



مدل برنامه ریزی خطی برای بهینه سازی تخصیص پسماند شهری استان گیلان مبنتی بر رویکرد کانون های منطقه ای

محمد پناهنده^۱، نیلوفر عابدین زاده^۱✉، صدف فیضی^۲

۱- عضو هیئت علمی پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران.

۲- پژوهشگر پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	مدیریت بهینه جریان پسماند در استان گیلان، با توجه به پراکنش فضایی جمعیت، تفاوت میزان تولید پسماند و توزیع نامتوازن ظرفیت تأسیسات پردازش، نیازمند رویکردی منطقه ای است. هدف این پژوهش، ارائه مدل برنامه ریزی خطی برای تخصیص پسماند شهری شهرستان های مورد مطالعه به سه کانون منطقه ای مرکزی، شرقی و غربی با هدف حداقل سازی مجموع مسافت وزنی حمل و نقل است. در مدل، هر شهرستان به یک کانون تخصیص یافت و محدودیت تأمین کامل پسماند و ظرفیت تأسیسات پردازش در نظر گرفته شد. مدل در نرم افزار LINGO حل و به منظور ارزیابی پایداری، تحلیل حساسیت نسبت به تغییر ترکیب پسماند و ظرفیت تأسیسات انجام شد. نتایج نشان داد از مجموع ۱۵۱۶/۹ تن پسماند روزانه، کانون مرکزی با ۸۸۹/۶۵ تن (۵۸/۶ درصد)، کانون شرقی با ۳۵۹/۵ تن (۲۳/۷ درصد) و کانون غربی با ۲۶۷/۷۵ تن (۱۷/۶ درصد) پسماند دریافت می کنند. ترکیب پسماند تخصیص یافته شامل ۹۸۶ تن کمپوست پذیر، ۳۰۳/۳۸ تن ریجکت و ۲۲۷/۵۴ تن مواد بازیافتی در روز است. مقدار تابع هدف، بر اساس مجموع مسافت وزنی حمل و نقل، ۲۶۴۱۷/۳۵ تن-کیلومتر در روز به دست آمد. نتایج تحلیل ظرفیت و حساسیت نشان داد که نوع و توزیع مکانی ظرفیت تأسیسات، در کنار مقدار کل ظرفیت، از عوامل مؤثر بر عملکرد شبکه هستند. بر این اساس، ساختار سه کانونی پیشنهادی می تواند چارچوبی مناسب برای برنامه ریزی منطقه ای مدیریت پسماند در استان گیلان فراهم کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۶	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۲۵	
کلید واژه ها: مدیریت پسماند، مدل برنامه ریزی خطی، تخصیص مراکز کانونی، منطقه ای گیلان	



Linear Programming Model for Optimizing Municipal Solid Waste Allocation in Gilan Province Based on a Regional Hubs Approach

Mohammad Panahandeh¹, Niloufar Abedinzadeh^{1✉}, Sadaf Feyzi²

1- Faculty Member, Environmental Research Institute, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Rasht, Iran.

2- Researcher, Environmental Research Institute, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Rasht, Iran.

Article Info	Abstract
Article type: Research Article Article history: Received: 2025/10/07 Accepted: 2026/09/05 Available online: 2026/09/16 Keywords: Municipal Solid Waste Management; Linear Programming Model; Regional Hub Allocation; Gilan Province	Optimizing waste flows in Gilan Province requires a regional approach due to the spatial distribution of population, variations in waste generation, and the uneven distribution of waste-processing capacities. This study aims to develop a linear programming model for allocating municipal solid waste from the selected counties to three regional hubs—central, eastern, and western—with the objective of minimizing the total weighted transportation distance. Each county was assigned to a single hub, while constraints related to complete waste allocation and processing capacity were incorporated into the model. The model was solved using LINGO software, and sensitivity analysis was conducted to assess the robustness of the results to changes in waste composition and facility capacities. The results showed that, of the total daily waste generation of 1,516.9 tons, the central hub received 889.65 tons (58.6%), the eastern hub received 359.5 tons (23.7%), and the western hub received 267.75 tons (17.6%). The allocated waste included 986 tons of compostable waste, 303.38 tons of reject waste, and 227.54 tons of recyclable materials per day. The objective function value, representing the total weighted transportation distance, was 26,417.35 ton-kilometers per day. The capacity and sensitivity analyses indicated that the type and spatial distribution of processing capacities, in addition to their overall magnitude, are important determinants of network performance. The proposed three-hub structure can therefore provide a suitable framework for regional municipal solid waste management planning in Gilan Province.

✉ Corresponding author E-mail address: n.abedinzadeh@gmail.com

مقدمه

مدیریت پسماند جامد شهری^۱ در قرن بیست و یکم به یکی از چالش‌های پیچیده و چندبعدی محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی در کلان‌شهرها و مناطق پرتراکم جهان تبدیل شده است (رام و براچی^۲، ۲۰۲۴). بر اساس گزارش بانک جهانی^۳ با عنوان What a Waste 2.0، پیش‌بینی می‌شود حجم تولید پسماند در جهان از ۲/۰۱ میلیارد تن در سال به ۳/۴ میلیارد تن در سال ۲۰۵۰ برسد که بیانگر رشد حدود ۷۰ درصدی طی سه دهه است. این افزایش عمدتاً ناشی از رشد جمعیت، شهرنشینی، تغییر الگوی مصرف و توسعه اقتصادی است و ضرورت طراحی سیستم‌های مدیریتی کارآمد، پایدار و مبتنی بر علم و فناوری را آشکار می‌سازد (کازا^۴ و همکاران، ۲۰۱۸). در کشورهای درحال توسعه نیز ضعف زیرساخت‌های فنی و نهادی و محدودیت منابع مالی، پیچیدگی مدیریت پسماند را افزایش داده است (قاسم‌زاده و همکاران، ۱۴۰۰).

در ایران، بیش از ۷۰ درصد پسماند تولیدی شهرها همچنان به روش‌های سنتی و غیراستاندارد دفن می‌شود. این مسئله در استان‌های شمالی، از جمله گیلان، به دلیل شرایط اقلیمی مرطوب، تراکم جمعیتی بالا و ویژگی‌های خاص ترکیب پسماند، پیچیدگی بیشتری دارد (فیضی و همکاران، ۱۴۰۲). این شیوه مدیریت علاوه بر هدررفت منابع قابل بازیافت، پیامدهایی همچون آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی، تولید گازهای گلخانه‌ای، آلودگی خاک و تخریب اکوسیستم‌ها را به دنبال دارد (جلیلی‌پور^۵ و همکاران، ۲۰۲۱؛ گل‌حسینی و قاضی‌زاده^۶، ۲۰۲۴).

در پاسخ به این چالش‌ها، رویکرد مدیریت یکپارچه پسماند^۷ از دهه ۱۹۹۰ به‌عنوان چارچوبی جامع برای مدیریت علمی و نظام‌مند پسماند مورد توجه قرار گرفته است. این رویکرد بر کاهش از مبدأ^۸، استفاده مجدد^۹، بازیافت^{۱۰}، بازیابی انرژی^{۱۱} و دفن بهداشتی^{۱۲} به‌عنوان آخرین گزینه تأکید دارد (ویلسون^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۳).

در این چارچوب، مدل‌های کمی بهینه‌سازی و تحقیق در عملیات، به‌ویژه برنامه‌ریزی خطی^{۱۴}، برنامه‌ریزی عدد صحیح^{۱۵}، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط^{۱۶} و برنامه‌ریزی چندهدفه^{۱۷}، نقش مهمی در تخصیص بهینه جریان‌های پسماند، مکان‌یابی تأسیسات، بهینه‌سازی حمل‌ونقل و کاهش هزینه‌های عملیاتی دارند (قنادپور^{۱۸} و همکاران، ۲۰۱۴؛ گولارت کواله‌و^{۱۹} و همکاران، ۲۰۱۳).

مطالعات بین‌المللی، از جمله پژوهش‌های قیانی^{۲۰} و همکاران (۲۰۱۴)، تیرکلایی^{۲۱} (۲۰۲۰) و آل‌شیخ و عبدالفتاح^{۲۲} (۲۰۲۴)، کارایی مدل‌های بهینه‌سازی را در حل مسائل مدیریت پسماند در مقیاس‌های مختلف نشان

1- Municipal Solid Waste

2- Ram & Bracci

3- World Bank

4- Kaza

5- Jalalipour

6- Golhosseini & Ghazizade

7- Integrated Solid Waste Management

8- Source Reduction

9- Reuse

10- Recycling

11- Energy Recovery

12- Sanitary Landfilling

13- Wilson

14- Linear Programming

15- Integer Programming

16- Mixed Integer Programming

17- Multi-Objective Programming

18- Ghannadpour

19- Goulart Coelho

20- Ghiani

21- Tirkolaee

22- Alshaikh & Abdelfatah

داده‌اند. این مدل‌ها با لحاظ محدودیت‌هایی مانند ظرفیت تأسیسات، بودجه، الزامات محیط‌زیستی و الگوی تولید و ترکیب پسماند، امکان ارائه راهکارهای بهینه و قابل اجرا را فراهم می‌کنند (ال‌هنانده و ال‌زین^۱، ۲۰۱۰). با این حال، همچنان خلأ قابل توجهی در استفاده از مدل‌های کمی مبتنی بر داده‌های واقعی، به‌ویژه در مقیاس استانی، وجود دارد (جاناترا و رومادهانی^۲، ۲۰۲۵).

برنامه‌ریزی خطی یکی از روش‌های اصلی تحقیق در عملیات است که امکان تخصیص بهینه منابع محدود تحت مجموعه‌ای از قیود را فراهم می‌کند (هیلیر و لیبرمن^۳، ۲۰۲۱). در مدیریت پسماند نیز از این روش برای بهینه‌سازی جریان، تخصیص و حمل‌ونقل استفاده می‌شود و هدف آن می‌تواند حداقل‌سازی مجموع مسافت‌های وزنی حمل‌ونقل، با رعایت محدودیت‌هایی مانند ظرفیت تأسیسات و تخصیص کامل پسماند شهرستان‌ها باشد (موسوی^۴ و همکاران، ۲۰۲۲؛ قنادپور و همکاران، ۲۰۱۴).

راهبرد ایجاد و توسعه مراکز کانونی منطقه‌ای^۵ یا «مراکز تجمع و پردازش متمرکز» نیز از دهه ۱۹۹۰ به‌عنوان رویکردی مؤثر برای دستیابی به صرفه‌جویی مقیاس^۶، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری^۷ و عملیاتی^۸، بهبود کنترل کیفیت، استانداردسازی عملیات و استفاده بهینه از فناوری مورد توجه قرار گرفته است (پیرس^۹ و همکاران، ۲۰۱۱؛ زمان^{۱۰}، ۲۰۱۶؛ رضوانگلو^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۰؛ بیژن‌پور و همکاران، ۱۴۰۳).

مطالعه گیل و گوه^{۱۲} (۲۰۱۰) در سنگاپور نشان داد که استقرار سیستم کانونی منطقه‌ای می‌تواند موجب کاهش ۳۰ تا ۴۰ درصدی هزینه‌های کل سیستم، افزایش راندمان بازیافت و بهبود عملکرد محیط‌زیستی شود. این رویکرد به‌ویژه در مناطق دارای پراکندگی جغرافیایی، تفاوت در میزان تولید پسماند و محدودیت منابع، کاربرد بیشتری دارد. با وجود مطالعات انجام‌شده در ایران، شکاف قابل توجهی در ارائه مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی مبتنی بر داده‌های واقعی و به‌روز و متناسب با ویژگی‌های استان گیلان، از جمله شرایط اقلیمی، ترکیب پسماند، پراکندگی جغرافیایی و محدودیت‌های زیرساختی، وجود دارد. بسیاری از مطالعات پیشین عمدتاً به راهکارهای کیفی و توصیفی پرداخته و کمتر محدودیت‌های ظرفیتی، جغرافیایی، حمل‌ونقل، اقتصادی و محیط‌زیستی را به‌صورت همزمان در مدل‌سازی کمی لحاظ کرده‌اند.

همچنین، بخش قابل توجهی از مطالعات موجود فاقد راهبردهای عملیاتی مشخص و زمان‌بندی‌شده برای دوره‌های کوتاه‌مدت (۱-۲ سال)، میان‌مدت (۳-۵ سال) و بلندمدت (۵-۱۰ سال) هستند و بیشتر به تحلیل وضع موجود یا ارائه پیشنهادی کلی محدود شده‌اند. این خلأ، دسترسی مدیران و سیاست‌گذاران حوزه پسماند استان گیلان به ابزارهای علمی و مبتنی بر شواهد را برای برنامه‌ریزی و تخصیص بهینه منابع محدود کرده است.

هدف اصلی این پژوهش، طراحی و پیاده‌سازی یک مدل بهینه‌سازی عملیاتی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی برای مدیریت یکپارچه پسماند استان گیلان در مناطق معتدل و مرطوب، با تمرکز بر سه کانون منطقه‌ای غرب، مرکز و شرق است. مدل با استفاده از داده‌های تولید پسماند ۱۶ شهرستان، فواصل جاده‌ای، ظرفیت موجود و قابل توسعه تأسیسات پردازش شامل کمپوست‌سازی، مدیریت ریجکت و بازیافت و ترکیب فیزیکی-شیمیایی پسماند، به دنبال دستیابی به

1- EL-Hanandeh & El-Zein

2- Janatra& Romadhani

3- Hillier & Lieberman

4- Mousavi

5- Regional Hubs

6- Economies of Scale

7- Capital Expenditure

8- Operating Expenditure

9- Pires

10- Zaman

11- Rızvanoğlu

12- Gill & Goh

تخصیص بهینه و پایدار و حداقل‌سازی مجموع مسافت‌های وزنی حمل‌ونقل است. نوآوری اصلی پژوهش در چند محور است: (۱) ارائه یک مدل ریاضی یکپارچه مبتنی بر داده‌های واقعی برای برنامه‌ریزی مدیریت پسماند استان گیلان؛ (۲) استفاده از رویکرد سه‌کانونی منطقه‌ای با توجه به ویژگی‌های جغرافیایی، اقلیمی و پراکنش جمعیتی استان؛ (۳) تدوین راهبردهای اجرایی و نقشه راه در سه افق زمانی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت؛ و (۴) انجام تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی برای ارزیابی پایداری و قابلیت اطمینان نتایج مدل.

مواد و روش‌ها

● منطقه مورد مطالعه

استان گیلان به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد؛ زیرا ویژگی‌های جغرافیایی، اقلیمی، اقتصادی، اجتماعی و جمعیتی آن، نیازمند سیستم مدیریت پسماند کارآمد و متناسب با شرایط محلی است. این استان با مساحت حدود ۱۴۰۴۴ کیلومترمربع در شمال ایران و در حاشیه جنوبی دریای خزر واقع شده و دارای ۱۷ شهرستان شامل رشت (مرکز استان)، آستارا، آستانه اشرفیه، املش، بندر انزلی، خمام، رودبار، رودسر، سیاهکل، صومعه‌سرا، تالش، فومن، لاهیجان، لنگرود، ماسال، رضوانشهر و شفت است.

جمعیت استان بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ حدود ۲/۵ میلیون نفر و بر اساس برآوردهای سال ۱۴۰۴ حدود ۲/۷ میلیون نفر بوده و تراکم جمعیتی بیش از ۱۷۸ نفر در کیلومترمربع را نشان می‌دهد؛ رقمی بالاتر از میانگین ملی حدود ۵۲ نفر در کیلومترمربع که فشار بیشتری بر سیستم مدیریت پسماند وارد می‌کند (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). شرایط اقلیمی استان، با بارش سالانه بیش از ۱۳۰۰ میلی‌متر در برخی نقاط و رطوبت نسبی ۷۰ تا ۸۰ درصد در بیشتر ماه‌های سال، بر ویژگی‌های پسماند اثرگذار است (سازمان هواشناسی، ۱۴۰۴). رطوبت بالا موجب افزایش وزن مخصوص پسماند، تسریع فرآیندهای تجزیه زیستی، افزایش تولید بو و شیرابه و دشواری برخی فرآیندهای بازیافت می‌شود (قاسم‌زاده و همکاران، ۲۰۲۲).

پراکندگی سکونتگاه‌های شهری و روستایی از مناطق ساحلی تا ارتفاعات البرز و همچنین محدودیت‌های توپوگرافی، از دیگر چالش‌های مدیریت پسماند استان است که می‌تواند موجب افزایش فواصل و هزینه‌های حمل‌ونقل شود (جعفری^۱ و همکاران، ۲۰۲۰).

● داده‌های جمعیتی

داده‌های جمعیتی شامل تعداد جمعیت هر یک از ۱۷ شهرستان استان، تراکم جمعیتی، نرخ رشد جمعیت، و توزیع جمعیت شهری و روستایی از مرکز آمار ایران استخراج شده است. این داده‌ها بر اساس نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ و برآوردهای رسمی سال ۱۴۰۴ تهیه شده‌اند. استفاده از داده‌های به‌روز جمعیتی برای برآورد دقیق تولید پسماند در هر منطقه ضروری است، زیرا تولید پسماند به طور مستقیم با تعداد جمعیت و الگوهای مصرف آن‌ها در ارتباط است (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۴).

● داده‌های تولید پسماند

اطلاعات مربوط به میزان تولید روزانه پسماند، نرخ تولید سرانه، و الگوهای فصلی تولید پسماند از سازمان مدیریت پسماند استان گیلان اخذ شده است. بر اساس مطالعات میدانی و آمارهای رسمی، نرخ تولید سرانه پسماند در استان گیلان به طور متوسط ۰/۸ کیلوگرم در روز به ازای هر نفر برآورد شده است. این رقم در شهرهای بزرگ‌تر مانند رشت

ممکن است به ۱ کیلوگرم در روز نیز برسد، در حالی که در شهرستان‌های کوچک‌تر و مناطق روستایی ممکن است کمتر از ۰/۶ کیلوگرم باشد (طرح جامع مدیریت پسماند گیلان، ۱۳۹۸).

بر اساس داده‌های جمعیتی و نرخ تولید سرانه، مجموع تولید روزانه پسماند در شهرستان‌های مورد مطالعه استان بیش از ۱۵۰۰ تن برآورد شده که این رقم به صورت سالانه معادل ۵۵۳۶۸۸/۵ تن (بیش از نیم میلیون تن) پسماند است (جدول ۱). این حجم عظیم پسماند نیازمند مدیریت دقیق و کارآمد و زیرساخت‌های گسترده برای جمع‌آوری، حمل‌ونقل، پردازش و دفع نهایی است (آذری و فتاحی، ۱۳۹۸).

جدول (۱) میزان پسماند تولیدی براساس میزان جمعیت به تفکیک شهرستان‌های مورد مطالعه در استان گیلان

شهرستان	جمعیت	میزان تولید پسماند (تن در روز)
آستارا	۹۱۲۵۷	۱۱۰
آستانه اشرفیه	۱۰۸۱۳۰	۴۵
املش	۴۳۲۲۵	۱۸/۵
بندر انزلی	۱۳۹۰۱۶	۱۵۸
تالش	۲۰۰۶۴۹	۹۸
رشت	۹۰۲۱۱۱	۶۱۷
خمام	۵۴۸۶۰	۱۵
رودسر	۱۴۷۳۹۹	۷۳/۵
سیاهکل	۴۶۹۷۵	۱۸
صومعه‌سرا	۱۲۵۰۷۴	۵۸/۲۵
فومن	۹۲۳۱۰	۳۲/۴
لاهیجان	۱۶۷۵۴۴	۱۲۲
لنگرود	۱۴۰۶۸۶	۸۲/۵
ماسال	۵۲۶۴۹	۳۱/۷۵
رضوانشهر	۶۹۸۶۵	۲۸
شفش	۵۴۲۲۶	۹
مجموع	۲۴۳۵۹۷۶	۱۵۱۶/۹

• داده‌های ترکیب پسماند

یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی سیستم مدیریت پسماند، شناخت دقیق ترکیب فیزیکی پسماند است. بر اساس مطالعات آنالیز ترکیب پسماند^۱ که توسط سازمان مدیریت پسماند انجام شده، ترکیب پسماند استان گیلان به صورت زیر تعیین شده است:

- **مواد کمپوست‌پذیر (آلی):** حدود ۶۵ درصد از کل پسماند را تشکیل می‌دهد که شامل بقایای غذایی، پسماندهای باغی و فضای سبز، و سایر مواد آلی قابل تجزیه زیستی است. این درصد بالا نشان‌دهنده پتانسیل بالای تولید کمپوست و کود آلی در استان است.

- **پسماند ریجکت (غیرقابل بازیافت):** حدود ۲۰ درصد شامل موادی است که قابلیت بازیافت یا کمپوست‌سازی ندارند و باید از طریق روش‌های دیگر مانند زباله‌سوزی یا دفن بهداشتی مدیریت شوند.

- **مواد بازیافتی:** حدود ۱۵ درصد شامل کاغذ، مقوا، پلاستیک، شیشه، فلزات و سایر مواد قابل بازیافت است که ارزش اقتصادی قابل توجهی دارند (طرح جامع مدیریت پسماند گیلان، ۱۳۹۸).

این ترکیب می‌تواند بسته به فصل، منطقه جغرافیایی و سطح اقتصادی-اجتماعی جمعیت متفاوت باشد، اما

میانگین‌های ارائه شده برای طراحی مدل استفاده شده است (جدول ۲).

جدول (۲) ترکیب پسماند تولیدی

نوع پسماند	مقدار (تن در روز)	درصد
پسماند کمپوست‌پذیر (آلی)	۹۸۶	۶۵
پسماند ریجکت	۳۰۳/۴	۲۰
مواد بازیافتی	۲۲۷/۵	۱۵

این آمار نشان می‌دهد که بخش عمده پسماند استان (حدود دو سوم) قابلیت تبدیل به کمپوست و کود آلی را دارد که فرصت مناسبی برای توسعه صنعت کمپوست‌سازی و کشاورزی ارگانیک در استان فراهم می‌آورد.

• داده‌های شبکه حمل و نقل

اطلاعات مربوط به شبکه راه‌های استانی، فواصل بین شهرستان‌ها، کیفیت جاده‌ها و محدودیت‌های تردد از اطلاعات مربوط به وزارت راه و شهرسازی و سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای استان گیلان اخذ شده است (سالنامه آماری گیلان، ۱۴۰۰). این داده‌ها برای ساخت ماتریس فواصل^۱ بین هر شهرستان و هر یک از سه کانون منطقه‌ای استفاده شده است. ماتریس فواصل بر اساس کوتاه‌ترین مسیر جاده‌ای بین مرکز هر شهرستان و کانون‌های منطقه‌ای با استفاده از داده‌های شبکه راه‌های استان استخراج شد. ماتریس فواصل بر اساس شبکه جاده‌ای موجود و با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه شده است. جدول (۳)، مسافت‌های جاده‌ای (به کیلومتر) بین شهرستان‌ها و هاب‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول (۳) ماتریس فواصل شهرستان‌ها تا سه مرکز کانونی منطقه‌ای منتخب (کیلومتر)

شهرستان مبدأ	کانون مرکزی - رشت	کانون شرق - لاهیجان	کانون غرب - تالش
آستارا	۱۷۳	۲۱۰	۷۴
تالش	۱۰۵	۱۶۵	۰
رضوانشهر	۵۵	۱۰۴	۲۵
ماسال	۶۵	۱۲۴	۳۰
رشت	۰	۴۴	۱۰۵
صومعه‌سرا	۲۸	۵۸	۸۶
شفت	۲۶	۵۶	۱۰۹
فومن	۲۹	۶۲	۱۰۵
خمام	۷	۴۰	۹۷
سیاهکل	۴۷	۱۹	۱۸۳
بندر انزلی	۴۱	۸۸	۶۲
رودسر	۷۳	۳۹	۱۷۳
املش	۷۷	۵۱	۱۹۱
لنگرود	۶۰	۲۲	۱۷۰
آستانه اشرفیه	۲۶	۲۷	۱۴۶
لاهیجان	۴۴	۰	۱۶۵

1- Distance Matrix

• داده‌ها و ظرفیت‌های تأسیسات پردازش پسماند

اطلاعات مربوط به ظرفیت تأسیسات موجود پردازش پسماند شامل کارخانه‌های کمپوست‌سازی، زباله‌سوزها، مراکز بازیافت و محل‌های دفن بهداشتی از سازمان مدیریت پسماند استان گیلان جمع‌آوری شده است. این داده‌ها شامل ظرفیت اسمی، ظرفیت عملیاتی فعلی، وضعیت فنی تجهیزات، سن تأسیسات و قابلیت توسعه آتی است. شناخت دقیق ظرفیت‌های موجود برای تعیین نقاط ضعف و فرصت‌های بهبود سیستم ضروری است (جدول ۴).

جدول (۴) ظرفیت‌تأسیسات پردازش پسماند (تن/روز)

ظرفیت زباله‌سوزی (تن در روز)	ظرفیت کمپوست سرمایه‌گذاری شده (تن در روز)	حوزه پوشش	کانون
.	.	آستارا، تالش، رضوانشهر، ماسال	غربی
۶۰۰ (در حال ساخت)	۱۲۵۰ (۱۰۰۰ رشت + ۲۵۰ انزلی)	رشت، صومعه‌سرا، شفت، فومن، خمام، بندرانزلی	مرکزی
.	۴۵۰ (۲۵۰ رودسر + ۲۰۰ لنگرود)	سیاهکل، رودسر، املش، لنگرود، آستانه، لاهیجان	شرقی

• متغیرهای پژوهش و تعریف عملیاتی

در این پژوهش، دو دسته متغیر شناسایی و تعریف شده‌اند: متغیرهای مستقل (ورودی) و متغیرهای وابسته (خروجی)

• **متغیرهای مستقل:** متغیرهای مستقل در این پژوهش شامل عواملی هستند که بر سیستم مدیریت پسماند تأثیر می‌گذارند اما خود تحت تأثیر تصمیمات مدیریتی قرار نمی‌گیرند:

- جمعیت شهرستان‌ها: تعداد جمعیت هر شهرستان که مستقیماً بر میزان تولید پسماند تأثیر می‌گذارد.
- نرخ تولید سرانه پسماند: میزان متوسط تولید پسماند به ازای هر نفر در روز (۰/۸ کیلوگرم)
- ترکیب پسماند: درصد مواد کمپوست‌پذیر (۶۵٪)، ریجکت (۲۰٪) و بازیافتی (۱۵٪)
- فواصل جغرافیایی: مسافت بین هر شهرستان و هر یک از مراکز کانونی منطقه‌ای
- ظرفیت تأسیسات: ظرفیت پردازش روزانه هر یک از تأسیسات کمپوست‌سازی و زباله‌سوزی

• **متغیرهای وابسته:** متغیرهای وابسته شامل خروجی‌های سیستم هستند که نتیجه تصمیمات مدیریتی و تخصیص منابع می‌باشند:

- تخصیص بهینه پسماند: میزان پسماند ارسالی از هر شهرستان به هر کانون
- کارایی سیستم: نسبت خروجی به ورودی سیستم و میزان بهره‌وری منابع
- هزینه‌های حمل‌ونقل: مجموع هزینه‌های مربوط به جابجایی پسماند در سیستم

• طراحی سیستم سه کانونی منطقه‌ای

استان گیلان با توزیع نامتوازن جمعیت، به‌طور طبیعی سه حوزه مرکزی، شرقی و غربی را شکل می‌دهد. سهم جمعیت این مناطق به‌ترتیب حدود ۶۴، ۲۳ و ۱۳ درصد در نظر گرفته شد. این تقسیم‌بندی، همراه با شرایط توپوگرافی استان، شبکه راه‌ها و موقعیت تأسیسات موجود، مبنای طراحی سیستم سه کانونی قرار گرفت. این تقسیم‌بندی طبیعی، همراه با شرایط توپوگرافی خاص استان (از ساحل دریای خزر تا ارتفاعات البرز)، مبنای منطقی برای طراحی سیستم سه کانونی منطقه‌ای فراهم آورده است. این طراحی بر اساس تحلیل جغرافیایی، الگوهای توزیع جمعیت، شبکه راه‌ها و موقعیت تأسیسات موجود انجام شده است.

• **کانون منطقه‌ای غرب:** این مرکز شامل شهرستان‌های واقع در غرب استان (آستارا، تالش، رضوانشهر و ماسال) است که مسئول جمع‌آوری و پردازش پسماند این مناطق غربی است. موقعیت استراتژیک این کانون‌ها به گونه‌ای

انتخاب شده که حداکثر دسترسی به شهرستان‌های تحت پوشش را داشته باشد. این تخصیص بر اساس اصل حداقل‌سازی مسافت حمل‌ونقل صورت گرفته و در عین حال تمام محدودیت‌های ظرفیتی را رعایت می‌کند.

• **کانون منطقه‌ای مرکزی:** کانون مرکزی در نزدیکی شهر رشت (به عنوان مرکز استان و پرجمعیت‌ترین شهر) قرار دارد و پسماند شهرستان‌های رشت، خمام، فومن، صومعه‌سرا، بندر انزلی و شفت را پردازش می‌کند. این کانون بزرگ‌ترین ظرفیت پردازش را دارا است و نقش محوری در سیستم مدیریت پسماند استان ایفا می‌کند. کل پسماند رشت به دلیل حجم بالای تولید پسماند و نزدیکی به کانون مرکزی در همین کانون مدیریت می‌شود.

• **کانون منطقه‌ای شرقی:** کانون شرقی مسئول پردازش پسماند شهرستان‌های شرقی استان شامل لاهیجان، لنگرود، رودسر، املش، سیاهکل و آستانه اشرفیه است. این کانون با توجه به فاصله قابل توجه این شهرستان‌ها از مرکز استان، نقش مهمی در کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل دارد.

• **اجزای مدل برنامه‌ریزی خطی:** در این پژوهش، مسئله تخصیص پسماند شهری در قالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی و با هدف تعیین الگوی بهینه انتقال پسماند شهرستان‌های مورد مطالعه به سه مرکز منطقه‌ای مدیریت پسماند مدل‌سازی شد. مجموعه‌های مورد استفاده در مدل به شرح زیر تعریف می‌شوند:

- مجموعه شهرستان‌های مورد مطالعه و تولیدکننده پسماند، به‌طوری‌که: $I = \{1, 2, \dots, n\} : i \in I$

- مجموعه مراکز منطقه‌ای مدیریت پسماند شامل کانون مرکزی، کانون شرقی و کانون غربی، به‌طوری‌که:

$J = \{1, 2, \dots, m\} : j \in J$

در این پژوهش، ۱۶ شهرستان شامل آستارا، آستانه اشرفیه، املش، بندر انزلی، تالش، رشت، خمام، رودسر، سیاهکل، صومعه‌سرا، فومن، لاهیجان، لنگرود، ماسال، رضوانشهر و شفت در مجموعه قرار گرفتند. شهرستان رودبار با توجه به تفاوت شرایط اقلیمی و ویژگی‌های تولید و مدیریت پسماند، از محدوده مطالعه حذف شد.

• پارامترهای مدل

پارامترهای مورد استفاده در مدل در جدول (۵) ارائه شده‌اند.

جدول (۵) پارامترهای مورد استفاده در مدل

نماد	تعریف	واحد
W_i	میزان پسماند تولیدی شهرستان i	تن در روز
d_{ij}	فاصله شهرستان i تا مرکز منطقه‌ای j	کیلومتر
α	سهم پسماند آلی قابل کمپوست	درصد
β	سهم پسماند ریجکت	درصد
C_j^{comp}	ظرفیت کمپوست‌سازی مرکز j	تن در روز
C_j^{inc}	ظرفیت زباله‌سوزی مرکز j	تن در روز

بر اساس داده‌های مورد استفاده در پژوهش، سهم پسماند آلی قابل کمپوست برابر با ۶۵ درصد و سهم پسماند ریجکت برابر با ۲۰ درصد در نظر گرفته شد؛ بنابراین $\alpha = 0.65$ و $\beta = 0.20$ در نظر گرفته شده است.

• متغیر تصمیم

- **متغیرهای تصمیم^۱:** این متغیرها نشان‌دهنده تصمیماتی هستند که باید گرفته شوند. در این مدل، متغیر تصمیم عبارت است از میزان پسماند ارسالی از هر شهرستان به هر کانون منطقه‌ای. به عنوان مثال، چه مقدار از پسماند

شهرستان رشت باید به کانون مرکزی و چه مقدار به کانون منطقه‌ای غرب ارسال شود؟ این متغیرها مقادیری هستند که مدل به دنبال یافتن بهترین مقادیر برای آن‌ها است.

متغیر تصمیم مدل به صورت زیر تعریف می‌شود: x_{ij}
میزان پسماند انتقال یافته از شهرستان i به مرکز منطقه‌ای j (تن در روز)

• تابع هدف^۱

تابع هدف نشان‌دهنده معیاری است که می‌خواهیم آن را بهینه (حداقل یا حداکثر) کنیم. در این پژوهش، تابع هدف حداقل کردن مجموع مسافت‌های وزنی حمل‌ونقل است. پسماند طوری تخصیص می‌یابد که مجموع (فاصله $\times$ مقدار پسماند) برای تمام مسیرها به حداقل برسد. حداقل کردن این تابع به معنای کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، کاهش مصرف سوخت، کاهش آلودگی هوا و کاهش زمان جابجایی است.

هدف مدل، حداقل‌سازی مجموع مسافت وزنی حمل‌ونقل پسماند در سطح استان است:

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij}$$

که در آن Z : بیان‌گر مجموع تن-کیلومتر جابه‌جایی پسماند در شبکه مدیریت پسماند استان است.

• محدودیت‌ها^۲

محدودیت‌ها قوانین و محدودیت‌هایی هستند که باید در تخصیص منابع رعایت شوند. در این مدل سه نوع محدودیت اساسی وجود دارد:

• **محدودیت تأمین پسماند:** این محدودیت تضمین می‌کند که کل پسماند تولیدی در هر شهرستان باید به یکی از کانون‌ها ارسال شود و هیچ پسماندی باقی نماند. به عبارت دیگر، مجموع پسماند ارسالی از هر شهرستان به تمام کانون‌ها باید دقیقاً برابر با کل پسماند تولیدی آن شهرستان باشد.
کل پسماند تولیدی هر شهرستان باید به یکی از مراکز منطقه‌ای تخصیص یابد:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = W_i \quad \forall i \in I$$

این محدودیت تضمین می‌کند که تمام پسماند تولیدی مدیریت شده و هیچ بخشی از آن خارج از سیستم باقی نماند.

• **محدودیت ظرفیت کمپوست‌سازی:** این محدودیت تضمین می‌کند که مجموع پسماند کمپوست‌پذیر (۶۵ درصد پسماند) دریافتی در هر کانون نباید از ظرفیت کمپوست‌سازی آن تجاوز کند. این محدودیت واقع‌بینانه است؛ زیرا تأسیسات کمپوست‌سازی ظرفیت محدودی دارند و نمی‌توانند بیش از حد معینی پسماند را پردازش کنند.
مقدار پسماند آلی تخصیص یافته به هر مرکز نباید از ظرفیت کمپوست آن تجاوز کند:

$$\sum_{i \in I} \alpha x_{ij} \leq C_j^{comp} \quad \forall j \in J$$

• **محدودیت ظرفیت زباله‌سوزی:** با توجه به اینکه ۲۰ درصد از پسماند تولیدی به‌عنوان ریجکت در نظر گرفته

1- Objective Function

2- Constraints

شده است. این قید ظرفیت پردازش ریجکت در هر مرکز منطقه‌ای را در فرآیند بهینه‌سازی لحاظ می‌کند.

مقدار پسماند ریجکت تخصیص‌یافته به هر مرکز نباید از ظرفیت زباله‌سوزی آن بیشتر شود:

$$\sum_{i \in I} \beta x_{ij} \leq C_j^{inc} \quad \forall j \in J$$

• **محدودیت غیرمنفی بودن:** مقادیر پسماند ارسالی برای کمپوست و زباله‌سوزی مثبت یا صفر در نظر گرفته شده است.

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j, \quad j \in J$$

این محدودیت تضمین می‌کند که مقادیر به‌دست‌آمده برای جریان‌های انتقال پسماند از نظر فیزیکی و مدیریتی معتبر باشند.

• شرح مدل

مدل توسعه‌یافته در این پژوهش از نوع برنامه‌ریزی خطی^۱ بوده و به منظور تعیین الگوی بهینه تخصیص پسماند شهرستان‌های استان گیلان به مراکز منطقه‌ای مدیریت پسماند، در نرم افزار لینگو^۲ نسخه ۱۸ پیاده‌سازی و حل شد (نقیب‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳؛ آل شیخ و عبدالفتاح، ۲۰۲۴). تابع هدف مدل، حداقل‌سازی مجموع مسافت وزنی حمل‌ونقل پسماند است و در تدوین مدل، محدودیت‌های مربوط به میزان تولید پسماند، ظرفیت واحدهای کمپوست‌سازی، ظرفیت واحدهای زباله‌سوزی و نامنفی بودن متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده است.

داده‌های ورودی مدل شامل میزان تولید روزانه پسماند در هر شهرستان، ماتریس فواصل بین شهرستان‌ها و مراکز منطقه‌ای، ترکیب فیزیکی پسماند و ظرفیت تأسیسات پردازش است. این داده‌ها به‌عنوان پارامترهای مدل تعریف و سپس روابط ریاضی مربوط به تابع هدف و قیود در محیط نرم‌افزار LINGO پیاده‌سازی شدند. مدل با استفاده از روش سیمپلکس، به‌عنوان یکی از روش‌های استاندارد حل مسائل برنامه‌ریزی خطی، حل شد. پس از حل مدل، الگوی تخصیص پسماند، مقدار تابع هدف و میزان استفاده از ظرفیت تأسیسات استخراج شد. همچنین قیود مربوط به توازن جریان، ظرفیت مراکز پردازش و نامنفی بودن متغیرها کنترل و نتایج از نظر سازگاری با شرایط جغرافیایی و زیرساختی استان ارزیابی شدند.

• تحلیل حساسیت

به‌منظور ارزیابی پایداری مدل و بررسی میزان حساسیت الگوی تخصیص پسماند نسبت به تغییر در پارامترهای کلیدی، تحلیل حساسیت در دو گروه اصلی انجام شد. گروه نخست به تغییر در ترکیب فیزیکی پسماند و گروه دوم به تغییر در ظرفیت تأسیسات پردازش در مراکز منطقه‌ای اختصاص یافت.

در سناریوی نخست، ترکیب پایه پسماند شامل ۶۵ درصد پسماند کمپوست‌پذیر، ۲۰ درصد پسماند ریجکت و ۱۵ درصد مواد بازیافتی در نظر گرفته شد. سپس به‌منظور بررسی پایداری مدل در برابر تغییرات ترکیب پسماند، سهم پسماند کمپوست‌پذیر نسبت به مقدار پایه به میزان ۱۰ درصد افزایش و ۱۰ درصد کاهش نسبی داده شد. در هر دو حالت، سهم سایر اجزای پسماند به‌گونه‌ای تعدیل شد که مجموع اجزای ترکیب برابر با ۱۰۰ درصد باقی بماند. بر این اساس، در سناریوی افزایش سهم مواد آلی، ترکیب پسماند به‌ترتیب شامل ۷۱/۵ درصد پسماند کمپوست‌پذیر، ۱۸ درصد ریجکت و ۱۰/۵ درصد مواد بازیافتی و در سناریوی کاهش سهم مواد آلی، شامل ۵۸/۵ درصد پسماند کمپوست‌پذیر، ۲۲ درصد ریجکت و ۱۹/۵ درصد مواد بازیافتی در نظر گرفته شد. مدل برای هر یک از این دو وضعیت

1- Linear Programming

2- LINGO

مجدداً حل شد و تغییرات حاصل در مقدار تابع هدف، تخصیص پسماند و میزان استفاده از ظرفیت مراکز پردازش با حالت پایه مقایسه گردید.

در سناریوی دوم، حساسیت مدل نسبت به تغییر ظرفیت تأسیسات سه کانون بررسی شد. در حالت پایه، ظرفیت کمپوست‌سازی کانون‌های مرکزی و شرقی به‌ترتیب ۱۲۵۰ و ۴۵۰ تن در روز بود و کانون غربی فاقد ظرفیت سرمایه‌گذاری شده کمپوست‌سازی بود. همچنین ظرفیت زباله‌سوزی کانون مرکزی ۶۰۰ تن در روز در نظر گرفته شد، در حالی که کانون‌های شرقی و غربی در حالت پایه فاقد این ظرفیت بودند. بر اساس ظرفیت‌های واقعی و وضعیت زیرساختی مراکز، مدل در شرایط تغییر ظرفیت مجدداً اجرا شد.

در هر سناریو، مقدار تابع هدف، الگوی تخصیص پسماند، میزان بهره‌برداری از ظرفیت تأسیسات و ظرفیت موردنیاز برای مدیریت ریجکت با حالت پایه مقایسه شد. تغییرات مسافت وزنی حمل‌ونقل نیز به‌عنوان شاخص اصلی عملکرد مدل مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، نتایج برای شناسایی پارامترهای حساس، ظرفیت‌های گلوگاهی و کانون‌های دارای اولویت توسعه زیرساختی استفاده شد.

یافته‌های پژوهش

● مقدار تابع هدف

نتایج حاصل از تخصیص پسماند به سه کانون منطقه‌ای نشان داد که با فرض تخصیص هر شهرستان به یک کانون واحد و انتخاب کانون بر اساس کمترین فاصله جاده‌ای، مجموع مسافت وزنی حمل‌ونقل پسماند برابر با ۲۶۴۱۷/۳۵ تن-کیلومتر در روز به دست آمد. در این محاسبه، میزان پسماند تولیدی هر شهرستان در فاصله جاده‌ای آن تا کانون تخصیص‌یافته ضرب و مجموع مقادیر حاصل محاسبه شد. این مقدار به‌عنوان مقدار پایه تابع هدف برای ارزیابی عملکرد شبکه سه‌کانونی و مقایسه سناریوهای تحلیل حساسیت مورد استفاده قرار گرفت.

● میزان پسماند تخصیص‌یافته به مراکز منطقه‌ای

بر اساس نتایج حاصل از حل مدل برنامه‌ریزی خطی، مجموع ۱۵۱۶/۹ تن پسماند تولیدی روزانه در شهرستان‌های مورد مطالعه استان

گیلان به سه مرکز منطقه‌ای تخصیص یافت. کانون مرکزی با دریافت ۸۸۹/۶۵ تن در روز (۵۸/۶۶ درصد) بیشترین سهم از پسماند تولیدی را به خود اختصاص داد. پس از آن، کانون شرقی با ۳۵۹/۵ تن در روز (۲۳/۷ درصد) و کانون غربی با ۲۶۷/۷ تن در روز (۱۷/۶۵ درصد) قرار گرفتند. بنابراین، حدود ۵۹ درصد از جریان پسماند در کانون مرکزی متمرکز شده و بخش باقی‌مانده میان دو کانون شرقی و غربی توزیع شده است. جزئیات مقدار و ترکیب پسماند تخصیص‌یافته به هر یک از مراکز منطقه‌ای در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول (۶) تولید پسماند در مراکز کانونی منطقه‌ای گیلان

مراکز کانونی منطقه‌ای	پسماند دریافتی (تن/روز)	کمپوست (تن/روز)	ریجکت (تن/روز)	بازیافت (تن/روز)	درصد
کانون غربی	۲۶۷/۷	۱۷۴/۰۴	۵۳/۵	۴۰/۱۶	۱۷/۶۵
کانون مرکزی	۸۸۹/۶۵	۵۷۸/۲۷	۱۷۷/۹۳	۱۳۳/۴۵	۵۸/۶۶
کانون شرقی	۳۵۹/۵	۲۳۳/۶۸	۷۱/۹	۵۳/۹۳	۲۳/۷
مجموع	۱۵۱۶/۹	۹۸۶	۳۰۳/۳۸	۲۲۷/۵۴	۱۰۰

کانون مرکزی با دریافت ۵۸/۶۶ درصد از کل پسماند، سهم اصلی شبکه را به خود اختصاص داد که با تمرکز جمعیت و تولید پسماند در شهرستان‌های مرکزی، به‌ویژه رشت، بندرانزلی، فومن، صومعه‌سرا، شفت و خمام مرتبط است. کانون‌های شرقی و غربی نیز به‌ترتیب ۲۳/۷ و ۱۷/۶۵ درصد جریان پسماند را پوشش می‌دهند. از نظر ترکیب پسماند، کانون شرقی روزانه ۷۱/۹ تن و کانون غربی ۵۳/۵ تن ریجکت دریافت می‌کنند. از آنجا که این دو کانون در وضعیت پایه فاقد ظرفیت زباله‌سوزی هستند، مدیریت ریجکت آن‌ها نیازمند انتقال به تأسیسات دارای ظرفیت پردازش یا توسعه زیرساخت‌های جدید خواهد بود.

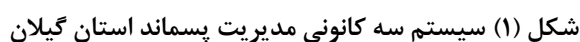
• نتایج تخصیص شهرستان‌ها به مراکز منطقه‌ای

بر اساس الگوی بهینه مدل، شهرستان‌های رشت، بندرانزلی، فومن، صومعه‌سرا، شفت و خمام در محدوده کانون مرکزی، شهرستان‌های لاهیجان، لنگرود، رودسر، آستانه اشرفیه، املش و سیاهکل در کانون شرقی و شهرستان‌های آستارا، تالش، رضوانشهر و ماسال در کانون غربی قرار گرفتند. جزئیات جمعیت و میزان پسماند تخصیص‌یافته در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول (۷) تخصیص بهینه پسماند شهرستان‌های مورد مطالعه استان گیلان به مراکز کانونی منطقه‌ای

مرکز کانونی تخصیص‌یافته	شهرستان	جمعیت (نفر)	پسماند تولیدی تخصیص‌یافته (تن/روز)
کانون غربی	آستارا	۹۱۲۵۷	۱۱۰
	تالش	۲۰۰۶۴۹	۹۸
	رضوانشهر	۶۹۸۶۵	۲۸
	ماسال	۵۲۶۴۹	۳۱/۷۵
جمع کل تخصیص بهینه پسماند در کانون غربی			۲۶۷/۷۵
کانون مرکزی	رشت	۹۰۲۱۱۱	۶۱۷
	بندرانزلی	۱۳۹۰۱۶	۱۵۸
	فومن	۹۲۳۱۰	۳۲/۴
	صومعه سرا	۱۲۵۰۷۴	۵۸/۲۵
	شفت	۵۴۲۲۶	۹
	خمام	۵۴۸۶۰	۱۵
جمع کل تخصیص بهینه پسماند در کانون مرکزی			۸۸۹/۶۵
کانون شرقی	لاهیجان	۱۶۷۵۴۴	۱۲۲
	لنگرود	۱۴۰۶۸۶	۸۲/۵
	رودسر	۱۴۷۳۹۹	۷۳/۵
	آستانه	۱۰۸۱۳۰	۴۵
	املش	۴۳۲۲۵	۱۸/۵
	سیاهکل	۴۶۹۷۵	۱۸
جمع کل تخصیص بهینه پسماند در کانون شرقی			۳۵۹/۵

مقایسه جداول (۶) و (۷) نشان می‌دهد که الگوی تخصیص بهینه پسماند شهرستان‌ها با میزان پسماند دریافتی در سه کانون منطقه‌ای مطابقت دارد و توازن جریان پسماند در شبکه پیشنهادی برقرار است. همچنین شکل (۱) پراکندگی و جانمایی تأسیسات موجود و پیشنهادی در سیستم سه کانونی مدیریت پسماند استان گیلان را نمایش می‌دهد.



مقایسه میزان پسماند تخصیص یافته با ظرفیت تأسیسات نشان داد که ظرفیت کمپوست سازی کانون های مرکزی و شرقی برای پردازش بخش آلی پسماند تخصیص یافته کافی است. در کانون مرکزی، از ظرفیت ۱۲۵۰ تن در روز، حدود ۵۷۸/۲۷ تن در روز پسماند کمپوست پذیر تخصیص یافته که معادل ۴۶/۳ درصد ظرفیت موجود است. در کانون شرقی نیز از ظرفیت ۴۵۰ تن در روز، حدود ۲۳۳/۶۸ تن در روز مورد استفاده قرار می گیرد که معادل ۵۱/۹ درصد ظرفیت است.

در بخش پردازش ریجکت نیز تنها کانون مرکزی دارای ظرفیت زباله‌سوزی است که ۶۰۰ تن در روز گزارش شده است. با تخصیص ۱۷۷/۹۳ تن در روز ریجکت به این کانون، در صورت بهره‌برداری از ظرفیت مذکور، حدود ۲۹/۷

درصد ظرفیت استفاده خواهد شد. کانون‌های شرقی و غربی به ترتیب ۷۱/۹ و ۵۳/۵ تن در روز ریجکت دریافت می‌کنند و فاقد ظرفیت زباله‌سوزی هستند (جدول ۸).

جدول (۸) شاخص‌های عملکردی مراکز کانونی منطقه‌ای

مرکز کانونی	پسماند دریافتی (تن/روز)	ظرفیت کمپوست (تن/روز)	کمپوست تخصیص یافته (تن/روز)	میزان بهره‌برداری از ظرفیت کمپوست (درصد)	ظرفیت زباله‌سوزی (تن/روز)	ریجکت دریافتی (تن/روز)
غربی	۲۶۷/۷	۰	۱۷۴/۰۴	—	۰	۵۳/۵
مرکزی	۸۸۹/۶۵	۱۲۵۰	۵۷۸/۲۷	۴۶/۱۳	۶۰۰	۱۷۷/۹۳
شرقی	۳۵۹/۵	۴۵۰	۲۳۳/۶۸	۵۱/۹	۰	۷۱/۹

در مجموع، محدودیت زیرساختی شبکه به یک کانون محدود نیست. کانون مرکزی از ظرفیت مناسب‌تری برخوردار است، در حالی که کانون شرقی در بخش مدیریت ریجکت و کانون غربی در بخش کمپوست‌سازی و مدیریت ریجکت با محدودیت مواجه‌اند.

• تحلیل صرفه‌جویی در حمل‌ونقل

مقایسه الگوی پیشنهادی با وضعیت مبنا نشان داد که اجرای مدل موجب کاهش مجموع مسافت وزنی حمل‌ونقل می‌شود. میزان صرفه‌جویی در کانون شرقی ۴۲۸۵۰ تن-کیلومتر در روز (۴۴/۵ درصد)، در کانون مرکزی ۳۵۲۰۰ تن-کیلومتر در روز (۳۶/۵ درصد) و در کانون غربی ۱۸۳۰۰ تن-کیلومتر در روز (۱۹ درصد) به دست آمد (جدول ۹). در مجموع، اجرای الگوی پیشنهادی موجب کاهش ۹۶۳۵۰ تن-کیلومتر در روز در مسافت وزنی حمل‌ونقل نسبت به وضعیت مبنا شد. بیشترین سهم صرفه‌جویی مربوط به کانون شرقی بود که بیانگر اثرگذاری بازآرایی جریان پسماند این شهرستان‌ها و کاهش انتقال‌های غیرضروری به مراکز دورتر است.

جدول (۹) میزان صرفه‌جویی حاصل از اجرای مدل در مراکز کانونی منطقه‌ای

مرکز کانونی منطقه‌ای	کاهش مسافت (تن-کیلومتر/روز)	سهم از کل صرفه‌جویی (درصد)
غربی	۱۸۳۰۰	۱۹
مرکزی	۳۵۲۰۰	۳۶/۵
شرقی	۴۲۸۵۰	۴۴/۵
مجموع	۹۶۳۵۰	۱۰۰

• تحلیل حساسیت سناریوی اول: حساسیت مدل نسبت به تغییر ترکیب پسماند

برای بررسی پایداری مدل، دو سناریوی افزایش و کاهش ۱۰ درصدی سهم پسماند کمپوست‌پذیر نسبت به حالت پایه بررسی شد. ترکیب پایه شامل ۶۵ درصد کمپوست‌پذیر، ۲۰ درصد ریجکت و ۱۵ درصد مواد بازیافتی بود. در سناریوی افزایش سهم مواد کمپوست‌پذیر، ترکیب به ۷۱/۵ درصد مواد کمپوست‌پذیر، ۱۸ درصد ریجکت و ۱۰/۵ درصد مواد بازیافتی تغییر کرد. در سناریوی کاهش، سهم مواد کمپوست‌پذیر به ۵۸/۵ درصد رسید و سهم ریجکت و مواد بازیافتی به ترتیب ۲۲ و ۱۹/۵ درصد در نظر گرفته شد. افزایش سهم مواد کمپوست‌پذیر موجب افزایش نیاز به ظرفیت کمپوست‌سازی و کاهش آن، همراه با افزایش سهم ریجکت، موجب افزایش نیاز به ظرفیت مدیریت ریجکت شد. بنابراین، ترکیب فیزیکی پسماند از پارامترهای مؤثر بر بهره‌برداری از زیرساخت‌های پردازش است و باید در برنامه‌ریزی ظرفیت تأسیسات لحاظ شود.

● تحلیل حساسیت سناریوی دوم: حساسیت مدل نسبت به تغییر ظرفیت مراکز منطقه‌ای

در سناریوی دوم، اثر تغییر ظرفیت تأسیسات پردازش در سه کانون بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش ظرفیت در مراکز دارای محدودیت، امکان مدیریت بخش بیشتری از جریان پسماند در همان کانون را فراهم می‌کند؛ در مقابل، کاهش ظرفیت می‌تواند فشار بیشتری بر سایر مراکز وارد کند و الگوی تخصیص را تغییر دهد. همچنین مشخص شد که توزیع مکانی ظرفیت پردازش در کنار مقدار کل ظرفیت موجود، عامل مهمی در عملکرد شبکه است. افزایش ظرفیت در یک کانون الزاماً محدودیت کانون دیگر را برطرف نمی‌کند، زیرا تخصیص پسماند هم‌زمان تابع فاصله حمل‌ونقل، ظرفیت تأسیسات و محدودیت‌های پردازش است.

در وضعیت پایه، کانون مرکزی دارای ظرفیت زباله‌سوزی ۶۰۰ تن در روز و کانون‌های شرقی و غربی فاقد این ظرفیت هستند. بنابراین، توسعه ظرفیت مدیریت ریجکت در کانون‌های فاقد زیرساخت، به‌ویژه کانون‌هایی که جریان ریجکت قابل توجهی دریافت می‌کنند، از گزینه‌های مهم توسعه شبکه محسوب می‌شود.

● بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که استفاده از ساختار سه‌کانونی منطقه‌ای و مدل برنامه‌ریزی خطی می‌تواند چارچوبی مناسب برای سازمان‌دهی فضایی جریان پسماند در شهرستان‌های مورد مطالعه استان گیلان فراهم کند. بر اساس نتایج حاصل از حل مدل، پسماند تولیدی شهرستان‌ها با در نظر گرفتن هدف حداقل‌سازی مسافت وزنی حمل‌ونقل و محدودیت‌های ظرفیت تأسیسات، میان سه کانون مرکزی، شرقی و غربی تخصیص یافت. این تخصیص بیانگر آن است که سازمان‌دهی منطقه‌ای جریان پسماند می‌تواند ضمن توجه به پراکنش فضایی تولید پسماند، از تمرکز کامل جریان در یک مرکز جلوگیری کند.

یافته‌های پژوهش نشان داد که استفاده از ساختار سه‌کانونی منطقه‌ای و مدل برنامه‌ریزی خطی می‌تواند چارچوب مناسبی برای سازمان‌دهی فضایی جریان پسماند در شهرستان‌های مورد مطالعه استان گیلان فراهم کند. مدل با در نظر گرفتن حجم تولید پسماند، فواصل جاده‌ای و محدودیت ظرفیت تأسیسات، الگوی تخصیص بهینه‌ای ارائه کرد که بر اساس آن از مجموع حدود ۱۵۱۶/۹ تن پسماند روزانه، ۸۸۹/۶۵ تن به کانون مرکزی، ۳۵۹/۵ تن به کانون شرقی و ۷۵/۲۶۷ تن به کانون غربی تخصیص یافت. سهم بیشتر کانون مرکزی را می‌توان به تمرکز جمعیت و تولید پسماند، به‌ویژه در رشت و شهرستان‌های پیرامونی، و جایگاه آن در شبکه نسبت داد.

مقایسه جریان پسماند با ظرفیت تأسیسات نشان داد که چالش اصلی شبکه، کمبود مطلق ظرفیت در کل استان نیست، بلکه عدم توازن مکانی و نوعی ظرفیت پردازش است. کانون مرکزی از ظرفیت مناسب‌تری برخوردار است و جریان تخصیص‌یافته در شرایط پایه در محدوده ظرفیت موجود قرار دارد. در کانون شرقی، ظرفیت کمپوست‌سازی پاسخگوی جریان ورودی است، اما نبود ظرفیت مناسب برای مدیریت ریجکت، محدودیت اصلی محسوب می‌شود. کانون غربی نیز علاوه بر نبود ظرفیت مدیریت ریجکت، فاقد ظرفیت سرمایه‌گذاری‌شده کمپوست‌سازی است و از این نظر نیازمند توسعه زیرساخت است. بنابراین، توسعه تأسیسات باید متناسب با نوع محدودیت هر کانون انجام شود و افزایش یکنواخت ظرفیت در همه مراکز الزاماً راهکار بهینه نخواهد بود.

از منظر لجستیکی، مدل برنامه‌ریزی خطی امکان لحاظ هم‌زمان حجم تولید، فواصل حمل‌ونقل و ظرفیت تأسیسات را فراهم کرد؛ از این‌رو تخصیص پسماند صرفاً بر مبنای نزدیک‌ترین مرکز انجام نشده است. نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان داد که تغییر ترکیب فیزیکی پسماند می‌تواند فشار بر ظرفیت‌های پردازش را تغییر دهد؛ افزایش سهم پسماند کمپوست‌پذیر، نیاز به ظرفیت کمپوست‌سازی و افزایش سهم ریجکت، نیاز به زیرساخت‌های مدیریت آن را افزایش

می‌دهد. همچنین تغییر ظرفیت تأسیسات لزوماً موجب تغییر اساسی در الگوی تخصیص نمی‌شود و محل و نوع ظرفیت ایجادشده اهمیت بیشتری از افزایش صرف ظرفیت دارد.

این یافته با نتایج مطالعات پیشین در زمینه استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی برای مکان‌یابی، تخصیص و بهینه‌سازی شبکه مدیریت پسماند همسو است. مطالعات مورد اشاره در مقاله، از جمله جعفری و همکاران (۲۰۲۰)، قاسم‌زاده و همکاران (۲۰۲۲)، تیرکلایی (۲۰۲۰)، زعیمی و رصافی^۱ (۲۰۲۱) و مطالعات بین‌المللی مورد استناد، بر اهمیت تخصیص بهینه، کاهش جابه‌جایی‌های غیرضروری، توجه به شرایط مکانی و لحاظ کردن محدودیت‌های شبکه تأکید کرده‌اند. پژوهش حاضر نیز با تمرکز بر ساختار سه‌کانونی استان گیلان نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های ریاضی می‌تواند برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری منطقه‌ای در مدیریت جریان پسماند مورد استفاده قرار گیرد.

با این حال، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که بهینه‌سازی حمل‌ونقل به تنهایی برای طراحی نهایی شبکه مدیریت پسماند کافی نیست. اگرچه کاهش مسافت حمل‌ونقل یکی از معیارهای مهم کارایی شبکه است، اما ظرفیت واقعی تأسیسات، هزینه‌های احداث و بهره‌برداری، پیامدهای محیط‌زیستی، انتشار آلاینده‌ها، شرایط فنی تجهیزات و امکان توسعه آتی نیز باید در تصمیم‌گیری نهایی مورد توجه قرار گیرند. از این رو، نتایج مدل حاضر را می‌توان به‌عنوان یک چارچوب تصمیم‌یار برای برنامه‌ریزی اولیه و مقایسه سناریوها در نظر گرفت، نه جایگزینی برای مطالعات امکان‌سنجی اقتصادی و محیط‌زیستی پروژه‌های زیرساختی.

مطالعه لیاوو^۲ و همکاران (۲۰۲۶) نشان داد مکان‌یابی بهینه تأسیسات بازیافت با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی می‌تواند هزینه‌های حمل‌ونقل و بهره‌برداری را به‌طور قابل توجهی کاهش داده و کارایی شبکه مدیریت پسماند را افزایش دهد.

با وجود نتایج مطلوب، این پژوهش دارای محدودیت‌هایی نیز است. در مدل ارائه‌شده تنها شاخص مسافت حمل‌ونقل به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد و هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های بهره‌برداری، آثار محیط‌زیستی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در مدل لحاظ نشده است. همچنین، فرض شد که میزان تولید پسماند و ظرفیت تأسیسات در طول دوره مطالعه ثابت است، در حالی که این پارامترها در شرایط واقعی ممکن است تحت تأثیر رشد جمعیت، تغییر الگوی مصرف و توسعه زیرساخت‌ها تغییر کنند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده از مدل‌های چندهدفه با در نظر گرفتن هم‌زمان شاخص‌های اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی برای طراحی شبکه مدیریت پسماند استفاده شود. نتایج این پژوهش با مطالعات جعفری و همکاران (۲۰۲۰) و قاسم‌زاده و همکاران (۲۰۲۲) همسو است و نشان می‌دهد که تمرکز زدایی از مدیریت پسماند و استفاده از مراکز منطقه‌ای می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و افزایش بهره‌وری سیستم شود. با این حال، برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر ارزیابی وضعیت موجود تمرکز داشته‌اند، پژوهش حاضر با توسعه یک مدل برنامه‌ریزی خطی، الگوی بهینه تخصیص پسماند را با در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت مراکز پردازش ارائه کرده است. همچنین بررسی مطالعه ژانگ^۳ و همکاران (۲۰۲۶) نیز نشان داد استفاده از مدل‌های ریاضی در مدیریت حمل‌ونقل پسماند می‌تواند کارایی سیستم را افزایش داده و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد.

یافته‌های این پژوهش از جنبه‌های متعددی با نتایج مطالعات پیشین در سطح بین‌المللی همسو و سازگار است، که این امر اعتبار و قابلیت تعمیم نتایج را تقویت می‌کند. مطالعه گیل و گوه (۲۰۱۰) در مورد سیستم مدیریت پسماند بر اهمیت و مزایای رویکرد مراکز کانونی منطقه‌ای در دستیابی به صرفه‌جویی در مقیاس و کاهش هزینه‌ها تأکید کرده

1- Zaeimi & Rassafi

2- Liao

3- Zhang

است. یافته‌های پژوهش حاضر نیز تأیید می‌کند که این رویکرد در بستر استان گیلان نیز مؤثر و کارآمد است. این همسویی نشان می‌دهد که اصول طراحی سیستم‌های مدیریت پسماند مبتنی بر کانون‌های منطقه‌ای، فراتر از مرزهای جغرافیایی و فرهنگی کاربرد دارند. همان‌گونه که مطالعات اخیر نشان داده‌اند، تعداد و مکان مراکز پردازش باید بر اساس توزیع فضایی تولید پسماند، هزینه‌های حمل‌ونقل و ظرفیت زیرساخت‌ها تعیین شود، نه بر اساس تقسیمات اداری (لیوو و همکاران، ۲۰۲۶). در پژوهش حاضر نیز انتخاب سه مرکز کانونی بر مبنای ویژگی‌های فضایی استان گیلان، الگوی پراکنش جمعیت، موقعیت تأسیسات موجود و حداقل‌سازی مسافت حمل انجام شده است.

پژوهش تیرکلایی (۲۰۲۰) نیز بر اهمیت تخصیص بهینه پسماند در کاهش هزینه‌های لجستیکی تأکید کرده است. نتایج ما با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی، کارایی این رویکرد را در شرایط استان گیلان تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که حتی با استفاده از مدل‌های نسبتاً ساده در مقایسه با الگوریتم‌های فراابتکاری، می‌توان به نتایج قابل قبول و کاربردی دست یافت.

مطالعه زعیمی و رصافی (۲۰۲۱) بر اهمیت در نظر گرفتن شرایط بومی و محلی در طراحی سیستم‌های مدیریت پسماند تأکید کرده است. این پژوهش نیز با لحاظ کردن ویژگی‌های خاص استان گیلان (شرایط اقلیمی، ترکیب پسماند، توپوگرافی و حساسیت‌های محیط زیستی دریای خزر) نشان می‌دهد که اگرچه اصول کلی جهان شمول هستند، اما موفقیت در اجرا نیازمند تطبیق با شرایط محلی است.

آل شیخ و عبدالفتاح (۲۰۲۴) بر اهمیت در نظر گرفتن آثار محیط زیستی در کنار ملاحظات اقتصادی تأکید کرده‌اند. یافته‌های ما نیز نشان می‌دهد که کاهش ۲۵ درصدی مسافت حمل‌ونقل نه تنها به صرفه‌جویی اقتصادی، بلکه به کاهش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز منجر می‌شود. با وجود همسویی با مطالعات پیشین، این پژوهش چندین نوآوری و مشارکت منحصربه‌فرد دارد که آن را از تحقیقات قبلی متمایز می‌کند.

بیشتر مطالعات پیشین پس از ارائه مدل ریاضی و نتایج بهینه‌سازی، کار خود را پایان می‌دهند. این پژوهش فراتر رفته و راهبردهای علم مشخص، زمان‌بندی‌شده و قابل اجرا برای سه افق زمانی (کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت) ارائه داده است. این راهبردها شامل برآورد هزینه، زمان اجرا، صرفه‌جویی مورد انتظار و شناسایی موانع احتمالی می‌شوند که قابلیت اجرایی بالاتری نسبت به مطالعات پیشین دارند (عدالت‌پور^۱ و همکاران، ۲۰۱۸).

با وجود مزایای مدل، تابع هدف پژوهش صرفاً بر حداقل‌سازی مسافت حمل‌ونقل متمرکز بود و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، آثار محیط‌زیستی و انتشار گازهای گلخانه‌ای مستقیماً در مدل لحاظ نشده‌اند. همچنین ثابت فرض کردن میزان تولید پسماند و ظرفیت تأسیسات، یکی دیگر از محدودیت‌های پژوهش است. بنابراین، نتایج باید به‌عنوان چارچوب تصمیم‌یار برای برنامه‌ریزی و مقایسه سناریوها تلقی شود و پیش از اجرای عملی، با داده‌های میدانی، ظرفیت واقعی تأسیسات، مطالعات اقتصادی و ارزیابی اثرات محیط‌زیستی تطبیق داده شود.

در مجموع، ساختار سه‌کانونی پیشنهادی می‌تواند ضمن کاهش جابه‌جایی‌های غیرضروری و توزیع متعادل‌تر جریان پسماند، مبنایی برای برنامه‌ریزی منطقه‌ای مدیریت پسماند استان گیلان باشد. در کوتاه‌مدت، اجرای الگوی تخصیص، تکمیل بانک اطلاعاتی، پایش عملکرد و توسعه تفکیک از مبدأ پیشنهاد می‌شود. در میان‌مدت، ایجاد ظرفیت مدیریت ریجکت در کانون شرقی و توسعه ظرفیت کمپوست‌سازی و مدیریت ریجکت در کانون غربی باید با انجام مطالعات فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی بررسی شود. در بلندمدت نیز حرکت به سمت اقتصاد چرخشی، افزایش بازیافت، توسعه فناوری‌های نوین پردازش و کاهش وابستگی به دفع نهایی ضروری است. استفاده از فناوری‌هایی مانند پیرولیز و گازیفیکاسیون، تولید سوخت از پسماند آلی و بازیافت پیشرفته نیز می‌تواند در چارچوب مطالعات آینده بررسی شود.

هدف نهایی می‌تواند تبدیل استان گیلان به یکی از قطب‌های فناوری و مدیریت پایدار پسماند در شمال کشور باشد.

● پیشنهادات

بر اساس مجموع یافته‌ها، پیشنهاد می‌شود در کوتاه‌مدت، اجرای الگوی تخصیص منطقه‌ای، تکمیل بانک اطلاعاتی تولید و ترکیب پسماند و پایش مستمر عملکرد کانون‌ها در دستور کار قرار گیرد. در میان‌مدت، امکان ایجاد ظرفیت مدیریت ریجکت در کانون شرقی و ایجاد ظرفیت کمپوست‌سازی و مدیریت ریجکت در کانون غربی با انجام مطالعات فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی بررسی شود. همچنین ظرفیت موجود کانون مرکزی با توجه به نقش آن در شبکه حفظ و بهره‌برداری بهینه شود.

در افق بلندمدت نیز حرکت از مدیریت صرف پسماند به سمت اقتصاد چرخشی، افزایش تفکیک از مبدأ، توسعه بازیافت و استفاده از فناوری‌های نوین پردازش می‌تواند وابستگی شبکه به دفع نهایی و انتقال بین‌کانونی را کاهش دهد. توسعه چنین رویکردی باید متناسب با شرایط اقلیمی، محیط‌زیستی و اقتصادی استان گیلان و حساسیت اکوسیستم‌های منطقه انجام شود.

در نهایت، الگوی سه‌کانونی پیشنهادی را می‌توان به‌عنوان یک چارچوب تصمیم‌یار برای برنامه‌ریزی منطقه‌ای مدیریت پسماند استان گیلان مورد استفاده قرار داد؛ مشروط بر آنکه پیش از اجرای عملی، نتایج مدل با داده‌های میدانی، ظرفیت واقعی و عملیاتی تأسیسات، مطالعات اقتصادی، ارزیابی اثرات محیط‌زیستی و الزامات نهادی و اجرایی تطبیق داده شود. همچنین پیشنهادات و راهبردهای زیر جهت بهبود شرایط موجود پیشنهاد داده می‌شود:

● راهبردهای کوتاه‌مدت (۱-۲ سال)

بهینه‌سازی مسیرهای حمل‌ونقل، اجرای تخصیص منطقه‌ای، انتقال موقت ریجکت کانون شرقی به کانون مرکزی، ایجاد بانک اطلاعاتی یکپارچه و داشبورد مدیریتی، توسعه تفکیک از مبدأ و ارتقای بهره‌وری کانون غربی.

● راهبردهای میان‌مدت (۳-۵ سال)

بررسی احداث ظرفیت مناسب مدیریت ریجکت در کانون شرقی، توسعه ظرفیت کمپوست‌سازی و مدیریت ریجکت در کانون غربی، نوسازی تأسیسات، ارتقای سیستم مدیریت شیرابه و کنترل بو، توسعه بازار کمپوست و محصولات بازیافتی و ایجاد سامانه یکپارچه مدیریت پسماند. هرگونه احداث تأسیسات جدید باید پس از انجام مطالعات فنی، اقتصادی و ارزیابی اثرات محیط‌زیستی^۱ انجام شود.

● راهبردهای بلندمدت (۵-۱۰ سال)

حرکت به سمت اقتصاد چرخشی^۲، طراحی مجدد سیستم با هدف صفر پسماند^۳، توسعه صنایع تبدیلی و فناوری‌های پیشرفته پردازش، تقویت بازیافت و تولید انرژی و گسترش همکاری‌های علمی و فناوری بین‌المللی. در نهایت، اجرای الگوی سه‌کانونی باید پویا بوده و با تغییر جمعیت، میزان تولید و ترکیب پسماند و ظرفیت تأسیسات، به‌طور دوره‌ای بازنگری شود. همچنین توسعه آتی مدل‌های چندهدفه با لحاظ هم‌زمان شاخص‌های اقتصادی، محیط‌زیستی، اجتماعی و لجستیکی می‌تواند دقت تصمیم‌گیری و قابلیت کاربرد نتایج را افزایش دهد.

1- Environmental Impact Assessment

2- Circular Economy

3- Zero Waste

منابع

- آذری، نرگس، و فتاحی، سجاد (۱۳۹۸). گزارش راهبردی پسماند استان گیلان (وارونگی هرم مدیریت پسماند و تبعات آن). مرکز بررسی‌های استراتژیک ریاست جمهوری.
- بیژن‌پور، محسن، احتشام‌رایی، رضا، و قراخانی، داوود (۱۴۰۳). مدل ریاضی چندهدفه برای بهینه‌سازی جمع‌آوری و بازیافت پسماندهای شهری در شرایط عدم قطعیت (مورد مطالعه: شهر کرج). مدیریت بهره‌وری، دوره هجدهم، شماره چهارم، صفحه ۲۷۱-۳۲۱. doi:10.71737/jpm.2025.304.352
- سازمان هواشناسی کشور (۱۴۰۴). سازمان هواشناسی کشور، ایران. www.irimo.ir
- طرح جامع مدیریت پسماند گیلان (۱۳۹۸). مهندسین مشاور خزرآب. استانداری گیلان، ایران.
- فیضی، صدف، پناهنده، محمد، و عابدین‌زاده، نیلوفر (۱۴۰۲). مقایسه سناریوهای وضع موجود و طرح توسعه سیستم مدیریت پسماند شهرستان رشت با رویکرد ارزیابی چرخه حیات. فصلنامه جغرافیا و پایداری محیط، دوره سیزدهم، شماره سوم، صفحه ۹۸-۱۲۳. doi:10.22126/ges.2023.9101.2657
- قاسم‌زاده، رضا، عبدلی، محمد علی، بزرگ‌حداد، امید، و پاژکی، مریم (۱۴۰۰). بررسی کارایی پردازش کربنیزاسیون گرمایی بر تولید بیوگاز ناشی از هضم بی‌هوازی مواد آلی. نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب، دوره هفتم، شماره دوم، صفحه ۱۴-۲۲. doi:10.22112/jwwse.2021.297114.1281
- مرکز آمار ایران (۱۴۰۰). سالنامه آماری استان گیلان. www.amar.org.ir
- نقیب‌زاده، سید شهرام، معین‌الدینی، مظاهر، و زعفرانی، مهدی (۱۴۰۳). توسعه سامانه پشتیبان تصمیم‌گیری برای ارائه سناریوهای بهینه محیط‌زیستی و اقتصادی مدیریت پسماند و به‌کارگیری آن در یک مطالعه موردی. سلامت و محیط زیست، دوره هفدهم، شماره سوم، صفحه ۴۵۹-۴۷۸. http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6891-fa.html
- Alshaikh, R., & Abdelfatah, A. (2024). Optimization techniques in municipal solid waste management: A systematic review. *Sustainability*, 16(15), 6585. doi:10.3390/su16156585
- Edalatpour, M. A., Mirzapour Al-e-Hashem, S. M. J., Karimi, B., & Bahli, B. (2018). Investigation on a novel sustainable model for waste management in megacities: A case study in Tehran municipality. *Sustainable Cities and Society*, 36, 286-301. doi:10.1016/j.scs.2017.09.019
- El Hanandeh, A., & El-Zein, A. (2010). Life-cycle assessment of municipal solid waste management alternatives with consideration of uncertainty: SIWMS development and application. *Waste Management*, 30(5), 902-911. doi:10.1016/j.wasman.2009.12.026
- Ghannadpour, S. F., Noori, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Ghoseiri, K. (2014). A multi-objective dynamic vehicle routing problem with fuzzy time windows: Model, solution and application. *Applied Soft Computing*, 14, 504-527. doi:10.1016/j.asoc.2013.08.015
- Ghiani, G., Laganà, D., Manni, E., Musmanno, R., & Vigo, D. (2014). Operations research in solid waste management: A survey of strategic and tactical issues. *Computers & Operations Research*, 44, 22-32. doi:10.1016/j.cor.2013.10.006
- Gill, I. S., & Goh, C.-C. (2010). Scale economies and cities. *The World Bank Research Observer*, 25(2), 235-262. doi:10.1093/wbro/lkp022
- Golhosseini, Z., & Ghazizade, M. J. (2024). Municipal solid waste status in Iran: From generation to disposal. *Environmental Protection Research*, 16-29. doi:10.37256/epr.4120243553
- Goulart Coelho LM, Lange LC, Coelho HM. (2017). Multi-criteria decision making to support waste management: A critical review of current practices and methods. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 35(1):3-28. doi:10.1177/0734242X16664024
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2021). *Introduction to operations research* (11th ed.). McGraw-Hill Education.
- Jafari, A. J., Latifi, P., Kazemi, Z., Kazemi, Z., Morovati, M., Farzadkia, M., & Torkashvand, J. (2021). Development a new index for littered waste assessment in different environments: A study on coastal

- and urban areas of northern Iran (Caspian Sea). *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112684. **doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112684**
- Jalalipour, H., Jaafarzadeh, N., Morscheck, G., Narra, S., & Nelles, M. (2021). Adoption of sustainable solid waste management and treatment approaches: A case study of Iran. *Waste Management & Research*, 39(7), 975–984. **doi.org/10.1177/0734242X20978300**
- Janatra, F., & Romadhani, A. R. D. I. (2025). Identifying drivers and barriers in the involvement of integrated township as an e-waste collection hub: A DEMATEL-based ANP approach. *International Journal of Environmental, Sustainability, and Social Science*, 6(2), 391–406. **doi.org/10.38142/ijesss.v6i2.1394**
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications.
- Liao, Q., Wang, G., & Xu, H. (2026). Optimal siting of photovoltaic waste treatment facilities in China: A mixed-integer linear programming approach. *Environmental Impact Assessment Review*, 117, 108153. **doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108153**
- Mousavi, S. M., Darvishi, G., Mobarghaee Dinan, N., & Naghibi, S. A. (2022). Optimal landfill site selection for solid waste of three municipalities based on Boolean and fuzzy methods: A case study in Kermanshah Province, Iran. *Land*, 11(10), 1779. **doi.org/10.3390/land11101779**
- Pires, A., Martinho, G., & Chang, N. B. (2011). Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques. *Journal of Environmental Management*, 92(4), 1033–1050. **doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.024**
- Ram, M., & Bracci, E. (2024). Waste Management, Waste Indicators and the Relationship with Sustainable Development Goals (SDGs): A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 16(19), 8486. **doi.org/10.3390/su16198486**
- Rızvanoğlu, O., Kaya, S., Ulukavak, M., & Yeşilnacar, M. İ. (2020). Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes, through linear programming and geographic information system: A case study from Şanlıurfa, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(1), 9. **doi.org/10.1007/s10661-019-7975-1**
- Tirkolae, E. B., Goli, A., Faridnia, A., Soltani, M., & Weber, G. W. (2020). Multi-objective optimization for the reliable pollution-routing problem with cross-dock selection using Pareto-based algorithms. *Journal of Cleaner Production*, 276, 122927. **doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122927**
- Wilson, D. C., Velis, C. A., & Rodic, L. (2013). Integrated sustainable waste management in developing countries. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*, 166(2), 52–68. **doi.org/10.1680/WARM.12.00005**
- Zaeimi, M. B., & Rassafi, A. A. (2021). Optimization model for integrated municipal solid waste system using stochastic chance-constraint programming under uncertainty: A case study in Qazvin, Iran. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 9994853. **doi.org/10.1155/2021/9994853**
- Zaman, A. U. (2016). A comprehensive review of the development of zero waste management: Lessons learned and guidelines. *Journal of Cleaner Production*, 91, 12–24. **doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.086**
- Zhang, Y., Wei, Y., Zhang, B., Wu, Y., & Pan, S. (2026). Fuzzy optimization of municipal solid waste collection routing under uncertain emissions. *Scientific Reports*.