



Production and Operations Management
University of Isfahan E-ISSN: 2423-6950
Vol. 14, Issue 1, No. 32, Spring 2023



<https://doi.org/10.22108/pom.2023.134258.1453>

(Research paper)

Non-deterministic supply chain planning for consumable operating room items considering surgeon satisfaction: cMOHS, eNSGA-II, and ARAS methods

Sahar Karimyan

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, saharkarimyan94@gmail.com

Parvaneh Samouei *

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, p.samouei@basu.ac.ir

Purpose: This study aims to investigate a supply chain problem of operating room consumable items that are not reused after consumption. In this supply chain, maximizing the satisfaction of the surgeons and minimizing the total costs are considered. Also, due to the importance of choosing suppliers from the surgeons' point of view, it is possible to prioritize suppliers based on criteria such as quality and cost. Furthermore, to get closer to real-world situations, uncertain demands of patients due to their physical conditions and various diseases, the capacities of the pharmacy, operating rooms, and the sterile core used for sterilizing the non-sterile items have been considered. The scope of this research includes different operating rooms, and the initially required number of consumable items according to the opinion of the surgeon. If an emergency occurs during the operation (such as sudden bleeding, item failure, or operating room personnel error) and the patient needs more items, the nurse goes to the hospital pharmacy to get the necessary items and brings them to the operating room, during the operation.

Design/methodology/approach: In this research, due to the uncertain demand for consumable items in the operating room, three pessimistic, probable, and optimistic scenarios have been used; and due to the discreteness and uncertainty of the data distribution, Mulvey's robust method has been applied. The problem has been solved in two phases. In the first phase, the additive ratio assessment (ARAS) multi-criteria decision-making method has been used to prioritize suppliers, and in the second phase,

* Corresponding author



according to the size of the problem, the epsilon-constraint method, for the small-sized problem, and Non-dominated Sorting Genetic Algorithms (NSGA-II) and Multi-Objective Harmony Search (MOHS) for large-sized problems have been used to minimize the total costs of the supply chain, and maximize 'surgeons' satisfaction. In addition, to set the parameters of both meta-heuristic algorithms, the Taguchi method, which is one of the most well-known parameter-setting methods, has been used.

Findings: To compare exact and metaheuristic algorithms, 10 examples were designed randomly. The comparisons showed that the results of the epsilon-constraint method were better than the meta-heuristic algorithms but it could only solve small-sized problems, and it required more time as a sensitive influencing factor in operating room planning. Also, to analyze the NSGA-II and MOHS algorithms, the obtained results were examined from the perspective of solution time, Number of Pareto Solutions (NPS), Mean Ideal Distance (MID), Diversification Metric (DM), and Spacing Measure (SM) indicators. They were also compared with each other using statistical hypothesis tests. The results showed that such algorithms had a significant difference from the point of view of the NPS and DM indicators at the significance level of 0.05, but they did not differ much in terms of the other two indicators. However, in terms of solution time, the MOHS was more suitable than the NSGA-II algorithm.

Research limitations/implications: One of the limitations of this research is the collection of real-world data, especially in estimating the demand for each item according to different conditions.

Practical implications: Comparing the NSGA-II and MOHS algorithms using different indicators, especially solution time which is significant for operating room planning, MOHS algorithms were better than the NSGA-II.

Social implications: Using the proposed algorithms, hospital managers can reduce total costs, guarantee the quality of consumable operating room items, and increase the satisfaction of the surgeon, who is in charge of providing better services to the patients.

Originality/value: In this paper, two meta-heuristic algorithms were proposed for non-deterministic supply chain planning for consumable operating room items, considering surgeon satisfaction and cost, and their efficiencies were compared with each other. The two-mentioned algorithms have not been used in previous studies. Both academic researchers and hospital managers can benefit from applying the findings of this study.

Keywords: Healthcare supply chain, Prioritization of suppliers, Operating room consumption equipment, Inventory management in the healthcare supply chain, NSGA-II, MOHS



مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۴، شماره ۱، پیاپی ۳۲، بهار ۱۴۰۲

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۸ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴ ص ۸۵-۱۲۰



<https://doi.org/10.22108/pom.2023.134258.1453>

(مقاله پژوهشی)

برنامه‌ریزی زنجیره تأمین غیرقطعی اقلام مصرفی اتاق عمل با در نظر گرفتن رضایت جراح: به کارگیری روش‌های *MOHS*، *NSGA-II* و *ARAS*

سحر کریمیان^۱، پروانه سموئی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، saharkarimyan94@gmail.com

۲- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، p.samouei@basu.ac.ir

چکیده: هدف اصلی این پژوهش، کاهش هزینه‌های لجستیک و افزایش رضایت جراحان در یک زنجیره تأمین تجهیزات مصرفی اتاق عمل، با در نظر گرفتن اولویت‌بندی تأمین‌کنندگان است؛ زیرا امروزه بخش بزرگی از بودجه هر کشور، صرف سیستم‌های سلامت می‌شود و این مبالغ کلان، تأثیر مستقیمی بر اقتصاد کشورها دارد؛ از این رو هرگونه تغییر در هزینه‌های اتاق عمل، بر هزینه‌های کل زنجیره و بیمارستان نیز تأثیر می‌گذارد. مدل ریاضی مسئله با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره آراس و رویکرد استوار و الگوریتم‌های چندهدفه ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (*NSGA-II*) و جست‌وجوی هارمونی (*MOHS*) حل شده است. برای حل مسئله در ابعاد مختلف، مثال‌هایی طراحی و با هر دو روش دقیق و الگوریتم‌های فراابتکاری حل شد. برای مقایسه دو روش حل دقیق و فراابتکاری *NSGA-II* ده مثال نمونه طراحی شد. مقایسه‌ها نشان داد در هر دو تابع هدف، کیفیت پاسخ‌های روش اپسیلون محدودیت بهتر بوده است؛ اما زمان حل بیشتری نسبت به *NSGA-II* نیاز داشته است؛ به طوری که گاهی تا ۵ برابر زمان حل بیشتر در روش اپسیلون، به محدودیت نیاز بوده است. همچنین برای اعتبارسنجی *NSGA-II*، از روش فراابتکاری *MOHS* کمک گرفته شد که نتایج نشان داد مسئله به کمک *MOHS* نیز به زمان حل کمتری نسبت به *NSGA-II* نیاز داشته است.

واژه‌های کلیدی: اولویت‌بندی تأمین‌کنندگان، تجهیزات مصرفی اتاق عمل، زنجیره تأمین سلامت، مدیریت

موجودی در زنجیره تأمین سلامت، *NSGA-II*، *MOHS*



۱- مقدمه

امروزه زنجیره تأمین سلامت، هم از لحاظ بُعد هزینه و هم ارتباط مستقیم با جان انسان‌ها درخور توجه زیادی قرار گرفته است. یکی از عمده‌ترین بخش‌های سیستم سلامت، بیمارستان‌ها هستند که در آنها اتاق‌های عمل، از جمله حیاتی‌ترین قسمت‌ها محسوب می‌شود. انتقال مفاهیم پشتیبان صنعت تولید و تأمین محصولات به حوزه سلامت به دلیل محدودیت‌های این حوزه، پیچیده است. زنجیره تأمین بیمارستان‌ها با محدودیت‌هایی همچون پیچیدگی، منحصربه‌فرد بودن، وجود چالش‌های عملیاتی، ردیابی دشوار موجودی و تقاضای پیش‌بینی‌نشده تجهیزات پزشکی مواجه است (لويس، بالاجی و رأی^۱، ۲۰۱۰). یکی از مواردی که بررسی روند زنجیره تأمین بیمارستان را ضروری می‌کند، تعارضات بین مدیران موجودی و جراحان موجود در بخش اتاق‌های عمل است. انتظار جراحان، در دسترس بودن همیشگی تجهیزات است؛ در حالی که این امر موجب استفاده نامناسب از وسیله‌ها و تجهیزات می‌شود و افزایش هزینه‌ها را به دنبال دارد. از سوی دیگر همواره مدیران موجودی در کاهش هزینه‌ها می‌کوشند (ریس و فانتین^۲، ۱۹۹۳)؛ از این رو تصمیم‌گیری چندمعیاره^۳ (MCDM) می‌تواند به عنوان یک رویکرد کمی برای ارزیابی گزینه‌ها، به منظور یافتن بهترین گزینه به کار برده شود. وزن‌های نسبی به منظور تعیین اهمیت گزینه‌ها برای اولویت‌بندی شاخص‌ها در روش‌هایی مثل فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی یا روش توسعه‌یافته شبکه تحلیلی، به معیارها اختصاص داده می‌شوند (زاخاریا و شانکار^۴، ۲۰۰۷؛ ون هورن-بیک و پیتلن^۵، ۲۰۱۴؛ ساتی و وارگاس^۶، ۲۰۱۳). در این تحقیق اولویت‌بندی تأمین‌کنندگان زنجیره تأمین تجهیزات جراحی، به منظور کاهش هزینه‌های خرید تجهیزات و نگه‌داشتن جراحان در سطح رضایت مطلوب از دسترسی، کیفیت تجهیزات و ... حائز اهمیت است.

مدیریت موجودی زنجیره تأمین، ایجاد یک جریان مطمئن در انتقال مواد و خدمات از ابتدا تا انتهای زنجیره تأمین است (حاج شیرمحمدی^۷، ۲۰۱۷). شایان ذکر است که در مدیریت زنجیره تأمین، تنها توجه به سطوح تأمین‌کنندگان (در سمت ورودی) و دریافت‌کنندگان (در سمت خروجی) کافی نخواهد بود. شرکت‌های موفق در امر زنجیره تأمین، همواره می‌کوشند که بیشترین اطلاعات را از سطوح بالاتر تأمین‌کنندگان و دریافت‌کنندگان داشته باشند. با استفاده از این اطلاعات و با برقراری ارتباطات منظم با سطوح مختلف زنجیره تأمین، مدیران و برنامه‌ریزان می‌توانند هماهنگی لازم را در جهت دستیابی به اهداف مدیریت زنجیره تأمین ایجاد کنند.

نظام سلامت یکی از پیچیده‌ترین زنجیره تأمین دنیا را دارد و علت عمده آن، شاخص خطر بالای آن است. زنجیره تأمین سلامت نیز به جهت سروکار داشتن با انسان‌ها و سلامتی ایشان، یک نظام پرخطر محسوب می‌شود؛ زیرا تأمین اقلام دارویی و تجهیزات پزشکی در اسرع وقت، یکی از مهم‌ترین چالش‌های این زنجیره تأمین است؛ بنابراین تأمین‌شدن و یا نشدن یک وسیله، ابزار جراحی یا دارو، می‌تواند به از دست رفتن جان یک انسان منجر شود. به علاوه، براساس اطلاعات دنیای واقعی، در حین عمل ممکن است کمبود برخی از اقلام به وجود بیاید که می‌تواند در اثر خرابی و ایراد آن، خطای کارکنان، نیاز بیشتر بیمار به دلیل شرایط اورژانسی حین عمل و ... باشد؛ به این معنا که در تخمین تقاضای اقلام موردنیاز باید نوعی عدم قطعیت را در نظر گرفت. هدف این مقاله کاهش هزینه‌های پشتیبانی و افزایش رضایت جراحان در یک زنجیره تأمین تجهیزات مصرفی اتاق عمل، با در نظر گرفتن اولویت‌بندی تأمین‌کنندگان است. در ادامه، پیشینه پژوهش حاضر ارائه می‌شود.

۱-۱ پیشینه پژوهش

در اینجا برخی از مطالعات انجام شده در زمینه مفاهیم ذکر شده در شرایط و دیدگاه‌های مختلف ارائه می‌شود. مونز و همکاران^۸ (۲۰۱۹)، یک چارچوب اندازه‌گیری عملکرد لجستیک دقیق را برای ارزیابی کارایی فرایندهای لجستیک در اتاق‌های عمل ارائه دادند. آنها از ANP به عنوان یک تکنیک MCDM برای حل مسئله تصمیم‌گیری استفاده کردند. چارچوب پیشنهادی مبتنی بر فرایند شبکه تحلیلی اولین قدم برای اندازه‌گیری عملکرد فرایندهای زنجیره تأمین اتاق عمل، با انتخاب و اولویت‌بندی اهداف لجستیک و شاخص‌های کلیدی عملکرد مرتبط شد. در مقاله احمد، حسن و باربویا^۹ (۲۰۲۱)، کاربرد بالقوه یک روش MCDM معروف به نام گروه بهترین-بدترین روش^{۱۰} برای غلبه بر چالش‌های تصمیم‌گیری در زمان شیوع کرونا و ترسیم استراتژی‌های مقابله با شیوع COVID19 ارائه شد. این روش برای رتبه‌بندی ۱۰ استراتژی شناسایی شده براساس اهمیت نسبی آنها ارائه شد. استویچ و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۰) روش چندمعیاره مارکوس را برای انتخاب تأمین‌کننده پایدار در صنعت مراقبت‌های بهداشتی پیاده کردند. پژوهش آنها یک مطالعه موردی (پلی کلینیک) شامل رتبه‌بندی هشت گزینه جایگزین با توجه به ۲۱ معیار برای همه جنبه‌های پایداری بود. همچنین اورجی و اوجدی^{۱۲} (۲۰۲۱)، از رویکردهای MCDM در پزشکی استفاده کرده‌اند. در یک مطالعه که بیجانک و ویس^{۱۳} (۲۰۱۲) انجام دادند، نشان داده شد که بیشتر سیستم‌های مدیریت کنترل موجودی در بیمارستان‌ها براساس فروش از دست رفته، مشاهدات دوره‌ای با زمان تحویل کوتاه‌مدت و ظرفیت محدود انبار شکل گرفته است و در این راستا دو نوع مدل دقیق توسعه داده شد. در مدل نوع اول، سطح خدمت‌رسانی، تابع هدف حداکثرسازی با محدودیت ظرفیت و در مدل نوع دوم، ظرفیت، تابع هدف حداقل‌سازی با محدودیت خدمت‌رسانی بود که مدل نوع اول، مدل ظرفیت و مدل نوع دوم، مدل خدمت‌رسانی نامیده می‌شد. همچنین تخمین کاربرد مدل‌ها برای هر سیستم موجودی فروش از دست رفته فرموله شد. ژنگ^{۱۴} (۱۹۹۲) نیز مقایسه بین سیستم‌های نگهداری موجودی قطعی و غیرقطعی را انجام داد. در این زمینه آگرا، سرویرا و رگنخو^{۱۵} (۲۰۱۶)، از یک مدل ریاضی و الگوریتم شاخه و برش برای توزیع محصولات پزشکی، از یک انبار به بخش‌های پرستاری استفاده کردند. بلانگر و همکاران^{۱۶} (۲۰۱۸)، از یک روش ابتکاری برای کمک به ذخیره‌سازی اقلام موردنیاز واحد پرستاری استفاده کردند. سپس در پژوهشی دیگر اوتایاکومار و پریان^{۱۷} (۲۰۱۳)، یک مدل موجودی را ارائه دادند که بررسی مداوم تولید و توزیع برای یک زنجیره تأمین دارویی و زنجیره تأمین بیمارستان را با در نظر گرفتن محصولات دارویی متعدد، زمان سررسید متغیر، تأخیرهای پرداخت مجاز، محدودیت در دسترس بودن فضا و سطح خدمات مشتری^{۱۸} در نظر می‌گرفت. آنها یک مدل موجودی ارائه دادند که بررسی مداوم تولید و توزیع را برای یک زنجیره تأمین یک شرکت دارویی و زنجیره تأمین بیمارستان ادغام می‌کرد. در پژوهشی دیگر جنتیان و همکاران^{۱۹} (۲۰۱۹) یک مدل برنامه‌ریزی زنجیره تأمین دارو را با توجه به مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی ارائه دادند که به دلیل Np-Hard بودن، مسئله را با الگوریتم‌های چندهدفه تکاملی حل کردند. همچنین مهاجر تبریزی و همکاران^{۲۰} (۲۰۲۲) یک مدل برنامه‌ریزی زنجیره تأمین دارو را با هدف کاهش هزینه‌های توزیع و احداث با روش حل الگوریتم ژنتیک دوسطحی با تکیه بر کدینگ مبتنی بر اولویت‌بندی ارائه کردند که از جمله جدیدترین پژوهش‌ها در حوزه زنجیره تأمین سلامت است. برنامه‌ریزی اتاق عمل یک مرحله مهم برای مدیریت اتاق عمل است. تخصیص منابع هدف اصلی این مرحله است. زمان منظم کار، اضافه‌کار، تعداد اتاق‌های عمل، ابزار و تجهیزات، برخی از شاخص‌های اندازه‌گیری ظرفیت در مرحله برنامه‌ریزی است. ارزیابی شاخص‌ها می‌تواند

براساس برخی معیارهای مالی باشد؛ اما ساختار هزینه اتاق عمل اغلب پیچیده است. این مرحله برنامه‌ریزی را پیچیده‌تر می‌کند. در یک مطالعه در رابطه با موضوع ذکر شده توسط عابدینی، یه و لی^{۲۱} (۲۰۱۶)، یک روش چندمرحله‌ای برای اختصاص جراحی به اتاق‌های عمل در یک افق برنامه‌ریزی هفتگی را پیشنهاد دادند. احمدی، ماسل و هوستلر^{۲۲} (۲۰۱۹) نیز یک مدل استوار تصادفی برای فعالیت‌های لجستیک اتاق عمل برای حداقل‌سازی هزینه‌ها ارائه کردند. دیامنت و همکاران^{۲۳} (۲۰۱۸)، یک مدل زنجیره مارکوف گسسته را برای مدیریت موجودی ابزارهای قابل استفاده مجدد در اتاق عمل ارائه دادند که نشان می‌داد در صورت استفاده از تکنیک‌های استریلیزاسیون در محل (نظیر استریلیزاسیون فوری)، بیمارستان می‌توانست تعداد مجموعه ابزارهای قابل استفاده مجدد را کاهش دهد. خلاصه‌ای از مهم‌ترین پژوهش‌های یادشده در بخش پیشینه پژوهش در قالب جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- جمع‌بندی تحقیقات و مطالعات یادشده در بخش پیشینه تحقیق

Table 1- Summary of research and studies mentioned in the research background section

نویسندگان	سال	کنترل موجودی	زنجیره تأمین	تأمین کنندگان	اولویت‌بندی	اهداف	مدل ریاضی	روش	داده قطعی	سیستم سلامت	رضایت
Moons et al.	۲۰۱۹	*	*	*	*	اندازه‌گیری عملکرد لجستیک با دقت تعریف‌شده برای ارزیابی کارایی فرآیندهای لجستیک در اتاق‌های عملیاتی	روش ANP مبتنی بر رویکرد MCDM	روش ANP مبتنی بر رویکرد MCDM	*	*	*
Ahmad, Hasan, Barbhuiya	۲۰۲۱	*	*	*	*	اولویت‌بندی استراتژی‌های مقابله با شیوع کووید ۱۹	روش BWM مبتنی بر رویکرد MCDM	روش BWM مبتنی بر رویکرد MCDM	*	*	*
Stević et al.	۲۰۲۰	*	*	*	*	انتخاب تأمین‌کننده پایدار در یک سیستم خصوصی پزشکی	روش MARCOS مبتنی بر رویکرد MCDM	روش MARCOS مبتنی بر رویکرد MCDM	*	*	*
Bijvank & Vis	۲۰۱۲	*	*	*	*	تهیه مدل‌های موجودی با در نظر گرفتن سطح خدمات و محدودیت‌های ظرفیت در بیمارستان‌ها			*	*	*
Agra, Cerveira & Requejo	۲۰۱۶	*	*	*	*	تعریف برنامه توزیع هفتگی محصولات پزشکی به طوری که ضمن رعایت سطح موجودی اطمینان، بازدید از بخش‌ها را به حداقل برساند.	الگوریتم شاخه و برش		*	*	*
Abedini, Yi & Li	۲۰۱۶	*	*	*	*	کاهش هزینه‌های بخش اتاق‌های عمل	ارائه روش حل زمان‌بندی PTD و مقایسه با نتایج LPT	ارائه روش حل زمان‌بندی PTD و مقایسه با نتایج LPT	*	*	*
Janatyan et al.	۲۰۱۹	*	*	*	*	طراحی مدلی نوین برای زنجیره تأمین دارو	هدف این پژوهش طراحی مدلی نوین برای زنجیره تأمین دارو است.	هدف این پژوهش طراحی مدلی نوین برای زنجیره تأمین دارو است.	*	*	*
Mohajer Tabrizi et al.	۲۰۲۲	*	*	*	*	کمینه‌کردن هزینه‌های توزیع و هزینه احداث	الگوریتم ژنتیک دوسطحی با تکیه بر کدینگ مبتنی بر اولویت‌بندی	الگوریتم ژنتیک دوسطحی با تکیه بر کدینگ مبتنی بر اولویت‌بندی	*	*	*
Ahmadi, Masel & Hostetler	۲۰۱۹	*	*	*	*	حداقل‌سازی هزینه‌های اتاق عمل	استوار	استوار	*	*	*
تحقیق حاضر	۲۰۲۳	*	*	*	*	حداقل‌سازی هزینه‌ها حداکثرسازی رضایت جراح	استوار NSGA - II و MOHS	استوار NSGA - II و MOHS	*	*	*

با وجود توجه به زنجیره تأمین سلامت، مطالعات اندکی در رابطه با مدل‌سازی ریاضی زنجیره تأمین سلامت به‌ویژه در زمینه تجهیزات جراحی انجام شده است؛ بنابراین تلاش شده است با مدل‌سازی یک مسئله تأمین تجهیزات مصرفی اتاق عمل در شرایط عدم قطعیت، هزینه‌های این زنجیره، شامل خرید و آماده‌سازی اقلام کاهش یابد و در عین حال با افزودن سطح تأمین‌کنندگان، به جراحان این امکان داده شده است تا با ارائه نظر خود درباره اقلام تحویلی، تأمین‌کنندگان اولویت‌بندی شوند و از طرفی رضایت جراحان از کارکردن با اقلام مدنظرشان افزایش یابد. در این پژوهش برای خرید از تأمین‌کنندگان، سقف خرید در نظر گرفته شده است که اگر کل میزان اقلام موردنیاز را نتوان از یک تأمین‌کننده با اولویت بالا خریداری کرد، باید به تأمین‌کنندگان با اولویت بعدی مراجعه شود. همچنین برای نزدیک شدن به شرایط دنیای واقعی، ظرفیت‌های داروخانه، اتاق‌های عمل و هسته استریل برای اقلام مختلف در نظر گرفته شده است. به‌علاوه، تقاضای حین عمل برای هر بیمار غیرقطعی است که با توجه به شرایط متفاوت هر بیمار، توزیع مشخصی برای تقاضا وجود ندارد؛ بنابراین برای مواجهه با عدم قطعیت مسئله، از روش استوار استفاده شده است.

مطالعه حاضر مشتمل بر یک مدل ریاضی دوهدفه است که به‌منظور تأمین تجهیزات جراحی در اتاق عمل توسعه داده شده است. هدف این پژوهش کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های عملیاتی، خرید، تهیه و آماده‌سازی اقلام مصرفی اتاق عمل است. از سوی دیگر تلاش می‌شود تا افزون بر تابع هدف اول، رضایت جراح‌ها از به‌کارگیری اقلام مصرفی با توجه به اولویت‌بندی تأمین‌کنندگان نیز بیشینه شود. در بخش دوم این پژوهش مسئله و در بخش سوم مدل‌سازی ریاضی و روش حل مسئله بیان می‌شود. در بخش چهارم، مثال‌های عددی و تجزیه و تحلیل‌های مختلف انجام می‌شود و در بخش آخر، نتایج و پیشنهادهای آتی ارائه خواهد شد.

۲- روش‌شناسی پژوهش

۲-۱- بیان مسئله

در این مطالعه، یک زنجیره تأمین، شامل تأمین‌کنندگان، انبار و داروخانه، هسته استریل و بخش اتاق‌های عمل بررسی می‌شود. تأمین‌کنندگان از نظر شاخص‌هایی مانند هزینه اقلام، کیفیت و ... متفاوت‌اند و این تفاوت‌ها، تأثیر مستقیمی بر رضایت جراحان دارد؛ از این رو، تأمین‌کنندگان مطابق اولویت جراحان، براساس شاخص‌های مختلف رتبه‌بندی می‌شوند.

تجهیزات موردنیاز اتاق عمل در این پژوهش، شامل مواد مصرفی موردنیاز برای جراحی‌هاست که پس از مصرف به چرخه استریل و استفاده مجدد بازمی‌گردند. این اقلام به دو شکل اقلام استریل و غیراستریل کارخانه، از تأمین‌کنندگان خریداری می‌شوند. نظر به اینکه برای حفظ سلامت بیمار، تنها اقلام استریل به اتاق‌های عمل می‌توانند وارد شوند، بدیهی است وجود هسته استریل قبل از اتاق عمل، برای استریلیزاسیون اقلام غیراستریل خریداری‌شده ضروری باشد. در این تحقیق، اقلام تهیه‌شده از تأمین‌کنندگان در انبار مجاور داروخانه نگهداری و سپس به قفسه‌های داروخانه منتقل می‌شود (هزینه و فاصله جابه‌جایی اقلام بین انبار و داروخانه قابل چشم‌پوشی است). طبق دستور جراح پیش از عمل، اقلام موردنیاز براساس فهرستی به نام کارت ترجیحی حاضر و به اتاق‌های عمل فرستاده می‌شود (اقلام غیراستریل پیش از رفتن به اتاق عمل، استریل می‌شوند). براساس اطلاعات دنیای

واقعی، در حین عمل امکان کمبود اقلام در اثر خرابی، خطای کارکنان و یا نیاز اورژانسی بیمار وجود دارد. در این حالت حین عمل، یک پرستار از داروخانه اقلام را تهیه می‌کند و در صورت لزوم پس از استریل کردن، آن را به اتاق عمل منتقل می‌کند. به‌ازای هر قلم تجهیز به مکان‌هایی که وارد می‌شوند، یک حداکثر ظرفیت نگهداری در نظر گرفته شده است. همچنین حداکثر خرید از هر تأمین‌کننده نیز حد مشخصی دارد که سقف خرید نامیده می‌شود. مسئله مورد بحث این پژوهش، شامل اتاق‌های عمل مختلف است و تقاضای اتاق‌های عمل طبق نظر جراح در قالب لیست ترجیحی پیش از عمل، به کمک سبد اقلام به هر اتاق عمل ارسال می‌شود. چنانچه در حین عمل نیز شرایط اورژانسی پیش بیاید (نظیر خونریزی ناگهانی، خرابی اقلام، خطای کارکنان اتاق عمل و ...) و بیمار به اقلام بیشتری نیاز پیدا کند، پرستار حین عمل، برای تهیه اقلام مورد نیاز به داروخانه مراجعه می‌کند. اگر اقلام از نوع غیراستریل اولیه باشند، باید آنها را به هسته استریل برد و سپس آنها را به اتاق عمل منتقل کرد. این درخواست‌های حین عمل، فاقد توزیع آماری مشخص است. از طرفی هزینه آماده‌سازی اقلام پیش و حین عمل متفاوت‌اند؛ به‌طوری که برای حین عمل مقدار بالاتری در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش برای حل مسئله از سه سناریوی بدبینانه، محتمل و خوش‌بینانه و به‌علت گسسته‌بودن و نامشخص‌بودن توزیع داده‌ها، از روش استوار مالوی استفاده شد.

همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، تأمین‌کنندگان اقلام مصرفی را با عناوین استریل و غیراستریل به بیمارستان ارسال می‌کنند. این اقلام در انبار نگهداری و از آنجا در قفسه‌های داروخانه چیده می‌شود. فاصله انبار و داروخانه کم است و در این مسئله از فاصله بین این دو مکان چشم‌پوشی شده است. پیش از هر عمل براساس کارت ترجیحی جراح، اقلام مورد نیاز به اتاق عمل ارسال می‌شود. جابه‌جایی اقلام پیش از عمل با پیکان مشکی مشخص شده است. در صورتی که این اقلام استریل شده کارخانه نباشند، پس از خروج از داروخانه به هسته استریل^{۲۴} (h) فرستاده می‌شوند و پس از استریل به اتاق عمل ارسال می‌شوند. همچنین اگر در حین عمل نیاز بیشتری به اقلام وجود داشته باشد، این روند دوباره انجام می‌شود که با پیکان‌های خط‌چین روی شکل مشخص شده است.



شکل ۱ - زنجیره تأمین تجهیزات جراحی در مقیاس کوچک (کریمیان و سموئی، ۲۰۲۲)

Fig. 1. The supply chain of the consumable items of operating room in small-sized

۲-۲ مفروضات مسئله

مفروضات در نظر گرفته شده برای این مسئله، به شرح زیر است:

- کلیه اقلام موردنیاز برای یک عمل می‌تواند درون یک سبد قرار بگیرد. اقلام سایز بزرگ ندارند و در حدی است که در سینی جراحی جا می‌گیرند.
 - اقلام در داروخانه نگهداری و سپس برای اتاق‌های عمل ارسال می‌شوند.
 - اقلام خریداری‌شده به دو گروه استریل کارخانه و غیراستریل تقسیم می‌شوند. اقلام استریل کارخانه به استریل‌کردن در هسته استریل نیاز ندارند.
 - پیش از عمل، اقلام موردنیاز هر اتاق عمل براساس کارت ترجیحی جراح به آماده‌سازی و اتاق‌های عمل ارسال می‌شوند.
 - در صورت نیاز به اقلام در حین عمل، پرستار از داروخانه اقلام را فراهم می‌کند.
 - تقاضا بر دو دسته است: پیش از عمل تقاضای قطعی و تقاضای حین عمل، غیرقطعی است.
 - خرید از هر تأمین‌کننده به‌ازای هر قلم، یک سقف مشخص دارد.
 - معیارهای ارزیابی تأمین‌کنندگان شامل هزینه خرید، کیفیت اقلام، خدمات پس از فروش، زمان تحویل اقلام است.
 - سفارش از تأمین‌کنندگان در شرایط قطعی انجام می‌شود.
 - زمان استریلیزه کردن تجهیزات اندک است، در روند عمل، خللی ایجاد نمی‌کند و قابل چشم‌پوشی است.
 - بخش استریل مکانی برای انبار اقلام ندارد و اقلام پس از استریل، به بخش اتاق‌های عمل فرستاده می‌شود.
 - دوره زمانی برنامه‌ریزی مسئله، دوره روزانه است.
- در جدول ۲ اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله تعریف شده‌اند. مدل پیشنهادی نیز به صورت روابط (۱) تا (۲۸) تعریف شده است.

۳-۲- نمادگذاری

در این مدل، از نمادهای زیر استفاده شده است:

جدول ۲- اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله

Table 2- indices, Parameters and decision variables

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

i	اندیس قلم استریل خریداری‌شده از کارخانه، مانند سرنگ، گاز استریل.
i'	اندیس قلم غیراستریل خریداری‌شده از کارخانه، مانند سواب‌های نمونه‌گیری، پین‌های ترمیم استخوان.
$i' \in I'$	
k	اندیس اتاق عمل $k \in K$
v	اندیس تأمین‌کنندگان $v \in V$
0	داروخانه

	$0'$	هسته استریل
	s', s	اندیس سناریوها Ω
پارامترها		
	D_{ik}	تقاضای قلم استریل اولیه i در اتاق عمل k
	$D_{i'k}$	تقاضای قلم غیراستریل اولیه i' در اتاق عمل k
	D'_{ik^s}	تقاضای قلم i در اتاق عمل k حین عمل تحت سناریوی s
	$D'_{i'k^s}$	تقاضای قلم i' در اتاق عمل k حین عمل تحت سناریوی s
	CL_{ik}	هزینه تأمین و ارسال قلم استریل i قبل از عمل از داروخانه به اتاق عمل k
	$CL_{i'0'}$	هزینه تأمین و ارسال قلم غیراستریل اولیه i' قبل از عمل از داروخانه به هسته استریل
	$CL_{i'k}$	هزینه تأمین و ارسال قلم i' از استریلیزاسیون و قبل از عمل از هسته استریل به اتاق عمل k
	FP_{0k}	هزینه ثابت انتقال قلم استریل کارخانه از داروخانه به اتاق عمل k حین عمل
	$FP_{00'}$	هزینه ثابت انتقال اقلام غیراستریل از داروخانه به هسته استریل حین عمل
	$FP_{0'k}$	هزینه ثابت انتقال قلم استریل شده از هسته استریل به اتاق عمل k حین عمل
	CAP_{i0}	ظرفیت داروخانه برای قلم استریل i
	$CAP_{i'0}$	ظرفیت داروخانه به ازای قلم غیراستریل i'
	$CAP_{i'0'}$	ظرفیت هسته استریل به ازای قلم غیراستریل i'
	CAP_{ik}	ظرفیت اتاق عمل k به ازای قلم استریل کارخانه i
	$CAP_{i'k}$	ظرفیت اتاق عمل k به ازای قلم غیراستریل اولیه i'
	C_{iv}	سقف خرید اقلام غیراستریل i' از تأمین کننده v
	$C_{i'v}$	سقف خرید اقلام غیراستریل i' از تأمین کننده v
	CB_{iv}	هزینه خرید قلم استریل i از تأمین کننده v
	$CB_{i'v}$	هزینه خرید قلم غیراستریل i' از تأمین کننده v
	UP	هزینه متغیر آماده سازی اورژانسی اقلام به ازای کمبود هر واحد کالا
	CE	هزینه آماده سازی اورژانسی اقلام به ازای کمبود هر واحد کالا
	$p_{s'} \text{ و } p_s$	احتمال رخداد سناریوی s و s'
	A_v	ضریب رضایت جراح از محصولات تأمین کننده v
	M	عدد مثبت خیلی بزرگ
متغیرها		
	Y_{ik}	تعداد قلم استریل i که پیش از عمل با توجه به لیست ترجیحی جراح به وسیله سبد اقلام از داروخانه به اتاق عمل k ارسال می شود.
	Q_{iv}	مقدار خرید قلم استریل i از تأمین کننده v
	$Q_{i'v}$	مقدار خرید قلم غیراستریل اولیه i' از تأمین کننده v

- $T_{i'0'}$ مقدار اقلام غیراستریل اولیه i' ارسال شده از داروخانه به هسته استریل قبل از عمل
- $O_{i'0'k}$ مقدار قلم برداشته شده از هسته استریل، قبل از عمل برای اتاق عمل k
- W_{i0k}^s مقدار قلم استریل i برداشته شده از داروخانه حین عمل، برای اتاق عمل k تحت سناریوی s
- $W_{i'0'k}^s$ مقدار قلم غیراستریل اولیه i' از هسته استریل حین عمل برای اتاق عمل k آمده تحت سناریوی s
- $N_{i'0'}^s$ مقدار قلم غیراستریل اولیه i' ارسال شده از داروخانه به هسته استریل تحت سناریوی s
- B_{i0k}^s اگر نیاز باشد که در حین عمل در اتاق عمل k ، قلم استریل i تحت سناریوی s از داروخانه برداشته شود، برابر ۱؛ در غیر این صورت برابر ۰.
- $B_{i'00'}^s$ اگر نیاز باشد که در طی روند عمل اتاق عمل، قلم غیراستریل اولیه i' تحت سناریوی s از داروخانه برداشته شود، برابر ۱؛ در غیر این صورت برابر ۰
- θ عدد مثبت

۲-۴- مدل سازی

$$\min F_1 = OC + BC + EC_s$$

$$OC = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} CL_{ik} \times Y_{ik} + \sum_{i' \in I'} CL_{i'0'} \times T_{i'0'} + \sum_{i' \in I'} \sum_{k \in K} CL_{i'k} \times O_{i'0'k} \quad (1)$$

$$BC = \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} CB_{iv} \times Q_{iv} + \sum_{i' \in I'} \sum_{v \in V} CB_{i'v} \times Q_{i'v} \quad (2)$$

$$EC_s = \sum_{s \in \Omega} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (FP_{0k} \times B_{i0k}^s + UP \times W_{i0k}^s) + \sum_{s \in \Omega} \sum_{i' \in I'} (FP_{00'} \times B_{i'00'}^s + CE \times N_{i'0'}^s) + \sum_{s \in \Omega} \sum_{i' \in I'} \sum_{k \in K} (FP_{0'k} \times B_{i'0'k}^s + CE \times W_{i'0'k}^s) \quad (3)$$

$$\max F_2 = \sum_v \sum_i (A_v \times Q_{iv}) + \sum_v \sum_{i'} (A_v \times Q_{i'v}) \quad (4)$$

s. to:

$$\sum_{v \in V} Q_{iv} \leq CAP_{i0} \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{v \in V} Q_{i'v} \leq CAP_{i'0} \quad \forall i' \in I' \quad (6)$$

$$N_{i'0'}^s + T_{i'0'} \leq CAP_{i'0'} \quad \forall i' \in I', s \in \Omega \quad (7)$$

$$Y_{ik} + W_{i0k}^s \leq CAP_{ik} \quad \forall k \in K, i \in I, s \in \Omega \quad (8)$$

$$O_{i'0'k} + W_{i'0'k}^s \leq CAP_{i'k} \quad \forall k \in K, i' \in I', s \in \Omega \quad (9)$$

$$Y_{ik} \geq D_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (10)$$

$$W_{iok}^s \geq D'_{ik}{}^s \quad \forall i \in I, k \in K, s \in \Omega \quad (11)$$

$$O_{i'o'k} \geq D_{i'k} \quad \forall i' \in I', k \in K \quad (12)$$

$$W_{i'o'k}{}^s \geq D'_{i'k}{}^s \quad \forall i' \in I', k \in K, s \in \Omega \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} (Y_{ik} + W_{iok}{}^s) \leq \sum_v Q_{iv} \quad \forall i \in I, s \in \Omega \quad (14)$$

$$T_{i'o'} + N_{i'o'}{}^s \leq \sum_v Q_{i'v} \quad \forall i' \in I', s \in \Omega \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} (O_{i'o'k} + W_{i'o'k}{}^s) = T_{i'o'} + N_{i'o'}{}^s \quad \forall i' \in I', s \in \Omega \quad (16)$$

$$B_{iok}{}^s \leq W_{iok}{}^s \leq B_{iok}{}^s \times D'_{ik}{}^s \quad \forall i \in I, k \in K, s \in \Omega \quad (17)$$

$$B_{i'00'}{}^s \leq N_{i'o'}{}^s \leq B_{i'00'}{}^s \times M \quad \forall i' \in I', k \in K, s \in \Omega \quad (18)$$

$$B_{i'o'k}{}^s \leq W_{i'o'k}{}^s \leq B_{i'o'k}{}^s \times D'_{i'k}{}^s \quad \forall i' \in I', k \in K, s \in \Omega \quad (19)$$

$$Q_{iv} \leq C_{iv} \quad \forall i \in I, v \in V \quad (20)$$

$$Q_{i'v} \leq C_{i'v} \quad \forall i' \in I, v \in V \quad (21)$$

$$B_{iok}{}^s, B_{i'00'}{}^s, B_{i'o'k}{}^s \in \{0,1\} \quad \forall s \in \Omega, i \in I, i' \in I', k \in K \quad (22)$$

$$EC_s - \sum_{s \in \Omega} p_s EC_s + \theta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (23)$$

تابع هدف‌ها:

توابع اهداف این مدل شامل دو تابع هدف است که تابع هدف اول برای کمینه‌سازی هزینه‌ها تعریف شده است و شامل سه عبارت است که عبارت (۱) OC : بیانگر هزینه آماده‌سازی و ارسال سبد اقلام از داروخانه به اتاق عمل، پیش از عمل است. عبارت (۲) BC : هزینه خرید اقلام از تأمین‌کنندگان و عبارت (۳) EC_s : بیانگر هزینه آماده‌سازی و ارسال سبد اقلام از داروخانه به اتاق عمل، حین عمل است. در عبارت (۴) تابع هدف دوم بیانگر بیشینه‌کردن رضایت جراح است.

محدودیت‌ها:

محدودیت‌های ظرفیت

محدودیت‌های (۵) تا (۹) حداکثر ظرفیت فضای داروخانه، هسته استریل و اتاق‌های عمل را نشان می‌دهد. منظور از ظرفیت اتاق عمل برای اقلام استریل و غیراستریل، این است که قرارداد بیش از حد اقلام در سینی‌ها و بر میزهای اتاق عمل خود به‌نوعی موجب به هم ریختگی و کاهش تمرکز و رضایت جراحان می‌شود.

محدودیت‌های تقاضا

محدودیت‌های (۱۰) تا (۱۳) بیان می‌کنند تقاضا باید با مجموع مقدار وارد شده به اتاق عمل، قبل و حین عمل برآورده شود.

محدودیت تعادل موجودی

محدودیت‌های (۱۴) تا (۱۶) برای تضمین اینکه مقدار اقلام (استریل و غیراستریل اولیه) انتخاب شده از داروخانه و هسته استریل نمی‌تواند بیشتر از مقدار موجود در داروخانه و هسته استریل باشد، استفاده می‌شود.

محدودیت مدل‌سازی هزینه ثابت

محدودیت‌های (۱۷) تا (۱۹) برای مدل‌سازی هزینه ثابت در ارتباط با مسافت‌های پیاده‌روی استفاده می‌شود، هنگامی که پرستاران برای برداشتن یک قلم از مکان‌های دیگر، حین عمل اقدام می‌کنند.

محدودیت سقف خرید

محدودیت‌های (۲۰) تا (۲۱) نشان می‌دهد برای خرید از هر تأمین‌کننده یک سقف میزان خرید وجود دارد. عبارت (۲۳) به شکل زیر گسترش می‌یابد:

$$\begin{aligned} & \sum_{s \in \Omega} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (FP_{0k} \times B_{i0k}^s + UP \times W_{i0k}^s) + \sum_{s \in \Omega} \sum_{i' \in I'} (FP_{00'} \times B_{i'00'}^s + CE \times N_{i'0'}^s) \quad (24) \\ & + \sum_{s \in \Omega} \sum_{i' \in I'} \sum_{k \in K} (FP_{0'k} \times B_{i'0'k}^s + CE \times W_{i'0'k}^s) \\ & - \sum_{s \in \Omega} (P_s * \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (FP_{0k} \times B_{i0k}^s + UP \times W_{i0k}^s)) \\ & + \sum_{i' \in I'} (FP_{00'} \times B_{i'00'}^s + CE \times N_{i'0'}^s) \\ & + \sum_{i' \in I'} \sum_{k \in K} (FP_{0'k} \times B_{i'0'k}^s + CE \times W_{i'0'k}^s) + \theta_s \geq 0 \end{aligned}$$

برای تبدیل تابع هدف از غیرخطی به خطی عبارت (۲۴) اضافه شده است.

$$\theta_s \geq 0 \quad \forall s \in \Omega \quad (25)$$

محدودیت (۲۲) محدودیت غیرکارکردی و محدودیت‌های (۲۳) تا (۲۵) محدودیت‌هایی‌اند که بر اثر پیاده‌سازی روش استوار به مدل اضافه شده است. براساس مدل مالوی عبارت (۳) به شکل زیر درخواهد آمد:

$$\min \sum_{s \in \Omega} p_s(\xi_s) + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s[(\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'}) + 2\theta_s] \quad (26)$$

سپس به شکل زیر گسترش خواهد یافت:

$$\min \sum_{s \in \Omega} p_s(EC_s) + \lambda_1 \sum_{s \in \Omega} p_s \left[(EC_s) - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'}(EC_{s'}) + 2\theta_s \right] \quad (27)$$

درنهایت خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} EC_s = \sum_{s \in \Omega} p_s & \left(\sum_{s \in \Omega} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (FP_{0k} \times B_{i0k}^s + UP \times W_{i0k}^s) \right. \\ & + \sum_{s \in \Omega} \sum_{i' \in I'} (FP_{00'} \times B_{i'00'}^s + CE \times N_{i'0'}^s) \\ & + \sum_{s \in \Omega} \sum_{i' \in I'} \sum_{k \in K} (FP_{0'k} \times B_{i'0'k}^s + CE \times W_{i'0'k}^s) \left. \right) \\ & + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s \left[\sum_{s \in \Omega} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (FP_{0k} \times B_{i0k}^s + UP \times W_{i0k}^s) \right. \\ & + \sum_{s \in \Omega} \sum_{i' \in I'} (FP_{00'} \times B_{i'00'}^s + CE \times N_{i'0'}^s) \\ & + \sum_{s \in \Omega} \sum_{i' \in I'} \sum_{k \in K} (FP_{0'k} \times B_{i'0'k}^s + CE \times W_{i'0'k}^s) \\ & - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \left(\sum_{s' \in \Omega} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (FP_{0k} \times B_{i0k}^{s'} + UP \times W_{i0k}^{s'}) \right. \\ & + \sum_{s' \in \Omega} \sum_{i' \in I'} (FP_{00'} \times B_{i'00'}^{s'} + CE \times N_{i'0'}^{s'}) \\ & \left. \left. + \sum_{s' \in \Omega} \sum_{i' \in I'} \sum_{k \in K} (FP_{0'k} \times B_{i'0'k}^{s'} + CE \times W_{i'0'k}^{s'}) + 2\theta_{s'} \right) \right] \end{aligned} \quad (28)$$

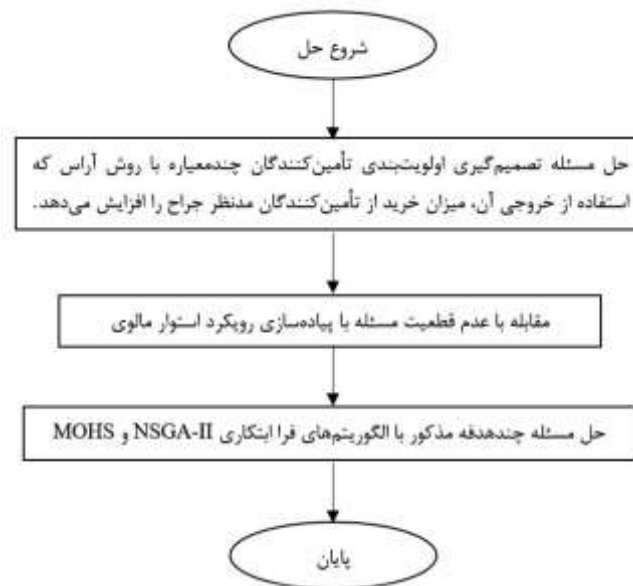
مدل‌سازی استوار به شکل زیر در خواهد آمد:

$$\min F_1 = OC + BC + EC_s$$

و محدودیت‌های (۵) تا (۲۵) را نیز خواهیم داشت.

۳- روش حل

مراحل حل این مسئله در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- مراحل حل مسئله

Fig. 2- Solution steps

۳-۱- روش آراس

روش تصمیم‌گیری آراس^{۲۵} (ARAS) را زاوادساکاس و ترسکیس^{۲۶} (۲۰۱۰) پیشنهاد کردند. در این روش بهترین گزینه آن است که بیشترین فاصله را از عوامل منفی و کمترین فاصله را از عوامل مثبت داشته باشد و از شش گام تشکیل شده است که در نهایت منتج به تعیین اولویت‌بندی بین گزینه‌ها می‌شود. گام‌های روش به‌اختصار در ادامه توضیح داده شده‌اند.

گام ۱) تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری؛

گام ۲) نرمال کردن یا بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم‌گیری؛

گام ۳) موزون کردن ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده؛

گام ۴) محاسبه مقدار بهینگی؛

گام ۵) محاسبه درجه سودمندی یا مطلوبیت گزینه‌ها؛

گام ۶) رتبه‌بندی گزینه‌ها.

برای دریافت اطلاعات بیشتر از مراحل پیاده‌سازی و حل مسئله عددی اولویت‌بندی، به منبع کریمیان و سموئی (۲۰۲۲) مراجعه بفرمایید.

۳-۲- مقابله با عدم قطعیت مدل‌سازی با پیاده‌سازی رویکرد استوار

درواقع در بحث بهینه‌سازی استوار، به‌دنبال جوابی هستیم که با در نظر گرفتن عدم قطعیت در داده‌ها (تابع هدف و محدودیت‌ها) با احتمال بسیار بالایی موجه باشد. رویکرد استوار، مدلی را ارائه می‌دهد که در آن پارامترهای

غیرقطعی با یک مجموعه از سناریوها تعریف خواهند شد. در این بهینه‌سازی اگر به‌ازای تمام سناریوهای تعریف‌شده، جواب به دست آمده نزدیک به جواب بهینه باشد، پاسخ استوار نامیده می‌شود و همچنین اگر به‌ازای تمام سناریوهای تعریف‌شده تقریباً شدنی باشد، مدل استوار نامیده می‌شود که تعریف بیان‌شده همان دو رویکرد در استوار است؛ یعنی استواری جواب و استواری کیفیت، استواری کیفیت نیز معادل شدنی ماندن مسئله و خارج‌نشدن از فضای پاسخ است. در این پژوهش برای مواجهه با عدم قطعیت و نیز به‌علت گسسته‌بودن و نامشخص‌بودن توزیع داده‌ها، از روش استوار مالوی استفاده شد. برای دریافت اطلاعات بیشتر از مدل‌سازی استوار مالوی و توضیحات مربوط به آن، به منبع کریمیان و سموئی (۲۰۲۲) مراجعه بفرمایید.

۳-۳- الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع-۲^{۲۷}

نظر به اینکه مسئله موردبررسی در این پژوهش، با توجه به مسئله مشابه آن (احمدی، ماسل و هوستتلی، ۲۰۱۹) یک مسئله NP-Hard است، می‌توان در ابعاد متوسط و بزرگ از روش‌های فراابتکاری استفاده کرد. در اینجا از روش‌های الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نوع ۲ (NSGA-II) و جست‌وجوی هارمونی چندهدفه برای ابعاد بزرگ استفاده می‌کنیم.

روش NSGA-II که توسعه‌یافته‌ای از روش NSGA است، یکی از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه است که به‌طور مکرر در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی به‌عنوان بهترین تکنیک برای تولید مرزهای پارتو، از آن استفاده می‌شود. روش کار الگوریتم کلی NSGA-II به شرح ذیل است (دب و همکاران^{۲۸}، ۲۰۰۲).

۱. ایجاد جمعیت اولیه؛
 ۲. محاسبه معیارهای برازندگی؛
 ۳. مرتب‌کردن جمعیت براساس شرط‌های غلبه‌کردن؛
 ۴. محاسبه فاصله ازدحامی؛
 ۵. به محض اینکه جمعیت اولیه براساس شرط‌های غلبه‌کردن مرتب شد، مقدار فاصله ازدحامی در آن محاسبه خواهد شد و انتخاب از میان جمعیت اولیه آغاز می‌شود؛
 ۶. توقف الگوریتم در صورت رسیدن به شرط توقف.
- پارامترهای الگوریتم NSGA-II عبارت‌اند از: تعداد تکرار، تعداد جمعیت، نرخ جهش^{۲۹} و نرخ تقاطع^{۳۰}.

۳-۳-۱- ایجاد جواب اولیه

متداول‌ترین روش برای تولید جواب اولیه، تولید جواب تصادفی به‌دلیل سرعت اجرا و نیز ایجاد تنوع در جواب‌هاست؛ به این ترتیب که در ابتدای اجرای الگوریتم، یک جواب تصادفی تولید و مقدار تابع هدف را نیز برای آن محاسبه می‌کنیم.

۳-۳-۲- نحوه نمایش جواب

هر الگوریتم فراابتکاری تکراری، به ساختاری برای نمایش راه‌حل‌ها نیاز دارد؛ این کار کدگذاری نامیده می‌شود. کدگذاری تأثیر بسیار مهمی بر کارایی و اثربخشی هر فراابتکاری دارد و یک مرحله مهم در طراحی یک فراابتکاری

محسوب می‌شود. نحوه نمایش جواب در این مسئله به شکل ماتریسی است؛ به طوری که مانند شکل زیر مقادیر موردنیاز برای برآورد تقاضاهای مختلف چه قبل از عمل و چه حین عمل به شکل زیر نمایش داده می‌شود.

Y_{ik}	$k = 1$	$k = 2$...	$k = K$
$i = 1$	۱۱	۷	...	۸
$i = 2$	۱۲	۶	...	۵
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
$i = I$	۷	۵	...	۳

شکل ۳- نمایش اقلام ارسالی قبل از عمل ارسال شده به اتاق عمل

Fig. 3- Representation of sent items to operating rooms before operations

برای مثال در شکل ۳، عدد ۵ در سطر دوم و ستون آخر این ماتریس نشان می‌دهد که از قلم استریل دوم، به میزان ۵ واحد، پیش از عمل به وسیله سبد اقلام از داروخانه به اتاق عمل آخر ارسال می‌شود.

$O_{i'0'k}$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$...	$k = K$
$i = 1,0$	۳	۴	۵	...	۳
$i = 2,0$	۴	۶	۳	...	۷
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
$i = I,0$	۵	۶	۴	...	۱

شکل ۴- نمایش اقلام غیراستریل کارخانه ارسالی از هسته استریل به اتاق عمل، پیش از عمل

Fig. 4- Representation of sent non-sterile items from the sterile core to operating rooms before operations

در شکل ۴، چگونگی ارسال هرکدام از اقلام غیراستریل کارخانه از هسته استریل به اتاق‌های عمل، پیش از عمل نشان داده شده است؛ به طور مثال عدد ۴ در سطر آخر و ستون سوم نشان می‌دهد که از قلم i' غیراستریل کارخانه به میزان ۴ واحد پیش از عمل از هسته استریل به اتاق عمل سوم ارسال شده است. در ادامه برای سهولت در نمایش اقلام ارسالی به اتاق عمل، حین عمل، از یک مثال کوچک با ابعادی شامل سه نوع از اقلام استریل کارخانه و دو اتاق عمل و سه سناریو استفاده شده است.

W_{i0k}^s	$k = 1,$	$K = 1,$	$K = 1,$	$k = 2,$	$k = 2,$	$K = 2,$
	$s = 1$	$s = 2$	$s = 3$	$s = 1$	$s = 2$	$s = 3$
$i = 1,0$	۲	۳	۵	۱	۲	۳
$i = 2,0$	۲	۳	۶	۲	۳	۳
$i = 3,0$	۳	۴	۸	۲	۴	۶

شکل ۵- نمایش اقلام استریل کارخانه ارسالی از داروخانه به اتاق عمل، حین عمل

Fig. 5- Representation of sent items from the pharmacy to operating rooms during operations

در شکل ۵، چگونگی ارسال هر کدام از اقلام استریل کارخانه از داروخانه به اتاق‌های عمل، حین عمل نشان داده شده است؛ به‌طور مثال عدد ۶ در سطر دوم و ستون سوم نشان می‌دهد که از قلم استریل کارخانه نوع دوم به میزان ۶ واحد حین عمل از داروخانه به اتاق عمل اول، تحت سناریوی سوم (سناریوی بدبینانه) ارسال شده است. به همین ترتیب برای متغیرهای دیگر نیز ماتریس نمایش جواب تشکیل می‌شود.

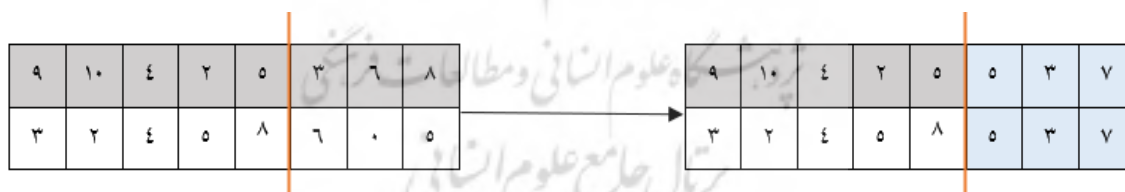
۳-۳-۳- عملگر تقاطع

مهم‌ترین عملگر در الگوریتم ژنتیک، عملگر تقاطع است. تقاطع، فرایندی است که در آن نسل قدیمی کروموزوم‌ها با یکدیگر مخلوط و ترکیب می‌شوند تا نسل تازه‌ای از کروموزوم‌ها به وجود بیایند. جفت‌هایی که در قسمت انتخاب، به‌عنوان والد در نظر گرفته شدند، در این قسمت ژن‌هایشان را با هم مبادله می‌کنند و اعضای جدید به وجود می‌آورند. ترکیب در الگوریتم ژنتیک باعث از بین رفتن پراکندگی یا تنوع ژنتیکی جمعیت می‌شود؛ زیرا اجازه می‌دهد ژن‌های خوب یکدیگر را بیابند. ما در این پژوهش، از تقاطع حسابی استفاده کردیم. براساس این روش، فرزندان از تقاطع حسابی والدین ایجاد می‌شوند. یک نقطه تقاطع انتخاب می‌شود و ترکیب والدین این صورت است که اگر A و B دو عضو از جمعیت فعلی باشند که به‌عنوان والد انتخاب شده‌اند، از تقاطع حسابی آنها دو فرزند a و b به‌صورت زیر به وجود می‌آید:

$$a = \alpha A + (1 - \alpha)B \quad (29)$$

$$b = \alpha B + (1 - \alpha)A \quad (30)$$

پارامتر α مقداری در بازه $[0,1]$ است که در هر ترکیب می‌تواند مقدار مختلفی داشته باشد (یالسنوز^{۳۱} و همکاران، ۲۰۰۱)؛ به‌طور مثال در شکل زیر، $\alpha = 0.5$ است. شکل ۶ یک نمونه ساده از عملگر انجام شده است.

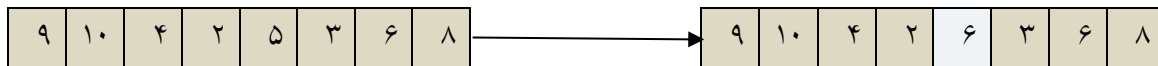


شکل ۶ - تقاطع حسابی

Fig. 6- Arithmetic crossover

۳-۳-۴- عملگر جهش به روش درج^{۳۲} با رویکرد تغییر مقدار

این نوع جهش را نمی‌توان برای کدگذاری باینری یا کدگذاری‌های مشابه، که امکان تغییر ژن‌ها وجود ندارد، به کار برد. در این جهش به ژنی که شرایط جهش را دارد، مقداری اضافه یا کم می‌شود. اضافه‌شدن یا کم‌شدن می‌تواند وابسته به محدوده مقدار ژن باشد و تصادفی انتخاب شود یا برای الگوریتم تعریف شود. بدیهی است مقدارهای بزرگ پراکندگی ژنتیکی را افزایش می‌دهند. در شکل ۷ نمونه‌ای از این جهش نشان داده شده است (دب و همکاران، ۲۰۰۲).



شکل ۷- مثالی از جهش با رویکرد تغییر مقدار

Fig. 7- An example for a mutation with change value

۵-۳-۳- مرتب‌سازی اعضای جمعیت

در شرایطی که دستیابی به بهترین جواب امکان‌پذیر نباشد، جداسازی جواب‌هایی که بهتر از دیگران‌اند، موجب کاهش گزینه‌هایی برای تصمیم‌گیرنده می‌شود. در مسائل چندهدفه، یک جواب موجه وقتی به وسیله جواب موجه دیگر مغلوب می‌شود که حداکثر بر مبنای تمامی اهداف، به خوبی جواب موجه اول باشد و دست‌کم براساس یک تابع هدف بدتر از جواب موجه اول باشد. یک مسئله کمینه‌سازی با m تابع هدف را در نظر بگیرید. جواب x در صورتی به جواب y غلبه می‌کند که:

$$x < y \mid \forall f_i(x) \leq f_i(y) \text{ and } \exists j : f_j(x) < f_j(y) \quad (31)$$

که $f_i(x)$ و $f_i(y)$ به ترتیب مقادیر تابع هدف‌های نام مرتب با جواب‌های x و y هستند. عبارت بالا به این مفهوم است که همه تابع هدف‌های مربوط به جواب x کوچک‌تر یا مساوی تابع هدف متناظر مربوط به جواب y باشند؛ یعنی y از هیچ نظر بهتر از x نباشد و x حداقل از یک نظر اکیداً بهتر از y باشد. جواب‌های نامغلوب، جواب بهینه پارتو نیز نامیده می‌شود.

برای هر جوابی مانند P با توجه به تعریف جواب‌های نامغلوب، یک شمارنده N_p که نشان‌دهنده تعداد دفعات مغلوب شدن P به وسیله دیگر اعضای جمعیت و یک مجموعه S_p ایجاد می‌شود که شامل اعضای از جمعیت است که توسط P مغلوب می‌شوند. تمامی اعضای جمعیت دوبه‌دو با یکدیگر مقایسه می‌شوند و مقادیر N_p و S_p برای آنها محاسبه می‌شود. با توجه به این مقادیر، رتبه مجموعه اعضای جمعیت تعیین می‌شود. برای مقایسه اعضای جمعیت در الگوریتم NSGA-II، اگر با رتبه‌بندی اعضا نسبت به هم نتوان آنها را با یکدیگر مقایسه کرد، برای تعیین برتری اعضا نسبت به یکدیگر، به یک معیار ثانویه نیازمندیم که این معیار ثانویه فاصله ازدحامی^{۳۳} نامیده می‌شود. برای محاسبه فاصله ازدحامی، ابتدا اعضای جمعیت به‌ازای هریک از تابع هدف‌ها به‌صورت صعودی مرتب می‌شوند، سپس مقدار فاصله ازدحامی برای جواب‌های اول و آخر مجموعه مرتب‌شده بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود و برای جواب‌های دیگر نیز با توجه به نسبت اختلاف جواب‌های مجاور و جواب اول و آخر محاسبه می‌شود. این محاسبات برای تمامی تابع هدف‌ها تکرار و مقدار فاصله ازدحامی برای هر عضو جمعیت، از جمع مقادیر فواصل مربوط به هر تابع هدف محاسبه می‌شود. هرچه مقدار فاصله ازدحامی برای یک عضو جمعیت بیشتر باشد، نشان‌دهنده پوشش فاصله بیشتری توسط عضو مدنظر است (یعنی جواب در ناحیه خلوت‌تری قرار دارد) و بیانگر این نکته است که این جواب بیشتر از جواب‌های دیگر به ایجاد تنوع در جمعیت کمک می‌کند (هنرور و خلیلی^{۳۴}، ۱۳۹۶).


۳-۳-۶- بررسی معیار توقف الگوریتم

برای توقف الگوریتم‌های حل می‌توان از چندین معیار توقف، نظیر توقف بعد از تکرارهای مشخص، توقف بعد از سپری شدن یک مدت زمان مشخص و توقف بعد از اجرای تعداد مشخصی از تکرارها استفاده کرد که به موجب آن هیچ بهبودی در بهترین جواب حاصل نمی‌شود. در الگوریتم پیشنهادی، از تعداد تکرارهای مشخص برای توقف الگوریتم استفاده شده است؛ به این ترتیب زمانی که شرط توقف الگوریتم برآورده شود، الگوریتم متوقف می‌شود و در غیر این صورت، بخش‌های قبلی تکرار خواهند شد.

۳-۳-۷- استراتژی برخورد با جواب‌های نشدنی

در هر الگوریتم برای برخورد با حالات و پاسخ‌های نشدنی، استراتژی‌های مختلفی در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، نحوه برخورد با پاسخ نشدنی براساس استراتژی اصلاحی^{۳۵} است و به جای آنکه کروموزوم حذف شود، تبدیل به یک کروموزوم موجه می‌شود. این روش به مسئله وابسته است و گاهی می‌تواند پیچیده باشد. عملکرد استراتژی اصلاح به این صورت است که پس از تشکیل کروموزوم و مقداردهی ژن‌ها، مقادیر با میزان تقاضا سنجیده می‌شوند. در این حالت اگر مقادیر نتوانند میزان تقاضا را برآورد کنند، آن قدر به آن مقدار اضافه و کم می‌شود تا بتواند تقاضا را ارضا کند؛ به‌طور مثال اگر برای اتاق عمل ۲ ($k = 2$) پیش از عمل به میزان پنج واحد از قلم استریل نوع اول ($i_1 = 5$) تقاضا نیاز داشته باشیم و مقدار به دست آمده در ماتریس مربوطه ۳ واحد باشد، الگوریتم آن قدر به این مقدار اضافه می‌کند تا بتواند ماتریسی تشکیل دهد که این مقدار را در درایه مربوطه برآورد کند.

Y_{ik}	$k = 1$	$k = 2$...	$k = K$
$i = 1$	۱۱	۳	...	۸
$i = 2$	۱۲	۶	...	۵
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
$i = I$	۷	۵	...	۳



Y_{ik}	$k = 1$	$k = 2$...	$k = K$
$i = 1$	۱۱	۵	...	۸
$i = 2$	۱۲	۶	...	۵
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
$i = I$	۷	۵	...	۳

شکل ۸- مثالی از پیاده‌سازی استراتژی اصلاح

Fig. 8- An example for repairing strategy

۳-۴- الگوریتم رقیب یا الگوریتم جست‌وجوی هارمونی چندهدفه (MOHS)

موسیقی یکی از رضایت‌بخش‌ترین فرآیندهای حاصل از تلاش‌های بشر است. الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی هارمونی مشتق شده از یک پدیده مصنوعی موجود در اجرای موسیقی، یعنی فرآیند جست‌وجو برای هارمونی بهتر است.

در این الگوریتم هر نوازنده، نت را تولید می‌کند که مشابه یک متغیر در بردار کلی حل است. کیفیت این بردار با استفاده از یک تابع برازندگی اندازه‌گیری می‌شود و روند بهینه‌سازی کلی به دنبال یافتن بهترین بردار راه‌حل با بهترین مقدار برازندگی است (گیم و همکاران^{۳۷}، ۲۰۰۱).

شباهت بین کار نوازندگان در موسیقی و عملکرد روش‌های بهینه‌یابی را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

ساز: متغیر تصمیم

دامنه‌نت: دامنه متغیر تصمیم

نت انتخاب‌شده: مقدار متغیر تصمیم

هارمونی: بردار حل

علم زیباشناختی: تابع هدف

تمرین: تکرار

تجربه: حافظه هارمونی

۳-۴-۱- تعیین مقادیر اولیه برای پارامترهای مسئله و الگوریتم

در مرحله آغازین، دامنه مقادیر ممکن متغیرهای تصمیم مسئله بهینه‌سازی و همچنین پارامترهای الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، شامل اندازه حافظه هارمونی (MS)، احتمال پذیرش از حافظه هارمونی (HMCR)، نرخ تغییر گام (PAR)، حداکثر مقدار تغییر ایجادشده در متغیر انتخاب‌شده (bw) و حداکثر تعداد مراحل ایجاد حافظه هارمونی (NI) تعیین می‌شود. تعداد بردارهای جواب در حافظه هارمونی با HMS مشخص می‌شود. احتمال استفاده از هر یک از اجزای حافظه هارمونی در ایجاد یک جواب جدید با HMCR مشخص و براساس آن متغیرهای متناسب در طول تکرارهای پیشین همواره حفظ می‌شود. احتمال تنظیم گام متغیر انتخاب‌شده با PAR تعیین می‌شود.

۳-۴-۲- مقداردهی اولیه حافظه هارمونی

در الگوریتم جست‌وجوی هارمونی برای حفظ جواب‌های پیشین، از حافظه هارمونی استفاده می‌شود. حافظه هارمونی مرحله برای ذخیره همه بردارهای جواب است و با جواب‌های شدنی تصادفی پر می‌شود. حافظه هارمونی به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$HM = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{pmatrix} \quad (32)$$

۳-۴-۳- ایجاد یک هارمونی جدید

بردار هارمونی جدید $X' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$ بر مبنای سه قاعده، یعنی انتخاب متغیرها از حافظه قبلی، تنظیم گام و انتخاب تصادفی ایجاد می‌شود. درباره قاعده انتخاب متغیرها از حافظه قبلی، می‌توان گفت همان‌طور که در یک گروه موسیقی، هر نوازنده می‌تواند نت‌های مناسب اجراشده در طول تمرین‌های گذشته را دوباره اجرا کند، در الگوریتم جست‌وجوی هارمونی نیز یک متغیر می‌تواند مقدار مناسب اختیارشده گذشته موجود در حافظه هارمونی را انتخاب کند. احتمال انتخاب متغیرها از حافظه هارمونی HMCR، همواره عددی بین صفر و یک است. اگر

HMCR خیلی کوچک و نزدیک به صفر باشد، همگرایی الگوریتم به‌کندی انجام می‌شود و اگر خیلی بزرگ و نزدیک به یک باشد، جواب‌های خوبی حاصل نمی‌شود.

در یک گروه موسیقی، یک نوازنده می‌تواند نت‌های اجرا شده در تمرین‌های پیشین را با تغییرات جزئی اجرا کند؛ در موسیقی این عمل را تنظیم گام می‌نامند. در الگوریتم جست‌وجوی هارمونی نیز یک متغیر می‌تواند با احتمال PAR مقادیر انتخاب‌شده از طریق پارامتر را اندکی تغییر دهد. PAR مقداری در محدوده [۰,۱] می‌گیرد و میزان تغییر توسط پهنای باند تعیین می‌شود تا جواب از یک همسایه به همسایه دیگر منتقل شود. مقدار پهنای باند به‌طور تصادفی از دامنه آن انتخاب می‌شود؛ برای مثال، اگر $(PAR=0,3)$ باشد، به این معنی است که احتمال تغییر مقدار متغیر ۳۰٪ است. در حالی که یعنی $(PAR-1)$ ، احتمال حفظ متغیر بدون هیچ تغییری است. PAR شبیه به یک الگوریتم جست‌وجوی محلی است که تنها راه‌حل‌های بهبود را می‌پذیرد.

برای ایجاد مقدار برای متغیر نام، ابتدا یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید می‌کنیم. این عدد تصادفی با HMCR مقایسه می‌شود و دو حالت زیر را خواهیم داشت:

اگر عدد تولیدشده از HMCR کمتر باشد، آنگاه یک مقدار برای متغیر نام از ماتریس حافظه هارمونی انتخاب می‌شود.

اگر عدد تولیدشده بزرگ‌تر مساوی HMCR باشد، آنگاه یک مقدار برای متغیر نام از فضای جست‌وجوی هارمونی انتخاب می‌شود.

در صورتی که تولیدشده از HMCR کمتر باشد، پس از انتخاب یک مقدار برای متغیر، یک عدد تصادفی دیگر انتخاب (ε) و با PAR مقایسه می‌شود و اگر کوچک‌تر باشد، این متغیر انتخاب‌شده از ماتریس حافظه به مقدار کوچکی با توجه به رابطه زیر تغییر پیدا می‌کند. برای تعیین مقدار متغیر بر متغیر انتخاب‌شده از حافظه ماتریس پارامتر دیگری به نام bw (ماکزیمم مقدار تغییر ایجادشده در متغیر انتخاب‌شده) تعریف می‌شود و با توجه به رابطه زیر، مقدار متغیر جدید به دست می‌آید:

$$X_{new} = X_{old} + bw + \varepsilon \quad (33)$$

در رابطه (۳۳)، X_{old} عنوان مقدار متغیر ذخیره‌شده در حافظه هارمونی و ε عدد تصادفی از یک توزیع یکنواخت در بازه $[-1,1]$ بوده است؛ سپس ما متغیر جدید را با X_{new} نشان داده‌ایم.

درباره قاعده انتخاب تصادفی، می‌توان گفت همان‌طور که در یک گروه موسیقی، یک نوازنده می‌تواند به‌صورت تصادفی نت‌هایی را اجرا کند، در الگوریتم جست‌وجوی هارمونی نیز یک متغیر می‌تواند مقادیر را به‌صورت تصادفی برگزیند. از انتخاب تصادفی برای افزایش تنوع جواب‌ها استفاده می‌شود و PAR نیز نقش مشابهی را ایفا می‌کند؛ اما توسط یک فضای معین محدود شده است و این امر الگوریتم را به سمت جست‌وجوی محلی و گیرافتادن در جواب‌های بهینه محلی هدایت می‌کند؛ اما با استفاده از انتخاب تصادفی، الگوریتم به سمت یافتن جواب بهینه سراسری هدایت می‌شود (طالعی‌زاده و همکاران^{۳۸}، ۲۰۱۱).

۳-۴-۴- به‌هنگام‌سازی حافظه هارمونی

نظر به اینکه مسئله حاضر در زمره مسائل بهینه‌سازی چندهدفه قرار می‌گیرد، به‌هنگام‌سازی حافظه هارمونی با مسائل تک‌هدفه متفاوت خواهد بود. براساس رویکرد پیشنهادشده توسط سیواسایرمانی و اسوراپ^{۳۹} (۲۰۱۱)، از دسته‌بندی نامغلوب و فاصله ازدحام برای یافتن جواب‌های بهینه پارتو استفاده می‌شود. در این گام حافظه هارمونی جدید با حافظه هارمونی موجود ترکیب می‌شود تا یک بردار جواب با $2 \times \text{HMS}$ حاصل شود. با عملکرد دسته‌بندی نامغلوب، هر جواب براساس سطح نامغلوب بودن رتبه‌بندی می‌شود. رتبه یک به بهترین سطح نامغلوب و رتبه دو به بهترین سطح نامغلوب بعدی تخصیص می‌یابد و این روند ادامه پیدا می‌کند تا همه جواب‌ها رتبه‌بندی شود. برای تشکیل بهترین حافظه هارمونی با اندازه HMS دو جواب براساس رتبه با هم مقایسه می‌شوند و جواب با رتبه پایین‌تر انتخاب می‌شود. در صورت برابری رتبه جواب‌ها، از معیار فاصله ازدحام استفاده می‌شود. معیار فاصله ازدحام برای حفظ تنوع جواب در بین جواب‌ها با رتبه یکسان استفاده می‌شود و براساس آن میزان نزدیکی یک جواب به جواب‌های همسایه به صورت زیر اندازه‌گیری خواهد شد:

$$CD_i = \frac{1}{N_{obj}} \sum_{g=1}^{N_{obj}} |f_{i+1}^g + f_{i-1}^g| \quad (34)$$

در این رابطه، CD_i فاصله ازدحام برای i امین جواب، N_{obj} تعداد اهداف، f_{i+1}^g مقدار g امین تابع هدف $(i+1)$ این جواب، f_{i-1}^g مقدار تابع هدف $(i-1)$ امین جواب و $(i+1)$ و $(i-1)$ نزدیک‌ترین جواب‌های همسایگی جواب i هستند، نظر به اینکه فاصله ازدحام بالاتر به تنوع بهتری در جمعیت منجر می‌شود، جواب بدتر براساس فاصله ازدحام از حافظه هارمونی حذف خواهد شد تا تعداد جواب‌های نامغلوب از HMS فراتر نرود.

۳-۴-۵- بررسی معیار توقف الگوریتم

برای توقف الگوریتم‌های حل می‌توان از چندین معیار توقف، نظیر توقف بعد از تعداد تکرارهای مشخص، توقف بعد از سپری شدن یک مدت‌زمان مشخص و توقف بعد از اجرای تعداد مشخصی از تکرارها استفاده کرد که به موجب آن هیچ بهبودی در بهترین جواب حاصل نشود. در الگوریتم پیشنهادی، از تعداد تکرارهای مشخص برای توقف الگوریتم استفاده شده است؛ به این ترتیب زمانی که شرط توقف الگوریتم برآورده شود، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی متوقف می‌شود و در غیر این صورت، بخش‌های قبلی تکرار خواهند شد.

۴- یافته‌ها

۴-۱- تنظیم پارامترهای ورودی الگوریتم NSGA-II

تعیین پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری، عاملی تأثیرگذار بر عملکرد این الگوریتم‌هاست؛ بنابراین تنظیم پارامتر، یکی از مهم‌ترین تحقیقات چالش‌برانگیز برای هر روش بهینه‌سازی، خصوصاً الگوریتم‌های فراابتکاری است؛ بنابراین دو ایده کلی برای تعیین بهترین مقادیر پارامترها مطرح شده است که می‌تواند به صورت مقادیر ثابت از آغاز تا پایان اجرای الگوریتم باشد و یا با استفاده از روش‌های پویا و انطباقی، پارامتر در هنگام اجرای الگوریتم اجازه تغییر داشته

باشد و خود را با وضعیت پیشرفت الگوریتم تطبیق دهد. روش مرسوم در کاهش تعداد ترکیبات آزمایش، استفاده از آزمایش‌های فاکتوریلی جزئی است. تاگوچی مجموعه ویژه‌ای از طرح‌های کلی را برای آزمایش‌های فاکتوریلی ایجاد کرده است که بیشتر کاربردها را پوشش می‌دهد. آرایه‌های ارتوگونال، جزئی از این مجموعه طراحی‌هاست. استفاده از این آرایه‌ها ما را در تعیین کمترین تعداد آزمایش‌های موردنیاز برای مجموعه‌ای از فاکتورها یاری می‌کند؛ به عبارت دیگر تاگوچی، انجام آزمایش‌ها را با تغییر دادن کامل فاکتورها با روشی ساده‌تر، کم‌هزینه‌تر و سریع‌تر به صورت آزمایش‌های ناقص جایگزین کرده است.

۴-۱-۱- روش طراحی آزمایش تاگوچی

در روش تاگوچی عوامل به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: عوامل قابل کنترل و نویز^{۴۰}. نویزها عواملی‌اند که ما هیچ کنترلی روی آنها نداریم. روش تاگوچی به دنبال حداقل کردن تأثیر نویز و تعیین بهترین سطح برای عوامل قابل کنترل است. در کنار تعیین بهترین سطح هر فاکتور، روش تاگوچی اهمیت هر عامل را برحسب تأثیر اصلی آنها روی متغیر پاسخ تعیین می‌کند. روش تاگوچی یک طرح آزمایش نیرومند است که مقادیر متغیر پاسخ را به نحی به نام سیگنال به نویز (S/N) تبدیل می‌کند. عموماً واژه سیگنال به مقدار مطلوب (متوسط متغیر پاسخ) و نویز به مقدار نامطلوب (انحراف معیار) اشاره دارد؛ بنابراین، نرخ S/N به مقدار پراکندگی موجود در متغیر پاسخ اشاره دارد. هدف، حداقل کردن نرخ S/N است. روش تاگوچی می‌تواند به صورت زیر شرح داده شود: تأثیر فاکتور بر مقادیر S/N و میانگین مقادیر عملکرد ارزیابی می‌شود. برای هر فاکتور که تأثیر معناداری بر مقادیر داشته باشد، سطحی از آن فاکتور انتخاب می‌شود که بیشترین مقدار S/N مرتبط با آن است. این فاکتورها، فاکتورهای کنترل نامیده می‌شوند. برای هر فاکتور که تأثیر معناداری بر مقادیر S/N ندارد، اما تأثیر معناداری بر میانگین معیار عملکرد دارد، سطحی از آن فاکتور انتخاب می‌شود که به نقطه هدف^{۴۱} نزدیک‌تر باشد. این فاکتورها، فاکتورهای تنظیم^{۴۲} نامیده می‌شوند. هر فاکتور که تأثیر معناداری بر S/N و میانگین عملکرد نداشته باشد، فاکتور اقتصادی^{۴۳} نامیده می‌شود و سطحی از آنکه معیار عملکرد بهتری را نتیجه دهد یا زمان محاسباتی کمتری داشته باشد، انتخاب می‌شود. پارامترهایی که برای بررسی و ارزیابی کارایی الگوریتم NSGA-II در نظر گرفته شده است، به همراه سطوح انتخابی آنها، در جدول ۳ آورده شده است (صادقی، صادقی و نیاکی^{۴۴}، ۲۰۱۴).

جدول ۳- پارامترها و سطوح آنها برای الگوریتم NSGA-II

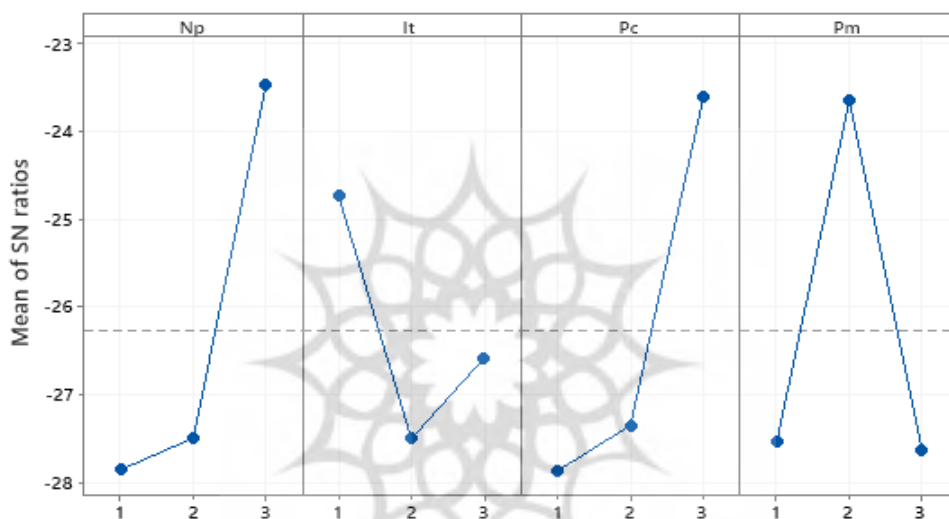
Table 3. Parameters and their levels for NSGA-II algorithm

فاکتور	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم
جمعیت	۵۵	۶۰	۶۵
تکرار	۴۰۰	۷۰۰	۱۰۰۰
نرخ تقاطع	۰٫۶	۰٫۷	۰٫۸
نرخ جهش	۰٫۱	۰٫۱۵	۰٫۲

براساس جدول استاندارد تاگوچی، با در نظر گرفتن ۲ فاکتور ۲ سطحی می‌توان از دو طرح L9 و L27 استفاده کرد که ما در این قسمت از طرح L9 به دلیل ساده‌تر بودن و محاسبات کمتر استفاده می‌کنیم؛ سپس شاخص‌ها برای آزمایش‌های مختلف اندازه‌گیری و این شاخص‌ها با استفاده از انحراف درصد نسبی^{۴۵} بی‌مقیاس شدند:

$$RPD = \frac{\left| \text{بهترین جواب} - \text{هر جواب} \right| \times 100}{\text{بهترین جواب}} \quad (35)$$

با توجه به اینکه هدف نمودار نسبت سیگنال به نویز، هرچه کوچک‌تر باشد، بهتر است، برای همین با توجه به شکل ۹، زمانی که پارامتر جمعیت در سطح ۱، پارامتر تکرار در سطح ۲، پارامتر نرخ تقاطع در سطح ۱ و پارامتر نرخ جهش نیز در سطح ۳ تنظیم شوند، بهترین پاسخ حاصل از اجرای الگوریتم به دست می‌آید.



شکل ۹- نمودار نسبت سیگنال به نویز برای الگوریتم NSGA-II

Fig. 9- Signal to noise ratio for NSGA-II algorithm

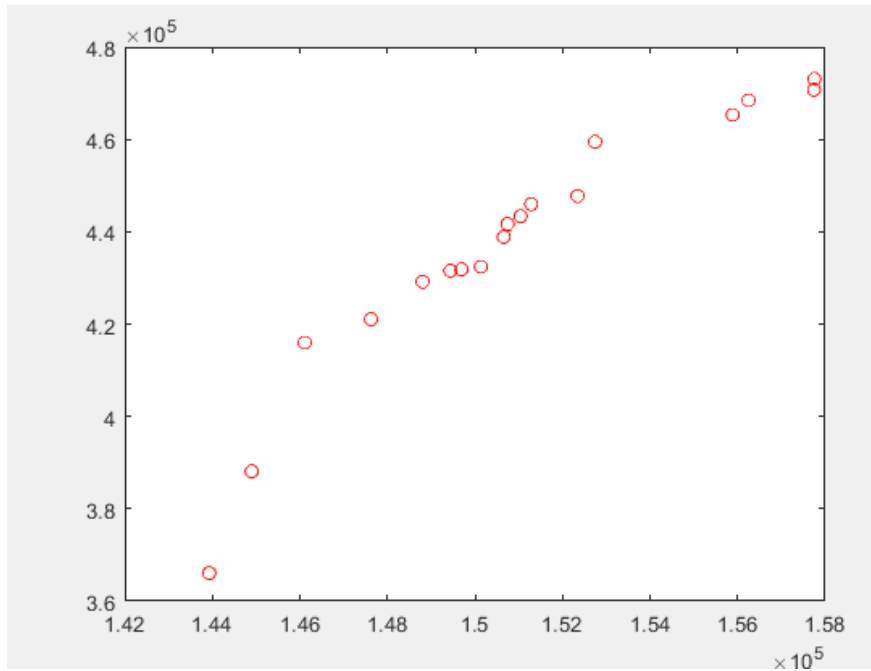
نتیجه نهایی تنظیم پارامتر در جدول ۴ درج شده است.

جدول ۴ - نتیجه نهایی تنظیم پارامترهای الگوریتم NSGA-II

Table 4. Final results of parameters' setting of the NSGA-II algorithm

پارامتر	مقدار
جمعیت	۵۵
تکرار	۷۰۰
نرخ تقاطع	۰,۶
نرخ جهش	۰,۲

پس از تنظیم پارامترها مطابق جدول فوق برای نمونه یک مثال، با ابعاد $(i = 22, i' = 10, k = 20, v = 15)$ در فضای نرم‌افزار متلب حل شد. شکل زیر نمودار جبهه پارتو از حل مثال نمونه است.



شکل ۱۰- نمودار پارتو یک مثال با روش NSGA-II

Fig. 10-Pareto chart of an example using NSGA-II algorithm

مطابق نمودار فوق، لایه پارتو شامل ۱۸ نقطه جواب، نشان داده شده است؛ به طوری که محور افقی مقادیر تابع هدف اول و محور عمودی تابع هدف دوم را نشان داده است.

۲-۴- تنظیم پارامترهای ورودی الگوریتم MOHS

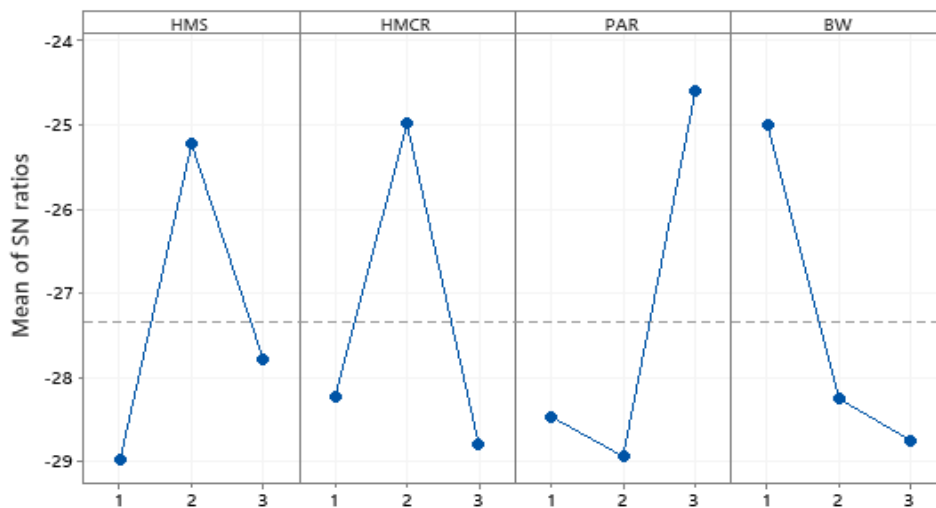
مطابق با شرح الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی هارمونی چندهدفه، داده‌های ورودی برای تنظیم مناسب پارامترهای این الگوریتم، براساس مطالعه ولانی و بهنامیان^{۴۶} (۲۰۱۴) به صورت جدول ۵ در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۵- پارامترها و سطوح آنها برای الگوریتم MOHS

Table 5. Parameters and their levels for MOHS algorithm

پارامتر	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم
سایز حافظه هارمونی	۱۰	۲۰	۴۰
نرخ درگیری حافظه هارمونی	۰.۵	۰.۶۵	۰.۸
نرخ تنظیم گام	۰.۴	۰.۶	۰.۸
نرخ پهنای باند	۰.۳	۰.۵	۰.۷

برای تنظیم پارامترهای الگوریتم MOHS، ۹ آزمایش در نظر گرفتیم که هر یک از این آزمایش‌ها ۲۵ بار تکرار شده‌اند. در نهایت متغیر پاسخ محاسبه شده است تا به کمک آنها، سطوح مناسب پارامترها تعیین شود. شکل ۱۱ نمودار نسبت سیگنال به نویز برای بعد متوسط الگوریتم MOHS است.



شکل ۱۱- نمودار نسبت سیگنال به نویز برای الگوریتم MOHS

Fig. 11- Signal to noise ratio for MOHS algorithm

مطابق این شکل، زمانی که پارامتر سایز حافظه هارمونی در سطح ۱، پارامتر نرخ درگیری حافظه در سطح ۳، نرخ تنظیم گام در سطح ۲، نرخ پهنای باند در سطح ۳، تنظیم شود، بهترین پاسخ حاصل از اجرای الگوریتم رقیب (MOHS) به دست می‌آید. نتیجه نهایی پارامترهای الگوریتم MOHS در جدول ۶ مشاهده می‌شود.

جدول ۶- نتیجه نهایی تنظیم پارامترهای الگوریتم MOHS

Table 6. Final results of parameters' setting of the MOHS algorithm

مقدار	پارامتر
۱۰	سایز حافظه هارمونی
۰٫۸	نرخ درگیری حافظه هارمونی
۰٫۶	نرخ تنظیم گام
۰٫۷	نرخ پهنای باند

برای اینکه مشخص شود کدام یک از الگوریتم‌ها مناسب‌تر است، باید از طریق شاخص‌ها با یکدیگر مقایسه شوند که در بخش بعدی این کار انجام می‌شود.

۵- بحث

۵-۱- تحلیل نتایج و مقایسات مثال‌های عددی

در این مقاله، مثال‌های عددی مختلف و در ابعاد گوناگون بررسی شده‌اند. برای حل مسائل در ابعاد بزرگ، از دو الگوریتم فراابتکاری MOHS و NSGA-II استفاده شد که در محیط نرم‌افزار MATLAB R2014a کد شدند و برای ابعاد کوچک نیز از نرم‌افزار GAMS 24.1.3 کمک گرفته شد. شایان ذکر است که کامپیوتر استفاده‌شده، دارای سیستم‌عامل Microsoft Windows نسخه 10 و پردازنده CPU@2.00GHz Intel(R)Core(TM) i5- 5005U است.

۵-۲- تحلیل حساسیت مدل

بعد مسئله شامل ۲ اتاق عمل، دو قلم استریل کارخانه، دو قلم غیراستریل کارخانه، یک داروخانه، یک هسته استریل و سه تأمین کننده است. تأمین کنندگانی را انتخاب می‌کنیم که بالاترین اولویت بندی را براساس روش آراس کسب کرده باشند. پارامترهای موجود در مدل، تغییر داده شده و اثر آن بر توابع هدف مسئله، به‌ازای افزایش و کاهش ۲۵ درصدی در پارامترها، بررسی شده است. پیش از پرداختن به تحلیل حساسیت‌ها، یک مثال در همین ابعاد برای فهم بهتر مسئله ارائه شده است. مثال مذکور سه سناریو دارد که هر کدام از سناریوها بر یک شکل مجزا ارائه خواهد شد. برای کسب اطلاعات از نحوه تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی این مدل ریاضی، به مقاله سمویی و کریمیان (۲۰۲۲) مراجعه کنید.

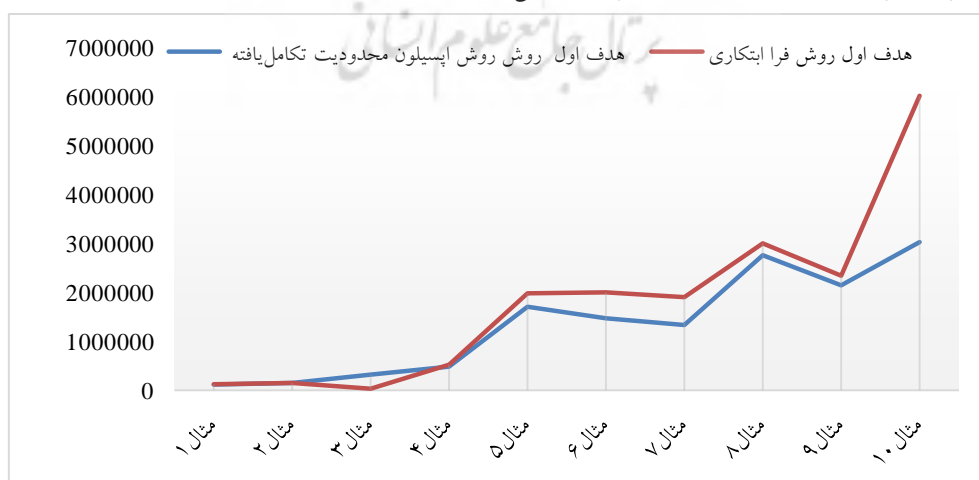
در حل مسئله با بعد کوچک و متوسط، نتایج حل مدل استوار با روش اپسیلون محدودیت با نتایج الگوریتم NSGA-II مقایسه می‌شود. برای این مقایسه، ده مثال با ابعاد مختلف برای بررسی مقادیر توابع هدف و زمان حل در نظر گرفته شده و جزییات ابعاد مثال‌ها در جدول ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۷- جزییات مثال‌های مدنظر

Table 7. The details of examples

شماره مثال‌ها	ابعاد ($i * i' * k * v$)
مثال ۱	۱۵ * ۲۰ * ۸ * ۱۸
مثال ۲	۱۵ * ۲۰ * ۱۰ * ۲۲
مثال ۳	۲۰ * ۲۵ * ۱۵ * ۳۰
مثال ۴	۲۲ * ۲۸ * ۲۰ * ۴۰
مثال ۵	۲۵ * ۳۰ * ۲۵ * ۶۰
مثال ۶	۲۷ * ۳۰ * ۳۰ * ۸۰
مثال ۷	۳۰ * ۳۰ * ۳۰ * ۱۰۰
مثال ۸	۳۵ * ۳۰ * ۳۵ * ۱۵۰
مثال ۹	۱۵ * ۲۰ * ۸ * ۱۸
مثال ۱۰	۱۵ * ۲۰ * ۱۰ * ۲۲

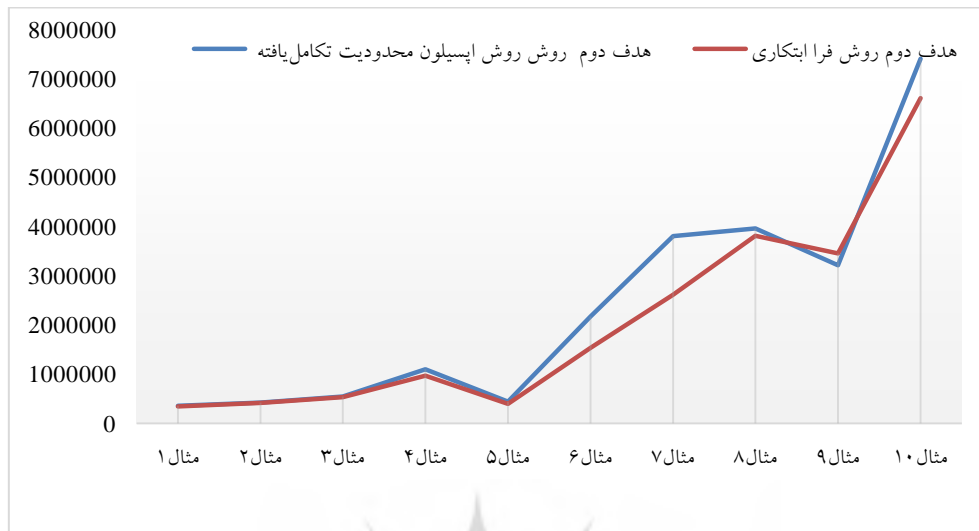
نتایج مقادیر از نظر مقدار اهداف و زمان اجرا در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- تغییرات مقادیر تابع هدف اول برحسب واحد پولی در روش اپسیلون محدودیت تقویت شده و الگوریتم NSGA-II

Fig. 12- The first objective function in AEC method and the NSGA-II algorithm

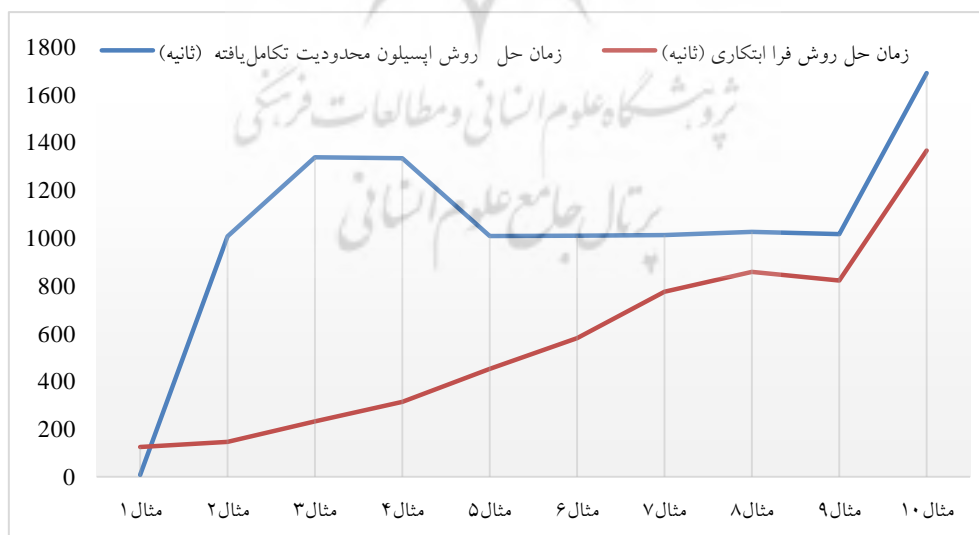
با توجه به مقایسه نتایج حل مسائل نمونه در روش‌های اپسیلون محدودیت تقویت‌شده و NSGA-II در نمودار شکل ۱۲، مشاهده می‌شود مقادیر تابع هدف اول که تابع مینیمم‌سازی است، در روش فراابتکاری مقادیر نزدیک به بهینه و بیشتر از مقدار بهینه به دست آمده است.



شکل ۱۳- تغییرات مقادیر تابع هدف دوم در روش اپسیلون محدودیت تقویت‌شده و الگوریتم NSGA-II

Fig. 13- The second objective function in AEC method and the NSGA-II algorithm

با توجه به مقایسه نتایج حل مسائل نمونه در روش‌های اپسیلون محدودیت تقویت‌شده و NSGA-II در شکل ۱۳، مشاهده می‌شود مقادیر تابع هدف دوم که تابع ماکسیمم‌سازی است، به جز در مثال ۹ در روش فراابتکاری، مقادیر نزدیک به بهینه و کمتر از مقدار بهینه به دست آمده است.



شکل ۱۴- تغییرات مقادیر زمان حل در روش اپسیلون محدودیت تقویت‌شده و الگوریتم NSGA-II

Fig. 14- The solution time in AEC method and the NSGA-II algorithm

با توجه به مقایسه نتایج اپسیلون محدودیت تقویت شده و NSGA-II در شکل ۱۴، مشاهده می‌شود که از مثال دوم با افزایش سائز مسئله از ۱۸ قلم استریل، ۸ قلم غیراستریل، ۲۰ اتاق عمل، ۱۵ تأمین‌کننده به بعد، زمان حل در نرم‌افزار گمز به شدت افزایش می‌یابد. همچنین زمان‌های حل مسائل متوسط با روش اپسیلون محدودیت تقویت شده، بیشتر از زمان حل همان مسائل با روش‌های فراابتکاری در نرم‌افزار متلب است.

۳-۵- مقایسه کارایی دو الگوریتم NSGA-II و MOHS

در این بخش باید الگوریتم‌ها با استفاده از شاخص‌ها ارزیابی و با یکدیگر مقایسه شوند. برای مقایسه دقیق کارایی دو الگوریتم استفاده شده در این پژوهش، از شاخص‌های تعداد نقاط پارتو (NPS)، متوسط فاصله از ایده‌آل (MID)، شاخص پراکندگی (DM) و شاخص فاصله (SM) استفاده می‌شود.

در حل الگوریتم‌های بهینه که برای مسائل چندهدفه به کار می‌رود، جواب بهینه یگانه وجود ندارد و یک مجموعه جواب نامغلوب به‌عنوان جواب‌های بهینه در نظر گرفته می‌شود. در این‌گونه موارد، برای تنظیم پارامترها و مقایسه کارایی الگوریتم‌ها، از چند شاخص استفاده می‌شود. در این پژوهش نیز تعدادی شاخص اعم از تعداد جواب‌های پارتو، متوسط فاصله جواب‌های پارتو از جواب ایده‌آل، فاصله و پراکندگی به کار رفته است که در ادامه توضیحاتی برای هرکدام از آنها ارائه شده است:

- تعداد جواب‌های پارتو^{۴۷} (NPS): این شاخص تعداد جواب‌های موجود در پارتو مربوط به هر الگوریتم حل را نشان می‌دهد. هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد، مناسب‌تر است.
 - شاخص متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل^{۴۸} (MID): با استفاده از این شاخص، فاصله نزدیکی بین جواب‌های پارتو و نقطه ایده‌آل آن جواب‌ها حاصل می‌شود. هرچه MID کمتر باشد، الگوریتم به دلیل تولید جواب‌هایی با متوسط فاصله کمتر از نقطه ایده‌آل، اولویت بالاتری دارد (جتیان و همکاران، ۲۰۱۹).
- در این مقاله، با توجه به اینکه تابع هدف اول از نوع کمینه‌سازی و تابع هدف دوم از نوع بیشینه‌سازی است، در نتیجه نقطه ایده‌آل برابر مینیمم تابع هدف اول و ماکزیمم تابع هدف دوم در بین تمام الگوریتم‌ها در نظر گرفته می‌شود. در رابطه زیر، n تعداد نقاط پارتو و $f_{i,total}^{max}$ و $f_{i,total}^{min}$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار توابع هدف در میان تمامی توابع هدف الگوریتم‌های بررسی شده است. مختصات نقطه ایده‌آل به صورت (f_1^{best}, f_2^{best}) خواهد بود. همان‌طور که گفته شد، پایین‌تر بودن مقدار این شاخص، بیانگر بهتر بودن الگوریتم است.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{f_{1i} - f_1^{best}}{f_{1,total}^{max} - f_{1,total}^{min}}\right)^2 + \left(\frac{f_{2i} - f_2^{best}}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}}\right)^2}}{n} \quad (36)$$

- شاخص فاصله^{۴۹} (SM): با به‌کارگیری این شاخص، یکنواختی انتشار جواب‌های نامغلوب طبق رابطه (۳۶) حاصل می‌شود. براساس رابطه یادشده، n تعداد جواب‌های پارتو و d_i فاصله اقلیدسی بین دو جواب پارتوی کناری در فضای حل است و \bar{d} میانگین فواصل d_i ها است. مقادیر کم این شاخص بیانگر توزیع یکنواخت‌تر جواب در پارتوی شناسایی شده است، هرچه شاخص SM کمتر باشد الگوریتم مناسب‌تر است (دب و جین، ۲۰۰۲).

$$SM = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n}}}{\bar{d}} \quad (37)$$

• شاخص پراکندگی DM^{51} : براساس این شاخص که زیتلر⁵² (۱۹۹۹) آن را ارائه کرد، گستردگی مجموعه جواب‌ها برای الگوریتم براساس رابطه (۳۹) محاسبه می‌شود. هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد، الگوریتم اولویت بالاتری دارد. نحوه محاسبه این شاخص به صورت زیر است که در آن f_m^i و f_m^j مقادیر تابع هدف m م دو جواب پارتوی i و j هستند. مقادیر بزرگ‌تر این شاخص بیانگر پخش بودن بهتر جواب‌هاست.

$$d_i = \max_j \left\{ \sum_{m=1}^m (f_m^i - f_m^j)^2 \right\} \quad (38)$$

$$DM = \sqrt{\sum_{i=1}^N d_i} \quad (39)$$

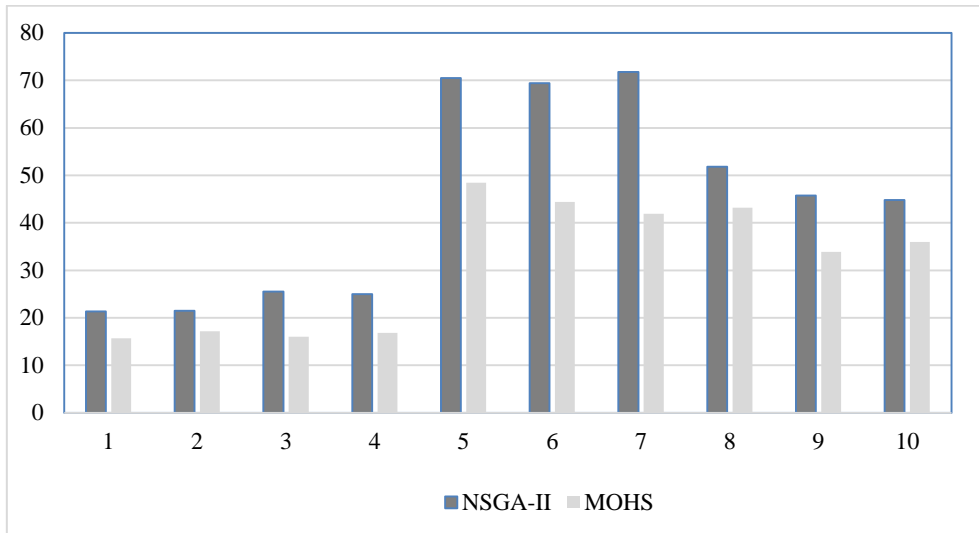
شاخص‌های ذکر شده برای هر ۲۵ آزمایش محاسبه و پس از آن میانگین شاخص‌های به دست آمده در تکرارهای هر آزمایش محاسبه شده است؛ سپس بهترین مقدار آنها با توجه به ماهیت هر شاخص، مبنی بر منفی یا مثبت بودن شاخص مشخص شده است؛ سپس نرمال‌سازی شاخص‌های فوق به روش RPD انجام و برای محاسبه متغیر پاسخ (response) نیز، از مقادیر شاخص‌ها در هر آزمایش میانگین گرفته شد.

جدول ۸ - نتایج شاخص‌ها برای الگوریتم‌ها در مثال‌های مختلف

Table 8- The results of indicators for different examples

SM		DM		MID		NPS		$i * i' * k * v$	مثال
MOHS	NSGA-II	MOHS	NSGA-II	MOHS	NSGA-II	MOHS	NSGA-II		
۰,۷۶	۱,۰۳	۹۷۰,۰۵	۱۱۵۵,۶۵	۱,۶۱	۱,۵۸۵	۱۵,۶۶	۲۱,۳۳	۱۸*۸*۲۰*۱۵	۱
۰,۷۵	۰,۷۰۷۵	۱۰۰۹,۳۴	۱۱۶۹,۱۷۵	۱,۶۲	۱,۶۰۰۸	۱۷,۱۶	۲۱,۵۰	۲۲*۱۰*۲۰*۱۵	۲
۰,۶۸	۰,۶۹	۱۱۹۰,۵۶	۱۵۵۱,۴۴۷	۲,۳۵	۲,۲۵۸۳	۱۶	۲۵,۵۰	۳۰*۱۵*۲۵*۲۰	۳
۰,۷۴	۰,۷۹	۱۳۰۹,۷۳	۱۹۸۹,۳۵۲	۲,۴۴	۲,۴۸۴۲	۱۶,۸۳	۲۵	۴۰*۲۰*۲۸*۲۲	۴
۰,۶۵	۰,۶۳	۲۸۹۷,۳۸	۳۶۰۳,۲۶۴	۶,۴۶	۶,۴۷۹۲	۴۸,۴۱	۷۰,۵۰	۶۰*۲۵*۳۰*۲۵	۵
۰,۷۷	۰,۶۶	۲۹۱۱,۶۰	۳۶۸۸,۸۲۲	۵,۷۳	۵,۴۴۱۷	۴۴,۴۱	۶۹,۴۲	۸۰*۳۰*۳۰*۲۷	۶
۰,۶۹	۰,۷۷	۲۹۲۲,۶۲	۴۰۶۴,۱۰۳	۴,۵۶	۴,۷۵۴۱۶۷	۴۱,۹۱	۷۱,۷۵	۱۰۰*۳۰*۳۰*۳۰	۷
۰,۷۴	۰,۷۲	۳۱۳۸,۷۳	۳۶۹۵,۱۱۹	۳,۷۹	۳,۷۵۱۶۶۷	۴۳,۱۶	۵۱,۸۳	۱۵۰*۳۵*۳۰*۳۵	۸
۰,۷۲	۰,۶۶	۲۶۷۳,۳۸	۳۰۸۷,۲۴۹	۳,۷۶	۳,۴۳۹۱۶۷	۳۳,۹۱	۴۵,۷۵	۱۸۰*۳۵*۲۲*۳۵	۹
۰,۷۵	۰,۷۳	۳۴۸۰,۲۸	۷۶۱۹,۸۱۱	۳,۶۸	۳,۶۸۹۱۶۷	۳۶	۴۴,۸۳	۳۰۰*۳۵*۳۵*۳۵	۱۰

همان‌طور که در جدول ۸ مشخص است، جواب‌ها برای الگوریتم NSGA-II در شاخص‌های SM و NPS و DM از مقادیر مربوط به الگوریتم MOHS بهتر است. در رابطه با شاخص MID مقادیر به دست آمده از هر دو الگوریتم به هم نزدیک بوده و می‌توان گفت مقادیری یکسان به دست آمده است. با استفاده از نمودارهای زیر، می‌توان الگوریتم‌ها را از نظر شاخص‌ها، مقایسه و بررسی کرد.

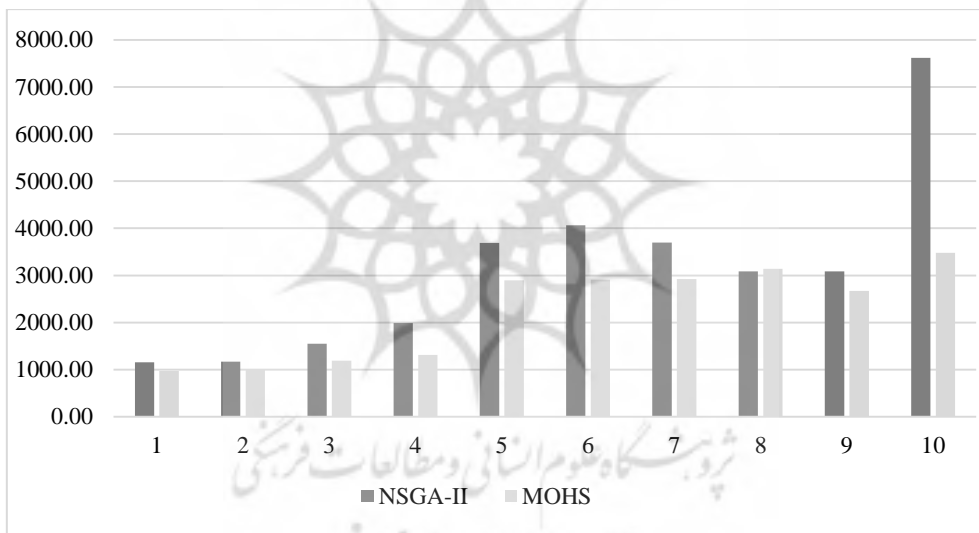


شکل ۱۵ - نمودار مقایسه الگوریتم‌ها از نظر شاخص NPS

Figure 15 - Comparison chart of algorithms in terms of NPS index

بر اساس شکل ۱۵، همان‌طور که از نمودار برداشت می‌شود، در تمام موارد مقدار شاخص تعداد نقاط پارتو، در

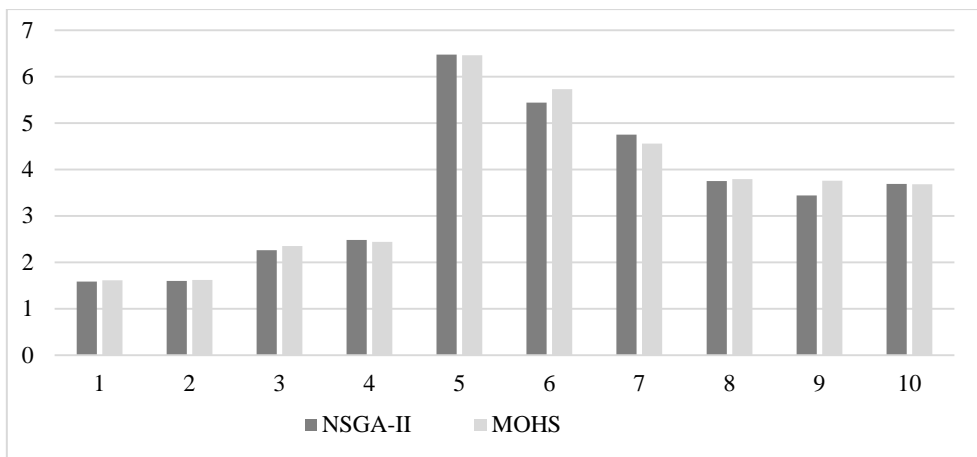
الگوریتم NSGA-II بهتر است.



شکل ۱۶ - نمودار مقایسه الگوریتم‌ها از نظر شاخص DM

Fig. 16- Comparison of the algorithms in terms of DM indicator

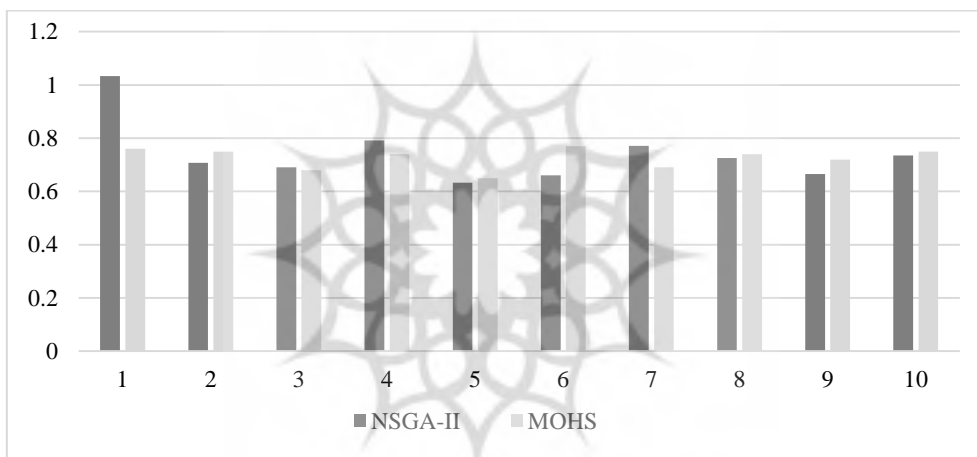
در شکل فوق، ملاحظه می‌شود که شاخص پراکندگی، در الگوریتم NSGA-II بهتر است.



شکل ۱۷ - نمودار مقایسه الگوریتم‌ها از نظر شاخص MID

Fig. 17- Comparison of the algorithms in terms of MID indicator

بر اساس شکل ۱۷ مقدار شاخص پراکندگی، در هر دو الگوریتم تقریباً مقادیر یکسانی را نشان داده است.



شکل ۱۸ - نمودار مقایسه الگوریتم‌ها از نظر شاخص SM

Fig. 18- Comparison of the algorithms in terms of SM indicator

بر اساس شکل ۱۸، مشاهده می‌شود که از نظر شاخص فاصله، در برخی موارد الگوریتم NSGA-II و در برخی دیگر، الگوریتم MOHS بهتر شناخته می‌شود؛ اما به طور کلی، این شاخص در الگوریتم NSGA-II بهتر است. برای اطمینان از جواب‌های به دست آمده، ابتدا آزمون نرمال بودن در جدول ۹ انجام شده است.

جدول ۹ - آزمون نرمال بودن

Table 9- Normality distribution test results

نتیجه	p-value	شاخص
نرمال	۰,۵۶	شاخص NPS
نرمال	۰,۹۴	شاخص MID
نرمال	۰,۷۴	شاخص DM
نرمال	۰,۶۲	شاخص SM

نتایج آزمون نرمال بودن همه شاخص‌ها برای مقادیر p-value مقداری بیشتر از ۰,۰۵ است که سطح معناداری را نشان می‌دهد. در نتیجه همگی نرمال‌اند. در جدول ۱۰ نتایج آزمون فرض آماری آورده شده است.

جدول ۱۰ - نتایج آزمون فرض آماری

Table 10- The results of statistical hypothesis tests

نتیجه	t-value	P-value	فرض H_0
فرض H_0 رد می‌شود.	۱,۷۱	۰,۱۰۸	هر دو الگوریتم در شاخص NPS عملکرد یکسانی داشته‌اند.
فرض H_0 رد می‌شود	۱,۲۶	۰,۲۳۱	هر دو الگوریتم در شاخص DM عملکرد یکسانی داشته‌اند.
فرض H_0 رد نمی‌شود.	۰,۰۷	۰,۹۹۴	هر دو الگوریتم در شاخص MID عملکرد یکسانی داشته‌اند.
فرض H_0 رد نمی‌شود.	۰,۴۳	۰,۱۶۸	هر دو الگوریتم در شاخص SM عملکرد یکسانی داشته‌اند.

در جدول ۱۰ نیز در صورتی که مقادیر برای p-value بیشتر از ۰,۰۵ باشد جواب‌های به دست آمده معنی‌دار است. همچنین هر چقدر مقادیر t-value از صفر دورتر باشد، تفاوت معنی‌دار بین دو نمونه بیشتر خواهد بود و فرض صفر قوی‌تر رد خواهد شد. بر این اساس مطابق جدول یادشده، الگوریتم در شاخص‌ها MID و SM عملکرد یکسانی داشته است و تفاوت معناداری میان این دو مشاهده نشد.

برای مقایسه بیشتر بین الگوریتم‌های فراابتکاری، اضافه بر توضیحاتی که تا به حال ارائه شده است، در ادامه جدولی برای مقایسه بهتر بین الگوریتم‌ها با ۱۱ مثال در ابعاد مختلف نیز نشان داده می‌شود.

جدول ۱۱- مقایسه مقادیر حاصل از اجرای اهداف و زمان اجرای دو الگوریتم فراابتکاری بررسی شده

Table 11- comparison of the both algorithms in terms of objective functions and solution time

MOHS		NSGA-II		ابعاد مسئله		
زمان اجرا (ثانیه)	هدف دوم	هدف اول	زمان اجرا (ثانیه)	هدف دوم	هدف اول	$i * i' * k * v$
۴۳,۷۴	۳۲۵۱۱۸,۷۵	۱۲۰۲۶۴,۶۵	۱۲۳,۸۴	۳۴۶۹۶۶,۱۶۶	۱۲۲۰۱۱,۲۳	۱۸*۲۰*۱۵
۴۵,۸۷	۳۹۸۴۶۴,۲۵	۱۴۹۹۷۲,۰۴	۱۴۶,۰۴	۴۱۸۴۹۳,۹۱۶	۱۵۰۰۸۰,۲۶	۲۲*۱۰*۲۰*۱۵
۷۹,۱۷	۵۳۰۵۱۲,۳۳	۳۰۰۳۱۲,۱۰	۲۳۰,۸۲	۵۳۵۱۳۰,۷۵	۳۲۱۴۳,۰۵۰	۳۰*۱۵*۲۵*۲۰
۱۲۱,۱۶	۹۵۹۴۶۴,۰۸	۵۲۶۹۲۳,۶۷	۳۱۳,۲۶	۹۷۱۱۲۷,۰۰۰	۵۲۴۶۳۵,۰۵	۴۰*۲۰*۲۸*۲۲
۱۸۶,۸۹	۳۴۲۴۰۲,۱۷	۱۹۲۰۸۶۱,۶۰	۴۵۱,۵۷	۳۹۶۳۱۰,۰۰۰	۱۹۷۹۱۵۷,۵۷	۶۰*۲۵*۳۰*۲۵
۲۳۲,۷۷	۱۹۹۴۰۶۶,۵۸	۱۵۵۴۴۷۲,۳۲	۵۸۰,۰۶	۱۵۳۹۲۲۷,۷۰۰	۱۹۹۹۸۲۰,۵۰	۸۰*۳۰*۳۰*۲۷
۲۶۹,۹۴	۲۵۵۲۷۲۸,۵۰	۱۸۸۳۱۱۶,۴۶	۷۷۴,۰۲	۲۶۱۵۰۲۰,۰۰۰	۱۹۰۰۵۸۲,۵۶	۱۰۰*۳۰*۳۰*۳۰
۳۸۷,۱۰	۳۹۱۵۲۹۹,۱۷	۲۸۳۰۲۰۹,۵۹	۸۵۷,۱	۳۸۱۴۵۵۴,۲۵	۲۹۹۷۵۵۲,۲۵	۱۵۰*۳۵*۳۰*۳۵
۳۴۷,۵۰	۳۵۱۴۹۸۴,۷۵	۲۳۶۰۲۹۵,۶۶	۸۲۰,۰۵	۳۴۵۶۳۴۷,۱۳۳	۲۳۳۹۳۷۱,۲۳	۱۸۰*۳۵*۲۲*۳۵
۸۷۵,۰۱	۶۸۸۵۶۹۳,۵۰	۶۰۱۹۰۳۰,۳۷	۱۳۶۴,۸	۶۶۰۹۱۱۶,۰۸۳	۶۰۱۰۲۲۰,۳۹	۳۰۰*۳۵*۳۵*۳۵

همان‌طور که در جدول ۱۱ نشان داده شده است، می‌توان از ستون زمان‌های اجرا دریافت که الگوریتم رقیب (MOHS) به زمان کمتری نسبت به الگوریتم (NSGA-II) برای حل مسئله نیاز دارد. از نظر کیفیت جواب‌ها، جواب‌های هر دو الگوریتم حدوداً مقادیر یکسانی بوده است؛ بنابراین می‌توان گفت زمان عامل اثرگذارتری در مقایسه الگوریتم‌هاست.

۴-۵- یافته‌های مدیریتی

هدف این پژوهش کمینه‌کردن هزینه‌های خرید و هزینه‌های عملیاتی تهیه و آماده‌سازی اقلام مصرفی اتاق عمل است. از طرف دیگر تلاش می‌کنیم که افزون بر تابع هدف اول، رضایت جراح‌ها را در استفاده از اقلام مصرفی با توجه به یک اولویت‌بندی بین تأمین‌کنندگان که براساس روش تصمیم‌گیری آراس انجام شده است، در قالب تابع هدف دوم پیشینه کنیم. در اتاق‌های عمل یک تعارض مابین مدیران زنجیره تأمین و جراحان وجود دارد؛ زیرا جراحان خواهان دسترسی بیشتر به اقلام با اولویت بالاتر در زمان کم‌ترند؛ اما عمده تمرکز مدیران در جهت کاهش هزینه‌هاست. چنین تضادی مابین مدیران و جراحان، ما را بر آن داشت تا خرید از تأمین‌کنندگان را براساس یک اولویت‌بندی انجام بدهیم. این اولویت‌بندی هم معیارهای مدنظر جراحان را پوشش می‌دهد و هم شامل معیارهای مدنظر مدیران است. از طرفی از سوی تأمین‌کننده‌ها، یک‌سری محدودیت برای عرضه اقلام وجود دارد؛ از جمله این محدودیت‌ها به ظرفیت محدود دستگاه‌های تولید یا نایاب بودن برخی اقلام و سهمیه‌ای بودن آنها و ... اشاره می‌شود که این موضوع به مطرح شدن مفهومی به نام سقف خرید از تأمین‌کننده‌ها منجر و از سوی تأمین‌کننده تعیین می‌شود. بنابر توضیحات فوق، مسئله از دید مدیریت بیمارستان مدل شده است که پیش از مدل‌سازی و حل مسئله چندهدفه، حل مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره را بیان می‌کنیم. شرایط پیاده‌سازی این مسئله در حالت عدم قطعیت است. همچنین شرایط نگهداری برای همگی اقلام یکسان است.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله یک مدل دوهدفه برنامه‌ریزی زنجیره تأمین تجهیزات جراحی با در نظر گرفتن اولویت‌بندی تأمین‌کنندگان تجهیزات بررسی شد. برنامه‌ریزی این مسئله در دو مرحله و به کمک روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره آراس و در ابعاد بزرگ با الگوریتم فراابتکاری NSGA-II انجام شده است. این مدل به صورت هم‌زمان در جست‌وجوی کمینه‌کردن هزینه کل زنجیره تأمین و پیشینه‌کردن رضایت جراحان از تجهیزات مصرفی خریداری‌شده از تأمین‌کنندگان است و محدودیت‌های ظرفیت، تخمین تقاضا، محدودیت تعادل موجودی و محدودیت سقف خرید، در نظر گرفته شده است. با توجه به چندهدفه بودن مدل در ابعاد بزرگ‌تر، از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و برای اعتبارسنجی از الگوریتم MOHS استفاده شد. همچنین ده مثال برای مقایسه روش دقیق و فراابتکاری در نظر گرفته شد که در هر دو تابع هدف عملکرد روش دقیق بهتر بود و روش فراابتکاری موفق به یافتن جواب نزدیک به بهینه شد، همچنین درباره زمان حل می‌توان گفت که الگوریتم فراابتکاری موفق به حل مسئله در زمان کمتری شد. از محدودیت‌های این تحقیق، جمع‌آوری داده‌های دنیای واقعی به‌خصوص در تخمین تقاضای هر قلم با توجه به شرایط مختلف است. برای گسترش این پژوهش در تحقیقات آتی، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- در نظر گرفتن تجهیزات دیگر اتاق عمل برای تعریف مسائل جدید از جمله ابزارهای جراحی که قابلیت برگشت به چرخه استریل و استفاده مجدد دارند؛
- اضافه‌کردن تعداد انبارهای نگهداری تجهیزات جراحی؛
- ادغام مسئله زمان‌بندی استریل‌کردن ابزار و اقلام مصرفی اتاق عمل برای درک بهتر اهمیت بخش جراحی؛
- در نظر گرفتن انبارهای موقت در بخش اتاق عمل برای دسترسی سریع‌تر کارکنان به تجهیزات حین عمل.

References

- Abedini, A., Ye, H., & Li, W. (2016). Operating room planning under surgery type and priority constraints. *Procedia Manufacturing*, 5, 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.005>.
- Agra, A., Cerveira, A., & Requejo, C. (2016). A branch-and-cut algorithm for a multi-item inventory distribution problem. In Machine Learning, Optimization, and Big Data: Second International Workshop, MOD 2016, Volterra, Italy, August 26-29, 2016, Revised Selected Papers 2 (pp. 144-158). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51469-7_12
- Ahmad, N., Hasan, M. G., & Barbhuiya, R. K. (2021). Identification and prioritization of strategies to tackle COVID-19 outbreak: A group-BWM based MCDM approach. *Applied soft computing*, 111, 107642. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107642>.
- Ahmadi, E., Masel, D. T., & Hostetler, S. (2019). A robust stochastic decision-making model for inventory allocation of surgical supplies to reduce logistics costs in hospitals: A case study. *Operations Research for Health Care*, 20, 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2018.09.001>.
- Bélangier, V., Beaulieu, M., Landry, S., & Morales, P. (2018). Where to locate medical supplies in nursing units: An exploratory study. *An International Journal*, 19(1), 81-89. <https://doi.org/10.1080/16258312.2018.1433438>
- Bijvank, M. & F A Vis, I. (2012). Inventory control for point-of-use locations in hospitals. *Journal of the Operational Research Society*, 63(4), 497-510. <https://doi.org/10.1057/jors.2011.52>
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Diamant, A., Milner, J., Queresby, F., & Xu, B. (2018). Inventory management of reusable surgical supplies. *Health care management science*, 21(3), 439-459. <https://doi.org/10.1007/s10729-017-9397-3>
- Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *simulation*, 76(2), 60-68. <https://doi.org/10.1177/003754970107600201>
- Haj Shir Mohammadi, A. (2017). *Principles of planning and inventory control*. Arkan Danesh Publisher.
- Honarvar, M., Khalili, M. (2017). Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Bi-Objective Transportation Location Routing Problem under Demand Uncertainty. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 4(8), 147-163. (In Persian). <https://doi.org/10.22084/ier.2017.1700>
- Janatyan, N., Zandieh, M., Alem Tabriz, A., & Rabieh, M. (2019). Optimizing Sustainable Pharmaceutical Distribution Network Model with Evolutionary Multi-objective Algorithms (Case Study: Darupakhsh Company). *Production and Operations Management*, 10(1), 133-153. <https://doi.org/10.22108/jpom.2019.110116.1123>
- Jharkharia, S., & Shankar, R. (2007). Selection of logistics service provider: An analytic network process (ANP) approach. *Omega*, 35(3), 274-289. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.06.005>.
- Karimyan, S., & Samouei, P. (2022). Robust Multi-Objective Supply Chain Optimization of Surgical Supplies Considering Costs and Satisfaction of Surgeon, and ranking Suppliers Using ARAS Method. *Scientia Iranica*. [in press] <https://doi.org/10.24200/SCI.2022.60372.6763>
- Lewis, M. O., Balaji, S., & Rai, A. (2010). RFID-enabled capabilities and their impact on healthcare process performance. *ICIS 2010 Proceedings*, 115. https://aisel.aisnet.org/icis2010_submissions/115
- Reis, J. G., & Fontaine, K. (1993). Cutting costs in the OR: A case study. *AORN journal*, 57(2), 503-504. [https://doi.org/10.1016/S0001-2092\(07\)64108-8](https://doi.org/10.1016/S0001-2092(07)64108-8)
- Mohajer Tabrizi, M., Khojeh, Z., & Darvishmohammadi, T. (2022). Designing a drug distribution network using a two-tier genetic algorithm and priority-based coding the case of Adorateb. *Production and Operations Management*, 13(3), 47-75. <https://doi.org/10.22108/jpom.2022.133342.1439>

- Moons, K., Waeyenbergh, G., Pintelon, L., Timmermans, P., & De Ridder, D. (2019). Performance indicator selection for operating room supply chains: An application of ANP. *Operations Research for Health Care*, 23, 100229. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2019.100229>.
- Orji, I. J., & Ojadi, F. (2021). Investigating the COVID-19 pandemic's impact on sustainable supplier selection in the Nigerian manufacturing sector. *Computers & Industrial Engineering*, (160), 107588. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107588>.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2013). Sensitivity analysis in the analytic hierarchy process. In *Decision making with the analytic network process*, 345-360. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7279-7_15.
- Sadeghi, J., Sadeghi, S. & Niaki, S. T. A. (2014). A hybrid vendor managed inventory and redundancy allocation optimization problem in supply chain management: An NSGA-II with tuned parameters. *Computers & Operations Research*, 41, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.07.024>.
- Stević, Ž., Pamučar, D., Puška, A., & Chatterjee, P. (2020). Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COMpromise solution (MARCOS). *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106231. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106231>.
- Sivasubramani, S., Swarup, K.S., (2011). Multi-objective harmony search algorithm for optimal power flow problem. *Electrical Power and Energy Systems*, 33(3), 745-752. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.12.031>.
- Taleizadeh, A. A., Niaki, S. T. A., & Nikousokhan, R. (2011). Constraint multiproduct joint-replenishment inventory control problem using uncertain programming. *Applied Soft Computing*, 11(8), 5143-5154. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.05.045>.
- Uthayakumar, R., & Priyan, S. (2013). Pharmaceutical supply chain and inventory management strategies: Optimization for a pharmaceutical company and a hospital. *Operations Research for Health Care*, 2(3), 52-64. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2013.08.001>.
- Valaei, M. R., Behnamian, J. (2014). *Comparison of Taguchi experimental design and response surface methods in parameters' tuning of harmony search algorithm*. Tenth international industrial engineering conference, Tehran, Iran, <https://civilica.com/doc/284103>
- Van Horenbeek, A., & Pintelon, L. (2014). Development of a maintenance performance measurement framework—using the analytic network process (ANP) for maintenance performance indicator selection. *Omega*, 42(1), 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.02.006>.
- Yalcinoz, T., Altun, H., & Uzam, M. (2001, September). Economic dispatch solution using a genetic algorithm based on arithmetic crossover. In *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings*, 1, 2-4. <https://doi.org/10.1109/PTC.2001.964734>.
- Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2010). A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making. *Technol Econ Dev Econ*, 16(2), 159-172. <https://doi.org/10.3846/tede.2010.10>
- Zheng, Y. S. (1992). On properties of stochastic inventory systems. *Management science*, 38(1), 87-103. <https://doi.org/10.1287/mnsc.38.1.87>.
- Zitler, E. (1999). *Evolutionary Algorithms for multi-objective optimization: method and applications*. P.H.D Thesis, dissertation ETHNO. 13398, Swaziland Federal Institute of Technology Zorikh, Switzerland.

- ¹ Lewis, Balaji & Rai
- ² Reis & Fontaine
- ³ Multiple-criteria decision-making
- ⁴ Jharkharia & Shankar
- ⁵ Van Horenbeek & Pintelon
- ⁶ Saaty & Vargas
- ⁷ Haj Shir Mohammadi
- ⁸ Moons et al
- ⁹ Ahmad, Hasan & Barbhuiya
- ¹⁰ Best–Worst Method
- ¹¹ Stević et al.
- ¹² Orji & Ojadi
- ¹³ Bijvank & Vis
- ¹⁴ Zheng
- ¹⁵ Agra, Cerveira & Requejo
- ¹⁶ Bélanger
- ¹⁷ Uthayakumar & Priyan
- ¹⁸ Customer Service Level
- ¹⁹ Janatyan et al.
- ²⁰ Mohajer Tabrizi et al.
- ²¹ Abedini, Ye & Li
- ²² Ahmadi, Masel & Hostetler
- ²³ Diamant et al.
- ²⁴ Still core
- ²⁵ Additive Ratio Assessment
- ²⁶ Zavadskas & Turskis
- ²⁷ Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II
- ²⁸ Deb et al.
- ²⁹ Mutation
- ³⁰ Crossover
- ³¹ Yalcinoz et al.
- ³² Insertion
- ³³ Crowding Distance
- ³⁴ Honarvar & Khalili
- ³⁵ Repairing
- ³⁶ Multi Objective Harmony Search
- ³⁷ Geem et al.
- ³⁸ Taleizadeh et al.
- ³⁹ Sivasubramani, Swarup
- ⁴⁰ Noise
- ⁴¹ Objective Point
- ⁴² Adjustment factors
- ⁴³ Economical factor
- ⁴⁴ Sadeghi, Sadeghi & Niaki
- ⁴⁵ Relative Percentage Deviation
- ⁴⁶ Valaei & Behnamian
- ⁴⁷ Number of Pareto Solution
- ⁴⁸ Mean Ideal Distance
- ⁴⁹ Spacing
- ⁵⁰ Deb, jein
- ⁵¹ Diversification Metric
- ⁵² Zitler

