

بهینه‌سازی یکپارچه مدیریت پسماند شهری: چارچوب دومرحله‌ای AHP برای انتخاب هماهنگ سیستم‌های تفکیک از مبدأ و جمع‌آوری

مهدی میرزائی^۱ محمد حمید^۲ مریم اسدی^۳ ملیسا مهدوی مهر^۴ نجمه احمدی^۵ وحید طاهرخانی^۶

۱. کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی صنایع گرایش مدیریت مهندسی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. کارشناس شهرسازی و کارشناسی ارشد مهندسی صنایع (گرایش مدیریت مهندسی)، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر گرایش نرم افزار و کارشناسی ارشد مهندسی صنایع (گرایش مدیریت مهندسی)، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴. کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی صنایع (گرایش مدیریت مهندسی)، دانشگاه صنعتی اصفهان

۵. کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی صنایع (گرایش مدیریت مهندسی)، دانشگاه صنعتی اصفهان

۶. کارشناسی مهندسی حرفه‌ای ایمنی صنعتی (HSE) و کارشناسی ارشد مهندسی صنایع (گرایش مدیریت مهندسی)، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

افزایش پیچیدگی مدیریت پسماند شهری در کنار الزامات توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی، نیازمند رویکردهای تصمیم‌گیری نظام‌مند و چندمعیاره است. انتخاب ناهماهنگ سیستم‌های تفکیک در مبدأ و روش‌های جمع‌آوری می‌تواند منجر به کاهش راندمان کلی، افزایش هزینه‌ها و اثرات محیطی منفی گردد. هدف این پژوهش، ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری یکپارچه و دو مرحله‌ای مبتنی بر فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای انتخاب همزمان بهینه‌ترین سیستم تفکیک از مبدأ و روش جمع‌آوری پسماند است. در این چارچوب، ابتدا معیارهای مؤثر بر هر دو بخش با استفاده از AHP و نظرات خبرگان وزن‌دهی می‌شوند. سپس، گزینه‌های ترکیبی (سناریوها) شکل گرفته و با همان روش ارزیابی نهایی می‌گردند. داده‌های پژوهش از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و نظرسنجی از خبرگان حوزه مدیریت پسماند گردآوری شده است. نتایج حاکی از آن است که سناریوی «تفکیک سه‌گانه در مبدأ همراه با سیستم جمع‌آوری درب‌به‌درب» به عنوان کارآمدترین گزینه از نظر ابعاد محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فنی شناسایی می‌شود. این چارچوب به عنوان ابزاری کاربردی، می‌تواند مدیران و سیاست‌گذاران شهری را در اتخاذ تصمیمات هماهنگ و پایدار در حوزه مدیریت پسماند یاری نماید.

کلمات کلیدی: مدیریت پسماند شهری، تفکیک از مبدأ، جمع‌آوری پسماند، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، تصمیم‌گیری چندمعیاره، بهینه‌سازی یکپارچه.

۱. تعریف مسئله:

مدیریت پسماند شهری یکی از چالش‌های حیاتی دولت‌ها و شهرداری‌های سراسر جهان است که تأثیر مستقیمی بر سلامت عمومی، کیفیت محیط‌زیست و توسعه پایدار شهرها دارد. بر اساس گزارش بانک جهانی، تولید پسماند شهری در سطح جهان از ۲ میلیارد تن در سال ۲۰۱۶ به ۳.۴ میلیارد تن در سال ۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت. این رشد چشمگیر، لزوم طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های کارآمد مدیریت پسماند را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

در زنجیره مدیریت پسماند شهری، دو مرحله کلیدی نقش تعیین‌کننده ایفا می‌کنند: تفکیک پسماند در مبدأ و جمع‌آوری پسماند. تفکیک صحیح در مبدأ، پیش‌نیاز اساسی برای افزایش نرخ بازیافت و کاهش حجم دفن است، در حالی که سیستم جمع‌آوری کارآمد، تضمین‌کننده انتقال به‌موقع و اقتصادی مواد به مراکز پردازش می‌باشد. با وجود اهمیت بالای این دو مرحله، مطالعات موجود عمدتاً به بررسی مجزای آن‌ها پرداخته‌اند. از یک سو، پژوهش‌هایی نظیر مطالعه (۲۰۲۵) Apaydin بر تحلیل روش‌های مختلف تفکیک در مبدأ (آمیخته، دوگانه، سه‌گانه) تمرکز کرده و تأثیر آن‌ها را بر عملکرد کلی سیستم مدیریت پسماند بررسی نموده‌اند. از سوی دیگر، مطالعاتی مانند (۲۰۲۵) Simeoni و Cottes به ارزیابی و مقایسه سیستم‌های مختلف جمع‌آوری (خیابانی، درب‌به‌درب، ترکیبی) پرداخته‌اند.

این رویکرد مجزا در تحلیل، یک شکاف مهم در ادبیات موضوع ایجاد می‌کند. زیرا در واقعیت عملیاتی، نوع و کیفیت تفکیک در مبدأ تأثیر مستقیمی بر طراحی، هزینه و کارایی سیستم جمع‌آوری دارد و بالعکس. به عنوان مثال، اگر پسماند در مبدأ به صورت سه‌گانه (کاغذ، پلاستیک، آلی) تفکیک شود، سیستم جمع‌آوری باید قابلیت جمع‌آوری جداگانه این جریان‌ها را داشته باشد. در غیر این صورت، تلاش‌های تفکیک در مبدأ بی‌نتیجه خواهد ماند.

بر این اساس، مسئله اصلی این تحقیق، شناسایی و تحلیل وابستگی متقابل بین روش‌های تفکیک در مبدأ و سیستم‌های جمع‌آوری پسماند است. هدف از حل این مسئله، ارائه یک چارچوب مفهومی یکپارچه است که بتواند به برنامه‌ریزان شهری و تصمیم‌گیرندگان در انتخاب هماهنگ و بهینه این دو مرحله کمک کند.

اهمیت این مسئله از چند جنبه قابل توجه است:

اول، از منظر اقتصادی، عدم هماهنگی بین تفکیک و جمع‌آوری می‌تواند منجر به اتلاف منابع مالی شود. برای مثال، سرمایه‌گذاری در سیستم تفکیک سه‌گانه بدون وجود سیستم جمع‌آوری مناسب، هزینه‌های بالایی را بدون بازدهی متناسب به همراه خواهد داشت.

دوم، از دیدگاه محیط‌زیستی، ناهماهنگی بین این دو مرحله می‌تواند منجر به کاهش نرخ بازیافت و افزایش حجم دفن شود که پیامدهای منفی زیست‌محیطی همچون آلودگی خاک، آب و هوا را به دنبال دارد.

سوم، از منظر اجتماعی، عدم کارایی سیستم مدیریت پسماند می‌تواند اعتماد شهروندان به برنامه‌های تفکیک را کاهش داده و مشارکت عمومی را تضعیف کند.

در این راستا، تحقیق حاضر با استفاده از یافته‌های دو مطالعه معتبر اخیر که از روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و معیارهای مشابه (محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی، فنی) استفاده کرده‌اند، به تحلیل تطبیقی و یکپارچه‌سازی یافته‌ها می‌پردازد. مطالعه (۲۰۲۵) Apaydin با بهره‌گیری از نظرات ۱۳ خبره در ترکیه، سه سناریوی مدیریت پسماند را در شرایط تفکیک آمیخته، دوگانه و سه‌گانه ارزیابی کرده است. از سوی دیگر، مطالعه Simeoni

(۲۰۲۵) و Cottet با مشارکت ۱۵ خبره در منطقه گوریزیا ایتالیا، سه سیستم جمع‌آوری (خیابانی، درب‌به‌درب، ترکیبی) را مقایسه نموده است.

با ترکیب و تحلیل یافته‌های این دو مطالعه، این تحقیق قصد دارد نشان دهد که چگونه می‌توان الگوهای بهینه هماهنگ بین روش‌های تفکیک و سیستم‌های جمع‌آوری را شناسایی کرد و چارچوبی برای تصمیم‌گیری یکپارچه در این زمینه ارائه نمود.

۲- طبقه بندی مسئله:

۲-۱- مقاله اول:

موضوع اصلی: تحلیل گزینه‌های مدیریت پایدار پسماند شهری مبتنی بر تفکیک در مبدأ با استفاده از فرآیند

تحلیل سلسله مراتبی.

۲-۱-۱. نوع مسئله:

تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)

۲-۱-۲. ماهیت مسئله:

مسئله ارزیابی و انتخاب - (Evaluation & Selection Problem) هدف، ارزیابی سه سناریوی مدیریت پسماند (A^1, A^2, A^3) تحت تأثیر سه روش تفکیک در مبدأ (مختلط، دوگانه، سه‌گانه) و انتخاب برترین سناریو است.

۲-۱-۳. سطح تصمیم:

تصمیم در سطح تاکتیکی-استراتژیک مدیریت شهری (تأثیرگذار بر انتخاب فناوری‌های پردازش و خط‌مشی‌های کلان جمع‌آوری).

۲-۱-۴. نوع داده‌ها و معیارها:

- داده‌های کمی (امتیازات وزن‌دار ناشی از مقایسات زوجی).
- داده‌های کیفی (قضاوت‌های خبرگان).
- معیارها در چهار گروه محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فنی با ۱۵ زیرمعیار تعریف شده‌اند.

۲-۱-۵. تعداد گزینه‌ها:

سه گزینه اصلی (سناریوهای A^1, A^2, A^3)

۲-۱-۶. تعداد معیارها:

۱۵ زیرمعیار تحت چهار معیار اصلی.

۲-۱-۷. روش تصمیم‌گیری پیشنهادی:

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP).

۲-۱-۸. هدف نهایی:

تعیین اثر روش تفکیک در مبدأ بر پایداری سناریوهای مدیریت پسماند و کمک به تصمیم‌گیرندگان در فرآیندهای مدیریت پسماند شهری پایدار.

۲-۲ مقاله دوم:

موضوع اصلی: یک چارچوب چندمعیاره مبتنی بر AHP برای جمع‌آوری پایدار پسماند شهری.

۲-۲-۱ نوع مسئله:

تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)

۲-۲-۲ ماهیت مسئله:

مسئله ارزیابی و انتخاب – (Evaluation & Selection Problem) هدف، مقایسه سه روش جمع‌آوری (خیابانی، ترکیبی، درب‌به‌درب) و شناسایی کارآمدترین روش از منظر عملکرد محیطی است.

۲-۲-۳ سطح تصمیم:

تصمیم در سطح عملیاتی- تاکتیکی مدیریت خدمات شهری (تأثیرگذار بر برنامه‌ریزی عملیات میدانی و تعامل با شهروندان).

۲-۲-۴ نوع داده‌ها و معیارها:

- داده‌های کمی (ردپای کربن، تعداد تجهیزات، مسافت طی شده).
- داده‌های کیفی (قضاوت‌های خبرگان در مورد معیارهای اجتماعی).
- معیارها در سه گروه محیطی، فنی و اجتماعی دسته‌بندی شده‌اند.

۲-۲-۵ تعداد گزینه‌ها:

سه گزینه (روش‌های جمع‌آوری).

۲-۲-۶ تعداد معیارها:

مجموعه‌ای از شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs) در قالب معیارها و زیرمعیارها.

۲-۲-۷ روش تصمیم‌گیری پیشنهادی:

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP).

۲-۲-۸ هدف نهایی:

ارائه یک چارچوب AHP برای ارزیابی عملکرد محیطی سیستم‌های جمع‌آوری جداگانه و کمک به تصمیم‌گیری مدیران خدمات بهداشت شهری.

۳- مدل سازی ریاضی:**۳-۱. تلفیق و توسعه چارچوب پیشنهادی**

با تحلیل دو مقاله پایه، نقطه اشتراک اصلی، استفاده از AHP به عنوان هسته روش‌شناختی است. با این حال، هر کدام تنها یک بخش از پازل مدیریت یکپارچه پسماند (تفکیک یا جمع‌آوری) را بررسی می‌کنند. مدل پیشنهادی این پژوهش، با الهام از ساختار سلسله‌مراتبی AHP و با هدف پر کردن شکاف موجود، یک چارچوب دو مرحله‌ای و یکپارچه ارائه می‌دهد که در آن خروجی مرحله اول، ورودی مرحله دوم را شکل می‌دهد.

۳-۱-۲. مرحله اول: وزن دهی معیارهای مستقل

یک سلسله مراتب AHP برای ارزیابی مستقل گزینه های تفکیک در مبدأ (مختلط، دوگانه، سه گانه) طراحی می شود. معیارهای این سطح، معیارهای عمومی پایداری (محیطی، اقتصادی، اجتماعی، فنی) با زیرمعیارهای اختصاصی شده برای تفکیک هستند (مانند بازیافت منابع، هزینه های آموزش شهروندی، نیاز به فضای ذخیره سازی در منازل). یک سلسله مراتب AHP موازی برای ارزیابی مستقل گزینه های روش جمع آوری (خیابانی، ترکیبی، درب به درب) طراحی می شود. معیارهای این سطح نیز معیارهای پایداری هستند که برای جمع آوری مناسب سازی شده اند (مانند رد پای کربن حمل و نقل، هزینه های نیروی انسانی، بهداشت شهری). وزن نهایی هر معیار و زیرمعیار در هر یک از این دو سلسله مراتب، از طریق نظرات خبرگان و تشکیل ماتریس های مقایسه زوجی محاسبه می شود.

۳-۱-۳. مرحله دوم: تشکیل و ارزیابی سناریوهای تلفیقی

در این مرحله، سناریوهای مدیریتی ترکیبی شکل می گیرند. هر سناریو حاصل ترکیب یک گزینه از مرحله اول تفکیک با یک گزینه از مرحله اول جمع آوری است (مثلاً سناریوی S1: تفکیک دوگانه + جمع آوری درب به درب). یک سلسله مراتب AHP جدید تعریف می شود که هدف نهایی آن «انتخاب بهینه ترین سناریوی ترکیبی مدیریت پسماند» است.

معیارهای این سطح، همان معیارهای وزندار شده نهایی از مرحله اول هستند که اکنون به عنوان شاخص هایی برای سنجش سناریوهای ترکیبی به کار می روند.

هر سناریوی ترکیبی تحت هر یک از این معیارها ارزیابی می شود. امتیاز نهایی هر سناریو از حاصل جمع وزنی امتیازات آن در تمام معیارها به دست می آید. سناریوی با بالاترین امتیاز، گزینه بهینه یکپارچه معرفی می گردد.

این مدل دو مرحله ای، امکان بررسی هم زمان تأثیر تصمیمات مرتبط را فراهم کرده و از تصمیم گیری جزیره ای جلوگیری می کند.

۴- روش حل مسئله:

۴-۱- مقاله اول:

۴-۱-۱ تعریف مسئله و هدف:

هدف مطالعه، تعیین تأثیر روش تفکیک پسماند در مبدأ (مختلط، دوگانه، سه گانه) بر ارجحیت سه سناریوی مدیریت پسماند شهری با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) است. مسئله، یک مسئله تصمیم گیری چندمعیاره با چندین گزینه (سناریوها) تحت تأثیر معیارهای متضاد است.

۴-۱-۲- تعیین معیارها و زیرمعیارها:

با استناد به ادبیات و اهداف پژوهش، چهار معیار اصلی (محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فنی) با مجموع ۱۵ زیرمعیار تعیین شدند. این زیرمعیارها طیفی از شاخص ها همچون انتشارات جوی و آلودگی آب (محیطی)، هزینه سرمایه گذاری و عملیاتی (اقتصادی)، افزایش آگاهی و کیفیت زندگی (اجتماعی) و امکان پذیری عملیاتی (فنی) را در بر می گیرند.

۴-۱-۳- ساخت سلسله مراتب تصمیم و مقایسه های زوجی:

یک ساختار سلسله مراتبی چهارسطحه طراحی شد:

سطح ۱: هدف نهایی (انتخاب بهینه ترین سناریوی مدیریت پسماند).

سطح ۲: معیارهای اصلی. (E, C, S, T)

سطح ۳: زیرمعیارها (۱۵ زیرمعیار).

سطح ۴: گزینه ها سه سناریوی. (A^1, A^2, A^3)

برای هر یک از سه روش تفکیک در مبدأ (به عنوان شرایط مجزا)، مقایسات زوجی توسط خبرگان انجام شد. از مقیاس ۱ تا ۹ ساعتی (۱=اهمیت یکسان، ۹=اهمیت فوق العاده) برای تعیین شدت ترجیح استفاده گردید.

۴-۱-۴- محاسبه اوزان و بررسی سازگاری:

- از ماتریس های مقایسه زوجی، وزن هر معیار و زیرمعیار محاسبه می شود (بردار ویژه نرمال شده).
- نسبت ناسازگاری (CR) محاسبه می شود؛ اگر $CR \leq 0.10$ باشد، قضاوت ها قابل قبول اند؛ در غیر این صورت، باید قضاوت ها بازبینی شوند.

۴-۱-۵- تجمیع اوزان و انتخاب گزینه نهایی:

- وزن نهایی (اولویت جهانی) هر گزینه از طریق تجمیع سلسله مراتبی اوزان محاسبه شد:
- وزن هر زیرمعیار در وزن معیار اصلی مربوطه ضرب شد تا اهمیت جهانی آن به دست آید.
- برای هر گزینه (سناریو)، امتیاز آن تحت هر زیرمعیار در وزن جهانی آن زیرمعیار ضرب شد.
- مجموع این امتیازات وزندار برای هر گزینه، امتیاز نهایی آن گزینه را تشکیل داد.
- گزینه با بالاترین امتیاز نهایی، به عنوان بهینه ترین راه حل انتخاب شد. در این مطالعه، در هر سه حالت تفکیک (مختلط، دوگانه، سه گانه)، سناریوی A^1 (تأسیسات بازیافت مواد + دفن بهداشتی) بالاترین امتیاز نهایی را کسب کرد.

۴-۲- مقاله دوم:

۴-۲-۱- تعریف مسئله و شناسایی اهداف

در گام نخست، مسئله به صورت دقیق و شفاف تعریف شد: ارزیابی و رتبه بندی سه روش عملیاتی جمع آوری پسماند (خیابانی، ترکیبی، درب به درب) از منظر پایداری (با تأکید بر عملکرد محیطی). هدف اصلی، ارائه یک چارچوب

تصمیم‌گیری برای کمک به مدیران خدمات شهری در انتخاب کارآمدترین روش بود. این مسئله چندهدفه و پیچیده، نیازمند در نظرگیری معیارهای متضاد است.

۴-۲-۲- تعیین معیارها و زیرمعیارها

بر اساس اهداف و با مشارکت خبرگان، مجموعه‌ای از شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs) به عنوان معیار و زیرمعیار تعیین شد. این معیارها در سه گروه اصلی دسته‌بندی شدند:

- محیطی: شامل ردپای کربن (CFP) و درصد جمع‌آوری جداگانه (%SWC).
- فنی: شامل کاربرد مخازن خیابانی، کاربرد مخازن یکبارمصرف و قابلیت استفاده از خدمات.
- اجتماعی: شامل زیبایی شهری، تعداد اپراتورها و آگاهی محیط‌زیستی کاربران.

۴-۲-۳- انتخاب روش مناسب منتخب

با توجه به ماهیت مسئله (چندمعیاره، ترکیب داده‌های کمی و کیفی، نیاز به مشارکت خبرگان)، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به عنوان روش مناسب انتخاب شد. این انتخاب مبتنی بر توانایی AHP در ساختاردهی سلسله‌مراتبی مسئله، انجام مقایسات زوجی ساده و ادغام نظرات مختلف بود.

۴-۲-۴- جمع‌آوری داده‌ها و وزن‌دهی به معیارها

داده‌ها از دو منبع جمع‌آوری شدند:

- داده‌های کمی واقعی: از مطالعه موردی استان گوریزیا، ایتالیا، شامل محاسبه CFP بر اساس پیمایش ناوگان، تعداد تجهیزات و غیره.
- داده‌های کیفی (قضاوت خبرگان): نظرات ۱۵ خبره از حوزه‌های دانشگاهی، مدیریتی، عملیاتی و اجتماعی.
- برای وزن‌دهی به معیارها و زیرمعیارها، نظرات خبرگان در قالب ماتریس‌های مقایسه زوجی ثبت و با استفاده از میانگین هندسی تجمیع شد. وزن نهایی هر معیار از بردار ویژه ماتریس تجمیع‌شده استخراج گردید و وزن‌دهی صحیح، دقت مدل را تضمین می‌کند.

۴-۲-۵- ارزیابی گزینه‌ها و رتبه‌بندی نهایی

پس از تعیین وزن معیارها، سه گزینه (روش‌های جمع‌آوری) تحت هر معیار و زیرمعیار ارزیابی شدند. ارزیابی بر اساس مقایسه زوجی گزینه‌ها صورت گرفت. با تجمیع نتایج و ضرب امتیازات در وزن معیارها، امتیاز نهایی هر گزینه محاسبه و رتبه‌بندی نهایی انجام شد. نتایج نشان داد روش جمع‌آوری درب‌به‌درب با اولویت مطلق ۰.۴۸۵ بهترین عملکرد را دارد. در نهایت، تحلیل حساسیت با تغییر وزن معیارهای کلیدی انجام شد تا اثر این تغییرات بر رتبه‌بندی نهایی بررسی گردد.

۴-۳. تلفیق یافته‌ها در چارچوب دو مرحله‌ای پیشنهادی

این بخش توضیح می‌دهد که چگونه یافته‌های دو مطالعه مذکور به عنوان ورودی‌های مدل ریاضی ارائه‌شده در بخش ۳ قرار می‌گیرند تا خروجی یکپارچه (بهترین سناریوی ترکیبی) تولید شود.

۴-۳-۱. استخراج داده‌های ورودی از مقالات پایه

برای پیاده‌سازی مدل دو مرحله‌ای، خروجی‌های کلیدی مطالعات مقاله به شرح زیر استخراج و آماده‌سازی شدند: از مطالعه آپادین (مرحله اول-الف در مدل):

- وزن معیارهای ارزیابی تفکیک: (W_S) وزنهای نهایی معیارهای چهارگانه (محیطی، اقتصادی، اجتماعی، فنی) و زیرمعیارهای مربوطه که برای ارزیابی سناریوهای تفکیک (مختلط، دوگانه، سه گانه) استفاده شده‌اند.
- امتیاز گزینه‌های تفکیک: (A_{Si}) امتیاز نهایی هر یک از سه روش تفکیک.
- از مطالعه کوتس و سیمثونی (مرحله اول-ب در مدل):
- وزن معیارهای ارزیابی جمع‌آوری: (W_C) وزنهای نهایی معیارهای اصلی (محیطی، فنی، اجتماعی) که برای مقایسه سیستم‌های جمع‌آوری به کار رفته‌اند.
- امتیاز گزینه‌های جمع‌آوری: (A_{Cj}) امتیاز نهایی و رتبه هر یک از سه روش جمع‌آوری (خیابانی، ترکیبی، درب‌به‌درب).

۴-۳-۲. تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری یکپارچه

پس از استخراج داده‌ها، یک ماتریس تصمیم‌گیری یکپارچه تشکیل می‌شود.

- سطرها: نشان‌دهنده ۹ سناریوی ترکیبی ممکن حاصل از تلفیق ۳ گزینه تفکیک و ۳ گزینه جمع‌آوری هستند (SC_{ij} تا SC_{33})
- ستون‌ها: نشان‌دهنده مجموعه معیارهای تلفیقی هستند که از ادغام معیارهای وزندار شده دو مطالعه به دست آمده‌اند.
- سلول‌ها: هر سلول (SC_{ij} , M_q) بیانگر عملکرد آن سناریوی ترکیبی تحت آن معیار خاص است.

۴-۳-۳. محاسبه و رتبه‌بندی نهایی سناریوهای ترکیبی

با استفاده از رابطه امتیاز نهایی $(SC_{ij}) =$ مجموع (وزن معیار $q \times$ عملکرد سناریو ij تحت معیار q) که در بخش ۳-۲ تعریف شد، امتیاز نهایی هر یک از ۹ سناریوی ترکیبی محاسبه می‌گردد. سناریوها بر اساس این امتیاز نهایی رتبه‌بندی شده و سناریوی بالاترین امتیاز به عنوان بهینه‌ترین ترکیب یکپارچه سیستم تفکیک و جمع‌آوری پسماند معرفی می‌شود. بر اساس یافته‌های کیفی حاصل از تلفیق دو مطالعه، سناریوی ترکیبی «تفکیک سه‌گانه در مبدأ همراه با سیستم جمع‌آوری درب‌به‌درب» به عنوان کارآمدترین گزینه از نظر ابعاد محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فنی پیش‌بینی می‌شود.

۴-۴. تحلیل مقایسه‌ای معیارها و نتایج

برای ارائه تصویری روشن‌تر از داده‌های ورودی مدل، وزن معیارهای اصلی در هر دو مطالعه در جدول ۱ مقایسه شده‌اند.

جدول ۱. وزن نهایی معیارهای اصلی در مطالعات پایه

توضیح	مطالعه دوم	مطالعه اول	معیار
وزن غالب در مطالعه اول	متغیر*	۰.۶۹۹	زیست‌محیطی
تنها در مطالعه دوم کمیّت شده	۰.۲۷۳ (در حالت مخلوط)	-	اقتصادی
-	متغیر*	۰.۲۳۷	اجتماعی
-	متغیر*	۰.۰۶۴	فنی

روش‌های تفکیک در مبدأ سیستم‌های جمع‌آوری منبع
در مطالعه دوم، وزن معیارها بسته به روش تفکیک در مبدأ (مخلوط، دوگانه، سه‌گانه) متفاوت است که نشان‌دهنده تأثیرپذیری ارزیابی پایداری از سطح تفکیک است.
سپس، نتایج نهایی و رتبه‌بندی گزینه‌های برتر در هر مطالعه و خروجی یکپارچه مدل پیشنهادی در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲. خلاصه نتایج نهایی و رتبه‌بندی در مطالعات و مدل یکپارچه

رتبه سوم	رتبه دوم	امتیاز/وزن	گزینه برتر	بخش مورد ارزیابی	مطالعه
ترکیبی ۰.۱۹۷	خیابانی ۰.۳۱۸	۰.۵۲۷	درب‌به‌درب	سیستم جمع‌آوری	مقاله اول
مخلوط	دوگانه	۰.۵۱۲~	سه‌گانه	روش تفکیک	مقاله دوم
-	A ^۲ یا A ^۳	رتبه ۱	A ^۱ (MRF+SLF)	سناریوی مدیریت	مقاله دوم
-	-	بهینه	تفکیک سه‌گانه + جمع‌آوری درب‌به‌درب	ترکیب بهینه	مدل یکپارچه پیشنهادی

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، ترکیب پیشنهادی این پژوهش (تفکیک سه‌گانه در مبدأ + سیستم جمع‌آوری درب‌به‌درب) که بر اساس تلفیق ساختار یافته یافته‌های دو مطالعه در چارچوب دو مرحله‌ای به دست آمده است، به عنوان راهکار بهینه برای مدیریت پایدار پسماند شهری شناسایی می‌شود. این نتیجه همسو با یافته‌های کلی هر دو مطالعه است که به ترتیب برتری «تفکیک سه‌گانه» و «جمع‌آوری درب‌به‌درب» را به لحاظ معیارهای پایداری نشان می‌دهند.

۴-۵- تحلیل حساسیت

به منظور آزمون پایداری خروجی مدل، تحلیل حساسیت به عنوان یک گام تکمیلی پیشنهاد می‌گردد. در این تحلیل، تغییرات سیستماتیک (مانند $\pm 10\%$) در وزن معیارهای کلیدی (نظیر معیارهای «زیست‌محیطی» و «اقتصادی») اعمال شده و تأثیر آن بر رتبه‌بندی نهایی سناریوهای ترکیبی بررسی می‌شود. انتظار می‌رود که سناریوی بهینه شناسایی شده در برابر چنین تغییراتی مقاوم باشد که نشان‌دهنده استحکام چارچوب تصمیم‌گیری ارائه‌شده خواهد بود.

۵- نقد ادبیات

۵-۱- مقاله اول

۵-۱-۱- نقد ادبیات مقاله

ادبیات پژوهش حاضر نشان می‌دهد که نویسنده تلاش کرده است مسأله مدیریت پسماند شهری را در چارچوب رویکرد «صفر پسماند» و با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) تحلیل کند. مرور ادبیات مقاله، گستره‌ای از منابع مرتبط با مدیریت پسماند پایدار، تفکیک در مبدأ، و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را پوشش می‌دهد و نشان می‌دهد که انتخاب سناریوی مدیریت پسماند، یک مسأله چندبعدی و وابسته به معیارهای زیست‌محیطی، اقتصادی،

اجتماعی و فنی است. با این حال، ادبیات مقاله بیشتر توصیفی است و کمتر وارد نقد یا مقایسه‌ای میان مدل‌ها و یافته‌های پیشین می‌شود. همچنین، ارتباط مستقیم میان روش تفکیک در مبدأ و انتخاب سناریوی بهینه به طور کامل تبیین نشده است.

۵-۱-۲- نقاط قوت ادبیات

۱. پوشش مناسب مفاهیم پایدار

ادبیات مقاله به خوبی ابعاد اصلی پایداری شامل معیارهای زیستمحیطی، اقتصادی، اجتماعی و فنی را معرفی می‌کند و نشان می‌دهد که انتخاب سناریوی مدیریت پسماند تنها یک تصمیم فنی نیست، بلکه یک تصمیم چندبعدی است.

۲. استفاده از منابع معتبر و متنوع

نویسنده از منابع بین‌المللی و پژوهش‌های مرتبط با مدیریت پسماند، تفکیک در مبدأ، و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده کرده است که به غنای مقاله کمک کرده است.

۳. تأکید بر ضرورت تصمیم‌گیری علمی در مدیریت پسماند

ادبیات مقاله به خوبی نشان می‌دهد که انتخاب سناریوی مدیریت پسماند بر اساس قضاوت ذهنی یا تجربه‌گرایی می‌تواند منجر به راه‌حل‌های ناکارآمد و آثار منفی زیستمحیطی شود.

۴. توجیه منطقی برای استفاده از AHP

مقاله با استناد به منابع معتبر، نشان می‌دهد که چرا AHP برای مسائل سلسله‌مراتبی و چندمعیاره مناسب است

۵-۱-۳- نقاط ضعف ادبیات

۱. نبود نقد عمیق منابع

ادبیات بیشتر حالت گزارش‌دهی دارد و کمتر به مقایسه، تحلیل انتقادی یا تضادهای موجود در پژوهش‌های پیشین می‌پردازد.

۲. عدم توجه به مطالعات منطقه‌ای مشابه

اگرچه مسأله در چارچوب "صفر پسماند" تحلیل شده، اما مقایسه با کشورهای مشابه از نظر فرهنگ، زیرساخت یا نظام مدیریت پسماند انجام نشده است.

۳. کمبود شواهد تجربی در ادبیات

بخش ادبیات بیشتر نظری است و کمتر به داده‌های واقعی یا مطالعات موردی اشاره می‌کند که می‌توانست استدلال‌ها را تقویت کند.

۴. عدم بررسی محدودیت‌های روش AHP در ادبیات

در حالی که AHP انتخاب شده، مقاله به محدودیت‌های این روش (ذهنی بودن قضاوت‌ها، حساسیت به ناسازگاری، تعداد زیاد مقایسه‌ها) اشاره نمی‌کند.

۵-۱-۴- آینده پژوهی و پیشنهادهای پژوهشی

۱. استفاده از روش‌های ترکیبی MCDM

پژوهش‌های آینده می‌توانند از روش‌های ترکیبی مانند:

• AHP-TOPSIS

• AHP-VIKOR

- Fuzzy AHP استفاده کنند تا عدم قطعیت و ابهام در قضاوت‌های خبرگان بهتر مدیریت شود.

۲. توسعه مدل سایر اجزای سیستم مدیریت پسماند

مدل ارائه شده می‌تواند برای انتخاب فناوری‌های پردازش نهایی، سیستم‌های جمع‌آوری هوشمند، یا سیاست‌های مشوق‌گذاری گسترش یابد.

۳. مقایسه نتایج با داده‌های واقعی پروژه‌ها

پژوهش‌های آینده می‌توانند بررسی کنند که آیا مصالح انتخاب‌شده واقعاً در عمل پایدارتر هستند یا خیر.

۴. افزودن شاخص‌های کمی‌تر

برای مثال:

- میزان واقعی انتشار CO₂
- انرژی نهفته
- هزینه چرخه عمر با داده‌های واقعی بازار این موارد می‌تواند دقت مدل را افزایش دهد.

۵. بررسی تأثیر اقلیم و جغرافیا

مدیریت پسماند در مناطق مختلف متفاوت است؛ پژوهش‌های آینده می‌توانند مدل را برای اقلیم‌های مختلف یا کشورهای مشابه تطبیق دهند.

۵-۲- مقاله دوم:

۵-۲-۱- نقد ادبی

ادبیات مرور شده در مقاله، گستره‌ی وسیعی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و شاخص‌های عملکرد زیستمحیطی را پوشش می‌دهد و از مفاهیم پایه پایداری تا مدل‌های کمی‌سازی اثرات کربن را در بر می‌گیرد. نویسندگان تلاش کرده‌اند تحول این حوزه را با رویکردی کاربردی و مبتنی بر موردکاوی نشان دهند و ارتباط میان معیارهای فنی، اجتماعی و زیستمحیطی را برجسته کنند. با این حال، ادبیات ارائه شده بیشتر توصیفی است تا تحلیلی و کمتر به مقایسه‌ی عمیق، نقد روش‌شناختی، یا تضادهای نظری میان پژوهش‌ها پرداخته است. در نتیجه، خواننده تصویری کاربردی اما نه کاملاً انتقادی از حوزه دریافت می‌کند..

۵-۲-۲- نقاط قوت ادبیات

۵-۲-۲-۱- پوشش جامع و ساختارمند

ادبیات مقاله دامنه‌ی وسیعی از شاخص‌های عملکرد زیستمحیطی را شامل می‌شود:

- شاخص‌های فنی: درصد جمع‌آوری تفکیکی، تعداد مخازن، استفاده از ظروف یکبارمصرف
 - شاخص‌های اجتماعی: آگاهی زیستمحیطی کاربران، رفاه شهری
 - شاخص‌های زیستمحیطی: ردپای کربن
- این گستردگی کمک می‌کند خواننده درکی کامل از ابعاد مؤثر بر انتخاب سیستم جمع‌آوری به دست آورد.

۵-۲-۲- توجه به کاربردهای عملیاتی

یکی از نقاط قوت مهم مقاله، اشاره به معیارهای قابل اندازه گیری و در دسترس برای مدیران خدمات شهری است. این رویکرد، مدل را از حالت تئوری صرف به سمت ابزار پشتیبان تصمیم عملیاتی سوق می دهد.

۵-۲-۳- تأکید بر نقش ذی نفعان و کار گروهی

مقاله به روشنی فرآیند تشکیل پنل خبرگان و ترکیب متنوع آن (دانشگاهی، عملیاتی، اجتماعی) را شرح داده و نشان می دهد که تصمیم گیری چندمعیاره باید مشارکت محور باشد..

۵-۲-۳- نقاط ضعف ادبیات**۵-۲-۳-۱- نبود نقد روش شناختی عمیق**

ادبیات بیشتر توصیفی است تا تحلیلی. برای مثال:

- تفاوت های مفهومی میان معیارهای فنی و اجتماعی به طور نظام مند بررسی نشده است.
- محدودیت های واقعی روش AHP در محیط های عملیاتی مقایسه نشده است.
- چالش های اجرایی مدل در مقیاس های بزرگ نادیده گرفته شده است.

۵-۲-۳-۲- نبود انسجام نظری

اگرچه مقاله شاخص های متعددی را معرفی می کند، اما یک چارچوب نظری منسجم برای تبیین روابط علی میان آنها ارائه نمی دهد.

۵-۲-۳-۳- فقدان ارجاع به مطالعات مقایسه ای معتبر

ادبیات به پژوهش های مقایسه ای بزرگ مقیاس در سطح اروپا یا بین المللی اشاره نمی کند که می توانست جایگاه مدل را در ادبیات جهانی مشخص کند..

۵-۲-۳-۴- عدم بررسی چالش های محاسباتی

مقاله به مسئله عدم قطعیت در داده های عملیاتی (مثل برآورد ردپای کربن) و تأثیر آن بر نتایج AHP پرداخته است.

۵-۲-۴- آینده پژوهی مقاله (Future Research Directions)

بر اساس ادبیات مقاله، چند مسیر مهم برای پژوهش های آینده قابل استخراج است:

۵-۲-۴-۱- توسعه مدل های پویا و بلادرنگ (Real-time MCDM)

با توجه به رشد فناوری های هوشمند و داده های لحظه ای، نیاز به مدل هایی که بتوانند:

- به صورت آنی به تغییرات پارامترها پاسخ دهند
- وزن معیارها را به طور پویا به روز کنند
- از یادگیری ماشین برای بهبود دقت پیش بینی استفاده کنند، بسیار ضروری است.

۵-۲-۴-۲- ادغام عمیق تر تحلیل چرخه عمر (LCA)

پژوهش‌های آینده می‌توانند به سمت:

مدل‌های ترکیبی AHP-LCA

شاخص‌های کیفی‌تر مبتنی بر LCA حرکت کنند.

۵-۲-۴-۳- استانداردسازی سیستم‌های جمع‌آوری

یکی از چالش‌های مهم، نبود یک چارچوب استاندارد برای مقایسه‌ی سیستم‌های جمع‌آوری در شهرهای مختلف است.

پژوهش‌های آینده می‌توانند:

- شاخص‌های ارزیابی یکپارچه تعریف کنند
- بانک داده‌های مرجع ارائه دهند
- پروتکل‌های مقایسه‌ای تدوین کنند.

۵-۲-۴-۴- مدل‌سازی عدم قطعیت پیشرفته

روش‌های فازی و تحلیل حساسیت کافی نیستند. نیاز به:

- مدل‌های مبتنی بر تئوری شواهد
- مدل‌های احتمالاتی پیشرفته
- سناریوسازی پویا به شدت احساس می‌شود.

۵-۲-۴-۵- کاربردهای پایداری و اقتصاد چرخشی

- با توجه به تأکید مقاله بر پایداری، پژوهش‌های آینده می‌توانند روی:
- تصمیم‌گیری مبتنی بر اقتصاد چرخشی
- ارزیابی هزینه-فایده زیست-محیطی
- شاخص‌های گردش مواد متمرکز شود.

۵- نتیجه گیری:

ترکیب یافته‌های دو حوزه تفکیک در مبدأ و سیستم‌های جمع‌آوری پسماند شهری نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) به‌ویژه در قالب فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، چارچوبی تحلیلی و قدرتمند برای هدایت سیستم‌های مدیریت پسماند به سوی پایداری، کارایی و شفافیت فراهم می‌کند. مطالعات موردی در ترکیه (Apaydin, ۲۰۲۵) و ایتالیا (Cottes & Simeoni, ۲۰۲۵) به وضوح نشان می‌دهند که انتخاب روش‌های مدیریت پسماند دیگر نمی‌تواند صرفاً بر اساس هزینه یا سهولت اجرا انجام شود؛ بلکه باید مجموعه‌ای از معیارهای زیستمحیطی، اقتصادی، اجتماعی و فنی به‌طور هم‌زمان و متوازن در نظر گرفته شوند. این دقیقاً همان نقطه‌ای است که روش‌های MCDM ارزش خود را آشکار می‌سازند. مقاله اول نشان داد که تفکیک دوگانه و سه‌گانه در مبدأ در مقایسه با روش مختلط، تأثیر مثبت و معناداری بر پایداری سناریوهای پردازش نهایی دارد.

مقاله دوم نیز تأیید کرد که سیستم جمع‌آوری درب‌به‌درب، علیرغم چالش‌های عملیاتی، به دلیل دستیابی به نرخ تفکیک بالاتر و افزایش مشارکت شهروندی، از منظر پایداری جامع برتر است.

این نتایج، لزوم نگرش یکپارچه و هماهنگ در طراحی سیستم‌های مدیریت پسماند را تأکید می‌کنند: بهبود در یک مرحله بدون توجه به مرحله بعدی ممکن است به بهره‌وری کلی سیستم لطمه بزند.

از سوی دیگر، کاربرد AHP در هر دو مطالعه، نشان‌دهنده تحول و تکامل مداوم این حوزه است:

- ادغام نظر خبرگان با داده‌های عملیاتی (مانند ردپای کربن، هزینه‌های اجرایی)
 - استفاده از تحلیل حساسیت برای آزمون پایداری نتایج
 - تلفیق معیارهای کیفی و کمی در یک ساختار سلسله‌مراتبی شفاف
- این روندها حاکی از آن است که تصمیم‌گیری در مدیریت پسماند در آینده نه تنها دقیق‌تر، بلکه هوشمندانه‌تر، مشارکتی‌تر و داده‌محور خواهد شد.

در مجموع، پیوند میان این دو مطالعه و چارچوب یکپارچه ارائه‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که:

- MCDA به‌طور خاص و AHP هسته مرکزی تصمیم‌گیری پایدار در مدیریت پسماند شهری است.
- به‌کارگیری این روش‌ها در انتخاب هماهنگ روش تفکیک و سیستم جمع‌آوری می‌تواند به کاهش اثرات زیست-محیطی، افزایش نرخ بازیافت، کاهش هزینه‌های چرخه عمر و بهبود رضایت اجتماعی بیانجامد.
- مدل دو مرحله‌ای پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان نقشه‌راه عملیاتی برای شهرها و نواحی مختلف، با در نظر گرفتن شرایط بومی، مورد استفاده قرار گیرد.

در پایان، حرکت به سوی شهرهای هوشمند و پایدار، مستلزم خرد جمعی، ابزارهای تحلیلی قدرتمند و نگاهی کل‌نگر به زنجیره ارزش پسماند است. این پژوهش گامی در جهت عینیت‌بخشیدن به این نگاه است. با وجود ارائه چارچوبی نوآورانه، این پژوهش از یک محدودیت بنیادی برخوردار است: وابستگی به داده‌ها و بافت دو مطالعه موردی در کشورهای ترکیه و ایتالیا. این امر، تعمیم‌پذیری مستقیم یافته‌ها به دیگر مناطق، به‌ویژه مناطقی با شرایط فرهنگی، اقتصادی و زیرساختی متفاوت (مانند ایران) را با چالش مواجه می‌سازد. بنابراین، گام ضروری بعدی، اعتبارسنجی عملیاتی و بومی‌سازی این مدل است. پیشنهاد می‌گردد پژوهش‌های آتی، چارچوب پیشنهادی را در قالب یک مطالعه موردی جامع در یکی از کلان‌شهرهای ایران پیاده‌سازی نموده و با گردآوری داده‌های محلی از خبرگان و ذی‌نفعان داخلی، قابلیت اجرا، اثربخشی و اصلاحات لازم آن را مورد ارزیابی قرار دهند.

۶. منابع

۱. Apaydin, O. (2025). Sustainable municipal solid waste management alternatives based on source separation using the Analytic Hierarchy Process (AHP). *Journal of Environmental Management*.
۲. Cottes, M., & Simeoni, P. (2025). A multi-criteria AHP framework for sustainable municipal solid waste collection systems. *Waste Management*.
۳. Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill.
۴. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98.
۵. World Bank. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>

۶. United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations.
۷. European Commission. (2020). *A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe*. Brussels: European Commission.