



Mathematical modeling of energy and emissions in the co-gasification of sewage sludge and municipal solid waste:

A case study of Tehran

Niloofer Sadeghi Looyeh¹ | Shahin Rafiee^{2✉} | Morteza Aghbashloo³ | Hossein Mobli⁴

1. Department of Mechanical Engineering of Agriculture Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Iran. E-mail: niloofersadeghiiool@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Mechanical Engineering of Agriculture Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Iran. E-mail: shahinrafiee@ut.ac.ir
3. Department of Mechanical Engineering of Agriculture Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Iran. E-mail: maghbashlo@ut.ac.ir
4. Department of Mechanical Engineering of Agriculture Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Iran. E-mail: hmobli@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 11 August 2024

Received in revised form 26

November 2024

Accepted 10 March 2024

Published online 01 July 2025

ABSTRACT

With the growth of population, the production of waste and wastewater has also increased significantly, making the management of this huge volume of waste a serious challenge. At the same time as the increase in the production of waste and wastewater, the demand for energy is also constantly growing. Since most of Iran's energy sources are fossil fuels, it is necessary to look for a renewable source of energy. Sewage sludge and waste, as biomass, are suitable sources for energy production. In this research, using mathematical modeling, the production of energy and the emission of gases from the simultaneous gasification of Tehran's waste and wastewater have been investigated. The results show that this method is not only an efficient method for the safe and hygienic disposal of sewage sludge and waste but can also be a sustainable and renewable source of energy production. In addition, by simultaneously gasifying the waste and sewage sludge of South Tehran wastewater treatment plant, about 2000 megawatt-hours of electricity can be recovered annually, which can be used for household and industrial purposes. In addition, this process is capable of processing about 5,000 tons of waste and sludge annually and produces about 2 million kilograms of carbon dioxide equivalent emissions.

Keywords:

*Gasification,
Management,
Modeling,
Sewage,
Waste.*

Cite this article: Sadeghi Looyeh, N., Rafiee, Sh, Aghbashloo, M., & Mobli, H. (2025). Mathematical modeling of energy and emissions in the co-gasification of sewage sludge and municipal solid waste: A case study of Tehran. *Journal of Natural Environment*, 78 (Monitoring and Management of Natural Environmental Pollutants), 255-265. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.380076.2701>



مدل سازی ریاضی انرژی و انتشارات در فرآیند گازی سازی همزمان لجن فاضلاب و پسماند (مطالعه شهر تهران)

نیلوفر صادقی لویه^۱ | شاهین رفیعی^۲ | مرتضی آغباشلو^۳ | حسین مبلی^۴

۱. گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: niloofarsadeghiioool@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: shahinrafiee@ut.ac.ir
۳. گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: maghbashlo@ut.ac.ir
۴. گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران. رایانامه: hmobli@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	با رشد جمعیت، تولید پسماند و فاضلاب نیز به طور چشمگیری افزایش یافته و مدیریت این حجم عظیم از مواد زائد، به چالشی جدی تبدیل شده است. همزمان با افزایش تولید زباله و فاضلاب، تقاضا برای انرژی نیز به طور پیوسته رو به رشد است. از آنجا که عمده منابع تولیدکننده انرژی در ایران از سوخت های فسیلی می باشد؛ بنابراین می بایست به دنبال منبعی تجدیدپذیر برای تولید انرژی بود. لجن فاضلاب و پسماند به عنوان زیست توده، منبع مناسبی برای تولید انرژی می باشند. در این پژوهش، با بهره گیری از مدل سازی ریاضی، به بررسی تولید انرژی و انتشار گازهای حاصل از گازسازی همزمان پسماند و فاضلاب شهر تهران پرداخته شده است. نتایج نشان می دهند که این روش، نه تنها روشی کارآمد برای دفع ایمن و بهداشتی لجن فاضلاب و پسماند است، بلکه می تواند منبعی پایدار و تجدیدپذیر برای تولید انرژی باشد. علاوه بر این، با گازی سازی همزمان پسماند و لجن فاضلاب تصفیه خانه جنوب تهران، سالانه حدود ۲۰۰۰ مگاوات ساعت الکتریسیته قابل بازیابی است که می تواند برای مصارف خانگی و صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، این فرآیند سالانه قادر به پردازش حدود ۵ هزار تن پسماند و لجن می باشد. در کنار تولید حدود ۲ میلیون کیلوگرم کربن دی اکسید معادل انتشارات تولیدی، با گازی سازی لجن فاضلاب و پسماند شهر تهران سالانه از انتشار حدود ۱۶۰۰ کیلوگرم کربن دی اکسید معادل به محیط زیست جلوگیری می شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰	
کلیدواژه ها: پسماند، گازی سازی، لجن فاضلاب، مدیریت، مدل سازی.	

استاد: صادقی لویه، نیلوفر؛ رفیعی، شاهین؛ آغباشلو، مرتضی؛ و مبلی، حسین (۱۴۰۴). مدل سازی ریاضی انرژی و انتشارات در فرآیند گازی سازی همزمان لجن فاضلاب و پسماند (مطالعه شهر تهران). محیط زیست طبیعی، ۷۸ (ویژه نامه پایش و مدیریت آلاینده های محیط زیست طبیعی)، ۲۶۵-۲۵۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.380076.2701>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

با افزایش جمعیت در جهان نیاز به انرژی افزایش یافته است. به طوری که تنها در بخش حمل و نقل استفاده از انرژی در ۳۰ سال گذشته دو برابر شده و انتظار می رود تا سال ۲۰۵۰ نیز مجدداً دو برابر شود (Farhat et al., 2022). از آنجا که عمده منابع تولیدکننده انرژی، منبع فسیلی داشته و تجدیدنپذیر هستند، بنابراین می بایست به دنبال منبعی تجدیدپذیر برای جبران کمبود انرژی در دنیا بود.

در ایران سالانه حجم بالایی پسماند و فاضلاب تولید می شود به طوری که در ایران روزانه بیش از ۶۰ هزار تن زباله تولید شده (Peyvastegar and Ansari, 2017) که از این مقدار بیش از ۷ هزار تن آن متعلق به شهر تهران می باشد. متوسط سرانه تولید زباله در شهر تهران ۳۲۰ کیلوگرم در سال است. سرانه تولید روزانه زباله در جهان ۲۵۰ تا ۳۰۰ گرم است که در ایران ۶۵۰ گرم و در شمال تهران ۱۲۰۰ گرم است (Hafezi et al., 2015). علاوه بر پسماند، میزان فاضلاب تولیدی نیز قابل توجه بوده و در کشورمان سالیانه حدود یک میلیون و هفتصد متر مکعب فاضلاب تولید می شود. لجن فاضلاب و پسماند تولید شده به عنوان یک زیست توده، پتانسیل بالایی برای تولید انرژی دارند به طوری که سالیانه پنج هزار گیگاژول انرژی و یا حدود ۱۴۰ میلیون کیلووات ساعت برق از فاضلاب تولید می شود (Sadeghi et al., 2019).

در راستای مدیریت همزمان پسماند و فاضلاب، پژوهش های متعددی انجام شده که اغلب آن به فناوری هضم بی هوازی این دو ماده اشاره دارد. Miranzadeh و همکاران (۲۰۲۴)، در پژوهشی چالش های کلیدی مؤثر بر هضم بی هوازی لجن فاضلاب تصفیه خانه ها و زباله های آلی را بررسی کرده و جنبه های اقتصادی و محیط زیستی هضم همزمان را ارزیابی کرده اند. Sadeghi و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی به مدیریت همزمان فاضلاب و پسماند شهر تهران پرداخته اند. آنها ابتدا اطلاعات شهر تهران را بر روی مدل فراساختار پیاده سازی کرده و سپس دو سناریوی برتر از دیدگاه انرژی با رویکرد بازیابی گرما و رویکرد تولید الکتریسیته را به عنوان بهترین سناریوها معرفی کرده اند. Chen و همکاران (۲۰۱۹)، در پژوهشی به تجزیه و تحلیل محیط زیستی، انرژی و اقتصادی پردازش همزمان پسماند شهری و لجن فاضلاب چین پرداختند. آنها چهار سناریوی (تک سوزی زباله جامد شهری، تک سوزی لجن فاضلاب، سوزاندن همزمان لجن فاضلاب و پسماند جامد به صورت سنتی، و روش های یکپارچه) مختلف مطرح کرده و بهترین سناریو از دیدگاه محیط زیستی، انرژی و اقتصادی را معرفی کردند. Rabii و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی به بررسی هضم همزمان پسماند آلی و لجن فاضلاب غلیظ شده پرداختند. آنها همچنین اثرات نسبت های اختلاط مختلف را بر روی میزان متان تولید شده بررسی کرده و بهترین نسبت اختلاط برای تولید متان را گزارش کردند.

همان طور که پیش از این نیز اشاره شد، پسماند و فاضلاب هر کدام پتانسیل بالایی برای تولید انرژی دارند. مدیریت همزمان این دو ماده زائد در کنار یکدیگر علاوه بر تولید انرژی، مزایای فراوانی از جمله صرفه جویی در هزینه ها، نیاز کمتر به فضا، افزایش بازدهی فرآیند، و غیره دارد. در این پژوهش، پس از مدل سازی ریاضی فرآیند، معادلات در محیط پایتون کد نویسی شده و اطلاعات پسماند و فاضلاب شهر تهران بر روی آن پیاده سازی شده است. در نهایت میزان انرژی حاصل از گازی سازی همزمان لجن فاضلاب و پسماند محاسبه شده است.

روش شناسی پژوهش

شهر تهران به عنوان پایتخت ایران و با بیش از هشت میلیون نفر جمعیت روزانه بیش از هفت هزار تن پسماند تولید می کند. پسماند تولید شده توسط ایستگاه های مختلف جمع آوری شده و در نهایت وارد مرکز دفع پسماند آرادکوه واقع در کهریزک در شهرستان ری می شود. علاوه بر این در شهر تهران روزانه حجم بالایی فاضلاب نیز تولید می شود که این فاضلاب توسط تصفیه خانه های موجود، پاکسازی و قابل استفاده در کشاورزی، صنعت، و غیره خواهد شد. شهر تهران دارای ۷ تصفیه خانه فاضلاب در حال بهره برداری و یک تصفیه خانه خارج از مدار است (Sadeghi et al., 2019). تصفیه خانه مورد مطالعه در این پژوهش تصفیه خانه جنوب تهران است این تصفیه خانه یکی از پیشرفته ترین تصفیه خانه های فاضلاب کشور بوده و جمعیتی در حدود ۳ میلیون نفر را تحت پوشش قرار داده است. این تصفیه خانه در شهرستان ری واقع است.

بررسی مقادیر فاضلاب تصفیه خانه جنوب تهران: مقدار فاضلاب در نظر گرفته شده در این پژوهش شامل فاضلاب تصفیه خانه جنوب می باشد. از آنجا که میزان فاضلاب ورودی به تصفیه خانه ها در ایام و فصول مختلف سال متفاوت است (در زمستان ۱۵ درصد بیشتر از تابستان است) (Peyvastegar et al., 2017) بنابراین مقادیر ورودی به تصفیه خانه ها به دو دسته فصول گرم و فصول سرد دسته بندی شده و شش ماه اول سال به عنوان فصل گرم و شش ماه دوم سال به عنوان فصل سرد در نظر گرفته شده است. مقادیر فاضلاب ورودی به تصفیه خانه جنوب تهران در سال ۱۴۰۱ در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مقدار فاضلاب ورودی به تصفیه خانه جنوب تهران (Water and Wastewater Company, 2023)

ماه	فاضلاب ورودی (برحسب متر مکعب)
فروردین	۱۷۸۰۹۷۱۷
اردیبهشت	17809717
خرداد	17809717
تیر	17809717
مرداد	17809717
شهریور	17809717
مهر	19820490
آبان	19820490
آذر	19820490
دی	19820490
بهمن	19820490
اسفند	19159807

بررسی پسماند ورودی به مجتمع دفع پسماند آرادکوه: پسماند بررسی شده در این پژوهش، شامل پسماند جامد شهری ورودی به مجتمع دفع آرادکوه واقع در تهران است. پسماند ساختمانی و بیمارستانی در این پژوهش در نظر گرفته نشده است. مقادیر پسماند در ماه های سال یکسان نبوده و مقادیر آن متفاوت است. در جدول ۲ میزان پسماند تولید شده در سال ۱۴۰۲ در شهر تهران گزارش شده است.

جدول ۲- مقدار پسماند ورودی به آرادکوه به صورت ماهانه بر حسب تن در شهر تهران (Waste Management Organization of Tehran Municipality, 2023)

ماه	پسماند ساختمانی	پسماند پزشکی	پسماند جامد شهری
فروردین	۳۹۷۰۲	۲۹۲۶	۱۶۲۴۳۳
اردیبهشت	۳۳۳۷۲	۳۳۱۶	۱۸۷۳۰۱
خرداد	۳۱۳۶۲	۳۸۳۱	۱۷۳۵۰۱
تیر	۱۹۵۱۸	۴۲۳۳	۱۷۱۹۰۹
مرداد	۲۲۵۰۰	۳۹۸۶	۱۸۱۲۷۷
شهریور	۲۰۵۱۴	۴۰۳۶	۱۷۰۱۰۱
مهر	۱۹۶۹۲	۴۲۱۱	۱۶۶۵۴۴
آبان	۳۰۵۵۲	۴۲۹۵	۱۶۸۶۱۲
آذر	۳۴۱۰۴	۴۳۲۸	۱۷۳۹۰۹
دی	۵۷۸۲۲	۴۰۲۲	۱۶۴۸۱۹
بهمن	۵۳۱۲۴	۴۰۰۳	۱۶۳۳۹۱
اسفند	۳۸۰۹۴	۳۹۴۱	۱۷۰۶۰۹

در جدول های ۳ و ۴ به ترتیب ضریب تبدیل فیزیکی (درصد ترکیب فیزیکی) و ترکیب شیمیایی پسماند، ارائه شده است. با ضرب ترکیب فیزیکی در ترکیب شیمیایی متناظر، مقادیر برحسب ترکیب شیمیایی محاسبه می شود.

جدول ۳- ضریب تبدیل فیزیکی اجزا پسماند (Waste Management Organization of Tehran Municipality, 2023)

ترکیبات	چوب	فلزات	شیشه	پلاستیک	کاغذ	مواد آلی
ضریب تبدیل	۰/۴	۱/۸	۰/۸۲	۲/۴۴	۴	۶۲/۳۳

جدول ۴- ضریب تبدیل شیمیایی اجزا پسماند (Waste Management Organization of Tehran Municipality, 2023)

درصد رطوبت	S	N	O	H	C	مواد آلی
۷۰	۰/۰۰۱۴۵	۰/۰۰۷۴۷	۰/۰۷۰۵	۰/۰۲۳۷	۰/۱۶	مواد آلی
۸	۰/۰۰۱۰۲	۰/۰۰۱۶۵	۰/۳۶۸	۰/۰۵۲۸	۰/۳۸۵	کاغذ
۲	۰/۰۰۳۳	۰/۰۱۶۶	۰/۰۸۲۶	۰/۰۶۰۶	۰/۶۷۲	پلاستیک
۲	.	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۵۲	شیشه
۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۵	۰/۰۴۳	۰/۰۰۶	۰/۰۴۵	فلزات
۱۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۳۰۷	۰/۰۴۸	۰/۴	چوب

با ضرب مقادیر پسماند تولید شده (به صورت ماهانه) در درصد ترکیب فیزیکی، مقادیر پسماند بر حسب ترکیب فیزیکی محاسبه شده است. جدول ۵ مقادیر ترکیب فیزیکی پسماند ورودی به مرکز دفع آرادکوه را نشان می دهد.

جدول ۵- مقادیر ترکیب فیزیکی پسماند ورودی به آرادکوه بر حسب تن در ماه (Waste Management Organization of Tehran Municipality, 2023)

ماه	چوب	فلزات	شیشه	پلاستیک	کاغذ	مواد آلی
فروردین	۶۴۹/۷۳۲۸	۲۹۲۳/۷۹۸	۱۳۳۱/۹۵۲	۳۹۶۳/۳۷	۶۴۹۷/۳۲۸	۱۰۱۲۴۴/۶
اردیبهشت	۷۴۹/۲۰۴۴	۳۳۷۱/۴۲	۱۵۳۵/۸۶۹	۴۵۷۰/۱۴۷	۷۴۹۲/۰۴۴	۱۱۶۷۳۴/۸
خرداد	۶۹۴/۰۰۷۱	۳۱۲۳/۰۳۲	۱۴۲۲/۷۱۴	۴۲۳۳/۴۴۳	۶۹۴۰/۰۷۱	۱۰۸۱۴۳/۶
تیر	۶۸۷/۶۳۹۲	۳۰۹۴/۳۷۷	۱۴۰۹/۶۶	۴۱۹۴/۵۹۹	۶۸۷۶/۳۹۲	۱۰۷۱۵۱/۴
مرداد	۷۲۵/۱۰۹۱	۳۲۶۲/۹۹۱	۱۴۸۶/۴۷۴	۴۴۲۳/۱۶۶	۷۲۵۱/۰۹۱	۱۱۲۹۹۰/۱
شهریور	۶۸۰/۴۰۶۵	۳۰۶۱/۸۲۹	۱۳۹۴/۸۳۳	۴۱۵۰/۴۷۹	۶۸۰۴/۰۶۵	۱۰۶۰۲۴/۳
مهر	۶۶۶/۱۷۹۶	۲۹۹۷/۸۰۸	۱۳۶۵/۶۶۸	۴۰۶۳/۶۹۶	۶۶۱/۷۹۶	۱۰۳۸۰۷/۴
آبان	۶۷۴/۴۵۱۸	۳۰۳۵/۰۳۳	۱۳۸۲/۶۲۶	۴۱۱۴/۱۵۶	۶۷۴۴/۵۱۸	۱۰۵۰۹۶/۵
آذر	۶۹۵/۶۳۷	۳۱۳۰/۳۶۶	۱۴۲۶/۰۵۶	۴۲۴۳/۳۸۶	۶۹۵۶/۳۷	۱۰۸۳۹۷/۶
دی	۶۵۹/۲۷۸۱	۲۹۶۶/۷۵۱	۱۳۵۱/۵۲	۴۰۲۱/۵۹۶	۶۵۹۲/۷۸۱	۱۰۲۷۳۲
بهمن	۶۵۳/۵۶۵۳	۲۹۴۱/۰۴۴	۱۳۳۹/۸۰۹	۳۹۸۶/۷۴۸	۶۵۳۵/۶۵۳	۱۰۱۸۴۱/۸
اسفند	۶۸۲/۴۳۶۹	۳۰۷۰/۹۶۶	۱۳۹۸/۹۹۶	۴۱۶۲/۸۶۵	۶۸۲۴/۳۶۹	۱۰۶۳۴۰/۷

مدل سازی انرژی فرایند گازی سازی: گازی سازی پسماند، فرآیندی است که در آن مواد زائد جامد، مانند زباله های شهری و صنعتی، و غیره در دمای بالا و بدون احتراق کامل به گاز تبدیل می شوند. این گاز، که معمولاً «گاز سنتز ۱» نامیده می شود، ترکیبی از گازهای قابل احتراق مانند مونوکسید کربن و هیدروژن است و می تواند به عنوان سوخت برای تولید گرما، برق یا حتی به عنوان ماده اولیه برای تولید سوخت های مایع سنتزی مانند بیواتانول، متانول، و غیره استفاده شود. از آنجا که گازی سازی یک تیمار حرارتی است پس مواد ورودی باید مواد خشک باشد؛ زیرا رطوبت بالا باعث کاهش شدید بازده فرایند می شود. از آنجا که پسماند جامد شهری به صورت ترکیبی از موادی با رطوبت بالاست، ابتدا با استفاده از رابطه ۱ مقدار ماده خشک ورودی از پسماند جامد شهر تهران محاسبه شده و مقادیر آن در جدول ۶ ارائه شده است.

$$\text{رابطه ۱)} \quad (\text{درصد رطوبت مواد} - 1) \times \text{مقادیر پسماند ورودی} = \text{جامدات خشک پسماند}$$

جدول ۶- مقادیر ماده خشک پسماند ورودی برحسب تن

ماه	چوب	فلزات	شیشه	پلاستیک	کاغذ	مواد آلی
فروردین	۵۵۲/۲۷۲۹	۲۸۶۵/۳۲۲	۱۳۰۵/۳۱۳	۳۸۸۴/۱۰۳	۵۹۷۷/۵۴۲	30373/38
اردیبهشت	۶۳۶/۸۲۳۷	۳۳۰۳/۹۹۱	۱۵۰۵/۱۵۲	۴۴۷۸/۷۴۴	۶۸۹۲/۶۸	35023/43
خرداد	۵۸۹/۹۰۶	۳۰۶۰/۵۷۱	۱۳۹۴/۲۶	۴۱۴۸/۷۴۴	۶۳۸۴/۸۶۵	32443/09
تیر	۵۸۴/۴۹۳۴	۳۰۳۲/۴۸۹	۱۳۸۱/۴۶۷	۴۱۱۰/۷۰۷	۶۳۲۶/۲۸۱	32145/42
مرداد	۶۱۶/۳۴۲۸	۳۱۹۷/۷۳۱	۱۴۵۶/۷۴۴	۴۳۳۴/۷۰۲	۶۶۷۱/۰۰۴	33897/04
شهریور	۵۷۸/۳۴۵۵	۳۰۰۰/۵۹۲	۱۳۶۶/۹۳۷	۴۰۶۷/۴۷	۶۲۵۹/۷۳۹	31807/3
مهر	۵۶۶/۲۵۳۷	۲۹۳۷/۸۵۲	۱۳۳۸/۳۵۵	۳۹۸۲/۴۲۲	۶۱۲۸/۸۵۳	31142/23
آبان	۵۷۳/۲۸۴	۲۹۷۴/۳۳۳	۱۳۵۴/۹۷۴	۴۰۳۱/۸۷۳	۶۲۰۴/۹۵۷	31528/94
آذر	۵۹۱/۲۹۱۴	۳۰۶۷/۷۵۹	۱۳۹۷/۵۳۵	۴۱۵۸/۵۱۸	۶۳۹۹/۸۶	32519/29
دی	۵۶۰/۳۸۶۴	۲۹۰۷/۴۱۶	۱۳۲۴/۴۹	۳۹۴۱/۱۶۴	۶۰۶۵/۳۵۸	30819/6
بهمن	۵۵۵/۵۳۰۵	۲۸۸۲/۲۲۳	۱۳۱۳/۰۱۳	۳۹۰۷/۰۱۳	۶۰۱۲/۸۰۱	30552/54
اسفند	۵۸۰/۰۷۱۳	۳۰۰۹/۵۴۷	۱۳۷۱/۰۱۶	۴۰۷۹/۶۰۸	۶۲۷۸/۴۱۹	31902/22

ضریب تولید لجن برابر نسبت میزان لجن تولیدی بر میزان فاضلاب ورودی به تصفیه خانه می باشد. از این لجن در صورت تصفیه مناسب و کاهش آلاینده های می توان به عنوان کود استفاده کرد. این ضریب در تصفیه خانه فاضلاب بسته به عواملی از جمله: میزان فاضلاب ورودی، فرآیند مورد استفاده، دما و غیره متغیر است. این ضریب در سال ۱۴۰۱ برای تصفیه خانه جنوب تهران برابر ۰/۰۶ کیلوگرم بر متر مکعب فاضلاب ورودی بوده است (Riyazati et al., 2024). با ضرب مقادیر فاضلاب ورودی در این ضریب، میزان لجن فاضلاب آگیری شده، به صورت ماهانه محاسبه شده است. در جدول ۷ میزان لجن فاضلاب تولیدی در این تصفیه خانه نشان داده شده است.

جدول ۷- مقدار لجن فاضلاب تولید شده در تصفیه خانه جنوب تهران در سال ۱۴۰۱

ماه	لجن تولیدی (برحسب تن)
فروردین	۱۰۶۸/۵۸۳
اردیبهشت	۱۰۶۸/۵۸۳
خرداد	۱۰۶۸/۵۸۳
تیر	۱۰۶۸/۵۸۳
مرداد	۱۰۶۸/۵۸۳
شهریور	۱۰۶۸/۵۸۳
مهر	۱۱۸۹/۲۲۹
آبان	۱۱۸۹/۲۲۹
آذر	۱۱۸۹/۲۲۹
دی	۱۱۸۹/۲۲۹
بهمن	۱۱۸۹/۲۲۹
اسفند	۱۱۴۹/۵۸۸

در تیمارهای حرارتی، ارزش حرارتی مواد ورودی دارای اهمیت بسیاری است؛ زیرا تأثیر مستقیم بر میزان انرژی بازیابی شده دارد. برای محاسبه ارزش حرارتی مواد ورودی به تجهیزات گازی سازی از رابطه ۲ استفاده شده است (Hosseini et al., 2020).

$$\text{HHV} = 337C + 1419\left(H_2 + \frac{O_2}{8}\right) + 93S + 23N \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن HHV: ارزش حرارتی مواد خشک ورودی (برحسب مگاژول بر تن) می باشد. همچنین مقادیر C، H₂، O₂ و N برابر درصد وزنی هر کدام از عناصر در ترکیبات ورودی می باشد. با ضرب ترکیب فیزیکی پسماند در مقادیر ترکیب شیمیایی متناظر آن، مقادیر این عناصر برای پسماند محاسبه شده است. در این پژوهش لجن فاضلاب به عنوان ماده آلی در نظر گرفته شده و با ضرب

مقدار لجن در مقادیر متناظر آن در ترکیب شیمیایی مقادیر این عناصر محاسبه شده است. در جدول ۸ مقادیر درصد وزنی هرکدام از این عناصر ارائه شده است. با قرار دادن این مقادیر در رابطه ۲ مقادیر ارزش حرارتی پسماند و فاضلاب محاسبه شده است. در جدول ۹ مقادیر ارزش حرارتی آورده شده است.

جدول ۸- درصد وزنی هرکدام از عناصر در پسماند و لجن فاضلاب

C	H	O	S	N	
۰/۲۲۵۲۷۴	۰/۰۲۹۲۶	۰/۱۱۰۳۱۱	۰/۰۰۱۴۱۹	۰/۰۰۶۸۰۲	درصد وزنی در پسماند ^۲
۰/۱۶	۰/۰۲۳۷	۰/۰۰۱۴۵	۰/۰۷۰۵	۰/۰۰۷۴۷	درصد وزنی فاضلاب ^۳

جدول ۹- مقادیر ارزش حرارتی پسماند و فاضلاب شهر تهران

واحد		
ارزش حرارتی پسماند	۹۸/۰۴۹۳	کیلوژول بر کیلوگرم
ارزش حرارتی لجن فاضلاب	۹۴/۰۱۹۶	کیلوژول بر کیلوگرم

تولید انرژی در فرآیند گازی سازی به روش های متفاوتی امکانپذیر است. یکی از این روش ها استفاده از گاز سنتز برای تولید برق است. با استفاده از رابطه ۳ میزان الکتریسیته بازیابی شده در فرآیند گازی سازی پسماند و فاضلاب تهران محاسبه شده است. لازم به ذکر است در فرآیند گازی سازی پسماند و فاضلاب، شیشه و فلزات شرکت نکرده اند (Rajaeifar et al., 2017).

$$E = m_{dry} \times HHV \times 1.157 \times 10^{-5} \times \eta \times t \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن E: میزان الکتریسیته تولیدی (مگاژول) در فرآیند گازی سازی، m_{dry} : مقدار ماده خشک ورودی، HHV: ارزش حرارتی مواد خشک ورودی، η : بازده فرآیند که در این پژوهش ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است (Rajaeifar et al., 2017). در این رابطه، t: برابر زمان بود که در این پژوهش، فرآیند گازی سازی ۲۱ ساعت در روز (۳ نوبت ۷ ساعته) در نظر گرفته شده است. از میزان الکتریسیته تولیدی در فرآیند گازی سازی، بخشی صرف خود سامانه شده و مابقی مورد استفاده قرار می گیرد. برق مصرفی گازی سازی ۲۰ درصد برق تولیدی است و مابقی بازیابی شده و به شبکه تزریق می شود. با استفاده از روابط ۴ و ۵ مقدار انرژی مصرفی و بازیابی شده در فرآیند گازی سازی محاسبه شده است (Rajaeifar et al., 2017).

$$E_{recover} = 0.8 \times E \quad \text{رابطه ۴}$$

$$E_{consum} = 0.2 \times E \quad \text{رابطه ۵}$$

همچنین در این فناوری ۳۰ درصد از ارزش حرارتی ماده خشک به حرارت تبدیل شده که از این میزان، ۲۴ درصد آن حرارت تولیدی و مابقی حرارت مصرفی است. با استفاده از روابط ۶ و ۷ مقدار حرارت مصرفی و تولیدی محاسبه شده است (Rajaeifar et al., 2017).

$$H_{consum} = HHV \times (0.3-0.24) \times m_{dry} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$H_{product} = HHV \times 0.24 \times m_{dry} \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن H_{consum} و $H_{product}$ به ترتیب برابر گرمای مصرفی و گرمای تولیدی در فرآیند گازی سازی است. در مدل سازی انرژی، دیدگاه این پژوهش میزان انرژی اجتناب شده است. به عبارتی بررسی شده که با گازی سازی پسماند و لجن فاضلاب، ضمن دفع این مواد، مقداری انرژی نیز تولید می شود که این انرژی معادل اجتناب از مصرف چند مترمکعب گاز طبیعی می باشد. در جدول ۱۰ مقادیر محصولات به ازای متر مکعب گاز طبیعی ارائه شده است. این ضرایب نشان می دهد در صورتی که برای تولید محصول

^۲منبع: آمار سازمان پسماند شهر تهران

^۳Vadenbo et al, 2014

مورد نظر از گاز طبیعی استفاده شود، چند متر مکعب گاز مصرف می شود. همچنین خروجی انرژی اجتناب شده با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شده است.

رابطه ۸) ضریب انرژی در صورت استفاده از گاز طبیعی $\times$ محصولات بازیابی شده = انرژی اجتناب شده فناوری

جدول ۱۰- ضرایب تبدیل انرژی بر حسب متر مکعب گاز طبیعی		
الکتریسیته ^۴	۱۰/۵	kWh/m ³
گرما	۳۱۷۳۶	kJ/m ³

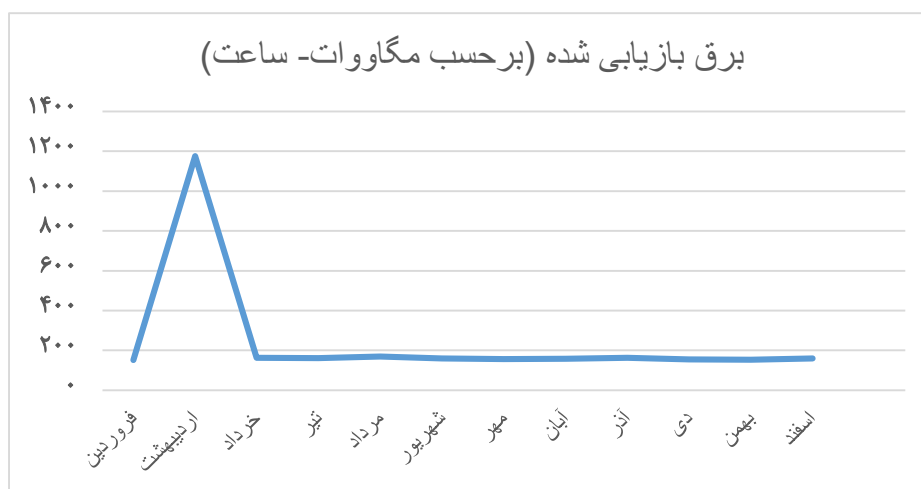
مدل سازی انتشارات: مقدار انتشارات فناوری گازی سازی در این پژوهش برحسب کربن دی اکسید معادل محاسبه شده است. ضریب انتشار کربن دی اکسید در فرآیند گازی سازی برابر ۰/۸۶۸ کیلوگرم کربن دی اکسید معادل بر کیلووات ساعت می باشد (Wang et al., 2022). با ضرب این مقدار در میزان برق تولید شده در فرآیند گازی سازی مقادیر انتشارات حاصل از گازی سازی مواد ورودی محاسبه شده است. در این پژوهش همچنین میزان انتشارات اجتناب شده نیز بررسی شده است. به عبارتی بررسی شده که گازی سازی همزمان لجن فاضلاب و پسماند شهر تهران، ضمن دفع این مواد، با تولید الکتریسیته از انتشار مقادیری آلاینده گی به محیط زیست نیز جلوگیری به عمل آمده است. با استفاده از رابطه ۹ مقادیر انتشارات اجتناب شده محاسبه شده است. رابطه ۹) انتشارات گازی سازی - ۱/۹۲ $\times$ محصولات (الکتریسیته و گرما) = انتشارات اجتناب شده

یافته های پژوهش و بحث

به کمک معادلات ریاضی و مقادیر ورودی پسماند و لجن فاضلاب شهر تهران، مقادیر تولید انرژی با استفاده از گازی سازی پسماند و لجن فاضلاب شهر تهران محاسبه شده و در جدول ۱۱ ارائه شده است. در نمودار شکل ۱ مقادیر الکتریسیته بازیابی شده در فناوری گازی سازی پسماند و لجن فاضلاب شهر تهران نشان داده شده است. بیشترین میزان انرژی بازیابی شده به ترتیب در ماه های اردیبهشت و مرداد و کمترین میزان برق بازیابی شده در ماه فروردین می باشد. علت تغییر در میزان برق تولیدی را می توان به علت تغییر در میزان پسماند و فاضلاب تولیدی در ماه های مختلف اشاره کرد. به طور کلی در شهر تهران با گازی سازی همزمان پسماند و فاضلاب حدود ۲ هزار مگاوات ساعت برق تولید شده است که می توان از آن برای مصارف مختلف بهره برد. برای تولید این میزان برق نیاز به حدود ۱۸۳ هزار متر مکعب گاز طبیعی بوده که با استفاده از این فناوری از مصرف آن اجتناب شده است.

جدول ۱۱- میزان برق تولید شده از گازی سازی همزمان پسماند و فاضلاب شهر تهران

ماه	برق تولیدی (برحسب مگاوات-ساعت)
فروردین	۱۵۲/۰۰۷۶
اردیبهشت	۱۷۵/۲۷۳۵
خرداد	۱۶۲/۳۶۳۱
تیر	۱۶۰/۸۷۳۷
مرداد	۱۶۹/۶۳۷۷
شهریور	۱۵۹/۱۸۲
مهر	۱۵۵/۸۵۸۷
آبان	۱۵۷/۷۹۳۶
آذر	۱۶۲/۷۴۸۶
دی	۱۵۴/۲۴۴۵
بهمن	۱۵۲/۹۰۸۳
اسفند	۱۵۹/۶۵۹۸
مجموع	۱۹۲۲/۵۴۲



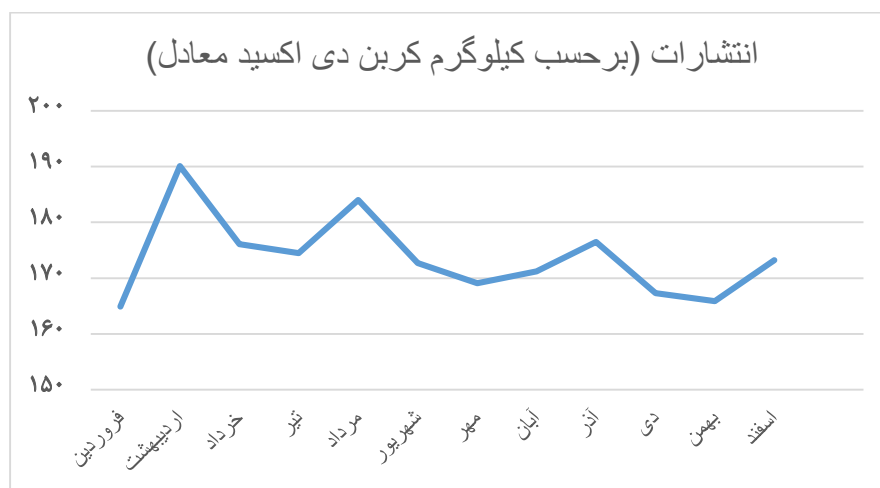
شکل ۱- نمودار میزان الکتریسیته بازیابی شده در فناوری گازی‌سازی پسماند و لجن فاضلاب شهر تهران

علاوه بر برق تولیدی با گازی‌سازی همزمان مقادیر انتشارات نیز تولید شده است که در جدول ۱۲ ارائه شده است. از آنجا که نرخ تولید انتشارات با نرخ تولید مواد ورودی رابطه مستقیم دارد، بر این اساس، بیشترین میزان تولید انتشارات مربوط به اردیبهشت و کمترین میزان تولید آلاینده‌گی مربوط به ماه فروردین است. در نمودار شکل ۲ میزان انتشارات تولیدی در ماه‌های مختلف نشان داده شده است. بیشترین میزان انتشارات تولیدی در ماه اردیبهشت می‌باشد. همچنین با گازی‌سازی پسماند و فاضلاب شهر تهران سالانه حدود ۲ هزار کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل، آلاینده‌گی تولید می‌شود. اما در کنار این میزان آلاینده‌گی حدود ۲ مگاوات ساعت برق نیز تولید شده که در صورتی که برای تولید این میزان الکتریسیته از سوخت‌های فسیلی استفاده شود، حدود ۳۷۰۰ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل، انتشارات تولید می‌شود. با کسر انتشارات تولیدی خود فرآیند، می‌توان دریافت با استفاده از این فناوری در مجموع از انتشار حدود ۱۶۰۰ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل، انتشارات به محیط‌زیست جلوگیری می‌شود.

جدول ۱۲- میزان انتشارات ناشی از گازی‌سازی همزمان پسماند و لجن فاضلاب تهران

ماه	انتشارات (برحسب کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل)
فروردین	۱۶۴/۹۲۸۲
اردیبهشت	۱۹۰/۱۷۱۷
خرداد	۱۷۶/۱۶۴
تیر	۱۷۴/۵۴۸
مرداد	۱۸۴/۰۵۶۹
شهریور	۱۷۲/۷۱۲۵
مهر	۱۶۹/۱۰۶۷
آبان	۱۷۱/۲۰۶۱
آذر	۱۷۶/۵۸۲۲
دی	۱۶۷/۳۵۵۳
بهمن	۱۶۵/۹۰۵۵
اسفند	۱۷۳/۲۳۰۹
مجموع	۲۰۸۵/۹۶۴

همان‌طور که پیش از این نیز به آن اشاره شد، می‌توان از گاز سنتز تولیدی به‌جای تولید برق سوخت‌هایی مانند بیواتانول تولید کرد. این عمل تحت فرآیندی به نام فیشرتروپس انجام شده و از ضریب ۳۱۹ لیتر بر تن پسماند ورودی استفاده شده است (Hosseini et al., 2020). در این پژوهش نیز با ضرب مقدار پسماند و فاضلاب ورودی (حدود ۵ هزار تن) در ضریب تولید بیواتانول، میزان حدود ۱۶۴ میلیون لیتر بیواتانول ناشی از گازی‌سازی همزمان پسماند و لجن فاضلاب به‌دست آمده است.



شکل ۲- نمودار میزان انتشارات تولیدی ناشی از گازی سازی پسماند و لجن فاضلاب شهر تهران

نتیجه گیری

با مدیریت همزمان پسماند و لجن فاضلاب می توان مقادیر قابل توجهی انرژی از طریق گازی سازی مواد ورودی کسب کرد. در جدول ۱۳ میزان برق تولیدی، مصرفی، بازیابی شده، و انتشارات تولیدی در فرآیند گازی سازی همزمان پسماند و فاضلاب شهر تهران نشان داده شده است. با نگاهی به این اعداد می توان دریافت با مدیریت صحیح، سالانه حدود ۲ هزار و چهارصد مگاوات ساعت برق بازیابی می شود که می توان از آن در مصارف خانگی و صنعتی بهره برد. در کنار تولید این میزان الکتریسیته، با گازی سازی پسماند و لجن فاضلاب شهر تهران، از انتشار حدود یک میلیون و ششصد هزار کیلوگرم کربن دی اکسید معادل، انتشارات به محیط زیست نیز جلوگیری به عمل آمده که کمک بزرگی به کاهش آلودگی شهر تهران در طولانی مدت می کند. علاوه بر این می توان از گازی سازی این میزان پسماند و فاضلاب در حدود ۱۶۴ میلیون لیتر بیواتانول تولید کرده که قابل استفاده در حمل نقل و غیره می باشد.

جدول ۱۳- میزان محصولات و انتشارات ناشی از گازی سازی همزمان پسماند و لجن فاضلاب شهر تهران، در سال ۱۴۰۱

برق تولیدی	۲۴۲۵/۷۱	بر حسب مگاوات ساعت
برق مصرفی	۴۸۵/۱۴	بر حسب مگاوات ساعت
برق بازیابی شده	۱۹۴۰/۵۷	بر حسب مگاوات ساعت
انتشارات	۲۱۰۴۹۰۰	بر حسب کیلوگرم کربن دی اکسید معادل
بیواتانول	۱۶۴۶۰۴۶۶۰	بر حسب لیتر

عدم مدیریت صحیح پسماند و فاضلاب منجر به مخاطرات محیط زیستی فراوانی از جمله آلودگی آب، خاک، هوا و به خطر انداختن سلامت انسان و موجودات زنده می شود. در این پژوهش با ترکیب لجن فاضلاب و پسماند علاوه بر مزایای ذکر شده (کاهش هزینه ها، کاهش نیاز به زمین، و غیره) منجر به تولید حجم بالاتری از زیست توده نیز می شوند. گازی سازی همزمان این دو ماده ضمن دفع حدود ۵ هزار تن پسماند و لجن فاضلاب در طول سال، حدود ۱۶۴ میلیون لیتر بیواتانول و حدود ۲ هزار مگاوات نیز برق تولید کرده که این میزان معادل اجتناب از انتشار حدود ۵۴۰ هزار کیلوگرم کربن دی اکسید معادل می باشد. بنابراین مدیران شهری می توانند در کنار دفع فاضلاب و پسماند، ضمن کاهش مخاطرات آنها مقادیر قابل توجهی انرژی و مواد با ارزش تولید کنند.

References

- Chen, C., Wang, X., Li, J., Yan, B., Wang, Y., Wu, X., Velichkova, R., Cheng, H., Ma, W., 2019. Energy, and economic analysis of integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge: A case study in China. *Science of the Total Environment* 647, 1433-1443
- Farhat, O., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C., Khaled, M., 2022. A recent review on waste heat recovery methodologies and applications: comprehensive review, critical analysis and potential recommendations. *Journal of Cleaner Engineering and Technology* 100387
- Hafezi, R., Yousefi, H., Haji Nezhad, A., Ziaei, E., 2015. Assessment of the electrical power potential of an incinerator based on the amount of waste produced and estimation of the amount of air pollutant emissions in Tehran. (In Persian)
- Hosseini, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S., 2020. Multi-Objective Optimization of Urban Solid Waste Management System: Cost, Energy, and Emissions - A Case Study of Tehran. Master theses of university of Tehran. (In Persian)
- Miranzadeh, M., Jafarsalehi, M., Akram, J., Ebrahimi, M., Mazaheri, A., Mashayekh, M., 2024. Boosting biogas production in the wastewater treatment plants: A narrative review on co-digestion of sewage sludge with internal and external organic waste. *Bioresource Technology Reports* 26, 101856
- Malek, H., Ehteshami, M., Nazari, E., 2020. Performance Evaluation of Urban Wastewater Treatment Plant: A Case Study of Southeast Tehran Wastewater Treatment Plant. *Civil Engineering, Architecture, and Urban Planning*. (In Persian)
- Peyvastegar, Y., Ansari, M., 2017. An Investigation and Evaluation of Social Factors Influencing Household Waste Reduction: A Case Study of Districts 3 and 10 of Tehran Municipality. *Environmental Science and Technology* 19. (In Persian)
- Rajaeifar, M. A., Ghanavati, H., Dashti, B., Heijungs, R., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., 2017. Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79, 414-439
- Rabii, A., Sayed, A., Ismail, A., Aldin, S., Dahman, Y., Elbeshbishy, E., 2024. Optimizing the Mixing Ratios of Source-Separated Organic Waste and Thickened Waste Activated Sludge in Anaerobic Co-Digestion: A New Approach. *Journal of Processes* 12, 794
- Riyazati, A., Nabi bidhendi, G., Mehrdadi, N., Mosafari, M., 2024. Correlation of Carbon and Energy in Sludge Digestion Unit and Power Plant of South Tehran Wastewater Treatment Plant. *Water and Wastewater* pp. 80-96. (In Persian)
- Sadeghi, N., Rafiee, S., Jafari, A., 2019. Multi-Objective Optimization (Cost and Energy) of Urban Wastewater Treatment: A Case Study of Tehran. Master theses of university of Tehran. (In Persian)
- Sadeghi, N., Rafiee, S., Jafari, A., 2024. Energy Optimization of Integrated Wastewater and Solid Waste Management System in Tehran: A Case Study. *Journal of Natural Environment* (In Persian)
- Vadenbo, C., Hellweg, S., Guillen-gosalbec, G., 2014. Multi-objective optimization of waste industrial and resource management in networks – PartI: Model description, Resources, Conservation and recycling pp. 52-63
- Waste Management Organization of Tehran Municipality. 2023. (In Persian)
- Water and Wastewater Company. 2023. (In Persian)
- Wang, Y., Yang, Y., 2022. Research on greenhouse gas emission and economic of biomass gasification power generation technology in china based on LCA method.