Urban Development Policy Making
Home Page: https://judpm.ir
Online ISSN: 3092-6564

Multi-Criteria Decision Making for Selecting the Optimal Urban Waste Management Method Using Analytic Hierarchy Process

Asma Fayazi[1] | Reza Fallah[2] | Sara Mahmoudian Younesi[3] | Majid Zandi[4*]

1. Undergraduate student, Department of Renewable Energy Engineering, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: Asmafayaazi@gmail.com
2. Master of Science student, Department of Energy Conversion Engineering, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: Rez.fallah@mail.sbu.ac.ir
3. Phd student, Department of Renewable Energy Engineering, Faculty of Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: s_mahmoodian@sbu.ac.ir
4. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Renewable Energy Engineering, Faculty of Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_zandi@sbu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 01 February 2025
Revised 15 March 2025
Accepted 05 April 2025
Published Online 10 May 2025

Keywords:
Urban waste management,
Analytic Hierarchy Process,
Multi-Criteria Decision Making,
Recycling,
Anaerobic Digestion.

ABSTRACT

Municipal solid waste management has become one of the major challenges in modern cities due to the rapid increase in waste generation and the limitation of natural resources. Selecting an optimal waste management method requires the consideration of environmental, economic, technical, and social criteria to not only minimize negative environmental impacts but also make the best use of available resources. In this study, various waste management methods including pyrolysis, recycling, composting, anaerobic digestion, incineration, and refuse-derived fuel were evaluated and prioritized using the Analytic Hierarchy Process (AHP). The evaluation criteria included investment cost, environmental pollution, resource availability, required technical expertise, social acceptance, energy consumption, and process efficiency. The weights of criteria and alternatives were determined based on expert opinions. Criteria where lower values indicate higher desirability were inverted within the software to ensure consistency in the evaluation. The results of this study indicate that sustainable and cost-effective methods such as recycling (score: 0.0982) and anaerobic digestion (score: 0.0879), due to their ability to generate valuable products, reduce pollution, and offer economic benefits, are more suitable for urban waste management compared to costly and polluting methods such as incineration and pyrolysis. Furthermore, the findings suggest that combining different methods and adopting integrated approaches can enhance the effectiveness of waste management systems and contribute to achieving sustainability goals.

Cite this article: Fayazi, A.; Fallah, R.; Mahmoudian Younesi, S. & Zandi, M. (2025). Multi-Criteria Decision Making for Selecting the Optimal Urban Waste Management Method Using Analytic Hierarchy Process. *Urban Development Policy Making*, 2 (2), 173-188. DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.513772.1026

© Asma Fayazi, Reza Fallah, Sara Mahmoudian Younesi, Majid Zandi
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.513772.1026

1. Introduction

The increasing volume of urban waste, driven by economic growth and urbanization, has posed significant challenges for waste management systems. The selection of an optimal waste management strategy is a complex decision-making process due to the multiplicity of available methods and the necessity of considering various environmental, economic, social, and technical criteria. This study employs the AHP to systematically identify and prioritize key criteria influencing urban waste management. By integrating a comparative assessment of different waste management techniques, this

research aims to establish a comprehensive and scientifically grounded framework for optimizing waste management strategies. Through an extensive review of previous studies and empirical data analysis, this study underscores the efficacy of AHP as a robust decision-support tool in this domain. The findings provide valuable insights for policymakers, urban planners, and researchers in formulating efficient and sustainable waste management policies.

2. Methodology

Urban waste management is a complex multi-criteria decision-making (MCDM) problem involving diverse stakeholders. The Analytic Hierarchy Process is used to evaluate six waste management technologies across seven criteria: energy consumption, process efficiency, required expertise, resource accessibility, investment cost, and environmental impact. The decision process is structured hierarchically using Super Decisions software, where expert panels conduct pairwise comparisons based on Saaty's 1-9 scale. Consistency ratios (CR) below 0. 1 ensure judgment reliability. Criteria such as investment cost and pollution levels are inversely weighted for consistency. The final ranking is determined by aggregating criteria weights and scores. The evaluation framework categorizes criteria into technical, economic, social, and environmental groups. Technical aspects include energy consumption, efficiency, and required expertise. Economic factors consider resource accessibility and investment costs, while environmental criteria focus on pollution levels. Social factors include public acceptance and regulatory compliance, ensuring a comprehensive sustainability assessment.

3. Results and Discussion

The analysis reveals that recycling and anaerobic digestion are the most effective waste management strategies due to their lower costs, environmental benefits, and resource recovery potential. In contrast, incineration and pyrolysis, despite their energy generation capabilities, are less favorable due to high operational costs and emissions. A comparative assessment of six waste management methods—recycling, anaerobic digestion, composting, incineration, refuse-derived fuel, and pyrolysis—using eight evaluation criteria highlights the superiority of recycling, which achieved the highest ranking, followed by anaerobic digestion and composting. Incineration, refuse-derived fuel, and pyrolysis ranked lower due to economic and environmental concerns. These findings emphasize the importance of an integrated approach that combines multiple methods to enhance sustainability, reduce landfill dependency, and optimize waste-to-energy processes.

4. Conclusion

This study systematically evaluated and prioritized six urban waste management methods—pyrolysis, recycling, composting, anaerobic digestion, incineration, and refuse-derived fuel—using the Analytic Hierarchy Process (AHP) framework. The findings demonstrate that recycling and anaerobic digestion are the most favorable options due to their lower financial burdens, reduced environmental footprint, and higher societal acceptance. Conversely, methods such as incineration and pyrolysis were found to be less desirable due to their high capital requirements, dependency on specialized labor, and significant pollution levels. Based on these insights, this study advocates for increased investments in recycling infrastructure and the promotion of waste segregation at the source, which are crucial for fostering sustainable and efficient urban waste management practices.

پیشرفت شهری
سیاستگذاری
سایت نشریه: https://judpmi.ir
شاپا الکترونیکی: ۶۵۶۴-۳۰۹۲

تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب روش بهینهٔ مدیریت پسماند شهری با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی

اسما فیاضی[۱] | رضا فلاح[۲] | سارا محمودیان یونسی[۳] | مجید زندی[۴*]

۱. دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران. رایانامه: Asmafayaazi@gmail.com
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی تبدیل انرژی، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران. رایانامه: Rez.fallah@mail.sbu.ac.ir
۳. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکدهٔ انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران. رایانامه: s_mahmoodian@sbu.ac.ir
۴. نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکدهٔ انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران. رایانامه: m_zandi@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰

کلیدواژه:
مدیریت پسماند شهری،
تحلیل سلسله‌مراتبی،
تصمیم‌گیری چندمعیاره،
بازیافت،
هضم بی‌هوازی.

چکیده

امروزه، مدیریت پسماند شهری به دلیل افزایش روزافزون تولید پسماند و محدودیت منابع طبیعی به یکی از چالش‌های اساسی شهرهای مدرن تبدیل شده است. انتخاب نوعی روش بهینه برای مدیریت پسماند نیازمند در نظر گرفتن معیارهای زیست‌محیطی، اقتصادی، فنی و اجتماعی است تا علاوه بر کاهش اثرهای منفی بر محیط زیست، از منابع موجود به بهترین شکل استفاده شود. در این پژوهش، با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، روش‌های مختلف مدیریت پسماند شامل پیرولیز، بازیافت، کمپوست‌سازی، هضم بی‌هوازی، سوزاندن و تبدیل به سوخت مشتق‌شده مورد ارزیابی و اولویت‌بندی قرار گرفته‌اند. معیارهای ارزیابی شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، آلاینده‌های زیست‌محیطی، دسترسی به منابع، نیاز به نیروی متخصص، پذیرش اجتماعی، مصرف انرژی و کارایی فرایند هستند. برای تعیین وزن معیارها و گزینه‌ها، از نظرهای خبرگان استفاده شده است. معیارهایی که مقدار کمتر آن‌ها نشان‌دهندهٔ مطلوبیت بالاتر بود، در نرم‌افزار به صورت معکوس در نظر گرفته شدند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد روش‌های پایدار و کم‌هزینه مانند بازیافت با امتیاز ۰/۰۹۸۲ و هضم بی‌هوازی با امتیاز ۰/۰۸۷۹ به دلیل تولید محصول‌های ارزشمند، کاهش آلودگی و بهره‌وری اقتصادی، نسبت به روش‌های پرهزینه و آلاینده مانند سوزاندن و پیرولیز به منظور مدیریت پسماند شهری مناسب‌تر هستند. علاوه بر این، یافته‌ها نشان می‌دهند ترکیب روش‌های مختلف و استفاده از رویکردهای یکپارچه می‌تواند اثربخشی سامانهٔ مدیریت پسماند را بهبود بخشد و در دستیابی به اهداف پایداری مؤثر باشد.

استناد: فیاضی، اسما؛ فلاح، رضا؛ محمودیان یونسی، سارا و زندی، مجید (۱۴۰۴). تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب روش بهینهٔ مدیریت پسماند شهری با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۲ (۲) ۱۷۳-۱۸۸.

DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.513772.1026

© اسما فیاضی، رضا فلاح، سارا محمودیان یونسی، مجید زندی
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.513772.1026

۱. مقدمه

امروزه، تولید پسماند در سراسر جهان به دلیل توسعهٔ سریع اقتصادی و شهرنشینی به‌سرعت افزایش یافته است. طبق گزارش بانک جهانی، تا سال ۲۰۵۰ میلادی، تولید پسماند شهری تا ۷۰ درصد افزایش خواهد یافت [۱]. رشد جمعیت، تغییر سبک زندگی، و مصرف‌گرایی فزاینده، حجم پسماندهای شهری را به طور چشم‌گیری بالا برده و مدیریت کارآمد پسماند شهری را به یکی از چالش‌های اساسی جوامع مدرن تبدیل کرده است. عدم مدیریت صحیح پسماندها می‌تواند به آلودگی محیط زیست، تهدید سلامت عمومی، اتلاف منابع طبیعی و آثار منفی بر تغییر اقلیم منجر شود. از این‌رو، انتخاب روش مناسب برای مدیریت پسماند شهری اهمیت ویژه‌ای دارد. تصمیم‌گیری در مورد انتخاب روش مناسب برای مدیریت پسماند شهری نوعی چالش اساسی در برنامه‌ریزی شهری و توسعهٔ پایدار است. با توجه به اینکه روش‌های مختلفی مانند تبدیل پسماند به انرژی، بازیافت، سوزاندن، دفن بهداشتی، کمپوست‌سازی و سایر روش‌ها برای این منظور وجود دارد، انتخاب بهترین گزینه نیازمند یک تحلیل علمی است که بتواند ابعاد مختلف این روش‌ها را به طور هم‌زمان ارزیابی کند. هر روش ویژگی‌های خاصی از نظر میزان آلایندگی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، پیچیدگی فنی، پذیرش اجتماعی و آثار زیست‌محیطی دارد. بنابراین، برای دستیابی به یک تصمیم بهینه، باید معیارهای متعددی در نظر گرفته شوند و گزینه‌های مختلف براساس این معیارها مقایسه شوند.

مطالعه‌های این حوزه نشان داده‌اند بسته به ویژگی‌های پسماند و شرایط محلی، انتخاب فناوری‌ها متفاوت است. به عنوان نمونه، در داکا، بنگلادش، گازسازی پلاسما به دلیل پردازش پسماندهای تفکیک‌نشده و تولید گاز سنتزی باکیفیت، بهینه‌ترین گزینه شناخته شده است [۲]. در حالی که در احمدآباد، هند، به دلیل رطوبت بالای پسماندهای شهری، احتراق کنترل‌شده مناسب‌ترین راه‌کار ارزیابی شده است [۳]. در کشورهای اروپایی نیز ترکیبی از هضم بی‌هوازی و سوخت مشتق‌شده از پسماند برای افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش آلودگی مورد استفاده قرار گرفته است [۴].

در سال‌های اخیر، روش تحلیل سلسله‌مراتبی به عنوان یکی از ابزارهای پرکاربرد در ارزیابی و اولویت‌بندی گزینه‌های مدیریت پسماند در پژوهش‌های داخلی و خارجی مورد استفاده قرار گرفته است. کرباتووا و ابو قدیس در [۵] به بررسی گزینه‌های مختلف تولید انرژی از پسماند در مسکو به عنوان یک کلان‌شهر پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی[1] چهار فناوری تولید انرژی از پسماند که شامل تولید گاز دفن[2]، هضم بی‌هوازی[3]، سوزاندن[4] و سوخت مشتق‌شده از پسماند[5] را ارزیابی کردند. بررسی‌ها نشان داد تولید گاز دفن بهترین گزینه برای منطقهٔ مسکو است، در حالی که هضم بی‌هوازی و سوزاندن به‌ترتیب در اولویت دوم و سوم قرار گرفتند. تحلیل حساسیت نشان داد معیارهای زیست‌محیطی و فنی بیشترین تأثیر را در انتخاب فناوری دارند.

مجتبی و همکاران از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[6] شامل منطق فازی[7]، تحلیل سلسله‌مراتبی، تاپسیس[8] و روش سازمان رتبه‌بندی ترجیحی[9] برای ارزیابی سناریوهای مدیریت پسماند شهری در لاهور پاکستان استفاده کردند [۶]. آن‌ها ده سناریو را براساس هفت معیار و هشت روش، ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که ترکیب هضم بی‌هوازی، گازی‌سازی و دفن پسماند بهینه‌ترین راه‌کار برای پایداری زیست‌محیطی و مدیریت پسماند شهری است. قاضی و همکاران نیز از تحلیل سلسله‌مراتبی برای اولویت‌بندی فناوری‌های تبدیل پسماند به انرژی در عمان استفاده کردند و هضم بی‌هوازی را به عنوان مناسب‌ترین فناوری‌ها برای این منطقه معرفی کردند [۷]. تخمیر[10] و سوزاندن نیز پس از هضم‌بی‌هوازی انتخاب شدند. معیارهای اصلی این مطالعه شامل معیارهای زیست‌محیطی و اقتصادی بودند.

1. Analytic hierarchy process (AHP)
2. Landfill biogas
3. Anaerobic digestion
4. Incineration
5. Refuse derived fuel (RDF)
6. Multiple Criteria Decision Making (MCDM)
7. Fuzzy logic
8. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)
9. Preference ranking organization method for enrichment evaluation (PROMETHEE)
10. Fermentation

خشنود و همکاران از روش تحلیل سلسله‌مراتبی برای ارزیابی مدیریت پسماندهای ساختمانی در تهران استفاده کردند [۸]. آن‌ها چهار روش دفن، بازیافت، استفادهٔ مجدد و کاهش در مبدأ را با توجه به شانزده معیار مختلف که در چهار دسته زیست‌محیطی، اجتماعی، فنی و اقتصادی قرار داشتند، بررسی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد کاهش پسماند در مبدأ دارای اولویت بالاتری است، در حالی که دفن پسماند کمترین اولویت را دارد. روپانی و همکاران با بررسی وضعیت فعلی مدیریت پسماند شهری تهران، تفکیک نامناسب، وجود فلزهای سنگین و پسماندهای خطرناک را به عنوان چالش‌های مدیریت پسماند شهر تهران شناسایی کردند [۹]. این چالش‌ها، موجب کاهش کیفیت کمپوست تولیدی نیز می‌شود. بررسی تحول‌های مدیریت پسماند در آسیا طی پنج دههٔ اخیر نشان می‌دهد کمپوست‌سازی در آسیا محبوبیت کمتری دارد، در حالی که تبدیل پسماند به انرژی در برخی کشورها مانند چین، تایلند و مالزی به‌تدریج در حال افزایش است. سایر چالش‌های مدیریت پسماند شامل عدم تفکیک در مبدأ، ضعف در قانون‌ها و کمبود مشارکت عمومی است [۱۰].

آزاهاری و همکاران در پژوهشی در ایالت کلانتان مالزی، سه گزینهٔ کمپوست‌سازی، بازیافت و ترکیب این دو را با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی ارزیابی کردند و نشان دادند گزینهٔ ترکیبی با وزن نهایی ۴۹ درصد مناسب‌ترین گزینه برای نهادهای آموزشی این منطقه انتخاب شد [۱۱]. این پژوهش نشان داد حتی در محیط‌های دارای محدودیت نیز می‌توان با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، تصمیم‌گیری دقیق و مبتنی بر شواهد را در حوزهٔ مدیریت پسماند اجرایی کرد. در پژوهش دمیرجان و یتیلمزسوی از رویکرد ترکیبی روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و تاپسیس فازی برای ارزیابی چهار راهبرد هوشمند مدیریت پسماند استفاده شد [۱۲]. این پژوهش با بهره‌گیری از نظرهای متخصصان پانزده معیار را مورد بررسی قرار داد و نشان داد معیارهایی مانند کاهش آلاینده‌های هوا، امکان‌پذیری عملیاتی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه بیشترین وزن را در انتخاب گزینه‌ها دارند. در پژوهش دیگری به بررسی کاربرد روش تحلیل سلسله‌مراتبی در ارزیابی روش‌های جمع‌آوری و حمل‌ونقل پسماندهای جامد در شهر ویساکاپاتنام هند پرداخته شده است [۱۳]. این پژوهش با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی دوازده معیار را برای مقایسهٔ چهار روش مختلف جمع‌آوری و حمل‌ونقل پسماند مورد بررسی قرار داده است. نتایج این پژوهش نشان داد روش جمع‌آوری با کامیون‌های فشرده با امتیاز ۳۳/۸۹ درصد به عنوان بهترین گزینه انتخاب شد. پژوهش دیگری در نپال، نشان داد بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله‌مراتبی برای اولویت‌بندی ریسک‌ها و روش‌های اجرایی در پروژه‌های مشارکت عمومی ـ خصوصی می‌تواند به طور معناداری به تصمیم‌سازی بهتر منجر شود [14].

در پژوهش دیگری، به بررسی استراتژی‌های بهینه تبدیل پسماند به انرژی در ایران با استفاده از تحلیل سوات، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و نظریهٔ بازی‌ها پرداخته شده است [۱۵]. این پژوهش با ارزیابی قوت‌ها، ضعف‌ها، فرصت‌ها و تهدیدها، به شناسایی مؤثرترین استراتژی‌ها در زمینهٔ پسماند به انرژی کمک کرده و با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و نظریهٔ بازی‌ها، ترکیب بهینه‌ای از استراتژی‌ها را تعیین کرده است. این مطالعه نشان می‌دهد ترکیب راهبردهای مختلف مانند دفن بهداشتی با جمع‌آوری گاز، توسعهٔ نیروگاه‌های پسماندسوز و بازیافت منابع از طریق سوخت مشتق‌شده از پسماند می‌تواند به پایداری زیست‌محیطی و بهبود سامانه‌های مدیریت پسماند کمک کند.

مطالعه‌های موجود نشان دادند پویایی تصمیم‌گیری در مدیریت پسماند شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این زمینه، بهینه‌سازی چرخهٔ عمر به عنوان رویکردی مؤثر برای دستیابی به مدیریت پایدار پسماند مطرح شده است. در پژوهشی، روش بهینه‌سازی چرخهٔ عمر با ترکیب ارزیابی چرخهٔ عمر و بهینه‌سازی چندهدفه به منظور شناسایی پیکربندی‌های بهینهٔ سامانه‌های مدیریت پسماند به کار گرفته شده است [۱۶]. این مطالعه با در نظر گرفتن هدف‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی، به شناسایی راه‌کارهای بهینه پرداخته و نشان داده است بیشتر پژوهش‌ها بر بهینه‌سازی هم‌زمان اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی متمرکز هستند، در حالی که اثرهای اجتماعی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. همچنین، اهمیت استفاده از مدل‌های پویا و در نظر گرفتن عدم قطعیت در بهینه‌سازی چرخهٔ عمر به‌عنوان عاملی کلیدی در تصمیم‌گیری مؤثر بیان شده است.

از سوی دیگر، در حوزهٔ مدیریت پسماند، مدل‌های تحلیل جریان مواد مانند تحلیل جریان مواد[1] و تحلیل جریان مواد خاص[2]

1. Material flow analysis (MFA)
2. substance flow analysis (SFA)

به عنوان ابزارهای علمی برای بررسی ورودی و خروجی مواد در سامانه‌های مشخص به کار می‌روند. این مدل‌ها امکان شناسایی مراحل کلیدی در چرخهٔ مواد و انرژی را فراهم کرده و به سیاست‌گذاران در اتخاذ تصمیم‌های پایدار کمک می‌کنند. در روش تحلیل جریان مواد، ابتدا داده‌های مربوط به نوع و مقدار مواد ورودی، استفاده شده و خروجی از سامانه جمع‌آوری می‌شود. سپس، جریان‌های مواد کمی‌سازی شده و ذخایر مواد در سامانه تحلیل می‌شود تا مشکل‌ها و نقطه‌های گلوگاهی شناسایی شوند. در نهایت، نتیجه‌ها به کمک نمودارهای گرافیکی مانند نمودار سانکی نمایش داده می‌شوند. در روش تحلیل جریان مواد خاص، تمرکز بر پایش و ردیابی حرکت و ذخایر مواد شیمیایی خاص در سامانه‌های مختلف مانند صنایع، منطقه‌های شهری و چرخه‌های زیست‌محیطی است. این روش به شناسایی منابع، مسیرها و محل‌های دفع نهایی مواد خطرناک کمک می‌کند. مطالعه‌های مختلف نشان داده‌اند ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری مانند تحلیل سلسله‌مراتبی با مدل‌های تحلیل جریان مواد و تحلیل جریان مواد خاص می‌تواند به بهینه‌سازی سامانه‌های زیست‌محیطی کمک کند. در این راستا، پژوهش‌های مختلفی انجام شده است، از جمله مطالعه‌ای که به بررسی تبدیل پسماندهای غیرقابل بازیافت به سوخت‌های جایگزین از طریق فرایندهای پیرولیز و گازی‌سازی پرداخته است. این مطالعه نشان داده است این روش‌ها می‌توانند ضمن کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، ارزش اقتصادی پسماندها را افزایش دهند [۱۷ و ۱۸]. همچنین، پژوهش‌هایی در زمینهٔ مدل‌سازی و تحلیل تصمیم‌گیری برای مدیریت بهینهٔ پسماند انجام شده که به سیاست‌گذاران در طراحی سامانه‌های بازیافت کارآمدتر کمک کرده است [۱۸].

ولاچوکستاس و همکاران به بررسی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در استراتژی‌های مدیریت تبدیل پسماند به انرژی پرداخته‌اند [۱۹]. در این مطالعهٔ مروری، ۱۵۳ مقالهٔ منتشرشده تجزیه‌وتحلیل شده و نشان داده شده که روش تحلیل سلسله‌مراتبی پرکاربردترین روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بوده که در ۶۲ مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، در پژوهش دیگری، تحلیل علم‌سنجی[1] از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در مدیریت پسماند با استفاده از پایگاه اسکوپوس[2] انجام داده است [۲۰]. در این مطالعه ۲۱۶ مقالهٔ منتشرشده بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ میلادی بررسی شده است. در این مطالعه نیز نشان داده شده که روش تحلیل سلسله‌مراتبی پرکاربردترین تکنیک در تصمیم‌گیری چندمعیاره بوده و در ۴۷ درصد از مطالعه‌ها استفاده شده است. بیشترین پژوهش‌ها در این حوزه را هند، ایران، چین و ترکیه داشته‌اند.

رویکردهای علمی و سیاست‌گذاری در حوزهٔ مدیریت پسماند شهری همیشه هم‌راستا نبوده‌اند. در این زمینه، مطالعه‌ای به مقایسهٔ اولویت‌های علمی و سیاست‌گذاری در مدیریت پسماند شهری پرداخته و نشان داده که تمرکز علمی، بیشتر روی جنبه‌های فنی و زیست‌محیطی است، در حالی که سیاست‌گذاران بیشتر به ملاحظه‌های اقتصادی و اجتماعی توجه دارند. این عدم تطابق میان اولویت‌ها می‌تواند به چالش‌هایی در اجرای سیاست‌های مدیریت پسماند منجر شود [۲۱].

طبق بررسی‌های انجام‌شده، یکی از روش‌های مناسب برای تصمیم‌گیری در بررسی‌های موجود، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی است. این روش امکان مقایسهٔ زوجی گزینه‌ها، تعیین وزن نسبی معیارها، و رتبه‌بندی نهایی روش‌های مدیریت پسماند را فراهم می‌کند. همچنین، این روش با ایجاد یک ساختار سلسله‌مراتبی از مسئلهٔ مورد بررسی، امکان مشارکت کارشناسان و تصمیم‌گیران را در ارزیابی گزینه‌ها افزایش می‌دهد و دقت انتخاب را بهبود می‌بخشد.

با وجود انجام پژوهش‌های متعدد در زمینهٔ انتخاب فناوری‌های مدیریت پسماند با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، اغلب پژوهش‌ها تنها بر تعداد محدودی از گزینه‌ها یا معیارها متمرکز بوده و کمتر به بررسی جامع گزینه‌های رایج در شرایط ایران پرداخته‌اند. همچنین، در بسیاری از مطالعات داخلی، تطابق معیارهای ارزیابی با شرایط بومی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر با تمرکز بر چندین فناوری متداول و در نظر گرفتن معیارهای متنوع فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، سعی دارد این خلأ را پوشش داده و الگویی قابل انطباق با شرایط شهری کشور ارائه دهد.

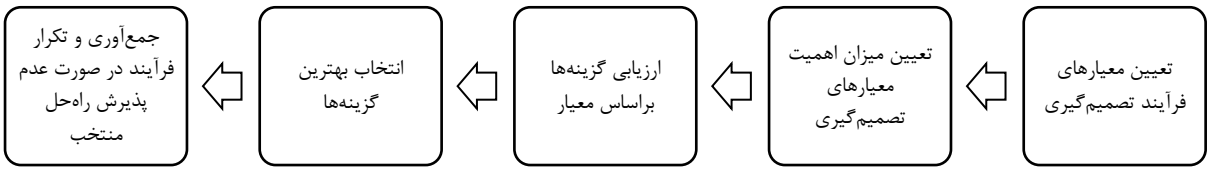
در این پژوهش، ابتدا معیارهای ارزیابی روش‌های مدیریت پسماند شهری معرفی شده و روش تحلیل سلسله‌مراتبی برای تعیین اهمیت نسبی این معیارها توضیح داده می‌شود. سپس، طیف گسترده‌تری از روش‌های مدیریت پسماند شهری که برای کاربردهای شهری مناسب هستند، شناسایی و براساس این معیارها مقایسه می‌شوند. پس از آن، روش‌های بهینه اولویت‌بندی خواهد شد. هدف

1. Bibliometric
2. Scopus

اصلی این مقاله، ارائهٔ یک چارچوب علمی و عملی برای انتخاب روش بهینهٔ مدیریت پسماند شهری است تا با در نظر گرفتن معیارهای مختلف، تصمیمی منطقی و کارآمد اتخاذ شود. به این‌ترتیب، این مطالعه می‌تواند به سیاست‌گذاران، مدیران شهری و پژوهشگران کمک کند تا روش‌های مناسبی را برای به‌کارگیری در سامانه‌های مدیریت پسماند شهری انتخاب کنند.

۲. روش‌شناسی

انتخاب بهترین روش برای مدیریت پسماند شهری یک چالش اساسی است. در حال حاضر، برای انتخاب بهترین روش مدیریت پسماند شهری روش‌های متفاوتی وجود دارد. در انتخاب بهترین روش، ذی‌نفعان متعددی حضور دارند که معیارها و منافع متفاوتی دارند. به همین‌دلیل، شناسایی گزینه‌ای که تمام این ملاحظه‌ها را برآورده کند، می‌تواند امری پیچیده باشد. اجرای موفقیت‌آمیز این تصمیم به بررسی‌های مقدماتی برای آشنایی با جنبه‌ها و چالش‌های استراتژیک مختلف قبل از تدوین و اجرای سیاست‌ها نیاز دارد؛ بنابراین، ابتدا با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره به بررسی عوامل مرتبط با اجرای روش‌های مدیریت پسماند پرداخته شده است.



شکل ۱. گام‌های روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره [۲۲]

تصمیم‌گیری چندمعیاره طیف گسترده‌ای از روش‌ها را شامل می‌شود که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا در شرایطی که معیارهای متعددی وجود دارد، دیدگاه‌های مختلف ذی‌نفعان و تصمیم‌گیرندگان را که دارای اولویت‌ها و اهداف متفاوتی هستند، با یکدیگر ادغام کند تا به یک راه‌حل بهینه و توافقی دست یابند. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره اغلب شامل مراحلی هستند که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

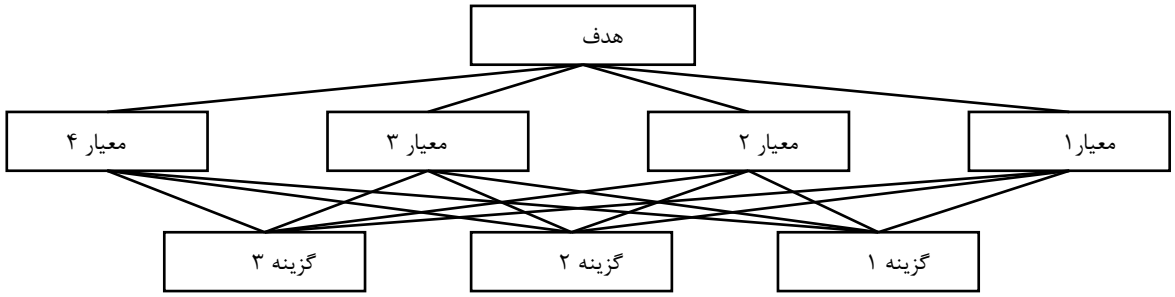
برای انجام فرایند تصمیم‌گیری در این پژوهش، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است. ابتدا، فناوری‌های مرتبط با مدیریت پسماند شناسایی شده و با توجه به پیشرفت‌های جهانی و ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن‌ها، چند فناوری به عنوان فناوری منتخب در نظر گرفته شده است. سپس، اولین گام این تحلیل یعنی تعیین هدف، با عنوان انتخاب بهترین فناوری مشخص می‌شود. در مرحلهٔ بعد لازم است معیارهای مؤثر بر این هدف شناسایی و انتخاب شوند.

۲-۱. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در تصمیم‌گیری

روش تحلیل سلسله‌مراتبی نخستین بار توسط توماس ساعتی[1] در دههٔ ۱۹۷۰ میلادی معرفی شد. این روش، از پرکاربردترین روش‌ها در تصمیم‌گیری چندمعیاره است. این روش زمانی استفاده می‌شود که تصمیم‌گیری نیازمند مقایسهٔ چندین گزینه براساس معیارهای مختلف باشد. روش تحلیل سلسله‌مراتبی مسئله تصمیم‌گیری را به یک ساختار سلسله‌مراتبی تبدیل می‌کند که شامل سه سطح اصلی به شرح زیر است:

۱. هدف[2]: انتخاب بهترین فناوری‌ها برای مدیریت پسماند
۲. معیارها[3]: شاخص‌هایی که برای ارزیابی فناوری‌ها استفاده می‌شوند (۷ معیار شناسایی‌شده)
۳. گزینه‌ها[4]: فناوری‌های موجود برای مدیریت پسماند (۶ فناوری)

1. Thomas L. Saaty
2. Goal
3. Criteria
4. Alternative



شکل ۲. یک نمونهٔ ساختار سلسله‌مراتبی

طبق شکل ۲ در روش تحلیل سلسله‌مراتبی، ابتدا یک هدف تعیین می‌شود. سپس، برای انتخاب گزینه‌ها، چند معیار در نظر گرفته می‌شود. این معیارها به کمک داده‌های ورودی به مقادیر عددی تبدیل می‌شود. مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، درنهایت با توجه به مقادیر عددی مشخص‌شده برای معیارها، گزینه‌ها را اولویت‌بندی می‌کند.

در مرحلهٔ اول، ساختار سلسله‌مراتبی مسئله شکل می‌گیرد که شامل هدف، معیارها و گزینه‌های موجود است. در این مطالعه، ۷ معیار و ۶ فناوری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مرحلهٔ دوم، معیارها از طریق مقایسهٔ زوجی ارزیابی می‌شوند. این مقایسه‌ها براساس نظرهای متخصصان و خبرگان این حوزه انجام شده است که در جلسه‌های خبرگی شرکت کرده‌اند. در این جلسه‌ها، خبرگان با مقایسهٔ معیارها نسبت به یکدیگر، میزان اهمیت هر معیار را تعیین کرده‌اند. این مقایسه‌ها اغلب براساس مقیاس ۹ امتیازی ساعتی انجام می‌شود. در روش تحلیل سلسله‌مراتبی، مقیاس ساعتی[1] به مقیاس ترجیحی ۱ تا ۹ اشاره دارد که توسط توماس ساعتی برای مقایسهٔ زوجی معیارها و گزینه‌ها پیشنهاد شده است. این مقیاس برای بیان شدت ترجیح یک معیار یا گزینه نسبت به دیگری در فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده می‌شود؛ که به صورت جدول ۱ تعریف می‌شود.

جدول ۱. مقیاس ساعتی در روش تحلیل سلسله‌مراتبی

عدد	سطح ترجیح (اهمیت)	توضیح
۱	برابر[2]	دو گزینه یا معیار اهمیت یکسان دارند.
۳	کمی مهم‌تر[3]	یکی از گزینه‌ها نسبت به دیگری کمی مهم‌تر است.
۵	مهم‌تر[4]	یکی از گزینه‌ها اهمیت قابل توجهی نسبت به دیگری دارد.
۷	بسیار مهم‌تر[5]	یک گزینه نسبت به دیگری بسیار برتر است.
۹	به طورکامل برتر[6]	یک گزینه به طورکامل برتر و غالب بر گزینهٔ دیگر است.
۲،۴،۶،۸	مقدارهای میانی[7]	برای مواقعی که تصمیم‌گیرنده بین دو سطح قرار دارد.

طیف لیکرت[8] یکی دیگر از ابزارهای روان‌سنجی شناخته‌شده برای اندازه‌گیری نگرش‌ها، نظرها یا درک‌های افراد است. این ابزار شامل مجموعه‌ای از بیانیه‌ها است که هر یک از پاسخ‌دهندگان می‌توانند از بین گزینه‌ها، پاسخ مناسب را انتخاب کنند. این گزینه‌ها اغلب در قالب یک مقیاس ۵درجه‌ای از «به طورکامل مخالفم» تا «به طورکامل موافقم» قرار دارند. این مقیاس برای تبدیل پاسخ‌های کیفی به داده‌های کمی بسیار مناسب است و به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که نگرش‌ها و نظرهای افراد را به طور دقیق‌تر و قابل تجزیه‌وتحلیل اندازه‌گیری و به مقادیر کمی تبدیل کنند. این ابزار به دلیل سادگی و قابلیت استفادهٔ گسترده در پژوهش‌های مختلف، به‌ویژه در روان‌شناسی، علوم اجتماعی، بازاریابی و سایر حوزه‌های پژوهشی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از ویژگی‌های برجستهٔ طیف لیکرت این است که می‌تواند مجموعه‌ای از پرسش‌های مرتبط را در یک مقیاس ترکیبی جمع‌آوری کند. از این‌رو این طیف، برای اندازه‌گیری مفاهیم وسیع‌تر و پیچیده‌تر مناسب است [۲۳].

1. Saaty Scale
2. Equal
3. Moderate
4. Strong
5. Very Strong
6. Extremely Strong
7. Intermediate
8. Likert Scale

پس از جمع‌آوری نظرهای متخصصان، یک ماتریس مقایسه‌های زوجی تشکیل می‌شود. اگر n معیار برای تصمیم‌گیری وجود داشته باشد، ماتریس مقایسه‌های زوجی به صورت رابطهٔ ۱ خواهد بود.

$$A=\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \frac{1}{a_{13}} & \frac{1}{a_{23}} & 1 & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \frac{1}{a_{3n}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (۱)$$

در این ماتریس مقدار a_{ij} اهمیت معیار i نسبت به معیار j، $\frac{1}{a_{ij}}$ برای حفظ تقارن ماتریس و مقدارهای روی قطر اصلی برابر با ۱ هستند، زیرا هر معیار با خودش مقایسه شده است.

برای محاسبهٔ وزن نسبی معیارها، ابتدا عناصر هر ستون بر مجموع مقدارها آن در جهت نرمال‌سازی ماتریس مقایسه‌های زوجی ستون تقسیم می‌شوند (رابطهٔ ۲).

$$A_{norm.i,j}=\begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum_{i=1}^{n}a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum_{i=1}^{n}a_{i2}} & \frac{a_{13}}{\sum_{i=1}^{n}a_{i3}} & \cdots & \frac{a_{1n}}{\sum_{i=1}^{n}a_{in}} \\ \frac{a_{21}}{\sum_{i=1}^{n}a_{i1}} & \frac{a_{22}}{\sum_{i=1}^{n}a_{i2}} & \frac{a_{23}}{\sum_{i=1}^{n}a_{i3}} & \cdots & \frac{a_{2n}}{\sum_{i=1}^{n}a_{in}} \\ \frac{a_{31}}{\sum_{i=1}^{n}a_{i1}} & \frac{a_{32}}{\sum_{i=1}^{n}a_{i2}} & \frac{a_{33}}{\sum_{i=1}^{n}a_{i3}} & \ddots & \frac{a_{3n}}{\sum_{i=1}^{n}a_{in}} \\ \frac{a_{n1}}{\sum_{i=1}^{n}a_{i1}} & \frac{a_{n2}}{\sum_{i=1}^{n}a_{i2}} & \frac{a_{n3}}{\sum_{i=1}^{n}a_{i3}} & \cdots & \frac{a_{nn}}{\sum_{i=1}^{n}a_{in}} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

وزن هر معیار (ω_i) از میانگین سطری ماتریس نرمال‌سازی‌شده به دست می‌آید (رابطهٔ ۳).

$$\omega_i=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}A_{norm.i,j} \quad (۳)$$

بردار وزن معیارها به صورت رابطهٔ ۴ خواهد بود.

$$W=\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_n \end{bmatrix} \quad (۴)$$

یکی از ویژگی‌های مهم روش تحلیل سلسله‌مراتبی، بررسی سازگاری قضاوت‌های خبرگان است. اگر ناسازگاری مقایسه‌ها زیاد باشد (نرخ ناسازگاری[1] بیش‌تر از ۰/۱ باشد)، باید مقایسه‌ها مورد بازبینی قرار گیرند. برای این‌منظور، ابتدا مقدار ویژهٔ بیشینه (λ_{max}) از رابطهٔ ۵ محاسبه می‌شود.

$$\lambda_{max}=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{(AW)_i}{W_i} \quad (۵)$$

که در آن A ماتریس مقایسه‌های زوجی اولیه، W بردار وزن معیارها AW حاصل‌ضرب ماتریس A در بردار وزن‌ها است. سپس، نسبت سازگاری[2] از رابطهٔ ۶ محاسبه می‌شود که در آن شاخص یا نرخ ناسازگاری به صورت رابطهٔ ۷ است.

$$CR=\frac{CI}{RI} \quad (۶)$$

1. Consistency Index (CI)
2. Consistency Ratio (CR)

RI مقدار تصادفی است که بسته به تعداد معیارها مقدار مشخصی دارد. این مقدارها در جدول ۲ ارائه شده است.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (۷)$$

جدول ۲. مقدارهای RI براساس تعداد معیار

n	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰
RI	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹۰	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۹

اگر $CR < 0/1$ باشد، ماتریس مقایسه‌های زوجی سازگار است، در غیر این‌صورت، باید مجدد مقایسه‌های زوجی اصلاح شوند.

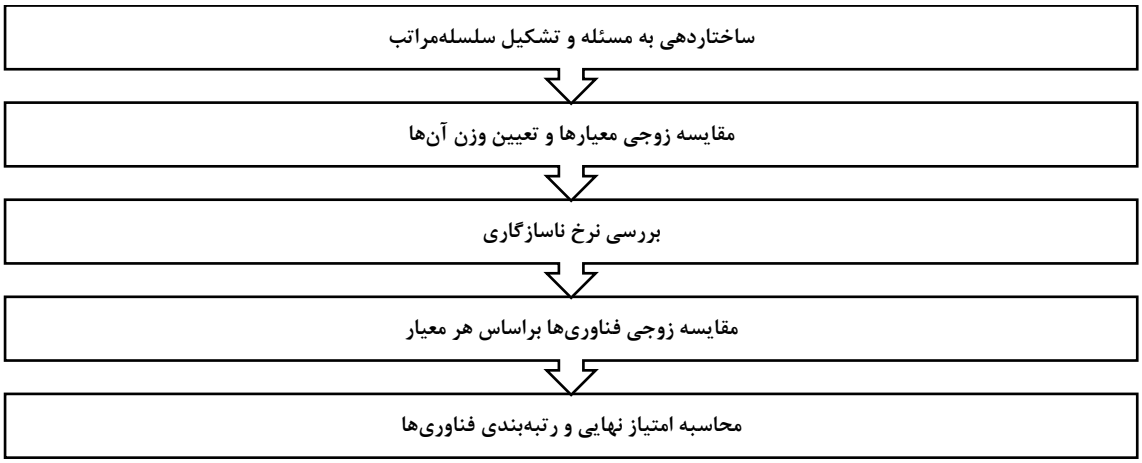
پس از تعیین وزن معیارها، فناوری‌های مورد بررسی نیز از طریق مقایسه زوجی و براساس هر معیار امتیازدهی می‌شوند. به‌عنوان‌مثال، اگر دو فناوری «الف» و «ب» از نظر معیار «سرمایه‌گذاری اولیه» مقایسه شوند، بسته به نظرهای متخصصان، یکی از آن‌ها ممکن است امتیاز بالاتری بگیرد. این روند برای تمامی فناوری‌ها و تمامی معیارها تکرار می‌شود و یک ماتریس نهایی از وزن‌دهی فناوری‌ها به دست می‌آید. پس از محاسبهٔ وزن معیارها، فناوری‌های مختلف نیز با استفاده از همین فرایند مقایسهٔ زوجی شده و یک ماتریس مقایسه‌های زوجی برای آن‌ها تشکیل می‌شود. سپس، با استفاده از مرحله‌های قبل، وزن نسبی گزینه‌ها برای هر معیار محاسبه می‌شود.

درنهایت، امتیاز نهایی هر گزینه از طریق ترکیب وزن معیارها (W) و وزن گزینه‌ها نسبت به هر معیار (V) مطابق (۸) به دست می‌آید.

$$S = V \times W \quad (۸)$$

که در آن S بردار امتیازهای نهایی گزینه‌ها، V ماتریس وزن‌های گزینه‌ها نسبت به هر معیار و W بردار وزن معیارها است. در نهایت گزینه‌ای که بالاترین مقدار S را داشته باشد، به عنوان فناوری برتر انتخاب خواهد شد. در مرحلهٔ آخر، وزن هر فناوری براساس معیارها محاسبه می‌شود و امتیاز نهایی هر فناوری به دست می‌آید. فناوری که بالاترین امتیاز را کسب کند، به عنوان گزینهٔ برتر انتخاب خواهد شد.

در شکل ۳ یک نمایش تصویری از تمامی مراحل یادشده نشان داده شده است.



شکل ۳. شکل مفهومی مراحل انجام روش تحلیل سلسله‌مراتبی [۲۴]

در این پژوهش، تعیین وزن معیارها از طریق جلسه‌های خبرگی با متخصصان حوزهٔ مدیریت پسماند و انرژی‌های تجدیدپذیر انجام شد. در انتخاب متخصصان، با توجه به موضوع پژوهش که مرتبط با فناوری‌های مدیریت پسماند شهری است، تلاش شد تا تنوع تخصص در ترکیب افراد لحاظ شود. به همین‌منظور، نمونه‌گیری به صورت هدفمند انجام گرفت و متخصصان دعوت‌شده

شامل گروهی از اعضای هیئت‌علمی دانشگاه‌ها، پژوهشگران حوزهٔ انرژی و محیط زیست، و کارشناسان با تجربه از سازمان‌های مرتبط با مدیریت پسماند شهری و بازیافت بودند. به این‌ترتیب، ترکیبی از دیدگاه‌های علمی و اجرایی در فرایند تصمیم‌گیری وارد شد. ابتدا معیارهای ارزیابی فناوری‌ها به این افراد معرفی شد و سپس، از آن‌ها خواسته شد تا از طریق مقایسهٔ زوجی، میزان اهمیت هر معیار را مشخص کنند. داده‌ها از طریق پرسش‌نامه‌های مقایسهٔ زوجی و برگزاری جلسه‌های تخصصی جمع‌آوری شد. در نهایت، با استفاده از میانگین‌گیری هندسی، مقدار نهایی مقایسهٔ زوجی در صورتی که k خبره مقدار مقایسهٔ زوجی را به صورت a_i ارائه دهند، از (۹) محاسبه شد. در واقع مقدار نهایی، ریشهٔ مرتبهٔ k از حاصل‌ضرب تمام مقدارها پیشنهادی خبرگان است.

$$\left(\prod_{i=1}^{k} a_i\right)^{1/k} = \sqrt[k]{a_i\, a_i\, a_i \ldots a_i} \qquad (۹)$$

پس از دریافت نظرهای خبرگان، وزن نهایی معیارها محاسبه شد و نرخ ناسازگاری بررسی شد. در صورت بالا بودن نرخ ناسازگاری، جلسه‌های بازبینی برگزار شد تا اطمینان حاصل شود که وزن‌ها از اعتبار کافی برخوردار هستند.

در فرایند وزن‌دهی، برخی معیارها به گونه‌ای هستند که مقدار کمتر آن‌ها، مطلوب‌تر است. بنابراین، برای حفظ یکپارچگی در مقایسه، این شاخص‌ها معکوس شده‌اند. این معیارها شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، میزان آلایندگی، نیاز به نیروی متخصص و مصرف انرژی هستند. در این موارد، هر چه مقدار عددی معیار کمتر باشد، فناوری از نظر آن شاخص مطلوب‌تر خواهد بود. معکوس‌سازی این معیارها در نرم‌افزار انجام شده و مقدار آن‌ها به صورت خودکار تغییر یافته است. این اقدام باعث هماهنگی بین معیارها و بهبود دقت مقایسه شده است.

در این پژوهش، از نرم‌افزار سوپردسیژن[1] برای اجرای فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد. این نرم‌افزار امکان مدل‌سازی سلسله‌مراتبی، انجام مقایسه‌های زوجی، محاسبهٔ وزن‌های نهایی و بررسی نرخ ناسازگاری را فراهم کرده است. یکی از قابلیت‌های کلیدی این نرم‌افزار، امکان نمایش ساختار سلسله‌مراتبی و تجزیهٔ مسئله به سطوح مختلف شامل هدف، معیارها و گزینه‌ها است. همچنین، این نرم‌افزار نرخ ناسازگاری مقایسه‌ها را بررسی می‌کند و در صورتی که مقدار نرخ ناسازگاری بیشتر از ۰/۱ باشد، نرم‌افزار پیشنهادهایی برای بهبود سازگاری ارائه می‌دهد.

۲-۲. شناسایی و تعریف معیارها

در فرایند ارزیابی فناوری‌های مدیریت پسماند، معیارها در چهار دستهٔ اصلی فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به عنوان مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در انتخاب فناوری بهینه در نظر گرفته شده‌اند. این معیارها با در نظر گرفتن الزام‌های فنی، ملاحظه‌های اقتصادی و اجتماعی و پیامدهای زیست‌محیطی تعیین شده‌اند تا یک ارزیابی جامع از فناوری‌های مختلف ارائه شود.

از نظر فنی، عواملی مانند بلوغ فناوری، قابلیت اطمینان، راندمان تبدیل انرژی و تطبیق‌پذیری با انواع پسماندها اهمیت دارند [۲۵]. از جنبهٔ زیست‌محیطی، میزان آلایندگی هوا، تولید پساب، نیاز به زمین و تأثیر بر اکوسیستم نقش تعیین‌کننده‌ای دارند [۲۶]. هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه، هزینهٔ عملیات و نگهداری، سود اقتصادی و میزان بازیافت مواد با ارزش نیز معیارهای کلیدی اقتصادی محسوب می‌شوند [۳]، در حالی که پذیرش عمومی، قوانین و استانداردهای زیست‌محیطی و امکان اجرای پروژه در مقیاس محلی، معیارهای اجتماعی و قانونی را شامل می‌شوند [۲۷].

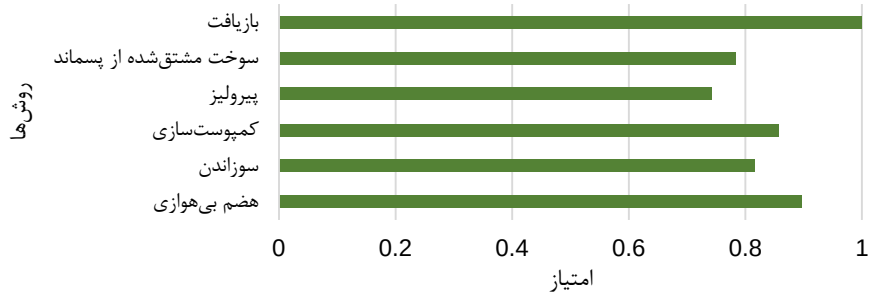
در این پژوهش، در حوزهٔ معیارهای فنی، مصرف انرژی، کارایی فرایند و نیاز به نیروی متخصص در نظر گرفته شده‌اند. در بحث معیار اقتصادی، دسترسی به منابع و هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه برای ارزیابی توجیه‌پذیری مالی، مورد بررسی قرار گرفته است. معیارهای زیست‌محیطی شامل آلایندگی زیست‌محیطی است. این معیار شامل میزان تولید شیرابه و انتشار گازهایی است که تأثیر فناوری بر کیفیت هوا، آب و خاک را ارزیابی می‌کند و نقش مهمی در پایداری و پذیرش اجتماعی این فناوری‌ها ایفا می‌کند. این معیارها با توجه به بررسی مطالعه‌های پیشین و مشورت با چندین کارشناس و متخصص حوزهٔ مدیریت پسماند، انرژی و محیط زیست انتخاب شده‌اند تا تمامی جنبه‌های کلیدی در تصمیم‌گیری پوشش داده شوند.

1. Super Decisions

۳. تحلیل نتایج

در این پژوهش، شش روش مدیریت پسماند شامل بازیافت، هضم بی‌هوازی، کمپوست، سوزاندن، سوخت مشتق‌شده از پسماند و پیرولیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای مقایسهٔ این گزینه‌ها، هفت معیار کلیدی شامل دسترسی به منابع، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، کارایی فرایند، مصرف انرژی، آلایندگی محیط زیست، نیاز به نیروی متخصص و پذیرش اجتماعی در نظر گرفته شده است. مقدار ناسازگاری مقایسه‌ها کمتر از حد استاندارد بوده که نشان‌دهندهٔ دقت و قابلیت اتکای نتایج حاصل از این فرایند است. نتایج حاصل از نرم‌افزار در شکل ۴ نشان داد روش بازیافت با امتیاز ۰/۰۹۸۲ بهترین گزینه برای مدیریت پسماند است. این روش به دلیل کاهش مصرف منابع، هزینه‌های پایین‌تر، پذیرش اجتماعی بالا و مزایای زیست‌محیطی برتر از سایر گزینه‌ها پیشی گرفته است. هضم بی‌هوازی با امتیاز ۰/۰۸۷۹ در رتبهٔ دوم قرار دارد که به دلیل تولید بیوگاز و کاهش حجم پسماندهای آلی، یک راه‌کار پایدار و کارآمد محسوب می‌شود. کمپوست با امتیاز ۰/۰۸۴۰ نیز در جایگاه سوم قرار گرفته و به دلیل تولید کود ارگانیک و کاهش آلودگی خاک، به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب برای مدیریت پسماندهای آلی معرفی شده است.

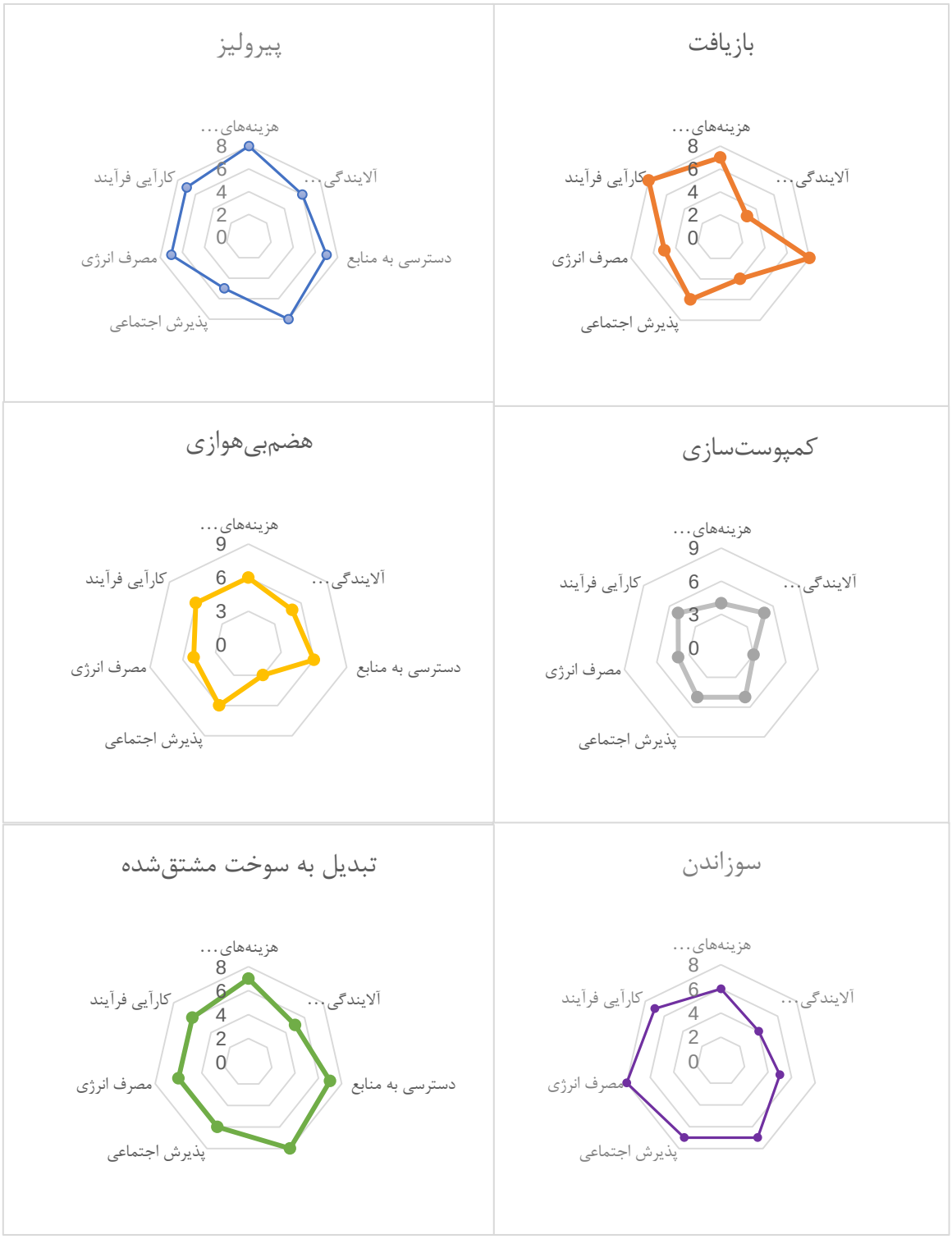
در رتبه‌های پایین‌تر، سوزاندن پسماند با امتیاز ۰/۰۸۰۱ به دلیل اثر منفی زیست‌محیطی و انتشار آلاینده‌ها، گزینه‌ای کمتر مطلوب شناخته شد. سوخت مشتق‌شده از پسماند و پیرولیز به‌ترتیب با امتیازهای ۰/۰۷۶۹ و ۰/۰۷۲۹ در رتبه‌های پنجم و ششم قرار گرفتند. این روش‌ها به دلیل نیاز به فناوری‌های پیشرفته، هزینه‌های اجرایی بالا و چالش‌های فنی متعدد در مقایسه با سایر گزینه‌ها جذابیت کمتری دارند. این یافته‌ها نشان می‌دهد روش‌های پایدار و کم‌هزینه مانند بازیافت و هضم بی‌هوازی، نسبت به روش‌های پرهزینه و آلاینده مانند سوزاندن و پیرولیز، برای مدیریت پسماند ارجحیت دارند. این اولویت‌بندی مربوط به شرایط حال حاضر است و ممکن است در آیندهٔ نزدیک با توسعهٔ فناوری‌ها و سیاست‌گذاری‌های جدید و در نتیجه، تغییر در مقدار شاخص‌ها، اولویت‌بندی‌ها تغییر کند. رتبه‌بندی فناوری‌های مدیریت پسماند در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ٤. اولویت‌بندی در تعیین فناوری منتخب مدیریت پسماند با استفاده از داده‌های نرم‌افزار

شکل ۵. رتبه‌بندی فناوری‌های مدیریت پسماند

همان‌طور که در نمودارهای شکل ۶ نشان داده شده است، فناوری بازیافت در معیارهای کارایی فرایند، میزان آلایندگی و مصرف انرژی که هر سه جزء معیارهای برتر در تحلیل سلسله‌مراتبی برای مدیریت پسماند محسوب می‌شدند، ارجحیت بالایی دارد و همین موضوع مطلوبیت اجرای این فناوری را نشان می‌دهد.



شکل ٦. نمودارهای ترجیح معیارها برای هر فناوری

۴. نتیجه‌گیری

مدیریت پسماند شهری یکی از موضوعات مهم در تحقق توسعهٔ پایدار به شمار می‌آید که مستلزم انتخاب بهینه‌ترین فناوری‌ها بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای زیست‌محیطی، اقتصادی، فنی و اجتماعی است. در این پژوهش، به منظور ارزیابی و اولویت‌بندی فناوری‌های مختلف مدیریت پسماند از جمله بازیافت، کمپوست‌سازی، هضم بی‌هوازی، پیرولیز، سوزاندن و سوخت مشتق‌شده از پسماند، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد. همچنین، برخی از معیارهای ارزیابی از جمله هزینه‌های سرمایه‌گذاری، میزان آلایندگی، مصرف انرژی و نیاز به نیروی متخصص، به صورت معکوس در تحلیل لحاظ شدند، چرا که مقدار کمتر آن‌ها مطلوب‌تر تلقی می‌شود. یافته‌های پژوهش نشان داد فناوری‌هایی نظیر بازیافت و هضم بی‌هوازی، به دلیل هزینه‌های پایین‌تر، آلایندگی کمتر و سطح بالای پذیرش اجتماعی، در رتبه‌های بالاتری قرار دارند. در مقابل، روش‌هایی مانند سوزاندن و پیرولیز به دلیل هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری، نیاز به دانش فنی پیشرفته و آثار زیست‌محیطی بیشتر، در اولویت‌های پایین‌تر دسته‌بندی شدند. مقدار شاخص ناسازگاری در مقایسه‌های زوجی کمتر از حد مجاز است که اعتبار نتایج را نشان می‌دهد.

با توجه به این نتایج، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران و مدیران شهری سرمایه‌گذاری بیشتری در توسعهٔ زیرساخت‌های مرتبط با بازیافت و هضم بی‌هوازی انجام دهند. از طرف دیگر، اجرای سیاست‌های تشویقی برای ترویج تفکیک پسماند از مبدأ از طریق آموزش عمومی، تسهیلات مالی و تعرفه‌های ترجیحی می‌تواند گامی اثرگذار در افزایش مشارکت شهروندان باشد. علاوه بر آن، توسعه و بومی‌سازی فناوری‌های نوین در حوزهٔ بازیابی انرژی از پسماند، به‌ویژه از طریق به‌کارگیری بیوراکتورهای پیشرفته، می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری سامانه‌های مدیریت پسماند شود. در عین حال، کاربرد روش‌های پرهزینه و آلاینده نظیر سوزاندن و پیرولیز، تنها در شرایط خاص و با اعمال کنترل‌های دقیق زیست‌محیطی توصیه می‌شود.

با وجود دقت قابل توجه روش تحلیل سلسله‌مراتبی، این پژوهش با برخی محدودیت‌ها نیز مواجه بوده است. از جمله اینکه وزن‌دهی به معیارها بر اساس نظر خبرگان انجام شده که ممکن است تحت تأثیر قضاوت‌های ذهنی قرار گیرد. همچنین، داده‌های تجربی مبتنی بر عملکرد واقعی پروژه‌ها به صورت محدود در دسترس بود و تحلیل‌ها بیشتر بر پایهٔ اطلاعات ثانویه صورت گرفته است. افزون بر این، عواملی نظیر نوسان اقتصادی، تغییر سیاست‌گذاری، و تأثیر بلندمدت زیست‌محیطی در مدل لحاظ نشده‌اند. در مطالعه‌های آتی پیشنهاد می‌شود از روش‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و تاپسیس فازی برای کاهش اثر ذهنی بودن قضاوت‌ها استفاده شود. همچنین، بهره‌گیری از تحلیل سناریو، مدل‌سازی عدم قطعیت، و مطالعات میدانی با داده‌های واقعی شهری می‌تواند به افزایش دقت تصمیم‌گیری و بهبود کارایی سامانه‌های مدیریت پسماند کمک کند. در نهایت، توجه به عوامل فرهنگی، مشارکت مردمی و ظرفیت نهادی مناطق مختلف نیز می‌تواند به طراحی سامانه‌های اثرگذارتر و پایدارتر منجر شود. علاوه بر این، انجام مطالعه‌های تکمیلی با در نظر گرفتن عوامل منطقه‌ای، فرهنگی و فنی می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری و افزایش کارایی سامانهٔ مدیریت پسماند شهری کمک کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس خود را از مرکز پژوهشی انرژی و دانشکدهٔ انرژی دانشگاه شهید بهشتی به دلیل حمایت‌ها و راهنمایی‌های ارزشمند این مجموعه طی این پژوهش ابراز می‌دارند. بازخوردهای سازنده، دسترسی به امکانات پژوهشی و مشارکت‌های علمی این مرکز نقش مهمی در غنای این مطالعه داشته است.

منابع

1. "Solid Waste Management." Accessed: Mar. 08, 2025. [Online]. Available: https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management
2. T. Malkow, "Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal," *Waste Management*, vol. 24, no. 1, pp. 53–79, 2004, doi: 10.1016/S0956-053X(03)00038-2.
3. H. Parekh, K. Yadav, S. Yadav, and N. Shah, "Identification and assigning weight of indicator influencing performance of municipal solid waste management using AHP," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 36–45, Jan. 2015, doi: 10.1007/s12205-014-2356-3.
4. A. Nzihou, "Toward the valorization of waste and biomass," *Waste Biomass Valorization*, vol. 1, no. 1, pp. 3–7, Mar. 2010, doi: 10.1007/s12649-010-9014-x.
5. A. Kurbatova and H. A. Abu-Qdais, "Using multi-criteria decision analysis to select waste to energy technology for a Mega city: The case of Moscow," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 23, pp. 1–18, Dec. 2020, doi: 10.3390/su12239828.
6. M. A. Mujtaba *et al.*, "Evaluating sustainable municipal solid waste management scenarios: A multicriteria decision making approach," *Heliyon*, vol. 10, no. 4, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25788.
7. W. A. Qazi, M. F. M. Abushammala, and M. H. Azam, "Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies for municipal solid waste management in Sultanate of Oman," *Waste Management and Research*, vol. 36, no. 7, pp. 594–605, Jul. 2018, doi: 10.1177/0734242x18777800.
8. A. Khoshand, K. Khanlari, H. Abbasianjahromi, and M. Zoghi, "Construction and demolition waste management: Fuzzy Analytic Hierarchy Process approach," *Waste Management and Research*, vol. 38, no. 7, pp. 773–782, Jul. 2020, doi: 10.1177/0734242X20910468.
9. P. F. Rupani *et al.*, "Current scenario of the tehran municipal solid waste handling rules towards green technology," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 16, no. 6, Mar. 2019, doi: 10.3390/ijerph16060979.
10. P. Agamuthu and S. Babel, "Waste management developments in the last five decades: Asian perspective," Dec. 01, 2023, *SAGE Publications Ltd*. doi: 10.1177/0734242X231199938.
11. S. N. S. S. Azahari *et al.*, "Developing a Sustainable Solid Waste Management System Using Analytical Hierarchy Process (AHP) Method at Pondok Institutions in Kelantan," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Sep. 2021. doi: 10.1088/1755-1315/842/1/012060.
12. B. G. Demircan and K. Yetilmezsoy, "A Hybrid Fuzzy AHP-TOPSIS Approach for Implementation of Smart Sustainable Waste Management Strategies," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 8, Apr. 2023, doi: 10.3390/su15086526.
13. G. Sasikumar, A. Sivasangari, and N. Venkatachalam, "Application of Analytical Hierarchy Process (AHP) for Assessment of Collection and Transportation of Solid Waste: An Empirical Study," *Nature Environment and Pollution Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 283–288, Mar. 2022, doi: 10.46488/NEPT.2022.v21i01.033.
14. M. Ghimire, S. Pandey, and J. R. Woo, "Assessing stakeholders' risk perception in public-private partnerships for waste-to-energy projects: A case study of Nepal," *Energy for Sustainable Development*, vol. 79, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.esd.2024.101414.
15. Z. Hasankhani, M. Zandieh, and E. B. Tirkolaee, "Identification of optimal waste-to-energy strategies for sustainable development in Iran: SWOT analysis, hybrid MCDM methods, and game theory," *Renew Energy*, vol. 237, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.121564.
16. D. Zhao, Y. Chen, H. Yuan, and D. Chen, "Life cycle optimization oriented to sustainable waste management and circular economy: A review," *Waste Management*, vol. 191, pp. 89–106, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.wasman.2024.11.001.
17. B. Biakhmetov, Y. Li, Q. Zhao, A. Dostiyarov, D. Flynn, and S. You, "Transportation and process modelling-assisted techno-economic assessment of resource recovery from non-recycled municipal plastic waste," *Energy Convers Manag*, vol. 324, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.enconman.2024.119273.

18. R. S. Raj, S. Jain, and A. Kumar Sharma, “Transforming municipal solid waste management through material and substance flow analysis: Conversion pathways for sustainable energy production,” *Energy Convers Manag*, vol. 322, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.119164.
19. C. Vlachokostas, A. V. Michailidou, and C. Achillas, “Multi-Criteria Decision Analysis towards promoting Waste-to-Energy Management Strategies: A critical review,” Mar. 01, 2021, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2020.110563.
20. S. S. Sohail *et al.*, “Multi-criteria decision making-based waste management: A bibliometric analysis,” Nov. 01, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e21261.
21. M. Rodrigues, J. A. Antunes, and V. Miguéis, “Aligning priorities: A Comparative analysis of scientific and policy perspectives on municipal solid waste management,” *Waste Management*, vol. 193, pp. 70–83, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.wasman.2024.11.031.
22. G. Garcia-Garcia, “Using Multi-Criteria Decision-Making to optimise solid waste management,” Oct. 01, 2022, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.cogsc.2022.100650.
23. M. Koo and S.-W. Yang, “Likert-Type Scale,” *Encyclopedia*, vol. 5, no. 1, p. 18, Feb. 2025, doi: 10.3390/encyclopedia5010018.
24. “What is the Analytic Hierarchy Process (AHP)? | Passage Technology.” Accessed: Dec. 23, 2023. [Online]. Available: https://www.passagetechnology.com/what-is-the-analytic-hierarchy-process
25. F. Ahammed and A. Azeem, “Selection of the most appropriate package of Solar Home System using Analytic Hierarchy Process model in rural areas of Bangladesh,” *Renew Energy*, vol. 55, pp. 6–11, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.12.020.
26. H. Shahabi, S. Keihanfard, B. Bin Ahmad, and M. J. T. Amiri, “Evaluating Boolean, AHP and WLC methods for the selection of waste landfill sites using GIS and satellite images,” *Environ Earth Sci*, vol. 71, no. 9, pp. 4221–4233, 2014, doi: 10.1007/s12665-013-2816-y.
27. L. A. Guerrero, G. Maas, and W. Hogland, “Solid waste management challenges for cities in developing countries,” *Waste Management*, vol. 33, no. 1, pp. 220–232, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2012.09.008.