Journal of Behdasht dar Arseh (i.e., Health in the Field)
Shahid Beheshti University of Medical Sciences
School of Public Health and Safety
Journal homepage: https://journals.sbmu.ac.ir/jhf
Vol.14, No.1, Spring 2026

Evaluation of methane emission from Zanjan municipal solid waste landfill using IPCC waste and LandGEM models (1997–2034)

Javad Zangini [1], Nadali Alavi Bakhtiarvand[1], Reza Saeedi[1], Anooshiravan Mohseni Bandpei[1], Mehrnoosh Abtahi [1, 2 *]

[1] Department of Health, Safety and Environment, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
[2] Air Quality and Climate Change Research Center, Research Institute for Health Sciences and Environment, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Abstract

Background and Aims: Methane is one of the most potent greenhouse gases affecting climate change, and landfills are among its primary emission sources. Accurate estimation of methane emissions is a key step in effective waste management, mitigating climate impacts, and planning for energy recovery. This study aimed to estimate and compare methane emissions and energy production potential from the Zanjan municipal solid waste (MSW) landfill using the IPCC Waste and LandGEM models from 1997 to 2034.

Materials and Methods: Demographic data, waste generation and disposal rates, physical composition, and landfill management conditions were collected. These data, along with model-specific parameters and coefficients—including DOC, DOCF, MCF, F, L0, k, and OX—were utilized to simulate methane emissions based on IPCC guidelines and LandGEM documentation. Finally, the potential for electrical energy production derived from the estimated methane gas was calculated. Ethical considerations were strictly observed throughout this research.

Results: Results indicated an increasing trend in methane emissions for both models; however, LandGEM estimates were significantly higher. Annual methane emissions increased from 0.114 to 3.204 Gg/year in the IPCC Waste model and from 0.377 to 11.306 Gg/year in the LandGEM model, with the highest levels observed in the final years. The annual electrical energy production potential in the final year was estimated at 57.7 GWh/year for the LandGEM model and 15.27 GWh/year for the IPCC Waste model.

Conclusion: The findings demonstrate the capability of both IPCC Waste and LandGEM models in predicting emission trends, although LandGEM predicted higher values. The Zanjan landfill possesses a favorable capacity for energy recovery and greenhouse gas mitigation. Given the modeling-based nature of this research, validation of these results using field measurement data is recommended for future studies.

Keywords: Municipal solid waste (MSW); Biogas; Climate change; Emission modeling; Energy recovery; Greenhouse gases (GHGs).

Please cite this article as: Zangini J, Alavi Bakhtiarvand N, Saeedi R, Mohseni BandpeyA, Abtahi M. Evaluation of methane emission from Zanjan municipal solid waste landfill using IPCC waste and LandGEM models (1997–2034). Journal of Behdasht dar Arseh 2026; 14(1):68-80. https://doi.org/10.22037/jhf.v14i1.51462

Corresponding Author: Department of Health, Safety and Environment, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Corresponding Author: Department of Health, Safety and Environment, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Email: mehrabtahi@sbmu.ac.ir

Received: 11 January 2026
Accepted: 1 September 2026

فصلنامه علمی-پژوهشی
بهداشت در عرصه
دوره ۱۴ شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، صفحات ۶۸ تا ۸۰
Journal homepage: https://journals.sbmu.ac.ir/jhf

ارزیابی میزان انتشار گاز متان از محل دفن پسماند شهر زنجان با استفاده از مدل های IPCC Waste و landGEM در سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۴۱۵

جواد زنگینی [۱]، نادعلی علوی بختیاروند [۱]، رضا سعیدی [۱]، انوشیروان محسنی بندپی [۱]، مهرنوش ابطحی [۲*]

[۱] گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.
[۲] مرکز تحقیقات کیفیت هوا و تغییر اقلیم، پژوهشکده علوم بهداشتی و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

مقاله پژوهشی

چکیده

زمینه و اهداف: متان از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای مؤثر بر تغییر اقلیم است و محل‌های دفن پسماند از منابع اصلی انتشار متان محسوب می‌شوند که برآورد دقیق انتشار آن، برای مدیریت پسماند و بازیابی انرژی ضروری است. پژوهش حاضر با هدف برآورد و مقایسه انتشار متان از محل دفن پسماند شهر زنجان با استفاده از مدل‌های IPCC Waste و LandGEM طی سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۴۱۵ انجام شد.

مواد و روش‌ها: داده‌های جمعیت‌شناختی، پسماند تولیدی و دفن شده، ترکیب فیزیکی و شرایط مدیریتی محل دفن پسماند گردآوری شد. این داده‌ها به همراه پارامترهای اختصاصی و ضرایب مورد نیاز مدل‌ها شامل DOC، DOC_F، MCF، F، L_0، k، OX مطابق دستورالعمل‌های IPCCWaste و LandGEM جهت شبیه‌سازی انتشار متان به‌کار رفت. همچنین با استفاده از میزان انتشار برآوردی توسط هر مدل، پتانسیل تولید انرژی الکتریکی محاسبه گردید. موازین اخلاقی درانجام این پژوهش، رعایت گردید.

یافته‌ها: هر دو مدل روند افزایشی انتشار را نشان دادند؛ اما مقادیر LandGEM به طور معناداری بالاتر بود. انتشار سالانه متان در IPCC Waste از ۰/۱۱۴ به ۳/۲۰۴ گیگاگرم در سال و در LandGEM از ۰/۳۷۷ به ۱۱/۳۰۶ Gg/year افزایش یافت که اوج آن در سال‌های پایانی برای مدل‌های LandGEM و IPCC Waste به ترتیب برابر با ۵۷/۷ و ۱۵/۲۷ GWh/year است.

نتیجه‌گیری: نتایج بیانگر توانمندی هر دو مدل در پیش‌بینی روند انتشار است، هرچند LandGEM مقادیر بیشتری را پیش‌بینی کرد. بر اساس محل دفن پسماند زنجان، ظرفیت مطلوبی جهت استحصال انرژی و کاهش گازهای گلخانه‌ای دارد. با توجه به مدل‌محور بودن پژوهش، اعتبارسنجی نتایج با داده‌های پایش میدانی در مطالعات آتی ضروری است.

کلید واژه‌ها: پسماند شهری؛ بیوگاز؛ تغییر اقلیم؛ مدل‌سازی انتشار؛ بازیابی انرژی؛ گازهای گلخانه‌ای.

Please cite this article as: Zangini J, Alavi Bakhtiarvand N, Saeedi R, Mohseni BandpeyA, Abtahi M. Evaluation of methane emission from Zanjan municipal solid waste landfill using IPCC waste and LandGEM models (1997–2034). Journal of Behdasht dar Arseh 2026; 14(1):68-80. https://doi.org/10.22037/jhf.v14i1.51462

***نویسنده مسئول:** گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.
Email: mehrabtahi@sbmu.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۲۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۱

مقدمه

تغییر اقلیم ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدیریت اصولی پسماند را به یکی از محورهای کلیدی توسعه پایدار تبدیل کرده است [۱]. در این میان، محل‌های دفن پسماند به واسطه تجزیه بی‌هوازی مواد آلی، سهمی تعیین‌کننده در انتشار متان دارند که به دلیل پتانسیل گرمایش جهانی (GWP: Global Warming Potential) ۲۸ تا ۳۶ برابر بیشتر از دی‌اکسید کربن در افق ۱۰۰ ساله، عاملی قدرتمند در تشدید پدیده گلخانه‌ای محسوب می‌شود [۲]. متان با تشکیل سهمی حدود ۱۶ درصدی از گرمایش زمین ناشی از گازهای گلخانه‌ای، نقشی تعیین‌کننده در تغییرات اقلیمی دارد [۳]. در حالی که حدود ۴۰ درصد از تولید این گاز حاصل منابع طبیعی است، سهم ۶۰ درصدی ناشی از فعالیت‌های انسانی، به ویژه در بخش مدیریت پسماند، آن را به کانونی نیازمند اقدامات اصلاحی تبدیل کرده است [۳،۴]. با توجه به ترکیب آلی بالای پسماندهای شهری در ایران [۵،۶]، دفن همچنان یکی از روش‌های اصلی مدیریت پسماند شهری به شمار می‌رود و سهم بالای مواد آلی در پسماندها، محل‌های دفن را به یکی از مهم‌ترین منابع تولید متان تبدیل کرده است. از سوی دیگر، محدود بودن زیرساخت‌های جمع‌آوری و بازیابی گاز محل دفن در بسیاری از شهرهای کشور، از جمله زنجان، ضرورت برآورد دقیق تولید متان و ارزیابی پتانسیل بازیابی انرژی را برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در مدیریت پسماند بیش از پیش آشکار می‌سازد [۷،۸]. از این رو، پایش و پیش‌بینی دقیق نرخ تولید متان در محل‌های دفن پسماند اهمیت ویژه‌ای دارد؛ چرا که نبود برآوردهای دقیق، طراحی سیستم‌های استحصال گاز و تدوین راهبردهای کاهش انتشار را با خطای عملکردی مواجه می‌سازد [۹،۱۰]. برای برآورد نرخ انتشار متان از محل‌های دفن پسماند، مدل‌های مبتنی بر تجزیه مرتبه اول (First-Order Decay:FOD) به عنوان رویکرد استاندارد شناخته می‌شوند [۱۱]. در این میان، مدل IPCC با رویکرد ملی و مبتنی بر ترازنامه کربن، و مدل LandGEM با تمرکز بر پارامترهای عملیاتی و سینتیکی، دو ابزار پرکاربرد در این حوزه هستند [۱۲].

اگرچه هر دو مدل از معادله FOD بهره می‌برند، اما تفاوت در نحوه طبقه‌بندی پسماند، پارامترهای ورودی و نحوه مدیریت داده‌های تاریخی، منجر به نوسانات قابل‌توجهی در نتایج برآورد می‌شود [۱۳]. این ناهمگونی در خروجی‌ها نشان می‌دهد که انتخاب مدل مناسب، نه تنها به ویژگی‌های اقلیمی، بلکه به دقت واسنجی پارامترهای بومی وابسته است. با این حال، فقدان یک ارزیابی مقایسه‌ای که بتواند عملکرد این دو مدل را در شرایط خاص محل دفن پسماند زنجان (با الگوی پسماند منحصر به فرد) واسنجی کند، به یک شکاف تحقیقاتی ملموس تبدیل شده است [۱۴]. در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌سازی ریاضی/محاسباتی به ابزاری کلیدی برای مدیریت پسماند تبدیل شده است و در مطالعات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. Shabrina و همکاران (۲۰۲۵) با به‌کارگیری مدل IPCC Waste در محل دفن پسماند بانیوروتوی اندونزی، بر اهمیت پایش مستمر برای کاهش اثرات اقلیمی تأکید کرده‌اند [۱۵]. یافته‌های مطالعه Usman و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل IPCC Waste در نیجریه، وابستگی تولید متان به رشد جمعیت، کربن آلی و دما را گزارش کردند و ظرفیت بالای استحصال انرژی مورد تایید قرار دادند [۱۶]. با این حال، نیاز به تحلیل‌های تطبیقی در مطالعات پیشرو پررنگ‌تر شده است؛ چنان‌که Mokhtari و همکاران (۲۰۲۰) در یزد، اختلاف قابل توجهی میان نتایج خروجی دو مدل LandGEM (۵/۷۴ گیگاگرم) و IPCC Waste (۱۷/۲۳گیگاگرم) را گزارش کردند و بر ضرورت انتخاب مدل مناسب برای برآورد انتشار تأکید کردند [۱۴]. هم‌راستا با این موضوع، Wang و همکاران (۲۰۲۳) در تیانجین چین نشان دادند که بدون واسنجی پارامترهای بومی در هر دو مدل LandGEM و IPCC Waste، دقت برآورد به شدت کاهش می‌یابد [۱۷]. در همین راستا، مطالعه توکلی (۲۰۱۹) با تکیه بر مدلIPCC Waste ، پتانسیل بالای تولید متان در محل دفن پسماند زنجان (میانگین ۴۳/۳۴ گیگاگرم در سال) را تأیید کرده است [۱۸].

با وجود توسعه روش‌های پیشرفته‌تر مانند مدل‌های دینامیکی، مدل‌های مبتنی بر سیستم و رویکردهای داده محور مبتنی بر یادگیری ماشین برای پیش‌بینی انتشار گازهای محل دفن، مدل‌های مبتنی بر تجزیه مرتبه اول (FOD) همچنان به دلیل ساختار ساده، نیاز کمتر به داده‌های ورودی و پذیرش گسترده در چارچوب‌های گزارش‌دهی بین‌المللی، از پرکاربردترین ابزارهای ارزیابی انتشار متان به شمار می‌روند [۱۹،۲۰]. مدل‌های پیشرفته‌تر اگرچه قابلیت در نظر گرفتن روابط پیچیده‌تر میان عوامل محیطی، مدیریتی و زمانی را دارند، اما معمولاً به داده‌های طولانی مدت و با کیفیت بالا نیازمند هستند که در بسیاری از محل‌های دفن، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، محدود است [۶،۲۱].

اگر چه مطالعات متعددی در ایران برای برآورد انتشار متان از محل‌های دفن پسماند انجام شده است، اما تفاوت در ویژگی‌های پسماند، نرخ رشد جمعیت، میزان تولید و دفن سالانه پسماند و شرایط مدیریتی محل‌های دفن، موجب می‌شود نتایج حاصل از یک منطقه به طور مستقیم قابل تعمیم به سایر مناطق نباشد. در مورد محل دفن پسماند زنجان، با وجود انجام یک مطالعه مبتنی بر مدل IPCC Waste [۱۸]، ارزیابی هم‌زمان عملکرد مدل‌های IPCC Waste و LandGEM در یک دوره زمانی بلند مدت که تغییرات گذشته و روند آینده تولید متان را پوشش دهد، تاکنون انجام نشده است. همچنین، نبود داده‌های پایش مستقیم و بلند مدت از انتشار واقعی گاز محل دفن، ضرورت استفاده از مدل‌های برآوردی و مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های مختلف را برای کاهش عدم قطعیت افزایش می‌دهد. از این رو، پژوهش حاضر با هدف برآورد و

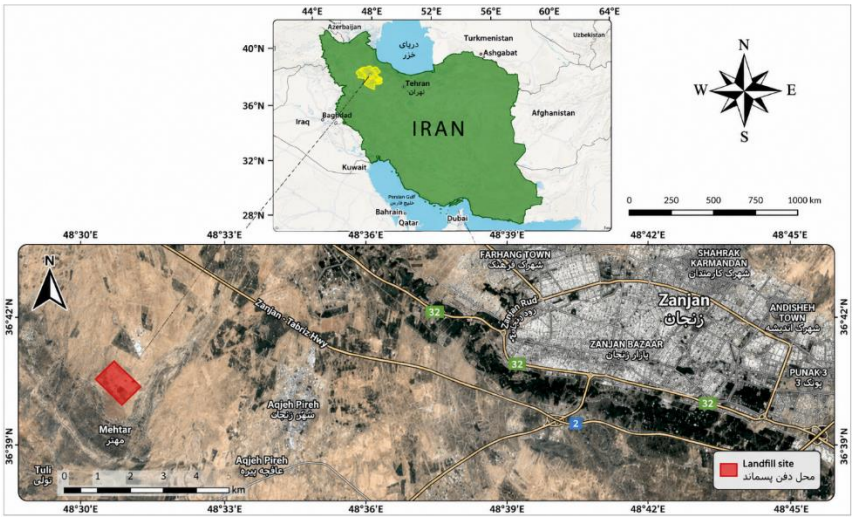
این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

مقایسه انتشار متان محل دفن پسماند زنجان طی سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۴۱۵ با استفاده از مدل‌های IPCC Waste و LandGEM انجام شده است.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

شهر زنجان، به عنوان مرکز استان زنجان، در منطقه شمال غرب ایران قرار گرفته و در محدوده طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۴ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی واقع شده است. مساحت شهر زنجان ۶۱/۶۹ کیلومتر مربع و در حدود ۰/۲۸ درصد از مساحت کل استان زنجان می‌باشد (پایگاه اطلاع‌رسانی استانداری استان زنجان، ۱۴۰۴). در این استان آب و هوای غالب، سرد و خشک با زمستان‌های بسیار سرد است (پایگاه هواشناسی زنجان، ۱۴۰۴). مرکز دفن پسماند شهری موسوم به سایت مهتر در کیلومتر ۱۹ شهر زنجان جاده دندی، به مساحت ۷۰ هکتار قرار گرفته است. این محل از سال ۱۳۷۶ به‌عنوان جایگاه نهایی دفن پسماندهای شهری، صنعتی و بیمارستانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، با توجه به اینکه مدل‌های IPCC و LandGEM مشخصاً برای شبیه‌سازی تجزیه پسماندهای جامد شهری توسعه یافته‌اند، در این پژوهش تنها آمار مربوط به «پسماند شهری» به عنوان داده‌های ورودی مدل‌ها در نظر گرفته شده و پسماندهای صنعتی و بیمارستانی، به دلیل ماهیت متفاوت ترکیب آلی و ضرایب تجزیه، در محاسبات متان لحاظ نشده‌اند.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و محدوده ناحیه مورد مطالعه (محل دفن پسماند شهر زنجان)

Figure 1- Geographical location and boundary of the study area (Zanjan municipal solid waste landfill site)

روش اجرای پژوهش و مدل سازی

در این پژوهش، نرخ تولید و انتشار متان طی دوره ۱۳۷۶ تا ۱۴۱۵، با استفاده از دو مدل IPCC Waste و LandGEM برآورد و نتایج حاصل از آنها با یکدیگر مقایسه شد. داده‌های ورودی هر دو مدل شامل اطلاعات مربوط به مقدار و ترکیب پسماند، شرایط بهره‌برداری محل دفن و سایر پارامترهای موردنیاز بود که از سازمان مدیریت پسماند شهرداری زنجان، مطالعات پیشین و راهنمای هر دو مدل گردآوری شد.

مدل IPCC Waste

در این پژوهش از نرم‌افزار IPCC Inventory Software -Version 2.980.9306.14596 که بر پایه دستورالعمل‌های سال ۲۰۰۶ هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC) توسعه یافته است، استفاده گردید. این نرم‌افزار به عنوان ابزاری استاندارد و مورد تایید در سطح بین‌المللی برای تهیه ترازنامه‌های ملی گازهای گلخانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل، با بهره‌گیری از رویکرد تجزیه با مرتبه اول FOD، فرایند تجزیه بی‌هوازی مواد آلی در توده پسماند شبیه‌سازی می‌کند به نحوی که نرخ انتشار متان به صورت تابعی از میزان مواد آلی، نرخ تجزیه (k)، شرایط اقلیمی محل دفن و سایر پارامترهای ورودی محاسبه می‌گردد [۲۲]. ورودی‌های مدل IPCC Waste شامل داده‌های کمّی پسماند و پارامترهای عملیاتی محل دفن است. این داده‌ها شامل پارامترهایی نظیر میزان کل پسماند تولیدی سالانه، نسبت پسماند دفن شده به کل پسماند، محتوای کربن آلی قابل تجزیه (Degradable Organic Carbon: DOC)، کسری از DOC تجزیه‌پذیر (Fraction of DOC that can decompose: DOC_F)، ضریب تبدیل به متان (F)، ضریب اصلاح شرایط مدیریتی محل دفن (Methane Correction Factor: MCF)،

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

درصد بازیابی متان (R)، ضریب اکسیداسیون خاک (OX) و پتانسیل تولید متان (L_0) می‌باشد (جدول شماره ۱).

گردآوری اطلاعات مورد نیاز برای بازه‌ی زمانی ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۴ از گزارش‌های سازمان مدیریت پسماند شهرداری زنجان و راهنماهای مرجع IPCC Waste ۲۰۰۶ استخراج گردید. در این تحلیل، تمرکز مدل بر پسماندهای دارای پتانسیل بالای تولید متان (شامل پسماند آلی، کاغذ و مقوا، چوب، منسوجات و پوشک) بوده و پسماندهای فاقد نقش موثر در فرآیند تولید متان (مانند فلزات، شیشه و نخاله) از محاسبات کنار گذاشته شدند. مطابق با رهنمودهای (IPCC, 2006)، در این پژوهش اولویت با استفاده از مقادیر بومی بوده و در صورت فقدان داده‌های اختصاصی برای برخی پارامترها از مقادیر پیش‌فرض این دستورالعمل استفاده شد تا ضمن حفظ دقت برآوردها، سازگاری نتایج با چارچوب‌های استاندارد تضمین گردد. با این حال، باید اذعان داشت که برآورد انتشار متان همواره با درجاتی از عدم‌قطعیت همراه است که به طور عمده ناشی از تغییرپذیری زمانی ترکیب پسماند، خطای احتمالی در آمار تولید پسماند و حساسیت ساختاری مدل به پارامترهای کلیدی نظیر DOC، L_0، K، DOCf و MCF می‌باشد. از این رو، نتایج حاصل از مدل‌سازی، به عنوان برآوردهای تئوری تفسیر می‌شوند.

جدول ۱- پارامترهای ورودی مدل IPCC Waste

Table 1- Input parameters for the IPCC Waste model

اجزای ترکیبی پسماند	DOC	DOC_f	K	MCF	F(fraction)
مواد آلی	۰/۱۵	۰/۷	۰/۰۶	۰/۸	۰/۵
ضایعات باغبانی	۰/۲	۰/۷	۰/۰۵	۰/۸	۰/۵
چوب	۰/۴۳	۰/۵	۰/۰۲	۰/۸	۰/۵
پوشک های یکبار مصرف	۰/۲۴	۰/۵	۰/۰۵	۰/۸	۰/۵
کاغذ و مقوا	۰/۴	۰/۵	۰/۰۴	۰/۸	۰/۵
منسوجات	۰/۲۴	۰/۵	۰/۰۴	۰/۸	۰/۵

میزان متان تولیدی در مدل IPCC با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$CH_4 \text{ generated in year t (Gg/yr)} = \sum_x[(A \bullet k \bullet MSW_T(x) \bullet MSW_F(x) \bullet L_0(x)) \bullet e^{-k(t-x)}] \quad (۱)$$

در این معادله، CH_4 generated بیانگر میزان متان تولید شده بر حسب گیگاگرم در سال است. متغیر t سال مورد نظر برای محاسبه انتشار متان و x سال‌هایی را نشان می‌دهد که داده‌های ورودی آنها در محاسبات لحاظ می‌شود.

پارامتر A ضریب نرمال‌سازی مدل بوده که از رابطه $k / (1- e^{-k})$ به دست می‌آید و به منظور اصلاح مجموع محاسبات در مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامتر k ثابت نرخ تولید متان یا ثابت تجزیه مرتبه اول است که سرعت تجزیه مواد آلی و تولید متان را نشان می‌دهد. همچنین، $MSW_T(x)$ بیانگر کل پسماند جامد شهری تولید شده بر حسب گیگاگرم در سال است که در این پژوهش بر اساس جمعیت همان سال و سرانه تولید پسماند محاسبه شد. $MSW_F(x)$ سهم پسماند تولیدی دفن شده در محل دفن را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه گزارش مکتوب و رسمی درباره سهم دقیق پسماند دفن شده در شهر زنجان منتشر نشده است، و از آنجایی که پسماندهای شهری زنجان عمدتاً در محل دفن دفع می‌شوند [۲۳]، مقدار ۹۰ درصد به عنوان یک فرض مدل‌سازی مبتنی بر شرایط محلی در این پژوهش در نظر گرفته شد. پارامتر L_0 نیز پتانسیل تولید متان بوده و بیانگر حداکثر مقدار متان قابل تولید از تجزیه بی‌هوازی پسماند دفن شده است.

معادله محاسبه L_0 به شرح ذیل می‌باشد:

$$L_0(Gg\ CH_4/Gg\ waste) = MCF \times DOC \times DOC_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (۲)$$

پارامتر MCF ضریب اصلاح متان بوده و اثر شرایط مدیریت محل دفن بر میزان تولید متان را نشان می‌دهد. بر اساس دستورالعمل IPCC (۲۰۰۶)، مقدار این ضریب با توجه به نوع محل دفن تعیین می‌شود و در این پژوهش، با توجه به اینکه محل دفن زنجان از نوع محل دفن مدیریت نشده عمیق با عمق بیش از ۵ متر است، مقدار ۰/۸ برای آن در نظر گرفته شد. پارامتر DOC بیانگر مقدار کربن آلی قابل تجزیه موجود در پسماند است که برای هر جزء پسماند مطابق مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار IPCC Inventory Software و دستورالعمل IPCC (۲۰۰۶) در نظر گرفته شد. در این روش، برای هر جزء پسماند (مانند مواد غذایی، کاغذ، چوب و منسوجات) مقدار DOC اختصاصی استفاده شده (جدول ۱) و مقدار نهایی DOC مؤثر به صورت خودکار توسط نرم‌افزار بر اساس ترکیب واقعی پسماند محاسبه می‌شود؛ بنابر این در این پژوهش از یک مقدار ثابت DOC برای کل پسماند استفاده نشده است. DOC_f کسری از کربن آلی قابل تجزیه را نشان می‌دهد که در شرایط بی‌هوازی به طور واقعی تجزیه شده و در تولید گاز محل دفن مشارکت می‌کند و F نیز سهم حجمی متان در گاز محل دفن را بیان می‌کند که برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد. در نهایت، مقدار L_0 به‌صورت یک پارامتر مستقل یا پیش‌فرض انتخاب نشد، بلکه بر اساس رابطه (۲) و با استفاده از مقدار DOC محاسبه شده از ترکیب واقعی پسماند و سایر پارامترهای مدل، برای کل پسماند محاسبه شد.

میزان انتشار متان نیز با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

$$CH_4 \text{ emitted in year t (Gg/yr)} = [CH_4 \text{ generated in year t} - R(t)] \times (1 - OX) \quad (۳)$$

در این معادله، CH_4emitted بیانگر میزان متان منتشر شده بر حسب گیگاگرم در سال است. R بیانگر مقدار متان بازیابی یا جمع‌آوری شده از محل دفن است. همچنین، OX ضریب اکسیداسیون بوده و بیانگر سهم متانی است که پیش از انتشار به اتمسفر، در لایه پوششی محل دفن

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

اکسید شده و به دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌شود. در این پژوهش، به دلیل نبود سامانه جمع‌آوری گاز محل دفن، مقدار R برابر صفر در نظر گرفته شد و با توجه به عدم استفاده از پوشش نهایی با قابلیت اکسیداسیون مؤثر، ضریب اکسیداسیون نیز مطابق دستورالعمل مدل برابر صفر فرض گردید.

مدل LandGEM

در این پژوهش، میزان تولید سالانه متان از محل دفن پسماند با استفاده از مدل LandGEM برآورد شد. این مدل، تولید متان را بر اساس معادله تجزیه مرتبه اول مطابق رابطه زیر محاسبه می‌کند:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=0.1}^{1} kL_0\left(\frac{M_i}{10}\right)e^{-kt_{ij}} \qquad (۴)$$

در این رابطه، Q_{CH_4} بیانگر میزان تولید سالانه گاز متان است. پارامتر L_0 در مدل LandGEM بر حسب m^3/Mg تعریف می‌شود؛ از این رو خروجی اولیه مدل به صورت حجمی قابل محاسبه است. با این حال، نرم‌افزار LandGEM علاوه بر خروجی حجمی، میزان تولید متان را به صورت جرمی(Mg/year) نیز محاسبه و گزارش می‌کند. در این پژوهش، به منظور مقایسه با نتایج مدلIPCC، از خروجی جرمی نرم‌افزار استفاده و مقادیر برای گزارش نهایی به Gg/year تبدیل شدند. متغیر (i) سال مورد نظر در دوره محاسبات را نشان می‌دهد و (n) تعداد سال‌های سپری شده از آغاز پذیرش پسماند تا سال مورد محاسبه را بیان می‌کند. همچنین، M_i معرف مقدار پسماند دفن‌شده در سال (i) بر حسب مگاگرم (Mg) است که بر اساس جمعیت همان سال، سرانه تولید پسماند معادل ۰/۸۵ کیلوگرم به ازای هر نفر در روز [۲۴] و با در نظر گرفتن ۹۰ درصد از پسماند تولیدی به عنوان پسماند دفن شده، محاسبه شده است.

در مدل LandGEM، دقت برآورد انتشار متان به پارامترهای ورودی، به ویژه پتانسیل تولید متان و ثابت نرخ تجزیه وابسته است. پارامتر L_0 حداکثر حجم متان قابل تولید از هر واحد جرم پسماند را نشان می‌دهد ، در حالی که k بیانگر سرعت تجزیه مواد آلی و نرخ تولید متان است. در این پژوهش، مقادیر این پارامترها بر اساس شرایط محل دفن و مقادیر پیشنهادی سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا مطابق جدول (۲) انتخاب شدند [۲۰].

جدول ۲- پارامترها و ضرایب مورد استفاده در مدل LandGem [۲۰]
Table 2- LandGEM model parameters and coefficients

پارامترهای مدل	نماد	مقدار	واحد
ضریب تولید متان	K	۰/۰۵	$year^{-1}$
پتانسیل تولید متان	L_0	۱۷۰	m^3/Mg
درصد متان در گاز محل دفن	-	۵۰%	درصد حجمی متان

جمعیت

جمعیت سال‌های دوره مطالعه برای سال‌هایی که آمار رسمی در دسترس بود، از داده‌های مرکز آمار ایران و سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان زنجان استخراج شد. به طور مشخص، جمعیت سال‌های ۱۳۷۵، ۱۳۸۵، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ از نتایج سرشماری‌های عمومی نفوس و مسکن و جمعیت سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰، ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ از برآوردهای جمعیتی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان زنجان اخذ گردید. برای سال‌های فاقد آمار رسمی، جمعیت با استفاده از نرخ متوسط رشد سالانه بین دو سرشماری متوالی برآورد شد؛ به طوری‌که برای سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۴ از نرخ رشد متوسط سالانه ۱/۹۳ درصد (بر اساس سرشماری‌های ۱۳۷۵ و ۱۳۸۵)، برای سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۹ از نرخ رشد متوسط سالانه ۲/۰۲ درصد (بر اساس سرشماری‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰) و برای سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴ از نرخ رشد متوسط سالانه ۲/۱۷ درصد (بر اساس سرشماری‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵) استفاده شد. همچنین، جمعیت سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ و نیز جمعیت سال‌های ۱۴۰۵ تا ۱۴۱۵ با استفاده از نرخ رشد متوسط سالانه ۲/۳۳ درصد، محاسبه شده بر اساس برآوردهای جمعیتی سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۳، برآورد گردید. برآورد جمعیت سال‌های فاقد آمار رسمی با استفاده از معادله (۵) انجام گرفت.

$$P_n = P_0(1+r)^n \qquad (۵)$$

که در آن r نرخ رشد جمعیت، P_0 جمعیت در شروع طرح و P_n جمعیت در سال n ام می‌باشد.

پتانسیل بازیابی انرژی از متان تولیدی

متان تولید شده در محل‌های دفن پسماند، علاوه بر اینکه یک گاز گلخانه‌ای قوی محسوب می‌شود، منبعی ارزشمند برای تولید انرژی نیز به شمار می‌رود. با جمع‌آوری این گاز و سوزاندن کنترل شده آن، می‌توان انرژی گرمایی یا برق تولید کرد و از این راه، هم از انتشار آن به جو جلوگیری نمود و هم از یک منبع تجدیدپذیر بهره برد.

به‌کارگیری این روش، گامی مؤثر در کاهش آلودگی هوا و مدیریت پایدار پسماند است. در این پژوهش، پس از برآورد مقدار تولید متان با استفاده از مدل‌های LandGEM و IPCC Waste، پتانسیل انرژی حاصل از متان تولیدی محاسبه شد. برای مدل LandGEM، حجم سالانه متان به صورت مستقیم از خروجی مدل استخراج شد، در حالی که برای نتایج مدل IPCC Waste، جرم متان تولیدی ابتدا با استفاده از چگالی متان ($۰/۷۱۴ kg/m^3$) به حجم متان تبدیل گردید.

پتانسیل انرژی شیمیایی موجود در متان بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$E_{electricity} = V_{CH_4} \times \mu \times LHV \qquad (۶)$$

که در آن E_R انرژی قابل استحصال (Mj/year)، V_{CH_4} حجم متان تولیدی (m^3/year)، μ راندمان تبدیل انرژی و LHV ارزش حرارتی پایین متان که در این پژوهش برابر با ($۳۵ Mj/m^3$) در نظر گرفته شد.

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

معیارهای مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل‌ها

به منظور ارزیابی دقیق قابلیت کاربرد مدل‌های LandGEM و IPCC در شرایط اختصاصی محل دفن پسماند زنجان، مقایسه نتایج بر اساس سه محور اصلی صورت گرفت.

نخست، تمامی خروجی‌های حاصل از مدل‌سازی جهت یکپارچه‌سازی در تحلیل‌های تطبیقی به واحد استاندارد گیگاگرم متان در سال تبدیل شدند. دوم، روند تغییرات انتشار در بازه زمانی ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۴ با هدف شناسایی نقاط عطف تولید گاز در هر مدل مورد واکاوی قرار گرفت. در نهایت، میزان واکنش هر مدل نسبت به پارامترهای اقلیمی منطقه سرد و خشک زنجان و مقادیر مختلف ثابت تجزیه تحلیل گردید. این رویکرد تحلیلی با آشکارسازی تفاوت‌های رفتاری و میزان انحراف میان دو مدل، محدوده عدم قطعیت تخمین‌ها را مشخص ساخته و بستری را برای برنامه‌ریزی‌های محافظه‌کارانه و سناریو محور در مدیریت پسماند منطقه فراهم می‌آورد.

یافته‌ها

به منظور تعیین پارامترهای ورودی مدل‌های IPCC Waste و LandGEM، ابتدا ترکیب فیزیکی پسماند شهری زنجان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنالیز فیزیکی پسماند نشان داد که بخش عمده پسماند تولیدی را مواد آلی تشکیل می‌دهند و پس از آن پلاستیک، کاغذ و مقوا، شیشه، فلزات، منسوجات و سایر اجزای پسماند قرار دارند. غلبه مواد آلی در ترکیب پسماند، بیانگر پتانسیل بالای تولید گاز متان در محل دفن است. جزئیات ترکیب فیزیکی پسماند در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- آنالیز فیزیکی پسماند تولید شده در شهر زنجان (٪) در سال ۱۴۰۰ (سازمان مدیریت پسماند شهرداری زنجان)

Table 3- Physical composition of municipal solid waste in Zanjan (%), 2021 (Source: Zanjan Municipality Waste Management Organization)

نوع پسماند	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	میانگین سالانه
مواد آلی	۸۱/۲۵	۷۸/۴۱	۷۸/۳	۸۰/۳۱	۷۹/۵۳
پلاستیک	۱۰/۰۳	۱۱/۹۲	۷/۹	۱۰/۹۷	۷/۶۶
نان خشک	۲/۱	۲/۸۹	۲/۳۷	۰/۴	۱/۸۵
کاغذ، مقوا و کارتن	۱/۵	۰/۸۴	۰/۸۶	۴/۳۷	۲/۸۹
فلزات آهنی	۱/۲	۱/۶	۲/۴۷	۰/۳۷	۱/۲۴
فلزات غیر آهنی	۰/۱	۰/۲	۰/۱۷	۰/۶۳	۱/۶۳
منسوجات و چرم	۰/۵۷	۰/۶	۱/۵۹	۰/۷۵	۰/۶۹
شیشه	۱	۰/۹۸	۱/۲۵	۰/۷	۱/۸۴
چوب	۰/۲	۰/۰۶	۰/۴۲	۰/۲	۰/۱۷
جزء ویژه	۱/۵	۱/۳	۲/۸۱	۰/۳	۱/۴۱
سایر	۰/۲۸	۱/۲	۱/۸۲	۱	۱/۱۰

داده‌های مربوط به ترکیب فیزیکی پسماند مورد استفاده در این پژوهش بر اساس آنالیز فیزیکی پسماند تولیدشده در شهر زنجان در سال ۱۴۰۰، ارائه شده توسط سازمان مدیریت پسماند شهرداری زنجان، استخراج شد. برای محاسبه پارامتر DOC در مدل IPCC، اجزای پسماند مطابق دسته‌بندی موردنیاز این مدل از داده‌های ترکیب فیزیکی پسماند استفاده شدند. در ادامه، روند تغییرات جمعیت شهر زنجان به همراه نرخ تولید و دفن پسماند در بازه زمانی ۱۳۷۶ تا ۱۴۱۵ محاسبه و در جدول شماره ۴ ارائه شده است. همچنین در این جدول نتایج مدل‌سازی انتشار متان با استفاده از مدل‌های IPCC Waste و LandGEM خلاصه گردیده است. داده‌های این جدول نشان‌دهنده تغییرات همگام میزان انتشار گاز متان با روند رشد جمعیت و حجم پسماند دفن‌شده است. تمامی مقادیر برآورد شده برای انتشار متان جهت یکپارچگی تحلیل به واحد گیگا گرم در سال (Gg/yr) تبدیل شده‌اند. همان‌گونه که در جدول مشاهده می‌شود، مقدار کل پسماند دفن شده در هر سال بر اساس جمعیت همان سال، با اعمال سرانه تولید پسماند معادل ۲۵۵ کیلوگرم به ازای هر نفر در سال و درصد دفن پسماند (۹۰ درصد) محاسبه و به عنوان داده ورودی مدل‌های IPCC Waste و LandGEM برای برآورد انتشار سالانه گاز متان مورد استفاده قرار گرفت.

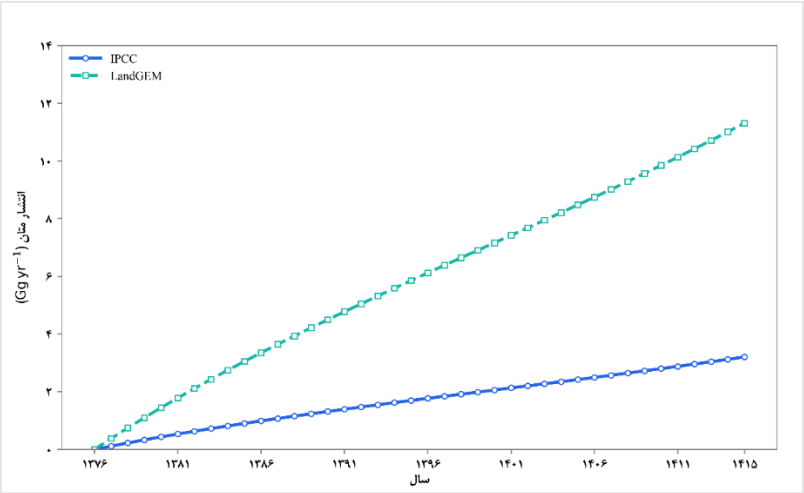
این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

جدول ۴– روند سالانه جمعیت، تولید و دفن پسماند و برآورد انتشار متان با استفاده از مدل‌های IPCC Waste و LandGEM
Table 4- Annual trends of population, waste generation, disposal, and methane emission estimates using the IPCC Waste and LandGEM models

سال	جمعیت	کل پسماند تولیدی (Gg/yr)	پسماند دفن شده (Gg/yr)	IPCC Waste Model (Gg/yr)	LandGEM Model (Mg/yr)	LandGEM (Gg/yr)
۱۳۷۶	۲۹۶۵۲۸	۷۵/۶۱	۶۸/۰۵	۰	۰	۰
۱۳۷۷	۳۰۲۲۵۱	۷۷/۰۷	۶۹/۳۶	۰/۱۱۴	۳۷۷/۳۶	۰/۳۷۷
۱۳۷۸	۳۰۸۰۸۴	۷۸/۵۶	۷۰/۷۰	۰/۲۲۶	۷۴۳/۶۱	۰/۷۴۳
۱۳۷۹	۳۱۴۰۳۰	۸۰/۰۷	۷۲/۰۶	۰/۳۳۱	۱۰۹۹/۴۱	۱/۰۹۹
۱۳۸۰	۳۲۰۰۹۱	۸۱/۶۲	۷۳/۴۶	۰/۴۳۳	۱۴۴۵/۴۲	۱/۴۴۵
۱۳۸۱	۳۲۶۲۶۹	۸۳/۲۰	۷۴/۸۷	۰/۵۳۳	۱۷۸۲/۲۸	۱/۷۸۲
۱۳۸۲	۳۳۲۵۶۶	۸۴/۸۰	۷۶/۳۲	۰/۶۳۰	۲۱۱۰/۵۶	۲/۱۱۰
۱۳۸۳	۳۳۸۹۸۴	۸۶/۴۴	۷۷/۸۰	۰/۷۲۳	۲۴۳۰/۸۵	۲/۴۳۰
۱۳۸۴	۳۴۵۵۲۶	۸۸/۱۱	۷۹/۲۹	۰/۸۱۴	۲۷۴۳/۶۹	۲/۷۴۳
۱۳۸۵	۳۵۲۱۵۱	۸۹/۷۹	۸۰/۸۱	۰/۹۰۲	۳۰۴۹/۶۰	۳/۰۴۹
۱۳۸۶	۳۵۹۲۶۴	۹۱/۶۱	۸۲/۴۵	۰/۹۸۸	۳۳۴۹/۰۲	۳/۳۴۹
۱۳۸۷	۳۶۶۵۲۲	۹۳/۴۶	۸۴/۱۱	۱/۰۷۲	۳۶۴۲/۸۹	۳/۶۴۲
۱۳۸۸	۳۷۳۹۲۵	۹۵/۳۵	۸۵/۸۱	۱/۱۵۵	۳۹۳۱/۶۶	۳/۹۳۱
۱۳۸۹	۳۸۱۴۷۹	۹۷/۲۷	۸۷/۵۴	۱/۲۳۵	۴۲۱۵/۷۷	۴/۲۱۵
۱۳۹۰	۳۸۹۲۷۰	۹۹/۲۶	۸۹/۳۳	۱/۳۱۴	۴۴۹۵/۶۴	۴/۴۹۵
۱۳۹۱	۳۹۷۷۱۷	۱۰۱/۴۱	۹۱/۲۷	۱/۳۹۲	۴۷۷۱/۷۸	۴/۷۷۱
۱۳۹۲	۴۰۶۳۴۸	۱۰۳/۶۱	۹۳/۲۵	۱/۴۶۹	۵۰۴۵/۱۹	۵/۰۴۵
۱۳۹۳	۴۱۵۱۶۵	۱۰۵/۸۶	۹۵/۲۸	۱/۵۴۵	۵۳۱۶/۲۶	۵/۳۱۶
۱۳۹۴	۴۲۴۱۷۴	۱۰۸/۱۶	۹۷/۳۴	۱/۶۲۰	۵۵۸۵/۳۲	۵/۵۸۵
۱۳۹۵	۴۳۳۴۷۵	۱۱۰/۵۳	۹۹/۴۸	۱/۶۹۵	۵۸۵۲/۷۳	۵/۸۵۲
۱۳۹۶	۴۳۹۹۵۸	۱۱۲/۱۸	۱۰۰/۹۷	۱/۷۶۹	۶۱۱۸/۹۳	۶/۱۱۸
۱۳۹۷	۴۴۹۲۳۶	۱۱۴/۵۵	۱۰۳/۰۹	۱/۸۴۲	۶۳۸۰/۴۰	۶/۳۸۰
۱۳۹۸	۴۵۸۷۱۰	۱۱۶/۹۷	۱۰۵/۲۷	۱/۹۱۴	۶۶۴۰/۹۳	۶/۶۴۰
۱۳۹۹	۴۶۸۳۸۳	۱۱۹/۴۳	۱۰۷/۴۹	۱/۹۸۶	۶۹۰۰/۸۰	۶/۹۰۰
۱۴۰۰	۴۷۸۲۶۱	۱۲۱/۹۵	۱۰۹/۷۶	۲/۰۵۸	۷۱۶۰/۳۱	۷/۱۶۰
۱۴۰۱	۴۸۹۴۰۴	۱۲۴/۷۹	۱۱۲/۳۱	۲/۱۲۹	۷۴۱۹/۷۴	۷/۴۱۹
۱۴۰۲	۵۰۰۸۰۷	۱۲۷/۷۰	۱۱۴/۹۳	۲/۲۰۱	۷۶۸۰/۶۹	۷/۶۸۰
۱۴۰۳	۵۱۱۹۵۶	۱۳۰/۵۴	۱۱۷/۴۹	۲/۲۷۴	۷۹۴۳/۴۳	۷/۹۴۳
۱۴۰۴	۵۲۳۱۱۱	۱۳۳/۳۹	۱۲۰/۰۵	۲/۳۴۷	۸۲۰۷/۵۵	۸/۲۰۷
۱۴۰۵	۵۳۵۲۹۹	۱۳۶/۵۰	۱۲۲/۸۵	۲/۴۲۰	۸۴۷۲/۹۷	۸/۴۷۲
۱۴۰۶	۵۴۷۷۷۱	۱۳۹/۶۸	۱۲۵/۷۱	۲/۴۹۴	۸۷۴۰/۹۷	۸/۷۴۰
۱۴۰۷	۵۶۰۵۳۳	۱۴۲/۹۳	۱۲۸/۶۴	۲/۵۷۰	۹۰۱۱/۷۷	۹/۰۱۱
۱۴۰۸	۵۷۳۵۹۳	۱۴۶/۲۶	۱۳۱/۶۳	۲/۶۴۴	۹۲۸۵/۶۰	۹/۲۸۵
۱۴۰۹	۵۸۶۹۵۷	۱۴۹/۶۷	۱۳۴/۷۰	۲/۷۲۱	۹۵۶۲/۷۰	۹/۵۶۲
۱۴۱۰	۶۰۰۶۳۲	۱۵۳/۱۶	۱۳۷/۸۴	۲/۷۹۹	۹۸۴۳/۲۸	۹/۸۴۳
۱۴۱۱	۶۱۴۶۲۶	۱۵۶/۷۲	۱۴۱/۰۵	۲/۸۷۷	۱۰۱۲۷/۵۹	۱۰/۱۲۷
۱۴۱۲	۶۲۸۹۴۵	۱۶۰/۳۸	۱۴۴/۳۴	۲/۹۵۷	۱۰۴۱۵/۸۴	۱۰/۴۱۵
۱۴۱۳	۶۴۳۵۹۸	۱۶۴/۱۱۷	۱۴۷/۷۰	۳/۰۳۸	۱۰۷۰۸/۲۶	۱۰/۷۰۸
۱۴۱۴	۶۵۸۵۹۲	۱۶۷/۹۴	۱۵۱/۱۴	۳/۱۲۰	۱۱۰۰۵/۰۶	۱۱/۰۰۵
۱۴۱۵	۶۷۳۹۳۵	۱۷۱/۸۵	۱۵۴/۶۶	۳/۲۰۴	۱۱۳۰۶/۴۶	۱۱/۳۰۶

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، روند تغییرات سالانه انتشار متان برآورد شده توسط مدل‌های IPCC Waste و LandGEM در طول دوره شبیه‌سازی از الگوی مشابهی پیروی می‌کند. در هر دو مدل، به‌دلیل تأخیر در آغاز فرآیندهای تجزیه بی‌هوازی، میزان انتشار متان در سال‌های ابتدایی در سطح پایینی قرار داشته و با افزایش تدریجی حجم پسماند دفن شده، روندی صعودی را طی می‌کند. در مدل IPCCWaste، میزان انتشار متان از ۰/۱۱۴ گیگاگرم در سال ۱۳۷۷ به ۳/۲۰۴ گیگاگرم در سال ۱۴۱۵ افزایش یافته است. به طور مشابه، در مدل LandGEM نیز انتشار متان از ابتدای دوره روندی افزایشی داشته و مقدار آن از ۰/۳۷۷ گیگاگرم در سال ۱۳۷۷ به ۱۱/۳۰۶ گیگاگرم در سال ۱۴۱۵ رسیده است. پس از رسیدن به بیشینه، در هر دو مدل روند انتشار متان شیب نزولی پیدا می‌کند که این رفتار ناشی از کاهش تدریجی مواد آلی قابل تجزیه موجود در محل دفن و کاهش سرعت فرآیندهای تجزیه بی‌هوازی پس از توقف ورود پسماند است. اگر چه الگوی تغییرات زمانی در هر دو مدل مشابه است، اختلاف در مقادیر برآورد شده انتشار متان را می‌توان به تفاوت در پارامترهای ورودی، فرضیات و نحوه پیاده‌سازی مدل واپاشی مرتبه اول (FOD) در دو مدل نسبت داد. پس از برآورد میزان تولید متان با استفاده از مدل‌های LandGEM و IPCC Waste، پتانسیل بازیابی انرژی از متان تولیدی محاسبه شد. نتایج نشان داد که روند تغییرات پتانسیل انرژی در هر دو مدل مشابه روند تغییرات تولید متان بوده و با افزایش تولید متان، پتانسیل بازیابی انرژی نیز افزایش یافت. بر اساس نتایج مدل LandGEM، بیشترین پتانسیل تولید انرژی در سال ۱۴۱۵ و همزمان با بیشینه تولید متان حاصل شد. در این سال، حجم متان تولیدی برابر با $۱/۶۹۵ \times ۱۰^{۷}$ m³/year که با در نظر گرفتن ارزش حرارتی متان و راندمان تبدیل انرژی، پتانسیل تولید ۵۷/۷ GWh/year انرژی الکتریکی برآورد شد. در مقابل، بر اساس نتایج مدل IPCC Waste، حجم متان تولیدی در سال پایانی برابر با $۴/۴۸۷ \times ۱۰^{۷}$ m³/year بود که معادل ۱۵/۲۷ GWh/year انرژی الکتریکی بالقوه برآورد گردید. این نتایج نشان می‌دهد که مدل LandGEM پتانسیل بازیابی انرژی به مراتب بیشتری نسبت به مدل IPCC Waste پیش‌بینی می‌کند که ناشی از برآورد بالاتر تولید متان در این مدل است. لازم به ذکر است که در این مطالعه، به دلیل نبود اطلاعات مربوط به عملکرد واقعی سامانه جمع‌آوری گاز در محل دفن پسماند زنجان، راندمان جمع‌آوری گاز در محاسبات لحاظ نشد. بنابراین، مقادیر به دست آمده نشان‌دهنده حداکثر پتانسیل انرژی موجود در متان تولیدی بوده و برای تعیین ظرفیت واقعی بازیابی انرژی، انجام اندازه‌گیری‌های میدانی دبی و ترکیب گاز و همچنین ارزیابی سامانه جمع‌آوری گاز در مطالعات آینده ضروری است.



شکل ۲- مقایسه روند انتشار متان از زمین دفن پسماند شهر زنجان توسط IPCC Model و LandGEM

Figure 2- Comparison of methane emission trends at the Zanjan landfill site using the IPCC Waste and LandGEM models

بحث

در این مطالعه، نرخ انتشار متان از محل دفن پسماند شهر زنجان با استفاده از مدل‌های IPCC Waste و LandGEM طی بازه زمانی ۱۳۷۶ تا ۱۴۱۵ برآورد و نتایج حاصل از دو مدل با یکدیگر مقایسه شد. اگرچه هر دو مدل روند زمانی مشابهی را برای تولید متان پیش‌بینی کردند، اختلاف قابل توجهی در مقدار انتشار برآورد شده وجود داشت. این اختلاف بیانگر آن است که انتخاب مدل می‌تواند بر برآورد ظرفیت بازیابی انرژی و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی اثر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد؛ بنابراین شناخت تفاوت‌های مفهومی و ساختاری دو مدل برای کاربرد صحیح آنها ضروری است. این شباهت در روند تغییرات زمانی ناشی از آن است که هر دو مدل بر پایه مفهوم واپاشی مرتبه اول (FOD) توسعه یافته‌اند؛ با این حال، تفاوت در ساختار محاسباتی، نحوه تعریف پارامترهای ورودی و فرضیات مدل‌ها سبب ایجاد اختلاف در مقادیر

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

نهایی انتشار شده است. اختلاف میان خروجی دو مدل را می‌توان با تفاوت در مبانی محاسباتی آن‌ها تبیین کرد [۱۴]. در مدل LandGEM، تولید متان عمدتاً بر اساس دو پارامتر ثابت پتانسیل تولید متان (L_0) و نرخ تجزیه (k) برآورد می‌شود و جرم کل پسماند ورودی در معادله واپاشی لحاظ می‌گردد. این مدل با هدف طراحی محافظه‌کارانه سامانه‌های جمع‌آوری گاز محل دفن توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا توسعه یافته است [۲۰]. در مقابل، مدل IPCC Waste علاوه بر فرآیند واپاشی مرتبه اول، اثر ترکیب پسماند، کربن آلی قابل تجزیه (DOC)، کسر کربن تجزیه‌شونده (DOC_f)، ضریب تصحیح متان (MCF) و سایر ضرایب تبدیل را نیز در محاسبات لحاظ می‌کند. بنابراین، تنها بخش مستعد زیست تخریب‌پذیری پسماند، به‌عنوان پتانسیل تولید متان در نظر گرفته می‌شود [۱۷]. در نتیجه، بزرگ‌تر بودن مقادیر برآوردشده توسط LandGEM در این پژوهش را می‌توان ناشی از تفاوت رویکرد محاسباتی دو مدل دانست، نه لزوماً بیش‌برآورد واقعی انتشار متان. با این حال، خروجی هر دو مدل به شدت به کیفیت داده‌های ورودی وابسته است. استفاده از پارامترهای پیش‌فرض، به‌ویژه برای L_0، k و ضرایب مرتبط با ترکیب پسماند، ممکن است موجب افزایش عدم قطعیت در برآوردها شود، زیرا این مقادیر الزاماً بیانگر شرایط واقعی هر محل دفن نیستند. در مقابل، به‌کارگیری داده‌های اختصاصی هر سایت موجب بهبود کالیبراسیون و افزایش دقت پیش‌بینی می‌شود؛ موضوعی که توسط Mouو همکاران [۲۵] و Vu و همکاران [۲۶] نیز گزارش شده است. وابستگی شدید خروجی مدل‌ها به پارامترهای ورودی در نتایج این پژوهش نیز قابل مشاهده است؛ به گونه‌ای که اختلاف تقریباً سه تا چهار برابری خروجی دو مدل نشان می‌دهد انتخاب مقادیر L_0، k، DOC و سایر ضرایب می‌تواند اثری هم‌تراز یا حتی بیشتر از انتخاب خود مدل بر نتایج داشته باشد. بنابراین، حتی در صورت استفاده از مدل یکسان، تفاوت در پارامترهای محلی، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های پسماند می‌تواند منجر به اختلاف قابل توجه در نتایج شود. از دیدگاه کاربردی نیز، بیشتر بودن خروجی LandGEM را نباید بدون وجود داده‌های میدانی به عنوان بیش‌برآورد تلقی کرد و همچنین کمتر بودن مقادیر حاصل از مدل IPCC Waste نیز الزاماً به معنای دقت بیشتر آن نیست. ارزیابی عملکرد واقعی هر مدل مستلزم مقایسه نتایج با داده‌های اندازه‌گیری شده، شامل دبی و غلظت متان محل دفن، است. افزون بر این، انتخاب مدل باید متناسب با هدف مطالعه انجام شود؛ به گونه‌ای که LandGEM می‌تواند برای طراحی سامانه‌های جمع‌آوری گاز و برآورد ظرفیت تجهیزات مناسب‌تر باشد، در حالی که مدل IPCC Waste به دلیل انطباق با دستورالعمل‌های بین‌المللی، کاربرد گسترده‌تری در تهیه موجودی انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات انجام شده در سایر کشورها نیز نشان می‌دهد که رابطه میان خروجی دو مدل همواره یکسان نیست. در برخی مطالعات، از جمله پژوهش‌های Wang و همکاران [۱۷]، Ghosh و همکاران [۲۷] و Wijaya و همکاران [۲۸]، مقادیر برآوردشده توسط LandGEM بیشتر از مدل IPCC Waste گزارش شده است، در حالی که در مطالعات Bhar و همکاران [۲۹]، Mokhtari و همکاران [۱۴]، Pheakdey و همکاران [۳۰] و Permadi و همکاران [۳۱]، روند معکوس مشاهده شده است. این اختلاف‌ها نشان می‌دهد که نمی‌توان هیچ یک از دو مدل را به طور مطلق بیش برآوردکننده یا کم برآوردکننده دانست. تفاوت در ترکیب فیزیکی پسماند، شرایط اقلیمی، میزان رطوبت، شیوه مدیریت محل دفن، مقادیر پارامترهای ورودی و روش کالیبراسیون مدل‌ها از مهم‌ترین عوامل ایجاد این اختلاف‌ها هستند.

جدول ۵- مقایسه پارامترهای ورودی مدل IPCC و LandGEM در مطالعات مختلف

Table 5- Comparison of input parameters for the IPCC and LandGEM models across different studies

نویسنده	کشور	IPCC Waste			LandGEM		شرایط اقلیمی	رفرنس
		MCF	F	DOC_F	L_0 (m^3/Mg)	K ($year^{-1}$)		
Mokhtari et. al.	ایران (یزد)	۰/۸	۰/۵	۰/۶	۵۷/۸۸	۰/۰۱	گرم و خشک	[۱۴]
Rezaee et. al.	ایران(سنندج)	-	-	-	۲۰۰	۰/۰۴۵	گرم و خشک	[۳۲]
Jalayer & Heydari	ایران (قم)	-	-	-	۲۰	۰/۰۱	گرم و خشک	[۳۳]
Rahimi et. al.	ایران (تهران)	۰/۵	۰/۵	۰/۷۷	۵۱/۰۲	۰/۰۱۶	گرم و خشک	[۳۴]
Shabrina et. al.	اندونزی	۰/۶	۰/۵	۰/۵	۴۲/۷	-	گرم و مرطوب	[۱۵]
Usman et. al.	نیجریه	۰/۴	۰/۵	۰/۷	۴۵/۹	-	گرم و خشک	[۱۶]
Lando et. al.	اندونزی	۰/۷	۰/۵	۰/۷	-	-	گرم و مرطوب	[۳۵]
Oukili & Chhiba	مراکش	۱	۰/۶	۰/۵	۱۲۰	۰/۰۲	مدیترانه‌ای	[۳۶]
Wang et. al.	چین	۰/۷	۰/۵	۰/۵	۳۲	۰/۰۲	معتدل	[۱۷]

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

بنابر این، مقایسه صرف نتایج عددی میان مطالعات مختلف بدون توجه به این عوامل می‌تواند به برداشت نادرست از عملکرد مدل‌ها منجر شود. همان‌گونه که جدول ۵ نشان می‌دهد، تفاوت مقادیر پارامترهایی نظیر L_0، k، DOCf و MCF در مطالعات مختلف قابل توجه است. این اختلاف‌ها نشان می‌دهد که حتی در صورت استفاده از یک مدل یکسان، تغییر در مقادیر پارامترهای ورودی می‌تواند به تفاوت چشمگیر در برآورد انتشار متان منجر شود. علاوه بر این، تفاوت در شرایط اقلیمی، ترکیب فیزیکی پسماند و شیوه مدیریت محل دفن نیز بر مقدار این پارامترها و در نتیجه بر نتایج مدل‌ها اثرگذار است. از این رو، توسعه پارامترهای بومی و کالیبره‌شده برای محل‌های دفن ایران می‌تواند نقش مهمی در کاهش عدم قطعیت و افزایش قابلیت اعتماد برآوردهای انتشار متان داشته باشد. اگرچه در این پژوهش از ضرایب پیش‌فرض مدل‌ها استفاده شد، اما ویژگی‌های محلی محل دفن پسماند زنجان نیز در تفسیر نتایج اهمیت دارد. سهم بالای مواد آلی در پسماند شهر زنجان، همراه با دفن بخش عمده پسماندهای تولیدی، شرایط مناسبی برای تولید متان فراهم کرده است [۳۷]. از سوی دیگر، اقلیم نسبتاً خشک منطقه می‌تواند موجب کاهش رطوبت توده پسماند و در نتیجه کاهش سرعت تجزیه بیولوژیکی در مقایسه با مناطق مرطوب شود. بنابراین، برآوردهای ارائه‌شده حاصل برهم‌کنش ویژگی‌های اقلیمی، ترکیب پسماند و شیوه مدیریت محل دفن در زنجان است و تعمیم مستقیم آن به سایر شهرها باید با احتیاط انجام گیرد. در همین راستا، یکی از منابع اصلی عدم قطعیت در این پژوهش، استفاده از مقادیر پیش‌فرض برخی پارامترها و نبود داده‌های میدانی برای کالیبراسیون مدل‌ها بود. بنابراین، نتایج باید به عنوان برآوردهای مبتنی بر مدل تفسیر شوند و نه مقادیر قطعی انتشار. علاوه بر ترکیب پسماند، افزایش تدریجی انتشار متان در طول دوره بهره‌برداری را می‌توان با روند رشد جمعیت و افزایش میزان پسماند دفن شده تبیین کرد. در این پژوهش، مقدار پسماند دفن‌شده بر اساس رشد جمعیت، سرانه تولید پسماند و درصد دفن محاسبه شد و نتایج نشان داد که با افزایش حجم پسماند ورودی، میزان انتشار متان نیز افزایش یافته است. این یافته با نتایج پژوهش‌های اخیر همخوانی دارد که نشان می‌دهند رشد جمعیت و توسعه شهرنشینی، از طریق افزایش تولید پسماند جامد شهری، موجب افزایش جرم مواد آلی قابل تجزیه و در نتیجه افزایش تولید گاز محل دفن می‌شود [۳۸]. برآورد پتانسیل بازیابی انرژی نشان داد که متان تولیدی در محل دفن پسماند زنجان ظرفیت قابل توجهی برای تولید انرژی دارد. با وجود اختلاف مقادیر برآوردشده توسط دو مدل، هر دو نشان می‌دهند که بازیابی گاز محل دفن می‌تواند علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گیرد. اختلاف قابل توجه ظرفیت انرژی پیش‌بینی‌شده توسط دو مدل نیز بیانگر آن است که انتخاب مدل می‌تواند بر ارزیابی اقتصادی و امکان‌سنجی پروژه‌های استحصال گاز اثرگذار باشد. از این رو، استفاده از تحلیل حساسیت، داده‌های محلی و اعتبارسنجی نتایج با اندازه‌گیری‌های میدانی می‌تواند عدم قطعیت برآوردها را کاهش داده و مبنای مطمئن‌تری برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی فراهم کند. از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب مدل مناسب تنها یک تصمیم محاسباتی نیست، بلکه می‌تواند بر برآورد ظرفیت بازیابی انرژی، ارزیابی اقتصادی پروژه‌های استحصال گاز و اولویت‌بندی راهکارهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای اثرگذار باشد. بنابراین، در مطالعات آینده استفاده از داده‌های میدانی برای کالیبراسیون پارامترهای مدل، انجام تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی نتایج با اندازه‌گیری‌های واقعی گاز محل دفن، می‌تواند عدم قطعیت برآوردها را کاهش داده و قابلیت اعتماد نتایج را برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری مدیریتی افزایش دهد. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که اختلاف میان مدل‌های LandGEM و IPCC Waste بیش از آنکه ناشی از برتری ذاتی یکی از مدل‌ها باشد، حاصل تفاوت در فرضیات، پارامترهای ورودی و شرایط محلی است؛ ازاین‌رو، انتخاب مدل مناسب باید متناسب با هدف مطالعه، کیفیت داده‌های موجود و ویژگی‌های محل دفن انجام شود و در صورت امکان، نتایج با داده‌های میدانی اعتبارسنجی شوند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، انتشار متان از محل دفن پسماند شهر زنجان با استفاده از دو مدل IPCC Waste و LandGEM برآورد و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که هر دو مدل روند زمانی مشابهی را برای تولید متان پیش‌بینی می‌کنند؛ به گونه‌ای که با افزایش حجم پسماند دفن شده، انتشار متان روندی صعودی داشته، پس از توقف دفن به بیشینه خود رسیده و سپس با کاهش تدریجی مواد آلی قابل تجزیه، روندی نزولی پیدا می‌کند. با وجود این شباهت، مدل LandGEM در تمامی سال‌های مطالعه مقادیر بیشتری نسبت به مدل IPCC Waste برآورد کرد که این اختلاف عمدتاً ناشی از تفاوت در ساختار محاسباتی، نحوه تعریف پارامترهای ورودی و فرضیات دو مدل است. نتایج همچنین نشان داد که سهم بالای مواد آلی در ترکیب پسماند و تداوم دفن بخش عمده پسماندهای شهری، ظرفیت قابل توجهی برای تولید متان در محل دفن زنجان ایجاد کرده است. از این رو، استمرار انتشار متان حتی پس از پایان بهره‌برداری از محل دفن، ضرورت برنامه‌ریزی برای پایش، جمع‌آوری و بازیابی گاز محل دفن را در دوره پس از بسته شدن نیز آشکار می‌سازد. برآورد پتانسیل بازیابی انرژی نشان داد که متان تولیدی می‌تواند علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به عنوان منبعی برای تولید انرژی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، مقادیر ارائه شده بیانگر پتانسیل نظری بوده و تعیین ظرفیت واقعی مستلزم اندازه‌گیری‌های میدانی، ارزیابی عملکرد سامانه‌های جمع‌آوری

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

گاز و کالیبراسیون مدل‌ها با داده‌های محلی است. از منظر مدیریت پسماند، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اجرای سامانه‌های جمع‌آوری و بهره‌برداری از گاز محل دفن، در کنار افزایش تفکیک از مبدأ، توسعه بازیافت و کمپوست، و کاهش وابستگی به دفن، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود پایداری سیستم مدیریت پسماند شهری داشته باشد. همچنین، استفاده هم‌زمان از مدل‌های IPCC Waste و LandGEM، همراه با اعتبارسنجی آنها بر پایه داده‌های میدانی، می‌تواند مبنای قابل اعتمادتری برای برنامه‌ریزی، ارزیابی پروژه‌های بازیابی انرژی و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در حوزه مدیریت پسماند فراهم کند.

تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مصوب در گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران است (کد پایان نامه در سامانه پژوهان: ۴۳۰۱۱۷۶۷). نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری تمام افراد و سازمان‌هایی که در انجام پژوهش همکاری نموده اند، تشکر و قدردانی نمایند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند هیچگونه تضاد یا تعارض منافعی ندارند.

تامین مالی مقاله

این مقاله برآمده از پایان‌نامه است و فاقد منبع تامین مالی بیرونی می‌باشد.

ملاحظات اخلاقی

این مقاله حاصل بخشی از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط با کد اخلاق IR.SBMU.PHNS.REC.1403.083 مصوب دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی می باشد.

مشارکت مولفین

کلیه نویسندگان در تمامی مراحل پژوهش، شامل طراحی مطالعه، گردآوری و تحلیل داده ها، نگارش پیش نویس و بازبینی نهایی مقاله مشارکت فعال داشته اند.

استفاده از هوش مصنوعی

در تدوین این مقاله از هوش مصنوعی استفاده نشده است.

References

1- Ostadtaghizadeh A, Mesdaghinia A, Naddafi K. The necessity of developing a national plan to deal with the effects of climate change on health. Iranian Journal of Culture and Health Promotion 2022; 6(3):524–28 (In Persian). https://doi.org/10.22034/6.3.20

2- Wan Y, Chen F, Fan L, Sun D, He H, Dai Y, et al. Conversion of surface CH4 concentrations from GOSAT satellite observations using XGBoost algorithm. Atmospheric Environment 2023; 30. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119694

3- WMO. The Global Climate 2011–2020: A Decade of Accelerating Climate Change. Geneva: World Meteorological Organization; 2023. WMO-No. 1338. https://doi.org/10.18356/9789263113382

4- Bakshan A, Srour I, Chehab G, El-Fadel M. A field based methodology for estimating waste generation rates at various stages of construction projects. Resources, Conservation and Recycling 2015; 100:70-80.

5- Hassanvand MS, Nabizadeh R, Heidari M. Municipal solid waste analysis in Iran. Iranian Journal of Health and Environment 2008; 1(1):9–18 (In Persian).

6- Jalali S, Alavi Bakhtiarvand SN, Khaloo SS, Abtahi M. Odor emission in the composting process and its reduction strategies: A review. Journal of Health in the Field 2024; 11(4):52–75 (In Persian). https://doi.org/10.22037/jhf.v11i4.43864

7-Maghmoumi A, Marashi F, Houshfar E. Environmental and economic assessment of sustainable municipal solid waste management strategies in Iran. Sustainable Cities and Society 2020; 59. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102161

8- Arman F, Mohseni Bandpey A, Shahsavani A, Sadani M, Abtahi M. Investigation of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations in the air of Aradkooh waste management facility of Tehran and neighboring areas in 2020. Journal of Health in the Field 2021; 9(1):1–12 (In Persian). https://doi.org/10.22037/jhf.v9i1.33776

9- Manheim DC, Yeşiller N, Hanson JL. Gas emissions from municipal solid waste landfills: a comprehensive review and analysis of global data. Journal of the Indian Institute of Science 2021; 101(4):625–57. https://doi.org/10.1007/s41745-021-00234-4

10- Sekhohola-Dlamini L, Tekere M. Microbiology of municipal solid waste landfills: A review of microbial dynamics and ecological influences in waste bioprocessing. Biodegradation 2020; 31(1–2):1–21. https://doi.org/10.1007/s10532-019-09890-x

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

11- Sirimangkhala K, Pimpunchat B, Amornsamankul S, Nuttavut N, Triampo W. A review of modelling and computer simulation of landfill gas. International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology 2019; 20(4); 9:1–9. https://doi.org/10.5013/IJSSST.a.20.04.09

12- Krause M, Thorneloe S. Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.1 user manual and tool. Washington (DC): U.S. Environmental protection Agency, Office of Research and Development; 2024. EPA/600/B-24/160.

13- Krause MJ, Chickering GW, Townsend TG. Translating landfill methane generation parameters among first-order decay models. Journal of the Air & Waste Management Association 2016; 66(11):1084–97. https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1200158

14- Mokhtari M, Ebrahimi AA, Rezaeinia S. Prediction of greenhouse gas emissions in municipal solid waste landfills using LandGEM and IPCC methods in Yazd, Iran. Journal of Environmental Health and Sustainable Development 2020; 5(4):1145–54. https://doi.org/10.18502/jehsd.v5i4.4964

15- Shabrina HM, Afifah NA. Evaluating greenhouse gas emissions from banyuroto landfill through the IPCC landfill gas model. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2025; 1486(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1486/1/012044

16- Usman AM, Soja YJ, Maisalati AA, Liman MA. Determination of methane and energy generating potentials from municipal solid waste using IPCC default model. Nigerian Journal of Engineering Science and Technology Research 2022; 8(2):14–28.

17- Wang D, Yuan W, Xie Y, Fei X, Ren F, Wei Y, et al. Simulating CH_4 emissions from MSW landfills in China from 2003 to 2042 using IPCC and LandGEM models. Heliyon 2023; 9(12). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22943

18- Tavakoli A. Evaluation and potential estimation of energy extraction from municipal wastes using IPCC waste model: Case study of Zanjan City. Journal of Environmental Science Studies 2019; 4(1):1153–61 (In Persian).

19- Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. Intergovernmental panel on climate change (IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hayama (Japan): Institute for Global Environmental Strategies (IGES); 2006.

20. Alexander A, Burklin C, Singleton A. Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user's guide. Washington (DC): U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development; 2005. EPA/600/R-05/047.

21- Amini HR, Reinhart DR. Regional prediction of long-term landfill gas to energy potential. Waste Management 2011; 31(9–10):2020–26. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.010

22- Penteado R, Cavalli M, Magnano E, Chiampo F. Application of the IPCC model to a Brazilian landfill: First results. Energy Policy 2012; 42:551–56. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.023

23- Fathi H, Zangane A, Fathi H, Moradi H. Municipal solid waste characterization and it is assessment for potential compost production: a case study in Zanjan City, Iran. American Journal of Agriculture and Forestry 2014; 2(2):39–44.

24- Gharajlou F. Quantitative and qualitative studies, and physical and chemical analysis of Zanjan city's municipal solid waste [Master's thesis]. Zanjan: University of Zanjan; 2017.

25- 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. https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1008653

26- Vu HL, Ng KTW, Richter A. Optimization of first order decay gas generation model parameters for landfills located in cold semi-arid climates. Waste Management 2017; 69:315–24. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.028

27- Ghosh P, Shah G, Chandra R, Sahota S, Kumar H, Vijay VK, et al. Assessment of methane emissions and energy recovery potential from the municipal solid waste landfills of Delhi, India. Bioresource Technology 2019; 272:611–15. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.069

28- Wijaya SP, Ainun S, Permadi DA. Methane emission estimation and dispersion modeling for a landfill in West Java, Indonesia. Journal of the Civil Engineering Forum 2021; 7(3):239–52. https://doi.org/10.22146/jcef.62824

29- Bhar A, Azoulay K, Sakini S, Moufti A, Zandar T, Jemjami S. Estimating biogas production in Moroccan landfills: A comparative analysis of LandGEM and IPCC models. Environmental Monitoring and Assessment 2025; 197(4):481. https://doi.org/10.1007/s10661-025-13827-8

30- Pheakdey DV, Noudeng V, Xuan TD. Landfill biogas recovery and its contribution to greenhouse gas mitigation. Energies 2023; 16(12):4689. https://doi.org/10.3390/en16124689

31- Permadi DA, Al-Madani HA, Ainun S, Juwana I, Kramawijaya AG. Comparison of methane emission inventory between the IPCC and LandGEM approach in a tropical landfill. AIP Conference Proceedings 2024; 2744(1). https://doi.org/10.1063/5.0182663

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

32- Rezaee R, Nasseri S, Mahvi AH, Jafari A, Mazloomi S, Gavami A, et al. Estimation of gas emission released from a municipal solid waste landfill site through a modeling approach: a case study, Sanandaj, Iran. Journal of Advances in Environmental Health Research 2014; 2(1):13–21. https://doi.org/10.22102/jaehr.2014.40139

33- 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 and Environmental Engineering 2023; 1(2):16–33 (In Persian). https://doi.org/10.48306/jumee.2023.399904.1008.

34- Rahimi M, Zare Shahne M, Javadi MA. Estimation and modeling of emission of greenhouse gases and carbon monoxide in urban landfill (case study: Aradkooh landfill, Tehran). Journal of Environmental Studies 2025; 51(2):165–88 (In Persian). https://doi.org/10.22059/jes.2025.386125.1008554

35- Lando AT, Rahim IR, Sari K, Djamaluddin I, Arifin AN, Sari AM. Estimation of methane emissions from municipal solid waste landfill in Makassar city based on IPCC waste model. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2021; 841(1):012002. https://doi.org/10.1088/1755-1315/841/1/012002

36- Oukili AI, Chhiba M. Evaluation of the energy capacity of the controlled landfill from Mohamedia Benslimane by three theoretical methods–LandGEM, IPCC, and TNO. Journal of Ecological Engineering 2023; 24(2):19–30. https://doi.org/10.12911/22998993/156624

37- Campuzano R, González-Martínez S. Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: a review. Waste Management 2016; 54:3–12. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.016

38- Lakhouit A. Landfill emissions and environmental challenges: A comprehensive review. Fuel 2026; 417:138671. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.138671

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.