



Research in Production and Operations Management

University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329

Vol. 17, Issue 2, No. 45, 2026



DOI: [10.22108/pom.2026.147333.1644](https://doi.org/10.22108/pom.2026.147333.1644)

(Research paper)

Facility Location for Organ Transplant Networks with Backup Transplant Centers

Elham Sharifi

Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran,
elham.sharifi9194@gmail.com

Ali Shahandeh *

Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran,
ali-nook@iut.ac.ir

Mehdi Iranpoor

Department of Industrial and Systems Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran,
iranpoor@iut.ac.ir

Purpose: Organ transplantation is one of the most critical healthcare services for patients with end-stage organ failure, yet a substantial gap persists between organ supply and demand. Limited transport time and short organ viability often result in long waiting lists and high patient mortality. Designing an efficient and resilient organ transplant network is therefore essential to improve organ utilization and patient outcomes. This study develops a multi-objective facility location-allocation model for organ transplant networks. The model simultaneously determines optimal locations for organ procurement and transplant centers, assigns hospitals and demand regions, and manages organ flows while accounting for potential disruptions at transplant centers. Unlike previous studies, this work incorporates backup transplant centers to enhance network resilience and ensure continuity of service when primary centers fail due to technical issues, capacity overload, or emergencies.

Design/Methodology/Approach: A bi-objective mixed-integer linear programming model is formulated to design an efficient organ transplant network. The model minimizes total cost and maximizes weighted organ flow while considering travel-time and ischemia constraints. The network

* Corresponding author, [0000-0002-4007-8289](https://orcid.org/0000-0002-4007-8289)

2981-0329 / © University of Isfahan



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

How to cite: Sharifi, E., Shahandeh, A. and Iranpoor, M. (2026). Facility Location for Organ Transplant Networks with Backup Transplant Centers. *Research in Production and Operations Management*, 17(2), 25-51. doi: 10.22108/pom.2026.147333.1644

includes hospitals, organ procurement centers, transplant centers, transportation modes, and demand regions over a multi-period horizon. Each primary transplant center is assigned a backup center to improve reliability during disruptions. Because the problem becomes computationally challenging for medium- and large-scale instances, a multi-objective simulated annealing (MOSA) algorithm is developed to obtain high-quality solutions efficiently. The model is evaluated using test instances and compared with the augmented ε -constraint method, demonstrating superior computational performance while maintaining solution quality.

Findings: The results indicate that the proposed location–allocation model effectively balances total network cost and organ flow while improving system resilience. The MOSA algorithm generates high-quality Pareto solutions in significantly shorter computational time, particularly for medium- and large-scale problems. Although the augmented ε -constraint method performs slightly better for small instances, the proposed heuristic becomes more efficient as problem size increases. Sensitivity analysis shows that higher disruption probability increases total cost and reduces organ flow, underscoring the importance of backup transplant centers. Additionally, organ demand increases cost only until supply becomes the limiting factor. Overall, the findings confirm that incorporating resilience considerations substantially improves organ transplant network design.

Research limitations/implications: The study assumes deterministic demand, supply, and transportation conditions, along with a predefined disruption probability. However, real organ transplant systems involve uncertainties such as weather conditions, traffic congestion, donor availability, and unexpected operational failures. Future research may extend the model by incorporating more practical factors, including probability of successful transplantation at each center, patient waiting times, and the use of air transportation. Further studies may also examine capacity constraints, strategies to reduce organ wastage, and joint location of transportation agencies with other facilities to better assess their impact on time and cost.

Practical implications: The proposed decision-support framework assists healthcare managers in identifying optimal locations for organ procurement and transplant centers and making more effective allocation decisions. By incorporating backup transplant centers, it supports reliable planning and ensures service continuity during disruptions. The model helps reduce transportation time, improve transplant success rates, and minimize organ wastage, leading to more efficient resource use and saving more lives. From a managerial perspective, it reduces operational costs and enhances overall system performance. Moreover, the MOSA algorithm enables efficient solution of large-scale planning problems, making the framework practical for real-world decision-making.

Social implications: Improving organ transplant network design yields significant social benefits. By reducing organ losses caused by transport delays and increasing reliability during disruptions, the proposed approach can lower patient mortality, shorten waiting lists, and improve access to transplant services. Better utilization of donated organs also strengthens public trust in organ donation systems and supports fairer access to healthcare. Overall, it enhances patients' quality of life and contributes to a more resilient healthcare system.

Originality/value: This study offers several original contributions. First, it incorporates backup transplant centers into a strategic facility location–allocation model to improve resilience against disruptions. Second, it simultaneously maximizes weighted organ flow while considering travel-time and ischemia constraints. Third, it integrates hospitals as the first operational level and models the transfer of brain-dead donors from hospitals to procurement centers, an aspect rarely addressed in prior research. Finally, the development of a multi-objective simulated annealing algorithm provides a practical solution approach for large-scale organ transplant network design problems.

Keywords: Organ transplant network, Facility location-allocation, Healthcare logistics, Multi-objective optimization, Mixed-integer programming, Simulated annealing, Network resilience, Backup facilities



پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۷، شماره ۲، پیاپی ۴۵، ۱۴۰۵
دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۶ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۱ ص ۲۵-۵۱



DOI: [10.22108/pom.2026.147333.1644](https://doi.org/10.22108/pom.2026.147333.1644)

(مقاله پژوهشی)

مکان‌یابی تسهیلات در شبکه پیوند عضو با در نظر گرفتن مراکز پشتیبان

الهام شریفی^۱؛ علی شاهنده^{۲*}؛ مهدی ایرانپور^۳

۱- کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی صنایع و سیستمها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، elham.sharifi9194@gmail.com

۲- استاد دانشکده مهندسی صنایع و سیستمها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، ali-nook@iut.ac.ir

۳- استادیار دانشکده مهندسی صنایع و سیستمها، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، iranpoor@iut.ac.ir

چکیده: پیوند عضو از شاخه‌های اصلی حوزه سلامت و از روش‌های درمانی پیچیده در علم پزشکی است که در برخی موارد، از جمله بیماری‌های حاد کبدی، قلبی و ریوی، تنها درمان ممکن است. با این حال، تعادل‌نداشتن بین عرضه و تقاضا، به لیست‌های انتظار طولانی و مرگ‌ومیر بیماران پیش از دریافت عضو منجر می‌شود. این مشکل، توجه به بهینه‌سازی فرآیند اهدای عضو و استفاده کارآمد از آن را ضروری می‌کند. با توجه به اینکه تعداد مراکز پیوند در سطح یک کشور محدود است و کل تقاضا باید از سوی این مراکز پوشش داده شود، در صورت از دسترس خارج شدن هر کدام از مراکز در دوره‌های زمانی، خسارات جبران‌ناپذیری به سیستم پیوند عضو وارد و موجب از دست رفتن اعضای اهدایی و پایمال‌شدن حق بیماران داوطلب می‌شود. در این پژوهش، با لحاظ احتمال از دسترس خارج شدن مراکز پیوند، علاوه بر تعیین تعداد و مکان بهینه تسهیلات شبکه پیوند، برای هر کدام از مراکز پیوندی که استقرار می‌یابند، یکی از مراکز پیوند پشتیبان در نظر گرفته می‌شود تا در صورت لزوم، تقاضای پیوند در مرکز پیوند پشتیبان انجام شود و خسارات به حداقل برسد. در مدل برنامه‌ریزی چندهدفه ارائه شده، علاوه بر حداقل‌سازی هزینه‌های استقرار و جریان بین مراکز، حداکثرسازی جریان عبوری بین مراکز نیز در نظر گرفته می‌شود تا کیفیت عمل پیوند انجام‌شده افزایش و احتمال از دست رفتن عضو، کاهش یابد. به‌منظور حل مسائل در ابعاد بزرگ، یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید چندهدفه ارائه شده است. نتایج بر داده‌های وزارت بهداشت نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با روش محدودیت اپسیلون تعمیم‌یافته، در حل مسائل متوسط و بزرگ، عملکرد بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی: شبکه پیوند عضو، فراهم‌آوری عضو، مکان‌یابی-تخصیص، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه



۱- مقدمه

پیوند عضو از شاخه‌های اصلی حوزه سلامت و از روش‌های درمانی پیچیده در علم پزشکی است که در برخی موارد، از جمله بیماری‌های حاد کبدی، قلبی و ریوی، تنها درمان ممکن است. با وجود پیشرفت‌های پزشکی، هنوز بیماران زیادی در جهان، جان خود را در اثر دریافت نکردن به موقع عضو پیوندی از دست می‌دهند. در فرآیند پیوند عضو، مشکلات زیادی از قبیل وجودداشتن یک لیست انتظار واحد برای بیماران، دیررساندن فرد مرگ مغزی به بیمارستان، نبود مراقبت‌های مناسب، کمبود تسهیلات پزشکی پیوند عضو و حمل و نقل مناسب و لیست‌های انتظار بلند وجود دارد، از طرف دیگر، میزان تقاضا برای دریافت عضو از عرضه آن بیشتر بوده و همین امر موجب تشکیل لیست‌های انتظار پیوند طولانی شده است. این مسائل بر این موضوع دلالت دارند که طراحی یک سیستم عملکردی مناسب برای فرآیند پیوند عضو، کار ساده‌ای نیست. با توجه به اینکه اعضای پیوندی منابع باارزش و کمیابی‌اند، لازم است استراتژی و سیاست‌های مؤثری برای مدیریت آنها در نظر گرفته شود. فعالیت‌های مدیریتی مؤثر و کارآمد در شبکه پیوند عضو (OTN)^۱ شامل اهدا، تهیه، تخصیص، نگهداری و انتقال عضو مدنظر با طراحی مناسب شبکه پیوند عضو و همچنین برنامه‌ریزی‌های عملیاتی موردنیاز در شبکه حاصل می‌شود؛ بنابراین با مدیریت صحیح و طراحی یک شبکه زنجیره تأمین کارآمد، تعداد اعضای پیوندی از دست رفته به حداقل می‌رسد و آمار مرگ و میر ناشی از آن کاهش می‌یابد.

هر عضو پیوندی تنها برای مدت زمان محدود و مشخصی (زمان ایسکمی)، بدون جریان خون و خارج از بدن نگهداری می‌شود و این زمان، از محدودیت‌های اصلی در فرآیند پیوند عضو است. با توجه به زمان ایسکمی اعضای پیوندی، موضوع تخصیص، حمل و نقل و انتقال بیماران و عضو پیوندی، بسیار حائز اهمیت است و بنا بر ضرورت و با توجه به امکانات، از شیوه و گونه‌های مختلف حمل و نقل استفاده می‌شود. معمولاً دو روش به منظور تعیین مناسب‌ترین گیرنده عضو اهدایی در شبکه پیوند وجود دارد: الف- متمرکز، مستلزم وجود یک لیست واحد از بیماران در انتظار در سطح منطقه یا کشور است. در این سیستم حتی اگر یک بیمار در انتظار دریافت عضو، در همان بیمارستانی بستری باشد که عضو اهدا شده است، این بیمار لزوماً دریافت‌کننده نخواهد بود ([Belien et al., 2013](#))؛ ب- سلسله‌مراتبی: در این رویکرد، چندین لیست انتظار در داخل یک کشور در نظر گرفته می‌شود که هر کدام از آنها با یک ساختار یا منطقه جغرافیایی از قبیل بیمارستان، شهر یا ناحیه در ارتباط است. زمانی که یک عضو پیوندی در دسترس قرار می‌گیرد، بیماران متقاضی از پایین‌ترین سطح ساختار سلسله‌مراتبی بررسی می‌شوند و اگر گزینه مناسبی پیدا نشود، بیماران سطح بعدی بررسی می‌شوند. این فرآیند تا پیداشدن مناسب‌ترین گزینه در ساختار تکرار می‌شود ([Bertsimas et al., 2013](#)). گرچه تخصیص عضو به بیماران در روش متمرکز عادلانه‌تر است، این تضمین در روش سلسله‌مراتبی وجود دارد که عضو اهدایی به نزدیک‌ترین گیرنده مناسب می‌رسد.

هدف از این پژوهش، ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوهدفه جامع برای مسئله مکان‌یابی-تخصیص تسهیلات شبکه پیوند عضو (شامل بیمارستان‌ها، مراکز فراهم‌آوری و مراکز پیوند) است که سه تمایز کلیدی با مطالعات پیشین دارد:

الف- مدل پیشنهادی احتمال از دسترس خارج شدن مراکز پیوند را در نظر می‌گیرد و برای هر مرکز اصلی، یک

مرکز پشتیبان تعیین می‌کند تا در صورت وقوع اختلال، تقاضای مناطق تحت پوشش آن مرکز از سوی پشتیبان تأمین شود؛

ب- علاوه بر کمینه‌سازی هزینه‌های استقرار و جریان، مدل جریان عبوری عضو را بین مراکز فراهم‌آوری و مراکز پیوند، با در نظر گرفتن فاصله (زمان سفر) حداکثرسازی می‌کند تا کیفیت پیوند افزایش و احتمال از دست رفتن عضو کاهش یابد؛

ج- این پژوهش، نقش حیاتی بیمارستان‌ها را به‌عنوان اولین سطح شبکه و جریان انتقال فرد مرگ مغزی را از بیمارستان به مرکز فراهم‌آوری، به‌دلیل محدودیت زمانی حیاتی این مرحله در مدل لحاظ می‌کند؛ جنبه‌ای که در پیشینه موجود مغفول مانده است. برای حل مدل در ابعاد بزرگ نیز، یک الگوریتم ابتکاری چندهدفه مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید توسعه داده می‌شود.

ادامه پژوهش به شرح زیر است: در بخش دوم، مطالعات پیشین در این حوزه بررسی خواهد شد؛ سپس در بخش سوم، مسئله و مدل ریاضی تعریف می‌شود؛ در بخش چهارم، روش حل مدل و نتایج عددی توضیح داده خواهد شد؛ در فصل پنجم بحث و تحلیل نتایج و در بخش ششم، نتیجه‌گیری و بیان فرصت‌های پژوهش‌های آتی ارائه خواهد شد.

۲- پیشینه موضوع

مسائل در شبکه پیوند، عضو از لحاظ افق برنامه‌ریزی به سه دسته مسائل تصمیم‌گیری بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت تقسیم می‌شوند. در حوزه مسائل استراتژیک و بلندمدت، تمرکز بیشتر مقالات بر مکان‌یابی-تخصیص تسهیلات شبکه پیوند و طراحی ساختار منطقه‌ای سلسله‌مراتبی است. در این رابطه، استال و همکاران^۲ (۲۰۰۵) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح را به‌منظور تعیین ساختار منطقه‌ای بهینه برای تخصیص سلسله‌مراتبی در شبکه پیوند کبد ایالات متحده ارائه دادند که هدف مدل آنها بیشینه‌کردن تعداد پیوندهای درون منطقه‌ای (تعداد پیوندهای ممکن در یک ناحیه با توجه به محدودیت‌های موجود) و همچنین برابری جغرافیایی از طریق بیشینه‌کردن کمترین نرخ پیوند در هر کدام از مناطق است. با توجه به فاصله جغرافیایی بین مناطق و برابری عضوهای اهداشده در نواحی مختلف، مسئله برابری جغرافیایی و نرخ پوشش مناطق مطرح می‌شود. آنها در مدل خود برای هر ناحیه جغرافیایی یک مقدار پذیرفتنی را برای نرخ پیوند تعیین کردند که ممکن است هزینه‌های بیشتری به شبکه تحمیل کند؛ اما با توجه به محدودیت زمانی موجود در انتقال عضو، توزیع عضوهای اهداشده باید عادلانه باشد و در حد ممکن، همه مناطق را پوشش دهد؛ به‌طوری که کمترین نرخ پوشش داده شده در یک منطقه بیشینه شود و پیوندهای انجام‌شده در یک ناحیه، متمرکز نباشد. کونگ و همکاران^۳ (۲۰۱۰)، مدل استال و همکاران (۲۰۰۵) را در ارتباط با سیستم پیوند ایالات متحده به‌کار بردند؛ با این تفاوت که هدف، تنها بیشینه‌سازی جریان درون منطقه‌ای است، روش آنها در ایجاد ساختار منطقه‌ای متفاوت و براساس مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با الگوریتم شاخه و قیمت^۴ است. منظور از جریان بین تسهیلات، مجموع تعداد عضوهایی است که در محدوده جغرافیایی مشخصی براساس محدودیت‌های زمانی انتقال عضو و گونه حمل‌ونقل انتخاب‌شده، از بیمارستان اهداکننده یا مراکز فراهم‌آوری عضو (مبدأ) به مراکز گیرنده عضو (مقصد) ارسال می‌شود. آنها برای اعتبارسنجی مدل خود، یک مطالعه موردی را بر

سیستم پیوند کشور انجام داده‌اند. ظهیری و همکاران^۵ (۲۰۱۴) مطالعه‌ای را بر مسئله مکانیابی-تخصیص مراکز پیوند عضو در شبکه پیوند ایران انجام دادند. آنها با لحاظ عدم قطعیت در برخی پارامترهای اصلی، یک مدل برنامه‌ریزی استوار امکانی^۶ را ارائه دادند. مدل پیشنهادی آنها به صورت چند دوره‌ای و هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌های شبکه است. ظهیری و همکاران (۲۰۱۴) در ادامه پژوهش قبلی خود، مدل شبکه را توسعه دادند و یک مدل مکانیابی-تخصیص چندهدفه را برای طراحی شبکه پیوند عضو در شرایط عدم قطعیت ارائه کردند که علاوه بر مجموع زمان سفر بین مراکز، زمان انتظار عضو را در مرکز پیوند برای انجام عمل پیوند نیز در نظر می‌گیرد و کلیه هزینه‌های شبکه را به طور هم‌زمان کمینه‌سازی می‌کند. به منظور محاسبه زمان انتظار عضو در صف، از سیستم صف اولویت‌دار استفاده و به جهت مقابله با عدم قطعیت داده‌ها، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه فازی ارائه کرده‌اند. برای حل مسائل بزرگ از یک الگوریتم ابتکاری استفاده کرده‌اند که ترکیبی از شبیه‌سازی تبرید^۷ و تکامل دیفرانسیل^۸ است.

رجم‌وهان و همکاران^۹ (۲۰۱۷) در پژوهشی متفاوت، مدل تک‌هدفه را به منظور مکانیابی و تخصیص مراکز پیوند عضو بر مبنای روش p-میانه ارائه دادند. هدف در این پژوهش، کمینه‌سازی فواصل وزن‌دار میان نواحی تقاضا و مراکز پیوند است که به منظور محاسبه فواصل بین نقاط از روش دایره بزرگ استفاده شده است. همچنین به منظور ارزیابی کارایی مدل، مطالعه موردی بر سیستم پیوند کشور هند انجام داده‌اند. آقازاده و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۸) در پژوهش خود، عدم قطعیت پارامترها را در نظر گرفته و یک مدل مکانیابی و تخصیص چندهدفه را در شرایط عدم قطعیت برای شبکه پیوند عضو ارائه کرده‌اند که در آن جنبه‌های دیگری از شبکه پیوند عضو، از قبیل تعداد عضوهای اهدایی مورد انتظار، نرخ پوشش مناطق براساس زمان ایسکمی هر عضو و شاخص ایمنی نقاط کاندید استقرار مراکز پیوند را در نظر گرفته‌اند. مدل آن‌ها شامل سه تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها، بیشینه‌سازی نرخ پوشش و تعداد اعضای اهدایی مورد انتظار است. همچنین برای رویارویی با عدم قطعیت داده‌ها، از مدل برنامه‌ریزی استوار امکانی استفاده و به حل دقیق مدل در ابعاد کوچک اکتفا کرده‌اند. در ادامه، ربانی و طالبی^{۱۱} (۲۰۱۹) یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه را به طور مشابه برای طراحی شبکه پیوند عضو در شرایط عدم قطعیت ارائه کرده‌اند. اهداف پژوهش آنها، کمینه‌سازی هزینه‌ها و همچنین نابرابری جغرافیایی میان نواحی متقاضی دریافت عضو است. برای مقابله با عدم قطعیت پارامترها، از مجموعه‌های فازی در مدل ریاضی استفاده و در نهایت مقایسه و تحلیل حساسیت بر دو پارامتر تأثیرگذار رضایت والدین برای اهدا و نرخ زیست‌پذیری اعضای پیوندی انجام شده است. جدول ۱، خلاصه‌ای از تحقیقات مرتبط با شبکه پیوند عضو را نشان می‌دهد.

جدول ۱- بررسی اجمالی مطالعات طراحی شبکه پیوند عضو

Table 1- Overview of organ transplant network design studies

مرجع	توابع هدف					مدل ریاضی و روش حل
	هزینه	زمان سفر	تعداد پیوندهای ممکن	نرخ پوشش مناطق	جریان بین تسهیلات	لحاظ مراکز پشتیبان
استال و همکاران (۲۰۰۵)	-	-	✓	✓	-	-
کونگ و همکاران (۲۰۱۰)	-	-	-	-	✓	-
ظهیری و همکاران	✓	-	-	-	-	-

مرجع	توابع هدف					مدل ریاضی و روش حل
	هزینه	زمان سفر	تعداد پیوندهای ممکن	نرخ پوشش مناطق	جریان بین تسهیلات	لحاظ مراکز پشتیبان
(۲۰۱۴)						
ظهیری و همکاران (۲۰۱۴)	✓	✓	-	-	-	برنامه‌ریزی چندهدفه فازی، الگوریتم ابتکاری
رجموهان و همکاران (۲۰۱۷)	-	✓	-	-	-	p-میانه، حل دقیق
آقازاده و همکاران (۲۰۱۸)	✓	-	-	✓	-	مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دوهدفه، برنامه‌ریزی استوار امکانی
ربانی و طالبی (۲۰۱۹)	✓	-	-	✓	-	مدل برنامه‌ریزی چندهدفه، محدودیت اپسیلون
گلی و همکاران ^{۱۲} (۲۰۲۳)	✓	✓	-	-	-	بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی- نظریه اعتبار
سلیمیان و همکاران ^{۱۳} (۲۰۲۳)	✓	✓	✓	-	-	برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط - روش ترکیبی بهینه‌سازی استوار و رویکرد سازشی ABS
فتح‌اللهی فرد و همکاران ^{۱۴} (۲۰۲۵)	✓	-	✓	-	-	مسیریابی و زمان‌بندی - الگوریتم فرا ابتکاری
پژوهش حاضر	✓	✓	-	-	✓	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه، روش مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید چندهدفه

گلی و همکاران (۲۰۲۳) نیز در پژوهش خود، عدم قطعیت پارامترها را لحاظ کردند و یک مدل ریاضی جدید را به‌جهت بهینه‌سازی زنجیره تأمین عضو تحت عدم قطعیت زمان حمل‌ونقل ارائه دادند. در این پژوهش، مدل برنامه‌ریزی امکانی و روش حل مبتنی بر شبیه‌سازی را برای مکان‌یابی، تخصیص و توزیع مرکز پیوند عضو توسعه داده‌اند. مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت فازی، تقاضای عضو و زمان حمل‌ونقل، هزینه کل را کمینه می‌کند. علاوه بر این، یک بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی جدید با استفاده از نظریه اعتبار برای مقابله با عدم قطعیت در بهینه‌سازی این مدل ریاضی، استفاده شده است. سلیمیان و همکاران (۲۰۲۳)، جنبه دیگری از شبکه پیوند را در نظر گرفته و کیفیت عضوهای پیوندی را یک تابع هدف در مدل مطرح کرده‌اند. آنها یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط چندهدفه را برای شبکه پیوند عضو ارائه دادند که توابع هدف این مدل، به ترتیب کاهش هزینه کل، کاهش زمان کل انتقال اعضا و حداکثرسازی کیفیت اعضای منتقل شده است. عدم قطعیت در پژوهش آنها، ناشی از شرایط آب و هوایی و سرعت وسایل نقلیه در نظر گرفته و برای مقابله با عدم قطعیت، روش حل ترکیبی مبتنی بر بهینه‌سازی استوار و رویکرد سازشی ABS ارائه شده است. فتح‌اللهی فرد و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهش خود، علاوه بر کیفیت عضو پیوندی، شانس موفقیت پیوند را مهم‌ترین فاکتور در نظر گرفته و یک مدل بهینه‌سازی را توسعه داده‌اند که مسیریابی و زمان‌بندی را برای پیوند عضو ادغام می‌کند و شامل لجستیک تحویل و مسیریابی آمبولانس‌های حامل اعضاست. برای حل مدل، الگوریتم فراابتکاری را ترکیبی ارائه دادند که شبیه‌سازی تبرید را با

یک استراتژی جست‌وجوی تصادفی همسایگی و مفهوم مهندسی اجتماعی ادغام می‌کند. به‌طور کلی در بیشتر مطالعات انجام‌شده، زمان ایسکمی محدودیت اصلی در نظر گرفته می‌شود و تنوع آنها بیشتر مربوط به توابع هدف و نوع روش‌های حل استفاده‌شده است.

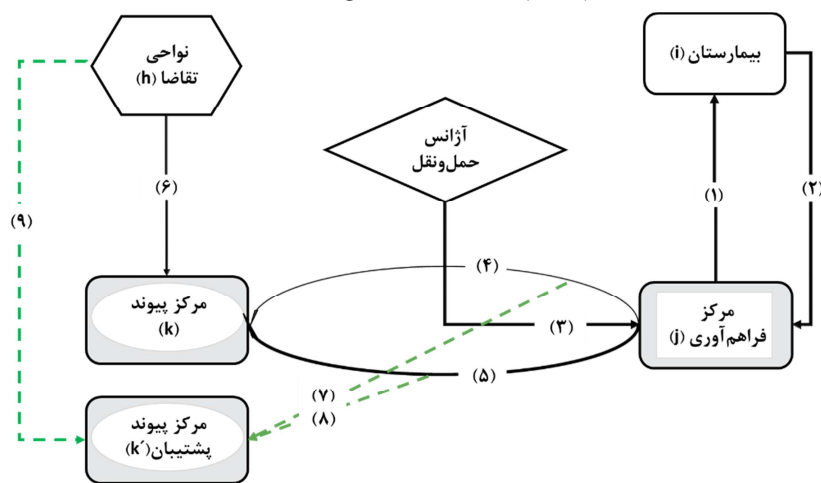
در این پژوهش، به‌منظور کاهش مشکلات برنامه‌ریزی در شبکه پیوند، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه به‌منظور مکان‌یابی و تخصیص بهینه تسهیلات شبکه پیوند ارائه می‌شود. موضوعی که در طراحی شبکه پیوند عضو به آن توجه نشده است، احتمال از دسترس خارج شدن تسهیلات پیوند و موضوع پشتیبان‌گیری است. با توجه به اینکه تعداد مراکز پیوند در سطح یک کشور محدود است و کل تقاضا از سوی این مراکز محدود پوشش داده می‌شود، در صورت از دسترس خارج شدن هرکدام از مراکز در دوره‌های زمانی، خسارات جبران‌ناپذیری به سیستم پیوند عضو وارد و موجب از دست رفتن اعضای اهدایی و پایمال‌شدن حق بیماران متقاضی این مراکز می‌شود. به همین منظور، لحاظ پشتیبان برای از مراکز پیوند در صورت از دسترس خارج شدن هر مرکز، تقاضای تخصیص‌یافته از سوی مرکز پیوند پشتیبان پوشش داده می‌شود و خسارات به حداقل می‌رسد. به‌عنوان دومین نوآوری، علاوه بر کمینه‌سازی مجموع کل هزینه‌های شبکه پیوند، سعی می‌شود جریان عضو بین مراکز فراهم‌آوری و مراکز پیوند با لحاظ زمان سفر بیشینه شود؛ به این صورت که جریان عضو بین دو تسهیل با مسافت (زمان سفر) بین آنها ارتباط دارد تا کیفیت عمل پیوند انجام‌شده افزایش و احتمال از دست رفتن عضو، کاهش یابد. به‌عنوان نوآوری سوم، به‌منظور نزدیک‌کردن مدل ریاضی به واقعیت، با توجه به اینکه در مجموعه مطالعات گذشته به زمان انتقال فرد مرگ مغزی از بیمارستان محل گزارش به مرکز فراهم‌آوری اعضا برای عمل برداشت عضو اشاره‌ای نشده است و به‌دلیل محدودیت زمانی که برای خارج کردن عضو از بدن فرد مرگ مغزی وجود دارد، شبکه بیمارستان‌ها در سطح اول تسهیلات و جریان بین بیمارستان‌ها با مراکز فراهم‌آوری عضو در نظر گرفته می‌شود. در ضمن، در این پژوهش یک الگوریتم ابتکاری بر مبنای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه برای حل مسائل در ابعاد بزرگ توسعه داده می‌شود.

۳- مفاهیم و مدل ریاضی

مسئله طراحی شبکه پیوند عضو شامل تصمیم‌گیری درباره مکان استقرار مراکز فراهم‌آوری، مکان استقرار مراکز پیوند، تخصیص بیمارستان‌ها به مراکز فراهم‌آوری، تخصیص مراکز فراهم‌آوری عضو به مراکز پیوند، انتخاب گونه حمل‌ونقل مناسب در هر دوره برای انتقال عضو اهداشده از مرکز فراهم‌آوری به مرکز پیوند و تعیین میزان جریان بهینه بین مراکز است.

شمای کلی از شبکه پیوند عضو و تعامل میان تسهیلات، در شکل ۱ نشان داده شده است. به‌محض شناسایی بیمار با کمای عمیق، که احتمال مرگ مغزی آن می‌رود، بیمارستان، واحد فراهم‌آوری اعضای پیوندی را مطلع می‌کند و بلافاصله یک گروه هماهنگ‌کننده از مرکز فراهم‌آوری به بیمارستان اعزام می‌شود (کمان ۱)؛ پس از انجام معاینات کامل او، در صورت احتمال قوی به مرگ مغزی، به اطلاع مرکز رسانده می‌شود. مرکز فراهم‌آوری، قابلیت اهدای عضو بیمار را بررسی می‌کند و در صورت تأیید، مراتب به‌منظور جلب رضایت اولیای دم به هماهنگ‌کننده اطلاع داده می‌شود. با اعلام رضایت، فرد بیمار به‌همراه گروه هماهنگ‌کننده به مرکز فراهم‌آوری منتقل می‌شود (کمان ۲). با بستری شدن بیمار در بخش مراقبت‌های ویژه، بررسی‌های نهایی تخصصی انجام و گزارش مربوطه

به‌همراه اطلاعات موردنیاز، به‌طور هم‌زمان برای مسئول تخصیص عضو در مرکز پیوند وزارت بهداشت ارسال می‌شود تا داوطلب دریافت عضو تعیین شود. با تأیید مرگ مغزی فرد و رضایت خانواده او بر اهدای عضو، عمل برداشت عضو از سوی گروه پزشکی انجام می‌شود. متناسب با فاصله مرکز فراهم‌آوری تا مرکز پیوند و همچنین زمان در دسترس برای انتقال عضو اهدایی، وسیله حمل و نقل مناسب برای انتقال عضو به مرکز، تخصیص می‌یابد (کمان ۳) و در نهایت عضو اهداشده با رعایت شرایط لازم به مرکز پیوند تعیین‌شده حمل می‌شود (کمان ۴ و ۵). بیمار تعیین‌شده به‌طور هم‌زمان برای دریافت عضو از ناحیه تقاضا به مرکز پیوند تعیین‌شده برای انجام عمل پیوند منتقل می‌شود (کمان ۶). در صورت در دسترس نبودن مرکز پیوند تعیین‌شده و با توجه به محدودیت‌های زمانی عضو اهدایی و بیمار، گیرنده عضو به مرکز پیوند پشتیبان فرستاده می‌شود (کمان ۷، ۸).



شکل ۱- شمای کلی شبکه پیوند عضو

Fig. 1- General diagram of the organ transplant network

مجموعه‌ها عبارت‌اند از:

مجموعه‌ها	تعریف
I	اندیس مکان بیمارستان‌ها ($i \in I$)
J	اندیس مکان‌های بالقوه برای استقرار مراکز فراهم‌آوری عضو ($j, j' \in J, J \subseteq I$)
K	اندیس مکان‌های بالقوه برای استقرار مراکز پیوند عضو ($k, k' \in K, K \subseteq I$)
H	اندیس مناطق متقاضی دریافت عضو ($h, h \in H$)
O	مجموعه اعضای پیوندی ($o \in O$)
T	مجموعه دوره‌های زمانی ($t \in T$)

پارامترها عبارت‌اند از:

پارامترها	تعریف
C_j	هزینه ثابت استقرار مرکز فراهم‌آوری در مکان j
C'_k	هزینه ثابت استقرار مرکز پیوند در مکان k
R_{jo}	هزینه برداشت عضو o در مرکز فراهم‌آوری j
R'_{ko}	هزینه تجهیز مرکز پیوند k به امکانات لازم برای پیوند عضو o
Cd_{ij}	هزینه انتقال اهداکننده از بیمارستان i به مرکز فراهم‌آوری j و ($i \neq j$)
Cg_{jk}	هزینه انتقال عضو از مرکز فراهم‌آوری j به مرکز پیوند k با گونه حمل و نقل زمینی ($j \neq k$)

هزینه انتقال عضو از مرکز فراهم‌آوری j به مرکز پیوند k با گونه حمل‌ونقل هوایی ($j \neq k$)	Ca_{jk}
هزینه انتقال بیمار متقاضی از ناحیه متقاضی h به مرکز پیوند k	Ch_{hk}
مدت‌زمان انتقال اهداکننده از بیمارستان i به مرکز فراهم‌آوری j	Td_{ij}
مدت‌زمان انتقال اهداکننده داخل بیمارستان، زمانی که مرکز فراهم‌آوری در بیمارستان i استقرار یابد.	Ti_i
مدت‌زمان انتقال عضو از مرکز فراهم‌آوری j به مرکز پیوند k با گونه حمل‌ونقل زمینی	Tg_{jk}
مدت‌زمان انتقال عضو از مرکز فراهم‌آوری j به مرکز پیوند k با گونه حمل‌ونقل هوایی	Ta_{jk}
مدت‌زمان انتقال عضو داخل بیمارستان، زمانی که مرکز فراهم‌آوری j و مرکز پیوند هر دو در یک بیمارستان استقرار یابند.	Ti'_j
مدت‌زمان انتقال بیمار گیرنده از ناحیه متقاضی h به مرکز پیوند k	Th_{hk}
میانگین تعداد اهداکنندگان عضو بیمارستان i در دوره t	A_i^t
تعداد اعضای نوع o که از هر اهداکننده به دست می‌آید.	So
حداقل سطح رضایتمندی تأمین تقاضا برای عضو o در ناحیه متقاضی h	β_{ho}
حداکثر زمانی که بیمار اهداکننده عضو در ICU نگهداری می‌شود.	T_{max}
زمان ایسکمی عضو o	IS_o
مدت‌زمان عمل برداشت عضو o	TS_o
تعداد تقاضای بیماران ناحیه متقاضی h برای دریافت عضو o در دوره t	D_{ho}^t
احتمال از دسترس خارج شدن مرکز پیوند k	λ_k
یک عدد به‌اندازه کافی بزرگ	M

در صورتی که زمان انتقال عضو o با گونه حمل‌ونقل زمینی، بین مرکز فراهم‌آوری j و مرکز پیوند k از مقدار زمان ایسکمی عضو o بیشتر باشد، عضو پیوندی فاسد می‌شود، امکان ارسال آن وجود ندارد و مقدار xg_{jko} مقدار صفر می‌گیرد.

$$xg_{jko} = \begin{cases} 1 & Tg_{jk} < IS_o \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad \forall j, k, o$$

همچنین در صورتی که زمان سفر با گونه حمل‌ونقل هوایی میان مرکز فراهم‌آوری j و مرکز پیوند k از مقدار زمان ایسکمی عضو o بیشتر باشد، عضو پیوندی فاسد می‌شود، امکان ارسال آن وجود ندارد و مقدار xa_{jko} مقدار صفر می‌گیرد.

$$xa_{jko} = \begin{cases} 1 & Ta_{jk} < IS_o \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad \forall j, k, o$$

در صورتی که طول مدت زمان انتقال بیمار گیرنده از ناحیه متقاضی h به مرکز پیوند k ، از مجموع زمان در دسترس برای انتقال بیمار اهداکننده به مرکز فراهم‌آوری عضو، زمان ایسکمی و طول مدت‌زمان برداشت عضو o کمتر باشد، امکان پیوند موفق وجود دارد و در غیر این صورت xh_{hko} مقدار صفر می‌گیرد.

$$xh_{hko} = \begin{cases} 1 & Th_{hk} < T_{max} + IS_o + TS_o \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad \forall h, k, o$$

متغیرهای تصمیم استفاده‌شده در مدل ریاضی عبارت‌اند از:

متغیرهای تصمیم	تعریف
z_j	برابر یک است، اگر مرکز فراهم‌آوری در مکان j استقرار یابد، در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.
z'_k	برابر یک است، اگر مرکز پیوند در مکان k استقرار یابد، در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.
y_{jo}	برابر یک است، اگر مرکز فراهم‌آوری j قادر به انجام عمل برداشت عضو o باشد، در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.
y'_{ko}	برابر یک است، اگر مرکز پیوند k به‌جهت پیوند عضو o مجهز شود، در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.
$Q_{kk'o}$	برابر یک است، اگر مرکز پیوند k' به‌عنوان مرکز پشتیبان مرکز پیوند k برای عضو o انتخاب شود، در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.
fd_{ij}^t	میزان جریان بیمار اهداکننده از بیمارستان i به مرکز فراهم‌آوری عضو j در دوره t و $(i \neq j)$
ft_{ij}^t	میزان جریان بیمار اهداکننده داخل بیمارستان در دوره t ، زمانی که مرکز فراهم‌آوری j در بیمارستان i استقرار یابد.
fg_{jko}^t	میزان جریان عضو o از مرکز فراهم‌آوری j به مرکز پیوند k در دوره t با گونه حمل‌ونقل زمینی $(j \neq k)$
fa_{jko}^t	میزان جریان عضو o از مرکز فراهم‌آوری j به مرکز پیوند k در دوره t با گونه حمل‌ونقل هوایی $(j \neq k)$
ft'_{jko}	میزان جریان عضو o داخل بیمارستان در دوره t ، زمانی که مرکز فراهم‌آوری j و مرکز پیوند k هر دو در یک بیمارستان استقرار یابند.
fh_{hko}^t	میزان جریان بیمار متقاضی عضو o از ناحیه تقاضای h به مرکز پیوند k در دوره t
$\Gamma g_{jkk'o}^t$	میزان جریان عضو o از مرکز فراهم‌آوری j به مرکز پیوند k' به‌عنوان پشتیبان مرکز پیوند k در دوره t با گونه حمل‌ونقل زمینی
$\Gamma a_{jkk'o}^t$	میزان جریان عضو o از مرکز فراهم‌آوری j به مرکز پیوند k' به‌عنوان پشتیبان مرکز پیوند k در دوره t با گونه حمل‌ونقل هوایی
$\Gamma h_{hkk'o}^t$	میزان جریان بیمار گیرنده عضو o از ناحیه تقاضای h به مرکز پیوند k' به‌عنوان پشتیبان مرکز پیوند k ، در دوره t

توابع هدف

تابع هدف اول، کل هزینه‌های شبکه پیوند را کمینه و تابع هدف دوم، کل جریان بین تسهیلات شبکه پیوند را با لحاظ فاصله زمانی بین آنها بیشینه می‌کند.

$$\begin{aligned}
 TotalCost_1 = & \sum_j c_j \cdot z_j + \sum_k c'_k \cdot z'_k + \sum_o \sum_j R_{jo} \cdot y_{jo} + \sum_o \sum_k R'_{ko} \cdot y'_{ko} \\
 & + \sum_i \sum_j \sum_t cd_{ij} \cdot fd_{ij}^t + \sum_j \sum_k \sum_o \sum_t cg_{jk} \cdot fg_{jko}^t \\
 & + \sum_j \sum_k \sum_o \sum_t ca_{jk} \cdot fa_{jko}^t + \sum_h \sum_k \sum_o \sum_t ch_{hk} \cdot fh_{hko}^t
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 TotalCost_2 = & \sum_k (\sum_o (\sum_{k', k' \neq k} (\sum_{j, j \neq k} cg_{jk'} \cdot fg_{jko}^t + \sum_{j, j \neq k} ca_{jk'} \cdot fa_{jko}^t) \\
 & + \sum_t \sum_h ch_{hk'} \cdot fh_{hko}^t) \cdot Q_{kk'o}) - (\sum_t \sum_{j, j \neq k} cg_{jk} \cdot fg_{jko}^t \\
 & + \sum_t \sum_{j, j \neq k} ca_{jk} \cdot fa_{jko}^t + \sum_t \sum_h ch_{hk} \cdot fh_{hko}^t) \lambda_k
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$Min TC = TotalCost_1 + TotalCost_2 \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 TotalFlow_1 = & \sum_i \sum_{j, j \neq i} \sum_t \left(\frac{1}{T_{dij}} \right) \cdot fd_{ij}^t + \sum_i \sum_{j, j = i} \sum_t \left(\frac{1}{T_{ii}} \right) \cdot ft_{ij}^t \\
 & + \sum_j \sum_{k, k \neq j} \sum_o \sum_t \left(\frac{IS_o}{T_{gjk}} \right) \cdot fg_{jko}^t + \sum_j \sum_{k, k \neq j} \sum_o \sum_t \left(\frac{IS_o}{T_{ajk}} \right) \cdot fa_{jko}^t \\
 & + \sum_j \sum_{k, k = j} \sum_o \sum_t \left(\frac{IS_o}{T_{i'j}} \right) \cdot ft'_{jko} + \sum_h \sum_k \sum_o \sum_t \left(\frac{IS_o}{T_{hkk}} \right) \cdot fh_{hko}^t
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 TotalFlow_2 = & \sum_k (\sum_o (\sum_{k', k' \neq k} (\sum_{j, j \neq k'} \sum_t \left(\frac{IS_o}{T_{gjk'}} \right) \cdot fg_{jko}^t + \sum_{j, j \neq k'} \sum_t \left(\frac{IS_o}{T_{ajk'}} \right) \cdot fa_{jko}^t) \\
 & + \sum_h \sum_t \sum_t \left(\frac{IS_o}{T_{hkk'}} \right) \cdot fh_{hko}^t) \cdot Q_{kk'o}) - (\sum_{j, j \neq k} \sum_t \left(\frac{IS_o}{T_{gjk}} \right) \cdot fg_{jko}^t \\
 & + \sum_{j, j \neq k} \sum_t \left(\frac{IS_o}{T_{ajk}} \right) \cdot fa_{jko}^t + \sum_{j=k} \sum_t \left(\frac{IS_o}{T_{i'j}} \right) \cdot ft'_{jko} \\
 & + \sum_h \sum_t \left(\frac{IS_o}{T_{hkk}} \right) \cdot fh_{hko}^t) \lambda_k
 \end{aligned} \quad (5)$$

$$Max TF = TotalFlow_1 + TotalFlow_2 \quad (۶)$$

توابع هدف مسئله، شامل کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های شبکه و بیشینه‌سازی مجموع جریان بین تسهیلات است. رابطه (۱)، بیان‌کننده مجموع هزینه‌های ثابت شبکه پیوند شامل هزینه احداث مراکز فراهم‌آوری و مراکز پیوند عضو، هزینه‌های انجام عمل برداشت عضو در مراکز فراهم‌آوری، هزینه تجهیز مراکز پیوند به امکانات لازم برای انجام عمل پیوند عضو و همچنین هزینه‌های متغیر مربوط به جریان بین تسهیلات شامل هزینه انتقال بیمار اهداکننده از بیمارستان به مرکز فراهم‌آوری، هزینه انتقال عضو اهدایی از مرکز فراهم‌آوری به مرکز پیوند و هزینه انتقال بیمار داوطلب دریافت عضو از ناحیه متقاضی به مرکز پیوند است. رابطه (۲)، مجموع هزینه‌های شبکه با فرض از دسترس خارج شدن مراکز پیوند را بیان می‌کند. با از دسترس خارج شدن هریک از مراکز پیوند و احتمال متناظر با آن، هزینه میزان جریانی که از طریق اختصاص مرکز پیوند پشتیبان دوباره پوشش داده می‌شود، به کل هزینه اضافه و هزینه جریان ارسال‌شده به مرکز پیوند از دسترس خارج‌شده از کل هزینه کسر می‌شود؛ در نتیجه همان‌طور که در رابطه (۳) مشاهده می‌شود، تابع هدف اول مجموع هزینه‌های شبکه پیوند عضو را کمینه می‌کند.

بخش اول تابع هدف دوم در رابطه (۴)، بیانگر مجموع جریان وزن‌دار میان تسهیلات شبکه پیوند عضو از جمله جریان اهداکننده از بیمارستان به مرکز فراهم‌آوری، جریان اعضای اهدایی از مرکز فراهم‌آوری به مرکز پیوند عضو و همچنین جریان بیمار گیرنده عضو از ناحیه متقاضی به مرکز پیوند عضو را بیشینه می‌کند. با در نظر گرفتن نسبت زمان در دسترس بر زمان سفر بین دو تسهیل، حجم جریان بین تسهیلات با فاصله زمانی کمتر افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر وزنی که به هر جریان بالقوه بین تسهیلات داده می‌شود، با زمان سفر میان این تسهیلات رابطه عکس دارد. رابطه (۵) بیانگر مجموع جریان بین تسهیلات با فرض از دسترس خارج شدن مراکز پیوند و پوشش جریان از طریق مراکز پشتیبان است. با فرض از دسترس خارج شدن هر کدام از مراکز پیوند و احتمال متناظر با آن، میزان جریانی که از طریق اختصاص مرکز پیوند پشتیبان دوباره پوشش داده می‌شود، به کل جریان پوشش داده‌شده اضافه و کل جریان رسیده به مرکز پیوند از دسترس خارج‌شده از جریان پوشش داده‌شده کسر می‌شود.

در نهایت تابع هدف دوم که در رابطه (۶) نشان داده شده است، مجموع روابط (۴) و (۵) و نشان‌دهنده کل تقاضای پوشش داده‌شده از طریق بیشینه‌کردن مجموع جریان وزن‌دار میان تسهیلات شبکه پیوند است.

در تابع هدف ارائه‌شده، ضرب متغیر صفر و یک $Q_{kk'o}$ در یک عبارت عدد صحیح، باعث غیرخطی شدن مدل می‌شود که به منظور خطی‌سازی تابع هدف از روش ارائه‌شده در پژوهش مدنی و همکاران^{۱۵} (۲۰۱۸) استفاده می‌شود. با جایگزینی متغیرهای $g_{jkk'o}^t$ و $\Gamma a_{jkk'o}^t$ و $\Gamma h_{jkk'o}^t$ در عبارت‌های (۲) و (۵) و با توجه به رابطه‌های (۷) تا (۹) و اضافه‌کردن مجموعه محدودیت‌های (۱۰) تا (۱۷) به مدل، عامل غیرخطی شدن توابع هدف برطرف می‌شود.

$$\Gamma g_{jkk'o}^t \rightarrow f g_{jko}^t \cdot Q_{kk'o} \quad (۷)$$

$$\Gamma a_{jkk'o}^t \rightarrow f a_{jko}^t \cdot Q_{kk'o} \quad (۸)$$

$$\Gamma h_{jkk'o}^t \rightarrow f h_{jko}^t \cdot Q_{kk'o} \quad (۹)$$

$$\Gamma g_{jkk'o}^t + \Gamma a_{jkk'o}^t \leq M \cdot Q_{kk'o} \quad \forall j \neq k', k \neq k', o, t \quad (۱۰)$$

$$\Gamma g_{jkk'o}^t + \Gamma a_{jkk'o}^t \geq (f g_{jko}^t + f a_{jko}^t) - M \cdot (1 - Q_{kk'o}) \quad \forall j \neq k', k \neq k', o, t \quad (۱۱)$$

$$\Gamma g_{jkk'o}^t + \Gamma a_{jkk'o}^t \leq f g_{jko}^t + f a_{jko}^t \quad \forall j \neq k', k \neq k', o, t \quad (12)$$

$$\Gamma g_{jkk'o}^t + \Gamma a_{jkk'o}^t \geq f i_{jko}^t - M \cdot (1 - Q_{kk'o}) \quad \forall j = k', k \neq k', o, t \quad (13)$$

$$\Gamma g_{jkk'o}^t + \Gamma a_{jkk'o}^t \leq f i_{jko}^t \quad \forall j = k', k \neq k', o, t \quad (14)$$

$$\Gamma h_{hkk'o}^t \leq M \cdot Q_{kk'o} \quad \forall h, o, t, k \neq k' \quad (15)$$

$$\Gamma h_{hkk'o}^t \geq f h_{hko}^t - M \cdot (1 - Q_{kk'o}) \quad \forall h, o, t, k \neq k' \quad (16)$$

$$\Gamma h_{hkk'o}^t \leq f h_{hko}^t \quad \forall h, o, t, k \neq k' \quad (17)$$

در نهایت توابع هدف به صورت روابط (۱۸) و (۱۹) بازنویسی می‌شود.

$$\text{Min } TC = \sum_j c_j \cdot z_j + \sum_k c'_k \cdot z'_k + \sum_o \sum_j R_{jo} \cdot y_{jo} + \sum_o \sum_k R'_{ko} \cdot y'_{ko} \quad (18)$$

$$+ \sum_i \sum_j \sum_t c d_{ij} \cdot f d_{ij}^t + \sum_j \sum_k \sum_o \sum_t c g_{jk} \cdot f g_{jko}^t$$

$$+ \sum_j \sum_k \sum_o \sum_t c a_{jk} \cdot f a_{jko}^t + \sum_h \sum_k \sum_o \sum_t c h_{hk} \cdot f h_{hko}^t$$

$$+ \sum_k (\sum_o (\sum_{k', k' \neq k} (\sum_{j, j \neq k} c g_{jk'} \cdot \Gamma g_{jkk'o}^t + \sum_{j, j \neq k} c a_{jk'} \cdot \Gamma a_{jkk'o}^t$$

$$+ \sum_t \sum_h c h_{hk'} \cdot \Gamma h_{hkk'o}^t)) - (\sum_t \sum_{j, j \neq k} c g_{jk} \cdot f g_{jko}^t + \sum_t \sum_{j, j \neq k} c a_{jk} \cdot f a_{jko}^t$$

$$+ \sum_t \sum_h c h_{hk} \cdot f h_{hko}^t))) \lambda_k$$

$$\text{Max } TF = \sum_i \sum_{j, j \neq i} \sum_t \left(\frac{1}{T d_{ij}} \right) \cdot f d_{ij}^t + \sum_i \sum_{j, j = i} \sum_t \left(\frac{1}{T i_{ij}} \right) \cdot f i_{ij}^t \quad (19)$$

$$+ \sum_j \sum_{k, k \neq j} \sum_o \sum_t \left(\frac{IS_o}{T g_{jk}} \right) \cdot f g_{jko}^t + \sum_j \sum_{k, k \neq j} \sum_o \sum_t \left(\frac{IS_o}{T a_{jk}} \right) \cdot f a_{jko}^t$$

$$+ \sum_j \sum_{k, k = j} \sum_o \sum_t \left(\frac{IS_o}{T i_{ij}} \right) \cdot f i_{jko}^t + \sum_h \sum_k \sum_o \sum_t \left(\frac{IS_o}{T h_{hk}} \right) \cdot f h_{hko}^t$$

$$+ \sum_k (\sum_o (\sum_{k', k' \neq k} (\sum_{j, j \neq k'} \sum_t \left(\frac{IS_o}{T g_{jk'}} \right) \cdot \Gamma g_{jkk'o}^t + \sum_{j, j \neq k'} \sum_t \left(\frac{IS_o}{T a_{jk'}} \right) \cdot \Gamma a_{jkk'o}^t$$

$$+ \sum_h \sum_t \sum_t \left(\frac{IS_o}{T h_{hk'}} \right) \cdot \Gamma h_{hkk'o}^t)) - (\sum_{j, j \neq k} \sum_t \left(\frac{IS_o}{T g_{jk}} \right) \cdot f g_{jko}^t$$

$$+ \sum_{j, j \neq k} \sum_t \left(\frac{IS_o}{T a_{jk}} \right) \cdot f a_{jko}^t + \sum_{j, j = k} \sum_t \left(\frac{IS_o}{T i_{ij}} \right) \cdot f i_{jko}^t$$

$$+ \sum_h \sum_t \left(\frac{IS_o}{T h_{hk}} \right) \cdot f h_{hko}^t))) \lambda_k$$

محدودیت‌های مدل ارائه شده به شرح زیر است.

$$y_{jo} \leq z_j \quad \forall j, o \quad (20)$$

$$y'_{ko} \leq z'_k \quad \forall k, o \quad (21)$$

$$z'_k \leq \sum_o y'_{ko} \quad \forall k \quad (22)$$

$$\sum_j y_{jo} \geq 1 \quad \forall o \quad (23)$$

$$\sum_k y'_{ko} \geq 1 \quad \forall o \quad (24)$$

$$\sum_{j, j \neq i} f d_{ij}^t + \sum_{j, j = i} f i_{ij}^t \leq A_i^t \quad \forall i, t \quad (25)$$

$$f d_{ij}^t \leq A_i^t \cdot \sum_o y_{jo} \quad \forall t, i \neq j \quad (26)$$

$$f i_{ij}^t \leq A_i^t \cdot \sum_o y_{jo} \quad \forall t, i = j \quad (27)$$

$$\sum_t f g_{jko}^t \leq M \cdot x g_{jko} \quad \forall o, j \neq k \quad (28)$$

$$\sum_t f a_{jko}^t \leq M \cdot x a_{jko} \quad \forall o, j \neq k \quad (29)$$

$$\sum_{k,k \neq j} (fg_{jko}^t + fa_{jko}^t) + \sum_{k,k=j} fi_{jko}^t \leq S_o \cdot (\sum_{i,i \neq j} fd_{ij}^t + \sum_{i,i=j} fi_{ij}^t) \quad \forall j, o, t \quad (30)$$

$$fg_{jko}^t + fa_{jko}^t \leq S_o \cdot y_{jo} \cdot y'_{ko} (\sum_{i,i \neq j} fd_{ij}^t + \sum_{i,i=j} fi_{ij}^t) \quad \forall j \neq k, o, t \quad (31)$$

$$fi_{jko}^t \leq S_o \cdot y_{jo} \cdot y'_{ko} (\sum_{i,i \neq j} fd_{ij}^t + \sum_{i,i=j} fi_{ij}^t) \quad \forall j = k, o, t \quad (32)$$

$$\sum_t fh_{hko}^t \leq M \cdot xh_{hko} \quad \forall h, k, o \quad (33)$$

$$\sum_h fh_{hko}^t = \sum_{j,j \neq k} (fg_{jko}^t + fa_{jko}^t) + \sum_{j,j=k} fi_{jko}^t \quad \forall k, o, t \quad (34)$$

$$\sum_k fh_{hko}^t \geq [\beta_h \cdot D_{ho}^t] \quad \forall h, o, t \quad (35)$$

$$\sum_k fh_{hko}^t \leq D_{ho}^t \quad \forall h, o, t \quad (36)$$

$$\sum_{k',k' \neq k} Q_{kk'o} = y'_{ko} \quad \forall k, o \quad (37)$$

$$\sum_{k,k \neq k'} Q_{kk'o} = |k| \cdot y'_{ko} \quad \forall k', o \quad (38)$$

$$\sum_t \Gamma g_{jkk'o}^t \leq M \cdot xg_{jk'o} \quad \forall j \neq k', k \neq k', o \quad (39)$$

$$\sum_t \Gamma a_{jkk'o}^t \leq M \cdot xa_{jk'o} \quad \forall j \neq k', k \neq k', o \quad (40)$$

$$\sum_t \Gamma h_{hkk'o}^t \leq M \cdot xh_{hk'o} \quad \forall h, k \neq k', o \quad (41)$$

$$fd_{ij}^t, fi_{ij}^t, fg_{jko}^t, fa_{jko}^t, fi_{jko}^t, fh_{hko}^t, \Gamma g_{jkk'o}^t, \Gamma a_{jkk'o}^t, \Gamma h_{hkk'o}^t \geq 0.int \quad (42)$$

$$z_j, z'_k, y_{jo}, y'_{ko}, Q_{kk'o}, xg_{jk'o}, xa_{jk'o}, xh_{hko} \in \{0,1\} \quad (43)$$

محدودیت (۲۰) تضمین می‌کند مرکز فراهم‌آوری j در صورتی قادر به انجام عمل برداشت عضو o است که این مرکز استقرار یابد. محدودیت (۲۱) بیان می‌کند مرکز پیوند k در صورتی به تجهیزات لازم برای عمل پیوند عضو o مجهز می‌شود که این مرکز استقرار یابد. محدودیت (۲۲) تضمین می‌کند یک مرکز پیوند زمانی استقرار می‌یابد که به تجهیزات لازم برای حداقل یک نوع عضو پیوندی مجهز شود. محدودیت‌های (۲۳) و (۲۴) اطمینان می‌دهند که برای هر عضو پیوندی، حداقل یک مرکز فراهم‌آوری و مرکز پیوند عضو استقرار یابد تا عمل برداشت و پیوند عضو در این مراکز، انجام شود. محدودیت (۲۵) حجم جریان بین بیمارستان و مراکز فراهم‌آوری عضو را نشان می‌دهد و تضمین می‌کند مجموع کل اهداکنندگانی که از یک بیمارستان به مراکز فراهم‌آوری داخل و خارج از بیمارستان منتقل می‌شوند، باید کمتر از تعداد کل بیماران اهداکننده آن بیمارستان باشد. محدودیت (۲۶) تضمین می‌کند هر اهداکننده عضو تنها در صورتی به مرکز فراهم‌آوری خارج از بیمارستان فرستاده می‌شود که امکان انجام عمل برداشت حداقل یک عضو پیوندی در آن مرکز، وجود داشته باشد. محدودیت (۲۷) تضمین می‌کند هر اهداکننده عضو تنها در صورتی به مرکز فراهم‌آوری در داخل بیمارستان فرستاده می‌شود که امکان انجام عمل برداشت حداقل یک عضو پیوندی در آن مرکز، وجود داشته باشد.

محدودیت (۲۸) بیان می‌کند که در هر دوره زمانی، طول مدت زمان انتقال هر عضو o از مرکز فراهم‌آوری j به مرکز پیوند k با گونه حمل و نقل زمینی، باید از زمان ایسکمی آن عضو کمتر باشد. محدودیت (۲۹) بیان می‌کند در صورتی که طول زمان انتقال هر عضو o از مرکز فراهم‌آوری به مرکز پیوند با گونه حمل و نقل هوایی در هر دوره زمانی ایسکمی برای آن عضو بیشتر باشد، جریان بین دو مرکز مقدار صفر می‌گیرد. محدودیت (۳۰) یک کران بالا را برای کل جریان عبوری از یک مرکز فراهم‌آوری به مراکز پیوند داخل و خارج از آن مرکز به وسیله هر دو نوع گونه

حمل و نقل زمینی و هوایی نشان می‌دهد. محدودیت (۳۱) تضمین می‌کند که جریان بین یک مرکز فراهم‌آوری و مراکز پیوند خارج از بیمارستان در هر دوره زمانی و به‌ازای هر عضو خاص، تنها در صورتی برقرار است که مرکز فراهم‌آوری و مرکز پیوند هر دو استقرار یابد و به تجهیزات لازم برای عمل برداشت و پیوند هر عضو خاص مجهز شده باشد. محدودیت (۳۲) تضمین می‌کند که جریان بین یک مرکز فراهم‌آوری و مرکز پیوند داخل همان مرکز در هر دوره زمانی و به‌ازای هر عضو خاص تنها در صورتی برقرار است که مرکز فراهم‌آوری و مرکز پیوند هر دو استقرار یافته و به تجهیزات لازم برای عمل برداشت و پیوند هر عضو خاص مجهز شده باشند. محدودیت (۳۳) تضمین می‌کند بیمار دریافت‌کننده عضو در هر دوره زمانی، باید حداکثر در یک مدت زمان مشخص به مرکز پیوند تعیین شده برسد، در غیر این صورت انجام عمل پیوند ممکن نیست. رابطه (۳۴) محدودیت تعادل است و نشان می‌دهد کل جریانی که از کل نواحی تقاضا در هر دوره زمانی به یک مرکز پیوند می‌رسند، برابر با مجموع کل جریانی است که با هر دو گونه حمل و نقل زمینی و هوایی از کل مراکز فراهم‌آوری داخل و خارج از بیمارستان به همان مرکز پیوند وارد می‌شود. محدودیت (۳۵) تضمین می‌کند که در هر دوره زمانی، درصدی از کل تقاضای ناحیه h برای دریافت عضو o باید از سوی مراکز پیوند تأمین شود. محدودیت (۳۶) بیان می‌کند که در هر دوره زمانی، مجموع کل جریانی که از نواحی تقاضا به یک مرکز پیوند فرستاده می‌شود، باید از تقاضای آن ناحیه برای دریافت عضو کمتر باشد. محدودیت (۳۷) نشان می‌دهد که باید به‌ازای هر مرکز پیوند استقرار یافته k و هر عضو پیوندی o حداقل یک مرکز پیوند k^- به عنوان مرکز پشتیبان وجود داشته باشد. محدودیت (۳۸) بیان می‌کند که مرکز پیوند k^- در صورتی مرکز پشتیبان برای مراکز پیوند k و برای عضو o لحاظ می‌شود که استقرار یابد. در شرایط بحران و در نظر گرفتن مراکز پشتیبان برای مراکز پیوند، توجه به زمان سفر بین مراکز فراهم‌آوری و مرکز پیوند پشتیبان، با توجه به زمان ایسکمی برای هر عضو حائز اهمیت است؛ به این منظور، مجموعه محدودیت‌های (۳۹) تا (۴۱) به مسئله اعمال می‌شوند و بیانگر این هستند که تنها زمانی جریان بین یک مرکز فراهم‌آوری و یک مرکز پیوند پشتیبان برای مرکز پیوند از دسترس خارج می‌شود و همچنین جریان بین ناحیه تقاضا و مرکز پیوند پشتیبان برقرار است که محدودیت‌های زمانی رعایت شده باشد و زمان سفر بین این مراکز از حداکثر زمان در دسترس، بیشتر نباشد. مجموعه محدودیت‌های (۴۲) و (۴۳) دامنه مجاز برای متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

در مدل ریاضی ارائه شده، مجموعه محدودیت‌های (۳۱) و (۳۲) غیرخطی‌اند و به منظور خطی‌سازی، به صورت مجموعه محدودیت‌های (۴۶) تا (۵۲) بازنویسی می‌شوند. متغیر P_{jko} یک متغیر صفر و یک است و زمانی مقدار یک می‌گیرد که متغیرهای y_{jo} و y'_{ko} هر دو مقدار یک بگیرند. متغیرهای p_j^t و e_{jko}^t متغیر عدد صحیح‌اند و به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$e_{jko}^t = p_j^t \cdot p_{jko} \quad \forall j, k, o, t \quad (44)$$

$$p_j^t = \sum_{i \neq j} f d_{ij}^t + \sum_{i=j} f i_{ij}^t \quad \forall j, t \quad (45)$$

در نهایت دو محدودیت ذکر شده به شکل زیر بازنویسی می‌شوند.

$$p_{jko} \leq y_{jo} \quad \forall j, k, o \quad (46)$$

$$p_{jko} \leq y'_{ko} \quad \forall j, k, o \quad (47)$$

$$p_{jko} \geq (y_{jo} + y'_{ko}) - 1 \quad \forall j, k, o \quad (48)$$

$$e_{jko}^t \leq M \cdot p_{jko} \quad \forall j, k, o, t \quad (49)$$

$$e_{jko}^t \leq p_j^t \quad \forall j, t \quad (50)$$

$$e_{jko}^t \geq p_j^t - M \cdot (1 - p_{jko}) \quad \forall j, k, o, t \quad (51)$$

$$f g_{jko}^t + f a_{jko}^t \leq S_o \cdot e_{jko}^t \quad \forall j \neq k, o, t \quad (52)$$

۴- روش حل

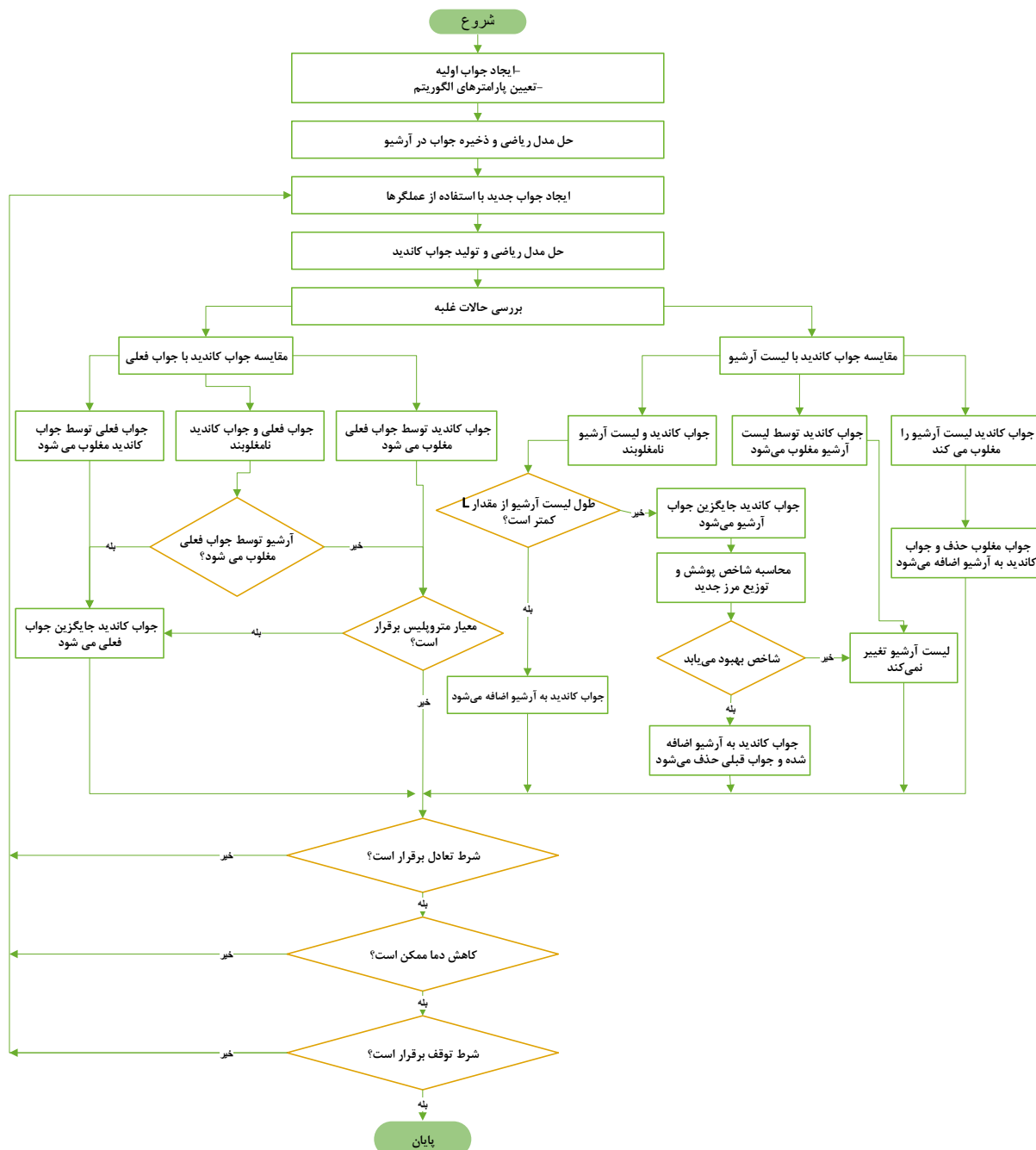
روش محدودیت اپسیلون، از روش‌های شناخته‌شده در حوزه مسائل بهینه‌سازی و به‌منظور ایجاد مرز پارتو است که هایماس و همکاران^{۱۶} (۱۹۷۱) آن را برای اولین بار معرفی کردند. هدف از به‌کارگیری این روش، تبدیل مدل بهینه‌سازی چندهدفه به مدلی تک‌هدفه است. در این روش، تمامی توابع هدف به‌جز یکی از آنها که از اهمیت بالاتری برخوردار است، به مجموعه محدودیت‌های مدل اضافه می‌شود. از ضعف‌های روش محدودیت اپسیلون، قرارنگرفتن دامنه توابع هدف به دست آمده بر مجموعه پارتو و کاراست. این مشکل زمانی پیش می‌آید که در برخی از توابع هدف، جواب بهینه چندگانه وجود داشته باشد. به‌منظور حل این مشکل، تکنیک لکسیکوگراف^{۱۷} برای محاسبه جدول بازده پیشنهاد شده است (Mavrotas et al., 2009). از دیگر ضعف‌های روش محدودیت اپسیلون، آن است که تضمین نمی‌کند جواب‌های بهینه به دست آمده کارا باشد. به‌منظور برطرف کردن این مشکل از روش محدودیت اپسیلون تعمیم‌یافته استفاده می‌شود که در این پژوهش به‌منظور حل مدل پیشنهادی، به کار گرفته شده است.

مسئله طراحی شبکه ارائه‌شده در پژوهش پیشنهادی توسعه‌ای بر مدل ارائه‌شده را ظهیری و همکاران (۲۰۱۴) بررسی کردند. با چشم‌پوشی از بعضی از محدودیت‌ها و تابع هدف، مدل پیشنهادی به سطح پیچیدگی مدل پایه (NP-hard) می‌رسد و حل آن در ابعاد بالا مستلزم به‌کارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری است.

۴-۱ الگوریتم ابتکاری براساس شبیه‌سازی تبرید چندهدفه و مقایسه دو مرز پارتو (HMOSA)

در این پژوهش، از یک الگوریتم ابتکاری بر مبنای الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید چندهدفه بهره گرفته شده است که در پژوهش بندیوپادیه و همکاران^{۱۹} (۲۰۰۸) ارائه شده بود. براساس ساختار الگوریتم پیشنهادی، استفاده از مفهوم غلبه و نگهداری آرشیو جواب‌های نامغلوب در طی اجراست. فلوچارت الگوریتم ارائه‌شده در (شکل ۲) و رویه کلی به این صورت است که ابتدا یک جواب اولیه شامل متغیرهای باینری طبق ساختار مشخص تولید می‌شود؛ سپس آن بخش باینری در مدل ریاضی قرار می‌گیرد و متغیرهای عدد صحیح و مقادیر دو تابع هدف محاسبه می‌شود. جواب حاصل (دو مقدار تابع هدف) در لیست آرشیو ذخیره می‌شود. به‌طور مداوم با عملگرهای جست‌وجوی همسایگی و تصادفی، جواب‌های کاندید جدید تولید و هر کاندید پس از ارزیابی در مدل ریاضی، دو بار مقایسه می‌شود: ابتدا جواب کاندید با جواب فعلی و سپس جواب کاندید جدید با مجموعه جواب‌های ذخیره‌شده در لیست آرشیو مقایسه می‌شود.

فلوچارت الگوریتم ابتکاری بر اساس شبیه‌سازی تبرید چندهدفه



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم ابتکاری HMOSA

Fig. 2- Flowchart of the HMOSA heuristic algorithm

در مقایسه جواب کاندید با جواب فعلی، ممکن است حالت‌های زیر رخ بدهد:

- ۱- اگر جواب کاندید، جواب فعلی را مغلوب کند، جواب کاندید به‌طور مستقیم جایگزین جواب فعلی می‌شود؛
- ۲- اگر جواب کاندید و جواب فعلی نامغلوب باشند، به لیست آرشیو مراجعه می‌شود. اگر یکی از جواب‌های لیست آرشیو با جواب کاندید مغلوب شود، جواب کاندید جایگزین جواب فعلی می‌شود. در غیر این صورت، از معیار متروپلیس برای تعیین احتمال پذیرش جواب کاندید استفاده خواهد شد. مقدار احتمال پذیرش جواب کاندید از رابطه (۵۳) به دست می‌آید که P_{acp} احتمال پذیرش جواب کاندید، T پارامتر دما و ΔD میزان غلبه

میان دو جواب کاندید و فعلی است و با استفاده از رابطه (۵۴) حاصل می‌شود. در این رابطه، $\Delta D_{C,N}$ مقدار غلبه جواب فعلی C بر جواب کاندید N ، $OF_i(n)$ مقدار تابع هدف i برای جواب کاندید و $OF_i(c)$ مقدار تابع هدف i برای جواب فعلی است.

$$P_{acp} = \min(1, \exp(-\frac{\Delta D_{N,C}}{T})) \quad (53)$$

$$\Delta D_{N,C} = |OF_1(n) - OF_1(c)| \times |OF_2(n) - OF_2(c)| \quad (54)$$

پس از محاسبه احتمال پذیرش جواب کاندید، یک عدد تصادفی p' در بازه $[0,1]$ تولید می‌شود و براساس معیار متروپلیس، اگر $p' < p_{acp}$ باشد، جواب کاندید جایگزین جواب فعلی می‌شود؛

۳- اگر جواب کاندید با جواب فعلی مغلوب شود، در این حالت نیز مانند حالت قبل، از معیار متروپلیس و محاسبه احتمال پذیرش برای جایگزین کردن جواب کاندید استفاده می‌شود.

در گام بعدی الگوریتم که به مقایسه جواب کاندید با لیست آرشیو مربوط است، ممکن است حالت‌های زیر رخ بدهد:

الف- جواب کاندید حداقل یکی از جواب‌های لیست آرشیو را مغلوب کند. در این صورت جواب کاندید به لیست آرشیو اضافه و جواب (های) مغلوب از لیست آرشیو حذف می‌شود؛

ب- جواب کاندید و جواب‌های ذخیره‌شده در آرشیو نامغلوب‌اند، در این صورت با توجه به طول لیست آرشیو، دو حالت زیر اتفاق می‌افتد:

➤ در صورتی که طول لیست آرشیو از L کمتر باشد، جواب کاندید به‌طور مستقیم به لیست آرشیو اضافه می‌شود؛
 ➤ در صورتی که طول لیست آرشیو از L بیشتر باشد، از یک رویکرد جدید برای پذیرش جواب کاندید استفاده می‌شود. به این صورت که جواب کاندید، هر بار جایگزین یکی از جواب‌های آرشیو و یک مرز پارتو جدید با اضافه کردن جواب کاندید ایجاد می‌شود؛ سپس مرز پارتو ایجادشده با مرز پارتو قبلی مقایسه و در صورت بهتر بودن مرز جدید، جواب کاندید جایگزین جواب آرشیو و جواب قبلی از آرشیو حذف می‌شود. شاخص‌های مختلفی برای مقایسه دو مرز پارتو وجود دارد که در این الگوریتم از شاخص HA^{20} استفاده می‌شود. این شاخص به‌طور هم‌زمان پوشش و توزیع یک جبهه پارتو را ارزیابی می‌کند (Hartigan & Wong, 1979). مقدار این شاخص برای هر جبهه پارتو از رابطه (۵۵) به دست می‌آید که در این رابطه pf_t^1 و pf_t^2 به ترتیب مقدار تابع هدف اول و دوم برای جواب نامغلوب t ام، n تعداد کل جواب‌های نامغلوب و S_A مقدار شاخص پوشش و توزیع برای مرز پارتو A است. این رابطه درواقع مساحت زیرمنحنی مرز پارتو را نسبت به تابع هدف اول محاسبه می‌کند.

$$S_A^1 = \sum_{t=2}^n ((pf_t^1 - pf_{t-1}^1) \times pf_t^2) \quad (55)$$

در مدل ارائه‌شده، توابع هدف در تضادند، به همین دلیل برای مقایسه دو مرز پارتو نمی‌توان براساس یکی از توابع هدف اظهارنظر کرد؛ بنابراین از رابطه (۵۶) به‌منظور محاسبه مساحت زیرمنحنی مرز پارتو نسبت به تابع هدف دوم و درنهایت به‌منظور مقایسه دو مرز پارتو از نسبت این دو مساحت مطابق با رابطه (۵۷) استفاده می‌شود که R_A نسبت مساحت‌های زیرمنحنی پارتو A است.

$$S_A^2 = \sum_{t=2}^n ((pf_t^2 - pf_{t-1}^2) \times pf_t^1) \quad (56)$$

$$R_A = S_A^1 / S_A^2 \quad (57)$$

با توجه به مفاهیم بیان‌شده و براساس این شاخص، در صورتی که $R_{candia} > R_{Archive}$ باشد، جواب کاندید جایگزین جواب آرشیو می‌شود و در غیر این صورت آرشیو تغییری نمی‌کند. فرآیند بیان‌شده در هر دما، به تعداد دفعات مشخصی اجرا و در هر تکرار، لیستی از بهترین جواب‌های نامغلوب به دست آمده تا آن مرحله از اجرای الگوریتم، حاصل می‌شود؛ سپس با توجه به قاعده هندسی کاهش دما، دما کاهش و این فرآیند تا زمان رسیدن به شرط توقف الگوریتم، ادامه می‌یابد. بر طبق رابطه (۵۳)، دما ارتباط مستقیمی با پذیرش جواب‌های نامطلوب دارد؛ به طوری که در دماهای بالا، احتمال پذیرش جواب‌های بد بالاست و تقریباً همه جواب‌ها پذیرش می‌شود؛ اما با کاهش دما، احتمال پذیرش جواب‌های بد کمتر می‌شود؛ به طوری که در دماهای پایین، تنها جواب‌هایی پذیرفته می‌شود که از جواب فعلی بهتر باشد.

شرط توقف الگوریتم

در این الگوریتم، شرط توقف علاوه بر رسیدن به دمای نهایی، زمان اجرای الگوریتم است. بر این اساس، فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه پس از تعدادی تکرار مشخص، متوقف می‌شود.

۴-۲ مطالعه کاربردی و یافته‌ها

در این تحقیق، از روش طراحی آزمایش‌های تاکوچی برای تنظیم پارامترهای الگوریتم استفاده شده است. به منظور اجرای بهتر الگوریتم ارائه‌شده، سه سطح برای ۴ پارامتر ورودی شامل دمای اولیه، دمای نهایی، نرخ سردشدن و تعداد تکرارها در دمای ثابت در نظر گرفته شده است. حدود مقادیر پارامترها با توجه به مقادیر استفاده‌شده در پیشینه موضوع تعیین و سطوح در نظر گرفته شده برای این پارامترها، در جدول ۲ نشان داده شده است. ماتریس آزمایش برای تنظیم پارامترها، شامل ۹ ترکیب مختلف برای انجام آزمایش‌هاست. به جهت تنظیم پارامترها، مسئله‌ای در ابعاد متوسط در نظر گرفته و برای هر سناریوی طراحی‌شده در آزمون، مسئله ۳ مرتبه حل شده است.

جدول ۲- سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم

Table 2- Levels of Algorithm Parameters

سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	
۱۰۰۰	۸۰۰	۶۰۰	دمای اولیه
۳۰	۲۰	۱۰	دمای نهایی
۰/۹۵	۰/۹۰	۰/۸۵	نرخ سردشدن
۱۲	۱۰	۸	تعداد تکرارها در دمای ثابت

با توجه به اینکه مسئله ارائه‌شده دوهدفه و نتایج به دست آمده به جای یک جواب مشخص، مجموعه‌ای از جواب‌های نامغلوب است، باید ابتدا جواب‌های نامغلوب به دست آمده براساس معیارهای مقایسه ارزیابی و به یک متغیر پاسخ تبدیل شود. به منظور ارزیابی و مقایسه نتایج به دست آمده، از شاخص‌های همگرایی و پراکندگی از جمله شاخص فاصله از جواب ایده‌آل^{۲۱}، گوناگونی^{۲۲}، فاصله^{۲۳} و زمان اجرای الگوریتم استفاده شده است.

با توجه به اینکه شاخص‌های ارائه شده هم‌مقیاس و هم‌جهت نیستند، به منظور بی‌مقیاس کردن شاخص‌های مثبت DM از رابطه (۵۸) و برای شاخص‌های منفی SM, MID و زمان حل از رابطه (۵۹) استفاده می‌شود که N_{ij} مقداری است، ترکیب i را در شاخص j کسب می‌کند و ماهیت مثبت دارد؛ یعنی مقادیر بیشتر بیانگر عملکرد بهتر دارند.

$$N_{ij} = \frac{r_{ij} - r_{ij}^{max}}{r_{ij}^{max} - r_{ij}^{min}} \quad (58)$$

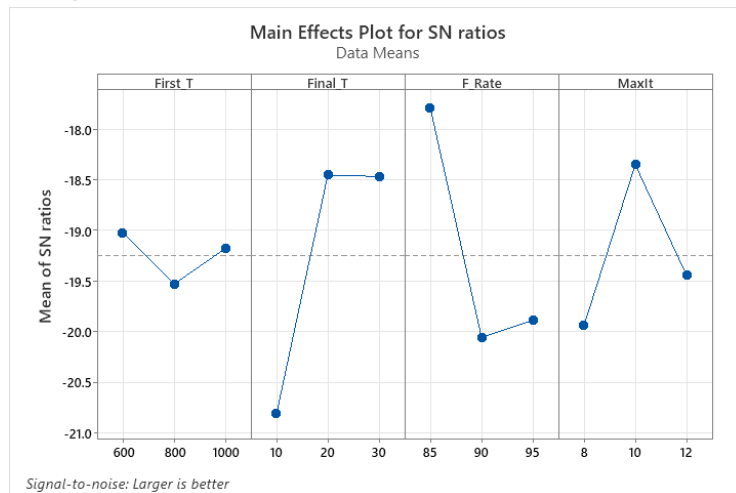
$$N_{ij} = \frac{r_{ij}^{min} - r_{ij}}{r_{ij}^{max} - r_{ij}^{min}} \quad (59)$$

پس از نرمال‌شدن معیارها، مقادیر آنها به راحتی با هم جمع می‌شوند. با در نظر گرفتن ضریب اهمیت متفاوت برای معیارها، از جمع ساده وزن دار به منظور محاسبه مقدار نهایی متغیر پاسخ، طبق رابطه (۶۰) استفاده می‌شود.

$$S_i = \sum_j W_j \cdot N_{ij} \quad \forall i \quad (60)$$

W_j وزن شاخص j ام و S_i مقدار متغیر پاسخ برای ترکیب i است. وزن‌ها برای شاخص‌های اول تا چهارم به ترتیب با نسبت‌های ۳۰، ۳۰، ۳۰ و ۱۰ درصد، در نظر گرفته شده است.

مقادیر به دست آمده در نرم‌افزار *Minitab* وارد و نتایج در شکل ۳ نمایش داده شده است. در نمودارهای شکل ۳، پارامترهایی به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفته می‌شوند که بیشترین مقدار میانگین نرخ S/N را دارند.



شکل ۳- میانگین نرخ S/N برای سطوح مختلف پارامترها

Fig. 3- Average SN rate for different parameter levels

مقادیر به دست آمده در نرم‌افزار *Minitab* وارد و نتایج در شکل ۳ نمایش داده شده است. در نمودارهای شکل ۳، پارامترهایی به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفته می‌شوند که بیشترین مقدار میانگین نرخ S/N را دارند و مقادیر بهینه پارامترها در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۳- مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم (الف)

Table 3- Optimal values of algorithm parameters (a)

پارامتر	مقدار بهینه
دمای اولیه	۶۰۰
دمای نهایی	۲۰
نرخ سرد شدن	۸۵
تعداد تکرارها در دمای ثابت	۱۰

در این پژوهش، پردازش‌های مربوط به حل دقیق مسئله در ابعاد کوچک و با نرم‌افزار *GAMS 24.3.1* انجام شده است. الگوریتم ابتکاری برای حل نمونه‌ها در ابعاد متوسط و بزرگ، در محیط *Visual studio* و با استفاده از حل‌کننده *CPLEX 12.8* کد نویسی و از سیستمی با مشخصات *Intel(R)Core i8,4GHz* و *RAM 16GB* استفاده شده است. به منظور تولید برخی از پارامترهای مسئله، با توجه به پیشینه موضوع، از توزیع یکنواخت (جدول ۴) استفاده شده است.

جدول ۴- بازه پارامترهای مسئله (الف)

Table 4- Problem parameter range (a)

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
C_j	Uniform (4800,5100)	Cg_{jk}	Uniform (12, 23)
C'_k	Uniform (28000,31000)	Ca_{jk}	Uniform (36,69)
R_{jo}	Uniform (100,130)	Ch_{hk}	Uniform (15, 30)
R'_{ko}	Uniform (300,600)	A_i^t	Uniform (10,25)
Tg_{jk}	Uniform (3,30)	D_{ho}^t	Uniform(30,65)
Ta_{jk}	Uniform (1,4)		

داده‌های وزارت بهداشت نیز به عنوان دیگر پارامترهای مسئله لحاظ شده است. پارامتر β_{ho} وابسته به میزان عرضه و تقاضای عضو است که به صورت نسبت مجموع این دو به ازای هر عضو پیوندی به دست می‌آید (جدول ۵). همچنین پارامتر T_{max} یک مقدار ثابت بوده و برابر ۲۰ در نظر گرفته شده است.

جدول ۵- بازه پارامترهای مسئله (ب)

Table 5- Range of parameters of problem (b)

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
Cd_{ij}	Uniform (14, 25)	Ti'_j	Uniform (0.35,0.5)
Td_{ij}	Uniform (3,30)	Th_{hk}	Uniform (5,34)
Ti_i	Uniform (0.35,0.5)	S_o	Uniform (1,2)
TS_o	Uniform(2,8)	T_{max}	20
IS_o	Uniform(4,15)	λ_k	Uniform(0.01,0.05)

به منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، ۱۵ نمونه مسئله در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ طراحی شد (جدول ۶). اندیس‌های O, H, K, J, I و T به ترتیب بیانگر مجموعه بیمارستان‌ها، مکان‌های بالقوه استقرار مراکز فراهم‌آوری، مکان‌های بالقوه استقرار مراکز پیوند، مجموعه مناطق متقاضی دریافت عضو، مجموعه اعضای پیوندی و تعداد دوره‌های زمانی است.

مسائل طراحی شده در ابعاد کوچک و متوسط، با هر دو روش محدودیت اپسیلون تعمیم یافته و الگوریتم ابتکاری حل شده، که به جهت بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی و مقایسه آن با نتایج حاصل از حل مدل، مقادیر شاخص‌های مقایسه برای هر کدام از جواب‌های پارتو محاسبه و در جداول ۷ و ۸ گزارش شده است؛ همان‌گونه که در ستون آخر جدول ۸ مشخص است، روش محدودیت اپسیلون تنها در نمونه‌های ۱ تا ۵ و در زمان کمتر از ۱ ساعت به جواب رسیده است. از نمونه ۶ تا ۹ با محدود کردن زمان حل به ۳۶۰۰ ثانیه، جواب موجهی برای مدل به دست آمده است که از نمونه ۹ به بعد، روش محدودیت اپسیلون قادر به یافتن جواب موجه در زمان تعیین شده نیست و تنها الگوریتم پیشنهادی قادر به حل مسئله است.

جدول ۶- مشخصات مسائل تولیدشده

Table 6- Characteristics of generated issues

شماره مسئله	ابعاد مسئله $ I \times J \times K \times H \times O \times T $
۱	$ 5 \times 2 \times 2 \times 4 \times 1 \times 3 $
۲	$ 6 \times 4 \times 3 \times 5 \times 2 \times 3 $
۳	$ 8 \times 5 \times 3 \times 5 \times 2 \times 3 $
۴	$ 10 \times 6 \times 4 \times 7 \times 2 \times 3 $
۵	$ 12 \times 6 \times 4 \times 8 \times 2 \times 3 $
۶	$ 14 \times 8 \times 5 \times 9 \times 2 \times 3 $
۷	$ 17 \times 9 \times 5 \times 11 \times 2 \times 3 $
۸	$ 18 \times 10 \times 6 \times 12 \times 2 \times 3 $
۹	$ 20 \times 12 \times 8 \times 15 \times 2 \times 3 $
۱۰	$ 22 \times 15 \times 9 \times 18 \times 3 \times 3 $
۱۱	$ 25 \times 16 \times 10 \times 20 \times 3 \times 3 $
۱۲	$ 28 \times 18 \times 10 \times 20 \times 3 \times 3 $
۱۳	$ 35 \times 22 \times 14 \times 28 \times 4 \times 3 $
۱۴	$ 40 \times 25 \times 15 \times 30 \times 5 \times 3 $
۱۵	$ 45 \times 26 \times 16 \times 35 \times 5 \times 3 $

جدول ۷- مقادیر شاخص‌های مقایسه‌ی جواب‌های پارتو (الف)

Table 7- Values of Pareto comparison indicators (a)

شماره مسئله	DM		MID		SM	
	HMOSA	EPS	HMOSA	EPS	HMOSA	EPS
۱	۵۵۶۰	۵۷۱۹/۹	۳۳۰۶/۷۳	۲۷۲۲/۳	۱/۳۰	۰/۹۷
۲	۳۲۳۵/۴	۷۶۴۶/۹	۸۰۰۱/۱۵	۲۸۴۲/۳	۰/۹۰	۰/۸۸
۳	۳۰۳۳۷/۳	۴۰۵۶۳/۸۷	۵۳۱۴/۰۲	۶۹۱۸/۲۴	۱/۶۴	۱/۳۴
۴	۹۴۴۵/۶	۸۰۰۴/۳۸	۵۳۳۲۷/۷۰	۳۱۸۸۷/۳۲	۰/۵۱	۰/۵۰
۵	۲۳۱۴۱/۲	۲۱۵۶۳/۸۶	۱۳۱۲۹/۸	۹۱۶۵/۸۲	۰/۷۲	۰/۵۹
۶	۲۶۳۱۹/۹	۲۰۱۰۱/۲۲	۱۷۱۵۸/۷	۱۰۶۸۰/۸۳	۰/۵۰	۰/۶۷
۷	۲۵۶۷۴/۱	۱۱۱۲۹/۱	۸۸۶۵/۱۱	۶۲۵۹/۷۴	۰/۲۶	۰/۸۶
۸	۳۸۳۳۶/۸	۱۲۳۸۲/۲۱	۲۲۸۴۷/۰۲	۲۱۲۰۴/۴۱	۰/۲۵	۰/۴۲
۹	۳۸۶۱۱/۸	۳۳۸۳۵/۳۳	۹۱۷۲/۴۸	۸۹۵۱/۵۰	۰/۳۱	۰/۵۷

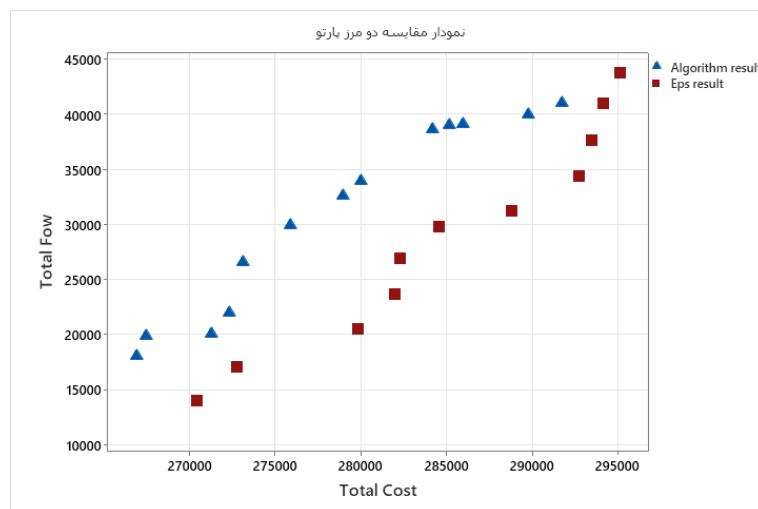
با توجه به بررسی جدول ۷، در نمونه‌های کوچک (۱ تا ۵) و با توجه به شاخص‌های فاصله و پوشش و توزیع، روش محدودیت اپسیلون تعمیم‌یافته، عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ابتکاری دارد و با افزایش ابعاد مسئله از نمونه ۵، الگوریتم ابتکاری عملکرد بهتری نسبت به روش محدودیت اپسیلون تعمیم‌یافته دارد. در جدول ۸، الگوریتم ابتکاری با توجه به شاخص‌های زمان و میانگین فاصله از جواب ایده‌آل، همواره عملکرد بهتری نسبت به روش محدودیت اپسیلون تعمیم‌یافته داشته و برای نمونه‌های کوچک نیز در زمانی کوتاه، به جواب خوبی رسیده است.

جدول ۸- مقادیر شاخص‌های مقایسه‌ی جواب‌های پارتو(ب)

Table 8- Values of comparison indices of Pareto solutions (b)

CPU Time(s)		HA-Rate		نمونه مسئله
HMOSA	EPS	HMOSA	EPS	
۱۳	۹۳	۰/۰۸	۰/۱۱	۱
۱۲۰	۳۵۰	۰/۱۳	۰/۲۳	۲
۲۱۲۰	۴۲۰۰	۰/۳۶	۰/۸۸	۳
۱۹۰۵	۵۳۰۰	۱/۴۴	۱/۶۱	۴
۳۹۲۸	۷۲۴۰	۰/۰۸	۰/۲۱	۵
۲۱۲۶	۳۶۰۰	۰/۱۱	۰/۰۴	۶
۱۹۹۶	۳۶۰۰	۰/۸۰	۰/۱۲	۷
۲۱۹۶	۳۶۰۰	۰/۳۲	۰/۱۰	۸
۲۹۲۴	۳۶۰۰	۰/۱۲	۰/۰۷	۹

به منظور ایجاد درک بهتر از جواب‌های ایجادشده با الگوریتم و مقایسه آن با جواب به دست آمده از روش محدودیت اپسیلون، جواب‌های پارتو حاصل از حل مسئله با هر دو روش، برای نمونه ۹ (برگرفته از جدول ۶) با ابعاد متوسط در شکل ۴ نشان داده شده است. محور افقی، بیانگر تابع هدف اول (کمینه‌سازی هزینه) و محور عمودی، بیانگر تابع هدف دوم (بیشینه‌سازی جریان) است. مدت زمان حل نرم‌افزار گمز، محدود به ۳۶۰۰ ثانیه است و الگوریتم در زمان ۲۹۲۶ ثانیه متوقف شده است. با توجه به شکل، برتری نسبی روش ابتکاری نسبت به روش محدودیت اپسیلون، در این مسئله مشهود است.

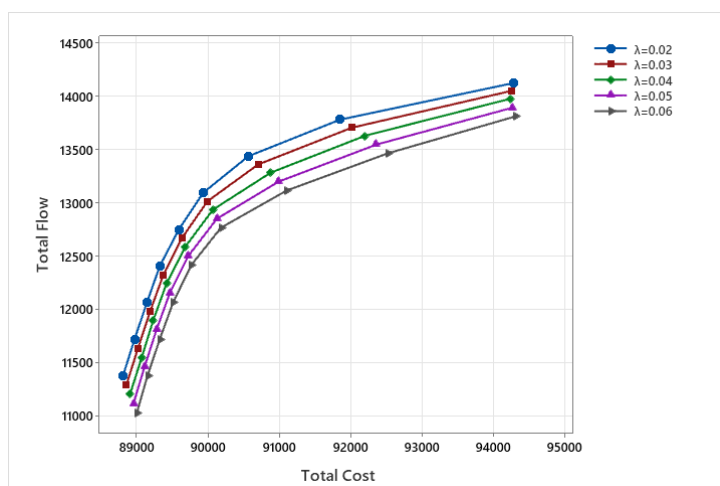


شکل ۴- مقایسه‌ی جواب‌های پارتو حاصل از روش محدودیت اپسیلون و الگوریتم ابتکاری

Fig. 4- Comparison Of Pareto Solutions Obtained from the Epsilon-Constraint Method and the Heuristic Algorithm

۵. بحث و تحلیل نتایج

در این بخش، میزان حساسیت توابع هدف در نتیجه تغییر پارامتر λ (احتمال از دسترس خارج شدن مراکز پیوند) و پارامتر تقاضا بررسی می‌شود. شکل ۵، اثر تغییر مقادیر پارامتر λ را بر توابع هدف نشان می‌دهد. محور افقی به تابع هدف اول (کمینه‌سازی هزینه‌ها) مربوط است، محور عمودی به تابع هدف دوم (بیشینه‌سازی جریان) ارتباط دارد و منحنی‌ها نیز بیانگر جواب‌های پارتو براساس مقادیر مختلف λ است.

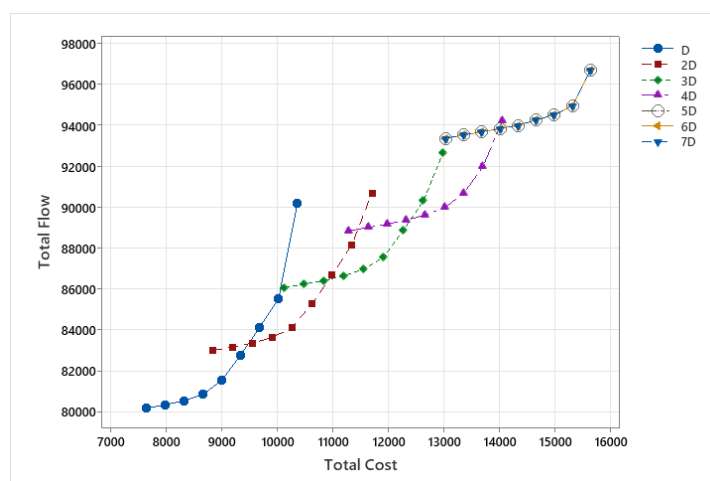


شکل ۵- بررسی تأثیر تغییرات λ بر توابع هدف

Fig. 5- The effect of λ changes on objective functions

همان‌طور که مشاهده می‌شود، احتمال از دسترس خارج شدن مراکز پیوند، تأثیر بسزایی در توابع هدف داشته باشد. با افزایش مقدار این پارامتر، مقدار تابع هدف اول افزایش می‌یابد و تابع هدف دوم کاهش پیدا می‌کند؛ بنابراین هرچه احتمال از دسترس خارج شدن یک مرکز پیوند کمتر باشد، هزینه‌های شبکه پیوند عضو کمتر است و همچنین جریان بیشتری پوشش داده می‌شود. با افزایش احتمال از دسترس خارج شدن یک مرکز پیوند، هزینه‌هایی نظیر هزینه انتقال بیمار متقاضی و عضو اهداشده به مرکز پشتیبان، با توجه به احتمال افزایش فاصله جغرافیایی و همچنین تغییر گونه حمل‌ونقل مناسب به جهت انتقال عضو، به منظور پیشگیری از هدررفتن عضو پیوندی افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به محدودیت زمانی که در انتقال عضو وجود دارد، با از دسترس خارج شدن یک مرکز، امکان هدررفتن عضو وجود دارد و تعداد پیوندهای ممکن از طریق انتقال به موقع گیرنده و عضو اهداشده به مرکز پیوند، که درواقع همان جریان بین تسهیلات است، کاهش می‌یابد.

پارامتر بعدی بررسی شده، پارامتر تقاضاست. تأثیر تغییرات این پارامتر بر توابع هدف اول و دوم، در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش میزان تقاضا، هزینه کل شبکه نیز افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر تقاضا، منحنی پارتو آنها کاملاً بر هم منطبق می‌شود (سه منحنی پارتوی آخر) و بیانگر این مطلب است که میزان هزینه‌ها از نقطه‌ای به بعد ثابت می‌ماند؛ زیرا میزان تقاضای پاسخ داده نشده کاملاً به میزان عضو اهدایی وابسته است و تقاضای بیشتر از عرضه به تقاضای پاسخ داده نشده منجر می‌شود. همچنین با افزایش تقاضا، میزان کل جریان تا مقدار مشخصی رشد دارد و بعد از آن، تقاضای برآورده نشده تأثیری بر جریان کل ندارد.



شکل ۶- بررسی تأثیر تغییرات پارامتر تقاضا بر توابع هدف

Fig. 6- The impact of changes in demand parameters on objective functions

۶- نتیجه‌گیری

پیوند عضو از شاخه‌های اصلی حوزه سلامت و از روش‌های درمانی پیچیده در علم پزشکی است که در برخی موارد، مؤثرترین درمان است. با وجود پیشرفت‌های پزشکی و تکنولوژی و اهمیت زیاد آن در حوزه سلامت، هنوز در بیشتر کشورها، هزاران بیمار در انتظار دریافت عضو به سر می‌برند و تعداد زیادی از آنها قبل از دریافت عضو، فوت می‌کنند. یک شبکه پیوند عضو با کارایی بالا، علاوه بر کاهش هزینه‌های شبکه، تأثیر چشمگیری در بهبود وضعیت لیست‌های انتظار عضو و آمار تلفات دارد. در این پژوهش با هدف کارایی بیشتر شبکه پیوند، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه برای مسئله مکان‌یابی-تخصیص تسهیلات شبکه پیوند ارائه شد. بهره‌گیری از پژوهش پیشنهادی، به بهبود فرآیند پیوند عضو کشور، به ویژه کاهش اعضای پیوندی از دست رفته و نرخ مرگ و میر ناشی از آن منجر می‌شود. عمده تفاوتی که این مدل با تحقیقات گذشته دارد، بحث تعیین پشتیبان برای مراکز پیوند است. این مدل علاوه بر کمینه‌سازی مجموع کل هزینه‌های شبکه پیوند، بر جریان عضو بین مراکز فراهم‌آوری و مراکز پیوند تمرکز کرده و به بیشینه‌سازی این جریان با در نظر گرفتن زمان سفر بررسی شده است. علاوه بر این، در این پژوهش به منظور نزدیک کردن مسئله به شرایط واقعی، سطح اول تسهیلات شبکه، بیمارستان‌ها در نظر گرفته و جریان بین بیمارستان‌ها با مراکز فراهم‌آوری عضو لحاظ شد. به منظور حل مسائل در ابعاد بزرگ، یک الگوریتم ابتکاری بر مبنای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چندهدفه توسعه داده شد. نتایج نشان داده است که الگوریتم ابتکاری از لحاظ زمان حل، در حل نمونه مسائل متوسط و بزرگ، عملکرد نسبتاً بهتری در مقایسه با روش محدودیت اسیلون تعمیم‌یافته دارد.

در ادامه این تحقیق و به جهت بهبود بیشتر کارایی شبکه، شانس موفقیت پیوند در هر مرکز، زمان انتظار در مراکز و استفاده از گونه حمل و نقل هوایی در انتقال بیماران اهداکننده و گیرنده مدنظر قرار گرفته می‌شود. در مدل ارائه شده، احتمال در دسترس بودن مراکز پشتیبان ثابت فرض شده است؛ بنابراین، فرض دسترس‌ناپذیری مراکز پشتیبان برای توسعه مدل در نظر گرفته می‌شود. همچنین لحاظ مواردی نظیر ظرفیت برای مراکز فراهم‌آوری و پیوند به دلیل تراکم جریان ورودی، تلاش در جهت کمینه‌سازی عضوهای هدررفته، مکان‌یابی آژانس‌های حمل و نقل

هم‌زمان با مکان‌یابی دیگر تسهیلات شبکه و بررسی تأثیر آن بر زمان انتقال عضوهای اهدایی و هزینه‌ها در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد خانم الهام شریفی با عنوان «مکان‌یابی تسهیلات بر شبکه پیوند عضو با در نظر گرفتن پشتیبان برای مراکز پیوند» در دانشگاه صنعتی اصفهان است.

References

- Aghazadeh, S. M., Mohammadi, M., & Naderi, B. (2018). Robust bi-objective cost-effective, multi-period, location-allocation organ transplant supply chain. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 29(1), 17-36. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2018.088578>
- Bandyopadhyay, S., Saha, S., Maulik, U., & Deb, K. (2008). A simulated annealing-based multiobjective optimization algorithm: AMOSA. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 12(3), 269-283. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2007.900837>.
- Beliën, J., De Boeck, L., Colpaert, J., Devesse, S., & Van Den Bossche, F. (2013). Optimizing the facility location design of organ transplant centers. *Decis. Support System*, 54, 1568-1579. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.059>
- Bertsimas, D., Farias, V.F., & Trichakis, N.C. (2013). Fairness, efficiency, and flexibility in organ allocation for kidney transplantation. *Operations Research*, 61, 73-87. <https://doi.org/10.1287/opre.1120.1138>
- Fathollahi, F. A. M., Khalili, H. A., and Al-e-hashem, S. M. J. (2025). An efficient metaheuristic algorithm for the organ transplant logistics network considering urban traffic and cold ischemia constraints. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, pp.1-45. <https://doi.org/10.1007/s10696-025-09625-6>.
- Goli, A., Ala, A., & Mirjalili, S.A. (2023). A robust possibilistic programming framework for designing an organ transplant supply chain under uncertainty. *Annals of Operations Research*, 328.1, 493-530. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04829-7>.
- Haimes, Y. Y., Lasdon, L. S., & Wismer, D. A. (1971). On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-1(3), 296-297. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1971.4308298>
- Hartigan, J. A., & Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(1), 100-108. <https://doi.org/10.2307/2346830>
- 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. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1100.1249>
- Madani, R., Shahandeh Nookabadi, A., & Hejazi, S.R. (2018). A bi-objective, reliable single allocation p-hub maximal covering location problem. *Mathematical formulation and solution approach, The Journal of Air Transport Management*, 68, 118-136. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2017.09.001>
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), 455-465. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.037>
- Rajmohan, M., Theophilus, C., Sumalatha, M. R., & Saravanakumar, S. (2017). Facility location of organ procurement organisations in Indian health care supply chain management. *South African J. Ind Eng*, 28(1), 90-102. <https://doi.org/10.7166/28-1-1508>
- Rabbani, M., & Talebi, E. (2019). A comprehensive mathematical model for designing an organ transplant supply chain network under uncertainty. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 32, 835-841. <https://doi.org/10.5829/ije.2019.32.06c.06>
- Stahl, J.E., Kong, N., Shechter, S.M., Schaefer, A.J., & Roberts, M.S. (2005). A methodological framework for optimally reorganizing liver transplant regions. *Medical Decision Making*, 25(1), 35-46. <https://doi.org/10.1177/0272989X04273137>

- Salimian, S., & Mousavi, S.M. (2023). A robust possibilistic optimization model for organ transplantation network design considering climate change and organ quality. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14.12, 16427-16450. <https://doi.org/10.1007/s12652-022-03863-4>
- 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 & Industrial Engineering*, 74, 139-148. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.05.008>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.09.007>

¹ Organ Transplant Network

² Stahl et al.

³ Kong et al.

⁴ Branch and Price

⁵ Zahiri et al.

⁶ Robust Possibilistic Programming

⁷ Simulated Annealing

⁸ Differential evolution

⁹ Rajmohan et al.

¹⁰ Aghazadeh et al.

¹¹ Rabbani & Talebi

¹² Goli et al.

¹³ Salimian & Mousavi

¹⁴ Fathollahi-Fard et al.

¹⁵ Madani et al.

¹⁶ Haimes et al.

¹⁷ Lexicographic

¹⁸ Hybrid Multi-Objective Simulated Annealing (HMOSA)

¹⁹ Bandyopadhyay et al.

²⁰ Hyperarea

²¹ Mean Ideal Distance

²² Diversification Metric

²³ Spacing Metric