



Assessment and Feasibility of Waste-to-Energy Conversion in Developing Country Metropolises (Case Study: Iran)

Helia Sadat Hosseini Shekarabi^{1*} | Shahla Razaghi² | Mahmood Abdoos³

1. Corresponding Author, Head of the Biomass Power Plant Development Office, Renewable Energy and Electricity Efficiency Organization (SATBA), Ministry of Energy, Tehran, Iran. Email: h.hosseini.sh@gmail.com
2. Renewable Energy and Electricity Efficiency Organization (SATBA), Ministry of Energy, Tehran, Iran. Email: razaghi1988@gmail.com
3. School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mahmood.abdoos@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 01 January 2025
Revised 14 January 2025
Accepted 17 February 2025
Published Online 05 April 2025

Keywords:
Renewable energy,
waste-to-energy,
electricity generation,
biomass resources,
municipal solid waste,
incinerator,
anaerobic digester.

ABSTRACT

Urbanization and rapid population growth in cities have led to the production of significant amounts of municipal waste and have created numerous environmental problems. Meanwhile, by using modern technologies, including waste to energy, in addition to solving environmental problems, it is possible to produce energy and save on fossil fuel consumption. Biomass resources, including municipal solid waste, agricultural waste, livestock waste, and municipal and industrial wastewater, which are considered as renewable energy sources, have high potential for electricity generation; So as each ton of municipal solid waste per day, with a calorific value of 6,000 kJ/kg while using incineration technology, has the potential to produce 466 kWh electricity per day. Likewise, it is expected to generate 280 kWh electricity from anaerobic digestion of one ton of organic waste per day. Producing this amount of electricity, in addition to saving on fossil fuels, also reduces greenhouse emissions such as methane and CO₂. Therefore, it seems necessary to use this potential to produce energy and solve environmental problems caused by landfilling.

Cite this article: Sadat Hosseini Shekarabi, H.; Razaghi, Sh. & Abdoos, M. (2025). Assessment and Feasibility of Waste-to-Energy Conversion in Developing Country Metropolises (Case Study: Iran). *Urban Development Policy Making*, 2 (1), 49-71. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2025.512670.1021>



© Helia Sadat Hosseini Shekarabi, Shahla Razaghi, Mahmood Abdoos
DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2025.512670.1021>

1. Introduction

In 2022, the total energy produced in the world reached 622 EJ, 80% of which was supplied by fossil fuels, while coal, oil, and gas were the main sources. Meanwhile, the share of bioenergy was only 9% of the total energy produced. In 2023, electricity generated from renewable sources was 8,931 TWh, 47% of which was supplied by hydropower and 26% by wind.

Bioenergy, as the fourth largest source of renewable electricity, produced 697 TWh (equivalent to 8%) of that. In 2021, energy supply from municipal and industrial waste was 2.7 EJ, 56% of which was provided using municipal solid waste.

In Iran, the capacity of electricity generation from biomass sources was about 21 MW at the end of December 2024 with five biomass power plants in operation, including two incinerations, two anaerobic digestions (sewage), and one landfill.

2. Literature review

This type of technology generates energy by heating waste in the presence or absence of auxiliary agents. The main advantage of thermochemical methods is a significant reduction in waste volume and a faster rate of energy production. Types of thermochemical technologies include: combustion (waste incineration), gasification, pyrolysis and plasma.

Biochemical and thermochemical technologies have advantages and disadvantages when compared to each other. The efficiency of energy conversion (energy produced per unit weight of input waste), the reduction in the amount of landfilled waste and the emission of pollutants are the three main aspects in the technical comparison of existing methods of energy recovery from waste. The efficiency of electricity production in each of these methods varies depending on the composition of the input waste and the technology used.

3. Methodology

The most common waste-to-energy technologies include landfill, anaerobic digestion, waste incineration, gasification and pyrolysis. Landfill and anaerobic digestion plants are called biochemical technologies, while the others are thermochemical.

4. Results

Several criteria are involved in selecting the most suitable landfill for a city, some of which are mentioned below. The task of selecting a site within a specific study radius from the waste generating center (for example, the city center) is based on the most economical distance of transporting waste from the city to the landfill, and different sites are identified on the map in accordance with environmental, social and economic criteria and unsuitable sites are screened. Then, from among the various options, the one that scores more points than the others is selected as the most suitable site.

In a sanitary-engineered landfill, the following environmental criteria must be observed:

- Waste buried in the landfill should not cause unpleasant odors to spread in the surrounding environment and air pollution.
- Waste buried should be kept away from animals, insects and vermin that can cause waste to spread to the surrounding environment and also spread microbial contamination.
- Noise pollution from waste handling machinery and machinery used in the landfill should be minimal and the landfill should not cause visual pollution.
- Gases produced in the landfill, such as methane and carbon dioxide, should be controlled and ventilated.
- Leachate produced in the landfill should be controlled, collected and treated so as not to pollute surface and groundwater.

5. Discussions

Given the human need to eliminate waste, there have been different methods for disposing of waste and municipal waste from time immemorial, each of which naturally has its advantages and disadvantages. Among these technologies, in Iran, waste incinerators are used only for the purpose of waste disposal. In a way, it can be stated that the technology of energy extraction by thermochemical method is somewhat unknown in Iran, and in most Iranian cities, landfills are used to dispose of waste, which is not a very suitable method and will have adverse environmental consequences, the most important of which is water and soil pollution by leachate produced at the landfill.

Given that a high percentage of municipal solid waste produced in Iran is wet (organic), it can be stated that the necessary conditions for the growth of microorganisms are well provided and the biogas waste disposal method will be more efficient than other technologies. Because, due to the high moisture content in wet waste, incineration technology, an additional cost is required to remove moisture and pre-processing to achieve a uniform heat value for waste incineration. By constructing and using these waste disposal centers in the country, a portion of electrical energy can be provided for domestic and industrial uses, which in addition to economic savings for energy production, creates job opportunities and attracts specialists and workers in this field and strengthens economic infrastructure in Iran. Considering the state of waste management in the country, it can be concluded that our

country has not yet addressed waste management methods in principle and needs to develop the necessary strategy for waste management, such as; avoiding waste production, reducing waste production, reusing, recycling and recovering materials and energy, etc. This is important by gaining the satisfaction and participation of stakeholders, increasing public awareness, improving technology, optimizing methods, and increasing participation in formulating and implementing executive guidelines and criteria in carrying out waste management activities. It is also certain that by utilizing the experiences of successful countries in waste management that have successfully overcome waste issues and problems after years of trial and error, our country can also be successful in this field. In this article, the importance of managing municipal solid waste with an energy recovery and waste disposal approach was examined. Given the limited resources of fossil fuels and the environmental pollution caused by burning these resources, which leads to an increase in greenhouse gases and global warming, waste management can be considered as one of the important sources of renewable and clean energy in the future, so that many developed countries look at the issue of waste management with a sustainable development perspective.

6. Conclusion

The use of waste-to-energy technologies, in addition to solving environmental problems caused by traditional waste management, also contributes significantly to the diversification of countries' energy supply portfolios. The expansion of the use of these technologies for energy supply in developed and some developing countries in recent years and the successful experiences in countries such as China, Japan and European countries confirm the effectiveness of the mentioned technologies. Although there are still concerns about the pollution caused by some types of waste-to-energy technologies in societies, with the maturity of technology and the use of new methods to eliminate the pollution caused, this concern has been significantly eliminated. There are also challenges in the development of waste-to-energy power plants, including the supply of drinking water, the supply of power plant feed under appropriate conditions, and the shortage of skilled labor, which can be solved with the cooperation of waste authorities and the localization of technologies. In upstream documents, such as the Seventh Development Plan, the Ministry of Energy is only required to purchase electricity from waste, so that the purchase price of electricity is an attraction for realizing investment in this area. However, it seems that the development of a national waste management program by the Environmental Protection Organization in cooperation with the Ministry of Interior will play a more key role. In this regard, the conversion of waste into energy, in addition to completing the waste life cycle and generating electricity, can be considered as a package that requires constructive interactions between the Renewable Energy Organization, the Municipalities and Rural Organization, and the Environmental Protection Organization. Considering the existing capacities in Iran and the daily production of 58 thousand tons of urban and rural waste nationwide, achieving the vision of producing 200 megawatts of electricity from urban solid waste can be achieved with the cooperation and serious determination of the responsible agencies. In terms of implementing numerous projects and localizing technology and training specialized personnel, waste management will move away from landfill in the future and reduce the major environmental problems created.



ارزیابی و امکان‌سنجی تبدیل پسماند به انرژی در کلان‌شهرهای کشور در حال توسعه (مطالعه موردی: ایران)

حلیا سادات حسینی شکرابی^{۱*} | شهلا رزاقی^۲ | محمود عبدوس^۳

۱. نویسنده مسئول، مدیرکل دفتر توسعه نیروگاه‌های زیست‌توده، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، وزارت نیرو. رایانامه: h.hosseini.sh@gmail.com
۲. کارشناس مطالعات فنی و ارزیابی اقتصادی، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، وزارت نیرو. رایانامه: razaghi1988@gmail.com
۳. دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mahmood.abdoos@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵

کلیدواژه:

انرژی تجدیدپذیر،

P2E

تولید برق،

زیست‌توده،

پسماند جامد شهری،

زباله‌سوز،

هاضم بی‌هوازی.

توسعه شهرنشینی و رشد سریع جمعیت شهرها به تولید میزان قابل توجهی پسماند شهری منجر شده و معضلات زیست‌محیطی متعددی را به وجود آورده است که دیگر نمی‌توان همانند گذشته آن‌ها را در دفن‌گاه‌ها دفن کرد. در این میان، با استفاده از فناوری‌های مدرن از جمله تبدیل پسماند به انرژی، علاوه بر رفع مشکلات زیست‌محیطی می‌توان به تولید انرژی پرداخت و در مصرف سوخت‌های فسیلی صرفه‌جویی کرد. منابع زیست‌توده شامل پسماند جامد شهری، زائدات کشاورزی، فضولات دامی و فاضلاب‌های شهری و صنعتی، که به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی محسوب می‌شوند، از پتانسیل بالایی برای تولید انرژی الکتریکی برخوردار هستند؛ به طوری که هر تن پسماند جامد شهری در روز، با ارزش حرارتی ۶ هزار کیلوژول بر کیلوگرم و با به‌کارگیری فناوری زباله‌سوزی، پتانسیل تولید حدود ۴۶۶ کیلووات ساعت برق در روز را دارد. به همین ترتیب، انتظار می‌رود با استفاده از بیوگاز حاصل از یک تن پسماند آلی که توسط فرایند هضم بی‌هوازی تولید شده است، حدود ۲۸۰ کیلووات ساعت برق در روز تولید شود. تولید این میزان برق علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی، موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر متان و CO₂ نیز می‌شود. بنابراین، استفاده از این پتانسیل برای تولید انرژی و همچنین اهمیت رفع مشکلات زیست‌محیطی ناشی از دفن پسماندها، ضروری به نظر می‌رسد.

استناد: حسینی شکرابی، حلیا سادات؛ رزاقی، شهلا و عبدوس، محمود (۱۴۰۴). ارزیابی و امکان‌سنجی تبدیل پسماند به انرژی در کلان‌شهرهای کشور در حال توسعه (مطالعه موردی: ایران). *سیاست‌گذاری پیشرفت شهری*، ۲ (۱) ۴۹-۷۱.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2025.512670.1021>

© حلیا سادات حسینی شکرابی، شهلا رزاقی، محمود عبدوس

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2025.512670.1021>



۱. مقدمه

در سال ۲۰۲۲ میلادی مجموع انرژی تولیدشده در جهان به ۶۲۲ اگزاژول رسید که ۸۰ درصد آن توسط سوخت‌های فسیلی تأمین شده و زغال سنگ، نفت و گاز اصلی‌ترین منابع تولید این انرژی بوده‌اند. اگرچه منابع انرژی تجدیدپذیر در یک دهه گذشته رشد ۳۰ درصدی داشته‌اند، اما اگزاژول از این انرژی توسط آن‌ها تولید شده است [۱-۳]. در این میان، سهم بیوانرژی تنها ۹ درصد از کل انرژی تولیدشده بوده است. جدول ۱ سهم منابع مختلف تولید انرژی در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ را نشان می‌دهد [۴].

جدول ۱. مجموع انرژی تولیدشده در جهان به تفکیک منشأ (تمام واحدها اگزاژول است)

سال	مجموع	زغال سنگ	نفت	گاز	هسته ای	تجدیدپذیر	بیوانرژی (%)
۲۰۱۳	۵۵۶	۱۶۳	۱۷۷	۱۲۱	۲۷	۶۷	۸/۴۳
۲۰۱۴	۵۶۳	۱۶۵	۱۸۰	۱۲۱	۲۸	۶۹	۸/۴۱
۲۰۱۵	۵۶۴	۱۶۱	۱۸۲	۱۲۲	۲۸	۷۰	۸/۴۴
۲۰۱۶	۵۶۹	۱۵۶	۱۸۵	۱۲۷	۲۸	۷۲	۸/۵۱
۲۰۱۷	۵۸۱	۱۵۹	۱۸۸	۱۳۰	۲۹	۷۵	۸/۵۰
۲۰۱۸	۵۹۵	۱۶۲	۱۸۹	۱۳۶	۳۰	۷۸	۸/۵۵
۲۰۱۹	۶۰۲	۱۶۲	۱۹۱	۱۳۹	۳۰	۸۱	۸/۵۸
۲۰۲۰	۵۸۰	۱۵۸	۱۷۳	۱۳۸	۲۹	۸۳	۸/۹۷
۲۰۲۱	۶۱۴	۱۶۹	۱۸۳	۱۴۶	۳۱	۸۶	۸/۷۵
۲۰۲۲	۶۲۲	۱۷۲	۱۸۸	۱۴۴	۲۹	۸۹	۸/۷۶

مطابق جدول ۱، بیان می‌شود که مجموع انرژی مصرف‌شده در جهان در سال ۲۰۲۲ به ۴۲۲ اگزاژول رسید که منشأ ۸۲ درصد از آن سوخت‌های فسیلی بوده است. محصولات نفتی اصلی‌ترین منابع تولید انرژی بوده و سهم آن‌ها ۱۶۸ اگزاژول بوده است که ۱۰۴ اگزاژول از آن به شکل برق و گرما مصرف شده است. با توجه به جدول ۲ بیان می‌شود که سهم انرژی مصرف‌شده با منشأ تجدیدپذیر (بدون در نظر گرفتن انرژی زیستی) رشد پایدار خود را حفظ کرده و به ۲/۸۷ اگزاژول رسیده که نسبت به سال ۲۰۱۲ دو برابر شده است [۵]. بیوانرژی نیز با سهم ۳۹ اگزاژولی، یک مؤلفه قابل ملاحظه در این آمار است. جدول ۲ مجموع انرژی مصرف‌شده در جهان را به تفکیک در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد [۴].

جدول ۲. مجموع انرژی مصرف‌شده در جهان به تفکیک منشأ (تمام واحدها اگزاژول است)

سال	زغال سنگ	محصولات نفتی	گاز طبیعی	دیگر تجدیدپذیرها	سوخت‌های زیستی	برق و گرما	مجموع
۲۰۱۳	۴۷	۱۵۵	۵۹	۱/۴۸	۴۲	۸۲	۳۶۸
۲۰۱۴	۴۷	۱۵۷	۵۹	۱/۵۹	۴۲	۸۴	۳۹۱
۲۰۱۵	۴۶	۱۶۱	۵۹	۱/۷۳	۴۲	۸۴	۳۹۴
۲۰۱۶	۴۴	۱۶۴	۶۱	۱/۸۸	۴۲	۸۷	۳۹۹
۲۰۱۷	۴۲	۱۶۸	۶۳	۲/۰۲	۴۲	۹۰	۴۰۷
۲۰۱۸	۴۰	۱۷۰	۶۷	۲/۲۱	۴۳	۹۴	۴۱۷
۲۰۱۹	۳۹	۱۷۱	۶۸	۲/۳۳	۴۴	۹۵	۴۱۹
۲۰۲۰	۳۸	۱۵۵	۶۷	۲/۵۰	۴۳	۹۵	۴۰۲
۲۰۲۱	۳۸	۱۶۴	۷۲	۲/۶۸	۴۴	۱۰۱	۴۲۲
۲۰۲۲	۳۷	۱۶۸	۷۱	۲/۸۷	۳۷	۱۰۴	۴۲۲

۲. پیشینه پژوهش

۲-۱. وضعیت انرژی‌های تجدیدپذیر

در سال ۲۰۲۳ برق تولیدشده از منابع تجدیدپذیر ۸۹۳۱ تراوات ساعت بوده که ۴۷ درصد آن توسط نیروگاه‌های برق‌آبی و ۲۶ درصد آن توسط نیروگاه‌های بادی تأمین شده است [۱]. بیوانرژی به عنوان چهارمین منبع بزرگ تأمین برق تجدیدپذیر، تولید ۶۹۷ تراوات ساعت (معادل ۸ درصد) از این برق را به عهده داشته است. گرچه بیوانرژی رشد پیدا کرده، اما سهم نسبی آن در مقایسه با باد و خورشید که به سرعت در یک دهه گذشته توسعه یافته‌اند، ثابت بوده است [۴ و ۶].

جدول ۳. برق تجدیدپذیر تولیدشده در جهان (تمام مقادیر برحسب تراوات ساعت است)

سال	مجموع	بیوانرژی	برق‌آبی	خورشیدی	بادی	دیگر تجدیدپذیرها	سهم بیوانرژی (%)
۲۰۰۰	۲۸۵۸	۱۵۴	۲۶۳۹	۱	۳۱	۴۴	۵
۲۰۰۵	۳۲۸۰	۲۱۱	۲۹۱۲	۴	۱۰۴	۴۹	۶
۲۰۱۰	۴۱۹۲	۳۲۵	۳۴۲۸	۳۲	۳۴۶	۶۰	۸
۲۰۱۵	۵۵۱۹	۴۷۷	۳۸۸۴	۲۵۶	۸۳۰	۷۳	۹
۲۰۲۰	۷۴۸۴	۶۰۹	۴۳۴۴	۸۵۳	۱۵۹۱	۸۶	۸
۲۰۲۱	۷۹۲۷	۶۵۹	۴۲۷۶	۱۰۵۶	۱۸۴۹	۸۷	۸
۲۰۲۲	۸۴۸۵	۶۷۶	۴۲۹۸	۱۳۲۳	۲۰۹۹	۸۹	۸
۲۰۲۳	۸۹۳۱	۶۹۷	۴۲۱۰	۱۶۳۱	۲۳۰۴	۹۰	۸

در سال ۲۰۲۲، ۱/۳۳ اگزاژول انرژی با منشأ تجدیدپذیر به شکل گرما تولید شده که ۹۶ درصد از آن توسط منابع زیست‌توده تأمین شده است. فناوری‌های زمین‌گرایی و حرارت خورشیدی سهم اندکی در تولید گرما داشته‌اند [۵]. کشورهای اروپایی تقریباً ۸۰ درصد از گرمای تولیدشده از منابع تجدیدپذیر را در جهان تولید کرده‌اند که ۹۵ درصد از آن توسط منابع زیست‌توده تأمین شده است [۷].

۲-۲. تبدیل پسماند به انرژی

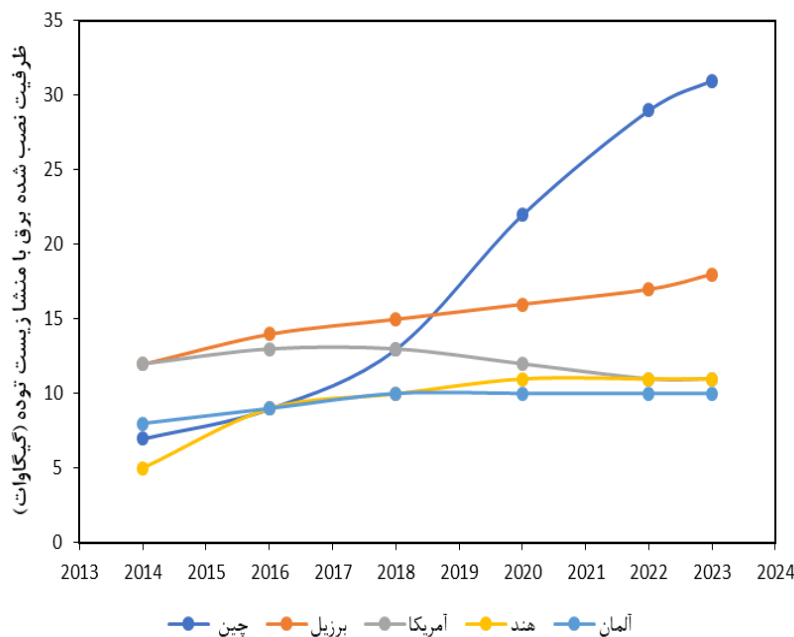
در سال ۲۰۲۱ تأمین انرژی از پسماند شهری و صنعتی ۲/۷ اگزاژول بوده که ۵۶ درصد از آن با استفاده از پسماند جامد شهری تأمین شده است. براساس اطلاعات منتشرشده توسط کنفدراسیون نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی اروپا، از سال ۲۰۲۱ نزدیک به ۵۰۰ نیروگاه تبدیل پسماند به انرژی در اروپا به بهره‌برداری رسیده است که حدود ۱۰۳ میلیون تن پسماند جامد شهری را پردازش می‌کنند [۸]. انرژی تولیدشده از این فرایند برق ۲۱ میلیون شهروند اروپایی و گرمای مورد نیاز ۱۷ میلیون شهروند را تأمین می‌کند [۷].

فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی به دلیل پتانسیل آن‌ها در کاهش اثرات زیست‌محیطی، به‌خصوص کاهش انتشار گاز کربن دی‌اکسید، شناخته شده هستند [۱]. با استفاده از پسماند به عنوان منبع انرژی، نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی می‌توانند نیاز به سوخت‌های فسیلی برای تولید برق را کاهش دهند. بسته به نوع سوخت فسیلی جایگزین، حدود ۱۰ تا ۵۶ میلیون تن صرفه‌جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی اتفاق خواهد افتاد که به کاهش انتشار گاز کربن دی‌اکسید به میزان ۲۲ تا ۴۴ میلیون تن منجر می‌شود.

با تبدیل پسماند به انرژی، نیروگاه‌هایی که مبتنی بر این فناوری فعالیت می‌کنند باعث کاهش وابستگی به دفن پسماند و توسعه لندفیل‌ها، حفظ زمین‌های با ارزش و کاهش انتشار گاز متان می‌شوند [۷].

ظرفیت تولید برق از منابع زیست‌توده به طور پیوسته طی یک دهه گذشته رشد یافته است و از ۸۸ گیگاوات در سال ۲۰۱۴ به ۱۵۰/۳ گیگاوات در سال ۲۰۲۳ رسیده که ۷۱ درصد رشد داشته است. قاره آسیا بیشترین سهم را در این رشد داشته است و ظرفیت تولید برق با منشأ زیست‌توده در این قاره طی یک دهه سه برابر شده و از ۲۱ گیگاوات به ۶۳ گیگاوات رسیده است که علت آن، سرمایه‌گذاری قابل ملاحظه ژاپن و چین در این زمینه بوده است. در حالی که اروپا ابتدا به صورت پیوسته در حال رشد

ظرفیت برق از منابع زیست‌توده بوده است، پس از سال ۲۰۱۹ رشد آن متوقف شده و ظرفیت حدود ۴۲-۴۳ مگاوات را حفظ کرده است. قاره آمریکا رشد متوسطی داشته و در سال ۲۰۲۳ به ظرفیت ۳۸ گیگاواتی دست یافته است. در همین حال، ظرفیت تولید برق با منشأ زیست‌توده در آفریقا و اقیانوسیه از سال ۲۰۱۶ به میزان ۳ گیگاوات راکد مانده است. طی یک دهه گذشته ظرفیت برق تولیدشده با منشأ زیست‌توده در چین از ۷ گیگاوات در سال ۲۰۱۴ به ۳۱ گیگاوات در سال ۲۰۲۳ رسیده که به داشتن بالاترین ظرفیت برق زیستی در میان کشورهای جهان منجر شده است. برزیل و ایالات متحده آمریکا رتبه‌های دوم و سوم را در این رده‌بندی دارند. کشور ژاپن با رشد ظرفیت سالانه ۱۸ درصد، بالاترین نرخ رشد ظرفیت برق زیستی را در میان کشورهای جهان دارد [۴].



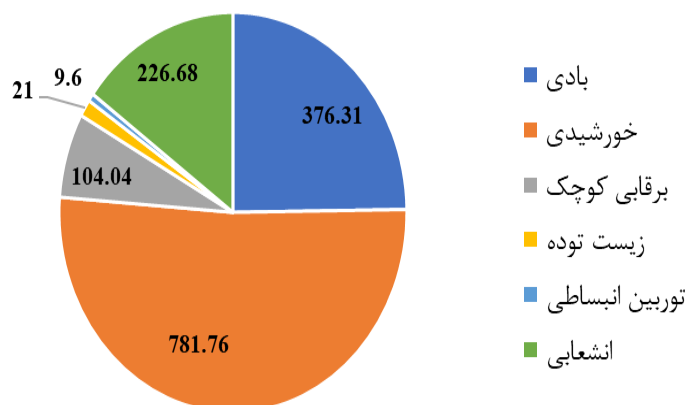
شکل ۱. ظرفیت نصب‌شده برق با منشأ زیست‌توده در کشورهای چین، برزیل، آمریکا، هند و آلمان

۲-۳. وضعیت انرژی‌های تجدیدپذیر و تبدیل پسماند به انرژی در ایران

کشور ایران یکی از دارندگان بزرگ ذخایر نفت و گاز در جهان است و بخش اعظم انرژی مورد نیاز کشور توسط این منابع تأمین می‌شود. افزایش تقاضا، استهلاک تجهیزات استخراج نفت و گاز، عدم استفاده از تکنولوژی‌های روز دنیا برای تولید انرژی و همچنین سرانه مصرف انرژی بالا به دلیل ارزان بودن انرژی، سبب شده است تا ناترازی قابل ملاحظه‌ای در بخش تولید و مصرف انرژی مشاهده شود [۷ و ۹]. از سویی دیگر، ارزان و در دسترس بودن سوخت‌های فسیلی سبب شده بود تا در سال‌های گذشته توجه چندانی به موضوع تنوع بخشی به سبد تأمین انرژی در کشور نشود و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در اولویت قرار نگرفته باشد [۱۰ و ۱۱]. در سال‌های اخیر موضوع ناترازی در تولید و مصرف انرژی توجه‌ها را به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده و توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر با شتاب بیشتری در دستور کار قرار گرفته است [۷، ۹ و ۱۲].

میزان تولید برق با استفاده از نیروگاه‌های بادی، خورشیدی، برق‌آبی، زیست‌توده، توربین انبساطی و انشعابی^۱ در ایران، تا پایان آذرماه ۱۴۰۳، در نمودار ۲ نمایش داده شده است. مجموع ظرفیت نصب‌شده تولید برق از منابع تجدیدپذیر تا تاریخ یادشده ۱۵۲۰ مگاوات بوده که نسبت به ظرفیت نصب‌شده در پایان اسفندماه ۱۴۰۲ حدود ۳۰ درصد افزایش داشته است. عمده این افزایش ظرفیت بر اثر توسعه نیروگاه‌های خورشیدی و انشعابی بوده است [۱۲ و ۱۳].

۱. نوعی از نیروگاه‌های مقیاس کوچک خورشیدی هستند که توسط دارندگان انشعاب برق احداث شده و برق تولیدی آن‌ها به شبکه تریق می‌شود.



شکل ۲. ظرفیت نصب شده نیروگاه های تجدیدپذیر تا پایان آذرماه ۱۴۰۳ در ایران

ظرفیت تولید برق از منابع زیست توده در پایان آذرماه ۱۴۰۳ حدود ۲۱ مگاوات بوده و نسبت به ظرفیت نصب شده تا انتهای سال ۱۴۰۲، ۶۴ درصد رشد داشته است. در حال حاضر، پنج نیروگاه زیست توده، شامل دو نیروگاه زباله سوز، دو نیروگاه هاضم بی هوازی (فاضلاب) و یک نیروگاه لندفیل در حال بهره برداری هستند. با توجه به تولید روزانه ۵۸ هزار تن پسماند در کشور، پتانسیل دستیابی به ظرفیت تولید ۵۵۰ مگاوات برق از منابع زیست توده وجود دارد [۹]. براساس ارزیابی های انجام شده در سازمان انرژی های تجدیدپذیر و بهره وری انرژی برق (ساتبا)، ۲۵۰ مگاوات نیروگاه زباله سوز، ۲۰۰ مگاوات نیروگاه هاضم بی هوازی و ۱۰۰ مگاوات نیروگاه لندفیل قابل احداث است [۱۴].



شکل ۳. پتانسیل تولید انرژی از پسماند جامد شهری در ایران براساس ارزیابی های ساتبا

در این مقاله علاوه بر اشاره به فناوری های تبدیل پسماند به انرژی و ضعفها و قوت های هر یک از این فناوری ها، به چالش های مدیریت پسماند در ایران و چگونگی رفع این چالش ها با استفاده از فناوری های تبدیل پسماند به انرژی اشاره خواهد شد. زیرساخت های مورد نیاز برای توسعه این فناوری ها و همچنین، آثار مثبت زیست محیطی و اجتماعی آن ها نیز بیان خواهد شد.

۳. روش شناسی

۳-۱. تکنولوژی های ترموشیمیایی

این نوع از تکنولوژی ها به وسیله گرم کردن پسماند در شرایط حضور یا عدم حضور عوامل کمکی، انرژی تولید می کنند. مزیت عمده روش های ترموشیمیایی، کاهش قابل توجه حجم زباله و سرعت بیشتر در تولید انرژی است. انواع تکنولوژی های ترموشیمیایی عبارتند از: احتراق (زباله سوز)، گازسازی، پیرولیز و پلاسما. فناوری های بیوشیمیایی و ترموشیمیایی در مقایسه با یکدیگر، دارای مزایا و معایبی هستند [۱۵]. بازده تبدیل انرژی تولیدی (انرژی تولیدی به ازای واحد وزن زباله ورودی)، میزان کاهش در مقدار زباله

دفع‌شونده و میزان انتشار آلاینده‌ها، سه جنبه اصلی در مقایسه فنی روش‌های موجود استحصال انرژی از زباله هستند. بازده تولید الکتریسیته در هر یک از این روش‌ها، بسته به ترکیب زباله ورودی و فناوری به کار گرفته شده تغییر می‌کند.

جدول ۴. بازده فناوری‌های تولید انرژی از پسماند جامد شهری

فناوری	بازده تبدیل انرژی (کیلووات ساعت بر تن زباله ورودی)
احتراق مستقیم (زباله‌سوز)	۹۳۰ تا ۴۷۰
گازسازی	۶۵۰ تا ۴۰۰
پیرولیز	۵۳۰ تا ۴۵۰
پلازما	۲۵۰ تا ۴۰۰
هضم بی‌هوازی	۱۵۰ تا ۷۵
گاز دفنگاه	۸۴ تا ۴۱

اما به کارگیری فناوری‌های استحصال انرژی از زباله فقط برای تولید الکتریسیته نبوده، بلکه هدف اصلی، کاهش حجم زباله و تبدیل آن به موادی بی‌ضرر است. انرژی تولیدی نیز فقط یک محصول جانبی آن محسوب می‌شود. میزان کاهش در مقدار زباله‌ای که پس از پردازش توسط هر یک از فناوری‌ها، به دفنگاه ارسال می‌شود نیز به ترکیب زباله ورودی وابسته است. درصد کاهش وزنی زباله پردازش‌شونده توسط فناوری‌های مختلف، جهت مقایسه، در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. درصد کاهش حجم زباله پس از پردازش

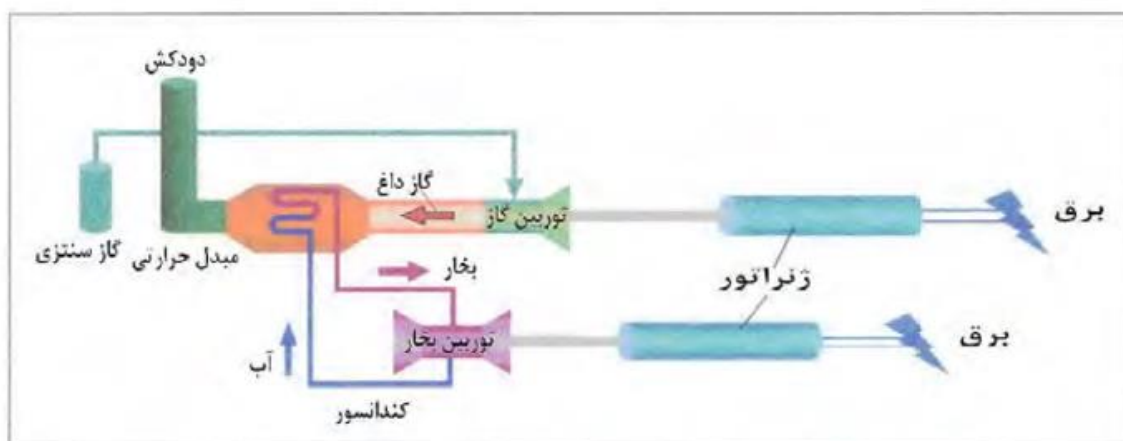
فناوری	کاهش وزنی زباله (%)
احتراق مستقیم (زباله‌سوز)	۷۵
گازسازی	۹۴ تا ۱۰۰
پیرولیز	۷۲ تا ۹۵
پلازما	۹۵ تا ۱۰۰
گاز دفنگاه	۰

۳-۱-۱. زباله‌سوز

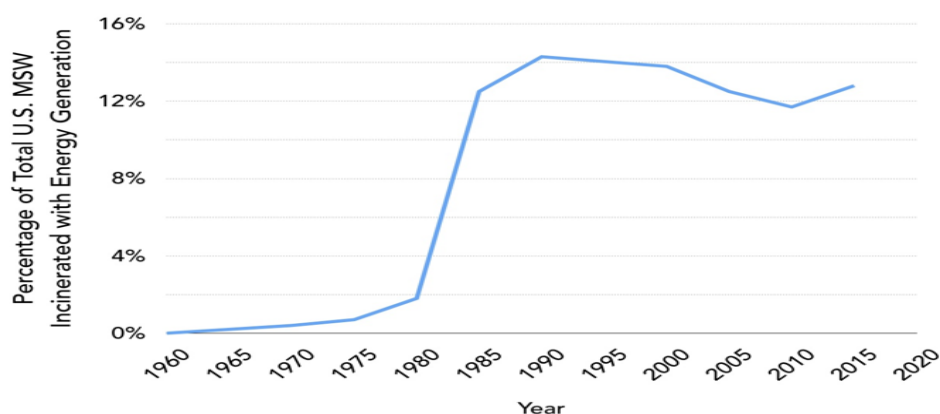
اولین نیروگاه تجاری در سال ۱۹۷۱ در آمریکا ساخته شد که هدف آن بازیابی مواد آهنی و غیرآهنی به‌خصوص آهن، آلومینیوم، شیشه و الیاف کاغذ بود و تقریباً می‌توان گفت که بحران‌های زباله و پسماند در اوایل ۱۹۹۰ تا حدودی رفع شد. در سال ۲۰۱۶ تعداد نیروگاه‌های زباله‌سوز به ۱۶۱۸ در سراسر جهان رسید که از این تعداد ۵۱۲ نیروگاه در اروپا، ۸۲۲ نیروگاه در ژاپن، ۸۸ نیروگاه در آمریکا و ۱۶۶ نیروگاه نیز در چین موجود است. در حدود ۹۰ درصد از پسماند جامد شهری در اروپا در سال ۲۰۱۵ در کوره سوزانده شد [۱۱].

زمانی که بحث دفع زباله‌های خطرناک و بیمارستانی مطرح می‌شود، نقش زباله‌سوزها بیشتر نمایان می‌شود. زباله‌سوزها به عنوان واحدهایی تعریف می‌شوند که توسط حرارت، مواد زائد را اکسید و مواد کربنی را کاهش می‌دهند. محصولات خروجی از زباله‌سوزها، دی‌اکسید کربن، آب، خاکستر و حرارت حاصل از احتراق است. علاوه بر این، آلاینده‌های هوا نظیر ترکیبات سولفور و نیتروژن و هالوژن‌ها و فلزات سنگین نظیر کادمیوم نیز از محصولات دیگر احتراق هستند. در برخی موارد، سوزاندن زباله‌ها از مناسب‌ترین شیوه‌های مدیریت زباله به شمار می‌رود. حداقل ارزش حرارتی مناسب برای تولید انرژی از پسماند به روش زباله‌سوزی ۶ KJ/Kg هزار تخمین زده شده است [۱۶]. امروزه، ظرفیت جهانی زباله‌سوزی به منظور انهدام زباله و در کنار آن تولید انرژی و بازیافت فلزات (از زباله‌های جامد شهری) حدود ۱۳۰ میلیون تن در سال است که حدود ۶۰۰ نیروگاه بزرگ زباله‌سوز انجام می‌شود. سوزاندن مواد زائد جامد شهری یک فرایند مهارشده است که در آن مواد زائد جامد می‌سوزد و به خاکستر تبدیل شده و باقی‌مانده به گازهای کم‌خطر و یا بی‌خطر تبدیل می‌شوند [۳]. زباله‌سوزی یکی از روش‌های دفع مواد زائد شهری است. از این دستگاه‌ها نیز می‌توان برای کاهش یا رفع ویژگی سمی مواد استفاده کرد. به طور کلی، می‌توان زباله‌های شهری، مواد

شیمیایی آلی، مواد پرتوشناسی، مواد بیولوژیکی، مواد آتش‌گرفتنی، مواد منفجرشدنی، لجن حاصل از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را در انواع مختلف زباله‌سوزها سوزاند. شکل ۴ نمایی از یک واحد زباله‌سوزی را نشان می‌دهد. در شکل ۵ میزان رشد استفاده از فناوری زباله‌سوزی در آمریکا را در سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۰ مشاهده می‌شود که روند صعودی داشته است.



شکل ۴. شماتیک سیستم تولید نیرو در یک نیروگاه زباله‌سوز



شکل ۵. میزان رشد زباله‌های جامد شهری سوزانده‌شده در آمریکا بر حسب سال

۲-۳. انواع زباله‌سوز

انواع مختلفی از سیستم زباله‌سوزی موجود است که در ادامه برخی از آن‌ها که در پسماندهای جامد شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند را توضیح مختصری خواهیم داد.

۳-۲-۱. زباله‌سوز توده‌سوز

این نوع زباله‌سوزها، زباله‌های فرآوری‌نشده شهری را در محفظه احتراق واحد یا دوتایی با استفاده از هوای اضافی که برای اطمینان از احتراق کامل به کار می‌رود، می‌سوزانند که سبب افزایش زمان عمر تجهیزات می‌شود. عملیات با تخلیه مواد زائد جامد از کامیون‌های جمع‌آوری در یک انبار ذخیره‌سازی شروع می‌شود. ظرفیت ذخیره به طور متوسط، حجم زباله یک روز است [۱۷]. چون اکثر زباله‌های آلی از لحاظ حرارتی ناپایدار هستند، گازهای متعددی هنگام فرایند احتراق که دما در حدود 760°C است، متصاعد می‌شود. این گازها و ذرات ریز آلی از یک محفظه که معمولاً محفظه احتراق نامیده می‌شود و در دمای بالای 820°C سوزانده می‌شوند و محصولات بدبوی حاصل از احتراق معمولاً در دمای بالای 760°C تا 820°C از بین می‌روند. با توجه به قوانین

کنترل آلودگی هوا، باید تجهیزات پاکسازی تدارک دیده شود [۱۸]. برای تأمین جریان خوب هوا و غلبه بر افت فشار ناشی از تجهیزات پاکسازی هوا، فن مورد استفاده قرار می‌گیرد. محصول نهایی سوزاندن زباله، گازهای تمیزی است که از دودکش تخلیه می‌شود. خاکستر و مواد نسوخته به داخل قیف که در زیرشبه‌ها هستند می‌افتند که به وسیله آب سرد خاموش می‌شوند [۳]. ذرات خاکستر که در داخل محفظه احتراق نشست می‌کنند به وسیله دستگاه مخصوص این کار دفع می‌شوند و باقی‌مانده نهایی حاصله به مناطق دفع یا واحدهای بازیافت هدایت می‌شوند به عنوان نمونه برای بازیافت حرارتی از این سیستم، بویلر دیگ بخار به کار می‌رود که از حرارت گازهای احتراقی که محفظه احتراق را ترک می‌کنند برای تبدیل آب به بخار استفاده می‌کند. برای بالا بردن دما و فشار جهت تولید انرژی الکتریکی از یک مبدل حرارتی به نام سوپرهیتر استفاده می‌شود و سوپرهیترهای تابشی که از حرارت تابشی محفظه احتراق استفاده می‌کنند در مقابل بویلر نصب می‌شوند، سپس بخارهای تولیدشده به بخش جمع‌آوری هدایت می‌شوند [۱۶].

۳-۲-۲. زباله‌سوز مدولار

این زباله‌سوزها واحدهای کوچک با ظرفیت ۵ تا ۱۰۰ تن در روز هستند. آن‌ها نوعاً دارای دو محفظه احتراق اولیه و ثانویه هستند. زباله‌سوزهای مدولار، زباله‌ها را در یک محفظه اولیه عایق‌شده با مواد نسوز با هوای کمتر از مقدار استوکیومتری که اکسیژن کافی برای احتراق کامل ندارد، می‌سوزانند. گازهای احتراق ابتدا مخلوطی از مونواکسیدکربن و آب هستند که وارد محفظه احتراق دوم می‌شوند و در آن هوای اضافی و سوخت برای احتراق کامل موجود است. انرژی گازهای احتراق با عبور از لوله‌هایی می‌تواند برای تولید برق مورد استفاده قرار گیرد [۱۶].

۳-۲-۳. زباله‌سوز با سوخت RDF

سوخت‌های RDF از باقی‌مانده زباله‌های جامد شهری پس از جداسازی موادی از آن مانند شیشه‌ها و سایر ترکیباتی که نمی‌سوزند، تشکیل می‌شود. این سوخت می‌تواند به صورت یک سوخت جامد در بویلرهای RDF سوز استفاده شود و یا به همراه زغال سنگ و یا نفت در بویلرهای چندسوخته سوزانده شود. همچنین در حال حاضر RDF در کوره سیمان به عنوان جانشین سوخت‌های فسیلی تزریق می‌شود [۱۹].

۳-۲-۴. زباله‌سوز با بستر سیال

در مقابل زباله‌سوزهای توده‌سوز که زباله‌ها روی شبکه یا آتشدان کوره می‌سوزانند، زباله‌سوزهای بستر سیال، زباله را در یک بستر شامل ماده بی‌اثر داغ نظیر شن و ماسه که به وسیله جریان سریع و رو به بالای هوای اولیه احتراق به صورت سوسپانسون درآمده‌اند، خشک می‌کند. احتراق مؤثر نیاز به سوخت همگن دارد. ذرات چوب یا سایر زباله‌های همگن را می‌توان به طور مستقیم وارد این زباله‌سوز کرد، ولی زباله‌های شهری ابتدا فرآوری شده و سپس وارد این زباله‌سوز می‌شوند. در طراحی استاندارد راکتور بستر سیال که گاهی اوقات بستر سیال حباب‌دار (BFB) نامیده می‌شود سرعت هوا ۱/۵ تا ۳ متر در ثانیه به کار می‌رود [۳]. در حالی که مواد بستر و مواد با احتراق ناقص نیم‌سوخته به داخل محفظه برمی‌گردند. این مواد از جریان گازهای دودکش جدا می‌شوند و دوباره به کوره برمی‌گردند [۱۸]. هوای احتراق ثانویه به بالای محفظه دمیده می‌شود. این زباله‌سوزها این قابلیت را دارند که محدوده وسیعی از سوخت‌ها شامل زباله جامد شهری و لجن فاضلاب را بسوزانند. کوره‌های بستر سیال می‌توانند مواد فرآوری‌شده را به‌تنهایی یا در کنار سایر مواد با ظرفیت ۸۰۰ تن در روز بسوزانند. از مهم‌ترین مزیت زباله‌سوز بستر سیال راندمان احتراق ۹۹ درصد است [19].

۳-۲-۵. محصولات خروجی از زباله‌سوز

محصولات خروجی از زباله‌سوزها، دی‌اکسید کربن، آب، خاکستر و حرارت حاصل از احتراق است. علاوه بر این، آلاینده‌های هوا نظیر ترکیبات سولفور و نیتروژن و هالوژن‌ها و فلزات سنگین گوناگون (مانند کادمیوم، جیوه و...) نیز از دیگر محصولات احتراق

هستند. در مورد بسیاری از زباله‌ها، سوزاندن از بهترین و یا ضروری‌ترین شیوه‌های مدیریت زباله به شمار می‌رود. در اغلب موارد، سوزاندن تنها به عنوان مرحله پردازش برای بسیاری از زباله‌های جامد و مایع به شمار می‌آید و پسماندهای جامد یا مایع برای مراحل بعدی دفع باقی می‌مانند [۱۹ و ۲۰].

۳-۳. انواع مختلف خاکستر تولیدی در زباله‌سوزها

۳-۳-۱. خاکستر ته‌نشین

حدود ۸۵ تا ۹۰ درصد خاکستر تولیدی در زباله‌سوزها از این نوع محسوب می‌شود، این نوع از خاکستر شامل مواد خنثی، شیشه و فلز است. اندازه ذرات این بین ۰/۱۰ تا ۰/۱۵ میلی‌متر است. معمولاً این نوع از خاکستر خطرناک نیست.

۳-۳-۲. خاکستر معلق

این نوع از خاکستر طی فرایند احتراق ایجاد می‌شود و از نظر اندازه ذرات بسیار کوچک‌تر از خاکستر ته‌نشین و حدود ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی‌متر است، برعکس خاکستر ته‌نشین این نوع همواره به صورت خشک است و بسیار فرار است، به این منظور از آب برای جلوگیری از پخش شدن آن استفاده می‌شود. برای تشخیص آلودگی‌های زیست‌محیطی معمولاً از این شاخص استفاده می‌شود [۱۰].

۳-۳-۳. خاکستر اسکرابر

این نوع خاکستر از واکنش گازهای خروجی و مواد شیمیایی نظیر آهک که به منظور کنترل آلودگی مورد استفاده قرار می‌گیرد تولید می‌شود. این نوع از خاکستر نیز جزء خاکسترهای خطرناک محسوب می‌شود [۱۰].

۳-۳-۴. موارد استفاده از خاکستر

مواد باقی‌مانده بعد از هضم و تصفیه حرارتی به طور عمومی شامل خاکستر کف و لجن است. این مواد به طور مکانیکی جمع‌آوری و تا دمای 1000°C حرارت داده می‌شوند و سپس، به آرامی سرد می‌شوند (ابتدا به وسیله آب ته‌نشین شده و سپس به بیرون زباله‌سوز هدایت می‌شوند)، آهن‌ربای الکتریکی برای جدا کردن مواد قابل بازیافت مانند آهن و آلومینیوم استفاده می‌شود. استفاده از خاکستر در مصالح ساختمانی، که در این شرایط باید از بی‌خطر بودن آن اطمینان حاصل شود، به صورت یک ماده بی‌اثر مثل شیشه تشکیل می‌شود [۲۱]. نیتروژن، فسفر و پتاسیم سه ماده اصلی برای رشد گیاهان است. خاکستر حاصل از سوزاندن پسماند جامد شهری با فراهم آوردن این مواد کاربرد مفیدی برای کشاورزی دارد. خاکستر کف حاوی مقادیر زیادی فسفر و پتاسیم است که می‌تواند جایگزین کود تجاری عمل کند [۱۰].

۳-۴. تولید بیوگاز از زباله جامد شهری

نظر به اینکه درصد بالایی (حدود ۷۵ درصد) از مواد موجود در زباله‌های جامد شهری (MSW) تجزیه‌پذیر و جز آلی (پسماند تر) بوده، با فرایند بی‌هوازی قابلیت تبدیل به فرایند بیوگاز را دارند که علت بسیاری از مشکلات محیط زیستی مانند: آلودگی آب، خاک و هوا شناخته شده است [۳۳]. با توجه به رطوبت بالا در مواد آلی زباله‌های مناطق شهری، استفاده از سیستم‌های زباله‌سوز راهکار مناسبی نبوده، زیرا گازهای تولیدی از سوزاندن باعث آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود. استفاده از کمپوست نیز کارایی لازم را ندارد و عمل تثبیت مواد آلی در این روش به طور کامل انجام نمی‌گیرد [۲۲]. در روش هضم بی‌هوازی می‌توان ضمن حل معضل زباله و فاضلاب با رعایت مسائل زیست‌محیطی، کود آلی و انرژی قابل ملاحظه‌ای تولید کرد [۲۳]. در فرایند هضم بی‌هوازی مواد زائد آلی شهری، پسماندهای آلی در راکتورهای هاضم بسته بدون هیچ‌گونه برهم‌کنش زیست‌محیطی تحت تأثیر میکرو ارگانیسم‌های بی‌هوازی شکسته شده و به ترکیبات ساده‌تر تبدیل می‌شوند [۱۸]. حاصل نهایی این فرایند با ارزش گاز قابل سوختنی (متان) و کود آلی است که سرشار از مواد مغذی قابل استفاده در توسعه کشاورزی و پرورش گل و گیاه آپارتمانی است [۱۹ و ۲۴].

از آنجا که تخمیر بی‌هوازی در راکتورها و تانک‌های بسته انجام می‌گیرد، امکان نشر آلاینده به محیط زیست وجود ندارد، چنین تجهیزاتی را می‌توان نزدیک به مناطق مسکونی ایجاد کرد. کل گاز تولیدشده از واحد تخمیر به وسیله لوله‌های مناسب به واحد

مصرف انتقال می‌یابد. این گاز می‌تواند با عنوان منبع سوخت در تولید انرژی (الکتروسیته) و یا در مصارف صنعتی و تولید آب گرم مورد استفاده قرار گیرد [۲۵]. همچنین، می‌توان با تزریق گاز تولیدی به شبکه گازی شهری با توزیع مناسب از آن استفاده کرد. مقدار بیوگاز تولیدی از حدود ۶۰۰ تن زباله قابلیت تولید ۱۲ هزار مگاوات - ساعت انرژی الکتریکی در سال را دارد [۲۱].

در حال حاضر، در بسیاری از کشورها هضم بی‌هوازی به عنوان یک جایگزین مناسب برای کاهش حجم زباله و بازیابی انرژی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲]. اهمیت و توسعه بیوگاز در جهان طی سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از جمله عواملی که سبب افزایش علاقه‌مندی در زمینه کاربرد و توسعه این تکنولوژی شده است، عبارت‌اند از: تولید انرژی، کاهش آلودگی هوا، بهبود کیفیت کود و محصول این فرایند بیوگاز با حدود ۶۰ درصد متان است [۱۷]. سیستم هاضم بی‌هوازی سیستمی در جهت مدیریت پسماندهای آلی و تبدیل آن‌ها به انرژی و کود آلی بسیار مناسب است [۲۶]. با به‌کارگیری این روش از انتشار گازهای گلخانه‌ای به محیط زیست نیز جلوگیری می‌شود. امروزه در سطح گسترده‌ای این فرایند در حال اجرا است و یکی از روش‌های مناسب برای تبدیل مواد زائد جامد شهری به شمار می‌رود [۱۹].

۳-۵. لندفیل

لندفیل عبارت است از: فضایی ایزوله که به منظور ذخیره سیستماتیک بلندمدت پسماند در شرایطی که از نشت آن به هوا و آب جلوگیری می‌شود، طراحی می‌شود. لندفیل‌ها طی سالیان متمادی تنها روش دفع پسماند بوده‌اند.

در بسیاری از نقاط جهان لندفیل هنوز مهم‌ترین روش مدیریت پسماند صنعتی و شهری است. دفن پسماند به عنوان یکی از گزینه‌های ارزان در مدیریت پسماند شناخته شده است. این امر به دلیل این واقعیت است که دفن پسماند می‌تواند به پروژه بهره‌برداری مجدد از گاز طبیعی تبدیل شوند و در عین حال، به عنوان راهی جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از دفن زباله‌ها عمل کند [۲۳].

۳-۵-۱. ترکیب گاز لندفیل

خروج گاز در لندفیل‌ها در شرایط بی‌هوازی و از طریق تجزیه باکتریایی در یک فرایند چهارمرحله‌ای صورت می‌گیرد که این گاز عمدتاً حاوی ۵۵ تا ۶۰ درصد متان، ۴۰ تا ۴۵ درصد دی‌اکسید کربن و به مقدار کمی (کمتر از ۵ درصد) ترکیبات غیر متانی است.

۳-۵-۲. نیروگاه لندفیل

بخش آلی پسماند دفن شده در دفن‌گاه توسط میکرو ارگانیسم‌ها به بیوگاز تبدیل می‌شود که می‌توان با جمع‌آوری، کنترل و هدایت گاز به ژنراتورهای بیوگاز سوز، انرژی الکتریکی تولید کرد. بیوگاز متشکل از ۶۰ تا ۷۰ درصد متان و ۳۰ تا ۴۰ درصد دی‌اکسید کربن است. حدود ۰/۶ درصد از گاز محل دفن را گازهای فرعی، شامل ترکیبات بودار، هیدروکربن‌های آروماتیک، حلال‌های کلردار، الکل‌ها، هیدروکربن‌های آلیفاتیک و پلی‌آروماتیک، تشکیل می‌دهند [۲۳]. ترکیبات موجود در پسماند، سن دفن پسماند، وجود اکسیژن در لندفیل، دما و میزان رطوبت از جمله عواملی هستند که بر کیفیت و کمیت بیوگاز تولیدشده تأثیرگذار هستند [۲۷ و ۲۸].

- ترکیبات موجود در پسماند؛ هر چه میزان مواد آلی موجود در پسماند بیشتر باشد، گاز بیشتری تولید می‌شود.
- سن دفن پسماند؛ اگر سن دفن کمتر از ۱۰ سال باشد، گاز بیشتری تولید می‌شود. ماکزیمم مقدار گاز ۵ تا ۷ سال پس از دفن تولید می‌شود.
- وجود اکسیژن در لندفیل؛ وجود اکسیژن مانع تولید گاز متان می‌شود.
- دما؛ افزایش دما به افزایش فعالیت باکتری‌های شیمیایی، تبخیر و واکنش‌های شیمیایی و در نتیجه افزایش تولید بیوگاز منجر می‌شود.
- میزان رطوبت؛ وجود رطوبت در شرایط غیراشباع، باعث افزایش تولید گاز می‌شود.

متداولترین روش جمع‌آوری گاز لندفیل شامل حفر چاه‌های عمودی در زباله‌ها و اتصال سر چاه‌ها به لوله‌های جانبی برای انتقال گاز به جمع‌کننده است. نوع دیگری از سیستم جمع‌آوری گاز لندفیل که عموماً در لندفیل‌های عمیق استفاده می‌شود، مبتنی بر لوله‌کشی‌های افقی درون ترانشه‌های زباله است. برخی از سیستم‌ها ترکیبی از چاه‌های عمودی و لوله‌های افقی هستند. تکنولوژی‌های رایج تولید برق از گاز لندفیل شامل موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های گازی و میکروتوربین‌ها می‌شوند. موتورهای احتراق داخلی بیشترین استفاده را داشته و برای پروژه‌هایی با مقیاس ۸۰۰ کیلووات تا ۳ مگاوات مناسب هستند. توربین‌های گازی برای پروژه‌های بزرگ‌مقیاس با ظرفیت بیش از ۵ مگاوات و میکروتوربین‌ها برای پروژه‌هایی با ظرفیت کمتر از ۱ مگاوات مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۹].

۳-۵-۳. نیروگاه هاضم بی‌هوازی

در نیروگاه‌های هاضم بی‌هوازی مواد آلی فسادپذیر براساس واکنش هضم بی‌هوازی که در غیاب اکسیژن و در حضور میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی رخ می‌دهد تجزیه می‌شوند، مولکول‌های بزرگ به مولکول‌های ساده‌تر تبدیل شده و بیوگاز تولید می‌شود. این گاز با کمی پالایش برای تولید برق استفاده می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، بیوگاز حاوی ۶۰ تا ۷۰ درصد متان و ۳۰ تا ۴۰ درصد دی‌اکسید کربن است.

منابع اولیه مناسب برای تولید بیوگاز با استفاده از روش هضم بی‌هوازی شامل فضولات دامی، بقایای گیاهان، پسماند مواد غذایی و مواد آلی فسادپذیر، مواد آلی فاضلاب و پسماند کشاورزی هستند [۳۰].

فرایند تخمیر شامل سه مرحله است؛ در مرحله اول مواد آلی پیچیده و نامحلول هیدرولیز شده و به ترکیبات آلی محلول تبدیل می‌شوند، در مرحله دوم ترکیبات آلی محلول به وسیله باکتری‌های اسیدساز شکسته شده و اسیدهای آلی و هیدروژن تولید می‌شود، در مرحله سوم تمام اسیدهای آلی و ترکیبات تولیدشده در مرحله اسیدسازی، توسط باکتری‌های متان‌ساز به بیوگاز تبدیل می‌شوند. دما، نوع راکتور هاضم بی‌هوازی، حضور میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی، وجود مواد بازدارنده یا شرایط شیمیایی نامناسب و نرخ باردهی مواد ورودی، از جمله عواملی هستند که بر فرایند هضم تأثیر می‌گذارند [۳۰ و ۳۱].

انواع هاضم‌های بی‌هوازی، براساس نوع عملکرد، به سه دسته ناپیوسته، پیوسته و نیمه‌پیوسته تقسیم می‌شوند. در نوع ناپیوسته، بارگیری هاضم یک بار انجام می‌شود، مواد برای دوره مشخصی درون راکتور مانده و پس از آن تخلیه می‌شوند. در مدل پیوسته، بارگیری مواد به صورت روزانه انجام شده و با استفاده از همزن مواد مخلوط می‌شوند. در مدل نیمه‌پیوسته، بارگیری به صورت متناوب و در فواصل زمانی مشخص انجام می‌شود [۳۱ و ۳۲].

انواع هاضم‌های مناسب برای پسماند شهری شامل هاضم خشک گاراژی، هاضم خشک پیوسته و هاضم تر پیوسته هستند. ویژگی‌های هر یک از این نوع هاضم‌ها در جدول ۶ نشان داده شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هاضم خشک پیوسته نیاز به آب کمتری دارد و در مناطقی که محدودیت منابع آب دارند مناسب است.

جدول ۶. مقایسه انواع هاضم‌های مناسب برای پسماند شهری [۳۰-۳۲]

هاضم خشک گاراژی	هاضم خشک پیوسته	هاضم تر پیوسته
نیاز به پیش‌پردازش محدود دارد؛ - باز کردن کیسه‌ها، غربالگری و اختلاط - نیاز به کاهش زیاد اندازه مواد نیست - اندازه مواد باید کمتر از ۲۰ سانتی‌متر باشد.	نیاز به پیش‌پردازش دارد؛ - باز کردن کیسه‌ها و کاهش اندازه زیاد (خرد کردن) - اندازه مواد باید کمتر از ۵ سانتی‌متر باشد تا امکان پمپ کردن آن‌ها باشد.	نیاز به پیش‌پردازش بالایی دارد؛ - باز کردن کیسه‌ها، کاهش اندازه زیاد (مانند خرد کردن) - جدا کردن مواد شناور و مواد ته‌نشین شده - اندازه مواد باید کمتر از ۵ سانتی‌متر باشد تا امکان پمپ کردن آن‌ها باشد.
به ازای هر تن پسماند نیاز به ۱۰۰ لیتر آب است.	به ازای هر تن پسماند نیاز به ۵۰ لیتر آب است.	به ازای هر تن پسماند نیاز به ۵۰۰ لیتر آب است.
ماده هضم‌شده به وسیله لودر تخلیه می‌شود. درصد رطوبت ماده هضم‌شده ۵۰ تا ۶۰ درصد وزنی است. برای تولید کمپوست نیاز به آبیگری نیست.	ماده هضم‌شده توسط پمپ از هاضم خارج می‌شود. درصد رطوبت ماده هضم‌شده پیش از آبیگری ۷۰ تا ۹۰ درصد است. معمولاً لازم است درصد رطوبت حدود ۵۰ درصد به وسیله پرس فیلتر یا پرس ماریچ و ... آبیگری شود.	

۳-۶. نیروگاه‌های زباله‌سوز، گازی‌سازی و پیرولیز

فناوری تولید برق با استفاده از نیروگاه‌های زباله‌سوز، گازی‌سازی و پیرولیز، فناوری‌های ترموشیمیایی نامیده می‌شوند. در فناوری زباله‌سوزی، انرژی حاصل از ترکیبات آلی پیچیده بر اثر احتراق، برای تولید برق و حرارت استفاده می‌شود. در این فناوری میزان تولید انرژی به نوع فناوری و ارزش حرارتی پسماند بستگی دارد. فرایند گازی‌سازی مانند زباله‌سوزی از انرژی حاصل از احتراق استفاده می‌کند، اما این فرایند شامل احتراق دومرحله‌ای، برای تبدیل پسماند به انرژی است. در کوره اول با تأمین دمای بالای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و در حضور مقدار محدودی اکسیژن، گاز سنتز تولید می‌شود. گاز سنتز نیز در کوره دوم سوزانده شده و از انرژی آن برای تولید برق استفاده می‌شود [۳۳].

فرایند پیرولیز در غیاب اکسیژن انجام می‌شود و می‌تواند تا ۸۰ درصد انرژی را از بخش آلی پسماند بازیابی کند. محصول این فرایند سوخت یا برق خواهد بود. ویژگی‌ها و مشخصات انواع فناوری‌های ترموشیمیایی در جدول ۷ نشان داده شده است [۳۴]. فناوری‌های مختلف ترموشیمیایی در تعداد مراحل احتراق، غلظت اکسیژن فرایند، نحوه اختلاط پسماند با هوا برای سوختن کامل، نحوه پاکسازی گاز خروجی و انواع خاکستر و سرباره با هم تفاوت دارند.

جدول ۷. ویژگی‌های فناوری‌های مختلف ترموشیمیایی [۳۳ و ۳۴]

زباله‌سوزی	گازی‌سازی	پیرولیز
سوزاندن پسماند شهری با حداقل پردازش	تخریب و تجزیه حداکثری مواد خام در حضور عامل گازساز	تخریب مواد آلی به وسیله گرما در غیاب اکسیژن
دمای کوره بالای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد	دمای کوره اول ۶۰۰-۶۵۰ درجه و دمای کوره دوم ۱۰۰۰-	آغاز واکنش در دمای ۳۰۰ تا ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد
خروجی H_2O , CO_2 خاکستر و حرارت حاصل از احتراق است.	مشابه پیرولیز است اما الویت تولید گاز است. قطران و روغن‌های آلی در محل گازی‌سازی تبدیل به گاز می‌شوند.	محصولات فرایند: زغال، مایعات آلی، گاز و آب
-	زمان ماند بیش از دو ثانیه جهت جلوگیری از بازترکیب دیوکسین	زمان ماند طولانی و دمای بالا - تولید گاز بیشتر
نیازمند پیش‌پردازش شامل جداسازی مواد خطرناک، اجسام بزرگ و مواد غیرقابل سوختن.	نیازمند پیش‌پردازش پسماند و جداسازی مواد غیرآلی (شیشه و فلزات)	نیازمند پیش‌پردازش پسماند و جداسازی مواد غیرآلی (شیشه و فلزات)
-	اضافه کردن عامل گازساز باعث تولید گاز مصنوعی می‌شود	تولید گاز مصنوعی متشکل از هیدروژن و متان با اضافه کردن بخار به راکتور پیرولیز
آلاینده‌ها: NO_x , SO_x و فلزات سنگین	آلاینده‌ها: H_2S , NO_x , HCl , SO_x ، دیوکسین	آلاینده‌ها: NO_x , HCl ، دی اکسین، ذرات معلق و کلئیدها
حرارت تولیدشده برای تبدیل آب به بخار و تولید برق استفاده می‌شود.	گاز تولیدشده از این فناوری مانند گاز طبیعی در توربین‌های گازسوز یا در موتورهای برق استفاده می‌شود.	برای تولید الکتریسیته تجاری‌سازی نشده و جنبه تحقیقاتی دارد.

۴. نتایج

۴-۱. معیارهای انتخاب محل دفن و اثر متقابل زمین

معیارهای متعددی در انتخاب مناسب‌ترین محل دفن زباله برای یک شهر دخالت دارند که به پاره‌ای از آن‌ها اشاره می‌شود. کار انتخاب محل در یک شعاع مطالعاتی مشخصی نسبت به مرکز تولیدکننده زباله (مثلاً مرکز شهر) براساس اقتصادی‌ترین فاصله حمل زباله از شهر تا محل دفن انتخاب، و محل‌های مختلف مطابق با معیارهای زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی روی نقشه مشخص و محل‌های نامناسب الک می‌شوند. سپس، از میان گزینه‌های مختلف آنکه امتیاز بیشتری نسبت به سایرین کسب کرد به عنوان مناسب‌ترین محل انتخاب می‌شود. در یک لندفیل بهداشتی - مهندسی باید معیارهای زیست‌محیطی زیر رعایت شوند [۲۱]:

✓ زباله دفن شده در لندفیل نباید موجب پخش بوی نامطبوع در محیط اطراف و آلودگی هوا شوند.

- ✓ زباله‌های دفن‌شده باید از دسترس حیوانات، حشرات و پرندگان موزی که می‌توانند موجب پخش شدن زباله به محیط اطراف و همچنین انتشار آلودگی میکروبی شوند، دور نگه داشته شوند.
- ✓ آلودگی صوتی توسط ماشین‌آلات حمل زباله و ماشین‌آلات به‌کارگرفته‌شده در لندفیل باید حداقل باشد و لندفیل نباید موجب آلودگی بصری شود.
- ✓ گازهای تولیدشده در لندفیل مانند گاز متان و دی‌اکسید کربن، باید کنترل و تهویه شوند.
- ✓ شیرابه تولیدشده در لندفیل باید کنترل، جمع‌آوری و تصفیه شود تا موجب آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی نشود.

۴-۲. معیارهای طراحی و المان‌های لندفیل‌های مهندسی

پس از انتخاب محل مناسب و مطالعه دقیق هیدروژئولوژی منطقه استقرار لندفیل، معیارهای مختلف طراحی مطالعه و بررسی شده و طرح مناسب لندفیل که دارای المان‌های مختلف مهندسی است ارائه می‌شود. از جمله نکاتی که باید در طراحی مد نظر قرار گیرند می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ انتخاب خطوط تراز کف لندفیل پس از حفاری و قبل از ساخت المان‌های مهندسی
- ✓ حجم و تعداد سلول‌های لندفیل براساس میزان تولید زباله و عمر طرح
- ✓ شیب شیروانی‌های کناری لندفیل
- ✓ تعداد، جنس و ضخامت المان‌های مهندسی مانند لایه‌های زهکش شیرابه، لاینرهای رسی و یا مصنوعی مانند ژئوسینتتیک‌ها
- ✓ لایه‌های پوششی روزانه، میانی و نهایی لندفیل
- ✓ سیستم تهیه گاز

۴-۲-۱. عوامل مؤثر بر تولید گاز لندفیل

تولید گاز در لندفیل به عواملی همچون نوع ترکیب پسماند (مقدار مواد آلی)، مقدار رطوبت پسماند، مواد مغذی، وجود ترکیبات بازدارنده، سن پسماند، محیط بیوشیمیایی لندفیل و طراحی پوشش لندفیل بستگی دارد. تولید گاز سال‌ها پس از دفن گاز و تا وقتی که محتوای مواد آلی پسماند کم شود، ادامه دارد، معمولاً تولید گاز پس از دو ماه از دفن آغاز شده و تا ۱۰۰ سال نیز ادامه دارد. تولید گاز در لندفیل صورت می‌گیرد، اما بر اثر فرایند انتشار به بیرون از لندفیل فرار می‌کند. در لندفیل‌های مهندسی ابتدا زمانی طول می‌کشد تا پسماند در لندفیل تثبیت شود و پس از آن لندفیل شروع به تولید گاز می‌کند که قسمتی از آن در پوشش خاک اکسید می‌شود و باقی به اتمسفر منتشر می‌شود. با نصب سیستم جمع‌آوری گاز بخشی از گاز تولیدشده یا شبکه‌ای از چاه‌ها و کانال‌ها که تحت فشار منفی قرار دارند، جمع‌آوری می‌شود اما حتی کاراترین سیستم‌ها هم نمی‌توانند همه گاز تولیدشده را جمع‌آوری کنند.

۴-۳. طرح جامع مدیریت پسماند تهران

۴-۳-۱. طرح تفکیک از مبدأ

در شهر تهران روزانه حدود ۷۵۰۰ تن و سالیانه حدود ۲/۵ میلیون تن پسماند تولید می‌شود که از این میزان پسماند با توجه به آنالیز انجام‌شده حدود ۷۰ تا ۷۵ درصد مواد آلی قابل کمپوست (زباله تر) و ۲۰ تا ۲۵ درصد مواد خشک قابل بازیافت و ۵ تا ۱۰ درصد سایر مواد زائد وجود دارد و به منظور بهینه‌سازی شیوه دفع پسماندهای خانگی، این سازمان، تفکیک از مبدأ را طراحی، برنامه‌ریزی و سامان‌دهی کرده و با همکاری ادارات بازیافت مناطق، ضمن آموزش و اطلاع‌رسانی اجرا می‌کند. در ادامه وضعیت گذشته و حال این طرح بررسی می‌شود. یکی از نکات مهمی که در مدیریت پسماند باید به آن توجه ویژه‌ای داشت کاهش تولید پسماند است. تولید کمتر پسماند کار آسانی نیست و نیازمند یک برنامه جامع است که باید در آینده نزدیک به این امر مهم دست یابیم. در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته، موضوع کاهش پسماند از مبدأ را در برنامه مدیریت پسماند خود لحاظ کرده‌اند که

موجب کاهش هزینه‌های جمع‌آوری و ساماندهی پسماند و کاهش بارهای زیست‌محیطی و همچنین سبب تقویت خدمات شهرداری در MSWM می‌شود. جلوگیری از تولید پسماند اولین گام از مراحل برنامه‌های ملی مدیریت پسماند محسوب می‌شود و از دیدگاه اقتصادی مناسب‌تر به نظر می‌آید [۲۱]. MSWM پرهزینه‌ترین خدمات شهری در کشورهای در حال توسعه هستند، تا جایی که مقامات محلی ۲۰ تا ۵۰ درصد بودجه خود را صرف هزینه سرویس جمع‌آوری و حمل‌ونقل MSW می‌کنند. یعنی قسمت اعظم بودجه برای جمع‌آوری و حمل‌ونقل صرف می‌شود و منابع مالی و انسانی زیادی صرف این مهم می‌شود. بنابراین هر یک از تولیدکنندگان پسماند شهری اعم از خانگی و غیر خانگی سهم قابل توجهی از مدیریت پسماند را به عهده دارند. MSW به طیف گسترده‌ای از موضوعات از جمله؛ اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی، فناوری، قانون‌گذاری مربوط می‌شود.

۴-۴. وضعیت گذشته

سیستم‌های تفکیک پسماندهای خشک شهر تهران از سال ۱۳۷۴ تا کنون، طرح‌های متعددی توسط سازمان بازیافت و تبدیل مواد با همکاری شهرداری‌های مناطق، به منظور سامان‌دهی امر تفکیک و جمع‌آوری پسماندهای خشک در مناطق مختلف شهر تهران به اجرا درآمده است. این طرح‌ها به دلایل متفاوتی با عدم موفقیت همراه بود. با استفاده از تجربیات گذشته و رفع ضعف‌ها و تقویت قوت‌های طرح‌های قبلی، طرح «تفکیک پسماندها در مبدأ» در تابستان سال ۱۳۸۳ تدوین و به مورد اجرا درآمد که به لحاظ مالی ۱۱۴۰ ریال در ازای هر کیلوگرم زیان در برداشت.

این طرح‌ها به لحاظ روش اجرا به چهار گروه تقسیم می‌شدند:

۱. سامان‌دهی عوامل بازیافت سنتی با استفاده از پیمانکاران بازیافت
۲. استفاده از خودروهای خدمات شهری جهت جمع‌آوری زباله خشک در روز
۳. استفاده از خودروهای دومانظوره برای جمع‌آوری هم‌زمان پسماندهای تر و خشک
۴. استفاده از خودروهای خدمات شهری جهت جمع‌آوری زباله خشک در شب

۴-۵. وضعیت حال

در حال حاضر، مجتمع بازیافت و پردازش آرادکوه با ظرفیت دریافت بیش از ۲ هزار تن زباله در روز، اقدام به جداسازی مواد و تولید کمپوست می‌کند و به این ترتیب موجب کاهش دفن زباله، تولید زهرابه و گاز متان و بوی نامطبوع شده است و درنهایت، باعث بهبود هوای منطقه و حفظ سلامتی افراد ساکن در اطراف مجتمع و حفظ بهداشت محیط شده است. همچنین، در این مجتمع واحدهای جدید پردازش پسماندها و تولید کمپوست احداث شده است. از آنجا که یکی از اهداف استراتژیک مدیریت پسماند، کاهش تدریجی دفع و افزایش ظرفیت بازیافت و پردازش است. لذا اجرای ۱۲ خط ۲۵۰ تنی پردازش و تولید کمپوست، با استفاده از آخرین تکنولوژی روز دنیا، در مجتمع پردازش و دفع در حال اتمام است. در این روش پسماندهای آلی از پسماندهای خشک جداسازی شده و در پروسه تخمیر هوازی به کمپوست تبدیل می‌شود و مواد خشک به روش‌های بهینه جداسازی شده و به چرخه تولید بازخواهند گشت و موجب بهبود محیط زیست شهری و بهبود وضعیت اجتماعی و بهداشتی مردم خواهد شد. کاهش شیرابه و عدم تولید گازهای گلخانه‌ای (متان)، کاهش میزان مواد دفنی و افزایش طول عمر مراکز دفع، جلوگیری از دفن مواد با ارزش از دیگر مزایای زیست‌محیطی احداث واحدهای پردازش است.

۴-۶. پروژه استحصال گاز از مرکز دفن آرادکوه

یکی از معضلات زیست‌محیطی مراکز دفن زائدات جامد، تولید حجم بالایی از گازهای گلخانه‌ای یا به بیانی، گازهای گرم‌کننده اتمسفر زمین است. ضرورت جمع‌آوری و تصفیه این‌گونه گازها در چارچوب کنوانسیون‌های حفظ محیط زیست جهانی از یک سو و قابلیت استفاده از این گازها به عنوان منبع انرژی جهت تولید برق از سوی دیگر باعث شده تا با بهره‌گیری از فناوری روز دنیا شرایطی جهت استحصال این گاز در مراکز دفن زائدات جامد شهر تهران فراهم آورد. انجام این پروژه ضمن شناسایی منابع جدید تولید انرژی برای استفاده در مرکز دفن، با حذف گازهای قابل اشتعال و انفجار، امکان ایجاد آتش‌سوزی را در مرکز دفن به

حداقل خواهد رساند که دارای ظرفیت ۲۲۰ حلقه چاه و ۴ هزار تن کمپوست است که ۳ میلیون تن گاز متان و ۴ هزار تن کمپوست روزانه تولید می‌کند. اولین سلول دفن بهداشتی ایران با ظرفیت حدود ۶۰۰ هزار تن طراحی و اجرا شده است. هدف از اجرای این پروژه، بررسی نتایج و امکان‌سنجی دفن اصولی در این مرکز است. این پروژه مزایای مختلفی دارد که عبارت‌اند از:

- ✓ کنترل استحصال گازهای حاصله از مرکز دفن CO₂ و CH₄ و جلوگیری از گازهای گلخانه‌ای
- ✓ کنترل استحصال شیرابه‌های به‌وجودآمده برای تصفیه و استفاده مجدد برای فضای سبز
- ✓ بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی ملی و محلی و کاهش آثار نامطلوب زیست‌محیطی
- ✓ بالا بردن سرعت تجربه بیولوژیکی و ایجاد فضای مناسب برای دفع مجدد
- ✓ امکان استفاده مجدد از زائدات دفع‌شده به عنوان کمپوست پس از پایان فرایند تثبیت

آن دسته از پسماندهایی که قابلیت بازیافت و نیز استفاده در فرایندهای تولید کمپوست، تولید سوخت جایگزین و دیگر تکنولوژی‌های پردازش را ندارند، برای دفع به مراکز دفن ارسال می‌شود. برای دفن این بخش از پسماندها اولین سلول دفن بهداشتی ایران با ظرفیتی حدود ۶۰۰ هزار تن طراحی و اجرا شده که با تعبیه لوله‌های جمع‌آوری گاز در این سلول گاز تولیدی بر اثر فرایندهای بیولوژیکی که غالباً از نوع گاز متان است جمع‌آوری شده و به منظور استحصال و بازیابی انرژی مورد مصرف قرار می‌گیرد تا به این وسیله از آلودگی هوا به واسطه این گازهای گلخانه‌ای جلوگیری شود. با بهره‌برداری از این پروژه، دفن سنتی پسماندها متوقف می‌شود و معضلات زیست‌محیطی مرتفع خواهد شد. چشم‌انداز برنامه جامع مدیریت پسماند شهر تهران ۱۳۹۲، توسعه سیستمی معتبر در مدیریت پسماند شهری به لحاظ زیست‌محیطی و اجتماعی به روش پایدار و به‌صرفه برای کلان‌شهر تهران است [۳۵]. سیستم جامع تلفیقی مدیریت پسماند تهران با بهره‌گیری از تمام امکانات و روش‌های ممکن، مشارکت مردمی و بخش خصوصی، کمینه کردن فشار بر زمین، بازیافت و تولید مواد و انرژی، اعمال روش مناسب و جدید مدیریت پسماند با کمترین آسیب به محیط زیست است.

۴-۷. قوت‌ها و ضعف‌های استفاده از فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی

استفاده از فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، حل معضل فاضلاب‌ها و پساب‌های آلی و از بین رفتن خطر آلودگی آب‌های سطحی، کاهش جرم و حجم پسماند، کاهش قابل توجه پسماند ارسالی به دفن‌گاه و جلوگیری از توسعه محل‌های دفن، کنترل آلودگی‌های زیست‌محیطی (حذف بوها، حشرات موزی و ...)، جلوگیری از انفجار و آتش‌سوزی‌های احتمالی در محل‌های دفن می‌شود و همچنین می‌توان کودهای آلی سازگار با محیط زیست تولید کرد. در مقابل نیاز به نیروی کار متخصص، هزینه بالای بهره‌برداری و نگهداری، نیاز به پردازش دقیق پسماند در هاضم‌های بی‌هوازی و تولید آلاینده‌هایی مانند NO_x، SO_x، CO₂ و ترکیبات کلر، وجود فلزات سنگین در خاکستر و سرباره و همچنین تکنولوژی پرهزینه در فناوری‌های ترموشیمیایی، از جمله ضعف‌های فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی هستند.

۴-۸. زیرساخت‌های مورد نیاز برای توسعه فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی

برای احداث نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی ضرورت دارد که زیرساخت‌های زیر فراهم شود: (۱) تخصیص زمین به همراه جاده دسترسی، (۲) تأمین و تحویل پسماند در محل اجرای پروژه، (۳) واحد پیش‌پردازش و آماده‌سازی پسماند، (۴) تأمین آب به میزان ۵۰ تا ۵۰۰ لیتر به ازای هر تن پسماند برای نیروگاه‌های هاضم بی‌هوازی (بسته به نوع هاضم) و تأمین پساب یا آب صنعتی برای نیروگاه‌های زباله‌سوز، (۵) تأمین برق پروژه طی دوره احداث.

۵. بحث و تحلیل

با توجه به نیاز بشر برای از بین بردن ضایعات، از دیرباز تا کنون روش‌های متفاوتی برای دفع پسماند و زباله‌های شهری وجود داشت که به‌طرح هر یک دارای مزایا و معایبی هستند. از بین این تکنولوژی‌ها در ایران زباله‌سوز آن هم تنها با هدف امحا پسماند استفاده می‌شود و به نوعی می‌توان اظهار داشت که تکنولوژی استحصال انرژی به روش ترموشیمیایی تا حدودی در ایران

ناشناخته است و در بیشتر شهرهای ایران از لندفیل در جهت دفع زائدات استفاده می‌شود که روش چندان مناسبی نیست و پیامدهای سوء زیست محیطی، که مهم‌ترین آن‌ها آلودگی آب و خاک توسط شیرابه‌های تولیدی در مکان دفن هستند را در بر خواهد داشت.

با توجه به اینکه درصد بالایی از زباله‌های جامد شهری تولیدشده در ایران از نوع تر (آلی) هستند، می‌توان اظهار داشت که شرایط لازم برای رشد میکروارگانیسم‌ها به‌خوبی فراهم بوده و روش دفع پسماند با روش بیوگاز کارایی بهتری نسبت به سایر فناوری‌ها خواهد داشت، چرا که با توجه به رطوبت بالای موجود در زباله‌تر، در فناوری زباله‌سوز یک هزینه اضافی برای از بین بردن رطوبت و پیش‌فرآوری لازم است تا به ارزش حرارتی یکنواختی برای زباله‌سوز برسد. با احداث و استفاده از این مراکز دفع زباله در کشور می‌توان بخشی از انرژی الکتریکی را برای مصارف خانگی و صنعتی تأمین کرد که علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی جهت تولید انرژی به ایجاد فرصت‌های شغلی و جذب متخصصان و کارمندان و کارگران در این حوزه و تقویت زیرساخت‌های اقتصادی در ایران می‌شود. با توجه به وضعیت مدیریت پسماند در کشور، می‌توان به این نتیجه رسید که کشور ما هنوز به طور اصولی به روش‌های مدیریت پسماند نپرداخته و نیازمند تدوین استراتژی لازم جهت مدیریت پسماند، مانند اجتناب از تولید زباله، کاهش تولید زباله، استفاده مجدد، بازیافت و بازیابی مواد و انرژی و... است، که این مهم با جلب رضایت و مشارکت ذی‌نفعان، افزایش سطح آگاهی عمومی، ارتقای سطح فناوری و بهینه‌سازی روش‌ها و افزایش مشارکت در تدوین و اعمال دستورالعمل‌ها و ضوابط اجرایی در انجام فعالیت‌های مدیریت اجرایی پسماند است و همچنین مسلم است که با بهره‌گیری از تجارب کشورهای موفق در مدیریت پسماند که پس از سال‌ها آزمون و خطا با موفقیت توانستند به مسائل و مشکلات پسماند فائق شوند در کشور ما نیز می‌توان در این زمینه موفق بود. در این مقاله اهمیت مدیریت زباله‌های جامد شهری با رویکرد استحصال انرژی و امحای پسماند مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و ایجاد آلودگی زیست‌محیطی ناشی از سوختن این منابع که به افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش زمین منجر می‌شوند، می‌توان مدیریت پسماند را به عنوان یکی از منابع مهم انرژی تجدیدپذیر و پاک در آینده دانست، به طوری که بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته به مسئله مدیریت پسماند با دید توسعه پایدار نگاه می‌کنند.

۵-۱. نقش توسعه نیروگاه‌های زیست‌توده رفع چالش‌های مدیریت پسماند و حل مشکلات زیست‌محیطی

۵-۱-۱. چالش‌های مدیریت پسماند در ایران و نقش نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی در رفع این چالش‌ها

چالش‌های حوزه مدیریت پسماند در ایران را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: چالش‌های ساختاری، چالش‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری و چالش‌های مالی. نبود یکپارچگی و مدیریت جزیره‌ای، ضعف ضمانت اجرا در قوانین و ضعف در بازرندگی و اعمال مجازات‌ها، نبود نگاه کلان برای مدیریت پسماند، نبود برنامه ملی و منطقه‌ای مناسب از جمله چالش‌های ساختاری حوزه مدیریت پسماند در ایران هستند [۳۶].

کم‌توجهی به آموزش و مسائل اجتماعی، عدم پردازش پسماند، ضعف در به‌کارگیری مشارکت جوامع محلی، بخش خصوصی و گروه‌های مردم‌نهاد، ضعف استفاده از فناوری‌های متناسب با شرایط هر منطقه نیز بخشی از چالش‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری مدیریت پسماند در کشور هستند. ضعف در موضوعات مربوط به تخصیص اعتبار و بودجه نیز یکی از چالش‌های مهم مالی این حوزه است [۳۶].

توسعه نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی کمک شایانی به حل بخشی از چالش‌های مدیریت پسماند در کشور خواهد کرد. در حوزه چالش‌های ساختاری، با توجه به اینکه توسعه این نیروگاه‌ها نیازمند هماهنگی بخش‌های مختلف مدیریتی و اجرایی است، با ایجاد مشارکت و هم‌افزایی در دستگاه‌های متولی چالش نبود یکپارچگی تا حد قابل ملاحظه‌ای برطرف خواهد شد. همچنین، با تدوین برنامه ملی براساس برنامه هفتم توسعه و بازبینی طرح‌های جامع پسماند به منظور در دستور کار قرار دادن استفاده از فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی، چالش نبود برنامه ملی و منطقه‌ای مناسب مرتفع خواهد شد.

از آنجا که یکی از زیرساخت‌های مورد نیاز برای توسعه نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی، احداث خطوط پردازش و تفکیک پسماند به صورت دقیق و جزئی است، چالش عدم پردازش پسماند در بخش چالش‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری به شکل قابل

توجهی رفع می‌شود. همچنین مشاهده خروجی این نیروگاه‌ها که همانا تبدیل پسماند به برق است سبب ایجاد انگیزه و جلب مشارکت‌های مردمی در مدیریت پسماند خواهد شد که به شکل هم‌زمان چالش‌های محیط زیستی جامعه و ناترازی برق را برطرف خواهد کرد و چالش ضعف در به‌کارگیری ظرفیت‌های مشارکت جوامع محلی را حل خواهد کرد.

با توجه به تنوع فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی و شرایط متفاوت مناطق مختلف از منظر آنالیز پسماند و ارزش حرارتی آن، می‌توان متناسب با شرایط هر منطقه فناوری مناسب را انتخاب کرده و چالش ضعف در استفاده از فناوری‌های متناسب با شرایط هر منطقه که یکی از چالش‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری حوزه مدیریت پسماند در کشور است را رفع کرد.

مهم‌ترین چالشی که حوزه مدیریت پسماند با آن روبه‌روست، نبود منابع مالی و اعتبارات مورد نیاز برای مدیریت پسماند است. با توجه به اینکه تبدیل پسماند به انرژی و کسب درآمد از محل فروش آن از جذابیت اقتصادی برخوردار است، تأمین مالی این پروژه‌ها از طریق جذب سرمایه‌گذار بخش خصوصی قابل انجام است. همچنین، از طریق بهبود و ایجاد سازوکارهای حمایتی نو می‌توان جذابیت اقتصادی پروژه‌ها را افزایش داد و منابع مالی و اعتبارات مورد نیاز را جذب کرد.

۵-۲. آثار مثبت اجتماعی و زیست‌محیطی احداث نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، روزانه حدود ۵۸ هزار تن پسماند در کشور تولید می‌شود که ۲۵ درصد از آن بازیافت و ۷۵ درصد از آن دفن می‌شود که عمدتاً دفن غیر بهداشتی و به شکل تلباری است. به منظور حل بخشی از مشکلات ناشی از دفن غیراصولی پسماند و کاهش حجم پسماند ارسالی به محل‌های دفن و همچنین کمک به حفظ محیط زیست، شورای اقتصاد در جلسه‌ای به تاریخ ۱۴۰۲/۰۸/۱۰ مجوز سرمایه‌گذاری در طرح احداث ۲۰۰ مگاوات نیروگاه زیست‌توده از محل ماده ۱۲ قانون رفع موانع تولید رقابت‌پذیر و ارتقای نظام مالی کشور را صادر کرد. به موجب این مصوبه، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهروری انرژی برق (ساتبا) موظف است در چارچوب قانون برگزاری مناقصات، شرکت‌های سرمایه‌گذار برای احداث نیروگاه را از طریق برگزاری مناقصه انتخاب کند. برنده مناقصه شرکتی است که کمترین قیمت به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی را پیشنهاد دهد. سقف قیمت پیشنهادی ۹/۵ سنت دلار است و وزارت نیرو به مدت ۴/۵ سال از زمان بهره‌برداری، برق تولیدی نیروگاه را خریداری می‌کند. همچنین، برق تولیدی نیروگاه تا پایان عمر آن متعلق به سرمایه‌گذار بوده و وزارت نیرو مجوز فروش برق در بورس انرژی سبز را صادر می‌کند.

به همین دلیل، پیش‌بینی می‌شود با احداث ۲۰۰ مگاوات نیروگاه زیست‌توده (تبدیل پسماند به انرژی)، سالیانه ۱۶۰۰ گیگاوات ساعت برق تولید شده و ۴۳۲ میلیون متر مکعب در مصرف گاز طبیعی صرفه‌جویی شود. همچنین، تولید این میزان برق از پسماند سبب می‌شود تا از انتشار ۲/۸ میلیون تن گاز گلخانه‌ای معادل CO₂ جلوگیری شود. با توجه به آنکه هر تن زباله ۴۰۰ تا ۵۰۰ لیتر شیرابه تولید می‌کند و هر لیتر شیرابه می‌تواند ۴ هزار لیتر آب را آلوده کند، از آلودگی آب جلوگیری خواهد شد.

۶. نتیجه‌گیری

استفاده از فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی، علاوه بر حل معضلات زیست‌محیطی ناشی از مدیریت سنتی پسماند، به تنوع سبد تأمین انرژی کشورها نیز کمک قابل توجهی می‌کند. گسترش به‌کارگیری این فناوری‌ها برای تأمین انرژی در کشورهای توسعه‌یافته و برخی کشورهای در حال توسعه در سال‌های اخیر و تجربه‌های موفق که در کشورهای چین، ژاپن و کشورهای اروپایی وجود دارد، تأییدی بر کارآمدی فناوری‌های مورد اشاره است. اگرچه همچنان نگرانی‌هایی در خصوص آلاینده‌های ایجادشده توسط برخی از انواع فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی در جوامع وجود دارد، اما با بلوغ تکنولوژی و استفاده از روش‌های نوین برای حذف آلاینده‌های ایجادشده، این نگرانی تا حد قابل ملاحظه‌ای مرتفع شده است. همچنین چالش‌هایی در مسیر توسعه نیروگاه‌های تبدیل پسماند به انرژی، از جمله تأمین آب مصرفی، تأمین خوراک نیروگاه با شرایط مناسب و کمبود نیروی کار متخصص، وجود دارد که با همکاری متولیان امر پسماند و بومی‌سازی فناوری‌ها، قابل حل هستند. در اسناد بالادستی، مانند برنامه هفتم توسعه، وزارت نیرو فقط مکلف به خرید برق حاصل از پسماند است، به طوری که قیمت خرید برق جذابیتی برای تحقق سرمایه‌گذاری در این حوزه است. حال آنکه به نظر می‌رسد تدوین برنامه ملی مدیریت پسماند توسط

سازمان حفاظت محیط زیست با همکاری وزارت کشور نقش کلیدی‌تری را ایفا خواهد کرد. در همین ارتباط تبدیل پسماند به انرژی علاوه بر تکمیل چرخه حیات پسماند و تولید برق می‌تواند به صورت بسته‌ای مد نظر قرار گیرد که نیازمند تعاملات سازنده میان سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر، سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌ها و سازمان حفاظت محیط زیست است. با توجه به ظرفیت‌های موجود در ایران و تولید روزانه ۵۸ هزار تن پسماند شهری و روستایی در سطح کشور، رسیدن به چشم‌انداز تولید ۲۰۰ مگاوات برق از پسماند جامد شهری، با همکاری و عزم جدی دستگاه‌های متولی قابل حصول است. از جهت اجرای پروژه‌های متعدد و بومی‌سازی فناوری و تربیت نیروهای متخصص سبب خواهد شد در آینده مدیریت پسماند از دفن فاصله گیرد و از عمده مشکلات زیست‌محیطی ایجادشده کاسته شود.

منابع

1. Razeghi, M., et al., Evaluating the economic impact of solar energy on local industries in Semnan, Iran. 2025. **3**(1): p. 49-58.
2. Feizi, R., et al., Technical and environmental assessment of biofuel utilization in light and heavy vehicles: implications for carbon footprint reduction on high-traffic freeway. 2025. **3**(2): p. 1-7.
3. Yousefi, H., et al., GIS-based spatially integrated bioenergy resources assessment in Kurdistan Province-Northwest Iran. 2017. **23**: p. 11-20.
4. Shukla-Pandya, H., Bioenergy as a global public tool and technology transfer, in *Microbial Biotechnology for Bioenergy*. 2024, Elsevier. p. 263-275.
5. Rasaei, F., et al., Optimal selection of CSP site for desalination system using GIS and AHP method in Hormozgan province, Iran. 2025. **13**: p. 2255-2268.
6. Gholami, A., et al., The effect of hydrodynamic and ultrasonic cavitation on biodiesel production: An exergy analysis approach. 2018. **160**: p. 478-489.
7. Ahmadi, S., et al., Reducing the share of electricity generation from fossil fuels by replacing renewable energies in rainy areas. 2023.
8. Yousefi, H., et al., Identifying and Ranking the Effective Components in City Branding Emphasizing on the Economic (Case study: Tajrish Neighborhood of Tehran). 2025. **2**(1): p. 1-15.
9. Tabrizi, A., et al., Evaluating renewable energy adoption in G7 countries: a TOPSIS-based multi-criteria decision analysis. 2025. **5**(1): p. 2.
10. Abdous, M., et al., Design and analysis of zero-energy and carbon buildings with renewable energy supply and recycled materials. 2024. **324**: p. 114922.
11. Aboutorabi, R.S.S., et al., A comparative analysis of the carbon footprint in green building materials: a case study of Norway. 2024. **31**(49): p. 59320-59341.
12. Abdoos, M., et al., Forecasting solar energy generation in the Mediterranean region up to 2030–2050 using convolutional neural networks (CNN). 2025. **10**: p. 100167.
13. George, A.S., T. Baskar, and P.B.J.P.U.I.I.J. Srikanth, Cyber threats to critical infrastructure: assessing vulnerabilities across key sectors. 2024. **2**(1): p. 51-75.
14. Oztemel, E. and S.J.J.o.i.m. Gursev, Literature review of Industry 4.0 and related technologies. 2020. **31**(1): p. 127-182.
15. Hajinezhad, A., et al., Biodiesel production from Norouzak (*Salvia lerifolia*) seeds as an indigenous source of bio fuel in Iran using ultrasound. 2015. **99**: p. 132-140.
16. Bahrani, S., et al., Modeling landfill site selection by multi-criteria decision making and fuzzy functions in GIS, case study: Shabestar, Iran. 2016. **75**: p. 1-14.
17. Zahedi, R., et al., Technical, economic and environmental assessment of carbon capture from thermal power plants and convert it into value added concrete material. 2024: p. 1-12.
18. Aliabadi, Y., et al., Analysis of energy generation from MSW with auxiliary feed in the north of Iran. 2023. **18**: p. 101185.
19. Salaripoor, H., H. Yousefi, and M.J.F.C. Abdoos, Life Cycle Environmental Assessment of Refuse-Derived Fuel (RDF) as an Alternative to Fossil Fuels in Cement Production: A Sustainable Approach for Mitigating Carbon Emissions. 2025: p. 100135.
20. Fardnia, K., et al., A bibliometric analysis of carbon and water footprints in renewable energy: The post-COVID-19 landscape. 2024: p. 100162.
21. Yousefi, H.J.W.m., Canola straw as a bio-waste resource for medium density fiberboard (MDF) manufacture. 2009. **29**(10): p. 2644-2648.
22. Noorollahi, Y., et al., Biogas production potential from livestock manure in Iran. 2015. **50**: p. 748-754.
23. Tayefeh, A., et al., Advanced bibliometric analysis on water, energy, food, and environmental nexus (WEFEN). 2023. **30**(47): p. 103556-103575.
24. Abdoos, M., et al., Evaluating zero-energy strategies in mixed-use buildings: a case study. 2025: p. 8-18.
25. Ghahremani, A., et al., Experimental investigation of spray characteristics of a modified bio-diesel in a direct injection combustion chamber. 2017. **81**: p. 445-453.

26. Panbechi, B., et al., Environmental, economic and energy evaluation of alternative fuels for a steam power plant: focus on biodiesel-nanoparticles utilization. 2024. **23**: p. 102636.
27. Zeng, Y., et al., Characterization of solid waste disposed at Columbia Sanitary Landfill in Missouri. 2005. **23**(1): p. 62-71.
28. Althouse, P., et al., 2004 Environmental Report. 2005, Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States).
29. Noorollahi, Y., H. Yousefi, and M. Pourarshad. Three dimensional modeling of heat extraction from abandoned oil well for application in sugarcane industry in Ahvaz—Souther Iran. in Proceedings World Geothermal Congress. 2015.
30. Kumar, D.J.P., et al., A comprehensive study on anaerobic digestion of organic solid waste: A review on configurations, operating parameters, techno-economic analysis and current trends. 2024.
31. Nayono, S.E., Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production. Vol. 46. 2010: KIT scientific Publishing.
32. Ghaedi, M., et al., Evaluation of the efficiency of dry anaerobic digester in the production of biogas and fertilizer using activated sludge and plant waste. 2024. **14**(1): p. 24727.
33. Helsen, L. and A. Bosmans. Waste-to-Energy through thermochemical processes: matching waste with process. in Proceedings of the 1st International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining. 2010. Haletra; Houthalen-Helchteren.
34. Nandhini, R., et al., Thermochemical conversion of municipal solid waste into energy and hydrogen: a review. 2022. **20**(3): p. 1645-1669.
35. Noorollahi, Y., et al., Biofuel for energy self-sufficiency in agricultural sector of Iran. 2021. **44**: p. 101069.
36. Abdulfatah, A.K., Exploring municipal solid waste management in Nigeria: Challenges, opportunities, and roadmap for sustainable development. 2023.