



# Energy optimization of the simultaneous management system of wastewater and solid waste in Tehran

Niloofer Sadeghi Looyeh<sup>1</sup> | Shahin Rafiee<sup>2✉</sup> | Ali Jafari<sup>3</sup> |  
Morteza Aghbashlo<sup>4</sup> | Hossein Mobli<sup>5</sup>

1. Department of Mechanical Engineering of Agriculture Machinery, Faculty of Agriculture, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [niloofer.sadeghi0001@gmail.com](mailto:niloofer.sadeghi0001@gmail.com)
2. Corresponding Author, Department of Mechanical Engineering of Agriculture Machinery, Faculty of Agriculture, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [shahinrafiee@ut.ac.ir](mailto:shahinrafiee@ut.ac.ir)
3. Department of Mechanical Engineering of Agriculture Machinery, Faculty of Agriculture, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [afarya@ut.ac.ir](mailto:afarya@ut.ac.ir)
4. Department of Mechanical Engineering of Agriculture Machinery, Faculty of Agriculture, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [maghashlo@ut.ac.ir](mailto:maghashlo@ut.ac.ir)
5. Department of Mechanical Engineering of Agriculture Machinery, Faculty of Agriculture, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [hmobli@ut.ac.ir](mailto:hmobli@ut.ac.ir)

## Article Info

### Article type:

Research Article

### Article history:

Received 15 January 2024

Received in revised form 06 June 2024

Accepted 17 June 2024

Published online 31 August 2024

### Keywords:

*Energy management,*

*Municipal solid waste,*

*Optimization,*

*Wastewater.*

## ABSTRACT

Population growth and industrialization have led to an increase in waste and sewage production, which is always a concern for urban managers. With the increasing population, in addition to increased waste production, the need for energy also increases. With the increase in energy consumption, a renewable source must be sought to meet the country's needs. Municipal solid waste and sewage sludge have a high potential for energy production due to the high volume of organic matter in them. Therefore, in addition to waste disposal, appropriate management of waste and sewage can be used as a suitable source of energy production. In this research, simultaneous management of sewage and solid waste in Tehran was carried out. For this purpose, information was implemented on a superstructural model, and then, using Python programming language and decision nodes, decision coefficients from 0 to 100 percent with a one percent step were considered. Finally, 592 scenarios were proposed, and two scenarios were selected as the best scenarios in terms of energy perspective, with the approaches of heat recovery and electricity production. In these two scenarios, approximately two million gigajoules and one million four hundred thousand gigajoules were recovered as the highest heat and electricity from simultaneous management of sewage and solid waste in Tehran city, respectively. By implementing this model for Tehran, urban managers can use waste and sewage as a source to meet the energy needs of waste disposal systems and supply part of the city's energy needs.

**Cite this article:** Sadeghi Looyeh, N., Rafiee, S., Jafari, A., Aghbashlo, M., & Mobli, H. (2024). Energy optimization of the simultaneous management system of wastewater and solid waste in Tehran. *Journal of Natural Environment*, 77 (2), 189-202. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2024.371016.2641>



## بهینه‌سازی انرژی سامانه مدیریت همزمان فاضلاب و پسماند شهر تهران

نیلوفر صادقی لویه<sup>۱</sup> | شاهین رفیعی<sup>۲</sup> | علی جعفری<sup>۳</sup> | مرتضی آغباشلو<sup>۴</sup> | حسین مبلی<sup>۵</sup>

۱. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [niloofer.sadeghi0001@gmail.com](mailto:niloofer.sadeghi0001@gmail.com)
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [shahinrafiee@ut.ac.ir](mailto:shahinrafiee@ut.ac.ir)
۳. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [jafarya@ut.ac.ir](mailto:jafarya@ut.ac.ir)
۴. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [maghbashlo@ut.ac.ir](mailto:maghbashlo@ut.ac.ir)
۵. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [hmobli@ut.ac.ir](mailto:hmobli@ut.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	افزایش جمعیت و صنعتی شدن منجر به افزایش تولید پسماند و فاضلاب شده، که همواره دغدغه مدیران شهری می‌باشد. با افزایش جمعیت علاوه بر تولید زائدات بیشتر، نیاز به انرژی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌بایست به دنبال منبعی تجدیدپذیر برای برطرف کردن نیاز کشور بود. زباله جامد شهری و لجن فاضلاب به دلیل حجم بالای مواد آلی موجود در آن‌ها پتانسیل بالایی برای تولید انرژی دارند. بنابراین در کنار دفع آنها می‌توان با مدیریت صحیح، از پسماند و فاضلاب به‌عنوان منبع مناسب برای تولید انرژی بهره برد. در این پژوهش مدیریت همزمان فاضلاب و پسماند شهر تهران انجام شده است. برای این منظور ابتدا اطلاعات شهر تهران بر روی مدل فراساختار پیاده‌سازی شده و سپس به کمک زبان برنامه‌نویسی پایتون و با استفاده از گره‌های تصمیم‌گیری، ضرایب تصمیم‌گیری ۰ تا ۱۰۰ درصد با گام یک درصد در نظر گرفته شده است. در نهایت ۵۹۲ سناریو مطرح شده، و دو سناریو به‌عنوان بهترین سناریوها از دیدگاه انرژی با رویکرد بازیابی گرما و رویکرد تولید الکتریسیته، به‌عنوان بهترین سناریوها انتخاب شده است. در این دو سناریو به ترتیب حدود دو میلیون گیگاژول و یک میلیون چهارصد هزار گیگاژول گرما و الکتریسیته بازیابی شده است. با پیاده‌سازی این مدل برای شهر تهران، مدیران شهری می‌توانند از پسماند و فاضلاب به‌عنوان منبعی برای برطرف کردن نیاز انرژی سامانه‌های دفع و تأمین بخشی از نیاز انرژی شهری بهره برده و با تأسیس یک سامانه، فاضلاب و پسماند را در کنار هم تیمار نمایند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۸	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰	
کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی، زباله جامد شهری، فاضلاب، مدیریت انرژی.	

استناد: صادقی لویه، نیلوفر؛ رفیعی، شاهین؛ جعفری، علی؛ آغباشلو، مرتضی؛ و مبلی، حسین (۱۴۰۳). بهینه‌سازی انرژی سامانه مدیریت همزمان فاضلاب و پسماند

شهر تهران. محیط زیست طبیعی، ۷۷ (۲)، ۱۸۹-۲۰۲.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2024.371016.2641>



## مقدمه

با افزایش جمعیت و افزایش فعالیت‌های انسانی، میزان پسماند و فاضلاب تولید شده افزایش می‌یابد. طبق گزارش ارائه شده از سوی سازمان پسماند کشور، در کشور ما ایران روزانه ۴۰ هزار تن پسماند تولید می‌شود، که از این میان حدود ۷ هزار تن آن متعلق به تهران است (Khoshnevisan, 2018). همچنین سالانه حدود دو میلیون و هفتصد هزار متر مکعب فاضلاب شهری، از شهرهای مختلف کشورمان جمع‌آوری و تصفیه می‌شود. این میزان پسماند و فاضلاب تولید شده پتانسیل بالایی برای آلودگی آب، خاک و محیط‌زیست دارند و با توجه به حجم بالای تولید شده، مدیریت آن‌ها بسیار حساس می‌باشد. از طرف دیگر دفع پسماند و تصفیه فاضلاب، فرآیندهایی به شدت انرژی‌بر است. در کشورهای مختلف ۰/۸ تا ۴ درصد کل برق تولیدی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مصرف می‌شود. (Aghabalae et al., 2020). بنابراین مدیریت این مواد، علاوه بر صرف هزینه و چالش‌های محیط‌زیستی، انرژی‌بر است.

با افزایش جمعیت علاوه بر افزایش تولید فاضلاب و پسماند، میزان تقاضای انرژی نیز افزایش می‌یابد. به طوری که مصرف جهانی برق بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۲ بیش از سه برابر شده و این روند همچنان ادامه دارد. براساس چشم‌انداز بین‌المللی انرژی، انتظار می‌رود مصرف جهانی انرژی بین سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۵۰ حدود ۳۴ درصد افزایش یابد. از آنجا که عمده منابع تولیدکننده انرژی در جهان سوخت‌های فسیلی می‌باشند و این منابع، تجدیدناپذیر هستند، بنابراین می‌بایست به دنبال منبع انرژی تجدیدپذیر برای برطرف کردن نیاز انرژی بود. سهم انرژی تجدیدپذیر در جهان از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ حدود ۱۰ درصد افزایش داشته است (Annual Report of the Ministry of Energy, 2022). امروزه زیست توده<sup>۱</sup> به عنوان یکی از روش‌های تولید انرژی تجدیدپذیر در جهان مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. از آنجا که لجن فاضلاب و پسماند حاوی حجم بالایی زیست توده می‌باشند، می‌توان از آنها به عنوان منبع مناسبی جهت تأمین بخشی از انرژی کشور بهره برد. در ایران سالیانه حدود دو میلیون و هفتصد هزار متر مکعب فاضلاب تولید می‌شود، که معادل حدود پنج هزار گیگاژول انرژی و یا حدود ۱۴۰ میلیون کیلووات ساعت برق در سال می‌باشد (Bakhshi, et al., 2009). انرژی موجود در فاضلابی با  $cod^2$  معادل ۵۰۰ میلی گرم در لیتر برابر ۱/۹۳ کیلووات ساعت در متر مکعب و میزان انرژی مورد نیاز تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ۰/۳ تا ۰/۸ کیلووات ساعت به ازای هر متر مکعب فاضلاب تصفیه شده است. در صورت بازیابی انرژی از فاضلاب می‌توان علاوه بر تأمین انرژی واحدهای تصفیه فاضلاب، انرژی مازاد را در اختیار شبکه برق قرار داد (Aghabalae et al., 2020) علاوه بر فاضلاب، با مدیریت صحیح پسماند نیز می‌توان مقادیر زیادی انرژی تولید کرد.

در راستای مدیریت پسماند و فاضلاب پژوهش‌های بسیاری انجام شده است. این پژوهش‌ها در سه حیطه مدیریت پسماند، مدیریت فاضلاب و مدیریت همزمان فاضلاب و پسماند دسته‌بندی شده است. در زمینه مدیریت فاضلاب Aghabalae و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی فرآیند  $MLE^3$  همراه با هاضم هوازی در تصفیه‌خانه فاضلاب شرق مشهد را از نظر میزان مصرف انرژی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری در مقایسه با فرآیندهای پیشنهادی دیگر مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. Shi و همکاران (۲۰۲۴) تحقیقات انجام شده در زمینه تبدیل فاضلاب به انرژی را بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها با برجسته کردن روش‌های نوظهور مدیریت انرژی فاضلاب، چشم‌اندازی برای آینده ارائه کردند. در زمینه مدیریت پسماند، Zhao و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی، یک طرح جدید برای تبدیل پسماند غذایی به انرژی با استفاده از فرآیندهای هضم بی‌هوازی و کربن‌سازی هیدروترمال را بررسی کردند. در پژوهش دیگری Husain Khan و همکاران (۲۰۲۲) مدیریت زباله جامد و بازیافت انرژی در کشورهای در حال توسعه را بررسی کرده و یک بازنگری جامع در مورد فناوری‌های بازیافت انرژی ارائه کردند. پژوهش‌های انجام شده در زمینه مدیریت همزمان پسماند و فاضلاب، یکی از موضوعات نو و مورد توجه می‌باشد. Sadeghi و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی یک مدل فراساختار برای مدیریت همزمان پسماند و فاضلاب شهری را با هدف کمک به مدیریت بهتر این زائادات ارائه کردند. Mancini و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی مدیریت همزمان پسماند و فاضلاب جنوب اروپا را با رویکرد تولید انرژی بررسی

<sup>۱</sup>Biomass<sup>۲</sup>میزان اکسیژن خواهی شیمیایی فاضلاب  
<sup>۳</sup>روش اصلاح شده لودزاک و اتینگبر برای حذف ازت

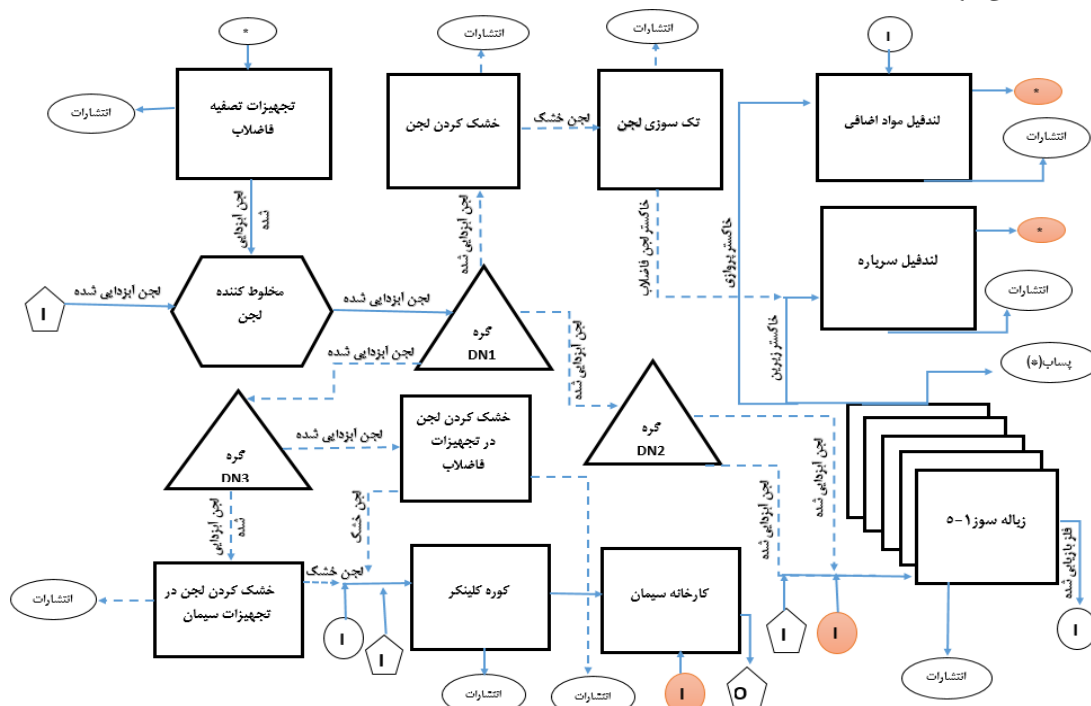
کردند. آنها مزایای این روش را در یک شبکه همزیستی که شامل تجهیزات تبدیل پسماند به انرژی، تصفیه‌خانه فاضلاب و تجهیزات هضم بی‌هوازی است، بررسی کردند.

در این پژوهش، مقادیر پسماند و فاضلاب شهر تهران بر روی مدل فراساختار، پیاده‌سازی شده و با استفاده از معادلات مربوط به انرژی و زبان برنامه‌نویسی پایتون، مدل‌سازی انرژی انجام شده است. همچنین با کمک گره‌های تصمیم‌گیری موجود در مدل، جریان هدایت شده و با تغییر ضرایب تصمیم‌گیری، سناریوهای مختلف به وجود آمده است. در پایان، بهترین سناریوها از دیدگاه تولید الکتریسیته و بازیابی گرما انتخاب شده است. با پیاده‌سازی این مدل، علاوه بر دفع فاضلاب و پسماند و کاهش ریسک آلودگی‌های محیط‌زیستی، آب و خاک، میزان قابل توجهی انرژی نیز بازیابی می‌شود. نقطه قوت مدل، مدیریت همزمان فاضلاب و پسماند می‌باشد. در روش مدیریت جداگانه مشکلاتی از جمله: هزینه‌های حمل و نقل، مکان برای ساخت تصفیه‌خانه، نیروی کار، هزینه و غیره وجود دارد.

### روش‌شناسی پژوهش

تهران پرجمعیت‌ترین شهر و پایتخت ایران است. شهر تهران هم‌اکنون دارای ۸ تصفیه‌خانه فاضلاب در حال بهره‌برداری و یک تصفیه‌خانه خارج از مدار است. تصفیه‌خانه مورد مطالعه در این پژوهش، تصفیه‌خانه شهرک قدس است. همچنین پسماند تولید شده نیز وارد مرکز دفع آرادکوه واقع در کهریزک شده و پس از فرآیندهای مختلف به چند دسته تقسیم می‌شود.

**مدل فراساختار:** Sadeghi و همکاران (۲۰۲۰) مدل فراساختاری برای مدیریت فاضلاب و پسماند شهری ارائه کردند، که در شکل ۱ ارائه شده<sup>۴</sup> و علائم بکار رفته در مدل نیز در جدول ۱ نشان داده شده است. در پس زمینه این مدل، سه تکنولوژی سوزاندن، تک‌سوزی لجن و استفادۀ در کوره کلینکر (برای تولید سیمان) برای تیمار پسماند و فاضلاب در نظر گرفته شده است. جریان فاضلاب ورودی به کمک گره‌های تصمیم‌گیری DN1، DN2 و DN3 پس از آزدایی و خشک شدن به سمت هر کدام از این فناوری‌ها هدایت می‌شود.<sup>۵</sup>








شکل ۱- مدل فراساختار سیستم تیمار زباله و فاضلاب

<sup>۴</sup> مقادیر دایره‌های رنگی در این پژوهش صفر در نظر گرفته شده

<sup>۵</sup> علت قرار دادن خطچین‌ها در مدل، این است که مقادیر جریان با تغییر ضرایب تصمیم‌گیری هر کدام از گره‌ها تغییر می‌کند، بنابراین مقدار ثابتی نبوده و تابعی از ضرایب انتخابی می‌باشد.

جدول ۱- نمادهای بکار رفته در مدل فراساختار

نمادها در مدل فراساختار	توضیحات
	مواد زائد ورودی (غیر قابل مصرف به صورت مستقیم)
	صورت مستقیم قابل استفاده‌اند و نیازی به پردازش ندارند. ورودی‌هایی که به
	خروجی‌هایی که مجدداً در سیستم استفاده شده است.
	صورت محصول نهایی استفاده می‌شود. خروجی‌هایی که به
	پساب

**مدل‌سازی انرژی:** مدل‌سازی انرژی در این پژوهش با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون و معادلات مربوط به انرژی، کد نویسی شده است. محاسبات انرژی مدل فراساختار شامل دو دسته انرژی تولیدی و مصرفی می‌باشد. انرژی مصرفی شامل انرژی یا توانی است، که صرف تولید یک محصول شده و انرژی تولیدی شامل توان گرمایی و الکتریسته تولید شده می‌باشد. از میان تجهیزات در نظر گرفته شده در پیش زمینه مدل فراساختار، در تجهیزات تک‌سوزی، زباله‌سوزی، کوره کلینکر و تجهیزات سیمان، بازیابی و یا مصرف انرژی داریم و بقیه فرایندها شامل تولید یا مصرف انرژی نشده و یا به دلیل جزئی بودن از آن صرف نظر شده است.

**فرآیند تک‌سوزی:** لجن فاضلاب پس از تک‌سوزی در کوره<sup>۶</sup>، انرژی تولید می‌کند، که از این انرژی بازیابی شده برای خشک کردن (مرحله قبل) استفاده می‌شود. با ضرب ورودی فرآیند خشک کردن لجن در ضریب ۰/۴، لجن فاضلاب خشک شده، حاصل می‌شود (Sadeghi et al., 2020). برای محاسبه انرژی تولیدی و مصرفی در فرآیند تک‌سوزی از ضرایب موجود در جدول ۲ استفاده شده است.<sup>۷</sup>

جدول ۲- ضرایب تبدیل برای تولید و مصرفی انرژی در فرآیند تک‌سوزی

توان مصرفی در فرآیند تک‌سوزی	گیگاژول بر تن ماده خشک	۰/۹
گرما مصرفی در فرآیند تک‌سوزی	گیگاژول بر تن ماده خشک	۰/۰۶
بازده بازیابی توان	درصد	۱۴/۸
بازده بازیابی گرما	درصد	۵۳/۶

همچنین برای محاسبه انرژی بازیابی شده در این فرآیند نیز از رابطه ۱ استفاده شده است.

$$Et = 0/536 \times Im \times C \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن Et: انرژی گرمایی، Im: ورودی (لجن خشک)، C: ارزش حرارتی متناظر می‌باشد (Vadenbo et al., 2014, part1). با به دست آوردن تفاضل مقدار انرژی تولیدی و مصرفی، میزان خالص انرژی تولید شده در فرآیند تک‌سوزی لجن فاضلاب محاسبه شده است.

**فرآیند زباله‌سوزی:** در این پژوهش ۵ حالت مختلف برای نیروگاه زباله‌سوز در نظر گرفته شده است. این پنج وضعیت شامل ۵ سامانه با تعداد کوره‌های مختلف، مقادیر جریان ورودی متفاوت، دما متفاوت کوره و غیره می‌باشد. در جدول ۳ مشخصات پنج سامانه زباله‌سوز و مقادیر ترکیبات ورودی به زباله‌سوز نیز در جدول ۴ ارائه شده است.

<sup>۶</sup> از گاز طبیعی برای روشن کردن کوره استفاده می‌شود، اما هیچ سوخت کمکی در طول عملیات نرمال نیاز نیست  
<sup>۷</sup> به‌طور مثال برای محاسبه مقدار انرژی مصرفی شده در فرآیند تک‌سوزی، مقدار لجن خشک ورودی در ۰/۰۶ ضرب شده است.

جدول ۳- مشخصات زیاله سوزها

واحد	زیاله سوز ۱	زیاله سوز ۲	زیاله سوز ۳	زیاله سوز ۴	زیاله سوز ۵
تعداد کوره	-	۲	۳	۲	۱
ظرفیت گرمایی ناخالص	مگاوات	۴۱	۸۷	۲۴/۸	۴۴
زیاله جامد شهری	درصد	۴۴	۴۵	۶۳	۵۰
زیاله جامد تجاری	درصد	۵۶	۳۱	۲۳	۵۰
لجن فاضلاب (تر)	درصد	۰	۱۰	۱۱	۰
زیاله خطرناک	درصد	۰	۱۴	۲	۰
مصرف الکتریسیته	گیگاژول بر تن پسماند	۰/۶۱	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۳۸
بازده بازیابی الکتریسیته	درصد	۲۳/۲	۱۸/۱	۱۳/۶	۱۳/۶
بازده بازیابی گرما	درصد	۸/۳	۶	۱۹/۹	۲۰/۱
بازده مصرف انرژی	گیگاژول بر تن پسماند	۰/۶۱	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۳۸

جدول ۴- ترکیبات ورودی به زیاله سوز

مقدار	واحد	ترکیب ورودی
۲۶۳۳۸۴۰	تن بر سال	زیاله جامد شهری
۲۹۵۱۰/۲۵	تن بر سال	زیاله جامد تجاری
۳۳۷۲۶	تن بر سال	زیاله خطرناک
۸/۲	تن بر سال	لجن فاضلاب

زیاله سوز موجود در مدل فراساختار دارای ۲ ورودی می باشد، که ورودی اول همان لجن های خروجی گره DN2 و ورودی دوم ترکیبات موجود در جدول ۴ می باشد. برای محاسبه مقادیر ورودی ۲ از رابطه ۲ استفاده شده است.

$$MSWi = PMSWi \times CMSW \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن  $MSWi$ : میزان پسماند ورودی به زیاله سوز (مقادیر جدول ۴)،  $PMSWi$ : درصد هر کدام از زیاله ها (مقادیر جدول ۳) و  $CMSW$ : ترکیبات ورودی به زیاله سوز می باشد (Vadenbo *et al.*, 2014, part1). با جمع مقادیر به دست آمده برای ورودی ۱ و ۲ زیاله سوز، مقدار کل ورودی برای هر زیاله سوز محاسبه شده است. برای محاسبه مقادیر الکتریسیته و گرمای مصرفی در فرآیند زیاله سوز، مقادیر ورودی به زیاله سوزها در ضرایب مصرف<sup>۸</sup> الکتریسیته و گرمای متناظر با هر کدام (جدول ۳) ضرب شده است<sup>۹</sup>. همچنین از رابطه های ۳ و ۴ برای محاسبه الکتریسیته و گرمای بازیابی شده در زیاله سوزها استفاده شده است.

$$Gei = Rei \times Imswi \times C \quad \text{رابطه ۳}$$

$$Ghi = Rhi \times Imswi \times C \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آنها  $Gei$ : میزان الکتریسیته بازیابی شده زیاله سوزها،  $Ghi$ : گرمای بازیابی شده آن ها،  $Imswi$ : ورودی متناظر با آن زیاله سوز،  $Rhi$ : بازده بازیابی گرما و  $Rei$ : بازده بازیابی الکتریسیته زیاله سوزها (جدول ۳) و  $C$ : ارزش حرارتی می باشد (Sadeghi *et al.*, 2019). با به دست آوردن اختلاف مقادیر مصرفی از بازیابی شده، مقدار الکتریسته و گرمای خالص بازیابی شده از زیاله سوزها محاسبه شده است.

**فرآیند تولید سیمان و کوره کلینکر:** در تجهیزات سیمان و کوره کلینکر، انرژی بازیابی نمی شود و تنها صرف تولید محصول می شود، که مقادیر مصرف انرژی در کوره کلینکر و تجهیزات سیمان در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- مقادیر مصرف انرژی در کوره کلینکر و تجهیزات سیمان

الکتریسیته مصرفی تجهیزات سیمان	گیگاژول بر تن سیمان	۰/۳۴
انرژی گرمایی مورد نیاز کوره کلینکر	گیگاژول بر تن کلینکر	۳/۳۱

<sup>۸</sup> میزان الکتریسیته مصرفی برای کنترل احتراق، پمپها، دمنده ها، تجهیزات جانبی و غیره

<sup>۹</sup> به طور مثال ضریب مصرف الکتریسیته در زیاله سوز ۱ برابر ۰/۶۱ گیگاژول بر تن پسماند بوده که این ضریب در مقدار ورودی به زیاله سوز ۱ ضرب شده تا مقدار الکتریسیته مصرفی زیاله سوز ۱ محاسبه شود. برای محاسبه گرما و الکتریسته سایر زیاله سوزها نیز به طور مشابه این کار انجام شده است.

کوره کلینکر دارای چهار ورودی است. دو ورودی شامل سوخت کمکی و مواد ورودی، که ترکیبات آن در جدول‌های ۶ و ۷ آورده شده و دو ورودی شامل لجن فاضلاب خشک شده، که از دو تجهیزات سیمان و تصفیه فاضلاب حاصل می‌شود (Sadeghi et al., 2019).

جدول ۶- مقادیر ورودی به کوره کلینکر برای شهر تهران

۷۲۰۰۵۰	تن بر سال	پلاستیک‌های زباله
۸۸۵۳	تن بر سال	لاستیک‌های زباله
.	تن بر سال	لجن فاضلاب خشک‌شده
۵۹۰۲۰	تن بر سال	خاک آلوده

جدول ۷- سوخت‌های کمکی برای کوره کلینکر کشور سوئیس

۵۴۲۲۸	تن بر سال	زغال سخت
۳۵۵۷	تن بر سال	سوخت نفتی سنگین
۸۱۱۰۰۰	تن بر سال	سنگ آهک
۲۵۶۰۰۰	تن بر سال	مارل
۱۰۵۰۰	تن بر سال	بوکسیت

برای محاسبه مقدار سوخت ورودی به کوره کلینکر از رابطه ۵ استفاده شده است.

$$Ac = n \times m \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن Ac: مقدار سوخت ورودی به کوره کلینکر، N: مقادیر متناظر آن در جدول‌های ۶ و ۷ و M: ضرایب تبدیل ترکیبات شیمیایی سوخت کمکی و مواد ورودی براساس جدول ۸ است (Vadenbo et al., 2014, PartII).

جدول ۸- ضرایب تبدیل سوخت کمکی و مواد ورودی به کوره کلینکر براساس اطلاعات کشور سوئیس

ویژگی	بوکسیت	مارل	سنگ آهک	سوخت نفتی سنگین	زغال سخت	خاک آلوده	لجن خشک شده	لاستیک‌ها ی زباله	پلاستیک‌ها ای زباله	حلال مصرف شده	غذای حیوانات
H2O	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۱</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱×۱۰ <sup>-۱</sup>
C, fossil	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۱</sup>	۷×۱۰ <sup>-۱</sup>	۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۵×۱۰ <sup>-۱</sup>	۷×۱۰ <sup>-۱</sup>	۴×۱۰ <sup>-۱</sup>	.
C, biogenic	.	.	.	.	.	.	۳×۱۰ <sup>-۱</sup>	۲×۱۰ <sup>-۱</sup>	.	.	۵×۱۰ <sup>-۱</sup>
ic	.	.	.	.	.	.	۵	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	.
CO2	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۱</sup>	۴×۱۰ <sup>-۱</sup>	.	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۵	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>
S	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>
N	.	.	.	۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>
Cl	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۸×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>
F	.	.	.	.	.	.	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	.	.	.
Br	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
H	.	.	.	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۸×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>
P	.	.	.	.	.	.	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	.	.	.
Si	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Al2O3	۵×۱۰ <sup>-۱</sup>	۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>
CaO	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۱</sup>	۵×۱۰ <sup>-۱</sup>	.	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱×۱۰ <sup>-۱</sup>
FeO	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Fe2O3	۳×۱۰ <sup>-۱</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>
Fe3O4	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

<sup>۱۰</sup> به‌طور مثال مقادیر سوخت نفتی سنگین ورودی به کوره طبق محاسبات زیر به‌دست می‌آید؛

$$۳۵۵۷ \times ۰/۰۱ = ۳۵۵/۵۷ \text{ (تن بر سال) مقدار آب ورودی به کوره کلینکر}$$

$$۳۵۵۷ \times ۰/۹ = ۳۲۰/۱/۳ \text{ مقدار کربن ورودی به کوره کلینکر (تن بر سال)}$$

مقادیر دیگر به‌طور مشابه محاسبه شده است.

۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	K2O
.	.	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	MgO
.	.	.	.	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	.	.	.	.	.	MnO
۸×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۸×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	Na2O
۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	.	.	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	P2O5
۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	.	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۱</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۱</sup>	۲×۱۰ <sup>-۱</sup>	SiO2
۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	SO3, volatile
.	.	.	.	.	.	.	.	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	SO3, non- volatile
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	TiO2
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	Al
۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	۸×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	As
۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	Cd
۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	Co
۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۸×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	Cr
۸×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	Cu
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	Fe
۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۸×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	Hg
۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	Mn
۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	Ni
۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	Pb
۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۵×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	Sb
۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	Sn
۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	Tl
۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	V
۷×۱۰ <sup>-۲</sup>	۶×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	Zn
۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۸×۱۰ <sup>-۲</sup>	۸×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۴×۱۰ <sup>-۲</sup>	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۹×۱۰ <sup>-۲</sup>	۳×۱۰ <sup>-۲</sup>	O

برای محاسبه خروجی کوره کلینکر از رابطه ۶ استفاده شده است.

$$KO = (K \times e) + (K \times f) \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن KO: خروجی، K: ورودی، E: ستون کلینکر در جدول ۹ و F: ستون گرد و غبار کوره در جدول ۹ است (Vadenbo et al., 2014, PartII).

جدول ۹- ضرایب تبدیل خروجی و انتشارات کوره کلینکر براساس اطلاعات کشور سوئیس

کلینکر	گاز کوره	باقیمانده ثانویه	گاز دودکش	گرد و خاک کوره	ویژگی	کلینکر	گاز کوره	باقیمانده ثانویه	گاز دودکش	گرد و خاک کوره	ویژگی
۱	.	.	۱	.	O	.	۱	.	۱	.	H2O
.	۱	.	۱	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	CO2	.	۱	.	۱	.	C
۱	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	S	.	.	.	.	.	Br
.	۱	.	۱	.	N	.	۱	.	۱	.	H
۱	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	Cl	۱	.	.	۱	.	P
۱	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	F	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	Si
۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	Al2O3	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	K2O
۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	CaO	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	MgO
۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	FeO	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	MnO
۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	Fe2O3	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	Na2O
۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	Fe3O4	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	P2O5
۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	.	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	SiO2	۱	۲×۱۰ <sup>-۲</sup>	۱	۱×۱۰ <sup>-۲</sup>	۸×۱۰ <sup>-۲</sup>	As



$5 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-1}$	1	$1 \times 10^{-3}$	.	SO <sub>3</sub> , volatile	$9 \times 10^{-1}$	$2 \times 10^{-3}$	1	$1 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-2}$	Cd
1	$1 \times 10^{-6}$	.	1	$1 \times 10^{-2}$	SO <sub>3</sub> , non- volatile	1	$2 \times 10^{-4}$	1	$1 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$	Co
1	$1 \times 10^{-6}$	.	1	$1 \times 10^{-2}$	TiO <sub>2</sub>	1	$1 \times 10^{-4}$	1	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-4}$	Cr
.	.	.	.	.	Al	1	$9 \times 10^{-4}$	1	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-2}$	Cu
$1 \times 10^{-1}$	$4 \times 10^{-1}$	1	$1 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-1}$	Hg	1	$1 \times 10^{-4}$	1	$1 \times 10^{-3}$	.	Fe
1	$2 \times 10^{-4}$	1	$1 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$	Mn	1	$3 \times 10^{-4}$	1	$1 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$	Ni
1	$3 \times 10^{-4}$	1	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$	Sb	$9 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-4}$	1	$1 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-2}$	Pb
1	$5 \times 10^{-4}$	1	$1 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$	V	$9 \times 10^{-1}$	$7 \times 10^{-4}$	1	$1 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-2}$	Sn
1	$6 \times 10^{-4}$	1	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$	Zn	$2 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-2}$	1	$1 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-1}$	Tl

در نهایت برای محاسبه میزان الکتریسیته مصرفی در تجهیزات سیمان و همچنین محاسبه انرژی گرمایی مصرفی در کوره کلینکر به ترتیب از رابطه‌های ۷ و ۸ استفاده شده است.

$$Ce = 0/34 \times Ic \quad \text{رابطه ۸}$$

$$Hc = 3/31 \times Ic \quad \text{رابطه ۹}$$

که در آنها Ce: الکتریسیته مصرفی در تجهیزات سیمان، Ic: ورودی سیمان و Hc: انرژی گرمایی مصرفی در کوره کلینکر می‌باشد. ضرایب این روابط از مقادیر جدول ۱۰ آورده شده است (Sadeghi et al., 2019).

جدول ۱۰- مشخصات کوره کلینکر و تجهیزات سیمان

پیش گرمکن چهارمرحله‌ای سیکلون	نوع کوره کلینکر	میزان الکتریسیته مورد نیاز (مصرفی) فرآیند تولید سیمان
۰/۳۴	گیاژول بر تن سیمان	انرژی گرمایی مورد نیاز کوره کلینکر
۳/۳۱	گیاژول بر تن کلینکر	نسبت خروجی کلینکر به خروجی سیمان
۰/۷۷	تن کلینکر بر تن سیمان	

بهینه‌سازی انرژی: در این مدل از روش جستجوی فراگیر<sup>۱۱</sup> برای بهینه‌سازی استفاده شده است. جستجوی فراگیر یک روش کلی برای حل مسائل بهینه‌سازی است که در آن تمام حالت‌های ممکن به‌طور منظم بررسی می‌شود و بهترین حالت از نظر تابع هدف انتخاب می‌شود. در این پژوهش به کمک سه گره تصمیم‌گیری موجود در مدل و تغییر ضرایب تصمیم‌گیری با گام یک درصد<sup>۱۲</sup>، ۵۹۲ سناریوی مختلف تولید شده است. به عبارتی، تمامی خروجی‌های ممکن برای تابع هدف مورد نظر ما (بیشترین میزان تولید انرژی) محاسبه شده است. در جدول ۱۱، ده سناریو به‌صورت اتفاقی از مدل آورده شده است. در نهایت مقادیر خروجی از بزرگ به کوچک مرتب شده و دو سناریوی برتر از نظر انرژی انتخاب شده است.

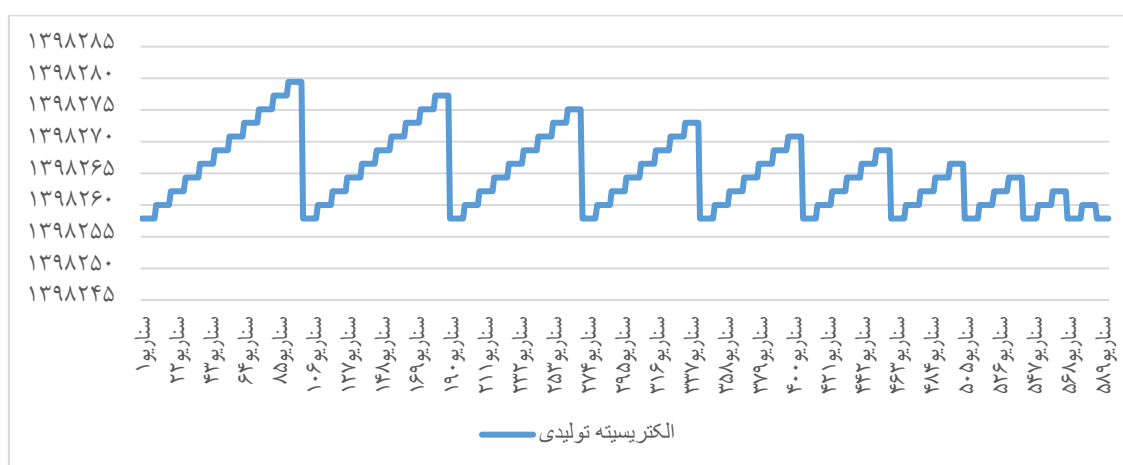
در شکل‌های ۲ و ۳ میزان الکتریسیته تولیدی و گرمای بازیابی شده در تمامی ۵۹۲ سناریو نشان داده شده است. میزان الکتریسته در سناریوهای آخر کاهش می‌یابد. در آخرین سناریو میزان ضرایب به‌ترتیب ۹۹، ۱ و ۰ درصد برای خروجی‌های اول، دوم و سوم گره DN1 است. همچنین ضرایب گره DN2 نیز به‌ترتیب ۰ و ۱۰۰ درصد برای خروجی اول و دوم است. در گره سوم نیز جریان به‌میزان مساوی بین دو خروجی تقسیم می‌شود. برخلاف نمودار ۲، در نمودار ۳، میزان گرمای بازیابی شده در سناریوی پایانی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. بنابراین با بررسی این دو نمودار می‌توان دریافت، روند گرمای بازیابی شده و الکتریسیته تولیدی در سناریوها، عکس یکدیگر هستند.

<sup>11</sup>Brute-Force Search

<sup>12</sup> به‌طور مثال اگر ضریب DN1\_1، DN1\_2 و DN1\_3 به‌ترتیب برابر ۱، ۱ و ۹۸ درصد باشد، به این معنا است که یک درصد از جریان ورودی به گره DN1 از خروجی اول (ورودی خشک کردن در فرآیند تک‌سوزی) و یک درصد از خروجی دوم (ورودی گره DN2) و ۹۸ درصد از جریان ورودی، از خروجی سوم (ورودی گره DN3) خارج می‌شود. به عبارتی با ضرب مقادیر ورودی به گره DN1 در هر کدام از این ضرایب، مقادیر خروجی مشخص می‌شود. به‌طور مشابه این کار برای گره DN2 و DN3 نیز با گام یک درصد انجام شده و سناریوهای مختلف به‌وجود آمده است.

جدول ۱۱- ده سناریوی انتخابی به صورت اتفاقی از میان سناریوها

سناریو	DN3_2	DN3_1	DN2_2	DN2_1	DN1_3	DN1_2	DN1_1	گرمای بازیابی شده	الکتریسیته تولیدی
۱	۰	۱۰۰	۵۰	۵۰	۱۰۰	۰	۰	۱۹۹۵۵۶۸	۱۳۹۸۲۵۸
۲	۰	۱۰۰	۰	۱۰۰	۹۰	۱۰	۰	۱۹۹۵۵۷۱	۱۳۹۸۲۶۰
۳	۱۰۰	۰	۵۰	۵۰	۸۰	۲۰	۰	۱۹۹۵۵۷۴	۱۳۹۸۲۶۲
۴	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰	۱۹۹۵۵۸۲	۱۳۹۸۲۶۹
۵	۵۰	۵۰	۱۰۰	۰	۲۰	۸۰	۰	۱۹۹۵۵۹۰	۱۳۹۸۲۷۵
۶	۵۰	۵۰	۱۰۰	۰	۱۰	۹۰	۰	۱۹۹۵۵۹۲	۱۳۹۸۲۷۷
۷	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰	۱۰۰	۰	۱۹۹۵۵۹۵	۱۳۹۸۲۷۹
۸	۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	۱۰	۳۰	۶۰	۱۹۹۵۹۱۳	۱۳۹۸۲۶۴
۹	۵۰	۵۰	۰	۱۰۰	۲۰	۰	۸۰	۱۹۹۶۰۱۷	۱۳۹۸۲۵۸
۱۰	۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۹۹۶۱۲۹	۱۳۹۸۲۵۸



شکل ۲- میزان تولید الکتریسیته در ۵۹۲ سناریو مختلف

### یافته‌های پژوهش

پس از ارائه و پیاده‌سازی مدل برای شهر تهران و به کمک گره‌های تصمیم‌گیری ۵۹۲ سناریوی مختلف مطرح شده، که از میان این سناریوهای مختلف دو سناریو به‌عنوان بهترین گزینه‌ها از دیدگاه تولید الکتریسیته و بازیابی گرما انتخاب شده است. در جدول ۱۲ مقادیر بهینه برای دو سناریوی برتر نشان داده شده است.

جدول ۱۲- خروجی بهینه‌سازی براساس سناریوی بهینه الکتریسیته و گرمای بازیابی شده برای شهر تهران

بهترین سناریو از دیدگاه انرژی	گرمای بازیابی شده	الکتریسیته تولیدی	DN3-2	DN3-1	DN2-2	DN2-1	DN1-3	DN1-2	DN1-1
با رویکرد تولید الکتریسیته	۱۹۹۵۵۹۵	۱۳۹۸۲۷۹	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰
با رویکرد بازیابی گرما	۱۹۹۶۱۲۹	۱۳۹۸۲۵۸	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰

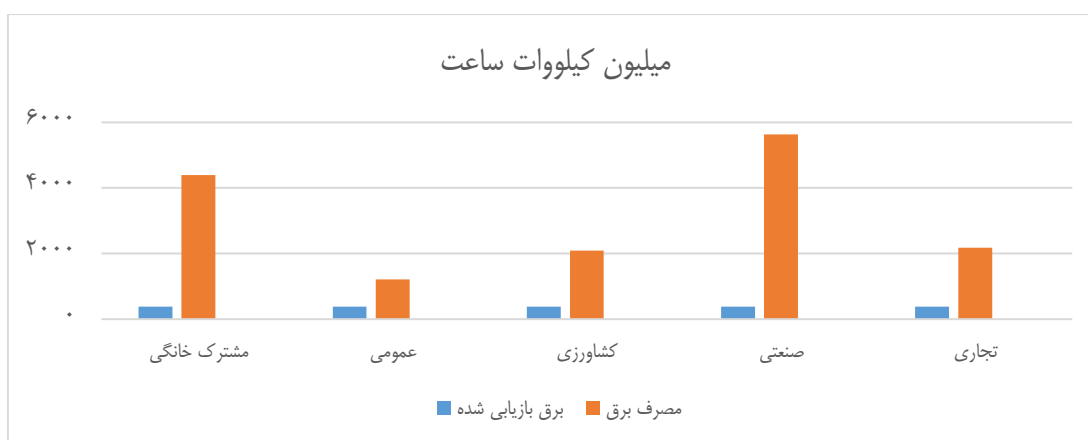
در سناریوی بهینه از دیدگاه تولید الکتریسیته، حدود یک میلیون و چهارصد هزار گیگاژول، الکتریسیته تولید شده است. ضرایب تصمیم‌گیری برای این سناریو به ترتیب ۰، ۱۰۰ و ۰ درصد برای خروجی اول، دوم و سوم گره DN1 می‌باشد. این ضرایب نشان می‌دهد که تمام جریان، وارد گره DN2 می‌شود. ضرایب گره DN2 به ترتیب ۰ و ۱۰۰ برای خروجی اول و دوم است، که نشان می‌دهد تمام جریان به همراه سوخت‌های ورودی ترکیب شده و وارد زباله‌سوز می‌شود. بنابراین در این سناریو، تمام جریان وارد فناوری زباله‌سوزی شده و جریانی وارد فناوری تولید سیمان و یا تک‌سوزی لجن فاضلاب نمی‌شود.

در سناریوی بهینه از دیدگاه بازیابی گرما، حدود دو میلیون گیگاژول گرما بازیابی شده است. ضرایب تصمیم‌گیری برای این سناریو به ترتیب ۱۰۰، ۰ و ۰ درصد برای خروجی اول، دوم و سوم گره DN1 می‌باشد. این ضرایب نشان می‌دهد که تمام جریان، وارد سامانه تک‌سوزی لجن می‌شود. ضرایب ۰ و ۱۰۰ درصد به ترتیب برای خروجی اول و دوم گره DN2 است. ضرایب گره DN3

نیز مشابه گره دوم می‌باشد. بنابراین در این سناریو، تمام جریان وارد فناوری تک‌سوزی لجن می‌شود.

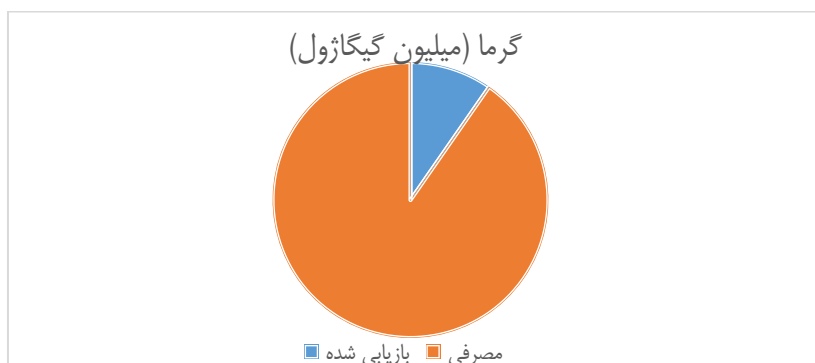
### بحث و نتیجه‌گیری

در شهر تهران در سال ۱۴۰۱ (با حدود ۲/۵ میلیون مشترک فعال)، حدود ۱۶ میلیون مگاوات ساعت برق در بخش‌های کشاورزی، صنعتی، خانگی و غیره مصرف شده است. از این میزان برق مصرفی، متوسط سرانه هر مشترک خانگی حدود ۲ هزار کیلووات ساعت در یک سال می‌باشد (Tehran Province Electricity Distribution Company, 2024). با پیاده‌سازی مدل برای شهر تهران میزان برق بازیابی شده از مدیریت پسماند و فاضلاب یک سال برابر ۳۸۰ میلیون کیلووات ساعت است. با این میزان برق بازیابی شده می‌توان برق حدود ۱۷۸ هزار مشترک خانگی (۲ هزار مشترک کشاورزی، یا ۲ هزار و چهارصد مشترک صنعتی و یا ۶۷ هزار مشترک تجاری) را در یک سال تأمین نمود. در شکل ۴، نمودار مقایسه انرژی بازیابی شده با هر کدام از مصارف انرژی شهر تهران نشان داده شده است.



شکل ۴- مقایسه برق بازیابی شده از فاضلاب و پسماند و برق مصرفی شهر تهران

علاوه بر مصرف برق، در سال ۱۴۰۱ در شهر تهران حدود ۸۰۰ میلیون متر مکعب گاز طبیعی در حمل و نقل و حدود ۵۰۰ میلیون متر مکعب در کشاورزی مصرف شده است (Statistics Department of Tehran Province, 2022). با پیاده‌سازی مدل، حدود ۲ میلیون گیگاژول انرژی گرمایی بازیابی می‌شود، که می‌توان آن را در بخش‌های کشاورزی و یا حمل و نقل بکار برد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با پیاده‌سازی مدل، حدود ۱۰ درصد از انرژی گرمایی بخش کشاورزی شهر تهران در طول یک سال تأمین می‌شود، و یا همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، حدود ۶ درصد انرژی گرمایی مورد نیاز در بخش حمل و نقل را تأمین کرد.



شکل ۵- مقایسه انرژی مصرفی گاز طبیعی در بخش کشاورزی شهر تهران و میزان انرژی گرمایی بازیابی شده از فاضلاب و پسماند تهران



شکل ۶- مقایسه انرژی مصرفی گاز طبیعی در بخش حمل و نقل شهر تهران و میزان انرژی گرمایی بازیابی شده از فاضلاب و پسماند تهران

با پیاده‌سازی مدل برای شهر تهران، در کنار تولید انرژی و گرما، حدود ۶۰ میلیون دلار درآمد حاصل از مدیریت همزمان پسماند و فاضلاب شهر تهران به دست می‌آید. در جدول ۱۳، درآمد حاصل از فروش محصولات بازیابی شده از فاضلاب و پسماند شهر تهران نشان داده شده است. این درآمد سود خالص نبوده و هزینه‌های مصرفی از آن کسر خواهد شد. در کنار بازیابی انرژی و ایجاد درآمد، مدیریت فاضلاب و پسماند شهر تهران تولید آلاینده‌هایی نیز می‌کند، که مقادیر آن در جدول ۱۳ ارائه شده است. به‌طور کلی سناریو بهینه انرژی با رویکرد تولید الکتریسیته نسبت به سناریوی دیگر علاوه بر تولید درآمد بیشتر، آلاینده‌های کمتری نیز تولید می‌کند.

جدول ۱۳- مقادیر انتشارات و درآمد ناشی از مدیریت پسماند و فاضلاب شهر تهران

انتشار دی‌اکسید کربن (کیلوگرم)	انتشار کربن منواکسید (کیلوگرم)	انتشار $N_2O$ (کیلوگرم)	انتشار ناکس (کیلوگرم)	درآمد (دلار)	بهترین سناریو از دیدگاه انرژی
۰/۲۰۱۰۰۳۱۵۶	۹۰۵۴۳۷۲	۴۳۸۰۱	۲۳۶۵۳۵۱۳	۵۹۷۳۰۲۶۷	با رویکرد تولید الکتریسیته
۰/۲۰۱۰۰۶۶۹۴	۹۰۵۴۳۷۵	۴۳۸۰۲	۲۳۶۵۳۵۱۶	۵۹۷۲۹۳۶۵	با رویکرد بازیابی گرما

برای بررسی و اعتبارسنجی مدل نگاهی به چند پژوهش شده است. Hosseini و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی میزان برق تولیدی از پسماند شهر تهران به روش زیباله‌سوزی را ۸۸/۱۳۱۲ کیلووات ساعت بر تن پسماند گزارش کرده‌اند. با فرض اینکه در شهر تهران روزانه حدود ۷۰۰۰ تن پسماند تولید شود، میزان الکتریسیته تولید شده از پسماند شهر تهران در طول یکسال برابر ۲۲۴/۸۴۰ گیگاوات ساعت می‌باشد. در پژوهشی دیگر، Dehghani و همکاران (۲۰۱۶) توان بازیابی انرژی از لجن فاضلاب تصفیه‌خانه جنوب تهران را ۱۲ مگاوات گزارش کرده‌اند؛ که این میزان در طول یکسال پتانسیل تولید حدود ۱۰۵ گیگاوات ساعت برق را دارد. با نگاهی به این دو مقدار می‌توان دریافت که در مجموع حدود ۳۳۰ گیگاوات ساعت برق می‌توان از پسماند و لجن فاضلاب شهر تهران به دست آورد. این عدد در مقایسه با حدود ۳۸۸ گیگاوات ساعت برق بازیابی شده در این پژوهش کمتر است و علت آن را می‌توان عواملی مانند شرایط بهینه‌سازی مدل، افزایش جمعیت، افزایش بازدهی و کارایی سیستم با ترکیب کردن لجن فاضلاب و پسماند و غیره دانست. در نقاط دیگر جهان پژوهش‌های مشابهی نیز انجام شده است. Wang و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی از مدیریت همزمان لجن فاضلاب و پسماند کشور چین سالانه حدود ۲۲ هزار گیگاوات ساعت برق بازیابی کرده‌اند، که این مقدار در مقابل مقدار بازیابی شده در این پژوهش به‌طور قابل توجهی بیشتر است و علت آن جمعیت بسیار بیشتر منطقه مورد مطالعه است. با پیاده‌سازی مدل فرصتی فراهم می‌شود تا در کنار مدیریت همزمان پسماند و فاضلاب، میزان قابل توجهی انرژی بازیابی شده که بخشی صرف تجهیزات داخلی سیستم شده و مازاد انرژی به شبکه برق‌رسانی تزریق شود.

## References

- Annual report of the Ministry of Energy, 2022. (In Persian)
- Aghabalae, V., Mehrdadi, N., Mardani, S., Tabeshnia, M., 2020. The importance of optimizing energy consumption in wastewater treatment plant: the case study of east of Mashhad wastewater treatment plant. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering* 5(4), 41-52. (In Persian)
- Ahmadipirloo, M., Mesrigandshamin, T., 2021. Methanogenic activity in biogas production from dry and wet anaerobic co-digestion of municipal solid waste and sewage sludge. *Civil and Environmental Engineering* 51(4), 109-117. (In Persian)
- Ahadi, A., 2015. Comparison of energy recovery methods from sewage treatment plant sludge using life cycle assessment: a case study of South Tehran treatment plant. Master's thesis. Under the guidance of Edwin Safari. Tehran, University of Tehran, Environment College. (In Persian)
- Bakhshi, M., Khanakeshadeh, M., Ghasemi Ghochghar, S., 2009. Evaluating the potential of extracting energy from urban wastewater and presenting its model, The 7th National Energy Conference. (In Persian)
- Department of Statistics and Information, 2014. Report on the status of the plans of the future electricity and television sector, Deputy Research and Human Resources of the Ministry of Energy. (In Persian)
- Dehghani, M., Hosseini, S., Alavi, M., 2016. Technical and Economic Evaluation of Biogas Production from Sewage Sludge in south Tehran Wastewater Treatment Plant. *Journal of Environmental Sciences and Technology* 14(4), 261-272.
- Hosseini, S., Rafiee, S., Mohtasebi, S., 2020. Calculation of power, energy and heat production and consumption in different urban solid waste treatment technologies including recycling: case study of Tehran. *Journal of Natural Environment* 73(4), 649-663 In Persian)
- Husain Khan, A., López-Maldonado, E., A. Khan, N., Jesús Villarreal, L., M. Munshi, F., H. Alsabhan, A., & Perveen, K., 2022. Current solid waste management strategies and energy recovery in developing countries - State of art review. *Chemosphere*, 291(3), 133088
- Khoshnevisan, B., 2018. Feasibility of integrated urban waste management through biological refineries: a case study of *Abali* biogas production plant, Ph.D. thesis. Department of Agricultural Machinery Engineering. Faculty of Agriculture and Natural Resources. Tehran, university, Tehran, Iran, 137 p. (In Persian)
- Mancini, G., Lombardi, L., Luciano, A., Bolzonella, D., Viotti, P., Fino, D., 2024. A reduction in global impacts through a waste-wastewater-energy nexus: A life cycle assessment. *Energy* 289, 130020.
- Rahimi, V., Karimi, K., Shafiei, M., Naghavi, R., Khoshnevisan, B., Ghanavati, H., Mohtasebi, S.S., Rafiee, S., Tabatabaei, M., 2021. Well-to-wheel life cycle assessment of *Eruca Sativa*-based biorefinery. *Renewable Energy* 117, 135-149.
- Sadeghi, N., Rafiee, S., Jafari, A., 2019. Multi-objective optimization (cost and energy) of urban wastewater treatment management: case study Tehran. Master's thesis. Department of Agricultural Machinery Engineering. Faculty of Agriculture and Natural Resources. University of Tehran. Tehran, Iran. 114 p. (In Persian)
- Sadeghi, N., Rafiee, S., Jafari, A., Hosseini, S., 2020. Examining relationships and providing a superstructure model for simultaneous management of wastewater and waste. The 5th national conference of knowledge and technology of agricultural sciences, natural resources and environment of Iran Tehran, Iran. (In Persian)
- Shah Nazari, A., 2020. Prioritization of energy recovery technologies from urban solid waste (case study of Mashhad). *Environmental Research and Technology* 5(7), 67-76. (In Persian)
- Shi, Z., Xing, K., Rameezdeen, R., Chow, C., 2024. Current trends and future directions of global research on wastewater to energy: a bibliometric analysis and review. *Environmental Science and Pollution Research* 31, 20792-20813
- Statistics and Information Group. 2015. Report on the status of the plans of the future electricity and television sector, Deputy Research and Human Resources of the Ministry of Energy. (In Persian)
- Statistics Department of Tehran Province, 2022. (In Persian)
- Tehran Water and Sewage Organization. (In Persian)
- Vadenbo, C., Guillen-Gosalbec, G., Saner, D., Hellwag, S., 2014. Multi-objective optimization of waste industrial and resource management in networks –PartII: Model sewage application to the treatment of sludge. *Resources, Conservation and Recycling* 89, 41-51.

- 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 Recyclin (C89), 52-63.
- Wikipedia. 1396., [https://fa.wikipedia.org/wiki/Energy\\_in\\_iran](https://fa.wikipedia.org/wiki/Energy_in_iran), ( In Persian)
- Wang, N., Zheng, T., Ma, Y., 2020. New insights into the co-locating concept on synergistic co-digestion of sewage sludge and food waste towards energy self-sufficient in future WWTPs. Bioresource Technology Reports 10, 100351.
- Wang, X., Jin, M., Feng, W., Shu, G., Tian, H., Liang, Y., 2018. Cascade energy optimization for waste heat recovery in distributed energy systems. Applied Energy (230), 679-695.
- Zhao, Z., Qi, S., Wang, R., Li, H., Song, G., Li, H., Yin., Q. 2024. Life cycle assessment of food waste energy and resource conversion scheme via the integrated process of anaerobic digestion and hydrothermal carbonization. International Journal of Hydrogen Energy 52,122-132.