



Multi-Objective Planning and Scheduling of Operating Rooms and Sterile Section Reusable Surgical Devices with a Scenario-Based Robust Optimization Approach

Fatemeh Arjmandi 

MSc. Department of Industrial Engineering,
Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina
University, Hamedan, Iran

Parvaneh Samouei *

Assistant Professor, Department of Industrial
Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali
Sina University, Hamedan, Iran

Accepted: 01/08/2023

Abstract

Planning and scheduling operating rooms and required equipment is very important for hospital managers from the perspective of cost, social, and health principles. Because operating rooms are one of the sources of income for hospitals that can provide the services needed by emergency patients who arrive randomly and elective patients whose surgery is preplanned. Since some tools used in operating rooms need to be sterilized each time, and in the real world, due to various reasons such as the physical condition of each patient, the duration of surgeries is uncertain, in this research, as well as considering the uncertainty of surgery times for emergency and elective patients, a robust scenario-based integrated mathematical model with two objective functions is presented. In this model, in addition to minimizing the cost of operating rooms, sterile section, and penalties for delay in surgery, the competition time of the last operation is minimized. Solving several problems and different sensitivity analyses confirmed the validation of the presented model from the viewpoint of the hospital managers.

Received: 27/01/2022

eISSN: 2476-602X

Introduction

The healthcare system is one of the most important topics that has attracted the attention of researchers and hospital managers. Two significant elements of healthcare systems are patients and hospitals, and their planning and scheduling are necessary for providing better services. Hospital managers aim to minimize costs or maximize profits while considering service times.

ISSN: 2251/8029

* Corresponding Author: P.samouei@basu.ac.ir

How to Cite: Arjmandi, F., Samouei, P. (2023). Multi-Objective Planning and Scheduling of Operating Rooms and Sterile Section Reusable Surgical Devices with a Scenario-Based Robust Optimization Approach, *Industrial Management Studies*, 21(70), 45-87.

Operating rooms are often the most critical sections of the hospital. Since life and death issues are at stake in the operating rooms, even the slightest delay or lack of resources can endanger human lives. Therefore, careful planning and scheduling of operating rooms and their resources is especially important. Additionally, to prevent potential hospital infections, the sterilization of reusable medical instruments is essential for every operation. Furthermore, patients can be broadly categorized into two groups: emergency patients who arrive randomly, and elective patients whose surgeries are preplanned. Planning and scheduling operating rooms, along with the required equipment, is of utmost importance for hospital managers, taking into account cost, social factors, and health considerations. Some items used in operating rooms need to be sterilized after each use, which incurs both time and cost.

Methodology

Due to high fluctuations of the duration of surgery, the different condition of each patient, and in order to get as close as possible to the real conditions, the duration of each surgery is considered uncertain. In this research, in addition to considering selected patients, considering the uncertainty of the duration of surgery, emergency patients have also been investigated, and dealing with uncertainties, the robust optimization approach is used. This approach is stable against changes, and minimizes the fluctuation of changes and maintains optimal and feasible. Therefore, in this research, as well as considering the uncertainty of surgery times for emergency and elective patients, a robust scenario-based integrated mathematical model with two objective functions is presented. In this model, in addition to minimizing the cost of operating rooms, sterile section, and penalties for delay in surgery, the competition time of the last operation is minimized. There are costs for performing elective and emergency operations, and in order to give priority to emergency patients, the cost of performing the operation of these patients is lower than the cost of performing elective operations surgeries of emergency patients, such as those injured in accidents, must be performed as soon as possible and these patients should be paid less. Also, for emergency patients, a maximum waiting time is considered, which they should not wait more than it. Obviously, surgeries that cannot be scheduled during the working hours of the operating room are postponed. Every patient needs a number of reusable medical tools that require sterilization. The sterile duration of reusable tools and the capacity of each sterile machine are known.

There are various techniques for solving multi-objective problems, one of which is the epsilon constraint method. In this method, one of the objective functions is considered as the main objective function and other objective functions are applied as constraints to the problem. Various developments for the epsilon constraint method have been presented to make it more efficient,

among which we can mention the Augmented Epsilon Constrain (AEC) method. Moreover, in order to solve the bi-objective integrated mathematical model, Mulvey's robust method is implemented on the model, and its validation is carried out in the GAMS software with the AEC method.


Results and Conclusion

Different sensitivities all confirm the validity and accuracy of the model from the point of view of hospital managers. According to the obtained results, the changes of the three parameters of surgery delay cost, duration of surgery and sterile duration times have more effects on the both objective functions of the mathematical model than other parameters of the problem. Furthermore, the obtained results show that the first objective function, which includes the total cost, will have the highest value when the delay cost parameters and the duration of the surgical operations increase. For the second objective function, which shows the complete time of the last operation, the most challenging situation occurs when the parameters of the duration of surgical operations and the sterile duration increase. Therefore, the most ideal situation from the point of view of the hospital manager is to reduce all three parameters, which will reduce, the total cost and the completion time of the last operation; Moreover, the results show, the separate costs of planning and scheduling of the operating room and the sterile department are more than when the planning and scheduling of the operating rooms and the sterile department were examined in an integrated manner. The results of this research can be used for the integrated planning and scheduling of the operating rooms and sterilization department in all hospitals as a suitable management tool.


Keywords: operating rooms, sterilization section, emergency operations, elective operations, scenario-based robust optimization approach.

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل ابزارهای جراحی قابل استفاده مجدد با رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریو محور

کارشناس ارشد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی
سینا، همدان، ایران.

فاطمه ارجمندی 

استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا،
همدان، ایران.

پروانه سموئی * 

چکیده

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق‌های عمل و تجهیزات موردنیاز از ابعاد هزینه‌ای، اجتماعی و اصول بهداشتی برای مدیران بیمارستان بسیار حائز اهمیت است. چراکه اتاق‌های عمل یکی از منابع درآمدی بیمارستان‌هاست که می‌توانند خدمات موردنیاز بیماران اورژانسی که به صورت تصادفی وارد می‌شوند و بیماران انتخابی که جراحی‌شان از قبل برنامه‌ریزی را ارائه نمایند. از آنجا که برخی وسایل مورد استفاده در اتاق‌های عمل برای هر بار استفاده نیازمند استریل شدن هستند و در دنیای واقعی با توجه به دلایل مختلف نظیر شرایط جسمی هر بیمار، مدت‌زمان جراحی‌ها دقیقاً غیرقطعی هستند، در این پژوهش، برای اولین بار، علاوه بر در نظر گرفتن عدم قطعیت زمان‌های غیرقطعی جراحی برای بیماران اورژانسی و انتخابی، یک مدل ریاضی یکپارچه دو هدفه استوار سناریو محور ارائه می‌گردد. در این مدل، ضمن حداقل‌سازی هزینه اتاق‌های عمل، بخش استریل و جریمه‌های تأخیر در جراحی، زمان تکمیل آخرین عمل نیز حداقل می‌شود. حل مسائل با ابعاد متفاوت و تحلیل حساسیت‌های مختلف همگی تأییدکننده اعتبار و صحت مدل از دیدگاه مدیران بیمارستان‌ها می‌باشند.

کلیدواژه‌ها: اتاق‌های عمل، بخش استریلیزاسیون، عمل‌های اورژانسی، عمل‌های انتخابی، رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریو محور.

۱- مقدمه

زمان‌بندی به معنی تعیین زمان شروع و ختم یک یا چند فعالیت روی یک یا چند منبع به‌صورت سری یا موازی است که اخیراً مورد توجه صنایع خدماتی از جمله صنعت سلامت واقع شده است. مسائلی چون زمان‌بندی پرستاران، اولویت‌دهی و زمان‌بندی ورود بیماران و زمان‌بندی اتاق عمل از جمله مسائل مطرح در صنعت سلامت هستند (اکبرزاده، ۱۳۹۲). بخش اتاق عمل، یکی از منابع حیاتی در بیمارستان هستند که ضمن ارائه خدمات بهداشتی هزینه‌های زیادی دارند که برای کاهش هزینه‌ها و حفظ کیفیت مراقبت از بیمار از طریق برنامه‌ریزی و زمان‌بندی، کارایی و کیفیت آن بهبود می‌یابد. زمانی که یک جراحی پایان می‌یابد کارهای آماده‌سازی مانند: تمیز کردن اتاق عمل و استریل کردن تجهیزات قبل از شروع جراحی بعدی انجام می‌شود تا در عمل‌های جراحی بعدی قابل استفاده مجدد باشد. برای جلوگیری از عفونت‌های احتمالی بیمارستان‌ها، استریل ابزارهای پزشکی قابل استفاده مجدد یکی از اهداف اصلی در هر عمل است. افزون بر موارد عنوان شده، بیماران به دودسته کلی بیماران اورژانسی^۱ و انتخابی^۲ تقسیم می‌شوند. بیماران اورژانسی، به‌صورت تصادفی وارد می‌شوند و بایستی در زودترین زمان ممکن به وضعیت آن‌ها رسیدگی کرد، اما عمل‌های انتخابی را می‌توان به زمان‌های بعد موکول کرد. یکی از مشکلات اساسی در حوزه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق عمل وجود عدم قطعیت است.

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد مطالعات بسیاری در زمینه بیماران انتخابی انجام شده است، ژیانگ و همکاران (۲۰۱۵) et al. Xiang با مشاهده شباهت‌های بین زمان‌بندی اتاق عمل جراحی و یک مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف چند منبع در تولید، یک رویکرد بهینه‌سازی کلونی مورچگان^۳ را برای حل مؤثر مسائل زمان‌بندی جراحی مبتنی بر دانش به‌دست آمده در مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف چند منبع در تولید به‌منظور حداقل کردن زمان اتمام و زمان آماده‌سازی جراحی‌ها مطرح کردند. ایران‌زاد (۱۳۹۶) در پایان‌نامه خود با استفاده از الگوریتم روش آزادسازی لاگرانژ سعی به برقراری ارتباط بین اتاق‌های

1. Emergency

2. Elective

3. Ant Colony Optimization

عمل و بخش مراقبت‌های پس از عمل کرد که مدل را هر چه بیشتر به واقعیت نزدیک‌تر کند و سعی در برنامه‌ریزی بیماران انتخابی در یک بازه زمانی مطلوب باهدف کمینه کردن زمان بیکاری اتاق‌های عمل و به‌بیان‌دیگر بیشینه کردن امتیاز با تخصیص بیماران با اولویت بالاتر پرداخت. (Roshanaei et al. ۲۰۱۹). زمان‌بندی اصلی جراحی و توالی جراحی را در حضور چندین تخصص جراحی ادغام کردند؛ و رویکردهای دقیق تجزیه را برای یک مسئله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی چند سطحی اتاق عمل به‌منظور حداکثر کردن زمان و تعداد جراحی‌های برنامه‌ریزی شده توسعه دادند. (Maghzi et al. ۲۰۱۹). با استفاده از نرم‌افزار گمز و مجموعه‌ای از داده‌های تصادفی به حل مسئله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق‌های عمل و بخش‌های مختلف بیمارستان باهدف به حداقل رساندن زمان حضور بیمار در تمام مراحل و بخش‌های بیمارستان پرداختند. در پژوهش‌های ذکر شده فقط برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق عمل با در نظر گرفتن بیماران انتخابی در نظر گرفته شده بود. (Kayvanfar et al. ۲۰۲۱). با استفاده از رویکرد آزادسازی لاگرانژ به حل مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط زمان‌بندی اتاق‌های عمل و بخش بهبود با در نظر گرفتن بیماران انتخابی باهدف حداقل سازی زمان‌های بیکاری اتاق‌های عمل و به حداکثر رساندن تعداد عمل‌های جراحی برنامه‌ریزی شده پرداختند. گروه دوم از بیماران، بیماران غیرانتخابی یا اورژانسی هستند که مطالعاتی پیرامون آن‌ها نیز انجام شده است. (Kroer et al. ۲۰۱۸). با استفاده از دو رویکرد ابتکاری مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط به حل مسئله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق عمل برای جراحی‌های انتخابی و اورژانسی تحت عدم قطعیت مدت‌زمان جراحی و ورود بیماران اورژانسی باهدف ایجاد برنامه‌ریزی استوار به‌منظور حداقل کردن اضافه‌کاری و آزاد کردن ظرفیت بلااستفاده پرداختند. پیام و جهان تیغ (۲۰۱۹) یک مدل ریاضی برای زمان‌بندی عملیاتی جراحی‌های اتاق‌های عمل بیمارستان با اهداف به حداقل رساندن هزینه لغو جراحی، زمان انتظار کل، تأخیرهای به وجود آمده در زمان خاتمه جراحی‌ها پرداختند. (Hasan Ali et al. ۲۰۱۹). با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط به حل مسئله زمان‌بندی اتاق عمل برای جراحی‌های انتخابی و غیرانتخابی در بیمارستانی که تحت تأثیر

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل...؛ ارجمندی و سموئی | ۵۱

حوادث مربوط به جنگ قرار دارد باهدف به حداکثر رساندن استفاده از اتاق عمل و درعین‌حال کاهش زمان بیکاری جراحی پرداختند. مرکزی مقدم و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از مدل شبیه‌سازی پیشامد گسسته باهدف بهینه‌سازی زمان‌بندی بخش جراحی که در آن با ورود افراد، اطلاعات آن‌ها و بیماری آن‌ها، نوع عمل جراحی (انتخابی یا اورژانسی)، مدت‌زمان حضور هر بیمار در بخش جراحی با جزئیات زمانی ثبت گردیده پرداختند. هدف از مسئله زمان‌بندی جراحی اصلی^۱ این است که تخصص‌های پزشکی را به اتاق‌های مختلف جراحی موجود اختصاص دهد، به گونه‌ای که جراحی‌ها به راحتی انجام شود. al Bovim et (۲۰۲۰) با استفاده از روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی متشکل از یک مدل بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای و یک مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته، زمان‌بندی جراحی اصلی که در آن بیماران انتخابی و اورژانسی می‌توانند در یک اتاق عمل درمان شوند را در نظر گرفتند.

برای جلوگیری از عفونت‌های احتمالی، استریل ابزارهای پزشکی قابل‌استفاده مجدد (RMD)^۲ یکی از اهداف اصلی در هر عمل است. ابزارهای پزشکی قابل‌استفاده مجدد پس از استفاده در اتاق‌های عمل به بخش استریل ارسال می‌شوند که شامل یک‌روند چرخه‌ای و چندمرحله‌ای است. Ozturk et al (۲۰۱۰). با استفاده از مدل عدد صحیح مختلط و در نمونه‌های بزرگ‌تر با استفاده از دو رویکرد ابتکاری به منظور حداقل کردن زمان انجام عملیات استریل در خدمات استریلیزاسیون بیمارستان‌ها، به حل مسئله زمان‌بندی دسته‌ای پرداختند. همچنین Ozturk et al. (۲۰۱۴). با استفاده از روش ابتکاری شاخه و کران به مسئله زمان‌بندی دسته‌ای موازی کار بر روی ماشین‌های یکسان به منظور کردن زمان آماده‌سازی روی ماشین‌های موازی پرداختند. Beroule et al. (۲۰۱۶). با استفاده از رویکردهای فراابتکاری (الگوریتم ژنتیکی، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و جست‌وجوی تابو) برای حل مسئله زمان‌بندی اتاق عمل شامل استریلیزاسیون ابزارهای پزشکی، پایه و اساس یک لجستیک عرضی را باهدف هماهنگ کردن خدمات استریل و فعالیت اتاق عمل توسعه دادند. Coban (۲۰۲۰) با استفاده از مدل عدد صحیح مختلط و در نمونه‌های بزرگ‌تر رویکرد

-
1. Master Surgery Scheduling Problem
 2. Reusable Medical Devices

ابتکاری مبتنی بر دسته‌ای و قاعده سرانگشتی به منظور حداقل کردن هزینه کلی شامل هزینه‌های مربوط به استریلیزاسیون، به تعویق افتادن جراحی و انجام عمل جراحی به مسائل زمان‌بندی اتاق عمل و استریلیزاسیون ابزارهای پزشکی قابل استفاده مجدد پرداخت. در آن پژوهش برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق عمل و بخش استریل به صورت یکپارچه مطرح شده است که در آن فقط بیماران انتخابی در نظر گرفته شده است.

برای مقابله با عدم قطعیت‌ها رویکردهای متفاوتی چون رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی، بهینه‌سازی فازی و برنامه‌ریزی استوار در مقالات استفاده شده است. دسته اول اگر عدم قطعیت در داده‌های ورودی باشد و تابع احتمالی توزیع پارامترها مشخص باشد از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده می‌شود. به طور نمونه، (۲۰۱۹) M'Hallah & Visintin با استفاده از روش تقریب میانگین نمونه یک مدل تصادفی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدت زمان جراحی، مدت زمان مراقبت‌های ویژه و طول مدت اقامت بعد از جراحی به حل مسئله زمان‌بندی جراحی‌های انتخابی در یک برنامه دوره‌ای جراحی اصلی که تعداد و نوع جراحی‌ها در یک افق برنامه‌ریزی دو هفته‌ای تعیین می‌شود را با هدف حداکثر کردن ظرفیت اتاق عمل بررسی کردند. (۲۰۲۰) Kamran et al. با استفاده از روش ابتکاری مبتنی بر تولید ستون و تجزیه بندرز برای حل مسئله زمان‌بندی تخصیص تطبیقی بیماران در اتاق‌های عمل یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با اهداف به حداقل رساندن لغو بیماران، تأخیر در بیماران، اضافه‌کاری اتاق عمل، بیکاری جراحان و به حداقل رساندن زمان شروع عمل جراحی بیمار اورژانسی ارائه شده است. بیماران کاندید با توجه به حوادث یا اختلالات پیش‌بینی نشده (به عنوان مثال، ورود بیماران غیرانتخابی) به بلوک‌های اتاق عمل اختصاص داده و توالی آن‌ها تعیین می‌شود. دسته دوم، رویکرد بهینه‌سازی فازی است و هنگامی استفاده می‌شود که هیچ داده تاریخی از پارامتر مدنظر وجود نداشته باشد و در نتیجه هیچ پارامتر احتمالی نتوان به آن نسبت داد. (۲۰۱۹) Behmanesh & Zandieh با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان مبتنی بر پارتو فازی به حل مسئله زمان‌بندی مورد جراحی دو هدفه با اهداف حداقل کردن زمان آماده‌سازی و تعداد موارد جراحی بدون برنامه تحت عدم قطعیت

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل ...؛ ارجمندی و سموئی | ۵۳

مدت‌زمان جراحی فازی پرداختند که بهینه‌سازی تخصیص منابع به مورد جراحی و زمان شروع آن‌ها را در نظر گرفتند. دسته سوم، رویکرد برنامه‌ریزی استوار که رویکرد جدیدی جهت مواجهه با عدم قطعیت است و به دنبال ارائه راه‌حلی برای مسئله موردنظر است که در مقابل عدم قطعیت داده‌ها استوار باشد. (۲۰۱۵) Rachuba and Werners با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی چند معیاره استوار با تمرکز بر مدت‌زمان جراحی نامشخص و ورود بیماران اورژانسی به حل مسئله برنامه‌ریزی عملیاتی برون‌خط باهدف حداقل کردن زمان انتظار، اضافه‌کاری کارکنان و تأخیرها پرداختند. نوروزی رسول آبادی (۱۳۹۵) در پایان‌نامه خود با استفاده از الگوریتم تجزیه بندرز و رویکرد بهینه‌سازی استوار بر پایه برتسیماس و سیم به حل مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای زمان‌بندی هفتگی بیماران انتخابی باهدف بیشینه کردن تعداد بیماران انتخابی برای جراحی و حجم کاری اتاق عمل تحت عدم قطعیت مدت‌زمان جراحی به صورت جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر پرداختند. (۲۰۱۷) Liu et al. یک مسئله زمان‌بندی جراحی با در نظر گرفتن امکانات پزشکی و زمان راه‌اندازی آن‌ها در اتاق‌های عمل را بررسی کردند. آن‌ها یک رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو برای مقابله با عدم قطعیت مربوط به مدت جراحی باهدف حداقل کردن زمان آماده‌سازی را ارائه دادند. (۲۰۲۰) Moosavi and Ebrahimnejad با استفاده از رویکرد ابتکاری دو مرحله‌ای به حل مسئله برنامه‌ریزی استوار اتاق عمل با عدم قطعیت مدت‌زمان جراحی، مدت اقامت و نیازهای اورژانسی باهدف به حداقل رساندن هزینه انتظار بیماران و کاهش کل اضافه‌کاری و بیکاری در اتاق عمل و به حداقل رساندن انحراف کل از متوسط تعداد تخت‌های مورد استفاده در واحدهای بالادست و پایین‌دست پرداختند. (۲۰۲۲) Mazlounian et al. استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار به حل مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح چندهدفه یکپارچه برنامه زمان‌بندی جراحی اصلی و مسئله تخصیص مورد جراحی، با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدت‌زمان جراحی و ورود اضطراری و باهدف به حداکثر رساندن بهره‌برداری از اتاق عمل و حداقل رساندن زمان انتظار بیماران پرداختند.

طبق پیشینه پژوهش انجام شده دریافته‌یم تنها پژوهشی که برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق‌های عمل و بخش استریل را به صورت یکپارچه مورد بررسی قرار داده است، پژوهش (Coban, 2020) است، با این تفاوت که در پژوهش او بیماران انتخابی مدنظر بودند و شرایط کاملاً قطعی بود. در حالی که در تحقیق پیش‌رو با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدت زمان جراحی، علاوه بر بیماران انتخابی، بیماران اورژانسی نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند برای برنامه‌ریزی اتاق عمل و بخش استریل در تمامی بیمارستان‌ها به عنوان یک ابزار مناسب به منظور تسهیل در تصمیم‌گیری و استفاده بهینه از منابع مورد استفاده مدیران و مراکز بهداشت و درمان، خصوصاً بخش‌های جراحی قرار گیرد.

۲- تعریف مسئله و مدل‌سازی

بخش اتاق عمل، یکی از منابع حیاتی در بیمارستان هستند که ضمن ارائه خدمات بهداشتی هزینه‌های زیادی دارند که برای کاهش هزینه‌ها و حفظ کیفیت مراقبت از بیمار از طریق برنامه‌ریزی و زمان‌بندی، کارایی و کیفیت آن بهبود می‌یابد. علاوه بر این، تجهیزات پزشکی منابع حیاتی هستند که در حین عمل جراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند، چراکه کمبود تجهیزات پزشکی مورد نیاز جراحی ممکن است منجر به تأخیر در زمان شروع جراحی شوند که در این صورت اگر بیمار اورژانسی باشد به واسطه دیر شدن جراحی ممکن است منجر به از دست رفتن جان بیمار یا خونریزی شدید و سگته مغزی می‌شود (Coban, 2020). وسایل پزشکی وسایل استریل هستند که به وسایل یک‌بار مصرف و ابزارهای پزشکی قابل استفاده مجدد دسته‌بندی می‌شوند. وسایل پزشکی یک‌بار مصرف، مانند سرنگ، پس از استفاده برای یک بیمار طی یک عمل دور ریخته می‌شوند. ابزارهای پزشکی قابل استفاده مجدد مانند گیره و پنس، آندوسکوپ و موارد دیگر با ضدعفونی کامل و به دنبال آن استریلیزاسیون مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرند. حل مسئله برنامه‌ریزی یکپارچه اتاق عمل و استریلیزاسیون ابزارهای پزشکی قابل استفاده مجدد هزینه کل که شامل هزینه‌های مربوط به استریلیزاسیون، به تعویق افتادن جراحی و انجام عمل جراحی است را کاهش می‌دهد (Coban, 2020). از

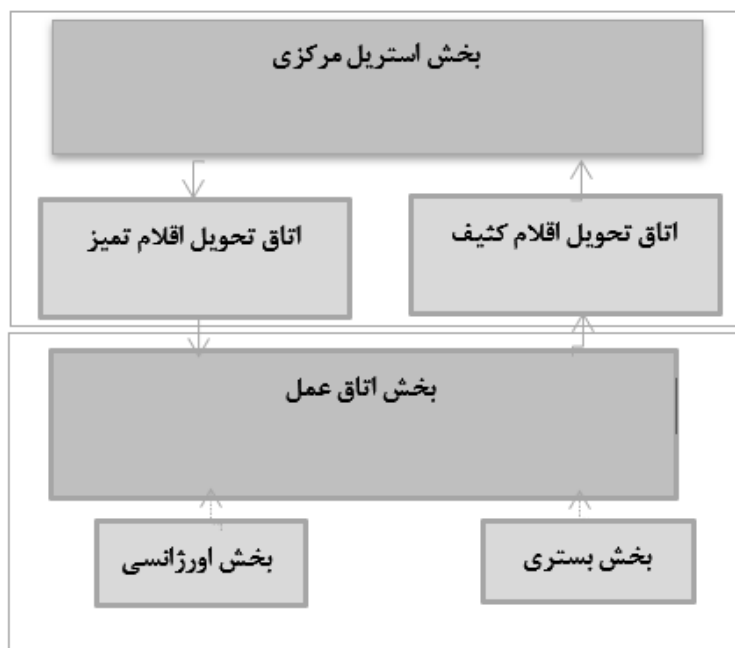
برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل...؛ ارجمندی و سموئی | ۵۵

طرفی برنامه‌ریزی بهتر باعث می‌شود به ابزارهای لازم در زمان مناسب دسترسی وجود داشته باشد.

در تحقیق پیش‌رو، دو هدف در نظر گرفته شده است که هدف اول، کمینه کردن هزینه کل که شامل هزینه انجام عمل‌ها، استفاده از دستگاه‌های استریل و جریمه تأخیر در جراحی بیماران انتخابی است و هدف دوم کمینه کردن زمان تکمیل آخرین عمل در اتاق‌های عمل است که باعث صرفه‌جویی در زمان و همچنین آزادسازی به‌موقع اتاق‌های عمل و منابع انسانی برای عمل‌های بعدی می‌شود. این کار موجب می‌شود عمل‌های اورژانسی به‌موقع انجام شود و جان افراد کمتری به خطر بیفتد. در این پژوهش، بیماران انتخابی و اورژانسی در نظر گرفته شده‌اند که بیماران اورژانسی باید در اسرع وقت جراحی شوند (تعداد و زمان بیماران اورژانسی در نظر گرفته شده که بر اساس مدل ارائه شده در پژوهش Kroer (۲۰۱۸) et al. برنامه‌ریزی شده است). به‌علاوه برای انجام عمل‌های انتخابی و اورژانسی هزینه‌ای در نظر گرفته شده است که به‌منظور اولویت دادن به بیماران اورژانسی هزینه انجام عمل این بیماران کمتر از هزینه انجام عمل‌های انتخابی است، چراکه در دنیای واقعی هم عمل‌های بیماران تصادفی در اسرع وقت باید انجام شوند و از بیمار هم هزینه خیلی کمتری گرفته شود. همچنین برای بیماران اورژانسی حداکثر زمان انتظاری در نظر گرفته می‌شود که نباید بیشتر از آن معطل شوند. بدیهی است جراحی‌هایی که در ساعات کاری اتاق عمل نتوانند زمان‌بندی شوند، به تعویق می‌افتند. همچنین در صورت شروع یک عمل جراحی، نمی‌توان آن را قطع کرد. به‌علاوه، هر بیمار با توجه به شرایطش نیازمند تعداد ابزارهای پزشکی قابل استفاده مجدد مخصوص به خود است. مدت‌زمان استریل ابزارهای قابل استفاده مجدد و ظرفیت هر دستگاه استریل مشخص است و تعداد دستگاه‌های مشغول به استریل نباید بیشتر از تعداد دستگاه‌های استریل باشد. در دنیای واقعی نیز واضح است که با توجه به شرایط بیماران، جراحان، وسایل و تجهیزات، مدت‌زمان جراحی دارای عدم قطعیت است. طبق شکل ۱ ابزارهای پزشکی قابل استفاده مجدد پس از استفاده در بخش اتاق عمل برای بیمارانی که از بخش بستری و بخش اورژانسی وارد می‌شوند به اتاق تحویل اقلام کثیف فرستاده

می‌شود و سپس به منظور استریل این ابزارها به بخش استریل منتقل می‌شود و بعد از فرایند استریل کردن به اتاق تحویل اقلام تمیز فرستاده شده و به منظور استفاده بخش اتاق عمل جراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد و این فرایند برای عمل‌ها تکرار می‌شود.

شکل ۱. نمایش زنجیره ابزارهای قابل استفاده مجدد در بخش اتاق عمل و بخش استریل



مدل پژوهش حاضر توسعه مدل‌های ریاضی دو مقاله Kroer et al (۲۰۱۸) و Coban (۲۰۲۰) است. در پژوهش Kroer et al. (۲۰۱۸) صرفاً برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق‌های عمل را با در نظر گرفتن بیماران انتخابی و اورژانسی لحاظ شده است در حالی که Coban (۲۰۲۰) برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق‌های عمل و بخش استریل را با در نظر گرفتن بیماران انتخابی بررسی قرار داده است. در تحقیق حاضر یک مدل ریاضی دو هدفه جدید که هدف اول کمینه کردن مجموع هزینه‌ها و هدف دوم کمینه کردن زمان تکمیل است ارائه خواهد شد، سپس با استفاده از روش اپسیلون محدودیت تقویت شده مسئله را حل خواهیم کرد. جزییات

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل...؛ ارجمندی و سموئی | ۵۷

مقایسه مقالات Kroer et al (۲۰۱۸)؛ و Coban (۲۰۲۰) و پژوهش حاضر در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مقایسه پژوهش‌های Kroer et al (۲۰۱۸) و Coban (۲۰۲۰) و پژوهش حاضر

پژوهش حاضر	Coban (۲۰۲۰)	Kroer et al. (۲۰۱۸)
برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق‌های عمل و بخش استریل	برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق‌های عمل و بخش استریل	برنامه‌ریزی اتاق‌های عمل
بیماران انتخابی و اورژانسی	بیماران انتخابی	بیماران انتخابی و اورژانسی
مدت‌زمان جراحی غیرقطعی	مدت‌زمان جراحی قطعی	مدت‌زمان جراحی غیرقطعی و ورود بیماران اورژانسی تصادفی
در نظر داشتن حداکثر زمان انتظار برای بیماران اورژانسی	-	در نظر داشتن حداکثر زمان انتظار برای بیماران اورژانسی
برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استوار	یک رویکرد ابتکاری و مبتنی بر قاعده سرانگشتی	رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی
حداقل کردن هزینه استریل کردن، هزینه تأخیر در جراحی، هزینه انجام عمل‌های جراحی انتخابی و اورژانسی و زمان اتمام آخرین عمل	حداقل کردن هزینه استریل کردن، هزینه تأخیر در جراحی و زمان اتمام جراحی	حداقل کردن اضافه‌کاری و ظرفیت بلااستفاده
قبل از رسیدن بیمار اورژانسی عمل جراحی شروع نخواهد شد و زمان رسیدن بیمار مشخص است و نباید بیش از حداکثر زمان انتظار معطل شود	-	ورود تصادفی بیمار اورژانسی می‌باشد و حداکثر زمان انتظار برای بیماران در نظر گرفته شده است

به‌طور کلی مراحل انجام این تحقیق به شرح زیر است:

در ابتدا با توجه به علاقه‌مندی در تحقیقات حوزه بیمارستان، منابع مختلف علمی با تأکید بر تحقیقات جدیدتر شامل مقالات و پایان‌نامه‌ها از پایگاه‌های علمی معتبر مورد بررسی قرار گرفتند. سپس با توجه به شرایطی که در دنیای واقعی وجود دارد، گپ‌های این پژوهش‌ها استخراج یافتند و از این طریق موضوع «برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل ابزارهای جراحی قابل استفاده مجدد با رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریو محور»

برای این پژوهش انتخاب گردید. پس از آن با توجه به نزدیک‌ترین مقالات به موضوع ((Kroer et al (۲۰۱۸)؛ و (Coban (۲۰۲۰) و همچنین تفاوت‌های موضوع در نظر گرفته شده در این پژوهش و مقالات پایه، مدل ریاضی جدیدی توسعه می‌یابد و این مدل با توجه به ساختار چندهدفه بودن خود و همچنین اولویت داشتن یک هدف نسبت به هدف دیگر توسط روش اِپسِلون محدودیت تقویت شده حل می‌گردد. برای بررسی صحت و اعتبارسنجی مدل ریاضی ارائه شده، از حل چندین مثال مختلف و انجام تحلیل حساسیت‌های پارامترهای مختلف از دیدگاه مدیران بیمارستان استفاده می‌شود. برای انجام این تحلیل حساسیت علاوه بر تغییرات تکی پارامترها، تغییرات هم‌زمان چند پارامتر مهم نیز برای ارزیابی‌های بهتر بررسی می‌شود. پس از آن نیز نتایج حاصل از تحقیق ارائه می‌گردد. فلوچارت مراحل انجام این تحقیق مطابق شکل ۲ است.

شکل ۲. فلوچارت مراحل انجام این تحقیق



۲-۱ برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استوار

در پژوهش موردنظر به دلیل نوسانات زیاد مدت‌زمان انجام عمل، ویژگی‌های خاص هر عمل، وضعیت متفاوت جراحان در انجام عمل و برای هرچه نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی، مدت‌زمان انجام عمل غیرقطعی در نظر گرفته شده است که با توجه به نیاز دنیای واقعی در مقابله با عدم قطعیت رویکرد بهینه‌سازی تصادفی سناریو محور استوار ارائه می‌گردد. رویکرد بهینه‌سازی استوار در مقایسه با رویکردهای دیگر برای مواجهه با عدم قطعیت مناسب و مقرون‌به‌صرفه می‌باشد، چراکه در مقابل تغییرات پایدار است، نوسان تغییرات را حداقل می‌کند و بهینگی و شدنی بودن را حفظ می‌کند. در رویکرد بهینه‌سازی استوار نیازی به دانستن نوع توزیع نیست و در مقایسه با بهینه‌سازی تصادفی و فازی با جواب موجه بیشتری روبرو می‌شود و پیچیدگی کمتری دارد. در این پژوهش، ما از مدل استوار مالوی و همکاران (۱۹۹۵)^۱ استفاده می‌کنیم چراکه در چنین شرایط محیطی که نیاز به تعریف سناریوهای مختلف دارد، مدل بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو از بهترین روش‌ها خواهد بود. مالوی و همکاران چارچوبی برای بهینه‌سازی استوار ارائه کردند که شامل دو تعریف مهم «جواب استوار» و «مدل استوار» است. به این صورت که؛ زمانی یک جواب برای مدل بهینه‌سازی، جوابی استوار نامیده می‌شود که آن جواب تحت همه سناریوها نزدیک به بهینه باقی بماند؛ و همچنین زمانی یک مدل، مدلی استوار است که تحت همه سناریوها تقریباً موجه باشد. با توجه به این تعاریف، مدل عمومی بهینه‌سازی استوار را توسعه داده‌اند، این بهینه‌سازی مرتبط با مسائلی است که جنس داده‌های آن از نوع سناریو باشد به عبارت دیگر، مقادیر داده‌های مسئله توسط مجموعه‌ای از سناریوها توصیف شود. در حالت کلی در مواجهه با مدل‌های بهینه‌سازی ما با دو بخش مجزا مواجه هستیم، بخش ساختاری که ثابت است و فاقد هرگونه نوسان در داده‌های ورودی آن می‌باشد و بخش کنترل که تابعی دستخوش داده‌های نامطمئن و نوسانی است. در تابع هدف مدل مالوی و همکاران برای استواری مدل و استواری جواب دارای جریمه هستیم که با توجه به ترجیح مدل‌ساز به هر یک از این جریمه‌ها وزن اختصاص می‌دهیم. روشن است که در این مدل، با توجه به ترجیحات تصمیم‌گیرنده، بین استواری

1. Mulvey et al.

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل...؛ ارجمندی و سموئی | ۶۱

جواب و استواری مدل باید تبادل صورت گیرد. نحوه فرموله سازی مدل بهینه‌سازی استوار مالوی و همکاران در ادامه آورده شده است.

مدل برنامه‌ریزی خطی با پارامترهای تصادفی زیر را در نظر بگیرید:

$$\min c^T x + d^T y \quad (1)$$

$$\text{s.to: } Ax = b \quad (2)$$

$$Bx + Cy = e \quad (3)$$

$$x \geq 0, y \geq 0 \quad (4)$$

متغیر x برداری از متغیرهای طراحی و متغیر y نیز برداری از متغیرهای کنترل است. ماتریس A ، B و C ماتریس پارامترهای ضرایب متغیرها در سمت چپ محدودیت‌ها و b و e نیز بردار پارامترهای سمت راست هستند. همچنین A و b مشخص و C ، B و e نادقیق هستند.

تحقق هر مقدار برای پارامتر نادقیق یک سناریو نامیده می‌شود که با s نشان داده و احتمال آن با p_s آورده می‌شود (مجموع p_s برای تمامی s ها برابر یک است). برای نمایش مجموعه سناریوها از $\Omega = \{1, 2, \dots, S\}$ استفاده می‌کنیم. ضرایب نادقیق B ، C و e را نیز به صورت C_s ، B_s و e_s برای هر سناریو $s \in S$ نشان می‌دهیم. همچنین، در مدل استوار زیر مجموعه $\{y_1, y_2, \dots, y_s\}$ مجموعه‌ای از متغیرهای کنترل برای هر سناریو $s \in S$ است. متغیر کنترل y نیز که در زمان تحقق یک سناریو در معرض تعدیل قرار می‌گیرد، به صورت y_s برای سناریو s نشان داده می‌شود. مدل بهینه‌سازی تصادفی سناریو محور استوار به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\min \gamma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) + \omega p(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_s) \quad (5)$$

$$\text{s.to: } Ax = b \quad (6)$$

$$B_s x + C_s y_s + \eta_s = e_s \quad \forall s \in \Omega \quad (7)$$

$$x \geq 0, y_s \geq 0, \eta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (8)$$

به دلیل نادقیق بودن پارامترها، مدل ممکن است برای برخی سناریوها ناموجه باشد. مجموعه $\{\eta_1, \dots, \eta_s\}$ شامل بردارهای خطا است که اندازه ناموجه بودن در محدودیت‌های کنترل را

برای سناریو s اندازه‌گیری می‌کند. در صورت موجه بودن مدل برای سناریوی s ، η_s برابر با صفر خواهد بود؛ در غیر این صورت، η_s مقدار مثبتی خواهد بود. در مدل بالا، تابع هدف رابطه (۱)، $(\xi = c^T x + d^T y)$ که می‌تواند تابع سود یا هزینه باشد، تبدیل به متغیر تصادفی به صورت $(\xi_s = c^T x + d_s^T y_s)$ می‌شود که متوسط آن به ازای سناریوها، سود یا هزینه مورد انتظار نامیده می‌شود.

در مدل بالا، تابع هدف دارای دو قسمت شامل استواری جواب و استواری مدل است که وزن قسمت اول با γ و وزن قسمت دوم با ω مشخص می‌شود. در قسمت اول که استواری جواب را در نظر می‌گیرد، از ξ_s برای نمایش تابع هزینه یا $f(x, y_s)$ استفاده می‌کنیم. از این رو، $\xi_s = f(x, y_s)$ خواهد بود. واریانس بزرگ برای متغیر تصادفی به معنی بالا بودن ریسک این جواب خواهد بود. در این صورت، یک تغییر کوچک در مقدار پارامترهای نادقیق مدل می‌تواند باعث یک تغییر بزرگ در مقدار تابع هدف شود. برای این قسمت، مالوی و همکاران از رابطه زیر استفاده کردند:

$$\sigma(0) = \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s + \gamma \sum_{s \in \Omega} p_s \left(\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'} \right)^2 \quad (9)$$

γ وزن تغییرپذیری جواب را نشان می‌دهد. عبارت $\sigma(0)$ به صورت عبارتی غیرخطی لحاظ می‌شود. در این عبارت، با عبارت درجه دوم نیاز به عملیات محاسباتی زیادی داریم. برای حل این مشکل، از قدر مطلق انحرافات به صورت زیر می‌توان استفاده کرد:

$$\sigma(0) = \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s + \gamma \sum_{s \in \Omega} p_s \left| \xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'} \right| \quad (10)$$

با توجه به غیرخطی بودن قدر مطلق انحرافات، می‌توان با معرفی دو متغیر انحرافی غیر منفی Q_s^+ و Q_s^- غیرخطی را به فرم خطی تبدیل کرد و به جای حداقل سازی قدر مطلق انحرافات، این دو متغیر را با در نظر گرفتن محدودیت‌های اصلی و محدودیت‌های اضافی، حداقل ساخت. این محدودیت اضافی باعث می‌شود اختلاف درون قدر مطلق مقدار مثبتی بگیرد. بر این اساس، مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی بالا به صورت خطی بازنویسی می‌شود:

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل...؛ ارجمندی و سموئی | ۶۳

$$\min \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s + \gamma \sum_{s \in \Omega} (Q_s^+ + Q_s^-) \quad (11)$$

$$\text{s. to: } \xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'} = Q_s^+ - Q_s^- \quad \forall s \in \Omega \quad (12)$$

$$Q_s^+, Q_s^- \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (13)$$

در روش خطی سازی بالا، با معرفی متغیرهای انحرافی غیر منفی، محدودیت‌های زیادی به مدل تحمیل می‌شود. برای این منظور، یو و لی (۲۰۰۰)^۱ از یک روش کارا برای خطی سازی فرم قدر مطلق انحرافات به صورت زیر استفاده کرده‌اند:

$$\text{Min } \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s + \gamma \sum_{s \in \Omega} p_s \left[\left(\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'} \right) + 2\theta_s \right] \quad (14)$$

$$\text{s. to: } \xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'} + \theta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (15)$$

$$\theta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (16)$$

در قسمت دوم، از تابع جریمه $(\omega p(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_s))$ برای دادن جریمه به ناموجه بودن مدل استفاده می‌شود که استواری مدل را اندازه‌گیری می‌کند. ω وزن غیرموجه بودن مدل را نشان می‌دهد و با پارامتر γ تبادل بین استواری جواب و مدل را کنترل می‌کند. در مسئله‌ای که در ادامه آورده خواهد شد، η_s که ناموجه بودن مدل را نشان می‌دهد، تقاضای برآورده نشده در سناریو s خواهد بود. تابع جریمه، مقدار مورد انتظار بردار خطا η_s خواهد بود که به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\rho(0) = \sum_{s \in \Omega} p_s \eta_s \quad (17)$$

در نهایت، مدل برنامه‌ریزی تصادفی محور استوار به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\text{Min } \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s + \gamma \sum_{s \in \Omega} p_s \left[\left(\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'} \right) + 2\theta_s \right] + \omega \sum_{s \in \Omega} p_s \eta_s \quad (18)$$

$$\text{s. to: } Ax = b \quad (19)$$

$$B_s x + C_s y_s + \eta_s = e_s \quad \forall s \in \Omega \quad (20)$$

$$\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'} + \theta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (21)$$

$$\theta_s \geq 0, x \geq 0, y_s \geq 0, \eta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (22)$$

۲-۲ مدل ریاضی

برای توضیح مدل ریاضی، نخست اندیس‌ها، پارامترها، مجموعه‌ها و متغیرهای تصمیم مدل ارائه شده‌اند. سپس مدل ریاضی مسئله معرفی گردیده است.

اندیس‌ها

$i, j \in I$ و z اندیس عمل‌ها

$a \in A$ عمل‌های اورژانسی

$b \in B$ عمل‌های انتخابی

$t \in T$ زمان

$r \in R$ اتاق‌های عمل

$s, s' \in \Omega$ سناریوها

مجموعه‌ها

A مجموعه عمل‌های اورژانسی

B مجموعه عمل‌های انتخابی

$I = A \cup B$ مجموعه کل عمل‌ها

T مجموعه زمان‌ها

R مجموعه اتاق‌های عمل

Ω مجموعه سناریوها

پارامترها

h_0 تعداد RMD های تمیز در زمان \bullet

d_0 تعداد RMD های کثیف در زمان \bullet

M یک عدد مثبت خیلی بزرگ

T طول افق برنامه‌ریزی

n_i تعداد RMD موردنیاز برای هر عمل جراحی i

p_i مدت زمان هر جراحی i

p_i^s مدت زمان جراحی i تحت سناریو s

ster زمان موردنیاز برای استریل

cap ظرفیت دستگاه‌های استریل

mach تعداد دستگاه‌های استریلیزاسیون

cost1 هزینه استفاده از دستگاه‌های استریلیزاسیون

cost2_b هزینه تأخیر در عمل انتخابی

cost3_a هزینه انجام عمل‌های اورژانسی که به‌منظور اولویت دادن به جراحی بیماران

اورژانسی نسبت به جراحی بیماران انتخابی، مقداری کمتر برای بیماران اورژانسی در نظر گرفته می‌شود.

cost4_b هزینه انجام عمل‌های انتخابی

e_a حداکثر زمان انتظار برای بیماران اورژانسی a

v_a زمان رسیدن بیماران اورژانسی a

buffer حداقل تعداد RMD تمیز موردنیاز در هر دوره زمانی

π^s احتمال رخداد سناریو s

λ وزن تغییرپذیری جواب در قسمت اول تابع هدف و نشان‌دهنده استواری جواب

ω وزن غیرموجه بودن در قسمت دوم تابع هدف و نشان‌دهنده استواری مدل

متغیرهای تصمیم

• اگر عمل i در زمان t در اتاق عمل r انجام شود، 1 در غیر این صورت 0 $x_{i,t,r}$

• اگر عمل i زودتر از عمل j در اتاق عمل r انجام شود، 1 در غیر این صورت 0 $f_{i,j,r}$

δ_i^s مقدار ناموجه بودن مدل را نشان می‌دهد که شامل تقاضای برآورده نشده عمل جراحی i در سناریو s خواهد بود.

h_t تعداد RMD های تمیز در ابتدای زمان t

d_t تعداد RMD های کثیف در ابتدای زمان t

o_t تعداد RMD هایی که در ابتدای زمان t استریلیزاسیون آنها شروع می‌شود

m_t تعداد دستگاه‌های استریلی که در ابتدای زمان t شروع به استریلیزاسیون می‌کنند

$t'_{i,r}$ زمان شروع عمل i در اتاق عمل r

$c_{i,r}$ زمان اتمام عمل i در اتاق عمل r

$c_{i,r}^s$ زمان اتمام عمل i در اتاق عمل r تحت سناریو s

C_{max} زمان تکمیل آخرین عمل

C_{max}^s زمان تکمیل آخرین عمل تحت سناریو s

$$\min \sum_{t \in T} cost_1 m_t + \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} t cost_{2b} x_{b,t,r} \quad (23)$$

$$+ \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} cost_{3a} x_{a,t,r}$$

$$+ \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} cost_{4b} x_{b,t,r}$$

$$\min \lambda \sum_{s \in \Omega} \pi^s C_{max}^s + (1 - \lambda) \sum_{s \in \Omega} \pi^s [(C_{max}^s - \sum_{s' \in \Omega} \pi^{s'} C_{max}^{s'}) + 2\theta^s] + \omega \sum_{s \in \Omega} \sum_{i \in I} \pi^s \delta_i^s \quad (24)$$

$$h_{t-1} - \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} n_a x_{a,t,r} - \sum_{r \in R} \sum_{b \in B} n_b x_{b,t,r} + o_{t-ster} = \quad (25)$$

$$h_t \quad \forall t \in T, t \geq 1 + ster$$

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل...؛ ارجمندی و سموتی | ۶۷

$$h_{t-1} - \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} n_a x_{a,t,r} - \sum_{r \in R} \sum_{b \in B} n_b x_{b,t,r} = h_t \quad \forall t \in T, t \leq ster \quad (26)$$

$$d_{t-1} - o_t + \sum_{r \in R} \sum_{a \in A: t-p_a^s \geq 1} n_a x_{a,t,r} + \sum_{r \in R} \sum_{b \in B: t-p_b^s \geq 1} n_b x_{b,t,r} = d_t \quad \forall t \in T, s \in \Omega \quad (27)$$

$$o_t \leq cap \quad m_t \quad \forall t \in T \quad (28)$$

$$m_t \leq mach \quad \forall t \in T, t \geq 1 + ster \quad (29)$$

$$\sum_{a \in A} x_{a,t,r} + \sum_{b \in B} x_{b,t,r} \leq 1 \quad \forall t \in T, r \in R \quad (30)$$

$$\sum_{t \in T: t \leq T-p_b^s} \sum_{r \in R} x_{b,t,r} = 1 \quad \forall b \in B, s \in \Omega \quad (31)$$

$$\sum_{t=v_a}^{t=v_a+e_a} \sum_{r \in R} x_{a,t,r} = 1 \quad \forall a \in A \quad (32)$$

$$h_t \geq buffer \quad \forall t \in T \quad (33)$$

$$t'_{a,r} \geq t x_{a,t,r} \quad \forall a \in A, r \in R, t \in T, t \geq v_a, t \leq v_a + e_a \quad (34)$$

$$t'_{b,r} \geq t x_{b,t,r} \quad \forall b \in B, r \in R, t \in T \quad (35)$$

$$C_{j,r}^{s'} - C_{i,r}^s + M \left(1 - \sum_{t \in T} x_{j,t,r} \right) + M \left(1 - \sum_{t \in T} x_{i,t,r} \right) + M(1 - f_{i,j,r}) \geq p_j^{s'} + ster \quad \forall j \in I, i \in I, r \in R, i \neq j, s, s' \in \Omega \quad (36)$$

$$C_{i,r}^s - C_{j,r}^{s'} + M \left(1 - \sum_{t \in T} x_{i,t,r} \right) + M \left(1 - \sum_{t \in T} x_{j,t,r} \right) + M(f_{i,j,r}) \geq p_i^s + ster \quad \forall j \in I, i \in I, r \in R, i \neq j, s, s' \in \Omega \quad (37)$$

$$C_{i,r}^s = \sum_{t \in T} (t + p_i^s)(x_{i,t,r}) + \delta_i^s \quad \forall i \in I, r \in R, s \in \Omega \quad (38)$$

$$c_{max}^s \geq C_{i,r}^s \quad \forall i \in I, r \in R, s \in \Omega \quad (39)$$

$$\left(c_{max}^s - \sum_{s' \in \Omega} \pi^{s'} c_{max}^{s'} \right) + \theta^s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (40)$$

$$x_{i,t,r} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, t \in T, r \in R \quad (41)$$

$$f_{i,j,r} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in I, r \in R \quad (42)$$

$$h_t, d_t, k_t, m_t \geq 0 \text{ and integer} \quad \forall t \in T \quad (43)$$

در مسئله موردنظر تابع هدف (۲۳) هزینه کل که شامل: هزینه استریلیزاسیون، تأخیر در عمل‌های جراحی انتخابی، هزینه انجام به‌موقع عملیات جراحی هستند را کمینه می‌کند. تابع هدف (۲۴) به کمینه‌سازی زمان تکمیل آخرین اتاق عمل می‌پردازد. از آنجا که مدت جراحی‌ها تحت سناریو می‌باشد، این تابع هدف با شرایط غیرقطعی مواجه است و از این رو در این تابع هدف همان‌طور که مطابق مفاهیم استوار مشاهده می‌شود، سعی بر بهینه‌سازی و موجه بودن هم‌زمان وجود دارد. محدودیت (۲۵) و (۲۶) بیان‌کننده موجودی ابزارهای استریل شده در دوره قبلی و مواردی که استریل آن‌ها تازه به پایان رسیده با توجه به ابزارهای موردنیاز برای عمل‌ها در لحظه t را بیان می‌کند که می‌توانند برای جراحی‌های دوره فعلی بر اساس تعداد ابزارهای موردنیاز هر عمل استفاده شوند. محدودیت (۲۷) بیان‌کننده موجودی تعداد ابزارهای کثیف در دوره t می‌باشد که برابر است با تعداد ابزارهای کثیف دوره قبلی به علاوه مجموع ابزارهای موردنیاز عمل جراحی که کثیف شده و در لحظه t استریلیزاسیون آن‌ها شروع می‌شود. محدودیت (۲۸) به محدودیت ظرفیت دستگاه‌های استریل اشاره دارد. محدودیت (۲۹) اطمینان حاصل می‌کند که تعداد کل دستگاه‌های مشغول به استریل در هر دوره زمانی کمتر یا برابر با تعداد دستگاه‌های استریل است. محدودیت (۳۰) تعیین می‌کند که در زمان t در هر اتاق عمل حداکثر می‌تواند یک عمل انجام گیرد. محدودیت‌های (۳۱)

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل...؛ ارجمندی و سموئی | ۶۹

و (۳۲) تضمین می‌کند که در یک‌زمان معین تنها یک عمل در یک اتاق عمل انجام می‌گیرد. محدودیت (۳۳) بافر ابزار استریل با این محدودیت تعیین می‌شود. محدودیت (۳۴) زمان شروع عمل اورژانسی را تعیین می‌کند که قبل از رسیدن بیمار اورژانسی عملیات شروع نمی‌شود و نباید بیش از حداکثر زمان انتظار معطل شود. محدودیت (۳۵) زمان شروع عملیات انتخابی را مشخص می‌کند، اگر در اتاق عمل t در زمان t انجام شود. محدودیت‌های (۳۶) و (۳۷) در صورتی یک عمل زودتر از عمل دیگر در اتاق عمل t انجام می‌شود که زمان اتمام آن عمل کوچک‌تر مساوی زمان اتمام عمل بعدی باشد و برعکس. محدودیت (۳۸) زمان اتمام عمل‌ها را در اتاق عمل t تحت هر سناریو تعیین می‌کند. محدودیت (۳۹) زمان بسته شدن آخرین اتاق عمل را مشخص می‌کند. محدودیت (۴۰) محدودیت کنترلی تحت سناریو s می‌باشد. محدودیت (۴۱) تا (۴۳) وضعیت و متغیرها را نشان می‌دهد.

۳- روش حل پژوهش

۳-۱ روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده

تکنیک‌های مختلفی برای حل مسائل چندهدفه وجود دارد که یکی از آن‌ها، روش محدودیت اپسیلون است. در این روش یکی از توابع هدف به‌عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته‌شده و سایر توابع هدف، به‌صورت محدودیت به مسئله اعمال می‌شوند. توسعه‌های گوناگونی برای روش محدودیت اپسیلون جهت کارا تر شدن آن ارائه‌شده است که از جمله می‌توان به روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده^۱ که نخستین بار در سال ۲۰۰۹ توسط ماوروتاس^۲ ارائه‌شده است، پرداخت. در این روش فقط جواب‌های کارا تولید می‌شود و همچنین در صورت نشدنی بودن مسئله، الگوریتم حل متوقف‌شده و برای تکرارهای بعدی حل نمی‌شود که این امر سبب افزایش سرعت حل آن نسبت به روش محدودیت اپسیلون معمولی شده است. علاوه بر این برخلاف روش محدودیت اپسیلون معمولی، در اولین گام نسخه تقویت‌شده، برای تشکیل جدول موازنه و تولید جواب‌های پارتویی از بهینه‌سازی

1. Augmented Epsilon constraint method
2. Mavrotas

لکسیکوگرافیک^۱ استفاده می‌شود.

مراحل روش محدودیت اسیلون توسعه یافته عبارت‌اند از:

گام اول: یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب می‌شود.

گام دوم: هر بار با در نظر گرفتن یکی از توابع هدف، مسئله حل شده و مقدار بهینه هر تابع هدف به دست می‌آید.

گام سوم: در این روش با استفاده از روش لکسیکوگراف، بهترین و بدترین (f_i^{max}, f_i^{min}) مقدار برای هر تابع هدف به دست می‌آید، بدین صورت که بهترین مقدار تابع هدف اول برابر مقدار بهینه آن در حالت بهینه‌سازی مسئله با در نظر گرفتن تابع هدف به صورت انفرادی است. سپس با بهینه‌سازی تابع هدف دوم با این محدودیت که تابع هدف اول در مقدار بهینه خود باقی بماند بدترین مقدار تابع هدف دوم تعیین می‌شود. این کار تا بهینه‌سازی تمام توابع هدف ادامه می‌یابد و بدین ترتیب بازه هر تابع هدف (r_i) تعیین می‌شود.

$$[f_i^{max}, f_i^{min}] \quad (۴۴)$$

$$r_i = f_i^{max} - f_i^{min} \quad (۴۵)$$

گام چهارم: بازه بین دو مقدار بهینه توابع فرعی، به تعداد از قبل مشخص شده‌ای (q_i) تقسیم شده و یک جدول مقادیر برای اسیلون‌ها (ε_i^k) به دست می‌آید.

$$\varepsilon_i^k = f_i^{max} - \frac{r_i}{q_i} * k \quad k = 0, 1, \dots, q_i \quad (۴۶)$$

گام پنجم: هر بار با در نظر گرفتن هر یک از مقادیر اسیلون، مسئله با تابع هدف اصلی حل می‌شود. بدین صورت که محدودیت‌های مربوط به توابع هدف فرعی با استفاده از متغیرهای مناسب کمبود یا مازاد به صورت محدودیت‌های مساوی تبدیل شده و با در نظر گرفتن ضریب دلتا بین 10^{-3} تا 10^{-6} برای این متغیرهای مازاد یا کمبود، مسئله حل شده و جواب‌های کارا

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل...؛ ارجمندی و سموئی | ۷۱

تولید می‌گردد s_p ها متغیرهای نامنفی کمکی و δ یک پارامتر برای نرمال‌سازی اهداف هستند.

مسئله جدید به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} & \min\{f_1(x) + \delta * (s_2 + s_3 + \dots + s_p)\} \\ & f_2(x) = \varepsilon_2 + s_2 \\ & f_3(x) = \varepsilon_3 + s_3 \\ & \vdots \\ & f_p(x) = \varepsilon_p + s_p \\ & x \in X, s_i \in R^+ \end{aligned} \tag{47}$$

گام ششم: در نهایت جواب‌های پارتویی یافته شده گزارش می‌شود (حیدری و همکاران، ۲۰۱۹)!

برای حل مدل چندهدفه ارائه شده در این تحقیق، با روش اسپیلون محدودیت تکامل یافته، هدف اول مدل که حداقل نمودن هزینه کل است، به عنوان هدف اصلی مسئله در تابع هدف آورده می‌شود و هدف دوم، حداقل نمودن زمان تکمیل آخرین عمل، به مقادیر اسپیلون محدود می‌شوند.

۴- حل و تجزیه و تحلیل محاسباتی

۴-۱ مثال عددی

به جهت بررسی عملکرد مدل مذکور مثالی در ابعاد کوچک حل خواهد شد. برای حل این مثال، یک مسئله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق عمل و بخش استریل با داده‌های ورودی در جداول ۲، ۳، ۴ مورد بررسی قرار دادیم. نتایج منطقی حاصل از حل مدل غیرقطعی در جداول ۵ و ۶ و شکل‌های ۳ تا ۵ نمایش داده شده است که زمان حل مسئله در سیستم با نرم‌افزار GAMS با سالور CPLEX به میزان 07.859 ثانیه به دست آمده است.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای ورودی

تعداد اتاق‌های عمل	تعداد عمل‌های جراحی	دوره‌های زمانی	مدت زمان استریل	تعداد دستگاه‌های استریل	ظرفیت دستگاه‌های استریل	بافر ابزار استریل	زمان رسیدن بیماران اورژانسی	حداکثر زمان انتظار بیماران اورژانسی	وزن تغییر پذیری	وزن غیرموجه بودن
4	۵	۳۰	۵	۲	۱۰	۲۵	۵	۶	۰.۵	۱

جدول ۳. مقادیر پارامترهای هزینه کل برای عمل‌های جراحی

هزینه کل	عمل انتخابی ۱	عمل انتخابی ۲	عمل انتخابی ۳	عمل انتخابی ۴	عمل اورژانسی ۵
هزینه تأخیر در جراحی انتخابی	۳۰۰	۵۵۰	۴۰۰	۳۵۰	-
هزینه انجام عمل‌های انتخابی	۱۰۰	۲۵۰	۱۵۰	۲۰۰	-
هزینه انجام عمل‌های اورژانسی	-	-	-	-	۲۰
هزینه استفاده از دستگاه‌های استریلیزاسیون	۱۵۰				

جدول ۴. مقادیر پارامتر ابزارهای جراحی

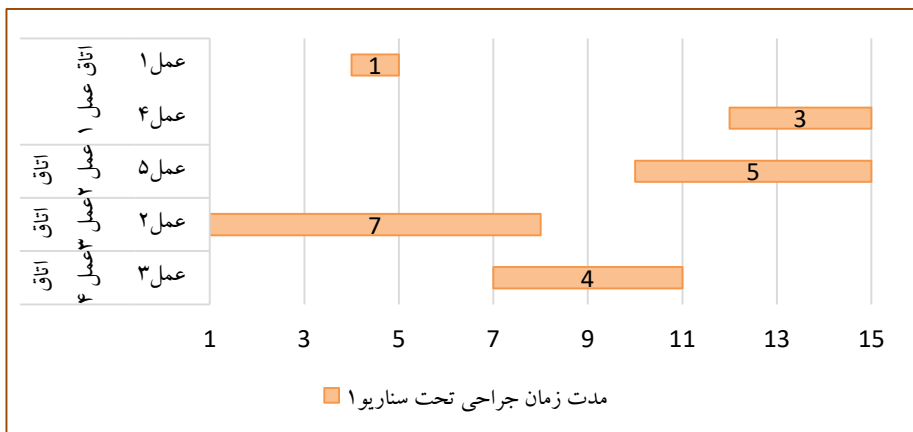
ابزارهای جراحی	عمل انتخابی ۱	عمل انتخابی ۲	عمل انتخابی ۳	عمل انتخابی ۴	عمل اورژانسی ۵
تعداد ابزارهای مورد نیاز جراحی	۳	۲	۴	۵	۶
موجودی ابزارهای تمیز در لحظه صفر	۳۰				
موجودی ابزارهای کثیف در لحظه صفر	۱۰				

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل...؛ ارجمندی و سموئی | ۷۳

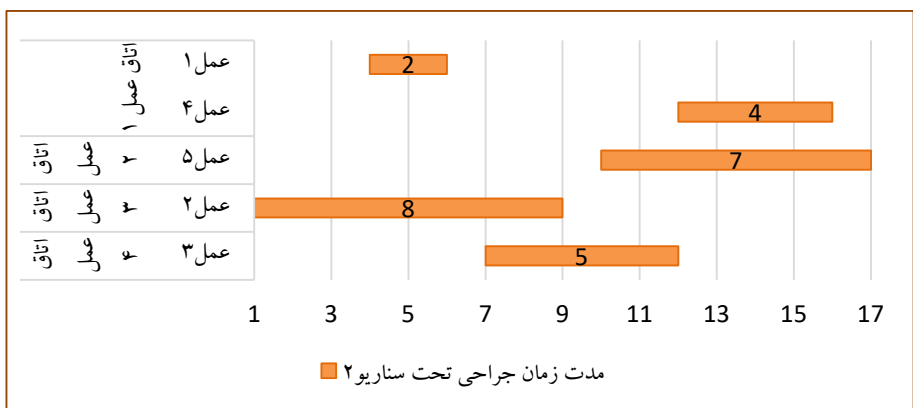
جدول ۵. نتایج به‌دست‌آمده از حل مثال

تعداد ابزارهایی که در لحظه t استریلیزاسیون آن‌ها شروع می‌شود	تعداد دستگاه‌هایی در لحظه t شروع به استریلیزاسیون می‌کنند	تعداد ابزارهای تمیز در ابتدای لحظه t	تعداد ابزارهای کثیف در ابتدای لحظه t
$o_1 = 10, o_7 = 5$	$m_1 = 1, m_7 = 1$	$h_{1,2,3} = 28, h_{4,5,10,11...30} = 25, h_6 = 35, h_{7,8,9} = 31$	$d_{4,5,6} = 3, d_{7,8,9} = 2, d_{10,11} = 8, d_{12,13,...,30} = 13$

شکل ۳. گانت چارت عمل‌ها در اتاق عمل تحت سناریو ۱



شکل ۴. گانت چارت عمل i در اتاق عمل I تحت سناریو ۲



شکل ۵. گانت چارت عمل i در اتاق عمل ۲ تحت سناریو ۳



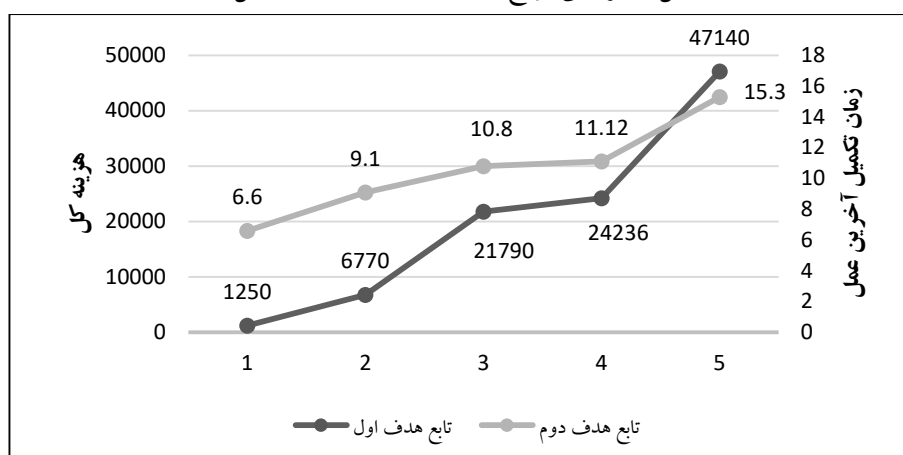
جدول ۶. نتایج زمان اتمام آخرین عمل تحت سناریو i

	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
زمان اتمام آخرین عمل تحت سناریو	15.800	17	19

۲-۴ تجزیه و تحلیل محاسباتی

در این بخش، تحلیل حساسیت پنج مسئله با استفاده از داده‌های تصادفی و تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف مدل غیرقطعی مثال موردنظر به منظور بررسی عملکرد مدل انجام شد که خروجی آن ۳ نقطه پارتو بوده است.

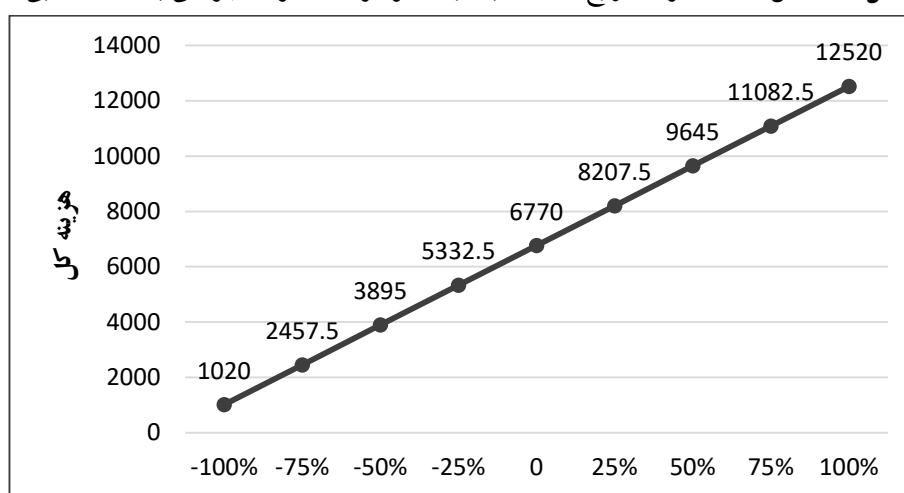
شکل ۶. بررسی توابع هدف در ابعاد مختلف مسائل



برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل...؛ ارجمندی و سموتی | ۷۵

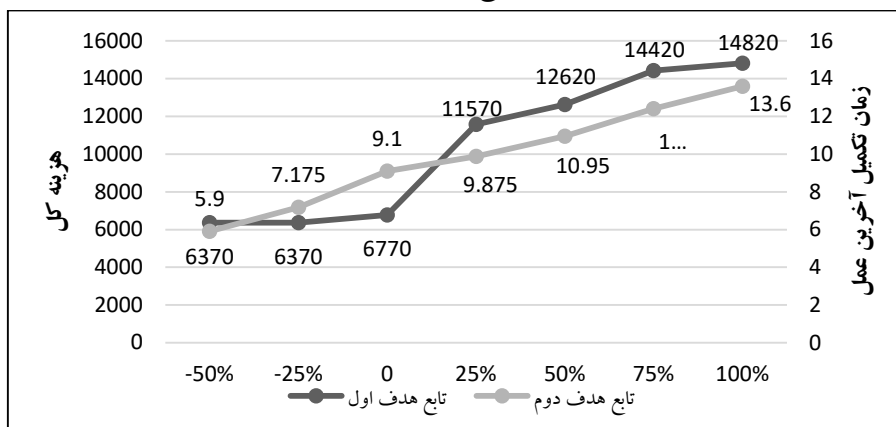
در شکل ۶ تغییرات توابع هدف نسبت به پنج مسئله با مقادیر مختلف نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش مقادیر داده‌های ورودی مسئله؛ تابع هدف اول، کمینه کردن هزینه و تابع هدف دوم، کمینه کردن زمان تکمیل آخرین عمل و مدت‌زمان حل مسئله افزایش می‌یابد.

شکل ۷. نمایش روند تغییرات توابع هدف نسبت به تغییر هزینه تأخیر در جراحی بیماران انتخابی



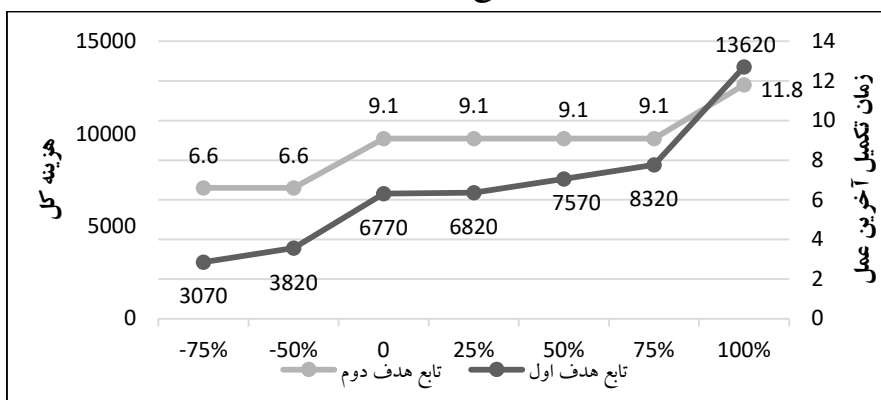
در شکل ۷ تأثیر تغییرات پارامتر هزینه تأخیر در جراحی بیماران انتخابی نسبت به تابع هدف اول نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش مقادیر پارامتر هزینه تأخیر در جراحی بیماران انتخابی، تابع هدف اول که کمینه کردن هزینه‌ها است افزایش می‌یابد و با کمینه کردن مقادیر پارامتر هزینه تأخیر در جراحی بیماران انتخابی، مقدار تابع هدف اول کاهش می‌یابد و در این مسئله افزایش و کاهش مقادیر هزینه تأخیر در جراحی بیماران انتخابی تأثیری بر مقدار تابع هدف دوم که کمینه کردن زمان تکمیل کار بود نداشت و ثابت ماند از این‌رو در این شکل قرار داده نشده است.

شکل ۸. نمایش روند تغییرات توابع هدف نسبت به تغییر مدت زمان جراحی



در شکل ۸ تأثیر تغییرات پارامتر مدت زمان جراحی بیماران اورژانسی و انتخابی نسبت به هر دو تابع هدف اول و دوم نمایش داده شده است. همان طور که مشخص است، با افزایش پارامتر مدت زمان جراحی، تابع هدف اول که هزینه کل را شامل می شود افزایش می یابد، چراکه پارامتر مدت زمان جراحی به صورت غیرمستقیم بر تابع هدف اول تأثیر خواهد گذاشت. با کاهش مدت زمان جراحی تابع هدف اول کاهش می یابد. با افزایش مقادیر پارامتر مدت زمان جراحی، تابع هدف دوم که کمینه کردن زمان تکمیل آخرین عمل است به صورت مستقیم افزایش و با کاهش مدت زمان جراحی، تابع هدف دوم به صورت مستقیم کاهش می یابد.

شکل ۹. نمایش روند تغییرات توابع هدف نسبت به تغییر مدت زمان استریل



برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل ...؛ ارجمندی و سموئی | ۷۷

در شکل ۹ تأثیر تغییرات مدت‌زمان استریل نسبت به هر دو تابع هدف اول و دوم نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش پارامتر مدت‌زمان استریل، هزینه استفاده از دستگاه‌های استریل و درنهایت هزینه کل که تابع هدف اول است، افزایش خواهد یافت و تابع هدف دوم که زمان تکمیل آخرین عمل است خیلی کم افزایش خواهد یافت. با کاهش مدت‌زمان استریل تابع هدف اول کاهش پیدا می‌کند چراکه هزینه استفاده از دستگاه استریل کاهش می‌یابد و تابع هدف دوم به مقدار خیلی کم کاهش و در ادامه ثابت خواهد ماند، چراکه پارامتر مدت‌زمان استریل به‌صورت غیرمستقیم بر تابع هدف دوم تأثیر خواهد گذاشت.

در جدول ۷ به بررسی حالت‌های مختلف تغییرات سه پارامتر هزینه تأخیر در جراحی بیماران انتخابی، مدت‌زمان انجام عمل‌های جراحی و مدت‌زمان استریل پرداختیم، چراکه تغییرات داده‌های این سه پارامتر تأثیر بیشتری بر دو تابع هدف دارد، به همین دلیل از دید مدیر بیمارستان این سه پارامتر در مدل مذکور مهم‌تر است و با تغییرات این سه پارامتر می‌توان ایدئال‌ترین راه را برای کاهش دو تابع هدف که از دید مدیر بیمارستان بهتر باشد، یافت. این تغییرات در بازه 50% تا $50\%+$ به‌صورت 25% افزایش و کاهش است. به‌عنوان مثال در حالت D به افزایش 25% هزینه تأخیر در جراحی و مدت‌زمان عمل جراحی و کاهش 25% مدت‌زمان استریل خواهیم پرداخت و در حالت‌های بعدی و 50% نیز به همین ترتیب می‌پردازیم.

جدول ۷. بررسی حالت‌های تغییرات سه پارامتر هزینه تأخیر در جراحی بیماران انتخابی،

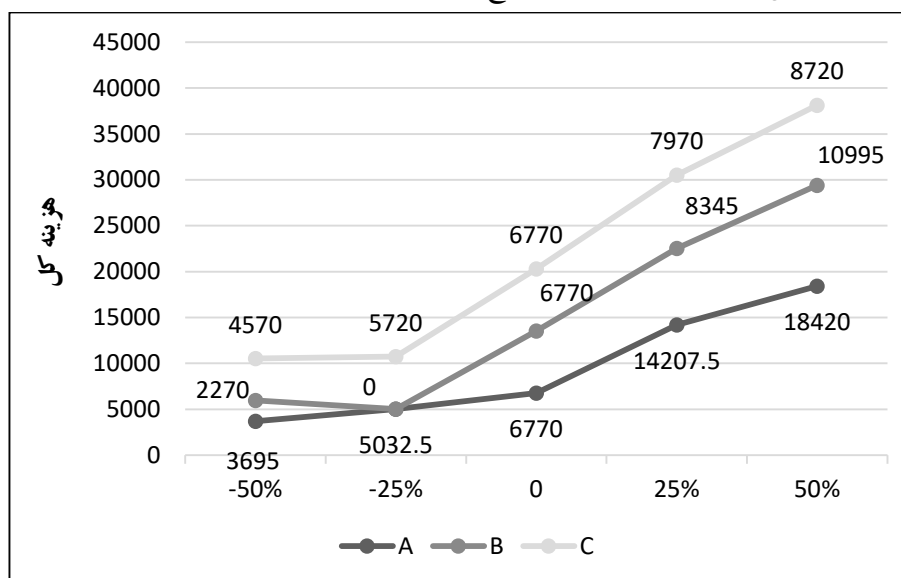
مدت‌زمان انجام عمل‌های جراحی و مدت‌زمان استریل

مدت‌زمان استریل	مدت‌زمان عمل	هزینه تأخیر در جراحی بیماران انتخابی	
-	↑	↑	A
-	↓	↓	
↑	-	↑	B
↓	-	↓	
↑	↑	-	C
↓	↓	-	
↓	↑	↑	

مدت زمان استریل	مدت زمان عمل	هزینه تأخیر در جراحی بیماران انتخابی	
↑	↓	↓	D
↑	↓	↑	E
↓	↑	↓	F
↑	↑	↓	F
↓	↓	↑	F
↑	↑	↑	G
↓	↓	↓	G

در ادامه به تحلیل حالات ارائه شده در جدول ۷، در قالب شکل‌ها خواهیم پرداخت.

شکل ۱۰. نمایش روند تغییرات تابع هدف اول نسبت به سه حالت A, B, C

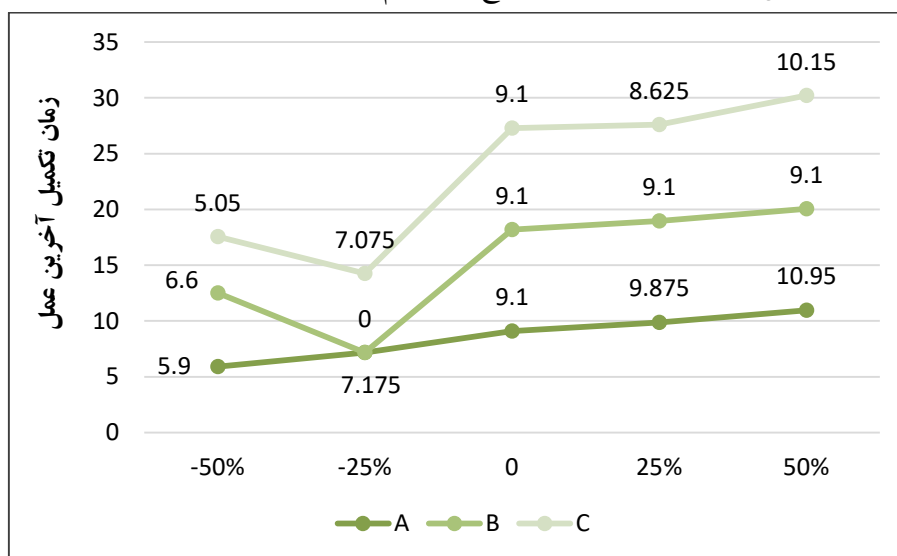


در شکل ۱۰ تأثیر سه حالت A, B, C نسبت به تابع هدف اول نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، در حالت A، با افزایش هزینه تأخیر در جراحی و مدت زمان جراحی، هزینه تأخیر در جراحی به صورت مستقیم و هزینه انجام عمل‌ها و در نهایت هزینه کل افزایش می‌یابد و با کاهش هزینه تأخیر در جراحی و مدت زمان عمل تابع هدف اول کاهش می‌یابد. در حالت B با افزایش مقادیر پارامترهای هزینه تأخیر در جراحی و مدت زمان استریل، هزینه تأخیر در جراحی و هزینه استفاده از دستگاه‌های استریل و در نهایت تابع هدف اول به صورت

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل...؛ ارجمندی و سموئی | ۷۹

مستقیم افزایش می‌یابد و با کاهش حالت B، تابع هدف اول کاهش می‌یابد و در ۲۵٪-ممکن است عمل انجام نشود و ابزار برای استریل نباشد به همین دلیل مسئله نشدنی می‌شود. در حالت C نیز با افزایش مقادیر پارامترهای مدت‌زمان جراحی و مدت‌زمان استریل، هزینه استفاده از دستگاه‌های استریل به صورت مستقیم و هزینه انجام عمل‌ها افزایش خواهد یافت و با کاهش حالت C، تابع هدف اول کاهش می‌یابد.

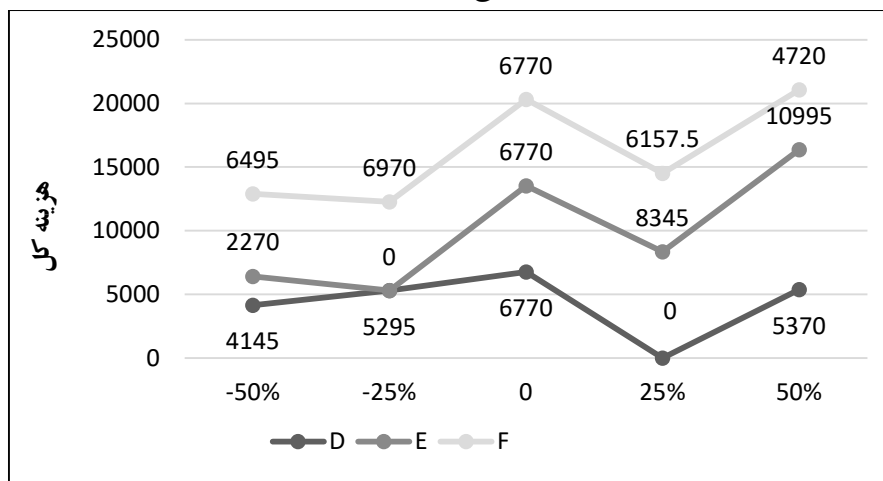
شکل ۱۱. نمایش روند تغییرات تابع هدف دوم نسبت به سه حالت A, B, C



در شکل ۱۱ تأثیر تغییرات سه حالت A, B, C نسبت به تابع هدف دوم نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش حالت A تابع هدف دوم به دلیل افزایش مدت‌زمان جراحی افزایش می‌یابد و با کاهش A تابع هدف دوم که زمان تکمیل آخرین عمل است کاهش می‌یابد. با افزایش و کاهش حالت B تابع هدف دوم تغییر زیادی نخواهد داشت چراکه پارامترهای هزینه تأخیر در جراحی و مدت‌زمان استریل بر تابع هدف دوم تأثیر زیادی نخواهد گذاشت، در ۲۵٪- مسئله به دلیل انجام نشدن عمل و استریل نشدن ابزار جراحی نشدنی می‌شود. با افزایش حالت C تابع هدف اول افزایش می‌یابد به دلیل افزایش مدت‌زمان استریل، در افزایش ۲۵٪ به دلیل در دسترس نبودن ابزار استریل کاهش می‌یابد. با کاهش

حالت C تابع هدف دوم به دلیل کاهش مدت زمان استریل و مدت زمان جراحی کاهش می‌یابد.

شکل ۱۲. نمایش روند تغییرات تابع هدف اول نسبت به سه حالت D,E,F



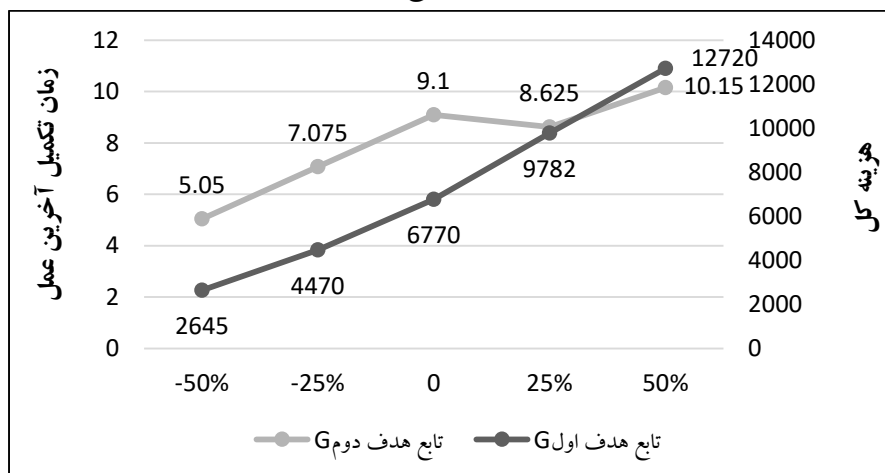
در شکل ۱۲ تأثیر تغییرات سه حالت D,E,F نسبت به تابع هدف اول نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، در حالت D با کاهش مدت زمان استریل و افزایش دو پارامتر دیگر هزینه استفاده از دستگاه استریل در نهایت تابع هدف اول کاهش می‌یابد، با افزایش مدت زمان استریل و کاهش دو پارامتر دیگر تابع هدف اول به دلیل کاهش هزینه تأخیر در جراحی کاهش می‌یابد. در حالت E با افزایش مدت زمان استریل و هزینه تأخیر در جراحی و کاهش پارامتر دیگر هزینه تأخیر در جراحی و استفاده از دستگاه‌های استریل و در نهایت تابع هدف اول افزایش می‌یابد و با کاهش مدت زمان استریل و هزینه تأخیر در جراحی و افزایش مدت زمان عمل، تابع هدف اول کاهش می‌یابد. در حالت F با افزایش مدت زمان استریل و مدت زمان عمل و کاهش هزینه تأخیر در جراحی، هزینه تأخیر در جراحی و در نهایت تابع هدف اول کاهش می‌یابد و با کاهش مدت زمان استریل و مدت زمان عمل و افزایش هزینه تأخیر در جراحی در ۲۵٪ به دلیل افزایش هزینه تأخیر در جراحی تابع هدف اول افزایش و در ۵۰٪ به دلیل کاهش مدت زمان استریل به مقدار کم کاهش می‌یابد.

نمو ۱۳. نمایش روند تغییرات تابع هدف دوم نسبت به سه حالت D, E, F



در شکل ۱۳ تأثیر سه حالت D, E, F نسبت به تابع هدف دوم نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، در حالت D با کاهش مدت‌زمان استریل و افزایش دو پارامتر دیگر تابع هدف دوم به مقدار خیلی کم کاهش می‌یابد، با افزایش مدت‌زمان استریل و کاهش مدت‌زمان عمل جراحی و هزینه تأخیر در جراحی تابع هدف دوم کاهش می‌یابد. در حالت E با کاهش مدت‌زمان عمل جراحی و افزایش دو پارامتر دیگر تابع هدف دوم که زمان تکمیل آخرین عمل است کاهش می‌یابد و کاهش مدت‌زمان استریل و هزینه تأخیر در جراحی و افزایش مدت‌زمان عمل تابع هدف دوم به مقدار خیلی کم کاهش می‌یابد. در حالت F با افزایش مدت‌زمان استریل و مدت‌زمان عمل تابع هدف دوم افزایش و در ۲۵٪ به دلیل در دسترس نبودن ابزارهای استریل به مقدار خیلی کم کاهش می‌یابد و با کاهش مدت‌زمان استریل و مدت‌زمان عمل و افزایش هزینه تأخیر در جراحی تابع هدف دوم کاهش می‌یابد.

شکل ۱۴. نمایش روند تغییرات توابع هدف نسبت به حالت G



در شکل ۱۴ تأثیر حالت G نسبت به هر دو تابع هدف اول و دوم نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، از دید مدیر بیمارستان ایدئال‌ترین حالت، کاهش مقادیر هر سه پارامتر به صورت هم‌زمان است که هر دو تابع هدف کمترین مقدار را دارند، چرا که با کاهش مقادیر پارامترهای مدت‌زمان استریل و مدت‌زمان انجام عمل‌های جراحی، تابع هدف دوم که شامل زمان تکمیل کار می‌باشد کاهش می‌یابد و تابع هدف اول که شامل هزینه انجام عمل‌های جراحی انتخابی و اورژانسی و هزینه استفاده از دستگاه‌های استریل و درنهایت هزینه کل است کاهش می‌یابد و با کاهش مقادیر هزینه تأخیر در جراحی تابع هدف اول که شامل هزینه تأخیر در جراحی و درنهایت هزینه کل است کاهش می‌یابد. بدترین حالت نیز از دید مدیر بیمارستان افزایش مقادیر سه پارامتر، هزینه تأخیر در جراحی بیماران انتخابی، مدت‌زمان انجام عمل‌های جراحی و مدت‌زمان استریل به صورت هم‌زمان است که تابع هدف اول که هزینه کل را شامل می‌شود و تابع هدف دوم که زمان تکمیل کار است بسیار افزایش خواهد یافت.

جدول ۸. بررسی مقادیر تابع هدف دوم در حالت‌های مختلف احتمال رخداد سناریوها

نقطه پارتو	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵	min	Max
	$\pi(1)=0.5$ $\pi(2)=0.2$ $\pi(3)=0.3$	$\pi(1)=0.33$ $\pi(2)=0.33$ $\pi(3)=0.33$	$\pi(1)=1$ $\pi(2)=0$ $\pi(3)=0$	$\pi(1)=0$ $\pi(2)=1$ $\pi(3)=0$	$\pi(1)=0$ $\pi(2)=0$ $\pi(3)=1$		
1	9.60	9.57	8	9	10	8	10
2	9.10	9.07	7.50	8.50	9.50	7.50	9.50
3	9.10	9.07	7.50	8.50	9.50	7.50	9.50

در جدول ۸ تأثیر حالت‌های مختلف احتمال رخداد سناریوها نسبت به تابع هدف دوم مشخص شده است که پنج حالت به ازای احتمال‌های مختلف برای رخداد سناریوها تعریف کرده‌ایم و مقادیر پارتو تابع هدف دوم، مینیمم مقدار و ماکسیمم مقدار مشخص شده است. همان‌طور که مشخص است کمترین مقدار تابع هدف دوم، حالت سوم است که بیشترین مقدار احتمال به $\pi(1)$ اختصاص داده شده که برابر ۱ و حالت خوش‌بینانه است و بیشترین مقدار تابع هدف دوم که زمان تکمیل آخرین عمل می‌باشد، حالت پنجم است که بیشترین مقدار احتمال به $\pi(3)$ اختصاص داده شده که برابر ۱ و حالت بدبینانه است.

نتیجه‌گیری

با توجه به مباحثی که در ارائه حاضر بیان شد و طبق مطالعه پژوهش‌های پیشین بااهمیت برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق عمل و بخش استریل در حوزه سلامت بیشتر آشنا شدیم و دریافتیم که بیشتر مطالعات پیشین به برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق عمل پرداخته و بیشتر بیماران انتخابی مدنظر قرار داده بودند و استفاده از رویکرد استوار در مقایسه با رویکردهای دیگر رایج‌تر است.

در این مقاله به بررسی مسئله دو هدفه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق عمل و بخش استریل ابزارهای جراحی قابل‌استفاده مجدد با توجه به بیماران اورژانسی در کنار بیماران انتخابی با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استوار پرداختیم و از رویکرد محدودیت اپسیلون تقویت شده برای حل مسئله در گمز به تحلیل نتایج پرداختیم و دریافتیم که تغییرات سه پارامتر هزینه تأخیر در جراحی، مدت زمان انجام عمل‌های جراحی و پارامتر

مدت زمان استریل بر هردو تابع هدف تأثیر بیشتری نسبت به پارامترهای دیگر خواهد گذاشت؛ بنابراین از دید مدیریت، چالش برانگیزترین حالت زمانی اتفاق خواهد افتاد که تابع هدف اول و دوم بیشترین مقدار خود را داشته باشند. طبق نتایج به دست آمده، زمانی تابع هدف اول که هزینه کل را شامل می‌شود، بیشترین مقدار را خواهد داشت که دو پارامتر هزینه تأخیر در جراحی و مدت زمان انجام عمل‌های جراحی افزایش یابد و برای تابع هدف دوم که زمان تکمیل آخرین عمل می‌باشد چالش برانگیزترین حالت، حالتی است که دو پارامتر مدت زمان انجام عمل‌های جراحی و مدت زمان استریل افزایش یابند. از این رو، ایدئال‌ترین حالت نیز از دید مدیر بیمارستان کاهش هر سه پارامتر است که سبب کاهش هدف بیمارستان‌ها، هزینه کل و زمان تکمیل آخرین عمل خواهد شد؛ بنابراین هزینه‌ها در برنامه‌ریزی و زمان بندی اتاق عمل و بخش استریل به صورت جداگانه بیشتر از حالتی است که برنامه‌ریزی و زمان بندی اتاق‌های عمل و بخش استریل به صورت یکپارچه مورد بررسی قرار گرفت. به عنوان پیشنهادها آتی که ممکن است برای پژوهش‌های آینده مفید واقع شود می‌توان به در نظر قرار دادن بیماران اورژانسی با ورود تصادفی، در نظر گرفتن بخش‌های بیشتر در ارتباط با اتاق عمل و ارائه یک روش فراابتکاری مناسب برای حل این پژوهش اشاره کرد.

ORCID

Fatemeh Arjmandi



<https://orcid.org/0009-0008-9844-2806>

Parvaneh Samouei



<https://orcid.org/0000-0003-0867-7617>

منابع

۱. اکبرزاده، بابک. (۱۳۹۲). برنامه‌ریزی و توالی عملیات چندمرحله‌ای اتاق عمل با در نظر گرفتن احتمال مواجهه با موارد اضطراری. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد. دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی.
۲. ایران‌زاد، رضا. (۱۳۹۶). ارائه یک روش حل برای مسئله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق عمل برای بیماران انتخابی تحت راهبرد باز. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد. دانشگاه صنعتی شریف.
۳. پیام، مطهره، فیروزی جهان تیغ.. (۲۰۱۹). بهینه‌سازی چندهدفه زمان‌بندی جراحی‌های اتاق عمل با اولویت‌های پزشکی در جراحی مورد مطالعه در بیمارستان چشم‌پزشکی الزهرا (س) زاهدان. *بیمارستان*، ۱۸(۳)، ۳۳-۴۲.
۴. مرکزی مقدم، زرگر بالای جمع، ساناز، قادری، زانیار، توفیقی، احسان. (۲۰۲۰). بهینه‌سازی و زمان‌بندی تالار جراحی یک بیمارستان آموزشی درمانی شهر تهران بر پایه مدل شبیه‌سازی پیشامد گسسته. *فصلنامه بیمارستان* ۱۹(۱)، ۶۱-۷۰.
۵. نوروژی رسول آبادی، مژده. (۱۳۹۵). برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اتاق‌های عمل تحت راهبرد باز و شرایط عدم قطعیت. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد. دانشگاه صنعتی شریف.
6. Ali, H. H., Lamsali, H., & Othman, S. N. (2019). Operating rooms scheduling for elective surgeries in a hospital affected by war-related incidents. *Journal of medical systems*, 43(5), 139.
7. Behmanesh, R., & Zandieh, M. (2019). Surgical case scheduling problem with fuzzy surgery time: An advanced bi-objective ant system approach. *Knowledge-Based Systems*, 186, 104913.
8. Beroule, B., Grunder, O., Barakat, O., Aujoulat, O., & Lustig, H. (2016). Operating room scheduling including medical devices sterilization: towards a transverse logistic. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1146-1151.
9. Bovim, T. R., Christiansen, M., Gullhav, A. N., Range, T. M., & Hellemo, L. (2020). Stochastic master surgery scheduling. *European Journal of Operational Research*.
10. Coban, E. (2020). The effect of multiple operating room scheduling on the sterilization schedule of reusable medical devices. *Computers & Industrial Engineering*, 147, 106618.
11. Kamran, M. A., Karimi, B., & Dellaert, N. (2020). A column-generation-heuristic-based benders' decomposition for solving adaptive allocation scheduling of patients in operating rooms. *Computers & Industrial Engineering*, 148, 106698.

12. Kroer, L. R., Foverskov, K., Vilhelmsen, C., Hansen, A. S., & Larsen, J. (2018). Planning and scheduling operating rooms for elective and emergency surgeries with uncertain duration. *Operations research for health care*, 19, 107-119.
13. Kayvanfar, V., Akbari Jokar, M. R., Rafiee, M., Sheikh, S., & Iranzad, R. (2021). *A new model for operating room scheduling with elective patient strategy*. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 1-24.
14. Liu, C., Wang, J., & Liu, M. (2017, June). *A scenario-based robust optimization approach for surgeries scheduling with a single specialized human resource server*. In 2017 International Conference on Service Systems and Service Management (pp. 1-4). IEEE.
15. Moosavi, A., & Ebrahimnejad, S. (2020). Robust operating room planning considering upstream and downstream units: A new two-stage heuristic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 106387.
16. Maghzi, P., Roohnavazfar, M., Mohammadi, M., & Naderi, B. (2019, January). Modeling the Problem of Operating Rooms and Different Wards of Health Centers Scheduling and Planning. In 2019 15th Iran International Industrial Engineering Conference (IIIEC) (pp. 37-42). IEEE.
17. Mazloumian, M., Baki, M. F., & Ahmadi, M. (2022). A robust multi objective integrated master surgery schedule and surgical case assignment model at a publicly funded hospital. *Computers & Industrial Engineering*, 163, 107826.
18. Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465.
19. Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*, 43(2), 264-281.
20. M'Hallah, R., & Visintin, F. (2019). A stochastic model for scheduling elective surgeries in a cyclic master surgical schedule. *Computers & Industrial Engineering*, 129, 156-168.
21. Ozturk, O., Di Mascolo, M., Espinouse, M. L., & Gouin, A. (2010). *Scheduling of washing operations in a hospital sterilization service for minimizing the mean preinfection excess time of medical devices*. Technical Report, G-SCOP.
22. Ozturk, O., Begem, M. A., & Zaric, G. S. (2014). A branch and bound based heuristic for makespan minimization of washing operations in hospital sterilization services. *European Journal of Operational Research*, 239(1), 214-226.

23. Rachuba, S., & Werners, B. (2017). A fuzzy multi-criteria approach for robust operating room schedules. *Annals of Operations Research*, 251(1-2), 325-350.
24. Roshanaei, V., Booth, K. E., Aleman, D. M., Urbach, D. R., & Beck, J. C. (2020). Branch-and-check methods for multi-level operating room planning and scheduling. *International Journal of Production Economics*, 220, 107433.
25. Xiang, W., Yin, J., & Lim, G. (2015). An ant colony optimization approach for solving an operating room surgery scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 85, 335-345.

Reference [In Persian]

1. Akbarzadeh, (2013), Planning and sequencing of multi-stage operations of the operating room, taking into account the possibility of encountering emergency cases, MSc. Thesis, K. N. Toosi University of Technology [In Persian].
2. Iranzad, R., (2017), a solution method for the planning and scheduling problem of the operating room for selected patients under the open strategy, MSc. Thesis, Sharif University of Technology [In Persian].
3. Payam, M., Firouzi jahantigh, F. (2019). Multi- objective optimization of scheduling surgeries at surgery room with medical priorities in surgery (Case study: Zahedan Al-Zahra eye Hospital). *jhosp*, 18 (3), 33-42 [In Persian].
4. Markazi moghadam N, Zargar S, Ghaderi Z, Tofighi E. Optimization and Scheduling of the Surgery Hall of a Teaching Hospital of Tehran based on Discrete Event Simulation Model. *jhosp* 2020; 19 (1), 52-61 [In Persian].
5. Nouroozi rasoolabadi, M, (2016). Planning and scheduling of operating rooms under open strategy and uncertainty conditions, MSc. Thesis, Sharif University of Technology [In Persian].

استناد به این مقاله: ارجمندی، فاطمه، سموئی، پروانه. (۱۴۰۲). برنامه‌ریزی و زمان‌بندی دو هدفه اتاق‌های عمل و بخش استریل ابزارهای جراحی قابل استفاده مجدد با رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریو محور، مطالعات مدیریت صنعتی،

۲۱(۷۰)، ۴۵-۸۷

DOI: 10.22054/jims.2023.66215.2762



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