

Paper Type: Original-Application Paper



A Robust Multi-Objective Multi-Prionic Planning Approach to the Problem of Locating the Allocation of Organ Transplant Centers Under Conditions of Uncertainty

Elham Nejati¹, Mahdi Yousefi Nejad Attari^{1*} , Asgar Hajibadali²

¹ Department of Industrial Engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran; e.nejati70@gmail.com; mahdi_108108@yahoo.com.

² Department of Electrical Engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran; asgar.haji@gmail.com.

Citation:



Nejati, E., Yousefi Nejad Attari, M., & Hajibadali, A. (2023). A robust multi-objective multi-prionic planning approach to the problem of locating the allocation of organ transplant centers under conditions of uncertainty. *Journal of decisions and operations research*, 8(4), 886-905.

Received: 11/02/2022

Reviewed: 12/03/2022

Revised: 09/04/2022

Accepted: 24/05/2022

Abstract

Purpose: One of the most vital subcategories of the health care system is organ transplantation, and since organ transplant centers deal directly with surgical operations and, as a result, human lives, the importance of this issue has received more attention. One of the major differences between the organ transplant supply chain and other supply chains is the possibility of corruption of related products. Therefore, the time and also the location of organ transplant centers are of special importance. On the other hand, due to the rapid growth of the demand for organ transplantation and the lack of resources, the patient's waiting time to complete the transplantation process plays a vital role in the organ transplantation system.

Methodology: This study presents a robust bi-objective mathematical model for the location problem of allocating organ transplant centers under uncertainty, which includes the total costs of the organ transplant system as well as the average patient waiting time for organ transplantation, which follows a G/G/m queuing system.

Findings: To solve this model, the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) has been used. Finally, the applicability of this model and the efficiency of the mentioned algorithm compared to the defined indicators have been shown through numerical experiments.

Originality/Value: Since each organ can spend a certain amount of time outside the body and there is a possibility of corruption or a decrease in the quality of the transplant, the time between the organ leaving the body and the completion of the transplant operation plays an essential role in the transplant system.

Keywords: Multi objective optimization, NSGA-II algorithm, Organ transplantation, Queuing theory, Supply chain management.

Corresponding Author: mahdi_108108@yahoo.com



Licensee. **Journal of Decisions and Operations Research**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



نوع مقاله: پژوهشی-کاربردی

6

رویکرد برنامه‌ریزی استوار چندهدفه چنددوره‌ای برای مساله مکان‌یابی تخصیص مراکز پیوند اعضا تحت شرایط عدم قطعیت

الهام نجاتی^۱، مهدی یوسفی نژاد عطاری^{۱*}، عسگر حاجی بدلی^۲

^۱گروه مهندسی صنایع، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران.

^۲گروه مهندسی برق، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران.

چکیده

هدف: یکی از حیاتی‌ترین زیرمجموعه‌های سیستم مراقبت‌های بهداشتی پیوند عضو می‌باشد و از آن‌جاکه مراکز پیوند عضو به‌صورت مستقیم با عمل‌های جراحی و در نتیجه، زندگی انسان‌ها سروکار دارند، اهمیت این موضوع مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. یکی از عمده‌ترین تفاوت‌های زنجیره تامین پیوند عضو با سایر زنجیره‌های تامین احتمال فساد محصولات مربوطه می‌باشد. لذا زمان و هم‌چنین بحث مکان‌یابی مراکز پیوند عضو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طرفی، با توجه به رشد سریع تقاضا برای پیوند عضو و کمبود منابع، زمان انتظار بیمار برای تکمیل پروسه پیوند نقش حیاتی را در سیستم پیوند اعضا ایفا می‌کند.

روش‌شناسی پژوهش: این مطالعه یک مدل ریاضی دوهدفه استوار برای مساله مکان‌یابی تخصیص مراکز پیوند عضو تحت شرایط عدم قطعیت ارائه می‌دهد که هزینه‌های کل سیستم پیوند عضو و هم‌چنین میانگین زمان انتظار بیمار برای انجام پیوند عضو را که از یک سیستم صف G/G/m تبعیت می‌کند، کمینه می‌سازد.

یافته‌ها: برای حل این مدل الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) به‌کار گرفته شده است. در نهایت، قابلیت اجرای این مدل و کارایی الگوریتم مذکور نسبت به شاخص‌های تعریف‌شده از طریق آزمایش‌های عددی نشان داده شده است.

اصالت/ارزش افزوده علمی: از آن‌جاکه هر عضو زمان مشخصی را می‌تواند خارج از بدن سپری کند و احتمال فساد یا کاهش کیفیت پیوند وجود دارد، زمان بین خروج عضو از بدن و تکمیل عمل پیوند نقشی اساسی در سیستم پیوند اعضا ایفا می‌کند.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم NSGA-II، پیوند عضو، تئوری صف، مدیریت زنجیره تامین.

۱- مقدمه

مدیریت زنجیره تامین^۱ معمولاً به‌عنوان یک فرآیند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل عملیات زنجیره تامین بر مبنای کارآمد بودن آن شناخته می‌شود [1]. طراحی شبکه زنجیره تامین، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیرمجموعه‌های تصمیم‌گیری استراتژیک SCM، در عملکرد اقتصادی کلی زنجیره تامین نقش مهمی را ایفا می‌کند که تعیین‌کننده مکان و تعداد تسهیلات شبکه و تخصیص جریان بین آن‌ها است [2]. در بین انواع مختلف تسهیلات، موقعیت مکانی تسهیلات مراکز بهداشتی و درمانی برای حصول اطمینان از به حداقل رساندن هزینه‌های اجتماعی و یا به‌طور معادل، به حداکثر رساندن مزایای افراد در شبکه مکانی انتخاب‌شده بسیار مهم است. به‌طور مشابه، تخصیص تقاضا به این تسهیلات تاثیر مستقیمی بر کارایی کل سیستم دارد؛ بنابراین، مدل‌های مکان‌یابی-تخصیص نقش مهمی را در برنامه‌ریزی خدمات بهداشتی و ارائه

^۱ Supply Chain Management (SCM)

* نویسنده مسئول





راه‌حل‌های جایگزین برای تغییر و بهبود سیستم موجود ایفا می‌کند [3]. شبکه سیستم پیوند عضو شامل اهداکنندگان عضو، مناطق عضوگیرندگان، بیمارستان‌ها، مراکز پیوند عضو و مراکز حمل‌ونقل می‌باشد. وقتی یک اهداکننده داوطلب به اهدای یک عضو می‌شود، تیم حمل‌ونقل به بیمارستان اهداکننده فرستاده می‌شود تا اطلاعات موردنیاز را به همراه نمونه خون اهداکننده از بیمارستان به مرکز پیوند عضو انتقال دهند. سپس، انتقال‌دهندگان به بیمارستان بازخواهند گشت. در صورت عملیات، پروسه خروج عضو از بدن در بیمارستان رخ خواهد داد و عضو برای پیوند به مرکز پیوند عضو فرستاده خواهد شد. در ضمن، شخص گیرنده مورد تایید اطلاع‌رسانی شده در اسرع وقت باید در مرکز پیوند حاضر گردد. در مورد گیرنده یا اهداکننده خارجی عضو باید به فرودگاه تحویل داده شود تا به مرکز پیوند عضو فرستاده شود.

در برخی مواقع، مراکز پیوند می‌توانند عملیات بیمارستان را نیز خود بر عهده گیرند. در شرایط یکپارچه‌سازی، داوطلب اهدای عضو یا بیمار دچار مرگ مغزی به این مرکز مراجعه کرده و آزمایش‌ها و تحلیل اطلاعات موردنیاز انجام می‌گیرد. سپس، عضوگیرنده مورد تایید نیز به همان مرکز منتقل شده و عملیات پیوند عضو صورت می‌گیرد. به همین دلیل در صورت یکپارچه‌سازی بیمارستان و مرکز پیوند عضو در یک محل، علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه‌های احداث و تجهیز، در بسیاری از هزینه‌های حمل‌ونقل نیز صرفه‌جویی می‌گردد. در پروسه پیوند، هر عضو دارای یک زمان ایسکمی سرد^۱ خاصی است. این زمان بیانگر این موضوع می‌باشد که هر عضو چه مدت پس از قطع جریان خون و استخراج از بدن اهداکننده تا زمان پیوند و بازگشت جریان به آن می‌تواند خارج از بدن و در دمای کم نگهداری شود. در نتیجه، باید احتمال فساد را در نظر گرفت و سعی بر آن داشت که زمان تکمیل پروسه پس از در دسترس قرار گرفتن عضو به حداقل رسانده شود. هدف این تحقیق کاهش زمان و هزینه به‌صورت هم‌زمان برای یافتن مکان بهینه مراکز پیوند اعضا و مکان بیمارستان‌ها و بهترین هم‌پوشانی بین آن‌ها می‌باشد.

۲- ادبیات موضوعی

تخصیص عضوهای اهداشده دچار کمبود، یک مشکل بالقوه و اجتماعی است که به‌طور فرآیندی پیچیده بوده و هم‌چنین فرمول‌بندی برنامه‌ریزی ریاضی آن مشکل است. درحالی‌که تعداد بیماران نیاز به پیوند عضو افزایش می‌یابد ولی هم‌چنان سیستم پیوند عضو با کمبود اهداکنندگان عضو مواجه می‌باشد. به‌عنوان مثال، در اواخر سال ۲۰۰۳ در ایتالیا، تعداد اهداکنندگان تنها ۲۱ در یک میلیون نفر بود. باین‌وجود، داده‌ها نشان می‌دهند که تعداد اهداکنندگان افزایش آهسته‌ای داشته است. در این زمینه برونی و همکاران یک مدل مکان‌یابی برای برنامه‌ریزی بهینه سیستم پیوند ارایه داده‌اند، در این مطالعه یک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مساله سازمان‌دهی سیستم پیوند عضو ارایه شده است که به دنبال مکان بهینه مراکز پیوند عضو، مراکز اهداکننده و سازمان تدارکات پیوند عضو^۲ با هدف کاهش زمان کلی سیستم پیوند، بهبود کارایی و همسان‌سازی زمان انتظار در کل کشور می‌باشد. سهم ارایه شده در این مقاله اساساً توسط مشاهداتی مطرح شده است که سیستم فعلی تخصیص عضو در بیشتر کشورهای توسعه‌یافته در قدم اول با مشکلاتی مانند نابرابری‌های جغرافیایی در زمان انتظار در میان مناطق مختلف کشور دست‌وپنجه نرم می‌کند. زمان انتظار عادلانه برای یک پیوند، باید هدف یک سیستم پیوند اجتماعی مطلوب باشد. کشور ایتالیا به‌عنوان مطالعه موردی برای این مطالعه انتخاب شده و این انتخاب از ساختار ویژه سیستم پیوند ایتالیا و نتایج آن ناشی شده است. در این مطالعه جهت غلبه بر ضعف‌های موجود مناطق، تقاضا شناسایی شده و برای اجرای مساله در دنیای واقعی، تراکم فاصله‌ای برای تقاضا و عدم اطمینان طولانی‌مدت در نظر گرفته شده است تا تصمیمات مربوط به موقعیت مکانی با توجه به شرایط آینده نامشخص اتخاذ گردد. از دیگر خروجی‌های مدل این مطالعه می‌توان به جابجایی مکانی *OPOs* موجود با در نظر گرفتن تصمیمات مکانی قبلی و پیش‌بینی جریان بیماران اشاره کرد [4].

کونگ و همکاران [5] در مطالعه خود مساله پیشینه‌سازی کارایی پیوندهای درون منطقه‌ای را از طریق طراحی دوباره مناطق تخصیص کبد در نظر گرفته‌اند. این مساله که مساله طراحی بهینه منطقه نام دارد به‌عنوان یک مساله تقسیم‌بندی مجموعه که شرکت‌های تدارک پیوند عضو را به ناحیه‌ها خوشه‌بندی می‌کند فرمول‌بندی شده است. یک تقریب سازگاری-پایداری پیوند درون منطقه‌ای جهت به دست آوردن مصالحه بین ناحیه‌های بزرگ و کوچک طراحی گردیده است. از انشعاب و قیمت به دلیل اینکه فرمول‌بندی تقسیم‌بندی مجموعه‌ها شامل تعداد زیادی ناحیه بالقوه می‌باشد، استفاده شده است. مساله ارزش‌گذاری به‌عنوان یک مساله عدد صحیح ترکیبی

¹ Cold Ischemia Time (CIT)

² Organ Procurement Organization (OPO)



و طراحی ابتکاری تجزیه جغرافیایی جهت تولید سریع ستون‌های مورد انتظار فرمول‌بندی گردیده است. به این دلیل که جواب بهینه وابسته به طراحی جزئی جغرافیایی است، یک‌رویه تکرارشونده که انشعاب و قیمت را به همراه جستجوی منطقه‌ای برای کم کردن وابستگی ترکیب می‌کند طراحی گردیده است. نهایتاً، تعدادی مطالعات محاسباتی که منافع بازطراحی ناحیه و تاثیر رویه حل را در کارایی نشان دهد، ارائه شده است. نمونه آزمایش‌های به‌دقت کالیبره شده می‌تواند درون یک بازه زمانی معقول حل شود و نتایج طراحی ناحیه نسبت به تنظیمات فعلی بهبود قابل‌توجهی را از خود نشان می‌دهد. یک مدل پارتیشن‌بندی ایجاد گردیده است و از انشعاب و قیمت برای کمک به طراحی مجدد ترکیب جغرافیایی سیستم تخصیص کبد ایالات‌متحده برای بهبود کارایی پیوند استفاده شده است. یک پارامتر ساده برای ضبط ارتباط بین مناطق بزرگ و کوچک معرفی شده است. آزمایش‌های محاسباتی این مطالعه نشان می‌دهد که:

۱. تخصیص کبد در مناطق با دقت طراحی شده مفید است.
۲. الگوریتم انشعاب و قیمت (به‌ویژه اکتشافات تجزیه جغرافیایی) در این مقاله پیشرفت قابل‌توجهی نسبت به پیکربندی منطقه‌ای جاری را دارد.
۳. روش تکرار شده در این مقاله، منجر به بهبود قابل‌توجهی نسبت به هر انشعاب و قیمت مستقل یا جستجوی محلی می‌باشد [5].

از آن‌جا که مطالعات انجام‌شده عمدتاً در به حداکثر رساندن مقیاسی از بهره‌وری شبکه که مبتنی بر مجموع بقای بیمار است، متمرکز می‌باشد. دمیرجی و همکاران [6] تعامل بین کارایی و عدالت جغرافیایی را در فرایند تخصیص محاسبه کرده‌اند و طراحی دوباره شبکه منطقه‌ای را که در آن کبدهای مرده اختصاص داده می‌شوند، مورد مطالعه قرار داده‌اند. برای این منظور، مدل‌های بهینه‌سازی اولیه را برای گنجاندن هر دو هدف توسعه داده و یک رویکرد دقیق انشعاب و قیمت برای حل این مساله ارائه داده شده است که در آن تنها کارایی در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، یک الگوریتم راه‌حل موثر ارائه شده است که مرزهای کارآمد پارتورا با توجه به هر دو هدف با تولید هم‌زمان و بهبود متوالی مرزهای بالا و پایین تقریب می‌زند. این مطالعه یک چارچوب بهینه‌سازی را معرفی کرده است که با استفاده از دو برنامه عدد صحیح پارامتری، کارایی و عدالت سیستم را متعادل می‌کند. تنظیمات منطقه‌ای ارائه شده در این مقاله به‌صورت تقریبی ۵% سود در سطح بهره‌وری و ۷۰% بهبود در عدالت سیستم تخصیص کبد در ایالات‌متحده به‌دست می‌آورد.

بلین و همکاران [7] یک مدل تصمیم‌گیری بلندمدت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۱ برای بهینه‌سازی مکان مراکز پیوند عضو ارائه کردند که در واقع هدف اصلی کمینه کردن مجموعه اجزای زمانی وزن‌دهی شده بین لحظه‌ای که یک عضو قابل پیوند در دسترس قرار می‌گیرد تا زمانی که به بدن گیرنده پیوند داده می‌شود، می‌باشد. از آن‌جا که حساسیت زمان سپری‌شده بعد از استخراج عضو از بدن بیشتر از زمان قبل از خروج عضو می‌باشد، مدل مذکور این حساسیت را به دو شکل در نظر گرفته است: ۱- این که بیشینه زمان مجاز برای سفر عضو بعد از خروج از بدن با حدود مشخصی از جمله زمان ایسکمی سرد هر عضو به‌عبارت‌دیگر بیشینه زمانی که عضو می‌تواند خارج از بدن زنده بماند، محدود شده است و ۲- اینکه تابع هدف با تخصیص وزن کمتر به زمان طی شده قبل از خروج عضو از بدن به‌طور عمده بر زمان بعد از استخراج عضو تمرکز می‌کند. هم‌چنین در این مطالعه محدودیت بودجه نیز در نظر گرفته شده است. این مدل در مسیر پیوند عضو بلژیکی برای اعضای حیاتی از جمله قلب، ریه، کبد، کلیه و لوزالمعده اعمال شده است. تاثیر تغییرات چهار عنصر شامل وزن تابع هدف، بودجه، زمان ایسکمی سرد عضو و محدودیت پوشش که تضمین می‌کند برای هر عضو حداقل یک مرکز عضو با یک زمان انتقال خاص از هر منطقه وجود دارد، در نظر گرفته شده است. طبق نتایج این مطالعه اگر تنها هدف به حداقل رساندن زمان نگهداری عضو در خارج از بدن است تنها چند مرکز باز خواهد بود که منجر به تمرکزگرایی می‌شود. از سوی دیگر اگر زمان کل بین لحظه‌ای که اهداکننده عضو را اهدا می‌کند و گیرنده عضو را دریافت می‌کند، به حداقل برسد، روند به سمت عدم تمرکز ایجاد خواهد شد که بسیاری از مراکز پیوند باز خواهند بود. زمان محدود ایسکمی سرد منجر به جریان‌های اضافی از بیمارستان‌های اهداکننده خاص به مراکز پیوند مجاور می‌شود. محدودیت بودجه منجر به بسته شدن برخی مراکز خواهد شد که نتیجه آن کاهش سطح خدمات خواهد بود. زمانی که محدودیت سفر دارای اهمیت کمتری باشد مراکز کمتری نیز باز می‌شوند. با استفاده از زمان‌های سفر تصادفی به‌سختی می‌توان راه‌حل بهینه را تغییر داد.

ظهوری و همکاران [8] یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی استوار برای مساله مکان‌یابی چنددوره‌ای برای زنجیره تامین پیوند عضو با عدم قطعیت ذاتی ارائه کردند که در آن کمینه‌سازی هزینه‌ها در تابع هدف مورد بحث بود که قابل فساد بودن محصولات و تفاوت در نوع عضوها نیز برای تعیین مکان بهینه مراکز پیوند عضو و تخصیص تسهیلات در نظر گرفته شده بود. سهم اصلی این مقاله در توسعه مساله مکان‌یابی زنجیره تامین پیوند اعضا در نظر گرفتن منطقه عضو گیرنده به‌عنوان یکی از اجزای زنجیره تامین می‌باشد. هم‌چنین برای پاسخگویی بهتر و مدیریت

¹ Mixed Integer Linear Programming (MILP)

هزینه‌ها یکپارچه‌سازی بیمارستان و مرکز پیوند عضو در برخی مراکز خاص مورد بحث قرار گرفته است. این مدل برای طراحی یک شبکه پیوند با کمترین هزینه برای یکی از مهم‌ترین استان‌های ایران پیاده‌سازی شد که در آن عضوهای قلب و کبد مورد مطالعه بوده است. نتایج حاکی از آن است که مدل استوار عملکرد بهتری در مقدار هزینه تخطی بالا دارد در حالی که مدل قطعی در هزینه تخطی پایین بیشتر قابل اجرا است.

۲-۲- مدل صف

در همان سال ظهیری و همکاران [9] یک مدل مکان‌یابی چنددوره‌ای جدید نیز برای طراحی شبکه حمل و نقل پیوند عضو تحت عدم قطعیت ارایه دادند که شامل یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دوهدفه^۱ می‌باشد که کل هزینه و زمان را از جمله زمان انتظار در صف برای انجام جراحی پیوند با توجه به اولویت عضوها کمینه می‌سازد. در این مطالعه یک روش برنامه‌ریزی چندهدفه فازی برای حل مسائل کوچک و متوسط ارایه شده است. برای مسائل بزرگ‌تر دو الگوریتم فرا ابتکاری شبیه‌سازی تبرید^۲ و الگوریتم تکامل دینفرانسیل ترکیبی خودسازگار^۳ در نظر گرفته شده است. از اصلی‌ترین وجوه تفاوت این مطالعه از سایر مطالعات می‌توان اعمال یک سیستم صف چند اولویتی $M/M/C$ برای مدل‌سازی ازدحام عضوها در هر مرکز پیوند اشاره کرد که مراکز پیوند این سیستم صف چندسرویه با ظرفیت نامحدود می‌باشد، در نتیجه هیچ محدودیتی برای ورود وجود ندارد. به عنوان مطالعه موردی طراحی یک شبکه پیوند بهینه برای بهبود دسترسی بیماران با کمترین هزینه و زمان برای ایران در نظر گرفته شده است که طبق نتایج به دست آمده نه تنها هزینه‌های ثابت تاسیسات در محدوده بهینه پیشنهادی مدل نیست بلکه تفاوت قابل توجهی از حد بالای محدوده جواب بهینه دارد. شبکه ناکارآمد فعلی مکان‌یابی تاسیسات در ایران ۲۷٪ از هزینه‌های ثابت (صرف نظر از هزینه‌های حمل و نقل) را به عنوان هزینه اضافی به کشور تحمیل کرده است.

۲-۲- لجستیک

مقالات علمی بیشتر بر روی طراحی محل تخصیص امکانات بهداشتی و یا بهینه‌سازی زنجیره تامین پیوند عضو متمرکز شده‌اند. مدل‌های مکان‌یابی گسسته توابع هدف متفاوتی دارند: حداقل‌سازی هزینه‌های تسهیلات (مجموعه مدل‌های پوشش)، حداقل‌سازی محدوده پوشش، حداقل‌سازی فاصله کل (یا میانگین) با توجه به تقاضا، به حداقل رساندن هزینه‌های تسهیلات و مجموع هزینه‌های فاصله یا حداکثر کردن تقاضای تحت پوشش. وجود نیاز به یکپارچه‌سازی بین محل‌های مراقبت‌های بهداشتی و بهینه‌سازی شبکه‌های زنجیره تامین عضو و هم‌چنین ارایه روش‌های حمل و نقل جایگزین به دلیل فاکتور زمان و هزینه نیز یک اصل اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در مقاله منتچینی، نخستین نتایج همکاری بین CNT و دانشگاه بولونیا در مورد فعالیت‌های حمل و نقل عضو از طریق هوایی از دیدگاه فناوری، عملیاتی و لجستیک ارایه شده است که این مطالعه که شامل نظارت فنی فعالیت‌های حمل و نقل هوایی برای شناسایی دستورالعمل مشترک انتقال داده‌ها و ثبت در یک پایگاه داده تجزیه‌شده به منظور بهینه‌سازی حمل و نقل عضو پیوندی از طریق هوایی است، با در نظر گرفتن شبکه مراکز پیوند عضو و فرودگاه‌ها انجام گردیده است. داده‌های ارایه شده به دوره زمانی ژوئن تا ژوئیه ۲۰۱۵ در کشور ایتالیا اشاره می‌کند که طی آن ۱۲۸ عمل انتقال عضو رخ داده است. به طور کلی کبد و کلیه بیشترین پیوند را داشته‌اند و مقالات مرتبط این موضوع را تایید می‌کنند. علاوه بر این، حمل و نقل معمولاً شامل یک یا دو عضو است؛ حمل و نقل بیش از دو عضو معمولاً نادر است. فعالیت اصلی پیش‌بینی شده توسط این پروژه، تجزیه و تحلیل حمل و نقل همگن (یعنی جابه‌جایی یک عضو از یک بیمارستان اهداکننده به همان مرکز پیوند عضو با همان حالت حمل و نقل) خواهد بود. به طور خاص، تفاوت در زمان هر انتقال، قابل‌شناسایی خواهد شد تا اقداماتی جهت حداقل‌سازی آن صورت گیرد. طبق نتایج این مطالعه، باید به زمان ایسکمی سرد هر عضو توجه کافی کرد [10].

پیچیدگی شبکه پیوند و اهدای عضو در نیاز آن به فرآیندهای استانداردهم‌زمان و سطح بالای اضطرار و عدم اطمینان به دلیل آسیب‌پذیری عضوها نهفته است. به همین دلیل دقت و قابلیت اطمینان خدمات حمل و نقل هوایی برای تضمین کیفیت پیوند امری حیاتی است. کاجیانی و همکاران [11] در این زمینه یک مدل برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح ارایه کرده‌اند تا توزیع بهینه هواپیماها در مجموعه معین از گره‌ها را تحت تقاضای استخراج‌شده از پایگاه داده پیوند ایتالیا تعیین کند. فوریت فعالیت‌های پیوند بستگی به زمان ایسکمی سرد دارد

¹ Bi-Objective Mixed-Integer Programming (BOMIP)

² Simulated Annealing (SA)

³ Self-Adaptive Differential Evolution (SADE) algorithms





که از خروج عضو از بدن اهداکننده شروع می‌شود و با پیوند عضو به بدن گیرنده به پایان می‌رسد. در این مدت که از ۵ ساعت برای قلب تا ۳۶ ساعت برای کلیه متغیر است عضو از مبدا (مرکز اهداکننده) گرفته شده و به مقصد (مرکز پیوند عضو) منتقل می‌شود، جایی که پیوند صورت می‌گیرد. این مساله در دسته مساله مکان‌یابی تسهیلات بدون محدودیت در ظرفیت قرار دارد. در این مقاله، تابع هدف ترکیبی از مسافت طی شده و تعداد هواپیماها را به حداقل می‌رساند. این مطالعه در کشور ایتالیا انجام گرفته است که در آن اولویت حمل‌ونقل هوایی به عضوهای با زمان ایسکمی کوتاه داده شده و هم‌چنین در صورت عدم اطمینان بیشتر، اولویت حمل‌ونقل هوایی به جابجایی‌های دوربرد داده می‌شود. دو سناریو پیشنهاد شده است (به ترتیب دو و سه قطب) که درخواست حمل‌ونقل با شش هواپیما را شامل می‌شوند که برای مقابله با روند روبه رشد ارقام فعالیت‌های پیوند کافی است. هر دو سناریوی بهینه‌شده باعث کاهش تکرار منابع می‌شوند. طبق نتایج این مطالعه تخصیص هواپیما در بین تعداد بیشتری از مراکز، به‌نوبه خود باعث کاهش کل مسافت طی شده و کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده می‌شود.

تدارکات و لجستیک یکی از عناصر اصلی عملیات پیوند عضو است که ساواشر در مطالعه خود به تجزیه و تحلیل لجستیک حمل‌ونقل عضو در سیستم‌های سلسله‌مراتبی می‌پردازد و به حداکثر رساندن سازگاری بین گیرنده و اهداکننده بالقوه در محدوده زمانی ایسکمی سرد از مشکلات اصلی است که در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشاهده شده است که ساختار خوشه‌بندی نقش مهمی در فرآیندهای تطبیق درون سلسله‌مراتب ایفا می‌کند؛ بنابراین، مدل‌های مبتنی بر خوشه‌بندی با گزینه‌های انتخاب روش حمل‌ونقل برای یافتن خوشه‌های بهینه برای شبکه‌های پیوند عضو پیشنهاد داده شده است. هدف این مدل به حداکثر رساندن کل جریان احتمالی عضو در مناطق است. علاوه بر این، یک مدل شبیه‌سازی برای تجزیه و تحلیل خروجی‌های مدل قطعی در یک محیط نامشخص که بیانگر ویژگی‌های حالت واقعی سیستم‌های سلسله‌مراتبی است، تهیه گردیده است. در این مطالعه عملکرد مدل‌ها با استفاده از مجموعه داده‌های ترکیه مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج این مطالعه بیانگر این موضوع است که با کاهش تعداد مراکز هماهنگی منطقه‌ای^۱، با افزایش تعداد اهداکنندگان بالقوه در منطقه تعداد سازگاری‌ها در همان مرکز افزایش می‌یابد. هنگامی که یک عضو با یک گیرنده از همان مرکز هماهنگی منطقه‌ای مطابقت دارد، سیستم‌های پیشنهادی برای انواع مختلف عضوها بهتر از سیستم فعلی عمل می‌کنند. در سیستم پیشنهادی، استفاده از وسایل حمل‌ونقل هوایی بسیار کمتر از سیستم فعلی است. به‌طور خاص استفاده از بالگرد تقریباً ۱۶ برابر کمتر است. این مطالعه، سیستم پیوند اعضای بدن ترکیه را بسیار بهبود بخشیده است. یکی از مهم‌ترین اهداف این پژوهش برجسته‌کردن موضوعات لجستیک در پیوند عضو و راهنمایی تصمیم‌گیرندگان در هنگام بهینه‌سازی این سیستم‌ها است. روش‌های این مطالعه عملکرد سیستم را با به حداکثر رساندن جریان درون منطقه‌ای بالقوه و برجسته کردن شهرهای مهم که میانگین حدود زمان حمل‌ونقل را در یک خوشه تعیین می‌کنند، بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، با کاهش زمان حمل‌ونقل از شهر اهداکننده به شهر دریافت‌کننده، زمان موجود برای جراحی افزایش می‌یابد که به‌طور غیرمستقیم عملکرد جراحی را بهبود می‌بخشد، در نتیجه احتمال پیوند موفقیت‌آمیز افزایش داده می‌شود [12].

با توجه به تحقیقات کلین و همکاران [13] که در مطالعه خود در ایالات متحده مطرح کرده‌اند، متأسفانه اهدا عضو با تقاضای رو به رشد هم‌خوانی ندارد و موانع شناسایی شده عبارت‌اند از: بی‌انگیزگی برای اهدای عضو زنده، میزان رضایت کم برای اهدای عضو فرد فوت‌شده توسط خانواده، ناتوانی در تشویق عموم به توسعه سیاست‌های پیوند عضو، عدم شفافیت در افشا و تجزیه و تحلیل اطلاعات مربوط به عملکرد خاص هر سازمان و سازمان‌های تدارکات پیوند عضو و ناتوانی در تمایز کیفیت اهداکننده بر اساس تست‌های پیش از عمل موجود که ممکن است منجر به از بین بردن عضوهای بالقوه قابل پیوند شود، می‌توان به میزان اهمیت عضو در دسترس برای پیوند به‌وضوح پی برد. زمانی که یک منبع (عضودهنده در این مورد) کمیاب است، نیاز به پیش‌بینی دقیق نتایج پس از پیوند بسیار مهم و حیاتی است. در این راستا اصیل اوزتکین و همکاران [14] موفقیت پیوند عضو را با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از نظر سنجی بیمار مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه یک درخت تصمیم معادله ساختاری مبتنی بر مدل‌سازی پیشنهاد شده است. چنین روشی می‌تواند علیت را با دقت پیش‌بینی بالا شناسایی کند؛ بنابراین، این امر می‌تواند متخصصان پزشکی را با تفسیر و پیش‌بینی واضح آن برای یک طرح تخصیص محور با توجه به موفقیت مورد انتظار پیوند، راضی کند. ۲۷ متغیر از پایگاه داده مربوطه جهت مطالعه انتخاب گردیده است که از بین آن‌ها عمر پیوند از زمان پیوند تا زمان مرگ و وضعیت عملکردی پس از پیوند نشان‌دهنده نرخ موفقیت پیوند عضو هستند. این دو متغیر در این مطالعه ترکیب شده‌اند تا مقیاس بهره‌وری را برای پیوند عضو تحت عنوان موفقیت پیوند ایجاد کنند. ۲۵ متغیر باقی‌مانده به‌صورت شاخص‌های علی در نظر گرفته شده‌اند که وابسته به سه عامل تعیین‌کننده اصلی یعنی مشخصات گیرنده، مشخصات اهداکننده و سطح میزان

¹ Regional Coordination Center (RCC)



تطابق مورد استفاده متخصصان پزشکی برای مدل‌سازی پیوند عضو قرار می‌گیرند. برای مدل‌سازی ارتباط علی بین این سه عامل تعیین‌کننده و ۲۵ شاخص علی متناظر با موفقیت پیوند و آیتم‌های آن از تکنیک حداقل مربعات جزئی در مدل‌سازی مسیر استفاده شده است. روش یکپارچه این مطالعه با مدل‌سازی معادلات ساختاری و درخت تصمیم ثابت شده است که تا حدودی توانا در پیش‌بینی دقیق می‌باشد. روش پیشنهادی این مطالعه نه تنها روابط غیرخطی را در میان متغیرهای مختلف پوشش می‌دهد بلکه توضیح بیشتری را ارائه می‌دهد تا روش پیوند ریه را از نظر متغیرهایی که برای مدل‌سازی و پیش‌بینی استفاده می‌شود، قابل فهم‌تر و شفاف‌تر نماید.

از زمان اجرای سیستم تخصیص پیوند کلیه اصلاح‌شده^۱ در دسامبر ۲۰۱۴، موجودی در دسترس کلیه به صورت جدی در اختیار بیمارانی که ممکن است برای مدت طولانی منتظر بوده باشند قرار می‌گیرد. این امر به‌ویژه در مورد بیماران با حساسیت بالا صادق است. لونز و همکاران [15] تاثیر این سیستم جدید تخصیص کلیه را در پروسه اهدای عضو ارزیابی کرده و فعل و انفعالات ضروری بین سازمان تدارکات پیوند عضو و مراکز پیوند برای تعیین بهترین تناسب بین کلیه‌های اهداشده و بیماران با حساسیت بالا را روشن می‌سازند. بر اساس این مطالعات انجام گرفته می‌توان مشاهده کرد که مزایای پیش‌بینی شده از KAS تجدیدنظرشده در سال اول پس از اعمال بر بیماران بسیار حساس لمس شده است.

کاروسو و دانیل [16] یک مدل ریاضی، مبتنی بر شبکه‌ها ارائه کرده‌اند که امکان حداقل‌سازی کل هزینه‌های مرتبط با پیوند عضو از جمله هزینه تیم‌های پزشکی، هزینه‌های حمل و نقل، هزینه اتلاف عضو و هزینه‌های دفع زباله را می‌دهد. در بعضی موارد، مانند پیوند کلیه و کبد، اهداکنندگان زنده می‌توانند عضو خود را برای پیوند در اختیار قرار دهند اما در مدل این مطالعه این‌گونه در نظر گرفته شده است که لازم است قبل از خروج عضو از بدن، مرگ مغزی تایید شده باشد. در تحقیق دیگری نیز که اخیراً توسط گلی و همکاران [17] ارائه شده است، زنجیره تامین پیوند اعضا با رویکرد شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ترکیبی جهت کاهش هزینه‌ها استفاده شده است.

۳- روش‌شناسی

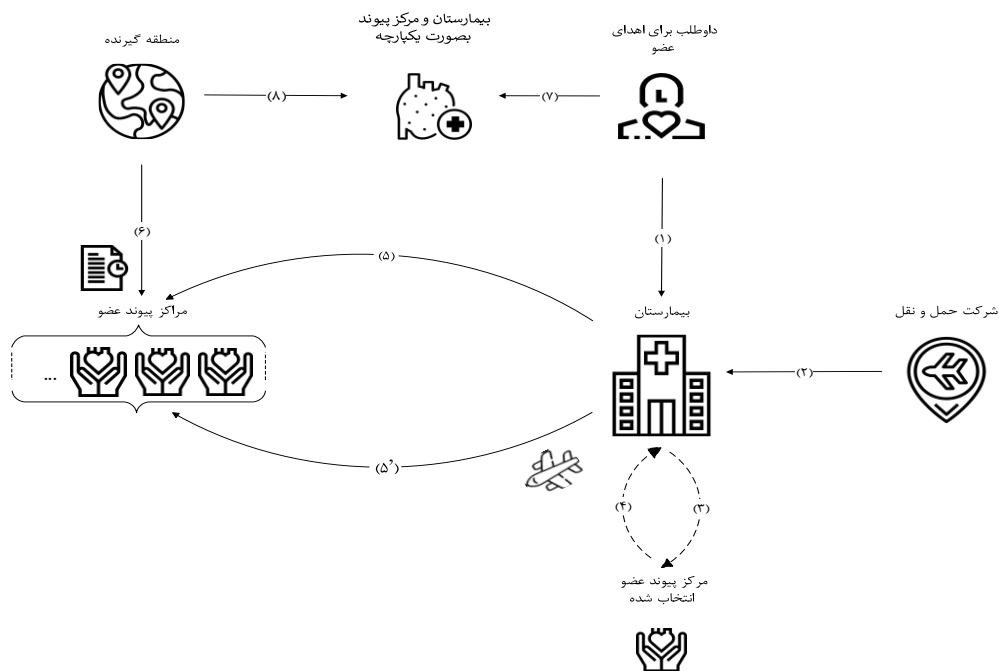
یکی دیگر از عمده تفاوت‌های زنجیره تامین پیوند عضو با سایر زنجیره‌های تامین احتمال فساد محصولات مربوطه می‌باشد. لذا زمان و هم‌چنین بحث مکان‌یابی مراکز پیوند عضو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ظهیری [8]، [9] در مطالعات قبلی خود یک سیستم صف چنداولویی $M/M/C$ برای مدل‌سازی ازدحام اعضا در هر مرکز پیوند اعمال کرد که مراکز پیوند این سیستم صف چندسوره با ظرفیت نامحدود می‌باشد. در نتیجه هیچ محدودیتی برای ورود وجود ندارد و در واقع زمان انتظار بیمار در صف از زمانی که عضو قابل پیوند در دسترس قرار گرفته است تا انجام عمل پیوند عضو را مدیریت می‌کند. در پژوهش حاضر با استفاده از مدل صف $G/G/m$ در مورد میانگین زمان انتظار بیمار از لحظه ورود به سیستم تا انجام عمل پیوند و تکمیل پروسه پیوند عضو اظهار نظر خواهد شد.

شکل ۱ یک نمای شماتیک کلی از شبکه زنجیره تامین پیوند عضو و ارتباط بین تسهیلات آن را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۱ وقتی یک اهداکننده داوطلب به اهدای یک عضو می‌شود (۱)، تیم ترابری به بیمارستان اهداکننده ارسال می‌گردد (۲) تا اطلاعات مورد نیاز را به همراه نمونه خون اهداکننده از بیمارستان به مرکز پیوند عضو انتخاب‌شده جهت پیوند انتقال دهند (۳). سپس انتقال‌دهندگان به بیمارستان باز خواهند گشت (۴). پیکان‌های این قسمت به صورت خط‌چین نشان داده شده است تا مشخص سازد که بیانگر جریان اطلاعات می‌باشند. در صورت عملیات، پروسه خروج عضو از بدن در بیمارستان رخ خواهد داد و عضو برای پیوند به مرکز پیوند عضو فرستاده خواهد شد (۵ و ۵'). در مورد گیرنده یا اهداکننده خارجی عضو باید به فرودگاه تحویل داده شود تا به مرکز پیوند فرستاده شود (۵'). در ضمن، شخص گیرنده مورد تایید اطلاع‌رسانی شده در اسرع وقت باید در مرکز پیوند حاضر شود (۶). همان‌طور که ذکر شد مراکز پیوند عضو مسئول ثبت نام، نمونه‌گیری خون و پیوند هستند، در برخی مواقع این مراکز می‌توانند عملیات بیمارستان را نیز خود بر عهده گیرند. در این شرایط شخص اهداکننده طبق جریان (۷) و شخص گیرنده طبق جریان (۸) به این مرکز مراجعه می‌نمایند و تمام مراحل در همین مرکز به انجام می‌رسد. در این پروسه باید زمانی که عضو خارج از بدن به سر می‌برد و هم‌چنین احتمال فساد را در نظر گرفت و سعی بر آن داشت که زمان تکمیل پروسه به حداقل رسانده شود. از آن‌جا که اغلب تعداد عضو قابل پیوند و در دسترس در برابر بیماران منتظر پیوند عضو به صورت قابل ملاحظه‌ای دچار کمبود می‌باشد بیماران همواره در یک صف منتظر عضو برای پیوند می‌مانند که

¹ Kidney Allocation System (KAS)



در شکل ۱ لیست انتظار کلی که با مراجعه بیماران به مراکز پیوند و ثبت نام جهت پیوند عضو ایجاد شده است به وضوح مشخص می‌باشد. یکی از مهم‌ترین بخش‌های سیستم پیوند عضو طول صف و مدت زمان انتظار بیمار در صف برای در دسترس بودن یک عضو برای پیوند می‌باشد لذا کمینه ساختن مدت زمان انتظار بیمار در صف یکی از مهم‌ترین اهداف سیستم پیوند عضو می‌باشد.



شکل ۱- شبکه زنجیره تامین پیوند عضو.

Figure 1- Organ transplant supply chain network.

در ادامه مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مورد استفاده در طراحی مدل ریاضی بیان می‌گردد.

مجموعه‌ها

I	مجموعه مکان‌های بالقوه برای بیمارستان‌ها.
K	مجموعه مکان‌های بالقوه برای مراکز پیوند عضو.
V	مجموعه مکان مراکز حمل و نقل.
H	مجموعه مناطق افراد گیرنده.
O	مجموعه انواع عضو.
A	مجموعه فرودگاه‌ها.
T	مجموعه دوره‌های زمانی.
E	مجموعه مکان‌های بالقوه برای تجمیع بیمارستان و مرکز پیوند.
S	مجموعه سناریوها.

پارامترها

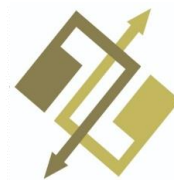
C_i	هزینه ثابت احداث یک بیمارستان در مکان بالقوه i .
C'_k	هزینه ثابت احداث یک مرکز پیوند عضو در مکان بالقوه k .
r_{io}	هزینه عملیات استخراج عضو O در بیمارستان i .
r'_{ko}	هزینه تجهیز مرکز پیوند k برای عضو O .
Sd_{is}^t	تعداد اهداکننده بومی در زمان t در بیمارستان i تحت سناریوی s .
Sa_i^t	تعداد اهداکننده خارجی در زمان t در بیمارستان i .



تعداد عضو O به‌دست‌آمده از یک بدن در بیمارستان i در زمان t .	M_{io}^t
نرخ اهداکننده بومی در بیمارستان i در زمان t .	Xd_i^t
نرخ اهداکننده خارجی در بیمارستان i در زمان t .	Xa_i^t
تقاضای کل برای عضو O در منطقه گیرنده h در زمان t تحت سناریوی s .	D_{hos}^t
هزینه عقد قرارداد بین بیمارستان i و مرکز حمل‌ونقل v .	$C_{vi}^{(v \rightarrow i)}$
هزینه انتقال نمونه‌ها و اطلاعات از بیمارستان i به مرکز پیوند k .	$C_{ik}^{(i \rightarrow k)}$
هزینه انتقال یک عضو از بیمارستان i به مرکز پیوند k .	$C_{ik}^{(i \rightarrow k)}$
هزینه انتقال بیمار از منطقه گیرنده h به مرکز پیوند k .	$C_{hk}^{(h \rightarrow k)}$
هزینه انتقال یک عضو از فرودگاه a به مرکز پیوند k .	$C_{ak}^{(a \rightarrow k)}$
زمان حمل عضو از بیمارستان i به مرکز پیوند k در دوره زمانی t تحت سناریوی s .	\tilde{t}_{ikos}^t
مدت زمانی که عضو O می‌تواند خارج از بدن بماند.	t'_o
هزینه تقاضای برآورده نشده.	M'
هزینه صرفه‌جویی شده از تجمیع بیمارستان و مرکز پیوند عضو در مکان بالقوه e .	f_e^t
وزن برای برنامه‌ریزی استراتژیک هزینه‌ها.	λ

متغیرهای تصمیم

اگر یک بیمارستان در منطقه i احداث گردد مقدار یک می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.	Z_i
اگر یک مرکز پیوند در مکان k احداث گردد مقدار یک می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.	Z'_k
اگر یک بیمارستان در مکان i احداث گردد و توانایی اهدای عضو O را داشته باشد مقدار یک می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.	y_{io}
اگر یک مرکز پیوند برای عضو O در مکان k احداث گردد مقدار یک می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.	y'_{ko}
اگر یک بیمارستان برای عضو O در مکان بالقوه e جهت یکپارچه‌سازی قرار گیرد مقدار یک می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.	y_{eo}
اگر یک مرکز پیوند برای عضو O در مکان بالقوه e جهت یکپارچه‌سازی قرار گیرد مقدار یک می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.	y'_{eo}
اگر مرکز حمل‌ونقل v در دوره زمانی t انتخاب گردد مقدار یک می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.	w_v^t
اگر یک بیمارستان در مکان i توسط مرکز حمل‌ونقل v تحت پوشش قرار گرفته باشد مقدار یک می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.	$X_{vi}^{(v \rightarrow i)t}$
جریان اطلاعات و منابع درخواستی عضو O از بیمارستان i به مرکز پیوند k در دوره زمانی t .	$X_{iko}^{(i \rightarrow k)t}$
جریان عضو از بیمارستان i به مرکز پیوند k در دوره زمانی t .	$X_{iko}^{t(i \rightarrow k)}$
جریان عضو O از بیمارستان i به فرودگاه a در دوره زمانی t .	$X_{iao}^{(i \rightarrow a)t}$
جریان عضو O از فرودگاه a به مرکز پیوند k در دوره زمانی t .	$X_{ako}^{(a \rightarrow k)t}$
جریان افراد گیرنده از منطقه h به مرکز پیوند k برای پیوند عضو O در دوره زمانی t .	$X_{hko}^{(h \rightarrow k)t}$
تعداد عضو O در دسترس در بیمارستان i از طرف اهداکننده بومی در دوره زمانی t .	Sa_{io}^t
تعداد عضو O در دسترس در بیمارستان i به‌دست‌آمده از اهداکننده خارجی در دوره زمانی t .	Sa'_{io}^t
سطح موجودی عضو O در بیمارستان i در دوره زمانی t .	I_{io}^t
مقدار تقاضای برآورده‌نشده عضو O در منطقه h .	B_{ho}
تعداد کلی مراکز حمل‌ونقل در دسترس در هر دوره زمانی.	w



در این سیستم فاصله زمانی بین دو ورود متوالی بیماران را نمی‌توان وابسته به توزیع خاصی دانست چراکه تقاضا برای انجام پیوند عضو کاملاً تصادفی بوده و از توزیع خاصی تبعیت نمی‌کند. از طرفی مدت خدمت‌دهی برای هر بیمار از لحظه ورود بیمار به سیستم و ثبت تقاضا برای انجام پیوند عضو تا زمان تکمیل عمل پیوند در نظر گرفته شده و این زمان رابطه مستقیم با در دسترس قرار گرفتن یک عضو برای پیوند دارد. از آن‌جا که ورود اهداکننده امری تصادفی بوده و به عوامل بسیاری وابسته است لذا مدت‌زمان خدمت‌دهی نیز متغیری تصادفی است که از توزیع به خصوصی پیروی نمی‌کند.

در این مطالعه هر مرکز پیوند عضو که قابلیت پیوند برای هر یک از اعضاها را داشته باشد به‌عنوان یک خدمت‌دهنده برای پیوند آن عضو محاسبه گردیده است به همین دلیل m خدمت‌دهنده در نظر گرفته شده است که در رابطه (۱) به شرح ذیل محاسبه شده است:

$$m_o = \sum_k^K y'_{ko} \quad \text{for all } o. \quad (1)$$

تعداد بیمار منتظر در صف از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$n_{ot} = \sum_h^H D_{hos}^t - \sum_h^H \sum_k^K X_{hko}^{(h \rightarrow k)t} \quad \text{for all } o, s, t. \quad (2)$$

آهنگ ورود بیمار به سیستم و آهنگ خدمت‌دهی به ترتیب در رابطه‌های (۳) و (۴) برآورد شده است.

$$\lambda_o = \frac{\sum_h^H \sum_k^K \sum_t^T X_{hko}^{(h \rightarrow k)t}}{T} \quad \text{for all } o. \quad (3)$$

$$\mu_o = \frac{\sum_i^I \sum_a^A \sum_k^K \sum_t^T X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} + X_{ako}^{(a \rightarrow k)t}}{T} \quad \text{for all } o. \quad (4)$$

با توجه به آهنگ ورود بیمار و آهنگ خدمت‌دهی ضریب بهره‌وری سیستم و همین‌طور احتمال خالی بودن صف در درازمدت به ترتیب از رابطه‌های (۵) و (۶) به دست می‌آید.

بدین ترتیب طول صف ایجادشده از رابطه‌های (۷) و (۸) محاسبه می‌گردد.

$$\rho_{ko} = \frac{\lambda_{ko}}{m\mu_{ko}} = \frac{\sum_h^H \sum_t^T X_{hko}^{(h \rightarrow k)t}}{\sum_k^K Z_k' \sum_i^I \sum_a^A \sum_t^T X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} + X_{ako}^{(a \rightarrow k)t}} \quad \text{for all } k, o. \quad (5)$$

$$\pi_o = \left[1 + \sum_{n=1}^{m-1} \left(\frac{\lambda_{ko}}{\mu_{ko}} \right)^n \frac{1}{n!} + \sum_{n=m}^{\infty} \left(\frac{\lambda_{ko}}{\mu_{ko}} \right)^n \frac{1}{m! m^{n-m}} \right]^{-1} \quad \text{for all } k, o. \quad (6)$$

$$Lq_{(M/M/m)} = \frac{\pi_o}{m!} \left(\frac{\lambda_{ko}}{\mu_{ko}} \right)^m \frac{\rho_{ko}}{(1 - \rho_{ko})^2} \quad \text{for all } k, o. \quad (7)$$

$$Lq_{(G/G/m)} = Lq_{(M/M/m)} \left[\frac{(\lambda_{ko})^2 \text{var}(p) + (\mu_{ko})^2 \text{var}(q)}{2} \right] \quad \text{for all } k, o. \quad (8)$$

که در آن p نشانگر زمان بین دو ورود متوالی و q نشانگر زمان خدمت‌دهی می‌باشد. در نهایت مدت‌زمان انتظار بیمار در صف جهت انجام پیوند عضو در بلندمدت از طریق رابطه (۹) محاسبه می‌گردد که یکی از اهداف این مطالعه به حداقل رساندن این مقدار می‌باشد.

$$Wq = \frac{Lq_{(G/G/m)}}{\lambda_{ko}}. \quad (9)$$

این مساله شامل دو تابع هدف به شرح ذیل می‌باشد که هدف اول کمینه‌سازی هزینه‌ها و هدف دوم کمینه‌سازی زمان انتظار بیمار در صف می‌باشد.



$$\begin{aligned} \min Z_1 = & \lambda \left(\sum_i C_i Z_i + \sum_k C'_k Z'_k + \sum_o \sum_k r'_{ko} y'_{ko} - \sum_o \sum_e f'_e y_{eo} y'_{eo} \right) + \\ & \sum_t \sum_o \sum_a \sum_k \sum_i r_{io} (X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} + X_{iao}^{(i \rightarrow a)t}) + \sum_t \sum_i \sum_v C_{vi}^{(v \rightarrow i)} X_{vi}^{(v \rightarrow i)t} \\ & \sum_t \sum_o \sum_k \sum_i C_{ik}^{(i \rightarrow k)} X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} + \sum_t \sum_o \sum_k \sum_i C'_{ik}{}^{(i \rightarrow k)} X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} \quad (10) \\ & \sum_t \sum_o \sum_a \sum_k C_{ak}^{(a \rightarrow k)} X_{ako}^{(a \rightarrow k)t} + \sum_t \sum_o \sum_k \sum_h C_{hk}^{(h \rightarrow k)} X_{hko}^{(h \rightarrow k)t} \\ & \sum_h \sum_o \sum_s M'_s B_{ho}. \end{aligned}$$

$$\min Z_2 = \text{Max}(Wq). \quad (11)$$

تابع هدف اول (۱۰) کل هزینه وزن‌دهی شده شامل هزینه‌های ثابت احداث، هزینه‌های عملیات خروج عضو از بدن، هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه تقاضای برآورده نشده و هزینه صرفه‌جویی شده از یکپارچه‌سازی بیمارستان‌ها و مراکز پیوند در یک مکان را کمینه‌سازی می‌کند.

تابع هدف دوم (۱۱) نیز بیشینه مقدار میانگین مدت‌زمان انتظار یک بیمار در صف در درازمدت را کمینه می‌سازد.

$$s.t \ y_{io} \leq Z_i \quad \text{for all } i, o. \quad (12)$$

$$y'_{ko} \leq Z'_k \quad \text{for all } k, o. \quad (13)$$

$$\sum_i y_{io} \geq 1 \quad \text{for all } o. \quad (14)$$

$$\sum_k y'_{ko} \geq 1 \quad \text{for all } o. \quad (15)$$

$$\sum_v w_v^t = W \quad \text{for all } t. \quad (16)$$

$$X_{vi}^{(v \rightarrow i)t} \leq w_v^t \quad \text{for all } i, v, t. \quad (17)$$

$$y_{io}^t \leq \sum_v X_{vi}^{(v \rightarrow i)t} \quad \text{for all } i, o, t. \quad (18)$$

$$w_v^t \leq \sum_i X_{vi}^{(v \rightarrow i)t} \quad \text{for all } v, t. \quad (19)$$

$$\sum_v X_{vi}^{(v \rightarrow i)t} \leq 1 \quad \text{for all } i, t. \quad (20)$$

$$\sum_k X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} = (Sd_{io}^{tt} + Sa_{io}^{tt}) y_{io} \quad \text{for all } i, o, t. \quad (21)$$

$$X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} \leq (Sd_{io}^{tt} + Sa_{io}^{tt}) y'_{ko} \quad \text{for all } i, k, o, t. \quad (22)$$

$$X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} = 0 \mid \tilde{t}_{ikos}^t > t'_o \quad \text{for all } i, k, o, s, t. \quad (23)$$

$$X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} \leq Sd_{io}^{tt} y'_{ko} \quad \text{for all } i, k, o, t. \quad (24)$$

$$\sum_k X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} \leq Sd_{io}^{tt} y_{io} \quad \text{for all } i, o, t. \quad (25)$$

$$\sum_a X_{iao}^{(i \rightarrow a)t} \leq Sa_{io}^{tt} y_{io} \quad \text{for all } i, o, t. \quad (26)$$

$$\sum_a X_{ako}^{(a \rightarrow k)t} \leq \sum_i Sa_{io}^{tt} y'_{ko} \quad \text{for all } k, o, t. \quad (27)$$

$$\sum_k X_{ako}^{(a \rightarrow k)t} = \sum_i X_{iao}^{(i \rightarrow a)t} \quad \text{for all } a, o, t. \quad (28)$$

$$Sd_{io}^{tt} = Sd_i^t M_{io}^t Xd_i^t \quad \text{for all } i, o, t. \quad (29)$$



$$Sa_{io}^t = Sa_i^t M_{io}^t Xa_i^t \quad \text{for all } i, o, t. \quad (30)$$

$$\sum_h X_{hko}^{(h \rightarrow k)t} = \sum_i X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} + \sum_a X_{ako}^{(a \rightarrow k)t} \quad \text{for all } k, o, t. \quad (31)$$

$$\sum_k X_{hko}^{(h \rightarrow k)t} + B_{ho} \geq \tilde{D}_{hos}^t \quad \text{for all } h, o, s, t. \quad (32)$$

$$I_{io}^t = I_{io}^{t-1} + Sd_{io}^t + Sa_{io}^t - \left(\sum_{k=1}^K X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} + \sum_{a=1}^A X_{iao}^{(i \rightarrow a)t} \right) \quad \text{for all } i, o, t, | I_{io}^0 = 0. \quad (33)$$

$$Z_i, Z'_k, y_{io}, y'_{ko}, w_v^t, X_{vi}^{(v \rightarrow i)t} \in \{0, 1\} \quad \text{for all } i, k, o, t, v. \quad (34)$$

$$X_{iko}^{(i \rightarrow k)t}, X_{iko}^{(i \rightarrow k)t}, X_{iao}^{(i \rightarrow a)t}, X_{ako}^{(a \rightarrow k)t}, X_{hko}^{(h \rightarrow k)t} \geq 0, \text{int eger} \quad \text{for all } i, k, o, h, a, t. \quad (35)$$

$$Sd_{io}^t, Sa_{io}^t, I_{io}^t, W \geq 0, \text{int eger} \quad \text{for all } i, o, t. \quad (36)$$

محدودیت (۱۲) اطمینان می‌دهد که یک بیمارستان تنها زمانی قادر به اهدای یک عضو خاص می‌باشد که خود احداث شده باشد. **محدودیت (۱۳)** همانند محدودیت قبل عمل مشابه را در مورد مرکز پیوند انجام می‌دهد. **محدودیت‌های (۱۴)** و **(۱۵)** اطمینان می‌دهد که حداقل یک بیمارستان و یک مرکز پیوند عضو برای هر عضو باید موجود باشد. **محدودیت (۱۶)** تعداد کل مرکز حمل و نقل در دسترس را در هر بازه زمانی تعریف می‌کند. **محدودیت (۱۷)** تضمین می‌کند که تنها زمانی که مرکز حمل و نقل v انتخاب شده باشد تخصیص آن به یک بیمارستان می‌تواند در بازه زمانی t در نظر گرفته شود. **محدودیت (۱۸)** نشان می‌دهد که هر بیمارستان موجود باید حداقل توسط یک مرکز حمل و نقل تحت پوشش قرار گیرد. **محدودیت (۱۹)** جریان‌ها و تعداد مراکز حمل و نقل بلااستفاده را کمینه می‌سازد. **محدودیت (۲۰)** نشان می‌دهد که هر بیمارستان باید حداکثر تحت پوشش یک مرکز حمل و نقل قرار گیرد. **محدودیت‌های (۲۱)** و **(۲۲)** اطمینان می‌دهد که جریان اطلاعات از یک بیمارستان به یک مرکز پیوند تنها زمانی امکان‌پذیر است که خود بیمارستان و مرکز پیوند موجود باشد. **محدودیت (۲۳)** نشان می‌دهد که زمان تحویل یک عضو از بیمارستان به مرکز پیوند عضو نباید متجاوز از زمانی باشد که عضو می‌تواند خارج از بدن بماند، در غیر این صورت جریان تحویل عضو از بیمارستان به مرکز پیوند صفر در نظر گرفته می‌شود. **محدودیت‌های (۲۴)** و **(۲۵)** تضمین می‌کند که جریان بین یک بیمارستان به یک مرکز پیوند تنها زمانی امکان‌پذیر است که خود بیمارستان و مرکز پیوند موجود باشد. **محدودیت (۲۶)** اطمینان می‌دهد که جریان بین بیمارستان به فرودگاه زمانی امکان‌پذیر است که بیمارستان قادر به اهدای یک عضو باشد. **محدودیت (۲۷)** نشان می‌دهد که جریان بین فرودگاه به مرکز پیوند زمانی امکان‌پذیر است که مرکز پیوند خود موجود باشد. **محدودیت (۲۸)** نشان می‌دهد که کل جریان‌های بیمارستان عضو دهنده به فرودگاه برای عمل‌های غیربومی برابر با کل جریان خارجی به مرکز پیوند در هر دوره زمانی می‌باشد. **محدودیت‌های (۲۹)** و **(۳۰)** کل موجودی عضو o در دوره زمانی t را به ترتیب برای اهداکنندگان بومی و غیربومی محاسبه می‌کند. **محدودیت (۳۱)** نشان می‌دهد که کل جریان از مناطق گیرنده به مراکز پیوند برابر با کل جریان از بیمارستان‌ها و فرودگاه‌ها به مراکز پیوند در دوره زمانی t می‌باشد. **محدودیت (۳۲)** اطمینان می‌دهد که کل تقاضا توسط موجودی در دسترس در هر دوره‌ی زمانی تحت پوشش قرار می‌گیرد. **محدودیت (۳۳)** سطوح موجودی هر بیمارستان در هر دوره زمانی برای هر عضو را محاسبه می‌کند. در نهایت **محدودیت (۳۴)** تا **محدودیت (۳۶)** نوع متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

۱-۳- خطی سازی مدل

به دلیل ضرب متغیرهای باینری در تابع هدف و متغیرهای عدد صحیح و باینری در برخی از محدودیت‌ها مدل ارایه‌شده غیر خطی می‌باشد. مطابق آخرین گزاره تابع هدف، دو متغیر باینری موجود است (یعنی y_{eo} و y'_{eo}) که بر یکدیگر ضرب می‌شوند [8]. برای تبدیل این گزاره به حالت خطی، محدودیت‌های زیر باید تعریف گردد:

$$Q_{eo} \leq y_{eo} \quad \text{for all } e, o. \quad (37)$$

$$Q_{eo} \leq y'_{eo} \quad \text{for all } e, o. \quad (38)$$

$$y_{eo} + y'_{eo} - Q_{eo} \leq 1 \quad \text{for all } e, o. \quad (39)$$

$$Q_{eo} \in \{0, 1\} \quad \text{for all } e, o. \quad (40)$$

که در آن Q_{eo} یک متغیر باینری می‌باشد که فقط در زمانی مقدار یک می‌گیرد که یک بیمارستان و مرکز پیوند در مکان بالقوه e جمع شده باشند (هم y_{eo} و هم y'_{eo} هر دو مقدار یک می‌گیرند).

در نتیجه تابع هدف اول به شکل زیر تغییر می‌یابد:



$$\begin{aligned}
 \min Z_1 = & \lambda \left(\sum_i C_i Z_i + \sum_k C'_k Z'_k + \sum_o \sum_k r'_{ko} y'_{ko} - \sum_o \sum_e f'_e Q_{eo} \right) + \\
 & \sum_t \sum_o \sum_a \sum_k \sum_i r_{io} X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} + X_{iao}^{(i \rightarrow a)t} + \sum_t \sum_i \sum_v C_{vi}^{(v \rightarrow i)} X_{vi}^{(v \rightarrow i)t} \\
 & \sum_t \sum_o \sum_k \sum_i C_{ik}^{(i \rightarrow k)} X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} + \sum_t \sum_o \sum_k \sum_i C'_{ik}{}^{(i \rightarrow k)} X'_{iko}{}^{(i \rightarrow k)t} \quad (41) \\
 & \sum_t \sum_o \sum_a \sum_k C_{ak}^{(a \rightarrow k)} X_{ako}^{(a \rightarrow k)t} + \sum_t \sum_o \sum_k \sum_h C_{hk}^{(h \rightarrow k)} X_{hko}^{(h \rightarrow k)t} \\
 & \sum_h \sum_o \sum_s M'_s B_{ho}.
 \end{aligned}$$

در محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲) و همچنین محدودیت (۲۴) تا محدودیت (۲۷) ضرب متغیرهای باینری و عدد صحیح مشهود است. برای تبدیل این محدودیت‌ها به معادل خطی معادل، M به عنوان یک عدد بسیار بزرگ در نظر گرفته می‌شود.

ابتدا محدودیت (۲۱) به شکل زیر تغییر می‌یابد:

$$\sum_k X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} \geq Sd_{io}^{tt} + Sa_{io}^{tt} - M(1 - y_{io}) \quad \text{for all } i, o, t. \quad (42)$$

$$\sum_k X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} \leq My_{io} \quad \text{for all } i, o, t. \quad (43)$$

این تغییر اطمینان می‌دهد که در حالت $y_{io} = 0$ هیچ جریان اطلاعاتی بین تسهیلات وجود نخواهد داشت و در حالت $y_{io} = 1$ جریان‌ها از $Sd_{io}^{tt} + Sa_{io}^{tt}$ تا M متغیر است. از آن‌جا که تابع هدف هزینه این جریان‌ها را به حداقل می‌رساند، مقدار همیشه در حد پایین بازه خود باقی می‌ماند (یعنی $Sd_{io}^{tt} + Sa_{io}^{tt}$) که حالت مطلوب محدودیت مورد نظر است.

برای تبدیل محدودیت (۲۲) به حالت خطی مجموعه محدودیت‌های (۴۴) و (۴۵) به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} \leq Sd_{io}^{tt} + Sa_{io}^{tt} \quad \text{for all } i, k, o, t. \quad (44)$$

$$X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} \leq My'_{ko} \quad \text{for all } i, k, o, t. \quad (45)$$

استفاده از این دو محدودیت اطمینان می‌دهد که در صورت ایجاد تسهیلات (یعنی y'_{ko}) جریان مورد نظر فقط در بازه صفر و $Sd_{io}^{tt} + Sa_{io}^{tt}$ متغیر است. به صورت مشابه محدودیت (۲۴) تا محدودیت (۲۷) به شکل محدودیت (۴۶) تا محدودیت (۵۳) تغییر می‌یابد.

$$X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} \leq Sd_{io}^{tt} \quad \text{for all } i, k, o, t. \quad (46)$$

$$X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} \leq My'_{ko} \quad \text{for all } i, k, o, t. \quad (47)$$

$$\sum_k X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} \leq Sd_{io}^{tt} \quad \text{for all } i, k, o, t. \quad (48)$$

$$\sum_k X_{iko}^{(i \rightarrow k)t} \leq My'_{ko} \quad \text{for all } i, k, o, t. \quad (49)$$

$$\sum_a X_{iao}^{(i \rightarrow a)t} \leq Sa_{io}^{tt} \quad \text{for all } i, o, t. \quad (50)$$

$$\sum_a X_{iao}^{(i \rightarrow a)t} \leq My_{io} \quad \text{for all } i, o, t. \quad (51)$$

$$\sum_a X_{ako}^{(a \rightarrow k)t} \leq \sum_i Sa_{io}^{tt} \quad \text{for all } k, o, t. \quad (52)$$

$$\sum_a X_{ako}^{(a \rightarrow k)t} \leq My'_{ko} \quad \text{for all } k, o, t. \quad (53)$$

در نهایت مدل نهایی این مساله به شکل زیر خواهد بود:



$$\begin{aligned} \min Z_1 = & \lambda \left(\sum_i^I C_i Z_i + \sum_k^K C'_k Z'_k + \sum_o^O \sum_k^K r'_{ko} y'_{ko} - \sum_o^O \sum_e^E f'_e Q_{eo} \right) + \\ & \sum_t^T \sum_o^O \sum_a^A \sum_k^K \sum_i^I r_{io} X_{iko}^{t(i \rightarrow k)t} + X_{iao}^{t(i \rightarrow a)t} + \sum_t^T \sum_i^I \sum_v^V C_{vi}^{(v \rightarrow i)} X_{vi}^{(v \rightarrow i)t} \\ & \sum_t^T \sum_o^O \sum_k^K \sum_i^I C_{ik}^{(i \rightarrow k)} X_{iko}^{t(i \rightarrow k)t} + \sum_t^T \sum_o^O \sum_k^K \sum_i^I C_{ik}^{t(i \rightarrow k)} X_{iko}^{t(i \rightarrow k)t} \\ & \sum_t^T \sum_o^O \sum_a^A \sum_k^K C_{ak}^{(a \rightarrow k)} X_{ako}^{t(a \rightarrow k)t} + \sum_t^T \sum_o^O \sum_k^K \sum_h^H C_{hk}^{(h \rightarrow k)} X_{hko}^{t(h \rightarrow k)t} \\ & \sum_h^H \sum_o^O \sum_s^S M'_s B_{ho}. \end{aligned} \tag{54}$$

$$\min Z_2 = \text{Max}(Wq). \tag{55}$$

s.t.

- محدودیت (۱۲) تا محدودیت (۲۰).
- محدودیت (۴۲) تا محدودیت (۴۵).
- محدودیت‌های (۹) و (۲۳).
- محدودیت (۴۶) تا محدودیت (۵۳).
- محدودیت (۲۸) تا محدودیت (۳۶).

۴- تجزیه و تحلیل‌های تحقیق

مطابق شکل ۲ شبه کد الگوریتم ژنتیک برای حل مساله دوهدفه استوار یک الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب طراحی شده است.

```

Genetic Algorithm
begin
Choose initial population
repeat
Evaluate the individual fitness of a certain proportion of the population
Select pairs of best-ranking individuals to reproduce
Apply crossover operator
Apply mutation operator
until terminating condition
end
    
```

شکل ۲- شبه کد الگوریتم ژنتیک.

Figure 1- Sedo code algorithm genetic.

به‌عنوان پارامترهای الگوریتم ژنتیک از جمله می‌توان به میزان احتمال تقاطع (pc) و جهش (pm)، تعداد افراد جامعه ($population\ size$) و تعداد تکرار ($maximum\ iteration$) اشاره کرد که احتمال تقاطع و جهش بیانگر درصدی از جامعه است که مورد تقاطع و جهش قرار می‌گیرد و نرخ جهش نشانگر تعداد ژن‌های مورد جهش می‌باشد. پارامترهای مذکور نقش بسیار مهم و اساسی را در تعریف یک الگوریتم کارآمد ایفا می‌کند لذا برای تنظیم این پارامترها از روش طراحی آزمایش تاگوجی بهره گرفته شده است. سطوح عامل استفاده‌شده برای الگوریتم $NSGA-II$ در جدول ۱ ارایه گردیده است.

جدول ۱- سطوح عامل الگوریتم $NSGA-II$.

Table 1- Operating levels of the $NSGA-II$ algorithm.

پارامترها	سطوح عامل		
	1	2	3
pc	0.7	0.4	0.2
pm	0.2	0.5	0.7
Population size	20	40	100
Max iteration	100	200	300

با مراجعه به جدول استاندارد آرایه‌های متعامد در روش تاگوجی و با استفاده از نرم‌افزار *Minitab*، آرایه‌های متعامد $L9$ به‌عنوان مناسب‌ترین

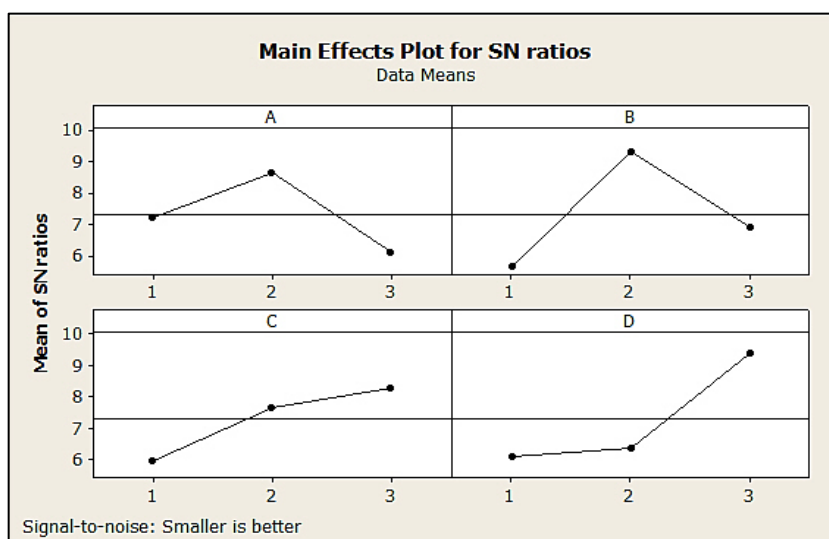
طرح برای مدل‌های دو تا چهار انتخاب می‌شود. آرایه‌های متعامد این طرح به همراه مقدار توابع هدف اول و دوم به‌ازای هر یک از آزمایش‌های تحت عنوان Z_1 و Z_2 در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- آرایه‌های متعامد برای الگوریتم NSGA-II.

Table 2- Orthogonal arrays for NSGA-II algorithm.

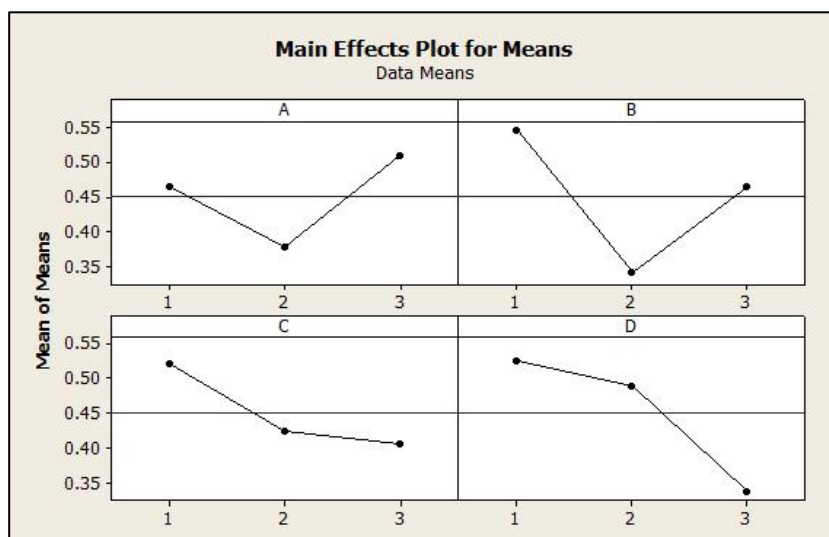
شماره آزمایش	pc	pm	Population Size	Maximum Iteration	Z_1	Z_2
1	1	1	1	1	57244149.02	969.979
2	1	2	2	2	57189695.62	1934.984
3	1	3	3	3	57185017.70	1819.032
4	2	1	2	2	57195728.19	1118.022
5	2	2	3	1	57155752.28	4005.427
6	2	3	1	2	57209670.28	1668.772
7	3	1	3	2	57224162.21	1480.376
8	3	2	1	3	57198563.56	1107.204
9	3	3	2	1	57227953.84	914.557

پس از وارد کردن اطلاعات در نرم‌افزار Minitab و اجرای روش تاگوشی نتایج متوسط نسبت S/N برای هر سطح از فاکتورها در الگوریتم NSGA-II برای مدل ارایه‌شده در شکل‌های ۳ و ۴، نشان داده شده است.



شکل ۳- متوسط نسبت S/N .

Figure 3- Average S/N ratio.



شکل ۴- نسبت میانگین میانگین‌ها.

Figure 4- The ratio of the mean of the means.





جدول ۳- سطح بهینه فاکتورهای الگوریتم NSGA-II.

Table 3- The optimal level of NSGA-II algorithm factors.

پارامتر	سطح	مقدار بهینه
Pc	2	0.4
Pm	2	0.5
Population size	3	100
Maximum iteration	3	300

ابتدا تعدادی از متغیرها به عنوان متغیرهای مرجع که دارای آزادی عمل می‌باشند به صورت رندم مقداردهی گردیده‌اند که این متغیرها عبارت‌اند از:

اگر یک بیمارستان در منطقه i احداث گردد مقدار یک می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.	Z_i
اگر یک مرکز پیوند در مکان k احداث گردد مقدار یک می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.	Z'_k
تعداد کلی مراکز حمل‌ونقل در دسترس در هر دوره زمانی.	W
اگر یک بیمارستان برای عضو O در مکان بالقوه e جهت یکپارچه‌سازی قرار گیرد مقدار یک می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.	y_{eo}
اگر یک مرکز پیوند برای عضو O در مکان بالقوه e جهت یکپارچه‌سازی قرار گیرد مقدار یک می‌گیرد، در غیر این صورت صفر.	y'_{eo}

سپس سایر متغیرها با توجه به روابط منطقی موجود در محدودیت‌ها و برحسب متغیرهای مرجع تعریف می‌گردد. هریک از این متغیرهای تولیدشده به عنوان کروموزوم و عضوهای هر متغیر به عنوان ژن‌های این کروموزوم شناخته می‌شود. جواب‌های به دست آمده ناقص هیچ یک از محدودیت‌ها نبوده ساختار جواب پیشنهادی قادر به ارایه جواب‌های شدنی و مناسب برای مساله اصلی می‌باشد.

شرط خاتمه‌ای که برای الگوریتم‌ها در این تحقیق در نظر گرفته شده است رسیدن به تعداد تکرارهای از قبل تعیین شده است. پس از ارزیابی جواب‌ها در صورتی که شرط توقف احراز شده باشد الگوریتم خاتمه می‌یابد در غیر این صورت به صورت تصادفی از بین جمعیت اولیه والد‌هایی انتخاب می‌گردد. برای انجام تقاطع از روش تقاطع یکنواخت استفاده گردیده است و برای انجام جهش به میزان نرخ جهش که از متغیرهای الگوریتم است و قبلاً تعیین گردید از ژن‌های کروموزوم انتخاب می‌شود. در متغیرهای باینری اگر مقدار ژن یک باشد به صفر تبدیل می‌گردد و بالعکس. برای متغیرهای عدد صحیح یک عدد صحیح در بازه شدنی مساله به صورت تصادفی انتخاب شده و با ژن موردنظر جایگزین می‌شود. شایان‌ذکر می‌باشد که هدف از جهش رها کردن مدل از بهینه محلی است. به همین دلیل بازه مجاز برای تولید اعداد تصادفی و اعمال جهش فاصله ۱۵٪ جواب بهینه را در بر می‌گیرد. پس از اعمال تقاطع و جهش و تعیین دوباره متغیرهای مرجع کلیه متغیرها بار دیگر با توجه به روابط منطقی موجود در محدودیت‌ها و برحسب متغیرهای مرجع تعریف می‌گردند. جواب‌های تولیدشده دوباره مقایسه شده و جبهه پارتو را تشکیل می‌دهند؛ که در این مطالعه عمدتاً جواب‌های رتبه ۱ مدنظر خواهد بود. لازم به ذکر است عضوهای در نظر گرفته شده برای این مطالعه قلب به عنوان عضو اول و کبد به عنوان عضو دوم بوده و دوره زمانی t به کاررفته سه ماه از افق زمانی را در بر می‌گیرد. میزان هزینه صرفه‌جویی شده از یکپارچه‌سازی بیمارستان و مرکز پیوند عضو ۲۰۰۰ و هزینه تقاضای برآورده‌نشده برابر با ۳۰۰۰ می‌باشد. هم‌چنین به عنوان وزن برای برخی هزینه‌ها در تابع هدف اول جهت برنامه‌ریزی استراتژیک میزان ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

مقادیر مربوط به پارامترهای غیر تصادفی که برای حل مدل استفاده گردیده‌اند در جدول ۴ تا جدول ۱۶ ذکر می‌گردد.

جدول ۴- هزینه ثابت احداث بیمارستان در مکان i (C_i).Table 4- The fixed cost of building a hospital in location i (C_i).

هزینه ثابت احداث بیمارستان‌ها (i)						
$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$	$i = 7$
2375	2475	2725	2425	2675	2425	2572



جدول ۵- هزینه ثابت احداث مرکز پیوند عضو در مکان k (C'_k).

Table 5- The fixed cost of building an organ transplant center in location k (C'_k).

هزینه ثابت احداث مراکز پیوند (k)				
$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$
3075	3225	3175	3025	3125

جدول ۶- هزینه عقد قرارداد بین بیمارستان i و مرکز حمل‌ونقل v ($C_{vi}^{(v-i)}$).

Table 6- The cost of concluding a contract between hospital i and transportation center v ($C_{vi}^{(v-i)}$).

شرکت حمل‌ونقل (v)	بیمارستان‌ها (i)						
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$	$i = 7$
$v = 1$	0.908	0.717	0.498	0.201	0.895	0.855	0.975
$v = 2$	0.399	0.575	0.580	0.387	0.588	0.181	0.288

جدول ۷- هزینه تجهیز مرکز پیوند عضو k برای عضو o (r'_{ko}).

Table 7- The cost of equipping the transplant center of member k for member o (r'_{ko}).

انواع عضو (o)	مراکز پیوند عضو (k)				
	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$
$o = 1$	725	685	825	635	685
$o = 2$	625	525	875	805	725

جدول ۸- هزینه عملیات استخراج عضو O در بیمارستان i (r_{io}).

Table 8- The cost of O organ extraction operation in hospital i (r_{io}).

انواع عضو (o)	بیمارستان‌ها (i)						
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$	$i = 7$
$o = 1$	3.25	5.25	4.25	4.75	3.45	4.15	5.05
$o = 2$	3.75	4.85	5.25	4.15	4.25	4.65	4.05

جدول ۹- هزینه انتقال نمونه‌ها و اطلاعات از بیمارستان i به مرکز پیوند k ($C_{ik}^{(i-k)}$).

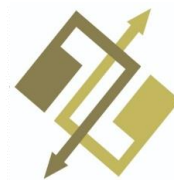
Table 9- The cost of transporting samples and information from hospital i to transplant center k ($C_{ik}^{(i-k)}$).

مراکز پیوند عضو (k)	بیمارستان‌ها (i)						
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$	$i = 7$
$k = 1$	0.075	0.085	0.115	0.065	0.105	0.095	0.075
$k = 2$	0.065	0.115	0.095	0.115	0.065	0.075	0.125
$k = 3$	0.105	0.075	0.075	0.085	0.085	0.085	0.095
$k = 4$	0.115	0.085	0.105	0.095	0.125	0.115	0.115
$k = 5$	0.075	0.095	0.105	0.075	0.065	0.065	0.085

جدول ۱۰- هزینه انتقال عضو از بیمارستان i به مرکز پیوند k ($C'_{ik}^{(i-k)}$).

Table 10- The cost of organ transfer from hospital i to transplant center k ($C'_{ik}^{(i-k)}$).

مراکز پیوند عضو (k)	بیمارستان‌ها (i)						
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$	$i = 7$
$k = 1$	0.115	0.205	0.175	0.195	0.205	0.225	0.195
$k = 2$	0.225	0.195	0.235	0.175	0.155	0.245	0.235
$k = 3$	0.195	0.225	0.155	0.235	0.145	0.145	0.145
$k = 4$	0.175	0.175	0.195	0.215	0.225	0.175	0.195
$k = 5$	0.205	0.215	0.185	0.225	0.145	0.155	0.225



جدول ۱۱- هزینه انتقال یک عضو از فرودگاه a به مرکز پیوند $C_{ak}^{(a-k)}$.

Table 11- The cost of transporting a member from airport a to link center k ($C_{ak}^{(a-k)}$).

(a) فرودگاه‌ها	(k) مراکز پیوند عضو				
	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4	k = 5
a = 1	0.7075	0.82	0.115	0.145	0.8025
a = 2	0.935	0.155	0.705	0.6825	0.525
a = 3	0.5125	0.295	0.5125	0.935	0.59
a = 4	1.005	0.155	0.575	0.84	0.155

جدول ۱۲- هزینه انتقال بیمار از منطقه گیرنده h به مرکز پیوند $C_{hk}^{(h-k)}$.

Table 12- The cost of transporting the patient from recipient area h to transplant center k ($C_{hk}^{(h-k)}$).

(h) مناطق گیرنده	(k) مراکز پیوند عضو				
	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4	k = 5
h = 1	0.045	0.065	0.065	0.055	0.055
h = 2	0.075	0.055	0.055	0.065	0.045
h = 3	0.065	0.0825	0.045	0.045	0.075
h = 4	0.055	0.045	0.085	0.075	0.065

جدول ۱۳- تعداد اهداکننده غیربومی در زمان t در بیمارستان i (Sa_i^t).

Table 13- Number of non-native donors at time t in hospital I (Sa_i^t).

(i) بازه‌های زمانی	(i) بیمارستان‌ها						
	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5	i = 6	i = 7
t = 1	23	28	33	29	26	29	18
t = 2	28	18	31	21	19	19	33
t = 3	27	23	18	27	18	20	31

جدول ۱۴- نرخ اهداکننده بومی در زمان t در بیمارستان i (Xd_i^t).

Table 14- Native donor rate at time t in hospital I (Xd_i^t).

(i) بازه‌های زمانی	(i) بیمارستان‌ها						
	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5	i = 6	i = 7
t = 1	9	9	11	9	8	7	7
t = 2	8	11	16	7	9	7	6
t = 3	9	10	9	6	9	6	10

جدول ۱۵- نرخ اهداکننده غیربومی در زمان t در بیمارستان i (Xa_i^t).

Table 15- Non-native donor rate at time t in hospital I (Xa_i^t).

(i) بازه‌های زمانی	(i) بیمارستان‌ها						
	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5	i = 6	i = 7
t = 1	8	9	11	10	9	10	6
t = 2	9	6	10	7	6	6	11
t = 3	9	8	6	9	6	7	10

جدول ۱۶- تعداد عضو O به دست آمده از یک بدن در بیمارستان i در زمان t.

Table 16- The number of organs O obtained from a body at hospital i at time t.

(t) بازه‌های زمانی	(o) اعضا	(i) بیمارستان‌ها						
		i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5	i = 6	i = 7
t = 1	o = 1	1	0	0	1	0	0	0
	o = 2	1	1	1	0	1	1	1
t = 2	o = 1	0	0	1	1	1	1	0
	o = 2	1	0	1	0	0	0	0
t = 3	o = 1	1	1	0	1	0	0	0
	o = 2	1	1	0	1	1	1	0

در مدل ریاضی معرفی شده، پارامترهایی که در شرایط عدم قطعیت به سر می‌برند عبارت‌اند از:

$$\left. \begin{array}{l} \text{تقاضای کل برای عضو } O \text{ در منطقه گیرنده } h \text{ در زمان } t \text{ تحت سناریوی } s. \\ \text{تعداد اهداکننده بومی در زمان } t \text{ در بیمارستان } i \text{ تحت سناریوی } s. \\ \text{زمان حمل عضو از بیمارستان } i \text{ به مرکز پیوند } k \text{ در دوره زمانی } t \text{ تحت سناریوی } s. \end{array} \right\} \begin{array}{l} D_{hos}^t \\ Sd_{is}^t \\ \tilde{t}_{ikos}^t \end{array}$$

برای پارامترهای فوق سه حالت خوش‌بینانه (۱)، محتمل (۲) و بدبینانه (۳) در نظر گرفته شده است که احتمال وقوع هر یک از این حالات به ترتیب برابر با $1/6$ ، $4/6$ و $1/6$ می‌باشد.

مقادیر پارامترهای مذکور در جدول (۱۷) تا جدول (۲۲) به شرح زیر ارائه گردیده است:

جدول ۱۷- تقاضای کل برای عضو O در منطقه گیرنده h در زمان t در حالت خوش‌بینانه (D_{hos}^t).

Table 17- The total demand for member O in receiver area h at time t in the optimistic state (D_{hos}^t).

بازه‌های زمانی (t)	عضوها (o)	مناطق عضو گیرنده (h)			
		h = 1	h = 2	h = 3	h = 4
t = 1	o = 1	456	512	576	456
	o = 2	600	992	1136	992
t = 2	o = 1	328	512	320	296
	o = 2	640	976	576	576
t = 3	o = 1	328	376	320	296
	o = 2	640	696	576	576

جدول ۱۸- تقاضای کل برای عضو O در منطقه گیرنده h در زمان t در حالت محتمل (D_{hos}^t).

Table 18- Total demand for member O in receiver area h at time t in the probable state (D_{hos}^t).

بازه‌های زمانی (t)	عضوها (o)	مناطق عضو گیرنده (h)			
		h = 1	h = 2	h = 3	h = 4
t = 1	o = 1	570	640	720	570
	o = 2	750	1240	1420	1240
t = 2	o = 1	410	640	400	370
	o = 2	800	1220	720	720
t = 3	o = 1	660	470	560	870
	o = 2	1260	870	800	1260

جدول ۱۹- تقاضای کل برای عضو O در منطقه گیرنده h در زمان t در حالت بدبینانه.

Table 19- The total demand for member O in receiver area h at time t in the pessimistic state.

بازه‌های زمانی (t)	عضوها (o)	مناطق عضو گیرنده (h)			
		h = 1	h = 2	h = 3	h = 4
t = 1	o = 1	684	768	864	684
	o = 2	900	1488	1704	1488
t = 2	o = 1	492	768	480	444
	o = 2	960	1464	864	864
t = 3	o = 1	792	564	672	1044
	o = 2	1512	1044	960	1512

جدول ۲۰- تعداد اهداکننده بومی در زمان t در بیمارستان i تحت در حالت خوش‌بینانه (Sd_{is}^t).

Table 20- The number of native donors at time t in hospital ii under optimistic mode (Sd_{is}^t).

بازه‌های زمانی (t)	بیمارستان‌ها (i)						
	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5	i = 6	i = 7
t = 1	34	34	40	32	28	24	27
t = 2	28	40	58	27	34	26	23
t = 3	34	38	34	23	33	22	36



جدول ۲۱- تعداد اهداکننده بومی در زمان t در بیمارستان i تحت در حالت محتمل (Sd_{is}^t).

Table 21- The number of native donors at time t in hospital i under the probable state (Sd_{is}^t).

بازه‌های زمانی (t)	بیمارستان‌ها (i)						
	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7
t = 1	28	28	33	26	23	20	22
t = 2	23	33	48	22	28	21	19
t = 3	28	31	28	19	27	18	30

جدول ۲۲- تعداد اهداکننده بومی در زمان t در بیمارستان i تحت در حالت بدبینانه (Sd_{is}^t).

Table 22- The number of native donors at time t in hospital ii under pessimistic mode (Sd_{is}^t).

بازه‌های زمانی (t)	بیمارستان‌ها (i)						
	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7
t = 1	22	22	26	20	18	16	17
t = 2	18	26	38	17	22	16	15
t = 3	22	24	22	15	21	14	24



۵- نتایج

همان‌طور که بیان شد یکی از حیاتی‌ترین زیرمجموعه‌های سیستم مراقبت‌های بهداشتی، پیوند عضو می‌باشد و از آن‌جاکه مراکز پیوند عضو به‌صورت مستقیم با عمل‌های جراحی و در نتیجه زندگی انسان‌ها سروکار دارند، اهمیت این موضوع مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. با وجود رشد روزافزون تقاضا، نرخ اهدای عضو روند ثابتی را طی می‌کند و این امر باعث عدم انطباق بین عرضه و تقاضا و در نتیجه آن ایجاد لیست‌های انتظار طولانی مدت می‌گردد. به همین دلیل علاوه بر مبحث مدیریت و تعیین مکان مناسب تسهیلات و هم‌چنین تخصیص مناسب جریان بین آن‌ها، همین‌طور کمینه‌سازی هزینه‌های مربوط، مبحث زمان نیز بیش‌ازپیش اهمیت می‌یابد. از آن‌جاکه هر عضو زمان مشخصی را می‌تواند خارج از بدن سپری کند و احتمال فساد و یا کاهش کیفیت پیوند وجود دارد، زمان بین خروج عضو از بدن و تکمیل عمل پیوند نقشی اساسی در سیستم پیوند ایفا می‌کند. از طرفی زمان انتظار بیمار تا در دسترس قرار گرفتن یک عضو قابل پیوند نباید نادیده گرفته شود. با مطالعه پژوهش‌های پیشین این نتیجه حاصل شد که این مساله تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است و در این پژوهش کمینه‌سازی میانگین مدت‌زمان انتظار بیمار از لحظه ورود به سیستم تا زمان تکمیل پیوند عضو تحت سیستم صف $G/G/m$ مورد مطالعه قرار گرفت. به دلیل ماهیت نادقیق شبکه مورد مطالعه، مدل تحت عدم قطعیت در نظر گرفته شده و یک رویکرد احتمالی استوار اعمال گردیده است.

در این مطالعه یک مدل ریاضی دو هدفه با هدف اول کمینه‌سازی کل هزینه‌ها (از جمله هزینه‌های احداث، هزینه‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های خروج عضو از بدن و هزینه تقاضای برآورده نشده و ...) و هدف دوم کمینه‌سازی میانگین مدت‌زمان انتظار بیمار از زمان ورود به سیستم تا زمان تکمیل پروسه پیوند ارایه گردیده است.

برای حل این مدل از طریق روش‌های فرا ابتکاری، یک الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب به‌کار گرفته شده است. حل عددی مدل در نرم‌افزار متلب انجام گرفته و نتایج در فصل پیشین بیان گردید. برای ارزیابی اهمیت جواب‌های تصادفی از روش‌های صبر و مشاهده، اینجا و اکنون و مقدار متوسط استفاده گردید و در نهایت برای اطمینان از بررسی دقیق مدل حساسیت مدل نسبت به سه پارامتر تقاضا، تعداد اهداکنندگان داخلی و تعداد اهداکنندگان خارجی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که مدل استوار تحت مقدار جریمه تخطی بالاتر عملکرد بهتری دارد.



- [1] Sorourkhah, A. (2022). Coping uncertainty in the supplier selection problem using a scenario-based approach and distance measure on type-2 intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy optimization and modeling journal*, 3(1), 64–71. DOI:10.30495/fomj.2022.1953705.1066
- [2] Eydi, A., & Mansouri, Z. (2023). The open location-routing problem for multi-objective optimization of sustainable supply chain considering social concerns. *Journal of industrial and management optimization*, 19(10), 7423–7446. DOI:10.3934/jimo.2023003
- [3] Karasakal, O., Karasakal, E., & Töreyn, Ö. (2023). A partial coverage hierarchical location allocation model for health services. *European journal of industrial engineering*, 17(1), 115–147. DOI:10.1504/EJIE.2023.10045477
- [4] Bruni, M. E., Conforti, D., Sicilia, N., & Trotta, S. (2006). A new organ transplantation location-allocation policy: a case study of Italy. *Health care management science*, 9(2), 125–142. DOI:10.1007/s10729-006-7661-z
- [5] Kong, N., Schaefer, A. J., Hunsaker, B., & Roberts, M. S. (2010). Maximizing the efficiency of the U.S. liver allocation system through region design. *Management science*, 56(12), 2111–2122. DOI:10.1287/mnsc.1100.1249
- [6] Demirci, M. C., Schaefer, A. J., Edwin Romeijn, H., & Roberts, M. S. (2012). An exact method for balancing efficiency and equity in the liver allocation hierarchy. *INFORMS journal on computing*, 24(2), 260–275. DOI:10.1287/ijoc.1110.0445
- [7] Beliën, J., De Boeck, L., Colpaert, J., Devesse, S., & Van Den Bossche, F. (2013). Optimizing the facility location design of organ transplant centers. *Decision support systems*, 54(4), 1568–1579. DOI:10.1016/j.dss.2012.05.059
- [8] Zahiri, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Pishvae, M. S. (2014). A robust possibilistic programming approach to multi-period location-allocation of organ transplant centers under uncertainty. *Computers and industrial engineering*, 74(1), 139–148. DOI:10.1016/j.cie.2014.05.008
- [9] Zahiri, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mohammadi, M., & Jula, P. (2014). Multi objective design of an organ transplant network under uncertainty. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 72, 101–124. DOI:10.1016/j.tre.2014.09.007
- [10] Mantecchini, L., Paganelli, F., Morabito, V., Ricci, A., Peritore, D., Trapani, S., ... & Costa, A. N. (2016). Transportation of organs by air: safety, quality, and sustainability criteria. *Transplantation proceedings* (Vol. 48, No. 2, pp. 304-308). Elsevier. DOI: 10.1016/j.transproceed.2015.12.050
- [11] Cacchiani, V., Malandri, C., Mantecchini, L., & Paganelli, F. (2018). A study on the optimal aircraft location for human organ transportation activities. *Transportation research procedia*, 30, 314–323. DOI:10.1016/j.trpro.2018.09.034
- [12] Savaşer, S., Kınay, Ö. B., Kara, B. Y., & Cay, P. (2019). Organ transplantation logistics: a case for Turkey. *OR spectrum*, 41(2), 327–356. DOI:10.1007/s00291-018-0538-y
- [13] Klein, A. S., Messersmith, E. E., Ratner, L. E., Kochik, R., Baliga, P. K., & Ojo, A. O. (2010). Organ donation and utilization in the United States, 1999-2008: special feature. *American journal of transplantation*, 10(4 PART 2), 973–986. DOI:10.1111/j.1600-6143.2009.03008.x
- [14] Oztekin, A., Kong, Z. J., & Delen, D. (2011). Development of a structural equation modeling-based decision tree methodology for the analysis of lung transplantations. *Decision support systems*, 51(1), 155–166. DOI:10.1016/j.dss.2010.12.004
- [15] Lunz, J., Hinsdale, L., King, C., Pastush, R., Buenvenida, M., & Harmon, M. (2017). The coordination of allocation: logistics of kidney organ allocation to highly sensitized patients. *Human immunology*, 78(1), 16–18. DOI:10.1016/j.humimm.2016.10.002
- [16] Caruso, V., & Daniele, P. (2018). A network model for minimizing the total organ transplant costs. *European journal of operational research*, 266(2), 652–662. DOI:10.1016/j.ejor.2017.09.040
- [17] Goli, A., Ala, A., & Mirjalili, S. (2023). A robust possibilistic programming framework for designing an organ transplant supply chain under uncertainty. *Annals of operations research*, 328(1), 493–530. DOI:10.1007/s10479-022-04829-7