

Estimation and Modeling of Emission of Greenhouse Gases and Carbon Monoxide in Urban Landfill (Case Study: Aradkooh Landfill, Tehran)

Mahdi Rahimi¹ , Maryam Zare Shahne^{2✉} , Mohammad Amin Javadi³ 

1. Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: rahimimahdi315@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: maryam_zare@kntu.ac.ir
3. Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: amin.javadi1999@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 26 April 2025
Received in revised form: 13 September 2025
Accepted: 15 September 2025
Available online: 21 September 2025

Keywords:

Aradkooh,
Biogas,
LANDGEM,
Methane gas emission,
Waste management.

ABSTRACT

Objective: Although sanitary landfilling remains a widely used waste management method in many places, one of its major challenges is the release of greenhouse gases such as methane, which contributes to air pollution, global warming, and safety hazards. Landfills are a major source of potent greenhouse gases, specially in developing countries where the majority of such emissions are produced. This is a critical issue for the case of Tehran, where the lack of research and modeling on gas production from the landfills hinders mitigation and control efforts. Given the current air pollution crisis in Tehran, the extent and proximity of Aradkooh landfill to Tehran have made this landfill's emissions a significant threat that could worsen the region's severe air pollution crisis. This fact has created an urgent need for accurate modeling and monitoring to inform effective recovery projects. Therefore, this study aims to (i) characterize landfill gas composition and formation processes, (ii) review and evaluate gas estimation methods, and (iii) apply the USEPA LANDGEM model to estimate greenhouse gas emissions at the Aradkooh landfill in Tehran.

Method: Methane generation was modeled using LANDGEM, which applies a first-order decay equation to predict annual landfill gas emissions. Two parameter sets were used: default values provided by the software and theoretical values calibrated to local conditions.

Results: Biogas generation potential was primarily determined by waste volume and composition. In Tehran, effective biogas potential was calculated as the difference between total waste input and the portion processed annually. Favorable landfill conditions, including adequate burial depth and engineered covers, supported efficient anaerobic degradation and methane recovery.

Conclusions: Modeling results under the two scenarios highlighted the importance of parameter selection for reliable emission forecasting. The study emphasized the need for accurate modeling and monitoring to support emission management. Future directions include applying advanced kinetic models, evaluating waste diversion impacts, validating results through field measurements, and testing mitigation measures such as geomembrane liners, nanomaterials, and biogas recovery for energy utilization.

Cite this article: Rahimi, M., Zare Shahne, M. and Javadi M. A. (2025). Estimation and Modeling of Emission of Greenhouse Gases and Carbon Monoxide in Urban Landfill (Case Study: Aradkooh Landfill, Tehran). Journal of Environmental Studies, 51 (2), 165- 188. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.386125.1008554>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/> <http://doi.org/10.22059/JES.2025.386125.1008554>

Introduction

Waste disposal in landfills is one of the most common methods of waste management worldwide, but it generates significant amounts of landfill gas (LFG) through anaerobic decomposition of organic matter. The main components of LFG—methane and carbon dioxide—are potent greenhouse gases associated with climate change, safety hazards, and health risks. Developing countries currently contribute the majority of global landfill emissions, a trend expected to rise further in coming decades. Despite the critical importance and urgent need for proper waste management in Iran, particularly in the Tehran metropolis, model-based predictions of landfill gas (LFG) production remain scarce. This lack of information can severely hinder the practical decision-making and investment in biogas recovery projects. If we consider Tehran's acute air pollution crisis, which has been a primary environmental and public health challenge in recent decades, the lack of such research is even more important. The Aradkooh landfill's location on the city's southern outskirts poses a significant risk, as its emissions of greenhouse gases and secondary pollutants can markedly exacerbate the region's air quality issues (Arhami et al., 2017; Zare Shahne & Arhami, 2016). This sensitive location plus the considerable volume of the waste disposed in this site makes precise emission modeling essential. Also, experiences from global methane recovery projects indicate that only a fraction of the theoretical gas potential can be typically captured. This knowledge gap highlights the urgency for robust model-based studies and continuous emission monitoring at the site.

In Iran, biogas production potential is considerable, averaging about 1.6×10^4 m³ annually with a calorific value exceeding 3.6×10^{10} J. The Aradkooh landfill, located 25 km south of Tehran, has served as the city's main disposal site since the 1980s and receives most of the municipal waste generated. Rapid urbanization has exacerbated waste management challenges and highlighted the environmental and health implications of landfill emissions. Given Iran's commitments under the Paris Agreement, an accurate amount of these emissions is a critical prerequisite for mitigation and energy recovery.

The objectives of this study are characterizing the landfill gas composition at Aradkooh, assessing the gas formation processes, evaluating the estimation methods, and applying the LANDGEM model to quantify greenhouse gas emissions from the site.

Method

Methane production models provide mathematical frameworks for estimating gas generation from waste decomposition in landfills. These models typically account for waste volume, composition, and site-specific environmental conditions to predict methane generation over time. They are generally classified into three groups: (i) zero-order models, which assume constant gas production; (ii) first-order models, the most widely used worldwide, where methane generation decreases exponentially with waste age and degradability; and (iii) second-order models, which combine multiple first-order reactions to describe more complex decomposition dynamics.

In this study, the first-order LANDGEM model developed by USEPA was applied to estimate biogas production at the Aradkooh landfill in Tehran. Model parameters, including methane generation potential (L_0), decay rate (k), and annual waste input, were determined using both default values and locally derived theoretical data. Effective waste mass was calculated as the difference between total input and the fraction processed annually. Based on expert assessments, the Aradkooh site is expected to reach its full capacity by 2041.

To account for local conditions, five-year meteorological data (2019–2024) from the Imam Khomeini Airport station were incorporated into the model. LANDGEM was then used to simulate methane, carbon dioxide, non-methane organic compounds, and selected pollutants, enabling assessment of both total generation and potential dispersion around the landfill.

Results

Biogas generation from landfill waste primarily depends on waste volume and composition. In Tehran, the effective biogas potential equals the difference between total waste input and the portion treated annually. Local landfills apply diverse disposal methods and provide favorable conditions, such as sufficient burial depth and proper cover systems, that enhance anaerobic degradation and support efficient biogas recovery.

This study focused on the Aradkooch landfill as a significant source of greenhouse gas emissions in the city of Tehran, particularly for methane. Modeling with LANDGEM software revealed a gas production trend aligning with the theoretical pattern of anaerobic waste decomposition, which was an initial increase followed by a gradual decline. While this pattern was consistent with other global landfills, the emission intensity and variability at Aradkooch were higher than average. This phenomenon was a consequence of the high proportion of biodegradable organic material in Tehran's waste composition.

Two scenarios were assessed and compared: default Clean Air Act (CAA) parameters and locally derived inputs. Results showed that methane production peaked in 2042 at 356.6 million m³ under CAA assumptions, compared to only 92 million m³ with local parameters, demonstrating the importance of site-specific data.

Conclusions

Overall, there are three key points in the results of this study. First, the Aradkouh landfill was recognized as a major source of methane emissions and, without proper management, could have serious impacts on climate change and human health. Second, the collection and use of biogas could not only prevent methane emissions but also create economic value as a renewable energy source. Third, waste management in Iran needs to move towards reducing dependence on landfills and developing alternative solutions such as recycling and composting. Furthermore, the findings highlighted the need for accurate modeling and monitoring, and recommended future work on advanced decay models, field validation, and mitigation strategies such as geomembrane liners, nanomaterials, and biogas recovery for energy use.

This research underscores the need for enhanced modeling of landfill greenhouse gas emissions. To achieve this, subsequent studies should employ modified or second-order models that better account for local site characteristics. The calibration and validation of these models require robust field data from direct emission measurements. Finally, evaluating diverse waste management strategies, particularly those boosting recycling and composting rates, is essential to quantify the potential of waste diversion policies in mitigating gas production.

Author Contributions

“Conceptualization, Mahdi Rahimi. and Maryam Zare Shahne; methodology, Mahdi Rahimi. and Maryam Zare Shahne; software, Mahdi Rahimi; validation, Mahdi Rahimi. and Maryam Zare Shahne; formal analysis, Mahdi Rahimi.; investigation, Mahdi Rahimi.; resources, Mahdi Rahimi.; data curation, Mahdi Rahimi.; writing—original draft preparation, Mohammad Amin Javadi.; writing—review and editing, Mohammad Amin Javadi; visualization, Mahdi Rahimi.; supervision, Maryam Zare Shahne.;

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author, upon reasonable request.

Acknowledgements

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

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



University of Tehran Press

نشریه محیط شناسی

دوره ۵۱، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴

شاپای چاپی: ۸۶۲۰-۱۰۲۵
شاپای الکترونیکی: ۶۹۲۲-۲۳۴۵

Homepage: <http://Jes.ut.ac.ir>

برآورد و مدل سازی انتشار گازهای گلخانه ای و مونوکسیدکربن در محل دفن زباله شهری (مطالعه موردی: محل دفن زباله آرادکوه، تهران)

مهدی رحیمی^۱، مریم زارع شحنة^۲✉، محمدامین جوادی^۳

۱. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: rahimimahdi315@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: maryam_zare@kntu.ac.ir
۳. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: amin.javadi1999@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰ کلیدواژه ها: LANDGEM، انتشار گاز متان، آرادکوه، زیست توده، مدیریت پسماند.	هدف: اگرچه دفن بهداشتی زباله همچنان به عنوان یک روش مدیریت پسماند به طور گسترده در بسیاری از مناطق مورد استفاده قرار می گیرد، اما یکی از چالش های اصلی آن، انتشار گازهای گلخانه ای مانند متان است که باعث آلودگی هوا، گرمایش جهانی و خطرات ایمنی می شود. مراکز دفن زباله، یکی از منابع مهم جهانی انتشار گازهای گلخانه ای مانند متان به ویژه در کشورهای در حال توسعه هستند. این مسئله برای شهر تهران نیز یک چالش بحرانی به شمار می رود. کمبود پژوهش و مدل سازی در مورد تولید گاز در مراکز دفن زباله، مانع مهمی در برابر تلاش های عملی برای کاهش انتشار این قبیل گازها می باشد. با توجه به وسعت و موقعیت مکانی نزدیک محل دفن پسماند آرادکوه نسبت به شهر، انتشار گازهای آن به طور قابل توجهی موجب تشدید بحران شدید آلودگی هوای موجود در تهران می شود. این امر لزوم فوری انجام مدل سازی دقیق و پایش مستمر را برای برنامه ریزی پروژه های بازایی گازهای حاصل از این مرکز دفن ایجاد کرده است. به همین منظور، این پژوهش با هدف برآورد و مدل سازی انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از محل دفن پسماندهای شهری تهران (آرادکوه) با تمرکز بر گاز متان انجام شد. اهمیت برآورد دقیق متان در مدیریت پسماند و کاهش پیامدهای محیط زیستی و ایمنی نیز مدنظر قرار گرفت. روش پژوهش: مدل LANDGEM توسعه یافته توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا برای پیش بینی انتشار گازهای گلخانه ای به کار گرفته شد. دو دسته پارامتر ورودی شامل مقادیر پیش فرض نرم افزار و مقادیر نظری در معادله تجزیه مرتبه اول به کار رفت و نتایج حاصل از آن ها برای بررسی دقت و قابلیت اعتماد مقایسه گردید. یافته ها: نتایج نشان داد پسماند غذایی با ۶۹/۵ درصد بیشترین سهم در ترکیب پسماند شهری و نایلون با ۸/۴ درصد بیشترین سهم اجزای غیرآلی را دارند. مدل سازی نشان داد بیشینه تولید متان در سال ۱۴۲۱ رخ می دهد که در سناریوی پیش فرض حدود $3/58 \times 10^8$ مترمکعب و در سناریوی نظری $3/57 \times 10^8$ مترمکعب است. این اختلاف هر چند اندک، از نظر آماری معنادار ($p < 0.01$) اما با روند مشابه ($R = 0.79$) همراه بود. نتیجه گیری: این مطالعه نشان می دهد به کارگیری مدل های معتبر می تواند برآوردی دقیق و قابل اتکا از انتشار گازهای گلخانه ای فراهم کند و به تصمیم گیری های راهبردی در بهره برداری از زیست توده و مدیریت پایدار پسماند شهری یاری رساند. نوآوری اصلی پژوهش در ارائه نخستین مقایسه نظام مند میان دو رویکرد محاسباتی (پارامترهای پیش فرض و مقادیر نظری) در شرایط واقعی آرادکوه است که نشان داد حتی اختلاف جزئی در پارامترهای ورودی می تواند پیامدهای علمی و کاربردی قابل توجهی در مدیریت انتشار و سیاست گذاری های زیست محیطی ایجاد کند.

استناد: رحیمی، مهدی؛ زارع شحنة، مریم و جوادی، محمد امین. (۱۴۰۴). برآورد و مدل سازی انتشار گازهای گلخانه ای و مونوکسیدکربن در محل دفن زباله شهری (مطالعه موردی: محل دفن زباله آرادکوه، تهران). نشریه محیط شناسی، ۵۱(۲)، ۱۶۵-۱۸۸. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.386125.1008554>

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.



DOI: <http://doi.org/10.22059/jes.2025.386125.1008554>

۱. مقدمه

دفن پسماند یکی از رایج‌ترین روش‌های مدیریت زباله در جهان به شمار می‌رود. در این فرایند، مواد آلی موجود در زباله‌ها تحت تجزیه بی‌هوازی توسط میکروارگانیسم‌ها به گازهای گلخانه‌ای مانند متان و دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌شوند که نقش مهمی در گرمایش زمین و تغییرات اقلیمی دارند (IPCC, 2020). با وجود استفاده از پوشش‌های خاکی و تمهیدات مهندسی در محل‌های دفن، نشت گازها به جو همچنان رخ می‌دهد و می‌تواند علاوه بر اثرات اقلیمی، خطراتی نظیر آتش‌سوزی، انفجار، مشکلات بهداشتی و پیامدهای زیست‌محیطی ایجاد کند. در کشورهای در حال توسعه، سهم انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از دفن‌گاه‌ها روندی افزایشی داشته است؛ به گونه‌ای که این سهم در سال ۲۰۰۰ حدود ۲۹ درصد برآورد شد و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ به بیش از ۷۵ درصد افزایش یابد (Ghasemzade & Pazoki, 2017). این شرایط، ضرورت طراحی بهینه دفن‌گاه‌ها و بهره‌برداری از زیست‌توده تولیدی را برای کاهش آلاینده‌ها و افزایش بهره‌وری انرژی آشکار می‌سازد. در مقابل، کشورهای توسعه‌یافته دفن‌گاه‌ها را به گونه‌ای طراحی می‌کنند که حداکثر انرژی ممکن از زیست‌توده استخراج شود و پیش‌بینی دقیق میزان متان به عنوان معیاری کلیدی در ارزیابی امکان‌سنجی پروژه‌ها و رعایت استانداردهای زیست‌محیطی تلقی می‌شود. (Thompson et al., 2009)

با وجود اهمیت این موضوع، در ایران و به ویژه تهران، مطالعات اندکی با رویکرد مدل‌محور برای پیش‌بینی تولید گاز دفن‌گاه‌ها انجام شده و داده‌های کافی برای تصمیم‌گیری عملی و سرمایه‌گذاری در پروژه‌های استحصال زیست‌توده در دسترس نیست. بحران آلودگی هوا در کلان‌شهر تهران طی دهه‌های اخیر به یکی از چالش‌های اصلی زیست‌محیطی و سلامت عمومی کشور تبدیل شده است (Kamali et al., 2024; Zare Shahne et al., 2024; Shahne & Arhami, 2023; al., 2015). از آنجا که محل دفن آرادکوه در حاشیه جنوبی تهران واقع است، انتشار گازهای گلخانه‌ای و ترکیبات ثانویه آن می‌تواند به تشدید مشکلات کیفیت هوا در این منطقه دامن بزند (Arhami et al., 2017; Zare Shahne & Arhami, 2016; Shahne et al., 2022; 2018). این موقعیت جغرافیایی حساس، نیاز به مدل‌سازی دقیق انتشار گاز را بیش از پیش نشان می‌دهد. از سوی دیگر، تجربه بسیاری از پروژه‌های بازیافت متان نشان داده است که تنها بخش اندکی از پتانسیل واقعی تولید گاز محقق می‌شود. این شکاف دانشی اهمیت مطالعات مدل‌محور و پایش انتشار گاز را دو چندان می‌کند. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ انجام شد. نوآوری اصلی آن استفاده از نرم‌افزار LANDGEM برای مدل‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای در محل دفن آرادکوه تهران، ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینی و ارائه تحلیل‌های کاربردی برای مدیریت و بهره‌برداری از زیست‌توده است. اهداف اصلی تحقیق عبارت‌اند از: ۱. شناسایی و تحلیل گازهای تولیدی در محل دفن، ۲. بررسی فرایند تشکیل گاز در دفن‌گاه‌های بهداشتی، ۳. ارزیابی روش‌های تخمین گاز، ۴. مدل‌سازی انتشار گاز با LANDGEM و ارائه نتایج کاربردی برای مدیریت پسماند.

۲. ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار LANDGEM و تخمین میزان انتشار زیست‌توده می‌باشد. بخشی از پژوهش‌های پیشین که این مقاله به نحوی به آنها ارتباط پیدا می‌کند، به شرح زیر و به صورت موردی آورده شده است.

۲-۱. مطالعات داخلی

بویاچچی و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی تحت عنوان ارزیابی تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی در محل دفن زباله و فناوری استحصال انرژی (مطالعه موردی: محل دفن زباله آرادکوه) با استفاده از مدل‌های ریاضی میزان گازهای متان، دی‌اکسیدکربن و دی‌اسید گوگرد را در محل دفن زباله جهت استحصال انرژی محاسبه کردند. نتایج به دست آمده نشان داد بیشترین گاز متان و دی‌اکسیدکربن تولید شده در محل دفن زباله آرادکوه به ترتیب ۶ و ۱۶ میلیون کیلوگرم در سال ۱۳۹۴ و کمترین مقدار به ترتیب ۰/۳ و ۰/۸ میلیون کیلوگرم در سال ۱۴۲۳ پیش‌بینی می‌شود و همچنین حجم کل گازهای تولید شده در این محل دفن زباله طی ۳۰ سال معادل ۲۱۳ میلیون مترمکعب است که ۲۷ درصد جرم آن را متان و ۷۳ درصد جرم آن را گاز دی‌اکسیدکربن تشکیل می‌دهد (Boyaghchi et al., 2013). قاسم‌زاده و پازوکی (۲۰۱۷) در تحقیقی با موضوع برآورد و مدل‌سازی انتشار گاز در محل دفن زباله شهری در شهرستان جیرفت با استفاده از LANDGEM

میزان تولید متان و دی‌اکسیدکربن را تخمین زده‌اند که بیشترین مقدار متان ۸۸۰۰ تن بر سال و مقدار دی‌اکسیدکربن ۲۴۰۰۰ تن بر سال در سال ۲۰۴۵ میلادی یا ۱۴۲۴ شمسی رخ خواهد داد و پس از آن میزان تولید این گازها نزولی شده تا جایی که در سال ۲۱۵۶ میلادی به مقدار خیلی ناچیزی می‌رسد (Ghasemzade & Pazoki, 2017). طلایی‌خوزانی و نصیری (۲۰۲۲) در تحقیقی تحت عنوان مدل‌سازی میزان انتشار گازهای آلی دی‌اکسیدکربن، متان و غیرمتان در دفن زباله جامد شهر چهارم در سال ۱۳۹۵ با استفاده از نرم‌افزار LANDGEM انجام داده‌اند. بررسی‌ها حاکی از آن است که تولید زباله در شهرستان چهارم ۳۱۳/۳۵ گرم در هر نفر در روز است. اوج تولید دی‌اکسیدکربن و متان در این محل دفن زباله در سال ۲۰۲۸ برابر با ۱۰۵۷۰۰۰۰ مترمکعب در سال خواهد بود (Talaiekhosani & Nasiri, 2022). عمرانی و همکاران در پژوهشی تحت عنوان ارزیابی فنی و بهداشتی استحصال گاز متان از محل دفن زباله شیراز به ارزیابی این گاز پرداختند. در این پژوهش با استفاده از LANDGEM و با در نظر گرفتن درصد حجمی محتوای متان ۶۱ درصد و محاسبه ۱۶۴ مترمکعب بر مگاگرم به عنوان ضریب پتانسیل تولید گاز، و ثابت نرخ تولید متان ۰/۰۶، میزان انتشار گاز و آلاینده‌ها از مرکز دفن زباله شهر شیراز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با شیوه لوله‌گذاری صحیح و مهندسی به‌موقع، از وقوع حوادث جلوگیری شده؛ ضمن آن که سالانه از انتشار ۳۰۰۰ مترمکعب گاز متان در این سایت جلوگیری می‌شود (Omrani, 2004). ابوالحسینی و رضایی (۱۳۹۷) در پژوهشی روند تولید گازهای محل دفن زباله شماره ۲ شاهین‌شهر اصفهان را طی ۳۰ سال بررسی کردند. نتایج نشان داد که تولید گازهای متان و دی‌اکسیدکربن از ۱/۱ و ۲/۸ میلیون کیلوگرم در سال ۱۳۹۴ به ۱۷۴ و ۴۷۶ هزار کیلوگرم در سال ۱۴۲۴ کاهش یافته است. کل گازهای تولیدی ۴۶ میلیون مترمکعب (۲۷ درصد متان و ۷۳ درصد دی‌اکسیدکربن) برآورد شد. محققان استفاده از فناوری استحصال انرژی برای کنترل آلاینده‌گی و تولید انرژی پایدار را پیشنهاد کردند (ابوالحسینی و رضایی، ۱۳۹۷). علی‌زاد و شکرکار (۱۳۹۹) در طی بررسی خود هفت شهر تبریز، تهران، شیراز، مشهد، بندرعباس، خوی و آستارا را به دلیل برخورداری از شرایط اقلیمی متفاوت، برای ارزیابی و مدل‌سازی میزان گاز متان قابل تولید با استفاده از نرم‌افزار LANDGEM از دفن‌گاه پسماند هر شهر، انتخاب کردند. یافته‌های این مطالعه، نشان داد که بالاترین نرخ تولید متان در بین شهرهای مورد مطالعه، با در نظر گرفتن منطقه مرطوب و معمولی برای شهرستان آستارا و منطقه خشک برای سایر شهرها، در سال ۱۴۱۵ در شهر تهران اتفاق خواهد افتاد. با استفاده از نتیجه‌های به‌دست آمده در این پژوهش، می‌توان سامانه‌های جمع‌آوری گاز متان را برای هر محل دفنی طراحی و اجرا کرد. (علی‌زاد و شکرکار، ۱۳۹۹). ذوقی و دوستی (۲۰۱۸) یک روش جدید برای کنترل گازهای مراکز دفن زباله ارائه می‌دهند که با استفاده از فشار منفی بالا و تغییر لایه پوشش، از نفوذ هوا جلوگیری کرده و کارایی استخراج زیست‌توده را افزایش می‌دهد. همچنین با به‌کارگیری فرآیند جذب CO₂ توسط مونواتانول‌آمین و شبیه‌سازی در Aspen Hysys، امکان پالایش کم‌هزینه گازهای دفن‌گاه فراهم می‌شود. این سیستم در مراکز دفن زباله معمولی قابل اجراست و با کاهش گازهای گلخانه‌ای و افزایش بهره‌برداری از زیست‌توده، به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر کمک می‌کند. حسن‌آبادی و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه خود روش‌های برآورد و سنجش انتشار گاز متان از محل‌های دفن پسماند را طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۳ در سراسر جهان بررسی کردند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، اگرچه روش‌های مرسوم برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند مدل‌های IPCC و LANDGEM از نظر هزینه مقرون‌به‌صرفه‌تر بوده و در زمان کوتاه‌تری نتایج را ارائه می‌دهند، اما معمولاً با میزان خطا و عدم قطعیت قابل توجهی همراه هستند. بنابراین، به‌کارگیری روش‌های مستقیم کمی و کیفی برای اندازه‌گیری دقیق متان منتشر شده از محل‌های دفن زباله، گزینه مناسب‌تری محسوب می‌شود (Hssanabadi et al., 2024). مختاری و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی خود به پیش‌بینی انتشار گازهای گلخانه‌ای در محل‌های دفن زباله جامد شهری با استفاده از روش‌های LANDGEM و IPCC در یزد پرداختند. در این دوره، با استفاده از مدل IPCC، میزان کل انتشار متان از محل دفن زباله شهرستان یزد ۲۳/۱۷ گیگاگرم در سال بوده است، در حالی که بر اساس مدل LANDGEM، مقدار کل انتشار متان از محل دفن زباله شهرستان یزد ۵/۷۴ گیگاگرم در سال بوده است. مقدار کل CO₂ در محل دفن زباله شهرستان یزد در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ در مدل LANDGEM ۱۵/۷۵ گیگاگرم در سال تخمین زده شده است. پتانسیل تولید ۱۱/۸۸ مگاوات ساعت برق در سال برای محل دفن زباله شهرستان یزد در سال ۲۰۲۰ وجود دارد. نتایج مطالعه حاضر می‌تواند برای برنامه‌ریزی و اجرای سیستمی برای جمع‌آوری گاز متان و کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای به محل‌های دفن زباله مورد استفاده قرار گیرد (Mokhtari et al., 2020).

۲-۲. مطالعات خارجی

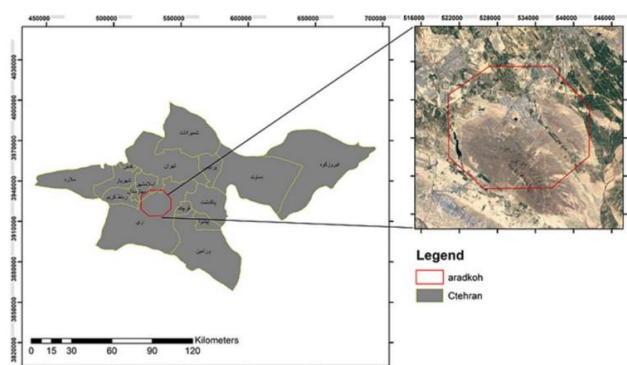
دریگ و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی مدفن بهداشتی پسماند جامد شهری در آبیژان ساحل عاج و پتانسیل تولید برق از انتشارات زیست‌توده پرداختند. از نرم‌افزار LANDGEM و مقادیر پیش‌فرض آن برای برآورد میزان تولید گاز متان استفاده شده است. با بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی معلوم گردید که در صورت استفاده از این مقادیر گاز برای تولید انرژی، می‌توان ۱۰ درصد الکتریسیته لازم برای شهر را تامین کرد (Rodrigue et al., 2018). داس و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی با عنوان تخمین تولید گازهای محل دفن زباله از پسماندهای جامد شهری در شهرهای هند با استفاده از ۴ مدل ریاضی (مدل چندفازی، مدل LANDGEM، مدل ایپر، مدل تی‌ان‌او) میزان انتشار گازهای محل دفن زباله را برآورد کردند و به این نتیجه رسیدند که تخمین گازهای حاصل از محل دفن زباله با استفاده از مدل چندفازی کمترین مقدار را دارد، در مدل ایپر میزان انتشار ۳۰۰ تا ۵۰۰ درصد و در مدل تی‌ان‌او ۲۰۰ درصد محاسبه گردیده است (Das et al., 2016). پژوهش قابل ذکر دیگر، یک رساله دکترا در مورد انتشارات گاز از محل‌های دفن زباله انجام شده است. یک مدفن در غرب ایالات متحده به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده که در منطقه‌ای با بارندگی فراوان قرار دارد و شیرابه آن به منظور بهبود شرایط واکنش‌گرایی دوباره در داخل مدفن به جریان در می‌آید. برای محاسبه میزان انتشارات گاز، پس از بررسی چندین مدل، از نرم‌افزار LANDGEM استفاده شده است. با توجه به موقعیت مدفن در ایالات متحده، مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار برای مدل‌سازی به کار رفته‌اند (Melaouhia, 2017). همچنین رحمان (۲۰۲۴) پتانسیل بیومتان حاصل از محل‌های دفن زباله در پنج شهر بزرگ عربستان سعودی را با استفاده از مدل انتشار گازهای محل دفن زباله (LANDGEM) برای تخمین انتشار متان از سال ۲۰۱۵ تا ۲۱۱۵ بررسی کرده است. این تحقیق، انتشار تجمعی متان را که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۱۱۵ به نزدیک به ۲۵/۵ میلیارد مترمکعب برسد، ارزیابی می‌کند و پتانسیل تولید برق از این بیومتان را که سالانه به ۱۲۹۹ گیگاوات‌ساعت می‌رسد، کمی می‌کند. تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی، از جمله نرخ تولید متان و ظرفیت بالقوه تولید متان نشان می‌دهد که عامل دوم تأثیر بیشتری بر خروجی متان دارد. این یافته‌ها بر اهمیت استراتژی‌های جذب متان و مدیریت محل دفن زباله برای افزایش ظرفیت انرژی تجدیدپذیر عربستان سعودی تأکید می‌کند (Rahman, 2024).

۳. مواد و روش‌ها

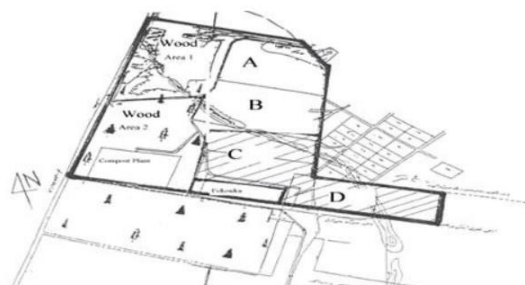
۳-۱. منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه به بررسی پتانسیل بالقوه تولید زیست‌توده از پسماندهای دفن شده در مدفن بهداشتی شهر تهران در آرادکوه پرداخته شده است. برای رسیدن به این هدف از مدل مرتبه اول LANDGEM استفاده شده است. پارامترهای دخیل در این مدل اعم از پتانسیل تولید متان و نرخ تجزیه و میزان پسماند تولیدی در هر سال با استفاده از داده‌های محلی موجود و روش‌های نظری محاسبه گردیده‌اند. شهر تهران، مرکز استان تهران و پایتخت کشور ایران، با وسعت ۷۳۰ کیلومتر مربع، مرکز استان تهران بوده و در ۱۷ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه عرض شمالی گسترده شده و در ارتفاع ۱۸۰۰-۹۰۰ متر از سطح دریا امتداد یافته است که این ارتفاع از شمال به جنوب کاهش می‌یابد. محل دفن زباله آرادکوه در فاصله ۲۵ کیلومتری جنوب تهران و در مجاورت جاده قدیم قم- تهران واقع شده است (شکل ۱). این مرکز دفن از سال‌های اولیه دهه ۴۰ شمسی پذیرای بخشی از پسماندهای تولیدی شهر تهران بوده و طبق بررسی‌های انجام شده از سال ۱۳۶۷ تاکنون این محل دفن به عنوان تنها محل دفن پسماندهای شهری تولیدی شهر تهران مطرح می‌باشد.

مرکز پردازش و دفع آرادکوه، به عنوان نقطه مرکزی برای مدیریت پسماندهای تهران، با توسعه‌ای قابل توجه تا منطقه آرادکوه گسترده شده است. این مجتمع که اکنون به مساحت تقریبی ۱۴۰۰ هکتار رسیده و فضایی در حدود ۵۰ هکتار را به مجتمع فعلی پردازش و بازیافت اختصاص داده است، به طور مداوم در حال توسعه است تا ظرفیت‌های بیشتری را برای پردازش پسماندها فراهم سازد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته و نظر کارشناسان سازمان پسماند شهر تهران این مجتمع در سال ۱۴۲۰ به ظرفیت نهایی خود خواهد رسید. شکل (۲) نمایی از این مرکز را نشان می‌دهد. همچنین برای بررسی وضعیت اقلیمی در محل دفن پسماند آرادکوه از اطلاعات ایستگاه هواشناسی فرودگاه امام خمینی (ره) که نزدیک‌ترین ایستگاه به این محل می‌باشد استفاده شده است.



شکل ۱. نقشه استان تهران و محل قرارگیری مرکز دفن زباله آرادکوه (منبع: یافته‌های تحقیق)



شکل ۲. نمایی از مرکز دفن زباله آرادکوه (منبع: سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران، ۱۴۰۲)

۲-۳. روش‌شناسی پژوهش

پسماندهای شهری که در مراکز دفن بهداشتی جای می‌گیرند، با گذر زمان با واکنش‌های بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی مختلفی مواجه می‌شوند. یکی از مهم‌ترین این واکنش‌های بیولوژیکی، تجزیه مواد به شیرابه و گاز است. این فرایندها شامل انحلال مواد موجود در خاک در شیرابه، انتشار شیرابه و گازها در خاک، تبخیر مواد شیمیایی و آب به اتمسفر، و واکنش‌های احیاء و اکسیداسیون و واکنش فلزات سنگین و نمک‌ها در خاک هستند. این فرایندها در پنج مرحله انجام می‌گیرند:

مرحله اول؛ تنظیم اولیه؛ این مرحله شامل تجزیه مواد آلی تحت شرایط هوازی است. مهم‌ترین محصول این فرایند کربن‌دی‌اکسید می‌باشد.

مرحله دوم؛ فاز گذار؛ در این مرحله که به عنوان مرحله گذار یا انتقالی شناخته می‌شود، شرایط از هوازی به بی‌هوازی تغییر می‌کند.

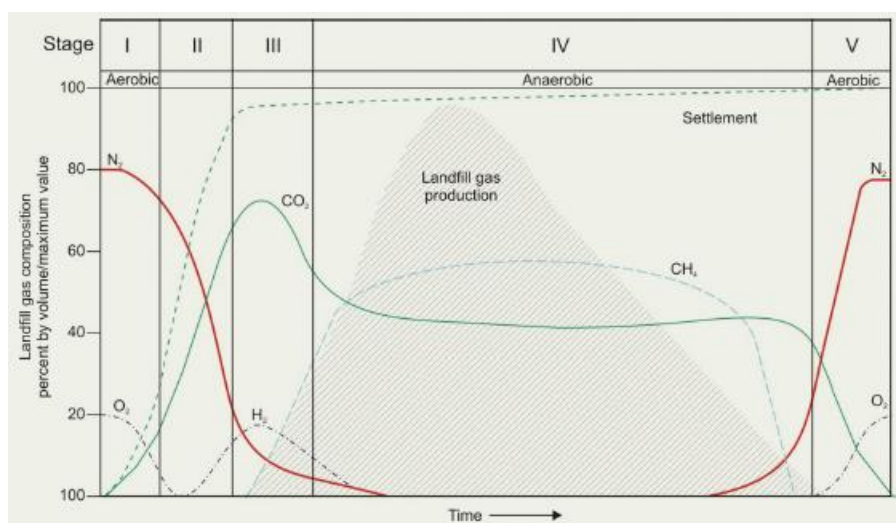
مرحله سوم؛ فاز اسید؛ در این مرحله، فعالیت باکتری‌ها افزایش می‌یابد و مقدار قابل توجهی اسید آلی تولید می‌شود.

مرحله چهارم؛ فاز تشکیل متان؛ در این مرحله، میکروارگانیسم‌های گروه دوم (استیک اسید) گاز هیدروژن را به متان و کربن‌دی‌اکسید تبدیل می‌کنند.

مرحله پنجم؛ فاز بلوغ؛ در این مرحله، تولید گاز متان به شدت کاهش می‌یابد و مواد موجود در این مرحله مواد پایه‌ای هستند که تجزیه آن‌ها با سرعت کم انجام می‌شود. گاز غالب در این مرحله متان است. بسته به مقیاس بسته شدن مدفن، مقداری گاز نیتروژن و اکسیژن

1. Initial Adjustment
2. Transition Phase
3. Acid Phase
4. Methane Formation Phase
5. Maturation Phase

نیز تولید می‌شود. به نوعی این مرحله، مرحله بلوغ و پایداری است (Baldwin et al., 1998).



شکل ۳. اجزای مصور محل دفن بهداشتی- مهندسی پسماند جامد شهری (Management of Low Levels of Landfill Gas) (Environmental Protection Agency, 2013)

با در نظر گرفتن سازوکار تشکیل گازهای محل دفن پسماند (LFG) این گازها نوعی زیست‌توده مشابه مخلوط گازهای تولید شده در هاضم‌های لجن فاضلاب و پسماند مزارع هستند. این مخلوط گازی حاصل فرایند تجزیه بیوشیمیایی مواد زائد در محل‌های دفن زباله است. عواملی مانند جنس پسماندها، بخش آلی آن‌ها، میزان رطوبت درون پسماندها و سن دفن‌گاه، به طور قابل‌توجهی بر کیفیت و حجم گاز تولیدی اثر می‌گذارند (Mann, 2001).

از سوی دیگر، گاز متان به عنوان یکی از عمده‌ترین گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های بشری، نقش به‌سزایی در تغییرات اقلیمی دارد. این گاز که تقریباً ۲۵ برابر قوی‌تر از کربن‌دی‌اکسید در افزایش گرمایش جهانی است، به‌وفور در مراکز دفن زباله تولید می‌شود. مدل‌های گاز دفن‌گاه به زبان ساده، تغییرات پیچیده‌ای که در طول تجزیه زباله‌ها در دفن‌گاه‌ها رخ می‌دهند را توصیف می‌کنند تا بتوانند تولید متان را برآورد کنند. این مدل‌ها داده‌های ورودی مانند حجم زباله، ترکیب مواد زباله، شرایط محیطی دفن‌گاه و داده‌های تجربی را در نظر می‌گیرند تا بتوانند پروفیل تولید متان را در طول زمان پیش‌بینی کنند. به صورت کلی این مدل‌ها به ۳ دسته تقسیم می‌شوند: ۱. معادلات مرتبه صفر، ۲. معادلات مرتبه اول و ۳. معادلات مرتبه دوم. در مدل‌های مرتبه صفر، میزان زیست‌توده‌ای که از دفن‌گاه‌ها تولید می‌شود در طول زمان متغیر نیست و پایدار باقی می‌ماند. به بیان دیگر، در این دسته از مدل‌ها، عواملی مانند قدمت و ترکیب زباله‌ها هیچ نقشی در تغییر میزان تولید گاز ندارند. از این نوع معادلات می‌توان به مدل‌های EPER آلمان، SWANA مرتبه صفر و IPCC اشاره کرد. مدل‌های مرتبه اول برای تولید زیست‌توده از دفن‌گاه‌ها از جمله رایج‌ترین مدل‌هایی هستند که به صورت جهانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مدل‌ها بر اساس معیارهایی مانند میزان رطوبت زباله‌ها، محتوای کربنی، سن زباله‌ها و قابلیت آن‌ها برای تجزیه شکل گرفته‌اند. علاوه بر این، حجم کلی زباله‌ها و شرایط خاص دفن‌گاه، مانند آب و هوا، دما و میزان بارش نیز در این مدل‌ها لحاظ می‌شوند. از این نوع معادلات می‌توان به مدل‌های SWANA، TNO، GasSim، Afvalzorg، EPER فرانسه، Mexico و LANDGEM اشاره نمود. مدل مرتبه دوم یک روش پیچیده برای توصیف فرایندهای تجزیه زباله در دفن‌گاه‌ها است. این مدل از چندین واکنش مرتبه اول با سرعت‌های مختلف برای مدل‌سازی تولید گاز استفاده می‌کند. در واقع، مدل مرتبه دوم به دلیل ترکیبی از واکنش‌های متنوع، یک سیستم بسیار پیچیده را شکل می‌دهد. معمولاً برای برآورد تولید متان در دفن‌گاه‌ها از معادله سینتیکی مرتبه اول استفاده می‌شود که بر اساس

حجم زباله‌ها در طی زمان، ترکیب زباله‌ها، و عوامل دیگر محاسبه می‌گردد. میزان گاز تولیدی ناشی از زباله‌های هر سال به صورت نمایی کاهش می‌یابد تا این که به طور کامل تجزیه شوند (Kamalan et al., 2011). همان طور که اشاره شد از طریق مدل‌های گوناگون و استفاده از اصول ریاضی، می‌توان میزان گاز تولیدی مراکز دفن زباله را پیش‌بینی نمود. مدل‌های متداول به طور معمول از معادلات مرتبه اول یک یا چند مرحله‌ای برای توصیف درجه قابلیت تجزیه و میزان گاز تولیدی در محل‌های دفن زباله استفاده می‌کنند. در این پژوهش از مدل LANDGEM برای برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده شد. داده‌های ورودی شامل حجم سالانه پسماند، ترکیب فیزیکی و شرایط اقلیمی (۲۰۱۹-۲۰۲۴) از ایستگاه فرودگاه امام خمینی گردآوری شد. دو دسته پارامتر ورودی شامل مقادیر پیش‌فرض آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا (USEPA) و مقادیر محلی به مدل اعمال گردید. برای اعتبارسنجی نتایج از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5 استفاده شد.

۱-۲-۳. محاسبه پتانسیل تولید و نرخ تولید متان

نرم‌افزار LANDGEM یک ابزار خودکار جهت تخمین مقادیر گازهای تولیدی در محل دفن زباله شامل متان، دی‌اکسیدکربن، ترکیبات آلی غیرمتانی و آلاینده‌های خاص می‌باشد. این نرم‌افزار توسط پژوهشگران مرکز کنترل فناوری USEPA تهیه شده‌است. در این نرم‌افزار کاربر می‌تواند از داده‌های اختصاصی موجود از محل دفن زباله استفاده کند و یا از اطلاعاتی که به صورت پیش‌فرض برای این گونه مراکز تهیه شده، استفاده نماید. این اطلاعات به دو دسته تقسیم می‌گردند: ۱. پیش‌فرض قانون هوای پاک (CAA) که بر مبنای نیازهای محل‌های دفن پسماند شهری تهیه شده و بر اساس مقررات قانون هوای پاک اقتباس شده‌اند و ۲. پیش‌فرض لیست کامل که به استثنای محل‌های دفن مرطوب، این گونه داده‌ها بر پایه فاکتورهای انتشار USEPA گردآوری شده‌اند. نرم‌افزار LANDGEM از معادله نرخ تجزیه مرتبه اول طبق رابطه (۱) برای محاسبه و تخمین انتشار سالانه گازهای حاصل از محل‌های دفن زباله در محدوده مشخص شده توسط کاربر استفاده می‌نماید:

$$Q_{CH_4} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن Q_{CH_4} مقدار متان تولیدی محاسبه شده بر حسب مترمکعب بر سال، i معادل یک سال افزایش زمان، n اختلاف سال موردنظر برای محاسبه تولید گاز و سال تاسیس محل دفن زباله، t : زمان بر حسب ۰/۱ سال، k : نرخ تولید متان بر حسب معکوس سال، L_0 : پتانسیل ظرفیت تولید متان بر حسب مترمکعب بر مگاگرم، M_i : جرم دفن زباله در سال اول تاسیس مدفن زباله بر حسب مگاگرم، t_{ij} : سن زامین بخش از زباله دفن شده در زامین سال بر حسب ۰/۱ سال (به عنوان مثال ۳/۲ سال) می‌باشد.

۲-۲-۳. پارامترهای ورودی LANDGEM

پارامترهای زیر جزء ورودی‌های مدل بوده و اطلاعاتی در خصوص محل دفن زباله ارائه می‌کنند. در صورت نبودن داده‌های میدانی مربوط به محل دفن می‌توان از داده‌های فرضی پیشنهادی LANDGEM بهره برد. این اطلاعات شامل موارد زیر است:

- کد محل دفن پسماند یا نام آن: کد در صورت وجود باید وارد گردد. این کد بیشتر مربوط به مراکز دفن پسماند ایالات متحده آمریکا می‌باشد. نام محل دفن زباله باید وارد شود و این نام در تمام قسمت‌های نرم‌افزار به صورت خودکار درج خواهد شد.
- سال تاسیس: سالی که محل دفن پسماند شروع به پذیرش پسماند می‌کند و باید به صورت یک عدد چهار رقمی وارد شود.
- سال پایان عمر: سالی که مرکز دفن پسماند بسته خواهد شد و ظرفیت آن تکمیل خواهد شد. در صورتی که کاربر سال پایان عمر را ندارد، نرم‌افزار با توجه به اطلاعات موجود و ظرفیت نهایی، سال پایان عمر را خودکار محاسبه می‌کند. LANDGEM بیش از ۸۰ سال را برای عمر محل دفن قبول نمی‌کند. در صورتی که عمر محل دفن بیش از ۸۰ سال است باید دو بار مدل‌سازی صورت گیرد. اگر تاریخ مشخصی برای بسته شدن محل دفن زباله در نظر گرفته نشده باشد، از ظرفیت طراحی پسماند برای محاسبه زمان بسته شدن استفاده

می‌شود؛ به این معنی که در چنین شرایطی می‌توان با وارد کردن ظرفیت طراحی پسماند در بخش ورودی اطلاعات نرم‌افزار، تاریخ بسته شدن محل دفن را محاسبه کرد. در هر صورت باید توجه داشت که این نرم‌افزار تعداد سال‌های قبول پسماند توسط محل دفن را حداکثر ۸۰ سال در نظر می‌گیرد. ظرفیت طراحی پسماند به کل میزان پسماندی اشاره دارد که قابلیت دفع در یک محل دفن زباله را دارد.

- میزان زباله‌ای که هر ساله وارد محل دفن زباله می‌شود: واحد آن تن در سال است و می‌تواند برای هر سال متفاوت باشد. این داده که به عنوان یکی از داده‌های کلیدی در نرم‌افزار مدیریت دفع زباله به حساب می‌آید، باید به‌طور دقیق توسط کاربر برای هر سال تا زمانی که ظرفیت محل دفع کاملاً تکمیل شود وارد گردد.

- ثابت تولید متان

- ظرفیت بالقوه تولید متان.

برای دستیابی به نتایجی از مدل‌سازی که به واقعیت نزدیک‌تر باشد، انتخاب دقیق فرضیات مربوط به پتانسیل تولید متان (L_0) و نرخ تولید متان (k) بسیار مهم است. L_0 نشان‌دهنده کل متانی است که از مقدار مشخصی زباله تولید می‌شود و مقدار k مدت زمانی است که انتظار می‌رود تولید متان از زباله‌ها ادامه یابد، مشخص می‌کند. این متغیرها تحت تاثیر مستقیم ترکیب شیمیایی زباله‌ها، خصوصیات آن‌ها و وضعیت فرایند تجزیه قرار دارند. بنابراین، تخمین L_0 و k نیازمند بررسی دقیق ویژگی‌های زیست‌شیمیایی زباله‌ها است و این امر باید با در نظر گرفتن مدیریت انتشار گازهای سایت دفن زباله انجام شود (Alexander, 2005). مدل IPCC (۲۰۰۶) با استفاده از ویژگی‌های زباله و مشخصات محل دفن‌گاه، تولید متان را پیش‌بینی می‌کند. در این مدل، می‌توان L_0 را با استفاده از رابطه (۲) محاسبه نمود:

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOC_f \times F \times \frac{16}{12} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن MCF ضریب مدیریت دفن زباله، یک پارامتر کلیدی است که وضعیت مدیریت و شرایط محیطی یک سایت دفن زباله را نشان می‌دهد. جدول (۱) مقادیر MCF برای انواع مختلف سایت‌های دفن زباله را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقادیر MCF سایت‌های مختلف دفن زباله (منبع: راهنمای LANDGEM)

نوع سایت دفن زباله	عمق ≤ 5 متر	عمق > 5 متر
بدون مدیریت	۰/۸	۰/۴
با مدیریت	۱	۰/۸
نیمه‌هوایی	۰/۵	۰/۴
شرایط نامعلوم	۰/۸	۰/۴

همچنین پارامتر DOC محتوای کربن آلی قابل تجزیه در زباله است که جزء ضروری محاسبات تولید گاز می‌باشد و تغییرات جزئی در مقدار آن می‌تواند موجب تغییرات بسیار بزرگی در محاسبات متان تولیدی گردد. DOC_f ضریب تجزیه کربن آلی، نشان‌دهنده درصد کربن آلی در پسماند است که در فرایندهای بی‌هوازی به گاز محل دفن زباله تبدیل می‌شود. DOC_f به دمای محیط وابسته بوده و با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$DOC_f = 0.014T + 0.28 \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن T دمای محیط بر حسب درجه سانتیگراد، F درصد متان موجود در گاز مدفون که با استفاده از آنالیز گازهای محل دفن زباله شهرهای مختلف آن کشور و یا منطقه تعیین می‌شود بوده و کسر $\frac{16}{12}$ نیز بیانگر نسبت وزن مولکولی CH_4 به C است.

$$DOC = (0.4 * A) + (0.17 * B) + (0.15 * C) + (0.3 * D) \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن A پسماندهای کاغذ و پارچه، B پسماندهای پارک‌ها، باغ‌ها و دیگر پسماندهای آلی غیرغذایی، C پسماندهای موادغذایی و D کسر پسماندهای چوب هستند. علاوه بر رابطه (۴) که توسط IPCC ارائه شده برای به‌دست آوردن L_0 از مقدار پیش‌فرض قرار داده شده در نرم‌افزار نیز می‌توان استفاده نمود. مقادیر پیش‌فرض در جدول (۲) قابل مشاهده است.

جدول ۲. مقادیر پیش‌فرض L_0 (منبع: راهنمای LANDGEM)

L_0 (مترمکعب بر مگاگرم)	نوع محل دفن زباله	نوع پیش‌فرض
۱۷۰	محل دفن معمولی	CAA
۱۷۰	محل دفن خشک	CAA
۱۰۰	محل دفن معمولی	Inventory
۱۰۰	محل دفن خشک	Inventory

بر اساس تحقیقات، بارش یکی از مهم‌ترین عوامل برای تعیین مقدار k است. بنابراین، می‌توان مقدار k را برای زباله‌های معمولی بر اساس نرخ بارش محاسبه کرد. رابطه (۵) جهت محاسبه k ارائه شده است^۱.

$$k = (3.2 \times 10^{-5} \times \text{annual precipitation in mm}) + 0.01 \quad (\text{رابطه ۵})$$

علاوه بر روش گفته شده فوق، برای بدست آوردن k از مقدار پیش‌فرض قرار داده شده در نرم‌افزار نیز می‌توان استفاده نمود. مقادیر پیش‌فرض در جدول (۳) قابل مشاهده است. طبق تعریف محل‌های دفن زباله خشک در مناطقی قرار دارند که کمتر از ۶۳۵ میلی متر (۲۵ اینچ) در سال بارندگی داشته باشند.

جدول ۳. مقادیر پیش‌فرض k (منبع: راهنمای LANDGEM)

k (بر حسب معکوس سال)	نوع محل دفن زباله	نوع پیش‌فرض
۰/۰۵	محل دفن معمولی	CAA
۰/۰۲	محل دفن خشک	CAA
۰/۰۴	محل دفن معمولی	Inventory
۰/۰۲	محل دفن خشک	Inventory

۳-۳-۲. صحت‌سنجی و ارزیابی نتایج

تخمین میزان تولید و انتشار گاز از محل دفن زباله‌ها با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، یک روش نوین و بسیار مؤثر در مدیریت پسماندها و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از این گازها است. با توجه به اهمیت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی ناشی از محل دفن زباله‌ها، استفاده از فناوری‌های پیشرفته ماهواره‌ای می‌تواند ابزاری کلیدی در پایش و مدیریت اثربخش این گازها باشد. (Amiri & Zare, 2024; Shahne, 2025; Bourbour et al., 2025; Kafi et al., 2024)

تصاویر ماهواره Sentinel 5 یکی از قوی‌ترین ماهواره‌ها در زمینه پایش و بررسی آلاینده و آلودگی هوا می‌باشد. این تصاویر از سال ۲۰۱۷ تا به امروز گازهای مختلف در سطح زمین را مورد بررسی قرار داده است. این سنجنده یکی از پرکاربردترین سنجنده‌های دنیا است. (Google Earth Engine, 2024). این ماهواره توسط سازمان فضایی اتحادیه اروپا طراحی و عرضه شده است و با استفاده از این ماهواره امکان پایش گازهای متان، دی‌اکسیدگوگرد، سولفوردی‌اکسید، آتروسول‌ها، مونوکسیدکربن و پوشش ابر در لایه تروپوسفر وجود دارد.

دسترسی به داده‌های این ماهواره از طریق سکوی محاسباتی Google Earth Engine (GEE) امکان‌پذیر است، که امکان مشاهده، تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی داده‌ها را بدون نیاز به زیرساخت‌های محاسباتی قدرتمند محلی فراهم می‌آورد. GEE، مجموعه‌ای عظیم از

1. <https://www.epa.gov/land-research/landfill-gas-emissions-model-landgem>

داده‌های مکانی است که با عملکرد بالا و خدمات محاسباتی موازی در کنار هم، قرار گرفته‌اند. مزیت اصلی GEE، این است که مجموعه‌های بزرگی از داده‌ها از جمله پوشش زمین، متغیرهای محیطی، آب و هوا و پیش بینی آب و هوا را فراهم می‌کند که برای دسترسی به داده‌های پیش‌پردازش شده است (Javadi et al., 2025).

کار با GEE از طریق یک رابط کاربری مبتنی بر وب قابل دسترسی برای اجرای اسکریپت‌های سفارشی در زبان‌های برنامه‌نویسی مانند JavaScript و Python امکان‌پذیر است. این امر به کاربران اجازه می‌دهد تا با استفاده از توابع پیش‌ساخته و کتابخانه‌های قدرتمند برای پردازش تصاویر و داده‌های ژئوفیزیکی، پروژه‌های تحلیلی پیچیده‌ای را پیاده‌سازی کنند. این پلتفرم توانایی‌های قدرتمندی را برای تحلیل زمانی و مکانی، تشخیص تغییر، طبقه‌بندی و سایر تجزیه و تحلیل‌های پیچیده ژئوفیزیکی فراهم می‌آورد (Google Earth Engine, 2024). علاوه بر ابزار فوق، جهت مقایسه آماری بین دو سناریوی مدل‌سازی، مقادیر سالانه تولید متان محاسبه و اختلاف‌ها تحلیل شدند. پس از آزمون نرمال بودن داده‌ها، آزمون t جهت بررسی معنی‌داری اختلاف‌ها و ضریب همبستگی برای ارزیابی شباهت روندها مورد استفاده قرار گرفت (Datatab, 2024).

نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه نخستین مقایسه نظام‌مند میان پارامترهای پیش‌فرض و پارامترهای محلی مدل LANDGEM در شرایط واقعی آرادکوه و همچنین استفاده هم‌زمان از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5 برای اعتبارسنجی نتایج است.

۴. یافته‌های پژوهش

سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران جهت آگاهی از کیفیت پسماندهای شهری شهر تهران و بسته به هدف موردنظر آنالیزهای مختلفی بر روی پسماند ورودی به محل دفن انجام داده است. با توجه به نمونه‌برداری و آنالیز پسماند در سال ۱۳۹۸ نتایجی منتشر شده است که در جدول (۴) این آمار قابل مشاهده است.

جدول ۴. آنالیز فیزیکی پسماند جامد شهری تهران بر حسب درصد (منبع: سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران، ۱۳۹۸)

اجزای پسماند	درصد تشکیل‌دهنده	اجزای پسماند	درصد تشکیل‌دهنده
پسماند غذایی	۶۹/۵	پارچه	۴/۱
نان	۰/۶	شیشه	۱/۴
پت (PET)	۱/۱	چوب	۰/۴
شمع و نایلون	۸/۴	لاستیک	۰/۱
پلاستیک قابل بازیافت	۲/۴	چرم	۰/۳
پلاستیک غیرقابل بازیافت	۲/۴	اقلام بهداشتی	۳/۵
کاغذ	۱/۹	تتراپک	۰/۱
مقوا و کارتن	۱/۶	ضایعات باغبانی	۰/۸
آهنی	۰/۲	پسماند ویژه	۰/۰
غیرآهنی	۰/۳	سایر	۰/۸

۴-۱. کمیت پسماندهای موثر در تولید گاز و برآورد میزان پسماند

در ارزیابی پتانسیل تولید زیست‌توده از محل‌های دفن زباله، دو فاکتور اصلی میزان زباله‌های دفن شده و کیفیت این زباله‌ها حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به این که هر ساله بخشی از زباله تهران مورد پردازش قرار می‌گیرد، پس تفاوت زباله ورودی با زباله پردازش شده به‌عنوان پسماند موثر در تولید گاز در نظر گرفته شده است. همان‌طور که بیان شد، کلیه روش‌های دفن در محدوده سایت‌های A، B، C و D اجرا شده‌اند و مشاهدات میدانی و بررسی اطلاعات نیز نشان می‌دهد که در این دو محدوده از لحاظ روش دفن (عمق دفن، پوشش نهایی و ...) شرایط مناسبی برای انجام فرایندهای بی‌هوازی مهیا بوده است. بر همین اساس کل جرم دفن شده در این محدوده‌ها به‌جز جرم پسماندهای پت، پلاستیک قابل بازیافت و غیرقابل بازیافت، آهنی، غیرآهنی، شیشه، اقلام بهداشتی، ویژه و سایر را می‌توان به‌عنوان جرم موثر در تولید گاز لحاظ نمود. با توجه به توضیحات ارائه شده، فرض شده است که حدود یک هفتم معادل ۱۴ درصد پسماند ورودی به مرکز دفن به

عنوان پسماند غیر موثر در تولید گاز بوده و مابقی به عنوان پسماند موثر در تولید گاز فرض شده است. میزان پسماند در سال‌های آینده با توجه به تخمین جمعیت و در نظر گرفتن میزان سرانه پسماند به ازای هر نفر حدود ۷۵۰ گرم در روز و فرض افزایش سرانه پسماند حدود ۲ درصد در سال‌های آتی در نظر گرفته شده است (Rupani et al., 2019) که در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵. پیش‌بینی جمعیت و میزان پسماند برای سال‌های آتی (منبع: یافته‌های تحقیق)

سال	جمعیت (میلیون نفر)	زباله ورودی (میلیون تن)	تولید زیست توده	سال	جمعیت (میلیون نفر)	زباله ورودی (میلیون تن)	تولید زیست توده
۱۴۰۳	۱۴۴۲۵۰۰۰	۴/۰۳	۳/۴۵	۱۴۱۲	۱۵۳۷۷۰۰۰	۵/۱۳	۴/۴
۱۴۰۴	۱۴۵۵۷۰۰۰	۴/۱۵	۳/۵۶	۱۴۱۳	۱۵۴۴۵۰۰۰	۵/۲۶	۴/۵۱
۱۴۰۵	۱۴۶۸۴۰۰۰	۴/۲۷	۳/۶۶	۱۴۱۴	۱۵۵۰۶۰۰۰	۵/۳۸	۴/۶۱
۱۴۰۶	۱۴۸۰۴۰۰۰	۴/۳۹	۳/۷۶	۱۴۱۵	۱۵۵۵۹۰۰۰	۵/۵۱	۴/۷۲
۱۴۰۷	۱۴۹۱۸۰۰۰	۴/۵۱	۳/۸۷	۱۴۱۶	۱۵۸۶۴۰۱۲	۵/۷۳	۴/۹۱
۱۴۰۸	۱۵۰۲۴۰۰۰	۴/۶۳	۳/۹۷	۱۴۱۷	۱۵۹۱۹۵۸۹	۵/۸۷	۵/۰۳
۱۴۰۹	۱۵۱۲۴۰۰۰	۴/۷۶	۴/۰۸	۱۴۱۸	۱۵۹۶۸۴۲۲	۶	۵/۱۴
۱۴۱۰	۱۵۲۱۶۰۰۰	۴/۸۸	۴/۱۸	۱۴۱۹	۱۶۰۱۷۲۵۵	۶/۱۴	۵/۲۶
۱۴۱۱	۱۵۳۰۱۰۰۰	۵/۰۱	۴/۲۹	۱۴۲۰	۱۶۱۱۴۹۲۲	۶/۳	۵/۴

یکی از داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی، میزان پسماند دفن‌شده در هر سال می‌باشد که برای به‌دست آوردن میزان آن در آینده، باید رشد جمعیت و سرانه تولید پسماند در سال‌های آتی تخمین زده شود. برای محاسبه این مقدار از رابطه (۲) استفاده شده است. با توجه به جدول (۱) به علت این که محل دفن زباله مورد مطالعه از نوع نیمه‌هوایی با عمق بیشتر از ۵ متر است، مقدار MCF برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. برای به‌دست آوردن مقدار DOC از فرمول ارائه شده در رابطه ۴ استفاده شده که برای به‌دست آوردن پارامترهای آن از جدول (۴) استفاده شده است و نتایج آن در قالب رابطه ۶ قابل مشاهده است:

$$DOC = (0.4 \times 6) + (0.17 \times 2.7) + (0.15 \times 69.5) + (0.3 \times 0.4) = 13.404 \% \quad \text{رابطه ۶}$$

برای به دست آوردن DOC_f نیز از رابطه (۳) استفاده می‌شود. با توجه به این که دما در محدوده مدفن آرادکوه (ایستگاه هواشناسی امام خمینی) ۳۵ درجه سانتی‌گراد فرض شده است: (Iran Meteorological Organization [IRIMO], 2022)

$$DOC_f = 0.014 \times 35 + 0.28 = 0.77$$

$$L_0 = 0.5 \times 0.13404 \times 0.77 \times 0.5 \times \frac{16}{12} = 0.03347 \times 1000 = 33.47 \frac{\text{kg}}{\text{ton}} \quad \text{رابطه ۷}$$

تراکم متان در شرایط استاندارد معمولاً ۰/۶۵۶ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته می‌شود، اما بسته به دمای مرجع می‌تواند متفاوت باشد:

$$L_0 = 33.47 \div 0.656 = 51.02 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}} \quad \text{رابطه ۸}$$

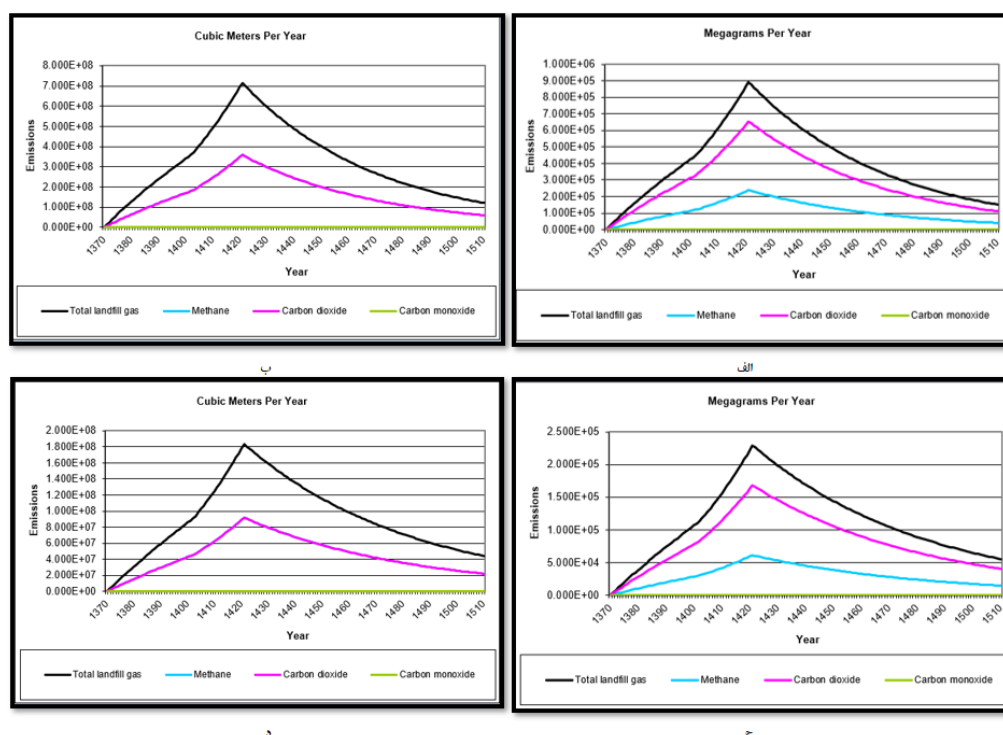
بنابراین مقدار L_0 بدست‌آمده توسط روش IPCC برابر ۵۱/۰۲ مترمکعب بر تن می‌باشد. (Iran Meteorological Organization [IRIMO], (2022

$$k = (3.2 \times 10^{-5} \times 189) + 0.01 \cong 0.016$$

۲-۴. نتایج

مدل‌سازی بر اساس دو سناریوی مختلف با استفاده از دو دسته مقادیر پیش‌فرض CAA و مقادیر نظری برای LANDGEM انجام گرفته است که نتایج حاصل از آن‌ها و نمودارهای مقایسه‌ای آورده شده‌اند. شکل (۴) نمودار خروجی LANDGEM برای گاز متان و کربن مونوکسید

و کربن‌دی‌اکسید را نشان می‌دهد. همچنین در جدول (۶) نیز نرخ انتشار این گازها به تفصیل آورده شده است.



شکل ۴. نمودار LANDGEM برای نرخ انتشار گازهای از محل دفن زباله آرادکوه با استفاده از مقادیر پیش فرض CAA برای واحدهای (الف) مگا گرم برسال و (ب) متر مکعب بر سال و مقادیر نظری برای واحدهای (ج) مگا گرم برسال و (د) متر مکعب بر سال (منبع: یافته‌های تحقیق)

مطابق شکل (۴) و با توجه به نتایج به دست آمده در جدول (۶) با استفاده از مقادیر پیش فرض CAA بیشترین میزان تولید متان در سال ۱۴۲۱ و به عبارت دیگر یک سال پس از پایان پذیرش زباله در محل دفن زباله اتفاق می‌افتد و به میزان $3/576 \times 10^8$ مترمکعب خواهد بود. همچنین بعد از اتمام کار محل دفن زباله روند تولید گازها نزولی خواهد شد. در قسمت مقادیر نظری نیز بیشترین میزان تولید متان در سال ۱۴۲۱ و به عبارت دیگر یک سال پس از پایان پذیرش زباله در محل دفن زباله اتفاق می‌افتد و به میزان $6/128 \times 10^4$ مگاگرم خواهد بود. همچنین بعد از اتمام کار محل دفن زباله روند تولید گازها نزولی خواهد شد. تحلیل داده‌های نمودارهای شکل (۴) نشان می‌دهد که اتخاذ یک رویکرد مبتنی بر شرایط ویژه هر سایت می‌تواند در طراحی راهبردهای مؤثرتر برای کنترل انتشار متان بسیار حائز اهمیت باشد. این رویکرد نه تنها اجازه می‌دهد تا طرح‌های کنترلی دقیق‌تر و سفارشی‌سازی شده‌تر تدوین شوند، بلکه به مدیران مراکز دفن این امکان را می‌دهد که با دقت بیشتری بر روی کاهش انتشارات تمرکز کنند.

همچنین لازم به ذکر است، نتایج آزمون t نشان داد اختلاف سالانه بین دو سناریو به‌طور معنی‌دار با صفر متفاوت است. ($p < 0.01$) با وجود این اختلاف مقداری، ضریب همبستگی بالا ($R = 0.79$) نشان داد که روند زمانی دو سناریو مشابه است. خروجی تصاویر ماهواره‌ای نشان‌دهنده افزایش پیوسته غلظت متان در طی سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ بود. به طور مثال غلظت متان در سال ۲۰۱۹ بین ۱۸۴۰ تا ۱۹۴۰ ppb بود، که این میزان در سال ۲۰۲۳ به ۱۹۸۰ تا ۲۰۴۰ واحد ppb افزایش یافت. این افزایش غلظت هم‌راستا با نتایج مدل‌سازی با LANDGEM بود و بیانگر یک روند صعودی پایدار در انتشار گاز متان از مرکز دفن زباله آرادکوه است.

جدول ۶. نرخ انتشار گازهای مورد مطالعه از محل دفن زیاله آرادکوه با استفاده از مقادیر الف) پیش‌فرض و ب) نظری (منبع: یافته‌های تحقیق)

الف)

سال	کربن مونوکسید ($m^3/year$)	کربن دی‌اکسید ($m^3/year$)	متان ($m^3/year$)	پسماند تجمعی (Mg)	پسماند ورودی ($Mg/year$)
۱۴۰۰	۱۱۹۸۰	۴۲۷۷۰۰۰۰	۴۲۷۷۰۰۰۰	۶۵۳۹۰۰۰۰	۲۴۹۰۰۰۰
۱۴۰۱	۱۲۳۵۰	۴۴۱۱۰۰۰۰	۴۴۱۱۰۰۰۰	۶۷۸۸۰۰۰۰	۲۶۶۰۰۰۰
۱۴۰۲	۱۲۷۶۰	۴۵۵۷۰۰۰۰	۴۵۵۷۰۰۰۰	۷۰۵۴۰۰۰۰	۲۷۴۰۰۰۰
۱۴۰۳	۱۳۱۸۰	۴۷۰۷۰۰۰۰	۴۷۰۷۰۰۰۰	۷۳۲۸۰۰۰۰	۲۸۵۰۰۰۰
۱۴۰۴	۱۳۷۵۰	۴۹۱۱۰۰۰۰	۴۹۱۱۰۰۰۰	۷۶۷۳۰۰۰۰	۳۰۵۰۰۰۰
۱۴۰۵	۱۴۳۴۰	۵۱۲۲۰۰۰۰	۵۱۲۲۰۰۰۰	۸۰۲۹۰۰۰۰	۳۲۶۰۰۰۰
۱۴۰۶	۱۴۹۴۰	۵۳۳۷۰۰۰۰	۵۳۳۷۰۰۰۰	۸۳۹۵۰۰۰۰	۳۴۶۰۰۰۰
۱۴۰۷	۱۵۵۶۰	۵۵۵۷۰۰۰۰	۵۵۵۷۰۰۰۰	۸۷۷۱۰۰۰۰	۳۶۷۰۰۰۰
۱۴۰۸	۱۶۱۹۰	۵۷۸۳۰۰۰۰	۵۷۸۳۰۰۰۰	۹۱۵۸۰۰۰۰	۳۸۷۰۰۰۰
۱۴۰۹	۱۶۸۴۰	۶۰۱۳۰۰۰۰	۶۰۱۳۰۰۰۰	۹۵۵۵۰۰۰۰	۴۰۸۰۰۰۰
۱۴۱۰	۱۷۴۹۰	۶۲۴۸۰۰۰۰	۶۲۴۸۰۰۰۰	۹۹۶۳۰۰۰۰	۴۲۸۰۰۰۰
۱۴۱۱	۱۸۱۷۰	۶۴۸۸۰۰۰۰	۶۴۸۸۰۰۰۰	۱۰۳۸۱۰۰۰۰	۴۴۹۰۰۰۰
۱۴۱۲	۱۸۸۵۰	۶۷۳۲۰۰۰۰	۶۷۳۲۰۰۰۰	۱۰۸۱۰۰۰۰۰	۴۷۰۰۰۰۰
۱۴۱۳	۱۹۵۵۰	۶۹۸۲۰۰۰۰	۶۹۸۲۰۰۰۰	۱۱۲۵۰۰۰۰۰	۴۹۱۰۰۰۰
۱۴۱۴	۲۰۲۶۰	۷۲۳۷۰۰۰۰	۷۲۳۷۰۰۰۰	۱۱۷۰۱۰۰۰۰	۵۱۱۰۰۰۰
۱۴۱۵	۲۰۹۹۰	۷۴۹۶۰۰۰۰	۷۴۹۶۰۰۰۰	۱۲۱۶۲۰۰۰۰	۵۳۲۰۰۰۰
۱۴۱۶	۲۱۷۳۰	۷۷۵۹۰۰۰۰	۷۷۵۹۰۰۰۰	۱۲۶۳۴۰۰۰۰	۵۵۳۰۰۰۰
۱۴۱۷	۲۲۴۹۰	۸۰۳۴۰۰۰۰	۸۰۳۴۰۰۰۰	۱۳۱۲۵۰۰۰۰	۵۷۴۰۰۰۰
۱۴۱۸	۲۳۲۸۰	۸۳۱۴۰۰۰۰	۸۳۱۴۰۰۰۰	۱۳۶۲۸۰۰۰۰	۵۹۵۰۰۰۰
۱۴۱۹	۲۴۰۸۰	۸۵۹۹۰۰۰۰	۸۵۹۹۰۰۰۰	۱۴۱۴۲۰۰۰۰	۶۱۶۰۰۰۰
۱۴۲۰	۲۴۸۹۰	۸۸۸۸۰۰۰۰	۸۸۸۸۰۰۰۰	۱۴۶۶۸۰۰۰۰	۶۳۷۰۰۰۰
۱۴۲۱	۲۵۷۲۰	۹۱۸۵۰۰۰۰	۹۱۸۵۰۰۰۰	۱۵۲۰۸۰۰۰۰	۰
۱۴۲۲	۲۵۳۱۰	۹۰۳۹۰۰۰۰	۹۰۳۹۰۰۰۰	۱۵۲۰۸۰۰۰۰	۰

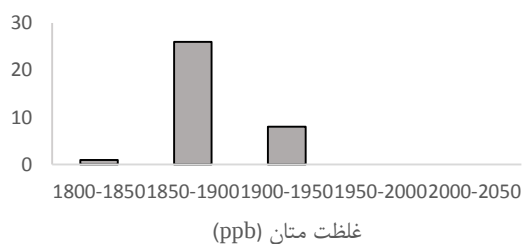
ب)

سال	کربن مونوکسید ($m^3/year$)	کربن دی‌اکسید ($m^3/year$)	متان ($m^3/year$)	پسماند تجمعی (Mg)	پسماند ورودی ($Mg/year$)
۱۴۰۰	۴۷۳۴۰	۱۶۹۱۰۰۰۰۰	۱۶۹۱۰۰۰۰۰	۶۵۳۹۰۰۰۰	۲۴۹۰۰۰۰
۱۴۰۱	۴۸۷۵۰	۱۷۴۱۰۰۰۰۰	۱۷۴۱۰۰۰۰۰	۶۷۸۸۰۰۰۰	۲۶۶۰۰۰۰
۱۴۰۲	۵۰۲۹۰	۱۷۹۶۰۰۰۰۰	۱۷۹۶۰۰۰۰۰	۷۰۵۴۰۰۰۰	۲۷۴۰۰۰۰
۱۴۰۳	۵۱۸۸۰	۱۸۵۳۰۰۰۰۰	۱۸۵۳۰۰۰۰۰	۷۳۲۸۰۰۰۰	۲۸۵۰۰۰۰
۱۴۰۴	۵۴۱۱۰	۱۹۳۲۰۰۰۰۰	۱۹۳۲۰۰۰۰۰	۷۶۷۳۰۰۰۰	۳۰۵۰۰۰۰
۱۴۰۵	۵۶۴۰۰	۲۰۱۴۰۰۰۰۰	۲۰۱۴۰۰۰۰۰	۸۰۲۹۰۰۰۰	۳۲۶۰۰۰۰
۱۴۰۶	۵۸۷۳۰	۲۰۹۸۰۰۰۰۰	۲۰۹۸۰۰۰۰۰	۸۳۹۵۰۰۰۰	۳۴۶۰۰۰۰
۱۴۰۷	۶۱۱۲۰	۲۱۸۳۰۰۰۰۰	۲۱۸۳۰۰۰۰۰	۸۷۷۱۰۰۰۰	۳۶۷۰۰۰۰
۱۴۰۸	۶۳۵۶۰	۲۲۷۰۰۰۰۰۰	۲۲۷۰۰۰۰۰۰	۹۱۵۸۰۰۰۰	۳۸۷۰۰۰۰
۱۴۰۹	۶۶۰۵۰	۲۳۵۹۰۰۰۰۰	۲۳۵۹۰۰۰۰۰	۹۵۵۵۰۰۰۰	۴۰۸۰۰۰۰
۱۴۱۰	۶۸۵۹۰	۲۴۵۰۰۰۰۰۰	۲۴۵۰۰۰۰۰۰	۹۹۶۳۰۰۰۰	۴۲۸۰۰۰۰
۱۴۱۱	۷۱۱۷۰	۲۵۴۲۰۰۰۰۰	۲۵۴۲۰۰۰۰۰	۱۰۳۸۱۰۰۰۰	۴۴۹۰۰۰۰
۱۴۱۲	۷۳۸۱۰	۲۶۳۶۰۰۰۰۰	۲۶۳۶۰۰۰۰۰	۱۰۸۱۰۰۰۰۰	۴۷۰۰۰۰۰

ادامه (ب)

سال	کربن مونوکسید ($m^3/year$)	کربن دی‌اکسید ($m^3/year$)	متان ($m^3/year$)	پسماند تجمعی (Mg)	پسماند ورودی ($Mg/year$)
۱۴۱۳	۷۶۵۰۰	۲۷۳۲۰۰۰۰	۲۷۳۲۰۰۰۰	۱۱۲۵۰۰۰۰	۴۵۱۰۰۰
۱۴۱۴	۷۹۲۴۰	۲۸۳۰۰۰۰۰	۲۸۳۰۰۰۰۰	۱۱۷۰۱۰۰۰	۴۶۱۰۰۰
۱۴۱۵	۸۲۰۲۰	۲۹۲۹۰۰۰۰	۲۹۲۹۰۰۰۰	۱۲۱۶۲۰۰۰	۴۷۲۰۰۰
۱۴۱۶	۸۴۸۵۰	۳۰۳۰۰۰۰۰	۳۰۳۰۰۰۰۰	۱۲۶۳۴۰۰۰	۴۹۱۰۰۰
۱۴۱۷	۸۷۸۰۰	۳۱۳۶۰۰۰۰	۳۱۳۶۰۰۰۰	۱۳۱۲۵۰۰۰	۵۰۳۰۰۰
۱۴۱۸	۹۰۸۱۰	۳۲۴۳۰۰۰۰	۳۲۴۳۰۰۰۰	۱۳۶۲۸۰۰۰	۵۱۴۰۰۰
۱۴۱۹	۹۳۸۶۰	۳۳۵۲۰۰۰۰	۳۳۵۲۰۰۰۰	۱۴۱۴۲۰۰۰	۵۲۶۰۰۰
۱۴۲۰	۹۶۹۷۰	۳۴۶۳۰۰۰۰	۳۴۶۳۰۰۰۰	۱۴۶۶۸۰۰۰	۵۴۰۰۰۰
۱۴۲۱	۱۰۰۱۰۰	۳۵۷۶۰۰۰۰	۳۵۷۶۰۰۰۰	۱۵۲۰۸۰۰۰	.
۱۴۲۲	۹۸۱۶۰	۳۵۰۶۰۰۰۰	۳۵۰۶۰۰۰۰	۱۵۲۰۸۰۰۰	.

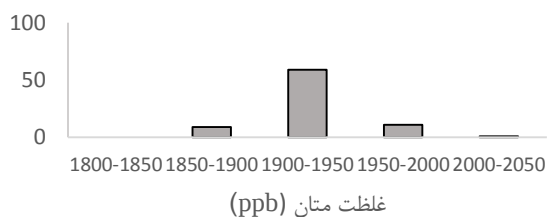
توزیع غلظت متان سال ۲۰۱۹



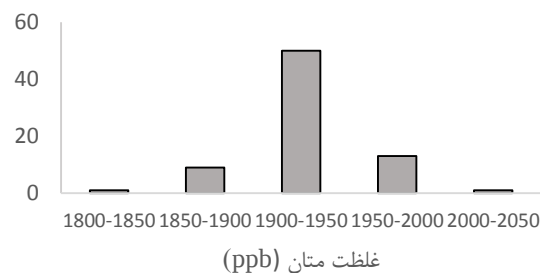
توزیع غلظت متان سال ۲۰۲۰



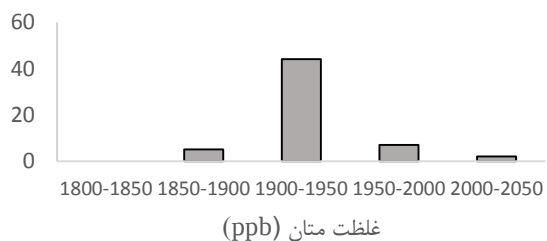
توزیع غلظت متان سال ۲۰۲۱



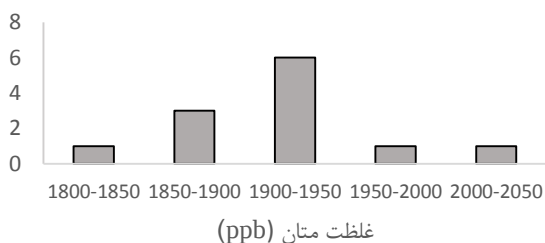
توزیع غلظت متان سال ۲۰۲۲



توزیع غلظت متان سال ۲۰۲۳



توزیع غلظت متان سال ۲۰۲۴



شکل ۵. نمودار توزیع مقادیر غلظت متان سال های ۲۰۱۹-۲۰۲۴ (منبع: یافته‌های تحقیق)

۵. بحث

از نظر ورودی‌های مورد نیاز، مدل IPCC انعطاف‌پذیری بیشتری در خصوص ترکیبات مختلف پسماند (مانند مواد فاسدشدنی، کاغذ و پلاستیک) دارد، در حالی که LANDGEM بیشتر بر مشخصات فیزیکی و عملیاتی محل دفن زباله متمرکز است. از این‌رو، IPCC برای شرایطی که ترکیب زباله متغیر است، مناسب‌تر به نظر می‌رسد. از جنبه کاربری، LANDGEM به دلیل محیط ساده‌تر و کاربرپسند، برای استفاده راحت‌تر است، اگرچه محاسبات ریاضی پیچیده‌تری دارد. در مقابل، مدل IPCC به دلیل فرمول‌ها و صفحات متعدد، پیچیدگی بیشتری در استفاده دارد. هر دو مدل تا حدی تفاوت‌های آب‌وهوایی را در نظر می‌گیرند، اما IPCC تنوع اقلیمی بیشتری را پوشش می‌دهد. با این وجود، مقادیر پیش‌فرض این مدل‌ها عموماً بر اساس شرایط خاص تعریف شده‌اند و ممکن است در مناطق دیگر دقت کمتری داشته باشند. در نهایت، باید توجه داشت که بیشتر مدل‌های برآورد انتشار متان، بر اساس فرضیات تجربی طراحی شده‌اند و نمی‌توان ادعا کرد که یک مدل تحت تمام شرایط نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. دقت خروجی این مدل‌ها به شدت تحت تأثیر شرایط محلی و نحوه اجرای مدل است.

یافته‌های این پژوهش نشان داد که مرکز دفن زباله آرادکوه منبع قابل‌توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه متان است. تحلیل نتایج مدل‌سازی با نرم‌افزار LANDGEM بیانگر آن بود که روند تولید گاز، مشابه الگوی نظری تجزیه بی‌هوازی پسماندها، در سال‌های اولیه دفن افزایش یافته و سپس به‌تدریج کاهش می‌یابد. این الگو با مطالعات مشابه در سایر محل دفن زباله‌های جهان همخوانی دارد، با این تفاوت که شدت و دامنه تغییرات در آرادکوه به دلیل ترکیب خاص پسماندهای شهری تهران (با سهم بالای مواد آلی قابل‌تجزیه) بالاتر از میانگین جهانی گزارش شده است.

مقایسه دو سناریوی مدل‌سازی نشان داد که انتخاب داده‌های ورودی نقش تعیین‌کننده‌ای در برآورد میزان انتشار دارد. اختلاف چشمگیر بین دو سناریو (۳۵۶/۶ میلیون مترمکعب در برابر ۹۲ میلیون مترمکعب متان در سال ۱۴۲۱) بیانگر حساسیت بالای مدل LANDGEM به این پارامترهاست. بنابراین، اتکا به مقادیر پیش‌فرض می‌تواند منجر به برآوردهای غیرواقعی شود و استفاده از داده‌های بومی برای افزایش دقت مدل‌سازی ضروری است. انجام مقایسه آماری، علاوه بر تحلیل توصیفی، نشان داد که استفاده از پارامترهای بومی می‌تواند تخمین‌های متفاوت و معناداری نسبت به مقادیر پیش‌فرض ارائه دهد، هر چند الگوی زمانی کلی همسو باقی می‌ماند.

از منظر محیط‌زیستی، نتایج نشان می‌دهد که محل دفن زباله‌ها نه تنها منبع مهمی از انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند، بلکه در صورت نبود مدیریت صحیح می‌توانند به تشدید تغییرات آب‌وهوایی منجر شوند. با این حال، همین حجم بالای متان در صورت جمع‌آوری و بهره‌برداری از زیست‌توده، می‌تواند به فرصتی برای تولید انرژی تجدیدپذیر تبدیل گردد.

در این مطالعه، مقادیر L_0 و k بر اساس دو رویکرد انتخاب شدند: نخست، مقادیر پیش‌فرض ارائه شده توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا و دوم، مقادیر برآوردشده متناسب با ترکیب واقعی پسماندهای ورودی آرادکوه. هر چند تحلیل حساسیت کمی به‌طور سیستماتیک انجام نشد، اختلاف نتایج دو سناریو به‌روشنی نشان‌دهنده اهمیت این پارامترها در دقت پیش‌بینی است. از این‌رو، انجام آزمایش‌های میدانی برای تعیین مقادیر دقیق‌تر و اجرای تحلیل حساسیت در پژوهش‌های آینده ضروری به نظر می‌رسد.

براساس برآوردهای این مطالعه، اوج تولید متان سالانه در آرادکوه حدود $10^8 \times 3/57$ مترمکعب برآورد شد. با فرض جمع‌آوری محافظه‌کارانه ۷۵ درصد و تبدیل به برق با راندمان ۳۵ درصد و دسترس‌پذیری ۹۰ درصد، مقدار متان جمع‌آوری شده می‌تواند حدود ۸۳۸ گیگاوات ساعت برق در سال تولید کند که معادل حدود ۹۶ مگاوات توان میانگین پیوسته یا تأمین برق تقریباً ۲۸۰ هزار خانوار است. همچنین در صورت استفاده جهت گرمایش مستقیم این حجم می‌تواند تقریباً ۲/۲۶۰ گیگاوات ساعت انرژی گرمایی فراهم سازد. این برآورد نشان می‌دهد که حتی در سناریوهای محافظه‌کارانه، متان دفن‌گاه می‌تواند نقش عملی و معناداری در تأمین بخشی از نیازهای محلی ایفا کند؛ با این حال تعیین سهم اقتصادی - سازمانی واقعی نیازمند مطالعات امکان‌سنجی فنی - اقتصادی و تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی است.

یافته‌های این پژوهش نشان دادند که اگرچه اختلاف میان دو سناریو از نظر عددی اندک است، اما این اختلاف از نظر آماری معنادار بوده و می‌تواند بر برآورد انرژی بازیافتی، طراحی سیستم جمع‌آوری و زمان‌بندی سرمایه‌گذاری تأثیر بگذارد. به‌طور مثال، اختلاف موجود در سال

اوج بین دو سناریو می‌تواند منجر به تفاوت قابل توجهی در توان تولید برق سالانه شود. این تفاوت‌ها اهمیت اعتبارسنجی پارامترها بر اساس داده‌های محلی را برجسته می‌سازد.

۶. نتیجه‌گیری

بازایی و مدیریت گازهای خروجی از مراکز دفن زباله، مستلزم برآورد دقیق و قابل اعتماد از میزان تولید این گازها است. برای دستیابی به این هدف، مدل‌های مختلفی توسعه یافته‌اند که از میان آن‌ها، مدل‌های IPCC و LANDGEM به عنوان پرکاربردترین و معتبرترین ابزارها در مطالعات مربوط به برآورد انتشار متان شناخته می‌شوند. هر دو مدل قابلیت محاسبه انتشار گازهایی نظیر متان، ترکیبات آلی غیرمتانی، دی‌اکسید کربن و سایر گازهای خروجی از مراکز دفن پسماند را دارند و به صورت رایگان از طریق تارنماهای رسمی در دسترس هستند. با این حال، استفاده از هر دو مدل نیازمند آشنایی اولیه با مفاهیم مدلسازی و فرآیندهای تولید گاز در محل دفن زباله است.

استفاده گسترده از مراکز دفن برای دفع پسماند جامد شهری، علی‌رغم سادگی و هزینه نسبتاً پایین، چالش‌های زیست‌محیطی گسترده‌ای ایجاد می‌کند. این پژوهش با هدف برآورد و مدل‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای از مرکز دفن زباله آرادکوه با استفاده از LANDGEM انجام شد. نتایج نشان داد که در سناریوی مبتنی بر مقادیر پیش‌فرض، تولید متان تا سال ۱۴۲۱ به حدود ۳۵۶/۶ میلیون مترمکعب می‌رسد، در حالی که در سناریوی مبتنی بر داده‌های محلی و واقعی‌تر، این مقدار به حدود ۹۲ میلیون مترمکعب محدود می‌شود. این اختلاف بزرگ نشان می‌دهد که انتخاب پارامترهای دقیق و بومی برای مدل‌سازی انتشار گازهای محل دفن زباله امری حیاتی است و می‌تواند منجر به پیش‌بینی‌های معتبرتر شود.

به طور کلی، نتایج این تحقیق سه پیام کلیدی دارد. اولاً، مرکز دفن آرادکوه یک منبع عمده انتشار متان بوده و بدون مدیریت مناسب می‌تواند آثار جدی بر تغییرات اقلیمی و سلامت انسان داشته باشد. دیگر آن که جمع‌آوری و استفاده از زیست توده می‌تواند نه تنها از انتشار متان جلوگیری کند، بلکه به عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر ارزش اقتصادی ایجاد نماید. در نهایت، لازم است مدیریت پسماند در ایران به سمت کاهش وابستگی به دفن و توسعه راهکارهای جایگزین نظیر بازیافت و کمپوست‌سازی حرکت کند.

همچنین لازم به ذکر است، در سناریوی پیش‌فرض برای آرادکوه، مقدار اوج تولید سالانه حدود ۳۵۶/۶ میلیون مترمکعب و در سناریوی پارامترهای محلی حدود ۹۲ میلیون مترمکعب برآورد شد؛ دامنه‌ای که از بسیاری از سایت‌های کوچک‌تر داخلی و بخشی از مطالعات بین‌المللی بزرگ‌تر است و با ترکیب پسماند تهران (سهام بالای جزء فسادپذیر) قابل توجیه می‌باشد.

نتایج این مطالعه به‌طور مستقیم اهداف تحقیق را پوشش می‌دهد که شامل شناسایی و تحلیل ترکیب گازهای تولیدی در راستای دستیابی به هدف اول تحقیق، مدلسازی فرآیند تشکیل و اوج تولید گاز در سال ۱۴۲۱ (هدف دوم)، مقایسه روش‌های تخمین با دو دسته پارامتر (هدف سوم)، و در نهایت خروجی‌های مدل LANDGEM به‌صورت کمی برای محل دفن آرادکوه ارائه گردید (هدف چهارم).

۷. پیشنهادها

با توجه به نتایج این پژوهش و به‌منظور ارتقای دقت مدل‌سازی و بهبود مدیریت انتشار گازهای گلخانه‌ای از مراکز دفن زباله، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده از مدل‌های اصلاح شده و یا مدل‌های مرتبه دوم که قابلیت انطباق بیشتری با ویژگی‌های محلی دارند استفاده شود. همچنین انجام مطالعات میدانی و اندازه‌گیری‌های مستقیم انتشار گاز می‌تواند به کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌ها کمک شایانی نماید. از سوی دیگر، تحلیل سناریوهای مختلف مدیریت پسماند، مانند افزایش سهم بازیافت و تولید کمپوست، می‌تواند درک بهتری از اثرات سیاست‌های انحراف پسماند بر کاهش تولید گاز فراهم آورد. بر اساس مقادیر اوج متان به‌دست آمده، توصیه می‌شود آزمایش‌های پایلوت برای استفاده از ژئوممبران‌ها و پوشش‌های بهبود یافته جهت کاهش انتشار گاز و شیرابه انجام گیرد. همچنین استفاده از جاذب‌ها و نانومواد تنها به‌عنوان گزینه‌های پژوهشی و پایلوت مطرح می‌شود و قبل از اجرای گسترده نیازمند ارزیابی اقتصادی و فنی است. چنین اقداماتی علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، می‌تواند ارزش اقتصادی قابل توجهی ایجاد کرده و در راستای مدیریت پایدار پسماند شهری نقش آفرین باشد. این پژوهش به‌طور خاص بر برآورد و تحلیل انتشار آلاینده‌ها از محل دفن پسماند تمرکز داشته و ارزیابی اقتصادی

جمع‌آوری و استفاده از گاز متان در چارچوب اهداف مطالعه قرار نداشته است. با این وجود، انجام تحلیل‌های اقتصادی و بررسی امکان‌سنجی فنی - اقتصادی بازیافت انرژی از گاز دفنی در سایت آرادکوه، می‌تواند در مطالعات آینده به‌عنوان یک گام تکمیلی و کاربردی مورد توجه قرار گیرد.

ضمناً بر اساس یافته‌های این پژوهش، مجموعه‌ای از پیشنهادات عملیاتی و پژوهشی به شرح زیر ارائه می‌شود:

- طراحی و هدف‌گذاری سیستم: با استناد به نتایج مدل‌سازی، دبی اوج متان در سناریوی مبتنی بر داده‌های محلی و پیش‌فرض برآورد شد. این مقادیر باید مبنای طراحی یک سیستم جمع‌آوری مازولار و کارآمد قرار گیرد که قادر به مهار حداقل ۷۵ درصد از گاز تولیدی باشد.
- اجرای پروژه آزمایشی: پیش از اجرای گسترده، انجام یک مطالعه آزمایشی به مدت یک تا دو سال در مقیاس سلول ضروری است. این پروژه امکان سنجش دقیق راندمان واقعی سیستم‌های پوشش و جمع‌آوری، اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای کلیدی مدل و اعتبارسنجی نهایی برآوردهای انجام شده را فراهم می‌آورد.
- بازیافت انرژی و توجیه اقتصادی: با فرض تحقق راندمان جمع‌آوری هدف، پتانسیل تولید انرژی برق از گاز محل دفن زباله آرادکوه بین ۲۵ تا ۹۶ مگاوات برآورد می‌شود. انجام یک مطالعه امکان‌سنجی فنی - اقتصادی دقیق برای تعیین سودآوری سرمایه‌گذاری در سیستم‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت گام بعدی است.
- پایش و کنترل: استقرار یک سامانه پایش مداوم برای نظارت بر کمیت و کیفیت گاز جمع‌آوری‌شده و همچنین پایش گستره انتشار با استفاده از روش‌های سنجش از دور برای اطمینان از عملکرد بهینه سیستم و اثربخشی اقدامات کنترلی پیشنهاد می‌شود.
- همچنین پیشنهاد این پژوهش برای تحقیقات آتی شامل بررسی نانوجاذب‌ها و فناوری‌های نوین در سطح پایلوت و تعریف شاخص‌های کلیدی عملکرد (راندمان جذب، عمر مفید) برای ارزیابی امکان توسعه صنعتی می‌باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

مهدی رحیمی: جمع‌آوری داده‌ها، انجام محاسبات، مدل‌سازی در نرم افزار، تحلیل و تفسیر اطلاعات؛ محمدامین جوادی: مطالعه و تهیه پیش‌نویس و ویرایش مقاله؛ مریم زارع شحنة: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی و نظارت بر مراحل پژوهش.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر هیچ کمک مالی خاصی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرد.

منابع

ابوالحسنی، محمد هادی و رضایی، احسان. (۱۳۹۷). ارزیابی میزان تولید گازهای زیست محیطی در محل دفن زباله جهت استحصال

- انرژی (مطالعه موردی محل دفن زباله شماره ۱ شاهین شهر). مجله پژوهش در بهداشت محیط. ۴(۳)، ۲۰۳-۲۱۴. doi: 10.22038/jreh.2018.32776.1227
- سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران، ۱۴۰۲.
- علی‌زاد اقیانوس، فرید، و شکرکار، هانیه. (۱۳۹۹). بررسی مقایسه‌ای و مدل‌سازی میزان تولید گازهای آلاینده از محل دفن پسماندهای شهرهای واقع در مناطق گوناگون ایران با استفاده از نرم‌افزار لندجم، نشریه شیمی و مهندسی شیمی/ایران. 39(2), pp. 291-304.
- ذوقی، محمدجواد، و دوستی، محمدرضا. (۱۳۹۷). رویکردی در طراحی محل دفن بهداشتی جهت تصفیه و استفاده از گازهای ناشی از تجزیه در شبکه گاز شهری. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۰(۳) (مسلسل ۷۸)، ۱۱۷-۱۲۶. SID. <https://sid.ir/paper/87613/fa>

References

- Amiri, Z., & Zare Shahne, M. (2025). Modeling PM_{2.5} concentration in tehran using satellite-based Aerosol optical depth (AOD) and machine learning: Assessing input contributions and prediction accuracy. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 38, 101549. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2025.101549>
- Alizad Oghyanous, F. and Shokrkhar, H. (2020). Comparative Study and Simulation of Pollutant Emissions from Landfills of different Cities in Various Regions of Iran by Using LandGEM Software. *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran*, 39(2), 291-304. [In Persian]
- Arhami, M., Hosseini, V., Zare Shahne, M., Bigdeli, M., Lai, A., & Schauer, J. J. (2017). Seasonal trends, chemical speciation and source apportionment of fine PM in Tehran. *Atmospheric Environment*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.046>
- Arhami, M., Shahne, M. Z., Hosseini, V., Roufigar Haghighat, N., Lai, A. M., & Schauer, J. J. (2018). Seasonal trends in the composition and sources of PM_{2.5} and carbonaceous aerosol in Tehran, Iran. *Environmental Pollution*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.111>
- Baldwin, T. D., Stinson, J., & Ham, R. K. (1998). Decomposition of Specific Materials Buried within Sanitary Landfills. *Journal of Environmental Engineering*, 124(12). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(1998\)124:12\(1193](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1998)124:12(1193)
- Boyaghchi, F. A., Khanpour, N., & Ashrafi, M. (2013). Emission rate assessment in landfill and energy generation technologies (Case Study: Aradkooh landfill). *Journal of Environmental Studies*, 39(3).
- Bourbour, S., Zare Shahne, M., & Safarkhanloo, H. (2025). Non-Gaussian Misalignment Regression Model Development Based on On-Site and Satellite Meteorological and Air Pollutant Data in Tehran, Iran. *International Journal of Environmental Research*, 19(4), 1–22. <https://doi.org/10.1007/S41742-025-00797-5/METRICS>
- Datatab. (2024). *Wilcoxon test tutorial*. Datatab. <https://datatab.net/tutorial/wilcoxon-test>
- USEPA. (2004). <https://www.epa.gov/land-research/landfill-gas-emissions-model-landgem>
- Das, D., Majhi, B. K., Pal, S., & Jash, T. (2016). Estimation of Land-fill Gas Generation from Municipal Solid Waste in Indian Cities. *Energy Procedia*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.169>
- Ghasemzade, R., & Pazoki, M. (2017). Estimation and modeling of gas emissions in municipal landfill (Case study: Landfill of Jiroft City). *Pollution*, 3(4).
- Google Earth Engine. (2024). Sentinel. Google Developers. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel>
- Hssanabadi, M., Hassanvand, M. S., Khanizadeh, M., Faridi, S., Mokammel, A., Malekian Esfahani, B., Ahmadi Orkomi, A., & Momeniha, F. (2024). Investigating methods of estimating and measuring methane emissions in municipal solid waste landfills: a systematic review. *Iranian Journal of Health and Environment*, 17(3), 595–630. <http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6930-en.html>
- IPCC. (2020). IPCC-2021. In *The Complete Guide to Climate Change*.
- Iran Meteorological Organization. (2022). Homepage. IRIMO. <https://irimo.ir>
- Javadi, M.A., Shahne, M.Z. & Amiri, Z. (2025) Integration of Sentinel-5P Satellite Data and Machine Learning for Spatiotemporal Prediction of NO₂ in Delhi: Impacts of COVID-19 Lockdown. *Atmospheric Pollution Research*. 102702. doi:10.1016/J.APR.2025.102702.
- Kafi, A. M., Hosseinipoor, M., Zare Shahne, M., Jamaat, A., Kafi, A. M., Hosseinipoor, M., Zare Shahne, M., & Jamaat, A. (2024). Integrating Sentinel-5P Satellite Data and Machine Learning Algorithms for Air Quality Index Prediction in Tehran: A Comprehensive Study on Factors Influencing Air Quality. *EGUGA*, 4506. <https://doi.org/10.5194/EGUSPHERE-EGU24-4506>
- Kamalan, H., Sabour, M., & Shariatmadari, N. (2011). A review on available landfill gas models. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4(2). <https://doi.org/10.3923/jest.2011.79.92>
- Kamali, N., Zare Shahne, M., & Arhami, M. (2015). Implementing Spectral Decomposition of Time Series Data in Artificial Neural Networks to Predict Air Pollutant Concentrations. *Https://Home.Liebertpub.Com/Ees*, 32(5), 379–388. <https://doi.org/10.1089/EES.2014.0350>
- Management of Low Levels of Landfill Gas | Environmental Protection Agency. (2013). Retrieved 19 September 2025, from <https://www.epa.ie/publications/compliance--enforcement/waste/management-of-low-levels-of-landfill-gas.php>
- Mann, J. H. (2001). Chapter 2: Landfill Gas Basics. *Landfill Gas Primer, An Overview for Environmental Health Professionals*.
- Mokhtari, M., Ebrahimi, A., & Rezaeinia, S. (2020). 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*, 5(4), 1155–1161. <https://doi.org/10.18502/JEHSD.V5I4.4964>
- Rahman, M. M. (2024). The Potential of Biomethane produced from Waste Landfill to Supplement Renewable Energy in Saudi Arabia. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(6), 18264–18270. <https://doi.org/10.48084/ETASR.8985>

- Rezaee E, Abolhasani MH. (2018). Evaluation of landfill gas generation for exploitation energy (case study: landfill of shahinshahr). *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Fall 2018; 4 (3): 204-214. doi: 10.22038/jreh.2018.32776.1227 [In Persian]
- Rodrigue, K. A., Essi, K., Cyril, K. M., & Albert, T. (2018). Estimation of Methane Emission from Kossihouen Sanitary Landfill and Its Electricity Generation Potential (Cô te d'Ivoire). *Journal of Power and Energy Engineering*, 06(07). <https://doi.org/10.4236/jpee.2018.67002>
- Rupani, P. F., Delarestaghi, R. M., Abbaspour, M., Rupani, M. M., EL-Mesery, H. S., & Shao, W. (2019). Current status and future perspectives of solid waste management in Iran: a critical overview of Iranian metropolitan cities. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 26, Issue 32). <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06456-5>
- Shahne, M. Z., Arhami, M., Hosseini, V., & Al Haddad, E. (2022). Particulate emissions of real-world light-duty gasoline vehicle fleet in Iran. *Environmental Pollution*, 292, 118303. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.118303>
- Shahne, M. Z., & Arhami, M. (2023). Toxicity of PM2.5 sources based on their chemical profile using source apportionment results in Tehran, Iran. *Journal of Environmental Studies*, 49(1), 1–16. <https://doi.org/10.22059/JES.2023.339901.1008294>
- Talaiekhazani, A., & Nasiri, A. (2022). The Modeling of Carbon Dioxide, Methane and Non-Methane Organic Gases Emission Rates in Solid Waste Landfill in City of Jahrom, Iran. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3968310>
- Thompson, S., Sawyer, J., Bonam, R., & Valdivia, J. E. (2009). Building a better methane generation model: Validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills. *Waste Management*, 29(7). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.02.004>
- Waste Management Organization of Tehran Municipality. 2023. [In Persian]
- Zare Shahne, M., Noori, A., & Alizade Attar, M. (2024). Air Pollution Variation During COVID-19 Pandemic Using Satellite and On-site Measurement Data in Six Provinces in Iran. *Numerical Methods in Civil Engineering*, 9(2), 86–97. <https://doi.org/10.61186/NMCE.2407.1067>
- Zare Shahne, M., & Arhami, M. (2016). STUDY OF TEMPORAL COMPONENTS OF CARBON MONOXIDE CONCENTRATION AND METEOROLOGICAL VARIABLES IN TEHRAN. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 32.2(1.1), 35–41. https://sjce.journals.sharif.edu/article_984_en.html
- Zoqi, M. J., & Doosti, M. R. (2018). An approach towards designing a new sanitary landfill system for treatment of emissions from decomposition in urban gas network. *Journal of Environmental Science and Technology*. [In Persian]