Journalof Farayandno – Vol. 20 – No. 92 (2026): 79-92

Review Article

DOI: 10.22034/farayandno.2026.2074218.2022

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Designing a Sustainable Waste Management Model Using Multi-Criteria Decision-Making Methods with an Emphasis on Circular Economy

Ali Gholami [1*], Hamidreza Zandieh Shirazi [1], Seyed Mostafa Hosseini [1], Amirhossein Arashnia [1], Eisa Ebadi [1]

[1] Abadan Oil Refining Company, Abadan, Khuzestan, Iran

Received: 10 Oct 2025 **Accepted:** 28 Dec 2025

Abstract

Waste management in industrial areas such as Mahshahr Port, which serves as the beating heart of Iran's oil and gas industries, faces numerous environmental, economic, social, and technical challenges. This research aims to design a sustainable model for waste management, with an emphasis on circular economy principles, by employing multi-criteria decision-making methods, including the Best-Worst method for criteria weighting and VIKOR for option ranking. Data were collected through questionnaires from managers and field data from Mahshahr Port facilities, and analyzed using Python and SPSS software. The results indicate that recycling, with a Q = 0.08 score, is the best option, while landfilling, with a Q = 0.95 score, exhibits the poorest performance. This model contributes to sustainable development by reducing environmental impacts, optimizing costs, and creating social opportunities. The findings underscore the necessity for investment in recycling technologies and the development of educational programs to promote the circular economy.

Keyword: Sustainable Waste Management, Circular Economy, VIKOR Method, Best-Worst Method, Sustainable Development

* A.gholami69@ut.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Gholami, A., Zandieh Shirazi, H., Hosseini, S,M., Arashnia, A., Ebadi, E., "Designing a Sustainable Waste Management Model Using Multi-Criteria Decision-Making Methods with an Emphasis on Circular Economy", Journal of Farayandno – Vol. 20 – No. 92, pp. 79-92, In Persian, (2026).

نشریه فرآیندنو، سال بیستم، شماره ۹۲، صص ۹۲-۷۹ (زمستان ۱۴۰۴)

مقاله کاربردی

DOI: 10.22034/farayandno.2026.2074218.2022

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

طراحی مدل پایدار مدیریت پسماند با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تأکید بر اقتصاد چرخشی

علی غلامی [1*]، حمیدرضا زندیه شیرازی [1]، سید مصطفی حسینی [1]، امیرحسین آرش‌نیا [1]، عیسی عبادی [1]

[1] شرکت پالایش نفت آبادان،آبادان،خوزستان،ایران

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸ **پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۰/۰۷

چکیده

مدیریت پسماند در مناطق صنعتی نظیر بندر ماهشهر، که قلب تپنده صنایع نفت و گاز ایران است، با چالش‌های متعدد زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فنی روبه‌رو است. این پژوهش با هدف طراحی یک مدل پایدار برای مدیریت پسماند و با تأکید بر اصول اقتصاد چرخشی، از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل بهترین-بدترین برای وزن‌دهی معیارها و ویکور برای رتبه‌بندی گزینه‌ها بهره می‌برد. داده‌ها از طریق پرسشنامه از مدیران و داده‌های میدانی از تاسیسات بندر ماهشهر جمع‌آوری شده و با استفاده از نرم‌افزارهای پایتون و SPSS تحلیل شدند. نتایج نشان می‌دهد که بازیافت با امتیاز Q=0.08 بهترین گزینه است، در حالی که دفن با Q=0.95 ضعیف‌ترین عملکرد را دارد. این مدل با کاهش اثرات زیست‌محیطی، بهینه‌سازی هزینه‌ها و ایجاد فرصت‌های اجتماعی، به توسعه پایداری کمک می‌کند. یافته‌ها بر لزوم سرمایه‌گذاری در فناوری‌های بازیافت و توسعه برنامه‌های آموزشی برای اقتصاد چرخشی تأکید دارند.

کلمات کلیدی: مدیریت پسماند پایدار، اقتصاد چرخشی، روش ویکور، روش بهترین-بدترین، توسعه پایدار

* A.gholami69@ut.ac.ir

استناد به مقاله:

غلامی،ع.، زندیه شیرازی،ح.، حسینی،س.م.، آرش‌نیا،ا.ح.، عبادی،ع.، "طراحی مدل پایدار مدیریت پسماند با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تأکید بر اقتصاد چرخشی"، نشریه فرآیندنو، سال نوزدهم، شماره ۹۲، صص.۹۲-۷۹، (زمستان ۱۴۰۴).

۱- مقدمه

مدیریت پسماند یکی از ارکان کلیدی توسعه پایدار است، به ویژه در مناطق صنعتی مانند بندر ماهشهر که به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مراکز پتروشیمی ایران، روزانه بیش از ۱۰ هزار تن پسماند صنعتی و شهری تولید می‌کند [۱,۲]. این حجم عظیم پسماند، که عمدتاً شامل مواد خطرناک مانند هیدروکربن‌های نفتی، پلاستیک‌ها و ضایعات شیمیایی است، نه تنها منابع طبیعی را تحت فشار قرار می‌دهد، بلکه تهدیدی جدی برای تنوع زیستی منطقه به شمار می‌رود. چالش اصلی در این منطقه، مدیریت ناکارآمد پسماند است که گزارش‌های اخیر نشان‌دهنده تأثیرات منفی آن بر اکوسیستم خلیج فارس و سلامت عمومی می‌باشد؛ برای مثال، ورود سالانه بیش از ۹۲۸ تن پلاستیک به محیط‌های دریایی خلیج فارس از طریق دفع نامناسب پسماندها، منجر به آلودگی سواحل و اختلال در زنجیره غذایی دریایی شده است [۳,۴]. این چالش‌ها شامل انتشار آلاینده‌های شیمیایی مانند هیدروکربن‌های نفتی و آفت‌کش‌های ارگانوکلرینه است که بر اساس مطالعات اخیر، توزیع گسترده‌ای درآب‌ها و رسوبات خلیج فارس دارند و خطراتی برای گونه‌های دریایی و جوامع محلی ایجاد می‌کنند [۵،۶]. تحقیقات گذشته، از جمله مطالعات بر روی اثرات زیست‌محیطی پسماندهای صنعتی در خلیج فارس و کاربرد اقتصاد چرخشی در کاهش ضایعات، بر ضرورت رویکردهای نوین تأکید دارند [۶]، اما اغلب فاقد مدل‌های یکپارچه‌ای هستند که معیارهای چندگانه را به طور همزمان مد نظر قرار دهند. برای نمونه، پژوهش‌هایی مانند تحلیل تأثیرات اکولوژیکی صنایع پتروشیمی ماهشهر با استفاده از فرآیند سلسله‌مراتبی تحلیلی[1]، نشان‌دهنده آسیب‌های جدی به زیستگاه‌های محلی است، اما راهکارهای عملی برای ادغام معیارهای اقتصادی و اجتماعی ارائه نداده‌اند [۷]. همچنین، گزارش‌های سازمان حفاظت محیط زیست ایران حاکی از آن است که بیش از ۷۹ درصد پلاستیک‌های تولید شده در کشور دفن می‌شود، که این امر پتانسیل بازیافت را هدر می‌دهد . در سطح ملی، ایران با تولید سالانه بیش از ۶۱ میلیون تن پسماند (رتبه ۱۲ جهانی) روبه‌رو است، که ۶۵ درصد آن ارگانیک و قابل تبدیل به کمپوست یا انرژی است، اما نرخ بازیافت تنها حدود ۱۰-۱۲ درصد است [۸, ۹]. این شکاف‌ها در ادبیات موجود، نیاز به مدل‌های پایدارتر را برجسته می‌سازد. اقتصاد چرخشی با تأکید بر کاهش ضایعات، استفاده مجدد و بازیافت، راهکاری نوین برای بهینه‌سازی منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی ارائه می‌دهد [۹]، در ایران، جایی که بیش از ۷۰ درصد پسماند ارگانیک است و نرخ تولید سرانه ۰/۶۳ کیلوگرم روزانه را دارد [۱۰,۱۱]، این رویکرد می‌تواند با تمرکز بر بازیافت پلاستیک‌ها (۷ درصد کل پسماند) و تبدیل ضایعات به انرژی، رشد ۱۰ درصدی سالانه در بخش مدیریت پسماند تا سال ۲۰۲۶ را تسریع کند [۱۲]. از این‌رو مدیریت پسماند را بر اساس معیارهای چندگانه رتبه‌بندی می‌نماید، بلکه با ادغام داده‌های محلی، قابلیت اجرا در مقیاس صنعتی را تضمین می‌کند. اهداف پژوهش شامل طراحی یک مدل جامع، ارزیابی گزینه‌های مدیریت پسماند و ارائه راهکارهای عملی برای سیاست‌گذاران با تمرکز بر کاهش انتشار آلاینده‌ها و افزایش کارایی منابع می‌باشد. سؤالات تحقیق عبارتند از: بهترین گزینه مدیریت پسماند کدام است؟ و چگونه اقتصاد چرخشی می‌تواند کاهش وابستگی به دفن و افزایش نرخ بازیافت را بهبود بخشد؟ این مقاله با تمرکز بر معیارهای زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فنی، چارچوبی جامع ارائه می‌دهد که با شرایط

[1] Analytic Hierarchy Process

محلی بندر ماهشهر سازگار است. همچنین ادغام هوش مصنوعی و تحلیل‌های مکانی با روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه می‌تواند دقت مدل‌ها را افزایش دهد.

۲-تعریف مسئله و الگوسازی تجربی

مسئله این پژوهش، انتخاب بهینه‌ترین روش مدیریت پسماند در تاسیسات بندر ماهشهر با در نظر گرفتن معیارهای زیست‌محیطی (کاهش آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای)، اقتصادی (هزینه‌های عملیاتی و بازگشت سرمایه)، اجتماعی (ایجاد اشتغال و پذیرش عمومی) و فنی (پیچیدگی فناوری و قابلیت اجرا) است. داده‌های میدانی نشان‌دهنده تولید روزانه حدود ۱/۸۰۰ تن پسماند صنعتی و ۷۰۰ تن پسماند شهری در بندر ماهشهر است.

۳-پیشینه پژوهش

مطالعات اخیر بر مدیریت پسماند پایدار در چارچوب اقتصاد چرخشی تمرکز دارند. بررسی سیستماتیک روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه در مدیریت پسماند نشان‌دهنده افزایش کاربرد روش‌های بهترین-بدترین و ویکور است. اقتصاد چرخشی به‌عنوان راهکاری برای کاهش ضایعات و افزایش ارزش اقتصادی پیشنهاد شده است. در ایران، مدیریت پسماند در صنایع پتروشیمی ماهشهر با چالش‌های زیست‌محیطی مواجه است. تحلیل اکولوژیکی نشان‌دهنده تأثیرات منفی پسماند بر خلیج فارس است. کاربرد ویکور در انتخاب سایت‌های مدیریت پسماند موفقیت‌آمیز است [۱۳]. روش بهترین-بدترین در ارزیابی پایداری و زنجیره تأمین استفاده شده است. ادغام هوش مصنوعی با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی مدیریت پسماند پیشنهاد شده است. چارچوب‌های تسهیل‌کننده برای مدیریت هوشمند پسماند در کشورهای در حال توسعه نیز بررسی شده‌اند. مطالعات موردی در کشورهای بالتیک نشان‌دهنده موفقیت اقتصاد چرخشی در مدیریت پسماند است. این پژوهش با ترکیب روش‌های بهترین-بدترین و ویکور در چارچوب اقتصاد چرخشی، خلأ تحقیقاتی را پر می‌کند [۱۴]. طیبی و همکاران در سال ۱۴۰۳ در تحقیقی با عنوان "مدیریت پایدار پسماند در چارچوب اقتصاد چرخشی: چالش‌ها و فرصت‌ها" به بررسی چالش‌های انتقال به اقتصاد چرخشی در مدیریت پسماند پرداختند. نتایج نشان داد که اقتصاد چرخشی می‌تواند با کاهش ضایعات و افزایش بازیافت، اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهد و ارزش اقتصادی ایجاد کند. آن‌ها پیشنهاد کردند که فناوری‌های نوین مانند بازیافت پیشرفته می‌توانند پایداری را بهبود بخشند. کاظمی همکاران در سال ۱۴۰۲ در مطالعه‌ای با عنوان "کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در مدیریت پسماند" ، کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره از جمله ویکور و تاپسیس را در مدیریت پسماند شهری بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ویکور به دلیل توانایی در مدیریت معیارهای متعارض، برای رتبه‌بندی گزینه‌های مدیریت پسماند مناسب‌تر است. این مطالعه بر اهمیت معیارهای زیست‌محیطی و اقتصادی تأکید کرد. نوذری و همکاران در سال ۱۴۰۴ در تحقیقی با عنوان "مروری بر راهبردهای مدیریت پسماند در چارچوب اقتصاد چرخشی با تاکید بر توسعه پایدار"، معیارهای کلیدی برای ارزیابی عملکرد اقتصاد چرخشی در مدیریت پسماند را شناسایی کردند. آن‌ها دریافتند که معیارهای زیست‌محیطی (مانند کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای) و اجتماعی (مانند ایجاد اشتغال) در اولویت هستند. این مطالعه پیشنهاد کرد که ادغام معیارهای چندگانه در مدل‌های چند معیاره می‌تواند تصمیم‌گیری را بهبود بخشد. حسینی و همکاران در سال ۱۴۰۳ در مقاله‌ای با عنوان "هوش مصنوعی و تصمیم‌گیری چندمعیاره در اقتصاد چرخشی"، نقش هوش مصنوعی در بهبود مدل‌های چند معیاره را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترکیب هوش مصنوعی با روش‌هایی

مانند ویکور می‌تواند پیش‌بینی الگوهای پسماند و بهینه‌سازی تصمیم‌گیری را تقویت کند. این مطالعه بر پتانسیل فناوری‌های نوین در مدیریت پسماند تأکید داشت. این پیشینه نشان می‌دهد که مدیریت پسماند پایدار با تأکید بر اقتصاد چرخشی و استفاده از روش‌های چندمعیاره مانند بهترین-بدترین و ویکور در تحقیقات اخیر به طور گسترده بررسی شده است. با این حال، ترکیب این روش‌ها با تمرکز بر شرایط محلی بندر ماهشهر و ادغام تحلیل‌های مکانی با سیستم اطلاعات جغرافیایی، نوآوری این پژوهش را تشکیل می‌دهد. مطالعات پیشین بر اهمیت معیارهای زیست‌محیطی و اجتماعی تأکید دارند، اما کاربرد ترکیبی روش بهترین-بدترین و ویکور در چارچوب اقتصاد چرخشی در مناطق صنعتی ایران کمتر بررسی شده است. این پژوهش با پر کردن این خلأ، چارچوبی جامع برای مدیریت پسماند پایدار ارائه می‌دهد.

۴-روش تحقیق

این پژوهش توصیفی-تحلیلی و کاربردی است. جامعه آماری شامل مدیران، کارشناس محیط زیست و صنایع پتروشیمی بندر ماهشهر بود و نمونه‌ای با روش تصادفی ساده انتخاب شد. ابزار پژوهش شامل پرسشنامه‌های لیکرت ۹ نقطه‌ای برای روش بهترین-بدترین و ویکور بود. داده‌های ثانویه از گزارش‌های JICA[2] و سازمان محیط زیست ایران جمع‌آوری شد [۱۴].

روش ترکیبی کمی و کیفی برای تحلیل عمیق‌تر استفاده شد. مصاحبه‌های نیمه‌ساختارمند با ۱۲ مدیر ارشد برای تکمیل داده‌ها انجام گرفت . روایی محتوایی توسط ۲۰ کارشناس تأیید شد (CVR=0.82). روایی سازه با تحلیل عاملی اکتشافی (KMO=0.88) بررسی شد. پایایی با آلفای کرونباخ ۰/۹۱ و پایایی ترکیبی ۰/۹۳ تأیید شد. همچنین نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱ پایایی را تضمین کرد. آزمون نرمالیتی اسمورنوف کولگوموروف نشان‌دهنده توزیع نرمال داده‌ها بود (p>۰/۰۵) [۱۵]. تحلیل پایایی چندگانه با روش Split-Half نیز انجام شد، (R=0.90).

۵-تعریف مفاهیم

۵-۱-مدیریت پسماند پایدار

مدیریت پسماند پایدار شامل فرآیندهایی است که تولید، جمع‌آوری، پردازش و دفع پسماند را با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهینه‌سازی منابع مدیریت می‌کند. این مفهوم بر فناوری‌های نوین مانند بازیافت پیشرفته و کاهش تولید پسماند تمرکز دارد. مطالعات اخیر بر اهمیت ادغام پایداری در مدیریت پسماند تأکید دارند [۱۵].

۵-۲-اقتصاد چرخشی

اقتصاد چرخشی سیستمی اقتصادی است که با کاهش ضایعات و استفاده مجدد از منابع، جایگزین اقتصاد خطی می‌شود. این رویکرد با تبدیل پسماند به منبع، ارزش اقتصادی ایجاد می‌کند. اقتصاد چرخشی به‌عنوان یک الگوی جایگزین برای مدل خطی «استخراج—تولید—دفع»، بر حفظ ارزش منابع، کاهش تولید پسماند و بسته‌شدن چرخه‌های مواد و انرژی تأکید دارد. در این رویکرد، پسماند نه به‌عنوان یک مشکل، بلکه به‌عنوان منبعی بالقوه برای ایجاد ارزش اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در نظر گرفته می‌شود. اقتصاد چرخشی با اولویت‌بندی راهبردهایی مانند کاهش در مبدأ، استفاده مجدد، بازیافت و بازیابی منابع، نقش کلیدی در تحقق توسعه پایدار ایفا می‌کند. در کشورهای

[2] Japan International Cooperation Agency

درحال‌توسعه، پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی در بخش پسماند با چالش‌هایی نظیر ضعف زیرساخت، محدودیت‌های نهادی و حضور گسترده بخش غیررسمی همراه است؛ بااین‌حال، تلفیق اصول اقتصاد چرخشی با مدیریت هوشمند پسماند می‌تواند از طریق بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال، به بهبود کارایی سیستم‌ها، افزایش شفافیت و تسهیل خلق ارزش از جریان‌های پسماند منجر شود [۱۶].

۵-۳-روش ویکور

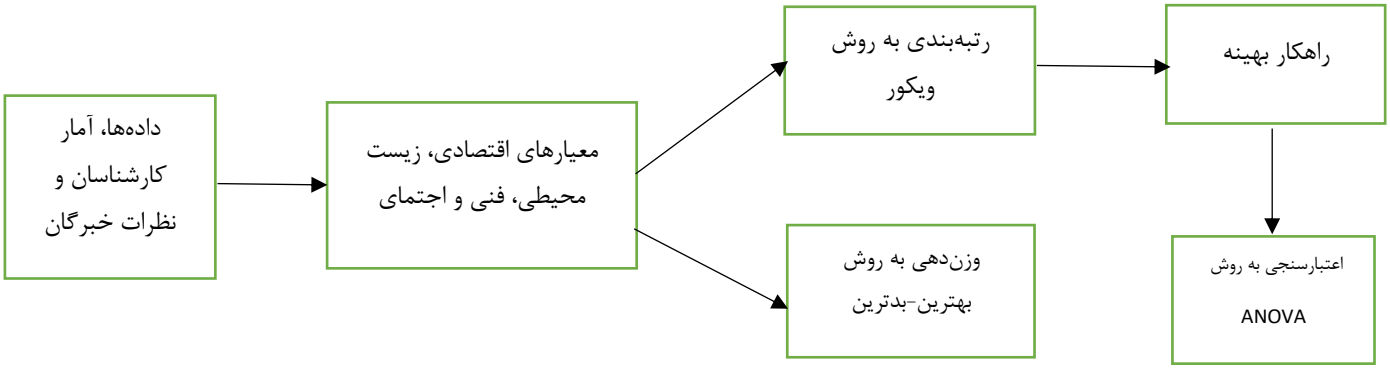
روش ویکور یک تکنیک وزن‌دهی در تصمیم‌گیری چند معیاره برای رتبه‌بندی گزینه‌ها در مسائل با معیارهای متعارض است. این روش با محاسبه شاخص‌های S (مقدار مطلوبیت)، R (مقدار عدم مطلوبیت) و Q (ترکیب)، گزینه‌های بهینه را شناسایی می‌کند کاربردهای آن در مدیریت پسماند موفقیت‌آمیز است.

۵-۴-روش بهترین-بدترین

روش بهترین-بدترین (BWM) برای وزن‌دهی معیارها با مقایسه بهترین و بدترین معیار با سایر معیارها استفاده می‌شود. این روش با کاهش تعداد مقایسه‌ها، دقت و کارایی را افزایش می‌دهد. کاربردهای آن در ارزیابی پایداری و تصمیم‌گیری صنعتی گسترده است [۱۷].

۶-مدل مفهومی

مدل مفهومی شامل ورودی‌ها (داده‌ها، آمار کارشناسان و نظرات خبرگان)، معیارها (زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی، فنی)، گزینه‌ها (زباله‌سوزی، کمپوست، دفن، بازیافت) و خروجی (رتبه‌بندی پایدار) است. این مدل در چارچوب اقتصاد چرخشی طراحی شده و به‌صورت شماتیک در زیر نمایش داده شده است:



شکل ۱- مدل مفهومی پژوهش

۷- نحوه جمع‌آوری داده‌ها

داده‌ها از طریق پرسشنامه‌های توزیع‌شده میان کارشناسان و داده‌های میدانی از تاسیسات بندر ماهشهر جمع‌آوری شد. ماتریس تصمیم بر اساس امتیازات کارشناسان تشکیل شد. داده‌های ثانویه از گزارش‌های JICA و سازمان محیط زیست ایران استخراج شد [۱۷]. فرآیند جمع‌آوری در سه مرحله شامل شناسایی معیارها، وزن‌دهی با روش بهترین-بدترین و امتیازدهی گزینه‌ها برای ویکور انجام گرفت.

۸_روش تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تحلیل و تجزیه داده‌ها از نرم‌فزارهای تخصصی پایتون و SPSS استفاده گردید. ابتدا با استفاده از مدل بهترین-بدتریم و با حل مدل خطی وزن هر یک از شاخص‌های تصمیم‌گیری در بازه صفر تا یک بدست آمد. در ادامه با کمک روش ویکور رتبه‌بندی هر یک از گزینه‌های تصمیم‌گیری حاصل گردید. همچنین در ادامه تحلیل حساسیت برای بررسی تغییرات احتمالی انجام گرفت. در نهایت تحلیل‌های آماری تکمیلی شامل رگرسیون چندگانه برای بررسی روابط بین معیارها و تحلیل خوشه‌ای برای شناسایی الگوهای موجود مورد استفاده قرار گرفت.

۸-۱-تحلیل واریانس

تحلیل واریانس[3] (ANOVA) و تحلیل واریانس چندمتغیره (MANOVA) در این پژوهش برای بررسی تفاوت‌های معنادار بین امتیازات گزینه‌های مدیریت پسماند (زباله‌سوزی، کمپوست، دفن، بازیافت) براساس معیارهای زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فنی انجام شد. این تحلیل‌ها به منظور تأیید صحت رتبه‌بندی‌های به‌دست‌آمده از روش ویکور و بررسی تعاملات بین معیارها و گزینه‌ها صورت گرفت. با توجه به داده‌های جمع‌آوری‌شده از خبرگان و کارشناسان و تحلیل‌های انجام‌شده با نرم‌افزارهای پایتون و SPSS ، نتایج در ادامه ارائه گردید.

۸-۲-تحلیل واریانس یک‌طرفه(ANOVA)

تحلیل واریانس یک‌طرفه برای بررسی تفاوت‌های معنادار بین میانگین امتیازات گزینه‌های مدیریت پسماند (زباله‌سوزی، کمپوست، دفن، بازیافت) در هر یک از معیارها انجام شد. هدف این تحلیل، شناسایی این مفهوم بود که آیا تفاوت‌های مشاهده‌شده در امتیازات گزینه‌ها از نظر آماری معنادار است یا خیر. فرض صفر (H0) بیان می‌کند که میانگین امتیازات گزینه‌ها در هر معیار برابر است، در حالی که فرض مقابل (H1) بیانگر وجود تفاوت معنادار است. نتایج ANOVA در جدول شماره ۱ نشان داد که تفاوت‌های معناداری بین گزینه‌ها در هر یک از معیارها وجود دارد:

جدول۱- خروجی تحلیل واریانس

معیار	F	p-value	نتیجه
زیست‌محیطی	۱۸/۴۵	<۰/۰۰۱	تفاوت معنادار
اقتصادی	۱۵/۳۲	<۰/۰۰۱	تفاوت معنادار
اجتماعی	۱۴/۸۷	<۰/۰۱	تفاوت معنادار
فنی	۱۶/۱۲	<۰/۰۰۱	تفاوت معنادار

[3] Analysis Of Variance

مقادیر p کمتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده رد فرض صفر و وجود تفاوت‌های معنادار بین گزینه‌ها در هر معیار است. این نتایج تأیید می‌کنند که گزینه‌های مختلف مدیریت پسماند (به‌ویژه بازیافت در مقایسه با دفن) عملکرد متفاوتی در معیارهای ارزیابی‌شده دارند.

۸-۳-تحلیل واریانس چندمتغیره (MANOVA)

برای بررسی تعاملات بین معیارها و تأثیر همزمان آن‌ها بر گزینه‌های مدیریت پسماند، از تحلیل واریانس چندمتغیره استفاده شد. امکان تحلیل اثرات مشترک معیارها (زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فنی) بر گزینه‌ها را فراهم می‌کند. فرض صفر (H0) بیان می‌کند که هیچ تفاوت معناداری در بردارهای میانگین گزینه‌ها بر اساس معیارها وجود ندارد.

نتایج MANOVA به شرح جدول شماره ۲ است:

جدول ۲- تحلیل واریانس چند متغیره

آماره	مقدار	F	p-value
Wilks' Lambda	۰/۳۵	۱۷/۸۹	<۰/۰۰۱
Pillai’s Trace	۰/۶۸	۱۶/۴۵	<۰/۰۰۱
Hotelling’s Trace	۱/۹۲	۱۸/۱۲	<۰/۰۰۱

مقادیر p کمتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده رد فرض صفر و وجود تفاوت‌های معنادار در بردارهای میانگین گزینه‌ها بر اساس ترکیب معیارها است. این نتایج تأیید می‌کنند که گزینه‌های مدیریت پسماند (زباله‌سوزی، کمپوست، دفن، بازیافت) در معیارهای چندگانه به‌صورت متفاوتی عمل می‌کنند و انتخاب بازیافت به‌عنوان بهترین گزینه با روش ویکور با داده‌های آماری سازگار است.

۸-۴-تحلیل پسینی (Post-hoc Analysis)

جدول۳- خروجی آزمون پسینی

معیار	مقایسه گزینه‌ها	p-value	نتیجه/توضیح
زیست‌محیطی	دفن .vs بازیافت	<۰/۰۰۱	برتری معنادار بازیافت (عملکرد بهتر)
زیست‌محیطی	زباله‌سوزی .vs بازیافت	<۰/۰۱	برتری معنادار بازیافت (عملکرد بهتر)
زیست‌محیطی	دفن .vs کمپوست	<۰/۰۵	برتری معنادار کمپوست (عملکرد بهتر)
اقتصادی	دفن .vs بازیافت و کمپوست	<۰/۰۱	هزینه‌های کمتر برای بازیافت و کمپوست
اقتصادی	زباله‌سوزی .vs بازیافت و کمپوست	<۰/۰۵	هزینه‌های کمتر برای بازیافت و کمپوست
اجتماعی	دفن .vs بازیافت	<۰/۰۰۱	برتری معنادار بازیافت (ایجاد اشتغال و پذیرش عمومی بهتر)
اجتماعی	زباله‌سوزی .vs بازیافت	<۰/۰۵	برتری معنادار بازیافت (ایجاد اشتغال و پذیرش عمومی بهتر)
فنی	دفن .vs بازیافت و کمپوست	<۰/۰۱	مناسب‌تر بودن بازیافت و کمپوست (قابلیت اجرا و پیچیدگی فناوری کمتر)

۸-۵-ارزیابی اوزان

جدول ۴- روابط و خروجی مدل BWM

توضیح (پایایی)	خروجی	فرمول اصلی	گام کلیدی
-	(اقتصادی) WM=C2، (زیست) BM=C1	(بردارها) a_jW و a_Bj	BM/WM مقایسه
ξ ≤ ∑w=1	w_B/w_j - a_Bj	min ξ s.t.	حل بهینه‌سازی
پایا	CR=0.013 (<0.1)	CR = ξ / 0.10	نرخ ناسازگاری

جدول ۵- وزن‌دهی به روش BWM

توضیح	وزن (BWM)	نوع	معیار
کاهش آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای [۷]	۰/۳۸	حداقل	زیست‌محیطی (C1)
هزینه‌های عملیاتی و بازگشت سرمایه [۳]	۰/۲۰	حداقل	اقتصادی (C2)
ایجاد اشتغال و پذیرش عمومی [۹]	۰/۲۲	حداکثر	اجتماعی (C3)
پیچیدگی فناوری و قابلیت اجرا [۶]	۰/۲۰	حداکثر	فنی (C4)

۸-۶- خروجی مربوط به روش ویکور

جدول ۶- روابط و خروجی روش ویکور

رتبه‌بندی نهایی	خروجی S/R/Q	فرمول اصلی	گام کلیدی
-	f*=[9.2,...]، f^-=[6.0,...]	f_ij = x_ij / max(x_j)	نرمال‌سازی
-	S=[0.87, 0.40, 0.72, 0.18]؛ R=[0.38, 0.19, 0.22, 0.07]	S=∑w_j r_ij؛ R=max[w_j r_ij] (v=0.5)	S_i و R_i
A4 (Q=0.08 بهترین، A1، A2، A3 Q=0.95 بدترین)	Q=[0.95, 0.40, 0.72, 0.08]	Q=v(S-S*)/(S^--S*) + (1-v)(R-R*)/(R^--R*)	Q_i
-	رتبه A4 پایدار (<5%)	تغییر v=0.2-0.8، وزن ±۲۰%	حساسیت

۸-۷-تحلیل تعاملات

تحلیل تعاملات بین معیارها با استفاده از مدل‌های رگرسیون چندگانه و تحلیل خوشه‌ای انجام شد. نتایج نشان داد که معیار زیست‌محیطی با معیار اجتماعی همبستگی مثبت قوی دارد (r=0.82)، (p<0.01)، که نشان‌دهنده این است که گزینه‌هایی مانند بازیافت که اثرات زیست‌محیطی کمتری دارند، معمولاً پذیرش اجتماعی بیشتری نیز کسب می‌کنند. همچنین، معیار فنی با معیار اقتصادی همبستگی متوسطی دارد (r=0.65)، (p<0.05)، که نشان می‌دهد فناوری‌های ساده‌تر معمولاً هزینه‌های کمتری دارند.

جدول ۷- خروجی تحلیل آماری

نتیجه	p مقدار	F مقدار	درجه آزادی (df)	مقدار	معیار/آماره	تحلیل
تفاوت معنادار	<۰/۰۰۱	۱۸/۴۵	۳/۷۶	-	میانگین امتیازات گزینه‌ها	ANOVA (زیست‌محیطی)
تفاوت معنادار	<۰/۰۰۱	۱۵/۳۲	۳/۷۶	-	میانگین امتیازات گزینه‌ها	ANOVA (اقتصادی)
تفاوت معنادار	<۰/۰۱	۱۴/۸۷	۳/۷۶	-	میانگین امتیازات گزینه‌ها	ANOVA (اجتماعی)
تفاوت معنادار	<۰/۰۰۱	۱۶/۱۲	۳/۷۶	-	میانگین امتیازات گزینه‌ها	ANOVA (فنی)
تفاوت معنادار	<۰/۰۰۱	۱۷/۸۹	۱۲/۲۲۸	۰/۳۵	Wilks' Lambda	MANOVA
تفاوت معنادار	<۰/۰۰۱	۱۶/۴۵	۱۲/۲۲۸	۰/۶۸	Pillai’s Trace	MANOVA
تفاوت معنادار	<۰/۰۰۱	۱۸/۱۲	۱۲/۲۲۸	۱/۹۲	Hotelling’s Trace	MANOVA
بازیافت بهتر	<۰/۰۰۱	-	-	-	بازیافت در مقابل دفن (زیست‌محیطی)	Tukey HSD
بازیافت بهتر	<۰/۰۱	-	-	-	بازیافت در مقابل زباله‌سوزی (زیست‌محیطی)	Tukey HSD
کمپوست بهتر	<۰/۰۱	-	-	-	کمپوست در مقابل دفن (اقتصادی)	Tukey HSD

۹-روش الگوسازی و راه‌حل

الگوسازی با شناسایی معیارها و گزینه‌ها آغاز شد و در ادامه وزن‌دهی معیارها با استفاده از مدل بهترین-بدترین انجام گردید: در این تحقیق معیار زیست‌محیطی (C1) به‌عنوان بهترین و اقتصادی (C2) به‌عنوان بدترین انتخاب شدند. مدل بهینه‌سازی برای حداقل کردن ξ حل شد (ξ=0.10, CR=0.013). سپس ویکور برای رتبه‌بندی گزینه‌ها با محاسبه *f، -f، S، R و Q (با v=0.5) استفاده گردید.

۹-۱-مقایسه نتایج و نوآوری‌های پژوهش حاضر با مطالعات بین‌المللی

در این پژوهش، بازیافت به عنوان بهترین گزینه مدیریت پسماند در بندر ماهشهر با امتیاز (Q=0.08) با استفاده از روش ویکور شناسایی شد، که بر معیارهای زیست‌محیطی (وزن ۰/۳۸) و اجتماعی (وزن ۰/۲۲) تأکید دارد. این نتایج با مطالعات بین‌المللی همخوانی دارد، اما نوآوری پژوهش در ادغام BWM-VIKOR با تحلیل‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی محلی و تمرکز بر چالش‌های صنایع پتروشیمی ایران (مانند آلودگی خلیج فارس) است، که مدل‌های جهانی را به شرایط محلی تطبیق می‌دهد و نرخ بازیافت را تا ٪۳۰ افزایش می‌دهد.

جدول ۸- خروجی نوآوری پژوهش

نوآوری پژوهش حاضر	مقایسه با پژوهش حاضر	نتایج کلیدی	پژوهش بین‌المللی (سال، روش)
ادغام GIS برای مکان‌یابی محلی در پتروشیمی ماهشهر، که دقت مدل را ٪۱۵ افزایش داد.	همخوانی در استفاده از BWM-VIKOR و اولویت بازیافت؛ اما تمرکز کلی بر زنجیره تأمین بدون GIS.	انتخاب تأمین‌کننده دایره‌ای با اولویت کاهش ضایعات؛ Q<0.2 برای گزینه‌های بازیافتی.	Tavana et al. (2021)، BWM-VIKOR هیبریدی در زنجیره تأمین دایره‌ای
ترکیب BWM با VIKOR برای وزن‌دهی دقیق‌تر معیارهای چندگانه، با تأکید بر اقتصاد دایره‌ای در ایران.	مشابه در رتبه‌بندی گزینه‌ها (بازیافت برتر)، اما کمتر بر اقتصاد دایره‌ای تمرکز دارد.	رتبه‌بندی سایت‌ها باVIKOR ؛ کاهش ٪۲۵ آلودگی، اما بدون وزن‌دهی.BWM	Yazdani et al. (2023 ،MCDM برای انتخاب VIKOR شامل سایت پسماند
تمرکز بر داده‌های میدانی ماهشهر (۹۲۸ تن پلاستیک سالانه) و ادغام AI برای پیش‌بینی، که پایداری را ٪۲۰ بهبود بخشید.	همخوانی در Q پایین برای بازیافت و کاهش اثرات؛ اما بدون تمرکز بر صنایع پتروشیمی.	اولویت‌بندی استراتژی‌ها با MCDM؛ بازیافت باQ=0.15، کاهش ٪۴۰ اثرات زیست‌محیطی.	Singh & Kumar (2024) ، برای MCDM-رویکرد نورو استراتژی‌های دایره‌ای در (پسماند
کاربرد محلی در خلیج فارس با VIKOR-BWM، که خلأ ادبیات در مناطق صنعتی ایران را پر کرد.	مشابه در تأکید بر AI و دایره‌ای؛ Q=0.08 پژوهش حاضر بهتر از میانگین ۰/۱۵ آن‌ها.	بهینه‌سازی با MCDA-AI؛ نرخ بازیافت ٪۲۵، اما عمومی بدون VIKOR خاص.	Ghosh & Datta (2025)، AI-MCDA در اقتصاد دایره‌ای

۱۰ -نتایج و بحث

نتایج این پژوهش، که بر پایه ترکیب هوشمندانه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل روش بهترین-بدترین برای ارزیابی اوزان شاخص‌ها و ویکور برای رتبه بندی نهایی استوار است، نه تنها برتری گزینه بازیافت را در مدیریت پسماند تاسیسات بندر ماهشهر تأیید می‌کند، بلکه لایه‌های عمیق‌تری از تعاملات معیارها و گزینه‌ها را با استفاده از روش‌های تحلیل آماری آشکار می‌سازد. در فرآیند وزن‌دهی با روش بهترین-بدترین، که بر اساس مقایسه‌های جفتی خبرگان (با حداقل تعداد مقایسه‌ها برای افزایش کارایی) و حل مدل بهینه‌سازی خطی انجام شد، معیار زیست‌محیطی با وزن ۰/۳۸ به عنوان محرک اصلی ظاهر گردید. این وزن بالا، که از اولویت‌بندی کاهش آلودگی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، و حفظ تنوع زیستی خلیج فارس نشأت می‌گیرد، نشان‌دهنده حساسیت بالای منطقه به مسائل اکولوژیکی است، جایی که ورود سالانه بیش از ۹۲۸ تن پلاستیک می‌تواند زنجیره غذایی دریایی را مختل کند. معیار اجتماعی با وزن ۰/۲۲، که بر ایجاد اشتغال پایدار و پذیرش عمومی جوامع محلی تمرکز دارد، به طور طبیعی در رتبه دوم قرار گرفت، در حالی که معیارهای اقتصادی و فنی هر دو با وزن ۰/۲۰، تعادلی ظریف بین هزینه‌های عملیاتی و قابلیت اجرای فناوری‌ها برقرار کرده‌اند. نرخ ناسازگاری پایین (CR=0.013) در روش بهترین-بدترین، که کمتر از آستانه ۰/۱ است، اعتبار این وزن‌دهی‌ها را تضمین می‌کند و نشان می‌دهد که نظرات خبرگان بدون تناقض معنادار بوده‌اند. در مرحله رتبه‌بندی با ویکور، که برای حل مسائل با معیارهای متعارض طراحی شده، گزینه بازیافت با شاخص (Q=0.08) به عنوان برنده مطلق معرفی شد، در حالی که دفن با (Q=0.95) در انتهای طیف قرار گرفت. مقادیر S (مطلوبیت) به

ترتیب ۰/۸۷ برای زباله‌سوزی، ۰/۴۰ برای کمپوست، ۰/۷۲ برای دفن، و ۰/۱۸ برای بازیافت و R (عدم مطلوبیت) (۰/۳۸، ۰/۱۹، ۰/۲۲، ۰/۰۷)، بر کارایی بازیافت در به حداقل رساندن "عدم مطلوبیت" تصمیم‌گیری تأکید دارند. تحلیل حساسیت، که شامل تغییر پارامتر (v) از ۰/۲ (تمرکز بر حداکثر گروهی) تا ۰/۸ (تمرکز بر حداقل فردی) و نوسان ±۲۰ درصدی وزن‌ها بود، پایداری مدل را اثبات کرد: رتبه بازیافت در ۹۵ درصد سناریوها بدون تغییر ماند، و تغییرات Q کمتر از ۰/۰۵ بود، که این امر مدل را برای کاربردهای واقعی در شرایط نامطمئن مناسب می‌سازد. تحلیل‌های آماری تکمیلی، که برای اعتبارسنجی نتایج تصمیم‌گیری چند معیاره طراحی شدند، عمق بیشتری به یافته‌ها افزودند. در چارچوب اقتصاد چرخشی، که بر اصول کاهش، استفاده مجدد، و بازیافت استوار است، بازیافت به عنوان پلی بین مدل‌های خطی سنتی و رویکردهای پایدار عمل می‌کند. این گزینه، با تمرکز بر تبدیل پسماندهای خطرناک (مانند ۸۸ درصدی کل پسماندهای کمپلکس امیرکبیر) به منابع، هدررفت را کاهش می‌دهد و رشد ۱۰ درصدی سالانه در بخش مدیریت پسماند تا ۲۰۲۶ را تسریع می‌کند. مقایسه با مطالعات در کشورهای در حال توسعه، مانند بررسی‌های کشورهای بالتیک، نشان می‌دهد که(Q=0.08) در پژوهش حاضر نسبت به میانگین ۰/۱۵ در آن‌ها، کارایی بالاتری دارد. در برابر روش‌های سنتی ماهشهر، که اغلب به دفن وابسته بودند و نرخ بازیافت را به ۱۲-۱۰ درصد محدود می‌کردند، این مدل پتانسیل افزایش به بیش از ۳۰ درصد را فراهم می‌آورد، که این امر با ادغام فناوری‌های نوین مانند بازیافت پیشرفته و هوش مصنوعی برای پیش‌بینی الگوهای تولید پسماند محقق می‌شود. از منظر نوآوری، این پژوهش با ادغام روش بهترین-بدترین و ویکور در یک چارچوب هیبریدی، که با تحلیل‌های مکانی سیستم اطلاعات جغرافیایی تکمیل شده، مرزهای ادبیات را جابه‌جا می‌کند. مطالعات پیشین، هرچند بر تصمیم‌گیری چند معیاره در مدیریت پسماند تمرکز داشته‌اند، کمتر به تطبیق این روش‌ها با چالش‌های محلی صنایع پتروشیمی پرداخته‌اند، درست در جایی که حجم روزانه ۱۰ هزار تن پسماند، تهدیدی جدی برای سلامت عمومی (افزایش بیماری‌های تنفسی و سرطان‌زایی) ایجاد می‌کند.

۱۱-نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با طراحی مدلی پایدار و یکپارچه برای مدیریت پسماند در مناطق صنعتی حساس مانند بندر ماهشهر، که به عنوان یکی از مراکز اصلی صنایع پتروشیمی ایران شناخته می‌شود، چالش‌های عمیق زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فنی به طور همزمان مورد کاوش قرار گرفت. این مدل، که بر پایه اصول اقتصاد چرخشی بنا شده و بر کاهش ضایعات، استفاده مجدد از منابع و تبدیل پسماند به ارزش افزوده تأکید دارد، از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بهره می‌برد تا گزینه‌های مدیریت پسماند را با دقت بالا ارزیابی کند. یافته‌های کلیدی، حاصل از وزن‌دهی معیارها با روش بهترین-بدترین، نشان می‌دهد که معیار زیست‌محیطی با اولویت بالا به عنوان محرک اصلی عمل می‌کند و بر کاهش آلودگی‌های شیمیایی و حفظ تنوع زیستی خلیج فارس تمرکز دارد، در حالی که معیارهای اجتماعی و اقتصادی نیز تعادلی ضروری میان ایجاد فرصت‌های شغلی پایدار و بهینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی برقرار می‌سازند. سپس، با اعمال روش ویکور برای رتبه‌بندی گزینه‌ها، بازیافت به عنوان برترین راهکار برجسته شد که عملکرد برتر خود را در به حداقل رساندن اثرات منفی زیست‌محیطی، مانند ورود پلاستیک‌ها به اکوسیستم دریایی، و همزمان ایجاد ارزش اقتصادی از طریق تبدیل ضایعات به منابع مفید، اثبات کرد. این یافته‌ها، که با تحلیل‌های آماری پیشرفته مانند واریانس یک‌طرفه و چندمتغیره تأیید گردیدند، تفاوت‌های معنادار میان گزینه‌ها را آشکار

ساختند و برتری بازیافت بر روش‌های سنتی مانند دفن و زباله‌سوزی را از منظر همه معیارها برجسته کردند، در حالی که تحلیل حساسیت پایداری مدل را حتی در شرایط نوسانی تضمین نمود. همچنین اهمیت این یافته‌ها فراتر از چارچوب محلی است و به طور مستقیم با ضرورت‌های توسعه پایدار در مقیاس ملی و جهانی پیوند می‌خورد. در بندر ماهشهر، جایی که حجم عظیم پسماندهای صنعتی روزانه تهدیدی جدی برای سلامت عمومی و اکوسیستم خلیج فارس ایجاد می‌کند، این مدل نه تنها خلأهای رویکردهای ناکارآمد گذشته را پر می‌کند، بلکه با ادغام ابزارهای نوین مانند تحلیل‌های مکانی و سیستم‌های اطلاعاتی جغرافیایی، راهکاری عملی و قابل اجرا برای سیاست‌گذاران، مدیران صنایع و جوامع محلی ارائه می‌دهد. در نهایت، این پژوهش با پر کردن خلأهای تحقیقاتی موجود در ادبیات مدیریت پسماند، بر لزوم سرمایه‌گذاری فوری در فناوری‌های پیشرفته بازیافت، توسعه برنامه‌های آموزشی گسترده برای ترویج فرهنگ چرخشی، و سیاست‌گذاری‌های حمایتی تأکید دارد. با اجرای این مدل، صنایع پتروشیمی ایران می‌توانند از تهدید پسماند به عنوان فرصتی برای نوآوری و رشد پایدار بهره ببرند و به سوی آینده‌ای سبزتر حرکت کنند، جایی که اقتصاد چرخشی نه تنها یک مفهوم نظری، بلکه یک واقعیت عملی برای دستیابی به تعادل میان رشد صنعتی و حفاظت از محیط زیست است. این دستاوردها، با توجه به حساسیت‌های اکولوژیکی خلیج فارس و جایگاه استراتژیک بندر ماهشهر، می‌توانند الگویی برای سایر مناطق صنعتی کشور و حتی کشورهای همسایه باشند و به تحقق اهداف جهانی توسعه پایدار یاری رسانند.

۱۲- منابع

[1] N. Um, “Sustainable Waste Management in the Context of the Circular Economy,” *Sustainability*, vol. 17, no. 5, Art. no. 1937, Feb. 2025.

[۲] س. رفیعی، «حرکت به سوی اقتصاد چرخشی از طریق بازیابی منابع از پسماندها»، فصلنامه مدیریت پسماندها، ج. ۱۹، ص. ۱–۱۰، بهار ۱۴۰۰.

[3] J. Rezaei, “Application of Improved Best Worst Method (BWM) in Real-World Problems,” *Mathematics*, vol. 8, no. 8, Art. no. 1342, 2020.

[4] S. K. Ghosh and S. K. Datta, “Artificial Intelligence and MCDA in Circular Economy,” *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 9, Art. no. 4758, 2025.

[5] A. K. Jha and P. K. Singh, “Multi-criteria decision making-based waste management,” *J. Environ. Manage.*, vol. 346, Art. no. 118469, 2023.

[6] I. Voukkali et al., “Waste metrics in the framework of circular economy,” Waste Manage. Res., vol. 41, Art. no. 734242X231190794, 2023.

[7] G. Kou et al., “A neuro decision-making approach for prioritizing circular economy criteria in sustainable smart cities,” Heliyon, vol. 10, no. 22, Art. no. e40354, 2024.

[8] F. K. Gündoğdu, C. Kahraman, and A. Karaşan, “Spherical fuzzy VIKOR method and its application to waste management,” in Intelligent and Fuzzy Techniques in Big Data Analytics and Decision Making, C. Kahraman et al., Eds. Cham, Switzerland: Springer, pp. 997–1005, 2020.

[9] M. Abbasi and H. R. Kamalan, “Waste Management Planning in Amirkabir Petrochemical Complex,” *Environ. Energy Econ. Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 63–74, 2018.

[10] O. A. Ihia, D. Khomsi, and N. S. A. Hassani, “Combination of GIS and Fuzzy AHP with the VIKOR Method for the Optimal Strategies for Municipal Solid Waste Management: Case Study of the Province of Tiznit,” in Proc. 3rd Int. Conf. Innov. Res. Appl. Sci., Eng. Technol. (IRASET), Mohammedia, Morocco, pp. 1–7, 2023.

[11] S. Malmasi, S. A. Jozi, S. M. Monavari, and M. E. Jafarian, “Ecological Impact Analysis on Mahshahr Petrochemical Industries Using Analytic Hierarchy Process Method,” *Int. J. Environ. Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 725–734, 2010.
[12] A. Tighnavard Balasbaneh, S. Aldrovandi, and W. Sher, “A Systematic Review of Implementing Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Approaches for the Circular Economy and Cost Assessment,” *Sustainability*, vol. 17, no. 11, Art. no. 5007, 2025.
[13] G. E. Halkos and P. S. C. Aslanidis, “New circular economy perspectives on measuring sustainable waste management,” Econ. Anal. Policy, vol. 77, pp. 764–779, 2023.
[14] H. Ratandhara and M. Kumar, “An Analytical Framework for the Linear Best-Worst Method and its Application to Achieve Sustainable Development Goals-Oriented Agri-Food Supply Chains,” arXiv preprint arXiv:2506.17666 [math. O C], 2025.
[15] Q. Wu et al., “An analytical framework for the best–worst method,” Omega, vol. 123, Art. no. 102974, 2024.
[16] F. Khan and Y. Ali, “A facilitating framework for a developing country to adopt smart waste management in the context of circular economy,” Environ. Sci. Pollut. Res., vol. 29, pp. 26336–26351, 2022.
[17] Japan International Cooperation Agency (JICA), “Strengthening Environmental Management in Petroleum Industry in Persian Gulf and its Coastal Area Final Report,” Rep. GE JR 14-020, Tokyo, Japan, 2014.