Journal of Industrial Innovations

https://jii.araku.ac.ir

ISSN: 3092-7811

Evaluation of Strategies for Implementing Sustainability, Resilience and Agility Dimensions in a Waste Management System Based on a Circular Economy

Seyed Masoud Kazemi [a], Zahra Saeidi Mobarakeh [b*], Ehsan Momeni [c], Hossein Amoozad Khalili [d]

[a] Department of Management, Ro.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran. Seyedmasoud.kazemi@iau.ac.ir
[b] Department of Industrial Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. z.saeidimobarakeh@iau.ac.ir
[c] Department of Industrial Engineering, Par.C., Islamic Azad University, Pardis, Iran. ehs_momeni@iau.ac.ir
[d] Department of Industrial Engineering, Sar.C., Islamic Azad University, Sari, Iran. ho.amoozad@iau.ac.ir

Original Article

Use your device to scan and read the article online

Citation: Kazemi S M, Saeidi Mobarakeh Z, Momeni E, Amoozad Khalili H. Evaluation of Strategies for Implementing Sustainability, Resilience and Agility Dimensions in a Waste Management System Based on a Circular Economy. Journal of Industrial Innovations. 2026; 4(4):22-46.

https://doi.org/10.22034/jii.2026.738218

KEYWORDS

Waste management;
Sustainability;
Resilience;
Agility;
Circular economy.

ABSTRACT

Waste management is one of the environmental and economic challenges of today's societies, and with the increase in waste production and complexity, the importance of finding new and sustainable solutions has become more apparent than ever. Considering the three dimensions of sustainability, resilience, and agility along with the principles of the circular economy can be a suitable solution to achieve an efficient system. In this study, a hybrid multi-criteria decision-making model is presented in order to evaluate strategies for moving towards sustainable, resilient, and agile waste management. For this purpose, first the criteria of the research problem are identified and then their weights are calculated by presenting a new method called the best-worst stochastic lexicographic method. Next, the identified strategies are ranked using the stochastic Vicor method.The results show that the most important criteria are public health criteria, initial investment cost, 3R (related to circular economy), operational flexibility, robustness, increased recycling rate, reliability and compatibility with current technologies. Also, according to the results obtained, strategies of using smart systems to process collected waste and using advanced technology in the waste collection system have been selected as the best ones. These findings can be a suitable guide for policymakers and managers in developing modern waste management systems.

Extended Abstract

1. Introduction

Industrial developments and the rapid growth of the urban population, along with the transformation of consumption patterns, have led to an exponential increase in the volume and complexity of waste, creating widespread environmental, economic, and health challenges. Traditional disposal methods, such as direct landfilling and incineration, have lost their efficiency due to destructive consequences, including severe pollution of water and soil resources, greenhouse gas emissions, and direct threats to public health. In this context, the circular economy paradigm, through maintaining material value in the economic cycle and emphasizing the principles of recycling, reuse, and reduction (3R3\text{R}3R), offers a fundamental solution for transitioning from traditional linear systems. However, existing waste management networks face fluctuations in

* Corresponding author.
E-mail address: z.saeidimobarakeh@iau.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.22034/jii.2026.738218
Received: April 24, 2026; Received in revised form: July 11, 2026; Accepted: July 30, 2026.
Article type: Researh Paper

the quantity and quality of waste streams, regulatory changes, resource constraints, and economic and environmental uncertainties. Successful implementation of this paradigm requires the simultaneous integration of sustainability, resilience, and agility dimensions. Despite this, prior literature has often examined these dimensions in isolation, as single-dimensional concepts, or within the framework of deterministic models, failing to provide a comprehensive framework for weighting criteria and evaluating executive strategies under uncertainty. Therefore, the present study aims to fill this gap by developing a novel, integrated, stochastic, and scenario-based decision-making model to synthesize these four dimensions in evaluating waste management implementation strategies.

2. **Design/Methodology/Approach**

This study utilized an integrated stochastic multi-criteria decision-making approach. Initially, by conducting a comprehensive literature review and soliciting expert opinions in the field of waste management, four main dimensions, twenty specialized sub-criteria, and four executive strategies were identified and formulated. To weight the criteria and sub-criteria, and to manage environmental and subjective uncertainties, the novel Stochastic Lexicographic Best-Worst Method was employed, which enhances the consistency and precision of weight vectors compared to classical models by incorporating a second objective function designed to minimize the sum of absolute deviations. Subsequently, the Stochastic VIKOR technique was applied under various uncertainty scenarios to prioritize operational strategies, ensuring robust decision-making capability under fluctuating conditions. Finally, the proposed approach was evaluated for stability and reliability through sensitivity analysis and systematic comparison with other weighting and ranking methods, such as the Analytic Hierarchy Process (AHP), fuzzy VIKOR, stochastic TOPSIS, and fuzzy TOPSIS.

3. **Findings**

Findings from the calculations demonstrated that among the main dimensions, the Circular Economy dimension possessed the highest relative weight and importance, followed by sustainability, resilience, and agility, respectively. At the sub-criteria level, indicators such as public health, initial investment costs, 3R principles (recycling, reuse, and reduction), operational flexibility, system robustness, and increasing the recycling rate were identified as the most influential criteria, while indicators such as interoperability with other systems, adaptation speed to change, and job creation received lower weights. Furthermore, the final ranking results obtained via the Stochastic VIKOR index indicate that the strategy of “using smart systems for processing collected waste” holds the highest priority, while “using advanced technology in the waste collection system” secured the second rank. The strategies of “collaboration and information exchange” and “decentralized waste management” occupied the third and fourth positions, respectively. Adaptive validation of the model confirmed the absolute stability of these top ranks across all competing methods.

4. **Conclusion**

Results of this research suggest that structural transformation in sustainable waste management and the achievement of circular economy goals require a strategic focus on employing smart technologies and advanced processing and segregation infrastructure. The superiority of strategies based on smartization indicates that integrating Industry 4.0 and 5.0 tools—such as artificial intelligence and automation—with collection and processing systems is the key to balancing the control of initial investment costs with the protection of public health. By presenting a structured, scenario-based model, this study provides a practical and reliable tool for urban managers, environmental policymakers, and supply chain planners, enabling them to make resilient, agile, and circular-aligned decisions amidst uncertainty and resource constraints.

نوآوری‌های صنعتی

شاپا: ۷۸۱۱-۳۰۹۲

ارزیابی استراتژی‌های پیاده‌سازی ابعاد پایداری، تاب‌آوری و چابکی در یک سیستم مدیریت پسماند مبتنی بر اقتصاد چرخشی

سید مسعود کاظمی[الف]، زهرا سعیدی مبارکه[ب*]، احسان مومنی[ج]، حسین عموزاد خلیلی[د]

[الف] گروه مدیریت، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران. Seyedmasoud.kazemi@iau.ac.ir

[ب] گروه مهندسی صنایع، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. z.saeidimobarakeh@iau.ac.ir

[ج] گروه مهندسی صنایع، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، پردیس، ایران. ehs_momeni@iau.ac.ir

[د] گروه مهندسی صنایع، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران. ho.amoozad@iau.ac.ir

واژگان کلیدی

مدیریت پسماند؛
پایداری؛
تاب‌آوری؛
چابکی؛
اقتصاد چرخشی؛
تصمیم‌گیری چندمعیاره.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۸

چکیده

مدیریت پسماند یکی از چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی جوامع امروزی است که با افزایش تولید و پیچیدگی ضایعات، اهمیت یافتن راهکارهای نوین و پایدار بیش از پیش آشکار شده است. در نظر گرفتن ابعاد سه‌گانه پایداری، تاب‌آوری و چابکی در کنار اصول اقتصاد چرخشی می‌تواند راهکاری مناسب جهت دستیابی به سیستمی کارآمد باشد. در این تحقیق، به‌منظور ارزیابی استراتژی‌های حرکت به سمت مدیریت پسماند پایدار، تاب آور و چابک، یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی ارائه شده است. بدین منظور، ابتدا معیارهای مساله تحقیق شناسایی‌شده و سپس وزن آن‌ها با ارائه یک روش جدید به نام روش بهترین–بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک محاسبه می‌شود. در ادامه، استراتژی‌های شناسایی‌شده با استفاده از روش ویکور تصادفی رتبه‌بندی می‌شوند. نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه یک چارچوب یکپارچه برای ارزیابی و اولویت‌بندی راهبردهای استقرار پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی در سیستم مدیریت پسماند است. در این راستا، با توسعه و به‌کارگیری روش بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک و ترکیب آن با روش ویکور تصادفی، امکان وزن‌دهی معیارها و رتبه‌بندی راهبردها به‌صورت همزمان در شرایط عدم قطعیت فراهم‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که معیارهای بهداشت عمومی، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، 3R (مرتبط با اقتصاد چرخشی)، انعطاف‌پذیری عملیاتی، استواری، افزایش نرخ بازیافت، قابلیت اطمینان و سازگاری با فناوری‌های روز مهمترین معیارها می‌باشند. همچنین، مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، استراتژی‌های استفاده از سیستم‌های هوشمند به‌منظور فرآوری پسماندهای جمع‌آوری‌شده و استفاده از تکنولوژی پیشرفته در سیستم جمع‌آوری پسماند به‌عنوان بهترین موارد انتخاب‌شده‌اند. این یافته‌ها می‌تواند راهنمای مناسبی برای سیاست‌گذاران و مدیران در توسعه سیستم‌های مدیریت پسماند نوین باشد.

۱- مقدمه

پیشرفت‌های صنعتی و فناوری در دهه‌های اخیر نقش قابل‌توجهی در ارتقای کیفیت زندگی و توسعه اقتصادی ایفا کرده‌اند؛ بااین‌حال، این تحولات با افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و رشد چشمگیر تولید پسماندهای ناشی از فعالیت‌های صنعتی،

* نویسنده مسئول؛

آدرس پست الکترونیک: z.saeidimobarakeh@iau.ac.ir

کشاورزی، خانگی و درمانی همراه بوده است. در نتیجه، مدیریت پسماند به یکی از چالش‌های اساسی جوامع معاصر تبدیل‌شده است، زیرا انباشت و دفع نامناسب پسماندها می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای برای منابع طبیعی، سلامت انسان و پایداری اکوسیستم‌ها به همراه داشته باشد [۱]. افزون‌بر این، رشد سریع جمعیت شهری و گسترش فعالیت‌های اقتصادی و صنعتی، همراه با تغییر الگوهای مصرف، موجب افزایش کمی و کیفی پسماندها شده و پیچیدگی مدیریت آن‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده است [۲].

ازاین‌رو، در چارچوب توسعه پایدار، مدیریت پسماند باید به‌گونه‌ای طراحی شود که میان ابعاد زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی تعادل برقرار کند. تحقق این هدف مستلزم ایجاد نظامی یکپارچه برای کاهش تولید پسماند، جمع‌آوری، حمل‌ونقل، پردازش، بازیافت و دفع اصولی آن است تا ضمن کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی، استفاده بهینه از منابع نیز امکان‌پذیر شود [۳]. در مقابل، تداوم رویکردهای سنتی دفع پسماند، از جمله دفن یا سوزاندن بدون مدیریت مؤثر، می‌تواند منجر به آلودگی منابع آب‌وخاک، انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش مخاطرات بهداشتی شود. ازاین‌رو، توجه به رویکردهای پیشگیرانه مانند کاهش پسماند در مبدأ، طراحی محصولات قابل بازیافت، تفکیک از مبدأ و بازیابی مواد و انرژی اهمیت فزاینده‌ای یافته است [۴].

در این میان، اقتصاد چرخشی به‌عنوان پارادایمی نوین در مدیریت منابع و پسماند مطرح‌شده است که هدف آن حفظ ارزش مواد و محصولات در چرخه اقتصادی برای مدت طولانی‌تر و حداقل‌سازی تولید ضایعات است. در این رویکرد، جریان‌های مواد از طریق راهکارهایی نظیر استفاده مجدد، بازتولید، بازسازی و بازیافت به چرخه تولید بازگردانده می‌شوند. چنین الگویی علاوه بر کاهش وابستگی به منابع اولیه، می‌تواند موجب صرفه‌جویی در انرژی، کاهش ردپای کربن و ایجاد فرصت‌های اقتصادی جدید در قالب صنایع سبز شود [۵،۶].

با وجود مزایای قابل‌توجه اقتصاد چرخشی، پیاده‌سازی مؤثر آن در سیستم‌های مدیریت پسماند با چالش‌های متعددی همراه است. بسیاری از شبکه‌های موجود بر ساختارهای خطی و سنتی استوار هستند و از انعطاف‌پذیری کافی برای مواجهه با تغییرات محیطی و اختلالات پیش‌بینی‌نشده برخوردار نیستند. علاوه بر این، عواملی همچون نوسانات در کمیت و ترکیب پسماند، تغییرات مقررات زیست‌محیطی، محدودیت منابع و عدم‌قطعیت‌های اقتصادی، فرآیند تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی در این سیستم‌ها را پیچیده‌تر می‌کنند [۷].

در پاسخ به این چالش‌ها، ادبیات پژوهش به‌طور فزاینده‌ای بر ضرورت ادغام مفاهیم پایداری، تاب‌آوری و چابکی در طراحی سیستم‌های مدیریت پسماند تأکید کرده است. پایداری بر ایجاد تعادل میان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی تمرکز دارد [۸]، تاب‌آوری به توانایی سیستم در مقاومت در برابر اختلالات و بازیابی سریع عملکرد پس از بحران‌ها اشاره می‌کند [۹] و چابکی بیانگر قابلیت واکنش سریع و سازگاری با تغییرات محیطی، فناوری و تقاضا است [۱۰]. ترکیب این سه بعد می‌تواند زمینه شکل‌گیری سیستم‌های مدیریت پسماندی را فراهم کند که علاوه بر کارایی عملیاتی و پایداری بلندمدت، از انعطاف‌پذیری لازم برای مواجهه با شرایط پیچیده و پویا نیز برخوردار باشند.

با وجود اهمیت این مفاهیم، هنوز چارچوب‌های جامعی برای یکپارچه‌سازی همزمان ابعاد پایداری، تاب‌آوری و چابکی در بستر اقتصاد چرخشی در حوزه مدیریت پسماند به‌طور کامل توسعه‌نیافته‌اند. این خلأ پژوهشی می‌تواند مانعی برای طراحی و اجرای استراتژی‌های مؤثر در این حوزه باشد [۱۱]. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف شناسایی و ارزیابی استراتژی‌های مناسب برای پیاده‌سازی همزمان این ابعاد در سیستم‌های مدیریت پسماند مبتنی بر اقتصاد چرخشی انجام شده است و تلاش می‌کند با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، چارچوبی تحلیلی برای اولویت‌بندی استراتژی‌های پیشنهادی ارائه دهد.

باوجوداینکه پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی هر یک از دیدگاه‌های متفاوتی به بهبود عملکرد سیستم‌های مدیریت پسماند می‌پردازند، بررسی مستقل آن‌ها نمی‌تواند پاسخگوی چالش‌های پیچیده و چندبعدی این سیستم‌ها باشد. پایداری بر ایجاد تعادل میان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی تأکید دارد، درحالی‌که تاب‌آوری بر توانایی سیستم در مقابله با اختلالات و بازیابی عملکرد، چابکی بر سرعت و انعطاف‌پذیری در پاسخ به تغییرات و اقتصاد چرخشی بر حفظ ارزش منابع از

طریق کاهش، استفاده مجدد، بازیافت و بازیابی تمرکز دارد. ازاین‌رو، اتخاذ رویکردی یکپارچه که این چهار بعد را به‌صورت همزمان مدنظر قرار دهد، می‌تواند ضمن افزایش کارایی و اثربخشی سیستم‌های مدیریت پسماند، زمینه دستیابی به توسعه پایدار، استفاده بهینه از منابع، کاهش آثار زیست‌محیطی و ارتقای توان سازگاری سیستم در برابر شرایط متغیر و غیرمنتظره را فراهم سازد. بر همین اساس، پژوهش حاضر با تمرکز همزمان بر این چهار بعد، تلاش می‌کند چارچوبی جامع برای ارزیابی و اولویت‌بندی راهبردهای پیاده‌سازی در سیستم مدیریت پسماند ارائه دهد.

در این پژوهش، ابتدا با بررسی ادبیات موضوع و نظرات کارشناسان، معیارها، زیرمعیارها و استراتژی‌های مرتبط شناسایی می‌شوند. سپس وزن معیارها و زیرمعیارها با استفاده از رویکرد بهترین–بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک محاسبه شده و در ادامه، استراتژی‌ها با به‌کارگیری روش ویکور تصادفی اولویت‌بندی می‌شوند. این مطالعه در پی پاسخ به پرسش‌های زیر است:

- چگونه می‌توان استراتژی‌های پیاده‌سازی ابعاد پایداری، تاب‌آوری و چابکی را در سیستم مدیریت پسماند مبتنی بر اقتصاد چرخشی ارزیابی کرد؟
- مهم‌ترین معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در این ارزیابی کدام‌اند؟
- کدام استراتژی‌ها از اولویت بالاتری برای پیاده‌سازی برخوردارند؟

با عنایت به شکاف تحقیقاتی شناسایی‌شده در مرور ادبیات، پژوهش حاضر در پی دستیابی به اهداف زیر است:

۱. شناسایی و دسته‌بندی معیارها و زیرمعیارهای کلیدی مؤثر بر پیاده‌سازی هم‌زمان ابعاد پایداری، تاب‌آوری و چابکی در سیستم‌های مدیریت پسماند مبتنی بر اقتصاد چرخشی بر اساس مرور نظام‌مند ادبیات و نظرات خبرگان؛

۲. ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره نوین با استفاده از روش بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک به‌منظور وزن‌دهی دقیق‌تر و قابل‌اطمینان‌تر به معیارها در شرایط عدم‌قطعیت، با لحاظ نمودن معیار انحراف کل به‌عنوان تابع هدف دوم؛

۳. اولویت‌بندی و ارزیابی استراتژی‌های اجرایی برای حرکت به سمت مدیریت پسماند پایدار، تاب‌آور و چابک با بهره‌گیری از رویکرد ویکور تصادفی که توانایی درنظرگرفتن سناریوهای مختلف را دارد؛

۴. اعتبارسنجی چارچوب پیشنهادی از طریق مقایسه سیستماتیک نتایج با روش‌های مرسوم تصمیم‌گیری نظیر فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، ویکور فازی و تاپسیس در هر دو مرحله وزندهی و رتبه‌بندی؛

۵. ارائه رهنمودهای عملی برای سیاست‌گذاران و مدیران حوزه مدیریت پسماند جهت انتخاب و پیاده‌سازی مؤثرترین استراتژی‌ها با تأکید بر نقش فناوری‌های هوشمند و پیشرفته

ساختار مقاله به این صورت است: در بخش دوم پیشینه پژوهش ارائه می‌شود، بخش سوم به روش تحقیق اختصاص دارد، بخش چهارم نتایج و تحلیل محاسباتی را بیان می‌کند و در نهایت بخش پنجم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده می‌پردازد.

۲- پیشینه پژوهش

در این بخش، مروری بر برخی از جدیدترین پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه‌های استراتژی‌های زنجیره تأمین، زنجیره تأمین پسماند و زنجیره تأمین چرخشی ارائه می‌شود.

۲-۱- استراتژی‌های زنجیره تأمین

زنجیره‌های تأمین و استراتژی‌های هماهنگ آن‌ها نقش مهمی در موفقیت شرکت‌های پیشرو دارند؛ ازاین‌رو بررسی پژوهش‌های این حوزه ضروری است. اوتاما و همکاران [۱۲]، با روش دلفی فازی موانع زنجیره تأمین برنج چرخشی را شناسایی کرده، با BWM فازی اوزان موانع و با CoCoSo فازی استراتژی‌های مقابله را رتبه‌بندی کردند. نتایج نشان داد موانع اقتصادی مهم‌ترین چالش زنجیره تأمین چرخشی برنج هستند و مشارکت‌های بین‌بخشی و مشوق‌های مالی مؤثرترین راهبردهای مقابله محسوب می‌شوند. سی‌وی و همکاران [۱۳]، با هدف ارتقای پایداری درآمد کشاورزان، استراتژی‌های مدیریت زنجیره تأمین را با رویکردی ساختاری (FAHP[1]، PVA[2]، TISM[3] وFMICMAC[4]) ارزیابی نمودند. یافته‌های این پژوهش، ضمن اولویت‌بندی استراتژی‌ها، نقشه‌راهی عملیاتی برای بهبود عملکرد و انطباق زنجیره با تقاضای بازار ارائه داد. اخبار و نگاش [۱۴]، با استفاده از رویکردهای دلفی و دیمتل فازی، ۲۸ شاخص ارزیابی استراتژی‌های کسب‌وکار چرخشی (CBS[5]) در صنعت مد را تدوین و شش اهرم عملیاتی کلیدی را به عنوان پیشران‌های اصلی عملکرد شناسایی کردند. راج و همکاران [۱۵]، با به‌کارگیری رویکرد ترکیبی پارتو و مولتی‌مورا، استراتژی‌های زنجیره تأمین و منبع‌یابی جهانی را اولویت‌بندی کرده و مدیریت ریسک، تدارکات و راهکارهای دیجیتال را به‌عنوان حیاتی‌ترین عوامل شناسایی نمودند. جورشاری و همکاران [۱۶]، با به‌کارگیری روش BWM، استراتژی‌های هوش مصنوعی در زنجیره تأمین گردشگری سلامت را اولویت‌بندی کردند؛ یافته‌ها نشان می‌دهد «مدیریت داده‌های بیمار»، «بهینه‌سازی زنجیره مراقبت» و «تجربه دیجیتال» راهکارهای اصلی ارتقای بهره‌وری هستند. اسپادا و همکاران [۱۷]، با ارزیابی استراتژی‌های چرخشی در زنجیره تأمین روغن زیتون، به تبیین رابطه مستقیم میان مدل‌های چرخشی و ارتقای تاب‌آوری پرداختند؛ یافته‌های آن‌ها حاکی از آن است که پیاده‌سازی این استراتژی‌ها، سودآوری سازمان را در برابر بحران‌ها و نوسانات قیمت مقاوم می‌سازد. نیری و همکاران [۱۸]، با استفاده از LFBWM[6] برای وزن‌دهی معیارها و ویکور فازی برای رتبه‌بندی، استراتژی‌های گذار از مدیریت پسماند سنتی به مدیریت پسماند مبتنی بر انقلاب صنعتی پنجم در استانبول را بررسی کردند. کولاشلو و عشقی [۱۹]، چارچوبی برای برنامه‌ریزی انرژی با ترکیب AHP برای وزن‌دهی معیارها، تاپسیس فازی برای رتبه‌بندی استراتژی‌ها و بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر سناریو ارائه کردند. نتایج نشان داد این رویکرد به کاهش هزینه‌های عملیاتی و انتشار کربن و بهبود مدیریت مصرف انرژی منجر می‌شود. داگدِویرن و اِرتورگوت [۲۰]، با تحلیل داده‌های پیمایش از ۱۰۰۰ شرکت برتر صادرکننده ترکیه، رابطه استراتژی‌های زنجیره تأمین و عملکرد لجستیک را بررسی کردند. نتایج نشان داد استراتژی‌های زنجیره تأمین اثر مثبت و معناداری بر عملکرد لجستیک دارند و یکپارچگی زنجیره تأمین نقش میانجی جزئی ایفا می‌کند. چودهاری و همکاران [۲۱]، با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه خاکستری و مطالعه موردی صنعت نساجی بنگلادش، چالش‌ها و استراتژی‌های مدیریت پسماند هوشمند را بررسی کردند. نیری و همکاران [۲۲]، با استفاده از بهترین–بدترین تصادفی برای وزن‌دهی معیارها و ویکور فازی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها، زنجیره تأمین پاسخگو در نظام سلامت مبتنی بر ابعاد انقلاب صنعتی پنجم را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد فناوری‌های پیشرفته و تسهیم اطلاعات مؤثرترین استراتژی‌ها هستند.

۲-۲- زنجیره تأمین پسماند

با توجه به افزایش حجم پسماند، محدودیت منابع و اراضی برای بازیافت و دفن، و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از آن، توجه جدی به مدیریت پسماند در زنجیره تأمین امری ضروری است. در ادامه برخی از مهم‌ترین تحقیقات این حوزه بررسی می‌شوند. باتار و پِکِر [۲۳]، با به‌کارگیری روش‌های فوکام و آراس، اثربخشی بلاکچین در مدیریت پسماندهای پزشکی را ارزیابی کردند. یافته‌ها "شفافیت و ردیابی" را معیارهای کلیدی و مرحله "ذخیره‌سازی"را اولویت نخست پیاده‌سازی این فناوری جهت تحقق اهداف اقتصاد چرخشی معرفی کردند. پاندِی و کومال [۲۴]، با توسعه روش واسپاس در محیط فازی شهودی چرخشی (CIFS[7])

[1] fuzzy analytic hierarchy process
[2] performance value analysis
[3] total interpretive structure modeling
[4] Fuzzy Matriced' Impacts Croise´s Multiplication Applique´e a un Classement
[5] circular business strategy
[6] Lexicographic Fuzzy Best-Worst Method
[7] circular intuitionistic fuzzy set

و بکارگیری عملگرهای ارشمیدسی، مدلی با قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری بالا برای ارزیابی سناریوهای مدیریت پسماند شهری طراحی کردند. بارکا-راپادیمیتریو و همکاران [۲۵]، با تلفیق نظرسنجی و تکنیک‌های یادگیری ماشین (الگوریتم‌های XGBoost و k-means)، رفتارهای مدیریت پسماند مواد غذایی خانگی را تحلیل و دسته‌بندی کردند؛ این رویکرد، منجر به شناسایی پنج خوشه رفتاری متمایز جهت تدوین برنامه‌های کاهش ضایعات در جامعه شد. کاترانچی و همکاران [۲۶]، با طراحی یک مدل تصمیم‌گیری فازی مبتنی بر روش‌های SIWEC[1] و RAWEC[2]، نشان دادند که فناوری کمپوست‌سازی مناسب‌ترین گزینه برای مدیریت پایدار پسماندهای شهری در مقایسه با سایر روش‌های حرارتی و فیزیکی است. بیشه [۲۷]، چارچوبی دومرحله‌ای برای مدیریت پایدار پسماندهای خطرناک ارائه کرد که شامل تعیین مکان بهینه و مسیریابی پویای وسایل نقلیه بود. این مدل با استفاده از Gurobi در پایتون روی پسماندهای بیمارستانی شانگهای پیاده‌سازی شد و منجر به کاهش هزینه و انتشار گازهای گلخانه‌ای شد. ان‌جی و همکاران [۲۸]، با استفاده از یادگیری ماشین و شبیه‌سازی مونت‌کارلو، تاب‌آوری زنجیره تأمین زباله‌های الکترونیکی در هند را بررسی کردند. آن‌ها از مدل‌های FNN[3] و RF[4] استفاده کردند. قاسمی و همکاران [۲۹]، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه، چندسطحی و چندکالایی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین تعاونی پسماند پزشکی در تهران ارائه کردند. مدل با شبیه‌سازی پویای سیستم برای پیش‌بینی پسماند و الگوریتم NSGA-II حل شد و نتایج نشان داد همکاری ائتلافی مراکز جمع‌آوری هزینه‌ها را کاهش و کارایی شبکه را بهبود می‌دهد. الیازیدی و خیسی [۳۰]، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس پایدار پسماندهای پزشکی ارائه کردند که با الگوریتم کلونی زنبورعسل ژنتیکی مصنوعی حل شد. نتایج نشان داد مدل پیشنهادی هزینه‌های عملیاتی و انتشار CO_2 را کاهش داده و کارایی شبکه را بهبود می‌دهد. گودرزیان و همکاران [۳۱]، یک مدل فازی چندهدفه، چنددوره‌ای و چندسطحی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین پسماندهای پزشکی کووید-۱۹ در مطالعه موردی تهران ارائه کردند. مدل با الگوریتم‌های TS[5] و GOA[6] حل شد. دمیرکن و یتیلمزسوی [۳۲]، با استفاده از AHP فازی برای وزن‌دهی معیارها و TOPSIS فازی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها، مدیریت پسماند هوشمند و پایدار را بررسی کردند. نتایج نشان داد امکان‌سنجی عملیاتی مهم‌ترین معیار و فناوری بلاکچین بهترین گزینه برای بهبود مدیریت پسماند است. یاداو و همکاران [۳۳]، با استفاده از روش دیمتل، مدیریت پسماند هوشمند در کشورهای درحال‌توسعه را بررسی کردند.

۲-۳- زنجیره تأمین چرخشی

زنجیره تأمین چرخشی با الهام از اقتصاد چرخشی به حفظ جریان مواد و محصولات از طریق بازیافت، بازتولید و استفاده مجدد می‌پردازد و در مقابل الگوی خطی «تولید–مصرف–دورریز» قرار دارد. در این بخش مهم‌ترین پژوهش‌های مرتبط با زنجیره تأمین چرخشی مرور می‌شود. کازان‌کوغلو و همکاران [۳۴]، با تلفیق روش‌های SWARA[7] و TOPSIS[8]، به اولویت‌بندی عوامل موفقیت و فناوری‌های اینترنت اشیا (IoT[9]) در زنجیره تأمین چرخشی لبنیات پرداختند. پاساک و همکاران [۳۵]، با استفاده از روش‌های ISM و MICMAC، موانع زنجیره تأمین چرخشی در صنعت نساجی را تحلیل کرده و فقدان قوانین زیست‌محیطی و انگیزه‌های صنعتی را به‌عنوان کلیدی‌ترین محرک‌ها شناسایی نمودند. جعفرزاده قوشچی و همکاران [۳۶]، یک مدل چندهدفه MILP برای طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته مبتنی بر اقتصاد چرخشی تحت عدم‌قطعیت ارائه کردند که با روش اپسیلون–محدودیت حل شد. نتایج نشان داد مدل پیشنهادی سود و رضایت مشتری را افزایش داده و ضایعات و آلایندگی را کاهش می‌دهد. غریبی و عبداله‌زاده [۳۷]، یک مدل MILP برای طراحی شبکه لجستیک حلقه‌بسته چرخشی شش‌سطحی و چندمحصولی در خدمات پس از فروش تجهیزات الکترونیکی ارائه کردند که در گمز با حل‌کننده سیمپلکس حل شد. همچنین

[1] Simple Weight Calculation
[2] Ranking Alternatives with Weights of Criterion
[3] Feedforward Neural Network
[4] Random Forest
[5] Tabu Search
[6] grasshopper optimization algorithm
[7] Step Wise Weight Assessment Ratio Analysis
[8] Technique for Order Preference Similar to Ideal Solution
[9] Internet of Things

با روش SDEA[1] کارایی مراکز بازگشت ارزیابی و مراکز کارآمد شناسایی شدند. سعیدی و همکاران [۳۸]، مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مبتنی بر MILP برای طراحی زنجیره تأمین کشاورزی پایدار، تاب‌آور و چرخشی با مفهوم ارزش‌گذاری ضایعات (VW[2]) ارائه کردند. مدل با لحاظ بافر موجودی و ادغام چندمنبعی انرژی به‌عنوان راهبردهای تاب‌آوری در GAMS/CPLEX حل شد. عباسی و همکاران [۳۹]، یک مدل چندهدفه برای طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته چرخشی تحت عدم‌قطعیت ارائه کردند که با الگوریتم ترکیبی HWS (WOA–SA[3]) حل شد. رجبی کفشگر و همکاران [۴۰]، یک مدل MILP برای طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته چرخشی با هدف کمینه‌سازی هزینه و ملاحظات زیست‌محیطی ارائه کردند. مدل با الگوریتم‌های SA، GA[4] و PSO[5] (تنظیم‌شده با روش تاگوچی) و با مطالعه موردی بطری‌های پلاستیکی ارزیابی شد. سجودی و همکاران [۴۱]، یک مدل چندمحصولی، چنددوره‌ای و چندهدفه MILP برای طراحی زنجیره تأمین ماهی دوکاناله چرخشی پایدار در آمل ارائه کردند. برای مدیریت عدم‌قطعیت از RFP[6] و برای حل از FMCCGP-UF[7] استفاده شد. شهرابی‌فراهانی و همکاران [۴۲]، یک مدل چندهدفه و چنددوره‌ای زنجیره تأمین حلقه‌بسته چرخشی برای تجهیزات الکترونیکی تحت عدم‌قطعیت با MCDM فازی و برنامه‌ریزی خطی امکانی استوار ارائه کردند. این مدل منجر به افزایش سود، کاهش کربن و تقویت جریان بازگشت محصول در مطالعه موردی گوشی‌های هوشمند در ایران شد. نظری‌نیا و همکاران [۴۳]، یک مدل سه‌هدفه MILP برای طراحی شبکه زنجیره تأمین چرخشی چندبخشی با استفاده از RFSP[8] برای مدیریت عدم‌قطعیت‌ها ارائه کردند. مدل با روش اپسیلون محدودیت حل شد و مطالعه موردی صنعت تایر فرانسه اهمیت عدم‌قطعیت و تعامل بازیگران را در دستیابی به تعادل اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی نشان داد. چان و همکاران [۴۴]، یک مدل چندهدفه غیرخطی برای زنجیره تأمین چرخشی محصولات تازه کشاورزی ارائه کردند که با برنامه‌ریزی آرمانی و اپسیلون محدودیت در گمز حل شد.

به‌منظور درک بهتر، جدول ۱ مقایسه این تحقیق و سایر پژوهش‌های مشابه را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مقایسه تحقیق حاضر و پژوهش‌های مشابه

مرجع	حوزه پژوهش	ویژگی‌های اصلی مسئله	روش تحقیق	تفاوت با پژوهش حاضر
اوتاما و همکاران [۱۲]	زنجیره تأمین چرخشی برنج	شناسایی موانع و انتخاب استراتژی‌ها	Delphi فازی، BWM فازی، CoCoSo فازی	صرفاً بر شناسایی موانع و انتخاب استراتژی‌ها زنجیره تأمین برنج متمرکز بوده و ابعاد مدیریت پسماند، عدم قطعیت سناریویی و روش پیشنهادی حاضر را بررسی نکرده است.
نیری و همکاران [۲۲]	زنجیره تأمین پاسخگو	ارزیابی استراتژی‌های زنجیره تأمین پاسخگو مبتنی بر ابعاد انقلاب صنعتی پنجم	BWM تصادفی، VIKOR فازی	صرفاً به ارزیابی استراتژی‌ها در زنجیره تأمین پاسخگو با درنظر گرفتن ابعاد انقلاب صنعتی پنجم پرداخته و ارزیابی جامع استراتژی‌های مدیریت پسماند با درنظر گرفتن ابعاد پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی به‌طور همزمان انجام نشده است.
باتار و پِکِر [۲۳]	زنجیره تأمین پسماند	ارزیابی فناوری‌های مدیریت پسماند هوشمند	FUCOM،ARAS	تمرکز بر ارزیابی فناوری‌های هوشمند بوده و ابعاد پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی به‌طور همزمان در نظر گرفته نشده است.
دمیرکن و یتیلمزسوی [۳۲]	مدیریت پسماند هوشمند	انتخاب فناوری‌های مدیریت پسماند	AHP فازی، TOPSIS فازی	تنها انتخاب فناوری انجام‌شده و ارزیابی همزمان پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی ارائه نشده است.

[1] Simultaneous data envelopment analysis
[2] Waste Valorization
[3] whale optimization algorithm- simulated annealing
[4] Genetic Algorithm
[5] Particle Swarm Optimization
[6] robust fuzzy programming
[7] Fuzzy Multi-Choice Chebyshev Goal Programming with Utility Function
[8] robust-fuzzy stochastic programming

مرجع	حوزه پژوهش	ویژگی‌های اصلی مسئله	روش تحقیق	تفاوت با پژوهش حاضر
یاداو و همکاران [۳۳]	مدیریت پسماند هوشمند	تحلیل عوامل مؤثر بر مدیریت پسماند	DEMATEL	رتبه‌بندی استراتژی‌ها مبتنی بر ابعاد مدنظر تحقیق حاضر و ارائه چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام نشده است.
کازان‌کوغلو و همکاران [۳۴]	زنجیره تأمین چرخشی	اولویت‌بندی فناوری‌های IoT	TOPSIS ،SWARA	تمرکز بر اینترنت اشیا در زنجیره تأمین چرخشی بوده و ارزیابی جامع استراتژی‌های مدیریت پسماند مبتنی بر ابعاد مدنظر تحقیق حاضر انجام نشده است.
پاساک و همکاران [۳۵]	اقتصاد چرخشی	توسعه راهکارهای اقتصاد چرخشی	MICMAC ،ISM	تمرکز بر مدیریت پسماند و ابعاد تاب‌آوری و چابکی به‌صورت همزمان انجام نشده است.
پژوهش حاضر	مدیریت پسماند مبتنی بر اقتصاد چرخشی	ارزیابی استراتژی‌های پیاده‌سازی پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی به‌صورت همزمان	روش بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک + ویکور تصادفی	تلفیق همزمان چهار بعد اصلی، توسعه روش وزن‌دهی با لحاظ انحراف کل، مدل‌سازی عدم قطعیت مبتنی بر سناریو و رتبه‌بندی استراتژی‌ها در قالب یک چارچوب یکپارچه تصمیم‌گیری

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اگرچه پژوهش‌های متعددی به بررسی ابعاد پایداری، تاب‌آوری، چابکی، اقتصاد چرخشی و یا توسعه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در حوزه مدیریت پسماند پرداخته‌اند، اما اغلب این مطالعات تنها بر یک یا چند بعدازاین مفاهیم تمرکز داشته و کمتر پژوهشی به ارزیابی همزمان تمامی این ابعاد در قالب یک چارچوب تصمیم‌گیری یکپارچه پرداخته است. همچنین، در مطالعات موجود، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره توسعه‌یافته برای وزن‌دهی معیارها و اولویت‌بندی راهبردها در شرایط عدم قطعیت با محدودیت‌هایی همراه بوده است. بر این اساس، پژوهش حاضر با تلفیق همزمان ابعاد پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی، توسعه و به‌کارگیری روش بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک برای تعیین اوزان معیارها و ترکیب آن با روش ویکور تصادفی به‌منظور اولویت‌بندی راهبردهای پیاده‌سازی، تلاش می‌کند بخشی از خلأهای موجود در ادبیات را پوشش داده و چارچوبی جامع و قابل اتکا برای حمایت از تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت ارائه دهد.

۲-۴- شکاف تحقیق

با وجود رشد قابل توجه پژوهش‌ها در حوزه مدیریت پسماند و اقتصاد چرخشی، بسیاری از مطالعات پیشین عمدتاً بر بهبود کارایی بازیافت، کاهش پسماند یا طراحی شبکه‌های لجستیکی تمرکز داشته‌اند و کمتر به رویکردی جامع برای ارزیابی همزمان ابعاد مختلف عملکرد سیستم‌ها پرداخته‌اند. در سال‌های اخیر، توجه به ابعاد پایداری در سیستم‌های مدیریت پسماند افزایش‌یافته است؛ بااین‌حال، در بسیاری از مطالعات، ابعاد مهمی مانند تاب‌آوری در برابر عدم‌قطعیت‌ها و چابکی در پاسخگویی سریع به تغییرات محیطی به‌صورت یکپارچه مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. از سوی دیگر، اغلب پژوهش‌های موجود به ارائه مدل‌های مفهومی یا بهینه‌سازی ساختاری پرداخته و کمتر به ارزیابی و اولویت‌بندی استراتژی‌های اجرایی برای پیاده‌سازی همزمان این ابعاد در چارچوب اقتصاد چرخشی توجه کرده‌اند. علاوه‌بر این، در شرایط واقعی مدیریت پسماند، تصمیم‌گیری‌ها معمولاً با عدم‌قطعیت و اطلاعات مبهم همراه است، درحالی‌که بسیاری از روش‌های مورد استفاده در مطالعات پیشین قطعی بوده و توانایی کافی برای لحاظ‌کردن این عدم‌قطعیت‌ها را ندارند. به همین دلیل، استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر عدم‌قطعیت می‌تواند دیدگاه دقیق‌تری در ارزیابی گزینه‌های راهبردی فراهم کند. در این راستا، تاکنون کاربرد همزمان روش بهترین–بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک برای تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها و روش ویکور تصادفی برای اولویت‌بندی استراتژی‌ها در حوزه مدیریت پسماند مبتنی بر اقتصاد چرخشی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ازاین‌رو، پژوهش حاضر تلاش می‌کند با پر کردن این شکاف، چارچوبی نظام‌مند برای ارزیابی و اولویت‌بندی استراتژی‌های پیاده‌سازی ابعاد پایداری، تاب‌آوری و چابکی در یک سیستم مدیریت پسماند مبتنی بر اقتصاد چرخشی ارائه دهد.

۳- معیارها، گزینه‌ها و روش تحقیق

۳-۱- معیارها و زیرمعیارها

در این بخش، معیارهای و زیرمعیارهای مساله تحقیق بر اساس منابع علمی و نظرات متخصصان در حوزه مدیریت پسماند شناسایی معرفی می‌شوند. در این راستا، جدول ۲ نشان‌دهنده زیرمعیارهای پایداری، جدول ۳ نشان‌دهنده زیرمعیارهای تاب‌آوری، جدول ۴ بیانگر زیرمعیارهای چابکی بوده و در انتها نیز جدول ۵ نشان‌دهنده زیرمعیارهای جنبه اقتصاد چرخشی می‌باشد.

جدول ۲ زیرمعیارهای پایداری

معیار	زیرمعیار	تعریف	منابع
پایداری	هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه اولیه برای راه‌اندازی یک سیستم یا فرآیند	[۴۵-۴۷]
	آلودگی آب	ورود آلاینده‌های به منابع آب	[۴۷-۵۰]
	انتشار گاز گلخانه‌ای	تولید گازهایی مانند دی‌اکسید کربن و متان تولیدشده از فرآیندهای مدیریت پسماند (مانند دفن زباله یا سوزاندن)	[۴۵-۴۶]، [۵۰-۵۲]
	اشتغال‌زایی	افزایش فرصت‌های شغلی در یک بخش اقتصادی	[۵۳]، [۵۴]
	بهداشت عمومی	اقدامات لازم برای حفظ و ارتقای سلامت عمومی	[۵۵]، [۵۶]

جدول ۳ زیرمعیارهای تاب‌آوری

معیار	زیرمعیار	تعریف	منابع
تاب‌آوری	استواری	توانایی یک سیستم برای حفظ عملکرد خود در مواجهه با چالش‌ها و بحران‌ها	[۵۰]، [۵۷-۶۰]
	ظرفیت مازاد	ظرفیت افزایش توان عملیاتی برای پاسخگویی به تقاضاهای بالاتر	[۵۹]، [۶۱]
	قابلیت اطمینان	قابلیت سیستم مستقر شده در کارکرد درست در گذر زمان	[۶۱]
	تنوع در کاربردهای زباله	پتانسیل استفاده از ضایعات در کاربردهای مختلف، کاهش وابستگی به یک مسیر بازیافت واحد	[۶۲]، [۶۳]
	قابلیت همکاری با سایر سیستم‌ها	توانایی هماهنگی با سایر سیستم‌ها مانند خدمات اورژانس یا مراقبت‌های بهداشتی در شرایط بحرانی	[۶۴]

جدول ۴ زیرمعیارهای چابکی

معیار	زیرمعیار	تعریف	منابع
چابکی	سازگاری با فناوری‌های روز	توانایی سازگاری با فناوری‌های جدید برای حفظ و افزایش عملکرد سیستم	[۶۵-۶۸]
	تنوع در روش‌های پردازش زباله	قابلیت اعمال روش‌های مختلف برای مدیریت و پردازش پسماند	[۶۷]
	انعطاف‌پذیری عملیاتی	انعطاف‌پذیری سیستم مدیریت پسماند برای تطبیق با تغییرات در الگوهای تولید پسماند یا سایر شرایط عملیاتی ضمن حفظ ارائه خدمات کارآمد و مؤثر	[۴۵]، [۴۶]
	سرعت سازگاری با تغییرات	قابلیت انطباق با تغییرات بدون کاهش عملکرد	[۶۶]، [۶۸-۷۰]
	انعطاف‌پذیری در قوانین و مقررات	توانایی هماهنگی سریع با تغییرات در قوانین و استانداردهای زیست‌محیطی	[۶۵]، [۶۸]، [۷۱]

جدول ۵ زیرمعیارهای اقتصاد چرخشی

معیار	زیرمعیار	تعریف	منابع
اقتصاد چرخشی	کاهش ضایعات	کاهش تولید ضایعات از طریق طراحی و بهینه‌سازی فرآیند	[۷۲]، [۶۸]، [۶۴]، [۵۵]
	3R	استفاده مجدد (Reuse)، بازیافت (Recycle) و بازیابی (Recover)	[۷۲-۷۴]، [۵۲]
	تکنولوزی سبز	استفاده از فناوری‌های پایدار برای کاهش ضایعات و آلودگی محیط‌زیست	[۷۵-۷۷]
	مصرف انرژی	کنترل مصرف انرژی در فرآیندهای تولید و بازیافت برای افزایش پایداری	[۷۸]
	افزایش نرخ بازیافت	افزایش نسبت مواد بازیافتی به‌کل زباله‌های تولیدی	[۶۸]

۳-۲- استراتژی‌ها

پس از شناسایی معیارهای اصلی مساله تحقیق، در ادامه، جدول ۶ استراتژی‌های مساله تحقیق را نشان می‌دهد که با توجه به ادبیات تحقیق و همچنین نظر کارشناسان استخراج‌شده‌اند. استراتژی‌های مورد بررسی در این پژوهش در دو مرحله شناسایی و انتخاب شده‌اند. در مرحله اول، با مرور جامع ادبیات پژوهش در حوزه مدیریت پسماند، اقتصاد چرخشی و ابعاد پایداری، تاب‌آوری و چابکی، مجموعه‌ای از استراتژی‌های بالقوه و موجود استخراج گردید. در مرحله دوم، استراتژی‌های شناسایی‌شده در قالب پرسشنامه در اختیار خبرگان حوزه مدیریت پسماند قرار گرفت و از آن‌ها خواسته شد تا با توجه به معیارهایی نظیر «ارتباط مستقیم با ابعاد چهارگانه پژوهش»، «قابلیت اجرایی در سیستم‌های مدیریت پسماند» و «اهمیت عملیاتی»، مهم‌ترین استراتژی‌ها را برای ارزیابی در این تحقیق انتخاب نمایند. در نهایت، بر اساس نظرات خبرگان، چهار استراتژی که بیشترین امتیاز را کسب نمودند، به‌عنوان استراتژی‌های نهایی پژوهش تعیین گردیدند. جدول ۵، این استراتژی‌ها را به همراه منابع مرتبط با هر یک نشان می‌دهد.

جدول ۶ استراتژی‌های مساله تحقیق

استراتژی	تعریف	منابع
استفاده از تکنولوژی پیشرفته در سیستم جمع‌آوری پسماند	استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای تبدیل پسماند به محصولات با ارزش و کاهش آلودگی محیط‌زیست	[۳۲]
استفاده از سیستم‌های هوشمند به منظور فرآوری پسماندهای جمع‌آوری‌شده	استقرار سیستم‌های مدرن و هوشمند به‌منظور برخورد با پسماندهای جمع‌آوری‌شده جهت افزایش نرخ بازیافت، بازیابی، استفاده مجدد و غیره	[۷۹]
همکاری و تبادل اطلاعات	ایجاد شبکه‌های اطلاعاتی بین نقاط تولید پسماند، صنایع فرآوری و نهادهای دولتی برای تسهیل مدیریت منابع و بهینه‌سازی استفاده از منابع	[۸۱]، [۸۰]
مدیریت پسماند غیرمتمرکز	ایجاد سیستم‌های مدیریت پسماند غیرمتمرکز در مناطق تولید پسماند برای کاهش وابستگی به سیستم‌های متمرکز و افزایش انعطاف‌پذیری در مواقع بحران	[۸۲]، [۷۹]، [۶۴]

۳-۳- روش بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک

این بخش به ارائه روش مورد استفاده در این پژوهش جهت محاسبه وزن معیارها و زیر معیارها اختصاص داده شده است. در این زمینه، با توجه به این امر که وجود عدم قطعیت بخش جدای نشدنی مسائل مرتبط با لجستیک و مدیریت پسماند می‌باشد، این پژوهش مساله تحقیق را تحت عدم قطعیت مورد ارزیابی قرار داده و جهت محاسبه وزن معیارها نیز یک روش جدید ارائه کرده است. در این زمینه، اخیراً، نیری و همکاران [۲۲]، نسخه جدیدی از روش بهترین-بدترین به نام روش بهترین-بدترین تصادفی را ارائه کرده‌اند که دارای مزیت‌های فراوانی مانند (الف) افزایش قابلیت اطمینان روش در مقایسه با روش‌های مشابه مانند فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، (ب) کاهش بار محاسباتی، (ج) مقابله با عدم قطعیت در فضای تصادفی و (د) قابلیت آسان جهت ترکیب با سایر روش‌ها می‌باشد. در این زمینه، علت اصلی بررسی مساله تحت عدم قطعیت از نوع تصادفی این است سایر روش‌های توسعه‌یافته جهت مقابله با عدم قطعیت این انعطاف را به تصمیم‌گیرندگان نمی‌دهند تا در یک مقایسه، سناریوهای مختلف را در نظر گرفته و اعداد دلخواه به آن تخصیص دهد. با ذکر یک مثال نکته بیان‌شده را تبیین می‌کنیم. قبل از شروع

همه‌گیری کووید-۱۹، اگر از مدیران صنعت تجهیزات پزشکی درباره مهم‌ترین شاخص آن می‌پرسیدیم، بدون شک هزینه آن را انتخاب می‌کردند. بااین‌حال، پس از همه‌گیری ویروس کرونا که جان انسان‌ها را به‌شدت به خطر انداخت، احتمالاً شاخص‌های دیگری مانند سطح سرویس را به‌عنوان بهترین معیار انتخاب می‌کنند. در واقع، یکی از مهم‌ترین دلایلی که پس از همه‌گیری کرونا منجر به چندین مشکل بزرگ شد، نادیده گرفتن یک سناریوی بدبینانه (یعنی شروع یک ویروس ناشناخته یا خطرناک) قبل از وقوع آن بود. ازاین‌رو، توسعه یک روش مبتنی بر سناریو، می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا سناریوهای مختلف را در نظر گرفته و امتیاز هر معیار را با توجه به سناریو مربوطه بدون محدودیت طیف عددی و با مقیاس دلخواه (برای مثال یک الی نه) ارائه کنند [۲۲]. با توجه به اینکه مسائل مدیریت پسماند همواره با عدم‌قطعیت در عواملی نظیر کمیت و ترکیب پسماند، قیمت مواد و قوانین زیست‌محیطی همراه هستند، استفاده از رویکردهای قطعی نمی‌تواند پاسخگوی نیازهای تصمیم‌گیری باشد. روش بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک به‌دلیل قابلیت مدل‌سازی عدم‌قطعیت به‌صورت سناریویی (با درنظرگرفتن سناریوهای بدبینانه، محتمل و خوشبینانه)، کاهش چشمگیر بار محاسباتی در مقایسه با روش‌هایی نظیر AHP و همچنین لحاظ‌کردن معیار انحراف کل به‌عنوان تابع هدف دوم (که دقت و پایایی وزنه‌ها را افزایش می‌دهد)، برای وزندهی به معیارها در این پژوهش انتخاب شده است.

در ادامه، گام‌های پیاده‌سازی روش بهترین-بدترین بیان می‌گردد.

۱) تعیین سناریوهای مساله

۲) تعیین بهترین و بدترین معیار: در این گام، کارشناسان به اجماع رسیده و بهترین و بدترین معیار را انتخاب می‌کنند

۳) تشکیل بردارهای مقایسات زوجی در هر سناریو: در این گام، بردار مقایسه بهترین معیار با سایر معیارها که به‌صورت $A_{Bs} = (a_{B1s}, a_{B2s}, \dots, a_{Bns})$ نشان داده می‌شود و بردار مقایسه زوجی سایر معیارها با بدترین معیار که به صورت $A_{Ws} = (a_{1Ws}, a_{2Ws}, \dots, a_{nWs})^T$ نشان داد می‌شود، تشکیل می‌شوند. لازم به ذکر است که معمولاً مقایسات زوجی بر مبنای اعداد در بازه یک الی نه انجام می‌گردد

۳) محاسبه وزن نهایی معیارها با استفاده از مدل ریاضی (۱) زیر که در آن ξ_s برابر با میزان نرخ ناسازگاری (CR)[1] تحت سناریو s بوده و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد مطلوب‌تر است. همچنین، w_{js} نشان‌دهنده وزن معیار j تحت سناریو s بوده و w_j وزن نهایی معیار می‌باشد.

ساختار ریاضی این روش به شرح مدل (۱) می‌باشد.

پارامترها	
P_s	احتمال رخداد سناریو s
a_{Bjs}	مقایسه زوجی بهترین معیار و معیار j تحت سناریو s
a_{jWs}	مقایسه زوجی معیار j و بدترین معیار تحت سناریو s
متغیرها	
ξ_s	میزان نرخ ناسازگاری در سناریو s
ws_{js}	وزن معیار j در سناریو s
w_j	وزن نهایی معیار j

[1] Consistency Ratio

$$
\begin{aligned}
& Min \sum_{s} P_s . \xi_s \\
& \left| ws_{Bs} - a_{Bjs} . ws_{js} \right| \le \xi_s && \forall j, s \\
& \left| ws_{js} - a_{jWs} . ws_{Ws} \right| \le \xi_s && \forall j, s \\
& \sum_{j} ws_{js} = 1 && \forall s \\
& w_j = \sum_{s} P_s . ws_{js} && \forall j \\
& ws_{js}, w_j \ge 0 && \forall j, s
\end{aligned}
\qquad (۱)
$$

با وجود مزایای بیان شده برای این روش، روش مذکور همچنان جای بهبود دارد. در این راستا، یکی از معیارهای اساسی برای بررسی عملکرد روش‌های تصمیم‌گیری معیار انحراف کل است که تعریف آن فاصله اقلیدسی بین نسبت وزن‌ها و مقایسه زوجی مربوط به آنها است. این معیار نیز یک معیار هرچه کوچکتر بهتر است که بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$
TD = \sum_{i} \sum_{j} (a_{ij} - \frac{w_i}{w_j})^2 \qquad (۲)
$$

با توجه به نقش حیاتی معیار انحراف کل، این تحقیق با هدف گنجاندن آن در روش بهترین-بدترین تصادفی سنتی با اضافه کردن یک تابع هدف لکسیکوگرافیک تعریف کرده است. بر اساس مباحث فوق، بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک را می‌توان بر اساس مدل (۳) فرموله کرد:

$$
\begin{aligned}
& Lex\ min \left\{ \sum_{s} P_s . \xi_s , \sum_{s} P_s . TD_s \right\} \\
& \left| ws_{Bs} - a_{Bjs} . ws_{js} \right| \le \xi_s && \forall j, s \\
& \left| ws_{js} - a_{jWs} . ws_{Ws} \right| \le \xi_s && \forall j, s \\
& \sum_{j} ws_{js} = 1 && \forall s \\
& w_j = \sum_{s} P_s . ws_{js} && \forall j \\
& TD_s = \sum_{j} (a_{Bjs} - \frac{w_{Bs}}{w_{js}})^2 + \sum_{j} (a_{jWs} - \frac{w_{js}}{w_{Ws}})^2 && \forall s \\
& ws_{js}, w_j \ge 0 && \forall j, s
\end{aligned}
\qquad (۳)
$$

۳-۴- روش ویکور تصادفی

روش ویکور به‌عنوان یک تکنیک تصمیم‌گیری چندشاخصه مبتنی بر راه‌حل توافقی شناخته می‌شود. این رویکرد با هدف حل مسائل چندمعیاره و دستیابی به مطلوب‌ترین گزینه ممکن توسعه‌یافته است. کاربرد اصلی این روش در اولویت‌بندی و انتخاب گزینه‌ها با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از شاخص‌های متنوع است. فلسفه اصلی ویکور، نزدیک‌سازی هر چه بیشتر گزینه‌ها به جواب ایده‌آل در تمامی شاخص‌ها بوده و رتبه‌بندی نهایی نیز بر همین اساس صورت می‌گیرد. انواع مختلفی از این روش تاکنون معرفی شده که از آن جمله می‌توان به نسخه‌های فازی، خاکستری و سایر نمونه‌های مشابه اشاره کرد. در پژوهش پیش‌رو، از نسخه تصادفی روش ویکور بهره گرفته شده که به‌تازگی توسط نوروزی و همکاران [۸۳]، معرفی گردیده است. در این نسخه، سناریوهای متعددی تعریف می‌شوند که هریک وزن مشخصی داشته و وزن نهایی گزینه‌ها بر اساس این سناریوها تعیین می‌گردد.

به‌بیان‌دیگر، انتخاب گزینه برتر با در نظر گرفتن شرایط و سناریوهای گوناگون پیش رو انجام‌شده و از این طریق به واقعیت‌های دنیای بیرونی نزدیک‌تر می‌شود. روش ویکور تصادفی به‌دلیل هماهنگی با رویکرد تصادفی در مرحله وزندهی و قابلیت درنظرگرفتن سناریوهای مختلف در فرآیند رتبه‌بندی، برای اولویت‌بندی استراتژی‌ها برگزیده شده است. مهم‌ترین مزیت این روش در مقایسه با سایر تکنیک‌های رتبه‌بندی نظیر تاپسیس، ماهیت حل توافقی آن است که به‌جای صرفاً نزدیک‌سازی به جواب ایده‌آل، به‌دنبال گزینه‌ای با کمترین میزان پشیمانی و بیشترین سودمندی جمعی می‌گردد. همچنین وجود شاخص ترکیبی Q و شرایط شفاف تصمیم‌گیری (شامل دو شرط مزیت قابل‌قبول و ثبات)، آن را به ابزاری مناسب برای تصمیم‌گیرندگان حوزه مدیریت پسماند تبدیل کرده است.

جهت آشنایی بیشتر با این روش و مشاهده مراحل آن، به خوانندگان توصیه می‌شود که مقاله نوروزی و همکاران [۸۳] را مطالعه کنند.

۴- نتایج محاسباتی

۴-۱- وزن معیارها و زیرمعیارها

در این بخش، خروجی روش بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک ارائه می‌گردد. در این زمینه، در این تحقیق جهت مقایسات زوجی، ۳ سناریو مختلف به شرح زیر در نظر گرفته شده‌است: سناریو اول (S1)، نشان‌دهنده شرایط خوش‌بینانه می‌باشد. از سوی دیگر، سناریو دوم (S2) بیانگر سناریو محتمل بوده و در انتها نیز سناریو سوم (S3) نشان‌دهنده حالت بدبینانه می‌باشد. لازم به ذکر است که احتمال رخداد آنها به ترتیب برابر با ۰.۲۵، ۰.۵ و ۰.۲۵ در نظر گرفته‌شده است. مقایسات زوجی توسط کارشناسان مربوطه انجام‌شده و سپس روش بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک پیاده‌سازی گردیده است. نتایج در جدول ۷ نشان داده شده است. بر اساس این جدول، معیارهای بهداشت عمومی، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، 3R، انعطاف‌پذیری عملیاتی، استواری، افزایش نرخ بازیافت، قابلیت اطمینان و سازگاری با فناوری‌های روز مهمترین معیارهای برای مساله تحقیق می‌باشند. نتایج وزن‌دهی معیارها نشان می‌دهد که خبرگان، اهمیت نسبتاً متعادلی برای چهار بعد اصلی پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی قائل بوده‌اند. این موضوع بیانگر آن است که دستیابی به یک سیستم مدیریت پسماند کارآمد مستلزم ایجاد توازن میان ابعاد مختلف عملکردی است و تمرکز صرف بر یک بعد نمی‌تواند پاسخگوی پیچیدگی‌های موجود باشد. همچنین، اختلاف نسبتاً محدود میان اوزان معیارها نشان می‌دهد که تمامی ابعاد موردبررسی نقش مؤثری در موفقیت راهبردهای پیاده‌سازی داشته و حذف یا کم‌توجهی به هر یک از آن‌ها می‌تواند بر عملکرد کلی سیستم تأثیر منفی بگذارد. این یافته با روند مطالعات اخیر در حوزه مدیریت پایدار پسماند و اقتصاد چرخشی که بر اتخاذ رویکردهای چندبعدی تأکید دارند، همخوانی دارد.

جدول ۷ نتایج حاصل از محاسبه وزن معیارها و زیرمعیارها

معیار	وزن معیار	زیرمعیار	وزن اولیه زیرمعیار	وزن نهایی زیر معیار (وزن معیار × وزن اولیه زیرمعیار)
پایداری	۰.۲۵۰۲	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	۰.۲۰۳۷	۰.۰۵۰۹۶۶
		آلودگی آب	۰.۱۹۸۵	۰.۰۴۹۶۶۵
		انتشار گاز گلخانه‌ای	۰.۱۹۸۵	۰.۰۴۹۶۶۵
		اشتغال‌زایی	۰.۱۹۵۳	۰.۰۴۸۸۶۴
		بهداشت عمومی	۰.۲۰۴	۰.۰۵۱۰۴۱
تاب‌آوری	۰.۲۴۹۸	استواری	۰.۲۰۳۶	۰.۰۵۰۸۵۹
		ظرفیت مازاد	۰.۱۹۸۵	۰.۰۴۹۵۸۵
		قابلیت اطمینان	۰.۲۰۳	۰.۰۵۰۷۰۹
		تنوع در کاربردهای زباله	۰.۲۰۰۴	۰.۰۵۰۰۶۰
		قابلیت همکاری با سایر سیستم‌ها	۰.۱۹۴۵	۰.۰۴۸۵۸۶

معیار	وزن معیار	زیرمعیار	وزن اولیه زیرمعیار	وزن نهایی زیر معیار (وزن معیار × وزن اولیه زیرمعیار)
چابکی	۰.۲۴۹۶	سازگاری با فناوری‌های روز	۰.۲۰۲۷	۰.۰۵۰۵۹۴
		تنوع در روش‌های پردازش زباله	۰.۲۰۰۶	۰.۰۵۰۰۷۰
		انعطاف‌پذیری عملیاتی	۰.۲۰۳۹	۰.۰۵۰۸۹۳
		سرعت سازگاری با تغییرات	۰.۱۹۴۸	۰.۰۴۸۶۲۳
		انعطاف‌پذیری در قوانین و مقررات	۰.۱۹۸	۰.۰۴۹۴۲۱
اقتصاد چرخشی	۰.۲۵۰۴	کاهش ضایعات	۰.۱۹۶۲	۰.۰۴۹۱۲۸
		3R	۰.۲۰۳۵	۰.۰۵۰۹۵۶
		تکنولوزی سبز	۰.۱۹۶۲	۰.۰۴۹۱۲۸
		مصرف انرژی	۰.۲۰۱	۰.۰۵۰۳۳۰
		افزایش نرخ بازیافت	۰.۲۰۳۱	۰.۰۵۰۸۵۶

۴-۲- رتبه‌بندی گزینه‌ها

این بخش به ارائه نتایج به دست آمده از روش ویکور تصادفی تخصیص داده شده‌است. لازم به ذکر است که این تحقیق سه سناریو به‌صورت بدبینانه، محتمل و خوشبینانه در نظر گرفته است (با الهام از ادبیات تحقیق و نظر کارشناسان) که در آن احتمال رخداد آنها به ترتیب برابر با ۰.۲۵، ۰.۵ و ۰.۲۵ در نظر گرفته‌شده است. در این زمینه، ماتریس تصمیم با کمک کارشناسان تشکیل شده و سپس روش مذکور در نرم‌افزار اکسل پیاده‌سازی گردیده است. با توجه به حجم زیاد ماتریس تصمیم، از آوردن آن در این تحقیق خودداری شده است. جداول ۸ و ۹ مقادیر شاخص‌های SS و R را نشان می‌دهند. در انتها نیز جدول ۱۰ شاخص Q و رتبه‌بندی استراتژی‌ها را نشان می‌دهد. مطابق با این جدول، استراتژی‌های استفاده از سیستم‌های هوشمند به‌منظور فرآوری پسماندهای جمع‌آوری‌شده و استفاده از تکنولوژی پیشرفته در سیستم جمع‌آوری پسماند به‌عنوان بهترین موارد انتخاب شده‌اند. نتایج رتبه‌بندی راهبردها نشان می‌دهد که راهبردهای برتر عمدتاً بر توسعه زیرساخت‌های فناورانه، ارتقای هماهنگی میان ذی‌نفعان و بهبود مدیریت اطلاعات تمرکز دارند. این موضوع نشان می‌دهد که تحقق همزمان اهداف پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی، بیش از هر چیز نیازمند ایجاد بسترهای مناسب برای تبادل اطلاعات، افزایش قابلیت تصمیم‌گیری و ارتقای هماهنگی در فرآیندهای مدیریت پسماند است. در مقابل، راهبردهایی که اولویت پایین‌تری کسب کرده‌اند، اگرچه در بهبود عملکرد سیستم مؤثر هستند، اما تأثیر آن‌ها در کوتاه‌مدت نسبت به راهبردهای زیرساختی کمتر ارزیابی‌شده است. از دیدگاه مدیریتی، این نتایج می‌تواند به سیاست‌گذاران و مدیران کمک کند تا منابع محدود را ابتدا به راهبردهایی اختصاص دهند که بیشترین تأثیر را بر عملکرد کلی سیستم دارند.

جدول ۸ مقدار شاخص SS

استراتژی	Ljs		SSj
استفاده از تکنولوژی پیشرفته در سیستم جمع‌آوری پسماند	۸.۰۸۳	۸.۲۰۰	۸.۱۶۷	۸.۱۶۲۵
استفاده از سیستم‌های هوشمند به‌منظور فرآوری پسماندهای جمع‌آوری‌شده	۳.۶۶۷	۳.۷۵۰	۳.۷۵۰	۳.۷۲۹۱۷
همکاری و تبادل اطلاعات	۱۴.۱۶۷	۱۴.۴۱۷	۱۴.۴۱۷	۱۴.۳۵۴۲
مدیریت پسماند غیرمتمرکز	۱۶.۷۵۰	۱۷.۲۱۷	۱۷.۰۸۳	۱۷.۰۶۶۷

جدول ۹ مقدار شاخص R

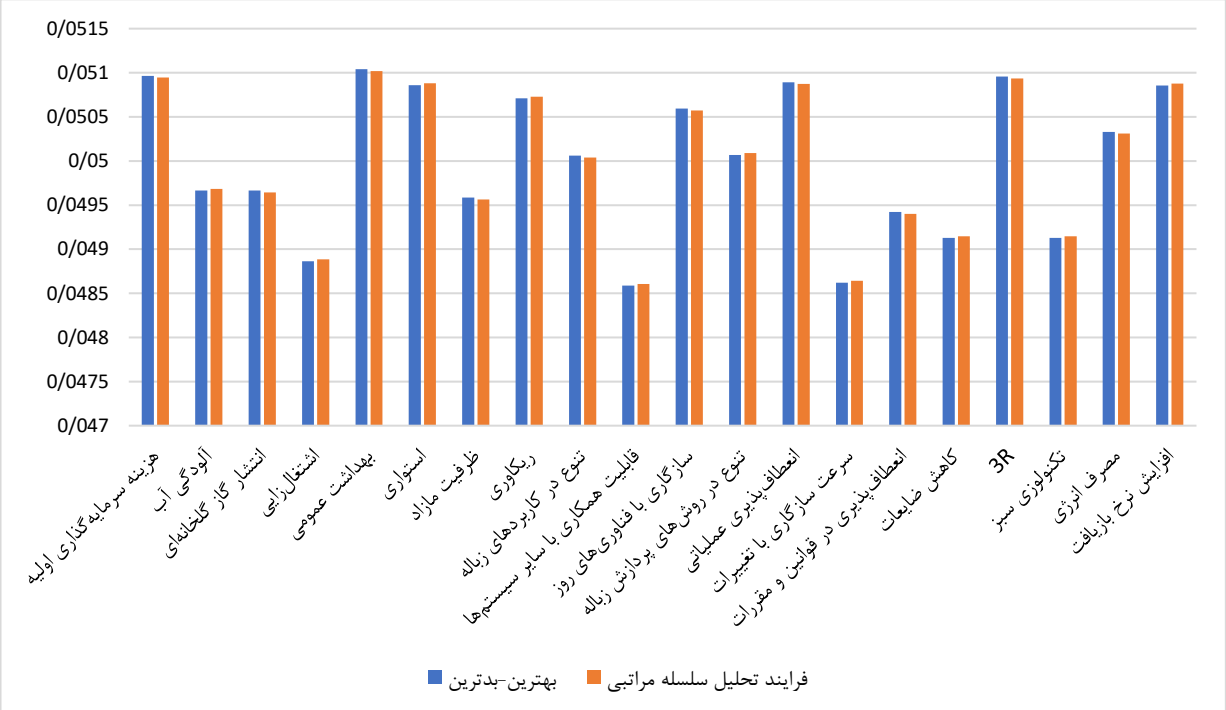
استراتژی		Tjs		Rj
استفاده از تکنولوژی پیشرفته در سیستم جمع‌آوری پسماند	۰.۴۲	۰.۵۴	۰.۷۰	۰.۵۴۶۶۷
استفاده از سیستم‌های هوشمند به منظور فرآوری پسماندهای جمع‌آوری شده	۴۵	۰.۵۶	۰.۷۲	۰.۵۷۴۱۷
همکاری و تبادل اطلاعات	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱
مدیریت پسماند غیرمتمرکز	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱

جدول ۱۰ مقدار شاخص Q و رتبه‌بندی استراتژی‌ها

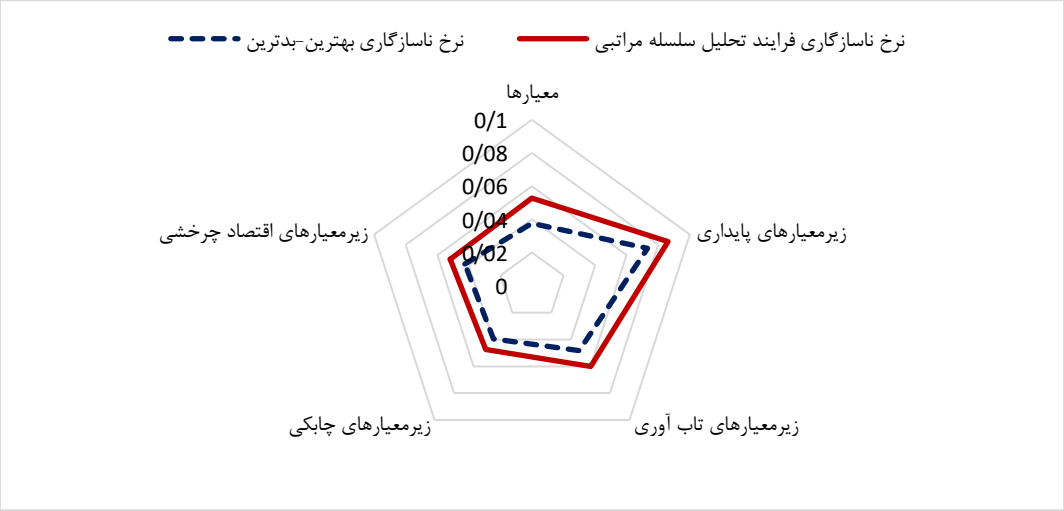
استراتژی	Qj	رتبه
استفاده از تکنولوژی پیشرفته در سیستم جمع‌آوری پسماند	۰.۱۶۶۱۹۸	۲
استفاده از سیستم‌های هوشمند به منظور فرآوری پسماندهای جمع‌آوری شده	۰.۰۳۰۳۳۶	۱
همکاری و تبادل اطلاعات	۰.۸۹۸۳۱۳	۳
مدیریت پسماند غیرمتمرکز	۱	۴

۴-۳- بررسی عملکرد روش بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک

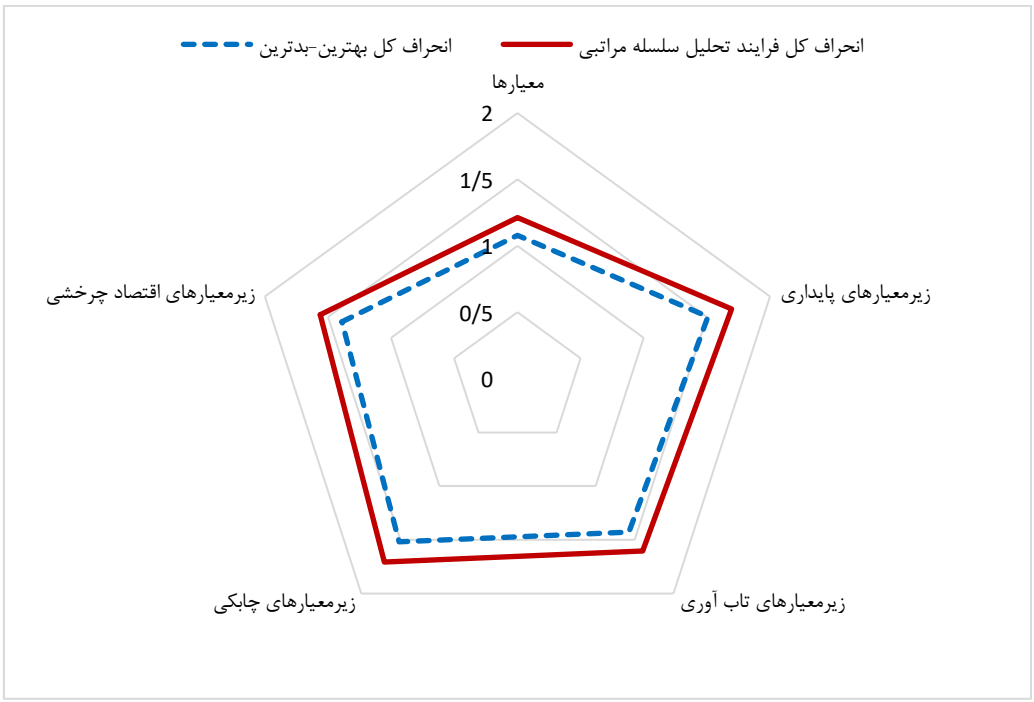
در این بخش، عملکرد روش توسعه‌یافته (روش بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ابتدا وزن زیرمعیارها به‌دست‌آمده توسط این روش با وزن زیرمعیارهای محاسبه‌شده با روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. شکل ۱ نشان‌دهنده این مقایسه است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، وزن‌های به‌دست‌آمده تقریباً نزدیک به هم هستند که نشان‌دهنده اعتبار و صحت نتایج به‌دست‌آمده است. از سوی دیگر، شکل ۲ و شکل ۳ به ترتیب مقدار نرخ ناسازگارش و انحراف کل برای هر یک از این روش‌ها را نشان می‌دهند که در هر دو معیار در تمامی مراحل روش توسعه داده‌شده در این تحقیق عملکرد بهتری داشته است که نشان از قابلیت اطمینان آن دارد.



شکل ۱ مقایسه وزن معیارها توسط روش‌های مختلف



شکل ۲ مقایسه میزان نرخ ناسازگاری در مراحل مختلف به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف



شکل ۳ مقایسه میزان انحراف کل در مراحل مختلف به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف

۴-۴- بررسی عملکرد ویکور تصادفی

به‌منظور بررسی عملکرد روش مورد استفاده جهت رتبه‌بندی استراتژی‌ها، نتایج این روش با رویکردهای ویکور فازی، تاپسیس تصادفی و تاپسیس فازی مورد مقایسه قرار گرفته است. در این راستا، جدول ۱۱ مقایسه خروجی روش‌های مذکور را نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول قابل‌مشاهده است، در میان پاسخ‌ها خصوصاً استراتژی برتر شباهت وجود دارد که صحت و اعتبار نتایج به‌دست‌آمده را تأیید می‌کند.

جدول ۱۱ مقایسه رتبه‌بندی گزینه‌ها در روش‌های مختلف

استراتژی	ویکور تصادفی	ویکور فازی	تاپسیس تصادفی	تاپسیس فازی
استفاده از تکنولوژی پیشرفته در سیستم جمع‌آوری پسماند	۲	۲	۲	۲
استفاده از سیستم‌های هوشمند به منظور فرآوری پسماندهای جمع‌آوری‌شده	۱	۱	۱	۱
همکاری و تبادل اطلاعات	۳	۴	۳	۴
مدیریت پسماند غیرمتمرکز	۴	۳	۴	۳

۴-۵- بحث و یافته‌های تحقیق

این پژوهش به ارزیابی استراتژی‌های پیاده‌سازی ابعاد پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی در سیستم‌های مدیریت پسماند می‌پردازد. با استفاده از رویکرد بهترین–بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک برای وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارها، و رویکرد ویکور تصادفی برای اولویت‌بندی استراتژی‌ها، یافته‌های کلیدی به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که چهار معیار اصلی پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی، باوجود وزن کمی بالاتر برای اقتصاد چرخشی، از اهمیت نسبتاً متعادلی در ارزیابی استراتژی‌های مدیریت پسماند برخوردارند. این امر بر ضرورت یک رویکرد جامع برای تضمین پایداری و کارایی بلندمدت سیستم تأکید می‌کند. در میان زیرمعیارها، بهداشت عمومی به‌عنوان مهم‌ترین عامل شناخته شد که نشان‌دهنده اولویت حفظ سلامت جامعه است. همچنین هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، 3R و انعطاف‌پذیری عملیاتی از وزن بالایی برخوردار بودند، که توجه به کارایی اقتصادی، ارتقای بازیافت و قابلیت انطباق سیستم را نشان می‌دهد. در مقابل، زیرمعیارهایی مانند قابلیت همکاری با سایر سیستم‌ها، سرعت سازگاری با تغییرات و اشتغال‌زایی از کمترین اهمیت برخوردارند که نشان می‌دهد تمرکز تصمیم‌گیرندگان بیشتر بر کارایی عملیاتی و پیامدهای مستقیم زیست‌محیطی و اجتماعی بوده است. در رتبه‌بندی استراتژی‌ها، «استفاده از سیستم‌های هوشمند برای فرآوری پسماندهای جمع‌آوری‌شده» برترین گزینه شناخته شد که حاکی از نقش حیاتی فناوری‌های هوشمند در افزایش کارایی است. «استفاده از تکنولوژی پیشرفته در سیستم جمع‌آوری پسماند» و «همکاری و تبادل اطلاعات» به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند و اهمیت فناوری‌های نوین و هماهنگی بین‌بخشی را تأیید می‌کنند. در مقابل، «مدیریت پسماند غیرمتمرکز» کمترین اولویت را کسب کرد. برای اعتبارسنجی روش بهترین–بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک، وزن‌های زیرمعیارهای به‌دست‌آمده از این روش با نتایج حاصل از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی مقایسه شد. نزدیکی این مقادیر، اعتبار نتایج را تأیید می‌کند؛ ضمن اینکه مقایسه نرخ ناسازگاری و انحراف کل، برتری و قابلیت اطمینان بالاتر روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، جهت ارزیابی کارایی روش ویکور تصادفی در رتبه‌بندی استراتژی‌ها، نتایج آن با روش‌های ویکور فازی، تاپسیس تصادفی و تاپسیس فازی مقایسه شد. این مقایسه نشان‌دهنده یکسانی رتبه‌بندی با تاپسیس تصادفی و شباهت قابل توجه با سایر روش‌ها، به‌ویژه در استراتژی‌های برتر، است که صحت و اعتبار یافته‌ها را تأیید می‌کند.

۴-۶- بینش‌های مدیریتی

این پژوهش به ارزیابی استراتژی‌های پیاده‌سازی ابعاد پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی در سیستم‌های مدیریت پسماند می‌پردازد. با استفاده از رویکرد بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک برای وزندهی معیارها و زیرمعیارها، و رویکرد ویکور تصادفی برای اولویت‌بندی استراتژی‌ها، یافته‌های کلیدی به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که چهار معیار اصلی پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی، با وجود وزن کمی بالاتر برای اقتصاد چرخشی، از اهمیت نسبتاً متعادلی در ارزیابی استراتژی‌های مدیریت پسماند برخوردارند. در میان زیرمعیارها، بهداشت عمومی به‌عنوان مهم‌ترین عامل شناخته شد که نشان‌دهنده اولویت بالای حفظ سلامت جامعه در تصمیم‌گیری‌های مدیریت پسماند است. همچنین هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، انعطاف‌پذیری عملیاتی و سازگاری با 3R از وزن بالایی برخوردار بودند. در مقابل، زیرمعیارهایی مانند قابلیت همکاری با سایر سیستم‌ها و اشتغال‌زایی از کمترین اهمیت برخوردارند که نشان می‌دهد تمرکز تصمیم‌گیرندگان بیشتر بر کارایی عملیاتی و پیامدهای مستقیم زیست‌محیطی و بهداشتی بوده است. در رتبه‌بندی استراتژی‌ها، »استفاده از سیستم‌های هوشمند برای

فرآوری پسماندهای جمع‌آوری‌شده با شاخص Q=0.030 برترین گزینه شناخته شد و »استفاده از تکنولوژی پیشرفته در سیستم جمع‌آوری پسماند باQ=0.166 و همکاری و تبادل اطلاعات با Q=0.898 در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

از منظر مدیریتی، وزن بالای معیار بهداشت عمومی (۰.۰۵۱۰) در مقایسه با سایر زیرمعیارها، پیام روشنی برای مدیران دارد که هرگونه سرمایه‌گذاری در سیستم‌های مدیریت پسماند باید با ارزیابی دقیق تأثیر آن بر سلامت جامعه همراه باشد. به‌عنوان‌مثال، انتخاب بین احداث یک کارخانه زباله‌سوز پیشرفته با فیلترهای کنترل آلودگی در مقابل یک کارخانه ساده‌تر با هزینه کمتر، با توجه به وزن بالای بهداشت عمومی، باید به‌نفع گزینه اول (با وجود هزینه بالاتر) تصمیم‌گیری شود. همچنین، وزن پایین زیرمعیار اشتغال‌زایی (۰.۰۴۸۹) نشان می‌دهد که در کوتاه‌مدت، سیاست‌گذاران نباید ایجاد اشتغال را به‌عنوان هدف اولیه سیستم‌های مدیریت پسماند دنبال کنند، چرا که این رویکرد ممکن است به انتخاب راه‌حل‌های پرهزینه و ناکارآمدی منجر شود که صرفاً به‌دلیل اشتغال‌زایی بالا انتخاب شده‌اند. به‌جای آن، مدیران باید به‌دنبال راه‌حل‌هایی با بهره‌وری بالا باشند که به‌طور طبیعی و در بلندمدت، از طریق توسعه صنایع بازیافت و فناوری‌های سبز، زمینه‌های اشتغال پایدار را نیز فراهم می‌کنند.

مقایسه شاخص‌های سودمندی (SS) و تأسف (R) در جدول‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهد که استراتژی‌های اول و دوم (فناوری پیشرفته و سیستم‌های هوشمند) از نظر سودمندی عملکرد بسیار بهتری نسبت به دو استراتژی دیگر دارند، اما استراتژی اول (R=0.546)از نظر شاخص تأسف اندکی از استراتژی دوم (R=0.574) بهتر است. این تفاوت به مدیران کمک می‌کند تا در شرایطی که ریسک‌پذیری کمتری دارند (یعنی نمی‌خواهند گزینه‌ای را انتخاب کنند که در بدترین سناریو، عملکرد بسیار ضعیفی داشته باشد)، استراتژی اول را به استراتژی دوم ترجیح دهند. برای مثال، شهرداری‌هایی که بودجه محدودی دارند و نمی‌توانند ریسک شکست پروژه را بپذیرند، بهتر است ابتدا به‌سراغ ارتقای سیستم جمع‌آوری با فناوری‌های پیشرفته بروند و سپس در گام بعدی، به‌سراغ پیاده‌سازی سیستم‌های هوشمند فرآوری بروند. همچنین ماهیت تصادفی روش‌های مورد استفاده، به مدیران این امکان را می‌دهد که سناریوهای مختلف (بدبینانه، محتمل و خوشبینانه) را در تصمیم‌گیری‌های خود لحاظ کنند. در سناریوی بدبینانه (با احتمال ۰.۲۵)، جایی که ممکن است قیمت مواد اولیه افزایش یابد یا قوانین زیست‌محیطی سخت‌تر شوند، استراتژی‌های مبتنی بر فناوری‌های پیشرفته که انعطاف‌پذیری بیشتری در مواجهه با تغییرات دارند، از اولویت بالاتری برخوردار می‌شوند و در سناریوی خوشبینانه، استراتژی همکاری و تبادل اطلاعات می‌تواند اثربخشی بیشتری داشته باشد.

رتبه اول استراتژی سیستم‌های هوشمند و رتبه دوم فناوری پیشرفته در جمع‌آوری، به‌وضوح نشان می‌دهد که آینده مدیریت پسماند به‌سمت دیجیتال‌سازی، اتوماسیون و هوشمندسازی حرکت می‌کند. مدیران باید برنامه‌های بلندمدت خود را بر این مبنا تنظیم کنند و سرمایه‌گذاری در حوزه‌هایی نظیر اینترنت‌اشیا، سنسورهای هوشمند، الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تفکیک خودکار و سیستم‌های پشتیبانی تصمیم مبتنی بر داده را در اولویت قرار دهند. به‌عنوان یک راهنمای عملی، پیشنهاد می‌شود که سازمان‌ها ابتدا یک ارزیابی از سطح آمادگی فناوری خود انجام دهند و سپس با پیاده‌سازی تدریجی و گام‌به‌گام سیستم‌های هوشمند، از هزینه‌های سنگین یک‌باره و شکست‌های احتمالی جلوگیری نمایند. علاوه بر این، روش ویکور با استفاده از ضریب v، این امکان را به مدیران می‌دهد که بر اساس اولویت‌های خود، تعادل میان حداکثرسازی سودمندی جمعی (SS) و حداقل‌سازی پشیمانی (R) را تنظیم کنند. در عمل، مدیران می‌توانند برای پروژه‌هایی با بودجه محدود و ریسک بالا، v را به‌سمت ۰ (تأکید بیشتر بر کاهش پشیمانی) و برای پروژه‌هایی با بودجه کافی و حمایت دولتی، v را به‌سمت ۱ (تأکید بیشتر بر افزایش سودمندی) تنظیم نمایند. برای مثال، در شرایط بحرانی مانند همه‌گیری‌ها یا بلایای طبیعی که سیستم‌های مدیریت پسماند تحت‌فشار شدید قرار می‌گیرند، مدیران بهتر است با تنظیم v به‌سمت ۰، استراتژی‌هایی را انتخاب کنند که کمترین ریسک شکست را داشته باشند.

برای اعتبارسنجی روش بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک، وزن‌های زیرمعیارهای به‌دست‌آمده از این روش با نتایج حاصل از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی مقایسه شد. نزدیکی این مقادیر، اعتبار نتایج را تأیید می‌کند؛ ضمن اینکه مقایسه نرخ ناسازگاری و انحراف کل، برتری و قابلیت اطمینان بالاتر روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، جهت ارزیابی کارایی روش ویکور تصادفی در رتبه‌بندی استراتژی‌ها، نتایج آن با روش‌های ویکور فازی، تاپسیس تصادفی و تاپسیس فازی مقایسه شد.

این مقایسه نشان‌دهنده یکسانی رتبه‌بندی با تاپسیس تصادفی و شباهت قابل‌توجه با سایر روش‌ها، به‌ویژه در استراتژی‌های برتر، است که صحت و اعتبار یافته‌ها را تأیید می‌کند. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد که مدیران حوزه مدیریت پسماند باید در طراحی و اجرای استراتژی‌ها توجه ویژه‌ای به حفظ بهداشت عمومی، مدیریت دقیق هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند داشته باشند و درعین‌حال، با استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری مبتنی بر سناریو، برنامه‌های مقاوم‌تری در مواجهه با عدم‌قطعیت‌های محیطی طراحی نمایند.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی استراتژی‌های یک سیستم مدیریت پسماند مبتنی بر معیارهای پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی، از رویکردهای بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک و ویکور تصادفی استفاده شده است. بدین منظور، بیست زیرمعیار درقالب چهار معیار اصلی پایداری، تاب‌آوری، چابکی و اقتصاد چرخشی برای ارزیابی چهار استراتژی شناسایی شدند. یافته‌های حاصل از روش بهترین-بدترین تصادفی لکسیکوگرافیک نشان داد که معیارهای اقتصاد چرخشی، پایداری، تاب‌آوری و چابکی به ترتیب در رتبه اول تا آخر قرار دارند. نتایج نشان می‌دهد که در ارزیابی زیرمعیارها، عواملی مانند بهداشت عمومی، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و ۳R از بیشترین اهمیت برخوردارند که بیانگر توجه تصمیم‌گیرندگان به سلامت جامعه، کارایی اقتصادی و تقویت بازیافت است. در مقابل، زیرمعیارهایی مانند قابلیت همکاری با سایر سیستم‌ها، سرعت سازگاری با تغییرات و اشتغال‌زایی کمترین اولویت را داشته‌اند. همچنین، ارزیابی استراتژی‌ها به کمک رویکرد ویکور تصادفی نشان از اولویت برتر استراتژی "استفاده از سیستم‌های هوشمند برای فرآوری پسماندهای جمع‌آوری‌شده" و کمترین اولویت استراتژی "مدیریت پسماند غیرمتمرکز" دارد که بیانگر نقش مهم فناوری‌های هوشمند در افزایش کارایی و بهبود فرآیندهای مدیریت پسماند و تمرکز تصمیم‌گیرندگان بیشتر بر راهکارهای فناورانه و هوشمندسازی سیستم مدیریت پسماند بوده است. در نهایت برای اعتبارسنجی رویکردهای پیشنهادی، خروجی‌های حاصل با نتایج سایر روش‌ها نظیر تحلیل سلسله مراتبی، ویکور فازی، تاپسیس تصادفی و تاپسیس فازی مقایسه و پایایی و اعتبار مدل پیشنهادی تأیید شد. در پژوهش‌های آتی می‌توان معیارها و شاخص‌های دیگری مانند میزان پذیرش اجتماعی طرح‌های مدیریت پسماند، سطح آگاهی و مشارکت شهروندان، میزان نوآوری و توسعه فناوری‌های بازیافت، کارایی نظام‌های نظارتی و سیاست‌های حمایتی دولت را موردبررسی قرار داد تا ارزیابی جامع‌تری از استراتژی‌ها ارائه شود. همچنین اجرای مدل در شهرها یا مناطق مختلف و مقایسه نتایج می‌تواند به بررسی قابلیت تعمیم آن کمک کند. استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره دیگر و بهره‌گیری از داده‌های واقعی و نظرات خبرگان بیشتر نیز می‌تواند دقت نتایج را افزایش دهد. در نهایت، بررسی نقش فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و سیستم‌های هوشمند در بهینه‌سازی فرآیندهای جمع‌آوری، تفکیک و بازیافت پسماند می‌تواند مسیرهای جدیدی برای توسعه سیستم‌های پایدار مدیریت پسماند فراهم کند

همانند هر پژوهش علمی، این مطالعه با محدودیت‌هایی مواجه بوده است. نخست، تعداد محدود خبرگان مشارکت‌کننده و تمرکز آن‌ها بر حوزه مدیریت پسماند شهری، ممکن است تعمیم‌پذیری نتایج را به سایر حوزه‌ها (مانند پسماندهای صنعتی یا پزشکی) محدود سازد. دوم، استفاده از داده‌های ذهنی مبتنی بر نظر خبرگان برای مقایسات زوجی، همواره با درجاتی از سوگیری همراه است که اگرچه با به‌کارگیری رویکرد تصادفی و لکسیکوگرافیک تا حد ممکن کاهش یافته، اما کاملاً قابل‌حذف نمی‌باشد. سوم، در نظر گرفتن تنها چهار استراتژی و بیست زیرمعیار، هرچند بر اساس نظر خبرگان انتخاب شده‌اند، اما ممکن است برخی استراتژی‌ها یا معیارهای مهم دیگر در این پژوهش لحاظ نشده باشند. چهارم، رویکرد تصادفی استفاده‌شده در این پژوهش، با وجود مزایای متعدد، نیازمند تعیین احتمال رخداد سناریوها توسط خبرگان است که خود می‌تواند منبع دیگری از عدم‌قطعیت باشد. با وجود این محدودیت‌ها، تلاش شده است تا با استفاده از روش‌های اعتبارسنجی متعدد و مقایسه با روش‌های مرسوم، از قابلیت اطمینان نتایج اطمینان حاصل شود.

منابع و مراجع

[1] Onuoha OB, Ogunmiloro OM. A Bi-Objective Nonlinear Mathematical Modeling for Optimal Assessment of Sustainable Waste Management. Journal of Mathematical Sciences. 2025; 289(4): 534-547. https://doi.org/10.1007/s10958-024-07260-4

[2] Yusri M, Kholik K, Hajar S, Warjio W. Healthy and Waste-Free Area: Integrated Waste Management, Regional Resilience through Sustainable Development in Deli Serdang Regency, Indonesia. Journal of Posthumanism. 2025; 5(3): 980-1000. https://doi.org/10.63332/joph.v5i3.832

[3] Makan A, Salama Y, Mamouni FZ, Makan M. Towards Zero-Waste Cities: An Integrated and Circular Approach to Sustainable Solid Waste Management. Sustainability. 2025; 17(17): 7884. https://doi.org/10.3390/su17177884

[4] Chioatto E, Sospiro P. Transition from waste management to circular economy: the European Union roadmap. Environment, Development and Sustainability. 2023; 25(1): 249-276. https://doi.org/10.1007/s10668-021-02050-3

[5] Onungwe I, Hunt DV, Jefferson I. Transition and implementation of circular economy in municipal solid waste management system in Nigeria: A systematic review of the literature. Sustainability. 2023; 15(16): 12602. https://doi.org/10.3390/su151612602

[6] Agovino M, Cerciello M, Musella G, Garofalo A. European waste management regulations and the transition towards circular economy. A shift-and-share analysis. Journal of Environmental Management. 2024; 354: 120423. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120423

[7] Saatchi P, Salamian F, Manavizadeh N, Rabbani M. A sustainable network design for municipal solid waste management considering waste-to-energy conversion under uncertainty. Engineering Optimization. 2025; 57(9): 2505-2528. https://doi.org/10.1080/0305215X.2024.2408478

[8] Monferdini L, Casella G, Bottani E. Development of a fuzzy logic-based tool for evaluating kpis in a lean, agile, resilient, and green (larg) supply chain. Applied Sciences. 2025; 15(14): 8010. https://doi.org/10.3390/app15148010

[9] Javan-Molaei B, Tavakkoli-Moghaddam R, Ghanavati-Nejad M, et al. A data-driven robust decision-making model for configuring a resilient and responsive relief supply chain under mixed uncertainty. Annals of Operations Research. 2024: 1-38. https://doi.org/10.1007/s10479-024-06038-w

[10] Alamroshan F, La'li M, Yahyaei M. The green-agile supplier selection problem for the medical devices: a hybrid fuzzy decision-making approach. Environmental Science and Pollution Research. 2022; 29(5): 6793-6811. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14690-z

[11] Agrawal A, Sharma A, Sarkar BD. Business strategies for sustainable development: Leveraging Industry 5.0 and circular pharmaceutical supply chains to overcome medicine waste. Business Strategy and the Environment. 2025; 34(4): 4291-4311. https://doi.org/10.1002/bse.4202

[12] Utama DM, Amallynda I, Wardana RW, Rosiani TY, Anggriani R, Wijaya DS. A new hybrid fuzzy decision model for barrier identification and strategy prioritization in circular rice supply chains: A case study in Indonesia. Indonesian Journal of Science and Technology. 2026; 11(2): 293-320. https://doi.org/10.17509/ijost.v11i2.89788

[13] CV SK, Agrawal R, Singh RK, Daniel J. If sustainable farmers' income is a concern: the response strategies of agricultural supply chains. International Journal of Productivity and Performance Management. 2026; 75(1): 286-308. https://doi.org/10.1108/IJPPM-12-2024-0837

[14] Akhbar T, Negash YT. Developing Circular Business Strategy Performance Indicators in the Fashion Industry: A Data-Driven Practical Guide. Business Strategy and the Environment. 2026. https://doi.org/10.1002/bse.71196

[15] Raj R, Kumar V, Mittal A, Verma P, Lai KK, Singh A. Practices and strategies for global sourcing and supply chain management: a Pareto analysis and MOORA a mixed method approach. Journal of Global Operations and Strategic Sourcing. 2025; 18(3): 447-470. https://doi.org/10.1108/JGOSS-06-2023-0064

[16] Jorshary KM, Sassani M, Raoufi S, Khamoushi S. Ranking of AI-Driven Strategies for Optimizing the Health Tourism Supply Chain Using Stratified BWM. Knowledge and Decision Systems with Applications. 2025; 1: 295-315. https://doi.org/10.59543/kadsa.v1i.15051

[17] Spada E, Carlucci D, Cembalo L, Chinnici G, D'Amico M, Falcone G, et al. Evaluating Circular Strategies for the Resilience of Agri-Food Business: Evidence From the Olive Oil Supply Chain. Business Strategy and the Environment. 2025; 34(3): 2748-2764. https://doi.org/10.1002/bse.4121

[18] Nayeri S, Sazvar Z, Tirkolaee EB. Towards waste management 5.0: A nexus between circular economy and industry 5.0 dimensions. Waste Management. 2025; 203: 114830. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114830

[19] Kolashlou HJ, Eshghi F. Multi-Criteria Decision-Making Framework for Sustainable Energy Scheduling and Demand Response Strategies in Smart Grids: An Economic, Environmental, and Technical Perspective. International Journal of Sustainable Applied Science and Engineering. 2025; 2(2): 53-65.

[20] Dağdeviren IE, Erturgut R. The Mediating Role of Supply Chain Integration in the Relationship Between Supply Chain Strategy and Logistics Performance. Sustainability. 2024; 16(21): 9514. https://doi.org/10.3390/su16219514

[21] Chowdhury NR, Paul SK, Sarker T, Shi Y. Implementing smart waste management system for a sustainable circular economy in the textile industry. International Journal of Production Economics. 2023; 262: 108876. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108876

[22] Nayeri S, Sazvar Z, Heydari J. Towards a responsive supply chain based on the industry 5.0 dimensions: A novel decision-making method. Expert Systems with Applications. 2023; 213: 119267. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119267

[23] Batar B, Peker İ. Determining the effect of blockchain technology on the medical waste management process in the circular economy framework using integrated FUCOM-ARAS methods. Biomedical Signal Processing and Control. 2026; 113: 109171. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2025.109171

[24] Pandey V, Komal. Novel similarity measure and Archimedean t-norm and t-conorm-based WASPAS method for circular intuitionistic fuzzy sets to evaluate municipal solid waste management scenarios. Soft Computing. 2026: 1-21. https://doi.org/10.1007/s00500-025-11014-y

[25] Barka-Papadimitriou A, Lyberatos V, Desiotou E, Efthimiou K, Lyberatos G. A Machine Learning Approach for the Completion, Augmentation and Interpretation of a Survey on Household Food Waste Management. Processes. 2026; 14(2): 302. https://doi.org/10.3390/pr14020302

[26] Katrancı A, Kundakcı N, Arman K. Fuzzy SIWEC and Fuzzy Rawec methods for sustainable waste disposal technology selection. Spectrum of Operational Research. 2025; 3(1): 87-102. https://doi.org/10.31181/sor31202633

[27] Bisheh AZ. Sustainable hazardous waste management: a two-stage dynamic multi-period decision framework (Doctoral dissertation). Memorial University of Newfoundland. 2025.

[28] Ng ZW, Debnath B, Chattopadhyay AK. Machine Learning-Aided Supply Chain Analysis of Waste Management Systems: System Optimization for Sustainable Production. Sustainability. 2025; 17(19): 8848. https://doi.org/10.3390/su17198848

[29] Ghasemi P, Goli A, Goodarzian F, Ehmke JF. Simulation-based genetic algorithm for optimizing a municipal cooperative waste supply chain in a pandemic. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2025; 139: 109478. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109478

[30] Elliazidi S, Dkhissi B. Optimizing sustainable reverse logistic networks: a case study of medical waste using the genetic artificial bee colony algorithm. International Journal on Interactive Design and Manufacturing. 2024; 18(6): 4263-4284. https://doi.org/10.1007/s12008-024-01947-3

[31] Goodarzian F, Ghasemi P, Gunasekaran A, Labib A. A fuzzy sustainable model for COVID-19 medical waste supply chain network. Fuzzy Optimization and Decision Making. 2024; 23(1): 93-127. https://doi.org/10.1007/s10700-023-09412-8

[32] Demircan BG, Yetilmezsoy K. A hybrid fuzzy AHP-TOPSIS approach for implementation of smart sustainable waste management strategies. Sustainability. 2023; 15(8): 6526. https://doi.org/10.3390/su15086526

[33] Yadav H, Soni U, Kumar G. Analysing challenges to smart waste management for a sustainable circular economy in developing countries: a fuzzy DEMATEL study. Smart and Sustainable Built Environment. 2023; 12(2): 361-384. https://doi.org/10.1108/SASBE-06-2021-0097

[34] Kazancoglu Y, Ozbiltekin-Pala M, Sezer MD, Kumar A, Luthra S. Circular dairy supply chain management through Internet of Things-enabled technologies. Environmental Science and Pollution Research. 2026; 33(9): 4046. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17697-8

[35] Pathak N, Rai SK, Sharma R. Identifying and Overcoming Barriers To Circular Supply Chain Management in the Textile Industry: an ISM and MICMAC Approach. Circular Economy and Sustainability. 2026; 6(1): 3. https://doi.org/10.1007/s43615-026-00737-1

[36] Jafarzadeh Ghoushchi S, Hushyar I, Sabri-Laghaie K. Multi-objective robust optimization for multi-stage-multi-product agile closed-loop supply chain under uncertainty in the context of circular economy. Journal of Enterprise Information Management. 2025; 38(1): 94-126. https://doi.org/10.1108/JEIM-12-2020-0514

[37] Gharibi K, Abdollahzadeh S. A mixed-integer linear programming approach for circular economy-led closed-loop supply chains in green reverse logistics network design under uncertainty. Journal of Enterprise Information Management. 2025; 38(1): 1-31. https://doi.org/10.1108/JEIM-11-2020-0472

[38] Saeedi M, Tavakkoli-Moghaddam R, Sabouhi F. Sustainable and resilient agricultural supply chains for net-zero goals: a circular economy and stochastic modeling perspective. Journal of Enterprise Information Management. 2025: 1-56. https://doi.org/10.1108/JEIM-05-2025-0355

[39] Abbasi S, Rokhva S, Farahmand K, Ghasemi P, Shahab E. Designing sustainable closed-loop supply chain network based on a circular economy approach: under uncertainty during the post-COVID era. Circular Economy and Sustainability. 2025; 5(3): 2229-2271. https://doi.org/10.1007/s43615-025-00509-3

[40] Rajabi-Kafshgar A, Seyedi I, Tirkolaee EB. Circular closed-loop supply chain network design considering 3D printing and PET bottle waste. Environment, Development and Sustainability. 2025; 27(8): 20345-20381. https://doi.org/10.1007/s10668-024-04767-3

[41] Sojoudi P, Paydar MM, Nayeri S. Designing a circular dual channel fish supply chain network considering sustainability: A case study. Computers & Industrial Engineering. 2025; 203: 111017. https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111017

[42] Shahrabifarahani S, Torabi SA, Rahiminia M. Circular sustainable supply chain network design for electronic devices. Environment, Development and Sustainability. 2025: 1-34. https://doi.org/10.1007/s10668-025-06068-9

[43] Nazarinia A, Pirayesh A, Dupouët O, Saint-Jean M. Circular supply chain network design: A robust probabilistic multi-objective optimisation approach. International Journal of Production Economics. 2025; 280: 109725. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2025.109725

[44] Chan A, Cruz D, Sy C. A multi-objective optimization approach for the design of circular supply chains of perishable agricultural products. Cleaner Waste Systems. 2025; 10: 100347. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100347

[45] Elsaid S, Aghezzaf EH. A framework for sustainable waste management: challenges and opportunities. Management Research Review. 2015; 38(10): 1086-1097. https://doi.org/10.1108/MRR-11-2014-0264

[46] Milutinović B, Stefanović G, Dassisti M, Marković D, Vučković G. Multi-criteria analysis as a tool for sustainability assessment of a waste management model. Energy. 2014; 74: 190-201. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.056

[47] Santos SM, Silva MM, Melo RM, Gavazza S, Florencio L, Kato MT. Multi-criteria analysis for municipal solid waste management in a Brazilian metropolitan area. Environmental Monitoring and Assessment. 2017; 189(11): 561. https://doi.org/10.1007/s10661-017-6283-x

[48] Hajam YA, Kumar R, Kumar A. Environmental waste management strategies and vermi transformation for sustainable development. Environmental Challenges. 2023; 13: 100747. https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100747

[49] Kannan D, Govindan K, Rajendran S. Fuzzy Axiomatic Design approach based green supplier selection: a case study from Singapore. Journal of Cleaner Production. 2015; 96: 194-208. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.076

[50] Moradi R, Yazdi M, Haghighi A, Nedjati A. Sustainable resilient E-waste management in London: A circular economy perspective. Heliyon. 2024; 10(13): e34071. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34071

[51] Khan MAA, Cárdenas-Barrón LE, Treviño-Garza G, Céspedes-Mota A. Optimal circular economy index policy in a production system with carbon emissions. Expert Systems with Applications. 2023; 212: 118684. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118684

[52] Niyommaneerat W, Suwanteep K, Chavalparit O. Sustainability indicators to achieve a circular economy: A case study of renewable energy and plastic waste recycling corporate social responsibility (CSR) projects in Thailand. Journal of Cleaner Production. 2023; 391: 136203. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136203

[53] Illankoon IMCS, Lu W. Cost implications of obtaining construction waste management-related credits in green building. Waste Management. 2020; 102: 722-731. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.024

[54] Purnomo CE, Priadi CR, Ombasta O, Suwarso R, Marthanty DR, Taufik FD, et al. Development of an economically viable plastic recovery waste management system in Cibodas and Padamukti Village, West Java. E3S Web of Conferences. 2024; 485: 05005. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448505005

[55] Awasthi AK, Cheela VRS, D'Adamo I, Iacovidou E, Islam MR, Johnson M, et al. Zero waste approach towards a sustainable waste management. Resources, Environment and Sustainability. 2021; 3: 100014. https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100014

[56] Yang H, Ma M, Thompson JR, Flower RJ. Waste management, informal recycling, environmental pollution and public health. Journal of Epidemiology and Community Health. 2018; 72(3): 237-243. https://doi.org/10.1136/jech-2016-208597

[57] Carvalho H, Azevedo S, Cruz-Machado V. Trade-offs among Lean, Agile, Resilient and Green Paradigms in Supply Chain Management: A Case Study Approach. In: Operational Research. Springer, Berlin, Heidelberg. 2014: 953-968. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40081-0_81

[58] Mohamed D, Fayad A, Mohamed AMO, Al Nahyan MT. Transforming Waste into Wealth: The Role of E-Waste in Sustainable Mineral Resource Management. Preprints. 2025: 2025030024. https://doi.org/10.20944/preprints202503.0024.v1

[59] Nayeri S, Khoei MA, Rouhani-Tazangi MR, GhanavatiNejad M, Rahmani M, Tirkolaee EB. A data-driven model for sustainable and resilient supplier selection and order allocation problem in a responsive supply chain: A case study of healthcare system. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2023; 124: 106511. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106511

[60] Puvača N, Simin MT, Bursić V, Đurić K, Brkić I, Soleša K. Economy, European Policies, and Citizens' Behavior: Managing Solid Waste as a Resource. Sustainability. 2025; 17(3): 1120.

[61] Agrebi M, Abed M. Decision-making from multiple uncertain experts: case of distribution center location selection. Soft Computing. 2021; 25(6): 4525-4544. https://doi.org/10.1007/s00500-020-05461-y

[62] Bhattacharya P, Aziz RA, Karmaker CL, Bari ABMM. A fuzzy synthetic evaluation approach to assess the risks associated with municipal waste management: Implications for sustainability. Green Technologies and Sustainability. 2024; 2(2): 100087. https://doi.org/10.1016/j.grets.2024.100087

[63] Torkayesh AE, Rajaeifar MA, Rostom M, Malmir B, Yazdani M, Suh S, Heidrich O. Integrating life cycle assessment and multi criteria decision making for sustainable waste management: Key issues and recommendations for future studies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022; 168: 112819. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112819

[64] Beraud H, Barroca B, Hubert G. Functional analysis, a resilience improvement tool applied to a waste management system – application to the "household waste management chain". Natural Hazards and Earth System Sciences. 2012; 12(12): 3671-3682. https://doi.org/10.5194/nhess-12-3671-2012

[65] Darvishmotevali M, Altinay L, Köseoglu MA. The link between environmental uncertainty, organizational agility, and organizational creativity in the hotel industry. International Journal of Hospitality Management. 2020; 87: 102499. https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2020.102499

[66] Dolatabad MJ, Azhdarifard M, Acwin Dwijendra NK, Ali Sharhan Al-Sudani AQ. Evaluating Agile Practices in Green Supply Chain Management Using a Fuzzy Multicriteria Approach. Discrete Dynamics in Nature and Society. 2022; 2022: 4290848. https://doi.org/10.1155/2022/4290848

[67] Kamil M, Roziqin A, Rahmawati Y. Dynamic Governance Model Within Integrated Waste Management In Malang City: Agile People And Process In Actions. Jurnal Studi Pemerintahan. 2021; 12(3): 245-268. https://doi.org/10.18196/jgp.123140

[68] Trofymenko OO, Koba NV, Koba MO, Lazarenko IS, Kuzminska NL. Waste management in the context of digitalization and the circular economy development. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023; 1269(1): 012003. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1269/1/012003

[69] Jo H, Noh SD, Cho Y. An agile operations management system for green factory. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2014; 1(2): 131-143. https://doi.org/10.1007/s40684-014-0018-z

[70] Refaldi DA, Faiz A, Sidiki MFM, Ridwan MAH, Rachmadi MG, Fahmi MI. Implementasi Prinsip Agile pada Pembuatan Aplikasi Greentech: A Smarter Way to Reduce Electronic Waste. LANCAH: Jurnal Inovasi Dan Tren. 2024; 2(2): 663-680. https://doi.org/10.35870/ljit.v2i2.2826

[71] Kubíková Ľ, Rudý S. Identification of Slovak Tourists' Attitudes Towards Digitalization for Circular Economy and Waste Management. Proceedings of the International Conference on Business Excellence. 2024; 18(1): 856-869. https://doi.org/10.2478/picbe-2024-0075

[72] Pires A, Martinho G. Waste hierarchy index for circular economy in waste management. Waste Management. 2019; 95: 298-305. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.014

[73] Garfì M, Tondelli S, Bonoli A. Multi-criteria decision analysis for waste management in Saharawi refugee camps. Waste Management. 2009; 29(10): 2729-2739. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.019

[74] Generowicz A, Kulczycka J. Planning of waste management systems in urban area using multi-criteria analysis. Journal of Environmental Protection. 2011; 2(7): 871-878. https://doi.org/10.4236/jep.2011.26085

[75] Dolatabad MJ, Azhdarifard M, Acwin Dwijendra NK, Ali Sharhan Al-Sudani AQ. Evaluating Agile Practices in Green Supply Chain Management Using a Fuzzy Multicriteria Approach. Discrete Dynamics in Nature and Society. 2022; 2022: 4290848. https://doi.org/10.1155/2022/4290848

[76] Ioana I. Clean technology from waste management. In: Advances in Waste Management, 4th WSEAS International Conference on Waste Management, Water Pollution, Air Pollution, Indoor Climate (WWAI'10). 2010: 71.

[77] Kannan D, Govindan K, Rajendran S. Fuzzy Axiomatic Design approach based green supplier selection: a case study from Singapore. Journal of Cleaner Production. 2015; 96: 194-208. https://doi.org/10.1155/2022/4290848

[78] Hidalgo D, Martín-Marroquín JM, Corona F. A multi-waste management concept as a basis towards a circular economy model. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019; 111: 481-489. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.048

[79] Zhang J, Qin Q, Li G, Tseng CH. Sustainable municipal waste management strategies through life cycle assessment method: A review. Journal of Environmental Management. 2021; 287: 112238. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112238

[80] Koul B, Yakoob M, Shah MP. Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. Environmental Research. 2022; 206: 112285.https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285

[81] Obi FO, Ugwuishiwu BO, Nwakaire JN. Agricultural waste concept, generation, utilization and management. Nigerian Journal of Technology. 2016; 35(4): 957-964. https://doi.org/10.4314/njt.v35i4.34

[82] Luttenberger LR. Waste management challenges in transition to circular economy – Case of Croatia. Journal of Cleaner Production. 2020; 256: 120495. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120495

[83] Noruzi M, Naderan A, Zakeri JA, Rahimov K. A Novel Decision-Making Framework to Evaluate Rail Transport Development Projects Considering Sustainability under Uncertainty. Sustainability. 2023; 15(17): 13086. https://doi.org/10.3390/su151713086