Iranian Journal of Biosystem Engineering ISNN: 2423-7841
Homepage: http://ijbse.ut.ac.ir

An Investigation into Integrating Sustainable Municipal Solid Waste Management and Energy Recovery: A Case Study of Tehran

Elnaz Maleki-Ghelichi[1] | Asadollah Akram [2]✉ | Mohammad Sharifi [3]

1. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: e.maleki@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: aakram@ut.ac.ir
3. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: m.sharifi@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Aug. 18, 2024

Revised: Jan. 11, 2025

Accepted: Jan. 19, 2025

Published online: Summer 2024

Keywords:
Aradkooh,
Incinerator,
Landfill,
LandGEM.

ABSTRACT

Tehran, one of the largest and most populous cities in Iran, grapples with significant solid waste management challenges. The increasing population and the huge amount of waste generation necessitate robust and efficient waste management systems. Recognizing that effective waste management planning hinges on understanding the types and quantities of waste produced, this research delves into a quantitative and qualitative analysis of Tehran's solid waste. It also assesses the current state of Tehran's waste management system. By employing the LandGEM software, the study quantifies the methane and other pollutant emissions from the Aradkuh landfill between 2012 and 2021. Moreover, two energy recovery scenarios (sanitary landfill and incineration) are modeled to estimate energy generation potential and pollutant emissions over a ten-year period. The findings reveal that organic and food waste constitutes a substantial portion of Tehran's waste stream. Despite their potential for recovery and energy generation, these materials are predominantly landfilled without energy recovery, leading to the release of over 6,000 tons of methane and other pollutants into the atmosphere. Conversely, the analysis indicates that implementing sanitary landfill and incineration technologies could generate 459 and 468 kiloWatt-hours of energy per ton of waste, respectively, while preventing the release of over 90% of the greenhouse gases currently emitted from landfills.

Cite this article: Maleki-Ghelichi, E., Akram, A., Sharifi, M., (2024) An Investigation into Integrating Sustainable Municipal Solid Waste Management and Energy Recovery: A Case Study of Tehran, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 55 (2), 41-55. https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.381051.665563

© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.381051.665563

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Tehran, Iran's capital and most populous city, faces significant challenges in waste management. The ever-increasing population and the resulting massive waste generation necessitate robust and efficient waste management systems. Effective waste management planning requires a thorough understanding of the quantity and quality of waste produced. The complex nature of waste management, including the selection of appropriate disposal options, makes it a challenging problem. The implementation of waste-to-energy technologies as a waste management strategy offers a promising avenue for energy recovery from waste. In addition to improving waste management systems, it can contribute to increasing access to renewable energy for the community.

Material and methods

This research conducted a statistical analysis of ten years' worth of waste generation data (2012-2021). The waste was subjected to physical and chemical characterization. The study also assessed the performance of Tehran's waste management system and quantified the gas emissions from the Aradkuh landfill using the LandGEM software. The study emphasizes the need for improved waste management practices, including the development and implementation of waste-to-energy (WtE) technologies to mitigate these issues. So, two scenarios for energy recovery from waste, sanitary landfill and incineration, were modeled to estimate the energy generation potential and pollutant emissions over a decade.

Results and discussion

Annual waste generation varied over the ten-year period. The cumulative waste deposited at the Aradkuh landfill from 2012 to 2021 exceeded 59,000 metric tons. The analysis revealed that a significant portion (approximately 65%) of Tehran's waste is organic. Despite the potential for energy recovery from waste, most is currently landfilled, leading to uncontrolled emissions and environmental degradation The LandGEM model estimated that the landfill emitted over 16 million cubic meters of gas during this period, including approximately 10 million cubic meters of methane. These emissions pose significant environmental and health risks. In the first scenario evaluating the development of a sanitary landfill as a biochemical conversion plant, 459 kWh of energy was recovered per ton of input waste, with a methane equivalent carbon dioxide emission of 0.28 tons. In the second scenario, evaluating the development of an incinerator as a thermal conversion plant, 468 kWh of energy was recovered per ton of input waste, with a carbon dioxide emission of 0.56 tons.

Conclusions

The high levels of pollutant emissions from the Aradkuh landfill underscore the importance of transitioning to more sustainable waste management practices. By adopting waste-to-energy technologies, we can divert waste from landfills, preventing the release of approximately 6000 tons of methane and generating over 27,000 megawatt-hours of clean energy over a ten-year period. This would not only mitigate climate change but also contribute to a more sustainable future.

Author Contributions

Conceptualization, M.Sh., E.M.Gh. and A.A.; methodology, E.M.Gh. and M.Sh.; software, E.M.Gh. and M.Sh.; validation, E.M.Gh., A.A. and M.Sh.; formal analysis, E.M.Gh. and M.Sh.; investigation, E.M.Gh., A.A. and M.Sh.; resources, E.M.Gh.; data curation, E.M.Gh. and M.Sh.; writing-original draft preparation, E.M.Gh. and M.Sh.; writing-review and editing, E.M.Gh., A.A. and M.Sh.; visualization, M.Sh., A.A.; supervision, M.Sh. and A.A.; project administration, M.Sh., E.M.Gh. and A.A.; funding acquisition, A.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

The original contributions presented in the study are included in the article, further inquiries can be directed to the corresponding author.

Acknowledgments

The authors would like to thank Iran Renewable Energy Organization (SATBA) and Engineer Behrouz Dashti for his invaluable support. Additionally, the authors express their gratitude to the Waste Management Organization of Tehran Municipality for providing access to the necessary data.

Ethical considerations

The study was approved by the Ethics Committee of the University of Tehran. authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

مجله مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۵۵، شماره ۲ شاپا: ۷۸۴۱-۲۴۲۳
Homepage: http://ijbse.ut.ac.ir

بررسی ادغام مدیریت پایدار پسماند جامد شهری با بازیابی انرژی: مطالعه موردی شهر تهران

الناز ملکی قلیچی[۱] | اسداله اکرم[۲]✉ | محمد شریفی[۳]

۱. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: e.maleki@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: aakram@ut.ac.ir (نویسنده مسئول)

۳. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: m.sharifi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۲۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰
تاریخ انتشار: تابستان ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:
آرادکوه،
زباله‌سوز،
لندفیل،
LandGEM.

چکیده

تهران، یکی از شهرهای بزرگ و پر جمعیت ایران، با مسائل بسیاری در زمینه مدیریت پسماند مواجه است. افزایش روزافزون جمعیت و تولید حجم عظیمی از پسماندها، ایجاب می‌کند که سامانه‌های قوی و کارآمد برای مدیریت صحیح پسماند آن به کار گرفته شود. با توجه به اینکه برنامه‌ریزی و تبیین راهبرد برای مدیریت بهینه پسماند، مستلزم شناخت نوع و میزان پسماند تولیدی است، در این پژوهش ضمن بررسی کمّی و کیفی پسماند جامد شهر تهران و وضعیت سامانه مدیریت پسماند شهر تهران، میزان انتشار گازهای تولید شده در محل دفن آرادکوه به ازای پسماند دفن شده در طی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ با استفاده از نرم افزار LandGEM محاسبه گردید. همچنین دو سناریو تولید انرژی از پسماند برای دو فناوری لندفیل بهداشتی و زباله‌سوزی تعریف شده و ظرفیت تولید انرژی و انتشار گازهای آلاینده برای این دو فناوری طی این دوره ۱۰ ساله برآورد گردید. نتایج نشان می‌دهد، بخش عمده پسماند شهر تهران را پسماند مواد غذایی و آلی تشکیل می‌دهد که علی‌رغم وجود پتانسیل بازیابی و تولید انرژی، جهت دفع به مراکز دفن (بدون بازیابی انرژی) منتقل می‌گردند؛ که حاصل این دفن انتشار بیش از ۶ هزار تن گاز متان و سایر آلاینده‌ها به جو بوده است. از سویی دیگر بر اساس برآوردهای صورت گرفته، با توسعه فناوری‌های لندفیل بهداشتی و زباله‌سوز به ازای هر تن پسماند به ترتیب، ۴۵۹ و ۴۶۸ کیلوات ساعت انرژی تولید شده و از انتشار بیش از ۹۰ درصد گازهای آلاینده در محل دفن فعلی جلوگیری می‌گردد.

استناد: ملکی قلیچی؛ الناز، اکرم؛ اسداله، شریفی؛ محمد، (۱۴۰۳) بررسی ادغام مدیریت پایدار پسماند جامد شهری با بازیابی انرژی: مطالعه موردی شهر تهران، *مجله مهندسی بیوسیستم ایران ایران*، ۵۵ (۲)، ۵۵-۴۱. https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.381051.665563

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.381051.665563

مقدمه

تمرکز جمعیت و در نتیجه شهرنشینی و افزایش سطح رفاه جامعه، برای هر جامعه‌ایی مشکلات و معضلات متعددی به همراه دارد که یکی از مهمترین آن‌ها، افزایش نرخ رشد تولید پسماند جامد شهری[1](MSW) می‌باشد که چالش بزرگی را برای مدیریت شهری و در نتیجه مدیریت پسماند جامد شهری[2](MSWM) ایجاد می‌کند (Karak et al., 2012) که در صورت ضعف مدیریت، تهدیدی جدی برای زیست بوم چه در سطح محلی، منطقه‌ایی و بعضاً جهانی، مانند آلودگی هوا، آب، خاک، زنجیره غذایی و حتی گرمایش جهانی در بر خواهد داشت (Wang & Nie, 2001; Zhao et al., 2011).

در شهر تهران، فقدان قانون به منظور همگرایی ذینفعان مختلف به منظور کاهش پسماند از مبدأ، کمبود میزان استحصال انرژی و مواد ارزشمند از چرخه مدیریت پسماند، انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، راندمان نامطلوب و هزینه‌های قابل توجه سامانه مدیریت پسماند به عنوان مهمترین آسیب‌های سامانه فعلی مدیریت پسماند مطرح شده است (مرکز مطالعات شهرداری تهران، ۱۴۰۰).

اقتصاد چرخه‌ای با هدف از بین بردن پسماند و استفاده مداوم از منابع به دنبال ایجاد یک سامانه برای به حداقل رساندن ورودی‌ها و کاهش بهره‌برداری از منابع، پسماند، آلودگی و انتشار کربن است. در دنیای پایداری که به دنبال تحقق اهداف مفهوم اقتصاد چرخه‌ای است، مدیریت پایدار پسماند الزامی است و بازیابی آخرین گامی است که باید برداشته شود، چرا که کاهش، استفاده مجدد یا بازیافت قبلاً انجام شده است (Lisbona et al., 2023).

با افزایش تولید زباله‌های شهری و صنعتی، نیاز به ابزارها و روش‌های جدید و بهینه برای کاهش پیامدهای منفی زیست محیطی و اقتصادی وجود دارد. سامانه ها و جوامع با چالش‌هایی اساسی همچون افزایش ریسک، عدم قطعیت و تغییرات پویا در شرایط اجتماعی، اقتصادی، سیاسی، فناورانه و محیطی مواجه هستند (Lari, 2021).

مدیریت پسماندهای تر (آلی) از دیدگاه زیست محیطی از اهمیت قابل توجهی برخوردار می‌باشد. این نوع پسماندها به علت ماهیت شیمیایی و ساختاری، به راحتی تجزیه شده و در صورت مدیریت غیراصولی از پتانسیل بالایی جهت تولید شیرابه و گازهای گلخانه ای خطرناکی همچون گاز متان برخوردار هستند. بکارگیری فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی[3] (WtE) به عنوان یکی از گزینه‌ها و روش‌های مدیریت پسماند می‌تواند راهی برای بازیابی انرژی از پسماند باشد و علاوه بر سامانه مدیریت پسماند، به دسترسی جامعه به انرژی‌های تجدیدپذیر کمک کند. در ایران، متأسفانه بدلیل عدم وجود یک دیدگاه استراتژیک و بلند مدت ملی و نبود یک بنیان علمی در تدوین الگوهای اجرایی و عدم شناخت عمیق فناوری‌های موجود در دنیا، توسعه چندانی در خصوص بهره‌گیری از فناوری‌های استحصال انرژی برای مدیریت پسماند کشور، صورت نگرفته است و از طرفی بسیاری از محل‌های دفن موجود پسماند در کشور که عمدتاً بدون پشتوانه علمی مکان‌یابی شده، علاوه بر ایجاد مشکلات متعدد زیست‌محیطی محلی و ملی و نبود نظارت جامع بر عملکرد آن‌ها، به حداکثر ظرفیت خود نزدیک شده و در کنار رشد روزافزون شهرهای تحت پوشش و متعاقب آن چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید حجم عظیم زباله‌ها، وضعیت کنونی مدیریت پسماند و محیط زیست ملی را بغرنج‌تر کرده است. در عرصه مدیریت پسماند شهر تهران، تاکنون تنها یک نیروگاه ریجکت‌سوز و یک نیروگاه هضم بی‌هوازی برای مدیریت پسماند شهری و تولید انرژی نصب و راه‌اندازی شده است.

ماهیت چند بُعدی مدیریت پسماند، انتخاب گزینه مناسب امحای پسماند و در سطحی بالاتر، انتخاب فناوری مناسب و بهینه جهت تبدیل پسماندهای جامد شهری به انرژی، مدیریت پسماند را به یک مشکل پیچیده تبدیل می‌کند. برآورد مقدار و ترکیب پسماند، اولین گام مطالعات در زمینه مدیریت پسماند می‌باشد. بر این اساس، در جوامع یا نواحی که اطلاعات دقیقی از کمیت و کیفیت پسماند تولیدی در دسترس است، می‌توان برنامه‌ریزی‌ها را با اطمینان و اعتماد بیشتری انجام داد.

عبدلی و همکاران در سال ۱۳۹۴ وضعیت سامانه مدیریت پسماند در شهر تهران در مناطق ۲۲ گانه، طی سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۲ را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تجزیه و تحلیل اطلاعات گردآوری شده در این مطالعه نشان می‌دهد، میزان سرانه تولید پسماند شهری در مناطق مختلف شهر تهران با حداکثر ظرفیت قابل قبول تولید پسماند فاصله دارد و تولید پسماند همه مناطق شهر تهران بیش از مقدار مجاز است.

---

1. Municipal Solid Waste
2. Municipal Solid Waste Management
3. Waste to Energy

حاتمی و همکاران در سال ۱۳۹۵ در پژوهشی به بررسی تفکیک و جداسازی پسماند در مناطق ۲۲ گانه شهر تهران با استفاده از سامانه اطلاعات مکانی پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که پسماند تر با ۷۴/۵۶ درصد، بیشترین سهم وزنی پسماندهای شهر تهران را به خود اختصاص داده است.

مطالعه (Fallahizadeh et al., 2019) با هدف برآورد میزان انتشار متان از محل دفن زباله‌های جامد شهری شهر یاسوج با استفاده از نرم افزار LandGEM انجام شد. بر اساس نتایج این پژوهش، تولید گاز متان طی سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ برای این مرکز دفن به ترتیب ۲۵۰، ۲۷۵، ۳۰۳ و ۳۳۰ مترمکعب درساعت به دست آمد که با توجه به مقدار محاسبه شده گاز متان، بیان شده که امکان طراحی و اجرای سامانه‌های جمع‌آوری گاز متان برای این محل دفن وجود دارد تا از تجمع گاز حاصل در محل‌های دفن و انفجار و رسوب احتمالی جلوگیری شود.

مطالعه (Toha & Rahman, 2023) تخمین انتشار متان از دو محل دفن زباله در شهر داکا بنگلادش را با استفاده از شش مدل پیش‌بینی مختلف و اندازه‌گیری مستقیم متان در محل را بررسی کرده است. بنابر نتایج این پژوهش روش اندازه‌گیری مستقیم متان و مدل LandGEM تخمین بسیار نزدیکی را نشان دادند. مدل پیش‌بینی LandGEM برآوردی تقریباً معادل روش مستقیم داشته است. بنابراین، مدل پیش‌بینی LandGEM می‌تواند انتخاب مناسبی برای کاهش عدم قطعیت تخمین انتشار متان از محل‌های دفن پسماند در داکا باشد.

بر اساس نتایج مطالعه آهنی و همکاران در سال ۱۴۰۰ که به منظور تخصیص مقادیر بهینه سالانه پسماند به پنج زیرسامانه بازیافت، کمپوست هوازی، هاضم بی‌هوازی، زباله‌سوز و دفن بهداشتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر منطق فازی با هدف کاهش هزینه کل سامانه مدیریت پسماند شهری صورت گرفت، لازم است جریان و روند تخصیص بهینه پسماند سالانه شهر تهران به زیرسامانه ها، جهت افزایش بهره‌وری سالانه سامانه مدیریت پسماند شهر تهران، با دقت بیشتری دنبال شود.

(Hosseinalizadeh et al., 2021) یک مدل برنامه‌ریزی خطی چند دوره‌ای برای مدیریت پسماند جامد شهری تهران طراحی کردند. دو سناریو که یکی شامل: بررسی همه فناوری‌های سوزاندن، گازی‌سازی، هضم بی‌هوازی، دفن زباله، بازیافت و کمپوست کردن و دیگری شامل: تمام این فناوری‌ها به جز بازیافت و کمپوست، برای مدیریت پسماند در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که بازیافت و کمپوست برای مدیریت پسماند در شهر تهران ارجحیت دارد. علاوه بر این، در میان فناوری‌های تولید انرژی، سوزاندن و هضم بی‌هوازی به ترتیب بهترین سامانه‌ها برای بخش غیرقابل تجزیه و زیست تخریب‌پذیر زباله هستند. گازی‌سازی نیز جایگزینی برای سوزاندن است. هضم بی‌هوازی یک فناوری جایگزین برای کمپوست است و اگرچه از نظر محیطی گزینه خوبی است، اما هزینه آنها باید کاهش یابد تا جذابیت بیشتری داشته باشد. نتایج همچنین نشان داد که دفن، بدترین گزینه برای مدیریت پسماند است. علاوه بر هدردادن منابع خوب مواد خام، آلودگی هوا، آب و خاک را به دنبال دارد.

در مطالعه (KhanPouraghdam et al., 2019) سه روش مختلف (دفن بدون بازیابی انرژی، زباله‌سوزی با بازیابی انرژی، و تولید کود کمپوست) برای دفع پسماندهای جامد شهری تهران با استفاده از دو روش ارزیابی چرخه حیات و تحلیل سلسله مراتبی مقایسه و ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهند که زباله‌سوزی با بازیابی انرژی با کمترین میزان انتشارات گاز گلخانه‌ای بهترین گزینه، دفن بدون بازیابی انرژی با بالاترین انتشارات بدترین گزینه است و تولید کود کمپوست نسبتاً بهتر از دفن بدون بازیابی انرژی است، ولی نمی‌تواند با زباله‌سوزی با بازیابی انرژی رقابت کند.

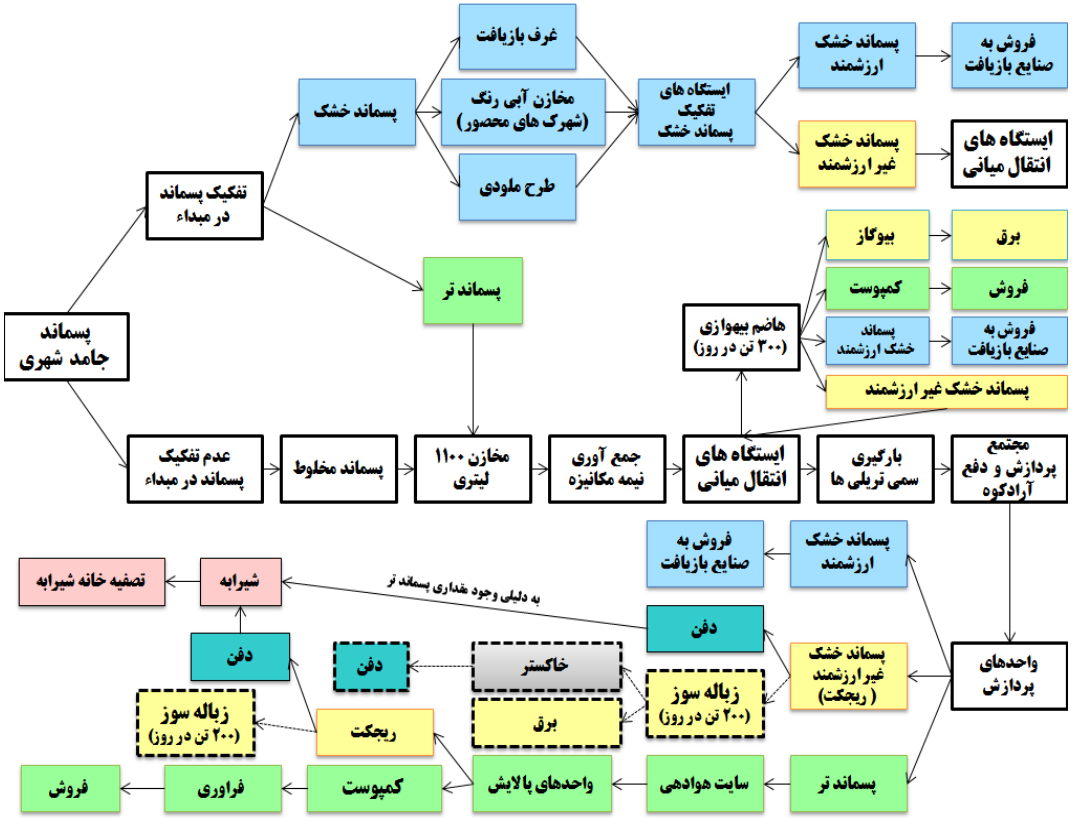
با توجه به چالش‌های گسترده زیست‌محیطی و اقتصادی ناشی از مدیریت نادرست پسماندهای جامد شهری در ایران، به‌ویژه در کلان‌شهر تهران که حدود ۲۴ درصد از کل پسماند تولیدی کشور را تولید می‌کند (نصرالهی و همکاران، ۱۳۹۵)، ضروری است راهکارهایی مبتنی بر اقتصاد چرخه‌ای و فناوری‌های نوین ارائه شود. مرور مطالعات نشان می‌دهد که فناوری‌های پیشرفته حرارتی و بیوشیمیایی می‌توانند گزینه‌های مؤثری برای مدیریت پایدار پسماند باشند. با این حال، تحقق این اهداف نیازمند برنامه‌ریزی راهبردی، اصلاح زیرساخت‌ها، کاهش هزینه‌ها و استفاده از مدل‌های علمی برای تخصیص بهینه پسماند است. این پژوهش با هدف ارائه راهکارهای علمی و عملی برای بهبود سامانه مدیریت پسماند شهری، به ارزیابی و تحلیل گزینه‌های مختلف می‌پردازد.

روش‌شناسی پژوهش

محدوده مطالعه

شهر تهران، پایتخت ایران با جمعیت حدود ۸ میلیون نفر و با وسعتی حدود ۷۳۰ کیلومترمربع بین ۳۵ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۷

دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۴ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۷ دقیقه طول شرقی قرار دارد. بر اساس تقسیمات شهری در حال حاضر این شهر شامل ۲۲ منطقه شهرداری است. هر یک از این مناطق بر حسب تراکم جمعیتی، بافت شهری، وسعت و برخی پارامترهای دیگر به چندین ناحیه تقسیم شده است. در مجموع تعداد کل نواحی شهر تهران، ۱۲۳ ناحیه است. پسماند جامد شهری بیش از ۹۷ درصد پسماندهای جامد شهر تهران را تشکیل می دهد در حالی که حدود سه درصد از آن را سایر انواع پسماند از جمله پسماندهای بیمارستانی، صنعتی و نخاله‌ها تشکیل می‌دهد. تعداد ۱۱ ایستگاه خدمات شهری در شهر تهران فعال هستند که محل تخلیه و بارگیری پسماند از خودروهای جمع‌آوری به خودروهای بزرگ‌تر (سمی‌تریلر) هستند. کلیه پسماندهای جامد شهری تولیدی (به غیر از پسماندهای ساختمانی، عمرانی، لجن و سرشاخه) مناطق مسکونی، اداری، آموزشی، تجاری و ... که به صورت روزانه از سطح مناطق ۲۲ گانه شهر تهران جمع‌آوری و جهت بازیافت و دفع نهایی به مجتمع پردازش و دفع آرادکوه و ایستگاه‌های تفکیک (بازیافت) ارسال می‌شود. تمام پسماند ورودی به مجتمع پردازش و دفع آرادکوه ابتدا در واحد باسکول توزین شده و میزان پسماند پذیرش شده در هر روز تعیین گردیده و سپس به سوی واحدهای پردازش موجود در مجتمع حرکت می‌کنند. شکل (۱) فرایند مدیریت پسماندهای جامد شهری تهران را نشان می‌دهد (مرکز مطالعات شهرداری تهران، ۱۴۰۰).



شکل ۱: جریان مدیریت پسماندهای جامد شهری تهران (سازمان مدیریت پسماند تهران، ۱۴۰۰)

آنالیز فیزیکی و شیمیایی پسماند جامد شهری تهران

جمع‌آوری داده‌های مرتبط با این پژوهش با مراجعه به واحد آمار سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران و استخراج خلاصه آمارهای مدیریت پسماند شهر تهران طی دوره ده ساله ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ و همچنین آمار مربوط به آخرین گزارش وضعیت مدیریت پسماند در کلان‌شهر تهران مربوط به سال ۱۴۰۰ انجام پذیرفت. سپس با تبدیل داده‌های به دست آمده به نمودارهای کاربردی تحلیل و بررسی نتایج انجام گرفت. همچنین کیفیت پسماند تهران و آنالیز فیزیکی و شیمیایی آن بر اساس گزارش داده‌برداری سازمان مدیریت پسماند صورت گرفت.

پتانسیل تولید گاز محل دفن

به طور کلی، عمده پسماند ورودی به آرادکوه، شامل مواد برگشتی حاصل از واحدهای پردازش و پسماندهای بیش از ظرفیت پذیرش این

واحدها به طور مستقیم وارد محل دفن می‌شوند. بخش آلی پسماند پس از ورود به محل دفن شروع به تجزیه و تولید گاز زیستی می‌کند. در مدل‌سازی تجزیه زیستی بخش آلی پسماند معمولاً از مدل درجه اول استفاده می‌شود (Ayodele et al., 2017).

$$Q_{CH_4} = \sum_{t=1}^{n} \sum_{j=0.1}^{1} kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}}$$ رابطه ۱)

در این معادله Q_{CH4} مقدار متان تولیدی محاسبه شده بر حسب مترمکعب بر سال؛ i برابر یک سال افزایش زمان؛ n اختلاف سال مورد نظر برای محاسبه تولید گاز و سال تاسیس محل دفن زباله؛ J 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؛ Mi جرم دفن زباله در سال اول تاسیس محل دفن زباله بر حسب مگاگرم؛tij سنJ مین بخش از زباله دفن شده درj مین سال بر حسب دهم سال می‌باشد.

نرم‌افزاری که از بیشترین کاربرد در پیش‌بینی نرخ تولید گاز در محل‌های دفن پسماند شهری برخوردار می‌باشد نرم‌افزار LandGEM است که برای محاسبه میزان انتشار گازهای حاصل از محل‌های دفن پسماند به کار گرفته می‌شود. این نرم‌افزار توسط مرکز کنترل تکنولوژی سازمان حفاظت از محیط زیست آمریکا[1] تهیه شده است (USEPA, 2005). برای محاسبه میزان گاز تولیدی، از طریق این نرم‌افزار اطلاعات زیر مورد نیاز می‌باشد:

ظرفیت طرح محل دفن پسماند

مقدار پسماند موجود در محل دفن یا میزان پسماند ورودی به آن در سال

نرخ تولید متان (k) و ظرفیت بالقوه تولید متان (L_0)

تعداد سال‌هایی که محل دفن مورد استفاده قرار گرفته

آیا محل دفن برای دفن مواد زائد خطرناک مورد استفاده قرار گرفته یا خیر

ظرفیت بالقوه تولید متان (L_0) ثابتی است که نمایانگر میزان ظرفیت پتانسیل محل دفن برای تولید متان می‌باشد و تنها به نوع پسماند دفنی بستگی دارد. دامنه تغییرات L_0 بین ۶/۲ تا ۲۷۰ مترمکعب به ازای هر تن پسماند می‌باشد.

ثابت نرخ تولید گاز (k) که برای محاسبه نرخ تولید گاز در هر بخش از پسماند دفنی به کار می‌رود تابعی از نیمه عمر تجزیه پسماند است. هرچه مقدار k بالاتر باشد واکنش تجزیه زیستی بخش آلی پسماند سریع‌تر بوده و نرخ تولید متان بالاتر خواهد بود. ضریب (k) بوسیله آزمایش‌های پایلوت و اندازه‌گیری‌های دقیق صحرایی قابل محاسبه است. همچنین برای تخمین مقدار آن می‌توان به مراجع و تجارب پژوهشگران مراجعه نمود. مراجع مختلف روش‌ها و مقادیر متفاوتی برای (k) پیشنهاد می‌نمایند. مقدار k براساس رهنمودهای سازمان حفاظت از محیط زیست آمریکا (USEPA) بین ۰/۰۰۳ تا ۰/۲۱ بر سال می‌باشد.

مقادیر تخمین زده شده k و L_0 تأثیر اساسی در محاسبات حجم گاز قابل استحصال محل دفن دارند. برای تخمین میزان تولید گاز از محل دفن پسماند بدون انجام آزمایش های میدانی، آگاهی از مقدار پسماند، ویژگی‌های مناطق دفنی و زمان دفن پسماند ورودی در طول تاریخچه بهره‌برداری از محل دفن ضروری است. در این مطالعه به دلیل کمبود داده در مورد خواص پسماند و شرایط محل دفن در طی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ (دوره مطالعه)، از داده‌های پیش‌فرض مدل نرم‌افزار متناسب با شرایط اقلیمی و ترکیبات پسماند تهران با حدود ۶۵ درصد مواد آلی، مطابق جدول (۱) استفاده شده است.

جدول ۱: داده‌های ورودی به مدل نرم افزار LandGEM

پارامتر	واحد	میزان
نرخ تولید متان (**k**)	$Year^{-1}$	۰/۰۵
پتانسیل ظرفیت تولید متان (**L_0**)	m^3/Mg	۱۷۰
غلظت ترکیبات آلی غیر متانی* (**NMOC**)	ppmv	۴۰۰۰
محتوای متان	درصد	۶۰

*** Non-Methan Organic Compounds**

1. United States Environmental Protection Agency (USEPA)

پتانسیل تولید انرژی

استحصال انرژی از پسماند، فناوری‌ها و فرآیندهایی را در برمی‌گیرد که طی آن‌ها، همه و یا بخشی از محتوای انرژی جریان پسماند، بازیافت می‌گردد. فناوری‌های تولید انرژی از پسماند که به مرحله تجاری سازی رسیده و از لحاظ تعداد واحدهای اجرا شده و سابقه، تثبیت شده محسوب می شوند بطور کلی به دو دسته فناوری‌های حرارتی[1] و فناوری‌های بیوشیمیایی[2] قابل تقسیم هستند.

فناوری‌های تولید انرژی از پسماند، با درجات بسیار متفاوتی از پیچیدگی و دامنه کاربرد، عمدتاً در کشورهای توسعه یافته مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان زباله سوزی به لحاظ قدمت بیشتر نقش اصلی را داراست. همچنین بازیابی گاز دفن‌گاه با تجهیز شدن به تأسیسات استحصال گاز و بازیافت انرژی، یکی از تکنولوژی‌های مهم در این زمینه می‌باشد.

سناریو ۱: بازیابی انرژی به روش بیوشیمیایی (فناوری لندفیل بهداشتی)

در این سناریو کلیه پسماند غیر قابل بازیافت وارد لندفیل بهداشتی شده و میزان انرژی قابل استحصال از آن بر اساس میزان ماده تجزیه‌پذیر وارد شده به آن محاسبه می‌گردد. بدین منظور تمهیدات لازم برای استقرار سیستم‌های تولید انرژی (تاسیسات جمع‌آوری گاز و تولید انرژی) و همچنین کنترل نشر آلایندگی احداث می‌گردد.

انرژی الکتریکی (kWh) که می‌تواند از محتوای متان گاز جمع‌آوری شده از محل دفن پسماند به دست آید با استفاده از رابطه (۲) برآورد می‌گردد (Ayodele et al., 2017):

$$E_{P\,LFG} = \frac{LHV_{CH4} \times Q_g \times \lambda \times \eta}{3.6} \quad \text{رابطه ۲)}$$

در این رابطه LHV_{CH4} ارزش حرارتی پایین متان (MJ/m^3)؛ Q_g متان جمع آوری شده (m^3)؛ λ راندمان جمع آوری؛ η راندمان تبدیل الکتریکی برای موتور احتراق داخلی و ۳/۶ ضریب تبدیل از مگاژول به کیلووات ساعت است.

انتشار گازهای گلخانه‌ای در لندفیل بهداشتی

دی‌اکسیدکربن موجود در گاز محل دفن پسماند به دلیل اینکه منشأ زیستی دارد به عنوان گاز گلخانه‌ای در نظر گرفته نمی‌شود. هنگامی که گاز متان محل دفن جمع‌آوری و در یک موتور احتراق داخلی سوزانده می‌شود، آلاینده‌هایی مانند CO_2، HCl، N_2O، SO_2 تولید می‌شوند. CO_2 تولید شده در طول این فرآیند چون منشأ زیستی دارد به عنوان عامل گرمایش جهانی در نظر گرفته نمی‌شود (Ayodele et al., 2017).

بازده جمع آوری گاز لندفیل ۹۰٪ در نظر گرفته شده است بنابراین ۹۰٪ گاز بازیافت شده در لندفیل در موتور احتراق داخلی برای تولید برق احتراق خواهد یافت و ۱۰ درصد از متان تولید شده، به دلیل نقص‌های عملیاتی، طراحی و ناکارآمدی سیستم در جو آزاد می‌شود که منجر به گرمایش جهانی می‌گردد. کربن‌دی‌اکسید معادل گاز متان (CO_2eq) که در اتمسفر آزاد می‌شود به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$E_{LFG}(kgCO2\ eq) = GWP_{CH_4} \times 0.1 \times M_{CH_4} \times 1000 \quad \text{رابطه ۳)}$$

در این رابطه E_{LFG} کربن‌دی‌اکسید معادل انتشار متان، M_{CH_4} جرم گاز متان (Mg)، GWP_{CH_4} پتانسیل گرمایش جهانی گاز متان ($kgCO_2/kg\ GHG$) است.

جدول۲ : ضرایب تبدیل میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به معادل کربن‌دی‌اکسید (IPCC, 2014)

گاز گلخانه‌ای	پتانسیل گرمایش جهانی[3]
کربن‌دی‌اکسید	۱
متان	۲۵
ناکسها (نیتروس اکسید)	۲۹۸

سناریو ۲: بازیابی انرژی به روش حرارتی (فناوری زباله‌سوز)

در این سناریو که اساس آن توسعه فناوری حرارتی جهت تولید انرژی است، فناوری توده‌سوز که می‌تواند پذیرای انواع پسماند بدون محدودیت رطوبت باشد، به عنوان فناوری تولید انرژی از پسماند در نظر گرفته شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. تمامی مولفه‌های

1 Thermo-Chemical
2 Bio-Chemical
3 Global Warming Potential

MSW در فناوری سوزاندن مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقدار انرژی الکتریسیته تولیدشده بر اساس ارزش حرارتی پایین اجزای پسماند از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد (Ayodele et al., 2017):

$$E_{P\,INC} = \frac{LHV_{waste} \times M_w \times \eta_{INC}}{3.6}$$ رابطه ۴)

در این رابطه LHV_{waste} ارزش حرارتی پایین پسماند (MJ/kg)؛ M_w میزان پسماند وردی به زباله‌سوز (kg)؛ η_{INC} راندمان تبدیل زباله‌سوز و ۳/۶ ضریب تبدیل از مگاژول به کیلووات ساعت است.

ارزش حرارتی پسماند جامد شهری تهران

ارزش حرارتی، یکی از چهار مشخصه‌ی اصلی پسماند و کلیدی ترین آن‌ها جهت تصفیه بیولوژیکی و حرارتی پسماند است. در این مطالعه از مدل تجربی بر مبنای آنالیز عنصری پسماند برای محاسبه ارزش حرارتی استفاده شده است. ارزش حرارتی بالای پسماند[1](HHV) بر حسب (MJ/kg) از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد (Parikh et al., 2005).

$$HHV_{waste} = 0.3491C + 1.1783H + 0.1005S - 0.1034O - 0.015N - 0.0211A$$ رابطه ۵)

در این رابطه C، H، O، N، S و A به ترتیب محتوای کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن، گوگرد و خاکستر پسماند را نشان می‌دهد که از آنالیز شیمیایی نهایی جریان پسماند (جدول ۱) به دست می‌آید.

ارزش حرارتی پایین پسماند[2](LHV) نیز بر اساس(MJ/kg) طبق رابطه زیر متعاقبا تعیین می‌گردد (Amoo & Fagbenle,2013).

$$LHV_{waste} = HHV_{waste} - (9 \times \%H + \%H_2O) \times 2.44$$ رابطه ۶)

انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرایند زباله‌سوزی

احتراق پسماند یک فرآیند انتشار کربن است که کربن موجود در پسماند را به CO_2 و کربن بیوژنیک تبدیل می‌کند. همچنین مقادیر ناچیزی از N_2O و CH_4 آزاد می کند (Ryu, 2010). بنابراین انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای از زباله‌سوز، مجموع انتشار CO_2 است که با استفاده از رابطه (۶) برحسب (tons/year) محاسبه می‌گردد.

$$CO_2\ emissions = \sum_i (IW_i \times CCW_i \times FCF_i \times EF_i \times \frac{44}{12})$$ رابطه ۷)

در این رابطه i پسماند جامد شهری؛ IW میزان پسماند ورودی به زباله‌سوز (tons/year)؛ CCW نسبت محتوای کربن پسماند؛ FCF نسبت میزان کربن فسیلی پسماند؛ EF راندمان احتراق پسماند در زباله‌سوز و $(\frac{44}{12})$ ضریب تبدیل کربن به دی‌اکسید کربن می‌باشد.

جدول۳ : داده‌های پیش‌فرض برای تخمین انتشار CO_2 در فرایند زباله‌سوزی (IPCC, 2000)

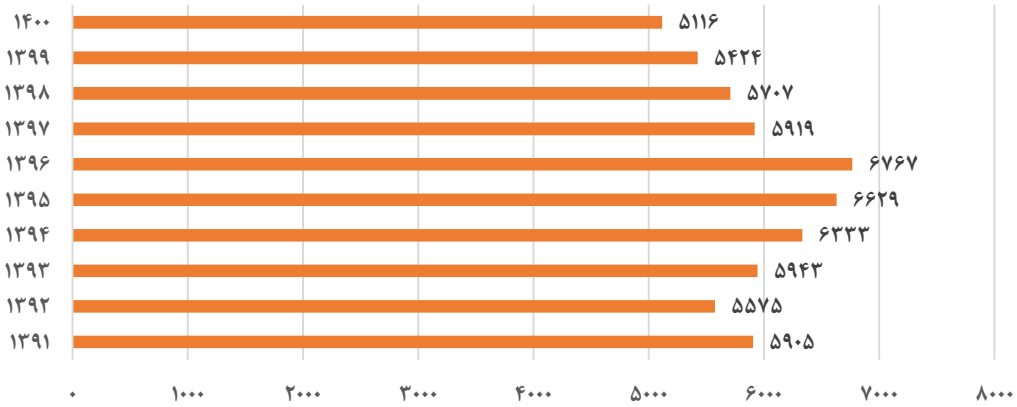
محتوای کربن پسماند جامد شهری (با آب)	کربن فسیلی پسماند جامد شهری	راندمان احتراق زباله‌سوز
۳۳-۵۰٪	۳۰-۵۰٪	۹۵-۹۹٪

یافته‌های پژوهش

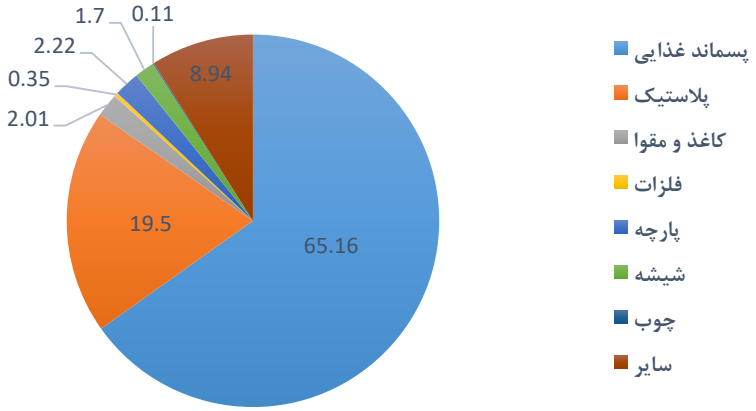
براساس آمار سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران روند تولید پسماند تر در شهر تهران بین سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ مطابق شکل (۲) است. همان‌طور که در شکل مشخص است تا سال ۱۳۹۶ روند تولید پسماند در شهر تهران صعودی بوده و پس از آن شکل نزولی به خود گرفته است. میانگین سالانه پسماند گردآوری شده در مجتمع پردازش و دفع آرادکوه تهران ۵۹۳۲ تن می‌باشد.

نتایج آنالیز فیزیکی پسماند شهری تهران در بهار ۱۴۰۰ به صورت میانگین مناطق ۲۲ گانه در شکل (۳) آمده است. آنالیز پسماند شهر تهران نشان می‌دهد که بخش آلی پسماند با ۶۵/۱۶ درصد بیشترین سهم وزنی را به خود اختصاص داده است. این همان بخشی است که قابلیت استحصال انرژی هم به صورت زیستی و هم به صورت حرارتی دارد.

1 Higher heating value
2 Lower heating value



شکل ۲: میزان پسماند تر جمع‌آوری شده از سطح شهر تهران به صورت روزانه (تن) طی سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۹۱



شکل۳: درصد ترکیبات پسماند شهر تهران ورودی به مجتمع آرادکوه در سال ۱۴۰۰

آنالیز شیمیایی به تفکیک آنالیز تقریبی (براساس محتوای رطوبت، ماده‌ی فرار، مقدار خاکستر و ارزش حرارتی) و آنالیز نهایی (براساس محتوای کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن، گوگرد) بیان می‌گردد. در جدول (۴) آنالیز نهایی و تقریبی پسماندهای جامد شهری تهران به صورت مخلوط (میانگین) آورده شده است.

جدول ۴ : آنالیز شیمیایی تقریبی و نهایی پسماند شهر تهران (با آب)

آنالیز تقریبی			آنالیز نهایی				
رطوبت (درصد)	خاکستر (درصد)	مواد فرار (درصد)	C	H	O	N	S
۶۰/۷۷	۲۹/۵۴	۱۰/۳۸	۲۰/۷	۹	۶۳/۷	۰/۶۸	۰/۰۹

میزان تولید گاز در محل دفن پسماند بستگی مستقیمی به مقدار پسماند دفنی و ترکیب آن دارد و هر چه میزان مواد آلی و فسادپذیر پسماند در محل دفن بیشتر باشد، ظرفیت تولید گاز زیستی نیز بیشتر خواهد بود (در شکل ۴ نیز مشخص است، در طی سال‌هایی که دفن صورت می‌گیرد روند تولید گاز زیستی صعودی بوده و پس از آن سیر نزولی به خود می‌گیرد). برآورد انتشار متان در محل دفن با استفاده از مدل LandGEM انجام شده است که بر اساس مدیریت محل دفن و ترکیب پسماند در هنگام توسعه این روش طراحی شده است. در این مطالعه از داده‌های پیش‌فرض مدل نرم‌افزار متناسب با شرایط اقلیمی و ترکیبات پسماند تهران (با حدود ۶۵ درصد مواد آلی) مطابق جدول (۵) جهت برآورد میزان انتشار گاز محل دفن استفاده شده است. جدول (۶) نیز میزان پسماند دفن شده تهران طی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ نمایش داده شده است (مرکز مطالعات شهرداری تهران، ۱۴۰۰).

جدول ۵: داده‌های ورودی به مدل نرم افزار LandGEM

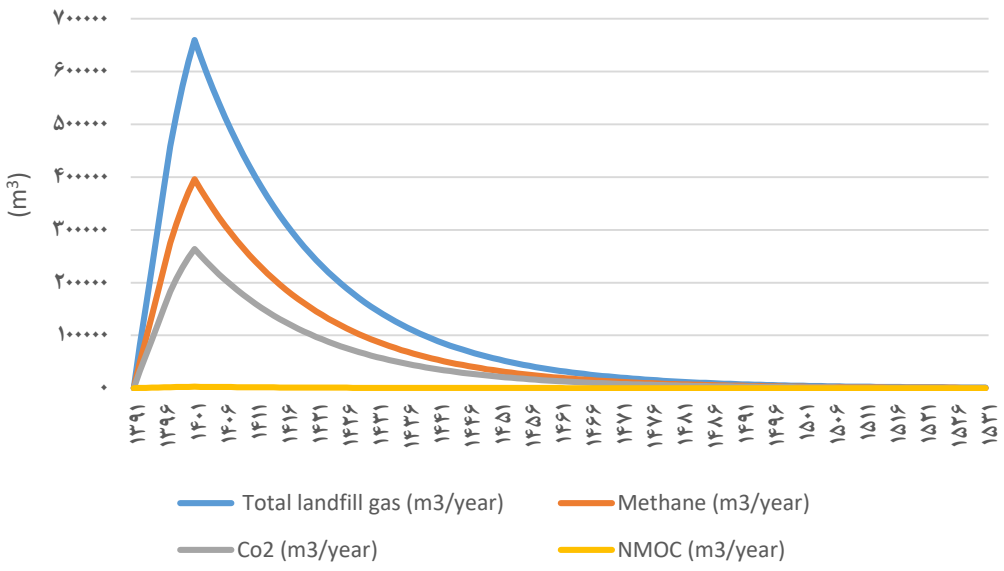
پارامتر	واحد	میزان
نرخ تولید متان (k)	$Year^{-1}$	۰/۰۵
پتانسیل ظرفیت تولید متان (L_0)	m^3/Mg	۱۷۰
غلظت ترکیبات آلی غیر متانی* (NMOC)	ppmv	۴۰۰۰
محتوای متان	درصد	۶۰

*** Non-Methan Organic Compounds**

شکل (۴) روند و مقدار انتشار گازهای آلاینده در سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ در محل دفع پسماند تهران را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، میزان تولید سالانه گاز زیستی در محل دفن پسماند تهران متغیر بوده است. با شروع دفن پسماند، فعل و انفعالات زیستی آغاز شده و تولید گازهای آلاینده حاصل از این فرایند تا سال‌های متمادی پس از دفن در محل ادامه دارد. جدول (۷) نیز میزان انتشارات گازهای آلاینده برای این حجم پسماند دفن شده را نشان می‌دهد.

جدول ۶: مقدار پسماندهای ورودی به محل دفن آرادکوه طی سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۹۱

سال	پسماند ورودی		پسماند تجمعی	
	(Mg/year)	(short tons/year)	(Mg)	(short tons)
۱۳۹۱	۵۹۰۵	۶۴۹۶	۰	۰
۱۳۹۲	۵۵۷۵	۶۱۳۳	۵۹۰۵	۶۴۹۶
۱۳۹۳	۵۹۴۳	۶۵۳۷	۱۱۴۸۰	۱۲۶۲۸
۱۳۹۴	۶۳۳۳	۶۹۶۶	۱۷۴۲۳	۱۹۱۶۵
۱۳۹۵	۶۶۲۹	۷۲۹۲	۲۳۷۵۶	۲۶۱۳۲
۱۳۹۶	۶۷۶۷	۷۴۴۴	۳۰۳۸۵	۳۳۴۲۴
۱۳۹۷	۵۹۱۹	۶۵۱۱	۳۷۱۵۲	۴۰۸۶۷
۱۳۹۸	۵۷۰۷	۶۲۷۸	۴۳۰۱۷۱	۴۷۳۷۸
۱۳۹۹	۵۴۲۴	۵۹۶۶	۴۸۷۷۸	۵۳۶۵۶
۱۴۰۰	۵۱۱۶	۵۶۲۸	۵۴۲۰۲	۵۹۶۲۲



شکل ۴: میزان کل گاز تولیدی محل دفن، متان، کربن دی اکسید و ترکیبات آلی غیرمتانی (به ازای دفن پسماند طی سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۹۱)

جدول ۷: میزان انتشارات در محل دفن به ازای دفن پسماند طی سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۹۱

انتشارات	بر حسب واحد حجمی (m^3)	بر حسب واحد وزنی (Mg)
کل گاز محل دفن (m^3)	**۱۶۸۲۹۴۷۵**	**۲۲۱۴۰**
متان	**۱۰۰۹۷۶۸۵**	**۶۷۳۷**
کربن دی اکسید (زیستی)	**۶۷۳۱۷۹۰**	**۱۲۳۲۳**
ترکیبات آلی غیرمتانی	**۶۷۳۱۸**	**۲۴۱**

مبنای محاسبات و نتایج مربوط به سناریوهای تعریف شده در این مطالعه در جدول (۸) ارائه شده است. در سناریو (۱) که اساس آن بهره‌گیری از لندفیل بهداشتی به منظور مدیریت پسماند و تولید انرژی از آن می‌باشد، فرض بر این است که کلیه پسماند ورودی به محل دفن فعلی وارد لندفیل بهداشتی شده و انرژی تولیدی بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌گردد. با راندمان جمع‌آوری ۹۰٪ ، ارزش حرارتی متان ۳۲/۷ مگاژول بر متر مکعب، ضریب تبدیل الکتریکی ۳۳٪ ، انرژی بازیابی شده به ازای هر تن پسماند معادل ۴۵۹ کیلووات ساعت می‌باشد. در سناریو (۲) که زباله‌سوز برای تولید انرژی از پسماند مورد ارزیابی قرار گرفته است، با فرض اینکه کلیه پسماند ورودی به مرکز دفن فعلی وارد این فناوری جهت تولید انرژی و مدیریت پسماند گردد از رابطه (۴) جهت محاسبه انرژی استفاده می‌شود. بدین منظور با استفاده از رابطه (۵) ارزش حرارتی بالای پسماند و رابطه (۶) ارزش حرارتی پایین پسماند به ترتیب ۱۱/۸۹ و ۸/۴۳ مگاژول بر کیلوگرم بدست آمده است. بنابراین انرژی بازیابی شده در این سناریو با راندمان تبدیل ۲۰٪ به ازای هر تن پسماند ورودی به زباله‌سوز، ۴۶۸ کیلووات ساعت می‌باشد.

جدول۸ : محاسبات سناریوهای تولید انرژی از پسماند

پارامتر	واحد	مقدار
میانگین سالانه تولید پسماند	tons	۵۹۳۲
دوره زمانی	years	۱۰
سناریو ۱: لندفیل بهداشتی		
متان تولید شده	m^3	۱۰۰۹۷۶۸۵
	Mg	۶۷۳۷
ارزش حرارتی پایین متان	MJ/m^3	۳۲/۷
راندمان جمع‌آوری	%	۹۰
راندمان تبدیل الکتریکی	%	۳۳
انرژی بازیابی شده	kWh/ton MSW	۴۵۹
انتشار دی‌اکسیدکربن (معادل متان)	ton CO_2/ton MSW	۰/۲۸
سناریو ۲: زباله‌سوز		
ارزش حرارتی بالای پسماند	MJ/kg	۱۱/۸۹
ارزش حرارتی پایین پسماند	MJ/kg	۸/۴۳
راندمان تبدیل	%	۲۰
انرژی بازیابی شده	kWh/ton $_{MSW}$	۴۶۸
انتشار دی‌اکسیدکربن	ton CO_2/ton MSW	۰/۵۶

در این پژوهش با بررسی وضعیت تولید و مدیریت پسماند در شهر تهران و با توجه به داده‌ها و اطلاعات گردآوری شده از سازمان مدیریت پسماند شهری تهران و مرکز مطالعات برنامه‌ریزی شهر تهران، مشخص گردید که حدود ۶۵ درصد از پسماند تولیدی روزانه شهر تهران که به مرکز پردازش و دفع آرادکوه منتقل می‌شود، پسماند آلی است. این نسبت بالای پسماند آلی نشان‌دهنده قابلیت بالای بازیابی و تبدیل این نوع پسماندها به منابع انرژی تجدیدپذیر است.

نتایج بررسی میزان انتشارات در محل دفن آرادکوه (به عنوان تنها مرکز فعلی پردازش و دفع پسماند شهر تهران) برای دفن پسماند تولید شده در یک دوره ده ساله (۱۴۰۰-۱۳۹۱) نشان داد که تولید متان و سایر گازهای آلاینده در محل دفن پسماند، بلافاصله پس از دفن

شروع شده و میزان تولید گازهای آلاینده از جمله متان طی سال‌هایی که دفن صورت می‌گیرد به صورت تجمعی، روند صعودی داشته و پس از آن با شیب نرم کاهش یافته است. میزان کل گاز تولید شده در محل دفن به ازای پسماند دفن شده در این دوره ۱۰ ساله بیش از ۱۶ میلیون مترمکعب بوده که از این مقدار حدود ۱۰ میلیون مترمکعب (۶۷۳۷ تن) گاز متان و حدود ۶/۷ میلیون مترمکعب (۱۲۳۲۳ تن) گاز کربن دی‌اکسید (زیستی) می‌باشد. پژوهش‌های دیگر نیز تولید گازهای آلاینده در محل های دفن زباله شهری را از عوامل مهم انتشار گازهای گلخانه‌ای به محیط‌زیست می‌دانند. در مطالعه برآورد انتشار گاز و آلاینده‌ها از مرکز دفن زباله شهر شیراز (عمرانی و همکاران، ۱۳۸۷) میزان تولید متان و کربن دی اکسید به ترتیب ۱/۵ و ۰/۹۶ میلیون مترمکعب در سال محاسبه شده و در مطالعه‌ای دیگر (Ghasemzade & Pazoki, 2017) که میزان گاز محل دفن جیرفت را برای ۳۰ سال پیش‌بینی کرده است، نتایج نشان داده که پسماند دفن شده طی این مدت بیش از سه میلیون تن بوده و آلاینده‌های منتشره از محل دفن مانند CH_4، CO_2 و NMOC تا ۱۵ کیلومتری محل دفن می‌رسند.

علاوه بر بررسی میزان انتشارات در محل دفن، دو سناریو با استراتژی توسعه فناوری‌های WtE (حرارتی و بیوشیمیایی) تعریف شده است تا اثرات گزینه‌های استفاده از MSW را از نظر تبدیل انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای مطابق جدول (۸) ارزیابی کند. در سناریوی ۱ که ارزیابی توسعه نیروگاه لندفیل بهداشتی به عنوان نیروگاه تبدیل بیوشیمیایی مورد مطالعه قرار گرفته، میزان انرژی بازیابی شده به ازای هر تن پسماند ورودی به آن ۴۵۹ کیلووات ساعت، میزان انتشار کربن دی‌اکسید معادل متان ۰/۲۸ تن بوده است. همچنین در سناریوی ۲ که ارزیابی توسعه نیروگاه زباله‌سوز به عنوان نیروگاه تبدیل حرارتی مورد مطالعه قرار گرفته، میزان انرژی بازیابی شده به ازای هر تن پسماند ورودی به آن ۴۶۸ کیلووات ساعت، میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید ۰/۵۶ تن بوده است. در مطالعه آنالیز انرژی و انتشارات پسماند جامد شهری مالزی، میزان بازیابی انرژی در نیروگاه لندفیل بهداشتی و زباله‌سوزی به ترتیب ۳۷۴ و ۴۸۱ کیلووات ساعت به ازای هر تن پسماند و میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید نیز به ترتیب ۱/۱۱ و ۰/۴۹ تن به ازای هر تن پسماند است (Tan et al., 2014). به طور کلی با توسعه فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی (WtE) و انحراف پسماند از دفن و تبدیل آن به انرژی، همان‌طور که در جدول (۹) نشان داده شده است، علاوه بر این که از انتشار حدود ۶۰۰۰ تن متان که معادل ۱۵۰۰۰۰ تن دی‌اکسیدکربن است، جلوگیری می‌گردد، امکان تولید انرژی بیش از ۲۷۰۰۰ مگاوات ساعت را طی یک دوره ۱۰ ساله فراهم می‌سازد که می‌تواند به کاهش وابستگی به منابع سوخت فسیلی و تقویت امنیت انرژی کشور کمک کند.

جدول ۹ : میزان انتشار گازهای آلاینده و انرژی بازیابی شده طی دوره ۱۰ ساله برای هر سناریو

	انتشارات (*ton*)			انرژی بازیابی شده (*MWh*)
	متان	**دی‌اکسیدکربن معادل متان**	**دی‌اکسیدکربن (غیرزیستی)**	
سناریو صفر (محل دفن فعلی)	۶۷۳۷	۱۶۸۴۲۵	–	–
سناریو ۱ (فناوری لندفیل بهداشتی)	۶۷۴	۱۶۸۴۲	–	۲۷۲۲۸
سناریو ۲ (فناوری زباله‌سوزی)	–	–	۳۳۲۱۹	۲۷۷۶۲

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بررسی سامانه مدیریت پسماند شهری تهران نشان می‌دهد علی‌رغم وجود ظرفیت بالقوه تولید انرژی از پسماند، تنها قسمت کوچکی از پسماندهای تولید شده در تهران بازیافت و بازیابی شده و بخش قابل توجهی از آن به صورت دفنی در مکان‌های پایانی دفن می‌شود که منجر به تولید گازهای گلخانه‌ای نظیر متان و کربن‌دی‌اکسید شده و مشکلات زیست محیطی و اجتماعی فراوانی به همراه دارد. میزان پسماند دفن شده در آرادکوه از سال ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ بیش از ۵۹۰۰۰ تن بوده و میزان انتشار گازهای تولید شده در محل دفن به ازای پسماند دفن شده در این دوره ۱۰ ساله بیش از ۱۶ میلیون مترمکعب بوده که از این مقدار حدود ۱۰ میلیون مترمکعب گاز متان و حدود ۶/۷ میلیون مترمکعب گاز کربن دی‌اکسید می‌باشد.

میزان انتشارات گازهای آلاینده در محل دفن آرادکوه، تأکید بر ضرورت اصلاح روش‌های مدیریت پسماند و بهره‌برداری بهینه از پسماند تولیدی دارد. با در نظر گرفتن رویکرد توسعه فناوری‌های تولید انرژی از پسماند، می‌توان به طور همزمان از پتانسیل انرژی موجود

در پسماند استفاده کرد و به مدیریت بهتر پسماند و تأمین انرژی پایدار کمک کرد. برای دستیابی به نتایج بهتر در مدیریت پسماند، پیشنهاد می‌شود که زیرساخت‌های تولید انرژی از پسماند بهبود یافته و نیروگاه‌های موجود به‌روزرسانی و بهره‌برداری کامل از آن‌ها صورت گیرد. با توجه به اهمیت این مسئله، تحقیق و بررسی‌های بیشتر در زمینه فناوری‌های نوین مدیریت پسماند و بهره‌برداری از انرژی پسماند ضروری به نظر می‌رسد.

منابع

آهنی، منیره، ارجمندی، رضا، هویدی، حسن، قدوسی، جمال، و میری لواسانی، سیدمحمدرضا. (۱۴۰۰). ارائه مدل بهینه برای سامانه مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر منطق فازی (مطالعه موردی: شهر تهران). علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۳(۱ (پیاپی ۱۰۴))، ۲۷-۴۰.

حاتمی، امیرمصطفی، معماریان فرد، مهسا، و صبور، محمدرضا. (۱۳۹۵). بررسی تفکیک و جداسازی پسماند در مناطق ۲۲ گانه شهر تهران با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی. علوم و فنون نقشه برداری، ۶(۳)، ۶۳-۷۴.

خان پوراقدم، سمیه، قنبرزاده لک، مهدی، مهتدی، مهرداد، و صبور، محمدرضا. (۱۳۹۸). ارزیابی گزینه های دفع نهایی پسماند جامد شهری با استفاده از تلفیق روش های ارزیابی چرخه عمر و تحلیل سلسله مراتبی(مطالعه موردی: شهر تهران). علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۱(۲ (پیاپی ۸۱))، ۵۷-۶۹.

عبدلی، محمدعلی، اکبرپورشیرازی، محسن، امیدوار، بابک، و سمیعی فرد، رضا. (۱۳۹۴). بررسی تولید پسماند شهری در مناطق ۲۲ گانه شهر تهران با رویکرد کاهش پسماند طی سال های ۱۳۹۲-۱۳۸۹. طلوع بهداشت، ۱۴(۲ (مسلسل ۵۰))، ۲۳-۳۳.

عمرانی، قاسمعلی، محسنی، نرگس، حقیقت، کاظم، و جاوید، امیرحسین. (۱۳۸۷). ارزیابی فنی و بهداشتی استحصال گاز متان از محل دفن زباله شهر شیراز. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۰(۴ (مسلسل ۳۹) (ویژه نامه))، ۱۷۴-۱۸۲.

سازمان مدیریت پسماند تهران، (۱۴۰۰)، شهرداری تهران، ایران، مطالعه آماری ۱۴۰۰.

نصرالهی سروآغاجی، سجاد، علی‌مردانی، رضا، شریفی، محمد، و تقی‌زاده یزدی، محمدرضا. (۱۳۹۵). پیش بینی پسماند تولیدی شهر تهران با استفاده از سامانه استنتاج تطبیقی فازی-عصبی و شبکه‌های عصبی مصنوعی. مهندسی بیوسیستم ایران، ۴۷(۱)، ۱۷۵-۱۸۳.

REFERENCES

Abduli M. A., Akbarpour-Shirazi M., Omidvar B., Samieifard R., 2015. A Survey of Municipal Solid Waste Generation in 22 Regions of Tehran With Solid Waste Reduction Approach. The Journal of Toloo-e-behdasht, 14 (2), (In Persian).

Ahani, M., Arjamandi, R., Hoveidi, H., Qudousi, J., Miri Lavasani, M., 2021. " Providing Optimal Model for Municipal Solid Waste Management System Using Genetic Algorithm Based on Fuzzy Logic (Case Study: Tehran City)", *Environmental Science and Technology, 23(1)*, (In Persian).

Amoo, O. M., & Fagbenle, R. L. (2013). Renewable municipal solid waste pathways for energy generation and sustainable development in the Nigerian context. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 4, 1-17.

Ayodele, T. R., Ogunjuyigbe, A. S. O., & Alao, M. A. (2017). Life cycle assessment of waste-to-energy (WtE) technologies for electricity generation using municipal solid waste in Nigeria. Applied energy, 201, 200-218.

Fallahizadeh, S., Rahmatinia, M., Mohammadi, Z., Vaezzadeh, M., Tajamiri, A., & Soleimani, H. (2019). Estimation of methane gas by LandGEM model from Yasuj municipal solid waste landfill, Iran. MethodsX, 6, 391-398.

Ghasemzade, R., & Pazoki, M. (2017). Estimation and modeling of gas emissions in municipal landfill (Case study: Landfill of Jiroft City). Pollution, 3(4), 689-700.

Hatami A.M, Memarian Fard M, Sabour M R., 2017. Evaluation of Waste Source Separation in 22 Districts of Tehran Using GIS. *JGST; 6 (3), 63-74*. (In Persian).

Hosseinalizadeh, R., Izadbakhsh, H., & Shakouri, H., 2021. A planning model for using municipal solid waste management technologies-considering Energy, Economic, and Environmental Impacts in Tehran-Iran. *Sustainable Cities and Society, 65, 102566*.

IPCC. (2000). Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. Chapter 5.

IPCC. (2014). Emission factors for greenhouse gas inventories.

Karak T., Bhagat RM., Bhattacharyya P., 2012. Municipal Solid Waste Generation, Composition and

Management: *The World Scenario. Critical Reviews in Environmental Science and Technology*; 42, 1509-1630

Khanpouraghdam, S., Ghanbarzadeh-Lak, M., Mohtadi, M., Sabour, M.R., 2019. Evaluation of Municipal Solid Waste Final Disposal Scenarios Through Life Cycle Assessment and Analytic Hierarchy Process Methods (Case study: Tehran). *Journal of Environmental Science and Technology*, *21*(2), 57-69. (In Persian).

Lari G., 2021. Applying Circular Economy in Municipal Waste Management by Optimal Approach of Game Theory. *Int J Waste Resour 11, 393.*

Lisbona, P., Pascual, S. and Pérez, V., 2023. Waste to Energy: Trends and Perspectives. *Chemical Engineering Journal Advances*, p.100494.

Nasrollahi, S., Alimardani, R., Sharifi, M., Taghizadeh-Yazdi, M.R. (2016). Prediction of Tehran solid waste production by using of neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 47(1), 175-183. (In Persian).

Omrani, G.A., Mohseni, N., Haghighat K., & Javid A.H. (2009). Technical and sanitary evaluation of methane extraction from Shiraz landfill. Environmental Science and Technology, 10 (4): 174-182. (In Persian).

Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. Fuel, 84(5), 487-494.

Ryu, C. (2010). Potential of Municipal Solid Waste for Renewable Energy Production and Reduction of Greenhouse Gas Emissions in South Korea. Journal of the Air & Waste Management Association, 60(2), 176–183.

Tan, S. T., Hashim, H., Lim, J. S., Ho, W. S., Lee, C. T., & Yan, J. (2014). Energy and emissions benefits of renewable energy derived from municipal solid waste: Analysis of a low carbon scenario in Malaysia. Applied Energy, 136, 797-804.

Tehran waste management organization, Tehran Municipality, Iran, Statistical Report of 2021 (In Persian).

Toha, M., & Rahman, M. M. (2023). Estimation and prediction of methane gas generation from landfill sites in Dhaka city, Bangladesh. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 7, 100302.

United States Environmental Protection Agency. (2005). Landfill gas emissions model. Version 3.02 user's guide.

Wang H., Nie Y., 2001. Remedial Strategies for Municipal Solid Waste Management in China. *Journal of the Air and Waste Management Association*; 51, 264-272.

Zhao Y., Christensen, TH., Lu W., Wu H., Wang H., 2011. Environmental impact assessment of solid waste management in Beijing City,China.*Waste management*; 31, 793-799.