Journal of Operational Research in its Applications
Vol.23, NO.2, Summer 2026
ISSN: 2251-7286
DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237

p-Robust Optimization of a Hazardous Waste Location–Routing Problem Considering Risk Response Actions

Sh. Teymouri[1], F. Hosseinzadeh Lotfi[2*], S.E. Najafi[3], N. Rafiei[4]
[1] *Ph.D. Student, Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran*
[2] *Professor, Department of Mathematics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran,*
[3] *Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran*
[4]*Assistant Professor, Industrial Engineering Department, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran.*

Research Paper

Received: 10 April 2024
Accepted: 29 August 2024

Abstract: Hazardous waste management systems must be designed in a manner that simultaneously controls operational costs, addresses uncertainty, and mitigates environmental risks. This study develops a two-stage mixed-integer location–routing model for hazardous waste management in which facility location, transportation, treatment, recycling, and disposal decisions are integrated within a unified optimization framework. In the first stage, a nominal location–routing model minimizes total system costs. In the second stage, uncertainty in hazardous waste generation is addressed through a scenario-based p-robust optimization approach. In addition, primary and secondary environmental risks and their corresponding response actions are explicitly incorporated into the model. A real-world case study from an Iranian waste management organization is used to evaluate the proposed approach. Computational results demonstrate that the p-robust model effectively manages uncertainty under optimistic, likely, and pessimistic scenarios while increasing total system cost by only about 6% compared with the nominal solution. The findings also reveal that secondary risks significantly influence the selection of appropriate responses to primary risks, emphasizing the importance of integrated risk management in hazardous waste systems.

Introduction: Hazardous waste management has become an increasingly important issue due to its environmental, social, and economic consequences. Improper collection, transportation, treatment, recycling, and disposal of hazardous waste can create serious threats to public health and ecosystems. Consequently, designing efficient waste management networks has attracted substantial attention in operations research and supply chain management. The location–routing problem (LRP) is one of the most effective approaches for integrating strategic facility location decisions with operational transportation planning. Although numerous studies have addressed hazardous waste LRPs, relatively few have simultaneously considered uncertainty, environmental risk management, and the consequences of risk response actions. This research addresses these gaps by proposing a p-robust optimization framework that incorporates uncertainty in waste generation and explicitly models primary and secondary environmental risks.

Materials and Methods: The proposed model is formulated as a mixed-integer mathematical

* *Corresponding Author: Farhad@hosseinzadeh.ir*

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

programming problem. The nominal model minimizes transportation costs, facility establishment costs, risk-related costs, and vehicle utilization costs. The network consists of waste generation centers, treatment facilities, recycling centers, and disposal sites. Hazardous waste can be processed using alternative treatment technologies depending on waste compatibility characteristics.
To address uncertainty, several key parameters, including waste generation volumes and recovery rates, are represented through discrete scenarios. A scenario-based p-robust optimization approach is then employed to obtain solutions that remain effective across different future conditions. The model also incorporates primary environmental risks, corresponding response actions, and secondary risks generated by the implementation of those actions. Linearization techniques are applied to transform nonlinear relationships into a mixed-integer linear programming formulation solvable by GAMS.

Results and Discussion: A real case study involving a waste management organization in western Iran was used to validate the proposed methodology. The network included seven waste generation centers, three candidate treatment facilities, three candidate recycling centers, and three candidate disposal centers. Three uncertainty scenarios—optimistic, likely, and pessimistic—were developed for hazardous waste generation and related parameters.
The nominal model produced an optimal objective value of 386,492.930, whereas the p-robust model resulted in a value of 410,507.309. This modest increase demonstrates that a relatively small additional cost can significantly improve robustness against uncertainty. Scenario validation confirmed that the p-robust solution remained feasible and economically efficient across all scenarios.
The risk analysis further indicated that secondary risks play a critical role in decision-making. In several cases, implementing a response action for a primary risk generated secondary risks whose consequences exceeded the benefits of mitigation. Therefore, the selection of risk response strategies should be based not only on the reduction of primary risks but also on the potential impacts of secondary risks. Sensitivity analysis showed that variations in the robustness parameter did not substantially affect solution quality, indicating the stability of the proposed approach.

Conclusions: This study presented a novel p-robust hazardous waste location–routing model that integrates uncertainty management with environmental risk-response planning. The results demonstrate that the proposed framework can effectively control uncertainty while maintaining reasonable system costs. Furthermore, the explicit consideration of primary and secondary risks provides a more realistic basis for managerial decision-making. The findings suggest that robust optimization is a valuable tool for designing sustainable hazardous waste management networks under uncertain conditions. Future research may extend the model by incorporating multi-period planning horizons, inventory decisions, and advanced simulation–optimization algorithms for large-scale applications.

Keywords: Hazardous Waste Management, Location–Routing Problem, p-Robust Optimization, Scenario-Based Uncertainty, Primary and Secondary Risks, Risk Response Actions.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال بیست و سوم، شماره دوم (پیاپی ۸۹)،تابستان ۰۵، ص ص ۲۱۳-۱۹۳
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱
DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237

بهینه‌سازی p-استوار مساله مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک با در نظر گرفتن اقدامات پاسخ به ریسک‌ها

شراره تیموری[۱]، فرهاد حسین‌زاده لطفی[۲*]، سید اسماعیل نجفی[۳]، نوید رفیعی[۴]
۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- استاد، گروه ریاضی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۴-استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

رسید مقاله: ۲۲ فروردین ۱۴۰۳
پذیرش مقاله: ۸ شهریور ۱۴۰۳

چکیده

سیستم مدیریت پسماندهای خطرناک باید به گونه‌ای طراحی شود که علاوه بر معقول بودن هزینه‌ها در آن، عدم‌قطعیت را در نظر بگیرد و کم‌ترین ریسک‌ها را به همراه داشته باشد. با هدف دستیابی به این شرایط، بهینه‌سازی مساله مدیریت پسماندهای خطرناک در حضور ریسک‌ها موضوعی بسیار ضروری تلقی می‌شود. در این مطالعه، یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دو مرحله‌ای پیشنهاد می‌شود. در مرحله اول، با ارایه یک مساله اسمی مکان‌یابی‌مسیریابی تلاش می‌شود هزینه‌های کل این سیستم به حداقل مقدار ممکن برسد. در مرحله دوم، با هدف مقابله با عدم‌قطعیت موجود در مقادیر پسماندهای خطرناک تولیدی، مدل بهینه‌سازی احتمالی p-استوار توسعه داده می‌شود. همچنین، برای حضور ریسک‌های اولیه و ثانویه در مدل‌های پیشنهادی، برنامه‌ریزی انجام می‌گیرد. سپس، به منظور تشریح کاربردی بودن و مقایسه مدل‌های پیشنهادی مطالعه‌ای موردی در یک سازمان مدیریت پسماند اجرا می‌شود. نتایج نشان می‌دهد مدل بهینه‌سازی p-استوار با افزایش اندکی در مقدار هزینه کل سیستم، عدم‌قطعیت موجود در مقادیر پسماندهای خطرناک تولیدی را با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف به‌طور موثرتری کنترل می‌کند. همچنین، نشان داده می‌شود که رخداد ریسک ثانویه نقش مهمی در انتخاب اقدام پاسخ به ریسک اولیه دارد و تصمیم‌گیرندگان باید با توجه به عوامل هزینه، اقدامات بهینه پاسخ به ریسک‌ها را انتخاب کنند.

کلمات کلیدی: پسماندهای خطرناک، مساله مکان‌یابی‌مسیریابی، عدم‌قطعیت، بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو، ریسک اولیه و ثانویه، اقدام پاسخ.

* عهده‌دار مکاتبات
آدرس الکترونیکی: Hosseinzadeh_lotfi@srbiau.ac.ir

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

۱ مقدمه

مدیریت پسماندهای خطرناک از مهم‌ترین مباحثی می‌باشد که در سال‌های اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. پسماندها با توجه به یکی از ویژگی‌های سمی بودن، اشتعال‌پذیری، خورندگی و واکنش‌پذیری، خطرناک تشخیص داده می‌شوند. این نوع پسماندها توسط منابع مختلفی ایجاد شده که از اصلی‌ترین آنها می‌توان به فرایندهای صنعتی و تولیدی اشاره کرد. در میان این فرایندها طیف گسترده‌ای از صنایع برای تولید پسماندهای خطرناک وجود دارد که پالایش نفت، اسیدهای پسماند، تولید مواد شیمیایی و شرکت‌های آبکاری نمونه‌هایی از آنها هستند. یک سیستم مدیریت پسماند خطرناک نامناسب تهدیدات زیادی را برای انسان و محیط‌زیست او ایجاد می‌کند [۱]. از این‌رو مدیریت صحیح و کارای پسماندها یک مساله اساسی برای کشورهای توسعه‌یافته بوده و منجر به کاهش هزینه‌ها و ایجاد زنجیره تامین جدیدی می‌شود که بازیافت و استفاده مجدد از مواد را به همراه دارد. مدیریت پسماندهای خطرناک جز مسایل برنامه‌ریزی ریاضی می‌باشد که در واقع می‌توان آن را ترکیبی از مسایل مکان‌یابی و مسیریابی دانست. این دو موضوع هر یک به‌طور جداگانه در مباحث زنجیره تامین از مسایل مطرح می‌باشند. در سال‌های اخیر با هدف تصمیم‌گیری واقعی‌تر و یکپارچه‌تر، استفاده این دو موضوع به‌صورت یکپارچه تحت عنوان مساله مکان‌یابی‌مسیریابی مورد توجه قرار گرفته است. اهمیت استفاده مساله مکان‌یابی-مسیریابی زمانی مشخص می‌شود که بهینه‌سازی جداگانه آنها، ممکن است باعث بهینگی دو مساله در شرایط یکپارچه نشود [۲]. مدیریت پسماندهای خطرناک، یکی از پرکاربردترین حوزه‌ها برای مسایل مکان‌یابی‌مسیریابی می‌باشد که در رابطه با این موضوع ادبیاتی غنی پدیدار شده است. اولین تلاش در ارتباط با مساله مکان‌یابی-مسیریابی بر اساس پسماندهای خطرناک توسط زوگرافروس و سامارا [۳] انجام گرفت و با در نظر گرفتن حداقل زمان سفر و حداقل ریسک‌های حمل‌ونقل و مکان‌های دفع، مدلی به منظور تعیین مراکز دفع و مسیرهای حمل‌و-نقل پسماندهای خطرناک پیشنهاد گردید. کاپانرا و همکاران [۴] یک مدل چندجمله‌ای را برای مکان‌یابی-مسیریابی گسسته تسهیلات فعالیت‌های نامطلوب توسعه دادند. با توجه به NP-Hard بودن مدل پیشنهادی، روش آزادسازی لاگرانژ برای تبدیل آن به دو زیرمساله استفاده شد و روش شاخه و کران برای حل در این مطالعه انتخاب گردید. آلومور و کارا [۵] یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را طراحی کردند که مبتنی بر محدودیت سازگاری انواع پسماندها با تکنولوژی‌های تصفیه بود. چنین محدودیتی نشان می‌داد که پسماندها انواع مختلفی دارند که برای هر یک از نوع خاصی از تکنولوژی‌های تصفیه استفاده می‌شود. ایمک و کارا [۶] یک برنامه‌ریزی عدد صحیح را برای مکان‌یابی تسهیلات تصفیه و بازیافت توسعه دادند که محدودیت‌های استاندارد آلودگی هوا و مقررات دولتی نقش مهمی را در مدل آنها داشتند.

علاوه بر این، سامانلیوقلو [۷] یکی از کامل‌ترین مدل‌های مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک را ارایه داد که تمامی فرایندهای جمع‌آوری، حمل‌ونقل، تصفیه با تکنولوژی‌های خاص برای انواع پسماندها، بازیافت و دفع را شامل می‌شود. هدف مدل تصمیم‌گیری مطلوب درباره مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن معیارهای هزینه، ریسک حمل‌ونقل و ریسک مربوط به احداث تسهیلات تصفیه و دفع بود و برای حل از روش لکسیکوگرافی استفاده شد. لی و همکاران [۸] بر اساس مدل مکان‌یابی پوشش، یک برنامه‌ریزی عدد

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

صحیح آینده‌نگر را به منظور جمع‌آوری و جابجایی پسماندهای صنعتی خطرناک به‌کار گرفتند که بر اساس مدل پیشنهادی، تمامی مراکز تولید پسماند تحت پوشش حداقل تعداد مراکز دفع قرار می‌گیرند. ارجمند و همکاران [۹] با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک، حداقل‌سازی مجموع وزنی هزینه تسهیلات، ریسک حمل‌ونقل و ریسک مکان‌های دفع را مطالعه کردند و به‌طور مشابه ارجمند و همکاران [۱۰] به‌صورت تصادفی مطالعه قبل را در حالت احتمالی اجرا کردند. سپس، آیدمیر-کاراداگ [۱۱] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی مبتنی بر سود را پیشنهاد کرد که بازیافت انرژی از پسماند و اصل پرداخت آلوده‌ساز را شامل می‌شود. ربانی و همکاران [۱۲] با در نظر گرفتن محدودیت در مورد ناسازگاری برخی از انواع پسماندها و با هدف حداقل کردن معیارهای هزینه، ریسک حمل-ونقل و ریسک مکان‌های تسهیلات، مدل مکان‌یابی‌مسیریابی را توسعه دادند. به منظور حل مدل، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب II و بهینه‌سازی ازدحام ذرات مورد استفاده قرار گرفت و نتایج خروجی عملکرد بهتر الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب II را نشان داد. در مقاله دیگری، ربانی و همکاران [۱] با در نظر گرفتن ابعاد تصادفی بودن محیط، چند دوره‌ای بودن افق برنامه‌ریزی و افزودن تصمیمات کنترل موجودی در مساله، مطالعه قبل را توسعه دادند و برای ایجاد روش حل، از الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده کردند.

در سال‌های اخیر، قادری و بوردت [۱۳] یک رویکرد استراتژیک مکان‌یابی‌مسیریابی در یک شبکه حمل‌و-نقل دو وجهی را در شرایط عدم‌قطعیت ارایه دادند که از مسیرهای جاده‌ای و ریلی تشکیل شده است. الگوریتم نمونه‌گیری حداکثر درستنمایی، الگوریتم تقریب میانگین نمونه و الگوریتمی ترکیبی از دو نوع، به منظور حل مدل انتخاب شد که نتایج برتری الگوریتم ترکیبی را نشان داد. حسن‌پور و همکاران [۱۴] کاربرد بهینه‌سازی استوار را برای مسایل مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک بررسی کردند که در آن پارامترهای احتمالی زمان، بر اساس مدل بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو فرموله شدند و با مساله مسیریابی وسیله نقلیه با پنجره‌های زمانی یکپارچه گشتند. دلفانی و همکاران [۱۵] با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های کل، به حداقل رساندن ریسک کلی مربوط به ارسال پسماندهای خطرناک و به حداقل رساندن ریسک موثر بر جمعیت تحت شعاع تاسیسات، مطالعه خود را انجام دادند و به منظور دستیابی به راه‌حل‌های مطلوب در شرایط عدم‌قطعیت، دو رویکرد برنامه‌ریزی محدودیت شانس و مدل برنامه‌ریزی احتمالی استوار توسعه داده شد. رئیسی و همکاران [۱۶] یک مدل بهینه‌سازی استوار فازی را در شرایط عدم‌قطعیت طراحی کردند که منجر به کسب درآمد از سوزاندن پسماندها و کاهش خطر ابتلا به کووید-۱۹ می‌شود و مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل مدل نشان داد که بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم چندهدفه کارامدترین الگوریتم مورد استفاده می‌باشد. حسن‌پور و همکاران [۱۷] یک مدل عدد صحیح مختلط با پنجره‌های زمانی را به منظور مدیریت پسماندهای عفونی فرموله کردند که در آن مقادیر پسماندها در شرایط عدم‌قطعیت با تعریف سناریوهای متعددی بررسی شدند و تغییرات زمان خدمات مربوط به مقادیر با محدودیت‌های شانس مورد کنترل قرار گرفتند. به منظور حل مدل معرفی‌شده یک الگوریتم شاخه-قیمت با روش محدودیت اپسیلون ترکیب شد.

موضوع قابل توجهی که مطالعات سال‌های اخیر بر آن تاکید دارند این است که مسایل بهینه‌سازی دنیای واقعی اغلب در معرض عدم‌قطعیت هستند. خطاهای پیاده‌سازی، خطاهای اندازه‌گیری و یا داده‌های موجود ناقص

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

در لحظه عواملی هستند که می‌توانند راه‌حل‌های قطعی را از دیدگاه علمی بی‌معنی کنند و به ندرت زمینه‌ای وجود دارد که از این عوامل مصون باشند. به همین دلیل رویکردهایی به منظور مقابله با چنین عدم‌قطعیت‌هایی ایجاد شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به رویکردهای برنامه‌ریزی ۱) احتمالی، ۲) فازی، ۳) پویای احتمالی و ۴) استوار اشاره کرد [۱۸]. در میان این رویکردها، بهینه‌سازی استوار اخیراً توجه زیادی را به خود جلب کرده است که هدف اصلی آن پیدا کردن راه‌حلی است که توانایی مقابله با داده‌های احتمالی و نامطمئن را داشته باشد و تضمین کند تمامی سناریوهای در نظر گرفته شده بر اساس تغییر در داده‌های ورودی، نزدیک به بهینگی هستند [۱۹]. بنابراین، در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط مبتنی بر روش بهینه‌سازی p-استوار برای مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک توسعه داده می‌شود که در این مدل مقادیر پسماندهای خطرناک صنعتی تولیدی در معرض عدم‌قطعیت قرار دارند.

از طرف دیگر، بررسی دقیق ادبیات نشان می‌دهد اگرچه در بسیاری از مطالعات مساله مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک موضوع ریسک در نظر گرفته شده، اما تاکنون اقدامات پاسخ به ریسک‌های اولیه و به دنبال آن رخداد ریسک‌های ثانویه مورد بررسی قرار نگرفته است. ریسک یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد هزینه‌ها و زیان‌های مالی بوده و در ادبیات، به عنوان ریسک اولیه شناخته می‌شود که باید در یک فرایند مدیریت ریسک شناسایی شده تا به‌درستی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. فرایند مدیریت ریسک نیز در واقع یک نظام پویا است که دسته‌ای از مسایل شامل شناسایی موارد، برآورد مقادیر، برنامه‌ریزی، پیگیری چگونگی کاهش و اصول کنترل ریسک را در بر می‌گیرد. همچنین، پیشرفت روزافزون و کاربرد مدیریت ریسک در صنایع گوناگون موجب گردیده که ریسک به‌صورت یک مولفه عمومی تعریف و کنترل‌هایی برای آن تعیین گردد. با شناسایی ریسک اولیه می‌توان احتمال وقوع و شدت آن را با روش‌های مختلفی از جمله ماتریس ریسک مشخص نمود [۲۰] تا اقدامات پاسخ به ریسک اولیه اتخاذ شوند و با اجرای یک اقدام مناسب پاسخ، ریسک اولیه به‌خوبی کنترل شود. بنابراین، انتخاب اقدامات مناسب پاسخ، اصلی‌ترین کار در مرحله پاسخ به ریسک است. دسته‌ای دیگر از ریسک‌ها با عنوان ریسک ثانویه شناخته شده که از اجرای اقدامات پاسخ به ریسک اولیه ایجاد می‌شود که به‌منظور کنترل این نوع ریسک نیز باید اقدامات مناسب پاسخ برنامه‌ریزی شود. تاثیر ریسک ثانویه نباید از تاثیر ریسک اولیه بیشتر باشد در غیراین‌صورت اقدام پاسخ به ریسک اولیه، که ریسک ثانویه از آن ناشی شده نباید اجرا گردد و یا باید اقدام پاسخ به ریسک اولیه دیگری انتخاب شود [۲۱]. مطالعه حاضر تلاش می‌کند یک مساله برنامه‌ریزی را در حضور ریسک‌ها توسعه دهد تا علاوه بر حداقل کردن هزینه‌های سیستم مدیریت پسماندهای خطرناک و در نظر گرفتن شرایط عدم‌قطعیت، مجموعه اقدامات بهینه پاسخ به ریسک‌های اولیه و ثانویه را انتخاب کند. دیگر بخش‌های این مطالعه به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده است:

در بخش ۲، توصیف مساله اسمی مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک در حضور ریسک‌های اولیه و ثانویه مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، روشی به منظور خطی‌سازی مدل بهینه‌سازی در این بخش معرفی می‌شود. در بخش ۳، ابتدا به فرمولاسیون بهینه‌سازی احتمالی مبتنی بر سناریو پرداخته شده و سپس مدل بهینه‌سازی p-استوار مساله مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک توسعه داده می‌شود. بخش ۴ با هدف تایید

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

اثربخشی مدل مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک، یک مطالعه واقعی را به‌کار گرفته و تحت سناریوهای مختلف بر اساس مقادیر پسماندها، استواری مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۵ ارایه می‌شود.

۲ توصیف مساله

تعریف سیستم مدیریت پسماندهای خطرناک منعکس‌کننده جمع‌آوری، حمل‌ونقل، تصفیه، بازیافت و دفع پسماندها به روشی کارا، ایمن و مقرون‌به‌صرفه است. به منظور تصفیه پسماندها به تکنولوژی‌های متنوعی از قبیل شیمیایی، سوزاندن و بیولوژیکی نیاز است و با در نظر گرفتن ویژگی‌های پسماند نوع تکنولوژی انتخاب می‌شود. علاوه بر این، بازیافت و دفع دو مرحله مهم دیگر هستند که باید تصمیمات مطلوبی برای استفاده از آنها اتخاذ شود [۱۵]. اما سیستمی که در این مطالعه در نظر گرفته می‌شود نقطه آغازین آن مراکز تولید می‌باشند که در آنها انواع پسماندهای تولیدی به دو گروه تقسیم می‌شوند. در گروه اول پسماندها به مراکز تصفیه دارای تکنولوژی‌های در ارتباط با ویژگی‌های پسماند ارسال می‌شوند. گروه دوم قابلیت بازیافت را داشته و به مراکز بازیافت انتقال داده می‌شوند. همچنین، سهمی از پسماندها پس از تصفیه قابلیت بازیافت را داشته که آنها نیز به مراکز بازیافت اختصاص داده می‌شوند. در پایان باقیمانده مراکز تصفیه و بازیافت به مراکز دفع منتقل می‌گردند. با توجه به این شرح مساله، در ادامه مدل اسمی مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک فرموله می‌شود:

۲-۱ مساله اسمی مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک

در این زیربخش، مساله اسمی مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک با در نظر گرفتن اقدامات پاسخ به ریسک‌های اولیه و ثانویه پیشنهاد می‌شود که برای توسعه این مساله از مطالعه سامانلیوقلو [۷] ایده گرفته شده است. در این مساله g اندیس مراکز تولید، w اندیس پسماندهای خطرناک، m اندیس وسایل حمل پسماند، t اندیس مراکز تصفیه، q اندیس تکنولوژی‌های تصفیه، r اندیس مراکز یازیافت، l اندیس مراکز دفع، h اندیس ریسک‌ها و a اندیس اقدامات پاسخ به ریسک‌ها را نشان می‌دهد. همچنین، پارامترها و متغیرهای تصمیم این مساله به‌صورت زیر فهرست شده است:

پارامترها:

ct_{gtm} : هزینه انتقال پسماند خطرناک از مرکز تولید g به مرکز تصفیه t با وسیله حمل پسماند m

cr_{grm} : هزینه انتقال پسماند قابل بازیافت از مرکز تولید g به مرکز بازیافت r با وسیله حمل پسماند m

ctr_{trm} : هزینه انتقال باقیمانده پسماند قابل بازیافت از مرکز تصفیه t به مرکز بازیافت r با وسیله حمل پسماند m

ctl_{tl} : هزینه انتقال باقیمانده پسماند از مرکز تصفیه t به مرکز دفع l

crl_{rl} : هزینه انتقال باقیمانده پسماند از مرکز بازیافت r به مرکز دفع l

ft_{qt} : هزینه ثابت تاسیس مرکز تصفیه t با تکنولوژی q

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

fr_r : هزینه ثابت تاسیس مرکز بازیافت r

fl_l : هزینه ثابت تاسیس مرکز دفع l

gen_{wg} : حجم پسماند خطرناک تولید شده w در مرکز تولید g

α_{wg} : سهم پسماند خطرناک تولید شده قابل بازیافت w در مرکز تولید g

δ_{wq} : سهم کاهش جرم پسماند خطرناک تصفیه شده w به وسیله تکنولوژی q

β_{wq} : سهم قابل بازیافت پسماند خطرناک تصفیه شده w به وسیله تکنولوژی q

η_r : سهم پسماند خطرناک بازیافت شده در مرکز بازیافت r

tc_{qt} : ظرفیت تکنولوژی q در مرکز تصفیه t

tcm_{qt} : حداقل پسماند خطرناک مورد نیاز به منظور تاسیس مرکز تصفیه t با تکنولوژی q

θ_{wq} : اگر پسماند خطرناک w با تکنولوژی q سازگار باشد مقدار آن ۱ است، در غیر اینصورت ۰ می‌باشد.

rc_r : ظرفیت در مرکز بازیافت r

rcm_r : حداقل پسماند مورد نیاز به منظور تاسیس مرکز بازیافت r

lc_l : ظرفیت در مرکز دفع l

lcm_l : حداقل باقیمانده پسماند مورد نیاز به منظور تاسیس مرکز دفع l

cap_m : ظرفیت وسیله حمل پسماند m

c_m : هزینه ثابت وسیله حمل پسماند m

$\lambda^{pr}{}_{lh}$: هزینه ناشی از رخداد ریسک اولیه h در مرکز دفع l

$\lambda^{pr}{}_{qth}$: هزینه ناشی از رخداد ریسک اولیه h در مرکز تصفیه t با تکنولوژی q

$\lambda^{sec}{}_{lh}$: هزینه ناشی از رخداد ریسک ثانویه h در مرکز دفع l

$\lambda^{sec}{}_{qth}$: هزینه ناشی از رخداد ریسک ثانویه h در مرکز تصفیه t با تکنولوژی q

$\kappa^{pr}{}_{lha}$: هزینه کاهش‌یافته ناشی بکارگیری اقدام پاسخ a به ریسک اولیه h در مرکز دفع l

$\kappa^{pr}{}_{qtha}$: هزینه کاهش‌یافته ناشی بکارگیری اقدام پاسخ a به ریسک اولیه h در مرکز تصفیه t با تکنولوژی q

$\kappa^{sec}{}_{lha}$: هزینه کاهش‌یافته ناشی به‌کارگیری اقدام پاسخ a به ریسک ثانویه h در مرکز دفع l

$\kappa^{sec}{}_{qtha}$: هزینه کاهش‌یافته ناشی به‌کارگیری اقدام پاسخ a به ریسک ثانویه h در مرکز تصفیه t با تکنولوژی q

$\varphi^{pr}{}_{lha}$: هزینه به‌کارگیری اقدام پاسخ a به ریسک اولیه h در مرکز دفع l

$\varphi^{pr}{}_{qtha}$: هزینه به‌کارگیری اقدام پاسخ a به ریسک اولیه h در مرکز تصفیه t با تکنولوژی q

$\varphi^{sec}{}_{lha}$: هزینه به‌کارگیری اقدام پاسخ a به ریسک ثانویه h در مرکز دفع l

$\varphi^{sec}{}_{qtha}$: هزینه به‌کارگیری اقدام پاسخ a به ریسک ثانویه h در مرکز تصفیه t با تکنولوژی q

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

Bd_l : ارزش آستانه هزینه‌های ریسک در مرکز دفع l

Bd_{qt} : ارزش آستانه هزینه‌های ریسک در مرکز تصفیه t با تکنولوژی q

متغیرهای تصمیم:

x_{wgtm} : مقدار پسماند خطرناک حمل شده w از مرکز تولید g به مرکز تصفیه t با وسیله حمل پسماند m

l_{grm} : مقدار پسماند قابل بازیافت حمل شده از مرکز تولید g به مرکز بازیافت r با وسیله حمل پسماند m

k_{trm} : مقدار باقیمانده پسماند قابل بازیافت حمل شده از مرکز تصفیه t به مرکز بازیافت r با وسیله حمل پسماند m

z_{tl} : مقدار باقیمانده پسماند حمل شده از مرکز تصفیه t به مرکز دفع l

y_{wqt} : مقدار پسماند خطرناک w تصفیه شده با تکنولوژی q در مرکز تصفیه t

v_{rl} : مقدار باقیمانده پسماند حمل شده از مرکز بازیافت r به مرکز دفع l

f_{qt} : اگر مرکز تصفیه t با تکنولوژی q تاسیس شود مقدار آن ۱ است، در غیراین‌صورت ۰ می‌باشد.

b_r : اگر مرکز بازیافت r تاسیس شود مقدار آن ۱ است، در غیراین‌صورت ۰ می‌باشد.

lz_l : اگر مرکز دفع l تاسیس شود مقدار آن ۱ است، در غیر اینصورت ۰ می‌باشد.

wr_r : مقدار پسماند بازیافت شده در مرکز بازیافت r

dis_l : مقدار باقیمانده پسماند دفع شده در مرکز دفع l

γ_{lha} : اگر اقدام پاسخ a به ریسک اولیه h در مرکز دفع l بکار گرفته شود ۱ است، در غیراین‌صورت ۰ می‌باشد.

γ'_{lha} : اگر اقدام پاسخ a به ریسک ثانویه h در مرکز دفع l بکار گرفته شود ۱ است، در غیراین‌صورت ۰ می‌باشد.

γ_{qtha} : اگر اقدام پاسخ a به ریسک اولیه h در مرکز تصفیه t با تکنولوژی q بکار گرفته شود ۱ است، در غیراین‌صورت ۰ می‌باشد.

γ'_{qtha} : اگر اقدام پاسخ a به ریسک ثانویه h در مرکز تصفیه t با تکنولوژی q بکار گرفته شود ۱ است، در غیراین‌صورت ۰ می‌باشد.

n_{wgtm} : تعداد وسیله حمل پسماند m برای انتقال پسماند خطرناک w از مرکز تولید g به مرکز تصفیه t

n_{grm} : تعداد وسیله حمل پسماند m برای انتقال پسماند قابل بازیافت از مرکز تولید g به مرکز بازیافت r

n_{trm} : تعداد وسیله حمل پسماند m برای انتقال پسماند قابل بازیافت از مرکز تصفیه t به مرکز بازیافت r

$criskl_l$: کل هزینه تحمیل شده بر مرکز دفع l به دلیل رخداد ریسک های اولیه و ثانویه

$criskt_{qt}$: کل هزینه تحمیل شده بر مرکز تصفیه t با تکنولوژی q به دلیل رخداد ریسک های اولیه و ثانویه

بر اساس توصیف مساله، نمادگذاری، پارامترها و متغیرهای تصمیم بالا، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مساله اسمی به‌صورت زیر فرموله می‌گردد:

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

$$Min \sum_{w}\sum_{g}\sum_{t}\sum_{m} ct_{gtm}x_{wgtm} + \sum_{t}\sum_{l} ctl_{tl}z_{tl} + \sum_{g}\sum_{r}\sum_{m} cr_{grm}l_{grm} + \sum_{r}\sum_{l} crl_{rl}v_{rl} + \sum_{t}\sum_{r}\sum_{m} c_{trm}k_{trm} + \sum_{q}\sum_{t} ft_{qt}f_{qt} + \sum_{r} fr_{r}b_{r} + \sum_{l} lz_{l}dz_{l} + \sum_{l} criskl_{l} + \sum_{q}\sum_{t} criskt_{qt} + \sum_{w}\sum_{g}\sum_{t}\sum_{m} c_{m}n_{wgtm} + \sum_{g}\sum_{r}\sum_{m} c_{m}n_{grm} + \sum_{t}\sum_{l} c_{m}n_{tl} \quad (۱)$$

s.t.

$$gen_{wg} = \alpha_{wg}gen_{wg} + \sum_{t}\sum_{m} x_{wgtm},\ \forall w, g \quad (۲)$$

$$\sum_{w} \alpha_{wg}gen_{wg} = \sum_{r}\sum_{m} l_{grm},\ \forall g \quad (۳)$$

$$\sum_{g}\sum_{m} x_{wgtm} = \sum_{q} y_{wqt},\ \forall w, t \quad (۴)$$

$$\sum_{w}\sum_{q} y_{wqt}(۱-\delta_{wq})(۱-\beta_{wq}) = \sum_{l} z_{tl},\ \forall t \quad (۵)$$

$$\sum_{w}\sum_{q} y_{wqt}(۱-\delta_{wq})(\beta_{wq}) = \sum_{r}\sum_{m} k_{trm},\ \forall t \quad (۶)$$

$$\sum_{t}\sum_{m} k_{trm} + \sum_{g}\sum_{m} l_{grm} = wr_{r},\ \forall r \quad (۷)$$

$$wr_{r}(۱-\eta_{r}) = \sum_{l} v_{rl},\ \forall r \quad (۸)$$

$$\sum_{r} v_{rl} + \sum_{t} z_{tl} = dis_{l},\ \forall l \quad (۹)$$

$$y_{wqt} \le tc_{qt}\theta_{wq},\ \forall w, q, t \quad (۱۰)$$

$$tcm_{qt}f_{qt} \le \sum_{w} y_{wqt},\ \forall q, t \quad (۱۱)$$

$$rcm_{r}b_{r} \le wr_{r},\ \forall r \quad (۱۲)$$

$$lcm_{l}lz_{l} \le dis_{l},\ \forall l \quad (۱۳)$$

$$\sum_{w} y_{wqt} \le tc_{qt}f_{qt},\ \forall q, t \quad (۱۴)$$

$$wr_{r} \le rc_{r}b_{r},\ \forall r \quad (۱۵)$$

$$dis_{l} \le lc_{l}lz_{l},\ \forall l \quad (۱۶)$$

$$\sum_{h}\lambda^{pr}_{qth}f_{qt} + \sum_{h}\sum_{a}\varphi^{pr}_{qtha}\gamma_{qtha}f_{qt} - \sum_{h}\sum_{a}\kappa^{pr}_{qtha}\gamma_{qtha}f_{qt} + \sum_{h}\sum_{a}\lambda^{\sec}_{qtha}\gamma_{qtha}f_{qt} + \sum_{h}\sum_{a}\varphi^{\sec}_{qtha}\gamma'_{qtha}f_{qt} - \sum_{h}\sum_{a}\kappa^{\sec}_{qtha}\gamma'_{qtha}f_{qt} = criskt_{qt},\ \forall q, t \quad (۱۷)$$

$$\sum_{h}\lambda^{pr}_{lh}lz_{l} + \sum_{h}\sum_{a}\varphi^{pr}_{lha}\gamma_{lha}lz_{l} - \sum_{h}\sum_{a}\kappa^{pr}_{lha}\gamma_{lha}lz_{l} + \sum_{h}\sum_{a}\lambda^{\sec}_{lha}\gamma_{lha}lz_{l} + \sum_{h}\sum_{a}\varphi^{\sec}_{lha}\gamma'_{lha}lz_{l} - \sum_{h}\sum_{a}\kappa^{\sec}_{lha}\gamma'_{lha}lz_{l} = criskl_{l},\ \forall l \quad (۱۸)$$

$$\sum_{h}\lambda^{pr}_{qth}f_{qt} + \sum_{h}\sum_{a}\varphi^{pr}_{qtha}\gamma_{qtha}f_{qt} - \sum_{h}\sum_{a}\kappa^{pr}_{qtha}\gamma_{qtha}f_{qt} \ge \sum_{h}\sum_{a}\lambda^{\sec}_{qtha}\gamma_{qtha}f_{qt} + \sum_{h}\sum_{a}\varphi^{\sec}_{qtha}\gamma'_{qtha}f_{qt} - \sum_{h}\sum_{a}\kappa^{\sec}_{qtha}\gamma'_{qtha}f_{qt},\ \forall q, t \quad (۱۹)$$

$$\sum_{h}\lambda^{pr}_{lh}lz_{l} + \sum_{h}\sum_{a}\varphi^{pr}_{lha}\gamma_{lha}lz_{l} - \sum_{h}\sum_{a}\kappa^{pr}_{lha}\gamma_{lha}lz_{l} \ge \sum_{h}\sum_{a}\lambda^{\sec}_{lha}\gamma_{lha}lz_{l} + \sum_{h}\sum_{a}\varphi^{\sec}_{lha}\gamma'_{lha}lz_{l} - \sum_{h}\sum_{a}\kappa^{\sec}_{lha}\gamma'_{lha}lz_{l},\ \forall l \quad (۲۰)$$

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

$$\sum_h \lambda^{pr}_{qth} f_{qt} - \sum_h \sum_a \kappa^{pr}_{qtha} \gamma_{qtha} f_{qt} + \sum_h \sum_a \lambda^{\sec}_{qtha} \gamma_{qtha} f_{qt} - \sum_h \sum_a \kappa^{\sec}_{qtha} \gamma'_{qtha} f_{qt} \le Bd_{qt} f_{qt},\ \forall q,t \quad (۲۱)$$

$$\sum_h \lambda^{pr}_{lh} lz_l - \sum_h \sum_a \kappa^{pr}_{lha} \gamma_{lha} lz_l + \sum_h \sum_a \lambda^{\sec}_{lha} \gamma_{lha} lz_l - \sum_h \sum_a \kappa^{\sec}_{lha} \gamma'_{lha} lz_l \le Bd_l lz_l,\ \forall l \quad (۲۲)$$

$$\gamma_{qtha} \ge \gamma'_{qtha},\ \forall q,t,h,a \quad (۲۳)$$

$$\gamma_{lha} \ge \gamma'_{lha},\ \forall l,h,a \quad (۲۴)$$

$$n_{wgtm} cap_m \ge x_{wgtm},\ \forall w,g,t,m \quad (۲۵)$$

$$n_{grm} cap_m \ge l_{grm},\ \forall g,r,m \quad (۲۶)$$

$$n_{trm} cap_m \ge k_{trm},\ \forall t,r,m \quad (۲۷)$$

$$x_{wgtm}, l_{grm}, k_{trm}, z_{tl}, v_{rl}, y_{wqt}, wr_r, dis_l, criskt_{qt}, crskl_l \ge 0,\ \forall w,g,q,t,r,l,m \quad (۲۸)$$

$$f_{qt}, b_r, lz_l, \gamma_{lha}, \gamma'_{lha}, \gamma_{qtha}, \gamma'_{qtha} \in \{۰,۱\},\ \forall q,t,r,l,h,a \quad (۲۹)$$

$$n_{wgtm}, n_{grm}, n_{trm} \ge ۰,\ \text{int}\ \forall w,g,t,r,m \quad (۳۰)$$

تابع هدف این مدل ریاضیاتی در رابطه (۱) هزینه‌های کل سیستم را حداقل می‌کند که شامل هزینه‌های حمل‌ونقل پسماندهای خطرناک و باقیمانده پسماندها، هزینه‌های ثابت تاسیس مراکز تصفیه، بازیافت و دفع، هزینه‌های کل ریسک تحمیل‌شده بر مراکز تصفیه و دفع، و در نهایت هزینه‌های ثابت به‌کارگیری وسایل حمل پسماند می‌باشد. محدودیت‌های (۲) تا (۴) شرط تعادل در انتقال پسماند از مراکز تولید به مراکز تصفیه و بازیافت را بر قرار می‌کنند. محدودیت‌های (۵) و (۶) با در نظر گرفتن کاهش جرم پسماندها به دلیل استفاده از تکنولوژی‌های مختلف، انتقال پسماند را از مراکز تصفیه به ترتیب به مراکز دفع و بازیافت نشان می‌دهند. انتقال پسماند از مراکز تولید و تصفیه به مراکز بازیافت توسط محدودیت (۷) تعیین می‌شود. علاوه بر این، انتقال پسماند از مراکز بازیافت به مراکز دفع توسط محدودیت (۸) و مجموع پسماندهای منتقل شده به مراکز دفع از مراکز بازیافت و تصفیه توسط محدودیت (۹) محاسبه می‌شوند. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند پسماندهای خطرناک تولیدشده فقط به مراکز تصفیه با تکنولوژی‌های سازگار با نوع پسماند ارسال می‌شوند. حداقل ظرفیت مورد نیاز به منظور تاسیس هر مرکز تصفیه، بازیافت و دفع به ترتیب در محدودیت‌های (۱۱) تا (۱۳) در نظر گرفته شده است و حداکثر ظرفیت که برای تاسیس این مراکز نیاز است به ترتیب در محدودیت‌های (۱۴) تا (۱۶) تعیین شده است. کل هزینه‌های ناشی از حضور ریسک‌های اولیه و ثانویه در مراکز تصفیه و دفع، به ترتیب با محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) برآورد می‌شود. همچنین، محدودیت‌های (۱۹) و (۲۰) به ترتیب در مراکز تصفیه و دفع تضمین می‌کنند هزینه‌های ریسک‌های ثانویه باید از هزینه‌های ریسک‌های اولیه کمتر باشند. علاوه بر این، محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲) نشان می‌دهند هزینه‌های باقیمانده ریسک‌ها در مراکز تصفیه و دفع، به ترتیب از ارزش آستانه اختصاص داده شده به این مراکز نباید تجاوز کنند. محدودیت‌های (۲۳) و (۲۴) بیان می‌کنند که زمانی اجرای اقدامات پاسخ به ریسک ثانویه معنادار است که اقدامات پاسخ به ریسک اولیه اجرا شود، زیرا ریسک ثانویه نتیجه اجرای اقدام پاسخ به ریسک اولیه می‌باشد. محدودیت‌های (۲۵) تا (۲۷) حداقل تعداد وسایل حمل‌ونقل پسماند مورد نیاز در

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

مراکز را تعیین می‌کنند. در نهایت، متغیرهای تصمیم غیرمنفی، باینری و عدد صحیح به ترتیب توسط محدودیت‌های (۲۸) تا (۳۰) بیان می‌شوند.

۲-۲ خطی‌سازی مدل بهینه‌سازی

مدل بهینه‌سازی ارایه‌شده در زیربخش قبل، در ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط است و غیرخطی بودن آن ناشی از حاصلضرب متغیرهای باینری در یکدیگر به نام‌های $\gamma_{qtha}f_{qt}$، $\gamma'_{qtha}f_{qt}$، $\gamma_{lha}lz_l$ و $\gamma'_{lha}lz_l$ هستند که در محدودیت‌های (۱۷) تا (۲۲) مشاهده می‌شوند. به منظور کاهش دشواری و پیچیدگی در حل مساله، یک روش خطی‌سازی به‌کار گرفته می‌شود که در آن یک متغیر باینری کمکی جایگزین اصطلاحات غیرخطی می‌گردد [۲۲]. به عنوان نمونه به‌جای اصطلاح غیر خطی $\gamma_{qtha}f_{qt}$ متغیر باینری جدید ψ_{qtha} تعریف می‌شود که از محدودیت‌های (۳۱) تا (۳۳) پیروی می‌کند:

$$\psi_{qtha} \le \gamma_{qtha} \qquad (۳۱)$$

$$\psi_{qtha} \le f_{qt} \qquad (۳۲)$$

$$\psi_{qtha} \ge \gamma_{qtha} + f_{qt} - ۱ \qquad (۳۳)$$

با به‌کارگیری این رویکرد، موضوع غیرخطی بودن اصطلاحات $\gamma_{qtha}f_{qt}$، $\gamma_{lha}lz_l$ و $\gamma'_{lha}lz_l$ نیز برطرف می‌شود و مساله غیرخطی ابتدایی به فرم مساله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط کاهش می‌یابد.

۳ روش بهینه‌سازی احتمالی استوار

۳-۱ بهینه‌سازی احتمالی مبتنی بر سناریو مساله مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک

در مساله اسمی ارایه شده در این مطالعه، پارامترهای gen_{wg}، α_{wg}، δ_{wq}، β_{wq} و η_r احتمالی و در شرایط عدم‌قطعیت هستند. به منظور دستیابی به نتایج واقعی‌تر، منطقی است که تا حد امکان شرایط پارامترهای احتمالی و نامطمئن در نظر گرفته شوند [۲۳]. با توجه به این موضوع، در این مقاله، مقدار پارامترهای غیرقطعی در قالب سناریوهای مختلف با مقادیر گسسته در نظر گرفته‌شده و مدل‌سازی مساله با استفاده از بهینه‌سازی احتمالی مبتنی بر سناریو توسعه داده می‌شود. در این مدل، تابع هدف (۳۴) به حداقل‌سازی هزینه‌های کل سیستم برای هر سناریو $s \in S$ می‌پردازد.

$$\begin{aligned} Min \ & \sum_w \sum_g \sum_t \sum_m ct_{gtm} x_{wgtms} + \sum_t \sum_l ctl_{tl} z_{tls} + \sum_g \sum_r \sum_m cr_{grm} l_{grms} + \sum_r \sum_l crl_{rl} v_{rls} \\ & + \sum_t \sum_r \sum_m c_{trm} k_{trms} + \sum_q \sum_t ft_{qt} f_{qt} + \sum_r fr_r b_r + \sum_l lz_l dz_l + \sum_l criskl_l \\ & + \sum_q \sum_t criskt_{qt} + \sum_w \sum_g \sum_t \sum_m c_m n_{wgtm} + \sum_g \sum_r \sum_m c_m n_{grm} + \sum_t \sum_l c_m n_{tl} \end{aligned} \qquad (۳۴)$$

همچنین، محدودیت‌های مدل احتمالی مشابه با محدودیت‌های مساله اسمی سیستم مدیریت پسماندهای خطرناک می‌باشند. با این حال، بر اساس تعریف جدید برخی پارامترها و متغیرها بر حسب هر سناریو s، باید تاثیر

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

هر سناریو نیز در محدودیت‌ها در نظر گرفته شود. بنابراین محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی احتمالی مبتنی بر سناریو به‌صورت زیر بازنویسی می‌گردد.

$s.t.$

محدودیت‌های (۱۷) تا (۲۴)، (۲۹) و (۳۰) (۳۵)

$$gen_{wgs} = \alpha_{wgs} gen_{wgs} + \sum_{t}\sum_{m} x_{wgtms},\ \forall w,g,s \quad (۳۶)$$

$$\sum_{w} \alpha_{wgs} gen_{wgs} = \sum_{r}\sum_{m} l_{grms},\ \forall g,s \quad (۳۷)$$

$$\sum_{g}\sum_{m} x_{wgtms} = \sum_{q} y_{wqts},\ \forall w,t,s \quad (۳۸)$$

$$\sum_{w}\sum_{q} y_{wqts}(۱-\delta_{wqs})(۱-\beta_{wqs}) = \sum_{l} z_{tls},\ \forall t,s \quad (۳۹)$$

$$\sum_{w}\sum_{q} y_{wqts}(۱-\delta_{wqs})(\beta_{wqs}) = \sum_{r}\sum_{m} k_{trms},\ \forall t,s \quad (۴۰)$$

$$\sum_{t}\sum_{m} k_{trms} + \sum_{g}\sum_{m} l_{grms} = wr_{rs},\ \forall r,s \quad (۴۱)$$

$$wr_{rs}(۱-\eta_{rs}) = \sum_{l} v_{rls},\ \forall r,s \quad (۴۲)$$

$$\sum_{r} v_{rls} + \sum_{t} z_{tls} = dis_{ls},\ \forall l,s \quad (۴۳)$$

$$y_{wqts} \le tc_{qt}\theta_{wq},\ \forall w,q,t,s \quad (۴۴)$$

$$tcm_{qt} f_{qt} \le \sum_{w} y_{wqts} \le tc_{qt} f_{qt},\ \forall q,t,s \quad (۴۵)$$

$$rcm_{r} b_{r} \le wr_{rs} \le rc_{r} b_{r},\ \forall r,s \quad (۴۶)$$

$$lcm_{l} lz_{l} \le dis_{ls} \le lc_{l} lz_{l},\ \forall l,s \quad (۴۷)$$

$$n_{wgtm} cap_{m} \ge x_{wgtms},\ \forall w,g,t,m,s \quad (۴۸)$$

$$n_{grm} cap_{m} \ge l_{grms},\ \forall g,r,m,s \quad (۴۹)$$

$$n_{trm} cap_{m} \ge k_{trms},\ \forall t,r,m,s \quad (۵۰)$$

$$x_{wgtms}, l_{grms}, k_{trms}, z_{tls}, v_{rls}, y_{wqts}, wr_{rs}, dis_{ls}, criskt_{qt}, crskl_{l}, \ge 0,\ \forall w,g,q,t,r,l,m,s \quad (۵۱)$$

مشاهده می‌شود که در این مدل محدودیت‌های (۱۷) تا (۲۴)، (۲۹) و (۳۰) همان محدودیت‌های مساله اسمی هستند. اما محدودیت‌های (۳۶) تا (۵۱) مشابه محدودیت‌های مدل قطعی می‌باشند با این تفاوت که در اینجا برای هر یک از سناریوهای موجود s تکرار شده‌اند. مدل بهینه‌سازی احتمالی مبتنی بر سناریو برای هر سناریو s حل و ارزش بهینه هر تابع هدف Z_s^* نامیده می‌شود. در ادامه، توسعه مدل بهینه‌سازی p-استوار شکل می‌گیرد.

۳-۲ مدل بهینه‌سازی احتمالی p-استوار مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک

در این زیربخش، ابتدا توصیف روش بهینه‌سازی احتمالی p-استوار ارایه می‌شود و سپس، این روش به منظور مدل‌سازی مساله مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش در مقابله با عدم قطعیت، مزایای دو تکنیک بهینه‌سازی احتمالی و استوار را در بر می‌گیرد. هدف تکنیک بهینه‌سازی احتمالی

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

معمولاً حداقل‌سازی هزینه انتظاری با در نظر گرفتن تمامی سناریوها است. اگرچه راه‌حل به‌دست آمده توسط این تکنیک در اکثر سناریوها به لحاظ مالی بهینه است، با این حال ممکن است در دیگر سناریوها منجر به ایجاد زیان‌هایی گردد. از طرف دیگر، تکنیک استوار معمولاً هدف کمینه‌بیشینه[1] هزینه یا کمینه‌بیشینه أسف را دنبال می‌کند که راه‌حل به‌دست آمده از آن برای هر فهمی از عدم‌قطعیت در مجموعه‌های از پیش تعریف‌شده بهینه می‌باشد. با این حال، این تکنیک بیش از حد محافظه‌کارانه است زیرا راه‌حل را در مقابل سناریوهایی ایمن می‌کند که به ندرت رخ می‌دهند. بنابراین، روش بهینه‌سازی احتمالی p–استوار، با جستجوی راه‌حل حداقل هزینه انتظاری، هر دو مزایای حداقل‌سازی هزینه انتظاری و کمینه‌بیشینه تأسف را ترکیب می‌کند [۲۴]. در ادامه این رویکرد شرح داده می‌شود [۲۵]:

به منظور نشان دادن اندازه استوار p، فرض می‌شود که $p \geq ۰$ و X یک راه‌حل امکان‌پذیر قطعی برای حداقل‌سازی مساله P_s است که بوسیله هر سناریو s نمایه شده است. علاوه بر این، $Z_s(X)$ را ارزش تابع هدف در نظر بگیرید. در نتیجه، سطح استواری را می‌توان بصورت زیر محاسبه کرد:

$$\frac{Z_s(X) - Z_s^*}{Z_s^*} \leq p \qquad (۵۲)$$

در صورتیکه X رابطه (۵۲) را برای تمامی سناریوهای s برآورده کند، آنگاه X، p–استوار می‌باشد. در این رابطه سمت چپ به تأسف نسبی برای هر سناریو s اشاره دارد و صورت کسر، تاسف مطلق را اندازه‌گیری می‌کند. تاسف نسبی معمولاً در فرایند بهینه‌سازی احتمالی p–استوار در نظر گرفته می‌شود، بنابراین، می‌توان آن را به راحتی برای در نظر گرفتن تأسف مطلق یا هزینه عملیاتی اصلاح نمود. رابطه (۵۲) را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$Z_s(X) \leq (۱ + p)Z_s^* \qquad (۵۳)$$

رابطه (۵۳) به شرط احتمالی p–استوار اشاره دارد که از ترکیب آن و تابع هدف حداقل‌سازی هزینه انتظاری، روش بهینه‌سازی احتمالی p–استوار بصورت زیر بدست می‌آید:

$$Min \ \sum_s \pi_s Z_s(X) \qquad (۵۴)$$

$$s.t.$$

$$Z_s(X) \leq (۱ + p)Z_s^*, \ \forall s, X \in \mathrm{P} \qquad (۵۵)$$

که π_s احتمال وقوع هر سناریو را نشان می‌دهد. تابع هدف (۵۴) به حداقل‌سازی هزینه انتظاری در مجموع سناریوها اشاره دارد. از طرف دیگر، محدودیت (۵۵) شرط احتمالی p–استوار را تضمین می‌کند. برای هر راه‌حل، ارزش هدف در هر سناریو s باید از $(۱ + p)Z_s^*$ کوچک‌تر باشد. علاوه بر این، $X \in \mathrm{P}$ مجموعه راه‌حل‌هایی است که برای تمامی سناریوها امکان‌پذیر هستند. محدودیت‌های (۵۲)، (۵۳) و (۵۵) تابع هدف را مجبور می‌کنند تا راه‌حلی پیدا کند که در تمامی سناریوها امکان‌پذیر باشد و همچنین حداقل هزینه انتظاری را نیز شامل شود [۲۵]. مدل بهینه‌سازی احتمالی p–استوار مساله پسماندهای خطرناک به‌صورت زیر است:

1 - Min-Max

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

$$
\begin{aligned}
Min\ & \sum_{w}\sum_{g}\sum_{t}\sum_{m}\sum_{s}\pi_s ct_{gtm}x_{wgtms}+\sum_{t}\sum_{l}\sum_{s}\pi_s ctl_{tl}z_{tls}+\sum_{g}\sum_{r}\sum_{m}\sum_{s}\pi_s cr_{grm}l_{grms}\\
&+\sum_{r}\sum_{l}\sum_{s}\pi_s crl_{rl}v_{rls}+\sum_{t}\sum_{r}\sum_{m}\sum_{s}\pi_s c_{trm}k_{trms}+\sum_{q}\sum_{t}ft_{qt}f_{qt}+\sum_{r}fr_r b_r+\\
&+\sum_{l}lz_l dz_l+\sum_{l}criskl_l+\sum_{q}\sum_{t}criskt_{qt}+\sum_{w}\sum_{g}\sum_{t}\sum_{m}c_m n_{wgtm}+\sum_{g}\sum_{r}\sum_{m}c_m n_{grm}\\
&+\sum_{t}\sum_{l}c_m n_{tl}
\end{aligned}
\qquad (۵۶)
$$

$$
\begin{aligned}
s.t.\\
&\sum_{w}\sum_{g}\sum_{t}\sum_{m}ct_{gtm}x_{wgtms}+\sum_{t}\sum_{l}ctl_{tl}z_{tls}+\sum_{g}\sum_{r}\sum_{m}cr_{grm}l_{grms}+\sum_{r}\sum_{l}crl_{rl}v_{rls}\\
&+\sum_{t}\sum_{r}\sum_{m}c_{trm}k_{trms}+\sum_{q}\sum_{t}ft_{qt}f_{qt}+\sum_{r}fr_r b_r+\sum_{l}lz_l dz_l+\sum_{l}criskl_l+\sum_{q}\sum_{t}criskt_{qt}\\
&+\sum_{w}\sum_{g}\sum_{t}\sum_{m}c_m n_{wgtm}+\sum_{g}\sum_{r}\sum_{m}c_m n_{grm}+\sum_{t}\sum_{l}c_m n_{tl}\le(1+p)Z_s^*,\ \forall s
\end{aligned}
\qquad (۵۷)
$$

محدودیت‌های (۳۵) تا (۵۱). (۵۸)

٤ ارایه مطالعه موردی واقعی در ایران

در این بخش، به منظور تشریح کاربردی بودن و مقایسه مدل‌های اسمی و p–استوار، یک مطالعه موردی از دنیای واقعی در غرب ایران در نظر گرفته می‌شود. قابل توجه است که تمامی محاسبات در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS نسخه ۲۴.۷.۱ تسهیل شده است.

٤-١ جمع‌آوری داده‌های سازمان مدیریت پسماند

از سال ۱۳۷۰ در ایران، وظیفه‌ای به منظور ساماندهی و بهینه‌سازی عملیات جمع‌آوری، حمل‌ونقل، تصفیه، بازیافت و دفع پسماندها به شهرداری‌های مراکز استان‌ها واگذار شده است و در مسیر تحقق آن، در سال‌های اخیر سازمان‌های مدیریت پسماند شکل گرفته است. در این مطالعه به منظور اجرایی کردن مدل‌های توسعه‌یافته مدیریت پسماندهای خطرناک، یک سازمان مدیریت پسماند واقع در غرب ایران مورد بررسی قرار می‌گیرد. شبکه مدیریت این سازمان شامل هفت مرکز تولید، سه مرکز تصفیه بالقوه، سه مرکز بازیافت بالقوه و سه مرکز دفع بالقوه می‌باشد. با هدف تصفیه پسماندها، از دو نوع تکنولوژی سوزاندن و شیمیایی استفاده می‌شود که تکنولوژی شیمیایی در مرکز تصفیه دوم و تکنولوژی سوزاندن در مراکز تصفیه اول و سوم قابل نصب است. تعداد انواع پسماندهای تولیدشده در سه گروه دسته‌بندی می‌شوند که گروه اول با تکنولوژی شیمیایی، گروه دوم با تکنولوژی سوزاندن و گروه سوم با هر دو تکنولوژی سازگاری دارد. همچنین، تعداد انواع وسایل برای جمع‌آوری پسماندها، سه نوع تعیین می‌گردد. به منظور به‌کارگیری مطالعه موردی، در ابتدا نیاز است داده‌های ورودی اولیه پارامترهای مساله مشخص شوند. هزینه انتقال پسماند از مراکز تولید به مراکز تصفیه، هزینه‌های انتقال پسماند قابل بازیافت از مراکز تولید و مراکز تصفیه به مراکز بازیافت، هزینه‌های انتقال باقیمانده پسماند از مراکز تصفیه و مراکز بازیافت به مراکز دفع و هزینه‌های ثابت تاسیس مراکز تصفیه، مراکز بازیافت و مراکز دفع

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

به‌صورت جدول ۱ مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که واحد تمامی هزینه‌های ارایه شده در این مطالعه بر حسب میلیون ریال است.

جدول ۱. هزینه‌های حمل‌ونقل پسماندهای خطرناک و تاسیس مراکز تصفیه، بازیافت و دفع.

پارامتر	ارزش	پارامتر	ارزش	پارامتر	ارزش	پارامتر	ارزش
ct_{gtm}	۱۰	ctr_{trm}	۱۲/۵	crl_{rl}	۲۰	fr_r	۴۰۰۰۰
cr_{grm}	۱۲/۵	ctl_{tl}	۲۰	ft_{qt}	۱۰۰۰۰۰	fl_l	۵۰۰۰۰

بر اساس اطلاعات و مستندات سازمان مدیریت پسماند مورد بررسی، حجم هر نوع پسماند خطرناک تولید شده در هر مرکز تولید برابر با ۵۰ تن، سهم هر نوع پسماند خطرناک تولید شده قابل بازیافت در هر مرکز تولید برابر ۰/۱۵، سهم کاهش جرم هر نوع پسماند خطرناک تصفیه‌شده به وسیله هر تکنولوژی برابر ۰/۱۵، سهم قابل بازیافت هر نوع پسماند خطرناک تصفیه‌شده به وسیله هر تکنولوژی برابر ۰/۱۷۵ و سهم پسماند خطرناک بازیافت شده در هر مرکز بازیافت برابر ۰/۱۵ برآورد می‌شود. علاوه بر این، به منظور تاسیس هر مرکز تصفیه با تکنولوژی مربوطه، حداقل پسماند خطرناک مورد نیاز ۱۰۰ تن تعیین شده است که برای تاسیس هر یک از مراکز بازیافت و دفع نیز به‌طور مشابه همین مقدار می‌باشد و هر مرکز تصفیه، و دفع در صورت تاسیس دارای ظرفیت حداکثر ۷۵۰ تن می‌باشد و این مقدار برای هر مرکز بازیافت ۴۰۰ تن است. همچنین، ظرفیت و هزینه ثابت هر یک از انواع وسایل حمل پسماند به ترتیب ۱۴ تن و ۱۵۰ میلیون ریال در نظر گرفته می‌شود.

در ادامه به منظور پرداختن به موضوع حضور ریسک‌های زیست محیطی، از کارشناسان دعوت شد تا با استفاده از چک‌لیست ریسک‌های اولیه در مراکز تصفیه و دفع را شناسایی کرده و اقدامات پاسخ مناسب به هر یک را برنامه‌ریزی نمایند. همان‌طور که قبلا توضیح داده شد با به‌کارگیری اقدامات پاسخ به ریسک‌های اولیه، ممکن است ریسک‌های ثانویه ایجاد گردند. بنابراین، در این مرحله ریسک‌های ثانویه ناشی از به‌کارگیری اقدامات پاسخ به ریسک‌های اولیه نیز شناسایی شدند که تمامی این اطلاعات در جدول ۲ فهرست شده است.

جدول ۲. فهرست ریسک‌های اولیه، اقدامات پاسخ به ریسک‌های اولیه و ریسک‌های ثانویه.

شماره	ریسک‌های اولیه	اقدامات پاسخ	ریسک‌های ثانویه
اول	آلودگی هوا ناشی از انتشار گازها	بکارگیری دستورالعمل‌های مدیریت سبز	کاهش تنوع زیستی گیاهان
دوم	مهاجرت و کاهش گونه‌های حیوانات و پرندگان در منطقه	ساخت مناطق حفاظت شده	تخریب زیستگاه‌ها در منطقه
سوم	تخلیه منابع طبیعی	بکارگیری پروژه‌های آبخیزداری	خسارت ناشی از سیل و رسوب
چهارم	آلودگی هوا	سیستم‌های کنترل و کاهش آلودگی هوا	جابجایی ذرات معلق و آلاینده‌ها
پنجم	آلودگی آب‌های سطحی	بکارگیری فرایند اکسیداسیون پیشرفته	تحمیل هزینه‌های بسیار بالای عملیاتی و نگهداری
ششم	تخریب لایه ازن	پیروی از پروتکل‌های وضع شده	-
هفتم	فرسایش خاک	تغییر کاربری و چشم‌انداز	-

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

هشتم	تهاجم گونه‌های مهاجم (موش و حشرات)	استفاده از سموم	آلودگی خاک
نهم	مسمومیت محصولات کشاورزی	ساخت کارخانه کمپوست	انتشار بوی نامطبوع

پس از شناسایی ریسک‌های اولیه و ثانویه، با بهره‌گیری از ماتریس ریسک احتمال و تاثیر هر یک بر اساس هزینه توسط کارشناسان ارزیابی شد. با ضرب این دو عامل در یکدیگر، هزینه انتظاری تحمیل شده در هر یک از مراکز تصفیه و مراکز دفع محاسبه می‌گردد. علاوه بر این، به‌کارگیری اقدامات مناسب پاسخ به ریسک‌های اولیه و ثانویه به منظور کاهش اثرات منفی آنها، مستلزم صرف هزینه است و با انتخاب اقدامات در هر مرکز به میزان قابل‌توجهی هزینه انتظاری تحمیل‌شده کاهش می‌یابد. داده‌های مربوط به تمامی این اطلاعات در جدول ۳ گزارش شده است که قسمت اول این جدول مربوط به اطلاعات ریسک‌های اولیه و قسمت دوم مربوط به اطلاعات ریسک‌های ثانویه می‌باشد. همچنین، به منظور مدیریت مطلوب هزینه‌های ناشی از رخداد ریسک‌ها در مراکز تصفیه و دفع، ارزش‌های آستانه این هزینه‌ها مقدار ۲۵۰ میلیون ریال در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. داده‌های ریسک‌های اولیه و ثانویه و اقدامات پاسخ به آنها.

قسمت اول جدول ۳، اطلاعات ریسک اولیه.

مرکز	ریسک اولیه	هزینه رخداد ریسک	هزینه اقدام پاسخ	هزینه کاهش‌یافته
تصفیه ۱ با تکنولوژی ۱	ریسک اولیه اول	۱۱۸	۲۲	۹۵
	ریسک اولیه دوم	۹۹	۲۰	۸۶
تصفیه ۲ با تکنولوژی ۲	ریسک اولیه سوم	۵	۲	۳
	ریسک اولیه چهارم	۱۵۱	۲۷	۱۴۳
تصفیه ۳ با تکنولوژی ۱	ریسک اولیه پنجم	۲۲۰	۴۸	۲۰۶
دفع ۱	ریسک اولیه ششم	۱۴۵	۲۴	۱۴۰
	ریسک اولیه هفتم	۲۴۵	۱	۲۰۵
دفع ۲	ریسک اولیه هشتم	۳۵۵	۲۷	۳۲۰
دفع ۳	ریسک اولیه نهم	۱۵	۰/۵	۱۰
	ریسک اولیه اول	۱۲۰	۱۸	۹۵

قسمت دوم جدول ۳، اطلاعات ریسک ثانویه.

مرکز	ریسک ثانویه	هزینه رخداد ریسک	هزینه اقدام پاسخ	هزینه کاهش‌یافته
تصفیه ۱ با تکنولوژی ۱	ریسک ثانویه اول	۸۴	۳۵	۸۳
	ریسک ثانویه دوم	۴۳	۲۱	۴۰
تصفیه ۲ با تکنولوژی ۲	ریسک ثانویه سوم	۳۸	۱۶	۳۵
	ریسک ثانویه چهارم	۹۱	۳۲	۹۰
تصفیه ۳ با تکنولوژی ۱	ریسک ثانویه پنجم	۱۵۰	۶۵	۱۴۷
دفع ۲	ریسک ثانویه هشتم	۱۳۶	۲۸	۱۳۰
دفع ۳	ریسک ثانویه نهم	۴۵	۲۴	۳۹
	ریسک ثانویه اول	۸۵	۳۶	۸۳

٤-۲ نتایج و بحث

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

در این قسمت با توجه به آماده‌سازی داده‌های اولیه مطالعه موردی، به حل مساله مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک بر اساس دو مدل بهینه‌سازی اسمی و احتمالی p-استوار پرداخته می‌شود. با حل مساله اسمی مشخص شد که مقدار بهینه تابع هدف ۳۸۶۴۹۲/۹۳۰ است که شامل هزینه‌های حمل‌ونقل پسماندهای خطرناک و باقیمانده پسماندها، هزینه‌های ثابت تاسیس مراکز تصفیه، بازیافت و دفع، هزینه‌های کل ریسک تحمیل شده بر مراکز تصفیه و دفع، و در نهایت هزینه‌های ثابت به‌کارگیری وسایل حمل پسماند می‌باشد. سپس، به منظور مقابله با عدم‌قطعیت موجود در پارامترهای gen_{wg}، α_{wg}، δ_{wq}، β_{wq} و η_r و دستیابی به نتایج واقعی‌تر، مدل بهینه‌سازی احتمالی p-استوار توسعه داده شد و برای این منظور سه سناریو خوشبینانه، محتمل و بدبینانه با احتمالات برابر بر روی پارامترهای نامطمئن تعیین شدند. داده‌های مربوط به سناریو خوشبینانه با ۱۰٪ بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده، سناریو محتمل با ۲۰٪ بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده و سناریو بدبینانه با ۳۰٪ بیشتر از مقدار پیش‌بینی‌شده به‌صورت جدول ۴ ارایه شده است.

جدول ٤. داده‌های پارامترهای نامطمئن در سناریوهای بدبینانه، محتمل و خوشبینانه.

پارامتر	خوشبینانه	محتمل	بدبینانه
gen_{wg}	۵۵	۶۶	۷۵
α_{wg}	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۲۲
δ_{wq}	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۲۲
β_{wq}	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۲۶
η_r	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۲۲

خروجی‌های حل مدل بهینه‌سازی احتمالی p-استوار نشان می‌دهد که مقدار بهینه تابع هدف ۴۱۰۵۰۷/۳۰۹ اندازه‌گیری شده است. بنابراین، مقایسه مدل بهینه‌سازی احتمالی p-استوار با مساله اسمی مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک از نظر استواری در برابر پارامترهای احتمالی و نامطمئن، نشان می‌دهد که راه‌حل استوار با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف ناشی از عدم‌قطعیت، نسبت به راه‌حل اسمی تفاوت چشمگیری ندارد. هزینه کل سیستم مدیریت پسماند در مساله اسمی مقدار ۳۸۶۴۹۲/۹۳۰ است درحالی‌که در مدل p-استوار به مقدار ۴۱۰۵۰۷/۳۰۹ افزایش یافته است. این بدان معناست که روش بهینه‌سازی احتمالی p-استوار با افزایش اندکی در هزینه کل به مقدار تقریباً ۶٪ نسبت به مساله اسمی، عدم‌قطعیت را به‌طور هم‌زمان در سه سناریو خوشبینانه، محتمل و بدبینانه به خوبی مدیریت و کنترل می‌کند. علاوه بر این، در طول بهینه‌سازی احتمالی، مقدار تابع هدف در هر یک از سناریوهای خوشبینانه، محتمل و بدبینانه اعتبارسنجی شد که به ترتیب با مقادیر ۳۹۰۲۷۷/۵۷۴، ۴۳۶۷۵۱/۱۳۶ و ۴۴۶۱۴۲/۲۸۲ در حداقل مقدار ممکن هستند.

جدا از بحث عدم‌قطعیت، موضوع مهم بعدی در اجرای موفقیت‌آمیز مساله مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک، انتخاب مجموعه اقدامات بهینه پاسخ به ریسک به منظور مقابله با ریسک‌های اولیه و ثانویه احتمالی مراکز تصفیه و دفع است که برای این منظور معادلات (۱۷) تا (۲۴) تعریف شدند. بنابراین، با رعایت این

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

محدودیت‌ها و با توجه به خروجی‌های مدل بهینه‌سازی احتمالی p-استوار، هزینه‌های ناشی از حضور ریسک‌های اولیه و ثانویه در هر یک از مراکز تصفیه و دفع در جدول ۵ گزارش شده است.

جدول ۵. هزینه‌های ناشی از رخداد ریسک های اولیه و ثانویه در هر مرکز.

مرکز	ریسک اولیه		ریسک ثانویه	
	نوع	هزینه	نوع	هزینه
تصفیه ۱ با تکنولوژی ۱	ریسک اولیه اول	۴۵	ریسک ثانویه اول	۳۶
	ریسک اولیه دوم	۳۳	ریسک ثانویه دوم	۲۴
تصفیه ۲ با تکنولوژی ۲	ریسک اولیه سوم	۴	ریسک ثانویه سوم	۱۹
	ریسک اولیه چهارم	۳۵	ریسک ثانویه چهارم	۳۳
تصفیه ۳ با تکنولوژی ۱	ریسک اولیه پنجم	۶۲	ریسک ثانویه پنجم	۶۸
دفع ۱	ریسک اولیه ششم	۲۹	-	-
	ریسک اولیه هفتم	۴۱	-	-
دفع ۲	ریسک اولیه هشتم	۶۲	ریسک ثانویه هشتم	۳۴
دفع ۳	ریسک اولیه نهم	۵/۵	ریسک ثانویه نهم	۳۰
	ریسک اولیه اول	۴۳	ریسک ثانویه اول	۳۸

با توجه به نتایج جدول ۵ واضح است که در مرکز دفع ۱، به‌کارگیری اقدامات پاسخ به ریسک‌های اولیه شماره ششم و هفتم، هیچ‌گونه ریسک دیگری را ایجاد نمی‌کند و در محدوده هزینه مجاز از پیش تعیین‌شده، این اقدامات به‌صورت بهینه عمل می‌کنند. اما در دیگر مراکز، بکارگیری اقدامات پاسخ به ریسک اولیه باعث ایجاد ریسک ثانویه می‌گردد که به دنبال آن اقدامات پاسخ به ریسک ثانویه نیز باید به‌کار گرفته شود. موضوعی که بسیار پر اهمیت است مقایسه هزینه ناشی از حضور ریسک‌های اولیه و ثانویه در هر یک از مراکز می‌باشد. در مرکز تصفیه ۲ برای ریسک شماره سوم، هزینه ریسک اولیه برابر با ۴ است که این مقدار برای ریسک ثانویه ۱۹ خواهد بود. بنابراین، چون اثرات منفی احتمالی ریسک ثانویه بالاتر از ریسک اولیه است، اقدامات پاسخ به ریسک اولیه نباید انجام شود تا از رخداد ریسک ثانویه و اینگونه اثرات منفی تحمیلی آن جلوگیری شود. به‌طور مشابه، برای ریسک شماره پنجم در مرکز تصفیه ۳ و برای ریسک شماره نهم در مرکز دفع ۳، اثرات منفی احتمالی بالاتر ریسک ثانویه، بر عدم انجام اقدامات پاسخ به ریسک اولیه تاکید دارد. در نتیجه، اثرات ریسک ثانویه نقش مهمی را در انتخاب اقدامات بهینه پاسخ به ریسک اولیه بازی می‌کند.

در نهایت به منظور بررسی اثر تغییر در عامل استواری بر خروجی مدل بهینه‌سازی احتمالی p-استوار تحلیل حساسیت اجرا شد. در جدول ۶ نتایج حاصل از حل مساله با تنظیم مقادیر مختلف p گزارش شده است. مشاهده می‌شود که با تغییر مقدار p از ۰/۰۰۰۱ تا مثبت بینهایت مقدار حداکثر تاسف نسبی تغییری نکرده است. لازم به ذکر است که مقدار تاسف نسبی به ازای هر مقدار p با استفاده از سمت چپ رابطه (۵۲) و برای تمامی سناریوها قابل محاسبه است و حداثر مقدار آنها، معرف حداکثر مقدار تاسف نسبی برای مقدار p انتخابی می‌باشد. علاوه بر این واضح است که با تغییر مقدار p، ارزش بهینه تابع هدف مدل استوار یا هزینه کل سیستم مدیریت پسماندهای

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

خطرناک دستخوش تغییر نشده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل احتمالی p-استوار پیشنهادی در این مطالعه نسبت به تغییرات در مقدار p حساس نمی‌باشد.

جدول ٦. تحلیل حساسیت بر روی عامل استواری p

P	حداکثر تأسف نسبی	درصد کاهش تأسف نسبی	تابع هدف مدل استوار (هزینه)	افزایش در هزینه
۰/۰۰۰۱	۶/۴۶۵	۰	۴۱۵۵۰۷/۳۰۹	۰
۰/۰۵	۶/۴۶۵	۰	۴۱۵۵۰۷/۳۰۹	۰
۰/۵	۶/۴۶۵	۰	۴۱۵۵۰۷/۳۰۹	۰
+∞	۶/۴۶۵	۰	۴۱۵۵۰۷/۳۰۹	۰

۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله مساله اسمی مکان‌یابی‌مسیریابی پسماندهای خطرناک و مدل بهینه‌سازی استوار آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مدل بهینه‌سازی احتمالی p-استوار پیشنهادی می‌تواند به خوبی عدم‌قطعیت را مدیریت و کنترل کند و با در نظر گرفتن سناریوهای خوشبینانه، محتمل و بدبینانه برای مقادیر پسماندهای خطرناک تولیدی، از منطقی بودن هزینه‌های کل سیستم مدیریت پسماند اطمینان حاصل نماید. همچنین، برنامه‌ریزی انجام شده در رابطه با ریسک نشان می‌دهد که انتخاب اقدام پاسخ به ریسک اولیه وابسته به رخداد ریسک ثانویه ناشی از آن است. این بدان معناست در صورتی اقدام پاسخ به ریسک اولیه انتخاب و به‌کار گرفته می‌شود که اثرات منفی ناشی از رخداد ریسک ثانویه کمتر از نوع اولیه باشد. در غیراین‌صورت، پاسخی به ریسک اولیه داده نمی‌شود. در نتیجه، به‌طور کلی روش مدل بهینه‌سازی استوار پیشنهادی را می‌توان در محیط‌هایی با مقدار پسماندهای خطرناک تولیدی احتمالی و تحت تاثیر ریسک‌های زیست‌محیطی به‌طور موثر به‌کار گرفت. به منظور توسعه این مطالعه، حوزه‌های جالبی ارزش تلاش‌های تحقیقاتی پیوسته را دارند که شامل مدل‌سازی فرایند مدیریت پسماندهای خطرناک به‌صورت چنددوره‌ای و همچنین، اضافه کردن تصمیمات مربوط به کنترل موجودی هستند. بر این اساس، الگوریتم‌های جدید مبتنی بر شبیه‌سازی‌بهینه‌سازی برای حل مسایل با پیچیدگی محاسباتی بالا تحت شرایط عدم‌قطعیت را نیز می‌توان طراحی نمود.

منابع

[1] Rabbani, M., Heidari, R., & Yazdanparast, R. (2019). A stochastic multi-period industrial hazardous waste location-routing problem: Integrating NSGA-II and Monte Carlo simulation. European Journal of Operational Research, 272(3), 945-961.

[2] Mara, S. T. W., Kuo, R. J., & Asih, A. M. S. (2021). Location-routing problem: a classification of recent research. International Transactions in Operational Research, 28(6), 2941-2983.

[3] Zografros, K. G., & Samara, S. (1989). Combined location-routing model for hazardous waste transportation and disposal. Transportation Research Record, (1245).

[4] Cappanera, P., Gallo, G., & Maffioli, F. (2003). Discrete facility location and routing of obnoxious activities. Discrete Applied Mathematics, 133(1-3), 3-28.

[5] Alumur, S., & Kara, B. Y. (2007). A new model for the hazardous waste location-routing problem. Computers & operations research, 34(5), 1406-1423.

[6] Emek, E., & Kara, B. Y. (2007). Hazardous waste management problem: The case for incineration. Computers & Operations Research, 34(5), 1424-1441.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]

[7] Samanlioglu, F. (2013). A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem. European Journal of Operational Research, 226(2), 332-340.
[8] Li, L., Wang, S., Lin, Y., Liu, W., & Chi, T. (2015). A covering model application on Chinese industrial hazardous waste management based on integer program method. Ecological Indicators, 51, 237-243.
[9] Ardjmand, E., Weckman, G., Park, N., Taherkhani, P., & Singh, M. (2015). Applying genetic algorithm to a new location and routing model of hazardous materials. International Journal of Production Research, 53(3), 916-928.
[10] Ardjmand, E., Young II, W. A., Weckman, G. R., Bajgiran, O. S., Aminipour, B., & Park, N. (2016). Applying genetic algorithm to a new bi-objective stochastic model for transportation, location, and allocation of hazardous materials. Expert systems with applications, 51, 49-58.
[11] Aydemir-Karadag, A. (2018). A profit-oriented mathematical model for hazardous waste locating-routing problem. Journal of Cleaner Production, 202, 213-225.
[12] Rabbani, M., Heidari, R., Farrokhi-Asl, H., & Rahimi, N. (2018). Using metaheuristic algorithms to solve a multi-objective industrial hazardous waste location-routing problem considering incompatible waste types. Journal of Cleaner Production, 170, 227-241.
[13] Ghaderi, A., & Burdett, R. L. (2019). An integrated location and routing approach for transporting hazardous materials in a bi-modal transportation network. Transportation research part E: logistics and transportation review, 127, 49-65.
[14] Hassanpour, S. T., Ke, G. Y., & Tulett, D. M. (2021). A time-dependent location-routing problem of hazardous material transportation with edge unavailability and time window. Journal of Cleaner Production, 322, 128951.
[15] Delfani, F., Kazemi, A., SeyedHosseini, S. M., & Niaki, S. T. A. (2021). A novel robust possibilistic programming approach for the hazardous waste location-routing problem considering the risks of transportation and population. International Journal of Systems Science: Operations & Logistics, 8(4), 383-395.
[16] Raeisi, D., & Jafarzadeh Ghoushchi, S. (2022). A robust fuzzy multi-objective location-routing problem for hazardous waste under uncertain conditions. Applied Intelligence, 52(12), 13435-13455.
[17] Hassanpour, S. T., Ke, G. Y., Zhao, J., & Tulett, D. M. (2023). Infectious waste management during a pandemic: A stochastic location-routing problem with chance-constrained time windows. Computers & Industrial Engineering, 109066.
[18] Govindan, K., & Cheng, T. C. E. (2018). Advances in stochastic programming and robust optimization for supply chain planning. Computers & Operations Research, 100, 262-269.
[19] Liu, S., & Zhang, C. (2023). Robust optimization of agriculture products urban distribution path considering demand uncertainty. Alexandria Engineering Journal, 66, 155-165.
[20] Roman, L., Hardesty, B.D., & Schuyler, Q. (2022). A systematic review and risk matrix of plastic litter impacts on aquatic wildlife: A case study of the Mekong and Ganges River Basins. Science of The Total Environment, 843: 156858.
[21] Ramezan Ghanbari, S., Afshar-Nadjafi, B., & Sabzehparvar, M. (2023). Robust optimization of train scheduling with consideration of response actions to primary and secondary risks. Mathematical Biosciences and Engineering, 20(7): 13015-13035.
[22] Wang, C., Lv, C., Li, P., Song, G., Li, S., Xu, X., & Wu, J. (2018). Modeling and optimal operation of community integrated energy systems: A case study from China. Applied energy, 230, 1242-1254.
[23] Gholizadeh, H., & Fazlollahtabar, H. (2020). Robust optimization and modified genetic algorithm for a closed loop green supply chain under uncertainty: Case study in melting industry. Computers & Industrial Engineering, 147, 106653.
[24] Ghaderi, A., & Khanzadeh, C. A. (2019). Combined Stochastic Programming and Robust Optimization Approach for Location-Routing Problem and Solving it via Variable Neighborhood Search algorithm. Journal of Operational Research in its Applications, 16(4): 15-36
[25] Guo, X., Guo, Q., Chen, Y., Valipour, E., & Nojavan, S. (2022). Regret-based management of wind-solar-thermal generation company under uncertainties: A novel stochastic p-robust optimization approach. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 52, 102313.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-30]

[DOI: 10.71773/jamlu-2026-2-2237]