



Multi-Objective Modeling of the Supply Chain of the Hospital Waste Management Considering the Dimensions of Sustainability Accompanied by Fuzzy Set Theory

Hossein Firouzi 

PhD student of Industrial Management, Faculty of Management, Islamic Azad University, Firuzkoh Branch, Iran

Javad Rezaian 

Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran

Mohammad Mehdi Movhadi 

Associate Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management, Islamic Azad University, Firuzkoh Branch, Iran

Alireza Rashidi Komijan 

Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Management, Islamic Azad University, Firuzkoh Branch, Iran

Abstract

This paper presents a multi-objective mathematical model for the reverse supply chain of hospital waste management in Iran during the COVID-19 pandemic, incorporating dimensions of sustainability. The objectives of the model are as follows: 1) Minimizing the costs associated with building facilities and waste treatment centers, vehicle fuel costs, and environmental costs due to pollutant emissions; 2) Maximizing the energy generated from the waste combustion process; 3) Minimizing the risk of virus transmission resulting from inadequate waste management; and 4) Maximizing the number of job opportunities in the established centers. It is important to note that existing uncertainties are addressed through the application of fuzzy set theory. Given the multi-objective nature of the model, two multi-objective algorithms, namely the Pareto archive-based Krill Herd Algorithm and Non-

* Corresponding Author: j.rezaeian@ustmb.ac.ir

How to Cite: Firouzi, O., Rezaian, J., Movhadi, M. M., Rashidi Komijan, A. (2024). Multi-Objective Modeling of the Supply Chain of the Hospital Waste Management Considering the Dimensions of Sustainability Accompanied by Fuzzy Set Theory, *Industrial Management Studies*, 21(71), 177-223.

dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), are employed to solve the defined problem. The results indicate that the proposed Krill Herd Algorithm converges to a solution with higher quality and dispersion compared to NSGA-II. Additionally, through a comparison of the spacing index and running time of the two algorithms, it is observed that NSGA-II explores the solution space with higher uniformity and solves the model in less time.

Introduction

Hospital waste encompasses a broad spectrum of both hazardous and non-hazardous materials. The management of hospital waste involves the development of a suitable supply chain network for handling waste generated in the healthcare sector. Improper disposal or mishandling of contaminated waste not only contributes to environmental pollution but also poses a risk of transferring viral pathogens to healthcare and recycling personnel. Research has shown that inadequate disposal of medical waste can lead to the transmission of up to 30% of hepatitis B, 1-3% of hepatitis C, and 0.3% of HIV infections from patients to healthcare workers. This paper aims to design a multi-objective mathematical model for the reverse supply chain of hospital waste management in Iran during the COVID-19 pandemic while considering the dimensions of sustainability.

Literatur Review

In recent years, various studies have delved into the complexities of medical and hospital waste management, proposing mathematical models to address this intricate issue. The current study is built upon the work of Valizadeh et al. (2021). In their paper, a hybrid mathematical modeling approach was introduced, featuring a Bi-level programming model specifically tailored for infectious waste management during the COVID-19 pandemic. The outcomes revealed that, at the higher level of the model, governmental decisions aiming to minimize total costs associated with infectious waste management were crucial. This involved the conversion of collected infectious waste into energy, with the generated revenue being reinvested back into the system. The findings indicated that, through energy production from waste during the COVID-19 pandemic, approximately 34% of the total costs related to waste collection and transportation could be offset. The uniqueness of this study lies in its

consideration of three sustainability dimensions: risk, vehicle routing, energy production, employment, and emission of polluting gases. Consequently, the novelty of this research, when compared to previous studies and the article by Valizadeh et al. (2021), is evident in several aspects. It introduces an integrated multi-objective positioning-routing model for the supply chain of waste management under pandemic conditions, taking into account sustainability dimensions, notably the economic aspect, and employs meta-heuristic algorithms for model resolution.

Methodology

To ensure the proper management of hospital waste, the waste is categorized into two groups: infectious and non-infectious waste. It is assumed that waste in hospitals and health centers is segregated and placed in infectious and non-infectious waste bins. The collected waste undergoes further processing: infectious waste is transported to incineration centers, where it is burned and converted into electrical energy, while non-infectious waste is sent to waste recycling centers, where it is reprocessed and returned to the production cycle in the industry. A multi-objective mathematical model is presented to integrate location-routing decisions in the supply chain of hospital waste management, with the following modeling assumptions:

- Waste segregation at the source helps prevent all waste from becoming viral, reducing the spread of viruses through waste.
- The risk of spreading viruses is assumed to be relatively equal for each type of waste.
- Two types of vehicles are considered for transporting waste: the first type carries non-infectious waste, while the second type carries infectious waste.
- The number of cars, waste collectors, and the capacity of waste incinerators are considered constant in this study.
- The mathematical model is multi-objective, with the objectives being to optimize the three dimensions of sustainability (economic, social, and environmental).
- The economic goal is to minimize system costs, including the cost of site location, recycling, collection, segregation of non-infectious waste, and incineration.

- The environmental goal is to minimize the emission of pollutants in the transportation and processing system in various facilities, as well as to maximize the production of electrical energy.
- The social goal is to minimize the risk of virus transmission and maximize the employment rate.

Results and Discussion

This research presents a multi-objective mathematical model for the reverse supply chain of hospital waste management during the COVID-19 pandemic in Iran and solves it. The pandemic period is considered a time of maximum utilization of health centers and waste disposal. In this context, a three-objective mathematical model was initially introduced. To solve the model, the krill herd optimization algorithm was employed. The performance of the krill herd optimization algorithm was scientifically and practically evaluated by comparing it with the well-known NSGA-II algorithm. After designing the model, both the multi-objective krill herd algorithm based on Pareto Archive and the NSGA-II algorithm were utilized to solve the model. The results of solving the model demonstrated that the proposed krill herd algorithm, designed in combination with VNS, effectively solved the model and determined the optimal solution within a boundary. Comparing the results of this algorithm with those obtained by the renowned NSGA-II algorithm revealed that the krill herd algorithm produced solutions of much higher quality.

Conclusion

The comparison of the Index of dispersion between the two algorithms indicates that the krill herd optimization algorithm explores more points in the solution space, leading to a lower probability of getting stuck in local optima compared to the NSGA-II algorithm. On the other hand, the index of uniformity for the NSGA-II algorithm is lower than that of the krill herd algorithm (lower values are better), suggesting that the multi-objective genetic algorithm explores the solution space more uniformly. Considering the execution time of the two algorithms, it was observed that the NSGA-II algorithm solved the model in less time. Additionally, the increasing trend of execution time in both algorithms confirms the NP-HARD nature of the hospital waste management problem. According to the output of the MATLAB

software, considering the presented model, the results affirm the capability to optimally select hospital waste recycling centers.


Keywords: Hospital Waste Management; Sustainability; Multi-Objective Optimization; Fuzzy Set Theory.



مدل سازی چندهدفه زنجیره تأمین مدیریت پسماندهای بیمارستانی با در نظر گرفتن ابعاد پایداری در ترکیب با تئوری مجموعه فازی


دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد

اسلامی، واحد فیروزکوه، ایران

حسین فیروزی 


دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه

علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

جواد رضائیان * 


دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد

اسلامی، واحد فیروزکوه، ایران

محمد مهدی موحدی 

دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد

اسلامی، واحد فیروزکوه، ایران

علیرضا رشیدی کمیجان 

چکیده

در این مقاله یک مدل ریاضی چهار هدفه برای زنجیره تأمین معکوس مدیریت پسماندهای بیمارستانی در دوره همه گیری کرونا در ایران با در نظر گرفتن ابعاد پایداری ارائه شده است. اهداف مدل ارائه شده عبارتند از: (۱) کمینه سازی هزینه های احداث تسهیلات و پردازش زباله ها در مراکز و هزینه های سوخت و سایر نقلیه و هزینه های زیست محیطی حاصل از انتشار گازهای آلاینده؛ (۲) بیشینه سازی انرژی تولید شده حاصل از سوزاندن زباله ها؛ (۳) کمینه سازی ریسک ابتلا به ویروس عدم مدیریت زباله ها و (۴) بیشینه سازی میزان استخدام نیروی کار در مراکز تأسیس شده. به منظور مدل سازی عدم قطعیت های موجود از تئوری مجموعه فازی استفاده شده است. با توجه به چندهدفه بودن مدل، جهت حل از الگوریتم های دسته میگوها چندهدفه مبتنی بر آرشیو پارتو و الگوریتم چندهدفه ژنتیک استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که الگوریتم دسته میگوهای پیشنهادی قادر به دستیابی به جواب های با کیفیت و پراکندگی بالاتر نسبت به

مدل‌سازی چندهدفه زنجیره تأمین مدیریت پسماندهای بیمارستانی با ...؛ فیروزی و همکاران | ۱۸۳

الگوریتم چندهدفه ژنتیک می‌باشد. همچنین مقایسه شاخص یکنواختی و زمان اجرای دو الگوریتم، نشان داد که الگوریتم چندهدفه ژنتیک در زمان کمتری فضای جواب را با یکنواختی بالاتری جستجو کرده و مدل را حل می‌کند.

کلیدواژه‌ها: مدیریت پسماندهای بیمارستانی، پایداری، بهینه‌سازی چند هدفه، تئوری مجموعه فازی.

مقدمه

از زمان انقلاب صنعتی حجم و تنوع زباله‌ها آنقدر زیاد شد که کم‌کم به یک مسئله بسیار مهم تبدیل شد. این رشد چشمگیر زباله‌ها باعث به وجود آمدن مشکلاتی شد که مهم‌ترین آن مربوط به محیط‌زیست و سلامت افراد جامعه می‌شود. از این رو، مدیریت زباله‌ها، توجه محققین و مسئولین را به خود جلب کرد و راهکارهای گوناگونی برای نحوه جمع‌آوری، حمل و نقل، پردازش، بازیافت یا انهدام زباله‌ها ارائه شده است (Nikzamid et al., 2021; Ferronato et al., 2021).

زباله‌های مربوط به حوزه بهداشت و درمان، نوعی از زباله‌ها هستند که شامل هر دو گروه خطرناک و غیرخطرناک هستند و محدوده‌ی وسیعی از مواد را شامل می‌شوند (Nikzamid et al., 2021)؛ به عبارت دیگر، اصطلاح زباله‌های بهداشت و درمان، شامل تمام زباله‌هایی است که در مراکز بهداشتی، مراکز تحقیقاتی و آزمایشگاه‌های مربوط به پزشکی تولید می‌شوند. علاوه بر این، زباله‌هایی که در خانه‌ها به منظور مراقبت‌های پزشکی نیز تولید می‌شوند در این دسته از زباله‌ها قرار می‌گیرند (Nikzamid et al., 2021; Chartier, 2014).

بنابراین، طراحی یک شبکه زنجیره تأمین مناسب به منظور مدیریت زباله‌های حوزه بهداشت و درمان یکی از چالش‌های اصلی این حوزه است؛ چراکه عدم مدیریت مناسب آن علاوه بر آلودگی زیست‌محیطی، بیمارستان و مراکز بهداشت و درمان را با مشکلات جدی مواجه خواهد کرد. دفع و یا جابجایی نامناسب پسماندهای آلوده، ممکن است عوامل بیماری‌زای ویروسی به کادر درمان و کارکنان بازیافت انتقال یابد. مشخص شده که با توجه به دفع نامناسب پسماندهای پزشکی تا ۳۰٪ هپاتیت B، ۱ الی ۳ درصد هپاتیت C و ۰/۳ درصد HIV از بیماران به کادر درمان منتقل می‌گردد (Singh et al., 2020).

همان‌طور که گفته شد، پسماندهای بیمارستانی، یکی از معضلات زیست‌محیطی است که به علت دارا بودن عوامل خطرناک، سمی و بیماری‌زا سلامت افراد و جامعه را تهدید می‌کند. لذا توجه به مدیریت صحیح پسماندهای بیمارستانی به دلیل دارا بودن پتانسیل عفونت‌زایی و وجود زائدات خطرناک بسیار حائز اهمیت است. لذا در این مقاله به

مدیریت پسماند بیمارستانی در ایران پرداخته می‌شود و یک مدل ریاضی چندهدفه جهت یکپارچه‌سازی تصمیمات مکان‌یابی-مسیریابی در زنجیره تأمین مدیریت پسماندهای بهداشتی با در نظر گرفتن ابعاد پایداری ارائه و حل می‌گردد.

پیشینه پژوهش

اوسابا^۱ و همکاران (۲۰۱۹) از الگوریتم خفاش گسسته و بهبودیافته برای حل مسئله توزیع کالاهای پزشکی و جمع‌آوری زباله‌های دارویی استفاده کردند. در مدل ریاضی ارائه‌شده توسط آن‌ها، وسایل نقلیه با ظرفیت محدود، هم‌زمان که داروها را به بیمارستان‌ها و مراکز بهداشتی تحویل می‌دهند، پسماندها را نیز جمع‌آوری می‌نمایند (Osaba et al., 2019). جرجین^۲ و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی به مسئله مکان‌یابی تأسیسات دفع زباله‌های بهداشتی پرداخته‌اند. در این تحقیق، پس از اعمال الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر ABC بر روی داده‌های آزمایشی، یک مسئله واقعی مکان‌یابی تأسیسات برای شناسایی مکان‌های تسهیلات دفع زباله‌های بهداشتی برای شهرداری استانبول حل شده است (Gergin et al., 2019). سنتینکایا^۳ و همکاران (۲۰۲۰) یک مدل رگرسیونی به منظور تخمین میزان زباله تولیدشده توسط بیمارستان‌های منطقه آکسارای ارائه دادند که ورودی‌های مدل تعداد بیمار در سه کلاس سنی مختلف (۰-۱۵؛ ۱۵-۶۵؛ ۶۵+) بود (Çetinkaya et al., 2020).

اشتری و همکاران (۲۰۲۰) بررسی بهبود مدیریت ضایعات بهداشتی و درمانی را از مقالات منتشرشده بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ در سایت‌های معتبر علمی جمع‌آوری کردند (Ashtari et al., 2020). سیدی مبارکه و همکاران (۲۰۲۰) یک رویکرد فراابتکاری دو سطحی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای مسئله مدیریت زباله‌های خطرناک ارائه کردند و در یک مطالعه موردی نشان دادند مدل پیشنهادی و رویکرد راه‌حل عملی و کارآمد است (Saeidi-Mobarakeh et al., 2020).

1. Osaba

2. Gergin

3. Yusuf Çetinkaya

کارگر و همکاران (۲۰۲۰) مدل برنامه‌ریزی خطی با سه تابع هدف برای به حداقل رساندن هزینه‌های کل، ریسک مرتبط با حمل‌ونقل و تصفیه پسماندها و مقدار زباله جمع‌آوری نشده در شیوع اپیدمی ویروس کرونا طراحی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند با تعیین جریان بین مراکز، تصمیم‌گیری برای نصب دو مرکز تصفیه موقت جدید و اجازه دادن به شبکه برای داشتن زباله جمع‌آوری نشده تعادلی بین سه هدف در نظر گرفته ایجاد کند (Kargar et al., 2020). یزدانی و همکاران (۲۰۲۰) از روش بهترین و بدترین گزینه جدید با اعداد تقریبی فاصله‌ای برای تصمیم‌گیری مکان دفع زباله‌های بهداشتی استفاده کرده و یک مطالعه موردی در یک بیمارستان خصوصی در مادرید برای نشان دادن کاربرد و نشان دادن اثربخشی روش ارزیابی چندمعیاره پیشنهادی ارائه داده‌اند (Yazdani et al., 2020).

یو^۱ و همکاران (۲۰۲۰) به طراحی شبکه لجستیک معکوس برای مدیریت مؤثر پسماندهای پزشکی در دوره کرونا در ووهان (چین) پرداخته‌اند. نتایج مقاله نشان می‌دهد که نصب زباله‌سوزهای موقت ممکن است راه‌حلی مؤثر برای مدیریت افزایش فوق‌العاده زباله‌های پزشکی در طول شیوع COVID-19 در ووهان باشد، اما انتخاب مکان این زباله‌سوزهای موقت از اهمیت قابل توجهی برخوردار است (Yu et al., 2020).

نیک ضمیر و برادران (۲۰۲۰) به طراحی شبکه لجستیک مراقبت‌های بهداشتی با در نظر گرفتن انتشار تصادفی آلودگی پرداخته و یک مدل دوهدفه برای آن ارائه کرده‌اند. آن‌ها یک مدل ریاضی دو هدفه در شرایط عدم قطعیت (تصادفی) ارائه داده و از الگوریتم آبشار چند هدفه مبتنی بر آرشیو پارتو جهت حل مدل استفاده نمودند (Nikzamid & Baradaran, 2020). در مقاله‌ی دیگری، نیک ضمیر و همکاران (۲۰۲۱) به ارائه یک مدل ریاضی دو هدفه جهت مدیریت زباله‌های عفونی پرداخته‌اند. در مدل پیشنهادی علاوه بر کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره، کاهش ریسک جمعیت در معرض انتشار آلودگی ناشی از زباله‌های عفونی نیز مدنظر قرار گرفته است و در نهایت یک الگوریتم فراابتکاری تلفیقی

مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک توسعه داده شد (Nikzamid, et al., 2021).

وانگ^۱ و همکاران (۲۰۲۱) یک شبکه لجستیک معکوس دو مرحله‌ای را برای زباله‌های بهداشتی شهری طراحی کردند که در دو مرحله میزان زباله‌های پزشکی بر اساس مدل پیش‌بینی GM(1) خاکستری پیش‌بینی شد و نتیجه آن توسعه رویکردی پویا برای شبکه لجستیک معکوس ضایعات بهداشتی با ترکیب روش پیش‌بینی GM(1) خاکستری با مدل بهینه‌سازی چند هدفه بود (Wang et al., 2021). لطفی و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل ریاضی بر پایه برنامه‌ریزی تصادفی استوار دو مرحله‌ای را برای طراحی شبکه زنجیره‌ای پسماند پزشکی با در نظر گرفتن ریسک و استواری را پیشنهاد دادند، مدل را با حل‌کننده GAMS CPLEX حل کرده و نتایج نشان داد که با افزایش ضریب محافظه کارانه، سطح اطمینان CVAR و ضریب بازیافت زباله، تابع هزینه و ریسک جمعیت را افزایش می‌یابد (Lotfi et al., 2021).

لیو^۲ و همکاران (۲۰۲۱) در مورد بهینه‌سازی سیستم مدیریت پسماند بهداشتی و درمانی بر اساس اصل حکمرانی سبز در همه‌گیری COVID-19 به تجزیه و تحلیل و مطالعه اصول حکمرانی سبز پرداخته و مشکلات موجود در این سیستم را خلاصه کردند. نتایج به ایجاد انبارهای موقت در امتداد مسیرهای ترانزیت برای بهبود کارایی انتقال زباله‌های بهداشتی بود و مطالعه هماهنگی و همکاری دولت، بیمارستان‌ها، جوامع و سایر بخش‌ها و پیشنهادها را هم‌راستا برای دفع زباله‌های بهداشتی در سراسر کشور دلالت دارد (Liu et al., 2021).

شادکام (۲۰۲۱) به طراحی شبکه‌ای برای مدیریت زباله COVID-19 و بهینه‌سازی شبکه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته پرداخته است. وی شبکه معکوس مدیریت پسماندهای پزشکی را طراحی کرده و یک مدل ریاضی تک هدفه باهدف کمینه‌سازی هزینه‌ها ارائه داد. همچنین جهت حل مدل از الگوریتم فراابتکاری فاخته استفاده کرده است (Shadkam, 2021).

1. Wang

2. Liu, Z

میشرا و رانی^۱ (۲۰۲۱) نیز مکان‌یابی تسهیلات دفع پسماندهای پزشکی با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته‌اند. آن‌ها جهت مکان‌یابی، ابتدا معیارها و شاخص‌های مهم و مؤثر را تعیین و سپس از یک رویکرد تصمیم‌گیری فازی به مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت محدود پرداختند (Mishra & Rani, 2021).

ولی زاده و همکاران (۲۰۲۱) به مدل‌سازی ریاضی برای تولید انرژی از زباله‌های خطرناک در طول همه‌گیری COVID-19 پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که در سطح بالاتر مدل، تصمیمات دولت در مورد کل هزینه‌های مربوط به زباله‌های عفونی باید به حداقل برسد و زباله‌های عفونی جمع‌آوری شده به انرژی تبدیل شود که درآمد حاصل از آن به سیستم بازگردد. نتایج نشان داد که با تولید انرژی از زباله در طول همه‌گیری کووید، ۳۴ درصد از کل هزینه جمع‌آوری و حمل زباله قابل جبران است (Valizadeh, 2021). گویندان^۲ و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل ریاضی برای مدیریت زباله‌های پزشکی در طول شیوع بیماری کروناویروس ارائه کرده‌اند که یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه را برای مدیریت زباله‌های پزشکی در طول شیوع COVID-19 ایجاد می‌کند که در مجموع هزینه‌ها و خطرات را به‌طور هم‌زمان به حداقل می‌رساند (Govindan et al., 2021). پولات^۳ (۲۰۲۱) یک مدل ریاضی برای مدیریت زباله‌های پزشکی در طول شیوع بیماری کروناویروس ارائه کرده است. نتایج محاسباتی اثربخشی روش یکپارچه را نشان می‌دهد که بینش عملی و نظری را در کنترل تولید زباله برای جلوگیری از انتشار ویروس برای مقامات بهداشتی تضمین می‌کند (Polat, 2022).

تیرکلایی و همکاران (۲۰۲۱) مدیریت پسماندهای بهداشتی در دوره کووید ۱۹ را بررسی کرده و برای مسئله مسیریابی-مکان‌یابی چند سفری فازی پایدار در سیستم مدیریت زباله‌های پزشکی ارائه نموده‌اند. مدل ریاضی ارائه‌شده توسط آن‌ها چندهدفه بوده و اهداف به حداقل رساندن هم‌زمان کل زمان سفر، کل تخلف از پنجره‌های زمانی/اولویت‌های خدمات و کل خطر آلودگی/محیط‌زیست تحمیل شده بر جمعیت

1. Mishra, A. R., & Rani, P

2. Govindan

3. E. G. Polat

اطراف محل های دفع است (Tirkolae et al., 2021). احمد و همکاران (۲۰۲۱) به مسئله سیاست های تولید پایدار و مدیریت پسماند برای تجهیزات پزشکی در شرایط عدم قطعیت پرداخته اند. این مقاله یک چارچوب مدلسازی و بهینه سازی را برای تصمیم گیری تولید پایدار و مدیریت زباله برای تجهیزات پزشکی دوره COVID-19 در شرایط عدم قطعیت پیشنهاد می کند (Ahmad et al., 2021).

ترکایش^۱ و همکاران (۲۰۲۱) به بهینه سازی چند هدفه برای طراحی شبکه مدیریت پسماند مراقبت های بهداشتی با چشم انداز پایداری پرداخته اند. این مقاله یک مدلسازی چندهدفه جدید را برای توانمندسازی شرکت ها در تصمیم گیری بهینه با در نظر گرفتن جنبه های اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی فرموله می کند. (Torkayesh et al., 2021).

ژائو^۲ و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی و مرور دفع اضطراری و مدیریت زباله های پزشکی در طول همه گیری COVID-19 در چین پرداخته اند. نتایج تحقیق آن ها نشان داد که تأسیسات سوزاندن زباله جامد شهری پتانسیل زیادی برای بهبود ظرفیت های دفع اضطراری پسماندهای بهداشتی دارند و سازگاری زباله ها باید با ترکیب و ارزش حرارتی زباله مطابقت داشته باشد (Zhao et al., 2022). آندیو^۳ و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی مدیریت پسماندهای باله های پزشکی ناشی از همه گیری کووید-۱۹ و مدیریت و اثرات زیست محیطی آن ها در استرالیا پرداخته اند. نتایج این مطالعه بینش هایی را در مورد پاسخ های کوتاه مدت و بلندمدت به مدیریت زباله های کووید-۱۹ در استرالیا ارائه می دهد و توصیه هایی برای توسعه استراتژی های قابل اجرا و پایدار برای کاهش همه گیری های مشابه در آینده ارائه می دهد (Andeobu et al., 2022).

در سال های اخیر تحقیقات متعددی مدیریت پسماندهای بهداشتی (بیمارستانی) را بررسی کرده و برای این مسئله مدلسازی ریاضی ارائه کرده اند. تحقیق حاضر براساس مقاله ولی زاده و همکاران (۲۰۲۱) شکل گرفته است و علاوه بر موارد در نظر گرفته شده در مقاله

1. Torkayesh, Ali

2. Zhao

3. Andeobu, Lynda

مذکور، ابعاد سه گانه پایداری، ریسک، مسیریابی و سایل نقلیه، تولید انرژی، استخدام و انتشار گازهای آلاینده نیز در نظر گرفته شده است. در این تحقیق یک مدل ریاضی چندهدفه با پارامترهای فازی برای مسئله تشریح شده، ارائه شده و جهت حل از الگوریتم فراابتکاری دسته میگوها و NSGA-II استفاده شده است. لذا نوآوری تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات پیشین و مقاله ولی زاده و همکاران (۲۰۲۱) در موارد زیر است: یک مدل چندهدفه یکپارچه مکان یابی-مسیریابی برای زنجیره تأمین مدیریت پسماند در شرایط پاندمی ارائه شده است که در آن ابعاد پایداری و به خصوص بعد اقتصادی در نظر گرفته شده است و در نهایت از الگوریتم های فراابتکاری برای حل مدل استفاده شده است.

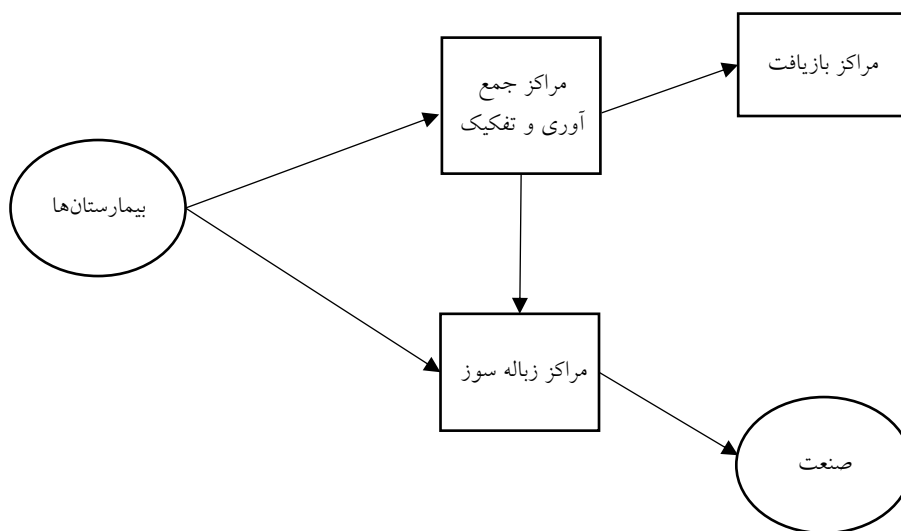
جدول ۱. مرور تحقیقات گذشته

نویسندگان	سال	الگوریتم	چندهدفه	مسیریابی	مکان یابی	ریسک	پایداری	شرایط تصادفی
اوسابا و همکاران	۲۰۱۹	خفاش گسسته	*	*				
جرجین و همکاران	۲۰۱۹	کلونب زنبور عسل			*			
سنتیکایا و همکاران	۲۰۲۰	رگرسیون						
اشتری و همکاران	۲۰۲۰	مقاله مروری						
سیدی مبارکه	۲۰۲۰	ژنتیک	*	*	*			
کارگر و همکاران	۲۰۲۰	برنامه ریزی خطی	*		*	*		
یزدانی	۲۰۲۰	ارزیابی چند معیاره	*	*	*			
یو و همکاران	۲۰۲۰	لجستیک معکوس	*	*	*			
نیک ضمیر و برادران	۲۰۲۰	آبشار چند هدفی	*		*		*	*
لطفی و همکاران	۲۰۲۱	برنامه ریزی تصادفی	*	*	*	*		*
ترکایش و همکاران	۲۰۲۱	چندهدفه	*	*	*		*	
آندیو و همکاران	۲۰۲۲	چندهدفه	*	*	*		*	
مقاله حاضر	۲۰۲۳	دسته میگوها و NSGA2	*	*	*	*	*	*

روش

در مسئله مورد بررسی، برای مدیریت بهتر زباله‌های بیمارستانی، زباله‌ها به دو دسته زباله‌های عفونی و غیر عفونی دسته‌بندی می‌شوند. فرض بر این است که زباله در بیمارستان‌ها و مراکز بهداشتی تفکیک شده و در سطل‌های زباله‌های عفونی و غیر عفونی قرار دارند. زباله‌های پزشکی از بیمارستان‌ها و مراکز بهداشتی گردآوری شده و سپس زباله‌های عفونی به مراکز زباله‌سوز و زباله‌های غیر عفونی به مراکز بازیافت ارسال می‌شوند. زباله‌های عفونی با استفاده از زباله‌سوز به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود و پسماند مگاووات پس از بازیافت به چرخه تولید در صنعت بازگردانده می‌شود. یکی از موارد در نظر گرفته شده در مسئله، ریسک ابتلای افراد به ویروس به دلیل وجود زباله‌ها و حمل و نقل آن‌ها به مراکز مختلف است. در بین زباله‌های غیر عفونی نیز، برخی قابل بازیافت هستند و برخی خیر. لذا پس از جمع‌آوری در مراکز جمع‌آوری تفکیک شده و بر اساس نوع، به مراکز بازیافت یا زباله-سوز ارسال می‌گردند.

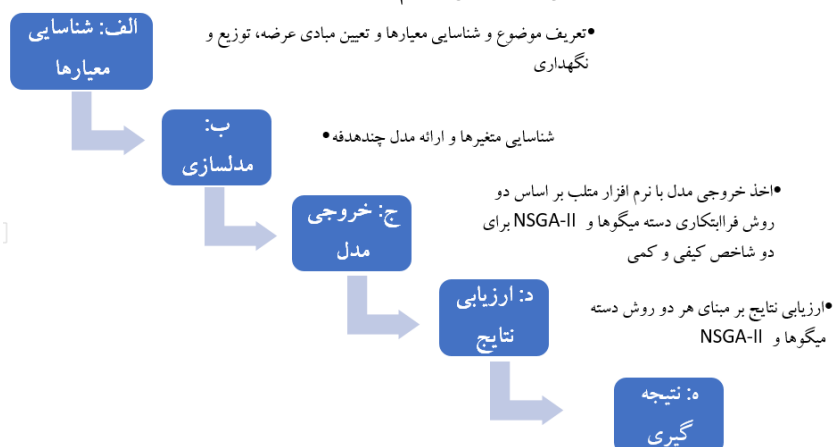
شکل ۱. مدل مفهومی



پس از ارائه مدل مفهومی فوق، مراحل انجام این تحقیق به شرح ذیل در شکل‌های شماره

دو و سه، ارائه می‌گردد:

شکل ۲. مراحل انجام تحقیق



شکل ۳. جزئیات و تشریح مراحل انجام تحقیق



مدلسازی چندهدفه زنجیره تأمین مدیریت پسماندهای بیمارستانی با ...؛ فیروزی و همکاران | ۱۹۳

در این مقاله یک مدل ریاضی چندهدفه جهت یکپارچه‌سازی تصمیمات مکان‌یابی-مسیریابی در زنجیره تأمین مدیریت پسماند بیمارستانی ارائه شده است که مفروضات مدل‌سازی به شرح زیر است:

- جداسازی زباله در مبدأ از ویروسی شدن همه زباله‌ها جلوگیری می‌کند و به کاهش انتشار ویروس از طریق زباله کمک می‌کند. پسماندها پس از تفکیک به دو دسته زباله‌های عفونی خطرناک (غیرقابل بازیافت و تبدیل به انرژی) و زباله‌های غیرخطرناک (قابل بازیافت) تقسیم می‌شوند.

- خطر سرایت ویروس‌ها برای هر نوع زباله (پسماندهای عفونی و غیر عفونی) نسبتاً برابر است.

- جهت حمل و نقل زباله‌ها نیز دو نوع وسیله نقلیه مدنظر است که نوع اول، زباله‌های غیر عفونی و نوع دوم زباله‌های عفونی را حمل می‌کنند.

- تعداد خودروها، افراد جمع‌کننده زباله و ظرفیت زباله سوزها در این مطالعه ثابت در نظر گرفته شده است؛ به عبارت دیگر، ما نمی‌توانیم وسیله نقلیه یا شخص جدیدی را وارد کنیم.

- وسایل نقلیه پس از تکمیل وظیفه خود در هر مرکز به مراکز جمع‌آوری یا بیمارستان‌ها (برحسب نیاز) بازگشته و مجدداً انجام وظیفه می‌کنند. لذا در این تحقیق، مسیریابی وسایل نقلیه نیز مدنظر است.

- ظرفیت وزنی و حجمی وسایل نقلیه محدود در نظر گرفته شده است.

- احداث تسهیلات در هر نقطه، ایجاد اشتغال به همراه دارد.

- برخی از پارامترهای مدل مانند میزان پسماند تولیدشده در بیمارستان‌ها غیرقطعی بوده و از نوع اعداد فازی در نظر گرفته می‌شوند.

- انتشار گازهای آلاینده حاصل از حمل و نقل با استفاده از وسایل نقلیه نیز در این مدل در نظر گرفته می‌شود.

- مدل ریاضی چند هدفه است که اهداف آن بهینه‌سازی ابعاد سه‌گانه پایداری (اقتصادی،

اجتماعی و محیطی) می‌باشد.

- هدف اقتصادی عبارت است از کمینه‌سازی هزینه‌های سیستم شامل هزینه مکان‌یابی، هزینه بازیافت، جمع‌آوری، تفکیک یک زباله‌های غیر عفونی و سوزاندن.
 - هدف محیطی شامل کمینه‌سازی انتشار آلاینده‌ها در سیستم حمل‌ونقل و پردازش در تسهیلات مختلف و همچنین بیشینه‌سازی تولید انرژی الکتریکی.
 - هدف اجتماعی شامل کمینه‌سازی ریسک ابتلا به ویروس‌ها و بیشینه‌سازی میزان اشتغال ایجادشده در مراکز می‌باشد.
- در این بخش به مدل ریاضی برای مسئله تشریح شده پرداخته‌ایم که در این راستا، ابتدا فرست علائم و اختصارات ارائه شده است.

I: اندیس مجموعه بیمارستان‌ها

M: مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز جمع‌آوری و تفکیک $m \in M$

P: مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز بازیافت $p \in P$

N: مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز زباله‌سوزی $n \in N$

S: مجموعه زباله‌ها $s = 1, 2 \in S$ (زباله‌های عفونی و غیر عفونی)

K: وسایل نقلیه حمل زباله‌ها

K': وسایل نقلیه حمل زباله‌های غیر عفونی

T: دوره $t \in T$

(ب) پارامترها:

\tilde{d}_{it}^s : میزان زباله‌های عفونی تولیدشده نوع s توسط بیمارستان i در دوره t

\tilde{f}_m : هزینه فازی احداث مرکز جمع‌آوری و تفکیک در محل m.

\tilde{f}_p : هزینه فازی احداث مرکز بازیافت در محل p.

\tilde{f}_n : هزینه فازی احداث مرکز زباله‌سوزی در محل n.

w_k : وزن وسیله نقلیه k ام.

W_c : وزن گازهای آلاینده منتشر شده در مصرف هر لیتر سوخت.

P_c : قیمت متوسط هر واحد گاز منتشر شده

P_f : قیمت سوخت یک واحد حجم

V_f : حجم مصرف سوخت در واحد فاصله در هر واحد وزن، سرعت و مسافت.

α_k : ضریب تغییر سرعت وسیله نقلیه k ام به ازای هر واحد وزن بیشتر.

V_k : سرعت وسیله نقلیه k ام.

W_s : وزن محصول s .

Vol_s : حجم محصول s .

C_S : هزینه تفکیک یک واحد زباله‌های غیر عفونی.

C_m : هزینه گردآوری یک واحد زباله عفونی و غیر عفونی.

C_p : هزینه بازیافت یک واحد زباله‌های غیر عفونی.

C_n : هزینه سوزاندن یک واحد زباله‌های عفونی یا غیر عفونی.

E : متوسط انرژی تولید شده از سوزاندن یک واحد وزنی زباله‌های عفونی.

$risk$: متوسط ریسک ابتلا به ویروس در اثر مدیریت نکردن یک واحد وزنی زباله‌های بیمارستانی.

θ_m : تعداد نیروی کار استخدام شده در صورت تأسیس مرکز جمع‌آوری و تفکیک در محل m .

θ_p : تعداد نیروی کار استخدام شده در صورت تأسیس مرکز بازیافت در محل p .

θ_n : تعداد نیروی کار استخدام شده در صورت تأسیس مرکز زباله‌سوزی در محل n .

$L_{i1,i2}$: مسافت بین بیمارستان $i1$ و بیمارستان $i2$.

L_m : متوسط مسافت بین بیمارستان‌ها و مرکز جمع‌آوری و تفکیک m .

L_{mp} : مسافت بین مرکز جمع‌آوری و تفکیک m و مرکز بازیافت p .

L_{mn} : مسافت بین مرکز جمع آوری و تفکیک m و مرکز زباله سوزی n .

L_{mi} : مسافت بین مرکز جمع آوری و تفکیک m و بیمارستان i .

QW_k : ظرفیت وزنی وسیله نقلیه k ام.

QV_k : ظرفیت حجمی وسیله نقلیه k ام.

Z_m : اگر مرکز جمع آوری و تفکیک در نقطه m تأسیس شود برابر با ۱ و در غیراین صورت برابر با ۰ است.

Z_p : اگر مرکز بازیافت در نقطه p تأسیس شود برابر با ۱ و در غیراین صورت برابر با ۰ است.

Z_n : اگر مرکز زباله سوزی در نقطه n تأسیس شود برابر با ۱ و در غیراین صورت برابر با ۰ است.

y_{i1i2k}^t : اگر وسیله نقلیه k ام از بیمارستان $i1$ به بیمارستان $i2$ در دوره t برود برابر با ۱ و در غیراین صورت برابر با ۰ است.

y_{ink}^t : اگر وسیله نقلیه k ام از بیمارستان i به مرکز زباله سوزی n در دوره t برود برابر با ۱ و در غیراین صورت برابر با ۰ است.

y_{imk}^t : اگر وسیله نقلیه k ام از بیمارستان i به مرکز جمع آوری و تفکیک m در دوره t برود برابر با ۱ و در غیراین صورت برابر با ۰ است.

y_{mnk}^t : اگر وسیله نقلیه k ام از مرکز ججمع آوریو بازیافت m به مرکز زباله سوزی n در دوره t برود برابر با ۱ و در غیراین صورت برابر با ۰ است.

y_{mpk}^t : اگر وسیله نقلیه k ام از مرکز جمع آوری و تفکیک m به مرکز بازیافت p در دوره t برود برابر با ۱ و در غیراین صورت برابر با ۰ است.

xw_{i1i2k}^{ts} : مقدار زباله s توسط وسیله نقلیه k ام که در دوره t از بیمارستان $i1$ به بیمارستان $i2$ سفر می کند (قبل از رسیدن به بیمارستان $i2$).

x_{ik}^{ts} : مقدار زباله s که توسط وسیله نقلیه k ام از بیمارستان i در دوره t جهت ارسال به مراکز جمع آوری و تفکیک دریافت می شود.

x_{mk}^{ts} : مقدار زباله s که توسط وسیله نقلیه k ام از بیمارستانها به مرکز جمع آوری و

تفکیک m در دوره t ارسال می شود.

x_{ink}^{ts} : مقدار زباله s که توسط وسیله نقلیه k ام از بیمارستانها به مرکز زباله سوزی n در دوره t ارسال می شود.

x_{mnk}^{ts} : مقدار زباله s که توسط وسیله نقلیه k ام از مرکز جمع آوری و تفکیک m به مرکز زباله سوزی n در دوره t ارسال می شود.

x_{mpk}^{ts} : مقدار زباله s که توسط وسیله نقلیه k ام از مرکز جمع آوری و تفکیک m به مرکز بازیافت p در دوره t ارسال می شود.

q_{is}^t : تقاضای پاسخ داده نشده بیمارستان i ام برای زباله s در دوره t .

ساختار مدل ریاضی

در ادامه، توابع هدف و قیود متصور برای مسئله فوق، به تفصیل بیان شده اند.

$$\begin{aligned} \min z1 = & \sum_{m=1}^M \tilde{f}_m z_m + \sum_{p=1}^P \tilde{f}_p z_p + \sum_{n=1}^N \tilde{f}_n z_n + CS \times \sum_t \sum_m \sum_{k \in K'} x_{mk}^{t2} \\ & + \sum_t \sum_m \sum_{k \in K'} \sum_p C_p x_{mpk}^{t2} + \sum_t \sum_i \sum_{k \in K} \sum_n C_n x_{ink}^{t1} \\ & + \sum_t \sum_m \sum_{k \in K'} \sum_n C_n x_{mnk}^{t2} + \left(\sum_{k=1}^K (v_f * \alpha_k * v_k \right. \\ & * \left(\sum_{t=1}^T \sum_m (x_{mk}^{t2} * L_m) \times w_2 + \sum_{t=1}^T \left(\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I x_{ink}^{t1} * L_{ni} * w_1 \right. \right. \\ & \left. \left. + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{mnk}^{t2} * L_{mn} + \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P x_{mpk}^{ts} * L_{mp} * w_2 \right) + w_k \right) \\ & * (p_f + w_c) \\ & * p_c \end{aligned} \quad (1)$$

عبارت (۲) نشان دهنده تابع هدف اول است که عبارت است از کمینه سازی هزینه های

احداث تسهیلات و پردازش زباله‌ها در مراکز و هزینه‌های سوخت و وسایل نقلیه و هزینه‌های زیست‌محیطی حاصل از انتشار گازهای آلاینده.

$$\begin{aligned} \text{Max } z2 = & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{K_t} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I E * x_{ink}^{t1} \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N E * x_{mnk}^{t2} \end{aligned} \quad (2)$$

عبارت (۳) نشان‌دهنده تابع هدف دوم بوده و عبارت است از بیشینه‌سازی انرژی تولیدشده حاصل از سوزاندن زباله‌ها.

$$\text{min } z3 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^2 \text{risk} * q_{is}^t \quad (3)$$

عبارت (۴) نشان‌دهنده تابع هدف سوم مدل است که عبارت است از کمینه‌سازی ریسک ابتلا به ویروس عدم مدیریت زباله‌ها (زباله‌هایی که در هر دوره گردآوری و مدیریت نشده‌اند).

$$\begin{aligned} \text{Max } z4 = & \sum_{m=1}^M \theta_m z_m + \sum_{p=1}^P \theta_p z_p \\ & + \sum_{n=1}^N \theta_n z_n \end{aligned} \quad (4)$$

عبارت (۵) نشان‌دهنده تابع هدف چهارم مدل است که عبارتست از بیشینه‌سازی میزان استخدام نیروی کار در مراکز تأسیس شده.

$$\sum_m \sum_k y_{imk}^t \geq 1 \quad \forall i, t \quad (5)$$

محدودیت (۶) تضمین می‌کند که کلیه بیمارستان‌ها در همه دوره‌ها حداقل توسط یک

وسیله نقلیه ملاقات شوند.

$$\sum_k \sum_i y_{imk}^t = \sum_k \left(\sum_p y_{mpk}^t + \sum_n y_{mnk}^t \right) \quad \forall m, t \quad (6)$$

محدودیت (۷) نشان می‌دهند که وسایل نقلیه وارد شده به مراکز جمع‌آوری و تفکیک، حتماً از این مراکز خارج می‌شوند.

$$\sum_k x_{ik}^{ts} + q_{is}^t = \bar{d}_{is}^t \quad \forall i, t, s \quad (7)$$

محدودیت (۸) میزان تقاضای پاسخ داده نشده یا زباله گردآوری نشده بیمارستان i ام برای زباله s در دوره t را محاسبه می‌کند.

$$\sum_k x_{mk}^{ts} = \sum_k \left(\sum_p x_{mpk}^{ts} + \sum_n x_{mnk}^{ts} \right) \quad \forall m, t, s \quad (8)$$

محدودیت (۹)، تعادل جریان زباله را در ندها تضمین می‌کنند.

$$x_{i1i2k}^{ts} \leq M \times y_{i1i2k}^t \quad \forall i1, i2, k, t, s \quad (9)$$

$$x_{ik}^{ts} \leq M \times y_{imk}^t \quad \forall l, m, k, t, s \quad (10)$$

$$x_{mpk}^{ts} \leq M \times y_{mpk}^t \quad \forall p, m, k, t, s \quad (11)$$

$$x_{mnk}^{ts} \leq M \times y_{mnk}^t \quad \forall n, m, k, t, s \quad (12)$$

$$x_{ink}^{ts} \leq M \times y_{ink}^t \quad \forall i, m, k, t, s \quad (13)$$

محدودیت‌های (۱۰) تا (۱۴) تضمین می‌کنند که در صورتی از یک مرکز به مرکز دیگری زباله توسط یک وسیله نقلیه فرستاده می‌شود که بین آن دو توسط آن وسیله نقلیه سفر صورت گرفته باشد.

$$\sum_{i1 \in I} \sum_{i2 \in I} y_{i1i2k}^t \leq |N| - 1 \quad \forall N \in I: |N| \geq 2 \quad \forall k, t \quad (14)$$

محدودیت (۱۳) از ایجاد زیر تور در هنگام سفر وسایل نقلیه بین بیمارستان‌ها جلوگیری می‌کند.

$$\sum_s (x_{mpk}^{ts} \times w_s) \leq QW_k \quad \forall m, p, k, t \quad (15)$$

$$\sum_s (x_{mpk}^{ts} \times vol_s) \leq QV_k \quad \forall m, p, k, t \quad (16)$$

$$\sum_s (x_{mnk}^{ts} \times w_s) \leq QW_k \quad \forall m, n, k, t \quad (17)$$

$$\sum_s (x_{mnk}^{ts} \times vol_s) \leq QV_k \quad \forall m, n, k, t \quad (18)$$

$$\sum_s (x_{ink}^{ts} \times w_s) \leq QW_k \quad \forall m, i, k, t \quad (19)$$

$$\sum_s (x_{ink}^{ts} \times vol_s) \leq QV_k \quad \forall m, i, k, t \quad (20)$$

مدلسازی چندهدفه زنجیره تأمین مدیریت پسماندهای بیمارستانی با ...؛ فیروزی و همکاران | ۲۰۱

$$\sum_s \left(\sum_i ((xw_{i,i1k}^{ts} \times y_{i,i1k}^t) + x_{i1,k}^{ts}) \times w_s \right) \leq QW_k \quad \forall i, k, t \quad (21)$$

$$\sum_s \left(\sum_i ((xw_{i,i1k}^{ts} \times y_{i,i1k}^t) + x_{i1,k}^{ts}) \times vol_s \right) \leq QV_k \quad \forall i, k, t \quad (22)$$

$$\sum_s (x_{mk}^{ts} \times w_s) \leq QW_k \quad \forall m, k, t \quad (23)$$

$$\sum_s (x_{mk}^{ts} \times vol_s) \leq QV_k \quad \forall m, k, t \quad (24)$$

محدودیت‌های (۱۴) تا (۲۳) تضمین می‌کنند که زباله حمل شده توسط وسیله نقلیه k از ظرفیت وزنی و حجمی آن تجاوز نکند.

$$\sum_m z_m \geq 1 \quad \forall m \quad (25)$$

$$\sum_p z_p \geq 1 \quad \forall p \quad (26)$$

$$\sum_n z_n \geq 1 \quad \forall n \quad (27)$$

محدودیت‌های (۲۴)، (۲۵) و (۲۶) تضمین می‌کنند که حداقل یک مرکز برای تسهیلات جمع‌آوری، زباله‌سوز و بازیافت تأسیس گردد. در مدل توسعه‌ای بخش قبل هزینه‌های احداث تسهیلات و پارامتر تقاضا، فازی در نظر گرفته شده است که در این مقاله این

پارامتر، فازی مثلثی است. روش های متعددی برای حل مسائل برنامه ریزی ریاضی فازی پیشنهاد شده است. در این تحقیق از روش رتبه بندی ارائه شده توسط خیمنز (۲۰۰۷) استفاده شده است. خیمنز یک روش رتبه بندی اعداد فازی بر مبنای مقایسه بازه‌ی انتظار آنها پیشنهاد داد. حال با توجه به روش خیمنز، مدل برنامه ریزی فازی ارائه شده را به مدل قطعی نظیرش تبدیل می کنیم:

شکل قطعی تابع هدف اول:

$$\begin{aligned} \min z1 = & \sum_{m=1}^M \frac{f_m^1 + 2f_m^2 + f_m^3}{2} z_m + \sum_{p=1}^P \frac{f_p^1 + 2f_p^2 + f_p^3}{2} z_p + \sum_{n=1}^N \frac{f_n^1 + 2f_n^2 + f_n^3}{2} z_n + CS \\ & \times \sum_t \sum_m \sum_{k \in K'} x_{mk}^{t2} + \sum_t \sum_m \sum_{k \in K'} \sum_p C_p x_{mpk}^{t2} + \sum_t \sum_i \sum_{k \in K} \sum_n C_n x_{ink}^{t1} \\ & + \sum_t \sum_m \sum_{k \in K'} \sum_n C_n x_{mnk}^{t2} + \left(\sum_{k=1}^K (v_f * \alpha_k * v_k * \left(\sum_{t=1}^T \sum_m (x_{mk}^{t2} * L_m) \right) \times w_2 \right. \\ & \left. + \sum_{t=1}^T \left(\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I x_{ink}^{t1} * L_{ni} * w_1 + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{mnk}^{t2} * L_{mn} + \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P x_{mpk}^{ts} * L_{mp} \right. \right. \\ & \left. \left. * w_2 \right) + w_k \right) * (p_f + w_c \\ & * p_c) \end{aligned} \quad (28)$$

تبدیل محدودیت (۷):

$$\begin{aligned} \sum_k x_{ik}^{ts} + q_{is}^t = (1 - \alpha) \frac{d_{is}^{t,1} + d_{is}^{t,2}}{2} \\ + \alpha \frac{d_{is}^{t,2} + d_{is}^{t,3}}{2} \quad \forall i, t, s \end{aligned} \quad (29)$$

یافته ها

در تحقیق حاضر ابتدا یک مدل ریاضی سه هدفه ارائه شد که جهت حل مدل از الگوریتم بهینه سازی دسته میگوها استفاده گردیده است. با مقایسه الگوریتم فراابتکاری دسته

میگوهای پیشنهادی با الگوریتم شناخته شده NSGA-II، عملکرد آن به طور علمی و عملی برای مسئله مورد بررسی، ارزیابی گردیده است.

الگوریتم گروه میگوها^۱ که به اختصار KHA نامیده می شود و در سال (۲۰۱۲) توسط گندمی و علوی ارائه شد جزو دسته الگوریتم های هوش ازدحامی دسته بندی شده و حرکت دسته جمعی میگوها برای یافتن غذا را بررسی می کند و بر پایه واکنش به نیاز زیستی و عملیات محیطی گله میگوها شبیه سازی می شود. تابع برازندگی هر میگو منحصر به فرد است و به صورت فاصله میگو از غذا و جمعیت میگوها در نظر گرفته می شود. انواع حرکت های میگو شامل جنبش ناشی از حرکت گله میگوها (حرکت سایر میگوها)، حرکت برای یافتن غذا و حرکت تصادفی است.

$$\begin{aligned} x_i^{t+1} &= N_i^t + F_i^t \\ &+ D_i^t \end{aligned} \quad (30)$$

بنابراین، الگوریتم در هر مرحله باید موقعیت جدید هر میگو را پیدا کند که این موقعیت به سه حرکت میگو که در بالا اشاره شد، بستگی دارد. در حرکت اول، میگوها علاقه مند به حفظ تراکم بالا دارند، پس حرکاتی ناشی از اثرات متقابل خودشان دارند که شامل جهت حرکت ناشی از تخمینی از تراکم محلی ذرات (اثر محلی)، هدف تراکم ذرات (اثر هدف) و تراکم ذرات دفع کننده (اثر دافعه) است.

$$n_i^{new} = n_i^{max} \alpha_i + w_n n_i^{old} \quad (31)$$

که در رابطه بالا،

$$\alpha_i = \alpha_i^{local} + \alpha_i^{target} \quad (32)$$

و n_i^{max} بزرگ ترین سرعت تحریک

w_n : وزن اینرسی ناشی از حرکت در محدوده ۰ و ۱

n_i^{old} حرکت قبلی

α_i^{local} : اثر محلی توسط همسایه‌ها

α_i^{target} : اثر جهت هدف توسط بهترین میگو

α_i : مجموع اثرات همسایه و هدف

همچنین داریم:

$$\alpha_i^{local} = \sum_k k_{ij} x_{ij} \quad (33)$$

در رابطه بالا، k_{ij} اختلاف بین برازندگی دو میگو i و j و x_{ij} فاصله بین آن‌ها را نشان می‌دهد. اثر یک همسایه می‌تواند مثبت یا منفی باشد (دافعه یا جاذبه).

همسایه: به تعدادی از میگوهای نزدیک همسایه می‌گویند.

سنجش فاصله برای هر میگو با استفاده از روش‌های اکتشافی:

$$d_{si} = \frac{1}{5N} \sum_j |x_j - x_i| \quad (34)$$

اگر فاصله دو میگو کمتر از فاصله سنجش تعریف شده باشد، آن دو میگو همسایه‌اند. همچنین اثر هدف به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\alpha_i^{target} = c^{best} k_i^{best} x_i^{best} \quad (35)$$

c^{best} : ضریب اثرگذاری میگوها با بهترین برازندگی به i امین میگو. از آنجایی که اثر هدف، راه‌حل را به بهینه سراسری هدایت می‌کند، پس مؤثرتر از اثر همسایه‌ها و دیگر میگوهاست.

$$c^{best} = 2 \left(rand + \frac{I}{I_{max}} \right), rand \in [0,1] \quad (36)$$

در رابطه بالا، I شماره تکرار جاری الگوریتم و I_{max} حداکثر تعداد تکرار الگوریتم می‌باشد. حرکت برای جستجوی غذا در قالب ۲ پارامتر اصلی و مؤثر مکان غذا و تجربه قبلی

محل غذا فرموله می‌شود: این حرکت برای میگوی i ام به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_i = V_F \beta_i + W_F F_i^{old} \quad (37)$$

مدلسازی چندهدفه زنجیره تأمین مدیریت پسماندهای بیمارستانی با ...؛ فیروزی و همکاران | ۲۰۵

$$\beta_i = \beta_i^{best} + \beta_i^{food} \quad (38)$$

V_F : سرعت جستجوی غذا (۰/۰۲ متر بر ثانیه)

W_F : وزن اینرسی برای حرکت جستجوی غذا بین ۰ و ۱

β_i^{food} : غذای جذاب

β_i^{best} : بهترین غذای یافت شده تاکنون توسط میگوی i ام.

اثر مواد غذایی در رابطه با محل آن معین می شود.

$$x^{food} = \frac{\sum_i \frac{1}{k_i} x_i}{\sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (39)$$

بنابراین، جذب مواد غذایی برای میگوی i ام به شرح زیر است:

$$\beta_i^{food} = c^{food} \times k_{i,food} \times x_{i,food} \quad (40)$$

که در آن c^{food} ضریب غذا بوده و مطابق رابطه زیر محاسبه میشود:

$$c^{food} = 2 \left(1 - \frac{I}{I_{max}} \right) \quad (41)$$

جاذبه غذایی برای جاذبه بالقوه ازدحام میگوها برای بهینه سراسری تعریف می شود.

براساس این شناخت افراد میگو بعد از چند مرحله تکرار به طور معمول در اطراف بهینه

سراسری تجمع میگوها شکل می گیرد. اثر بهترین برازندگی برای میگوی i ام به شرح زیر

است:

$$\beta_i^{best} = k_{i,best} \times x_{i,best} \quad (42)$$

که $k_{i,best}$ بهترین موقعیت بازدید توسط میگوی i ام است.

انتشار فیزیکی افراد میگو، پردازش تصادفی در نظر گرفته می شود.

$$D_i = D^{max} \times \delta \quad (43)$$

D^{max} : بالاترین سرعت

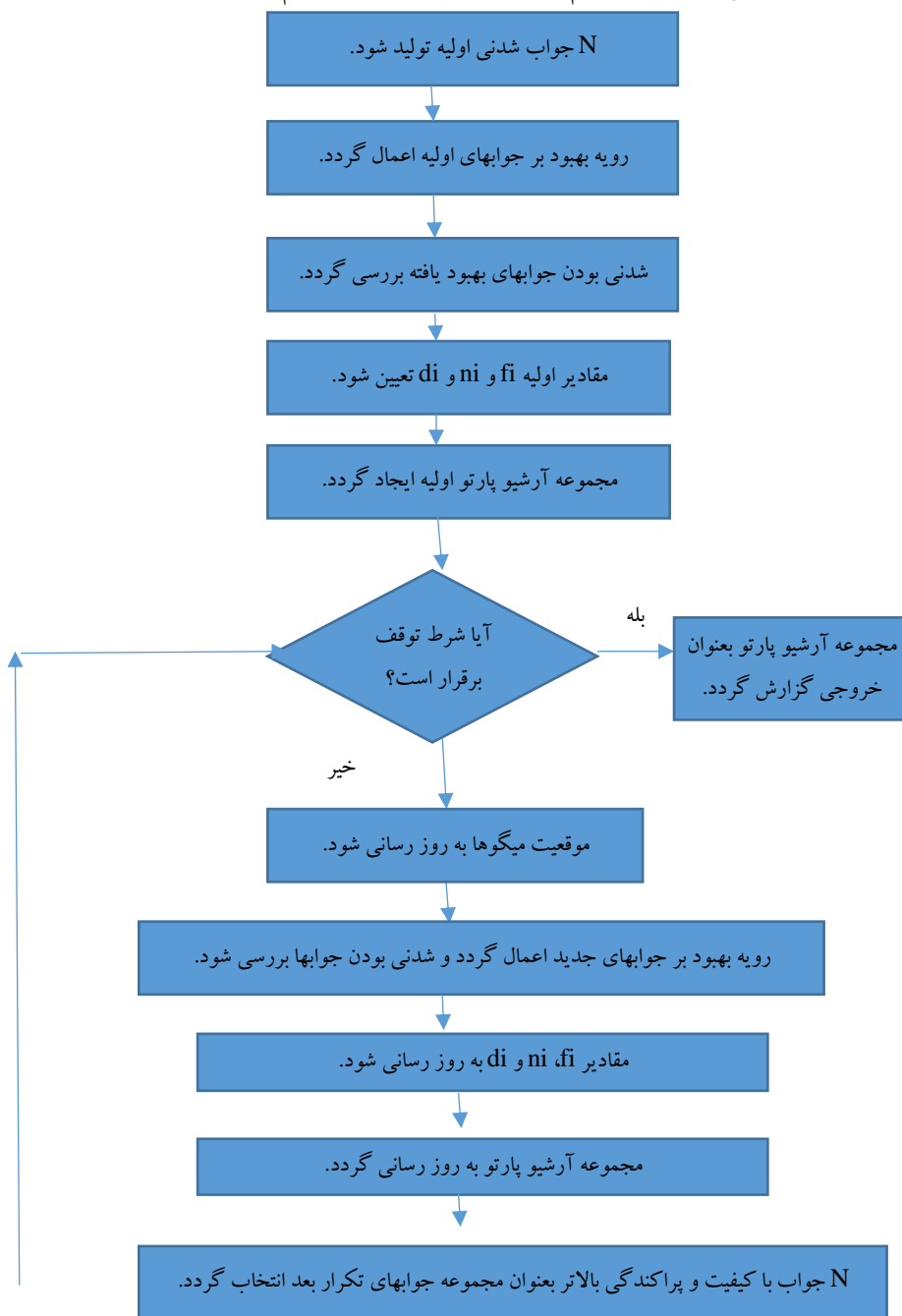
δ : بردار مستقیم تصادفی که ماتریسی با مقادیر تصادفی بین -۱ و ۱

اثرات حرکت ناشی از سایر میگوها و حرکت برای به دست آوردن غذا به تدریج با افزایش زمان کاهش می‌یابد. انتشار فیزیکی یک بردار تصادفی است که با افزایش تعداد تکرار (زمان)، کاهش نمی‌یابد.

$$D_i = D^{max} \times \left(1 - \frac{I}{I_{max}}\right) \times \delta \quad (44)$$

در این تحقیق جهت حل مدل پیشنهادی، الگوریتم دسته میگوها بر پایه آرشیو پارتو جهت حل مدل چند هدفه طراحی شده است که فلوچارت آن در شکل ۴ آمده است.

شکل ۴. فلوچارت گام‌های ساختار پیشنهادی الگوریتم دسته میگوها



در این مقاله برای نمایش هر جواب از ماتریس استفاده می‌شود. هر جواب شامل چندین ماتریس است که این ماتریس‌ها مطابق با خروجی‌های مدل طراحی می‌شوند. به‌عنوان مثال برای متغیرهای Z_p ، Z_n و Z_m از ماتریس سطری (یک‌بعدی) که تعداد درایه‌های آن برای سه متغیر مذکور به ترتیب برابر با تعداد M ، N و P (تعداد نقاط بالقوه مکان‌یابی) است تعریف می‌شود. جهت نمایش متغیر $link^t$ از یک ماتریس ۴ بعدی استفاده شده است که ابعاد آن به صورت $I^*N^*K^*T$ است. برای سایر متغیرها نیز به همین صورت بر اساس اندیس‌های آن‌ها ماتریس در نظر گرفته شده است.

همچنین، ۳ عملگر به صورت عملگر جستجوی همسایگی موازی استفاده شده‌اند. در هر کدام از توابع جستجوی همسایگی، یک جواب به‌عنوان جواب اولیه به تابع مربوطه ارسال شده و در قدم ۱، عملگر مربوطه بر روی جواب اعمال می‌شود و همسایگی جواب به دست می‌آید. پس از تولید کلیه جواب‌های همسایگی، با توجه به قاعده دب، جواب با کیفیت بالاتر و پراکندگی بالاتر، انتخاب گردیده و در صورت تکراری نبودن به جمعیت جواب‌های اولیه اضافه می‌شود. در ادامه، ابتدا عملگرهای جستجوی جواب و سپس، ترکیب موازی آن‌ها به‌عنوان رویه جستجوی همسایگی موازی شرح داده شده است.

شرح ۳ عملگر جستجوی جواب به صورت ذیل است:

عملگر ۱: دو اندیس $m1$ و $m2$ به تصادف در بازه یکنواخت $[1..M]$ (P تعداد بالقوه مراکز جمع‌آوری و تفکیک) تولید شده و در ماتریس جواب متغیر Z_m ، مقادیر $m1$ و $m2$ با یکدیگر تعویض می‌شوند. سپس با توجه به تغییر مراکز جمع‌آوری و تفکیک برپاشده، سایر متغیرها اصلاح می‌شوند.

عملگر ۲: دو اندیس $p1$ و $p2$ به تصادف در بازه یکنواخت $[1..P]$ (P تعداد بالقوه مراکز بازیافت) تولید شده و در ماتریس جواب متغیر Z_p ، مقادیر خانه‌های $p1$ و $p2$ با یکدیگر تعویض می‌شوند. سپس با توجه به تغییر مراکز بازیافت برپاشده، سایر متغیرها اصلاح می‌شوند.

عملگر ۳: دو اندیس $n1$ و $n2$ به تصادف در بازه یکنواخت $[1..N]$ (N تعداد بالقوه

مراکز زباله‌سوزی) تولیدشده و در ماتریس جواب متغیر z_n ، مقادیر خانه‌های n_1 و n_2 با یکدیگر تعویض می‌شوند. سپس با توجه به تغییر مراکز زباله‌سوزی برپا شده، سایر متغیرها اصلاح می‌شوند.

در عملگر ۳ همسایگی شرح داده‌شده، بر روی تولیدشده در تکرار، به‌طور موازی اعمال می‌شوند. برای هر جواب، چندین جواب همسایه که در همسایگی آن جواب، بهینه محلی هستند، گزارش می‌شود. جواب‌های گزارش‌شده، با توجه به قاعده دب جواب با کیفیت بالاتر و پراکندگی بالاتر انتخاب‌شده و همان‌طور که قبلاً شرح داده شد، در صورت تکراری نبودن به جمعیت جواب اضافه می‌گردد.

فرض کنید که تعداد جواب‌های موجود در هر تکرار الگوریتم دسته می‌گواها با N نمایش داده می‌شود، این مقدار در طی فرایند بهینه‌سازی ثابت است. برای تولید N جواب شدنی اولیه مطلوب، الگوریتم جستجوی همسایگی موازی طراحی شده باید N جواب شدنی غیرتکراری را تولید نماید. این الگوریتم، از یک جواب شدنی از پیش تعیین شده به‌عنوان جواب آغازین استفاده می‌کند. روش پیشنهادی در ابتدا، جواب موجود را به‌عنوان ورودی به ساختار جستجوی همسایگی موازی داده و یک جواب را به‌عنوان خروجی انتخاب و در صورت تکراری نبودن به جمعیت جواب‌ها اضافه می‌کند. این فرایند تا دستیابی الگوریتم به شرط خاتمه ادامه پیدا می‌کند. ساختار کامل روش جستجوی همسایگی موازی به‌صورت زیر است:

۰- شمارنده^۱ را مساوی صفر قرار بده.

- ۱- جواب ورودی (s) را به عملگر همسایگی اول بده و خروجی را s_1 نام‌گذاری کن.
- ۲- جواب ورودی (s) را به عملگر همسایگی دوم بده و خروجی را s_2 نام‌گذاری کن.
- ۳- جواب ورودی (s) را به عملگر همسایگی سوم بده و خروجی را s_3 نام‌گذاری کن.
- ۴- از بین جواب‌های s ، s_1 ، s_2 و s_3 با استفاده از قاعده دب، جواب با کیفیت بالاتر و پراکندگی بالاتر را انتخاب کن.
- ۵- جواب انتخاب‌شده را s نام‌گذاری کن.

۶- به شمارنده یک واحد اضافه کن.

۷- در صورتی که مقدار شمارنده از بیشترین حد مجاز تجاوز نکرده به قدم ۱ برو و در غیر این صورت به قدم ۸ برو.

۸- پایان.

پیاپی سازی رویه بهبود در این تحقیق بر پایه جستجوی همسایگی متغیر^۱ (VNS) است. ساختار VNS از ۳ ساختار جستجوی همسایگی^۲ (NSS) استفاده می کند. این ساختارها در قالب VNS استفاده شده و ساختار کلی آن به صورت زیر است

(Tavakkoli-Moghaddam et al., 2011)

{For each input solution

K=1

While stopping criterion is meet do

New solution=Apply NSS type k

If new solution is better then

K=1

Else

K=k+1

If k=4 then

K=1

Endif

Endif

Endwhile

}

هر کدام از جواب های موجود در جمعیت جواب به الگوریتم VNS داده شده و یک جواب

به عنوان خروجی دریافت خواهد شد. سپس رویه اصلاحی بر روی مابقی ماتریس های

جواب اعمال شده و به صورت شدنی اصلاح و جایگزین جواب ورودی خواهد شد. در واقع

ساختار کلی رویه بهبود به صورت زیر خواهد بود:

Improvement method

{For each si in input population

Si=apply VNS procedure on si.

Si=check feasibility method.

}

1. variable neighborhood search
2. neighborhood search structure

همان‌طور که قبلاً گفته شد، روش حل استفاده‌شده در این مقاله بر پایه آرشیو پارتو است. در الگوریتم پیشنهادی یک مجموعه به نام آرشیو پارتو در نظر گرفته شده است که جواب‌های غیر مغلوب^۱ را که توسط الگوریتم تولید می‌شوند را در خود نگه می‌دارد. این مجموعه در هر تکرار الگوریتم به‌روزرسانی خواهد شد. نحوه به‌روزرسانی به این صورت است که جواب‌های تولیدشده در آن تکرار و جواب‌های موجود در آرشیو پارتو در یک استخر جواب ریخته شده و با هم سطح‌بندی می‌شوند، سپس از بین این جواب‌ها، جواب‌های موجود در سطح اول یا همان جواب‌های غیر مغلوب انتخاب شده و به‌عنوان آرشیو پارتو جدید در نظر گرفته می‌شوند.

در هر تکرار، الگوریتم به جمعیتی از جواب‌ها نیاز دارد. در این مقاله برای انتخاب جمعیت تکرار بعد، جواب‌های موجود در جمعیت آن تکرار و جواب‌های جدید تولیدشده توسط الگوریتم با هم در یک استخر جواب ریخته شده و پس از سطح‌بندی و محاسبه معیار ازدحام^۲ برای هر جواب با توجه به سطح آن جواب، با استفاده از قاعده دب (۲۰۰۲) N جواب که دارای بالاترین کیفیت و بالاترین پراکندگی هستند، به‌عنوان جمعیت تکرار بعد الگوریتم انتخاب می‌شوند.

در این مقاله، ساختار دو الگوریتم بهینه‌سازی دسته میگوها و NSGA-II در محیط نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی گردیده و مدل حل شده است. در ادامه تحقیق به شرح نتایج محاسباتی پرداخته شده است.

برای ارزیابی کیفیت و پراکندگی الگوریتم‌های فراابتکاری چند هدفه، شاخص‌های متعدد و متنوعی وجود دارند. در این رساله، برای انجام مقایسه، سه شاخص که در ادامه شرح داده می‌شوند، مورد توجه قرار خواهد گرفت (Tavakkoli-Moghaddam et al., 2011).

شاخص کیفیت- این شاخص به مقایسه کیفیت جواب‌های پارتوی به‌دست‌آمده توسط هر روش می‌پردازد. در واقع همه جواب‌های پارتوی به‌دست‌آمده توسط هر روش

1. non-dominated
2. crowding distance

را باهم سطح‌بندی کرده و مشخص می‌کند که چند درصد جواب‌های سطح یک متعلق به هر روش می‌باشد. هر چه این درصد بالاتر باشد، الگوریتم، از کیفیت بالاتری برخوردار است.

شاخص یکنواختی: این معیار، یکنواختی توزیع جواب‌های پارتوی به دست آمده را در مرز جواب‌ها مورد آزمایش قرار می‌دهد. این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} |d_{mean} - d_i|}{(N-1) \times d_{mean}} \quad (45)$$

در رابطه فوق، d_i نشان‌دهنده فاصله اقلیدسی بین دو جواب غیر مغلوب یافت شده مجاور بوده و d_{mean} معرف میانگین مقادیر d_i می‌باشد.

شاخص پراکندگی: این شاخص برای تعیین میزان جواب‌های غیر مغلوب یافت شده بر روی مرز بهینه استفاده می‌گردد. تعریف شاخص پراکندگی به صورت زیر است:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N \max(\|x_t^i - y_t^i\|)} \quad (46)$$

در رابطه فوق، $\|x_t^i - y_t^i\|$ نشان‌دهنده فاصله اقلیدسی بین دو جواب مجاور x_t^i و y_t^i بر روی مرز بهینه است.

جهت حل مدل و ارزیابی کارایی دو الگوریتم، چندین مسئله نمونه طراحی شده که این مسائل بر اساس داده‌های موجود در شهر تهران در دوره همه‌گیری کووید ۱۹ در سال ۱۳۹۹، حل گردیده‌اند. برای طراحی مسائل نمونه، به تعداد بیمارستان‌ها در مناطق مختلف تهران و همچنین نقاط بالقوه گردآوری، بازیافت و زیباله‌سوزی در این شهر توجه شده است. داده‌های لازم جهت حل مدل نیز از پایگاه داده‌های مدیریت پسماندها بیمارستانی در شهر تهران در سال ۱۳۹۹ استخراج شده است.

جدول ۲. مسائل نمونه

شماره مسئله	تعداد بیمارستان	تعداد نقاط بالقوه مراکز جمع آوری	تعداد نقاط بالقوه مراکز بازیافت	تعداد نقاط بالقوه مراکز زباله سوزی	تعداد وسایل نقلیه جهت حمل های عفونی	تعداد وسایل نقلیه جهت حمل زباله های غیر عفونی	تعداد دوره (ماه)
۱	۱۰	۳	۳	۳	۵	۵	۱۲
۲	۱۰	۴	۳	۳	۱۰	۱۰	۱۲
۳	۱۰	۵	۳	۳	۵	۵	۱۲
۴	۱۵	۳	۳	۳	۱۰	۱۰	۱۲
۵	۱۵	۴	۳	۳	۵	۵	۱۲
۶	۱۵	۵	۳	۳	۱۰	۱۰	۱۲
۷	۲۰	۳	۳	۳	۱۰	۱۰	۱۲
۸	۲۰	۴	۳	۳	۱۵	۱۵	۱۲
۹	۲۰	۵	۳	۳	۱۰	۱۰	۱۲
۱۰	۲۰	۶	۳	۳	۱۵	۱۵	۱۲

در این مقاله جهت اجرای مقایسه کیفی الگوریتم های دسته میگوها و NSGA-II، پارامترهای الگوریتم به شرح زیر در نظر گرفته شده اند:

- اندازه جمعیت جواب برای هر دو الگوریتم برابر با ۳۰۰ در نظر گرفته شده است.
- شرط توقف الگوریتم های حل، تعداد تکرار بوده که برای هر دو الگوریتم برابر با ۵۰۰ در نظر گرفته شده است.
- نرخ عملگرهای جهش و تقاطع در الگوریتم NSGA-II به ترتیب ۰/۲ و ۰/۸ تنظیم گردیده است.

در تنظیم پارامترهای مدل از داده های موجود در سیستم مدیریت پسماندهای بیمارستانی شهر تهران در دوره کووید ۱۹ طی سال ۱۳۹۹ استفاده شد. همان طور که در مدل ریاضی مشاهده شد، برخی پارامترهای مدل از نوع اعداد فازی مثلثی هستند. جهت تولید اعداد مثلثی مربوط به هر کدام از پارامترهای فازی $(m1, m2, m3)$ ، ابتدا $m2$ تولید شده و سپس عدد تصادفی r در بازه $(0,1)$ تولید شده و $m1$ با استفاده از رابطه

پارامترهای فازی $m_2*(1-r)$ و m_3 با استفاده از رابطه $m_2*(1+r)$ تولید خواهند شد. جهت مقداردهی تعیین شده و دو مقدار m_1 و m_3 با استفاده از برنامه MATLAB تعیین می‌شوند. به همین دلیل در بخش تنظیم این پارامترها فقط به ذکر مقدار m_2 اکتفا می‌کنیم. در تولید مسائل نمونه مقادیر زیر در نظر گرفته شده است.

- در هر دوره میزان تقاضای بیمارستان‌ها جهت گردآوری پسماندها به صورت عدد فازی مثلثی $(m_1, 100000, m_3)$ لحاظ گردیده است (۱۰۰۰۰۰ کیلوگرم).
- هزینه تأسیس مراکز زباله‌سوزی برابر با عدد فازی $(m_1, 500, m_3)$ ، هزینه تأسیس جمع‌آوری برابر با عدد فازی $(m_1, 100, m_3)$ و مراکز بازیافت به صورت عدد فازی مثلثی $(m_1, 1500, m_3)$ در نظر گرفته شده‌اند.
- فواصل بین تسهیلات به‌طور تصادفی در بازه یکنواخت $[1..50]$ تولید شده‌اند (۵۰ کیلومتر).

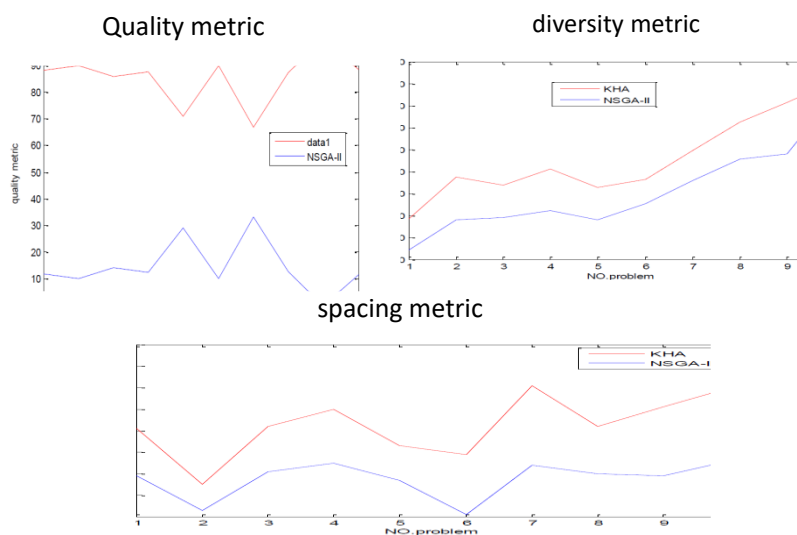
- مقدار برش برای رتبه‌بندی اعداد فازی برابر با ۰٫۸ در نظر گرفته شده است.
- مسائل نمونه موجود در جدول (۲) توسط دو الگوریتم دسته میگوها و NSGA-II حل و نتایج دو الگوریتم بر اساس شاخص‌های مقایسه‌ای کیفیت، پراکندگی و یکنواختی با یکدیگر مقایسه شده‌اند (جدول ۳).

جدول ۳. نتایج الگوریتم‌های حل مدل

Problem	Multi-objective KHA			NSGA-II		
	Quality metric	Spacing metric	Diversity metric	Quality metric	Spacing metric	Diversity metric
1	88.1	1.01	1930.2	11.9	0.79	1218.4
2	90	0.75	2871.6	10	0.63	1901.6
3	85.9	1.02	2685.3	14.1	0.81	1954.2
4	87.6	1.1	3063.5	12.4	0.85	2112.5
5	70.9	0.93	2636.3	29.1	0.77	1901.9
6	89.9	0.89	2816.5	10.1	0.61	2265.1
7	66.8	1.21	3486.3	33.2	0.84	2793.6
8	87.2	1.02	4121.9	12.8	0.80	3278.6
9	100	1.11	4565.9	0	0.79	3397.7
10	88.4	1.2	5054.1	11.6	0.86	4758.7

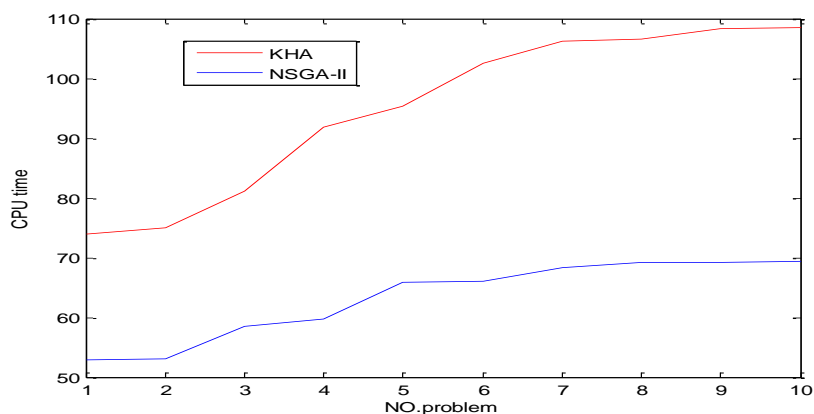
جدول (۳) مقایسه نتایج حاصل از دو الگوریتم را بر اساس شاخص‌های مقایسه‌ای کیفیت، پراکندگی و یکنواختی را نشان می‌دهد. در این جدول مشاهده می‌شود که برای همه مسائل نمونه، مقدار شاخص‌های کیفیت و پراکندگی به دست آمده برای الگوریتم دسته میگوها چندهدفه از مقادیر نظیر محاسبه شده برای الگوریتم NSGA-II بزرگ‌تر بوده که این نشان‌دهنده توانایی و قدرت بالای الگوریتم دسته میگوها چندهدفه نسبت به الگوریتم ژنتیک چندهدفه در دستیابی به جواب نزدیک بهینه و همچنین توانایی بالاتر برای اکتشاف و استخراج ناحیه شدنی جواب است. همچنین مقدار شاخص یکنواختی نشان می‌دهد که در بیشتر موارد، الگوریتم NSGA-II، ناحیه جواب را با یکنواختی بیشتری جستجو می‌کند.

شکل ۵. مقایسه نتایج الگوریتم‌ها با استفاده از شاخص‌های مقایسه‌ای



شکل (۵) مقایسه نتایج دو الگوریتم دسته میگوها و NSGA-II را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار نیز مشاهده می‌شود، عملکرد الگوریتم دسته میگوها چندهدفه در حل مدل مقاله حاضر، از منظر سه شاخص کیفیت، پراکندگی و یکنواختی، بهتر از الگوریتم NSGA-II است.

شکل ۶. مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌های حل



همچنین مقادیر زمان اجرای الگوریتم‌ها در شکل (۶) نشان داده شده و مقایسه زمان اجرا در این نمودار، حاکی از این است که الگوریتم دسته میگوها چندهدفه دارای زمان حل بالاتری است. از آنجا که بر اساس ساختار طراحی شده روش پیشنهادی، این روش، در هر تکرار به صورت هوشمندانه نقاط زیادی از فضای جواب را جستجو می‌کند. بدیهی است که این روش، زمان محاسباتی بیشتری را نسبت به روش NSGA-II مصرف می‌کند. همچنین در مرحله نهایی با داده‌های ورودی جدول شماره ۴ خروجی‌های نرم‌افزار متلب را برای تخصیص متغیرهای خودروها به مراکز بازیافت را ارائه می‌نماییم (خروجی نرم‌افزار هم به پیوست ارائه شده است):

جدول ۴. ورودی‌های مسئله

تعداد	بیمارستان	مراکز بازیافت	مراکز انهدام	مراکز تولید	وسایل نقلیه	پریود تکرار	جمعیت
۴	۴	۴	۴	۴	۵	۱۰	۵۰

جدول ۵. تخصیص خودروها به بیمارستان‌ها

خودرو ۱	خودرو ۲	خودرو ۳	خودرو ۴	خودرو ۵
۱۶۰۶	۱۷۴۲	۲۰۸۷	۲۴۱۰	۱۲۰۴

مدل‌سازی چندهدفه زنجیره تأمین مدیریت پسماندهای بیمارستانی با ...؛ فیروزی و همکاران | ۲۱۷

	خودرو ۱	خودرو ۲	خودرو ۳	خودرو ۴	خودرو ۵
بیمارستان ۲	۱۱۶۲	۲	۲۳۸۰	۹۸۲	۲۰۷۰
بیمارستان ۳	۱۰۵۸	۱۳۲۱	۱۹۶۲	۶۶	۱۰۹۶
بیمارستان ۴	۱۳۰۸	۱۱۱۲	۱۰۱۵	۸۶۹	۷۹۹

جدول ۶. تخصیص خودروها به مراکز بازیافت

	خودرو ۱	خودرو ۲	خودرو ۳	خودرو ۴	خودرو ۵
مرکز بازیافت ۱	۱۸۷۴	۵۶۶	۱۱۲۵	۱۱۰۲	۱۶۲۸
مرکز بازیافت ۲	۶۷۵	۱۶۲۷	۱۵۰۳	۱۲۶۱	۴۰۵
مرکز بازیافت ۳	۳۷۵	۱۹۵	۱۷۷۵	۱۷۹۵	۱۲۸
مرکز بازیافت ۴	۴۴۴	۱۰۲۹	۱۶۲۰	۲۲۰۰	۷۷۴

جدول ۷. تخصیص خودروها به مراکز جمع‌آوری

	خودرو ۱	خودرو ۲	خودرو ۳	خودرو ۴	خودرو ۵
مرکز جمع‌آوری ۱	۸۳۲	۱۶۳۹	۱۹۳۹	۱۴۸	۲۰۵۴
مرکز جمع‌آوری ۲	۳۰	۸۵۲	۸۷۷	۶۳۶	۱۲۲۲
مرکز جمع‌آوری ۳	۱۵۸	۱۰۴۱	۲۵۰۰	۱۴۳۳	۶۸۰
مرکز جمع‌آوری ۴	۹۳	۳۶۲	۱۵۱۴	۸۱۸	۹۸۲

جدول ۸. تخصیص خودروها به مراکز انهدام

	خودرو ۱	خودرو ۲	خودرو ۳	خودرو ۴	خودرو ۵
مرکز انهدام ۱	۴۶۱	۲۰۵۹	۵۵۸	۹۱۰	۲۱۵
مرکز انهدام ۲	۱۵۲۴	۱۵۹۵	۱۸۶۶	۵۸۳	۱۸۵۹
مرکز انهدام ۳	۷۶۱	۱۳۷۱	۴۳۹	۴۴۹	۱۱۸۲
مرکز انهدام ۴	۱۷۵۵	۲۱۰	۱۲۱۵	۲۰۵۹	۱۲۴۰

در ادامه مسیر اجرای نرم‌افزار طی جداول ذیل نتایج بهینه استفاده و تخصیص مراکز جمع‌آوری، بازیافت و انهدام نیز ارائه شده است (خروجی‌های نرم‌افزار متلب نیز به پیوست ارائه شده است):

جدول ۹. انتخاب مراکز جمع‌آوری در گام آخر

مراکز جمع‌آوری	۱	۲	۳	۴
گام اول	۰	۱	۰	۱
گام آخر	۰	۱	۱	۱

جدول ۱۰. انتخاب مراکز بازیافت در گام آخر

مراکز بازیافت	۱	۲	۳	۴
گام اول	۰	۱	۰	۰
گام آخر	۱	۱	۰	۰

جدول ۱۱. انتخاب مراکز انهدام در گام آخر

مراکز انهدام	۱	۲	۳	۴
اول	۱	۱	۱	۰
آخر	۱	۱	۱	۰

بر اساس نتایج و جداول فوق، تخصیص بهینه و استفاده از مراکز جمع‌آوری، بازیافت و انهدام نیز مشخص شده‌اند. مواردی که با عدد صفر مشخص شده‌اند نشان‌دهنده عدم تخصیص و مواردی که با عدد یک مشخص شده‌اند نشان‌دهنده انتخاب و تخصیص مراکز برای مدیریت پسماندهای بیمارستانی در این مدل (مقاله) می‌باشند.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله به ارائه و حل مدل ریاضی چند هدفه برای زنجیره تأمین معکوس مدیریت پسماندهای بیمارستانی در دوره همه‌گیری کرونا (به‌عنوان یک بازه زمانی با حداکثر شرایط استفاده از مراکز درمانی و مدیریت پسماند) در ایران پرداخته شده است. در این راستا، پس از طراحی مدل، از دو الگوریتم دسته‌میگوها چندهدفه برپایه آرشیو پارتو و الگوریتم NSGA-II جهت حل مدل استفاده شده است. نتایج حل مدل نشان داد، الگوریتم دسته‌میگوها پیشنهادی که به صورت ترکیب با VNS طراحی شده است، قادر به حل مدل و دستیابی به جواب‌های مرز بهینه می‌باشد؛ زیرا مقایسه نتایج این الگوریتم با نتایج

الگوریتم شناخته شده NSGA-II نشان داد، کیفیت جواب تولیدشده توسط الگوریتم دسته میگوها نسبت به الگوریتم NSGA-II بهتر است. مقایسه شاخص پراکنندگی دو الگوریتم، نشان می دهد که الگوریتم بهینه سازی دسته میگوها، نقاط بیشتری از فضای جواب را جستجو می کند و به این دلیل احتمال گیر کردن آن در بهینه محلی کمتر از الگوریتم NSGA-II می باشد. از طرفی، شاخص یکنواختی الگوریتم NSGA-II کمتر از الگوریتم دسته میگوها بوده (هر چه این شاخص کمتر باشد، بهتر است)، لذا می توان گفت که الگوریتم ژنتیک چندهدفه فضای جواب را به صورت یکنواخت تری جستجو می کند. از منظر زمان اجرای دو الگوریتم، نشان داده شد که الگوریتم NSGA-II در زمان کمتری، مدل را حل کرده است. همچنین روند افزایشی زمان اجرا در هر دو الگوریتم، تأیید دیگری بر NP-HARD بودن مسئله مدیریت پسماندهای بهداشتی می باشد. بر اساس خروجی نرم افزار متلب و با مدل ارائه شده در این مقاله، قابلیت تخصیص و انتخاب بهینه مراکز بازیافت و انهدام پسماندهای بیمارستانی نیز وجود داشته و نتایج اخذشده از نرم افزار نیز مؤید این مطلب می باشند.

در این مقاله، تنها مدیریت پسماندهای بهداشتی در بیمارستان ها در نظر گرفته شد، حال اینکه، در دوره همه گیری کووید ۱۹، بسیاری از بیماران در منزل بستری و درمان شده اند. لذا، پسماندهای بهداشتی در یک دوره همه گیری، تنها به بیمارستان ها محدود نمی باشد. جهت انجام تحقیقات آتی، پیشنهاد می شود که محققان، گردآوری پسماندهای بهداشتی از منازل مسکونی را نیز به مدل اضافه کنند.

تعارض منافع

تعارض منافع ندارم.

ORCID

Hossein Firouzi



<https://orcid.org/0000-0002-6754-6695>

Javad Rezaian



<https://orcid.org/0000-0003-4538-0126>

Mohammad Mehdi



<https://orcid.org/0000-0001-5414-2109>

Movhadi

Alireza Rashidi Kamijan



<https://orcid.org/0000-0001-7705-980X>

منابع

۱. نیک ضمیر، محمد، برادران، وحید و پناهی، یونس. (۱۴۰۰). طراحی یک شبکه زنجیره تأمین به منظور مدیریت پسماندهای بیمارستانی. *مطالعات مدیریت صنعتی*، ۱۹(۶۰)، ۸۵-۱۲۰. doi:10.22054/jims.2021.40574.2283

References

1. Ahmad, F., Ahmad, S., & Zaindin, M. (2021). Sustainable production and waste management policies for COVID-19 medical equipment under uncertainty: A case study analysis. *Computers & Industrial Engineering*, 157, 107381. <http://10.1016/j.cie.2021.107381>.
2. Andeobu, L., Wibowo, S., & Grandhi, S. (2022). Medical waste from COVID-19 pandemic—a systematic review of management and environmental impacts in Australia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1381. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031381>
3. Ashtari, A., Tabrizi, J. S., Rezapour, R., Maleki, M. R., & Azami-Aghdash, S. (2020). Health care waste management improvement interventions specifications and results: A systematic review and meta-analysis. *Iranian Journal of Public Health*, 49(9), 1611. doi: 10.18502/ijph.v49i9.4074
4. Çetinkaya, A. Y., Kuzu, S. L., & Demir, A. (2020). Medical waste management in a mid-populated Turkish city and development of medical waste prediction model. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 6233-6244. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00474-6>.
5. Chartier, Y. (Ed.). (2014). *Safe management of wastes from health-care activities*. World Health Organization.
6. Ferronato, N., Alarcón, G. P. P., Lizarazu, E. G. G., & Torretta, V. (2021). Assessment of municipal solid waste collection in Bolivia: Perspectives for avoiding uncontrolled disposal and boosting waste recycling options. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105234. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105234>.
7. Gergin, Z., Tunçbilek, N., & Esnaf, Ş. (2019). Clustering approach using artificial bee colony algorithm for healthcare waste disposal facility location problem. *International Journal of Operations Research and Information Systems (IJORIS)*, 10(1), 56-75. doi: 10.4018/IJORIS.2019010104
8. Govindan, K., Nasr, A. K., Mostafazadeh, P., & Mina, H. (2021). Medical waste management during coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak: A mathematical programming model. *Computers & Industrial Engineering*, 162, 107668. PMID: 34545265; PMCID: PMC8444379.

9. Kargar, S., Pourmehdi, M., & Paydar, M. M. (2020). Reverse logistics network design for medical waste management in the epidemic outbreak of the novel coronavirus (COVID-19). *Science of the Total Environment*, 746, 141183. [http:// 10.1016/j.scitotenv.2020.141183](http://10.1016/j.scitotenv.2020.141183).
10. Liu, Z., Liu, T., Liu, X., Wei, A., Wang, X., Yin, Y., & Li, Y. (2021). Research on Optimization of Healthcare Waste Management System Based on Green Governance Principle in the COVID-19 Pandemic. *International journal of environmental research and public health*, 18(10), 5316. <https://doi.org/10.3390/ijerph18105316>
11. Lotfi, Reza & Kargar, Bahareh & Gharehbaghi, Alireza & Weber, Gerhard-Wilhelm. (2021). Viable medical waste chain network design by considering risk and robustness. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16727-9>
12. Mishra, A. R., & Rani, P. (2021). Multi-criteria healthcare waste disposal location selection based on Fermatean fuzzy WASPAS method. *Complex & Intelligent Systems*, 7(5), 2469-2484. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00407-9>
13. Negarandeh, R., & Tajdin, A. (2022). A robust fuzzy multi-objective programming model to design a sustainable hospital waste management network considering resiliency and uncertainty: A case study. *Waste Management & Research*, 40(4), 439-457. <https://doi.org/10.1177/0734242X211038134>
14. Nikzamir, M., & Baradaran, V. (2020). A healthcare logistic network considering stochastic emission of contamination: Bi-objective model and solution algorithm. *Transportation research. Part E, Logistics and transportation review*, 142, 102060. [In Persian]. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102060>.
15. Osaba, E., Yang, X. S., Fister Jr, I., Del Ser, J., Lopez-Garcia, P., & Vazquez-Pardavila, A. J. (2019). A discrete and improved bat algorithm for solving a medical goods distribution problem with pharmacological waste collection. *Swarm and evolutionary computation*, 44, 273-286. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.04.001>
16. Polat, E. G. (2022). Medical waste management during coronavirus disease 2019 pandemic at the city level. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(5), 3907-3918. <http://10.1007/s13762-021-03748-7>.
17. Saeidi-Mobarakeh, Z., Tavakkoli-Moghaddam, R., Navabakhsh, M., & Amoozad-Khalili, H. (2020). A bi-level meta-heuristic approach for a hazardous waste management problem. *International Journal of*

- Engineering*, 33(7), 1304-1310. <http://10.5829/ije.2020.33.07a.17>.
18. Shadkam, Elham. (2021). Cuckoo optimization algorithm in reverse logistics: A network design for COVID-19 waste management. *Waste Management & Research. The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 40. 0734242X2110039. 10.1177/0734242X211003947.
 19. Singh, N., Tang, Y., Zhang, Z., & Zheng, C. (2020). COVID-19 waste management: Effective and successful measures in Wuhan, China. *Resources, conservation, and recycling*, 163, 105071. doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105071
 20. Tavakkoli-Moghaddam, R., Azarkish, M., & Sadeghnejad-Barkousaraie, A. (2011). Solving a multi-objective job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times by a Pareto archive PSO combined with genetic operators and VNS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53, 733-750. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2847-4>.
 21. Tirkolaee, E. B., Abbasian, P., & Weber, G. W. (2021). Sustainable fuzzy multi-trip location-routing problem for medical waste management during the COVID-19 outbreak. *Science of the Total Environment*, 756, 143607. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143607>.
 22. Torkayesh, A. E., Vandchali, H. R., & Tirkolaee, E. B. (2021). Multi-objective optimization for healthcare waste management network design with sustainability perspective. *Sustainability*, 13(15), 8279. <https://doi.org/10.3390/su13158279>.
 23. Valizadeh, J., Aghdamigargari, M., Jamali, A., Aickelin, U., Mohammadi, S., Khorshidi, H. A., & Hafezalkotob, A. (2021). A hybrid mathematical modelling approach for energy generation from hazardous waste during the COVID-19 pandemic. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128157. <https://10.1016/j.jclepro.2021.128157>.
 24. Wang, Z., Huang, L., & He, C. X. (2021). A multi-objective and multi-period optimization model for urban healthcare waste's reverse logistics network design. *Journal of Combinatorial Optimization*, 42, 785-812. <http://0.1007/s10878-019-00499-7>.
 25. Yazdani, M., Tavana, M., Pamučar, D., & Chatterjee, P. (2020). A rough based multi-criteria evaluation method for healthcare waste disposal location decisions. *Computers & Industrial Engineering*, 143, 106394. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106394>
 26. Yu, H., Sun, X., Solvang, W. D., & Zhao, X. (2020). Reverse logistics network design for effective management of medical waste in epidemic outbreaks: Insights from the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in Wuhan (China). *International journal of*

environmental research and public health, 17(5), 1770. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051770>

27. Zhao, H., Liu, H., Wei, G., Zhang, N., Qiao, H., Gong, Y., Yu, X., Zhou, J., & Wu, Y. (2022). A review on emergency disposal and management of medical waste during the COVID-19 pandemic in China. *The Science of the total environment*, 810, 152302. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152302>

References [In Persian]

1. Nikzamir, M., Baradaran, V., Panahi, Y. (2021). A Supply Chain Network Design for Managing Hospital Solid Waste. *Industrial Management Studies*, 19(60), 85-120. [In Persian]. doi: 10.22054/jims.2021.40574.2283

استناد به این مقاله: فیروزی، حسین، رضائیان، جواد، موحدی، محمدمهدی، رشیدی کمیجان، علیرضا. (۱۴۰۲). مدل‌سازی چندهدفه زنجیره تأمین مدیریت پسماندهای بیمارستانی با در نظر گرفتن ابعاد پایداری در ترکیب با تئوری مجموعه فازی، *مطالعات مدیریت صنعتی*، ۲۱(۷۱)، ۱۷۷-۲۲۳. DOI: 10.22054/jims.2023.72812.2850



Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.