



Research in Production and Operations Management

University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329

Vol. 16, Issue 1, No. 40, Spring 2025



<https://doi.org/10.22108/pom.2025.143209.1592>

(Research paper)

Solving Hospital Facility Layout Problem Using Metaheuristic Algorithms The Case of Khatam-al-Anbia Hospital in Iranshahr

Somayeh Anjam

Department of Mathematics, Faculty of Basic Sciences, Velayat University, Iranshahr, Iran,
Somayeh.anjam1@gmail.com

Narjes Sabeghi*

Department of Mathematics, Faculty of Basic Sciences, Velayat University, Iranshahr, Iran,
n.sabeghi@velayat.ac.ir

Purpose: This study presents a case analysis on facility layout in a specific hospital, addressing a gap in the literature where limited research has investigated the application of metaheuristic algorithms to real-world hospital facility layout challenges. By utilizing these methods, not only was the relocation cost of patients and staff effectively optimized, but the impacts of this optimization were also assessed within an actual hospital environment. The study demonstrates how these selected algorithms can significantly reduce costs and enhance operational efficiency, while also uniquely examining their tangible outcomes in a real-world hospital context. Unlike similar studies, this work directly focuses on the concrete results of algorithm implementation and provides a thorough comparison of costs before and after their application. These practical insights represent a notable advancement in the real-world application of such algorithms and offer actionable solutions for hospital managers.

Design/methodology/approach: Improving hospital efficiency largely relies on minimizing the movement of patients and healthcare staff within and between departments, as well as to and from the hospital entrance. To achieve this, the study formulates an objective function that minimizes the distance between highly interactive departments. Given that facility layout problems are classified as NP-hard, metaheuristic algorithms are frequently employed to find effective solutions. In this research, two metaheuristic algorithms—Genetic Algorithm (GA) and Simulated Annealing (SA)—

* Corresponding author, 0000-0002-8778-2150

2981-0329 / © University of Isfahan



This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

were utilized to determine the optimal layout for the departments of Khatam-al-Anbia Hospital in Iranshahr.

Findings: The solutions derived from the Genetic Algorithm and Simulated Annealing demonstrated a notable enhancement compared to the hospital's current layout. The results clearly indicate, from a theoretical standpoint, that the existing departmental arrangement is highly inefficient when juxtaposed with the optimized layouts produced by these two algorithms. Consequently, utilizing these metaheuristic algorithms for facility layout facilitates the identification of cost-effective configurations, providing significant practical value for real-world hospital applications.

Research limitations/implications: This study encountered two primary limitations. First, accurate data regarding the number of patients' companions, accompanying healthcare personnel, and their movement patterns within and between departments were unavailable. Consequently, this information was omitted from the analysis. The second limitation pertained to the non-uniform area sizes of hospital departments in the facility layout problem of Khatam-al-Anbia Hospital in Iranshahr. This simplification may pose practical challenges for implementing the proposed layout. To mitigate this issue, departments with significantly larger or smaller areas compared to others were excluded from the model, and their locations were treated as fixed, based on their current positions in the hospital layout.

Practical implications: Based on the findings of this study, it is advisable that scientific methods—such as those outlined in this research—be utilized in the initial planning and layout of hospital departments. This approach can significantly improve the operational efficiency of healthcare facilities, resulting in substantial enhancements in resource allocation, workflow efficiency, and service delivery quality.

Social implications: Enhancing hospital department layouts through scientific and data-driven methods can lead to more efficient healthcare delivery, decreased patient and staff fatigue, and reduced waiting or transfer times. These enhancements can improve the overall patient experience and quality of care, especially in resource-constrained or underserved areas. Ultimately, such optimizations support broader public health objectives by fostering more effective and equitable healthcare services.

Originality/value: The findings of this study illustrate how applied metaheuristic algorithms can effectively lower costs and boost operational efficiency in real-world contexts. These practical aspects underscore a significant innovation in the real-world application of such algorithms, providing actionable insights for hospital managers and other organizations aiming to enhance facility layout through data-driven decision-making.

Keywords: Optimization, Hospital facility layout, Genetic algorithm, Simulated Annealing algorithm, Hospital efficiency



پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۶، شماره ۱، پیاپی ۴۰، بهار ۱۴۰۴

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۹ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰ ص ۱۲۱-۱۳۷



<https://doi.org/10.22108/pom.2025.143209.1592>

(مقاله پژوهشی)

حل مسئله چیدمان تسهیلات بیمارستانی با الگوریتم‌های فراابتکاری مطالعه موردی: بیمارستان خاتم‌الانبیای ایرانشهر

سمیه انجام^۱؛ نرجس سابقی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه ریاضی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران، somayeh.anjam1@gmail.com

۲- استادیار گروه ریاضی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران، n.sabeghi@velayat.ac.ir

چکیده: هدف اصلی مسئله جابجایی تسهیلات بیمارستانی، قراردادن پلی‌کلینیک‌ها، آزمایشگاه‌ها، واحدهای رادیولوژی و غیره، به‌خصوص در بیمارستان‌هایی با مقیاس بزرگ در مناطقی از پیش تعیین شده است؛ به‌طوری که هزینه جابه‌جایی بیماران و کارکنان بهداشت و درمان را به حداقل برساند. از نظر کارایی بیمارستان لازم است بخش‌هایی که تعامل بیشتری با هم دارند، نسبت به بخش‌های با تعامل کم‌تر، نزدیک یکدیگر قرار گیرند؛ بنابراین یکی از عوامل اصلی برای بالابردن کارایی بیمارستان، کم کردن حرکت بیمار و کادر بهداشت و درمان در داخل بخش‌ها و بین بخش‌ها و نیز تا ورودی بیمارستان است. برای این منظور، تابع هدف مناسب را با توجه به فاکتور جابه‌جایی، طوری تعریف کردیم که فاصله بین بخش‌های با تعامل بالا کمینه شود. این امر خود باعث کم شدن بعد مسافت طی شده از سوی بیماران و کادر درمان و همین‌طور همراهان بیماران (در صورت داشتن همراه) و کاهش هزینه جابه‌جایی بیماران و افزایش کارایی بیمارستان می‌شود. همین‌طور در تابع هدف، فاصله هر بخش تا ورودی بیمارستان و تعداد بیماران هر بخش را در نظر گرفته‌ایم تا بخش‌های پرتراфик نزدیک‌تر به ورودی بیمارستان قرار گیرند و بیماران برای رسیدن به هر بخش، هزینه کمتری را به‌لحاظ جابه‌جایی بپردازند. با توجه به اینکه مسائل جابجایی تسهیلات، مسائلی ان‌پی-سخت هستند، برای حل آنها از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود. در این مقاله برای حل مسئله به دست آوردن بهترین چیدمان برای بخش‌های مختلف بیمارستان خاتم‌الانبیای شهرستان ایرانشهر، از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده کردیم.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، چیدمان تسهیلات بیمارستانی، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، کارایی بیمارستان



۱- مقدمه

با توجه به گسترش مناطق شهری و تغییرات جمعیتی، گاهی به بررسی مجدد مکان تسهیلات موجود و در صورت لزوم، ایجاد اصلاحات در ساختار شبکه‌ها نیاز می‌شود ([Tavakkoli-Moghaddam & Korzebor, 2022](#)). جایابی تسهیلات، یکی از موضوعات اصلی در حوزه بهینه‌سازی است که جوامع به دلیل نقش بسیار مهم در کنترل هزینه‌ها، کیفیت و دسترسی به کالا و خدمات، همواره به آن توجه کرده‌اند. استفاده از ابزارهای نوین علمی برای جایابی در کشورهای پیشرفته بسیار متداول بوده و راه‌حلی برای جلوگیری از اشتباه در سازمان‌دهی خدمات و تولید محصول تلقی می‌شود. در کشورهای در حال توسعه نیز، این ابزارها در ارتقای توانایی جوامع بسیار مؤثرند. نتیجه به‌کارگیری علم روز در جایابی در هر نقطه از جهان، به‌خوبی در کیفیت خدمات و رضایت تأمین‌کنندگان و متقاضیان ثابت شده است. در اجرای جایابی، تقاضای افراد در جوامع به‌صورت پویا و ایستا در نظر گرفته می‌شود. در حیطه تأسیسات ایستا به دلیل ابعاد نسبی بالا و نبود امکان جابجایی کم‌هزینه، تصمیمات جایابی اهمیت و دقت بالایی را به خود اختصاص می‌دهند. انتخاب خدمات و مکان‌های جدید برای استقرار یا حفظ خدمات، به افزایش کارایی و آمادگی یک مرکز بهداشتی و درمانی مانند بیمارستان در ارائه خدمات منجر می‌شود و از بروز اشتباهات احتمالی جلوگیری می‌کند ([Alikhasi & Vasili, 2020](#)).

حل مسئله چیدمان تسهیلات^۱ شامل یافتن کارآمدترین چیدمان عناصر در یک مکان، با توجه به محدودیت‌های مختلف به‌منظور دستیابی به یک یا چند هدف است. یک طراحی چیدمان مؤثر تسهیلات، توان عملیاتی، بهره‌وری کلی و کارایی را افزایش می‌دهد و از ازدحام وسایل جلوگیری می‌کند ([Huo et al., 2021](#)).

تعدادی از پژوهشگران در ایران و سراسر جهان، از جنبه‌های گوناگون به مسئله ارتقای کارایی خدمات بهداشتی و درمانی توجه کرده‌اند؛ ازجمله مسائلی که در این زمینه درخور توجه قرار گرفته است، تعیین مکان مناسب برای احداث بیمارستان‌های تخصصی با هدف حداکثر پوشش در ایران ([Bashiri et al., 2016](#))، تمرکز بر انتخاب استراتژی مناسب تأمین به‌نحوی که نیازها و ترجیحات بیماران را برآورده کند ([Shahin & Rostamian, 2021](#)) و تحقیقات محدود در زمینه جایابی تسهیلات است. در بخش بعد این مقاله، تحقیقات مرتبط با مسئله جایابی تسهیلات دقیق‌تر بررسی می‌شود. اصطلاح مسئله جایابی و چیدمان تسهیلات بیمارستانی^۲ (HFLP)، به کاربرد تئوری و عمل چیدمان تسهیلات در زمینه مدیریت مراقبت‌های بهداشتی اشاره دارد. HFLP تأثیر زیادی بر کیفیت پزشکی، رضایت شغلی کارکنان پزشکی و دیگر کارکنان و رضایت بیمار دارد. با این حال و در عمل، ساختمان‌های بیمارستانی بیشتر از سوی معماران، براساس تجربیات عمومی آنها و مقررات قانونی موجود در زمان راه‌اندازی، برنامه‌ریزی می‌شوند؛ بنابراین، بدون در نظر گرفتن ملاحظات خاص مراقبت‌های بهداشتی، طراحی مجدد انجام خواهد شد و تضمین نمی‌کند که آیا طرح‌بندی ارائه‌شده برای هدف، بهینه و مناسب است یا خیر؛ بنابراین در نظر گرفتن HFLP یک عمل ضروری است و مسئله باید از طریق ریاضیات مدل شود و عوامل کل‌نگر، کاربردی و خاص مربوطه را بررسی کند ([Huo et al., 2021](#)).

در این مقاله قصد داریم به کمک الگوریتم‌های فراابتکاری، جایابی مناسبی را برای بخش‌های مختلف بیمارستان خاتم‌الانبیای ایرانشهر بیابیم و مکان فعلی بخش‌های مختلف بیمارستان را با جایابی به دست آمده از الگوریتم

مقایسه کنیم. همینطور در این پژوهش به این سؤالات پاسخ داده خواهد شد که آیا در حال حاضر این جایی برای بخش‌های مختلف بیمارستان مناسب است؟ آیا با تغییر مکان بخش‌ها و تخصیص مکان مناسب‌تر به هر بخش، کارایی بیمارستان بهبود می‌یابد؟

۲- پیشینه پژوهش

در بررسی تحقیقات انجام‌شده در زمینه جایی تسهیلات، سه نوع روش معمول برای حل این مسئله وجود دارد: اولین روش، مسئله تخصیص درجه دوم (QAP^3) است که فرض می‌کند مناطق برای هر بخش یکسان و مکان‌های معلومی دارند ([Barbosa-Póvoa et al., 2001](#))؛ دومین روش، روش‌های ابتکاری^۴ است که در حل برخی از مسائل چیدمان مؤثرند ([Singh & Sharma, 2006](#)) و سومین روش، استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP^5) است که از یک تابع هدف مبتنی بر فاصله، برای چیدمان امکانات یا تسهیلات برای بخش‌هایی با مناطق یکسان و ناهمسان استفاده می‌کند ([Lacksonen, 1997](#)).

مسئله چیدمان امکانات، را آزادی‌وار و وانگ^۶ (2000)، قراردادن تعداد داده‌شده از امکانات با اندازه‌ها و محل‌های پذیرفتنی تعریف کرده‌اند. لی و لی^۷ (2002) امکانات را در مناطق مختلف قرار دادند تا کارایی امکانات در یک محدوده بهبود یابد. شایان و چیتیلایی^۸ (2004)، مسئله چیدمان تسهیلات را یک مسئله بهینه‌سازی دانستند و آن را بررسی کردند. آنها با در نظر گرفتن تعاملات بین تسهیلات مختلف و هزینه‌های انتقال مواد، چیدمان بهینه امکانات را به دست آورده‌اند. در سال‌های اخیر، روش‌های مبتنی بر فراابتکاری^۹ و هوش ازدحامی^{۱۰} برای حل مسائل چیدمان امکانات استفاده شده است. ساهین و تورک‌بی^{۱۱} (2010) یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی جدید را برای حل مسائل چیدمان امکانات چندهدفه پیشنهاد کردند که براساس تبرید شبیه‌سازی‌شده (SA^{12}) است و از طریق فهرست ممنوع^{۱۳} پشتیبانی می‌شود. چنگ و لین^{۱۴} (2012) یک الگوریتم ترکیبی را برای مسائل چیدمان امکانات، با ادغام الگوریتم جست‌وجوی سراسری زنبور^{۱۵} و مزایای جست‌وجوی محلی بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۱۶} ارائه دادند.

هوئین و همکاران^{۱۷} (2017) هزینه بیمارستان را بررسی و سعی کردند تعداد بیمارانی را که به بیمارستان می‌آیند، تخمین بزنند و از سامانه اطلاعات جغرافیایی برای نمایش وضعیت فعلی توزیع بیماران و هزینه‌های بیمارستان استفاده کردند. یانگ و همکاران^{۱۸} (2007) یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی شبکه رادیویی ارائه کرده‌اند. برای این منظور، استراتژی‌های بهینه‌سازی براساس برخی الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر ژنتیک و تبرید شبیه‌سازی‌شده بررسی می‌شوند. آنها عملکرد این الگوریتم‌های فراابتکاری را از نظر مدل ریاضی برای مسئله برنامه‌ریزی موقعیت ایستگاه پایه مقایسه کردند که به‌عنوان یک مسئله p -میانه^{۱۹} مدل شده است. قادری و جبل‌عاملی مسئله جایی ظرفیت پویا و شبکه تسهیلات بدون محدودیت را با در نظر گرفتن محدودیت‌های بودجه، بررسی و برای آن یک مدل برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح مختلط ارائه کردند. آنها برای کاربرد مسئله، دسترسی به امکانات بهداشتی در استان ایلام ایران را به‌عنوان یک مطالعه موردی بررسی کردند. برای حل مدل پیشنهادی، از الگوریتم‌های جست‌وجوی حریرانه^{۲۰} و بهینه‌سازی براساس شبیه‌سازی تبرید و روش دقیق استفاده شده است. آنان عملکرد الگوریتم‌های ارائه‌شده را با استفاده از مثال عددی بررسی کردند ([Ghaderi & Jabalameli, 2013](#)). به‌تازگی تانگور و همکاران^{۲۱} (2020)، چیدمان واحدهای مختلف نظیر پلی‌کلینیک، آزمایشگاه و رادیولوژی را برای یک بیمارستان بزرگ

دانشگاهی، با استفاده از سه الگوریتم فراابتکاری، بهینه‌سازی پرنده مهاجر^{۲۲}، جست‌وجوی ممنوع^{۲۳} و تبرید شبیه‌سازی‌شده، سازمان‌دهی کردند.

همان‌طور که ذکر شد، چندین مطالعه در پیشینه بر مسائل چیدمان امکانات مختلف تمرکز داشته‌اند؛ اما مطابق اطلاعات ما، تنها چند مطالعه درباره مسائل چیدمان بیمارستان وجود دارد. هدف این مقاله، توسعه چیدمان امکانات برای بیمارستان خاتم‌الانبیای ایرانشهر با کمینه‌سازی هزینه جابه‌جایی بیماران است. این کاهش هزینه با کمینه‌سازی سفر بین اجزای در دسترس است. در این مسئله، ما به دنبال بهترین ترتیب ممکن از بخش‌ها در داخل منطقه از پیش تعیین شده هستیم تا فاصله بین بخش‌هایی را کاهش دهد که با یکدیگر ارتباط نزدیکی دارند.

۳- روش‌شناسی پژوهش

در این مقاله برای یافتن بهترین جایابی ممکن برای بخش‌های مختلف بیمارستان خاتم‌الانبیای ایرانشهر در مناطق از پیش تعیین شده می‌کوشیم؛ به گونه‌ای که بخش‌هایی که تعامل بیشتری با یکدیگر دارند، نزدیک یکدیگر قرار گیرند. به عبارت دیگر در جایابی تسهیلات بیمارستانی، باید تمام الزامات ضروری مانند موجودی‌ها، سختی حرکت و ترتیب بخش‌ها در محدوده از پیش تعیین شده، به گونه‌ای در نظر گرفته شود که فاصله بین بخش‌های دارای تعامل بالا را کاهش دهد و افزایش تقاضا را برآورده کند. در رسیدن به مکان کارآمد بخش‌ها، باید به تعداد مشاوره‌های (تعاملات) بین بخش‌ها توجه شود که این به فراوانی جابه‌جایی بین بخش‌ها بستگی دارد. فراوانی جابه‌جایی فاکتور ارتباط را تعیین می‌کند و بخش‌هایی که ترافیک بالایی بین آنها وجود دارد، باید نسبت به آنهایی که ترافیک کمتری دارند، نزدیک‌تر به هم قرار گیرند؛ بنابراین هدف به حداقل رساندن هزینه جابه‌جایی کل، با در نظر گرفتن محدودیت‌های زیر است (Tongur et al., 2020):

- تأثیر متقابل بین بخش‌ها که به شدت به ترافیک بین دو بخش بستگی دارد، بررسی خواهد شد تا اطمینان حاصل شود بخش‌هایی که اثر متقابل بیشتری دارند، نسبت به آنهایی که اثر متقابل کمتری دارند، نزدیک‌تر به هم قرار گیرند؛
 - تعداد دفعات ویزیت بیماران سرپایی هر بخش محاسبه می‌شود تا قادر باشیم مکان بخش‌هایی را نزدیک‌تر به ورودی اصلی بیمارستان قرار دهیم که در آنها عمل ویزیت بیماران بیشتر انجام می‌شود؛
 - هزینه جابه‌جایی به‌طور مستقیم متناسب با مسافت، فرکانس حرکت، درجه سختی حرکت و هزینه حرکت پایه محاسبه می‌شود و بنابراین تغییر هر یک از ویژگی‌ها، هزینه جابه‌جایی را تغییر خواهد داد.
- برای به دست آوردن جواب بهینه، تابع هدف را با توجه به ساختار فیزیکی بیمارستان مطالعه‌شده، تعداد بخش‌ها با اندازه‌های معلوم و با توجه به اطلاعات بیمارستان، شامل تعداد بیماران هر بخش و تعداد مشاوره‌های هر بخش، همین‌طور فواصل بخش‌ها از یکدیگر و فاصله هر بخش از ورودی بیمارستان فرموله کردیم. با توجه به توضیحات فوق درباره هدف مسئله، تابع هدف را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\min \sum_{i=0}^m x_i y_i + \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^m z_{jk} t_{jk} \quad (1)$$

که در آن n تعداد بخش‌ها، m تعداد مناطقی که قرار است بخش‌های مختلف در آنجا مستقر شوند، x_i فاصله مناطق مختلف تا ورودی بیمارستان، y_i متوسط تعداد بیمارانی که هر ماه به بخش i مراجعه می‌کنند، z_{jk} تعداد

بیمارانی که از بخش واقع در منطقه z به بخش واقع در منطقه k ام مراجعه می‌کنند و t_{jk} مسافت مناطق z ام و k ام است. z_{jk} ماتریس جریان در مسائل QAP^{۲۴} در نظر گرفته می‌شود. این ماتریس شامل مقادیر مشاوره‌ای (تعداد حرکات درون بیمارستانی) است.

در این مقاله، برای حل مسئله پیدا کردن بهترین چیدمان برای بخش‌های مختلف یک بیمارستان، با توجه به انپی-سخت^{۲۵} بودن مسئله، از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک^{۲۶} (GA) و شبیه‌سازی تبرید^{۲۷} (SA) استفاده کرده‌ایم. در ادامه این بخش، این دو الگوریتم را که ابزارهای کارآمد در حل مسائل جایابی تسهیلات بیمارستانی‌اند و در این مقاله به کار می‌روند، به اختصار معرفی خواهیم کرد.

۳-۱ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، که جان هالند^{۲۸} آن را در اواسط دهه ۷۰ معرفی کرد، جواب بهینه را برای یک مسئله، به‌طور اکتشافی جست‌وجو می‌کند. جواب ممکن برای یک مسئله، با یک ژنوم^{۲۹} نشان داده می‌شود که اصولاً شامل یک کروموزوم^{۳۰} است. این کروموزوم شامل مقادیری به نام ژن^{۳۱} است. جهش^{۳۲} و ترکیب^{۳۳} نیز برای برای تغییر کروموزوم‌ها استفاده می‌شود. جهش شامل تغییرات کوچک تصادفی در کروموزوم‌هاست. ترکیب شامل تبادل میزانی از ویژگی‌های ژنتیکی است. در یک الگوریتم ژنتیک، جمعیتی از کروموزوم‌ها به‌صورت زیر تکامل می‌یابند. جمعیت اولیه به‌طور تصادفی ایجاد می‌شود. نسل‌های جدید از طریق انتخاب مکرر برازنده‌ترین افراد و جهش و تقاطع آنها تولید می‌شوند. این فرآیند تا زمانی که یکی از کروموزوم‌ها به برازندگی مطلوب رسیده باشد یا تا تولید تعداد محدودی از نسل‌ها ادامه می‌یابد. در ادامه، مراحل مختلف الگوریتم ژنتیک به اختصار شرح داده شده است.

الگوریتم GA

۱. ایجاد جمعیت اولیه (t) به‌صورت تصادفی؛
۲. تعیین برازندگی جمعیت اولیه (t) (براساس تابع هدف)؛
۳. تکرار موارد زیر تا جایی که بهترین عضو هر جامعه به اندازه کافی مناسب باشد:
 - انتخاب والدین از جمعیت (t) ؛
 - استفاده از عملگر ترکیب بر والدین و و ایجاد جمعیت $(t+1)$ ؛
 - استفاده از عملگر جهش بر جمعیت $(t+1)$ ؛
 - تعیین برازندگی جمعیت $(t+1)$.

۳-۲ الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده

تبرید، یک فرآیند فیزیکی برای بالابردن دمای یک جسم تا رسیدن به نقطه ذوب و سپس سردکردن آن طی شرایط مشخص است که در طول این فرآیند، انرژی جسم به حداقل می‌رسد. با الهام از این الگو، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای مسائل بهینه‌سازی معرفی شد. در این بخش به اجمال، توضیحاتی را درباره فرآیند تبرید و تبرید شبیه‌سازی شده ارائه می‌دهیم.

متروپلیس و همکارانش^{۳۴} (1953)، الگوریتمی را برای شبیه‌سازی تغییر انرژی یک سیستم، طی یک فرآیند تبرید تا زمانی ارائه دادند که سیستم به یک حالت پایدار برسد. آنها در ابتدا، دمای جسم را آنقدر بالا بردند تا جسم به حالت مذاب درآید و سپس برای کاهش انرژی درونی جسم، اتم‌های جسم را جابه‌جا کردند تا انرژی جسم کاهش یابد. این جابه‌جایی مابین دو اتم در همسایگی هم انجام می‌گیرد. انتخاب اتم برای جابه‌جایی، کاملاً تصادفی انجام می‌شود و هیچ ترتیبی برای این کار در نظر گرفته نمی‌شود. در این دما، چندین جابه‌جایی انجام می‌شود و وقتی هیچ تغییری در انرژی حاصل نشد، دمای جسم را کاهش می‌دهند. قبل از اینکه دمای جسم را کاهش دهند، تست تعادلی انجام می‌گیرد. در صورتی که در اثر جابه‌جایی، انرژی جسم کاهش یابد، جابه‌جایی پذیرفته شده است؛ ولی در صورت کاهش نیافتن انرژی، این جابه‌جایی با یک احتمال پذیرفته می‌شود. خواص ساختاری جسم جامد سردشده به نرخ سردکردن جسم بستگی دارد؛ برای مثال، کریستال‌های بزرگ با سردکردن به‌شدت تدریجی رشد می‌کنند؛ اما اگر سردکردن به‌صورت ناگهانی رخ دهد، کریستال عیب‌های زیادی خواهد داشت.

استفاده از تبرید شبیه‌سازی‌شده به‌عنوان یک روش برای حل مسائل بهینه‌سازی گسسته، به سال ۱۹۸۳ برمی‌گردد. زمانی که کرک پاتریک و همکاران^{۳۵} (۱۹۸۳) با کشف شباهت بین کمینه‌کردن تابع هزینه یک مسئله و سردکردن جسم تا زمان رسیدن آن به حالت انرژی پایه، پیشنهاد داد که این نوع شبیه‌سازی برای جست‌وجوی جواب‌های شدنی یک مسئله بهینه‌سازی با هدف همگرایی به جواب بهینه، استفاده می‌شود. او و همکارانش نشان دادند که الگوریتم متروپلیس با تفسیر عناصر فیزیکی فرآیند سردکردن به‌صورت عناصر یک مسئله بهینه‌سازی گسسته، به شکل ارائه‌شده در جدول ۱، برای حل مسائل بهینه‌سازی گسسته به کار می‌رود:

جدول ۱- مقایسه عناصر بهینه‌سازی گسسته و شبیه‌سازی ترمودینامیکی

Table 1- Discrete Optimization Elements vs Thermodynamic Simulation

شبیه‌سازی ترمودینامیکی	بهینه‌سازی گسسته
وضعیت سیستم	جواب شدنی
انرژی	هزینه
تغییر وضعیت	جواب همسایگی
دما	پارامتر کنترلی
حالت انجماد	جواب ابتکاری

الگوریتم SA مانند برخی دیگر از الگوریتم‌های ابتکاری، با یک جواب اولیه، که به‌طور تصادفی ایجاد می‌شود، شروع به کار می‌کند؛ سپس یک جواب همسایگی، که بهبود در تابع هدف ایجاد می‌کند، انتخاب می‌شود و این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که دیگر بهبودی در تابع هدف ایجاد نشود.

معمولاً الگوریتم‌های جست‌وجوی محلی که با یک جواب اولیه شروع و در طی مراحل بهبود داده می‌شوند، ممکن است بعد از چند تکرار در نقطه بهینه محلی قرار بگیرند که گاهی اوقات نیز از ناحیه جواب نهایی خیلی دور است. فرق الگوریتم SA با الگوریتم‌های بهینه‌سازی محلی در این است که در الگوریتم‌های بهینه‌سازی محلی، یک جواب در همسایگی جواب قبلی ایجاد می‌شود، اگر تابع هدف به‌واسطه جواب جدید بهتر شود، جواب جدید قبول و در غیر این صورت جواب جدید رد می‌شود. این عمل ممکن است به گیرافتادن در نقطه بهینه محلی منجر شود و

دیگر از آن خارج نشود؛ در حالی که روش تبرید شبیه‌سازی‌شده، از توقف در بهینه محلی اجتناب می‌کند و به‌طور گذرا از آن رد می‌شود. این حالت با پذیرفتن احتمالی جواب‌های بد انجام می‌شود. این احتمال برابر با $e^{-df/T}$ است که در آن T درجه‌حرارت و df میزان تغییر در تابع هدف است. اگر این احتمال از یک عدد تصادفی یکنواخت بین ۰ و ۱ بیشتر باشد، جواب نامناسب هم پذیرفته می‌شود.

۴- مطالعه کاربردی و یافته‌ها

بیمارستان مورد مطالعه ما در این مقاله، بیمارستان خاتم‌الانبیای ایرانشهر است که ۱۸ بخش دارد و باید به نواحی (مناطق) مختلف با مترائ‌های متفاوت تخصیص داده شود. همین‌طور بیمارستان دارای دو در، یک در اصلی و دیگری در اورژانس است که در دو خیابان متفاوت قرار می‌گیرند. براساس اطلاعات بازه زمانی اسفند ماه ۱۴۰۱ در سیستم اطلاعات بیمارستان، در جدول ۲ متوسط تعداد بیماران هر بخش، در جدول ۳ فاصله مناطق مختلف موجود در بیمارستان تا ورودی بیمارستان و مساحت هر منطقه داده شده است. در جدول ۴، تعداد مشاوره‌های بین بخش‌ها و در جدول ۵، فاصله بین مناطق مختلف نشان داده شده است.

در این مقاله، برای حل مسئله مدنظر که به دست آوردن بهترین چیدمان برای بخش‌های مختلف بیمارستان خاتم‌الانبیای ایرانشهر است، از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک (GA) و شبیه‌سازی تبرید (SA) استفاده کرده‌ایم. برای این هدف، ابتدا بیمارستان خاتم ایرانشهر بازدید و بررسی شد تا ترتیب فعلی بخش‌ها و تعداد مناطق موجود مشخص شود. همین‌طور با همکاری مدیریت بیمارستان، اطلاعات لازم مانند تعداد بیماران هر بخش، تعداد انتقال بین بخشی، فاصله بین نواحی موجود، فاصله هر ناحیه تا ورودی بیمارستان و ... از قسمت‌های پذیرش بیمارستان و دفتر فنی و مهندسی بیمارستان به دست آمد. بعد از بررسی داده‌های به دست آمده، مشخص شد ۱۶ ناحیه داریم (دو ناحیه و بخش‌های نظیر به دلیل مساحت بسیار کم و تفاوت زیاد با دیگر نواحی به لحاظ مترائ، در این پژوهش از داده‌ها حذف شدند).

به‌منظور حل مسئله با الگوریتم ژنتیک، هر جواب را با یک آرایه ۱۶ تایی نمایش می‌دهیم. هر درایه این آرایه نشان‌دهنده یک ناحیه است. مقدار موجود در این آرایه، شماره بخش است؛ برای مثال، نمونه‌ای از ترتیب بخش‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۲- متوسط تعداد بیماران هر بخش

Table 2- The average number of patients coming to the polyclinics

کد بخش	نام بخش	تعداد بیماران (نفر)	کد بخش	نام بخش	تعداد بیماران (نفر)
۱	ccu	۸۶	۹	داخلی	۲۲۷
۲	Icu1	۶۱	۱۰	دیالیز	۱۱۷
۳	Icu2	۲۴	۱۱	جراحی ۲	۱۴۴
۴	عفونی	۱۷۰	۱۲	اتاق عمل	۶۵۳
۵	اورژانس تحت نظر	۶۸۲	۱۳	آزمایشگاه بستری	۸۰۰۰
۶	اورژانس سوانح	۱۶۳۶	۱۴	رادیولوژی	۳۲۴۹
۷	جراحی عمومی	۲۸۰	۱۵	سی تی اسکن	۱۰۵۶
۸	جراحی ارتوپدی	۳۹۱	۱۶	آزمایشگاه اورژانس	۳۶۸۰

جدول ۳- فاصله هر منطقه تا ورودی بیمارستان و مساحت آن

Table 3- The size and the distance to hospital entrance of the areas to be placed

کد ناحیه	فاصله تا ورودی بیمارستان (متر)	مساحت ناحیه (متر مربع)	کد ناحیه	فاصله تا ورودی بیمارستان (متر)	مساحت ناحیه (متر مربع)
۱	۱۱۳	۱۸۰	۹	۱۲۶	۱۹۵
۲	۱۲۲	۲۰۷	۱۰	۲۲	۲۲۰
۳	۱۱۵	۹۳	۱۱	۱۱۰	۶۳
۴	۱۰۹	۸۸۱	۱۲	۱۰۱	۸۱۶
۵	۴۶	۳۶۹	۱۳	۴۳	۱۵۲
۶	۱۰	۵۰۰	۱۴	۹۱	۵۷
۷	۸۴	۱۹۵	۱۵	۷۴	۱۷۳
۸	۱۲۶	۲۲۰	۱۶	۸۱	۱۰۸

در شکل ۱ بخش ۲ در ناحیه ۱، بخش ۵ در ناحیه ۲ و به همین ترتیب مکان دیگر بخش‌ها نشان داده شده است. هرکدام از این آرایه‌ها یک جواب مسئله‌اند که به صورت تصادفی کد و با توجه به تابع هدف ۱ ارزیابی می‌شوند. در ادامه، بهترین جواب را به کمک دو الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید به دست می‌آوریم و سپس جواب‌های به دست آمده از دو الگوریتم را با هم مقایسه می‌کنیم. کدهای این دو الگوریتم به کمک متلب ۲۰۲۰ نوشته و سپس با استفاده از اطلاعات جداول ۲، ۳، ۴ و ۵ اجرا و پیاده‌سازی شد که در ادامه نتایج هر الگوریتم به همراه آن آورده شده است.

به منظور به دست آوردن بهترین جواب برای مسئله جابجایی بخش‌ها، تنظیمات پارامتری برای هر دو الگوریتم انجام می‌شود. در تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک، ۱۰۰ تکرار به طور مستقل اجرا و پارامترها با توجه به میانگین بهترین نتایج انتخاب می‌شود.

شماره ناحیه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
شماره بخش	۲	۵	۷	۶	۱۱	۳	۱۶	۹	۱۳	۱	۴	۱۴	۸	۱۲	۱۰	۱۵

شکل ۱- جواب نمونه

Fig. 1- A solution instance

جدول ۴- تعداد مشاوره‌های بین بخشی

Table 4- The patient consultations between the polyclinics

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۱	۰	۴	۰	۱	۰	۰	۲	۰	۰	۰	۲	۰	۹	۰	۳	۰
۲	۴	۰	۲	۲	۰	۰	۵	۱۳	۷	۳	۰	۱	۲	۱	۱	۰
۳	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۴	۳	۳	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
۴	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۲	۰	۰	۵۵	۵	۱۵	۰
۵	۳۵	۳	۳	۷۸	۰	۰	۹۲	۰	۱۳۸	۱	۰	۴۸	۰	۳	۱۳	۳۱
۶	۲۳	۲۴	۵	۸	۰	۰	۱۱۶	۳۰۶	۵۲	۱	۰	۳۳	۱۱۸	۱۲۹	۹۲	۱۱۸
۷	۱	۱۴	۲	۰	۰	۰	۰	۲۱	۱	۲	۵	۱۹۵	۷۸	۴۷	۳۳	۰
۸	۰	۵	۳	۰	۰	۰	۲۲	۰	۶	۱	۵	۲۲۴	۱۹۷	۱۲۳	۶۲	۰
۹	۳	۷	۲	۶	۰	۰	۴	۲	۷	۵	۰	۱	۱۸	۴	۷	۰

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۱۰	۰	۳	۰	۲	۰	۰	۱	۵	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۲۴	۱۴	۱	۰	۰	۱۵۳	۱۸	۴	۱	۰
۱۲	۰	۱	۰	۰	۰	۱۹۵	۲۲۴	۱	۰	۱۵۳	۰	۰	۰	۰	۰
۱۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۵- فاصله بین مناطق

Table 5- The distance between the areas

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۱	۰	۱۵	۸	۹۸	۸۴	۱۲۷	۱۹	۱۶	۸۸	۳	۸	۸۷	۱۰۲	۶۸	۷۳
۲	۱۵	۰	۷	۱۰۷	۹۳	۱۳۶	۲۵	۱۸	۹۷	۱۲	۱۷	۹۶	۱۱۱	۷۷	۸۲
۳	۸	۷	۰	۱۰۰	۸۶	۱۲۹	۱۸	۱۱	۹۰	۵	۱۰	۸۹	۱۰۴	۷۰	۷۵
۴	۹۸	۱۰۷	۱۰۰	۰	۳۱	۸۱	۸۲	۱۰۸	۷۱	۹۵	۱۲۱	۷۲	۵۳	۱۹	۲۴
۵	۸۴	۹۳	۸۶	۳۱	۰	۵۴	۶۸	۹۷	۷۴	۸۱	۸۱	۶۴	۲۲	۱۲	۷
۶	۱۲۷	۱۳۶	۱۲۹	۸۱	۵۴	۰	۱۲۷	۱۴۰	۱۲۴	۱۲۴	۱۵۳	۱۲۳	۳۲	۶۲	۵۷
۷	۱۹	۲۵	۱۸	۸۲	۶۸	۱۲۷	۰	۲۶	۷۲	۱۳	۱۳	۷۱	۸۶	۵۲	۵۷
۸	۱۶	۱۸	۱۱	۱۰۸	۹۷	۱۴۰	۲۶	۰	۹۸	۱۳	۲۲	۹۷	۱۱۲	۷۸	۸۳
۹	۱۶	۱۸	۱۱	۱۰۸	۹۷	۱۴۰	۲۶	۰	۹۸	۱۳	۲۲	۹۷	۱۱۲	۷۸	۸۳
۱۰	۸۸	۹۷	۹۰	۷۱	۷۴	۱۲۴	۷۲	۹۸	۰	۸۵	۸۵	۲۹	۹۲	۶۲	۶۸
۱۱	۳	۱۲	۵	۹۵	۸۱	۱۲۴	۱۳	۱۳	۸۵	۰	۶	۸۴	۹۹	۶۵	۷۰
۱۲	۸	۱۷	۱۰	۱۲۱	۸۱	۱۵۳	۲۲	۲۲	۸۵	۶	۰	۸۴	۹۹	۶۵	۷۰
۱۳	۸۷	۹۶	۸۹	۷۲	۶۴	۱۲۳	۷۱	۹۷	۲۹	۸۴	۸۴	۰	۹۱	۶۱	۶۷
۱۴	۱۰۲	۱۱۱	۱۰۴	۵۳	۲۲	۳۲	۸۶	۱۱۲	۹۲	۹۹	۹۹	۹۱	۰	۳۴	۲۹
۱۵	۶۸	۷۷	۷۰	۱۹	۱۲	۶۲	۵۲	۷۸	۶۲	۶۵	۶۵	۶۱	۳۴	۰	۵
۱۶	۷۳	۸۲	۷۵	۲۴	۷	۵۷	۵۷	۸۳	۶۸	۷۰	۷۰	۶۷	۲۹	۵	۰

۴-۱ تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک

در این بخش، سه پارامتر الگوریتم ژنتیک یعنی تعداد اعضای جمعیت، احتمال جهش و احتمال ترکیب بررسی شده است. در جدول ۶، پارامتر تعداد اعضای جمعیت با مقادیر ۴۰، ۶۰ و ۸۰ به ترتیب ارزیابی شدند. پارامترهای احتمال ترکیب و احتمال جهش نیز به ترتیب با ۰/۸ و ۰/۳ ثابت در نظر گرفته می‌شوند. همان‌طور که در جدول ۶ دیده می‌شود، بهترین مقدار میانگین در جمعیت، ۶۰ و بعد از ۴۰ تکرار به دست می‌آید. همچنین در جدول ۷ مشاهده می‌شود که بهترین مقدار میانگین برای احتمال ترکیب ۰/۵ و ۰/۸ یکسان به دست می‌آید؛ اما چون این جواب با ۰/۸ $p_c = 0/8$ بعد از ۴۰ تکرار و برای ۰/۵ $p_c = 0/5$ بعد از ۸۳ تکرار به دست می‌آید، بنابراین الگوریتم با احتمال ترکیب ۰/۸ زودتر به جواب می‌رسد.

جدول ۶- تنظیم پارامتر تعداد اعضای جمعیت

Table 6- Parameter setting of population

میانگین بهترین جواب	تعداد عناصر جمعیت	پارامترهای ثابت	
		عنوان پارامتر	مقدار
۷۴۶۸۷۸	۴۰	احتمال ترکیب	۰/۸
۷۳۴۹۵۸	۶۰	احتمال جهش	۰/۳
۷۳۵۳۹۷	۸۰		

جدول ۷- تنظیم پارامتر احتمال ترکیب

Table 7- Parameter setting of crossover

میانگین بهترین جواب	احتمال ترکیب	پارامترهای ثابت	
		عنوان پارامتر	مقدار
۷۳۴۹۵۸	۰/۵	تعداد اعضای جمعیت	۶۰
۷۳۴۹۵۸	۰/۸	احتمال جهش	۰/۳
۷۴۶۴۱۷	۰/۹		

از جدول ۸ نیز همان طور که مشاهده می شود، برای دو مقدار احتمال جهش $0/2$ و $0/3$ میانگین بهترین جواب یکی است؛ اما الگوریتم با احتمال جهش $0/3$ بعد از ۴۰ تکرار و با احتمال جهش $0/2$ بعد از ۵۹ تکرار، به این جواب می رسد؛ بنابراین احتمال جهش $0/3$ مناسب تر است.

جدول ۸- تنظیم پارامتر احتمال جهش

Table 8- Parameter setting of mutation

میانگین بهترین جواب	احتمال جهش	پارامترهای ثابت	
		عنوان پارامتر	مقدار
۷۳۴۹۵۸	۰/۲	تعداد اعضای جمعیت	۶۰
۷۳۴۹۵۸	۰/۳	احتمال ترکیب	۰/۸
۷۴۶۹۶۱	۰/۴		

با توجه به نتایج بررسی انجام شده، مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای تعداد اعضای جمعیت، احتمال ترکیب و احتمال جهش برای الگوریتم ژنتیک، در جدول ۹ داده شده است.

جدول ۹- پارامترهای انتخاب شده برای الگوریتم ژنتیک

Table 9- Best parameters for the G

پارامتر	مقدار
تعداد اعضای جمعیت	۶۰
احتمال ترکیب	۰/۸
احتمال جهش	۰/۳

۲-۴ تنظیم پارامترهای شبیه‌سازی تبرید

در این قسمت دو پارامتر الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بررسی شده است که عبارت‌اند از: دمای اولیه (T) و ضریب کاهش دما ($\alpha \in (0,1)$). تعداد تکرارها همانند الگوریتم ژنتیک ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. ابتدا دما به ترتیب ۲۰۰، ۱۰۰ و ۵۰ و α را ثابت و برابر ۰/۹۹ در نظر گرفتیم. در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود که در دمای ۲۰۰، جواب بهتری به دست می‌آید. در جدول ۱۱ با $\alpha = ۰/۹۴$ ، مراحل را تکرار کردیم و نتیجه، بهترین جواب در دمای ۲۰۰ است.

جدول ۱۰- تنظیم پارامتر دما با $\alpha = ۰/۹۹$

Table 10- Parameter Setting of temperature ($\alpha = ۰/۹۹$)

پارامترهای ثابت	مقدار	دما	میانگین بهترین
			جواب
α	۰/۹۹	۵۰	۷۴۳۹۵۱
		۱۰۰	۷۴۰۵۲۸
		۲۰۰	۷۳۸۹۴۵

جدول ۱۱- تنظیم پارامتر دما با $\alpha = ۰/۹۴$

Table 11- Parameter Setting of temperature ($\alpha = ۰/۹۴$)

پارامترهای ثابت	مقدار	دما	میانگین بهترین
			جواب
α	۰/۹۴	۵۰	۷۴۵۵۹۱
		۱۰۰	۷۴۳۰۴۵
		۲۰۰	۷۴۰۴۶۵

همان‌طور که از جداول ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود، بهترین جواب الگوریتم SA، در دمای ۲۰۰ و $\alpha = ۰/۹۹$ به دست می‌آید.

۳-۴ نتایج آزمایش

آزمایش‌های تجربی این پژوهش با کامپیوتر شخصی و با مشخصات پردازنده Intel® Core™ i5-1035G1، CPU @ 1.00GHz 1.19 GHz، رم ۴ گیگابایت و سیستم عامل Windows 10 Pro (64-bit) انجام شده است. هر دو الگوریتم GA و SA با برنامه متلب ۲۰۲۰، پیاده‌سازی و اجرا شدند. دو الگوریتم به‌طور مستقل و در ۱۰۰ تکرار اجرا شده‌اند که زمان اجرای الگوریتم ژنتیک کمتر از زمان اجرای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بود. در جدول ۱۲، نتایج حاصل از دو الگوریتم آورده شده است که نشان می‌دهد الگوریتم ژنتیک به جواب بهتری رسیده است.

جدول ۱۲- مقایسه دو الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید

Table 12- Comparison of GA and SA

الگوریتم	میانگین جواب
ژنتیک	۷۳۴۹۵۸
شبیه‌سازی تبرید	۷۳۸۹۴۵

بنابراین الگوریتم GA هم از لحاظ زمان و همین‌طور رسیدن به بهترین جواب، بهتر از الگوریتم SA عمل می‌کند.

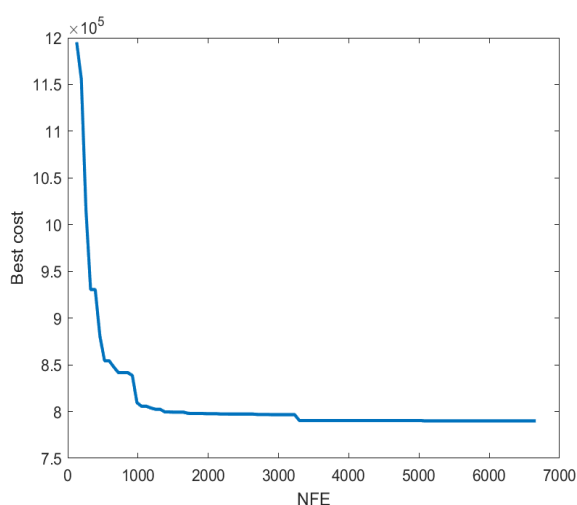
جواب طراحی جایابی به دست آمده با استفاده از الگوریتم ژنتیک به صورت

۵	۱۵	۸	۶	۷	۹	۱۶	۱۱	۴	۱۲	۱۳	۱۴	۱	۲	۳	۱۰
---	----	---	---	---	---	----	----	---	----	----	----	---	---	---	----

است که با طرح فعلی بیمارستان یعنی

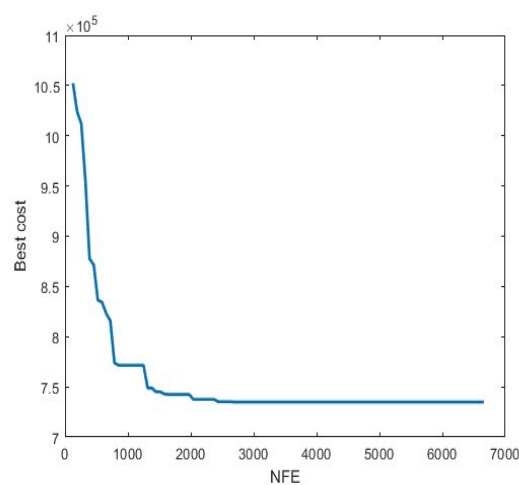
۶	۱۴	۵	۴	۱۶	۱۵	۹	۸	۲	۳	۱	۱۱	۱۲	۷	۱۳	۱۰
---	----	---	---	----	----	---	---	---	---	---	----	----	---	----	----

به جز بخش‌های ۲ و ۳ که در هر دو حالت در مجاورت هم‌اند (که این نیز به دلیل تعامل بالای این دو بخش است)، تفاوت دارد. در طرح فعلی، جواب مسئله ۲۱۴۳۴۱۹ است که تفاوت بسیار چشمگیری با بهترین جواب به دست آمده از دو الگوریتم دارد. همچنین نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. منظور از NFE^{36} در دو شکل مذکور، تعداد توابع ارزیابی شده است. با مقایسه این دو شکل نیز می‌بینیم که همگرایی این دو الگوریتم نزدیک به هم نیست و سرعت همگرایی الگوریتم GA بیشتر از الگوریتم SA است.



شکل ۳- منحنی همگرایی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

Fig. 3- SA convergence curve



شکل ۲- منحنی همگرایی الگوریتم ژنتیک

Fig. 2- GA convergence curve

۵- بحث

چیدمان تسهیلات در مناطق مناسب در مسئله جایابی تسهیلات با کاهش هزینه‌ها، فرآیند پردازش و زمان تحویل، راندمان عملیاتی را افزایش می‌دهد (Tongur et al., 2020). در مسئله بررسی شده در این مقاله هم، به‌وضوح مشاهده شد فاصله بخش‌ها تا ورودی بیمارستان و همین‌طور فاصله بخش‌ها از یکدیگر، نقش مهمی در تعیین زمان حمل و نقل بیماران و کارکنان بیمارستان دارد؛ زیرا طولانی‌شدن زمان حمل و نقل، به اقامت

طولانی مدت در بیمارستان و کاهش کارایی بیمارستان منجر می‌شود؛ بنابراین با قراردادن بخش‌هایی نزدیک به ورودی بیمارستان که تردد بیماران سرپایی به آنها بیشتر است، از توقف طولانی مدت و همین‌طور هزینه جابه‌جایی بیماران جلوگیری می‌شود و کارایی بیمارستان افزایش می‌یابد. مسئله ما در این مقاله دو محدودیت داشت: اول اینکه ما از تعداد همراهان بیماران و تعداد کادر درمان همراه بیمار، همین‌طور تعداد جابه‌جایی‌های این افراد در داخل بخش‌ها و بین بخش‌ها اطلاع دقیقی نداشتیم؛ بنابراین از آوردن اطلاعات آنها خودداری کردیم. محدودیت دوم در این مقاله و برای مسئله جایابی بخش‌های بیمارستان خاتم‌الانبیای ایرانشهر، محدودیت یکسان نبودن مساحت بخش‌ها بود که ما از آن صرف‌نظر کردیم. این محدودیت ممکن است طرح جایابی مکان بخش‌های به دست آمده را به لحاظ عملی با مشکل مواجه کند. برای به حداقل رساندن این مشکل، بخش‌هایی که به لحاظ مساحت، اختلاف مترای خیلی زیادی با بقیه بخش‌ها داشتند، در مدل در نظر گرفته نشدند و درواقع مکان آنها به صورت ثابت، مکان فعلی در چیدمان بیمارستان در نظر گرفته شد. مشاهده شد که جواب به دست آمده با دو الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید، نسبت به جواب فعلی بیمارستان تفاوت چشمگیری داشت و به لحاظ تئوری نشان داد که چیدمان فعلی بخش‌های بیمارستان نسبت به طرح چیدمان به دست آمده با کمک این دو الگوریتم بسیار ناکارآمد است؛ بنابراین، استفاده از این الگوریتم‌های فراابتکاری برای جایابی بخش‌ها و تسهیلات، بهترین جایابی ممکن به لحاظ هزینه را برای ما میسر می‌کند که در عمل بسیار کاربردی خواهد بود.

با توجه به اینکه مسئله بررسی شده در این پژوهش یک مطالعه موردی^{۳۷} است، مقایسه آن با مسائل مشابه در پیشینه ممکن نیست؛ بنابراین این مسئله علاوه بر اینکه با الگوریتم ژنتیک حل شد، برای مقایسه نتایج، با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نیز پیاده‌سازی و حل شد. بنابراین با توجه به نتایج این مقاله توصیه می‌شود که در ساخت بیمارستان‌ها، ابتدا در جایابی بخش‌ها از روش‌های علمی، نظیر آنچه در این مقاله بیان شد یا روش‌های نوین دیگر (Dokeroglu, 2015)، استفاده شود که تأثیر درخور توجهی در میزان کارایی مراکز درمانی خواهد داشت.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی کردیم تأثیر استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری را در یافتن بهترین جایابی ممکن برای بخش‌های مختلف بیمارستان خاتم‌الانبیای ایرانشهر در مناطق از پیش تعیین شده نشان دهیم. هدف یافتن جایابی مناسب به گونه‌ای بود که بخش‌هایی نزدیک یکدیگر قرار گیرند که تعامل بیشتری با یکدیگر دارند. در رسیدن به مکان کارآمد بخش‌ها، به تعداد مشاوره‌های (تعاملات) بین بخش‌ها با هدف به حداقل رساندن هزینه جابه‌جایی کل، توجه شد. همچنین مشاهده شد که جایابی به دست آمده با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشنهادی، هزینه‌های جابه‌جایی را در بیمارستان مطالعه شده به شکل چشمگیری کاهش داد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های بررسی شده، چگونه در شرایط واقعی به کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی عملیاتی منجر می‌شود. همچنین این پژوهش برخلاف مطالعات مشابه، به طور مستقیم نتایج ملموس حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم‌ها را بررسی می‌کند و مقایسه‌ای دقیق میان هزینه‌های قبل و بعد از استفاده از این روش‌ها ارائه می‌دهد. این جنبه‌های کاربردی، یک نوآوری مهم در استفاده عملی از این الگوریتم‌ها را در محیط‌های واقعی مطرح می‌کند و راهکاری عملی برای مدیران بیمارستان‌ها و دیگر سازمان‌ها ارائه می‌دهد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از مدیریت محترم بیمارستان خاتم‌الانبیای ایرانشهر، همچنین دفتر فنی و مهندسی این بیمارستان بابت همکاری‌شان در دستیابی به اطلاعات مورد نیاز، تشکر کنند.

References

- Alikhasi, M., & Vasili, M. (2020). Development of a discrete locating model for the healthcare facilities considering efficiency and readiness. *Revista Gestão & Tecnologia*, 20, 30-53. <https://doi.org/10.20397/2177-6652/2020.v20i0.1719>.
- Azadivar, F., & Wang, J. (2000). Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms. *International Journal of Production Research*, 38(17), 4369-4383. <https://doi.org/10.1080/00207540050205154>.
- Barbosa-Póvoa, A. P., Mateus, R., & Novais, A. Q. (2001). Optimal two-dimensional layout of industrial facilities. *International Journal of Production Research*, 39(12), 2567-2593. <https://doi.org/10.1080/00207540110049043>.
- BASHIRI, M., GARMEYI, Y., & YAHYAYI, M. (2016). Solving Gradual Governing of Healthcare Services by Simulated Annealing and K-means and Artificial Neural Network Clustering Methods. *Production and Operations Management*, 7(2), 45-62. <https://doi.org/10.22108/JPOM.2016.210870>.
- Cheng, M. Y., & Lien, L. C. (2012). A hybrid AI-based particle bee algorithm for facility layout optimization. *Engineering with Computers*, 28, 57-69. <https://doi.org/10.1007/s00366-011-0216-z>.
- Dokeroglu, T. (2015). Hybrid teaching-learning-based optimization algorithms for the quadratic assignment problem. *Computers & Industrial Engineering*, 85, 86-101. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.03.001>.
- Ghaderi, A., & Jabalameli, M. S. (2013). Modeling the budget-constrained dynamic uncapacitated facility location-network design problem and solving it via two efficient heuristics: A case study of health care. *Mathematical and Computer Modelling*, 57(3-4), 382-400. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2012.06.017>.
- Huo, J., Liu, J., & Gao, H. (2021). An nsga-ii algorithm with adaptive local search for a new double-row model solution to a multi-floor hospital facility layout problem. *Applied Sciences*, 11(4), 1758. <https://doi.org/10.3390/app11041758>.
- Huyen, D. T. T., Binh, N. T., Tuan, T. M., Trung, T. Q., Nhu, N. G., Dey, N., & Son, L. H. (2017). Analyzing trends in hospital-cost payments of patients using ARIMA and GIS: Case study at the Hanoi Medical University Hospital, Vietnam. *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, 7(2), 421- 429. <https://doi.org/10.1166/jmihi.2017.2111>.
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598), 671-680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.6>.
- Lacksonen, T. A. (1997). Preprocessing for static and dynamic facility layout problems. *International Journal of Production Research*, 35(4), 1095-1106. <https://doi.org/10.1080/002075497195560>.
- Lee, Y. H., & Lee, M. H. (2002). A shape-based block layout approach to facility layout problems using hybrid genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 42(2-4), 237-248. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00018-9).
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., & Teller, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *The journal of chemical physics*, 21(6), 1087-1092. <https://doi.org/10.1063/1.1699114>.
- Şahin, R., & Turkbey, O. (2010). A new hybrid heuristic algorithm for the multi objective facility layout problem. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25(1). <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6683/88459>.

- Shahin, A., & Rostamian, N. (2021). Proposing an approach for selecting outsourcing strategies in the two-level bidirectional service supply chain with a case study in healthcare services. *Production and Operations Management*, 11(4), 43-64. <https://doi.org/10.22108/JPOM.2021.126644.1320>
- Shayan, E., & Chittilappilly, A. (2004). Genetic algorithm for facilities layout problems based on slicing tree structure. *International Journal of Production Research*, 42(19), 4055-4067. <https://doi.org/10.1080/00207540410001716471>.
- Singh, S. P., & Sharma, R. R. (2006). A review of different approaches to the facility layout problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30, 425-433. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0087-9>.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., & Korzebor, M. R. (2022). Bi-objective mathematical modelling for a location-relocation problem of hierarchical healthcare facilities under uncertainty and disaster. *Emergency Management*, 11(1), 5-16. https://www.joem.ir/article_251419.html?lang=en.
- Tongur, V., Hacibeyoglu, M., & Ulker, E. (2020). Solving a big-scaled hospital facility layout problem with meta-heuristics algorithms. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(4), 951-959. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.10.006>.
- Yang, J., Aydin, M. E., Zhang, J., & Maple, C. (2007). UMTS base station location planning: a mathematical model and heuristic optimisation algorithms. *IET communications*, 1(5), 1007-1014. <https://doi.org/10.1049/iet-com: 20060495>.

¹ Facility Layout Problem (FLP)

² Hospital Facility Layout Problem (HFLP)

³ Quadratic Assignment Problem

⁴ Heuristic Approaches

⁵ Mixed-Integer Programming

⁶ Azadivar & Wang

⁷ Lee & Lee

⁸ Shayan & Chittilappilly

⁹ Meta-Heuristic

¹⁰ Swarm Intelligence

¹¹ Şahin & Turkbey

¹² Simulated Annealing

¹³ Tabu List

¹⁴ Cheng, & Lien

¹⁵ Bee Algorithm

¹⁶ Particle Swarm Optimization

¹⁷ Huyen et al.

¹⁸ Yang et al.

¹⁹ P-Median

²⁰ Greedy

²¹ Tongur et al.

²² Migrating Bird Optimization

²³ Tabu Search

²⁴ Quadratic assignment problem

²⁵ NP-Hard

²⁶ Genetic

²⁷ Simulated Annealing

²⁸ John Holland

²⁹ Genome

³⁰ Chromosome

³¹ Gene

³² Mutation

³³ Crossover

³⁴ Metropolis et al.

³⁵ Kirkpatrick et al.

³⁶ Number of function evaluation

³⁷ Case study