



Research paper

(Received Jun. 14, 2024

Accepted Aug. 27, 2024)

Evaluation and Ranking of Waste to Energy Technologies Using Multi-Criteria Decision-Making Methods AHP-VIKOR, AHP -TOPSIS

Arman Shahnazari*¹, Hamed Pourdej², Sareh Hakimi³, Narges Banaeian⁴

¹ CEO and member of the board of directors of Arman Charkhe-e- Sabz-e- Caspian, Rasht, Guilan, Iran

² member of the board of directors of Arman Charkhe-e- Sabz-e- Caspian, Rasht, Guilan, Iran

³ CEO of Asmanroud Rahim Abad environmental non-governmental organization (NGO), Rahimabad, Gilan, Iran

⁴ Assistant professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Guilan, Iran

Abstract

The most important objective of this paper is to provide an appropriate model for selecting best waste-to-energy technology for both private and public sector managers and investors. Urban waste management combined with energy recovery can be the most suitable solution not only for preserving environment but also for producing and supplying energy to urban and rural communities. Determining the most appropriate waste-to-energy technology is a challenging and complex process, requiring consideration of a wide range of diverse criteria. For this purpose, this study tries to apply two of the most widely used Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods, TOPSIS and VIKOR. Anaerobic digestion (AD), incineration, and pyrolysis were chosen as the main options for waste-to-energy conversion technologies. These options were evaluated based on three main criteria: environmental, technical, and economic, each of which included various sub-criteria. The results of pairwise comparisons indicate that among main criteria, environmental criterion holds the highest score and importance, followed by the economic and technical criteria, respectively. To ensure reliability, the options were ranked using three different MCDM models methods: Analytic Hierarchy Process (AHP), VIKOR, and TOPSIS. The overall results of the decision-making models show that incineration is the best waste-to-energy technology, followed by anaerobic digestion and pyrolysis in respective order.

Keywords: Municipal solid waste, Waste-to-energy technologies, Analytic Hierarchy Process, VIKOR method, TOPSIS method.

* Corresponding Author: Arman Shahnazari
Email: ashahnazari992@gmail.com
Phone: 09014479374



مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۷/۱

ارزیابی و رتبه‌بندی فناوری‌های تولید انرژی از پسماند با استفاده از روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چند معیاره VIKOR-AHP و TOPSIS-AHP

آرمان شاهنظری^{۱*}، حامد پوردژ^۲، ساره حکیمی^۳، نرگس بنائیان^۴

^۱ مدیرعامل و عضو هیات مدیره شرکت آرمان چرخه سبز کاسپین، شهر رشت، گیلان، ایران

^۲ عضو هیات مدیره شرکت آرمان چرخه سبز کاسپین، شهر رشت، گیلان، ایران

^۳ مدیر عامل سازمان مردم نهاد (سمن) محیط‌زیستی آسمانرود رحیم آباد، شهر رحیم آباد، گیلان، ایران

^۴ استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان، ایران

چکیده

مهم‌ترین هدف این مقاله ارائه مدلی مناسب برای انتخاب بهترین فناوری تبدیل پسماند به انرژی برای مدیران و سرمایه‌گذاران بخش خصوصی و دولتی است. مدیریت پسماند شهری همراه با بازیابی انرژی می‌تواند مناسب‌ترین راهکار هم به منظور حفظ محیط‌زیست و هم به منظور تولید و تامین انرژی برای جوامع شهری و روستایی باشد. به هر حال تعیین مناسب‌ترین فناوری استحصال انرژی از زباله یک موضوع چالش برانگیز و پیچیده است زیرا باید معیارهای گسترده و گوناگونی را مدنظر قرار داد. در این تحقیق از دو روش تاپسیس و ویکور که از پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره هستند؛ برای این منظور استفاده شده است. هاضم بی‌هوازی، زباله‌سوزی و پیرولیز به عنوان مهم‌ترین گزینه‌های فناوری تبدیل پسماند به انرژی انتخاب و بر اساس سه معیار اصلی زیست‌محیطی، فنی و اقتصادی که برای هر کدام از معیارها، زیرمعیارهای مختلفی در نظر گرفته شده، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج مقایسات زوجی نشان می‌دهد که در بین معیارهای اصلی، معیار زیست‌محیطی بیشترین امتیاز و اهمیت را دارد و پس از آن به ترتیب معیار اقتصادی و فنی در رده‌های بعدی اهمیت هستند. به جهت اطمینان از نتایج، گزینه‌ها با سه روش متفاوت تحلیل سلسله مراتبی، ویکور و تاپسیس رتبه‌بندی می‌شوند. نتایج کلی مدل‌های تصمیم‌گیری نشان می‌دهد که فناوری زباله‌سوزی به‌عنوان بهترین فناوری تبدیل پسماند به انرژی است. بعد از آن نیز به ترتیب فناوری‌های هاضم بی‌هوازی و پیرولیز در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

کلمات کلیدی: پسماند جامد شهری؛ فناوری تبدیل پسماند به انرژی؛ روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی؛ روش ویکور؛ روش تاپسیس

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر با توجه به افزایش جمعیت و محدودیت استفاده از سوخت‌های فسیلی، استفاده از پسماند جامد شهری به عنوان یک منبع جدید و بالقوه برای تولید انرژی مورد توجه بسیاری قرار گرفته است [۱]. به کار بردن پسماند به منظور تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر یکی از روش‌های بسیار مطلوب برای توسعه پایدار می‌باشد زیرا هم می‌توان انرژی تولید نمود و همچنین با احیا پسماند و استفاده کم‌تر از منابع نفتی به حفظ محیط‌زیست کمک کرد. فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی، سیستم‌هایی هستند که از پسماندهای غیر قابل بازیافت انرژی به شکل‌های حرارت، سوخت‌های مایع و جامد تولید می‌نمایند [۲]. از آنجایی که سیستم‌های مختلفی برای تبدیل پسماند به انرژی وجود دارد، احداث و بهره‌برداری و همین‌طور مدیریت این قبیل نیروگاه‌ها فرایند بسیار پیچیده‌ای بوده و پارامترها و ابعاد گوناگونی را باید قبل از ساخت مدنظر قرار داد [۳].

در مسائلی که چندین معیار در انتخاب بهترین گزینه موثر است، استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره و مقایسات زوجی گزینه‌ها گسترده شده که به مدیران جهت تصمیم‌گیری درست کمک زیادی می‌کند [۴]. در این مطالعه فناوری‌های مورد بررسی شامل سیستم‌های زباله‌سوزی از نوع توده‌سوز، پیرولیز و هاضم بی‌هوازی می‌باشد. زباله‌سوزی فرآیندی برای سوزاندن مواد قابل احتراق و تبدیل آنها به گاز و خاکستر می‌باشد [۵]. پیرولیز یک فرایند تجزیه حرارتی است که در غیاب اکسیژن (هوا) انجام می‌شود. محصولات فرایند پیرولیز در سه فاز جامد (زغال)، مایع (نفت زیستی) و گاز (CH_4 , H_2 , CO_2 , CO) می‌باشد [۶-۷]. فرایند هضم بی‌هوازی از تجزیه مواد آلی بدون وجود هوا صورت می‌گیرد. مهمترین محصول فرایند هضم بی‌هوازی یا بیوگاز، گاز متان می‌باشد [۸].

بررسی‌ها نشان داده که اگر از پسماند جامد شهری به عنوان مواد اولیه برای تولید انرژی مورد استفاده قرار بگیرد، این مواد دارای ثبات بیشتری در عرضه است. استفاده از فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی (WTE) در سال‌های اخیر به دلیل داشتن مزایایی مانند کاهش حجم پسماند، اشتغال‌زایی، تولید انرژی پاک، حفظ محیط‌زیست مورد توجه بسیاری قرار گرفته است و به موضوع مورد علاقه بسیاری از مطالعات تبدیل شده است که در ادامه به بررسی تعدادی از کارهای تحقیقاتی انجام شده مشابه در این حوزه پرداخته می‌شود.

روش‌های چند معیاره امکان ارزیابی کامل فناوری‌های WTE را در جنبه‌های مختلف از جمله امکان‌سنجی فنی، دوام اقتصادی، اثرات زیست‌محیطی و پذیرش اجتماعی فراهم می‌کنند. این رویکرد کل نگر برای شناسایی مناسب‌ترین، پایدارترین و تأثیرگذارترین گزینه‌ها برای تبدیل زباله به منابع ارزشمند و در عین حال به حداقل رساندن آسیب‌های زیست‌محیطی و حمایت از گذار به سمت اقتصاد گردشی ضروری است و تضمین می‌کند که فناوری انتخاب شده با اهداف پایداری همسو می‌شود بدین معنی که: ۱- فناوری بهینه را برای هر نوع ماده اولیه زباله برای به حداکثر رساندن انرژی و بازیافت منابع شناسایی کند. ۲- انتخاب فناوری‌های پاک تر به مدیریت پایدار زباله و کاهش تغییرات آب و هوا کمک می‌کند [۹]. ۳- بینش‌های ارزشمندی را برای سیاست‌گذاران و سرمایه‌گذاران فراهم می‌کند تا تصمیم‌گیری آگاهانه در مورد زیرساخت مدیریت زباله و استقرار فناوری بگیرند. این امر از توسعه اقتصاد دایره ای و دستیابی به اهداف توسعه پایدار حمایت می‌کند. ۴- می‌تواند برای زمینه‌های خاص منطقه‌ای یا ملی، با در نظر گرفتن ترکیب زباله‌های محلی، نیازهای انرژی و عوامل اجتماعی-اقتصادی تنظیم شود. این سازگاری انتخاب فناوری‌های WTE را که از نظر زمینه‌ای مناسب و تأثیرگذار هستند، تضمین می‌کند [۱۰].

موجتابا و همکاران (۲۰۲۴) در شهر لاهور به بررسی سناریوهای مختلف مدیریت پسماند جامد شهری پرداختند. برای ارزیابی این سناریوها از چهار روش موجود در تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده کردند که عبارتند از روش‌های فازی، تاپسیس، فرایند تحلیل سلسله مراتبی و PROM-ETHEE II. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که بهترین رویکرد در مدیریت پسماند شهر لاهور ترکیبی از ۵۴٪ هضم بی‌هوازی، ۳۷٪ گازی‌سازی و ۹٪ فناوری‌های دفن زباله است [۱۱].

در مطالعه‌ای که السولالی و همکاران (۲۰۲۴) در کویت انجام داده‌اند از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و الگوریتم ژنتیک برای شناسایی مطلوب‌ترین روش دفع پسماندهای جامد شهری بهره گرفته‌اند. پنج روش دفع شامل لندفیل، محل دفن کنترل شده،

^۱Bio-oil

^۲Waste To Energy

^۳Mujtaba et al

^۴Alsulaili et al

کمپوست و زباله‌سوزی RDF با معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی، فنی و ایمنی مورد ارزیابی قرار گرفتند. در نهایت روش کمپوست و زباله‌سوزی RDF به عنوان برترین گزینه‌های دفع زباله انتخاب شدند [۱۲].

بومیک و همکاران (۲۰۲۴) از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS برای یافتن مکان‌های دفع پسماند جامد شهری استفاده کردند. نتایج حاکی از آن است که تنها ۶٪ از زمین‌های شهرداری برای دفع زباله مناسب هستند که عمدتاً زمین‌ها در این منطقه آیش هستند. ۱۷٪ آن برای دفع پسماند بسیار مناسب هستند همچنین قسمت شرقی بخش شماره ۲۲ و قسمت جنوبی و جنوب غربی شماره ۱۶ برای دفن زباله مناسب است [۱۳].

الم و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای به انتخاب یک فناوری مناسب در شهر چیتاگونگ، بنگلادش پرداختند. فناوری‌های منتخب در این مطالعه شامل هضم بی‌هوازی، گازیفیکاسیون، زباله‌سوزی، گاز محل دفن LFG بودند. معیارهای اصلی برای انتخاب مناسب‌ترین فناوری شامل معیارهای فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی است. از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی برای انجام این تحقیق استفاده گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که در بین فناوری‌های منتخب روش هضم بی‌هوازی بیشترین امتیاز را کسب کرده و به‌عنوان بهترین فناوری WTE شناخته شد و پس از آن روش LFG، گازیفیکاسیون و زباله‌سوزی به ترتیب در رده‌های دوم سوم و چهارم قرار گرفتند [۱۴].

آل تیب^۳ و همکاران (۲۰۲۲) از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی به تنهایی و روش تلفیقی^۵ AHP^۴TOPSIS برای انتخاب بهترین فناوری WTE در بین فناوری‌های^۶ LFG، AD^۷، زباله‌سوزی و پیرولیز برای اردن بر اساس معیارهای زیست‌محیطی، فنی، اجتماعی-اقتصادی استفاده کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که فناوری LFG رتبه اول در بین سایر فناوری‌ها را به‌دست آورده است [۱۵].

در پژوهش دیگری اگیژول^۸ و همکاران (۲۰۲۱) که در منطقه ACCRA غنا انجام دادند از سه معیار فنی، زیست‌محیطی و اجتماعی - اقتصادی برای رتبه‌بندی تکنولوژی‌های بیوگاز لندفیل، زباله‌سوزی، هاضم بی‌هوازی و کمپوستینگ هوازی و از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای تجزیه و تحلیل نتایج استفاده کردند. نتایج حاکی از آن بود که روش زباله‌سوزی مناسب‌ترین فناوری WTE است [۱۶].

شاهنظری و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقی از سه معیار فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی برای ارزیابی فناوری‌های ترموشیمیایی استفاده کردند. آنها از دو روش AHP و TOPSIS استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در بین معیارهای اصلی، معیار زیست‌محیطی بیشترین امتیاز را کسب کرده و مهمترین معیار در انتخاب مناسب‌ترین فناوری ترموشیمیایی محسوب می‌شود. همچنین نتیجه ارزیابی این مطالعه نشان داد که در میان فناوری‌های ترموشیمیایی منتخب، سیستم پلاسما به عنوان بهترین فناوری انتخاب شد [۱۷].

در تحقیقی وحیدی و همکاران (۱۴۰۲) به انتخاب بهترین سیستم برای تولید انرژی از پسماند پرداختند. آنها از دو مدل AHP-^۹VIKOR در فضای فازی استفاده کردند. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که سیستم سوخت SRF مناسب‌ترین روش تولید انرژی از زباله برای شهر کرمان بوده و بعد از آن به ترتیب سیستم‌های پیرولیز، گازی‌سازی و هضم بی‌هوازی قرار گرفتند [۲].

^۱ Bhowmick et al

^۲ Alam et al

^۳ Al Theeb et al

^۴ Analytic Hierarchy Process

^۵ Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

^۶ Landfill Gases

^۷ Anaerobic Digestion

^۸ Agbejule et al

^۹ Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje

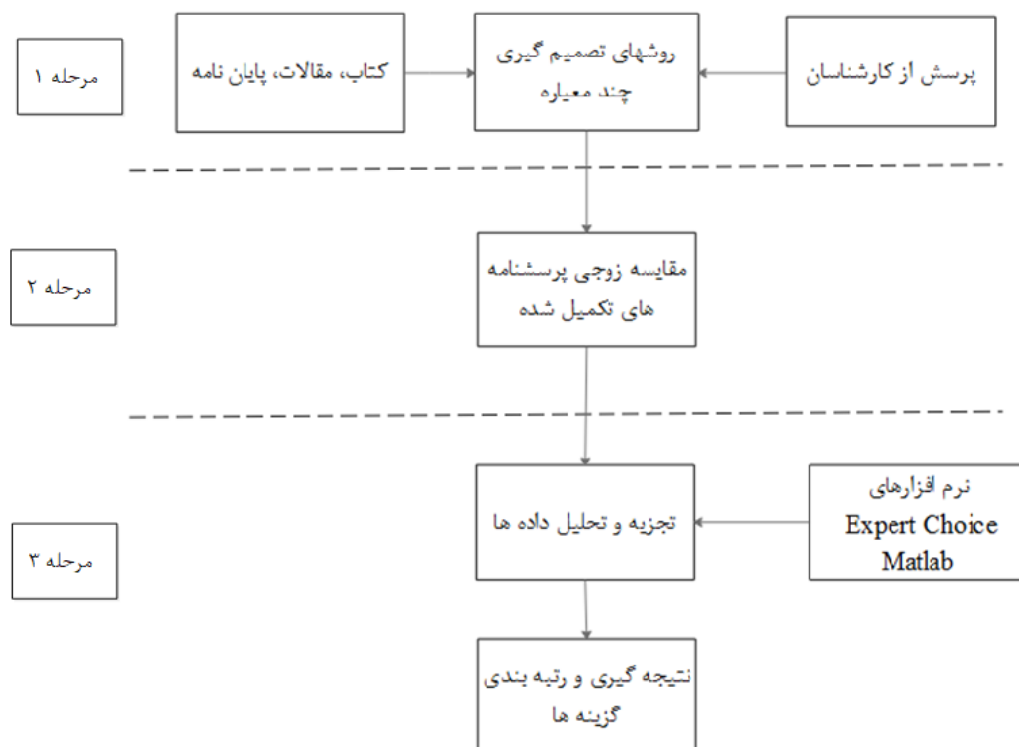
غفارپناه و همکاران (۱۳۹۹) مطالعه‌ای به منظور تعیین مناسب‌ترین روش دفع زباله شهری به کمک روش پویاشناسی سیستم انجام دادند. این تحقیق برای کلان‌شهر اصفهان انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که اجرای متوالی برنامه‌های "استقرار هاضم بی‌هوازی" و "خط تولید سوخت جایگزین" مناسب‌ترین گزینه برای دفع و پردازش زباله جامد شهری در اصفهان می‌باشد [۱۸].

صادقی و همکاران (۱۳۹۹) از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی، تاپسیس و ویکور به رتبه‌بندی نیروگاه‌های تجدیدپذیر پرداختند. شاخص‌های اصلی برای رتبه‌بندی شامل شاخص‌های اقتصادی، محیط‌زیستی و فنی هستند. نتایج حاکی از آن است که در بین نیروگاه‌های تجدیدپذیر، نیروگاه بادی در رتبه اول برای تولید برق بوده و سپس نیروگاه‌های خورشیدی، برقابی، گازی، بخاری، سیکل ترکیبی و دیزلی در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند [۱۹].

از پیشینه پژوهش که به بررسی تحقیقات مشابه پرداخته است می‌توان استنتاج نمود که استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به منظور انتخاب بهترین گزینه، روشی بسیار مطلوب و کاربردی می‌باشد؛ زیرا انتخاب یک فناوری در بین چندین فناوری دارای ابعاد گسترده و متفاوتی بوده و می‌بایست معیارهای گوناگونی را مدنظر قرار داد که در روش تصمیم‌گیری چند معیاره این امکان وجود دارد. در مطالعه حاضر ارزیابی و اولویت‌بندی فناوری‌های زباله‌سوزی، پیرولیز و هاضم بی‌هوازی از سه دیدگاه فنی، اقتصادی و زیست-محیطی که برای هر یک از معیارهای منتخب نیز تعدادی زیرمعیار در نظر گرفته و با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، یعنی فرایند تحلیل سلسله مراتبی، تاپسیس و ویکور انجام خواهد شد.

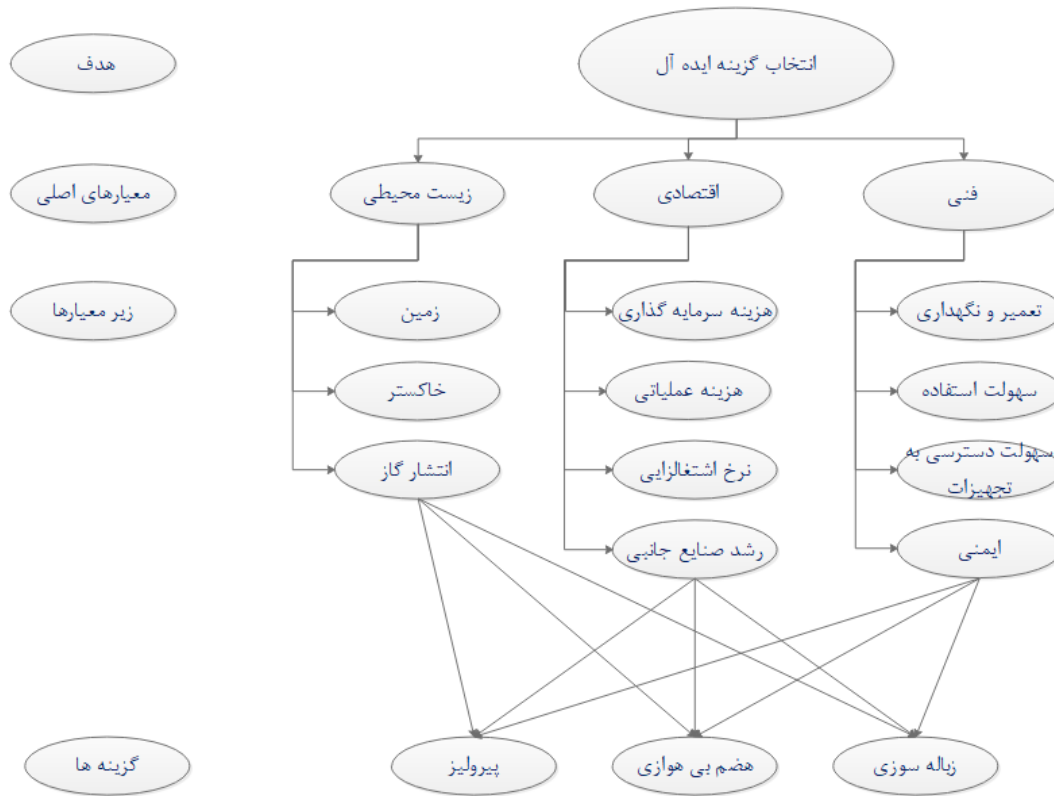
۲- مواد و روش‌ها

این مطالعه از منظر هدف جز پژوهش‌های کاربردی محسوب می‌گردد، زیرا نتایج آن به مدیران، سرمایه‌گذاران و صاحب‌نظران حوزه انرژی و مدیریت پسماند به انتخاب فناوری ایده‌آل بر اساس طیف گسترده‌ای از شاخص‌ها کمک نموده و از اتلاف سرمایه و زمان جلوگیری می‌کند. هدف اصلی این پژوهش شناسایی معیارهای موثر در انتخاب گزینه ایده‌آل و رتبه‌بندی فناوری‌های رایج تبدیل پسماند به انرژی می‌باشد. برای رسیدن به این هدف از روش تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده گردید. شماتیک مراحل اصلی پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک مراحل تحقیق

در ابتدا از منابع معتبر علمی کتابخانه‌ای، مقالات و پایان‌نامه‌ها معیارها و زیرمعیارهای موثر در انتخاب بهترین فناوری تبدیل پسماند به انرژی تعیین شد. سپس بر اساس روش تصمیم‌گیری چندمعیاره پرسشنامه مربوط به مقایسات زوجی تهیه و تدوین گردید. پس از تدوین، پرسشنامه مذکور توسط ۵ نفر کارشناسان و افراد خبره در این حوزه از کشورهای ایران، هندوستان، کره جنوبی و سنگاپور، تکمیل گردید. پس از تکمیل پرسشنامه توسط تیم خبره، فناوری‌های منتخب مورد تجزیه و تحلیل و اولویت‌بندی قرار گرفتند. بعد از مشخص شدن معیارها، زیرمعیارها و فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی، درخت سلسله مراتبی تشکیل که شماتیک آن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- درخت سلسله مراتبی معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها

۳- فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یکی از معروف‌ترین روش‌های موجود در تصمیم‌گیری چند معیاره است که به توسط توماس ال. ساعتی در دهه ۸۰ میلادی معرفی گردید [۲۰]. این روش یکی از جامع‌ترین روش‌های موجود جهت تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است؛ زیرا این روش امکان فرموله کردن مسأله را به شکل سلسله مراتبی فراهم می‌کند و همچنین امکان در نظر گرفتن شاخص‌های گوناگون کمی و کیفی را در مسأله دارد [۲۱].

این فرآیند گزینه‌های مختلف را در تصمیم‌گیری دخالت داده و امکان تحلیل حساسیت روی معیارها و زیرمعیارها را دارد. علاوه بر این، بر مبنای مقایسه زوجی بنا نهاده شده که قضاوت و محاسبات را آسان نموده و میزان سازگاری و ناسازگاری تصمیم را نشان می‌دهد که از مزایای برجسته این روش است [۲۲]. این روش برای انجام دو کار مورد استفاده قرار می‌گیرد: اول پیدا کردن وزن شاخص‌ها و دوم رتبه‌بندی گزینه‌ها. این روش، مانند آنچه در مغز انسان انجام می‌شود به تحلیل مسائل می‌پردازد [۲۳]. در این مطالعه برای محاسبه وزن شاخص‌ها از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی استفاده گردیده است. برای شروع این کار در ابتدا می‌بایست ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل شود که نمونه‌ای از آن در جدول ۱ نشان داده شده است. ماتریس تصمیم‌گیری، ماتریسی است که در واقع ارتباط بین گزینه‌ها و معیارها را به صورت همزمان نشان می‌دهد. عناصر ماتریس تصمیم‌گیری ارزش گزینه‌ها را نسبت به هر کدام از معیارها نشان می‌دهد [۲۴].

جدول ۱: ماتریس تصمیم‌گیری تحقیق حاضر

معیارها			
گزینه‌ها	فنی	اقتصادی	زیست‌محیطی
زباله‌سوزی	r_{11}	r_{12}	r_{13}
پیرولیز	r_{21}	r_{22}	r_{23}
هضم بی‌هوازی	r_{31}	r_{32}	r_{33}

جهت به دست آوردن وزن معیارها، در ابتدا باید تمام عناصر ماتریس تصمیم‌گیری بی‌مقیاس شده و یا اصطلاحاً نرمال کردند که برای این کار از رابطه ۱ استفاده می‌شود [۲۵]:

$$n_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij})^2}} \quad (1)$$

سپس برای محاسبه آنتروپی E_j از مجموعه P_{ij} ها به ازای هر مشخصه به صورت از رابطه ۲ استفاده می‌شود. به طوری که $k = \frac{1}{L \cdot nm}$ است.

$$E_j = -K \sum_{i=1}^n [P_{ij} \cdot \ln P_{ij}] \quad (2)$$

پس از محاسبه آنتروپی نیاز به محاسبه عدم اطمینان یا درجه انحراف است، درجه انحراف هر یک از شاخص‌ها از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد.

$$d_j = 1 - E_j ; \forall j \quad (3)$$

سرانجام وزن برای هر یک از شاخص‌ها از فرمول ۴ بدست می‌آید.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (4)$$

بعد از محاسبه وزن‌های نسبی هر یک از شاخص‌ها نیاز به ادغام وزن‌های نسبی و به دست آوردن وزن نهایی گزینه‌ها می‌باشد، بدین صورت که با ضرب وزن نسبی گزینه‌ها نسبت به هریک از شاخص‌ها در وزن نهایی شاخص و جمع بستن بر روی تمامی شاخص‌ها، وزن نهایی گزینه‌ها بدست می‌آید.

$$R_k = \sum w_i \cdot r_{ik} \quad (5)$$

که در این رابطه R_k وزن نهایی گزینه k ام، w_i وزن نهایی شاخص i ام، r_{ik} وزن نسبی گزینه k ام نسبت به شاخص i ام می‌باشند.

۴-روش VIKOR

این روش برای بهینه‌سازی چند معیاره در فرایندهای پیچیده طراحی شده است. این روش بر روی اولویت‌بندی و انتخاب مناسب‌ترین گزینه با معیارهای گوناگون متمرکز است و بر اساس نزدیکی به گزینه ایده‌آل انجام می‌شود. مراحل روش VIKOR به شرح زیر می‌باشد [۲۶]:

- تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری اطلاعات جمع‌آوری شده
- محاسبه مقادیر نرمال شده داده‌ها و وزن شاخص‌ها
- محاسبه بیشترین و کمترین مقدار برای هر کدام از شاخص‌های منتخب در این تحقیق.

$$f_j^* = \text{Max} f_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (۶)$$

$$f_j^- = \text{Min} f_{ij}, j = 1, 2, \dots, m \quad (۷)$$

- محاسبه فاصله گزینه‌ها از راه‌حل ایده‌آل

$$S_j = \sum_{i=1}^n \frac{w_i (f_j^* - f_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \quad (۸)$$

$$R_j = \text{Max} \left[\frac{w_i (f_j^* - f_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \right] \quad (۹)$$

در این روابط، S_j بیان‌کننده فاصله گزینه j از راه‌حل ایده‌آل مثبت و R_j بیان‌کننده فاصله گزینه j از راه‌حل ایده‌آل منفی می‌باشد. بدین ترتیب بهترین گزینه بر اساس مقدار S_j و بدترین گزینه نیز بر اساس مقدار R_j خواهد بود.

- محاسبه مقدار VIKOR یا مقدار Q_i

$$Q_i = V \left[\frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} \right] + (1 - V) \left[\frac{R_j - R^*}{R^- - R^*} \right] \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰) مقدار V همواره عدد ثابتی بوده و برابر ۰/۵ می‌باشد [۲۷]. همچنین مقادیر S^* و R^* به ترتیب برابر حداقل S_j ، R_j و مقادیر S^- و R^- به ترتیب برابر با حداکثر S_j ، R_j می‌باشند.

۵-روش TOPSIS

این روش یکی از پرکاربردترین روش در تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد. اساس این روش این گونه است که مطلوب‌ترین گزینه، گزینه‌ای است که همزمان بیشترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل منفی و کمترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل مثبت داشته باشد [۲۵].

۵-۱-مراحل TOPSIS

مراحل این روش به منظور اولویت‌بندی فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی منتخب در این تحقیق که بر اساس ماتریس تصمیم‌گیری عبارتند از [۲۸]:

- اولین مرحله بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم‌گیری است

$$V^+ = \{V_{ij}/(\max V_{ij}, j \in J), (\min V_{ij}, j \in J')\} \quad (12)$$

$$V^- = \{V_{ij}/(\min V_{ij}, j \in J), (\max V_{ij}, j \in J')\} \quad (13)$$

➤ مرحله دوم محاسبه ماتریس بی‌مقیاس شده وزین می‌باشد که از حاصل ضرب ماتریس بی‌مقیاس شده در وزن به دست می‌آید:

$$V_{ij} = W_j \cdot r_{ij}(X) \quad (11)$$

➤ تعیین راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی که از روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شوند:

که J در این جا برای مجموعه معیارهای مثبت همانند سود که هر چه بیشتر باشد، بهتر است و همچنین J' برای معیارهای منفی مثل هزینه‌ها که هر چه قدر این مقدار کمتر باشد مفیدتر است، می‌باشد.

➤ محاسبه فاصله اقلیدوسی هر گزینه تا بردارهای به دست آمده ایده‌آل مثبت و منفی که بر اساس روابط ۱۴ و ۱۵ به دست می‌آیند:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad (14)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (15)$$

➤ در نهایت جهت سطح‌بندی گزینه‌های موجود در تصمیم‌گیری شاخص نزدیکی نسبی^۱ هر کدام از گزینه‌ها به راه‌حل ایده‌آل مثبت را از طریق رابطه ۱۶ محاسبه می‌کنیم:

$$RC_i = \frac{d_i^+}{d_i^+ - d_i^-} \quad (16)$$

در این رابطه هر چه مقدار RC_i بیشتر باشد، نشان می‌دهد که گزینه مورد نظر به راه‌حل ایده‌آل مثبت نزدیکی نسبی بیشتری دارد و در نتیجه در سطح بالاتری قرار خواهد گرفت.

۶- نتایج و بحث

در مدیریت پسماند شهری لازم است تا فناوری‌های جدید در ابعاد گوناگون مورد بررسی قرار بگیرند. در این مطالعه فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی بر اساس سه معیار اصلی زیست‌محیطی، فنی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور انتخاب بهتر و دقیقتر برای هر معیار اصلی نیز تعدادی زیرمعیار در نظر گرفته شد. برای انجام این مقایسات و انتخاب بهترین گزینه از مدل VIKOR

^۱Relative Closeness

استفاده گردید. همچنین برای اطمینان از نتایج به دست آمده و افزایش دقت در انتخاب بهترین فناوری از مدل TOPSIS هم استفاده گردید. پس از انجام محاسبات، نتایج در هر دو مدل مقایسه شد. در ابتدا، برای به دست وزن معیارها و زیرمعیارها از روش AHP و از نرم افزار Expert Choice برای محاسبات استفاده گردید. فرایند تحلیل سلسله مراتبی بر پایه مقایسات زوجی است. در این روش وزن‌ها بیانگر اهمیت نسبی هستند. در این روش ابتدا وزن هریک از معیارها بر اساس اهداف ارزیابی محاسبه شده و سپس با مقایسه زوجی گزینه‌ها نسبت به هر کدام از معیارها ترتیب اهمیت آنها مشخص می‌گردد. وزن شاخص‌ها محاسبه و نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- وزن نهایی معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها

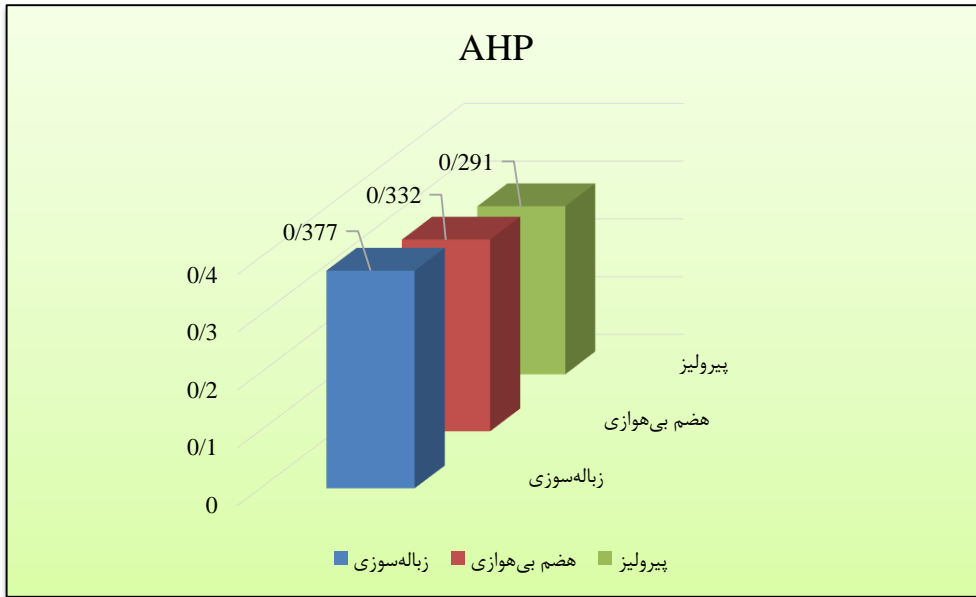
وزن نهایی فناوریهای تبدیل پسماند به انرژی		وزن		معیار اصلی	
هضم بی‌هوازی	پیرولیز	زباله‌سوزی	زیرمعیار	زیرمعیار	معیار اصلی
۰/۴۵۵	۰/۲۸۴	۰/۲۶۲	۰/۱۷۴	۰/۱۷۴	فنی
۰/۳۵۷	۰/۲۷۰	۰/۳۷۳	۰/۳۶۲	نگهداری و تعمیرات	
۰/۵۶۶	۰/۲۸۸	۰/۱۴۶	۰/۱۶۲	سهولت استفاده از فناوری	
۰/۴۴۲	۰/۳۵۰	۰/۲۰۸	۰/۱۷۲	سهولت دسترسی به تجهیزات	
۰/۵۸۴	۰/۲۵۷	۰/۱۵۹	۰/۳۰۴	ایمنی محیط کار	
۰/۳۸۱	۰/۲۸۵	۰/۳۳۵	۰/۲۶۷	اقتصادی	
۰/۴۶۹	۰/۳۰۶	۰/۲۲۵	۰/۳۶۳	هزینه عملیاتی	
۰/۴۱۴	۰/۳۷۲	۰/۲۱۴	۰/۱۳۳	رشد صنایع جانبی	
۰/۲۶۱	۰/۲۲۸	۰/۵۱۱	۰/۴۰۸	سرمایه‌گذاری	
۰/۴۶۰	۰/۲۸۹	۰/۲۵۱	۰/۰۹۵	نرخ اشتغال‌زایی	
۰/۲۷۶	۰/۲۹۶	۰/۴۲۸	۰/۵۵۹	زیست‌محیطی	
۰/۲۷۷	۰/۲۹۴	۰/۴۳۰	۰/۵۹۳	انتشار گاز	
۰/۲۶۰	۰/۳۵۱	۰/۳۸۹	۰/۲۴۴	خاکستر	
۰/۳۰۵	۰/۲۰۱	۰/۴۹۴	۰/۱۶۴	زمین مورد استفاده	

بر اساس نتایج به دست آمده از این جدول، در بین معیارهای اصلی معیار زیست‌محیطی بیشترین وزن (۰/۵۵۹) را به دست آورده و پس از آن معیار اقتصادی (۰/۲۶۷) و فنی (۰/۱۷۴) قرار دارند. یعنی در انتخاب بهترین فناوری، معیار زیست‌محیطی مهمترین معیار است که باید مد نظر قرار بگیرد. به همین ترتیب برای زیرمعیارهای منتخب نیز می‌توان چنین استنتاج کرد که پارامتر تعمیر و نگهداری از معیار فنی، پارامتر سرمایه‌گذاری از معیار اقتصادی و پارامتر انتشار گاز آلاینده از معیار زیست‌محیطی بیشترین اهمیت را در بین زیرمعیارها در انتخاب فناوری مناسب دارند. نتایج این جدول نیز نشان می‌دهد که فناوری مناسب از نظر معیار فنی و اقتصادی فناوری هضم بی‌هوازی و از نظر معیار زیست‌محیطی فناوری زباله‌سوزی بیشترین وزن‌ها را به دست آوردند.

هم‌چنین رتبه‌بندی نهایی فناوری‌های منتخب در این مطالعه براساس روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی نشان می‌دهد که فناوری زباله‌سوزی گزینه اول بوده و فناوری هضم بی‌هوازی و پیرولیز گزینه‌های دوم و سوم هستند. مقادیر عددی آن در جدول ۳ و شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- نتایج حاصل از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی

فناوری	امتیاز نهایی
زباله‌سوزی	۰/۳۷۷
هضم بی‌هوازی	۰/۳۳۲
پیرولیز	۰/۲۹۱

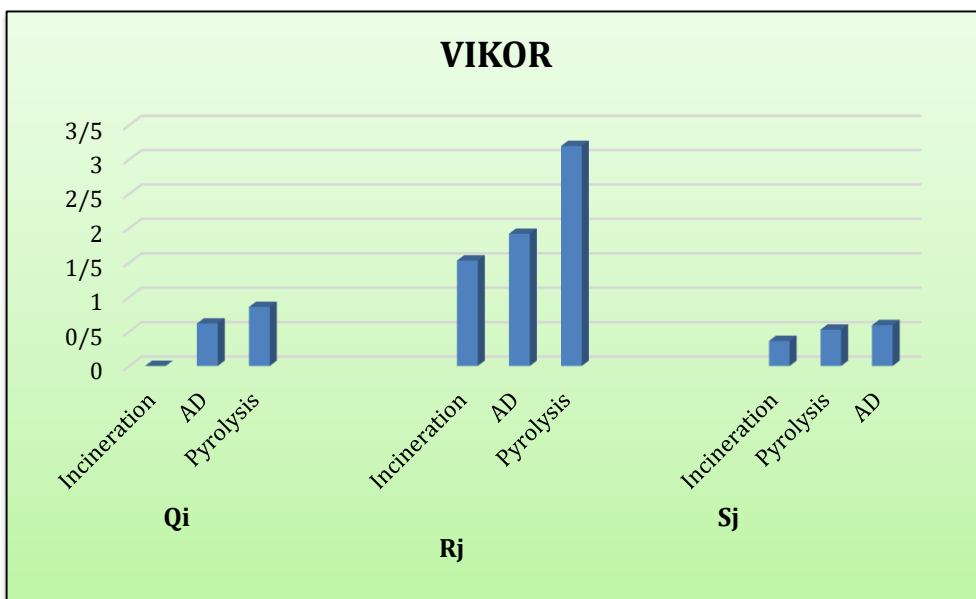


شکل ۳ - شماتیک نتایج حاصل از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی

پس از به‌دست آوردن وزن‌ها، از روش ویکور برای تصمیم‌گیری جهت انتخاب فناوری مناسب استفاده گردید که نتایج آن به شرح زیر است.

شکل ۴ مقادیر به‌دست آمده از روش ویکور که در نرم افزار Matlab محاسبات آن انجام شده برای پارامترهای Q_i ، S_j ، R_j را نشان می‌دهد. طبق شکل فناوری پیرولیز بیشترین مقدار Q_i را به‌دست آورده و پس از آن فناوری AD و زباله‌سوزی قرار دارند. اما بر اساس اصول روش ویکور فناوری که کمترین میزان Q_i را داشته باشد به عنوان بهترین فناوری شناخته می‌شود. یعنی نتیجه نهایی که رتبه‌بندی و انتخاب بهترین فناوری است، با این پارامتر Q_i که به ترتیب از کمترین مقدار به بیشترین مقدار مشخص می‌گردد، تعیین می‌شود.

طبق نتیجه به‌دست آمده کمترین مقدار Q_i مربوط به فناوری زباله‌سوزی بوده و پس از آن نیز فناوری هضم بی‌هوازی و پیرولیز قرار می‌گیرند. مقادیر عددی آن در جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ - شماتیک نتایج حاصل از روش ویکور

جدول ۴- مقادیر عددی پارامترهای R_j ، S_j ، Q_i

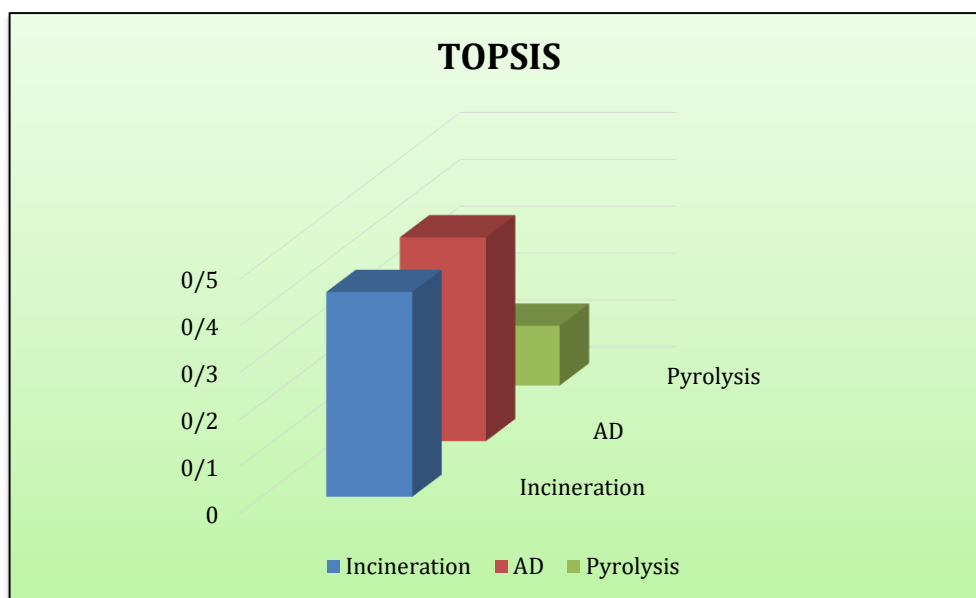
فناوری	Q_i	S_j	R_j
زباله‌سوزی	۰	۱/۵۳۰۹	۰/۳۶۳
هضم بی‌هوازی	۰/۶۱۶۳۳	۱/۹۱۸۴	۰/۵۹۳
پیرولیز	۰/۸۵۶۷۶	۳/۱۹۶۵	۰/۵۲۷۱۱

ما برای کسب اطمینان بیشتر از نتایج به دست آمده در روش ویکور، از روش تاپسیس نیز استفاده کردیم. برای انجام محاسبات این روش نیز از نرم‌افزار متلب استفاده گردید. نتایجی که از مدل تاپسیس به دست آمد نشان می‌دهد که فناوری زباله‌سوزی با امتیاز ۰/۴۳۷۲ در رتبه اول قرار گرفته و بعد از آن به ترتیب فناوری هضم بی‌هوازی و پیرولیز با امتیازات ۰/۴۳۵۳ و ۰/۱۲۷۴ می‌باشند. مقادیر عددی امتیاز نهایی در جدول ۵ و شماتیک نتایج حاصل از روش تاپسیس در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج در روش‌های مورد استفاده در این مطالعه حاکی از مناسب بودن روش زباله‌سوزی نسبت به سایر روش‌های تبدیل پسماند به انرژی مورد مطالعه در این تحقیق می‌باشد.

جدول ۵- نتایج حاصل از روش تاپسیس

فناوری	امتیاز نهایی
زباله‌سوزی	۰/۴۳۷۲
هضم بی‌هوازی	۰/۴۳۵۳
پیرولیز	۰/۱۲۷۴

از جمله دلایل اصلی برای انتخاب این سیستم طبق نظر کارشناسان می‌توان به مدت زمان کوتاه فرایند هم برای امحا زباله جامد شهری و هم به منظور بازیابی انرژی و همچنین مدیریت بهتر حجم زیاد زباله بدون نیاز به پیش پردازش اشاره نمود.



شکل ۵- شماتیک حاصل از روش تاپسیس

جدول ۶ به منظور سهولت دسترسی به نتایج نهایی سه روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی، ویکور و تاپسیس تشکیل گردید تا امتیاز نهایی کلیه فناوری‌های منتخب در یک جدول نشان داده شود.

جدول ۶- نتایج نهایی حاصل از سه روش سلسله مراتبی، ویکور و تاپسیس

فناوری	AHP	VIKOR	TOPSIS
زباله‌سوزی	۰/۳۷۷	۰	۰/۴۳۷۲
هضم بی‌هوازی	۰/۳۳۲	۰/۶۱۶۳۳	۰/۴۳۵۳
پیرولیز	۰/۲۹۱	۰/۸۵۶۷۶	۰/۱۲۷۴

۷- نتیجه‌گیری

امروزه استفاده از پسماند جامد شهری به منظور تولید انرژی کانون توجه بسیاری از سیاست‌گذاران و محققین قرار گرفته است. زیرا از طرفی به دفع زباله‌های جامد شهری پرداخته که به حفظ محیط‌زیست کمک کرده و همچنین می‌تواند به عنوان یک منبع پایدار تولید انرژی محسوب گردد. از آنجایی که فناوری‌های مختلفی برای تولید انرژی از زباله وجود دارد در این تحقیق سعی شده تا رایج‌ترین فناوری‌ها مورد ارزیابی قرار بگیرد. فناوری‌های مورد بررسی در این مطالعه شامل فناوری‌های بیوگاز (هضم بی‌هوازی)، زباله‌سوزی و پیرولیز می‌باشد. برای ارزیابی این فناوری‌ها از سه معیار اصلی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی و به منظور کسب نتایج دقیق‌تر برای هر کدام معیارهای منتخب، تعدادی زیرمعیار در نظر گرفته شد. برای محاسبه وزن‌ها از مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی در نرم‌افزار Expert Choice و برای محاسبات اصلی برای دو روش تاپسیس و ویکور از نرم‌افزار Matlab بهره گرفته شد. به جهت اطمینان از نتایج، گزینه‌ها با سه روش مقایسه زوجی تحلیل سلسله مراتبی، ویکور و تاپسیس که از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره هستند رتبه بندی شدند. با توجه به معیارها و زیر معیارهای مورد بررسی جهت مقایسه گزینه‌ها، نتایج نشان داد فناوری زباله سوزی به عنوان فناوری ارجح‌تر انتخاب شده است و البته بایستی در نظر داشت با تکمیل معیارها و زیر معیارها این ارجحیت بندی می‌تواند تغییر یابد. نتایج کلی نشان داد در روش‌های منتخب تصمیم‌گیری چند معیاره، فناوری زباله‌سوزی با بیشترین امتیاز به‌عنوان بهترین فناوری تبدیل پسماند به انرژی و بعد از آن فناوری‌های هاضم بی‌هوازی و پیرولیز در رده‌های دوم و سوم قرار گرفتند. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره با ادغام منطق فازی و روش‌های هیبریدی برای ارزیابی فناوری‌های تولید انرژی استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود که از معیارها و زیرمعیارهای متفاوت‌تر و فناوری‌های مختلف تبدیل پسماند به انرژی مانند انواع روش‌های زباله‌سوزی مثل روش توده‌سوزی، RDF، TDF و پیرولیز سریع و آهسته و ... با هم مقایسه شوند. با توجه به تنوع فناوری در زمینه مدیریت پسماندهای آلی پیشنهاد می‌گردد که با استفاده از روش‌های موجود در تصمیم‌گیری چند معیاره، روش‌های مختلف تولید کود از زباله‌های تر همانند کمپوست، ورمی‌کمپوست و BSF مورد ارزیابی قرار بگیرند.

۸- منابع

1. Afrane, S., et al., Integrated AHP-TOPSIS under a fuzzy environment for the selection of waste-to-energy technologies in Ghana: a performance analysis and socio-enviro-economic feasibility study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022. 19(14): p. 8428. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148428>
2. وحیدی، حسین، عرب آبادی، رضا، سلطانی نژاد، مرضیه، انتخاب مناسب‌ترین روش تبدیل پسماند به انرژی با استفاده از مدل‌های VIKOR-AHP در فضای فازی: مطالعه موردی شهرداری کرمان، فصلنامه مدیریت شهری و مهندسی محیط زیست، ۱۴۰۲، (۱۱)، ۳۶-۱۷. (DOI: 10.48306/jumee.2023.394192.1002)
3. Scott, J, A., W, Ho., and P, K, Dey., A review of multi-criteria decision-making methods for bioenergy systems, *Energy*, 2012. 42(1): p. 146-156. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.3.074>)
4. خان پور اقدم، سمیه، قنبرزاده لک، مهدی، مهدی، مهرداد، و صبور، محمدرضا، ارزیابی گزینه‌های دفع نهایی پسماند جامد شهری با استفاده از تلفیق روش‌های ارزیابی چرخه عمر و تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: شهر تهران)، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۳۹۸، ۲۱(۲) (پیاپی ۸۱)، ۵۷-۶۹. (<https://sid.ir/paper/360849/fa>) (SID)

5. Assamoi, B., Lawryshyn, Y., The environmental comparison of landfilling vs. incineration of MSW accounting for waste diversion, *Waste Management*. 2012. 32(5). 1019-1030.
6. Sharuddin, S, D, A., Abnisa, F., Daud, W, M, A, W., Aroua, M, K., A review on pyrolysis of plastic wastes, *Energy conversion and management*, 2016. 115, 308-326. Doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.037
7. Heo, H, S., Park, H, J., Park, Y, K., Ryu, C., Suh, D, J., Suh, Y, W., Kim, S, S., Bio-oil production from fast pyrolysis of waste furniture sawdust in a fluidized bed, *Bioresource technology*, 2010. 101(1), S91-S96. DOI: [10.1016/j.biortech.2009.06.003](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.003)
۸. زینلی، ر.، هضم مشترک زباله جامد شهری با گلیسیرین خام و پیش تیمار فراصوت، ۱۳۹۴، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
9. AlNouss, A. Alherbawi, M., Parthasarathy, P., Althani, N., McKay, G., AlAnsari, T., Waste-to-energy technology selection: A multi-criteria optimisation approach, 2024. *Computers & Chemical Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.10859>
10. Teimouri, F., Ebrahimi, A., Jalili, M., Alaghebandan, HR., Sustainability Impact Assessment of Waste to Energy Technologies in Iran, 2019. *J Environ Health Sustain Dev*. 2019; 4(4): 885-94.
11. Mujtaba, M,A., Munir, A., Imran, S., Nasir, M,K., Muhayyuddin, M, G., Javed, A., Mehmood, A., Habila, M, A., Fayaz, H., Qazi, A., Evaluating sustainable municipal solid waste management scenarios: A multicriteria decision making approach, *Heliyon*, 2024. 10 (4):e25788. Doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25788
12. Alsulaili, A., Ali, O., Alenezi, N., and Al-Dabbous, A, N., Selection of municipal solid waste disposal technology using the Analytic Hierarchy Process and Genetic Algorithm for Gulf Cooperation Council Countries, *Journal of Engineering Research*, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.03.015>
13. Bhowmick, P., Das, S., Das, N., Identification of suitable sites for municipal waste dumping and disposal using multi-criteria decision-making technique and spatial technology: A case of Bolpur municipality, Birbhum district, West Bengal, *Waste Management Bulletin*, 2024, Vol, 2, No, 1, 250-265. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.02.001>
14. Alam, S., Rahman, K, S., Rokonzaman, M., Salam, P, A., Miah, M, S., Das, N., Chowdhury, S., Channumsin, S., Sreesawet, S., Channumsin, M, Selection of Waste To Energy Technologies for Municipal Solid Waste Management Towards Achieving Sustainable Development Goals, *Sustainability*, 2022, 14, 11913. <https://doi.org/10.3390/su141911913>
15. Al Theeb, N., Qdais, H, A., Qdais, F, H, A., and Habibah, O, Utilizing AHP-TOPSIS as multi-criteria decision approaches to select the best alternative for waste to energy technology, *Jordan J, Mech, Ind, Eng*, 2022, 16, 601-613.
16. Agbejule, A., Shamsuzzoha, A., Lotchi, K., Rutledge, K, Application of Multi-Criteria Decision-Making Process to Select Waste-to-Energy Technology in Developing Countries: The Case of Ghana, *Sustainability*, 2021, 13(22):12863. <https://doi.org/10.3390/su132212863>

17. Shahnazari, A., Rafiee, M., Rohani, A., Nagar, B, B., Ebrahiminik, M, A., and Aghkhani, M, H, Identification of effective factors to select energy recovery technologies from municipal solid waste using multi-criteria decision making (MCDM): A review of thermochemical technologies, 2020, Sustainable energy technologies and assessments, 40, 100737. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100737>
۱۸. غفارپناه، محسن، حسین زاده، مهناز، کاظمی، عالی، مدلسازی سیستم پردازش و دفع پسماند شهری اصفهان با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم، پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری، ۱۳۹۹، ۵(۲)، ۸۱-۱۰۹
۱۹. صادقی، زین‌العابدین، رضایی، جعفری، مریم، و قاسمی نژاد، امین، بررسی نیروگاه‌های تجدیدپذیر با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی، تاپسیس و ویکور، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۳۹۹، ۲۲(۸) (پیاپی ۹۹)، ۴۳-۵۸ <https://sid.ir/paper/397458/fa>
۲۰. منظور، د، رحیمی، ع، ر، اولویت‌بندی نیروگاه‌های تولید برق در ایران با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، سال چهارم، شماره ۱۴، ۱۳۹۴، ۱۹۱-۲۱۵
۲۱. داوودی نژاد، م، بی‌پروا، پ، اولویت‌بندی فناوری‌های تولید انرژی از فرایندهای تصفیه فاضلاب به روش تحلیل سلسله‌مراتبی، نشریه انرژی ایران، ۱۳۹۴، شماره ۳
22. Bamdad, N., Mohammadzadeh-Basir, H., Narvankuhi, A., Emami, S., Saiedi, A., Site selection methodology for industries, 2007, Rahshah and Associates Engineers: 94: 54-5.
۲۳. مومنی، م، شریفی سلیم، ع، مدل‌ها و نرم‌افزارهای تصمیم‌گیری چند شاخصه، ۱۳۹۱، تهران: نشر مؤلف.
۲۴. قدسی پور، س، ح، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، ۱۳۸۷، تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
۲۵. میرغفور، س، ح، عزیزی، ف، اسدیان اردکانی، ف، روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه، ۱۳۹۳. سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی، جهاد دانشگاهی واحد یزد.
26. Opricovic, S., Tzeng, G, H., Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS, European journal of operational research, 2004, 156(2), 445-455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
27. Chen, L, Y., Wang, T, C., Optimizing partners' choice in IS/IT outsourcing projects: The strategic decision of fuzzy VIKOR, International Journal of Production Economics, 2009, 120(1), 233-242.
28. Aldona, K, Bartlomiej, G, Analytical Hierarchy Process/Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution-based approach to the generation of environmental improvement options for painting process e Results from an industrial case study, 2015, Journal of Cleaner Production, 101, 360-367.