

A Supply Chain Network Design for Managing Hospital Solid Waste

Mohammad Nikzamir

Ph.D. in Industrial Engineering, North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Vahid Baradaran*

Associate Professor, Industrial Engineering Department, North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Yunes Panahi

Professor, Pharmacotherapy Department, Faculty of Pharmacy, Baqiyatallah University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Abstract


Health care solid wastes include all types of waste that are produced as a result of medical and therapeutic activities in hospitals and health centers. About 15% to 20% of these waste materials are infectious waste, which falls within the category of hazardous materials. Infectious waste is the one that must be treated before disposal or recycling. Hence, this paper seeks to develop a bi-objective mixed integer programming model for the infectious waste management. In the proposed model, in addition to minimizing the chain costs, the reduction of risks for the population exposed to the spread of contamination resulting from infectious waste is also considered. For this purpose, a multi-echelon chain is proposed by taking into account the green location-routing problem, which involves the location of recycling, disposal, and treatment centers through various treatment technologies and routing of vehicles between treatment levels and the hospital. The routing problem has been considered to be multi-depot wherein the criterion of reducing the cost of fuel consumption of heterogeneous cars is used for green routing. Finally, a hybrid meta-heuristic algorithm based on ICA and GA is developed and, following its validation, its function in solving large-scale problems has been investigated. Results show that the proposed algorithm is effective and efficient.


Keywords: Infectious Waste Management, Mathematical Programming, Location-Routing Problem, Imperialist Competitive Algorithm, Genetic Algorithm


* Corresponding Author: V_baradaran@iau-tnb.ac.ir

How to Cite: Nikzamir, M., Baradaran, V. and Panahi, Y (2021). A Supply Chain Network design for Managing Hospital Solid Waste, *Industrial Management Studies*, Vol.19 No 60, Spring 2021

طراحی یک شبکه زنجیره تأمین به منظور مدیریت پسماندهای بیمارستانی

محمد نیک‌ضمیر  دکتری، مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.

وحید برادران  * دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.

یونس پناهی  استاد، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی بقیه الله (عج)، تهران، ایران.

چکیده

پسماندهای حوزه‌ی بهداشت و درمان شامل تمام پسماندهایی است که براساس فعالیت‌های پزشکی و درمانی در بیمارستان‌ها و مراکز درمانی تولید می‌شوند. حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد این زباله‌ها را زباله‌های عفونی تشکیل می‌دهند که در زمره‌ی مواد خطرناک قرار می‌گیرند. زباله‌های عفونی زباله‌هایی هستند که قبل از انهدام یا بازیافت باید بی‌خطر سازی شوند. از این رو در این مقاله جهت مدیریت زباله‌های عفونی، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دوهدفه توسعه داده می‌شود. در مدل پیشنهادی علاوه بر کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره، کاهش ریسک جمعیت در معرض انتشار آلودگی ناشی از زباله‌های عفونی نیز مدنظر قرار گرفته است. برای این منظور یک زنجیره چندسطحی، با در نظر گرفتن مسأله مکان‌یابی - مسیریابی سبز ارائه می‌شود که در آن به مکان‌یابی مراکز بازیافت، دورریز و پالایش با تکنولوژی‌های پالایش مختلف و مسیریابی وسایط نقلیه بین سطوح پالایش و بیمارستان پرداخته می‌شود. مسأله مسیریابی به صورت چندانباره در نظر گرفته شده و از معیار کاهش هزینه‌ی مصرف سوخت خودروهای ناهمگن، جهت مسیریابی سبز بهره گرفته می‌شود. در نهایت یک الگوریتم فراابتکاری تلفیقی مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک توسعه داده می‌شود و پس از اعتبارسنجی آن، به بررسی عملکرد آن در حل مسایل با ابعاد بزرگ پرداخته می‌شود که نتایج حاصل از آن حاکی از کارایی و عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی است.

کلیدواژه‌ها: مدیریت پسماندهای عفونی، برنامه‌ریزی ریاضی، مسأله مکان‌یابی - مسیریابی، الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتم ژنتیک.

مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری رشته مهندسی صنایع دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال است.

* نویسنده مسئول: V_baradaran@iau-tnb.ac.ir

مقدمه

از زمان انقلاب صنعتی حجم و تنوع زباله‌ها آنقدر زیاد شد که کم‌کم به یک مسأله بسیار مهم تبدیل شد. این رشد چشم‌گیر زباله‌ها باعث به وجود آمدن مشکلاتی شد که مهم‌ترین آن مربوط به محیط زیست و سلامت افراد جامعه می‌شود. از این‌رو، 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 شد (Ferronato et al., 2020).

زباله‌های مربوط به حوزه‌ی بهداشت و درمان، نوعی از زباله‌ها هستند که شامل هر دو گروه خطرناک و غیرخطرناک هستند و محدوده‌ی وسیعی از مواد را شامل می‌شوند. 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 (Chartier, 2014). بنابراین، طراحی یک شبکه زنجیره تأمین مناسب به منظور مدیریت زباله‌های حوزه بهداشت و درمان یکی از چالش‌های اصلی این حوزه است؛ چرا که عدم مدیریت مناسب آن علاوه بر آلودگی زیست‌محیطی، بیمارستان و مراکز بهداشت و درمان را با مشکلات جدی مواجه خواهد کرد. بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که در طراحی شبکه‌های حوزه بهداشت و درمان، معیار کمینه‌سازی هزینه‌ها به تنهایی ملاک طراحی شبکه نیست و توجه به موضوعات انسان دوستانه از اهمیت زیادی برخوردار است. علاوه بر این انتخاب مکان‌های مناسب برای جمع‌آوری، بازیافت و دورریز زباله‌های عفونی و انتخاب تکنولوژی پالایش مناسب از جمله تصمیمات استراتژیکی است که عدم انتخاب مناسب آن هزینه‌های قابل توجهی به زنجیره تحمیل کرده و ریسک زنجیره را افزایش می‌دهد. همچنین توجه به تصمیمات تاکتیکی مانند مسیریابی وسایط نقلیه به منظور جمع‌آوری زباله‌های عفونی از بیمارستان‌ها، تأثیر به‌سزایی در کاهش هزینه‌ها و علی‌الخصوص کاهش ریسک جمعیت در معرض خطر خواهد داشت. از این‌رو در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه جهت مدیریت زباله‌های عفونی بیمارستان‌ها توسعه داده می‌شود. مدل ارائه شده به کمینه‌سازی توأمان هزینه‌های زنجیره و ریسک افراد در معرض انتشار آلودگی‌های عفونی می‌پردازد. برای این منظور، جمعیت افراد موجود در هر مسیر تخمین زده شده و برای انتخاب مسیرهای بهینه،

علاوه بر کاهش هزینه، به کم جمعیت بودن مسیر نیز توجه می‌شود. علاوه بر این مدل ارایه شده به طور یکپارچه به مکان‌یابی مراکز بازیافت و دورریز و مسیریابی بهینه وسایط نقلیه جهت جمع‌آوری زباله‌های عفونی از بیمارستان‌ها می‌پردازد و برای پالایش زباله‌های عفونی چندین تکنولوژی در دسترس است که براساس معیارهای هزینه راه‌اندازی، ظرفیت و نرخ پالایش قابل بازیافت، مدل تصمیم می‌گیرد که کدام یک را انتخاب کند. در نهایت به دلیل این که مسایل مکان‌یابی - مسیریابی جز دسته مسایل NP-hard هستند (Rabbani et al., 2018)، یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک برای حل مسایل در ابعاد مختلف توسعه داده خواهد شد.

ساختار مقاله بدین صورت است که در ادامه در بخش دوم پیشینه ادبیات ارایه می‌شود. بخش سوم مربوط به بیان مسأله و مدل پیشنهادی است. رویکرد حل و الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی در بخش چهارم آورده شده و سپس در بخش پنجم نتایج عددی حاصل از اجرای مدل توسط داده‌های شبیه‌سازی شده در ابعاد مختلف پیاده‌سازی می‌شود. به منظور بررسی عملکرد مدل، در بخش ششم تحلیل حساسیت روی مقادیر ضرایب تابع هدف صورت گرفته و در نهایت در بخش هفتم و هشتم به ترتیب دیدگاه مدیریتی و نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

پیشینه پژوهش

مطالعات انجام گرفته در حوزه مدیریت زباله‌های بهداشتی و درمان قابل تقسیم به چند دسته می‌باشند؛ ولی به طور کلی می‌توان آن‌ها را به دو دسته‌ی عفونی و غیرعفونی تقسیم‌بندی کرد. بررسی زباله‌ها از نظر ماهیت و ترکیب فیزیکی، به انتخاب و طراحی روشی مناسب جهت دفع این پسماندها کمک می‌کند (Altin et al., 2003). برای طراحی سیستم‌های پالایش پسماندهای بیمارستانی دانستن میزان حجم زباله‌ها و ترکیب آن‌ها امری ضروری است. تولید و ترکیب زباله‌های پزشکی به تعداد و نوع بخش‌ها در هر بیمارستان، تعداد بیماران بستری شده و نیز درمان سرپایی بستگی دارد (Komilis et al., 2011). داشتن تعریف دقیق از زباله‌های عفونی و غیرعفونی و آموزش کارکنان به منظور جداسازی زباله در محل تولید با هدف کاهش میزان زباله‌های عفونی که کمک قابل توجه‌ای به کاهش هزینه‌ها و ریسک‌های سلامت و محیط می‌شود، رابطه مستقیم دارند (Askarian et al., 2010). در بررسی کلی شبکه مدیریت زباله‌های بهداشتی و درمان

توسط آلاگوز و کوکاسوی^۱ (۲۰۰۸)، روش‌های جداسازی، جمع‌آوری، ذخیره‌سازی موقت و حمل و نقل زباله در داخل و خارج از مراکز بهداشتی شهر استانبول مورد بررسی قرار گرفته و با در نظر گرفتن الزامات سازمان‌های ملی و بین‌المللی اقدام به بهبود شرایط و از بین بردن نواقص کردند. در اقدامی دیگر، الخطیب و ساتو^۲ (۲۰۰۹) با جمع‌آوری اطلاعات مربوط به مقادیر تولید، جمع‌آوری، جداسازی، پالایش، حمل و نقل و دفع نهایی به ارزیابی شیوه‌های مدیریت سلامت مراکز بهداشتی در کرانه باختری - قلمرو فلسطین پرداختند که با مقایسه نتایج با الزامات بین‌المللی متوجه فاصله داشتن از استانداردهای جهانی و لزوم رسیدگی به این مطلب شدند.

استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی در حوزه‌های مختلف مدیریت پسماندهای بیمارستانی بخصوص حمل و نقل نیز مورد توجه محققین بوده است. یک سیستم کامپیوتری مبتنی بر ویژوال بیسیک و مدل برنامه‌ریزی ریاضی جهت حل مسأله مسیریابی و زمانبندی وسایط نقلیه به منظور جمع‌آوری زباله‌های عفونی توسط شیه و چانگ^۳ (۲۰۰۱) توسعه داده شد. آن‌ها از یک رویکرد حل دو مرحله‌ای برای حل مسأله خود استفاده کردند. نخست با استفاده از برنامه‌ریزی پویا جزءبندی بهینه صورت گرفته و در مرحله دوم، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای زمانبندی و مسیریابی به کار گرفته شد. به منظور بررسی کارایی و اثربخشی رویکرد پیشنهادی، آن را به ازای داده‌های مربوط ۳۴۸ بیمارستان در شهر تاینان اجرا کردند.

به منظور مدیریت زباله‌های بهداشتی و درمان شانموگاساندaram و همکاران^۴ (۲۰۱۲) با استفاده از ابزار برنامه‌ریزی ریاضی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، توزیع فضایی مکان‌های تولید زباله‌های زیاد، محل قرار دادن تأسیسات پالایش متمرکز و طراحی مسیرهای بهینه حمل و نقل برای جمع‌آوری زباله‌ها را در کشور لائوس تحلیل و برنامه‌ریزی کردند. به دلیل این که امکان بازیافت برخی از زباله‌ها وجود دارد، به کارگیری مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی جهت طراحی شبکه‌های برای زباله‌های بیمارستانی کارا و مؤثر هستند. در این راستا شی^۵ (۲۰۰۹) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی با هدف

-
1. Alagöz & Kocasoy
 2. Al-Khatib & Sato
 3. Shih & Chang
 4. Shanmugasundaram et al.
 5. Shi et al.

کمینه‌سازی هزینه‌ها به منظور طراحی یک شبکه لجستیک معکوس برای زباله‌های بیمارستانی توسعه داد. زنجیره مورد مطالعه توسط او شامل سطوح بیمارستان‌ها، مراکز جمع‌آوری، مراکز پردازش و کارخانه است که مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری و پردازش توسط مدل صورت می‌پذیرد. در نهایت مدل پیشنهادی با استفاده از یک مثال عددی توسط نرم‌افزار لینگو اجرا شد.

یک مسأله مسیریابی موجودی احتمالی برای جمع‌آوری زباله‌های بهداشتی توسط نولز و همکاران^۱ (۲۰۱۴) ارائه شد. آن‌ها برای این منظور از یک مدل احتمالی دو مرحله‌ای بهره گرفتند که در مرحله اول مسیرهای بهینه توسط هر وسیله نقلیه مشخص می‌گردد و در مرحله دوم تعداد جعبه‌های تخصیص داده شده به هر داروخانه تعیین می‌گردند. علاوه بر این‌ها، مدل‌سازی مسأله مسیریابی جهت حمل و نقل زباله‌های بیمارستانی با مطالعه‌ی شرایط حاکم در بیمارستان در تونس توسط هاچیچا و همکاران^۲ (۲۰۱۴) انجام شد. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی تک‌هدفه با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های حمل و نقل جهت طراحی یک شبکه زنجیره تأمین زباله‌های بیمارستانی با در نظر گرفتن مسأله مسیریابی ظرفیت‌دار توسعه دادند و از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای حل مسأله خود تحت شرایط عدم قطعیت بهره بردند. نتایج حاصل از اجرای مدل به ازای ۱۲ بیمارستان در نرم‌افزار سیپلکس نشان‌دهنده‌ی دقت و صحت عملکرد مدل پیشنهادی آن‌هاست. یک مدل مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی چندهدفه برای مکان‌یابی مراکز پالایش، بازیافت و دفع زباله‌های بیمارستانی و مسیریابی وسایط نقلیه جهت جمع‌آوری زباله‌ها از بیمارستان‌ها توسط جقتایی‌نوبی و همکاران (۱۳۹۵) ارائه شد. مدل ارائه شده توسط آن‌ها دارای چهار تابع هدف شامل کمینه‌سازی هزینه‌ها، کمینه‌سازی ریسک جمعیتی در طول مسیر، کمینه‌سازی ریسک جمعیتی در مراکز دفع و پالایش و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان مسیرهای حمل زباله است. آن‌ها از یک رویکرد مبتنی بر ال‌پی متریک برای تک‌هدفه کردن و حل مدل خود بهره گرفتند. جهت مدیریت هزینه‌ها در مسأله‌ی جمع‌آوری زباله‌های بیمارستانی مدلی توسط منتزاراس و وودریاس^۳ (۲۰۱۷) توسعه داده شد که ظرفیت و محل مراکز پالایش و ظرفیت وسایل نقلیه و مسیرهای انتقال در آن در

1. Nolz et al.

2. Hachicha et al.

3. Mantzaras & Voudrias

نظر گرفته شده است. یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر فرایند تحلیل سلسله مراتبی، برنامه‌ریزی آرمانی و الگوریتم ژنتیک جهت مکان‌یابی - مسیریابی برای دفع زباله‌های عفونی توسط ویچاپا و خوخاجایکیات^۱ (۲۰۱۸) توسعه داده شد. برای این منظور ابتدا فاکتورهای ارزیابی مکان‌های کاندید دفع، با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی ارزیابی شده و سپس توسط یک مدل ریاضی و روش برنامه‌ریزی آرمانی با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌ها و بیشینه‌سازی وزن محل‌های دفع، مکان مناسب جهت دفع زباله‌های عفونی انتخاب شد. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مسیرهای بهینه تعیین شدند. بابایی تیرکلایی و همکاران^۲ (۲۰۱۹)، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط خطی با در نظر گرفتن مسأله مسیریابی وسایط نقلیه و پنجره زمانی برای طراحی شبکه جمع‌آوری زباله‌های شهری توسعه دادند. آن‌ها از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل مسأله خود بهره گرفتند. در مقاله دیگری که توسط بابایی تیرکلایی و همکاران (۲۰۲۰) ارائه گردید، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط خطی چندهدفه به منظور مدیریت پسماندهای بیمارستانی در شرایط اپیدمی ویروس کرونا فرمول‌بندی شد. آن‌ها از روش محدودیت شانس برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا استفاده کردند و با استفاده از یک رویکرد حل مبتنی بر روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی، مدل چندهدفه خود را تحت شرایط عدم قطعیت حل کردند. یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دو هدفه با هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌ها و کمینه‌سازی ریسک‌های حمل و نقل به منظور طراحی یک شبکه جمع‌آوری و انهدام زباله‌های بیمارستانی خطرناک تحت شرایط عدم قطعیت توسط همایونی و پیشوایی^۳ (۲۰۲۰) ارائه شد. آن‌ها از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای در نظر گرفتن عدم قطعیت استفاده کردند و در نهایت مدل پیشنهادی خود را با استفاده از روش محدودیت افسیلون حل کردند. به طور مشابه، کارگر و همکاران^۴ (۲۰۲۰)، یک مدل ریاضی به منظور جمع‌آوری پسماندهای عفونی بیمارستان‌ها در شرایط اپیدمی ویروس کرونا توسعه دادند. آن‌ها از یک رویکرد برنامه‌ریزی ریاضی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها و کمینه‌سازی ریسک‌های حمل و نقل برای این منظور استفاده کردند. نیک‌ضمیر و برادران^۵ (۲۰۲۰)

-
1. Wichapa & Khokhajaikiat
 2. Babae Tirkolae et al.
 3. Homayouni & Pishvae
 4. Kargar et al.
 5. Nikzamir & Baradaran

یک شبکه برای جمع‌آوری و مدیریت زباله‌های بیمارستانی در شرایط اپیدمی ویروس کرونا با در نظر گرفتن مسأله مکان‌یابی - مسیریابی پیشنهاد دادند. آن‌ها برای این منظور از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط دوهدفه شامل کمینه‌سازی هزینه‌ها و انتشار آلودگی بهره گرفتند و با استفاده از یک الگوریتم چندهدفه جدید، مسأله خود را حل کردند. در ادامه به منظور بررسی نوآوری این مقاله با سایر مقالات در سال‌های اخیر، در جدول ۱ تفاوت‌ها و شباهت‌های این مقاله با سایر مقالات آورده شده است.

جدول ۱. خلاصه‌ای از پیشینه ادبیات مربوط به حوزه جمع‌آوری پسماندها

نویسنده	الگوریتم حل	چندهدفه	مکان‌یابی	مسیریابی	انتشار آلودگی	وسيله نقلیه ناهمگن	ریسک جمعیتی	مراکز	
								خط‌خطر سازی	باز یافت
Hajar et al. (2018)	دقیق	*	-	*	-	-	*	*	-
Wichapa & Khokhajaikiat (2018)	فراابتکاری	*	*	*	-	-	-	*	-
Babae Tirkolae et al. (2019)	فراابتکاری	-	-	*	-	*	-	-	-
Gergin et al. (2019)	فراابتکاری	-	*	-	-	-	*	-	-
Babae Tirkolae et al. (2020)	دقیق	*	*	*	-	*	*	-	-
Homayouni & Pishvae (2020)	دقیق	*	*	-	-	-	-	*	*
Kargar et al. (2020)	دقیق	*	*	-	-	-	*	*	-
Nikzamid & Baradaran (2020)	فراابتکاری	*	*	*	*	*	-	*	*
این مقاله	فراابتکاری	*	*	*	*	*	*	*	*

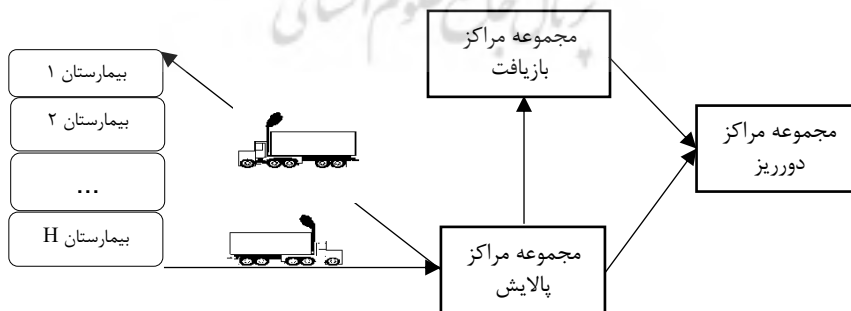
روش

هدف از این مقاله طراحی یک شبکه برای جمع‌آوری زباله‌های عفونی بیمارستانی و امکان بی‌خطر سازی آن‌ها برای استفاده مجدد است. برای این منظور همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، وسایط نقلیه از مراکز پالایش به سمت بیمارستان‌ها حرکت کرده و پس از جمع‌آوری تمام زباله‌های عفونی، مجدد به مراکز پالایش باز می‌گردند. مراکز

پالایش که مجهز به تکنولوژی‌های بی‌خطر سازی هستند، زباله‌ها را پالایش می‌کنند و آن‌هایی که قابل استفاده مجدد باشند به مراکز بازیافت و باقیمانده را به مراکز دورریز ارسال می‌کنند تا منهدم شوند. در مراکز بازیافت نیز ممکن است مقداری از زباله‌های پالایش شده شناسایی شوند که قابلیت بازیافتی نداشته باشند؛ آن‌ها نیز به مراکز دورریز ارسال خواهند شد. به منظور شناخت هر چه بهتر مسأله و شبکه مورد مطالعه، در ادامه مفروضات مربوط به مدل پیشنهادی آورده شده است:

- زنجیره مورد بررسی به صورت چندسطحی و چندمحصولی در نظر گرفته شده است.
- مکان جغرافیایی بیمارستان‌ها مشخص بوده ولی سایر مراکز توسط مدل پیشنهادی مکان‌یابی خواهند شد.
- مسیریابی بین سطوح بیمارستان‌ها و مراکز پالایش انجام می‌گیرد.
- وسایط نقلیه و مراکز به صورت ظرفیت‌دار در نظر گرفته شده‌اند.
- وسایط نقلیه ناهمگن هستند؛ یعنی از نظر ظرفیت، قیمت خرید و میزان مصرف سوخت با یکدیگر تفاوت دارند.
- امکان بازدید هر بیمارستان توسط هر خودرو حداکثر یکبار است، اما ممکن است چندین خودرو یک بیمارستان را بازدید نمایند. به عبارت دیگر شکست تقاضا در نظر گرفته شده است و این امکان وجود دارد که پسماندهای یک بیمارستان توسط چند وسیله نقلیه برداشت شود.
- هر خودروی خریداری شده باید به یک مرکز پالایش تخصیص یابد.
- مسأله مسیریابی از نوع چندانباره در نظر گرفته شده است.

شکل ۱. شبکه زنجیره‌ی مورد بررسی



اندیس‌های تعریف شده برای مدل ریاضی به شرح زیر است:

i	زباله عفونی	$i \in \{1, 2, \dots, I\}$
h, h'	بیمارستان	$h, h' \in \{1, 2, \dots, H\}$
f	تکنولوژی پالایش	$f \in \{1, 2, \dots, F\}$
c	مرکز پالایش	$c \in \{1, 2, \dots, C\}$
r	مرکز بازیافت	$r \in \{1, 2, \dots, R\}$
d	مرکز دورریز	$d \in \{1, 2, \dots, D\}$
k	وسایط نقلیه	$k \in \{1, 2, \dots, K\}$
t	دوره زمانی	$t \in \{1, 2, \dots, T\}$

همچنین پارامترهای تعریف شده برای مدل ریاضی به شرح زیر است:

$OT_{c,f}$	هزینه راه‌اندازی مرکز پالایش c با تکنولوژی پالایش f
OR_r	هزینه راه‌اندازی مرکز بازیافت r
OD_d	هزینه راه‌اندازی مرکز دورریز d
OV_k	هزینه تأمین وسیله نقلیه k
$PR_{i,c,f}^t$	هزینه پالایش هر واحد زباله عفونی i در مرکز پالایش c توسط تکنولوژی پالایش f در دوره زمانی t
$PR_{i,r}^t$	هزینه بازیافت هر واحد زباله عفونی i پالایش شده در مرکز بازیافت r در دوره زمانی t
$PR_{i,d}^t$	هزینه انهدام هر واحد زباله عفونی i پالایش شده در مرکز دورریز d در دوره زمانی t
$TR_{i,c,r}^t$	هزینه حمل و نقل هر واحد زباله عفونی i پالایش شده از مرکز پالایش c به مرکز بازیافت r در دوره زمانی t
$TR_{i,c,d}^t$	هزینه حمل و نقل هر واحد زباله عفونی i پالایش شده از مرکز پالایش c به مرکز دورریز d در دوره زمانی t
$TR_{i,r,d}^t$	هزینه حمل و نقل هر واحد زباله عفونی i از مرکز بازیافت r به مرکز دورریز d در دوره زمانی t
$cap_{c,f}$	ظرفیت مرکز پالایش c مجهز به تکنولوژی f
cap_r	ظرفیت مرکز بازیافت r
cap_d	ظرفیت مرکز دورریز d
cap_k	ظرفیت وسیله نقلیه k
$dis_{h',h}$	فاصله مکانی بین بیمارستان h' و بیمارستان h
$dis_{h,c}$	فاصله مکانی بین بیمارستان h و مرکز پالایش c

$w_{i,h}^t$	میزان زباله عفونی i تولید شده توسط بیمارستان h
$p_{i,c,f}$	نرخ زباله عفونی i قابل بازیافت به دست آمده توسط تکنولوژی f در مرکز پالایش c
$p_{i,r}$	نرخ زباله عفونی i دورریز شده توسط مرکز بازیافت r
population $_{h',h}$	میزان جمعیت واقع شده مسیر بین بیمارستان h' و بیمارستان h
fv_t^k	میزان مصرف سوخت در واحد مسافت توسط وسیله نقلیه k
p^{fuel}	قیمت هر واحد سوخت
$M \sim \infty$	عدد بسیار بزرگ

متغیرهای تصمیم مسئله ریاضی عبارتند از:

$\alpha_{c,f} \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	اگر مرکز پالایش c با تکنولوژی پالایش f راه اندازی گردد در غیر این صورت
$\alpha_r \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	اگر مرکز بازیافت r راه اندازی شود در غیر این صورت
$\alpha_d \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	اگر مرکز دورریز d راه اندازی شود در غیر این صورت
$veh_k \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	اگر وسیله نقلیه k جهت جمع آوری زباله های عفونی تأمین شود در غیر این صورت
$\beta_{k,c} \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	اگر وسیله نقلیه k به مرکز پالایش c تخصیص داده شود در غیر این صورت
$tour_{k,h',h}^t \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	اگر وسیله نقلیه k مسیر بین بیمارستان h' و بیمارستان h را در دوره زمانی t طی کند در غیر این صورت
$y_{i,k,c,h}^t$	میزان زباله عفونی i جمع آوری شده از بیمارستان h توسط مرکز پالایش c با استفاده از وسیله نقلیه k در دوره زمانی t
$y_{i,k,h}^t$	میزان زباله عفونی i موجود در وسیله نقلیه k هنگام ورود به بیمارستان h در دوره زمانی t
$z_{i,c,r}^t$	میزان زباله عفونی i پالایش شده انتقالی از مرکز پالایش c به مرکز بازیافت r در دوره زمانی t
$z_{i,c,d}^t$	میزان زباله عفونی i پالایش شده انتقالی از مرکز پالایش c به مرکز دورریز d در دوره زمانی t
$z_{i,r,d}^t$	میزان زباله عفونی i پالایش شده انتقالی از مرکز بازیافت r به مرکز دورریز d در دوره زمانی t

بر اساس اندیس ها، متغیرها و پارامترهای تعریف شده، مدل ریاضی به شرح زیر است.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } z^{\text{Cost}} = & \sum_{c,f} OT_{c,f} \times \alpha_{c,f} + \sum_r OR_r \times \alpha_r + \sum_d OD_d \times \alpha_d + \\
 & \sum_k OV_k \times veh_k + \sum_{i,k,c,f,h,t} PR_{i,c,f}^t \times y_{i,k,c,h}^t + \sum_{i,c,r,t} PR_{i,r}^t \times z_{i,c,r}^t + \\
 & \sum_{i,c,d,t} PR_{i,d}^t \times z_{i,c,d}^t + \sum_{i,c,r,t} TR_{i,c,r}^t \times z_{i,c,r}^t + \sum_{i,c,d,t} TR_{i,c,d}^t \times z_{i,c,d}^t + \\
 & \sum_{i,r,d,t} TR_{i,r,d}^t \times z_{i,r,d}^t + p^{\text{fuel}} \times \left(\sum_{k,h>1,c,t} fvt_k \times tour_{k,h,t}^t \right)
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{k,h>1,c,t} fvt_k \times dis_{h,c} \times \beta_{k,c} \times (tour_{k,1,h}^t + tour_{k,h,1}^t) \\
 \text{Min } z^{\text{Risk}} = & \sum_{k,h',h,t} population_{h',h} \times tour_{k,h',h}^t
 \end{aligned} \quad (2)$$

Subjected to:

$$\sum_{i,k,h} y_{i,k,c,h}^t \leq cap_{c,f} \quad \forall c,f,t \quad (3)$$

$$\sum_{i,c} z_{i,c,r}^t \leq cap_r \quad \forall r,t \quad (4)$$

$$\sum_{i,r} z_{i,r,d}^t + \sum_{i,c} z_{i,c,d}^t \leq cap_d \quad \forall d,t \quad (5)$$

$$\sum_{i,h} y_{i,k,c,h}^t \leq cap_k \quad \forall k,c,t \quad (6)$$

$$\sum_{h'} tour_{k,h',h}^t = \sum_{h'} tour_{k,h,h'}^t \quad \forall k,h,t \quad (7)$$

$$\sum_{h'} tour_{k,h',h}^t \leq 1 \quad \forall k,h,t \quad (8)$$

$$\sum_c \beta_{kc} \leq 1 \quad \forall k \quad (9)$$

$$\sum_k \beta_{k,c} \leq M \times \alpha_{c,f} \quad \forall c,f \quad (10)$$

$$y_{i,k,h}^t + (1 - tour_{k,h',h}^t) \times M \geq y_{i,k,h'}^t + y_{i,k,c,h}^t \quad \forall i,k,c,h',h > 1,t \quad (11)$$

$$y_{i,k,1}^t \geq \sum_h y_{i,k,c,h}^t \quad \forall i,k,c,t \quad (12)$$

$$\sum_{k,c} y_{i,k,c,h}^t \geq w_{i,h}^t \quad \forall i,h,t \quad (13)$$

$$y_{i,k,c,h}^t \leq M \times \sum_{h'} tour_{k,h',h}^t \quad \forall i,k,c,h,t \quad (14)$$

$$y_{i,k,c,h}^t \leq M \times veh_k \quad \forall i,k,c,h,t \quad (15)$$

$$y_{i,k,c,h}^t \leq M \times \beta_{k,c} \quad \forall i,k,c,h,t \quad (16)$$

$$\sum_{k,h} y_{i,k,c,h}^t = \sum_r z_{i,c,r}^t + \sum_d z_{i,c,d}^t \quad \forall i,c,t \quad (17)$$

$$\sum_r z_{i,c,r}^t = \sum_{f,k,h} p_{i,c,f} \times y_{i,k,c,h}^t \quad \forall i,c,t \quad (18)$$

$$\sum_d z_{i,r,d}^t = \sum_c p_{i,r} \times z_{i,c,r}^t \quad \forall i,r,t \quad (19)$$

$$y_{i,k,c,h}^t \leq M \times \alpha_{c,f} \quad \forall i,k,c,f,h,t \quad (20)$$

$$z_{i,c,r}^t \leq M \times \alpha_r \quad \forall i,c,r,t \quad (21)$$

$$z_{i,c,r}^t \leq M \times \alpha_{c,f} \quad \forall i,c,f,r,t \quad (22)$$

$$z_{i,c,d}^t \leq M \times \alpha_d \quad \forall i,c,d,t \quad (23)$$

$$z_{i,r,d}^t \leq M \times \alpha_r \quad \forall i,r,d,t \quad (24)$$

$$z_{i,r,d}^t \leq M \times \alpha_d \quad \forall i,r,d,t \quad (25)$$

تابع هدف اول به کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره می‌پردازد؛ این هزینه‌ها شامل هزینه‌های راه‌اندازی مراکز پالایش، مراکز بازیافت، مراکز دورریز، هزینه خرید وسایط نقلیه، هزینه پالایش زباله‌ها در مراکز پالایش، هزینه بازیافت زباله‌ها، هزینه امحاء، هزینه انتقال زباله‌ها از مراکز پالایش به بازیافت و دورریز و از مراکز بازیافت به دورریز و همچنین هزینه مصرف سوخت توسط وسایط نقلیه است. تابع هدف دوم به کمینه‌سازی ریسک جمعیت در معرض انتشار آلودگی ناشی از زباله‌های عفونی می‌پردازد.

عدم تجاوز از ظرفیت مراکز پالایش، بازیافت، دورریز و ظرفیت وسایط نقلیه به ترتیب در محدودیت‌های (۳) تا (۶) آورده شده است. محدودیت (۷) بیان می‌کند که اگر هر خودرو جهت جمع‌آوری زباله، به هر بیمارستان وارد شد، باید از آن بیمارستان خارج گردد. هر خودرو هر بیمارستان را حداکثر یکبار ویزیت می‌کند، اما این امکان وجود دارد که یک بیمارستان توسط چندین خودرو ویزیت شوند که این فرض توسط محدودیت (۸) پوشش داده شده است. طبق مفروضات مسأله مسیریابی، هر خودرو حداکثر باید به یک مرکز پالایش تخصیص داده شود؛ این مهم توسط محدودیت (۹) ارضا می‌شود. اگر مرکز پالایشی راه‌اندازی نشده باشد، نباید خودرویی به آن تخصیص داده شود؛ محدودیت (۱۰) تضمین‌کننده این شرط است. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) مربوط به محدودیت حذف زیرتور در مسأله مسیریابی مورد بررسی است. محدودیت (۱۳) تضمین می‌نماید که تمامی

زباله‌ها از تمامی بیمارستان‌ها جمع‌آوری گردد. سه شرط اساسی جهت جمع‌آوری زباله‌ها این است که خودرو بیمارستان را ویزیت نماید، خودرو خریداری شده باشد و خودروی خریداری شده به یک مرکز پالایش تخصیص داده شود، که این شروط به ترتیب در محدودیت‌های (۱۴) تا (۱۶) آورده شده است. میزان زباله‌ی انتقالی از مراکز پالایش به مراکز بازیافت و دورریز توسط محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) محاسبه می‌گردد. همچنین میزان زباله‌ی انتقالی از مراکز بازیافت به مراکز دورریز در محدودیت (۱۹) نشان داده شده است. یکی از شروط اصلی مسأله‌ی مکان‌یابی این است که اگر مرکز راه‌اندازی نشده باشد، امکان ورود/ خروج محصول به/ از آن امکان پذیر نمی‌باشد. محدودیت‌های (۲۰) تا (۲۵) تضمین می‌کنند که اگر مرکزی تأسیس نشود امکان ورود/ خروج محصول به/ از آن محقق نشود.

در تابع هدف اول عبارات $tour_{k,h',h}^t \times \beta_{k,c}$ باعث غیرخطی شدن مدل شده است. برای خطی سازی آن، متغیر کمکی $t\beta_{k,h',h,c}^t$ باینری تعریف می‌شود و این متغیر جایگزین عبارت غیرخطی مذکور می‌شود. سپس برای خطی سازی کافی است به جای تابع هدف اول، روابط (۲۶) تا (۳۰) جایگزین شود (Qazvini et al., 2016).

$$\begin{aligned} Min \ z^{Cost} = & \sum_{c,f} OT_{c,f} \times \alpha_{c,f} + \sum_r OR_r \times \alpha_r + \sum_d OD_d \times \alpha_d + \\ & \sum_k OV_k \times veh_k + \sum_{i,k,c,f,h,t} PR_{i,c,f}^t \times y_{i,k,c,h}^t + \sum_{i,c,r,t} PR_{i,r}^t \times z_{i,c,r}^t + \\ & \sum_{i,c,d,t} PR_{i,d}^t \times z_{i,c,d}^t + \sum_{i,c,r,t} TR_{i,c,r}^t \times z_{i,c,r}^t + \sum_{i,c,d,t} TR_{i,c,d}^t \times z_{i,c,d}^t + \\ & \sum_{i,r,d,t} TR_{i,r,d}^t \times z_{i,r,d}^t + p^{fuel} \times \left(\sum_{k,h',h,c,t} fvt_k \times tour_{k,h',h}^t \right. \\ & \left. + \sum_{k,h>1,c,t} fvt_k \times dis_{h,c} \times (t\beta_{k,1,h,c}^t + t\beta_{k,h,1,c}^t) \right) \end{aligned} \quad (26)$$

$$t\beta_{k,h',h,c}^t \leq \beta_{k,c} + (1 - tour_{k,h',h}^t) \times M \quad (27)$$

$$t\beta_{k,h',h,c}^t \leq tour_{k,h',h}^t + (1 - \beta_{k,c}) \times M \quad (28)$$

$$t\beta_{k,h',h,c}^t \geq 1 + (tour_{k,h',h}^t + \beta_{k,c} - 2) \times M \quad (29)$$

$$t\beta_{k,h',h,c}^t \leq (tour_{k,h',h}^t + \beta_{k,c}) \times M \quad (30)$$

رویکرد حل

برای حل مسأله در ابعاد بزرگ که روش حل دقیق از حل آن عاجز است، یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر رقابت استعماری و ژنتیک توسعه داده خواهد شد و از روش ال‌پی‌متریک برای تک‌هدفه کردن مدل بهره گرفته می‌شود. بررسی ادبیات نشان می‌دهد که الگوریتم‌های فراابتکاری زیادی وجود دارد که برای حل مسایل چندهدفه به کار می‌روند. برخی از آن‌ها از مفهوم حل چندهدفه به طور همزمان استفاده می‌کنند (مانند الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه) و برخی از آن‌ها مبتنی بر روش‌های تک‌هدفه کردن هستند. به دلیل این‌که حل مسایل چندهدفه با الگوریتم‌های چندهدفه از پیچیدگی‌های بالایی برخوردار است و امکان مقایسه جواب با استفاده از سنجه‌هایی صورت می‌گیرد که فرایند پیچیده‌ای دارد، به کارگیری روش‌های تک‌هدفه در الگوریتم‌های فراابتکاری، راهکار است که بسیاری از مقالات آن را مورد توجه قرار داده‌اند (Pakzad-Moghaddam et al., 2019؛ Khalifehzadeh et al., 2019) و در این مقاله نیز از این راهکار برای حل مسایل چندهدفه در ابعاد بزرگ بهره گرفته شده است. الگوریتم‌های تکاملی از جمله کاربردی-ترین روش‌های بهینه‌سازی محسوب می‌شوند. در مقابل روش‌ها و نرم‌افزارهای حل مدل-های تحقیق در عملیات حساسیت بسیار بالایی به عبارات غیرخطی در تابع هدف و محدودیت‌های مسأله از خود نشان می‌دهند. بنابراین با توجه به انبوه روابط پیچیده موجود در مدل فوق، واضح است که نرم‌افزارهای حل دقیق برای حل مسایل در ابعاد بزرگ کارایی ندارند. در نتیجه روش‌های تکاملی، با توجه به حساسیت بسیار پایین‌شان نسبت به پیچیدگی و غیرخطی بودن روابط به منظور یافتن سیاست‌های بهینه در سیستم فوق انتخاب شده‌اند.

الگوریتم رقابت استعماری را می‌توان به‌عنوان همتای الگوریتم ژنتیک اما برگرفته از مفاهیم رشد و توسعه اجتماعی در نظر گرفت. در حقیقت پایه‌های این الگوریتم بر مبنای شبیه‌سازی نحوه تکامل اجتماعی بشر بنا شده‌است. فرآیند بهینه‌سازی در این الگوریتم با تولید جمعیتی اولیه شروع می‌شود. بر مبنای مفاهیم بنیادین الگوریتم رقابت استعماری جواب‌های تولیدی در این الگوریتم، اصطلاحاً کشور خوانده می‌شوند. هزینه هر جواب در حقیقت نشان دهنده قدرت آن کشور می‌باشد. کشورها با کمترین هزینه و بیشترین قدرت به‌عنوان امپراطور در راس امپراطوری‌ها قرار گرفته و دیگر کشورها را تحت سلطه و استعمار خود قرار می‌دهند (Atashpaz-Gargari & Lucas, 2007).

همگون‌سازی^۱ و انقلاب^۲ عملگرهای اصلی الگوریتم رقابت استعماری محسوب می‌شوند. عملگر همگون‌سازی برای حرکت دادن مستعمرات به طرف امپراطورها و کم کردن فاصله بین آن‌ها به کار می‌رود. عملگر انقلاب تغییراتی ناگهانی را در موقعیت برخی کشورها ایجاد می‌کند. همگون‌سازی‌ها و انقلاب‌های پیاپی باعث می‌شود تا برخی از مستعمرات از امپراطورهای خود پیشی گرفته و به‌عنوان امپراطور جدید در راس امپراطوری‌ها قرار گیرند (Nazari-Shirkouhi et al., 2010).

الگوریتم رقابت استعماری از به‌عنوان یکی از جدیدترین الگوریتم‌های تکاملی کارایی خود را در حل مسائل NP-hard به اثبات رسانیده است. نظری شیرکوه و همکاران^۳ (۲۰۱۰) در مقاله خود ادعا می‌کنند که الگوریتم رقابت استعماری عملکرد بسیار خوبی برای حل مسائل بهینه‌سازی گوناگون از خود نشان داده‌است. آتش‌پز گرگری و لوکس^۴ (۲۰۰۷) برای اولین بار، الگوریتم رقابت استعماری را برای جستجوی هوشمند فضای جواب مسائل بهینه‌سازی پیوسته ارائه کردند. با توجه به پیچیدگی بالای روابط به کار رفته در مدل تحقیق در عملیات این پژوهش و طبیعت پیوسته متغیرهای تصمیم مساله، الگوریتم رقابت استعماری برای جستجوی فضای جواب مربوطه و یافتن سیاست‌های بهینه انتخاب شد.

در ارائه‌ی الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی علی‌الخصوص الگوریتم ژنتیک، علی‌رغم توجه به تکامل زیستی انسان و سایر موجودات، به تکامل اجتماعی و تاریخی او به عنوان پیچیده‌ترین و موفق‌ترین حالت تکامل، توجه چندانی نشده است. الگوریتم رقابت استعماری، با الهام گرفتن از تکامل اجتماعی انسان، جهت بهینه‌سازی توابع پیچیده توسعه داده شده است. این الگوریتم با تعدادی جمعیت اولیه آغاز می‌شود. در این الگوریتم، هر عنصر جمعیت یک کشور نامیده می‌شود. کشورها به دو دسته مستعمره و استعمارگر تقسیم‌بندی می‌شوند. هر استعمارگر، وابسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه‌ی خود درآورده و آن‌ها را کنترل می‌کند. سیاست جذب و رقابت استعماری، هسته‌ی اصلی این الگوریتم را تشکیل می‌دهند. عملگر جذب برای حرکت دادن مستعمرات به طرف قوی‌ترین کشور هر امپراتوری استفاده می‌گردد. رقابت استعماری شبیه

-
1. Assimilation
 2. Revolution
 3. Nazari-Shirkouhi et al.
 4. Atashpaz-Gargari & Lucas

ساز رفتار کشورهای استعمارگر به اضافه‌ی درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن تعریف می‌شود. یکی از شروط توقف این الگوریتم، از بین رفتن تمام امپراتوری‌های ضعیف و یکی شدن همه‌ی آنهاست (Pakzad-Moghaddam et al., 2014).

از طرفی، علی‌رغم عملکرد درخشان الگوریتم رقابت استعماری در جستجوی فضاها پیوسته، این الگوریتم به تنهایی در بهینه‌سازی مسائل گسسته، چندان کارا نمی‌باشد. بنابراین، در این پژوهش روشی جهت تلفیق قدرت جستجوی الگوریتم رقابت استعماری و قابلیت ابزارهای الگوریتم ژنتیک در بهبود جواب‌های گسسته، با هدف حل مسأله‌ی مورد نظر در مقیاس‌های بزرگ ارائه شده است. در واقع، این روش تلفیقی، در نتیجه‌ی هماهنگ شدن عملگرهای جذب، رقابت استعماری، ترکیب متقاطع، جهش و تولید تصادفی کروموزوم به عنوان عنصر جمعیت می‌باشد.

شبه کد الگوریتم فراابتکاری تلفیقی پیشنهادی به شرح زیر است:

- ۱- داده‌های مربوط به صورت مسأله را بخوان.
- ۲- پارامترهای الگوریتم را مقداردهی کن.
- ۳- امپراتوری‌های اولیه را بساز.
 - ۳-۱- کشورهای اولیه را به صورت تصادفی بساز.
 - ۳-۲- قدرت هر کشور را با توجه به مقدار تابع هدف آن برآزش کن.
 - ۳-۳- امپراطورها و مستعمراتشان را بر مبنای قدرت کشورها مشخص کن.
 - ۳-۴- قدرت هر امپراطوری را بر مبنای قدرت امپراطور و مستعمراتش محاسبه کن.
- ۴- حلقه زیر را تا جایی تکرار کن که تنها یک امپراطوری باقی بماند (حلقه اصلی الگوریتم).
 - ۴-۱- عملگر جذب را فعال کن، مستعمرات را با امپراطورشان ترکیب متقاطع داده و آن‌ها را به سمت امپراطور حرکت بده.
 - ۴-۲- از عملگر جهش برای جستجوی موضعی امپراطورها و برخی مستعمراتشان استفاده کن.
 - ۴-۳- قدرت هر کشور را با توجه به مقدار تابع هدف آن برآزش کن.
 - ۴-۴- قوی‌ترین کشور در هر امپراطوری را به عنوان امپراطور جدید مشخص کن.
 - ۴-۵- قدرت هر امپراطوری را بر مبنای قدرت امپراطور و مستعمراتش محاسبه کن.
 - ۴-۶- مستعمرات ضعیف‌ترین امپراطوری را توسط عملگر رقابت استعماری بین بقیه امپراطوری‌ها تقسیم کن.
- ۵- نتایج را ذخیره کن و ارائه بده.

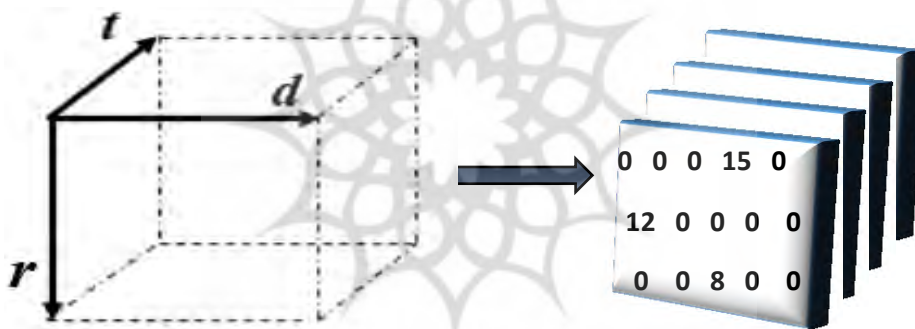
برای تشکیل کروموزوم این مسأله ابتدا یک ماتریس یک بعدی در نظر گرفته شده است که طول این ماتریس مطابق با شکل برابر با $|r|+|t|+|d|+|k|$ می باشد.

شکل ۲. ساختار کروموزوم شماره ۱ مسأله مورد بررسی

۱	...	r	۱	...	t	۱	...	d	۱	...	k
---	-----	---	---	-----	---	---	-----	---	---	-----	---

آرایه‌های ماتریس شکل ۲ به صورت صفر و یک می باشند، بدین معنی که اگر آرایه‌ای برابر با یک شد به معنای احداث تسهیل است. سپس با استفاده از جواب‌های تولید شده، کروموزوم‌های دوبعدی دیگری برای مشخص کردن میزان انتقال کالا بین تسهیلات استفاده می شود که ساختار آن در شکل ۳ آورده شده است.

شکل ۳. ساختار کروموزوم شماره ۲ مسأله مورد بررسی



در واقع بر اساس کروموزوم شکل ۳ احداث تسهیلات مشخص شده و بر اساس آن یک ماتریس سه بعدی به عنوان کروموزوم شماره ۲ تشکیل می شود که هر یک از آرایه‌های این ماتریس میزان انتقال کالا را بین تسهیلات احداث شده نشان می دهد. همچنین، به ازای هر مقدار داخل این ماتریس به مقدار برای وسیله نقلیه انتخاب شده هم تخصیص داده می شود. باید توجه داشت که با توجه به محدودیت‌ها و منطق مسأله اعداد این ماتریس باید به صورت هوشمندانه تولید شوند تا جواب‌های تولید شده موجه باشند. پس از این که کروموزوم موجه تولید شد، سایر متغیرهای مسأله را می توان با توجه به آن بدست آورد. با توجه به نحوه مدل سازی این مسأله، حل ابتکاری آن دو مرحله‌ای خواهد بود، بدین معنی که ابتدا متغیرهای استراتژیک مسأله در قالب کروموزوم شماره ۱ پاسخ

داده می‌شوند و سپس با توجه به جواب‌های حاصل شده الگوریتم برای متغیرهای تاکتیکیال مسأله اجرا شده تا جواب کلی مسأله حاصل شود.

به منظور ایجاد عملگر ترکیب متقاطع بین دو والد انتخاب شده، متناسب با کروموزوم شماره ۱ یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید می‌شود. اگر عدد تولید شده کوچکتر از $0/5$ باشد، احداث تسهیل از والد ۱ الگوبرداری می‌شود و اگر عدد تولید شده بین $0/5$ و ۱ باشد این تخصیص مطابق با تخصیص موجود در والد ۲ انتخاب خواهد شد. همان‌طور که اشاره شد، این عمل به ازای تمامی ارایه‌های ماتریس شماره ۱ انجام می‌شود. این روند برای کروموزوم شماره ۲ و در مرحله دوم این الگوریتم نیز صادق می‌باشد.

به منظور ایجاد عملگر جهش در کروموزوم‌های انتخاب شده، با توجه به درصد جهش، در هر ژن از کروموزوم انتخاب شده برای جهش، به مقدار مخالف موجود را تخصیص می‌یابد. در این حالت نیز مانند عملگر ترکیب متقاطع ممکن است کروموزوم جهش یافته غیرموجه شود که برای اجتناب از رخ دادن این اتفاق، هزینه‌ای برای این مورد در تابع برازندگی در نظر گرفته شده است. در این مرحله، کار عملگر جهش به پایان می‌رسد و مجموعه‌ی استعمارگران و مستعمران بروز می‌شوند. بدین منظور، قدرت هر کشور بر مبنای تابع هدف معرفی شده در مدل ریاضی، محاسبه شده و قوی‌ترین کشورها در هر امپراطوری به عنوان امپراطور جدید شناخته می‌شوند. اکنون نوبت به فعال کردن عملگر رقابت استعماری در بین امپراطورها می‌رسد. در این مرحله، ضعیف‌ترین امپراطوری شناسایی شده و بخشی از مستعمرات آن با توجه به قدرت محاسبه شده برای سایر امپراطوری‌ها به شکلی احتمالی یا تصادفی بین آن‌ها تقسیم می‌شوند. الگوریتم فوق تا آن‌جا ادامه پیدا می‌کند که تمام امپراطوری‌های ضعیف بر اثر مرور زمان از هم پاشیده و تنها یک امپراطوری باقی بماند. تنها امپراطور باقیمانده به عنوان بهترین جواب ذخیره شده و به نمایش درمی‌آید. حداکثر میزان همگرایی یا حداکثر تکرارهای مجاز نیز به عنوان شروط دیگر توقف در نظر گرفته شده‌اند.

در این مقاله از روش ال‌پی متریک برای حل مدل دو هدفه ارایه شده و تک‌هدفه کردن آن بهره گرفته خواهد شد. اساس روش ارایه شده، نرمال‌سازی توابع هدف و کمینه‌سازی مجموع وزنی میزان انحراف توابع هدف از مقادیر بهینه‌اشان است. اگرچه ماهیت این روش مانند روش‌های زیمرمن^۱ (۱۹۷۸)، ترابی و هسینی^۱ (۲۰۰۸)، لین^۲ (۲۰۱۲)

1. Zimmermann

و غیره، است، اما روش‌های بیان شده یک ضعف اساسی در مقایسه با روش ال‌پی متریک دارند. در روش‌های مذکور، برای تشکیل تابع عضویت جهت نرمال‌سازی توابع هدف، باید برای هر تابع هدف حد بالا و پایین تخمین زده شود که گاهی این روند منجر به صرف زمان و محاسبات طولانی می‌شود و نیاز به خلاقیت و ابتکار دارد. همچنین تخمین نادرست حدود بالا و پایین، ممکن است منجر به دست‌یابی به جواب‌های غیربهبه‌گردد. اما در روش ال‌پی متریک پیشنهادی، جهت نرمال‌سازی توابع هدف، تنها باید مقادیر بهینه هر تابع هدف به صورت جداگانه محاسبه شود. در ادامه روش ال‌پی متریک پیشنهادی آورده شده است:

$$z^{L-P} = (w_1 \times (\frac{z_1 - z_1^*}{z_1^*})^p + w_2 \times (\frac{z_2^* - z_2}{z_2^*})^p)^{\frac{1}{p}}$$

z_1 و z_2 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توابع هدف اول (از نوع کمینه‌سازی) و دوم (از نوع بیشینه‌سازی) بوده و z_1^* و z_2^* مقادیر بهینه‌ی هر یک از توابع هدف است. زمانی که مدل پیشنهادی به ازای هر تابع هدف به صورت مجزا حل شده باشد. همچنین w_1 میزان اهمیت تابع هدف اول و w_2 میزان اهمیت تابع هدف دوم می‌باشد. پارامتر p نشان‌دهنده‌ی درجه تأکید بر انحراف موجود است و می‌تواند مقادیر یک تا بی‌نهایت را اختیار نماید ولی اگر مقادیری به جز ۱ و ∞ بگیرد، منجر به غیرخطی شدن مدل خواهد شد. در روش ال‌پی متریک، تابع هدف مسأله به ازای $p=1$ به صورت،

$$Min z^{L-P} = w_1 \times (\frac{z_1 - z_1^*}{z_1^*}) + w_2 \times (\frac{z_2^* - z_2}{z_2^*})$$
تغییر یافته و توابع هدف مسأله پایه در محدودیت‌ها قرار گرفته و سایر محدودیت‌ها بدون تغییر باقی خواهند ماند.

یافته‌ها

در این بخش به بررسی عملکرد مدل و الگوریتم پیشنهادی با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده پرداخته شده است. در همین راستا، الگوریتمی جهت شبیه‌سازی داده‌ها ارائه شده و با استفاده از نرم‌افزار متلب، داده‌هایی در ابعاد مختلف (کوچک، متوسط و بزرگ) تولید می‌شوند. سپس مدل پیشنهادی به ازای داده‌های تولید شده در ابعاد کوچک

و متوسط در نرم‌افزار گمز اجرا می‌شود و برای حل مسأله در ابعاد بزرگ از الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی استفاده می‌شود. در جدول ۲، حدود پارامترها در الگوریتم، جهت شبیه‌سازی داده‌ها در ابعاد مختلف بیان شده است.

جدول ۲. حدود پارامترها در فرآیند تولید تصادفی داده‌های شبیه‌سازی

نام پارامتر	تابع توزیع
i	توسط کاربر تعیین می‌گردد
h, h'	توسط کاربر تعیین می‌گردد
f	توسط کاربر تعیین می‌گردد
c	توسط کاربر تعیین می‌گردد
r	توسط کاربر تعیین می‌گردد
d	توسط کاربر تعیین می‌گردد
k	توسط کاربر تعیین می‌گردد
t	توسط کاربر تعیین می‌گردد
$OT_{c,f}$	$Discrete\ uniform \sim [170000000, 190000000]$
OR_r	$Discrete\ uniform \sim [100000000, 120000000]$
OD_d	$Discrete\ uniform \sim [60000000, 80000000]$
OV_k	$Discrete\ uniform \sim [35000000, 45000000]$
$PR_{i,c,f}^t$	$Discrete\ uniform \sim [1250, 1350]$
$PR_{i,r}^t$	$Discrete\ uniform \sim [2300, 2400]$
$PR_{i,d}^t$	$Discrete\ uniform \sim [2300, 2400]$
$TR_{i,c,r}^t$	$Discrete\ uniform \sim [75, 100]$
$TR_{i,c,d}^t$	$Discrete\ uniform \sim [75, 100]$
$TR_{i,r,d}^t$	$Discrete\ uniform \sim [75, 100]$
$cap_{c,f}$	این پارامتر براساس مقادیر پارامتر W_{ih}^t به صورت زیر محاسبه می‌شود: $Round(3 \times \frac{\sum_{i,h} w_{ih}^t}{C})$
cap_r	این پارامتر براساس مقادیر پارامتر $cap_{c,f}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود: $Round(uniform[0.4, 0.6] \times \frac{\sum cap_{c,f}}{C \times F})$
cap_d	

این پارامتر براساس مقادیر پارامترهای cap_r و $cap_{c,f}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Round}((1 - \text{uniform}[0.4, 0.6]) \times \frac{\sum cap_{c,f}}{C \times F} + \text{uniform}[0.15, 0.25] \times \frac{\sum cap_r}{R})$$

این پارامتر براساس مقادیر پارامتر W_{ih}^t به صورت مقابل محاسبه می‌شود:

$$cap_k = \text{Round}(1.5 \times \frac{\sum W_{ih}^t}{K})$$

محل جغرافیایی بیمارستان‌ها	$x_h, x_{h'}$	$Discrete\ uniform \sim [0, 50]$
محل جغرافیایی مراکز پالایش	$y_h, y_{h'}$	$Discrete\ uniform \sim [0, 50]$
	x_c	$Discrete\ uniform \sim [0, 50]$
	y_c	$Discrete\ uniform \sim [0, 50]$

محاسبه فاصله اقلیدسی:

$$dis_{h',h} = \sqrt{(x_h - x_{h'})^2 + (y_h - y_{h'})^2}$$

محاسبه فاصله اقلیدسی:

$$dis_{h,c} = \sqrt{(x_h - x_c)^2 + (y_h - y_c)^2}$$

$$w_{i,h}^t = Discrete\ uniform \sim [120, 160]$$

$$p_{i,c,f} = Uniform \sim [0.4, 0.6]$$

$$p_{i,r} = Uniform \sim [0.15, 0.25]$$

$$population_{h',h} = Discrete\ uniform \sim [3000, 4000]$$

$$fv_t_k = Uniform \sim [0.18, 0.22]$$

$$p^{fuel} = 1000$$

برای بررسی کارایی و اعتبار مدل پیشنهادی ۱۰ مسأله با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی داده‌ها (جدول ۲)، در ابعاد کوچک و متوسط تولید شده و مدل تحقیق در عملیاتی به ازای داده‌های تولید شده در نرم‌افزار گمز اجرا شده است. ابعاد ۱۰ مسأله نمونه تهیه شده توسط الگوریتم شبیه‌سازی داده‌ها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. ابعاد مسائل کوچک و متوسط

شماره مسئله	زباله عفونی	بیمارستان	تکنولوژی پالایش	مرکز پالایش	مرکز بازیافت	مرکز دورریز	وسایط نقلیه دوره زمانی
۱	۱	۳	۲	۲	۲	۲	۲
۲	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۳
۳	۲	۴	۲	۲	۲	۲	۳
۴	۳	۴	۳	۳	۳	۲	۳
۵	۳	۵	۳	۳	۳	۳	۴
۶	۴	۵	۳	۴	۴	۳	۴
۷	۴	۶	۴	۴	۴	۴	۵
۸	۴	۶	۴	۴	۴	۴	۶
۹	۴	۷	۴	۵	۴	۴	۶
۱۰	۴	۷	۵	۶	۵	۵	۷

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، ابعاد مسئله از بالا به پایین در حال افزایش است و هر مقدار هر اندیس در مسئله‌ی بعد یا ثابت مانده یا افزایش یافته است. حال با استفاده از روش LP متریک مشروح در بخش قبلی، مسایل نمونه به ازای $w_1 = 0.7$ و $w_2 = 0.3$ در نرم افزار GAMS win64 24.1.2/ Cplex اجرا می‌شود. در جدول ۴ مقادیر توابع هدف و زمان اجرای هر یک از مسایل نمونه آورده شده است.

جدول ۴. مقادیر تابع هدف و زمان اجرا با استفاده از نرم‌افزار گمس

شماره مسئله	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	زمان اجرا
۱	۶۵۱۲۷۸۹۱۱	۱۶۸۲۲	۶/۱۵
۲	۶۷۹۴۱۱۲۸۰	۱۷۳۹۴	۱۴/۸۷
۳	۹۰۹۹۳۰۳۴۷	۳۷۲۲۰	۲۲/۰۱
۴	۱۰۱۱۸۰۰۹۷۰	۳۸۰۲۱	۴۵/۹۱
۵	۱۳۷۲۶۴۴۲۸۹	۵۵۷۶۵	۱۱۳/۶۹
۶	۱۵۰۹۴۸۴۳۱۹	۷۲۸۳۲	۲۰۷/۱۶
۷	۱۶۶۴۴۰۸۶۶۳	۹۵۲۷۲	۴۸۷/۱۵
۸	۱۸۱۵۲۶۷۷۵۷	۱۱۲۹۲۳	۶۱۴/۴۲
۹	۱۹۹۲۲۵۹۸۷۴	۱۱۸۳۵۲	۷۲۸/۴۴
۱۰	۲۱۱۳۷۴۵۶۱۶	۱۳۴۸۷۸	۸۸۵/۹۲

همان‌طور که مشاهده می‌کنید، مقادیر توابع هدف و زمان اجرا به ازای ۱۰ مسأله تولیدشده که نرم‌افزار حل دقیق قادر به حل آن‌ها در کمتر از ۱۰۰۰ ثانیه بوده است در زمره مسائل کوچک و متوسط دسته‌بندی شده‌اند. حال برای بررسی عملکرد مدل پیشنهادی، در ابعاد بزرگ، از الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی استفاده خواهیم کرد. برای اعتبارسنجی الگوریتم ارایه شده، مسایل ابعاد کوچک و متوسط را با آن حل کرده و نتایج حاصل از آن را با نتایج حل دقیق مقایسه می‌نماییم. در جدول ۵ نتایج حاصل از حل مسایل ابعاد کوچک و متوسط توسط الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی آورده شده و در جدول ۶ مقایسه نتایج توابع هدف و زمان اجرای آن‌ها گزارش می‌شود.

جدول ۵. مقادیر تابع هدف و زمان اجرا با استفاده از الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی

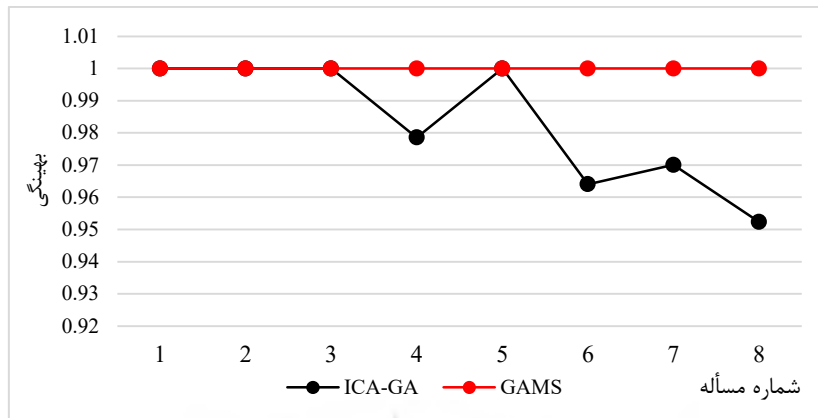
شماره مسأله	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	زمان اجرا
۱	۶۵۱۲۷۸۹۱۱	۱۶۸۲۲	۴/۶۶
۲	۶۷۹۴۱۱۲۸۰	۱۷۳۹۴	۷/۸۵
۳	۹۰۹۹۳۰۳۴۷	۳۷۲۲۰	۱۲/۱۹
۴	۱۰۲۹۹۲۷۳۸۴	۳۹۱۴۸	۲۰/۵۱
۵	۱۳۷۲۶۴۴۲۸۹	۵۵۷۶۵	۴۷/۲۲
۶	۱۵۶۳۵۱۹۳۲۹	۷۵۴۷۲	۹۶/۴۸
۷	۱۷۱۵۸۶۷۱۸۶	۹۷۹۱۲	۱۳۷/۵۵
۸	۱۸۹۶۸۳۱۳۶۸	۱۱۹۰۱۶	۱۵۴/۱۲
۹	۲۰۰۴۵۵۴۳۵۹	۱۲۰۸۰۲	۱۷۰/۸۸
۱۰	۲۱۲۸۰۴۴۴۰۴	۱۳۹۲۱۱	۱۹۶/۲۲

جدول ۶. مقایسه توابع هدف و زمان اجرای حاصل از الگوریتم پیشنهادی و حل دقیق

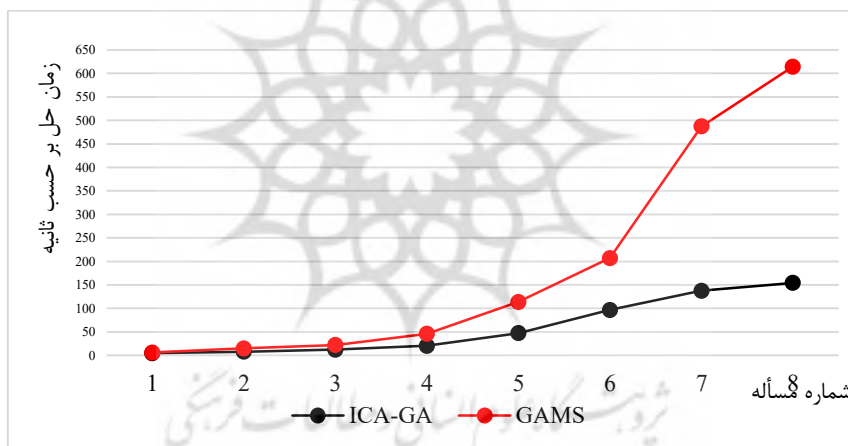
مقایسه زمان اجرا	مقایسه توابع هدف	مقایسه تابع هدف دوم	مقایسه تابع هدف اول	شماره مسأله
$\frac{Meta}{GAMS}$	$w_1 \times \phi_1 + w_2 \times \phi_2$	$\phi_2 = 1 - \frac{Meta - GAMS}{GAMS}$	$\phi_1 = 1 - \frac{Meta - GAMS}{GAMS}$	
۰/۷۵۷۷	۱	۱	۱	۱
۰/۵۲۷۹	۱	۱	۱	۲
۰/۵۵۳۸	۱	۱	۱	۳
۰/۴۴۶۷	۰/۹۷۸۵۶۹	۰/۹۷۰۳۶۴	۰/۹۸۲۰۸۵	۴
۰/۴۱۵۳	۱	۱	۱	۵
۰/۴۶۵۷	۰/۹۶۴۰۶۸	۰/۹۶۳۷۵۲	۰/۹۶۴۲۰۳	۶
۰/۲۸۲۳	۰/۹۷۰۰۴۵	۰/۹۷۲۲۹	۰/۹۶۹۰۸۳	۷
۰/۲۵۰۸	۰/۹۵۲۳۶	۰/۹۴۶۰۴۳	۰/۹۵۵۰۶۸	۸
۰/۲۳۱۷	۰/۹۷۷۲۲۸	۰/۹۷۰۲۹۸	۰/۹۸۰۲۹۸	۹
۰/۲۲۱۴	۰/۹۴۶۱۹۶	۰/۹۵۸۱۲۳	۰/۹۴۱۰۸۴	۱۰
۰/۴۱۵۳	۰/۹۷۸۸۵	۰/۹۷۸۰۹	۰/۹۷۹۱۸	میانگین

عملکرد نسبی الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی در حل مسایل کوچک و متوسط در مقایسه با حل دقیق در دو محور بهینگی و زمان اجرا در جدول ۵ آورده شده است. مشاهده می شود که الگوریتم فراابتکاری توانسته است در زمینه حل مسایل کوچک و متوسط به طور میانگین به تقریباً بیش از ۹۷ درصد از بهینگی در ۰/۴۱ از زمان حل دقیق دست یابد. هم چنین از جدول فوق مشخص می گردد که در چهار مورد از هشت مسأله نمونه، جواب نهایی الگوریتم فراابتکاری بر حل دقیق آن منطبق شده است که این نتایج حاکی از عملکرد دقیق و کارایی بالای الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی است. در ادامه برای مقایسه مقادیر تابع هدف و زمان حل الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی و حل دقیق در حل مسایل نمونه با سائز کوچک و متوسط به ترتیب از شکل های ۴ و ۵ استفاده شده است.

شکل ۴. شکاف بهینگی (بهینگی نسبی) الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی



شکل ۵. مقایسه زمان حل الگوریتم فراابتکاری و حل دقیق



براساس نتایج به دست آمده، چنین استنباط می‌شود که از توانایی بهینه‌یابی الگوریتم فراابتکاری در قیاس با حل دقیق با افزایش ابعاد مساله به صورت جزئی کاسته شده و در ازای آن سرعت بهینه‌یابی الگوریتم فراابتکاری در قیاس با حل دقیق به شدت افزایش می‌یابد. انتظار می‌رود که با افزایش پیچیدگی مسائل، تفاوت بین عملکرد دو روش حل بیش از پیش نمایان گردد. به عبارت دیگر مشاهده می‌شود که با رشد ابعاد مسایل نمونه نسبت بهینگی و زمان حل الگوریتم‌های فراابتکاری در مقایسه با حل دقیق به طور همزمان کاهش

می‌یابند. به طور کلی عملکرد الگوریتم فراابتکاری ارایه شده در هر دو محور بهینگی جواب‌ها و زمان حل بسیار مطلوب ارزیابی می‌شود. در ادامه با استفاده از الگوریتم پیشنهادی به حل چند مسأله در ابعاد بزرگ پرداخته خواهد شد.

حل مسایل در ابعاد بزرگ توسط الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی

در بخش قبلی به اعتبارسنجی الگوریتم تلفیقی رقابت استعماری و ژنتیک از طریق مقایسه نتایج آن با نتایج حل دقیق پرداخته شد و کارایی و اثربخشی آن تأیید شد. در این بخش از الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی برای حل سه مسأله در ابعاد بزرگ بهره گرفته می‌شود. ابعاد مسایل بزرگ در جدول ۷ آورده شده است. حد زمانی برای نرم‌افزار گمس ۲۵۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده و همچنین شرط توقف الگوریتم پیشنهادی قبل از همگرا شدن نیز ۲۵۰۰ ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۸ نتایج حاصل از اجرای مسایل بزرگ در نرم‌افزار گمس و الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است.

جدول ۷. ابعاد مسائل بزرگ

شماره مسأله	زیاله عفونی	بیمارستان	تکنولوژی پالایش	مرکز پالایش	مرکز بازیافت	مرکز دورریز	وسایط نقلیه	دوره زمانی
۱۱	۵	۱۱	۵	۶	۵	۵	۷	۸
۱۲	۶	۱۱	۶	۷	۶	۶	۷	۱۰
۱۳	۶	۱۲	۷	۸	۷	۷	۸	۱۲
۱۴	۷	۱۲	۷	۸	۷	۷	۸	۱۴
۱۵	۷	۱۳	۷	۸	۷	۷	۱۰	۱۶
۱۶	۸	۱۳	۷	۸	۷	۷	۱۰	۱۸
۱۷	۸	۱۴	۸	۹	۸	۸	۱۲	۲۰
۱۸	۸	۱۴	۸	۹	۸	۸	۱۲	۲۲

جدول ۸. نتایج حاصل از حل مسایل در ابعاد بزرگ توسط الگوریتم فراابتکاری و حل دقیق

شماره مسأله	ICA-GA			GAMS		
	دلیل توقف ICA-GA	دلیل توقف GAMS	تابع هدف ۱ تابع هدف ۲ زمان حل	تابع هدف ۱ تابع هدف ۲ زمان حل	تابع هدف ۱ تابع هدف ۲ زمان حل	تابع هدف ۱ تابع هدف ۲ زمان حل
۱۱	همگرایی	حد زمانی	۸۷۷ ۱۴۴۲۱۵ ۳۷۵۲۰۴۸۴۳۲	۲۵۰۰ ۱۵۰۲۲۰ ۳۹۳۹۸۲۰۲۶۴		
۱۲	همگرایی	حد زمانی	۱۹۶۴ ۱۴۹۹۳۱ ۴۱۲۸۹۸۷۷۱۰	۲۵۰۰ ۱۶۱۲۱۵ ۴۳۹۲۵۴۰۱۱۶		
۱۳	همگرایی	حد زمانی	۲۱۴۸ ۱۸۸۶۹۴ ۵۴۷۲۳۰۹۲۴	- - -		
۱۴	همگرایی	حد زمانی	۲۳۸۹ ۱۹۶۱۴۴ ۶۵۹۲۳۲۱۶۷۱	- - -		
۱۵	حد زمانی	Out of memory	۲۵۰۰ ۲۱۸۰۰۷ ۷۱۱۰۹۷۱۲۴۴	- - -		
۱۶	حد زمانی	Out of memory	۲۵۰۰ ۲۲۵۶۶۳ ۷۹۴۴۳۸۴۵۶۸	- - -		
۱۷	حد زمانی	Out of memory	۲۵۰۰ ۲۴۴۸۱۲ ۹۰۳۲۵۴۸۸۵۴	- - -		
۱۸	حد زمانی	Out of memory	۲۵۰۰ ۲۴۸۶۶۵ ۹۸۶۲۲۰۰۸۴۲	- - -		

همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، نرم‌افزار گمس قادر به حل مسأله شماره ۱۳ نبوده و قبل از رسیدن به یک جواب شدنی، حافظه موقت سیستم اشباع شده و دلیل این امر رشد نمایی و پیچیدگی بالای مسأله است. همچنین دلیل توقف نرم‌افزار گمس در مورد مسایل ۱۱ و ۱۲، محدودیت زمانی ۲۵۰۰ ثانیه است که بر روی نرم‌افزار اعمال شده و قبل از همگرایی حل دقیق اتفاق افتاده است. این در حالی است که الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی در مسأله ۱۳ که نرم‌افزار گمس قادر به حل آن نبود در حد زمانی ۲۵۰۰ ثانیه به یک جواب شدنی قابل قبول دست یافته است و در مورد مسایل ۱۱ و ۱۲ عملکرد بهتری نسبت به حل دقیق داشته و توانسته در این مسایل به ترتیب بیش از ۴ و ۶ درصد بهبود عملکرد نسبت به حل دقیق داشته باشد. این امر حاکی از آن است که در مسایل ابعاد بزرگ که نرم‌افزار حل دقیق از حل آن عاجز است، الگوریتم پیشنهادی عملکرد قابل قبول و رضایت‌بخشی ارائه می‌دهد.

جهت بررسی جواب‌های تولید شده توسط الگوریتم پیشنهاد شده، مساله توسط دو الگوریتم دیگر نیز حل شده است. این دو الگوریتم شبیه‌سازی تبرید^۱ و بهینه‌سازی تجمعی ذرات^۲ هستند. نتایج اجرای این الگوریتم‌ها از چند جهت مورد بررسی قرار گرفته است.

1. Simulated annealing (SA)
2. Particle swarm optimization (PSO)

تنها مسایل اندازه بزرگ توسط الگوریتم‌ها حل شده و به ازای هر مساله، هر یک از الگوریتم‌ها ۵ مرتبه اجرا شده و نتایج به صورت میانگین در جدول ذیل گزارش شده است. مطابق این نتایج، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به صورت سریع‌تر اجرا می‌شود ولی جواب‌های آن دارای کیفیت پایین‌تری نسبت به دو الگوریتم دیگر می‌باشد. از طرف دیگر زمان اجرای الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی ذرات به صورت ملموسی بیشتر بوده ولی جواب‌های آن مشابه الگوریتم ارائه شده در این مقاله می‌باشد.

جدول ۹. نتایج حاصل از مقایسه الگوریتم پیشنهاد شده با الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید و بهینه‌سازی

تجمعی ذرات

سؤال	ICA-GA		SA		PSO	
	تابع هدف ۱	تابع هدف ۲	زمان حل	تابع هدف ۲	تابع هدف ۱	تابع هدف ۲
۱۱	۳۷۵۲۰۴۸۴۳۲	۱۴۴۲۱۵	۸۷۷	۳۷۵۳۲۵۵۸۶۲	۱۴۳۰۸۶	۸۰۰۸۷
۱۲	۴۱۲۸۹۸۷۷۱۰	۱۴۹۹۳۱	۱۹۶۴	۴۳۲۶۶۳۲۰۱۸	۱۵۰۸۸۹	۱۸۶۸
۱۳	۵۴۷۲۳۳۰۹۲۴	۱۸۸۶۹۴	۲۱۴۸	۵۴۷۴۴۰۰۳۸۱	۱۹۱۰۰۲	۲۰۴۹
۱۴	۶۵۹۲۳۲۱۶۷۱	۱۹۶۱۴۴	۲۳۸۹	۶۶۳۰۱۴۲۵۷۶	۱۹۷۵۵۳	۲۲۱۰
۱۵	۷۱۱۰۹۷۱۲۴۴	۲۱۸۰۰۷	۲۵۰۰	۷۱۱۱۹۶۶۲۴۸	۲۱۸۹۵۸	۲۴۴۰
۱۶	۷۹۴۴۳۸۴۵۶۸	۲۲۵۶۶۳	۲۵۰۰	۷۸۹۴۲۸۹۶۹۰	۲۲۷۰۹۱	۲۵۰۰
۱۷	۹۰۳۲۵۴۸۸۵۴	۲۴۴۸۱۲	۲۵۰۰	۹۰۹۰۵۶۵۴۲۱	۲۴۶۶۵۸	۲۵۰۰
۱۸	۹۸۶۲۲۰۰۸۴۲	۲۴۸۶۶۵	۲۵۰۰	۹۹۰۸۰۳۸۸۱۰	۲۵۰۸۱۰	۲۵۰۰

از سوی دیگر، مقایسه بین انحراف معیارهای سه الگوریتم نشان می‌دهد که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید همگرایی مناسبی نداشته و جواب‌هایی که تولید می‌کند هرچند برای یک مساله، دارای تفاوت زیادی می‌باشد. اما الگوریتم پیشنهاد شده انحراف معیار کمتری دارد و این بدین دلیل است که از روش ترکیبی برای آن استفاده شده و به خوبی می‌تواند فضای جواب را جستجو کند. شایان ذکر است که این معیار در کنار متوسط جواب‌های تولید شده (جدول ۹) قابل تفسیر می‌باشد. نتایج این مقایسه در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۰. نتایج حاصل از مقایسه انجراف معیار جواب‌های الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید و بهینه‌سازی تجمعی ذارت

الگوریتم	ICA-GA	SA	PSO
تابع هدف ۱	۸۶۹۸۴۶۲	۱۰۰۸۱۱۱۹	۹۰۹۷۳۳۴
تابع هدف ۲	۱۶۶۷	۱۸۱۲	۱۷۶۰

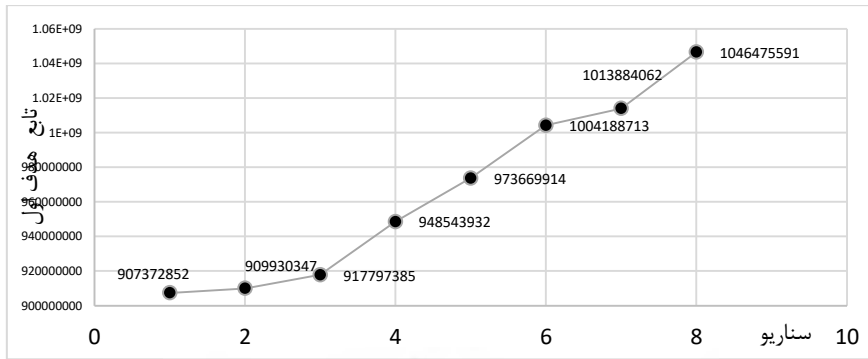
تحلیل حساسیت

در این بخش به منظور بررسی صحت و دقت عملکرد مدل پیشنهادی و اعتبارسنجی نتایج حاصل از اجرای مدل، حساسیت مدل نسبت به تغییر در پارامتر ضرایب توابع هدف به ازای مسأله شماره ۳ سنجیده خواهد شد. به دلیل این که هر دو تابع هدف مدل پیشنهادی از نوع کمینه‌سازی هستند، انتظار می‌رود که با افزایش ضریب تابع هدف اول و کاهش ضریب تابع هدف دوم، مقدار تابع هدف اول بدتر نشود (یا ثابت بماند یا کاهش یابد) و مقدار تابع هدف دوم نیز بهتر نشود (یا ثابت بماند یا افزایش یابد). همچنین با افزایش ضریب تابع هدف دوم و کاهش ضریب تابع هدف اول، انتظار می‌رود که مقدار تابع هدف اول بهتر نشود و مقدار تابع هدف دوم بدتر نشود. در جدول ۱۰ مقادیر توابع هدف به ازای ضرایب توابع هدف مختلف آورده شده است. همچنین در شکل ۶ و ۷ به ترتیب روند تغییرات تابع هدف اول و دوم به ازای سناریوهای مختلف نشان داده شده است و در شکل ۸ مرز تصمیم‌گیری به ازای سناریوهای مختلف (مرز پارتو) نشان داده شده است تا تصمیم‌گیرنده براساس این مرز، سناریو دلخواه و مورد نظر خود را جهت تصمیم‌گیری انتخاب نماید.

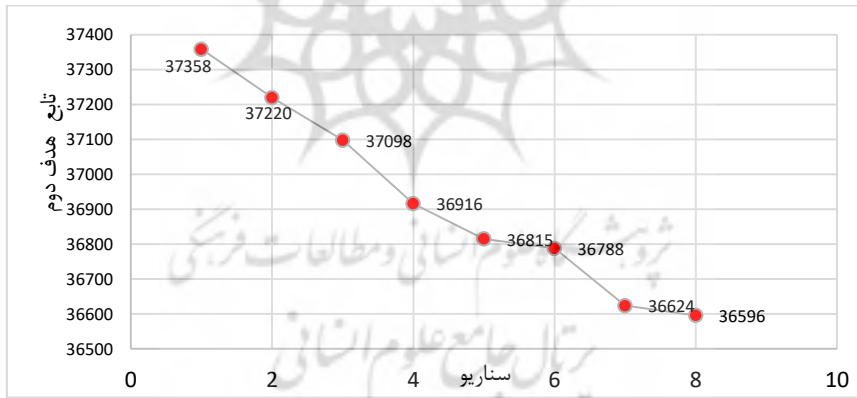
جدول ۱۰: مقادیر توابع هدف به ازای تحلیل حساسیت ضرایب توابع هدف

شماره سناریو	W_1	W_2	تابع هدف اول	تابع هدف دوم
۱	۰/۷۵	۰/۲۵	۹۰۷۳۷۲۸۵۲	۳۷۳۵۸
۲	۰/۷	۰/۳	۹۰۹۹۳۰۳۴۷	۳۷۲۲۰
۳	۰/۶۵	۰/۳۵	۹۱۷۷۹۷۳۸۵	۳۷۰۹۸
۴	۰/۶	۰/۴	۹۴۸۵۴۳۹۳۲	۳۶۹۱۶
۵	۰/۵۵	۰/۴۵	۹۷۳۶۶۹۹۱۴	۳۶۸۱۵
۶	۰/۵	۰/۵	۱۰۰۴۱۸۸۷۱۳	۳۶۷۸۸
۷	۰/۴۵	۰/۵۵	۱۰۱۳۸۸۴۰۶۲	۳۶۶۲۴
۸	۰/۴	۰/۶	۱۰۴۶۴۷۵۵۹۱	۳۶۵۹۶

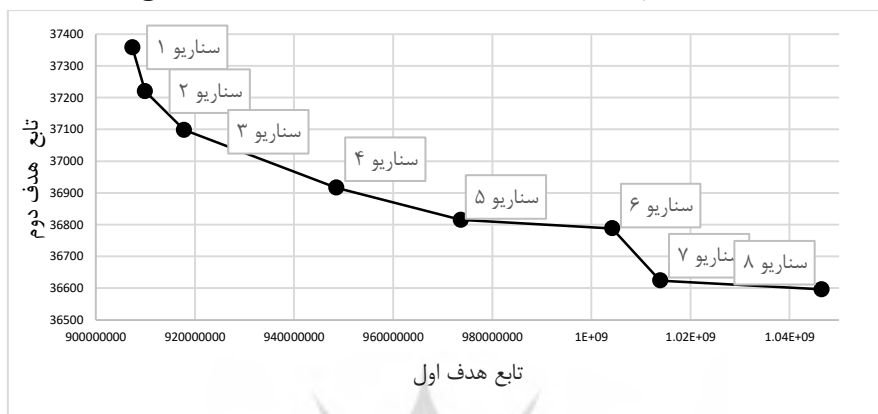
شکل ۶. روند تغییرات تابع هدف اول به ازای تحلیل حساسیت ضرایب توابع هدف



شکل ۷. روند تغییرات تابع هدف دوم به ازای تحلیل حساسیت ضرایب توابع هدف



شکل ۸. مرز تصمیم‌گیری (پارتوی) حاصل از تحلیل حساسیت ضرایب توابع هدف



همان‌طور که در جدول ۱۲ و اشکال ۶ تا ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب تابع هدف اول مقدار آن تابع هدف کاهش (بهبود) یافته و با کاهش ضریب آن، مقدار تابع هدف مذکور افزایش یافته است. همچنین با کاهش ضریب تابع هدف دوم، مقدار تابع هدف بهتر نشده و با افزایش آن مقدار تابع هدف بدتر نشده است که این نتایج دقیقاً منطبق بر انتظار منطقی ما از عملکرد مدل پیشنهادی است. نکته دیگری که در شکل‌های ۶ تا ۸ نهفته است مربوط به تضاد بین توابع هدف است. همان‌طور که در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود در هر سناریو که تابع هدف اول افزایش یافته است متناسب با آن تابع هدف دوم کاهش یافته است و برعکس. تضاد بین این دو تابع هدف به طور واضح در شکل ۸ نیز به تصویر کشیده شده است. بنابراین بر اساس نتایج به دست آمده و عملکرد منطقی مدل در فرایند تحلیل حساسیت، صحت و اعتبار مدل تأیید می‌شود.

برداشت‌های مدیریتی

در این مقاله، یک مدل ریاضی برای طراحی یک شبکه جهت مدیریت و جمع‌آوری پسماندهای پزشکی توسعه داده شد. اگر چه برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده، از داده‌های شبیه‌سازی شده استفاده شده، اما این مدل می‌تواند در شرایط مختلفی کاربرد داشته باشد و نتایج حاصل از آن می‌تواند به عنوان سیستم پشتیبان تصمیم در تصمیم‌گیری‌ها به مدیران و

صاحبان صنایع کمک نماید که برخی از آن‌ها در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از کاربردهای مدل ارایه شده، امکان جمع‌آوری پسماندهای بیمارستانی در شرایط اپیدمی ویروس کرونا است که در برخی از مقالات مشابه مانند کارگر و همکاران (۲۰۲۰) و نیک‌ضمیر و برادران (۲۰۲۰) نیز مورد توجه قرار گرفته است. همچنین این مدل برای جمع‌آوری مواد خطرناک تولیدشده توسط صنایع نیز کاربرد دارد؛ چرا که تابع هدف دوم این مقاله مختص مدیریت مواد خطرناک طراحی شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط خطی دوهدفه شامل اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره و کمینه‌سازی ریسک جمعیت در معرض انتشار آلودگی ناشی از زباله‌های عفونی توسعه داده شد. مدل پیشنهادی به مکان‌یابی مراکز پالایش و انتخاب نوع تکنولوژی پالایش، مکان‌یابی مراکز بازیافت و دورریز پرداخته و همزمان به مسیریابی خودروهای جمع‌آوری زباله‌های عفونی از بیمارستان‌ها می‌پردازد. سپس از روش ال‌پی‌متریک جهت تک‌هدفه کردن مدل دوهدفه ارایه شده بهره گرفته شد و مدل پیشنهادی به ازای داده‌های شبیه‌سازی شده در ابعاد کوچک و متوسط در نرم‌افزار گمس اجرا شد. سپس یک الگوریتم فراابتکاری تلفیقی مبتنی بر رقابت استعماری و ژنتیک توسعه داده شد و از طریق مقایسه نتایج آن با نتایج حل دقیق در ابعاد کوچک و متوسط، اعتبار الگوریتم پیشنهادی مورد سنجش قرار گرفت. از دو معیار بهینگی جواب‌ها و زمان اجرا، برای این مقایسه بهره گرفته شد. الگوریتم پیشنهادی در ۱۰ مسأله مورد بررسی توانست به طور میانگین به بیش از ۹۷٪ از بهینگی جواب‌ها در ۰/۴۱ از زمان حل دقیق دست یابد که این نتایج مؤید کارایی و اعتبار الگوریتم پیشنهادی بود. سپس ۸ مسأله در ابعاد بزرگ شبیه‌سازی شد و عملکرد الگوریتم پیشنهادی با عملکرد حل دقیق مورد مقایسه قرار گرفت و تعیین شد که الگوریتم پیشنهادی در ابعاد بزرگ بسیار کارا و اثربخش است. در این تحقیق از معیار جمعیت موجود در مسیر عبوری توسط وسیله نقلیه برای در نظر گرفتن ریسک انتشار بیماری‌های عفونی استفاده شد. این در حالی است که معیارهای دیگری از جمله، مدت زمان عبور خودرو از مسیر مورد نظر، شعاع انتشار آلودگی، نوع فرد در معرض انتشار (گروه حساس، گروه غیرحساس و کودکان) و غیره پارامترهایی هستند که در نظر گرفتن آن‌ها می‌تواند مدل را به دنیای واقعی نزدیکتر نماید که پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی مورد مطالعه قرار گیرد.

تعارض منافع

تعارض منافع ندارم.

ORCID

- Mohammad Nizkamir  <http://orcid.org/0000-0001-5495-1926>
- Vahid Baradaran  <http://orcid.org/0000-0001-5385-629X>
- Yunes Panahi  <http://orcid.org/0000-0002-2504-8356>

منابع

- جقتایی نوایی، مهدی، محمودیان، وحید، فضلی، مهدی، بزرگی امیری، علی. (۱۳۹۵). یک مدل چندهدفه مکان‌یابی - مسیریابی برای احداث مراکز پالایش، بازیافت و دفع زباله‌های بیمارستانی، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۲۷ (۲)، ۲۶۲-۲۷۴.

References

- Alagöz, A. Z., & Kocasoy, G. (2008). Determination of the best appropriate management methods for the health-care wastes in Istanbul, *Waste Management*, 28(7), 1227-1235.
- Al-Khatib, I. A., & Sato, C. (2009). Solid health care waste management status at health care centers in the West Bank–Palestinian Territory, *Waste management*, 29(8), 2398-2403.
- Altin, S., Altin, A., Eevli, B., & Cerit, O. (2003). Determination of hospital waste composition and disposal methods: a case study, *Polish Journal of Environmental Studies*, 12(2), 251-255.
- Askarian, M., Heidarpour, P., & Assadian, O. (2010). A total quality management approach to healthcare waste management in Namazi Hospital, Iran, *Waste management*, 30(11), 2321-2326.
- Atashpaz-Gargari, E., & Lucas, C. (2007, September). Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, *In Evolutionary computation*, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on (pp. 4661-4667). IEEE.
- Babae Tirkolaee, E., Abbasian, P., & Weber, G. W. (2020). Sustainable fuzzy multi-trip location-routing problem for the epidemic outbreak of the novel Coronavirus (COVID-19). *Science of The Total Environment*, 143607.
- Babae Tirkolaee, E., Abbasian, P., Soltani, M., & Ghaffarian, S. A. (2019). Developing an applied algorithm for multi-trip vehicle routing problem with time windows in urban waste collection: A case study, *Waste Management & Research*, 37(1_suppl), 4-13.
- Chartier, Y. (Ed.). (2014). Safe management of wastes from health-care activities. World Health Organization.
- Ferronato, N., Alarcón, G. P. P., Lizarazu, E. G. G., & Torretta, V. (2020). Assessment of municipal solid waste collection in Bolivia:

- Perspectives for avoiding uncontrolled disposal and boosting waste recycling options, *Resources, Conservation and Recycling*, 105234.
- 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.
- Hachicha, W., Mellouli, M., Khemakhem, M., & Chabchoub, H. (2014). Routing system for infectious healthcare-waste transportation in Tunisia: A case study, *Environmental Engineering and Management Journal*, 13(1), 21-29.
- Hajar, Z., Btissam, D., & Mohamed, R. (2018, April). Onsite medical waste multi-objective vehicle routing problem with time windows, *In 2018 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)*, 1-5. IEEE.
- Homayouni, Z., & Pishvae, M. S. (2020). A bi-objective robust optimization model for hazardous hospital waste collection and disposal network design problem, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(6), 1965-1984.
- 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.
- Khalifehzadeh, S., Fakhrzad, M. B., Mehrjerdi, Y. Z., & Hosseini_Nasab, H. (2019). Two effective metaheuristic algorithms for solving a stochastic optimization model of a multi-echelon supply chain, *Applied Soft Computing*, 76, 545-563.
- Komilis, D., Katsafaros, N., & Vassilopoulos, P. (2011). Hazardous medical waste generation in Greece: case studies from medical facilities in Attica and from a small insular hospital, *Waste Management & Research*, 29(8), 807-814.
- Lin, R. H. (2012). An integrated model for supplier selection under a fuzzy situation, *International Journal of Production Economics*, 138(1), 55-61.
- Mantzaras, G., & Voudrias, E. A. (2017). An optimization model for collection, haul, transfer, treatment and disposal of infectious medical waste: Application to a Greek region, *Waste Management*, 69, 518-534.
- Nazari-Shirkouhi, S., Eivazy, H., Ghodsi, R., Rezaie, K., & Atashpaz-Gargari, E. (2010). Solving the integrated product mix-outsourcing problem using the imperialist competitive algorithm, *Expert Systems with Applications*, 37(12), 7615-7626.
- 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.
- Nolz, P. C., Absi, N., & Feillet, D. (2014). A stochastic inventory routing problem for infectious medical waste collection, *Networks*, 63(1), 82-95.

- Pakzad-Moghaddam, S. H., Mina, H., & Mostafazadeh, P. (2019). A novel optimization booster algorithm, *Computers & Industrial Engineering*, 136, 591-613.
- Pakzad-Moghaddam, S. H., Mina, H., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014). An approach for modeling a new single machine scheduling problem with deteriorating and learning effects, *Computers & Industrial Engineering*, 78, 33-43.
- Qazvini, Z. E., Amalnick, M. S., & Mina, H. (2016). A green multi-depot location routing model with split-delivery and time window, *International Journal of Management Concepts and Philosophy*, 9(4), 271-282.
- 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.
- Shanmugasundaram, J., Soulalay, V., & Chettiyappan, V. (2012). Geographic information system-based healthcare waste management planning for treatment site location and optimal transportation routing, *Waste Management & Research*, 30(6), 587-595.
- Shi, L. H. (2009, September). A mixed integer linear programming for medical waste reverse logistics network design., 2009. ICMSE 2009, IEEE International Conference on In Management Science and Engineering, 1971-1975.
- Shih, L. H., & Chang, H. C. (2001). A routing and scheduling system for infectious waste collection, *Environmental Modeling & Assessment*, 6(4), 261-269.
- Thakur, V., Thakur, V., Ramesh, A., & Ramesh, A. (2017). Healthcare waste disposal strategy selection using grey-AHP approach, *Benchmarking: An International Journal*, 24(3), 735-749.
- Torabi, S. A., & Hassini, E. (2008). An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning, *Fuzzy sets and systems*, 159(2), 193-214.
- Wichapa, N., & Khokhajaikiat, P. (2018). Solving a multi-objective location routing problem for infectious waste disposal using hybrid goal programming and hybrid genetic algorithm, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 9(1), 75-98.
- Zimmermann, H. J. (1978). Fuzzy programming and linear programming with several objective functions, *Fuzzy sets and systems*, 1(1), 45-55.
- Joghtaei, M., Mahmoodian, V., Fazli, M., & Bozorgi-Amirai, A. (2016). A Multi Objective Location-Routing Model for Treatment, Recycling and Disposal Centers of Hospital Wastes. *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, 27(2), 262-274. [In Persian].

In Persian

- Joghtaei, M., Mahmoodian, M., Fazli, M., & Bozorgi-Amiri, A. (2016). A Multi Objective Location-Routing Model for Treatment, Recycling and Disposal Centers of Hospital Wastes, *International Journal of Industrial Engineering and Production Management*, 27(2), 261-274.