;109:86-92.
136. Jeon E, Bae S, Lee D, Seo D, Chun S, Lee N, Kim J, editors. Methane generation potential and biodegradability of MSW components. Sardinia 2007 eleventh international waste management and landfill symposium; 2007.
137. Tolaymat TM, Green RB, Hater GR, Barlaz MA, Black P, Bronson D, Powell J. Evaluation of landfill gas decay constant for municipal solid waste landfills operated as bioreactors. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2010;60(1):91-97.
138. Govindan SS, Agamuthu P. Quantification of landfill methane using modified Intergovernmental Panel on Climate Change's waste model and error function analysis. *Waste Management & Research*. 2014;32(10):1005-14.
139. Kumar S, Gaikwad S, Shekdar A, Kshirsagar P, Singh R. Estimation method for national methane emission from solid waste landfills. *Atmospheric Environment*. 2004;38(21):3481-87.
140. Thompson S, Sawyer J, Bonam R, Valdivia J. Building a better methane generation model: Validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills. *Waste Management*. 2009;29(7):2085-91.
141. Alexander A, Burklin C, Singleton A. Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user's guide: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development; 2005.
142. Mou Z, Scheutz C, Kjeldsen P. Evaluating the biochemical methane potential (BMP) of low-organic waste at Danish landfills. *Waste management*. 2014;34(11):2251-59.
143. Majdinasab A, Zhang Z, Yuan Q. Modelling of landfill gas generation: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2017;16:361-80.
144. Ahadi M. Policy making of energy resources in industry. National Climate Change Office, Department of Environment, Tehran, Iran. 2005.
145. Chai X, Tonjes DJ, Mahajan D. Methane emissions as energy reservoir: context, scope, causes and mitigation strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2016;56:33-70.
146. Ramprasad C, Teja HC, Gowtham V, Vikas V. Quantification of landfill gas emissions and energy production potential in Tirupati Municipal solid waste disposal site by LandGEM mathematical model. *MethodsX*. 2022;9:101869.
147. Eggleston H, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories 2006.
148. Change ICJ/Cowg/Ittfarotipocc. Mitigation of climate change. 2014;1454:147.
149. Wang D, Yuan W, Xie Y, Fei X, Ren F, Wei Y, et al. Simulating CH<sub>4</sub> emissions from MSW landfills in China from 2003 to 2042 using IPCC and LandGEM models. *Heliyon*. 2023;9(12):e22943.



150. Majdinasab A, Zhang Z, Yuan Q. Modelling of landfill gas generation: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2017;16(2):361-80.
151. Pierce J, LaFountain L, Huitric R. *Landfill Gas Generation and Modeling Manual of Practice*: Solid Waste Association of North America; 2005.
152. Scheutz C, Bogner J, Chanton JP, Blake D, Morcet M, Aran C, Kjeldsen P. Atmospheric emissions and attenuation of non-methane organic compounds in cover soils at a French landfill. *Waste Management*. 2008;28(10):1892-908.
153. Scheutz C, Fredenslund AM, Nedenskov J, Samuelsson J, Kjeldsen P. Gas production, composition and emission at a modern disposal site receiving waste with a low-organic content. *Waste management*. 2011;31(5):946-55.
154. Juncher Jørgensen C, Lund Johansen KM, Westergaard Nielsen A, Elberling B. Net regional methane sink in High Arctic soils of northeast Greenland. *Nature Geoscience*. 2015;8(1):20-23.
155. Lewis AW, Yuen ST, Smith AJ. Detection of gas leakage from landfills using infrared thermography-applicability and limitations. *Waste Management & Research*. 2003;21(5):436-47.
156. Beaumont B, Radoux J, Defourny P. Assessment of airborne and spaceborne thermal infrared remote sensing for detecting and characterizing landfills. *Waste Management and The Environment VII*. 2014;180:237-48.
157. Capodici M, Ciraolo G, DI TRAPANI D, Viviani G. Remote sensing analysis coupled to field measurements for the evaluation of methane emissions from a landfill site: a case study. *Inproceedings Sardinia 2015* 2015.
158. Battaglini R, Raco B, Scozzari A. Effective monitoring of landfills: flux measurements and thermography enhance efficiency and reduce environmental impact. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2013;10(6):064002.
159. Pihlatie MK, Christiansen JR, Aaltonen H, Korhonen JF, Nordbo A, Rasilo T, et al. Comparison of static chambers to measure CH<sub>4</sub> emissions from soils. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2013;171:124-36.
160. Davidson E, Savage K, Verchot L, Navarro R. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2002;113(1-4):21-37.
161. Kutzbach L, Schneider J, Sachs T, Giebels M, Nykänen H, Shurpali N, et al. CO<sub>2</sub> flux determination by closed-chamber methods can be seriously biased by inappropriate application of linear regression. *Biogeosciences*. 2007;4(6):1005-25.
162. Livingston G, Hutchinson G. Enclosure-based measurement of trace gas exchange: applications and sources of error. *Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water*. 1995;51:14-51.
163. Nay SM, Mattson KG, Bormann BT. Biases of chamber methods for measuring soil CO<sub>2</sub> efflux demonstrated with a laboratory apparatus. *Ecology*. 1994;75(8):2460-63.

164. Conen F, Smith K. An explanation of linear increases in gas concentration under closed chambers used to measure gas exchange between soil and the atmosphere. *European Journal of Soil Science*. 2000;51(1):111-17.
165. Kjeldsen P, Fischer EV. Landfill gas migration—Field investigations at Skellingsted landfill, Denmark. *Waste Management & Research*. 1995;13(5):467-84.
166. Christophersen M, Kjeldsen P, Holst H, Chanton J. Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: factors governing emissions and methane oxidation. *Waste Management & Research*. 2001;19(6):595-612.
167. Gebert J, Groengroeft A. Passive landfill gas emission – Influence of atmospheric pressure and implications for the operation of methane-oxidising biofilters. *Waste Management*. 2006;26(3):245-51.
168. Humer M, editor *Microbial methane oxidation for the reduction of landfill gas emissions. Proceedings of the 15th International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, USA (1999); 1999.*
169. Hutchinson G, Livingston G. Vents and seals in non-steady-state chambers used for measuring gas exchange between soil and the atmosphere. *European Journal of Soil Science*. 2001;52(4):675-82.
170. Rolston D. Gas diffusivity and gas flux. *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods, Agronomy Monograph*. 1986 (9):1089-119.
171. Hensen A, Vermeulen AT, Wyers GP, Zhang Y. Eddy correlation and relaxed eddy accumulation measurements of CO<sub>2</sub> fluxes over grassland. *Physics and Chemistry of the Earth*. 1996;21(5):383-88.
172. Kroon PS, Schrier Uijl AP, Hensen A, Veenendaal EM, Jonker HJJ. Annual balances of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from a managed fen meadow using eddy covariance flux measurements. *European Journal of Soil Science*. 2010;61(5):773-84.
173. Xu L, Lin X, Amen J, Welding K, McDermitt D. Impact of changes in barometric pressure on landfill methane emission. *Global Biogeochemical Cycles*. 2014;28(7):679-95.
174. Scharff H, Martha A, Van Rijn D, Hensen A, Flechard C, Oonk H, et al. A comparison of measurement methods to determine landfill methane emissions. *Afvalzorg Deponie BV, Dutch ministry of Housing, spatial Planning and Environment*. 2003.
175. Krautwurst S, Gerilowski K, Jonsson HH, Thompson DR, Kolyer RW, Iraci LT, et al. Methane emissions from a Californian landfill, determined from airborne remote sensing and in situ measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017;10(9):3429-52.
176. Peischl J, Ryerson TB, Brioude J, Aikin KC, Andrews AE, Atlas E, et al. Quantifying sources of methane using light alkanes in the Los Angeles basin, California. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013;118(10):4974-90.
177. Cambaliza MO, Shepson P, Bogner J, Caulton D, Stirm B, Sweeney C, et al. Quantification and source apportionment of the methane emission

- flux from the city of Indianapolis. *Elementa*. 2015;3:000037.
178. Czepiel PM, Mosher B, Harriss RC, Shorter JH, McManus JB, Kolb CE, et al. Landfill methane emissions measured by enclosure and atmospheric tracer methods. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 1996;101(11):16711-19.
179. Trégourès A, Beneito A, Berne P, Gonze MA, Sabroux JC, Savanne D, et al., editors. Comparison of seven methods for measuring methane flux at a municipal solid waste landfill site. *Waste Management and Research*; 1999.
180. Galle BO, Samuelsson J, Svensson BH, Borjesson G. Measurements of methane emissions from landfills using a time correlation tracer method based on FTIR absorption spectroscopy. *Environmental Science and Technology*. 2001;35(1):21-25.
181. Börjesson G, Samuelsson J, Chanton J. Methane oxidation in Swedish landfills quantified with the stable carbon isotope technique in combination with an optical method for emitted methane. *Environmental Science & Technology*. 2007;41(19):6684-90.
182. Abichou T, Clark J, Chanton J, Hater G, Green R, Goldsmith D, et al. A new approach to characterize emission contributions from area sources during optical remote sensing technique testing. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2012;62(12):1403-10.
183. Figueroa VK, Mackie KR, Guarriello N, Cooper CD. A robust method for estimating landfill methane emissions. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2009;59(8):925-35.
184. Zhu H, Letzel MO, Reiser M, Kranert M, Bächlin W, Flassak T. A new approach to estimation of methane emission rates from landfills. *Waste Management*. 2013;33(12):2713-19.
185. Foster Wittig TA, Thoma ED, Albertson JD. Estimation of point source fugitive emission rates from a single sensor time series: A conditionally-sampled Gaussian plume reconstruction. *Atmospheric Environment*. 2015;115:101-09.
186. Fredenslund AM, Rees White TC, Beaven RP, Delre A, Finlayson A, Helmore J, et al. Validation and error assessment of the mobile tracer gas dispersion method for measurement of fugitive emissions from area sources. *Waste Management*. 2019;83:68-78.
187. Hensen A, Scharff H. Methane emission estimates from landfills obtained with dynamic plume measurements. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*. 2001;1:455-64.
188. Mohammad Hassani E, Rafei R, Moeinaddini M, Aghapour N. Estimation of Methane gas emission rate from landfill using inverse dispersion modeling (case study of landfill in Alborz province). *Iranian Journal of Health and Environment*. 2024;17(1):181-92 (in Persian).



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>  
Systematic Review Article



## Investigating methods of estimating and measuring methane emissions in municipal solid waste landfills: a systematic review

Mohammad Hssanabadi<sup>1,2</sup>, Mohammad Sadegh Hassanvand<sup>1,2</sup>, Mohammad Khanizadeh<sup>1</sup>, Sasan Faridi<sup>1,2</sup>, Adel Mokammel<sup>1</sup>, Bitá Malekian Esfahani<sup>1</sup>, Ali Ahmadi Orkomi<sup>3</sup>, Fatemeh Momeniha<sup>1,4,\*</sup>

- 1- Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
- 2- Center for Solid Air Pollution (CAPR), Institute for Environmental Research, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
- 3- Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Someh Sara, Guilan, Iran
- 4- Center for Solid Waste Research (CSWR), Institute for Environmental Research, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

### ARTICLE INFORMATION:

**Received:** 28 May 2024  
**Revised:** 17 July 2024  
**Accepted:** 22 July 2024  
**Published:** 11 December 2024

**Keywords:** Methane emission, Landfill, Municipal solid waste, LandGEM, IPCC

**\*Corresponding Author:**  
fa.momeniha@tums.ac.ir

### ABSTRACT

**Background and Objective:** The initial step in managing methane emissions is quantification. This study aims to comprehensively investigate the methods for estimating and measuring methane gas emissions in municipal solid waste landfills.

**Materials and Methods:** This systematic review includes studies published in English and Farsi between January 2005 and May 2023. English-language articles were included from PubMed, Web of Science, and Scopus databases, while Persian-language articles were included from SID, Majiran and Google Scholar.

**Results:** After evaluating the studies, 90 studies providing information on methods for measuring and estimating methane gas emissions in urban landfills were selected. The results showed that emission estimates based on widely used models like LandGEM and IPCC, despite being lower in cost and providing faster results, are often associated with relatively high uncertainty. Therefore, quantitative and qualitative methods of direct measurement are preferred for accurately determining methane emissions from landfills. The most commonly used methods for measuring greenhouse gases, especially methane from landfills, include direct reading equipment and closed flux determination chambers.

**Conclusion:** Estimating greenhouse gas emissions from primary sources allows responsible authorities to understand the current status of methane emissions and to formulate reduction strategies. The findings of estimated methane emissions from landfills can differ significantly from the actual measurements in some situations. Therefore, while these estimation methods are useful, fast and cost-effective tools, their inherent uncertainties should be considered when using them.

Please cite this article as: Hssanabadi M, Hassanvand MS, Khanizadeh M, Faridi S, Mokammel A, Malekian Esfahani B, et al. Investigating methods of estimating and measuring methane emissions in municipal solid waste landfills: a systematic review. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2024;17(3):595-630.

