

## بهینه‌سازی چندهدفه شبکه تامین فرآورده‌های خونی به منظور حداقل‌سازی زمان ارسال و میزان تقاضای برآورد نشده بیمارستانی

چکیده

زینب کاظمی<sup>۱</sup> / مهدی همایون‌فر<sup>۲</sup> / مهدی فدایی<sup>۳</sup> / منصور صوفی<sup>۴</sup> / علی صالح‌زاده<sup>۵</sup>

**مقدمه:** با توجه به اهمیت خون به عنوان یک عنصر حیاتی در سیستم سلامت، در این پژوهش، زنجیره تامین خون در سه سطح اهداکنندگان، بانک‌ها (مراکز خون) و بیمارستان‌ها در قالب یک مدل چندهدفه به منظور حداقل‌سازی مجموع هزینه‌ها، حداقل‌سازی زمان کلی ارسال واحدهای خونی و حداقل‌سازی میزان تقاضای برآورد نشده بیمارستان‌ها در هر دوره، مدل‌سازی شده است.

**روش پژوهش:** پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی، از نظر روش توصیفی و از نوع کمی است. داده‌های مورد نیاز برای پیاده‌سازی مساله واقعی در سال ۱۴۰۰ با مراجعه به دفتر منطقه‌ای سازمان انتقال خون استان تهران و با همکاری سیستم نگاره گردآوری شده‌است. با توجه به ماهیت Np-hard مساله، مدل پیشنهادی با استفاده از سه الگوریتم ژنتیک، NSGAI و MOPSO در نرم‌افزار گمز حل شده است.

**یافته‌ها:** در مدل پیشنهادی، تطابق گروه‌های خونی در تامین تقاضا، سیستم صف، تخصیص گروه‌های خونی در آزمایشگاه‌ها و بانک‌های خون، هدر رفت خون در آزمایشگاه، انتقال محصولات بین مراکز تقاضا و نیز پارامترهای حساس و تعیین‌کننده‌ای مدل مانند: پارامتر تقاضا، اهدای خون و زمان حمل محصولات خونی بین اجزای شبکه، به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که در اجرای مسائل ۳، ۷، ۱۰ و ۱۲ برای شاخص کیفیت الگوریتم MOPSO دارای عملکرد مناسب‌تری است، اما به طور کلی و بر اساس دفعات اجرا و همچنین میانگین آنها، الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری دارد.

**نتیجه‌گیری:** بر اساس نتایج، مدل ارائه شده منجر به کاهش مجموع هزینه‌ها، زمان کلی ارسال واحدهای خونی و میزان تقاضای برآورد نشده بیمارستان‌ها می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** بهینه‌سازی چندهدفه، شبکه تامین فرآورده‌های خونی، رویکرد هیبریدی، الگوریتم فرا ابتکاری.

۱- دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

۲- استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران، (نویسنده مسئول)، پست الکترونیک:

homayounfar@iaurasht.ac.ir

۳- استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

۴- استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

۵- استادیار، گروه زیست‌شناسی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

## مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل موجود در ادبیات مدیریت زنجیره تامین، مسائل توزیع و موجودی هستند. از جمله این مسائل، می‌توان به انتقال خون و مشتقات خونی از اهداکنندگان به بیماران اشاره نمود که فرآیند آن به عنوان یک زنجیره تامین در نظر گرفته می‌شود [۱]. این فرآیند شامل: جمع‌آوری خون کامل از اهداکنندگان و پردازش آن به مشتقات در مراکز خون، تحویل مشتقات به بیمارستان‌ها و در نهایت تزریق آنها به بیماران است. در یک ناحیه جغرافیایی، مراکز خون وظیفه فراهم‌سازی محصولات خونی برای بیمارستان‌ها را بر عهده دارند. به این منظور یک برنامه زمان‌بندی دریافت خون در مکان‌های از پیش تعیین‌شده اهدای خون طراحی می‌شود. زمانی که موعد دریافت خون نزدیک است، تسهیلات خون‌گیری سیار همراه با تجهیزات لازم و نیروی انسانی متخصص طبق برنامه زمان‌بندی به این مکان‌ها فرستاده می‌شوند. در ادامه اهداکنندگان در این مکان‌ها حضور می‌یابند و پس از دریافت خون از آنها، تصمیمات برای جداسازی مشتقات مختلف از خون کامل اتخاذ می‌شود. خون کامل دریافتی به منظور ثبت مشخصات و نگهداری به مراکز پردازش ارسال می‌شود و در ادامه برای غربالگری ویروس‌ها و بیماری‌های مختلف مورد آزمایش قرار می‌گیرد. سپس اجزاء منتج شده ذخیره گردیده و بر اساس نیازمندی به بیمارستان‌ها ارسال می‌شوند. نهایتاً، بیمارستان‌ها در رابطه با زمان و نحوه استفاده از این اجزاء تصمیم‌گیری می‌کنند [۲].

زنجیره تامین خون به دلایل مختلف یکی از پرچالش‌ترین موضوعات مدیریت زنجیره تامین است. اولاً، خون یک محصول فسادپذیر است که مشتقات زیادی دارد و هر یک از آنها از طول عمر متفاوتی برخوردارند، بنابراین آماده‌سازی این اجزاء نیازمند صرف هزینه‌های اساسی است. دوماً، دریافت خون کامل از مکان‌های اهدای خون، متغیری تصادفی است که اغلب واریانس بزرگی دارد. بعلاوه، اهداف برنامه‌ریزی، مکان‌ها و روزهای دریافت خون نیز می‌توانند تصادفی باشند. همچنین، افزایش تعداد ویروس‌ها و بیماری‌ها قبل از

انتقال خون و مشتقات آن، غربالگری خون را ضروری می‌سازد که پیامد آن تغییرپذیری و ریسک بیشتر خواهد بود. سوماً تقاضا برای مشتقات خون در بیمارستان‌ها از هر دو جنبه مقدار و دفعات، متغیر تصادفی است. چهارماً، تصمیمات تعاملی زیادی باید در سطوح تاکتیکی و عملیاتی جهت طراحی سیاست‌ها اتخاذ شود. نهایتاً، کل زنجیره تامین باید به عنوان یک سیستم جامع و نه یک زیر سیستم در نظر گرفت [۳]. تمامی این موارد بایستی مورد توجه قرار گیرند تا میزان فرآورده‌های منقضی شده و اتلاف حداقل گردیده و کمبود بالقوه به پایین‌ترین میزان ممکن برسد.

با توجه به نکات بیان شده در زمینه زنجیره تامین خون، تامین مناسب این محصول نیازمند مدیریت دقیق و کارآمد است. از آنجاییکه بیمارستان‌ها برای فعالیت‌های ضروری مانند: جراحی‌ها و درمان بیماری‌های مزمن مانند: سرطان به خون احتیاج دارند، محصولات خونی برای بیمارستان‌ها بسیار حیاتی هستند. علیرغم پیشرفت‌های گوناگون در صنعت پزشکی نیاز به خون همچنان وجود دارد. در نتیجه جمع‌آوری این دسته از محصولات باید با یک برنامه خاص صورت گیرد تا این اطمینان حاصل شود که محصولات خونی مورد نیاز به مقدار کافی در دسترس هستند [۴]. از سوی دیگر، اتلاف خون نیز می‌تواند مانند کمبود آن، هزینه‌های گزافی را بر سیستم درمان تحمیل کند. بنابراین، یافتن سیاستی که بتواند در رفع این مشکلات کارآمد باشد، دارای اهمیت بسیاری است [۵].

پژوهش حاضر قصد دارد تا با ارائه یک مدل ریاضی، ضمن حداقل سازی کمبود و اتلاف خون در زنجیره، میزان موجودی بیمارستان‌ها و مراکز توزیع را بهینه سازد. همچنین، با افزودن امکان انتقال جانبی میان بیمارستان‌ها و مراکز توزیع در مدل ارائه شده، در صورت افزایش تقاضا و کاهش لحظه‌ای سطح موجودی، می‌توان از سایر بیمارستان‌ها و حتی مراکز آفریز کمبود را جبران نمود. این مطلب در مورد میزان کمبود در مراکز توزیع ثابت نیز صادق است. بنابراین، افزایش میزان موجودی که به تبع آن فساد محصولات خونی در بیمارستان‌ها را بدنبال دارد با این روش تعدیل شده و از اتلاف این محصول حیاتی

همکاران [۱۱] یک مدل بهینه‌سازی زنجیره تامین پایدار خون در حالت چند دوره‌ای و چند هدفه با داده‌های غیرقطعی در هنگام بروز فاجعه و بعد از آن ارائه دادند. مؤلفه‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش گروه‌های اهداکننده، مراکز جمع‌آوری خون، مراکز توزیع و بیمارستان‌ها بودند. مطالعه آنها با هدف حداقل‌سازی هزینه کل، حداقل‌سازی اثرات زیست محیطی، حداکثرسازی تأثیرات اجتماعی و به‌منظور افزایش بهره‌وری شبکه صورت گرفته است.

زهیری و همکاران [۲] در بررسی خود از یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای برای برنامه‌ریزی زنجیره تامین خون استفاده نمودند. در این مطالعه از یک مدل عدد صحیح مختلط به‌منظور جمع‌آوری، غربالگری، توزیع و برنامه‌ریزی مسیر فرآورده‌های خونی استفاده شده است که به دنبال بهینه‌سازی همزمان هزینه و تازگی فرآورده‌های خونی منتقل شده به بیمارستان‌ها است. دهقانی و همکاران [۱۲] در پژوهش خود به بررسی انتقال مجدد فعال در زنجیره تامین خون پرداختند. از آنجایی که تقاضای نامشخص و فسادپذیری واحدهای خونی می‌تواند باعث انبار بیش از حد یا کمبود خون گردد، در مطالعه آنها به ایجاد توازن میان اتلاف و کمبود واحدهای خونی پرداخته شده است.

بوهونک و همکاران [۱۳] در پژوهش خود به بهینه‌سازی عرضه فرآورده‌های خونی از طریق بکارگیری فن‌آوری در کاهش سرمایه‌دگی و عوامل بیماری‌زا پرداختند. احمدی‌منش و همکاران [۱۴] در مطالعه خود به طراحی مدل مدیریت بهینه موجودی برای زنجیره تامین خون اقدام نمودند. هدف این مطالعه طراحی یک مدل مدیریت بهینه شبکه انتقال خون با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مجدد و شبکه عصبی عمیق با چندین لایه بازگشتی در زنجیره تامین خون است. با استفاده از مدل ارائه شده می‌توان هزینه‌های اتلاف خون، بازگشت و کمبود را کاهش داد. ژو و همکاران [۱۵] به بررسی مدیریت عملیات زنجیره تامین خون با در نظر گرفتن طول عمر محصولات، وضعیت حمل و نقل و شرایط محیطی نامشخص پرداختند. با توجه به ویژگی‌های کنترل موجودی خون در

جلوگیری می‌شود. مساله بعد که خروجی پژوهش را به دنیای واقعی نزدیکتر می‌سازد چندمحصولی بودن فرآورده‌های خونی است که در کنار انتقال جانبی بین بیمارستان‌ها و مراکز توزیع، موضوع جدیدی است.

زنجیره تامین خون عموماً از چهار سطح؛ جمع‌آوری، تولید، نگهداری و موجودی و در نهایت توزیع فرآورده‌های خونی تشکیل شده است. فرایند تامین خون مورد نیاز برای پاسخگویی به تقاضا، در سطح جمع‌آوری مورد بررسی قرار می‌گیرد [۶]. اجزاء این زنجیره شامل بیمارستان‌ها یا سایر ارائه‌دهندگان خدمات بهداشتی، مراکز خون، تسهیلات متغیر، ثابت و اهداکنندگان می‌باشد. کارایی زنجیره‌های تامین خون به‌طور قابل توجهی از طریق برنامه‌ریزی ریاضی قابل بهبود است. برای طراحی یک شبکه زنجیره تامین کارآمد، داشتن شبکه مطلوب جمع‌آوری و توزیع خون اهمیت زیادی دارد [۷]. از آنجایی که سیستم‌های سلامت، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، از جمله ایران، با مشکل افزایش هزینه مواجه هستند و بخش زیادی از هزینه‌های سیستم سلامت متوجه زنجیره تامین خون است، هر گونه بهبود در کارایی این زنجیره موجب صرفه‌جویی در هزینه‌ها و رضایت مصرف‌کنندگان می‌شود [۸]. (شکل ۱)

مطالعات زنجیره تامین خون در دهه ۱۹۶۰ آغاز شد و بهینه‌سازی آن مورد توجه بسیاری از متخصصان، دانشمندان و سازمان‌ها قرار گرفت. برای نمونه در دهه اخیر؛ سیلوک و همکاران [۹] یک سیستم موجودی گسسته - زمان را برای پلاکت خون در نظر گرفتند که در تقاضا برای سنین مختلف را ممکن می‌سازد. مدل آنها علاوه بر هزینه نگهداری موجودی، اتلاف و کمبود، شامل هزینه تعویض (عدم تطابق) نیز هست. دودمان و بزرگی امیری [۱۰] در پژوهش خود به طراحی شبکه زنجیره تامین یکپارچه خون تحت شرایط عدم قطعیت با در نظر گرفتن انتقالات جانبی پرداختند. در این پژوهش، یک مدل دوهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تامین خون با هدف کاهش هزینه تالیس تسهیلات ثابت و موقت، هزینه‌های انتقال فرآورده‌های خونی و حداقل‌سازی حداکثر میزان کمبود ارائه شده است. اسکندری خانقاهی و

بانک اطلاعاتی جامعی که برای ثبت و پیگیری اطلاعات واحدهای خونی در قالب "سیستم نگاره" طراحی گردیده است، جمع‌آوری شده‌اند. اطلاعات مورد نظر به صورت روزانه از بیمارستان‌های شهر تهران جمع‌آوری گردیده و در این بانک اطلاعات ذخیره‌سازی می‌شود.

هدف این پژوهش، مدل‌سازی ریاضی چند هدفه برای مساله مدیریت زنجیره تامین خون با اهدافی از جمله حداقل‌سازی مجموع هزینه‌ها، حداقل‌سازی زمان کلی ارسال واحدهای خونی و حداقل‌سازی حداکثر میزان تقاضای برآورد نشده بیمارستان‌ها است. در مساله موجود، ماهیت توابع هدف از نوع هزینه و شامل هزینه‌های نگهداشت موجودی، میزان مازاد موجودی و کمبود آن در شرایط عدم قطعیت می‌باشد. بهینه‌سازی مساله موجود شامل: کاهش توانان هزینه‌های نگهداری موجودی در مراکز توزیع و بیمارستان‌ها و کاهش هزینه‌های کمبود در شرایط مواجهه با تقاضای لحظه‌ای است. در این پژوهش، حداقل‌سازی میانگین عدم پوشش تقاضای بیمارستان‌ها (به ترتیب اولویت) با استفاده از انتقال جانبی و حداقل‌سازی کمبود موجودی در مراکز خون با استفاده از انتقال جانبی بین مراکز توزیع صورت پذیرد. با توجه به چندمحصولی بودن فرآورده‌ها و دوره‌های فسادپذیری متفاوت محصولات، مدت مصرف و هزینه‌های مرتبط با آن بایستی به عنوان یک محدودیت در طراحی مدل در نظر گرفته شود.

پس از توسعه مدل پژوهش، ابتدا مثال‌هایی با اندازه‌های مختلف به صورت تصادفی تولید شده و با کدنویسی در نرم‌افزار گمز حل می‌شوند. به منظور حل مدل پیشنهادی نیز از تکنیک‌های مختلف چندهدفه (روش معیار جامع، روش ماکسی‌مین، روش دستیابی به آرمان، روش تابع مطلوبیت و برنامه‌ریزی آرمانی) استفاده شده و کارایی مدل با استفاده از نتایج حاصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس کاراترین روش حل چند هدفه با مقایسه بین نتایج حاصل از روش‌های مختلف و با بکارگیری تکنیک تاپسیس انتخاب می‌شود. در ادامه، با توجه به این که در ادبیات موضوع،

شرایط کمبود، مساله تصمیم‌گیری پویای زنجیره تامین خون در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. شکوهی فر و همکاران [۸] با توجه به عدم قطعیت عرضه و تقاضا و انتقال جانبی، مدیریت زنجیره تامین فرآورده‌های خونی را مورد بررسی قرار دادند. آرانی و همکاران [۱۶] در پژوهش خود به طراحی شبکه تامین خون با انتقال جانبی و تحت شرایط عدم قطعیت پرداختند. به این منظور، یک شبکه تامین خون با چهار سطح اهداکنندگان، امکانات جمع‌آوری خون، مراکز خون و بیمارستان‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. معاشی‌ثانی و همکاران [۱۷] در مطالعه خود به تعیین برنامه بهینه اهدا، انبارش و ارسال خون به بیمارستان‌های استان مازندران پرداختند، به طوری که میزان هزینه‌های راه‌اندازی و طراحی زنجیره تامین خون و نیز مدت زمان تحویل آن حداقل شود. نتایج نشان می‌دهد که استفاده مدل ارائه شده منجر به کاهش هزینه‌های راه‌اندازی و طراحی زنجیره تامین خون و در نتیجه کاهش مدت زمان دریافت و انتقال آن به بیمارستان‌ها می‌گردد.

با توجه به بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در مبانی نظری مشخص شد که بحث انتقال جانبی در زنجیره تامین خون با در نظر گرفتن اولویت در تقاضای بیمارستان‌ها، صورت نگرفته است. بعلاوه، در شرایطی که مازاد و کمبود سطح موجودی به صورت همزمان حائز اهمیت باشند، پژوهشی انجام نشده است. بر این اساس، پژوهش حاضر بدنبال بهینه‌سازی چند هدفه (حداقل‌سازی مجموع هزینه‌ها، حداقل‌سازی زمان کلی ارسال واحدهای خونی و حداقل‌سازی حداکثر میزان تقاضای برآورد نشده بیمارستان‌ها) فرآورده‌های خونی است.

### روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش توصیفی و از نوع کمی است. این پژوهش از نظر زمانی در سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۰ و از لحاظ جمع‌آوری داده‌ها در سال ۱۴۰۰ انجام گرفته است. داده‌های مورد نیاز برای پیاده‌سازی مساله واقعی، با همکاری دفتر منطقه‌ای سازمان انتقال خون استان تهران و از طریق

یک الگوریتم بیشتر باشد، از عملکرد بهتری برخوردار است.

### – شاخص فاصله از نقطه ایده‌آل

مقدار این شاخص برابر با فاصله نقاط پارتو الگوریتم مورد بررسی از نقطه ایده‌آل است. با استفاده از این شاخص، فاصله نزدیکی بین جوابهای پارتو و نقطه ایده‌آل آن جوابهای  $f_1^{best}$  و  $f_2^{best}$  حاصل می‌گردد. در معادله زیر،  $n$  تعداد نقاط پارتو و  $f_{1,total}^{min}$  و  $f_{1,total}^{max}$  به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار توابع هدف در میان تمامی توابع هدف نامغلوب الگوریتم‌های مورد مقایسه هستند. این شاخص را می‌توان توسط رابطه ۲۱ محاسبه نمود.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{f_2^{best} - f_{2i}}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}} \right)^2 + \left( \frac{f_{2i} - f_2^{best}}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}} \right)^2}{n} \quad (21)$$

با توجه به موارد ذکر شده، فرآیند اجرای پژوهش را می‌توان در شکل ۲ مشاهده نمود. (شکل ۲)

### مدل‌سازی

هر زنجیره تامین خون، شامل سه سطح اهداکنندگان، بانک‌ها یا مراکز خونی و مشتریان (بیمارستان‌ها) می‌باشد. در این پژوهش، هر سه سطح زنجیره تامین خون جهت مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. (شکل ۳)

### مفروضات مدل‌سازی

- ۱- مراکز ثابت (سازمان انتقال خون) و استقرار تسهیلات سیار و تسهیلات ثابت، از پیش تعیین شده هستند.
- ۲- نمونه‌گیری هم توسط تسهیلات ثابت و هم توسط تسهیلات سیار انجام می‌شود.
- ۳- برنامه‌ریزی برای اهدا کنندگان خون به صورت منطقه به منطقه لحاظ می‌گردد.
- ۴- واحدهای خون در هر دوره از تسهیلات سیار و ثابت به مراکز خون ثابت ارسال می‌گردند.
- ۵- این مساله به حالت چند محصولی (انواع گروه‌های خونی و دیگر فرآورده‌های خونی) در نظر گرفته می‌شود.
- ۶- تسهیلات سیار و ثابت و مراکز ثابت (بانک خون یا سازمان هلال احمر) دارای ظرفیت متفاوتی هستند.
- ۷- سن واحدهای خونی که از مراکز ثابت (سازمان انتقال

این گونه مسائل جزء مسائل Np-hard و دارای ساختار غیرخطی هستند و روش‌های دقیق تنها قادر به حل مسائل در مقیاس کوچک می‌باشند، حل مدل با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه NSGAI و MOPSO برای ۳۰ مساله نمونه در ابعاد مختلف (کوچک، متوسط، بزرگ) صورت گرفته است.

پس از حل مسائل نمونه، کیفیت جواب‌های حاصل از این دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه خواهند شد. سپس به منظور سنجش مدل و الگوریتم‌های پیشنهادی، جواب‌های حاصل از الگوریتم‌های پیشنهادی در سائز کوچک برای ۱۰ مساله نمونه مقایسه خواهند شد. در انتها نیز برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده از داده‌های واقعی یک ماهه مرکز خون استان تهران و برای ارزیابی الگوریتم‌های حل از شاخص‌های کیفیت و فاصله از نقطه ایده‌آل استفاده می‌شود. از آنجایی که پیچیدگی عملکرد الگوریتم‌های چندهدفه نسبت به الگوریتم‌های تک‌هدفه بسیار بیشتر است، با توجه به معیارهای ارائه شده، یک شاخص ارزیابی نمی‌تواند برای بررسی جواب‌های حاصل کافی باشد. به‌طور کلی جواب ارائه شده توسط الگوریتم‌های چندهدفه می‌بایست سه ویژگی داشته باشد

- فاصله بین مجموعه جواب‌های حاصل از حل مساله توسط الگوریتم با مجموعه پارتو بهینه کمینه باشد؛
- نحوه توزیع جواب‌ها در مجموعه جواب‌های پارتو به صورت یکنواخت باشد؛
- جواب‌های حاصل به صورت گسترده بخش زیادی از مقادیر هر یک از توابع هدف را پوشش دهند.

بنابراین، در این پژوهش جهت مقایسه الگوریتم‌ها از شاخص‌های کیفیت و فاصله از نقطه ایده‌آل استفاده شده است.

### – شاخص کیفیت

در شاخص کیفیت، کلیه جواب‌های پارتو بدست آمده از هر یک از الگوریتم‌ها با هم در نظر گرفته شده و عملیات ناچیرگی برای کلیه جواب‌ها بررسی می‌شود. کیفیت هر الگوریتم برابر با سهم جواب‌های پارتو جدید مختص به آن الگوریتم خواهد بود. هرچه میزان کیفیت

خون) دریافت می‌شوند، مشخص و در طول زمان متفاوت است.

۸- انتقال جانبی (عرضی) بین بیمارستان‌ها و مراکز ثابت (سازمان انتقال خون) امکان‌پذیر است.

۹- تقاضا حالت تصادفی دارد (ترکیبی از تقاضای مشخص و تقاضای اورژانسی)

۱۰- کمبود و مازاد موجودی مجاز نیست.

۱۱- اگر تقاضا بعلت فقدان موجودی برآورده نشود، سیستم متحمل یک جریمه کمبود می‌شود.

۱۲- اگر یک واحد خون منقضی شود، سیستم متحمل یک هزینه اتلاف می‌شود.

۱۳- تقاضای هر گروه خونی توسط خود آن گروه و گروه‌هایی که به لحاظ پزشکی مجاز هستند، برآورده می‌شود.

#### - اندیس‌های مدل

اندیس‌های مربوط به مدل را به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$i$  اندیس مجموعه گروه اهدا کننده،  $i = 1, 2, \dots, I$

$c$  اندیس مجموعه مراکز خون،  $c = 1, 2, \dots, C$

$j$  اندیس مجموعه مکان‌های تسهیلات سیار،  $j = 1, 2, \dots, J$

$p$  اندیس مجموعه مکان‌های تسهیلات ثابت،  $p = 1, 2, \dots, K$

$t$  اندیس دوره زمانی،  $t = 1, 2, \dots, T$

$h$  اندیس مجموعه بیمارستان‌ها،  $h = 1, 2, \dots, H$

#### پارامترهای مدل

پارامترهای مدل به صورت زیر تعریف شد:

$f_p$  هزینه احداث تسهیل ثابت در مکان  $p$

$A_t^1$  هزینه نگهداری هر واحد خون در تسهیل ثابت در دوره زمانی  $t$

$A_t^2$  هزینه نگهداری هر واحد خون در مراکز خون در دوره زمانی  $t$

$A_t^3$  هزینه نگهداری هر واحد خون در بیمارستان در دوره زمانی  $t$

$R_{j_1 j_2 t}^1$  هزینه جابجایی تسهیل متحرک جمع‌آوری خون از مکان  $j_1$  به مکان  $j_2$  در دوره زمانی  $t$

$T_{jct}^1$  هزینه انتقال واحدهای خونی از تسهیلات سیار  $j$  به

مرکز خون  $c$  در دوره زمانی  $t$

$T_{pct}^2$  هزینه انتقال واحدهای خونی از تسهیلات ثابت  $p$  به

مرکز خون  $c$  در دوره زمانی  $t$

$T_{cht}^3$  هزینه انتقال واحدهای خونی از مرکز خون  $c$  به

بیمارستان  $h$  در دوره زمانی  $t$

$T_{cc't}^4$  هزینه انتقال واحدهای خونی از مرکز خون  $c$  به

مرکز خون  $c'$  در دوره زمانی  $t$

$T_{hh't}^5$  هزینه انتقال یک واحد خون از بیمارستان  $h$  به

بیمارستان  $h'$  در دوره زمانی  $t$

$tjm_{cht}^3$  زمان انتقال واحدهای خونی از مرکز خون  $c$  به

بیمارستان  $h$  در دوره زمانی  $t$

$tjm_{cc't}^4$  زمان انتقال واحدهای خونی از مرکز خون  $c$  به مرکز

خون  $c'$  در دوره زمانی  $t$

$tjm_{hh't}^5$  زمان انتقال یک واحد خون از بیمارستان  $h$  به

بیمارستان  $h'$  در دوره زمانی  $t$

$s_h$  هزینه کمبود هر واحد خون در بیمارستان

$d_{mt}$  تقاضای بیمارستان واقع در نقطه  $m$  در دوره  $t$

$r_{ij}^1$  فاصله بین گروه‌های اهداکننده خون واقع در نقطه  $i$

و تسهیلات متحرک جمع‌آوری خون واقع در مکان  $j$

$r_{ip}^2$  فاصله بین گروه‌های اهداکننده خون واقع در نقطه  $i$

و تسهیلات ثابت جمع‌آوری خون واقع در مکان  $p$

$b_{jt}^1$  ظرفیت تسهیلات ثابت  $j$  در دوره زمانی  $t$

$b_{pt}^2$  ظرفیت تسهیلات متحرک  $p$  در دوره زمانی  $t$

$b_{ct}^3$  ظرفیت مرکز خون  $c$  در دوره زمانی  $t$

$b_{ht}^5$  ظرفیت مرکز بیمارستان  $h$  در دوره زمانی  $t$

$b_{it}^4$  ظرفیت اهدای خون توسط اهداکنندگان خون واقع

در مکان  $i$  در دوره  $t$

$cap_t$  بیشترین تامین خون از گروه خونی  $l$  در دوره زمانی

$t$

$w_1$  شعاع پوشش تسهیلات متحرک

$w_2$  شعاع پوشش تسهیلات ثابت

$u_c$  بیشترین ظرفیت ذخیره در مرکز خون  $c$

$R_{cc'}^1$  فاصله بین مراکز خون  $c$  و  $c'$

$R_{hh'}^2$  فاصله بین بیمارستان‌های  $h$  و  $h'$

$R_0^1$  شعاع پوشش برای انتقالات جانبی بین مراکز خون

$R_0^2$  شعاع پوشش برای انتقالات جانبی بین بیمارستان‌ها

$d_{ht}$  میزان تقاضای بیمارستان  $h$  ام در دوره  $t$

$M$  عددی بسیار بزرگ

متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم مدل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$N_t$  تعداد تسهیلات مورد نیاز در دوره زمانی  $t$

$X_p$  اگر تسهیل ثابت در مکان  $p$  قرار گیرد، مقدار یک دارد؛ در غیر اینصورت صفر.

$Y_{ijt}^1$  اگر در دوره زمانی  $t$ ، گروه اهدا کننده خون واقع در مکان  $i$  به تسهیل متحرک واقع در مکان  $j$  تخصیص داده شود، مقدار یک دارد؛ در غیر اینصورت صفر.

$Y_{ipt}^2$  اگر در دوره زمانی  $t$ ، گروه اهداکننده خون واقع در مکان  $i$  به تسهیل ثابت واقع در مکان  $p$  تخصیص داده شود، مقدار یک دارد؛ در غیر اینصورت صفر.

$Z_{j_1j_2t}$  اگر تسهیل متحرک جمع‌آوری خون در دوره زمانی  $t-1$  در مکان  $j_1$  قرار داشته و در دوره زمانی  $t$  در مکان  $j_2$  مورد استفاده قرار گیرد، مقدار یک دارد؛ در غیر اینصورت صفر.

$la_{cc't}^1$  اگر بین مراکز خون  $c$  و  $c'$  انتقالات جانبی انجام شود، مقدار یک دارد؛ در غیر اینصورت صفر.

$la_{hh't}^2$  اگر بین بیمارستان‌های  $h$  و  $h'$  انتقالات جانبی انجام شود، مقدار یک دارد؛ در غیر اینصورت صفر.

$Q_{ijt}^1$  میزان انتقال بسته‌های خونی از گروه اهدا کننده خون واقع در مکان  $i$  به تسهیلات متحرک واقع در مکان  $j$  در دوره  $t$

$Q_{ipt}^2$  میزان انتقال بسته‌های خونی از گروه اهدا کننده خون واقع در مکان  $i$  به تسهیلات ثابت واقع در مکان  $p$  در دوره  $t$

$Q_{jct}^3$  میزان انتقال بسته‌های خونی از تسهیلات متحرک واقع در مکان  $j$  به مرکز خون  $c$  در دوره  $t$

$Q_{pct}^4$  میزان انتقال بسته‌های خونی از تسهیلات ثابت واقع در مکان  $p$  به مرکز خون  $c$  در دوره  $t$

$Q_{cht}^5$  میزان انتقال بسته‌های خونی از مرکز خون  $c$  به بیمارستان  $h$  ام در دوره  $t$

$LT_{cc't}^1$  میزان انتقال بسته‌های خونی از طریق انتقالات جانبی بین مراکز خون  $c$  و  $c'$

$LT_{hh't}^2$  میزان انتقال بسته‌های خونی از طریق انتقالات جانبی بین بیمارستان‌های  $h$  و  $h'$

$I_{ipt}^1$  میزان موجودی خون در تسهیلات ثابت واقع در مکان  $p$  در انتهای دوره  $t$

$I_{ct}^2$  سطح موجودی خون در مرکز خون  $c$  در انتهای

دوره  $t$

$I_{ht}^3$  سطح موجودی خون در بیمارستان  $h$  ام در انتهای

دوره  $t$

$\delta_{ht}$  تقاضای برآورد نشده در بیمارستان  $h$  ام در انتهای

دوره  $t$

مدل ریاضی

$$Z1: \min \sum_p f_p X_p + \sum_{i,j,t} r_{ij,t}^1 Y_{ijt}^1 + \sum_{i,p,t} r_{ip,t}^2 Y_{ipt}^2 + \sum_{i,j,t} r_{ij,t}^3 I_{ij,t}^1 + \sum_{i,p,t} r_{ip,t}^3 I_{ipt}^2 + \sum_{i,t} r_{ih,t}^3 I_{ht}^3 + \sum_{i,t} w_1 Y_{ijt}^1 + \sum_{i,p,t} w_2 X_p + \sum_{i,t} w_3 \delta_{ht}$$

تابع

هدف

(۱)

$$Z2: \min \sum_{c,c'} \tau_{cc'}^1 la_{cc't}^1 + \sum_{h,h'} \tau_{hh'}^2 la_{hh't}^2 + \sum_{i,j,t} \tau_{ij,t}^1 Q_{ijt}^1 + \sum_{i,p,t} \tau_{ip,t}^2 Q_{ipt}^2 + \sum_{j,c,t} \tau_{jct}^3 Q_{jct}^3 + \sum_{p,c,t} \tau_{pct}^4 Q_{pct}^4 + \sum_{c,h,t} \tau_{cht}^5 Q_{cht}^5$$

تابع

هدف

(۲)

$$Z3: \max(\max_h \delta_{ht})$$

تابع

هدف

(۳)

$$\sum_{j_1} Z_{j_1j_2t} \leq 1, \forall j_2, t$$

رابطه

(۱)

$$\sum_{j_2} \sum_{j_1} Z_{j_1j_2t} = N_t, \forall t$$

رابطه

(۲)

$$\sum_j Z_{j_1j_2t} \leq \sum_j Z_{j_1j_2(t-1)}, \forall t, j_1$$

رابطه

(۳)

$$\sum_j Y_{ijt}^1 + \sum_p Y_{ipt}^2 \leq 1, \forall i, t$$

رابطه

(۴)

$$Y_{ijt}^1 r_{ij}^1 \leq w_1 \sum_{j_2} Z_{j_1j_2t}, \forall i, j, t$$

رابطه

(۵)

$$Y_{ipt}^2 r_{ip}^1 \leq w_2 X_p, \forall i, p, t$$

رابطه

(۶)

تابع هدف اول، مجموع هزینه‌ها شامل؛ هزینه احداث تسهیلات ثابت، هزینه جابجایی تسهیلات متحرک جمع‌آوری خون، هزینه انتقال واحدهای خونی از تسهیلات سیار به مراکز خون، هزینه انتقال واحدهای خونی از تسهیلات ثابت به مراکز خون، هزینه انتقال واحدهای خونی از مراکز خون به بیمارستان‌ها، هزینه انتقال واحدهای خونی بین مراکز خون (انتقال جانبی بین مراکز خون)، هزینه انتقال واحدهای خونی بین بیمارستان‌ها (انتقال جانبی بین بیمارستان‌ها)، هزینه نگهداری هر واحد خون در تسهیلات ثابت، هزینه نگهداری هر واحد خون در مراکز خون و هزینه نگهداری هر واحد خون در بیمارستان‌ها را حداقل می‌سازد. تابع هدف دوم، زمان کلی ارسال واحدهای خونی شامل زمان انتقال واحدهای خونی از مراکز خون به بیمارستان‌ها + زمان انتقال واحدهای خونی بین مراکز خون (انتقال جانبی بین مراکز خون) + زمان انتقال واحدهای خونی بین بیمارستان‌ها (انتقال جانبی بین بیمارستان‌ها) را حداقل می‌نماید. نهایتاً، تابع هدف سوم، حداکثر میزان تقاضای برآورد نشده بیمارستان‌ها در هر دوره را حداقل می‌کند.

محدودیت ۱، نشان‌دهنده آن است که حداکثر یکی از تسهیلات متحرک جمع‌آوری خون در دوره زمانی  $t-1$  می‌توانند در دوره زمانی  $t$  در مکان  $j_2$  مورد استفاده قرار گیرند. محدودیت ۲، نشان می‌دهد که تعداد تسهیلات مورد نیاز در دوره زمانی  $t$  برابر با کل تسهیلات متحرک جمع‌آوری خون در دوره زمانی  $t-1$  می‌باشند که در دوره زمانی  $t$  در یکی از مکان‌های موجود مورد استفاده قرار می‌گیرند. محدودیت ۳، نشان می‌دهد که تسهیلات متحرک جمع‌آوری خون در دوره زمانی  $t$  در مکان  $j_1$  و در صورتی می‌توانند به یکی از مکان‌های موجود دیگر بروند که در مرحله  $t-2$  به مکان  $j_2$  آمده باشند. محدودیت ۴، بیانگر این است که در هر دوره زمانی  $t$  هر یک از گروه‌های اهدا کننده خون، حداکثر به یکی از تسهیلات متحرک یا ثابت تخصیص داده می‌شوند. محدودیت ۵ حاکی از آن است که در هر دوره زمانی، گروه اهدا کننده خون با توجه به

رابطه (۷)

$$Q_{ij,t}^1 \leq M * Y_{ij,t}^1, \forall i, j, t$$

رابطه (۸)

$$Q_{ipt}^2 \leq M * Y_{ipt}^2, \forall i, p, t$$

رابطه (۹)

$$\sum_i Q_{ij,t}^1 + \sum_i Q_{ipt}^2 \leq b_{it}^4, \forall i, j, t$$

رابطه (۱۰)

$$\sum_i Q_{ij,t}^1 \leq b_{jt}^1, \forall t, j$$

رابطه (۱۱)

$$\sum_i Q_{ipt}^2 \leq b_{pt}^2, \forall t, p$$

رابطه (۱۲)

$$\sum_j Q_{jct}^3 + \sum_p Q_{pct}^4 \leq b_{ct}^3, \forall t, c$$

رابطه (۱۳)

$$\sum_h Q_{cht}^5 \leq b_{ht}^5, \forall t, h$$

رابطه (۱۴)

$$R_{cc'}^1 * la_{cc't}^1 \leq R_0^1, \forall c, c', t$$

رابطه (۱۵)

$$LT_{cc't}^1 \leq la_{cc't}^1, \forall c, c', t$$

رابطه (۱۶)

$$R_{hh'}^2 * la_{hh't}^2 \leq R_0^2, \forall c, c', t$$

رابطه (۱۷)

$$LT_{hh't}^2 \leq la_{hh't}^2, \forall c, c', t$$

رابطه (۱۸)

$$\sum_c R_{cc'}^1 * la_{cc't}^1 + I_{c(t-1)}^2 = \sum_h Q_{cht}^5 + \sum_{c'} LT_{cc't}^1 + I_{ct}^2, \forall t, c$$

رابطه (۱۹)

$$\sum_c R_{hh'}^2 * la_{hh't}^2 + I_{h(t-1)}^3 = \sum_h Q_{cht}^5 + \sum_{c'} LT_{hh't}^2 + I_{ht}^3, \forall t, c$$

رابطه (۲۰)

$$\delta_{ht} = d_{ht} - \left( \sum_c Q_{cht}^5 + \sum_h LT_{hh't}^2 \right), \forall t, h$$



در هر دوره زمانی، مجموع بسته‌های خون ارسال شده از هر مرکز و میزان موجودی ذخیره شده در انتهای دوره فعلی برابر با مجموع میزان خون دریافت شده از تسهیلات ثابت و متحرک و میزان ذخیره شده در انتهای دوره قبلی است. نهایتاً، محدودیت ۱۹ نیز نشان می‌دهد که در هر دوره زمانی، میزان تقاضای برآورد نشده بیمارستانی با تفاضل میزان تقاضای هر بیمارستان از میزان کل خون دریافت شده از مراکز و انتقالات جانبی به آن بیمارستان برابر است.

### یافته‌ها

در این بخش، ابتدا مثال‌هایی با ابعاد مختلف به صورت تصادفی تولید شده و با کدنویسی مدل پیشنهادی در نرم‌افزار گمز حل می‌شوند. به منظور حل مدل پیشنهادی از تکنیک‌های کلاسیک چندهدفه (روش معیار جامع، روش ماکسی‌مین، روش دستیابی به آرمان، روش تابع مطلوبیت و برنامه‌ریزی آرمانی) برای مسایل کوچک و الگوریتم‌های فراابتکاری برای همه مسایل استفاده شده است. جدول ۱، مقدار پارامترهای بکار رفته در مثال‌های عددی را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که هزینه‌های نگهداری موجودی از یک مرکز پزشکی منطقه‌ای واقعی گرفته شده است. (جدول ۱)

در این پژوهش مقدار تقاضای پلاکت در بانک خون بیمارستان‌ها برگرفته از پژوهش‌های [۱۸، ۱۹] است. در مطالعه اروان و همکاران [۱۸] دو نوع تقاضا در نظر گرفته شده است، در صورتی که در مقاله گانپینار و سنتنو [۱۹] تنها یک تقاضا مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار تقاضای پلاکت نیز به ترتیب برای روزهای دوشنبه تا یکشنبه هر هفته برابر با ۱۷،۲۶،۳۱،۲۶،۱۷،۹،۸ می‌باشد. مقدار تقاضای هر سناریوی مجموعه اعداد، به صورت تصادفی حول میانگین اعداد ذکر شده بدست می‌آیند. به این منظور در مطالعه حاضر نیز همانند مقاله اروان و همکاران [۱۸]، از توزیع پواسون استفاده شده است. ظرفیت‌های استفاده شده در مدل‌های ذکر شده مطابق با جدول ۲ می‌باشند. (جدول ۲)

وجود تسهیلات متحرک در مکان  $i$  و شعاع پوشش آن تسهیلات، تخصیص داده می‌شوند. محدودیت ۶ بیان می‌کند که در هر دوره زمانی، گروه اهدا کننده خون با توجه به وجود تسهیلات ثابت در مکان  $p$  و شعاع پوشش آن تسهیلات، تخصیص داده می‌شوند.

محدودیت‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند که در هر دوره زمانی، گروه اهدا کننده خون واقع در مکان  $i$  در صورتی می‌توانند در تسهیلات متحرک یا ثابت (حداکثر یکی از آنها) خون اهدا کنند که آن گروه به تسهیلات مذکور تخصیص یافته باشد. محدودیت ۹، بیان می‌کند که در هر دوره زمانی، میزان اهدای بسته‌های خونی در مکان  $i$  به تسهیلات متحرک یا ثابت باید کمتر از ظرفیت اهدا کنندگان باشد. محدودیت ۱۰ و ۱۱ نشان‌دهنده می‌دهد که در هر دوره زمانی، میزان خون دریافت شده توسط تسهیلات متحرک یا ثابت کمتر از ظرفیت آن تسهیلات است. محدودیت ۱۲، بیان می‌دارد که در هر دوره زمانی، میزان خون دریافت شده مراکز خون از تسهیلات باید کمتر یا مساوی ظرفیت آن مرکز خون باشد. محدودیت ۱۲، نشان می‌دهد که در هر دوره زمانی، میزان دریافت شده بیمارستان‌ها از مراکز خون باید کمتر یا مساوی ظرفیتشان باشد.

محدودیت‌های ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهند که در هر دوره زمانی، انتقال بسته‌های خون از طریق انتقالات جانبی بین مراکز خون  $c$  و  $c'$  در صورتی انجام می‌گیرد که فاصله آنها کمتر یا مساوی شعاع پوشش انتقالات جانبی بین مراکز خون باشد. محدودیت‌های ۱۵ و ۱۶ نشان می‌دهند که در هر دوره زمانی، انتقال بسته‌های خون از طریق انتقالات جانبی بین بیمارستان‌های  $h$  و  $h'$  در صورتی انجام می‌گیرد که فاصله بین آنها کمتر یا مساوی شعاع پوشش انتقالات جانبی بین بیمارستان‌ها باشد. محدودیت ۱۷ نشان می‌دهند که در هر دوره زمانی، مجموع بسته‌های خون ارسال شده از هر مرکز و میزان موجودی ذخیره شده در انتهای دوره فعلی برابر با مجموع میزان خون دریافت شده از تسهیلات ثابت و متحرک و میزان ذخیره شده در انتهای دوره قبلی است. محدودیت ۱۸ بیان می‌کند که

### بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت خون به عنوان یک عنصر حیاتی در سیستم سلامت، در این پژوهش، زنجیره تامین خون در سه سطح اهداکنندگان، بانک‌ها (مراکز خون) و بیمارستان‌ها در قالب یک مدل چندهدفه به منظور حداقل‌سازی مجموع هزینه‌ها، حداقل‌سازی زمان کلی ارسال واحدهای خونی و حداقل‌سازی میزان تقاضای برآورد نشده بیمارستان‌ها در هر دوره، مدل‌سازی شد. با توجه به مقدار هر یک از اجزاء تابع هدف هزینه و نیز مقدار کل هزینه‌ها می‌توان درصد هر یک از هزینه‌ها را نسبت به هزینه کل مشخص نمود. بدین صورت که ۵۱٪ از هزینه‌ها مربوط به هزینه احداث تسهیلات ثابت، ۴٪ هزینه جابجایی تسهیلات متحرک جمع‌آوری خون، ۷٪ هزینه انتقال واحدهای خون از تسهیلات سیار به مراکز خون، ۱۳٪ هزینه انتقال واحدهای خونی از تسهیلات ثابت به مراکز خون، ۱۰٪ هزینه انتقال واحدهای خون از مراکز خون به بیمارستان‌ها، ۱٪ هزینه انتقال جانبی واحدهای خون بین مراکز خون، ۴٪ هزینه انتقال جانبی واحدهای خونی بین بیمارستان‌ها، ۰/۳٪ هزینه نگهداری هر واحد خون در تسهیلات ثابت، ۰/۱٪ هزینه نگهداری هر واحد خون در مراکز خون، ۰/۳٪ هزینه نگهداری هر واحد خون در بیمارستان‌ها، ۳٪ هزینه کمبود و ۷٪ نیز هزینه فساد (انقضای) خون می‌باشد. همچنین با توجه به مقدار هر یک از اجزاء تابع هدف زمان و نیز مقدار زمان کل می‌توان درصد هر یک از آن‌ها را نسبت به زمان کل مشخص نمود. بدین صورت که ۵۲٪ از زمان کل مربوط به زمان انتقال واحدهای خون از مراکز خون به بیمارستان‌ها، ۳۱٪ زمان انتقال جانبی واحدهای خون بین مراکز خون و ۱۷٪ نیز مربوط به زمان انتقال جانبی واحدهای خون بین بیمارستان‌ها است.

تحلیل حساسیت پارامترهای حساس مساله نشان می‌دهد که افزایش میزان هدر رفت خون در آزمایشگاه‌ها باعث افزایش مقدار تابع هدف هزینه می‌گردد، افزایش سطح عدم قطعیت باعث افزایش هر دو تابع هزینه و زمان می‌شود و کاهش نرخ اهدای

نتایج خروجی توابع هدف و زمان پردازش الگوریتم به دست آمده از حل ۳۰ مثال با استفاده از روش‌های حل مسایل چندهدفه (ماکسی‌مین، دستیابی به آرمان، تابع مطلوبیت، معیار جامع، برنامه‌ریزی آرمانی) در شکل ۴ آورده شده است. (شکل ۴)

### نتایج محاسباتی الگوریتم‌های NSGAI و MOPSO

در این بخش نتایج حل مدل با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه NSGAI و MOPSO برای ۳۰ مساله نمونه در ابعاد مختلف (کوچک، متوسط، بزرگ) آورده شده است. جهت از بین بردن اثرات تصادفی و عدم قطعیت در خروجی الگوریتم‌ها، هر مساله نمونه ۳ بار اجرا گردید و میانگین پاسخ این ۳ اجرا به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شد. (جدول ۳)

### نتایج حل عددی

در این بخش حل مدل پژوهش در قالب یک مطالعه موردی انجام گرفته و در ادامه کارایی الگوریتم‌ها MOPSO و NSGA-II بر پایه نتایج آرشیو شده پارتو از طریق ۱۲ بار اجرای مدل و بر اساس دو شاخص کیفیت (QM) و فاصله از نقطه ایده‌آل (MID) مقایسه شده است. (جدول ۴)

برای شاخص QM، مقادیر بیشتر و برای شاخص MID مقادیر کمتر بیانگر برتری مدل هستند. این برتری بین دو الگوریتم فراابتکاری مورد بررسی، در جدول ۴ با اعداد تیره نشان داده شده است. همچنین از بین هر سه روش حل (یک روش دقیق و دو روش فراابتکاری) جواب بهتر (جواب مربوط به حل دقیق) به صورت خطدار و تیره مشخص شده است. از بین هر سه روش، ابتدا حل دقیق و بین دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II، هر دو شاخص QM و MID نشان می‌دهند که در مجموع الگوریتم NSGA-II جواب بهتری ارائه می‌دهد. البته در برخی موارد (مانند اجرای ۳، ۷، ۱۰ و ۱۲ برای شاخص QM) مشاهده می‌شود که الگوریتم MOPSO عملکرد بهتری دارد، اما اگر به طور کلی و بر اساس دفعات اجرا و میانگین آنها، الگوریتم NSGA-II از عملکرد بهتری برخوردار است.

پرداخته شود. از مدل سازی پویای چندسطحی شبکه تامین خون به منظور بررسی سناریوهای بهبود همکاری عناصر زنجیره استفاده شود.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله کمال تشکر را از مدیران و کارشناسان سازمان انتقال خون کلان شهر تهران دارند. این مقاله حاصل رساله دکتری تخصصی رشته مدیریت صنعتی در دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت است که پروپوزال آن به شماره ۱۷/۱۶/۴/۲۲۷۹ در تاریخ ۱۳۹۹/۰۳/۱۷ در معلونت پژوهشی واحد دانشگاهی به تصویب رسیده است.

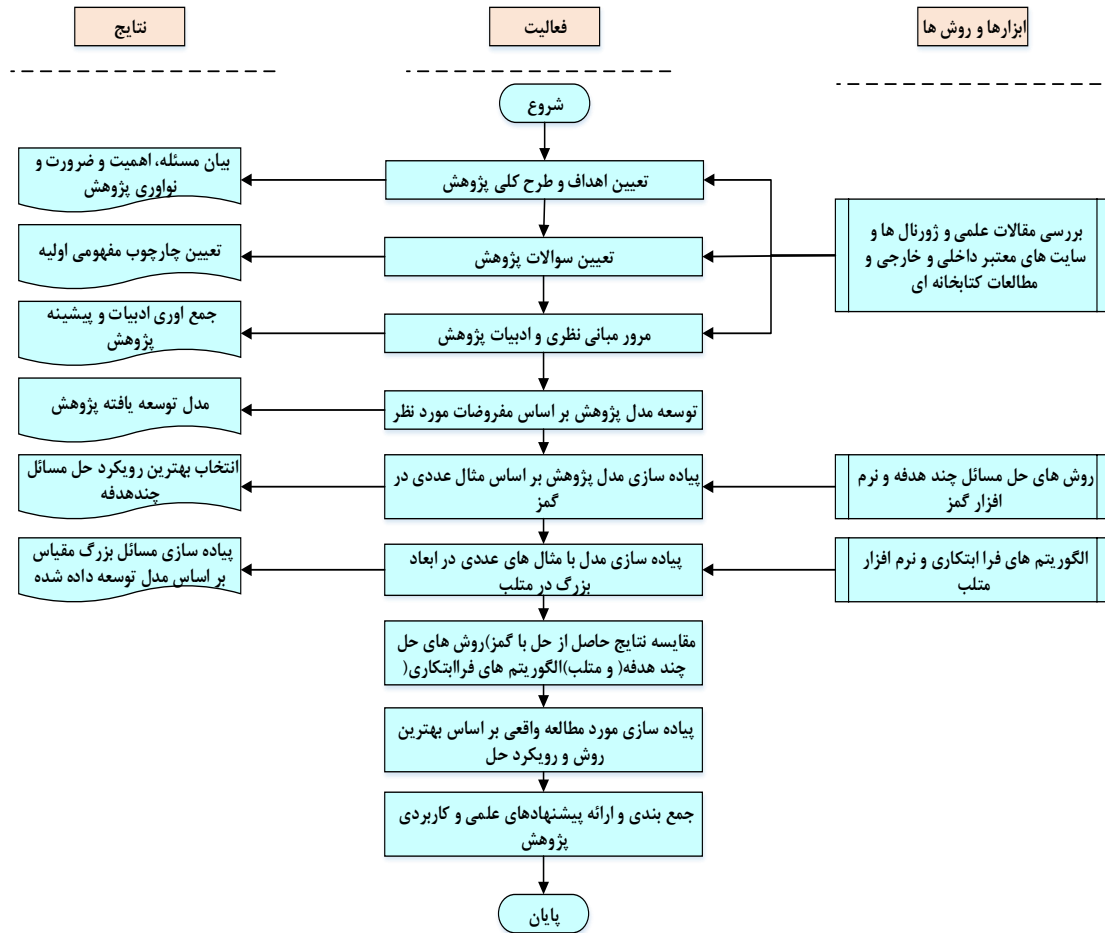
خون با ایجاد کمبود در زنجیره، مقدار تابع هدف هزینه را افزایش می دهد. بنابراین، مقدار تابع هزینه مستقیماً با مقدار ضریب جریمه رابطه دارد. نهایتاً، با افزایش تقاضا نیز تابع هدف هزینه روند افزایشی را از خود نشان می دهد.

همچنین در خصوص روش حل مدل با استفاده از الگوریتم های فراابتکاری، یافته ها نشان می دهند به طور کلی و بر اساس دفعات اجرا و همچنین میانگین آنها، الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری دارد.

در راستای انجام پژوهش های آینده پیشنهاد می شود که از تلفیق مدل های مسیریابی، تخصیص و مکان یابی برای برخورد با مساله استفاده شود. به بهینه سازی عملکرد شبکه در قالب مسائل کنترل موجودی و کاهش اثر شلاقی به خصوص در بانک های خون

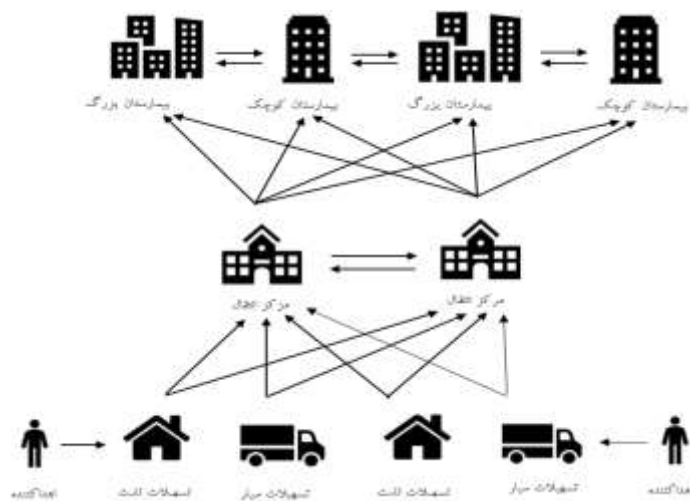


شکل ۱ - شمای کلی از یک زنجیره تامین خون  
Fig 1 - An overview of a supply chain



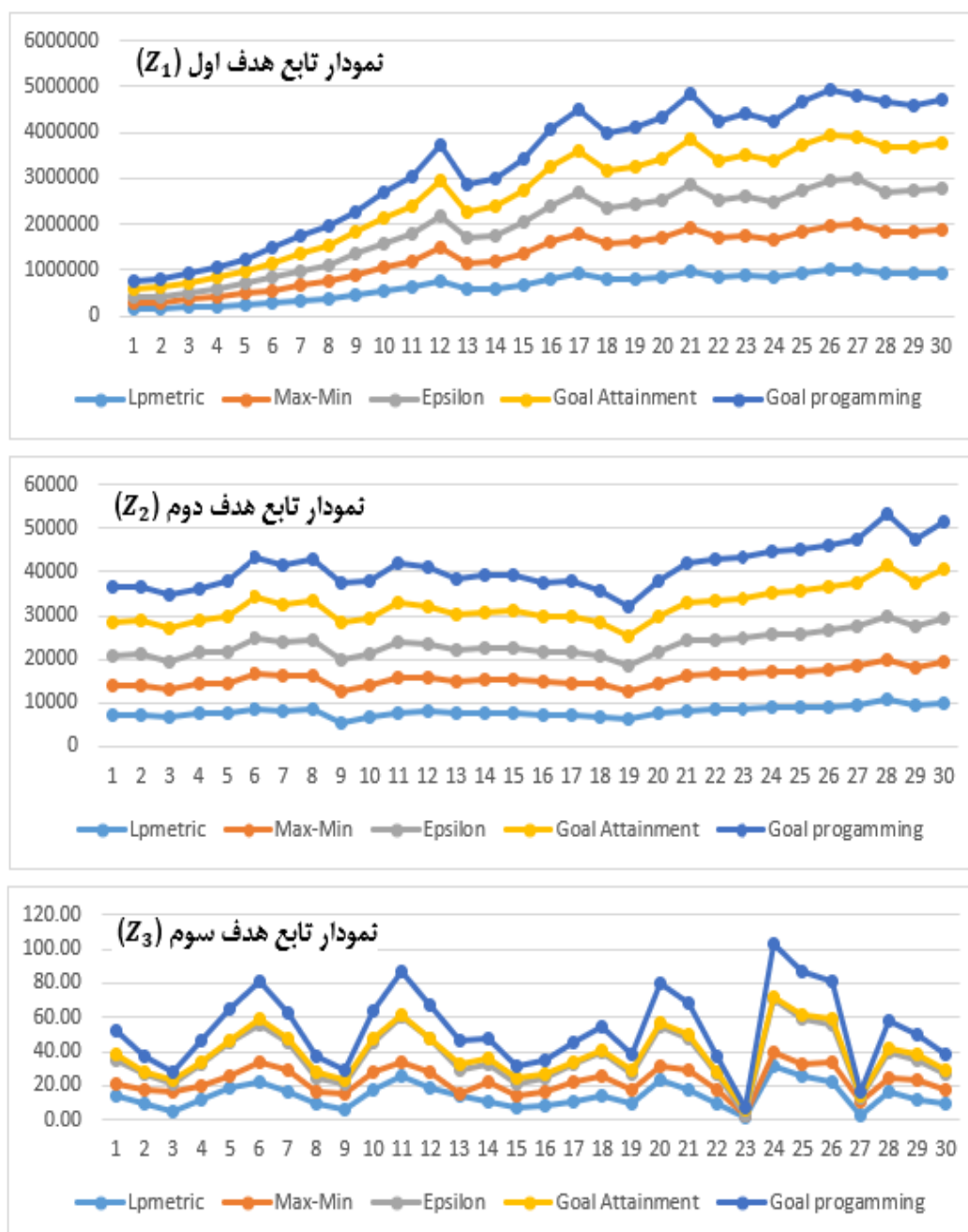
شکل ۲ - مراحل اجرای پژوهش

Figure 2 - The stages of research implementation



شکل ۳ - زنجیره تامین خون مورد بررسی در پژوهش

Fig 3 - Supply chain studied in the research



شکل ۴ - نمودار توابع هدف

Fig 4 - The third objective function diagram

جدول ۱ - مقدار پارامترهای به کار رفته برای مثال‌های عددی

Table 1 - the values of the parameters used for numerical examples

پارامتر	ارزش (دلار)	واحد (کیسه خون)	منبع
هزینه خرید پلاکت	۵۴۰	به ازای هر واحد	الالوف و همکاران، ۲۰۱۵
هزینه خرید خون قرمز	۱۸۰	به ازای هر واحد	آلفونسو و همکاران، ۲۰۱۴
هزینه کمبود	۱۵۰۰	به ازای هر واحد	کاستر و همکاران، ۲۰۰۵
هزینه ضایعات	۱۵۰	به ازای هر واحد	بلیک و همکاران، ۲۰۱۰
هزینه نگهداری	۱/۲	هر واحد در روز	واقعی
هزینه حمل و نقل	۵	هر واحد	واقعی

جدول ۲ - ظرفیت‌های استفاده شده در مدل‌ها

Table 2 - Capacities used in the mentioned models

ظرفیت	سطح ظرفیت روزانه (تعداد کیسه خون)
CAP1	29-29-15-25-35-25-15
CAP 2	25-25-39-19-79-19-39
CAP 3	19-19-35-15-75-15-35
CAP 4	15-15-79-39-59-39-79
CAPA1	1-1-4-2-6-2-4
CAPA2	2-2-6-4-8-4-6
CAPA3	4-4-8-6-10-6-8
CAPA4	6-6-10-8-12-8-10
CAPA5	9-9-13-11-15-11-13

جدول ۳ - نتایج به دست آمده از حل الگوریتم

Table 3 - The result obtained from solving the algorithm

NSGAI					MOPSO					مثال
CPU time	SM	SI	MSI	NPF	CPU time	SM	SI	MSI	NPF	
۵۹۴/۳	-/۵۸	۶۳/۵	۱۹۷۸۲۵/۱	۵	۶۳۷/۵	-/۵۲	۵۹/۸	۲۱۷۸۲۵/۱	۴	۱
۶۰۷/۴	-/۵۸	۷۴/۲	۲۱۴۵۴۳/۶	۵	۵۷۱/۴	-/۶۱	۷۱/۹	۱۹۴۶۱۳/۵	۳	۲
۶۵۲/۵	-/۵۲	۷۹/۳	۵۱۹۷۲/۴	۶	۶۱۹/۲	-/۴۹	۸۲/۱	۴۹۸۱۵/۴	۵	۳
۵۱۲/۷	-/۵۲	۲۵۸/۳	۴۹۸۱۲۹/۴	۷	۵۹۲/۹	-/۵۹	۳۱۰/۵	۵۱۲۳۱/۵	۶	۴
۴۲۶/۱	-/۳۹	۹۹۵/۳	۹۱۲۳۴۱/۸	۸	۳۹۹/۸	-/۴۱	۹۱۵/۸	۸۹۲۱۱/۲	۹	۵
۶۱۲/۷	-/۵۴	۲۹۵/۳	۵۸۱۲۹/۶	۷	۵۹۴/۲	-/۵۸	۳۱۴/۴	۵۲۹۷۸/۳	۱۰	۶
۶۵۹/۱	-/۴۷	۸۱/۴	۵۴۱۷۲/۴	۶	۶۵۹/۱	-/۴۷	۷۹/۲	۵۴۱۷۲/۴	۷	۷
۵۱۱/۸	-/۵۱	۳۵۲/۶	۴۹۲۸۵/۶	۷	۴۹۲/۱	-/۶۲	۴۱۶/۲	۵۱۳۷۲/۲	۹	۸
۳۸۲/۷	.	.	۵۶۲۸۱۴/۹	۶	۴۱۵/۲	.	.	۵۹۸۲۲۸/۱	۸	۹
۷۳۲/۴	-/۵۱	۶۸/۲	۳۶۲۸۱۹/۵	۱۲	۶۱۹/۲	-/۴۸	۷۳/۵	۴۴۲۵۵۱/۳	۱۳	۱۰
۲۸۷/۲	-/۶۳	۵۹/۸	۱۱۲۲۱۴/۵	۱۵	۳۱۶/۹	-/۵۹	۶۱/۲	۹۸۹۱۴/۵	۱۸	۱۱
۲۳۸/۵	-/۶۴	۵۹/۲	۱۱۸۱۷۲/۹	۱۹	۲۵۴/۲	-/۶۴	۵۹/۲	۱۲۱۱۳۸/۲	۲۲	۱۲
۴۷۲/۸	-/۲۷	۷۹۲/۴	۳۱۵۱۸/۱	۲۵	۵۲۴/۲	-/۳۱	۸۱۵/۹	۲۹۴۹۸/۶	۲۲	۱۳
۴۸۳/۱	-/۲۸	۷۹۲/۳	۲۸۳۵۲/۴	۲۱	۴۹۲/۵	-/۳۷	۸۲۵/۹	۲۹۵۴۲/۹	۱۸	۱۴
۴۳۹/۲	-/۲۸	۷۲۱/۶	۳۸۲۷۵۶۲/۸	۲۹	۴۲۲/۲	-/۳۱	۶۹۸/۳	۳۸۲۷۵۶۲/۸	۳۱	۱۵
۴۲۷/۲	-/۲۶	۷۹۲/۸	۲۴۸۴۲/۳	۲۴	۳۹۷/۸	-/۲۶	۷۹۲/۸	۲۴۸۴۲/۳	۲۲	۱۶
۳۸۱/۴	-/۲۳	۸/۴	۳۶۴/۸	۳۲	۴۱۲/۴	-/۲۷	۸/۴	۳۶۴/۸	۲۹	۱۷
۷۴۸/۸	-/۶۵	۱۸۲/۹	۱۳۹/۲	۱۸	۷۴۸/۸	-/۵۹	۲۱۹/۵	۱۳۹/۲	۱۹	۱۸
۴۲۸/۵	-/۲۳	۷۲۹/۲	۴۶۸۵۲۹/۷	۳۶	۴۲۸/۵	-/۲۳	۷۲۹/۲	۴۹۲۵۲۱/۷	۳۵	۱۹
۴۲۸/۱	-/۲۲	۷۹۴/۲	۲۳۵۸۲/۶	۲۲	۵۱۲/۸	-/۲۸	۷۹۴/۲	۲۵۱۷۹/۲	۲۱	۲۰
۷۳۲/۴	-/۶۴	۱۷۹/۱	۱۳۸/۴	۱۹	۷۳۲/۴	-/۷۱	۱۷۹/۱	۱۳۸/۴	۱۶	۲۱
۶۱۹/۸	-/۱۵	۴۱۱/۹	۲۴۴۵۷۷/۲	۲۵	۶۱۹/۸	-/۱۵	۴۱۱/۹	۲۴۴۵۷۷/۲	۲۸	۲۲
۵۹۴/۳	-/۵۸	۶۳/۵	۱۹۷۸۲۵/۱	۱۷	۵۹۴/۳	-/۵۸	۶۳/۵	۱۹۷۸۲۵/۱	۱۶	۲۳
۲۷۳/۸	-/۶۳	۳۹/۲	۱۳۲۹۳۲/۸	۱۴	۲۷۳/۸	-/۶۳	۴۱/۵	۱۴۳۸۲۹/۴	۱۱	۲۴
۶۱۹/۵	.	۴۱۵/۹	۲۴۵۲۶۸/۷	۲۷	۶۱۹/۵	.	۴۳۲/۸	۲۴۵۲۶۸/۷	۲۵	۲۵
۷۱۲/۳	-/۷۲	۲۳۸/۲	۲۴۱۲۵۱۹/۸	۲۱	۷۱۲/۳	-/۶۹	۲۵۵/۹	۲۵۸۲۵۲۴/۳	۱۹	۲۶

NSGAI					MOPSO					مثال
CPU time	SM	SI	MSI	NPF	CPU time	SM	SI	MSI	NPF	
۶۱۷/۸	۰	۴۱۹/۸	۱۹۴۵۸۲/۴	۲۵	۶۱۷/۸	۰	۴۱۹/۸	۲۱۴۴۷۲/۱	۲۸	۲۷
۳۳۹/۵	۰/۳۷	۲/۸	۶۴/۲	۱۶	۳۸۱/۵	۰/۴۲	۳/۱	۷۲/۵	۱۶	۲۸
۶۱۲/۹	۰	۳۹۸/۶	۲۱۷۲۱۹/۲	۲۴	۷۲۵/۳	۰	۳۹۸/۶	۲۱۷۲۱۹/۲	۲۶	۲۹
۶۴۹/۲	۰/۴۸	۵۸۴/۶	۳۳۱۵/۸	۲۱	۶۱۸/۴	۰/۵۵	۶۱۴/۵	۲۲۹۵/۶	۱۹	۳۰

جدول ۴ - مقایسه دو شاخص QM و MID برای جواب‌های الگوریتم‌ها

Table 4 - comparison of QM and MID indices for answers obtained from algorithms

فاصله از نقطه ایده آل (MID)			شاخص کیفیت (QM)			ردیف
NSGA-II	MOPSO	گمز	NSGA-II	MOPSO	گمز	
۰/۹۴	۱/۵۷	۰/۶۶	۶۵/۸۷	۳۴/۱۳	۱۰۰	۱
۱/۱۵	۱/۳۹	۰/۶۶	۵۷/۲۳	۴۲/۷۷	۱۰۰	۲
۱/۳۲	۱/۲۹	۰/۶۶	۴۸/۰۳	۵۱/۹۷	۱۰۰	۳
۱/۱۰	۱/۴۴	۰/۶۶	۵۹/۹۲	۴۰/۰۸	۱۰۰	۴
۰/۹۷	۱/۶۰	۰/۶۶	۶۳/۴۵	۳۶/۵۵	۱۰۰	۵
۱/۲۹	۱/۲۵	۰/۶۶	۵۲/۳۴	۴۷/۶۶	۱۰۰	۶
۱/۱۵	۱/۱۸	۰/۶۶	۴۱/۸۹	۵۸/۱۱	۱۰۰	۷
۱/۳۰	۱/۳۵	۰/۶۶	۵۶/۶۶	۴۳/۳۴	۱۰۰	۸
۱/۰۱	۱/۵۵	۰/۶۶	۶۱/۲۸	۳۸/۷۲	۱۰۰	۹
۱/۳۹	۱/۲۰	۰/۶۶	۴۳/۳۷	۵۶/۶۳	۱۰۰	۱۰
۱/۱۸	۱/۳۸	۰/۶۶	۵۵/۰۶	۴۴/۹۴	۱۰۰	۱۱
۱/۴۵	۱/۴۴	۰/۶۶	۵۲/۳۴	۴۷/۶۶	۱۰۰	۱۲
۱/۱۹	۱/۳۹	۰/۶۶	۵۴/۴۴	۴۵/۵۶	۱۰۰	میانگین



**Reference:**

- 1- Manavizadeh N, Mashayekhi N, Shabani M. Designing a fuzzy green blood supply chain network with regard to reducing blood product waste, Second International Conference on Challenges and New Solutions in Industrial Engineering, Management and Accounting, Damghan, 2021. [In Persian]
- 2- Zahiri B, Pishvae MS. Blood supply chain network design considering blood group compatibility under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 2017; 55(7): 2013-2033.
- 3- Dehghani M, Abbasi B. An age-based lateral-transshipment policy for perishable items. *International Journal of Production Economics*, 2019; 198: 93-103.
- 4- Cheraghi S, Hoseini Motlagh S, Ghatreh Samani M. A robust bi-objective model for integrated blood supply chain network design considering transshipment between facilities under uncertainty. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 2019; 10(4): 737-770. [In Persian]
- 5- Tofighi S, Torabi SA, Mansouri SA. Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 2016; 250(1): 239-250.
- 6- Mousavi R, Salehi-Amiri AH, Zahedia A, Hajiaghaei-Keshteli M. Designing a supply chain network for blood decomposition by utilizing social and environmental factor. *Computers & Industrial Engineering*, 2021; 160: 107501.
- 7- Kazemi Matin R, Azadi M, Farzipoor-Saen R. Measuring the sustainability and resilience of blood supply chains, *Decision Support Systems*, 2021; 21356765.
- 8- Shokouhifar M, Sabbaghi MM, Pilevari N. Inventory management in blood supply chain considering fuzzy supply /demand uncertainties and lateral transshipment. *Transfusion and Apheresis Science*, 2021; 60: 103103
- 9- Civelek I, Karaesmen I, Scheller-Wolf A. Blood platelet inventory management with protection levels. *European Journal of Operational Research*, 2015; 243(3): 826-838.
- 10- Doodman M, Bozorgi Amiri A. Integrate Blood Supply Chain Network Design with Considering Lateral Transshipment under Uncertainty. *Journal of Industrial Management Perspective*, 2020; 9(4): 9-40. [In Persian]
- 11- Eskandari-Khanghahi M, Tavakkoli-Moghaddam R, Taleizadeh AA, Amin SH. Designing and optimizing a sustainable supply chain network for a blood platelet bank under uncertainty. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2018; 71: 236-250.
- 12- Dehghani M, Abbasi B, Oliveira F. Proactive transshipment in the blood supply chain: A stochastic programming approach. *Omega*, 2019; 23: 1245-1253.
- 13- Bohonek M, Kutac D, Acker JP, Seghatchian J. (2020). Optimizing the supply of whole blood-derived bioproducts through the combined implementation of cryopreservation and pathogen reduction technologies and practices: an overview. *Transfus Apher Sci*: 102754.
- 14- Ahmadimanesh M, Tavakoli A, Pooya A, Dehghanian F. Designing an optimal inventory management model for the blood supply chain. *Quality Improvement Study*, 2020; 1-8. [In Persian]
- 15- Zhou Y, Zou T, Liu C, Yu H, Chen L, Su J. Blood supply chain operation considering lifetime and transshipment under uncertain environment. *Applied Soft Computing*, 2021; 106: 107364.

- 16- Arani M, Chan Y, Liu X, Momenitabar M. A lateral resupply blood supply chain network design under uncertainties. *Applied Mathematical Modelling*, 2021; 93: 165–187.
- 17- Maashisani F, Hajiaghaei-Keshteli M, Gholipour-kanani Y, Harsej F. Development of Multi - Objective, Multi- Period and Multi- Level Blood Supply Chain Planning Model. *Journal of healthcare management*, 2021; 12(2): 71-85. [In Persian]
- 18- Arvan M, Tavakkoli-Moghaddam R, Abdollahi M. Designing a bi-objective, multi-product supply chain network for blood supply. *Uncertain Supply Chain Management*, 2015; 3: 57-68.
- 19- Gunpinar S, Centeno L. Stochastic integer programming models for reducing wastages and shortages of blood products at hospitals. *Computers & Operations Research*, 2015; 54: 129-141.

## Multi-Objective Optimization of Blood Products Supply Network to Minimize Delivery Time and Non-Estimated Hospital Demand

Kazemi Z<sup>1</sup>, Homayounfar M<sup>2</sup>, fadaei M<sup>3</sup>, Sufi M<sup>4</sup>,  
Salehzadeh A<sup>5</sup>

### Abstract

**Introduction:** Due to the importance of blood as a vital element in the health system, in this study, the blood supply chain is modeled at three levels of donors, banks (blood centers) and hospitals in the form of a multi-objective model to minimize total costs, total delivery time of blood units and non-estimated demand of hospitals in each period.

**Methods:** The present study is applied in terms of purpose and descriptive and quantitative in terms of method. The data needed to implement the real problem in 2021 have been collected by through the regional office of the Tehran blood transfusion organization along with the Negareh system. Due to the Np-hard nature of the problem, the proposed model is solved using three algorithms of GA, NSGA-II and MOPSO in GAMS software.

**Results:** In the proposed model, matching the blood type in meeting demand; blood type delivery and allocation system in laboratories and blood banks, blood wasting in laboratory, transfer of products between demand centers, sensitive and determinative parameters of the model such as; demand, blood donation and delivery time of blood products between network components are considered indefinitely. The findings show that the MOPSO algorithm has a better performance in problems 3, 7, 10 and 12 for the QM index, but generally, based on running times and their average, the NSGA-II algorithm is better.

**Conclusion:** Based on the results, the proposed model leads to a reduction in total costs, total delivery time of blood units and unapproved demand of hospitals.

**Keyword:** Multi-objective optimization, Blood product supply network, Hybrid approach, Meta-heuristic algorithm.

---

1- PhD Candidate, Department of Industrial Management, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran

2- Assistant Professor, Department of Industrial Management, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran, (Corresponding Author), homayounfar@iaurasht.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Industrial Management, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran

4- Assistant Professor, Department of Industrial Management, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran

5- Assistant Professor, Department of Biology, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran