

# توسعه‌ی شبکه‌ی لجستیک پیشرو و معکوس در خدمات درمانی در شرایط عدم قطعیت و بحران

الهام منصوری: کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر.

مصطفی حاجی آقایی کشتلی: استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر.

رضا توکلی مقدم\*: استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، Email: tavakoli@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۵

تاریخ پذیرش: ۹۶/۲/۱۸

## چکیده

افزایش جمعیت، تغییر سبک زندگی، افزایش بیماری‌ها و سوانح و حوادث طبیعی و غیرطبیعی موجب اهمیت روزافزون زنجیره‌های خدمات درمانی شده است. از سویی اهمیت خون به منزله‌ی ماده‌ای کمیاب و حیاتی برای بشر و خاصیت فسادپذیری شدید و شرایط خاص حمل و نگهداری آن از سوی دیگر مسائلی هستند که در سال‌های اخیر محققان را به چالش کشیده‌اند. اهمیت این حوزه به‌خصوص در شرایط وقوع بحران و کمبود شدید خون می‌تواند دوچندان شود. در این مقاله، یک مدل ریاضی در زنجیره‌ی حلقه‌ی بسته‌ی تأمین خون در شرایط عدم قطعیت ارائه می‌گردد که در آن لجستیک معکوس و شرایط بحران نیز در نظر گرفته می‌شود. با توجه به پیچیدگی در حل مدل پیشنهادی، پس از ارائه‌ی روش دقیق برای اعتباردهی مدل، از تلفیق دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک (GA) و شبیه‌سازی تبرید (SA) استفاده می‌شود. سپس به سنجش اعتبار الگوریتم فراابتکاری تلفیقی در مقایسه با نتایج نرم‌افزار GAMS IDE /Cplex در حل مسائل کوچک، متوسط و بزرگ پرداخته می‌شود و در خاتمه نیز نتایج تحلیل حساسیت ارائه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: زنجیره‌ی تأمین خون، لجستیک پیشرو و معکوس، الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید

## Development of a Forward/Reverse Logistic Network in Health Care under Uncertainty and Disaster

Elham Mansouri<sup>1</sup>, Mostafa Haj aghaiee-Keshteli<sup>2</sup>, Reza Tavakkoli-Moghaddam<sup>3\*</sup>

### Abstract

Population growth, changes in lifestyles, increase in diseases, and natural and unnatural accidents have caused ever increasing importance of the health care chains. On the one hand, the importance of blood as a rare and vital element, and on the other hand, the specific conditions of transportation and maintenance, have been challenging researchers in recent years. The importance of this area will escalate especially in crisis occurrence and severe shortage of blood. In this paper, a mathematical model of a closed-loop blood supply chain under uncertainty is proposed, in which reverse logistics and emergency situations are also considered. Due to the complexity in solving the proposed model, after putting forward accurate method to validate the model, a hybrid algorithm based on genetic algorithm (GA) and simulated annealing (SA) is utilized. Then, the validation of this hybrid algorithm is evaluated in comparison with the results of GAMS IDE /Cplex software in solving small, medium and large-sized problems. Finally, the results of the sensitivity analysis are presented.

**Keywords:** Blood Supply Chain, Forward/Reverse Logistics, Genetic Algorithm, Simulated Annealing

<sup>1</sup> M.Sc., Department of Industrial Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.

<sup>3</sup> Prof., School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran; Email: tavakoli@ut.ac.ir

## مقدمه

مدیریت خون و فرآورده‌های آن یک مسئله‌ی حیاتی برای بشر است. خون کالایی معمولی نیست و خصوصیات هم‌چون فسادپذیری شدید، حیاتی و ارزشمند بودن، داشتن عدم تقارن بین عرضه و تقاضا و عدم قطعیت بسیار در عرضه اهداکنندگان موجب پیچیده‌تر شدن هرچه بیشتر زنجیره‌ی تأمین خون و توزیع و بازتوزیع آن شده است. از طرفی به‌خصوص در مواقع بحرانی و اوج تقاضا، کمبود این نوع فرآورده‌ها، هزینه‌ی بالایی برای جامعه در بر دارد، زیرا می‌تواند موجب افزایش نرخ مرگ و میر شود و از طرف دیگر منقضی شدن و دورریز خون عموماً به دلیل اهمیت بالایی آن در حیات انسان‌ها و کمبود اهداکنندگان غیرقابل قبول است [۱].

زنجیره‌ی تأمین، مجموعه‌ای از عوامل به هم پیوسته و مرتبط در چرخه‌ای از یک یا چند محصول (خدمت) است که با هم در تعامل هستند تا محصول (خدمت) مورد نظر را تولید و به مشتری (بیمار) عرضه کنند. در اکثر مدل‌های زنجیره‌ی تأمین خون که تا به حال ارائه شده‌اند، خون کامل ابتدا از اهداکنندگان جمع‌آوری شده، در آزمایشگاه‌های منطقه‌ای فرآوری شده و به فرآورده‌های خونی مختلف تبدیل می‌شوند و سپس این فرآورده‌های خونی به مراکز بانک خون و بعد از آن به بیمارستان‌ها منتقل و به بیماران تزریق می‌شوند [۲، ۳]. در پژوهش حاضر هدف، مدل‌سازی ریاضی یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین خون جامع با تعیین مکان اجزای شبکه با در نظرگیری کمبودها و اتلاف‌ها به دلایلی همچون نگهداری بیش از حد خون و گذشتن از تاریخ انقضای آن، حمل یا نگهداری خون در دما یا محیط نامناسب، مثبت بودن آزمایشات عفونی یا انواع بیماری‌های مربوط به خون در آزمایشگاه و بسیاری عوامل دیگر است که در هر یک از مراحل زنجیره می‌تواند باعث دورریز خون شود، که این مسئله در مواقع وجود بحران می‌تواند موجب خسارت جانی بالایی شود. البته گفتنی است که نحوه‌ی دورریز خون و فرآورده‌های آن به علت امکان آلودگی برای محیط زیست، دارای سیستم پیچیده‌تری نسبت به دورریز دیگر کالاها است. لذا در این مقاله، مطالعه‌ی موردی که تمرکز بر زنجیره‌ی تأمین خون به‌خصوص در شرایط وقوع بحران متمرکز است، این پژوهش را از دیگر مدل‌های دارای سیستم لجستیک هم‌زمان پیشرو و معکوس و دارای حلقه‌ی بسته متمایز می‌کند و به همین علت می‌توان آن را در تحقیقاتی که نمونه‌ی مورد مطالعه دارای محوریت اصلی است، دسته‌بندی کرد. مدل پیشنهادی به علت در نظرگیری شرایط بحران دارای سیستم لجستیک پیشرو و معکوس و دارای حلقه‌ی بسته است که در آن واحدهای خونی نزدیک به فساد از بیمارستان‌هایی با مصرف پایین به بیمارستان‌های نزدیک‌تر به محل وقوع بحران و با مصرف بالا انتقال می‌یابد.

برای برنامه‌ریزی لجستیک اضطراری در شرایط بحران و با توجه به ماهیت عدم قطعیت برخی پارامترها در شبکه‌ی زنجیره‌ی خون، در نظر گرفتن شرایط غیرقطعی ضروری به نظر می‌رسد [۴]. مطابق با تعریف نجفی و همکاران [۵]، بحران، بیانگر رویدادی است که موجب خسارت، خرابی، آسیب و از دست رفتن جان

انسان‌ها و یا زوال خدمات درمانی و سلامت در یک زنجیره‌ی تأمین می‌شود و می‌تواند شامل بلایای طبیعی، بیماری‌های مسری یا جنگ و حملات تروریستی شود. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در چنین شرایطی مطرح می‌شود، برنامه‌ریزی برای تأمین خون در طول بحران و بعد از آن در زمان وقوع یک افزایش ناگهانی در تقاضای خون است.

روش‌های فراابتکاری مورد استفاده در حل مسائل طراحی شبکه غالباً مبتنی بر روش‌های ترکیبی (تلفیقی) هستند. برای حل مدل پیشنهادی در این مقاله، از تلفیق دو الگوریتم فراابتکاری که در جستجو متفاوت عمل می‌کنند، استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک (GA) برخلاف الگوریتم شبهه‌سازی تبرید (SA)، یک الگوریتم با رویکردی بر پایه‌ی جمعیت است. الگوریتم SA با اصلاح تنها یک جواب در یک حرکت محلی، جواب جدیدی را می‌سازد و GA با ترکیب دو جواب متفاوت، جواب‌های جدید را ایجاد می‌کند. به‌کارگیری این دو الگوریتم با رویکردهای حل متفاوت می‌تواند کارایی الگوریتم ترکیبی را مسائل با ابعاد بزرگ و در دنیای واقعی به خصوص در شرایط وقوع بحران دوچندان کند.

## پیشینه‌ی پژوهش

با توجه به افزایش جمعیت و تغییر سبک زندگی در جوامع بشری، افزایش بیماری‌ها و سوانح و حوادث طبیعی و غیرطبیعی، نیاز به خون به‌منزله‌ی یک ماده‌ی حیاتی مسئله‌ای است که در سال‌های اخیر محققان را بیشتر به چالش کشیده است. تحقیقات روی مدیریت محلی و منطقه‌ای تأمین خون از دهه‌ی ۱۹۶۰ آغاز شد و در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰ و اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ به اوج خود رسید. پژوهش‌هایی در این زمینه را می‌توان در اواسط دهه‌ی ۱۹۸۰ در کارهای نامیاس [۶] و پراکتاکوس [۷] مشاهده کرد. در مطالعه‌ی پراکتاکوس، سیاست‌ها و تصمیمات مدیریت بانک خون بیشتر به کانون توجه است، اما در مطالعه‌ی نامیاس توجه بیشتر به تئوری‌های موجودی‌های فسادپذیر معطوف شده است.

صرف نظر از تلاش‌های بسیاری که در زمینه‌ی مدل‌سازی مسائل مکان‌یابی و طراحی زنجیره تأمین انجام شده است، بررسی طراحی زنجیره‌ی تأمین خون به ندرت بررسی شده است. مرور ادبیات جامعی که توسط بلین و فورس [۸] انجام شده است، نشان می‌دهد که در زمینه‌ی تصمیمات استراتژیک در مورد مکان‌یابی تسهیلات شکاف‌های بسیاری در ادبیات تحقیق وجود دارد. پیرسکالا [۲]، خلاصه‌ای از مدل‌های ارائه شده برای تخصیص مناطق اهدا و مراکز تزریق خون به مراکز بانک خون ارائه می‌دهد که هدف آن‌ها تعیین تعداد مراکز بانک خون در هر ناحیه، مکان‌یابی این تسهیلات و تطابق عرضه و تقاضا است. این مطالعه همچنین مدل‌های عملیاتی و تاکتیکی که بر روی جمع‌آوری خون، مدیریت موجودی و تخصیص بیمارستان‌ها تمرکز دارند را بررسی می‌کند. ناگورنی و همکاران [۸] و ناگورنی و معصومی [۹] مدل‌هایی برای بهینه‌سازی شبکه برای سیستم‌های منطقه‌ای خون که شامل سایت‌های دریافت خون، تسهیلات فرآوری، تسهیلات ذخیره‌سازی، مراکز توزیع و بیمارستان‌ها هستند؛

ارائه دادند. مدل‌های ارائه شده مسائل متفاوتی مانند تعیین تخصیص‌های بهینه و هزینه‌ی معدوم‌سازی هدررفته‌ها را در زنجیره‌ی تأمین خون در نظر گرفتند. دو مطالعه‌ی کاربردی در زنجیره‌ی تأمین خون توسط شاهین و همکاران [۱۰] و شا و هوانگ [۱۱] انجام شده‌اند. شاهین و همکاران یک مدل تک دوره‌ای مکان‌یابی-تخصیص برای منطقه‌ای سازی خدمات خون در هلال احمر ترکیه ارائه دادند. مسئله‌ی آن‌ها به صورت سلسله‌مراتبی در نظر گرفته شده بود که شامل مراکز خون منطقه‌ای (سطح اول)، ایستگاه‌های خون (سطح دوم) و واحدهای سیار خون (سطح سوم) است. متفاوت از مباحث زنجیره‌ی تأمین خون، مطالعاتی نیز در حوزه‌ی مکان‌یابی بیمارستان و مراکز خدمات درمانی انجام شده است، مانند مقاله‌ای که توسط حسامی و شیشه‌بری در خصوص سیاست‌های مکان‌یابی مراکز ارائه‌ی خدمات درمانی نگاشته شده است. این مقاله شامل مدلی توسعه یافته است که در آن با توجه به ظرفیت و تقاضای متفاوت در مناطق مختلف، مراکزی برای احداث بیمارستان‌ها مکان‌یابی شده‌اند [۱۲].

در حوزه‌ی بحران، شا و هوانگ مدلی ارائه دادند که به تأمین خون در شرایط اضطراری بعد از زلزله در پکن می‌پردازد. هدف این مدل تعیین مکان و تخصیص بهینه‌ی تسهیلات موقت خون است که هزینه‌های عملیاتی را در یک افق زمانی مشخص کمینه می‌کند. همچنین نجفی و همکاران [۵] در مطالعه‌ی خود بر روی مسئله‌ی برنامه‌ریزی لجستیک (لجستیک کالاها یا افراد آسیب‌دیده در شرایط بحران) تمرکز کردند. جبارزاده و همکاران [۴] به فرمول‌بندی یک مدل بهینه‌سازی استوار برای طراحی زنجیره‌ی تأمین خون با در نظر گرفتن سناریوهای بحران متفاوت می‌پردازند. مدل‌سازی فوق در شرایط پویا با تقاضا و عرضه‌ی غیرقطعی انجام شده و هر دو فاز واکنش سریع برای عرضه‌ی خون بلافاصله بعد از وقوع بحران و فاز آماده‌سازی و تعیین مکان استراتژیک تسهیلات ثابت خون را در نظر می‌گیرد.

تعداد زیادی از مقالات در حوزه‌ی کمی به طراحی شبکه‌ی لجستیک معکوس و برنامه‌ریزی اختصاص می‌یابند. انجمن مدیریت لجستیک در این رابطه تعریفی ارائه می‌کند. لجستیک معکوس عبارت است از: برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل جریان کار و مقرون به صرفه‌ی مواد خام، موجودی در گردش، محصول نهایی و اطلاعات مربوطه از نقطه‌ی مصرف به نقطه‌ی مبدأ با هدف بازیابی ارزش یا دورریز مناسب [۱۳].

در دهه‌ی گذشته، مدل‌های بسیاری برای طراحی شبکه‌ی لجستیکی بر اساس تئوری مکان‌یابی تسهیلات توسعه یافته‌اند. با نگاهی به ادبیات زنجیره‌ی تأمین در می‌یابیم که بخش عظیمی از آن در زمینه‌ی طراحی شبکه‌ی لجستیک پیشرو است و بخش اندکی به طراحی شبکه‌ی لجستیک معکوس با هدف بهینه‌سازی جریان معکوس از مشتریان به مراکز بازیابی و دفع مناسب، تعیین تعداد مراکز جمع‌آوری، بازیابی و دفع، مکان‌های آن‌ها و ظرفیت‌هایشان می‌پردازد. پژوهش‌ها در این زمینه چندوجهی هستند و به‌ویژه پس از سال ۲۰۰۵ به دلیل به رسمیت شناختن لجستیک معکوس به عنوان مشتقی از زنجیره‌ی تأمین و

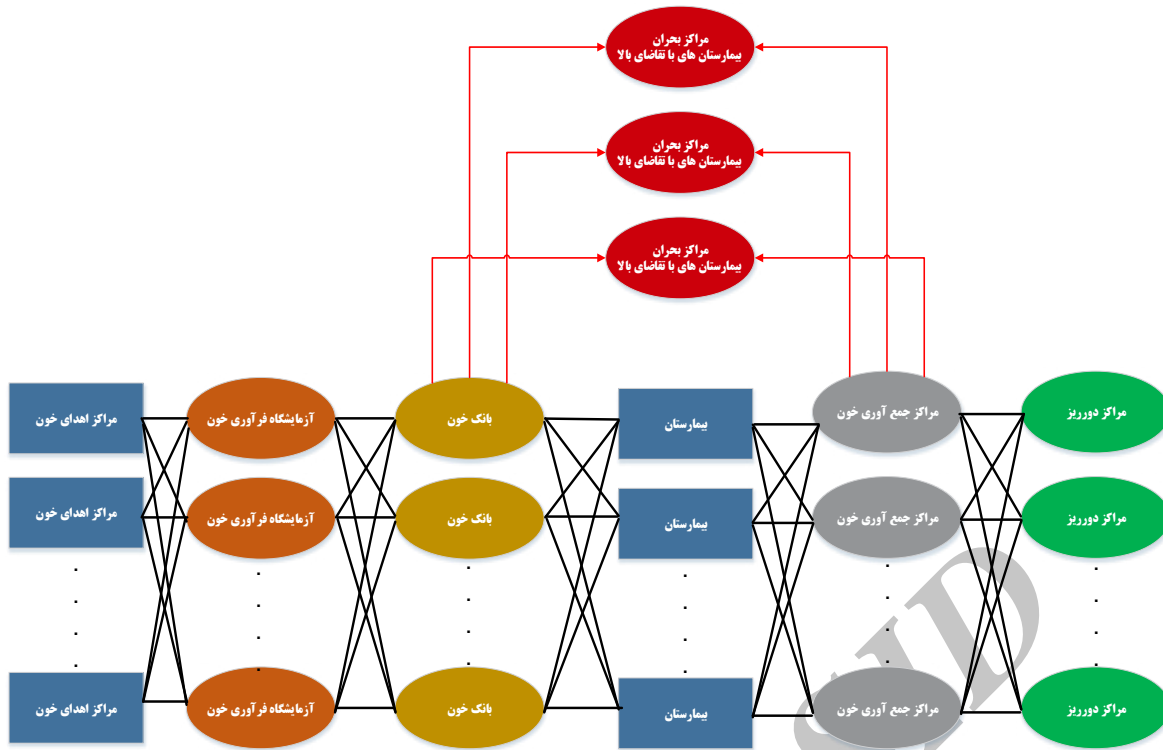
لجستیک و نیز توانایی بازیابی ارزش از محصولات برگشتی افزایش یافته‌اند. به عنوان مثال، روغنیان و پژوهش‌فر [۱۴] در مقاله‌ی خود به بررسی شبکه‌ی لجستیک معکوس در فضای عدم قطعیت می‌پردازند. آن‌ها احتمالی بودن را بر روی سه پارامتر ظرفیت، تقاضا و مقدار محصول بررسی کردند و سپس یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته‌ی احتمالی ارائه دادند. هاتفی و جولایی [۱۵] یک مدل طراحی شبکه‌ی قابل اطمینان برای لجستیک یکپارچه‌ی معکوس و پیشرو تحت شرایط تقاضای نامعین و خرابی تسهیلات ارائه می‌دهند. همچنین، پیشوایی و همکاران [۱۶] یک شبکه‌ی لجستیک معکوس مناسب برای کمینه کردن هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های ثابت را با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط طراحی کردند. در دهه‌ی گذشته با بررسی ادبیات موجود به این نکته پی می‌بریم که اکثر مسائل طراحی و برنامه‌ریزی از طریق روش‌های MILP، مدل‌سازی شده‌اند [۱۷].

در زمینه‌ی سیستم توزیع مجدد و بازگشت به زنجیره‌ی خون، مطالعات بسیار کمی وجود دارد؛ از آن جمله می‌توان به مطالعات دنسیوک و همکاران [۱۸] و کندل [۱۹] اشاره کرد. دنسیوک و همکاران [۱۸] یک سیستم توزیع مجدد گلبول‌های قرمز نزدیک به فساد را ارائه دادند. ایده‌ی این سیستم، حمل واحدهای خونی نزدیک به تاریخ انقضا از بیمارستان‌هایی با مصرف کم به بیمارستان‌های با تقاضای بالا است. این‌گونه شانس استفاده از آن‌ها قبل از فساد افزایش یافته و هدررفت خون کاهش می‌یابد.

استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری (به خصوص الگوریتم کارا و پرکاربرد ژنتیک) برای توسعه و مشاهده‌ی عملکرد مدل‌های پیشنهادی در ابعاد بزرگ اخیراً به وفور در ادبیات زنجیره‌ی تأمین و مکان‌یابی تسهیلات هم در زنجیره‌های حلقه بسته و هم در شرایط بحران مشاهده می‌شود [۲۰، ۲۱، ۲۲]. به عنوان نمونه در رابطه با استفاده از الگوریتم‌های GA و SA به طور همزمان می‌توان به مطالعه‌ی حاجی آقایی کشتلی و همکاران [۲۳] اشاره نمود. آن‌ها یک مدل ترکیبی تولید و حمل و نقل ریلی را به منظور تعیین برنامه‌ی زمان‌بندی تولید و تخصیص تسهیلات با استفاده از دو الگوریتم فوق توسعه دادند. همچنین کاربرد این دو الگوریتم به طور مجزا در مدل‌سازی شبکه‌های دارای سیستم بازتوزیع به وفور دیده می‌شود. برای مثال پیشوایی و همکاران [۱۶] از روش الگوریتم SA با شبیه‌سازی با جستجوی مخصوص در همسایگی جهت یافتن جواب نزدیک به بهینه برای حل مدل در خانواده‌ی NP-hard خود بهره گرفتند. علی‌رغم کارایی به‌کارگیری همزمان این دو الگوریتم با توجه به کاربرد وسیع و جستجو با روش‌های متفاوت کمتر مقاله‌ای در حوزه‌ی زنجیره‌ی تأمین خون و شرایط بحران از ترکیب الگوریتم‌های GA و SA کمک گرفته است.

### تعریف مسئله و مدل ریاضی پیشنهادی

مسئله‌ی بیان شده در این تحقیق، پارامترهایی همچون میزان عرضه‌ی خون، میزان تقاضا، ظرفیت هر یک از مراکز، میزان اتلاف خون، میزان دورریز و هزینه‌های مرتبط را در بر می‌گیرد. این مدل با دو تابع هدف مجزا میزان هزینه‌های راه‌اندازی و طراحی



تصویر ۱: مدل شبکه‌ی زنجیره‌ای تأمین خون

### نمادگذاری

#### مجموعه‌ها

مرکز اهدای خون	$S$
آزمایشگاه	$L$
بانک خون	$B$
بیمارستان	$H$
منطقه‌ی بحران	$C$
مرکز جمع‌آوری	$F$
مرکز دورریز	$D$
محصول (نوع خون)	$I$

#### پارامترها

هزینه‌ی راه‌اندازی آزمایشگاه $l$	$\text{cost}_l^{lab}$
هزینه‌ی راه‌اندازی بانک خون $b$	$\text{cost}_b^{bank}$
هزینه‌ی راه‌اندازی مرکز جمع‌آوری $f$	$\text{cost}_f^{col}$
هزینه‌ی راه‌اندازی مرکز دورریز $d$	$\text{cost}_d^{dis}$
هزینه‌ی پردازش هر واحد محصول $i$ در آزمایشگاه $l$	$\text{cost}_{il}^{p-lab}$
هزینه‌ی نگهداری هر واحد محصول $i$ در بانک خون $b$	$\text{cost}_{ib}^{p-bank}$
هزینه‌ی پردازش هر واحد محصول $i$ در مرکز جمع‌آوری $f$	$\text{cost}_{if}^{p-col}$

شبکه‌ی زنجیره‌ای تأمین خون و نیز میزان کمبود خون را به دلیل اهمیت بالای خون‌رسانی کافی در شرایط وقوع بحران کمینه می‌کند. همان‌طور که در تصویر ۱ مشاهده می‌شود، انواع محصولات خونی از مراکز اهدای خون برای فرآوری و اعمال آزمایشات مربوط برای سالم بودن خون به آزمایشگاه منتقل می‌شوند. در مرحله‌ی دوم این محصولات به بانک‌های خون منتقل می‌شوند.

در شرایط عدم وقوع بحران، می‌توان مراکز بحران را به عنوان نقاط با تقاضای بالا در نظر گرفت. محصولات خونی در این شرایط برای تأمین تقاضا بسته به هزینه‌ی انتقال خون به مراکز تقاضای معمولی یا بیمارستان‌ها و یا مراکز بحران انتقال می‌یابند، محصولاتی که به بیمارستان‌های با تقاضای کم ورود پیدا کرده‌اند در صورت مواجهه با مازاد فرآورده‌های خونی به مراکز جمع‌آوری هدایت می‌شوند تا به جای اتلاف به مراکز بحرانی رفته و حداکثر پوشش تقاضا در این شرایط انجام می‌گیرد. پس از مراکز جمع‌آوری سایت‌های دورریز خون قرار دارند تا در صورت مازاد بودن فرآورده‌های خونی بدون ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی دورریز شوند.

### مفروضات مسئله

- ظرفیت مراکز مختلف اهدا، بانک خون، مراکز جمع‌آوری و دورریز معلوم است.
- هزینه‌های راه‌اندازی سایت‌های آزمایشگاه، بانک خون، مراکز جمع‌آوری و دورریز معلوم است.
- هزینه‌های انتقال، پردازش، نگهداری و دورریز به ازای هر واحد محصول خونی معلوم است.
- تقاضای بیمارستان و میزان اتلاف و دورریز خون معلوم است.

### متغیرهای تصمیم‌گیری

اگر آزمایشگاه 1 تأسیس شود در غیر این صورت	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} y_1^{lab}$
اگر بانک خون b تأسیس شود در غیر این صورت	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} y_b^{bank}$
اگر مرکز جمع‌آوری f تأسیس شود در غیر این صورت	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} y_f^{col}$
اگر مرکز دورریز d تأسیس شود در غیر این صورت	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} y_d^{dis}$
اگر گروه خونی نوع i از مرکز اهدای خون s به آزمایشگاه 1 برود در غیر این صورت	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} y_{isl}^{sub-lab}$
اگر گروه خونی نوع i از آزمایشگاه 1 به بانک خون b برود در غیر این صورت	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} y_{ilb}^{lab-bank}$
اگر گروه خونی نوع i از بانک خون b به بیمارستان h برود در غیر این صورت	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} y_{ibh}^{bank-hos}$
اگر گروه خونی نوع i از بانک خون b به مرکز بحران c برود در غیر این صورت	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} y_{ibc}^{bank-cris}$
اگر گروه خونی نوع i از بیمارستان h به مرکز جمع‌آوری f برود در غیر این صورت	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} y_{ihf}^{hos-col}$
اگر گروه خونی نوع i از مرکز جمع‌آوری f به مرکز دورریز d برود در غیر این صورت	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} y_{ifd}^{col-dis}$
اگر گروه خونی نوع i از مرکز جمع‌آوری f به مرکز بحران c برود در غیر این صورت	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} y_{ifc}^{col-cris}$
مقدار گروه خونی نوع i که از مرکز اهدای خون s به آزمایشگاه 1 منتقل می‌شود	Integer $x_{isl}^{sup-lab}$
مقدار گروه خونی نوع i که از آزمایشگاه 1 به بانک خون b منتقل می‌شود	Integer $x_{ilb}^{lab-bank}$
مقدار گروه خونی نوع i که از بانک خون b به بیمارستان h منتقل می‌شود	Integer $x_{ibh}^{bank-hos}$
مقدار گروه خونی نوع i که از بانک خون b به مرکز بحران c منتقل می‌شود	Integer $x_{ibc}^{bank-cris}$

هزینه‌ی دورریز هر واحد محصول i در مرکز دور ریز d	$\text{cost}_{id}^{p-dis}$
هزینه‌ی انتقال هر واحد محصول i از مرکز اهدای خون s به آزمایشگاه 1	$\text{cost}_{isl}^{sup-lab}$
هزینه‌ی انتقال هر واحد محصول i از آزمایشگاه 1 به بانک خون b	$\text{cost}_{ilb}^{lab-bank}$
هزینه‌ی انتقال هر واحد محصول i از بانک خون b به بیمارستان h	$\text{cost}_{ibh}^{bank-hos}$
هزینه‌ی انتقال هر واحد محصول i از بانک خون b به مرکز بحران c	$\text{cost}_{ibc}^{bank-cris}$
هزینه‌ی انتقال هر واحد محصول i از بیمارستان h به مرکز جمع‌آوری f	$\text{cost}_{ihf}^{hoc-col}$
هزینه‌ی انتقال هر واحد محصول i از مرکز جمع‌آوری f به مرکز دورریز d	$\text{cost}_{ifd}^{col-dis}$
هزینه‌ی انتقال هر واحد محصول i از مرکز جمع‌آوری f به مرکز بحران c	$\text{cost}_{ifc}^{col-cris}$
ظرفیت مرکز اهدای خون s در تأمین خون نوع i	$\text{cap}_{is}^{sup}$
ظرفیت آزمایشگاه 1 برای نگهداری خون نوع i	$\text{cap}_{il}^{lab}$
ظرفیت بانک خون b برای نگهداری خون نوع i	$\text{cap}_{ib}^{bank}$
ظرفیت مرکز جمع‌آوری f برای نگهداری خون نوع i	$\text{cap}_{if}^{col}$
ظرفیت مرکز دورریز d برای دفع خون نوع i	$\text{cap}_{id}^{dis}$
تقاضای بیمارستان h برای خون نوع i	$\text{dem}_{ih}^{hos}$
حداکثر جریان انتقال خون نوع i از مرکز اهدای خون s به آزمایشگاه 1	$\text{flow}_{isl}^{sup-lab}$
حداکثر جریان انتقال خون نوع i از آزمایشگاه 1 به بانک خون b	$\text{flow}_{ilb}^{lab-bank}$
حداکثر جریان انتقال خون نوع i از بانک خون b به بیمارستان h	$\text{flow}_{ibh}^{bank-hos}$
حداکثر جریان انتقال خون نوع i از بانک خون b به مرکز بحران c	$\text{flow}_{ibc}^{bank-cris}$
حداکثر جریان انتقال خون نوع i از بیمارستان h به مرکز جمع‌آوری f	$\text{flow}_{ihf}^{hos-col}$
حداکثر جریان انتقال خون نوع i از مرکز جمع‌آوری f به مرکز دورریز d	$\text{flow}_{ifd}^{col-dis}$
حداکثر جریان انتقال خون نوع i از مرکز جمع‌آوری f به مرکز بحران c	$\text{flow}_{ifc}^{col-cris}$
میزان اتلاف خون نوع i توسط آزمایشگاه 1	$\alpha_{il}$
میزان دورریز خون نوع i توسط مرکز جمع‌آوری f	$\beta_{if}$
هزینه‌ی نگهداری هر واحد خون نوع i	$\text{hold}_i$
عدد مثبت بسیار بزرگ (بی‌نهایت)	$\text{bigm} \sim \infty$

رابطه ی ۴:

$$\sum_{l,b} x_{ilb}^{lab-bank} \times y_{ilb}^{lab-bank} \leq \sum_{l,b} flow_{ilb}^{lab-bank} \quad \forall i$$

رابطه ی ۵:

$$\sum_{b,h} x_{ibh}^{bank-hos} \times y_{ibh}^{bank-hos} \leq \sum_{b,h} flow_{ibh}^{bank-hos} \quad \forall i$$

رابطه ی ۶:

$$\sum_{b,c} x_{ibc}^{bank-cris} \times y_{ibc}^{bank-cris} \leq \sum_{b,c} flow_{ibc}^{bank-cris} \quad \forall i$$

رابطه ی ۷:

$$\sum_{h,f} x_{ihf}^{hos-col} \times y_{ihf}^{hos-col} \leq \sum_{h,f} flow_{ihf}^{hos-col} \quad \forall i$$

رابطه ی ۸:

$$\sum_{f,d} x_{ifd}^{col-dis} \times y_{ifd}^{col-dis} \leq \sum_{f,d} flow_{ifd}^{col-dis} \quad \forall i$$

رابطه ی ۹:

$$\sum_{f,c} x_{ifc}^{col-cris} \times y_{ifc}^{col-cris} \leq \sum_{f,c} flow_{ifc}^{col-cris} \quad \forall i$$

رابطه ی ۱۰:

$$\sum_l x_{isl}^{sup-lab} \times y_{isl}^{sup-lab} \leq cap_{is}^{sup} \quad \forall i, s$$

رابطه ی ۱۱:

$$\sum_b x_{ilb}^{lab-bank} \times y_{ilb}^{lab-bank} \leq cap_{il}^{lab} \quad \forall i, l$$

رابطه ی ۱۲:

$$\sum_c x_{ibc}^{bank-cris} \times y_{ibc}^{bank-cris} + \sum_h x_{ibh}^{bank-hos} \times y_{ibh}^{bank-hos} \leq cap_{ib}^{bank} \quad \forall i, b$$

رابطه ی ۱۳:

$$\sum_c x_{ifc}^{col-cris} \times y_{ifc}^{col-cris} + \sum_d x_{ifd}^{col-dis} \times y_{ifd}^{col-dis} \leq cap_{if}^{col} \quad \forall i, f$$

رابطه ی ۱۴:

$$\sum_f x_{ifd}^{col-dis} \times y_{ifd}^{col-dis} \leq cap_{id}^{col} \quad \forall i, d$$

رابطه ی ۱۵:

$$\sum_b x_{ibh}^{bank-hos} \times y_{ibh}^{bank-hos} = dem_{ih} + inv_{ih} \quad \forall i, h$$

رابطه ی ۱۶:

$$inv_{ih} = inv_{ih}^+ + inv_{ih}^- \quad \forall i, h$$

مقدار گروه خونی نوع i که از بیمارستان h به مرکز جمع آوری f منتقل می شود

Integer  $x_{ihf}^{hos-col}$

مقدار گروه خونی نوع i که از مرکز جمع آوری f به مرکز دورریز d منتقل می شود

Integer  $x_{ifd}^{col-dis}$

مقدار گروه خونی نوع i که از مرکز جمع آوری f به مرکز بحران c منتقل می شود

Integer  $x_{ifc}^{col-cris}$

متغیر کمکی (موجودی) Free  $inv_{ih}$

میزان خون نوع i اضافه در بیمارستان h

Integer  $inv_{ih}^+$

میزان کمبود خون نوع i در بیمارستان h

Integer  $inv_{ih}^-$

### مدل ریاضی

رابطه ی ۱:

$$\text{Min } Z^{cost} =$$

$$\sum_l cost_l^{lab} \times y_l^{lab} + \sum_b cost_b^{bank} \times y_b^{bank} +$$

$$\sum_f cost_f^{col} \times y_f^{col} + \sum_d cost_d^{dis} \times y_d^{dis} +$$

$$\sum_{i,l} cost_{il}^{p-lab} \times x_{isl}^{sup-lab} + \sum_{i,b} cost_{ib}^{p-bank} \times x_{ilb}^{lab-bank} +$$

$$\sum_{i,f} cost_{if}^{p-col} \times x_{ihf}^{hos-col} + \sum_{i,d} cost_{id}^{p-dis} \times x_{ifd}^{col-dis} +$$

$$\sum_{i,s,l} cost_{isl}^{sup-lab} \times x_{isl}^{sup-lab} \times y_{isl}^{sup-lab} +$$

$$\sum_{i,l,b} cost_{ilb}^{lab-bank} \times x_{ilb}^{lab-bank} \times y_{ilb}^{lab-bank} +$$

$$\sum_{i,b,h} cost_{ibh}^{bank-hos} \times x_{ibh}^{bank-hos} \times y_{ibh}^{bank-hos} +$$

$$\sum_{i,b,c} cost_{ibc}^{bank-cris} \times x_{ibc}^{bank-cris} \times y_{ibc}^{bank-cris} +$$

$$\sum_{i,h,f} cost_{ihf}^{hos-col} \times x_{ihf}^{hos-col} \times y_{ihf}^{hos-col} +$$

$$\sum_{i,f,d} cost_{ifd}^{col-dis} \times x_{ifd}^{col-dis} \times y_{ifd}^{col-dis} +$$

$$\sum_{i,f,c} cost_{ifc}^{col-cris} \times x_{ifc}^{col-cris} \times y_{ifc}^{col-cris} + \sum_{i,h} hold_i \times inv_{ih}^+$$

$$\text{Min } Z^{shortage} = \sum_{i,h} inv_{ih}^-$$

s.t. رابطه ی ۲:

رابطه ی ۳:

$$\sum_{s,l} x_{isl}^{sup-lab} \times y_{isl}^{sup-lab} \leq \sum_{s,l} flow_{isl}^{sup-lab} \quad \forall i$$

رابطه‌ی ۱۷:

$$\sum_l x_{ilb}^{lab-bank} \times y_{ilb}^{lab-bank} = \sum_c x_{ibc}^{bank-cris} \times y_{ibc}^{bank-cris} + \sum_h x_{ibh}^{bank-hos} \times y_{ibh}^{bank-hos} \quad \forall i, b$$

رابطه‌ی ۱۸:

$$\sum_b x_{ilb}^{lab-bank} \times y_{ilb}^{lab-bank} = \sum_s (1 - \alpha_{il}) \times \sum_s x_{isl}^{sup-lab} \times y_{isl}^{sup-lab} \quad \forall i, l$$

رابطه‌ی ۱۹:

$$\sum_f x_{ihf}^{hos-col} \times y_{ihf}^{hos-col} \geq \sum_b x_{ibh}^{bank-hos} \times y_{ibh}^{bank-hos} - dem_{ih} \quad \forall i, h$$

رابطه‌ی ۲۰:

$$\sum_d x_{ifd}^{col-dis} \times y_{ifd}^{col-dis} = \beta_{if} \times \sum_h x_{ihf}^{hos-col} \times y_{ihf}^{hos-col} \quad \forall i, f$$

رابطه‌ی ۲۱:

$$\sum_c x_{ifc}^{col-cris} \times y_{ifc}^{col-cris} = (1 - \beta_{if}) \times \sum_h x_{ihf}^{hos-col} \times y_{ihf}^{hos-col} \quad \forall i, f$$

تابع هدف اول دربرگیرنده‌ی کمینه‌سازی هزینه‌ها شامل هزینه‌های احداث مراکز به ترتیب آزمایشگاه، بانک خون، مراکز جمع‌آوری و مراکز دورریز، هزینه‌ی پردازش محصولات خونی در آزمایشگاه‌ها، بانک‌های خون، مراکز جمع‌آوری و مراکز دورریز (با عنوان هزینه‌ی دورریز محصولات)، هزینه‌ی انتقال گروه‌های خونی (حمل و نقل) در شبکه نمایش داده شده و هزینه‌های نگهداری واحدهای اضافه‌ی خون در بیمارستان‌ها است. تابع هدف دوم شامل کمینه‌سازی مواجهه با کمبود است، زیرا کمبود خون به خصوص در شرایط وقوع بحران می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری در بر داشته باشد. متغیرهای عدد صحیح زیر نیز برای خطی‌سازی روابط غیرخطی معرفی می‌شوند:

$$\begin{matrix} xy_{ifc}^{col-cris} & xy_{ihf}^{hos-col} & xy_{ibh}^{bank-hos} & xy_{isl}^{sup-lab} \\ xy_{ilb}^{lab-bank} & xy_{ifd}^{col-dis} & xy_{ibc}^{bank-cris} & \end{matrix}$$

محدودیت‌های ۳ تا ۹ برای جلوگیری از تجاوز از حداکثر جریان بین سطوح در تمامی مراکز شبکه آورده شده است. محدودیت‌های ۱۰ تا ۱۴ برای جلوگیری از تجاوز از ظرفیت مراکز آورده شده است. محدودیت‌های ۱۵ تا ۲۱ برای بالانس جریان بین سطوح در نظر گرفته شده است. محدودیت‌های ۱۵ و ۱۶ بیان می‌کند که مقدار محصولات خونی که از بانک خون به بیمارستان انتقال می‌یابد، برابر است با میزان تقاضای بیمارستان و میزان خون اضافه در

بیمارستان و میزان کمبود خون در بیمارستان. محدودیت ۱۷ توضیح می‌دهد که میزان خون انتقال یافته از آزمایشگاه به بانک خون شامل میزان خون حمل شده از بانک خون به مناطق بحران و از بانک خون به بیمارستان است. محدودیت ۱۸ بیان می‌کند که میزان محصولات خونی انتقال یافته از آزمایشگاه به بانک خون، همان میزان محصولات خونی مفید (غیر از محصولات اتلاف شده در آزمایشگاه) انتقالی از مراکز اهدا به آزمایشگاه‌ها است. محدودیت ۱۹ نشان می‌دهد که مقادیر مازاد بر تقاضای بیمارستان از این مرکز به مراکز جمع‌آوری انتقال می‌یابد و سپس در محدودیت ۲۰ نشان داده شده است که محصولات اتلاف شده در مراکز جمع‌آوری، برای دورریز به مراکز دورریز انتقال می‌یابند. محدودیت آخر نیز بیان می‌کند که هر آنچه مازاد بر تقاضای بیمارستان به مراکز جمع‌آوری انتقال می‌یابد، پس از کسر دورریز و اتلاف برای مراکز بحران یا بیمارستان‌های با تقاضای بالا ارسال می‌شود. این بازتوزیع موجب عدم هدررفت میزان خون اضافه و حداکثر پوشش مراکز بحران جهت خون‌رسانی می‌گردد.

### روش حل مسئله

از جمله رویکردهایی که برای حل مدل‌های پیچیده و در شرایط واقعی پیشنهاد می‌شود، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در کنار یک نرم‌افزار حل دقیق برای یافتن کارایی مدل در هر دو ابعاد کوچک و مسائل بزرگ و واقعی است. الگوریتم‌های تکاملی از جمله کاربردی‌ترین روش‌های بهینه‌سازی محسوب می‌گردند. در مقابل روش‌ها و نرم‌افزارهای حل مدل‌های تحقیق در عملیات حساسیت بسیار بالایی به عبارات غیرخطی در تابع هدف و محدودیت‌های مسئله از خود نشان می‌دهند. بنابراین با توجه به انبوه روابط پیچیده و عبارات غیرخطی موجود در مدل مورد نظر، واضح است که نرم‌افزارهای حل مدل‌های تحقیق در عملیات در بهینه‌سازی مدل ارائه‌شده در قسمت قبل کارایی ندارند. در نتیجه روش‌های تکاملی، با توجه به حساسیت بسیار پایینشان نسبت به پیچیدگی و غیرخطی بودن روابط به منظور یافتن سیاست‌های بهینه در سیستم فوق انتخاب شده‌اند.

### رویکرد حل مدل برنامه‌ریزی چندهدفه

در مسائل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه، بیش از یک تابع هدف وجود دارد و معمولاً جواب بهینه‌ی منحصر به فردی که همزمان تمامی توابع هدف را بهینه کند، وجود ندارد. برای پیدا کردن جواب بهینه لازم است تا اطلاعاتی در مورد ترجیحات در دسترس باشد. در این شرایط تصمیم‌گیرندگان به دنبال یافتن ارجح‌ترین جواب‌ها به جای یافتن جواب بهینه هستند. در مسائل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه، مفهوم بهینگی با بهینگی پارتو یا کارایی جایگزین می‌شود. مفهوم بهینگی پارتو، بهبود جواب‌های یک تابع هدف تنها از طریق بدتر نمودن حداقل یکی از توابع هدف باقی‌مانده است. مجموعه جواب‌های بهینه‌ی پارتو، مرز پارتو را تشکیل می‌دهند. تعریف ریاضی جواب کارا<sup>۲</sup> به صورت ذیل است (فرض می‌شود که تمامی توابع هدف از جنس حداکثرسازی هستند) [۲۴]:

$$\mu_{z_i^{\max}}(x) = \begin{cases} 1 & z_i(x) > z_i^{\text{positive}} \\ 0 & z_i(x) < z_i^{\text{negative}} \\ f_{z_i^{\max}} = \frac{z_i(x) - z_i^{\text{negative}}}{z_i^{\text{positive}} - z_i^{\text{negative}}}, & z_i^{\text{negative}} \leq z_i(x) \leq z_i^{\text{positive}} \end{cases} \quad \text{رابطه ی ۲۴}$$

$$\mu_{g_i}(x) = \begin{cases} 1 & g_i(x) > b_i \\ 0 & g_i(x) < b_i + d_i \\ f_{z_i^{\max}} = \frac{1 - [g_i(x) - b_i]}{d_i}, & b_i \leq g_i(x) \leq b_i + d_i \end{cases} \quad \text{رابطه ی ۲۵}$$

$d_i$  میزان اجازه‌ی تخطی از پارامتر مورد بررسی است.  $z^{\text{positive}}$  و  $z^{\text{negative}}$  به ترتیب حد بالا و پایین توابع هدف هستند که به صورت روند توضیح داده شده در ادامه آورده می‌شوند. برای به دست آوردن  $z^{\text{positive}}$  و  $z^{\text{negative}}$  ها به این صورت عمل می‌شود که برای تابع هدف اول با در نظر گرفتن این معیار به تنهایی مسئله حل شود. نتیجه‌ی به دست آمده برای مقدار تابع هدف اول کمترین مقدار برای این تابع هدف  $z^{\text{negative}}$  آن است. حال مدل را با در نظر گرفتن فقط تابع هدف دوم حل می‌کنیم که در این حالت مقدار به دست آمده برای تابع هدف دوم مقداری که برای تابع هدف اول به دست می‌آید را بیشتر مقدار آن یا  $z^{\text{positive}}$  این تابع هدف در نظر می‌گیریم. برای به دست آوردن  $z^{\text{positive}}$  و  $z^{\text{negative}}$  های تابع هدف، می‌دانیم که کمترین مقدار این تابع هدف برابر صفر و بیشترین مقدار آن برابر مجموع تقاضاها است.

#### الگوریتم تلفیقی GA-SA

الگوریتم تلفیقی از دو الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک است که رویکرد حل توسط هر یک از این دو الگوریتم در ادامه آورده شده است. همچنین تصویر ۲ شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده در این مقاله را نشان می‌دهد. برای حل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی، الگوریتم SA ابتدا از یک جواب اولیه شروع می‌کند و سپس در یک حلقه‌ی تکرار به جواب‌های همسایه حرکت می‌کند. اگر جواب همسایه بهتر از جواب فعلی باشد، الگوریتم آن را به منزله‌ی جواب فعلی قرار می‌دهد، در غیر این صورت، الگوریتم آن جواب را با احتمال  $\exp(-\Delta E/T)$  به منزله‌ی جواب فعلی می‌پذیرد. در این رابطه  $\Delta E$  تفاوت بین تابع هدف جواب فعلی و جواب همسایه است و  $T$  یک پارامتر به نام دما است. در هر دما، چندین تکرار اجرا می‌شود و سپس دما به آرامی کاهش داده می‌شود. در گام‌های اولیه دما خیلی بالا قرار داده می‌شود تا احتمال بیشتری برای پذیرش جواب‌های بدتر وجود داشته باشد. با کاهش تدریجی دما، در گام‌های پایانی احتمال کمتری برای پذیرش جواب‌های بدتر وجود خواهد داشت و بنابراین الگوریتم به سمت یک جواب خوب همگرا می‌شود.

یک جواب شدنی مانند  $x$  در مسئله‌ی MOMP کارا است اگر جواب شدنی دیگری مانند  $y$  وجود نداشته باشد؛ به طوری که به ازای تمامی توابع هدف  $f_i(y) \geq f_i(x)$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$  حداقل یکی از این نامساوی‌ها به طور مطلق برقرار باشد.

هر جواب کارا متناظر با یک بردار کارا در فضای تصمیم‌گیری است. اگر  $f_i(y) \geq f_i(x)$  با  $f_i(y) > f_i(x)$  جایگزین شود، جواب‌های کارای ضعیف حاصل می‌شوند. جواب‌های کارای ضعیف معمولاً در برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه (MOMP) مورد استفاده قرار نمی‌گیرند، به این علت که ممکن است توسط جواب‌های کارای دیگر مغلوب شوند. تصمیم‌گیرنده‌ی منطقی به دنبال یافتن ارجح‌ترین جواب در میان جواب‌های بهینه‌ی پارتو است.

روش‌های حل مسائل MPMP را برحسب مرحله‌ای که تصمیم‌گیرنده درگیر فرایند تصمیم‌گیری و بیان کردن اولویت می‌شوند به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

روش قیاسی: در روش قیاسی، تصمیم‌گیرنده اولویت‌هایش را قبل از فرایند حل بیان می‌کند.

روش تعاملی: در روش تعاملی، مراحل گفتگو با تصمیم‌گیرنده و تبادل نظر با آن‌ها انجام می‌شود و این فرایند با مراحل محاسبه ادغام می‌گردد و بعد از چندین تعامل، نظرات به ارجح‌ترین جواب همگرا می‌گردد.

روش استقرایی: در این روش ابتدا جواب‌های کارا محاسبه می‌گردند و سپس تصمیم‌گیرنده برای انتخاب بهتر جواب درگیر می‌گردد.

#### رویکرد حل مدل دو هدفه با استفاده از مدل‌سازی فازی

به علت اینکه مسئله دارای سه تابع هدف غیرهمجنس است از روش فازی ارائه شده توسط لین [۲۵] برای فازی کردن توابع هدف و محدودیت‌ها استفاده خواهد شد.

رابطه ی ۲۲:

$$\text{Max } \lambda$$

s.t.

$$\lambda \leq \mu_{z_k^{\min}}(x)$$

$$\lambda \leq \mu_{z_r^{\max}}(x)$$

$$\lambda \leq \mu_{g_l}(x)$$

این توابع عضویت به صورت زیر تعریف می‌شوند:  
رابطه ی ۲۳:

$$\mu_{z_k^{\min}}(x) = \begin{cases} 1 & z_k(x) > z_k^{\text{positive}} \\ 0 & z_k(x) < z_k^{\text{negative}} \\ f_{z_k^{\min}} = \frac{z_k^{\text{positive}} - z_k(x)}{z_k^{\text{positive}} - z_k^{\text{negative}}}, & z_k^{\text{negative}} \leq z_k(x) \leq z_k^{\text{positive}} \end{cases}$$



۱. پارامترهای مدل بهینه‌سازی را بخوان
۲. پارامترهای الگوریتم (از جمله اندازه‌ی جمعیت (Population size)، درصد نگهداری (Keep)، تقاطع (Crossover) و جهش (Mutation) و همچنین نقطه‌ی شکست (Break point) در اپراتور تقاطع و ضریب تغییرات در اپراتور جهش، همچنین ثابت دمایی (T) و شرط توقف در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید) را مقدار دهی کن.
۳. جمعیت اولیه را بساز
  - ۱-۳- کروموزوم‌های اولیه را به صورت تصادفی بساز.
  - ۲-۳- تست‌های مورد نیاز را جهت بررسی و اصلاح کروموزوم‌های حاصله اجرا کن.
  - ۳-۳- تابع هدف مرتبط با هر کروموزوم را محاسبه نما.
  - ۴-۳- جمعیت اصلاحی را بر مبنای مقادیر تابع هدفشان مرتب کن.
  - ۵-۳- کروموزوم‌های نخبه را تعیین کرده و تا وقوع شرط توقف در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، آن‌ها را بهبود بده.
  - ۵-۳-۱- به کمک فرایند جهش، جوابی در همسایگی جواب اولیه تولید کن.
  - ۵-۳-۲- پس از محاسبه مقدار تابع هدف جواب تولیدی،  $\Delta E$  را محاسبه کن.
  - ۵-۳-۳- اگر جواب همسایه بهتر از جواب فعلی باشد، آن را به عنوان جواب فعلی قرار داده و در غیر این صورت، آن را با احتمال  $\exp(-\Delta E/T)$  به عنوان جواب فعلی بپذیر.
  - ۶-۳- کروموزوم‌های حاصله را بار دیگر بر مبنای مقادیر تابع هدفشان مرتب کن.
۴. حلقه‌ی زیر را تا آن‌جا ادامه بده که شرط توقف الگوریتم تلفیقی محقق گردد (حلقه‌ی اصلی الگوریتم)
  - ۱-۴- درصدی از کروموزوم‌ها را با نتیجه‌ی آمیزش آن‌ها (child) با یکی از کروموزوم‌های نخبه جایگزین کن.
  - ۲-۴- از اپراتور جهش برای تغییر تعدادی از کروموزوم‌های عادی استفاده کن.
  - ۳-۴- تست‌های مورد نیاز را برای بررسی و اصلاح کروموزوم‌های حاصله اجرا کن.
  - ۴-۴- تابع هدف مرتبط با هر کروموزوم را محاسبه نما.
  - ۵-۴- جمعیت اصلاحی را بر مبنای مقادیر تابع هدفشان مرتب کن.
  - ۶-۴- کروموزوم‌های نخبه را تعیین کرده و تا وقوع شرط توقف در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، آن‌ها را بهبود بده.
  - ۶-۴-۱- به کمک فرآیند جهش، جوابی در همسایگی جواب اولیه تولید کن.
  - ۶-۴-۲- پس از محاسبه مقدار تابع هدف جواب تولیدی،  $\Delta E$  را محاسبه کن.
  - ۶-۴-۳- اگر جواب همسایه بهتر از جواب فعلی باشد، آن را به‌منزله‌ی جواب فعلی قرار داده و در غیر این صورت، آن را با احتمال  $\exp(-\Delta E/T)$  به‌منزله‌ی جواب فعلی بپذیر.
  - ۷-۴- کروموزوم‌های حاصله را بار دیگر بر مبنای مقادیر تابع هدفشان مرتب کن.
۵. نتایج را ذخیره کرده و نمایش بده.

#### تصویر ۲: شبه کد الگوریتم طراحی شده برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی

هدف در هر یک از نقاط چه مقدار باشد، احتمال شرکت نمودن آن‌ها در مرحله‌ی بعد تعیین می‌گردد [۲۶].

#### نتایج محاسباتی

در ادامه با توجه به تولید و حل مسائل نمونه در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ می‌توان عملکرد الگوریتم پیشنهادی و نیز نتایج محاسبات را در جداول ۱ الی ۳ که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مسئله‌ی نمونه در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ هستند، مشاهده نمود. به طور کلی با مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم فراابتکاری، در محورهای زمان و بهینگی در مورد مسائل با سایز کوچک و متوسط متوجه قابلیت اطمینان بالا و توانایی چشم‌گیر الگوریتم مذکور در حل مسائل واقعی با ابعاد بزرگ در زمان معقول می‌شویم. به منظور سنجش این ادعا به سراغ مسائل بزرگ با ابعاد شبه واقعی (مسائلی که نرم‌افزار حل دقیق GAMS IDE/Cplex توانایی حل آن‌ها را در کمتر از ۲۰۰۰ ثانیه ندارد) رفته و عملکرد الگوریتم فراابتکاری را در حل این مسائل مورد بررسی قرار می‌دهیم.

در الگوریتم ژنتیک یک جمعیت از افراد طبق مطلوبیت آن‌ها در محیط بقا می‌یابند. افرادی با قابلیت‌های برتر، شانس ازدواج و تولید مثل بیشتری را خواهند یافت. بنابراین بعد از چند نسل فرزندان با کارایی بهتر به وجود می‌آیند. در الگوریتم ژنتیک هر فرد از جمعیت به صورت یک کروموزوم معرفی می‌شود. کروموزوم‌ها در طول چندین نسل کامل‌تر می‌شوند. در هر نسل کروموزوم‌ها ارزیابی می‌شوند و متناسب با ارزش خود امکان بقا و تکثیر می‌یابند. تولید نسل در بحث الگوریتم ژنتیک با عملگرهای تقاطع<sup>۳</sup> و جهش<sup>۴</sup> صورت می‌گیرد. والدین برتر بر اساس یک تابع برازندگی انتخاب می‌شوند.

در هر مرحله از اجرای الگوریتم ژنتیکی، یک دسته از نقاط فضای جستجو مورد پردازش‌های تصادفی قرار می‌گیرند. به این صورت که به هر نقطه دنباله‌ای از کاراکترها نسبت داده می‌شود و بر روی این دنباله‌ها، عملگرهای ژنتیکی اعمال می‌شود. سپس دنباله‌های به دست آمده دیکد (بازگشایی از کد) می‌گردد تا نقاط جدیدی در فضای جستجو به دست آید. در آخر براساس اینکه تابع

جدول ۱: مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم فراابتکاری برای مسائل با اندازه‌ی کوچک

Problem name	GAMS		GA-SA		$(1 - \frac{GAMS - GASA}{GAMS})$	$(\frac{GASA}{GAMS})$
	Objective value	Runtime	Objective value	Runtime	Objective value	Runtime
P01	۰.۷۳۲۳	۶۷.۴۲۴۴	۰.۷۳۲۳	۲۰.۱۰۴۸	۱	۰.۲۹۸۱۸۳
P02	۰.۹۱۱۲	۷۶.۲۰۷۲	۰.۹۱۱۲	۱۶.۸۳۹۶	۱	۰.۲۲۰۹۷۱
P03	۰.۸۷۴۲	۸۵.۲۴۹۲	۰.۸۷۴۲	۱۰.۸۸۷۶	۱	۰.۱۲۷۷۱۵
P04	۰.۸۹۸۲	۱۲۵.۵۴۷۶	۰.۸۶۹۰	۱۲.۶۱۸	۰.۹۶۷۵۴۱	۰.۱۰۰۵۰۴
P05	۰.۹۸۲۶	۱۷۸.۲۴۶۸	۰.۹۴۶۲	۱۹.۱۲۸	۰.۹۶۲۹۶۷	۰.۱۰۷۳۱۲
P06	۰.۶۵۷۳	۲۰۶.۱۴۶۸	۰.۵۹۹۷	۲۵.۴۶۵۲	۰.۹۱۲۵۱۸	۰.۱۲۳۵۲۹
P07	۰.۸۳۳۲	۲۵۵.۷۴۶۴	۰.۷۷۷۹	۲۵.۳۸۷۲	۰.۹۳۳۷۳۶	۰.۰۹۹۲۶۷
P08	۰.۷۱۱۲	۳۵۹.۵۹۴۴	۰.۶۵۹۷	۲۵.۴۹۷۶	۰.۹۲۷۷۲۲	۰.۰۷۰۹۰۷
Min	۰.۶۵۷۳	۶۷.۴۲۴۴	۰.۵۹۹۷	۱۰.۸۸۷۶	۰.۹۱۲۵۱۸	۰.۰۷۰۹۰۷
Mean	۰.۸۲۵۰	۱۶۹.۲۷۰۴	۰.۷۹۶۳	۱۹.۴۹۱	۰.۹۶۳	۰.۱۴۳۵۴۸
Max	۰.۹۸۲۶	۳۵۹.۵۹۴۴	۰.۹۴۶۲	۲۵.۴۹۷۶	۱	۰.۲۹۸۱۸۳

جدول ۲: مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم فراابتکاری برای مسائل با اندازه‌ی متوسط

Problem name	GAMS		GA-SA		$(1 - \frac{GAMS - GASA}{GAMS})$	$(\frac{GASA}{GAMS})$
	Objective value	Runtime	Objective value	Runtime	Objective value	Runtime
P۰۱	۰.۶۳۹۸۴	۴۶۲.۵۴۲	۰.۵۵۹۲۹۴	۳۸.۷۹۵	۰.۹۲۶۰۰۸	۰.۰۸۳۸۷۲
P۰۲	۰.۵۹۹۰۶۴	۵۴۱.۰۹۲	۰.۵۵۲۸۷۶	۴۳.۸۲۵	۰.۹۲۲۹	۰.۰۸۰۹۹۵
P۰۳	۰.۶۳۰۵۷۶	۶۳۷.۳۴۹	۰.۵۷۱۹۸۷	۵۲.۰۲۷	۰.۹۰۷۰۸۶	۰.۰۸۱۶۳۱
P۰۴	۰.۷۶۶۷۵۴	۸۳۵.۶۸۵	۰.۶۹۲۱۴۲	۷۴.۹۴۲	۰.۹۰۲۶۹۱	۰.۰۸۹۶۷۸
P۰۵	۰.۵۷۲۳۱۲	۹۸۰.۶۶۶	۰.۵۳۰۵۷۷	۷۰.۸۱۳	۰.۹۲۷۰۴۱	۰.۰۷۲۲۰۹
P۰۶	۰.۶۲۸۰۳۷	۱۱۸۸.۷۵۸	۰.۵۷۶۷۲۶	۸۱.۱۶۳	۰.۹۱۸۲۹۹	۰.۰۶۸۲۷۶
P۰۷	۰.۹۷۰۸۷۷	۱۳۴۳.۷۱۰	۰.۸۶۴۴۷۲	۷۷.۴۶۸	۰.۸۹۰۴۰۳	۰.۰۵۷۶۵۳
P۰۸	۰.۹۱۱۴۹	۱۶۸۶.۴۷۸	۰.۸۱۵۶۳۷	۷۸.۴۰۶	۰.۸۹۴۸۳۹	۰.۰۴۶۴۹۱
Max	۰.۹۷۰۸۷۷	۱۶۸۶.۴۷۸	۰.۸۶۴۴۷۲	۸۱.۱۶۳۲	۰.۸۹۰۴۰۳	۰.۰۴۶۴۹۱
Mean	۰.۷۱۰۳۸۷	۹۵۹.۵۳۵	۰.۶۴۵۴۶۱	۶۴.۶۸	۰.۹۱۱	۰.۰۷۳
Min	۰.۵۷۲۳۱۲	۴۶۲.۵۴۲۴	۰.۵۳۰۵۵۷	۳۸.۷۹۸۴	۰.۹۲۷۰۴۱	۰.۰۸۹۶۷۸

جدول ۳: مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم فراابتکاری برای مسائل با اندازه‌ی بزرگ

Problem name	GAMS IDE-Cplex		GA-SA		Comparison	GAMS error message	Stopping condition for the hybrid algorithm
	Objective value	Runtime	Objective value	Runtime	$(1 - \frac{GAMS - GASA}{GAMS})$ Objective value		
L01	۰.۶۷۳	۱۰۰۰	۰.۷۲۲	۱۰۰۰	۱.۰۷۲۶۲۶	Resource limit exceeded	Time limit exceeded
L02	۰.۷۳۲	۱۰۰۰	۰.۷۷۸	۱۰۰۰	۱.۰۶۳۴۳۳	Resource limit exceeded	Time limit exceeded
L03	۰.۸۹۲	۱۰۰۰	۰.۹۷۶	۱۰۰۰	۱.۰۹۴۳۴	Resource limit exceeded	Time limit exceeded
L04	-	-	۰.۸۰۳	۱۰۰۰	-	Out of memory	Time limit exceeded
L05	-	-	۰.۷۸۹	۱۰۰۰	-	Out of memory	Time limit exceeded



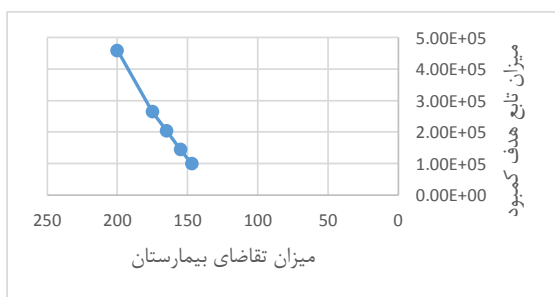
## نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این مقاله شامل طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ای تأمین حلقه‌ی بسته‌ی خون برای تأمین تقاضا با هدف کمینه‌سازی میزان کمبود و هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین است. در این تحقیق طرح بهینه‌ای به منظور استفاده‌ی هر چه بهتر از امکانات و تسهیلات موجود در راستای توزیع محصولات خونی و تأمین تقاضای مشتریان ارائه شده است. به منظور تحقق اهداف پژوهش از روش‌های بهینه‌سازی متعددی بهره گرفته شده است. در قدم اول مجموعه مفروضات، اهداف و محدودیت‌های این مسئله به صورت یکپارچه فرموله گردید. مدل نهایی قطعی این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار GAMS IDE/Cplex و با در نظر گرفتن داده‌های مختلف حل شده است. برای اعتبارسنجی مدل مورد نظر و پی بردن به صحت آن مسائلی در ابعاد کوچک و متوسط طراحی شده است و در نهایت برای مسائل با ابعاد بزرگ الگوریتم فراابتکاری طراحی شده است که برای سنجش اعتبار آن در مسائل با ابعاد کوچک و

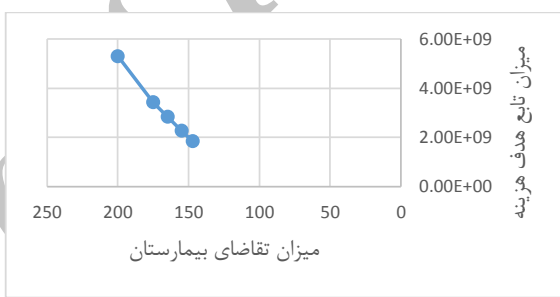
در ادامه مشخصات پنج مسئله‌ی بزرگ با ابعاد نزدیک به دنیای واقعی در نظر گرفته شده است. هیچ‌کدام از این مسائل در حد زمانی تعیین شده (۱۰۰۰ ثانیه) قابل حل دقیق توسط نرم‌افزار GAMS IDE/Cplex نبودند. جواب‌های بهینه‌ی موضعی به دست آمده برای این مسائل در حد زمانی مذکور در جدول ۳ آورده شده‌اند. همچنین دلایل عدم دستیابی روش حل دقیق به جواب بهینه‌ی نهایی نیز در این جدول ارائه می‌شود.

### تحلیل حساسیت

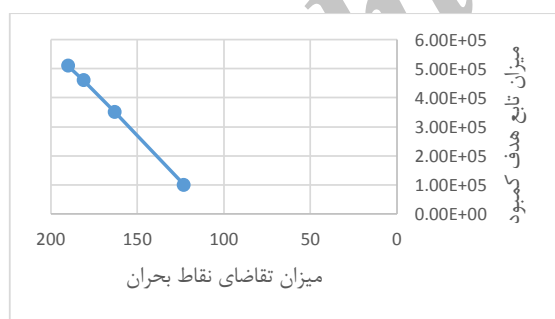
در این بخش، به منظور تحلیل تأثیر پارامترها بر روی مدل ارائه شده و نیز اعتبارسنجی مدل ریاضی به تحلیل حساسیت پارامترهای تقاضای بیمارستان‌ها در شرایط عادی، تقاضای نقاط بحران در شرایط بحران و میزان اتلاف خون پرداخته می‌شود. پارامترهای مذکور به عنوان نمونه‌ای از پارامترهای مدل و برای بررسی رفتار مدل به کمک حل مثال‌های عددی متعدد در نظر گرفته می‌شوند. همان‌طور که در تصاویر ۳ تا ۸ نشان داده شده است.



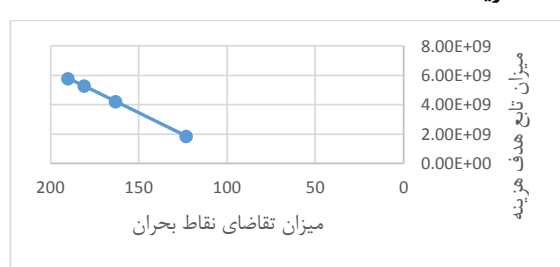
تصویر ۴: تأثیر تغییر میزان تقاضای خون بر روی تابع هدف کمبود



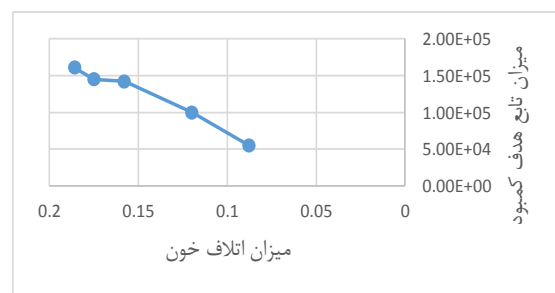
تصویر ۳: تأثیر تغییر میزان تقاضای خون بیمارستان بر روی تابع هدف هزینه



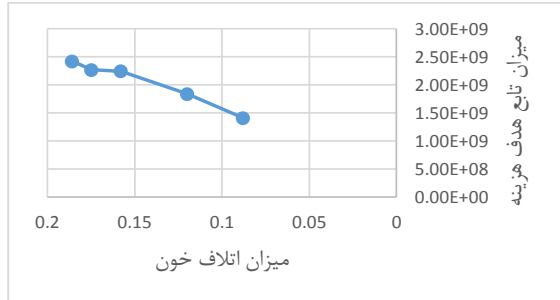
تصویر ۶: تأثیر تغییر میزان تقاضای خون نقاط بحران بر روی تابع هدف کمبود (اعمال شرایط بحران)



تصویر ۵: تأثیر تغییر میزان تقاضای نقاط بحران بر روی تابع هدف هزینه (اعمال شرایط بحران)



تصویر ۸: تأثیر تغییر میزان اتلاف خون بر روی تابع هدف کمبود



تصویر ۷: تأثیر تغییر میزان اتلاف خون بر روی تابع هدف هزینه

8. Nagurney, A.; Masoumi, A.H.; Yu, M. (2012). Supply Chain Network Operations Management of a Blood Banking System with Cost and Risk Minimization. *Computational Management Science*, 9, 205-223.

9. Nagurney, A.; Masoumi, A.H. (2012). Supply Chain Network Design of a Sustainable Blood Banking System, In: Sustainable Supply Chains: Models, Methods and Public Policy Implications, T. Boone; V. Jayaraman; R. Ganeshan, (Eds.), Springer, 49-72.

10. Şahin, G.; Süral, H.; Meral, S. (2007). Locational Analysis for Regionalization of Turkish Red Crescent Blood Services. *Computers & Operations Research*, 34, 692-704.

11. Sha, Y.; Huang, J. (2012). The Multi-Period Location-Allocation Problem of Engineering Emergency Blood Supply Systems. *Safety and emergency. Syst. Eng.*, 5, 21-28.

۱۲. حسامی، محمد؛ شیشه‌بری، داود (۱۳۹۴). توسعه‌ی سیاست‌های مکان‌یابی در افق برنامه‌ریزی بلندمدت (مطالعه‌ی موردی مکان‌یابی بیمارستان). *مجله‌ی تحقیق در عملیات در کاربردهای آن*، شماره‌ی سوم (پیاپی ۴۶)، ۶۹-۸۳.

13. Rogers, D.; Tibben-Lembke, R. (1998). Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices, Reverse Logistics Executive Council.

14. Roghanian, E.; Pazhoheshfar, P. (2014). An Optimization Model for Reverse Logistics Network under Stochastic Environment by using Genetic Algorithm, *J. Manuf. Syst.*, 33, 348-356.

15. Hatefi, S.M.; Jolai, F. (2014). Robust and Reliable Forward-Reverse Logistics Network Design under Demand Uncertainty and Facility Disruptions. *Appl. Math. Modelling*, 38, 2630-2647.

16. Pishvaei, M.S.; Kianfar, K.; Karimi, B. (2010). Reverse Logistics Network Design using Simulated Annealing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 47, 269-281.

17. Kannan, G.; Soleimani, H.; Devika, K. (2015). Reverse Logistics and Closed-Loop Supply Chain: A Comprehensive Review to Explore the Future. *European Journal of Operational Research*, 240, 603-626.

18. Denesiuk, L.; Richardson, T.; Nahirniak, S.; Clarke, G. (2006). Implementation of a Redistribution for Near-Outdate Red Blood Cell Units. *Archives of Pathology and Laboratory Medicine*, 130, 1178-1183.

19. Kendall, K.E. (1980). Formulating Blood Rotation Policies for Reducing Blood Wastage in Hospital Blood Banks. *Management Science*, 26, 1148-1157.

۲۰. جمالی، حسین؛ بشیری، مهدی؛ توکلی مقدم، رضا. (۱۳۹۴). بررسی و حل مسئله‌ی امدادسانی دوسطحی نقاط آسیب‌دیده از بحران. *دوفصلنامه‌ی علمی و پژوهشی مدیریت بحران*، دوره‌ی ۴ (شماره‌ی ۲)، ۵-۲۲.

۲۱. ارکات، جمال؛ زمانی، شکوفه؛ قدس، پرک. (۱۳۹۴). مکان‌یابی و مسیریابی تسهیلات اورژانسی با فرض احتمال خرابی مسیرهای ارتباطی در زمان بحران. *دوفصلنامه‌ی علمی و پژوهشی مدیریت بحران*، دوره‌ی ۴ (شماره‌ی ۲)، ۹۵-۱۰۶.

۲۲. بشیری، مهدی؛ بشیری، مهدیه. (۱۳۹۴). طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین حلقه‌ی بسته با در نظر گرفتن مراکز جمع‌آوری چندبخشی در شرایط عدم قطعیت و حل آن با الگوریتم ابتکاری و فراابتکاری. *نشریه‌ی*

متوسط توسط این الگوریتم حل شده و نتایج با حل دقیق مقایسه شده است که نشان‌دهنده‌ی کارایی الگوریتم پیشنهادی است. از جمله نوآوری‌های مدل پیشنهادی می‌توان به مواردی از قبیل چندهدفه بودن مدل زنجیره‌ی تأمین خون، چندمحصولی بودن زنجیره‌ی تأمین، در نظر گرفتن همزمان هر دو شبکه‌ی لجستیک پیشرو و معکوس (حلقه بسته)، اعمال شرایط عدم قطعیت و شرایط وقوع بحران و در نظرگیری مراکز دورریز جهت امحای تخصصی خون فاسد برای جلوگیری از ایجاد عفونت‌های زیست‌محیطی اشاره نمود. برای انجام تحقیقات آتی نیز موارد ذیل پیشنهاد می‌گردد: حمل و نقل جاده‌ای و مسئله‌ی مسیریابی و مدل‌های برنامه‌ریزی و پایش موجودی بین سطوح در نظر گرفته شود و نیز ارائه‌ی مدل‌های زمان‌بندی به علت کوتاه بودن زمان فساد محصولات خونی می‌تواند مدلی کاربردی باشد. در نظرگیری مدل در حالت پویا و یا استفاده از انواع دیگر عدم قطعیت شامل احتمالی و سناریویی و حل مدل چندهدفه با استفاده از روش دیگری مانند اپسیلون محدودیت نیز می‌توانند زمینه‌هایی برای انجام تحقیقات آتی باشند.

### پی‌نوشت

1. Efficiency or Non-efficiency or nondominated Dominated
2. Non-Dominated
3. Crossover
4. Mutation

### منابع

1. Beliën, J.; Forcé, H. (2012). Supply Chain Management of Blood Products: A Literature Review. *European Journal of Operational Research*, 217, 1-16.
2. Pierskalla, W. (2005). Supply Chain Management of Blood Banks. In: M. Brandeau; F. Sainfort; W. Pierskalla (Ed.), *Operations Research and Health Care: A handbook of methods and applications*, Boston: Kluwer, 103-145.
3. Arvan, M.; Tavakkoli-Moghaddam, R.; Abdollahi, M. (2015). Designing a Bi-Objective, Multi-Product Supply Chain Network for Blood Supply. *Uncertain Supply Chain Management*, 3, 57-68.
4. Jabbarzadeh, A.; Fahimnia, B.; Seuring, S. (2014). Dynamic Supply Chain Network Design for the Supply of Blood in Disasters: A Robust Model with Real World Application. *Transportation Research*, Part E, 70, 225-244.
5. Najafi, M.; Eshghi, K.; Dullaert, W. (2013). A Multi-Objective Robust Optimization Model for Logistics Planning in the Earthquake Response Phase. *Transportation Research*, Part E, 49, 217-249.
6. Nahmias, S. (1982). Perishable Inventory Theory: A Review. *Operations Research*, 30, 680-708.
7. Prastacos, G.P. (1984). Blood Inventory Management: An Overview of Theory and Practice. *Management Science*, 30, 777-800.

پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، سال سوم (شماره ۵)،  
۴۱-۲۷.

23. Hajiaghaei-Keshteli, M.; Aminnayeri, M.; Fatemi Ghomi, S.M.T. (2014). Integrated scheduling of production and rail transportation. *Computers & Industrial Engineering*, 74, 240-256.
24. Zimmermann, H.J. (1978). Fuzzy programming and Linear Programming with Several Objective Functions. *Fuzzy Sets and Systems*, 1, 45-55.
25. Lin, R.H. (2012). An Integrated Model for Supplier Selection under a Fuzzy Situation. *Int. J. Production Economics*, 138, 55-61.
26. Mitchell. M. (1996). *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press, Cambridge, MA.

Archive of SID

۱۷

شماره یازدهم

بهار و تابستان  
۱۳۹۶

دوفصلنامه  
علمی و پژوهشی



توسعه‌ی شبکه‌ی لجستیک پیشرو و معکوس در خدمات  
درمانی در شرایط عدم قطعیت و بحران