

## چشم‌انداز مدیریت صنعتی

سال یازدهم، شماره ۴۱، بهار ۱۴۰۰

شاپا چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵

صص: ۸۱-۱۱۵

# ارائه مدل بهینه‌سازی استوار به‌منظور طراحی زنجیره تأمین خون جامع تحت شرایط عدم قطعیت عرضه و تقاضا

طاهر کوچکی تاجانی\*، علی محتشمی\*\*، مقصود امیری\*\*\*

رضا احتشام رائی\*\*\*\*

## چکیده

خون یک کالای حیاتی است و کمبود آن در زنجیره تأمین نظام سلامت خون مسئله‌ساز و مصیبت‌بار خواهد بود. هرگونه پیشرفت در عملکرد زنجیره تأمین نظام سلامت به میزان زیادی باعث صرفه‌جویی در هزینه سیستم سلامت می‌شود و از همه مهم‌تر اینکه جان انسان‌های زیادی را نجات خواهد داد؛ بنابراین در این پژوهش زنجیره تأمین خون به‌صورت مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط شامل مراحل جمع‌آوری، فرآوری و توزیع خون و محصولات خونی با در نظر گرفتن طول عمر و سن تقاضا، طراحی شده است که به دنبال کاهش هزینه‌های متحمل بر زنجیره تأمین و نیز کاهش کمبود محصولات خونی می‌باشد. از آنجاکه همواره احتمال تغییرات ذاتی در بسیاری از پارامترهای مسئله از جمله عرضه و تقاضا وجود دارد، از روش بهینه‌سازی استوار به‌منظور مقابله با این عدم اطمینان در زنجیره تأمین استفاده شده است. مدل طراحی شده ابتدا با مثال عددی و در اندازه‌های کوچک به‌صورت حل دقیق و در اندازه بزرگ توسط الگوریتم‌های فراابتکاری وال و رقابت استعماری حل شده و نتایج حل الگوریتم‌ها ارائه گردیده است. در پایان یک مطالعه موردی برای بررسی کاربرد مدل صورت گرفته است.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین خون؛ مدل‌سازی ریاضی؛ مدل‌سازی استوار؛ الگوریتم وال؛  
الگوریتم رقابت استعماری.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۲۲.

\* دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

\*\* دانشیار گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران (نویسنده مسئول).

Email: mohtashami07@gmail.com

\*\*\* استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

\*\*\*\* استادیار گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

### ۱. مقدمه

خون انسان یک منبع کمیاب و جبران‌ناپذیر است که فقط توسط انسان تولید می‌شود. تأمین مقادیر کافی از فرآورده‌های خونی در مراکز تقاضا و بیمارستان‌ها یکی از چالش‌های بزرگ در محیط‌های بهداشتی و درمانی است. نیاز به اهداکنندگان بالقوه همیشه برای زنجیره تأمین خون موردنیاز بوده است و از آنجاکه امر اهدای خون یک امر انسان‌دوستانه محسوب می‌شود و مشوق‌های مالی در این زمینه کاربردی ندارد، ماهیت آن دارای عدم‌اطمینان و پیچیدگی خاص است؛ بدین معنا که در دسترس بودن فرآورده‌های خونی مناسب بسیار حیاتی است؛ بنابراین تصمیم‌گیری برای زنجیره تأمین خون با توجه به افزایش تقاضا برای فرآورده‌های خونی و همچنین نامشخص بودن سیاست‌های اهدای داوطلبان چالش‌برانگیز است [۳۰]. به‌طورکلی زنجیره تأمین خون از چهار بخش اصلی (جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، پردازش و فرآوری، انتقال به مراکز تقاضا) تشکیل شده است که از جمع‌آوری خون داوطلبان در مراکز اهدا آغاز می‌شود. در مرحله بعد خون دریافت‌شده از داوطلبان به‌صورت خون کامل در مراکز خون ذخیره خواهد شد و برخی از آن‌ها با توجه به نیاز مراکز درمانی و سیاست‌های مراکز خون به محصولات خونی فرآوری می‌شوند که هر کدام کاربردهای درمانی خاص خود را دارند (برای مثال، گلبول قرمز خون برای درمان کم‌خونی، پلاکت برای بیماران سرطانی، پلاسما برای بیماران سوختی به‌کار می‌رود) و با توجه به نیاز مراکز تقاضا توزیع می‌شوند [۱۱].

طراحی مناسب شبکه خون از اهمیت زیادی برخوردار است. پیکربندی شبکه به دلیل هزینه‌های قابل‌توجه و زمان موردنیاز در کوتاه‌مدت قابل‌تغییر نیست؛ بنابراین استفاده از امکانات موجود و بهینه‌سازی شرایط ارجحیت بیشتری نسبت به استقرار دوباره تجهیزات، مراکز خون و سایر تسهیلات مربوط به زنجیره تأمین خون دارد [۲۷]. یک عامل مهم در زنجیره تأمین خون عامل هزینه است. هزینه‌های چون خون‌گیری از داوطلبان، فرآوری محصولات و هزینه‌های موجودی خون و فرآورده‌های خونی در بیمارستان‌ها و مراکز خون، هزینه‌های انتقال خون به مراکز تقاضا اهمیت زیادی دارد. عامل مهم دیگر موجودی محصولات خونی در مراکز عرضه و تقاضا است. علت ذخیره‌سازی فرآورده‌های خونی برای رفع نیازهای مراکز درمانی است؛ اما ذخیره‌سازی زیاد باعث افزایش میزان موجودی و نیز باعث افزایش میزان فسادپذیری محصولات خونی می‌شود. در مقابل عدم‌ذخیره مناسب محصولات خونی در این مراکز باعث ایجاد کمبود می‌شود و کمبود محصولات خونی عواقب جبران‌ناپذیری بر زنجیره تأمین اعمال می‌کند؛ بنابراین باید توجه داشت که کاهش هزینه‌ها باید با رعایت کاهش کمبود و اتلاف انجام پذیرد [۸، ۳۱]. خون جزو کالاهای فاسدشدنی است و زنجیره تأمین که مبتنی بر آن و فرآورده‌های آن است نیز همین ویژگی را دارد [۳۲]. فرآورده‌های خون آن دسته از مواد تشکیل‌دهنده خون هستند که

کاربرد درمانی دارند و می‌توانند به‌وسیله سانتریفیوژ<sup>۱</sup>، فیلترکردن و منجمدکردن با استفاده از روش‌های مرسوم انتقال خون تهیه شوند [۲۳]. فرآورده‌های خونی عمدتاً شامل انواع پلاسما، پلاکت و گلبول قرمز و کرایوپره سی پتیت<sup>۲</sup> هستند که این محصولات دارای طول عمر متفاوت از یکدیگر هستند (پلاکت ۵-۷ روز، پلاسما و کرایوپره سی پتیت حدود یک سال و گلبول قرمز و خون کامل ۲۱-۴۲ روز عمر) و پس از آن مدت فاسد شده و باید منهدم شوند [۳]. در صورتی که مصرف این محصول درست مدیریت نشود، به خاطر منقضی‌شدن مقدار زیادی از آن دور ریخته خواهد شد و چنین وضعیتی برای سیستم زنجیره تأمین هزینه (مالی و اجتماعی) ایجاد خواهد کرد. باید توجه کرد محصولات خونی مشتق‌شده از خون نیز خود دارای ویژگی و طول عمر متفاوتی هستند که این خود یک چالش دیگر به همراه خواهد داشت؛ بنابراین این پژوهش با یک زنجیره تأمین چندمحصولی از کالاهای فاسدشدنی با طول عمر متفاوت مواجه است که عرضه و تقاضای آن دچار عدم قطعیت است.

امروزه زنجیره‌های تأمین به‌واسطه طبیعت پیچیده خود با حد بالایی از عدم قطعیت روبه‌رو هستند که می‌تواند کیفیت عملکرد آن‌ها را به‌طور نامطلوبی تحت تأثیر قرار دهد. با توجه به اهمیت این امر، عدم قطعیت در طراحی زنجیره تأمین که افق بلندمدت تصمیم‌گیری نیز سبب تشدید آن می‌شود، به دودسته قابل تقسیم است: دسته نخست عدم قطعیت مربوط به پارامترها است که خودبه‌خود به دو دسته سیستمی و محیطی تقسیم می‌شوند. دسته دوم نیز مربوط به حوادث مخرب غیرمترقبه‌ای است که می‌تواند زنجیره تأمین را متوجه ضررهای بزرگی کند [۲۰]. با توجه به اهدای نامنظم خون توسط داوطلبان در طول دوره‌های زمانی متفاوت و نیز ثابت نبودن تقاضا (به‌واسطه عدم مصرف، نسبت‌های متغیر کراسمچ به ترانسفوزیون در بیمارستان یا تقاضاهای اورژانسی پیش‌بینی‌نشده) در این پژوهش به‌منظور مواجهه با عدم قطعیت تقاضا و عرضه خون از رویکرد بهینه‌سازی استوار<sup>۳</sup> با پارامترهای بازه‌ای استفاده شده است.

استواری به این مفهوم است که خروجی مدل نباید حساسیت زیادی به مقادیر دقیق پارامترهای ورودی داشته باشد. به‌طور کلی می‌توان مدل‌های معرفی‌شده در زمینه برنامه‌ریزی استوار را به دو فهرست کلی تقسیم‌بندی کرد: دسته نخست مدل‌هایی است که مبتنی بر سناریوهای گسسته تعریف می‌شود. در این مدل‌ها مقدار تابع هدف در هر یک از سناریوها باید اختلاف کمی با یکدیگر داشته باشند. دسته دوم (مشابه این پژوهش) بر اساس مفهوم مجموعه‌های عدم اطمینان و مبتنی بر نوسان پارامترها در یک بازه است. در این مدل‌ها عدم اطمینان به شکل مجموعه‌های عدم اطمینان کران‌دار مدل‌سازی می‌شود و هدف

---

1. Centrifugation  
2. Cryoprecipitate  
3. Robust Optimization

به‌دست‌آوردن جوابی است که نسبت به تقریباً تمام پارامترهای عدم‌اطمینان حساسیت نداشته باشد [۱۲]. در واقع پارامترهای پیوسته را می‌توان با رویکرد برنامه‌ریزی استوار در فواصل مشخصی محدود کرد و عدم‌اطمینان را در یک مجموعه مناسب جای داد.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

پژوهش‌های متعددی در زمینه مدیریت خون و زنجیره تأمین خون انجام شده و این موضوع از جنبه‌های گوناگون بررسی شده است. نخستین مطالعه، پژوهش ناهیماس (۱۹۸۲) در خصوص زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی بود [۲۶] که بعدها توسط پراستاکوس (۱۹۸۴) و پیرسکالا (۲۰۰۵)، توسعه یافت [۲۸، ۲۹]. مطالعات اخیر با تمرکز بر طراحی زنجیره تأمین خون شامل موارد زیر است.

در مطالعه ناگورنی و همکاران (۲۰۱۲)، زنجیره تأمین خون انسان به‌صورت مجموعه‌ای شامل سایت‌ها، تجهیزات پردازش و آزمایش، تجهیزات ذخیره‌سازی، مراکز توزیع و همچنین نقاط تقاضا بررسی و تحلیل شده است. در این پژوهش یک مدل بهینه‌سازی شبکه خون توسعه یافته است که در آن هدف‌های چندگانه بهینه‌سازی سیستم، تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد تا هم هزینه عملیاتی کل و هم تابع خطر کل را حداقل کنند [۲۵]. گانپیر و سنتتو (۲۰۱۵) به چالش‌های عمده در مدیریت زنجیره تأمین خون که مربوط به کمبود و تلفات محصولات خون است، پرداختند. در این پژوهش، مدل برنامه‌ریزی عددی برای به‌حداقل‌رساندن هزینه کل، کمبود و میزان تلفات خون در بیمارستان در یک افق برنامه‌ریزی ارائه شده و تمرکز اصلی بر گلبول‌های قرمز و پلاکت خونی است. مدل‌های تصادفی و قطعی شامل موارد تقاضای ناخواسته، تقاضا برای دو نوع بیمار (جوان و عادی) است که نتایج نشان داد، میزان هدررفت از میانگین ۱۹/۹ درصد به ۲/۵۷ درصد کاهش یافته است؛ علاوه بر این، کمبود و هزینه کل به‌ترتیب به میزان ۹۱/۴۳ و ۲۰/۷ درصد کاهش می‌یابد [۱۵]. ازوریو و همکاران (۲۰۱۶)، برنامه‌ریزی تولید در زنجیره تأمین خون را بررسی کردند. در این پژوهش یک مدل بهینه‌سازی شبیه‌سازی ادغام‌شده برای پشتیبانی از تصمیمات استراتژیک و عملیاتی در برنامه‌ریزی تولید ارائه شد و شبیه‌سازی رویدادگسسته برای نشان‌دادن جریان از طریق زنجیره تأمین، شامل جمع‌آوری، تولید، نگهداری و توزیع بود. از سوی دیگر، مدل بهینه‌سازی خطی که در طول افق برنامه‌ریزی اجرا شده، برای پشتیبانی از تصمیم‌های روزانه، مانند تعداد موردنیاز اهداکنندگان، روش‌های جمع‌آوری و برنامه‌ریزی تولید مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل با داده‌های واقعی از یک مرکز خون در کلمبیا ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که شاخص‌های کلیدی شامل کمبود، خون منقضی‌شده، اهداکنندگان و هزینه‌ها بهبود یافته است [۲۷]. رمضانیان و همکاران (۲۰۱۷)، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای کاهش کمبودها و نیز افزایش انگیزه برای اهداکنندگان خونی ارائه کردند.

نوآوری این پژوهش در نظر گرفتن جنبه‌های اجتماعی از قبیل فاصله اهداکنندگان، تجربه اهداکنندگان و بودجه برای افزایش میزان جذب اهداکنندگان خون بوده است. به‌منظور مواجهه با عدم قطعیت تقاضا نیز از برنامه‌ریزی پایدار مبتنی بر سناریو استفاده شده است و در انتها مدل و کاربرد آن با یک مطالعه موردی در تهران آزمون شده است [۳۰]. حیدری و پسندیده (۲۰۱۸)، یک مدل زنجیره تأمین دوهدفه ارائه کردند که به‌صورت هم‌زمان هم به دنبال کاهش کل هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین و نیز کل تأثیرات زیست‌محیطی فعالیت‌های این مجموعه است. عرضه و تقاضا در این مدل دارای عدم قطعیت است و از برنامه‌ریزی استوار به‌منظور مواجهه با این عدم قطعیت استفاده شده است. در نهایت مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی مختلط ارائه شده با استفاده از الگوریتم آزادسازی لاگرانژ حل شد [۱۶]. زهیری و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل دوهدفه برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح با هدف جمع‌آوری، تولید غربالگری توزیع و برنامه‌ریزی مسیریابی محصولات خونی ارائه کردند که به دنبال بهینه‌سازی کل هزینه و نیز اولویت‌تازگی محصولات خون منتقل شده به بیمارستان‌ها است. در این پژوهش برای مقابله با عدم اطمینان داده‌های ورودی یک رویکرد برنامه‌نویسی تصادفی چندمرحله‌ای مبتنی بر درخت سناریو ترکیبی ارائه شد. پژوهشگران با توجه به پیچیدگی مدل یک مدل هیبرید فازی ارائه کردند که نتایج نشان‌دهنده بهره‌وری راه‌حل ارائه شده و الگوریتم حل بود. همدان و دیابت (۲۰۱۹)، یک مدل تصادفی دومرحله‌ای برای گلبول قرمز ارائه کردند که هم‌زمان تصمیم‌های تولید و موجودی و مکان را مدنظر قرار می‌دهد. مدل تحقیق در ابتدا تعداد امکانات جمع‌آوری خون سیار برای اعزام را تعیین می‌کند؛ درحالی‌که در مرحله دوم، تصمیم‌گیری در مورد میزان موجودی و تولید را موردبررسی قرار می‌دهد. در این پژوهش، هدف به حداقل رساندن تعداد واحدهای فاسد شده، هزینه سیستم و زمان تحویل خون بوده است که با استفاده از روش اسپیلون محدودیت مسئله سه‌هدفه به یک مسئله تبدیل شده و طی یک برنامه‌نویسی عدد صحیح<sup>۱</sup> حل شده است [۱۵]. حسینی مطلق و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی ریاضی برای تحقق هم‌زمان سه چالش انگیزه اهداکنندگان، بهینه‌سازی تصمیم‌گیری در خصوص موقعیت و ظرفیت تسهیلات و کنترل قابلیت اطمینان و پایداری زنجیره تأمین خون ارائه کردند؛ سپس مدل به‌منظور کنترل عدم قطعیت و امکان اختلال توسعه یافت و در یک مطالعه موردی اجرا شد [۱۸]. حسینی و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل برنامه‌نویسی تصادفی دومرحله‌ای برای مدیریت زنجیره تأمین گلبول‌های قرمز ارائه دادند که این مدل تصمیم‌های مربوط به تخصیص موقعیت مکانی تسهیلات و مدیریت موجودی را بهینه‌سازی می‌کند و هدف آن به حداقل رساندن هزینه کل زنجیره تأمین شامل هزینه‌های ثابت، هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های نگهداری موجودی،

هزینه‌های ضایعات و هزینه‌های حمل‌ونقل است. روش بهینه‌سازی استوار نیز برای مقابله با عدم قطعیت پارامترها در این پژوهش پیشنهاد شده است. در این پژوهش انتقال بین مراکز عرضه و تقاضا بر اساس شاخص ABO-RH است [۱۹]. در یکوند و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل برنامه‌نویسی تصادفی استوار تصادفی را برای مسئله توزیع موجودی در یک زنجیره تأمین خون پیشنهاد کردند که هدف نخست، به حداقل رساندن تعداد کل کمبودها و ضایعات و هدف دوم ارتباط بین یک مرکز خون و دو تیپ بیمارستان و بیماران بود. آن‌ها از روش ترکیبی اپسیلون محدودیت و آرام‌سازی لاگرانژ برای حل مدل پیشنهادی دوهدفه استفاده کردند. در انتها، این مدل با استفاده از داده‌های الهام‌گرفته از یک مطالعه موردی واقعی در ایران اجرا شد تا کاربرد بالقوه آن را نشان دهد [۷]. دودمان و امیری (۲۰۲۰)، یک مدل دوهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین خون با هدف کاهش هزینه تأسیس تسهیلات ثابت و موقت، هزینه‌های انتقال فرآورده‌های خونی و حداقل کردن حداکثر میزان کمبود ارائه کردند. در این مدل، انتقالات جانبی بین بیمارستان‌ها در نظر گرفته شد. مدل غیرقطعی به کمک روش فازی خیمز به مدل قطعی تبدیل شده و در ادامه مدل دوهدفه به مدل تک‌هدفه تبدیل شده است. نتایج محاسباتی حاصل از مدل نشان می‌دهد که در مدل فازی به دلیل وجود آلفا-کات، مدل انعطاف‌پذیرتر شده است [۹].

جایگاه پژوهش حاضر نسبت به پژوهش‌های مهم انجام‌شده در سال‌های اخیر در جدول ۱، مشاهده می‌شود.

جدول ۱. جایگاه پژوهش پیش رو نسبت به پژوهش‌های پیشین

پژوهشگران	محصول		دوره زمانی		اتلاف	کمبود	سن محصول	عدم اطمینان	مدل ریاضی	تکنیک انتخابی	روش حل
	تک	چند	تک	چند							
آروان و همکاران (۲۰۱۵). [۱]	✓	-	✓	-	✓	-	-	-	MINLP	-	EX(eps)
بهزاد زهیری و پیشوایی (۲۰۱۶). [۳۱]	-	✓	-	✓	✓	✓	-	✓	MINLP	RO-FM	EX
دیلون و همکاران (۲۰۱۷). [۸]	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	MINLP	TSSP	EX
رضانیان و بهبودی	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	MILP	TSSP-MDV	EX

پژوهشگران	محصول	دوره زمانی	اتلاف	کمبود	سن محصول	عدم اطمینان	مدل ریاضی	تکنیک انتخابی	روش حل
(۲۰۱۷) [۳۰]									
اسکندری و همکاران (۲۰۱۸) [۱۱]	✓	-	✓	✓	✓	✓	MINLP	FMP	EX & MH(SA)
کامیابیان و همکاران (۲۰۱۸) [۲۱]	✓	-	✓	✓	✓	✓	MINLP	F-Ro	HU
فتحیان و پسندیده (۲۰۱۸) [۱۶]	-	✓	✓	✓	-	✓	MILP	RO	EX(LR)
زهیری و همکاران (۲۰۱۸) [۳۲]	-	✓	-	✓	-	✓	MINLP	MSSP	HU
لریمی و یعقوبی (۲۰۱۹) [۲۲]	✓	-	✓	✓	✓	✓	MILP	RO	EX(LR)
مطلق و همکاران (۲۰۲۰) [۱۸]	-	✓	-	✓	-	✓	MILP	MPSFRP	EX
تحقیق پیش رو	-	✓	-	✓	✓	✓	MINLP	RO	EX & MH

RO: رایاست  
EX: حل دقیق  
MH: متاهوریستیک  
F-RO: رایاست فازی  
LR: لاکرانژ  
HU: هیوریستیک  
MPSFRP: برنامه‌ریزی متعطف احتمالی-تصادفی پایدار  
MILP: برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط  
SA: الگوریتم تبرید

### ۳. روش شناسی پژوهش

**تعریف مسئله و مدل پژوهش.** مسئله پیش رو بر اساس یک زنجیره تأمین خون مبتنی بر سه جزء جمع‌آوری، پردازش و ارسال خون و محصولات خونی است. تسهیلاتی برای جمع‌آوری خون در نظر گرفته شده است. اهداکنندگان یا به مراکز ثابت اهدای خون یا وسیله‌های جمع‌آوری کننده متحرک خون و یا به مراکز خون در سطح شهر خون اهدا می‌کنند. خون جمع‌آوری شده توسط مراکز ثابت خون‌گیری و وسیله‌های جمع‌آوری کننده خون به نزدیک‌ترین مرکز خون تحویل داده می‌شود. در این قسمت عملیات پردازش بر روی خون‌های جمع‌آوری شده آغاز می‌شود و بسته به

گروه‌های خونی جمع‌آوری شده خون به محصولات نظیر (گلبول قرمز، پلاسما، پلاکت و یا به صورت همان خون کامل) فرآوری شده و به بیمارستان‌ها ارسال می‌شود. نکته مهم اینکه با تبدیل خون به محصولات دیگر، برخی از خصوصیات محصول از جمله طول عمر انقضای محصولات تغییر می‌کند؛ بنابراین در ادامه انتقال محصولات و پاسخ به تقاضای آن‌ها باید به سن آن محصول خونی توجه کرد. نکته دیگر اینکه فرآورده خونی درخواستی از مراکز تقاضا به دو شکل است: در شرایط عادی محدودیتی برای ارسال محصولات نیست؛ ولی برای برخی جراحی‌ها یا خون‌ریزی‌ها و عمل‌ها به یک نوع فرآورده‌های خونی با عمر مشخص (خون جوان) نیاز است؛ بنابراین لزوم اهمیت به سن خون ارسالی به بیمارستان‌ها نیز در مدل دیده خواهد شد. در واقع این مدل به دنبال کاهش هزینه ناشی از خون‌گیری از اهدا کنندگان است؛ به صورتی که این حداقل‌سازی توأم با کاهش هزینه نگهداری موجودی فرآورده‌های خونی در بیمارستان‌ها و مراکز خون و نیز کاهش کمبود (با هزینه زیاد-زیرا کمبود خون در بیمارستان‌ها عواقب انسانی بسیار بالایی خواهد داشت) فرآورده‌های خونی در بیمارستان شود؛ همچنین اتلاف خونی بر اثر منقضی شدن عمر فرآورده‌ی خونی تولیدشده و عدم مصرف آن نیز باید حداقل شود. به طور خلاصه توسعه‌هایی که در مدل ریاضی پیش رو در نظر گرفته شده و آن را از مقالات دیگر متمایز می‌سازد به شرح زیر است.

۱. ارائه یک مدل بهینه‌سازی زنجیره تأمین خون چندمحصولی، چند دوره‌ای که شامل محصولات با طول عمر محدود، که هر محصول ویژگی خاص خود را دارد؛ ۲. زنجیره تأمین ارائه شده محصولات فاسدشدنی به‌گونه‌ای است که هر محصول دارای طول عمر متفاوت از محصولات دیگر است؛ ۳. تقاضای هر محصول به دو بخش محصول تازه و معمولی و بر اساس سن محصول تفکیک شده است؛ ۴. عرضه و تقاضا به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است و برای مواجهه با این عدم قطعیت رویکرد بهینه‌سازی استوار پیشنهاد شده است. مفروضات مدل:

- تمام مراکز جمع‌آوری و مراکز تقاضا دارای ظرفیت محدود هستند؛
- مراکز خون هم کار جمع‌آوری و هم فرآوری محصولات خونی را بر عهده دارند؛
- طول فرآیند پردازش و فرآوری محصولات خونی ۲ روز است؛
- تقاضای واسله به مراکز خون به دو نوع تازه و معمولی تفکیک می‌شود؛
- هر یک از محصولات خونی در این پژوهش با عمر متفاوت از یکدیگر دیده شده و نیز بر اساس سن آن‌ها به تقاضاهای واسله اختصاص داده می‌شوند؛
- عدم قطعیت در عرضه کل و نیز تقاضا دیده می‌شود.



**مدل پژوهشی****نمایه‌ها**

- $r$ : سن محصول خونی  
 $i$ : دسته اهداکنندگان خون  
 $y$ : مکان‌های که وسیله جمع‌آوری خون متحرک در آنجا مستقر می‌شود.  
 $b$ : تعداد وسیله‌های نقلیه جمع‌آوری خون  
 $l$ : تسهیلات ثابت که فقط جمع‌آوری خون انجام می‌دهند.  
 $m$ : مرکز خون (جمع‌آوری + پردازش و توزیع)  
 $h$ : بیمارستان‌ها و مراکز تقاضا محصولات خونی  
 $p$ : محصولات خونی  
 $g$ : گروه‌های خونی  
 $t$ : دوره زمانی

**پارامترها**

- $rl_p$ : طول عمر هر محصول  $p$   
 $ry_p$ : حداکثر سن موردقبول برای مصرف محصولات خونی  $p$   
 $demY_{p,g,h,t}$ : تقاضای محصولات خونی  $p$  با عمر جوان از گروه  $g$  از مرکز تقاضا  $h$  در دوره  $t$   
 $demO_{p,g,h,t}$ : تقاضای محصولات خونی  $p$  با عمر معمولی از گروه  $g$  از مرکز تقاضا  $h$  در دوره  $t$   
 $Cb_b$ : هزینه خون جمع‌آوری شده توسط وسیله  $b$   
 $Cm_m$ : هزینه خون جمع‌آوری شده توسط مرکز خون  $m$   
 $Cl_l$ : هزینه خون جمع‌آوری شده توسط مرکز جمع‌آوری  $b$   
 $Cih_h$ : هزینه نگهداری محصولات خونی در بیمارستان  $h$   
 $Cim_m$ : هزینه نگهداری محصولات خونی در مرکز خون  $m$   
 $Cmh_{m,h}$ : هزینه انتقال محصولات خونی از مرکز خون  $m$  به بیمارستان  $h$   
 $Csh_h$ : هزینه کمبود محصولات خونی  $p$   
 $Cw$ : هزینه اتلاف محصولات خونی  
 $Cd$ : حداکثر فاصله مجاز  
 $Zi_{i,t}$ : حداکثر ظرفیت اهداکنندگان  $i$  در دوره  $t$   
 $Zb_b$ : حداکثر ظرفیت دریافت خون وسیله  $b$   
 $Zl_l$ : حداکثر ظرفیت دریافت مرکز  $l$   
 $Zm_m$ : حداکثر ظرفیت دریافت خون مراکز خون  $m$

$Dy_{i,y}$ : فاصله اهداکنندگان  $i$  با مکان جمع‌آوری خون  $y$

$DI_{i,t}$ : حداکثر ظرفیت دریافت خون مراکز خون  $m$

$Dm_{i,m}$ : فاصله اهداکنندگان  $i$  با مرکز خون  $m$

$BM$ : یک عدد بسیار بزرگ

$Zg_g$ : درصد مقدار هر گروه خونی در کل خون جمع‌آوری‌شده در مرکز  $m$

$Zp_p$ : درصد مقدار هر محصول خونی  $p$  در کل خون جمع‌آوری‌شده در مرکز  $m$

### متغیرهای عدد صحیح

$MMb_{b,t}$ : مقدار خون جمع‌آوری‌شده توسط وسیله  $b$  در دوره  $t$

$MMm_{m,t}$ : مقدار خون جمع‌آوری‌شده توسط وسیله  $b$  در دوره  $t$

$MMI_{m,t}$ : مقدار خون جمع‌آوری‌شده در مراکز جمع‌آوری  $l$

$Max_t$ : حداکثر خون قابل جمع‌آوری از اهداکنندگان در دوره  $t$

$Ipb_{m,p,g,r,t}$ : مقدار موجودی آخر دوره مرکز خون  $m$  از محصول  $p$  با گروه  $g$  با سن  $r$  در دوره  $t$

$Iph_{h,p,g,r,t}$ : مقدار موجودی آخر دوره بیمارستان  $h$  از محصول  $p$  با گروه  $g$  با سن  $r$  در دوره  $t$

$MpgH_{m,h,p,g,r,t}$ : مقدار محصول  $p$  از گروه  $g$  با سن  $r$  انتقال‌یافته از مرکز خون  $m$  به بیمارستان

$h$  در دوره  $t$

$Sph_{p,g,h,r,t}$ : مقدار کمبود محصول  $p$  در گروه  $g$  در بیمارستان  $h$  در دوره  $t$

$Wh_{p,t}$ : میزان اتلاف محصول  $p$  فاسدشده در بیمارستان  $h$  در دوره  $t$

$Wb_{b,t}$ : میزان اتلاف محصول  $p$  فاسدشده در مرکز خون  $m$  در دوره  $t$

$KgM_{m,t}$ : مقدار کل خون جمع‌آوری‌شده در مرکز خون  $m$  در دوره  $t$

$Mgm_{m,g,t}$ : مقدار هر گروه خونی  $g$  در خون جمع‌آوری‌شده در مرکز خون  $m$  در دوره  $t$

$Mpm_{m,p,g,t}$ : مقدار هر محصول  $p$  با گروه خونی  $g$  در مرکز خون  $m$  در دوره  $t$

### متغیرهای باینری پژوهش

$CallB_{i,y,b,t}$ : اگر اهداکنندگان  $i$  در مکان  $y$  به وسیله  $b$  خون بدهند ۱؛ در غیر این صورت صفر.

$PB_{b,y,t}$ : اگر وسیله جمع‌آوری خون در منطقه  $y$  در دوره  $t$  قرار بگیرد ۱؛ در غیر این صورت صفر.

$CallL_{i,l,t}$ : اگر اهداکنندگان  $i$  به مرکز جمع‌آوری  $l$  خون بدهند ۱، در غیر این صورت صفر.

$CallM_{i,m,t}$ : اگر اهداکنندگان  $i$  به مرکز خون  $m$  خون بدهند ۱؛ در غیر این صورت صفر.

$VLM_{l,m,t}$ : اگر وسیله  $b$  خون جمع‌آوری‌شده را به مرکز خون  $m$  تحویل دهد ۱، در غیر این صورت صفر.

$VBM_{b,m,t}$ : اگر مرکز جمع‌آوری خون  $l$  خون جمع‌آوری‌شده را به مرکز خون  $m$  تحویل دهد ۱، در غیر این صورت صفر.

**متغیرهای مثبت**

$\delta_{m,g,t}$ : مقادیر کمتر از یک برای دستیابی به مقادیر عدد صحیح برای میزان گروه خونی g در مرکز خونی m در دوره t

$\mu_{m,g,t}$ : مقادیر کمتر از یک برای دستیابی به مقادیر عدد صحیح میزان محصول p با گروه g در مرکز خونی m در دوره t

**تابع هدف**

$$\begin{aligned} MinZ = & \sum_b \sum_t MMb_{b,t} * Cb_b + \sum_m \sum_t MMm_{m,t} * Cm_m + \sum_l \sum_t MML_{l,t} * Cl_l \\ & + \sum_h \sum_p \sum_g \sum_r \sum_t Iph_{h,p,g,r,t} * Cih_h + \sum_p \sum_g \sum_h \sum_r \sum_t Ipb_{m,p,g,r,t} * Cim_m \\ & + \sum_p \sum_g \sum_h \sum_r \sum_t Sph_{p,g,h,r,t} * Csh_h \\ & + \sum_m \sum_h \sum_p \sum_g \sum_r \sum_t MpgH_{m,h,p,g,r,t} * Cmh_{m,h} + \sum_p \sum_t Wb_{p,t} * Cw + \sum_p \sum_t Wh_{p,t} * Cw \end{aligned} \quad (1)$$

**Subject to:**

$$\sum_y \sum_b CallB_{i,y,b,t} \leq 1 \quad \forall i,t \quad (2)$$

$$CallB_{i,y,b,t} * dy_{i,y} \leq cd \quad \forall i,y,b,t \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_y CallB_{i,y,b,t} * Zi_{i,t} \leq Zb_b \quad \forall b,t \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_y CallB_{i,y,b,t} * Zi_{i,t} = MMb_{b,t} \quad \forall b,t \quad (5)$$

$$\sum_y Pb_{b,y,t} = 1 \quad \forall b,t \quad (6)$$

$$CallB_{i,y,b,t} \leq Pb_{b,y,t} \quad \forall i,y,b,t \quad (7)$$

$$\sum_l CallL_{i,l,t} \leq 1 \quad \forall i,l,t \quad (8)$$

$$CallL_{i,l,t} * Dl_{i,l} \leq cd \quad \forall i,l,t \quad (9)$$

$$CallL_{i,l,t} * Zi_{i,t} \leq Zl_l \quad \forall i,l,t \quad (10)$$

$$\sum_i CallL_{i,l,t} * Zi_{i,t} = Mml_{l,t} \quad \forall l,t \quad (11)$$

$$\sum_m Call_{i,m,t} \leq 1 \quad \forall i,t \quad (12)$$

$$Call_{i,m,t} * Dm_{i,m} \leq cd \quad \forall i,m,t \quad (13)$$

$$\sum_m Call_{i,m,t} * Zi_{i,t} \leq Zm_m \quad \forall m,t \quad (14)$$

$$\sum_m CallM_{i,m,t} * Zi_{i,t} \leq Mmm_{m,t} \quad \forall m,t \quad (15)$$

$$\sum_y \sum_b CallB_{i,y,b,t} + \sum_l CallL_{i,l,t} + \sum_m CallM_{i,m,t} \leq 1 \quad \forall i,t \quad (16)$$

$$\sum_m VBM_{b,m,t} \leq 1 \quad \forall b,t \quad (17)$$

$$VBM_{b,m,t} \leq \sum_i \sum_y CallB_{i,y,b,t} \quad \forall b,m,t \quad (18)$$

$$\sum_m VBM_{b,m,t} * BM \geq \sum_i \sum_y CallB_{i,y,b,t} \quad \forall b,t \quad (19)$$

$$\sum_m Vlm_{l,m,t} \leq 1 \quad \forall l,t \quad (20)$$

$$Vlm_{l,m,t} \leq \sum_i CallL_{i,l,t} \quad \forall l,m,t \quad (21)$$

$$\sum_m Vlm_{l,m,t} * BM \geq \sum_i CallL_{i,l,t} \quad \forall l,t \quad (22)$$

$$\sum_b MmB_{b,t} * Vbm_{b,m,t} + \sum_i Mml_{l,t} * Vlm_{l,m,t} + Mmm_{m,t} \leq Zm_m \quad \forall m,t \quad (23)$$

$$\sum_b MmB_{b,t} * Vbm_{b,m,t} + \sum_i Mml_{l,t} * Vlm_{l,m,t} + Mmm_{m,t} \leq Kgm_{m,t} \quad \forall m,t \quad (24)$$

$$\sum_b mmb_{b,t} + \sum_l mml_{l,t} + \sum_m mmm_{m,t} \leq Max_t \quad \forall t \quad (25)$$

$$Mgm_{m,g,t} + \delta_{m,g,t} = Kgm_{m,t} * Zg_g \quad \forall m,g,t \quad (26)$$

$$Mpm_{m,p,g,t} + \mu_{m,p,g,t} = mgm_{m,g,t-2} * Zp_p \quad \forall m,p,g,t \quad (27)$$

$$\delta_{m,g,t} < 1 \quad \forall m,g,t \quad (28)$$

$$\mu_{m,p,g,t} < 1 \quad \forall m,p,g,t \quad (29)$$

$$Ipb_{m,p,g,r,t} = Ipb_{m,p,g,r-1,t-1} + Mpm_{m,p,g,t} - \sum_h MpgH_{m,h,p,g,r,t} \quad \forall m,p,g, \quad (30)$$

$r = 3, t \geq 3$

$$\sum_{r=3}^{r=h_p} Ipb_{m,p,g,r,t} = \sum_{r=3}^{r=h_p} Ipb_{m,p,g,r-1,t-1} - \sum_h \sum_{r=3}^{r=h_p} MpgH_{m,h,p,g,r,t} \quad \forall m,p,g, \quad (31)$$

$r > 3, t \geq 3$

$$\sum_{r=3}^{r=h_p} Iph_{h,p,g,r,t} = \sum_{r=3}^{r=h_p} Iph_{h,p,g,r-1,t-1} - DemY_{p,g,h,t} \quad \forall h,p,g,t \quad (32)$$

$$+ \sum_{r=3}^{r=h_p} MpgH_{m,h,p,g,r,t} \quad \forall h,p,g,t \quad (33)$$

$$\sum_{r=h_p+1}^{r=h_p} Iph_{h,p,g,r,t} = \sum_{r=h_p+1}^{r=h_p} Iph_{h,p,g,r-1,t-1} - DemO_{p,g,h,t} \quad \forall h,p,g,t \quad (33)$$

$$+ \sum_{r=h_p+1}^{r=h_p} MpgH_{m,h,p,g,r,t} \quad \forall h,p,g,t \quad (34)$$

$$\sum_{r=3}^{r=h_y} Sph_{h,p,g,r,t} = DemY_{p,g,h,t} - \sum_h \sum_{r=3}^{r=h_p} MpgH_{m,h,p,g,r,t} \quad \forall h,p,g,t \quad (34)$$

$$\sum_{r=h_p+1}^{r=h_p} Sph_{h,p,g,r,t} = DemO_{p,g,h,t} - \sum_h \sum_{r=h_p+1}^{r=h_p} MpgH_{m,h,p,g,r,t} \quad \forall h,p,g,t \quad (35)$$

$$Wh_{p,t} = \sum_{r=end} \sum_h \sum_g Iph_{h,p,g,r,t} \quad \forall p,t \quad (36)$$

$$Wb_{p,t} = \sum_{r=end} \sum_m \sum_g Ipb_{m,p,g,r,t} \quad \forall p,t \quad (37)$$

رابطه ۱، تابع هدف پژوهش است که به مجموعه هزینه‌های جمع‌آوری خون، هزینه‌های

نگهداری در بیمارستان‌ها و مراکز خون، هزینه ارسال محصولات خونی به بیمارستان‌ها، هزینه کمبود خون در بیمارستان‌ها و هزینه فساد خون در مراکز خون و بیمارستان‌ها اشاره دارد. محدودیت ۲، به این اشاره دارد که هر گروه اهداکنندگان  $i$  حداکثر تنها در یک مکان  $y$  توسط یک وسیله جمع‌آوری خون  $b$  در دوره زمانی  $t$  پوشش داده می‌شوند. محدودیت ۳، تضمین می‌کند که فاصله گروه اهداکنندگان  $i$  برای تخصیص به وسیله جمع‌آوری خون  $b$  در مکان  $y$  در دوره  $t$  نباید از حداکثر فاصله مجاز بیشتر باشد. محدودیت ۴، تضمین می‌کند میزان خون اهداشده به وسیله جمع‌آوری خون  $b$  باید کمتر از حداکثر ظرفیت وسیله باشد. محدودیت ۵، میزان خون جمع‌آوری شده توسط وسیله جمع‌آوری خون  $b$  در دوره  $t$  را مشخص می‌کند. محدودیت‌های ۶ و ۷، مشخص می‌کنند که هر وسیله جمع‌آوری خون  $b$  در کدام یک از مناطق  $y$  در دوره  $t$  مستقر است. محدودیت ۸، به این اشاره می‌کند که خون هر گروه از اهداکنندگان  $i$  حداکثر تنها در یک مرکز جمع‌آوری ثابت خون  $l$  در دوره  $t$  می‌تواند جمع‌آوری شود. محدودیت ۹، نشان می‌دهد فاصله اهداکنندگان  $i$  برای تخصیص به مرکز جمع‌آوری ثابت  $l$  دوره  $t$  باید کمتر از حداکثر فاصله مجاز باشد. طبق محدودیت ۱۰، خون جمع‌آوری شده توسط مرکز جمع‌آوری ثابت  $l$  باید از حداکثر ظرفیت جمع‌آوری کمتر باشد. محدودیت ۱۱، میزان خون جمع‌آوری شده توسط مراکز جمع‌آوری ثابت  $l$  در دوره  $t$  را مشخص می‌کند. محدودیت ۱۲، به این اشاره می‌کند که هر گروه اهداکنندگان  $i$  حداکثر می‌تواند به یک مرکز خون  $m$  در هر دوره زمانی تخصیص یابد. محدودیت ۱۳، نشان می‌دهد که فاصله اهداکنندگان  $i$  برای تخصیص به مراکز خون  $m$  باید از حداکثر فاصله مجاز کمتر باشد. محدودیت ۱۴، تضمین می‌کند که میزان خون جمع‌آوری شده توسط مراکز خون  $m$  از حداکثر ظرفیت خون‌گیری مراکز خون باید کمتر باشد. محدودیت ۱۵، میزان خون جمع‌آوری شده در مرکز خون  $m$  در دوره  $t$  را مشخص می‌کند. محدودیت ۱۶، مشخص می‌کند که هر گروه از اهداکنندگان  $i$  تنها فقط می‌تواند به یکی از وسیله جمع‌آوری  $b$  یا مرکز جمع‌آوری  $l$  یا مرکز خون  $m$  خون اهدا کند. محدودیت‌های اتصال ۱۷، ۱۸ و ۱۹، به انتقال خون از هر وسیله جمع‌آوری  $b$  به مراکز خون  $m$  اشاره دارند. محدودیت‌های اتصال ۲۰، ۲۱ و ۲۲ مربوط به انتقال خون از مرکز جمع‌آوری  $l$  به مرکز خون  $m$  هستند. طبق محدودیت ۲۳، میزان کل خون تجمیع شده در مراکز خون  $m$  باید همواره کوچک‌تر مساوی ظرفیت آن مراکز خون باشد. محدودیت ۲۴، به کل خون جمع‌آوری شده در مراکز خون اشاره دارد. محدودیت ۲۵، به حداکثر خون ممکن قابل جمع‌آوری در هر دوره زمانی اشاره دارد. محدودیت‌های ۲۶ و ۲۷، مشخص‌کننده سهم گروه‌های خونی در هر خون و نیز تفکیک خون به محصولات دیگر خونی هستند (شایان ذکر است که زمان تفکیک محصولات و نیز دوره آزمایش‌ها برابر دو روز است؛ پس در واقع محصول فرآوری شده در مرکز خون از خون دو روز قبل است). محدودیت‌های ۲۸ و ۲۹، به ضایعات حاصل از ضرب تبدیل گروه خونی و محصولات اشاره دارند. محدودیت‌های ۳۰

و ۳۱، میزان موجودی آخر دوره مراکز خون محصولات p با گروه g با سن r در دوره t را محاسبه می‌کنند. محدودیت‌های ۳۲ و ۳۳، میزان موجودی آخر دوره بیمارستان h با محصولات p از گروه g با سن r در دوره t را محاسبه می‌کنند. محدودیت‌های ۳۴ و ۳۵، میزان کمبود هر محصول p از گروه g را در بیمارستان h در دوره t محاسبه می‌کنند. محدودیت ۳۶، میزان اتلاف محصول خونی p در دوره t که در بیمارستان‌ها فاسد می‌شود را محاسبه می‌کند. محدودیت ۳۷، میزان اتلاف خونی محصول p در دوره t که در مراکز خون فاسد می‌شود را محاسبه می‌کند.

**برآورد میزان عرضه و تقاضا با استفاده از بهینه‌سازی استوار.** بیشتر مسئله‌های بهینه‌سازی و برنامه‌نویسی ریاضی با مشکل عدم قطعیت در داده‌ها در دنیای واقعی روبه‌رو هستند [۵]. برخی از داده‌ها در حین حل مسئله وجود ندارد یا برخی از داده‌ها دقیقاً اندازه‌گیری نمی‌شوند یا مشخص کردن توزیع ریاضی آن‌ها نامعلوم است [۱۰]. در این صورت روش‌های گوناگونی برای حل مشکل قطعیت این داده‌ها استفاده می‌شود که در این پژوهش از بهینه‌سازی استوار به منظور حل مشکل عدم قطعیت پارامترها استفاده می‌شود. به منظور مواجهه با عدم قطعیت در عرضه و تقاضای خون در مدل، روش بهینه‌سازی استوار در این بخش ارائه شده است. رویکرد بهینه‌سازی استوارسازی برای این پژوهش مبتنی بر استوارسازی برتسیماس و سیم (۲۰۰۲)، انتخاب شده است [۴]؛ بنابراین مدل ریاضی زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\text{Min } c_j x_j \quad \text{s.t.} : \sum_j a_{ij} x_j \leq b_i \quad \forall i = 1, \dots, G \quad x_j \in \{0, 1\} \quad (38)$$

از آنجا که  $a_{ij}$  به عنوان پارامتر دارای عدم اطمینان شناسایی می‌شود، مقادیر آن در بازه  $[\hat{a}_{ij} - \bar{a}_{ij}, \bar{a}_{ij} + \hat{a}_{ij}]$  قرار می‌گیرد که ارزش اسمی پارامتر  $a_{ij}$  بوده و  $\bar{a}_{ij}$  نشان‌دهنده انحراف از مقادیر اسمی پارامتر است. با استفاده از قضیه دوگان، مسئله بالا به مسئله استوار زیر تبدیل شده است:

$$\text{Min } c_j x_j \quad \text{s.t.} : \sum_{j \in J} \bar{a}_{ij} x_j + Z_i \Gamma_i + \sum_{j \in J} p_{ij} \leq b_i \quad \forall i \quad Z_i + p_{ij} \geq \hat{a}_{ij} x_j, \forall j \quad Z_i \geq 0, \forall i \quad p_{ij} \geq 0, \forall i, j \quad x_j \in \{0, 1\} \quad (39)$$

در رابطه بالا  $\Gamma_i$  پارامتری به منظور تنظیم سطح عدم اطمینان در فاصله  $[0, \Gamma_i]$  است که به آن «سطح حفاظت» گفته می‌شود.  $Z_i$  و  $p_{ij}$  نیز متغیر کمکی هستند.

**فرمول‌بندی عدم اطمینان عرضه و تقاضا.** پارامتر دارای عدم قطعیت در عرضه  $Max_i$  است که حداکثر خون جمع‌آوری شده را توسط جمع‌آوری‌کننده‌ها در دوره t نمایش می‌دهد و به صورت  $[\overline{Max}_i - \underline{Max}_i, \overline{Max}_i + \underline{Max}_i]$  است و  $\Gamma^M$  به عنوان پارامتر سطح حفاظت و  $p'_i$  و  $Z'_i$  به عنوان

متغیرهای کمکی بزرگ‌تر از صفر مرتبط با تأمین خون هستند.

$$\sum_b mmb_{b,t} + \sum_i mml_{i,t} + \sum_m mmm_{m,t} + Z'_i \Gamma^M + P' \leq \overline{Max}_i, \quad \forall t \quad (40)$$

$$P'_i + Z'_i \geq \overline{Max}_i \quad \forall t \quad (41)$$

برای تقاضا محصولات خونی جوان و محصولات خونی، مقادیر پارامتر  $demy_{p,g,h,t}$  و  $demo_{p,g,h,t}$  در بازه  $\left[ \overline{demy}_{p,g,h,t} - \overline{demy}_{p,g,h,t}, \overline{demy}_{p,g,h,t} + \overline{demy}_{p,g,h,t} \right]$  برای تقاضای محصولات جوان و برای تقاضای معمولی نیز،  $\Gamma^o$  پارامتر  $\Gamma^y$  پارامتر سطح حفاظت  $P''_{p,g,h,t}$  و  $P'''_{p,g,h,t}$  به‌عنوان پارامترهای کمکی تقاضا خون معرفی می‌شوند. با اضافه کردن این عبارات به مدل پژوهش، مدل بهینه‌سازی استوار مسئله به‌دست خواهد آمد.

$$\sum_{r=3}^{r=\gamma_p} iph_{h,p,g,r,t} = \sum_{r=3}^{r=\gamma_p} iph_{h,p,g,r-1,t-1} \quad \forall p, g, h, t \quad (42)$$

$$-\left( \overline{demy}_{p,g,h,t} + Z''_{p,g,h,t} \Gamma^y + P''_{p,g,h,t} \right) + \sum_{r=3}^{r=\gamma_p} mpgh_{m,h,p,g,r,t} \quad \forall p, g, h, t \quad (43)$$

$$\sum_{r=\gamma_p+1}^{r=l_p} iph_{h,p,g,r,t} = \sum_{r=\gamma_p+1}^{r=l_p} iph_{h,p,g,r-1,t-1} - \left( \overline{demo}_{p,g,h,t} + Z'''_{p,g,h,t} \Gamma^o + P'''_{p,g,h,t} \right) + \sum_{r=\gamma_p+1}^{r=l_p} mpgh_{m,h,p,g,r,t} \quad \forall p, g, h, t \quad (44)$$

$$\sum_{r=3}^{r=\gamma_p} sph_{h,p,g,r,t} = \overline{demy}_{p,g,h,t} + Z''_{p,g,h,t} \Gamma^y + P''_{p,g,h,t} - \sum_{r=3}^{r=\gamma_p} mpgh_{m,h,p,g,r,t} \quad \forall p, g, h, t \quad (45)$$

$$\sum_{r=\gamma_p+1}^{r=\gamma_p} sph_{h,p,g,r,t} = \overline{demo}_{p,g,h,t} + Z'''_{p,g,h,t} \Gamma^o + P'''_{p,g,h,t} - \sum_{r=\gamma_p+1}^{r=l_p} mpgh_{m,h,p,g,r,t} \quad \forall p, g, h, t \quad (46)$$

$$P''_{p,g,h,t} + Z''_{p,g,h,t} \geq \overline{demy}_{p,g,h,t} \quad \forall p, g, h, t \quad (47)$$

$$P'''_{p,g,h,t} + Z'''_{p,g,h,t} \geq \overline{demo}_{p,g,h,t} \quad \forall p, g, h, t \quad (48)$$

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

**اعتبارسنجی و حل مدل پژوهش.** اعتبارسنجی مدل مشخص می‌کند که آیا مدل (ریاضی) تصویری درست از مدل و محدودیت‌های تعیین‌شده آن را نمایش می‌دهد یا خیر؟ تصدیق مدل مشخص می‌کند که آیا مدل و فرآیندهای آن از منظر کاربردی مدل دارای دامنه‌ای از درستی و سازگار است؛ بنابراین به‌منظور اعتبارسنجی مدل، نیاز به حل پژوهش از اندازه کوچک تا بزرگ است تا واکنش تابع هدف پژوهش نسبت به تغییرات پارامترهای مسئله مشخص شود. بدین منظور ابتدا مدل پژوهش در نرم‌افزار گمز ۲۴/۱ کد شده است. تفاوت در مسائل حل‌شده در جدول ۲، مشاهده می‌شود. سایر پارامترهای مهم مسئله نیز در جدول ۳، ارائه شده است.

جدول ۲. مثال‌های طراحی‌شده برای حل مسئله

مثال‌ها	I	b	Y	l	m	h	t	p
مثال ۱	۲	۱	۲	۱	۲	۲	۸	۱
مثال ۲	۲	۱	۲	۱	۲	۳	۸	۱
مثال ۳	۳	۲	۲	۱	۲	۳	۸	۱
مثال ۴	۳	۲	۲	۲	۲	۴	۸	۱
مثال ۵	۴	۲	۲	۲	۲	۴	۲۶	۲
مثال ۶	۴	۲	۲	۲	۲	۴	۲۶	۲
مثال ۷	۵	۲	۲	۲	۲	۴	۲۷	۲
مثال ۸	۶	۳	۳	۲	۳	۵	۲۷	۲
مثال ۹	۶	۳	۳	۳	۳	۷	۲۸	۳
مثال ۱۰	۷	۳	۳	۳	۴	۱۰	۲۸	۳
مثال ۱۱	۸	۴	۴	۳	۴	۱۲	۳۰	۳
مثال ۱۲	۱۰	۶	۶	۳	۶	۱۶	۳۰	۳

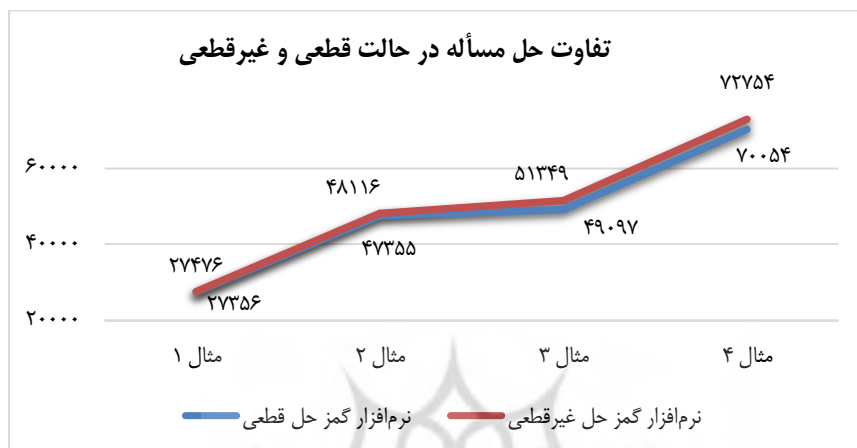
جدول ۳. پارامترهای حل مثال عددی

پارامترها	مقادیر	پارامترها	مقادیر	پارامترها	مقادیر
$rI_p$	{p1: 25, p2: 7}	$Cim_m$	UI(10,12)	$DemY_{p,g,h,t}$	UI(1,3)
$ry_p$	{p1: 5, p2: 3}	$Csh_h$	100	$DemO_{p,g,h,t}$	UI(1,5)
$Zp_p$	{p1: 0.6, p2: 0.4}	$Dl_{i,l}$	UI(1,5)	$Cb_b$	UI(5,10)
$Zl_i$	UI(1000,3000)	$Dm_{i,m}$	UI(1,5)	$Cm_m$	UI(3,5)
$Zi_{i,t}$	UI(70,90)	$Dy_{i,y}$	UI(1,5)	$Cl_i$	UI(3,6)
$Zb_b$	UI(1000,5000)	$CW, Cd$	50,5	$Cmh_{m,h}$	UI(10,12)
$Zm_m$	UI(3000,10000)	$Max_t$	580	$Cih_h$	UI(10,12)
$Zg_g$	[O+ 0. 34, O- 0. 04, A+ 0. 27, A- 0. 03, B+ 0. 22, B- 0. 02, AB+ 0. 07, AB- 0. 01]				

جدول ۴. حل مثال عددی در حالت قطعی و غیرقطعی



نرم‌افزار گمز حل غیرقطعی		نرم‌افزار گمز حل قطعی		مثال‌ها
زمان حل مسئله	تابع هدف	زمان حل مسئله	تابع هدف	
۸	۲۷۴۷۶	۸	۲۷۳۵۶	مثال ۱
۹	۴۸۱۱۶	۹	۴۷۳۵۵	مثال ۲
۱۰	۵۱۳۴۹	۹	۴۹۰۹۷	مثال ۳
۱۲	۷۲۷۵۴	۱۱	۷۰۰۵۴	مثال ۴
-	-	-	-	مثال ۵ تا ۱۲



شکل ۱. تفاوت حل مسئله در حالت قطعی و غیرقطعی با نرم‌افزار گمز

بدیهی است با افزایش اندازه مسئله رسیدن به جواب مسئله سخت‌تر می‌شود و از آنجاکه نوع مسئله از نوع NP-HARD است، زمان حل مسئله به صورت نمایی به واسطه افزایش اندازه مسئله در حال افزایش است و رسیدن به جواب قطعی در زمان معمول امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین در اندازه‌های بزرگ‌تر مسئله به منظور دستیابی به جواب تقریبی نزدیک به دقیق نیاز به الگوریتم‌های فراابتکاری برای رسیدن به جواب در زمان معقول‌تر است؛ از این رو در ادامه مسئله ابتدا در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۹ کد شده و با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مسئله حل می‌شود.

**الگوریتم فراابتکاری وال.** این الگوریتم از رفتار اجتماعی وال‌های گوژپشت<sup>۱</sup> الهام گرفته است. طعمه‌های موردعلاقه آن‌ها گله ماهی کریل و کوچک هستند. جالب‌ترین چیز در مورد نهنگ گوژپشت نحوه شکار خاص او است. روش تغذیه با ایجاد حباب‌های متمایز دایره‌ای انجام می‌شود. نهنگ‌ها به سمت پایین طعمه شیرجه می‌روند و با ایجاد حباب‌هایی به شکل ماریچی

1. Megaptera novaeangliae

در اطراف طعمه به سمت سطح شنا می‌کنند. دانشمندان دو مانور مرتبط با شبکه‌های حبابی را مشخص کرده و آن‌ها را مارپیچ به سمت بالا<sup>۱</sup> و حلقه‌های دوتایی<sup>۲</sup> نامیدند. این روش تغذیه روش خاصی است که تنها در نهنگ‌ها دیده شده است. در الگوریتم وال مانور مارپیچ شبکه حبابی به صورت ریاضی برای انجام بهینه‌سازی مدل شده است [۱۷، ۲۴].

وال‌ها می‌توانند مکان شکار را شناسایی کرده و آن‌ها را محاصره کنند. از آنجاکه مکان طراحی بهینه در فضای جست‌وجو از راه مقایسه شناخته نمی‌شود، الگوریتم فرض می‌کند که بهترین راه‌حل حال حاضر، شکار هدف بوده و یا نزدیک به حالت مطلوب است. بعد از اینکه بهترین عامل جست‌وجو شناسایی شد، عوامل دیگر جست‌وجو سعی می‌کنند تا مکان خود را نسبت به بهترین عامل جست‌وجو به‌روزرسانی کنند. این رفتار از طریق روابط ۴۸ و ۴۹، انجام می‌پذیرد.

$$\bar{D} = |\bar{C} \cdot \bar{X}^*(t) - \bar{X}(t)| \quad (48)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (49)$$

در رابطه بالا  $t$  تکرار فعلی،  $\bar{A}$  و  $\bar{C}$  بردار ضرایب،  $\bar{X}^*$  بردار مکان بهترین جواب،  $\bar{X}$  بردار مکان،  $||$  علامت قدر مطلق و علامت نقطه ضرب نقطه‌ای عنصر در عنصر است. که اگر در هر تکرار جواب بهتری وجود داشت  $\bar{X}^*$  به‌روزرسانی می‌شود. بردارهای  $\bar{A}$  و  $\bar{C}$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\bar{A} = 2\bar{a} \cdot \bar{r} - \bar{a} \quad (50)$$

$$\bar{C} = 2 \cdot \bar{r}$$

در رابطه بالا  $\bar{a}$  در هر تکرار به صورت خطی از ۲ به صفر طی تکرارها کاهش می‌یابد و  $\bar{I}$  یک بردار تصادفی بین [۰ و ۱] است. در روش حمله وال طعمه در امتداد یک دایره انقباضی و هم‌زمان در مسیر مارپیچی شکل شنا می‌کند. برای مدل‌سازی این رفتار فرض احتمال ۵۰ درصدی بین این دو مکانیسم انتخاب می‌شود تا موقعیت وال‌ها طی بهینه‌سازی به‌روزرسانی شود. مدل ریاضی به صورت زیر است:

$$\bar{X}(t+1) = \begin{cases} \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} & p < 0.5 \\ \bar{D} e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \bar{X}^*(t) & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (51)$$

1 upward spirals  
2 double loops

در رابطه بالا  $p$  یک عدد تصادفی بین  $0$  و  $1$  است،  $b$  ثابتی برای تعریف شکل ماریپج لگاریتمی  $I$  عددی تصادفی بین  $-1$  و  $+1$  و علامت نقطه، ضرب نقطه‌ای است بردار  $\vec{A}$  با مقادیر تصادفی بین  $-1$  و  $+1$  به کار گرفته می‌شود تا عامل جست‌وجو به وال مرجع نزدیک شود.

**اجرای الگوریتم وال.** ابتدا در مرحله نخست به مقداردهی پارامترها بر اساس تنظیم پارامتر صورت گرفته پرداخته می‌شود. در گام بعدی جمعیت اولیه تصادفی ایجاد و ارزیابی آن‌ها صورت می‌گیرد. در واقع  $n$  وال ایجاد شده و برای آن یک ساختار ایجاد می‌شود. در ساختار ایجاد شده هر وال باید دو ویژگی داشته باشد: نخست، موقعیت وال و دوم، مقدار میزان تطابق با شایستگی هر وال. برای مثال، در حالتی که دو متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود، وال دارای دو بُعد است و هر بُعد آن یک حد بالا و یک حد پایین دارد؛ بنابراین تولید موقعیت وال به صورت تصادفی بین حد بالا و پایین آن متغیر خواهد بود؛ سپس میزان شایستگی آن بر اساس تابع هزینه بررسی می‌شود. الگوریتم باید مقدار بهترین جواب عمومی، یعنی Leader، را پیدا کند. بهترین جواب آن جوابی است که میزان شایستگی آن کمتر باشد (زیرا تابع هدف از نوع حداقل‌سازی است). حال نوبت حلقه اصلی الگوریتم است که باید به صورت تکراری انجام گیرد تا شرط توقف ایجاد شود. در حلقه اصلی الگوریتم، همه عامل‌های جست‌وجو نامبرده شده در بخش قبل به روزرسانی می‌شوند. در مرحله اکتشاف اگر  $\vec{A}$  مقدار بزرگ‌تر از  $1$  و کوچک‌تر از  $-1$  داشته باشد، به روزرسانی عامل جست‌وجو به سمت یک عامل تصادفی دیگر می‌رود. بعد از اتمام حلقه اصلی الگوریتم، باید بررسی شود موقعیت جدید بین حد بالا و حد پایین که برای هر متغیر تصمیم در نظر گرفته شده بود، آیا صدق می‌کند یا خیر؟ اگر مقدار از حد بالای مجاز بیشتر شد، مساوی حد بالا قرار داده می‌شود و اگر مقدار آن از حد پایین مجاز کمتر شد، مساوی حد پایین مجاز قرار خواهد گرفت. حال مقدار شایستگی وال به روز شده محاسبه می‌شود. اگر میزان شایستگی وال به روزه از مقدار شایستگی Leader بهتر باشد، جایگزین Leader شده و بهترین جواب این مرحله ذخیره می‌شود. در هر بار اجرای الگوریتم بهترین جواب پیداشده نمایش داده می‌شود. این فرایند تا زمان حصول شرط توقف (حداکثر تکرار) ادامه می‌یابد.

```

Initialize the whale's population.
Calculate the fitness of each search agents by considering
the proposed RK. Set the Pareto optimal solutions.
X*=the best search agents.
while (t< maximum number of iteration)
  for each search agent
    Update A, a, C, I, and p;
    if1 (p<0.5)
      if2(|A|<1)
        Update the position of current search agent by Encircle prey
        (exploitation phase) elseif2 (|A|> 1)
          Select a random search agent;
          Update the position of current search agent by search for prey
          (exploration phase).
        endif2
      elseif1 (p>0.5)
        Update the position of current search agents by spiral
        updating position.
      endif1
    endfor
  Check if any search agents goes beyond the search space and amend it.
  Update the X* if there is better solution.
  t=t+1;
endwhile
return X*

```

شکل ۲. شبه کد الگوریتم وال

الگوریتم رقابت استعماری. الگوریتم رقابت استعماری<sup>۱</sup> نوعی الگوریتم تکاملی است که از پدیده اجتماعی به نام «استعمار» الهام گرفته شده است. همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آن‌ها یک «کشور» نامیده می‌شوند؛ شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت به‌عنوان استعمارگر انتخاب می‌شوند. باقی‌مانده جمعیت نیز به‌عنوان مستعمره در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران بسته به قدرتشان این مستعمرات را با یک روند خاص به سمت خود می‌کشند. قدرت کل هر امپراتوری به هر دو بخش تشکیل‌دهنده آن، یعنی کشور استعمارگر (به‌عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن، بستگی دارد. در حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت امپراتوری به‌صورت مجموع قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن، مدل شده است. با شکل‌گیری امپراتوری‌های اولیه، رقابت استعماری میان آن‌ها شروع می‌شود. هر امپراتوری که نتواند در رقابت استعماری موفق عمل کند و بر قدرت خود بیفزاید (یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری

کند)، از صحنه رقابت استعماری حذف خواهد شد؛ بنابراین بقای یک امپراتوری به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراتوری‌های رقیب و به سیطره درآوردن آن‌ها وابسته خواهد بود. در نتیجه در جریان رقابت‌های استعماری به تدریج بر قدرت امپراتوری‌های بزرگ‌تر افزوده شده و امپراتوری‌های ضعیف‌تر حذف می‌شوند. امپراتوری‌ها برای افزایش قدرت خود مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند [۲]. به طور خلاصه در این الگوریتم به استعمار به عنوان بخش تفکیک‌ناپذیر از سیر تکامل تاریخی بشر نگریسته شده و از چگونگی اثرگذاری آن بر کشورهای استعمارگر و مستعمره و نیز کل تاریخ، به عنوان منبع الهام یک الگوریتم کارا در زمینه محاسبات تکاملی استفاده شده است.

**اجرای الگوریتم رقابت استعماری.** کشورها در الگوریتم رقابت استعماری توسط ویژگی‌های سیاسی - اجتماعی آن‌ها معرفی می‌شوند و متغیرهای تابع هدف به عنوان این ویژگی‌ها در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه تابع هدف  $Z = F(x)$  این مسئله از نوع حداقل‌سازی بوده که  $X$  یک متغیر  $N$  بُعدی است. هر متغیر  $x_1$  تا  $x_n$  به عنوان ویژگی و  $Z$  به عنوان هزینه آن کشورها در نظر گرفته می‌شود. هر چه هزینه یک کشور کمتر باشد، آن کشور قوی‌تر خواهد بود. در ابتدا تعدادی از این کشورها به صورت تصادفی در محدوده کران قابل قبول برای تابع هدف، تولید می‌شوند. آنگاه تعدادی از کشورهای قوی‌تر به عنوان استعمارگر و بقیه به عنوان مستعمره در نظر گرفته می‌شود. تقسیم‌بندی کشورهای مستعمره بین استعمارگران با توجه به قدرت کشورهای استعمارگر صورت می‌گیرد و تعداد کشورهای مستعمره هر امپریالیست از مراحل زیر به دست می‌آید. ابتدا هزینه و قدرت نرمالیزه شده هر امپریالیست به صورت روابط ۵۲ و ۵۳، محاسبه می‌شود.

$$C_n = \max \{c_i\} - c_n \quad (52)$$

$$P_n = \left| C_n / \sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i \right| \quad (53)$$

در این معادلات  $C_n$  هزینه امپریالیست  $n$ ام و  $\max \{c_i\}$  بیشترین هزینه میان استعمارگرها و  $C_n$  هزینه نرمالیزه شده آن استعمارگر و  $P_n$  قدرت نرمالیزه ۱۰ امپریالیست  $n$ ام است؛ سپس با توجه به رابطه ۵۴، تعداد اولیه کشورهای مستعمره هر استعمارگر به دست می‌آید:

$$N_{c_n} = \text{round} \{P_n * N_{col}\} \quad (54)$$

در رابطه ۵۴،  $N_{c_n}$  تعداد اولیه کشورهای مستعمره امپریالیست  $n$ ام و  $N_{col}$  تعداد کل کشورهای مستعمره Round تابعی برای گرد کردن عدد اعشاری به نزدیک‌ترین عدد صحیح

است. به تعداد  $N_{c_n}$  از کشورهای مستعمره اولیه به صورت تصادفی انتخاب شده و به استعمارگر  $n$  اختصاص می‌یابد. قدرت یک امپراتوری برابر با قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن است. بدین ترتیب هزینه کل یک امپراتوری به صورت رابطه ۵۵، به دست می‌آید.

$$T.C_n = \text{Cost}(imp_n) + \zeta \text{mean}\{\text{Cost}(\text{colonies of empire}_n)\} \quad (55)$$

با داشتن حالت اولیه تمام امپراتوری‌ها، الگوریتم رقابت استعماری شروع می‌شود. روند تکامل در یک حلقه قرار دارد که تا برآورده شدن شرایط خاتمه به همین صورت ادامه می‌یابد؛ بنابراین استعمارگران به جذب مستعمرات خود می‌پردازند؛ به این صورت که مستعمره‌ای که در فاصله  $d$  از استعمارگر خود قرار دارد با توجه به رابطه ۵۶، به سمت استعمارگر خود کشیده می‌شود.

$$\text{new position of colony} = \text{old position of colony} + x \quad (56)$$

که در آن  $x$  از رابطه ۵۷، به دست می‌آید.

$$x = \frac{\beta \times \text{Assimilation Coefficient} \times \text{random number}}{\cos(\theta)} \times d \quad (57)$$

در رابطه ۵۷،  $\beta$  عددی بزرگ‌تر از یک و تقریباً برابر ۲ است و ضریب جذب نیز برابر ۲ در نظر گرفته شده است.  $\theta$  نیز  $\frac{\pi}{4}$  در نظر گرفته می‌شود. در تعدادی از مستعمرات، انقلاب رخ خواهد داد. برای انجام این عمل تعدادی از کشورهای مستعمره با توجه به نرخ انقلاب در نظر گرفته شده انتخاب شده و به صورت تصادفی در فضای جست‌وجو پخش می‌شوند. جای استعمارگر و مستعمره عوض می‌شود. جابه‌جایی بدین صورت است که اگر قدرتش (مقدار تابع هدف برای یک مستعمره کمتر از استعمارگرش بود) موقعیت و مقادیر تابع هدف آن‌ها با هم عوض می‌شود. این فرآیند بدین صورت انجام می‌گیرد که استعمارگر قوی‌تر می‌تواند استعمارگر ضعیف‌تر یا مستعمره آن را که در نزدیکی خود است به استعمار درآورد. فاصله‌ای که چنین اتفاقی می‌تواند رخ دهد را درصدی از فضای جست‌وجو در نظر می‌گیرند که از رابطه ۵۸، محاسبه می‌شود که در آن  $\text{norm}(\text{search space size})$  فاصله بین حداکثر و حداقل متغیرها و  $UT$  درصدی از محدودی فضای جست‌وجو که دو استعمارگر می‌توانند در آن هم‌زمان حضور داشته باشند و  $TD$  فاصله دو استعمارگر در فضای جواب ممکن است [۱۳].

$$TD = UT \times \text{norm}(\text{search Space Size}) \quad (58)$$

در صورتی که شرایط خاتمه در نظر گرفته شده برای الگوریتم برآورده نشده باشد، این شرایط به مرحله نخست برمی‌گردد.

```

Initialize parameters;
Generate the population randomly;
Initialize the empire:
  For i = 1 to Npop, (Npop= population size)
    Compute the evaluation cost ci;
    Sort the computed cost ci in descending order for the entire
    population; Select Nimp (number of imperialist countries)
    out of Npop;
    Normalize the cost of each imperialist Cn;
    Compute the normalized power of each
    imperialist Pn; Assign Ncol remained
    countries to the imperialists; End Loop
Assimilation, Revolution, Imperialist Competition
Processes; For j = 1 to Nimp
  Move the colony toward the relevant imperialist
  (assimilation); Compute the costs of assimilated
  countries;
  Perform revolution on new colony;
  If the cost of new colony is less than cost of imperialist
    Then exchange the position of colony and imperialist;
  Pick the weakest colony (colonies) from the weakest empire and assign it
  (them) to the empire that has most likelihood to possess it;
End Loop
Elimination Process;
  If there is imperialist with no colonies
    Then eliminate the imperialist;
Until stopping condition is reached.

```

شکل ۳. شبه کد الگوریتم رقابت استعماری

**تنظیم پارامتر.** در این بخش رفتار الگوریتم WOA و ICA با پارامترها و عملگرهای مختلف ارزیابی می‌شود. برای کالیبره کردن الگوریتم‌های فراابتکاری، روش تاگوچی کاراثر است؛ زیرا می‌تواند تعداد زیادی تصمیم را با کمترین تعداد آزمایش به دست آورد. در روش تاگوچی از بردارهای متعامد برای بررسی تعداد زیادی متغیر تصمیم با تعداد کمی آزمایش استفاده می‌شود؛ بنابراین به منظور طرح آزمایش، پارامتر آزمایش در سه سطح انتخاب شده است. با توجه به جدول آرایه‌های متعامد استاندارد تاگوچی آرایه L9 برای الگوریتم وال و L18 برای رقابت استعماری به عنوان طرح مناسب آزمایش پیشنهاد شده است. در روش تاگوچی تنظیم پارامترهای بهینه از آماره عملکردی نسبت S به N (سیگنال به نویز) است که سیگنال مقدار مطلوب متوسط

متغیر پاسخ است و نویز به مقدار نامطلوب (انحراف معیار) اشاره دارد؛ بنابراین نرخ S/N چون از نوع هر چه کمتر بهتر است، به صورت رابطه ۵۹، محاسبه می‌شود [۶].

$$S / N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (59)$$

الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهاد شده برای هر آزمایش تاگوجی اجرا می‌شوند؛ سپس نسبت‌های S/N به وسیله نرم‌افزار «مینی تب ۱۶» محاسبه می‌شوند. مقدارهای بهینه پارامترهای هر الگوریتم در جدول ۵، نشان داده شده است.

جدول ۵. تنظیم پارامتر، پارامترهای الگوریتم وال و رقابت استعماری

الگوریتم	پارامترها	سطح یک	سطح دو	سطح سوم	انتخاب مقدار بهینه
WOA	تعداد تکرار	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰
	اندازه جمعیت	۴۰	۴۵	۵۰	۵۰
	ضریب شکل ماریچ (b)	۰/۵	۱	۱/۵	۱
ICA	تعداد تکرار	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰
	اندازه جمعیت	۴۰	۴۵	۵۰	۵۰
	تعداد امپریالیست	۵	۱۰	۱۵	۵
	ضریب هزینه میانگین کلنی‌ها	۰/۰۱	۰/۱	۰/۱۵	۰/۱
	شدت وقوع انقلاب $\mu$	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۵

ساختار بردار جواب و نحوه اعمال محدودیت‌ها. به منظور تشکیل جمعیت اولیه، بردار جواب اولیه مسئله به صورت تصادفی بین صفر و یک در ۸ بخش (به صورت شکل ۴) و به صورت تصادفی پیوسته تولید می‌شود.

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
۴۸	۱۶	۱۶	۳۲	۱۶	۱۶	۱۶	۳۲

شکل ۴. ساختار یک نمونه بردار جواب برای مسئله یک

بخش اول بردار جواب مشخص می‌کند که دسته اهداکنندگان  $i$  به کدام یک از سه مکان‌های جمع‌آوری خون تخصیص داده شوند؛ یعنی به تعداد  $n_i$  در  $n_t$  در ۳ درایه عدد تصادفی پیوسته بین صفر و یک ایجاد می‌شود (برای مثال، مقدار ۴۸ درایه اول از حاصل ضرب  $t=8$  ضرب در  $i=2$  در ۳ به دست می‌آید و نشان‌دهنده ۴۸ عدد تصادفی بین صفر و یک است). بخش دوم



بردار جواب مربوط به این است که الگوریتم مشخص کند در صورت انتخاب وسیله نقلیه جمع‌آوری  $b$  برای دریافت خون به کدام یک از  $b$ ها خون تخصیص داده شود. تعداد درایه‌های این بخش از کروموزوم از حاصل ضرب  $n_i$  در  $nb$  در  $nt$  به دست خواهد آمد. بخش سوم بردار جواب مربوط به این است که در صورت دریافت خون در  $l$ ها به کدام  $l$  خون تخصیص داده شود. تعداد درایه‌های این بخش بردار جواب از حاصل ضرب  $n_i$  در  $nl$  در  $nt$  به دست خواهد آمد. بخش چهارم بردار جواب مربوط به این است که در صورت انتخاب مرکز خون  $m$  به کدام مرکز خون، خون تخصیص داده شود. تعداد درایه‌های این بخش بردار جواب از حاصل ضرب  $n_i$  در  $nm$  در  $nt$  به دست خواهد آمد. بخش پنجم نشان می‌دهد در صورتی که وسیله‌های نقلیه  $b$  خون را جمع‌آوری کردند، هر کدام از  $b$ ها در کدام مکان  $y$ ها قرار گیرند. تعداد درایه‌های این بخش پاسخ بر اساس حاصل ضرب  $nb$  در  $ny$  در  $nt$  به دست خواهد آمد. بخش ششم بردار جواب نشان‌دهنده آن است که هر کدام از وسیله‌های نقلیه  $b$  در صورت دریافت خون، آن را به کدام یک از مراکز خون  $m$  تحویل دهد. تعداد درایه‌های این بخش بر اساس حاصل ضرب  $nb$  در  $nm$  در  $nt$  به دست خواهد آمد. بخش هفتم بردار جواب مشخص می‌کند که کدام یک از مراکز جمع‌آوری ثابت خون  $l$ ، خون را به کدام یک از مراکز خون  $m$  تحویل دهد. تعداد درایه‌های این بخش از بردار جواب بر اساس حاصل ضرب  $nl$  در  $nm$  در  $nt$  به دست خواهد آمد. بخش هشتم جواب نشان‌دهنده این است که خون مراکز  $m$  به کدام یک از  $h$ ها تخصیص داده شود. تعداد درایه‌های این بخش بر اساس حاصل ضرب  $nm$  در  $nh$  در  $nt$  محاسبه می‌شود.

اعمال محدودیت اختصاص هر  $i$  به یکی از اجزا جمع‌آوری در بخش اول بردار جواب دیده شده است. محدودیت اختصاص دسته اهداکنندگان به هر یک از اجزا جمع‌آوری بر اساس محدودیت مربوط به کمترین فاصله در نظر گرفته شده است. در صورتی که ظرفیت آن تسهیل جمع‌آوری نیز تکمیل باشد، جمع‌آوری خون توسط تسهیل با کمترین هزینه دارای ظرفیت انجام خواهد پذیرفت. در بخش فرآورده‌ها نیز از آنجا که تولید و آزمایش هر فرآورده به دو روز زمان نیاز دارد، فرآورده‌های ارسالی از هر  $m$  به هر  $h$  با عمر کمتر از ۲ وجود نخواهد داشت و کلیه موجودی‌های فرآورده‌های خونی در مراکز تقاضا و عرضه با عمر بیش از ۲ روز در نظر گرفته شده است. میزان خون فاسدشده نیز بر اساس سن خون موجود در موجودی مراکز عرضه و تقاضا که به حد بالای اندیس  $r$  خود رسیده‌اند، برآورد شده است. تحویل فرآورده‌های خونی از مراکز  $m$  به  $h$  نیز بر اساس اولویت موجودی مراکز  $m$ ، سن خون موجود و هزینه ارسال که بر اساس فاصله مراکز خون به بیمارستان تخمین زده می‌شود، صورت خواهد گرفت.

پس از طراحی بردار جواب مسئله برای حل مسائل طرح‌شده الگوریتم‌های فراابتکاری وال و رقابت استعماری هر مسئله ۲۰ بار اجرا شده، میزان جمعیت اولیه ۵۰ و تکرار برابر با ۲۰۰ در نظر گرفته شده است که پاسخ ارائه شده در جدول ۶ مشاهده می‌شود.

جدول ۶. جواب مسئله

ICA الگوریتم		WOA الگوریتم		نرم‌افزار گمز		مثال‌ها
زمان حل مسئله	تابع هدف	زمان حل مسئله	تابع هدف	زمان حل مسئله*	تابع هدف	
۳۲۰	۳۰۵۵۳	۱۱۸	۲۹۴۳۵	۸	۲۷۴۷۶	مثال ۱
۴۵۹	۵۲۳۴۶	۱۱۹	۵۱۰۰۵	۹	۴۸۱۱۶	مثال ۲
۶۸۱	۵۸۴۵۵	۱۲۵	۵۴۶۷۸	۱۰	۵۱۳۴۹	مثال ۳
۹۸۰	۹۴۳۲۰	۱۶۹	۸۹۵۴۳	۱۲	۷۲۷۵۴	مثال ۴
۱۲۳۰	۹۸۴۵۶	۶۵۰	۹۳۲۱۴	-	-	مثال ۵
۱۷۸۹	۳۵۷۹۸۰	۸۹۰	۲۵۷۸۴۳	-	-	مثال ۶
۳۵۶۷	۶۳۵۵۶۷	۱۲۰۷	۵۳۱۸۵۴	-	-	مثال ۷
۴۲۵۷	۹۹۰۳۴۵	۱۴۸۰	۹۴۲۷۳۰	-	-	مثال ۸
۵۸۹۰	۳۶۱۰۴۵۰	۲۳۵۶	۲۵۰۱۲۷۷	-	-	مثال ۹
۹۰۰۶	۹۵۰۱۴۵۸	۴۵۸۹	۷۹۴۴۹۰۱	-	-	مثال ۱۰
۱۰۱۱۱	۱۶۱۱۰۹۹۰	۷۸۹۰	۱۱۰۵۴۲۳۰	-	-	مثال ۱۱
۱۳۸۰۴	۲۴۳۵۹۹۸۰	۸۰۵۲	۲۱۰۱۲۶۵۵	-	-	مثال ۱۲

\*زمان حل به ثانیه

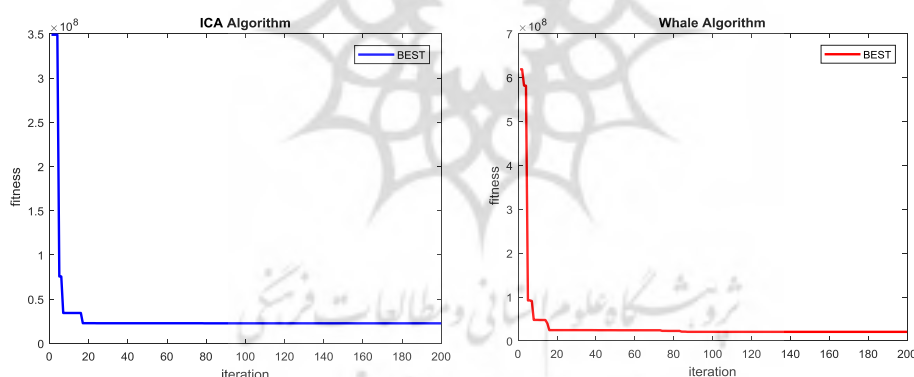
نتایج حاصل از مثال عددی در خصوص شاخص‌های مقایسه‌ای نشان می‌دهد که میزان تابع هدف به دست آمده در الگوریتم وال از الگوریتم رقابت استعماری کمتر بوده و تابع هدف مقدار کمتری را اتخاذ کرده است که از این جهت برتری بیشتری نسبت به الگوریتم رقابت استعماری دارد. در خصوص زمان حل مسئله (زمان رسیدن به شرط توقف) نیز الگوریتم وال عملکرد بسیار بهتری در مسائل با اندازه بزرگ‌تر داشته و زودتر به شرط توقف رسیده است.

**مطالعه موردی.** برای ارزیابی مدل ارائه شده در دنیای واقعی و تصدیق مدل اطلاعات یک ماهه مراکز خون استان گیلان انتخاب شده است. در این استان سه مرکز خون اصلی وجود دارد که کار پردازش خون جمع‌آوری شده را انجام می‌دهند و وظیفه خون‌رسانی به ۳۱ مرکز تقاضا در ۱۱ شهر را بر عهده دارند. با توجه به بازه یک‌ماهه انتخاب شده برای ارزیابی، دو محصول RBC و پلاکت به منظور بررسی مدل انتخاب می‌شود. نتایج تابع هدف بر اساس خروجی الگوریتم‌های مختلف پس از ۲۰ بار تکرار محاسبه شده و در جدول ۷، گزارش شده است.

جدول ۷. مقدار به‌دست‌آمده برای تابع هدف با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکار استفاده شده

تابع هدف	معیارهای توابع	ICA	WOA
حداقل هزینه‌ها	هزینه جمع‌آوری	۱۸۱۰۴۵۰	۴۶۱۰۴۶۲
	هزینه موجودی	۱۴۳۱۲۵۶	۲۷۳۰۸۷۰
	هزینه ارسال	۶۵۴۳۳۴۵	۸۶۴۳۵۲۰
	هزینه کمبود	۳۳۴۱۶۵۹	۲۵۱۹۷۴
	هزینه فاسدشدن	۹۵۳۲۱۶۴	۴۶۴۳۳۵۶
	هزینه کل	۲۲۶۵۷۷۸۴	۲۰۸۸۰۱۸۲

با توجه به جدول ۷، مقادیر تابع هدف به‌دست‌آمده به‌واسطه حل با استفاده از الگوریتم وال کمتر از الگوریتم رقابت استعماری بوده است که این نتیجه با توجه به برتری به‌دست‌آمده در حل اعتبارسنجی با استفاده از مثال عددی نیز محرز شده بود. با توجه به نتایج این الگوریتم میزان ۲۲/۱ درصد هزینه‌ها مربوط به هزینه جمع‌آوری تشخیص داده شده است. ۱۳/۱ درصد، هزینه موجودی خون در مراکز خون و بیمارستان‌ها بوده است. ۴۱ درصد هزینه‌ها هزینه آماده‌سازی و ارسال فرآورده‌های خونی از مراکز خون به بیمارستان‌ها است. ۲/۱ درصد هزینه‌ها هزینه کمبود و ۲۲/۲ درصد، هزینه اتلاف فرآورده‌های خونی است. تصویر رفتار دو الگوریتم در جست‌وجوی فضای حل و انتخاب جواب در شکل ۵، ارائه شده است که الگوریتم رقابت استعماری در تکرار ۱۵۸ از ۲۰۰ و الگوریتم وال در تکرار ۱۰۴ از ۲۰۰ به حداقل هزینه رسیده است.



شکل ۵. نمودار جست‌جوی فضای جواب برای الگوریتم‌های وال و رقابت استعماری

میزان خون جمع‌آوری شده بر اساس تسهیلات جمع‌آوری مستقر در آن شهر، در جدول ۸، ارائه شده است که خون تسهیلات  $l$  و  $b$  در تسهیلات  $m$  تجمیع می‌شود و فرآیند تولید فرآورده‌های خونی در مراکز  $m$  صورت می‌پذیرد. تعداد فرآورده‌های تولیدی نیز در جدول ۹، ارائه شده است.

جدول ۸. خون جمع‌آوری شده در مراکز جمع‌آوری طی دوره

خون کامل جمع‌آوری شده	خون جمع‌آوری شده در مراکز جمع‌آوری
رشت (m1)	۲۹۹۴
لاهیجان (m2)	۱۰۶۷
لنگرود (11)	۷۰۳
رودسر (12)	۴۸۶
انزلی (13)	۵۰۶
فومن (14)	۴۲۶
تالش (m3)	۶۸۰
آستارا (15)	۲۵۰
مسائل نقلیه جمع‌آوری خون (b1,b2)	۷۲۱

جدول ۹. خون تجمیع‌شده در مراکز خون و فرآورده‌های تولیدی

مراکز خون	خون جمع‌آوری شده	RBC فرآوری شده	مراکز خون
M1	۴۷۷۶	۴۶۴۷	۱۶۵۷
M2	۲۳۱۸	۲۲۵۵	۱۰۱
M3	۹۵۵	۹۲۹	۳۴

با توجه به کلیات مدل توزیع، مقادیر RBC و پلاکت‌ها و مقادیر کمبود مشاهده‌شده و مقادیر منقضی‌شده در جدول ۱۰، ارائه شده است.

جدول ۱۰. مقادیر محصولات فاسدشده (منقضی‌شده) و میزان کمبود هر بیمارستان و مقادیر ارسالی RBC و پلاکت

شهر	مراکز تقاضا	مقادیر RBC	منقضی شده	کمبود	مقادیر پلاکت	منقضی شده	کمبود
رشت	H1	۳۳۷	۳	۸	۹۱	۴	۶
	H2	۱۱۵	۲۲	۰	۱۳	۱	۱
	H3	۱۶	۷۶	۰	۰	۰	۰
	H4	۲۳۰	۲	۰	۷۲	۳	۱
	H5	۴۳۷	۲	۱	۷۵	۳	۱
	H6	۱۶	۵۱	۰	۰	۰	۰
	H7	۲۱۱	۴	۰	۵۷	۳	۱
	H8	۸۲۷	۱	۰	۶۳۴	۲۸	۲۰
	H9	۴۳۲	۷	۰	۱۴	۱	۱
	H10	۲۷۶	۱	۰	۱۳۳	۶	۴
	H11	۲۰۴	۲	۰	۹۰	۴	۱

شهر	مراکز تقاضا	مقادیر RBC	منقضی شده	کمبود	مقادیر پلاکت	منقضی شده	کمبود
	H12	۵۷	۸	۰	۰	۰	۰
	H13	۲۸	۲۲	۰	۰	۰	۰
	H14	۴۲۶	۱	۰	۱۴۳	۶	۶
فومن	H15	۹۱	۲	۰	۸	۰	۰
	H16	۱۸۵	۱	۰	۰	۰	۰
تالش	H17	۱۸	۳۱	۰	۱	۰	۰
آستارا	H18	۱۲۳	۳	۰	۱۶	۱	۲
	H19	۱۱	۲۳	۰	۰	۰	۳
رودبار	H20	۱۶	۱۷	۱	۰	۰	۰
	H21	۳۲	۹	۰	۰	۰	۰
املش	H22	۲۹	۳	۰	۰	۰	۰
	H23	۶۶	۱	۰	۱۰	۰	۰
لاهیجان	H24	۲۷۸	۱	۱۱	۱	۰	۰
	H25	۶۱	۱	۰	۰	۰	۰
لنگرود	H26	۲۰۰	۲	۰	۱۰	۰	۰
رودسر	H27	۳۹۵	۱	۰	۱۷	۱	۰
انزلی	H28	۳۴۲	۴	۰	۲۳	۱	۲
آستانه	H29	۱۳۸	۱	۲	۱	۰	۱
صومعه‌سرا	H30	۱۴۳	۴	۰	۲	۰	۰
ماسال	H31	۱۰۳	۲	۰	۲	۰	۰

همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد متوسط گلبول قرمز منقضی شده در مراکز درمانی به ۲/۵ درصد و میزان اتلاف پلاکت به ۴ درصد رسیده است که این رقم در مقابل مقدار ۸/۹ درصدی گلبول قرمز و ۴/۱۴ درصدی پلاکت به میزان قابل توجه‌ای کاهش یافته است. میزان کمبود در بحث فرآورده گلبول قرمز به میزان ۳/۰ درصد و برای پلاکت ۵/۳ درصد است. دلیل تفاوت این دو و بالابودن میزان اتلاف پلاکت نسبت به گلبول قرمز به واسطه میزان عمر کوتاه ۷ روزه آن است. در ۸۳ درصد مراکز درمانی کمبود گلبول قرمز و در ۵۵ درصد مراکز درمانی کمبود پلاکت به صفر رسیده است.

**تحلیل حساسیت پارامترهای استواری مدل استوار.** برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان حوزه انتقال خون بسیار مهم است که در صورت تغییر شرایط موجود چه تأثیراتی بر زنجیره تأمین حال حاضر خواهد گذاشت. پارامترهای استواری مدل، پارامترهایی هستند که به منظور تنظیم سطح حفاظت در مدل استوار اضافه می‌شوند. این پارامترهای استواری به طور خاص پارامترهایی هستند

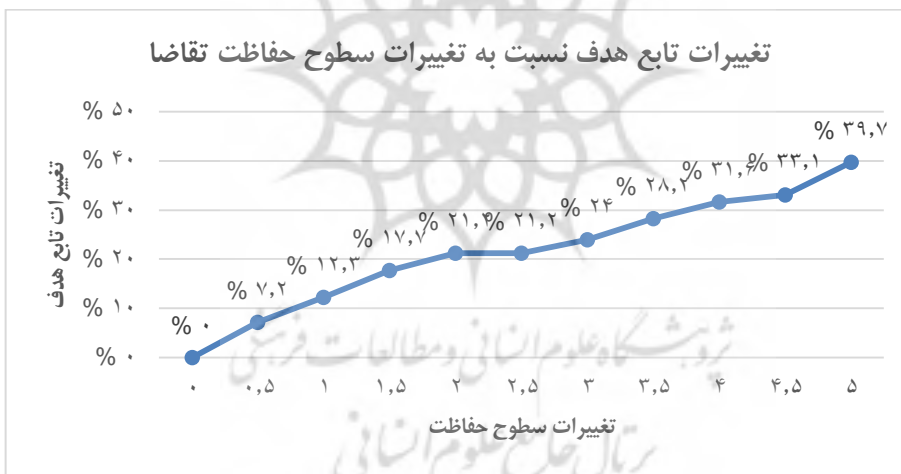
که با کنترل آن سطح محافظه‌کاری موردنظر تصمیم‌گیرنده قابل تنظیم است. در این پژوهش مطابق جدول‌های ۱۱ و ۱۲، یازده سطح حفاظت در نظر گرفته شده و درصد تغییرات تابع هدف در شکل ۶ گزارش شده است.

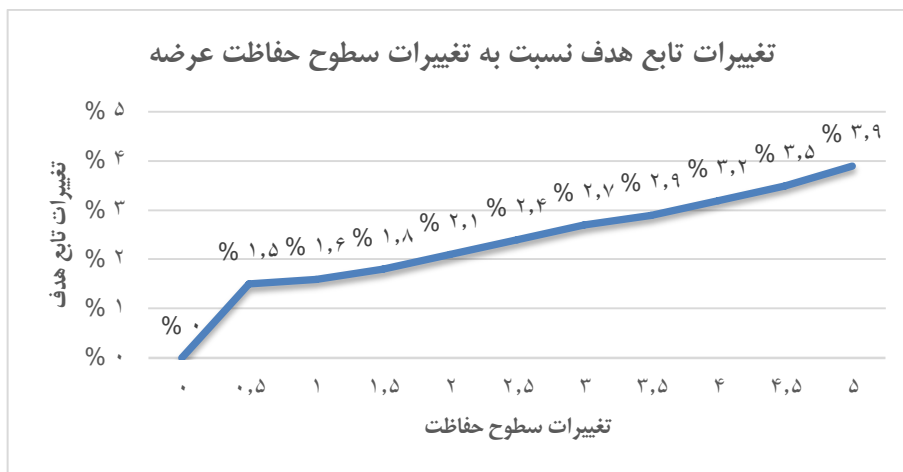
جدول ۱۱. سطح حفاظت برای عدم اطمینان در عرضه

حالت‌های سطح حفاظت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
$\Gamma^m$	۰	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴	۴/۵	۵
تغییرات تابع هدف	۰	%۱/۵	%۱/۶	%۱/۸	%۲/۱	%۲/۴	%۲/۷	%۲/۹	%۳/۲	%۳/۵	%۳/۹

جدول ۱۲. تعریف سطح حفاظت برای عدم اطمینان در تقاضا

حالت‌های سطح حفاظت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
$\Gamma^v$	۰	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴	۴/۵	۵
$\Gamma^o$	۰	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴	۴/۵	۵
تغییرات تابع هدف	%	۷/۲	۱۲/۳	۲۱/۲	۲۱/۲	۲۴	۲۸/۲	۳۱/۶	۳۳/۱	۳۶/۶	۳۹/۷
هدف	۰	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%





شکل ۶ تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات سطح حفاظت حداکثر عرضه (نمودار پایین) و نسبت به تغییرات سطح حفاظت تقاضا (نمودار بالا)

با توجه به شکل ۶، با افزایش سطح حفاظت مقدار تابع هدف بدتر شده است؛ در واقع هزینه‌ها افزایش می‌یابد. این مورد با منطق استوارسازی مدل کاملاً سازگار است؛ یعنی هر چه تصمیم‌گیرنده بخواهد عدم اطمینان بیشتری را برای مدل در نظر بگیرد، جواب‌های محافظه‌کارانه‌تری دریافت خواهد کرد.

**بینش مدیریتی.** این پژوهش به دنبال ارائه یک روش مدیریت اصولی علمی برای زنجیره تأمین خون بود. یک روش اصولی و استاندارد، روشی است که با شرایط حاکم بر سیستم مراقبت بهداشتی - درمانی وضعیت موجود تطبیق داشته باشد و سعی کند آن را به سمت بهره‌وری سوق دهد؛ سپس می‌توان ادعا نمود که سیستم طراحی شده می‌تواند گوشه‌ای از مشکلات موجود را بهبود دهد. کاهش میزان محصولات منقضی شده و نیز کاهش کمبود محصولات خونی در مراکز تقاضا از جمله دستاوردهای این پژوهش بوده است. به‌صورتی که درصد متوسط گلبول قرمز منقضی شده در مراکز درمانی به  $2/5$  درصد و میزان اتلاف پلاکت به  $4$  درصد رسیده است که این رقم در مقابل مقدار  $8/9$  درصدی گلبول قرمز و  $4/14$  درصدی پلاکت، به میزان قابل توجه‌ای کاهش یافته است. میزان کمبود نیز در بحث فرآورده گلبول قرمز به میزان  $3/0$  درصد و برای پلاکت  $5/3$  درصد بوده است. با توجه به اینکه بیشتر کمبود مشاهده شده در بخش پلاکت است، پیشنهاد می‌شود در برخی موارد به‌جای دریافت خون کامل از مراجعه‌کنندگان مستقیماً پلاکت آن‌ها دریافت شود. در اهدای پلاکت به‌صورت مستقیم، پلاکت‌های شش برابر پلاکتی است که در روش جداسازی از خون کامل گرفته می‌شود؛ همچنین در اهدای مستقیم پلاکت، محصول با کیفیت بهتری به‌دست بیماران نیازمند می‌رسد که لازمه آن تجهیز

مراکز دریافت خون به دستگاه‌هایی برای خونی‌گیری آفرزیس<sup>۱</sup> است که طی آن خون یک اهداکننده یا بیمار ابتدا گرفته می‌شود و برای جداسازی یک جزء آن به اجزای جداگانه تقسیم می‌شود؛ سپس اجزای خون باقی‌مانده دوباره به جریان خون بیمار یا اهداکننده وارد می‌شود.

آنچه در بحث هزینه می‌تواند ذکر کرد، بدین صورت است که محاسبه بهره‌وری هزینه در این پژوهش با تأمین انعطاف‌پذیری خون در بخش جمع‌آوری با حفظ سطح عرضه همراه بوده است. آنچه هنگام برنامه‌ریزی برای زنجیره تأمین خون حائز اهمیت است، تعادل بین عرضه و تقاضا باید در زنجیره است. نتایج پژوهش نشان داد که ۵ درصد تغییر در سطوح حفاظت استواری تقاضا می‌تواند تا ۳۹ درصد میزان هزینه متحمل بر زنجیره تأمین را افزایش دهد. این در حالی است که ۵ درصد تغییر در سطح حفاظت عرضه تنها باعث افزایش هزینه کل به میزان کمتر از ۴ درصد شده است. علت این امر در نظر گرفتن جریمه (هزینه) سنگین برای ایجاد کمبود در سیستم است. این تفاوت باعث است به دلیل مشکل‌ساز بودن میزان کمبود در زنجیره تأمین خون، تصمیم‌گیرندگان و مدیران به دنبال جذب حداکثری داوطلبان خون به‌منظور اهدای خون و ذخیره‌سازی باشند؛ درحالی‌که با توجه به نامتوازن بودن توزیع گروه خونی افراد و نیز نیاز همیشگی به یکسری گروه‌های خونی کمیاب، این کار می‌تواند باعث کثرت ذخیره‌سازی در یک گروه خونی و عدم کاهش کمبود در یک سری گروه‌های خونی کمیاب شود (برای مثال، بیشترین کمبود در گروه AB با RH منفی گزارش شده است). در این خصوص تصمیم‌گیرندگان می‌توانند با هوشمند کردن خون‌گیری و نیز ثبت اطلاعات افراد اهداکننده با گروه‌های خونی کمیاب و ارائه مشوق‌هایی سعی در دعوت مجدد این افراد به مراکز خون‌گیری برای اهدای خون نمایند.

نکته بعدی مورد توجه در این پژوهش سن محصولات خونی بوده است. سن محصولات خون در زنجیره تأمین نیز بسیار حائز اهمیت است؛ به‌طوری‌که هر بسته محصول خونی در طول دوره زمانی با یک شناسه سن مشخص شده است که امکان استفاده درست آن برای تقاضای مربوط به آن را مهیا می‌کند و باعث جلوگیری از برگشت‌خوردن و ذخیره‌سازی مجدد آن می‌شود. برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان تغییر در سیاست‌های سفارش بسته‌های خونی از شکل انتخاب تصادفی بسته و جایگزینی آن با سیستمی چون FIFO<sup>۲</sup> پیشنهاد می‌شود که این خود مشکلاتی چون منقضی‌شدن به‌واسطه عدم مصرف را کاهش خواهد داد. به‌منظور پیاده‌سازی یک سیستم بهینه انتقال خون استفاده از سامانه اتلاف‌گریز هوشمند بر پایه RFID<sup>۳</sup> پیشنهاد می‌شود که این امر علاوه بر مدیریت مجموعه زنجیره تأمین باعث می‌شود با کنترل فیزیکی بسته‌های خونی

---

1. Apheresis  
2. First In First Out  
3. Radio-frequency identification



بتوان تأثیر بسزایی در مدیریت موجودی و ردیابی لحظه‌به‌لحظه و ثبت اطلاعات آن‌ها و در نتیجه افزایش دقت در تزریق خون داشت.

### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف از انجام این پژوهش، طراحی یک زنجیره تأمین جامع بوده که شامل سه بخش جمع‌آوری، پردازش و توزیع کالای خونی است. زنجیره تأمین دارای واحدهای جمع‌آوری خون متحرک و ثابت است که خون را از اهداکنندگان دریافت و به مراکز خون ارسال می‌کنند. در مرکز خون، خون به محصولات مورد نیاز فرآوری می‌شود. محصولات خونی بر اساس تقاضاهایی که به دو دسته محصولات تازه یا معمولی تقسیم می‌گردند، به مراکز تقاضا ارسال می‌شوند. تابع هدف مدل به دنبال حداقل کردن هزینه‌هایی چون خون‌گیری، موجودی خون در مراکز خون و بیمارستان‌ها و نیز هزینه منقضی شدن محصولات خونی به علت عدم مصرف آن‌ها بوده است. در این پژوهش از بهینه‌سازی استوار برای مواجهه با عدم قطعیت در پارامترهای عرضه و تقاضا استفاده شده است. مسئله پژوهش در اندازه‌های کوچک توسط الگوریتم حل‌کننده دقیق در نرم‌افزار گمز حل شده و مدل پژوهش در اندازه متوسط و بزرگ به علت دست‌یافتن به یک زمان معقول حل با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری WOA و ICA در نرم‌افزار متلب حل و نتایج ارائه شده است. بر اساس جدول شاخص مقایسه الگوریتم‌های حل مسئله و نیز مقادیر به‌دست‌آمده برای تابع هدف (جدول‌های ۵ و ۶)، الگوریتم WOA کارایی بهتری نسبت به الگوریتم ICA در این مسئله از خود نشان داده است.

### پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی

- بررسی مدل به صورت زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن مسائل حمل‌ونقل و مسیریابی تحویل فرآورده‌های خونی از مراکز خون به مراکز تقاضا؛
- تفکیک تقاضای محصولات خونی واصله بر اساس شاخص ABO-RH و امکان ارضای تقاضا محصولات با گروه خونی متفاوت با عرضه‌هایی از گروه‌های خونی دیگر؛
- امکان استقرار تجهیزات در مواقع اضطرار و پیش‌آمدهای مترقبه.

## منابع

1. Arvan, M., R. (2015). Tavakkoli-Moghaddam, and M. Abdollahi, Designing a bi-objective and multi-product supply chain network for the supply of blood. *Uncertain Supply Chain Management*, 3(1), 57-68.
2. Atashpaz-Gargari, E., & Lucas., C. (2007). Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. in 2007 IEEE congress on evolutionary computation. Ieee.
3. Bain, B.J., (2014). *Blood cells: a practical guide*. John Wiley & Sons.
4. Bertsimas, D., & Sim, M. (2002). Robust discrete optimization and network flows I introduction. *Operations Research*, 71(January), 1-26.
5. Bozorgi Amiri, A., S. Mansoori, and M.S. Pishvae, Multi-objective Relief Chain Network Design for Earthquake Response under Uncertainties. *Journal of Industrial Management Perspective*, 2017. 7(Issue 1, Spring 2017): p. 9-36. (In Persian).
6. Daneshvar, A., Homayounfar, M., & Farahmandnejad, A. (2020). Developing an Intelligent Multi Criteria Clustering Method Based on PROMETHEE. *Journal of Industrial Management Perspective*, 9(Issue 4), 41-61. (In Persian)
7. Derikvand, H., et al., (2020). A robust stochastic bi objective model for blood inventory-distribution management in a blood supply chain. *European Journal of Industrial Engineering*, 14(3), 369-403. (In Persian)
8. Dillon, M., Oliveira, F., & Abbasi, B. (2017). A two-stage stochastic programming model for inventory management in the blood supply chain. *International Journal of Production Economics*, 187, 27-41.
9. Doodman, M., & Bozorgi Amiri, A. (2020). Integrate Blood Supply Chain Network Design with Considering Lateral Transshipment under Uncertainty. *Journal of Industrial Management Perspective*, 9(Issue 4), 9-40. (In Persian)
10. Ema, (2007). Guideline on influenza vaccines prepared from viruses with the potential to cause pandemic and intended for use outside of the core dossier context (EMA/CHMP/VWP/263499/2006). Guideline, 24.
11. Eskandari-Khanghahi, M., et al. (2018). Designing and optimizing a sustainable supply chain network for a blood platelet bank under uncertainty. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 71, 236-250.
12. Farrokh, M., A. Azar, and G. Jandaghi, Developing a Robust Fuzzy Programming Approach for Closed Loop Supply Chain Design. *Journal of Industrial Management Perspective*, 2016. 6(Issue 2, Summer 2016): p. 9-43. (In Persian).
13. Gholami, H.R., Mehdizadeh, E., & Naderi, B. (2018). Algorithm for Assembly Flowshops. *Journal of Industrial Management Perspective*, 8(Issue 1), 93-111. (In Persian)
14. Gunpinar, S. & Centeno, G. (2015). Stochastic integer programming models for reducing wastages and shortages of blood products at hospitals. *Computers & Operations Research*, 54, 129-141.
15. Hamdan, B., & Diabat, A. (2019). A two-stage multi-echelon stochastic blood supply chain problem. *Computers & Operations Research*, 101, 130-143.
16. Heidari-Fathian, H. & Pasandideh, S.H.R. (2018). Green-blood supply chain network design: Robust optimization, bounded objective function & Lagrangian relaxation. *Computers & Industrial Engineering*, 122, 95-105.
17. Horng, M.-F., T.-K. Dao, & Shieh, C.-S. (2017). A multi-objective optimal vehicle fuel consumption based on whale optimization algorithm, in *Advances in*

- Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. *Springer*, 371-380.
18. Hosseini-Motlagh, S.-M., M.R.G. Samani, & Cheraghi, S. (2020). Robust and stable flexible blood supply chain network design under motivational initiatives. *Socio-Economic Planning Sciences*, 70, 100725.
19. Hosseini-Motlagh, S.-M., M.R.G. Samani, & Homaei, S. (2020). Blood supply chain management: robust optimization, disruption risk, and blood group compatibility (a real-life case). *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11(3), 1085-1104.
20. Jokar, M., M. Mozafari, and A. Akbari, A Weighted Robust Two-Stage Stochastic Optimization Model for Supplier Selection and Order Allocation under Uncertainty. *Journal of Industrial Management Perspective*, 2020. 10(Issue 2, Summer 2020): p. 111-135. (In Persian).
21. Kamyabniya, A., et al., (2018). Robust Platelet Logistics Planning in Disaster Relief Operations Under Uncertainty: a Coordinated Approach. *Information Systems Frontiers*, 20(4), 759-782.
22. Larimi, N.G. & Yaghoubi, S. (2019). A robust mathematical model for platelet supply chain considering social announcements and blood extraction technologies. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106014.
23. Medicines, E.D.f.t.Q.o., (2013). Guide to the preparation, use and quality assurance of blood components, in Recommendation No. R (95) 15.
24. Mirjalili, S. & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*, 95, 51-67.
25. Nagurney, A., A.H. Masoumi, and M. Yu, Supply chain network operations management of a blood banking system with cost and risk minimization. *Computational Management Science*, 2012. 9(2): p. 205-231.
26. Nahmias, S. (1982). Perishable inventory theory: A review. *Operations research*, 30(4), 680-708.
27. Osorio, A.F., et al., (2016). Simulation-optimization model for production planning in the blood supply chain. *Health care management science*, 1-17.
28. Pierskalla, W.P. (2005). Supply chain management of blood banks, in *Operations research and health care.*, Springer. p. 103-145.
29. Prastacos, G.P. (1984). Blood inventory management: an overview of theory and practice. *Management Science*, 30(7), 777-800
30. Ramezani, R., & Behboodi, Z. (2017). Blood supply chain network design under uncertainties in supply and demand considering social aspects. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 104, 69-82.
31. Zahiri, B. & Pishvae, M.S. (2016). Blood supply chain network design considering blood group compatibility under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 55(7), 2013-2033.
32. Zahiri, B., et al. (2018). A multi-stage stochastic programming approach for blood supply chain planning. *Computers & Industrial Engineering*, 122, 1-14.

# Presenting a Robust Optimization Model to Design a Comprehensive Blood Supply Chain under Supply and Demand Uncertainties

Taher Kouchaki Tajani<sup>\*</sup>, Ali Mohtashami<sup>\*\*</sup>,  
Maghsoud Amiri<sup>\*\*\*</sup>, Reza Ehtesham Rasi<sup>\*\*\*\*</sup>

## Abstract

Neglecting the supply chain management of perishable goods could create a lot of costs for organizations and companies. Blood is a perishable product in the healthcare supply chain, the shortage of which could prove quite problematic and disastrous. Any improvements in the blood supply chain management operations may increase service efficiency and decrease the cost of the healthcare system, saving the lives of lots of people. In this paper, a mixed-integer nonlinear programming model is proposed for comprehensive blood supply chain management, which includes gathering, processing and distributing blood and blood products by taking into account the demand lifetime and age. This model aims at decreasing supply chain costs and blood product deficiency. Robust optimization is utilized to take into account the inherent uncertainty and volatility of the demand and supply. The proposed model is first tested on a small-scale numerical example in GAMS software. Then a large-scale problem is solved using Whale and Imperialist Competition algorithms and the results are compared. In addition, a case study is presented to show the applicability of the proposed model.

**Keywords: Blood Supply Chain; Mathematical Modeling; Robust Modeling; Whale Metaheuristic Algorithm; Imperialist Competitive Algorithm.**

---

Received: Jun. 13, 2020; Accepted: Nov. 12, 2020.

\* Ph.D. Student in Industrial Management, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

\*\* Associate Professor of Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran (Corresponding Author).

Email: mohtashami07@gmail.com

\*\*\* Professor, Department of Industrial Management, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

\*\*\*\* Assistant Professor of Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.