

# ارائه‌ی یک مدل تصادفی چهار-سطحی دو-مرحله‌یی برای تأمین محصولات خونی در شرایط بحران

Original Article

محمد باقر فخرزاد\* (دانشیار)

الهه قاسمی (دانشجوی دکتری)  
 دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه بزد

در سال‌های اخیر مکان‌یابی تسهیلات موقت و سیار، در سیستم‌های سلامت بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از حوزه‌های مهم در این زمینه، طراحی سیستم‌های جمع‌آوری و توزیع خون است. در این مقاله یک مدل تصادفی چهار-سطحی دو-مرحله‌یی تصادفی برای تأمین محصولات خونی در شرایط بحران ارائه می‌شود. هدف از این مطالعه، کمینه‌سازی هزینه‌ها با توجه به تأمین محصولات خونی مورد نیاز در زمان استاندارد است. در مدل‌سازی ارائه‌شده همچنین به موضوع فساد محصولات خونی در چرخه‌ی تأمین توجه می‌شود. در این مقاله سعی شده است که با ارائه‌ی یک رویکرد ترکیبی از یک الگوریتم فراابتکاری و روش ابتکاری، روش حل ارائه‌شده بهبود داده شود. به‌منظور اعتبارسنجی مدل و رویکرد پیشنهادی برای حل مسئله، نتایج محاسبات حاصل از تعدادی مثال عددی تولید شده نشان داده می‌شود.

واژگان کلیدی: زنجیره‌ی تأمین خون، مدیریت بحران، برنامه‌ریزی تصادفی، قیود احتمالی، مکان‌یابی - تخصیص، الگوریتم ژنتیک.

mfakhrzad@yazd.ac.ir  
 eghasemi@stu.yazd.ac.ir

## ۱. مقدمه

حوادث غیرمترقبه اعم از حوادث طبیعی از جمله زلزله، سیل، آتش‌سوزی یا حوادث تروریستی، اثرات زیادی بر زندگی و سلامت انسان‌ها دارد.<sup>[۱]</sup> در چنین شرایطی امکان کمک‌رسانی و تأمین کالاهای ضروری افراد آسیب‌دیده با مشکلات اساسی مواجه می‌شود. یکی از موضوعات اساسی در تحقیقات انجام شده برای مدل‌سازی کمک‌رسانی در بحران، شامل مدل‌سازی زنجیره‌ی تأمین خون و فرآورده‌های آن است که به شدت دارای ماهیت تصادفی و پویاست.<sup>[۲]</sup>

خون انسان، کالایی است که فقط به وسیله‌ی خود انسان تولید می‌شود، امروزه با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در حوزه‌ی پزشکی، هنوز جایگزین مناسبی برای این کالای حیاتی یافته نشده است.<sup>[۳]</sup> تأمین خون سالم و کافی مورد نیاز بیمارستان‌ها و مدیریت آن در شرایط عادی و بحرانی چالشی است که سیستم سلامت دولت‌ها همیشه با آن مواجه است. نیاز به اهداکنندگان خون و فرآورده‌های آن همیشه وجود خواهد داشت، درحالی‌که عرضه‌ی آن از سوی اهداکنندگان تا حدودی نامنظم و تقاضا برای فرآورده‌های خونی به ویژه در شرایط بحران اغلب تصادفی است.<sup>[۴]</sup> به‌طور میانگین از هر سه نفر، یک نفر در طول زندگی احتیاج به تزریق خون و فرآورده‌های خونی پیدا می‌کند و در هر ثانیه یک نفر از

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴/۱۰/۱۳۹۵، اصلاحیه ۲۸/۹/۱۳۹۶، پذیرش ۵/۱۰/۱۳۹۶.

DOI:10.24200/J65.2019.7024.1681

ساکنان کهری زمین از همه‌ی سنین و تمام نژادها برای ادامه‌ی حیات به انتقال خون نیاز دارد. از جمله موارد مصرف متعدد خون می‌توان به مصرف آن در عمل‌های جراحی (جراحی نوزادان، پیوند اعضا، زایمان، جراحی قلب باز و...)، درمان سوختگی، شیمی‌درمانی، بیماران تالاسمی، هموفیلی و بیماران دیالیزی اشاره کرد.

مدیریت خون از نگرانی‌های خاص برای بشر است و از این رو جمع‌آوری و مدیریت توزیع خون، که در قالب مدیریت زنجیره‌ی تأمین خون مطرح است، نیازمند مدیریت و برنامه‌ریزی دقیق است. زیرا همان‌طور که بیان شد این زنجیره با زنجیره‌ی تأمین کالای عادی متفاوت است؛ چرا که عرضه‌ی خون نسبتاً نامنظم و غیرقطعی است و تقاضا نیز برای این محصول غیرقطعی است. از طرف دیگر، محصولات متفاوت با ویژگی‌های مختلف و کاربردهای جداگانه از خون کامل قابل حصول است. از جمله پرکاربردترین محصولات می‌توان به خون کامل، گلبول‌های قرمز، پلاکت، و پلاسما اشاره کرد. هر یک از این محصولات دارای طول عمر متفاوت و شرایط خاص نگه‌داری هستند؛<sup>[۵]</sup> بنابراین این مسئله نیز بر پیچیدگی‌های طراحی زنجیره‌ی تأمین خون مناسب می‌افزاید. در شرایط بحران که دسترسی به اطلاعات کامل و دقیق به‌منظور تصمیم‌گیری امکان‌پذیر نیست، این مسئله مهم‌تر می‌شود.

علاوه بر این موارد، محصولات خون فاسدشدنی نیز هستند و دارای عمر محدودند،

کردند. بر اساس زلزله‌ی ۲۰۰۸، داکو<sup>[۱۱]</sup> مدیریت موجودی را در زمان‌بندی تأمین خون بررسی کرد. هویان و همکاران<sup>[۱۲]</sup> و چنگلی و همکاران<sup>[۱۳]</sup> با تکیه بر جنبه‌های عملی، با اشاره به کاستی‌ها و نواقص امنیتی خون در هنگام بحران، روشی برای تأمین خون در شرایط بحران ارائه دادند. اما این مقالات تنها به جنبه‌های کیفی در این حوزه پرداخته‌اند. از جمله مطالعاتی که به مدل‌سازی ریاضی مسئله‌ی تأمین خون پرداخته‌اند می‌توان به مقالات داسکین و همکاران<sup>[۱۴]</sup> و شن و همکاران<sup>[۱۵]</sup> اشاره کرد. آن‌ها مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی برای مسئله مکان‌یابی - موجودی خون به صورت تک‌دوره‌ی را ارائه داده‌اند. هدف مدل آن‌ها تعیین هم‌زمان تعداد و مکان مراکز توزیع و نیز سطح موجودی هر یک از آن‌هاست. شاهین و همکاران<sup>[۱۶]</sup> یک مدل تک‌دوره‌ی مکان‌یابی - تخصیص برای خدمت‌دهی خون را در یک شبکه‌ی سلسله‌مراتبی متشکل از: مراکز خون منطقه‌ی، ایستگاه‌های خون، و تسهیلات سیار ارائه دادند. زو و همکاران<sup>[۱۷]</sup> به بررسی مدیریت موجودی پلاکت خون با توجه به طول عمر سه‌روزه‌ی آن پرداختند. آنها مدل خود را با استفاده از برنامه‌ریزی پویا فرمول‌بندی کردند. شا و هوانگ<sup>[۱]</sup> یک مدل مکان‌یابی - تخصیص را برای تأمین خون در شرایط اضطراری ارائه دادند و یک رویکرد ابتکاری مبتنی بر آزادسازی لاگرانژ را به عنوان روش حل پیشنهاد کردند. آن‌ها به مطالعه‌ی موردی در چین به عنوان یک مثال پرداختند. آلفنسو و همکاران<sup>[۱۸]</sup> مسئله‌ی جمع‌آوری خون در فرانسه را با توجه به هزینه‌ی استقرار پایگاه‌های ثابت و سیار جمع‌آوری خون بررسی کردند. وفآرانی و بزرگی امیری<sup>[۱۹]</sup> یک مدل دوهفته‌ی مکان‌یابی - تخصیص چنددوره‌ی برای تسهیلات جمع‌آوری خون ارائه دادند. هدف آنها کمینه‌سازی هزینه‌ها و نیز کمبود خون در شبکه‌ی تأمین در نظر گرفته شده بود. آنها از روش  $\epsilon$  - محدودیت برای تک‌هدف‌کردن مدل پیشنهادی استفاده کردند. جبارزاده و همکاران<sup>[۲۰]</sup> یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین پویا را برای تأمین خون در شرایط بحران ارائه دادند. آن‌ها یک مدل طراحی استوار شبکه برای تصمیم‌گیری در مورد مکان‌یابی - تخصیص چنددوره‌ی پس از بحران ارائه دادند. یک مدل عدد صحیح مختلط غیرخطی تصادفی استوار توسط ظهیری و همکاران<sup>[۲۱]</sup> ارائه شد. آن‌ها مکان‌یابی تسهیلات و نیز نحوه‌ی تبدلات میان سطوح را در مدل خود بهینه‌سازی کردند. آروان و همکاران<sup>[۸]</sup> مدلی را برای تعیین مکان بانک‌های خون در زنجیره‌ی تأمین متشکل از محل‌های اهدای خون، آزمایشگاه‌های فرآوری خون، بانک‌های خون و نقاط تقاضا ارائه کردند. آن‌ها یک مدل دوهفته‌ی برای تأمین انواع محصولات خونی ارائه دادند.

در تازه‌ترین مطالعات انجام شده در حوزه‌ی تأمین خون در شرایط بحران، می‌توان به چراغی و حسینی مطلق<sup>[۲۲]</sup> و فریدونی و شهانقی<sup>[۲۳]</sup> اشاره کرد. چراغی و حسینی مطلق<sup>[۲۲]</sup> یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح فازی - تصادفی را برای تأمین خون در شرایط بحران ارائه دادند. آن‌ها برای نمایش عدم قطعیت، از رویکرد برنامه‌ریزی فازی و محدودیت‌های شانسی استفاده کردند و در مطالعه‌ی موردی، تأمین خون در شرایط زلزله در تهران را بررسی کردند. فریدونی و شهانقی<sup>[۲۳]</sup> از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مدل‌سازی عدم قطعیت تأمین خون در شرایط بحران بهره بردند. نهفتی کهنه و همکاران<sup>[۲۴]</sup> یک مدل دوهفته‌ی را برای خون‌رسانی در بحران ارائه دادند. آن‌ها از اعداد فازی برای بیان عدم قطعیت در داده‌ها استفاده کردند.

عدم قطعیت در زنجیره‌ی تأمین خون در شرایط غیربحرانی نیز در تعدادی از مطالعات بررسی شده است. ظهیری و پیشوایی<sup>[۲۵]</sup> یک مدل دوهفته‌ی بر مبنای برنامه‌ریزی امکانی فازی برای مواجهه با عدم قطعیت در تقاضای خون ارائه دادند. آنها همچنین تفاوت گروه‌های خونی را نیز در مدل خود لحاظ کردند. دیپن و همکاران<sup>[۲۶]</sup> یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ی را برای مدیریت موجودی گلبول‌های قرمز

که این خود بر پیچیدگی انجام برنامه‌ریزی‌های مناسب می‌افزاید. این امر موجب پیچیده‌تر شدن موضوع می‌شود و کمبود آن منجر به هزینه‌های بالا برای جامعه می‌شود؛ زیرا می‌تواند موجب افزایش میزان مرگ و میر شود. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که تحقیقات این حوزه در سه سطح قابل تقسیم است. سطوح مذکور عبارت‌اند از مدیریت زنجیره‌ی تأمین خون، مدیریت جمع‌آوری و انتقال خون در مراکز اهدای خون، و مدیریت موجودی خون در بیمارستان‌ها. برخی از تحقیقات به هر سه سطح پرداخته‌اند و برخی تنها بر یکی از سطوح ذکر شده تمرکز داشته‌اند. در شرایط پس از بحران تعداد زیادی از آسیب‌دیدگان به محصولات خونی احتیاج دارند. در حالی که عدم وجود خون و اهداکننده‌ی خون یک مسئله‌ی بزرگ و مهم در چنین شرایطی است. توزیع نامناسب خون و عدم تأمین خون در زمان مناسب برای بیمارستان‌ها می‌تواند اثرات مخربی داشته باشد.<sup>[۷]</sup> طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین خون یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدیریت تأمین خون است.

در این مقاله، یک مدل ریاضی دو - مرحله‌ی تصادفی برای طراحی یک زنجیره‌ی تأمین چهار - سطحی به منظور تأمین خون در شرایط بحران ارائه می‌شود. اجزای شبکه‌ی تأمین در نظر گرفته شده در این مطالعه عبارت‌اند از: اهداکنندگان، مراکز محلی، مراکز منطقه‌ی، تسهیلات سیار جمع‌آوری خون و بیمارستان‌ها. این مقاله با توجه به نیاز به محصولات خونی متفاوت، در نظر گرفتن طول عمر آنها و فساد در خون‌های جمع‌آوری شده یا محصولات تولیدی از آن‌ها، به دنبال یافتن بهترین ترکیب ممکن در زنجیره‌ی تأمین خون در شرایط بحرانی با کم‌ترین هزینه‌ی ممکن است. برای حل مدل ارائه شده از یک روش ابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و روش دقیق استفاده می‌شود. عملکرد مدل ارائه شده و نیز روش حل از طریق مثال‌های عددی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ادامه‌ی مقاله به این ترتیب دنبال می‌شود که در بخش ۲ به پژوهش‌های پیشین مرتبط با موضوع در حوزه‌ی زنجیره‌ی تأمین خون اشاره می‌شود. در بخش ۳ مدل مسئله معرفی می‌شود. روش حل ترکیبی در بخش ۴ معرفی می‌شود. محاسبات عددی در بخش ۵ ارائه می‌شود. در بخش ۶ تحلیل حساسیت مدل با توجه به پارامترهای ورودی انجام می‌گیرد و در نهایت بخش ۶ به جمع‌بندی مقاله می‌پردازد.

## ۲. پیشینه‌ی پژوهش

اگرچه تلاش‌های زیادی برای مدل‌سازی مکان‌یابی تسهیلات و طراحی زنجیره‌ی تأمین صورت گرفته است، مطالعات گسترده و کاربردی در حوزه‌ی مسئله‌ی طراحی زنجیره‌ی تأمین خون صورت نپذیرفته است.<sup>[۸]</sup>

مطالعات متفاوتی در حوزه‌ی مسائل مرتبط با جمع‌آوری و توزیع خون و فرآورده‌های آن و نیز طراحی زنجیره‌ی تأمین خون انجام گرفته است. یکی از موضوعاتی که در این حوزه به آن پرداخته شده است، مسئله‌ی مکان‌یابی - تخصیص در زنجیره‌ی تأمین و نیز جمع‌آوری خون از طریق تسهیلات موقت و سیار است. در این راستا به تازه‌ترین مطالعات انجام گرفته در این حوزه اشاره می‌شود. یک مطالعه‌ی مروری کامل در حوزه‌ی مدیریت زنجیره‌ی تأمین خون و موجودی خون، توسط بلین و فورس<sup>[۵]</sup> با تمرکز بر انواع محصولات خونی، سطوح برنامه‌ریزی و روش‌های حل، انجام گرفته است که برای مطالعه بیشتر خواننده به آن ارجاع داده می‌شود.

برای تأمین خون در بحران، یانگ مینگ زو و همکاران،<sup>[۹]</sup> آنلی لی و همکاران،<sup>[۱۰]</sup> سیستم مدیریت خون در ایالت متحده آمریکا، کانادا، و کشورهای دیگر را بررسی

- در مواقعی ممکن است به دلایلی از جمله کمبود یا زمان بر بودن ارسال، بیمارستان‌های متقاضی برای تأمین خون مورد نیاز خود از مراکز محلی یا منطقه‌یی دچار مشکل شوند، در حالی که می‌توانند تقاضای خود را در صورت امکان از سایر بیمارستان‌ها تأمین کنند. بنابراین، در مدل ارائه‌شده در مقاله، جابه‌جایی خون میان بیمارستان‌ها نیز لحاظ می‌شود. به این ترتیب امکان ذخیره‌ی خون در بیمارستان‌ها نیز امکان‌پذیر است. اما فرض می‌شود که بیمارستان‌ها تنها خون یا فرآورده‌های خونی را دریافت و ذخیره می‌کنند. بنابراین هزینه‌ی ذخیره‌سازی در بیمارستان‌ها نیز در تابع هدف منظور می‌شود.
- با توجه به موارد ذکرشده، تقاضای بیمارستان برای خون کامل از طریق مراکز محلی، منطقه‌یی، و بیمارستان و تقاضا برای سایر محصولات از طریق مراکز منطقه‌یی و بیمارستان‌ها قابل تأمین است.
- با توجه به اینکه در شرایط بحران، ممکن است که راه‌های ارتباطی با مشکل مواجه شود، در مدل ارائه‌شده، زمان سفر میان نقاط شبکه نیز به صورت تصادفی منظور شده است.
- از آن جایی که تأمین کامل تقاضا ممکن است که در شرایط بحران عملی نباشد، در مطالعه‌ی حاضر، تأمین تقاضا به صورت یک محدودیت شانس در نظر گرفته می‌شود. در این جا فرض می‌شود که توزیع تقاضا تحت سناریوهای مختلف از توزیع نرمال پیروی کند.
- در این مطالعه، از یک روش حل ابتکاری که ترکیبی از روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک و روش دقیق است برای حل مدل ارائه‌شده استفاده می‌شود. زیرا مدت زمان حل در مسائل حوزه‌ی بحران که نیاز به تصمیم‌گیری سریع دارد، حائز اهمیت است و از طرفی، دقت جواب تولیدشده نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

### ۳. تعریف مسئله

در این مقاله یک زنجیره‌ی تأمین چهارسطحی برای تأمین خون در شرایط بحران طراحی شده است. اجزای شبکه‌ی تأمین در نظر گرفته شده عبارت‌اند از: اهداکنندگان، تسهیلات سیار، مراکز خون محلی، مراکز خون منطقه‌یی و بیمارستان‌ها. هدف اصلی این مطالعه، تأمین خون و سایر محصولات حاصل از آن در شرایط بحران است. از ویژگی‌های بارز شرایط بحران وجود عدم قطعیت در اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی مسئله است. بنابراین، از رویکرد مدل‌سازی دو - مرحله‌یی تصادفی در این مقاله استفاده می‌شود. عدم قطعیت موجود در مسئله‌ی تأمین خون در شرایط بحرانی از طریق مجموعه‌یی از سناریوها در مدل‌سازی وارد می‌شود؛ برای پارامترهای غیر قطعی در هر یک از سناریوها یک توزیع احتمالی در نظر گرفته می‌شود.

در مرحله‌ی اول، پیش از مشخص شدن سناریوی به وقوع پیوسته، باید در مورد تعداد تسهیلات سیار برای جمع‌آوری خون از اهداکنندگان تصمیم گرفته شود. در مسائل واقعی نیز به این دلیل که فراهم‌آوری تسهیلات با امکانات مناسب و تخصصی برای جمع‌آوری خون مستلزم زمان و هزینه است، انتظار می‌رود این چنین تصمیماتی قبل از وقوع بحران اخذ شوند و تدابیر لازم اندیشیده شود. اما پس از وقوع بحران و مشخص شدن سناریوی رخ داده، باید در مورد مکان تسهیلات سیار و نحوه‌ی جمع‌آوری و توزیع خون تصمیم‌گیری شود. در این مقاله فرض می‌شود که اهدای خون می‌تواند در تسهیلات سیار یا مراکز محلی که در فاصله‌ی جغرافیایی مشخص از یکدیگر قرار گرفته‌اند، انجام گیرد اما در مراکز منطقه‌یی خون‌گیری

خون پیشنهاد دادند. آن‌ها در مدل پیشنهادی فسادپذیری و عدم قطعیت در تقاضا را در نظر گرفتند. انصافیان و یعقوبی<sup>[۲۷]</sup> مدل بهینه‌سازی استوار را برای تهیه و توزیع پلاکت‌های خونی ارائه دادند. انواع روش‌های تولید پلاکت (تولید از خون کامل یا به روش آفرزیس)، انواع سیاست‌های مدیریت موجودی و نیز طول عمر پلاکت‌ها در این مطالعه در نظر گرفته شد. انصافیان و همکاران<sup>[۲۸]</sup> در ادامه‌ی مطالعه انصافیان و یعقوبی<sup>[۲۷]</sup> تفاوت‌های گروه‌های خونی را نیز در نظر گرفتند و از مدل‌های زنجیره‌ی مارکوف برای پیش‌بینی تعداد اهداکنندگان در هر دوره استفاده کردند. در این مطالعه یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌یی ارائه شده است.

در میان مطالعات انجام گرفته در این حوزه، مطالعه‌یی که توسط فهیم‌نیا و همکاران<sup>[۲۹]</sup> انجام گرفته است یک مدل زنجیره‌ی تأمین دو - هدفه‌ی تصادفی را برای تأمین خون به صورت کارا و به موقع در شرایط بحران ارائه کرده است. آنها در مقایسه با سایر مطالعات انجام گرفته، یک زنجیره‌ی تأمین خون پیچیده را که به مسائل واقعی شباهت بیشتری دارد، بررسی کرده‌اند. زنجیره‌ی طراحی شده توسط آنها به شرایط حاکم در ایران نزدیک‌تر است. اما برخی از موارد نیز در مدل‌بندی آنها در نظر گرفته نشده است که هدف ما در این مقاله، توسعه‌ی مدل پیشنهادی آنها و لحاظ کردن مفروضاتی برای پیاده‌سازی عملی رویکرد آنها در شرایط تأمین خون اضطراری است.

در این مقاله مدل ارائه‌شده توسط فهیم‌نیا و همکاران<sup>[۲۹]</sup> گسترش داده شده است و نسبت به مدل آن‌ها تغییراتی که مدل را به یک مدل واقعی‌تر در زمینه‌ی زنجیره‌ی تأمین تبدیل می‌کند، اعمال شده است. این تغییرات به شرح زیر است:

- در مدل ارائه‌شده توسط فهیم‌نیا و همکاران<sup>[۲۹]</sup> تنها تأمین خون کامل در نظر گرفته شده بود، در حالی که در شرایط بحران تأمین فرآورده‌های خونی نیز یکی از چالش‌های پیش رو است. از طرف دیگر، هر یک از فرآورده‌های خونی دارای طول عمر متفاوتی هستند که باید لحاظ شود. بنابراین در این مقاله، چهار محصول خونی شامل: خون کامل، پلاسما، پلاکت، و گلبول قرمز نیز در نظر گرفته می‌شود.
- با توجه به مورد قبل، تقاضای بیمارستان‌ها نیز بر اساس نوع محصول خونی باید تأمین شود.
- در مدل اصلی دو تابع هدف یکی بر مبنای هزینه و دیگری بر مبنای زمان در نظر گرفته شده است؛ به عبارتی مدل به دنبال کمینه‌کردن زمان و هزینه است. در حالی که مناسب‌تر است که زمان تأمین خون را با توجه به زمان استاندارد خون‌رسانی در شرایط بحران در محدودیت‌ها وارد کرد و به دنبال تأمین خون در مدت زمان از پیش تعیین شده با حداقل هزینه می‌شود. بنابراین، مدل دوهدفه به یک هدفه تبدیل می‌شود که در ضمن پوشش هدف مسئله، حل مسئله را نیز ساده‌تر می‌کند.
- در این مقاله، فرض می‌شود که عملیات فرآوری خون کامل تنها در مراکز منطقه‌یی انجام می‌گیرد.
- هزینه‌ی تولید فرآورده‌های خونی در مراکز منطقه‌یی در این مطالعه لحاظ می‌شود که باید در تابع هدف منظور شود.
- در این مقاله هزینه‌یی به منظور آزمایش خون‌های جمع‌آوری شده در مراکز محلی و منطقه‌یی در نظر گرفته می‌شود.
- پس از آزمایش خون‌های رسیده به مراکز محلی و منطقه‌یی، درصدی از خون به دلایل مختلفی از جمله فساد به دلیل نحوه‌ی حمل نامناسب یا وجود بیماری‌هایی مانند ایدز، هپاتیت، و غیره از چرخه‌ی انتقال خارج می‌شود که این مورد در مدل‌سازی لحاظ شده است.

- مکان هر یک از تسهیلات سیار.
- میزان سطح موجودی خون در مراکز محلی، منطقه‌یی، و بیمارستان‌ها در انتهای هر سناریو.
- میزان خونی که باید تحت هر سناریو در هر یک از تسهیلات جمع‌آوری شود، از مراکز سیار به مراکز محلی و منطقه‌یی منتقل شود، از مراکز محلی به مراکز منطقه‌یی منتقل شود، از مراکز محلی و منطقه‌یی به بیمارستان‌ها منتقل شود، از بیمارستانی به بیمارستان دیگر انتقال یابد.
- با توجه به مسئله‌ی تشریح‌شده، اندیس‌ها، پارامترها، و متغیرهای تصمیم‌گیری در بخش بعدی معرفی می‌شوند.

### ۱.۳. اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری

برای مدل‌سازی مسئله‌ی ذکرشده پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری ذیل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

#### ۱.۱.۳. اندیس‌ها

$I$ : مجموعه‌ی اهداکنندگان؛

$J$ : مجموعه‌ی محل‌های کانیدها برای استقرار تسهیلات سیار؛

$K$ : مجموعه‌ی مراکز محلی؛

$R$ : مجموعه‌ی مراکز منطقه‌یی؛

$H$ : مجموعه‌ی بیمارستان‌ها؛

$P$ : مجموعه‌ی محصولات خونی؛

$S$ : مجموعه‌ی سناریوها؛

$T$ : مجموعه‌ی دوره‌های زمانی.

#### ۲.۱.۳. پارامترها

$f$ : هزینه‌ی ثابت استقرار یک تسهیل سیار؛

$v_{jlt}^s$ : هزینه‌ی حرکت یک تسهیل سیار از مکان ۱ به مکان  $j$  در دوره‌ی  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛

$o_{ijt}^s$ : هزینه‌ی عملیاتی واحد در تسهیل سیار  $j$  از گروه اهداکننده‌ی  $i$  در دوره‌ی  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛

$ob_{kt}^s$ : هزینه‌ی واحد عملیاتی (آزمایشات و...) خون در مرکز محلی  $k$  در دوره‌ی  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛

$or_{rt}^s$ : هزینه‌ی واحد عملیاتی (آزمایشات و...) خون در مرکز منطقه‌یی  $r$  در دوره‌ی  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛

$oc_{prt}^s$ : هزینه‌ی واحد فرآوری خون و تولید محصول  $p$  در مرکز منطقه‌یی  $r$  در دوره‌ی  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛

$ab_{jkt}^s$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد خونی از تسهیل سیار  $j$  به مرکز محلی  $k$  در دوره‌ی  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛

$ar_{jrt}^s$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد خونی از تسهیل سیار  $j$  به مرکز منطقه‌یی  $r$  در دوره‌ی  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛

$abr_{kr}^s$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد خونی از مرکز محلی  $k$  به مرکز منطقه‌یی  $r$  در دوره‌ی  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛

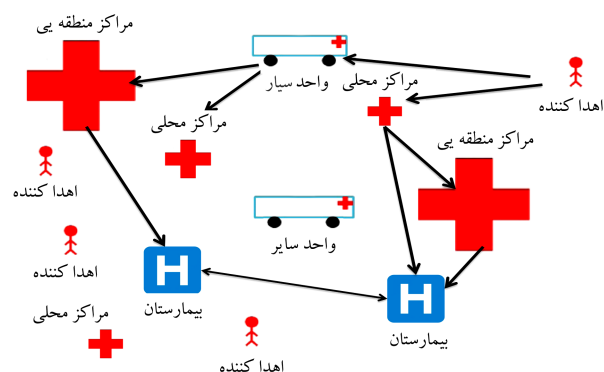
$arh_{kht}^s$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد خونی از مرکز محلی  $k$  به بیمارستان  $h$  در دوره‌ی  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛

$abh_{rht}^s$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد خونی از مرکز منطقه‌یی  $r$  به بیمارستان  $h$  در دوره‌ی  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛

انجام نمی‌شود. برای انجام عملیات پردازش و فرآوری خون، خون جمع‌آوری‌شده در تسهیلات سیار می‌تواند به هر یک از مراکز محلی یا منطقه‌یی منتقل شود. این‌طور در نظر گرفته می‌شود که در مراکز محلی فقط آزمایش‌های لازم بر روی خون جمع‌آوری‌شده انجام می‌گیرد و عملیات مربوط به فرآوری خون و تولید محصولات خونی فقط در مراکز منطقه‌یی صورت می‌پذیرد. عملیات انتقال خون کامل به بیمارستان‌ها هم از طریق مراکز منطقه‌یی و هم مراکز محلی انجام می‌گیرد. در حالی‌که سایر فرآورده‌های خونی از مراکز منطقه‌یی یا بیمارستان‌ها به بیمارستان‌های متقاضی صورت می‌پذیرد. شکل ۱ نمایی از زنجیره‌ی تأمین معرفی‌شده را نشان می‌دهد.

این مسئله به‌عنوان یک مدل دو - مرحله‌یی تصادفی برای تأمین خون و فرآورده‌های آن در شرایط اضطرابی تحت سناریوهای متفاوت در بحران مدل‌سازی می‌شود. هدف این مسئله تأمین خون مورد تقاضا در زمان استاندارد برای کمک‌رسانی در شرایط امداد با حداقل هزینه است. سایر مفروضاتی که در این مسئله لحاظ‌شده است به شرح زیر است:

- مراکز محلی و منطقه‌یی قادر به ذخیره‌ی خون در حجم محدود هستند اما این امکان در مورد مراکز سیار وجود ندارد.
- مراکز محلی و منطقه‌یی تنها به اهداکنندگانی که در شعاع پوشش آن‌ها باشند، خدمت‌دهی می‌کنند.
- اگرچه تأمین تمام تقاضا در اولویت است اما این امر به دلایلی از جمله وجود عدم قطعیت در داده‌های مورد نیاز برای تصمیم‌گیری ممکن است که امکان‌پذیر نباشد. بنابراین برای واقعی‌سازی مدل طراحی‌شده در شرایط بحران فرض می‌شود که احتمال عدم تأمین تقاضا محدود می‌شود و از حد معینی تجاوز نمی‌کند.
- در این مسئله فرض شده است که تأمین نقاط تقاضا از طریق یکدیگر نیز امکان‌پذیر باشد (ارسال خون از بیمارستانی به بیمارستان دیگر).
- با توجه به اینکه در شرایط بحران امکان مسدودشدن راه‌های ارتباطی نیز وجود دارد، در این مسئله زمان و هزینه‌ی حمل‌ونقل در شبکه‌ی تأمین به‌صورت تصادفی لحاظ می‌شود.
- در مدل در نظر گرفته شده در این مقاله، احتمال فساد در اثر طولانی‌مدت شدن دوره‌ی نگهداری یا فساد به علت حمل‌ونقل نامناسب نیز لحاظ شده است.
- مدل ارائه‌شده در هر دوره به دنبال تصمیمات زیر است:
- تعداد تسهیلات سیار.



شکل ۱. نمایی از زنجیره‌ی تأمین چهار-سطحی تأمین خون.

$AL_{krt}^s$ : متغیر دودویی، ۱ اگر مرکز محلی  $k$  به مرکز منطقه‌ی  $r$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$  تخصیص یابد؛ در غیر این صورت صفر؛  
 $QB_{ijkt}^s$ : مقدار خون کامل جمع‌آوری شده در تسهیل  $j$  از اهداکننده‌ی  $i$  در دوره  $t$  برای تحویل به مرکز محلی  $k$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $QR_{ijrt}^s$ : مقدار خون کامل جمع‌آوری شده در تسهیل  $j$  از اهداکننده‌ی  $i$  در دوره  $t$  برای تحویل به مرکز منطقه‌ی  $r$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $OQ_{ikt}^s$ : مقدار خون کامل جمع‌آوری شده در مرکز محلی  $k$  از اهداکننده‌ی  $i$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $BTR_{krt}^s$ : مقدار خون رسیده از مرکز محلی  $k$  به مرکز منطقه‌ی  $r$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $QBH_{kht}^s$ : مقدار خون کامل رسیده از مرکز محلی  $k$  به بیمارستان  $h$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $QRP_{prt}^s$ : مقدار محصول خونی تولیدشده از نوع  $p$  در مرکز منطقه‌ی  $r$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $QRH_{prht}^s$ : مقدار محصول خونی رسیده از نوع  $p$  از مرکز منطقه‌ی  $r$  به بیمارستان  $h$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $QHH_{ph'ht}^s$ : مقدار خون رسیده از نوع  $p$  از بیمارستان  $h'$  به بیمارستان  $h$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $IB_{kt}^s$ : سطح موجودی خون در مرکز محلی  $k$  در پایان دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $IR_{prt}^s$ : سطح موجودی محصول خونی  $p$  در مرکز منطقه‌ی  $r$  در پایان دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $IH_{ph}^s$ : سطح موجودی محصول خونی  $p$  در بیمارستان  $h$  در پایان دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ .

### ۲.۳. تابع هدف و محدودیت های مدل

تابع هدف، کمینه‌سازی هزینه‌های مورد انتظار در زنجیره‌ی تأمین است. اجرای هزینه‌ی زنجیره تأمین تحت هر سناریو عبارت‌اند از: هزینه‌ی استقرار تسهیلات خون ( $EC$ )، هزینه‌ی حرکت تسهیلات سیار ( $MC_s$ )، هزینه‌ی عملیاتی ( $OC_s$ )، هزینه‌ی فرآوری خون ( $PC_s$ )، هزینه‌ی حمل‌ونقل ( $TC_s$ ) و هزینه‌ی موجودی ( $IC_s$ ) فرمول‌های مربوط به شرح رابطه‌های ۱-۶ است.

$$EC \text{ (cost of establishing mobile blood facilities)} = fx \quad (1)$$

$$MC_s \text{ (cost of moving mobile blood facilities)} = \sum_{i \in L} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} v_{jlt}^s Z_{jlt}^s \quad (2)$$

$$OC_s \text{ (operational cost)} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} o_{ijt}^s \left( \sum_{k \in K} QB_{ijkt}^s + \sum_{r \in R} QR_{ijrt}^s \right) + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} ob_{kt}^s \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} QB_{ijkt}^s + \sum_{i \in I} OQ_{ikt}^s \right) + \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} or_{rt}^s \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} QR_{ijrt}^s + \sum_{r \in R} BTR_{krt}^s \right) \quad (3)$$

$$PC_s \text{ (Processing cost)} = \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} oc_{prt}^s QRP_{prt}^s \quad (4)$$

$ach_{phh't}^s$ : هزینه‌ی حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد خونی از نوع  $p$  از بیمارستان  $h$  به بیمارستان  $h'$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $hb_{kt}^s$ : هزینه‌ی نگهداری واحد در مرکز محلی  $k$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $hr_{rt}^s$ : هزینه‌ی نگهداری واحد در مرکز منطقه‌ی  $r$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $ch_{ph}^s$ : هزینه‌ی نگهداری واحد خون از نوع  $p$  در بیمارستان  $h$  در دوره  $t$ ؛  
 $d_{hpt}^s$ : میزان تقاضای بیمارستان  $h$  از محصول نوع  $p$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $tb_{jkt}^s$ : زمان سفر از تسهیل سیار  $j$  به مرکز محلی  $k$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $tr_{jrt}^s$ : زمان سفر از تسهیل سیار  $j$  به مرکز منطقه‌ی  $r$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $tc_{krt}^s$ : زمان سفر از مرکز محلی  $k$  به مرکز منطقه‌ی  $r$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $tq_{rht}^s$ : زمان سفر از مرکز منطقه‌ی  $r$  به بیمارستان  $h$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $tp_{kht}^s$ : زمان سفر از مرکز محلی  $k$  به بیمارستان  $h$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $th_{h'h't}^s$ : زمان سفر از بیمارستان  $h$  به بیمارستان  $h'$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $str_1$ : زمان استاندارد جمع‌آوری خون و تحویل به مراکز منطقه‌ی  $i$  و محلی برای آزمایش و فرآوری و توزیع؛  
 $str_2$ : زمان استاندارد انتقال خون از مراکز محلی و منطقه‌ی  $i$  به بیمارستان‌های متقاضی؛  
 $T_p$ : بیشینه‌ی مدت زمانی که می‌توان محصول خونی  $p$  را قبل از فساد نگهداری کرد؛

$T_{process}$ : مدت زمان لازم برای فرآوری محصول خونی نوع  $p$ ؛  
 $b$ : ظرفیت یک تسهیل سیار؛  
 $cb_k^s$ : ظرفیت ذخیره‌سازی خون در مرکز محلی  $k$ ؛  
 $cr_{pr}$ : ظرفیت ذخیره‌سازی محصول خونی  $p$  در مرکز منطقه‌ی  $r$ ؛  
 $ch_{ph}$ : ظرفیت ذخیره‌سازی محصول خونی  $p$  در بیمارستان  $h$ ؛  
 $m_i^s$ : بیشینه‌ی مقدار تأمین خون از گروه اهداکننده‌ی  $i$  تحت سناریوی  $s$ ؛  
 $rr_{ij}$ : فاصله‌ی بین اهداکننده‌ی  $i$  و تسهیل سیار  $j$ ؛  
 $rb_{ik}$ : فاصله‌ی بین اهداکننده‌ی  $i$  و مرکز محلی  $k$ ؛  
 $rc$ : شعاع پوشش تسهیلات خون؛  
 $\pi_s$ : احتمال رخداد هر سناریو؛  
 $\beta$ : نرخ ارجاع خون از مراکز محلی به مراکز منطقه‌ی  $i$  به‌منظور فرآوری و تولید سایر محصولات خونی؛  
 $\alpha$ : نرخ اتلاف خون پس از انجام آزمایش‌های لازم؛  
 $\gamma$ : نرخ فساد خون در اثر حمل‌ونقل؛  
 $\delta$ : سطح اطمینان تأمین تقاضای تصادفی؛  
 $M$ : یک عدد بسیار بزرگ.

### ۳.۱.۳. متغیرهای تصمیم‌گیری

$x$ : متغیر عدد صحیح، تعداد تسهیلات سیار؛  
 $z_{jlt}^s$ : متغیر دودویی، ۱ اگر تسهیل سیار  $j$  در محل  $l$  در دوره  $t$  قرار بگیرد و به محل  $j$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$  حرکت کند؛ در غیر این صورت صفر؛  
 $Y_{ijt}^s$ : متغیر دودویی، ۱ اگر تسهیل  $j$  به اهداکننده‌ی  $i$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$  تخصیص یابد؛ در غیر این صورت صفر؛  
 $U_{ikt}^s$ : متغیر دودویی، ۱ اگر مرکز محلی  $k$  به اهداکننده‌ی  $i$  در دوره  $t$  تحت سناریوی  $s$  تخصیص یابد؛ در غیر این صورت صفر؛

$$QBH_{kht}^s \leq (1-\gamma)^t * \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} QB_{ijkt}^s + (1-\alpha) \sum_{i \in I} OQ_{ikt}^s \right) + \sum_{t'=t-T_p}^t IB_{kt'}^s \quad \forall k \in K, \quad \forall t, t' \in T, \quad \forall s \in S \quad (22)$$

$$QRH_{phrt}^s \leq (1-\gamma) * QRP_{pr(t-T_{process})}^s + \sum_{t'=t-T_p}^t IR_{prt'}^s \quad \forall p \in P, \quad \forall r \in R, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (23)$$

$$QHH_{phh't}^s \leq (1-\gamma) \left( \sum_{r \in R} QRH_{prht}^s \right) + \sum_{t'=t-T_p}^t IH_{ph't'}^s \quad \forall p \in P, \quad p \neq \lambda, \quad \forall h, h' \in H, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (24)$$

$$QHH_{\lambda h'h't}^s \leq (1-\gamma) \left( \sum_{k \in K} QBH_{kht}^s + \sum_{r \in R} QRH_{\lambda rht}^s \right) + \sum_{t'=t-T_p}^t IH_{\lambda h't'}^s \quad \forall h, h' \in H, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (25)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{r \in R} QRP_{prt}^s \leq (1-\gamma) * \left( (1-\alpha) \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} QR_{ijrt}^s + \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} BTR_{krt}^s \right) \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (26)$$

$$IB_{kt-\lambda}^s + (1-\beta)(1-\gamma) * \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} OB_{ijkt}^s + (1-\alpha) \sum_{i \in I} OQ_{ikt}^s \right) - \sum_{h \in H} QBH_{kht}^s = IB_{kt}^s \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (27)$$

$$IR_{rt-\lambda}^s + (1-\gamma) = \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} QR_{ijrt}^s + \sum_{k \in K} BTR_{krt}^s \right) - \sum_{h \in H} QRH_{prht}^s = IR_{prt}^s \quad \forall r \in R, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (28)$$

$$IH_{ph't-\lambda}^s + \left( \sum_{k \in K} QBH_{kht}^s + \sum_{r \in R} QRH_{prht}^s \right) - \sum_{h \in H} QHH_{ph'ht}^s = IH_{ph't}^s \quad \forall p \in P, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (29)$$

$$\Pr \left( \sum_{k \in K} QBH_{kht}^s + \sum_{r \in R} QRH_{\lambda rht}^s + \sum_{h \in H} QHH_{\lambda h'ht}^s \geq d_{\lambda ht}^s \right) \geq \delta \quad \forall s \in S, \quad \forall t \in T, \quad \forall h \in H \quad (30)$$

$$\Pr \left( \sum_{r \in R} QRH_{ph't}^s + \sum_{h' \in H} QHH_{ph'h't}^s \geq d_{ph't}^s \right) \geq \delta \quad \forall s \in S, \quad \forall t \in T, \quad \forall h \in H, \quad \forall p \in P \quad (31)$$

$$IB_{kt}^s \leq cb_k \quad \forall s \in S, \quad \forall t \in T, \quad \forall k \in K \quad (32)$$

$$IR_{prt}^s \leq cr_{pr} \quad \forall s \in S, \quad \forall t \in T, \quad \forall r \in R \quad (33)$$

$$IH_{ph't}^s \leq ch_{ph} \quad \forall s \in S, \quad \forall t \in T, \quad \forall h \in H \quad (34)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} OB_{ijkt}^s tb_{jk} \leq str \lambda \quad \forall s \in S \quad (35)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} QR_{ijrt}^s tr_{jr} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} BTR_{krt}^s tc_{kr} \leq str \lambda \quad \forall s \in S \quad (36)$$

$$TC_s \text{ (transportation cost)} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} ab_{jkt}^s QB_{ijkt}^s + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} ar_{jrt}^s QR_{jrt}^s + \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} abr_{krt}^s BTR_{krt}^s + \sum_{k \in K} \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} abh_{kht}^s QBH_{kht}^s + \sum_{h \in H} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} arh_{rht}^s QRH_{rht}^s + \sum_{h \in H} \sum_{h' \in H} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} ach_{phh't}^s QHH_{phh't}^s \quad (5)$$

$$IC_s \text{ (Inventory cost)} = \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} hb_{kt}^s IB_{kt}^s + \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} hr_{rt}^s IR_{rt}^s + \sum_{p \in P} \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} ch_{ph't}^s IH_{ph't}^s \quad (6)$$

$$\text{Min } z = EC + \sum_{s \in S} \pi_s (MC_s + OC_s + PC_s + TC_s + IC_s) \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in J} z_{jlt}^s \leq x \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (8)$$

$$\sum_{l \in J} z_{jlt}^s \leq \lambda \quad \forall j \in J, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (9)$$

$$\sum_{l \in J} z_{jlt}^s \leq \sum_{l \in J} z_{jlt-\lambda}^s \quad \forall j \in J, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (10)$$

$$Y_{ijt}^s \leq \sum_{l \in J} z_{jlt}^s \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (11)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} Qb_{ijkt}^s + \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} QR_{ijrt}^s + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} OQ_{ikt}^s \leq m_i^s \quad \forall i \in I, \quad \forall s \in S \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} QB_{ijkt}^s + \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} QR_{ijrt}^s \leq b \quad \forall j \in J, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (13)$$

$$QB_{ijkt}^s \leq MY_{ijt}^s \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (14)$$

$$QR_{ijkt}^s \leq MY_{ijt}^s \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (15)$$

$$OQ_{ikt}^s \leq MU_{ikt}^s \quad \forall i \in I, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (16)$$

$$rr_{ij} * Y_{ijt}^s \leq rc \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (17)$$

$$rb_{ik} * U_{ikt}^s \leq rc \quad \forall i \in I, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (18)$$

$$\sum_{r \in R} AL_{krt}^s \leq \lambda \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (19)$$

$$BTR_{krt}^s \leq MAL_{krt}^s \quad \forall k \in K, \quad \forall r \in R, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (20)$$

$$BTR_{krt}^s \leq \beta(1-\gamma) * \left( \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} QB_{ijkt}^s + (1-\alpha) \sum_{i \in I} OQ_{ikt}^s \right) \quad \forall k \in K, \quad \forall r \in R, \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (21)$$

حمل و نقل نامناسب با نرخ  $\gamma$  از بین می‌رود. محدودیت ۲۲ بیشینه‌ی میزان خون کامل قابل انتقال از مراکز محلی به بیمارستان‌ها را مشخص می‌کند. محدودیت ۲۳ بیشینه‌ی میزان هر یک از محصولات خونی را که قابل انتقال از مراکز منطقه‌یی به بیمارستان‌ها هستند، نشان می‌دهد. محدودیت ۲۴ بیان‌گر بیشینه‌ی میزان هر یک از محصولات خونی قابل انتقال میان بیمارستان‌هاست. در محدودیت‌های ۲۲-۲۵ میزان موجودی‌های قبلی هر یک از مراکز نیز به این شرط که دوره‌ی عمر محصول سیری نشده باشد، در تأمین تقاضا لحاظ شده است. محدودیت ۲۶ بیان‌گر بیشینه‌ی مقدار تولیدی از هر یک از محصولات خونی با توجه به درصد اتلاف در اثر آزمایش‌های سلامت یا حمل و نقل را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۲۷-۲۹ سطح موجودی در هر یک از مراکز محلی، منطقه‌یی، و بیمارستان‌ها را نشان می‌دهند. محدودیت‌های ۳۰ و ۳۱ محدودیت‌های شانسی تأمین تقاضای انواع فرآورده‌های خونی را بیان می‌کنند. اضافه کردن این محدودیت‌ها مدل را به یک مدل غیرخطی تبدیل می‌کند. در بخش بعدی نحوه‌ی خطی‌سازی این دو محدودیت بیان می‌شود. محدودیت‌های ۳۲-۳۴ ظرفیت ذخیره در هر یک از مراکز محلی، منطقه‌یی، و بیمارستان‌ها را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۳۵ و ۳۶ بیان می‌کنند که زمان ارسال خون از مراکز سیار به محلی یا مراکز محلی به منطقه‌یی نباید از میزان از پیش تعیین شده تجاوز کند. همچنین محدودیت‌های ۳۷ و ۳۸ بیان می‌کنند که زمان ارسال خون از مراکز محلی یا منطقه‌یی به بیمارستان‌ها باید در کمتر از زمان تعیین شده انجام پذیرد. این محدودیت‌ها برای اطمینان از اینکه میزان خون لازم در زمان لازم به محل تقاضا رسیده شود، در نظر گرفته می‌شود. محدودیت‌های ۳۹-۴۱ دامنه‌ی متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

### ۳.۳. خطی‌سازی محدودیت‌های شانسی

محدودیت‌های مربوط به تأمین تقاضا همان‌طور که در بخش ۲.۳ ذکر شد به صورت احتمالی در نظر گرفته شده است. به منظور خطی‌سازی این محدودیت‌ها فرض می‌شود که تقاضا از توزیع نرمال پیروی کند. در این صورت محدودیت‌های ۳۰ و ۳۱ به صورت زیر بازنویسی می‌شوند و در مدل اصلی قرار می‌گیرند.

$$\sum_{k \in K} QBH_{kht}^s + \sum_{r \in R} QRH_{rht}^s + \sum_{h \in H} QBH_{h'ht}^s \geq E(d_{ht}^s) + Z_\delta \sqrt{\text{var}(d_{ht}^s)} \quad \forall s \in S, \forall t \in T, \forall h \in H \quad (42)$$

$$\sum_{r \in R} QRH_{pht}^s + \sum_{h' \in H} QBH_{pht}^s \geq E(d_{pht}^s) + Z_\delta \sqrt{\text{var}(d_{pht}^s)} \quad \forall s \in S, \forall t \in T, \forall h \in H, \forall p \in P \quad (43)$$

### ۴. روش حل

از آنجایی که مدل ارائه شده در این مقاله به دنبال یافتن تصمیمات بهینه در شرایط بحران است، زمان حل مدل از چالش‌های بسیار مهم در این زمینه است. اگر چه روش‌های حل دقیق نسبت به روش‌های ابتکاری و فراابتکاری در اولویت هستند، در بسیاری موارد به دلیل بزرگی ابعاد مسئله و وجود تعداد زیاد متغیر یا محدودیت استفاده از این روش‌ها مناسب به نظر نمی‌رسد. در چنین شرایطی استفاده از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری توصیه می‌شود. مدل ریاضی دو مرحله‌یی - تصادفی با محدودیت‌های احتمالی ارائه شده در این مقاله به دلیل وجود حجم بسیار بزرگی از سناریوها از جمله مسائل NP- سخت به حساب می‌آید و حل آن به وسیله‌ی روش‌های دقیق

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{h \in H} QBH_{kht}^s p_{kh} \leq str \gamma \quad \forall s \in S \quad (37)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{h \in H} QRH_{rht}^s q_{rh} \leq str \gamma \quad \forall s \in S \quad (38)$$

$$Y_{ijt}^s, U_{ikt}^s, AL_{krt}^s \in \{0, 1\} \quad \forall s \in S, \forall t \in T, \forall k \in K, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall r \in R \quad (39)$$

$$QB_{ijkt}^s, QR_{ijrt}^s, QBH_{rht}^s, QRH_{prht}^s, QRP_{prt}^s, BTR_{rht}^s, QHH_{ph'ht}^s, IB_{kt}^s, IR_{prt}^s, IH_{pht}^s, OQ_{ikt}^s \geq 0 \quad \forall s \in S, \forall t \in T, \forall k \in K, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall r \in R, \forall p \in P, \forall h, h' \in H \quad (40)$$

$$x \text{ Integer} \quad (41)$$

هزینه‌ی استقرار تسهیلات در رابطه‌ی ۱ از طریق حاصل ضرب هزینه‌ی استقرار یک تسهیل سیار در تعداد تسهیلات سیار مستقر شده به دست می‌آید. رابطه‌ی ۲ هزینه‌ی حرکت تسهیلات سیار خون از یک محل به محل‌های دیگر در دوره‌های مختلف را فرمول‌بندی می‌کند. رابطه‌ی ۳ مجموع هزینه‌های عملیاتی در تسهیلات سیار خون، مراکز محلی و منطقه‌یی نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۴، هزینه‌ی فرآوری و تولید محصولات خونی مختلف در مراکز منطقه‌یی را نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۵ مجموع هزینه‌های حمل و نقل شامل هزینه‌ی حمل و نقل خون تحویل داده شده از تسهیلات سیار به مراکز محلی و منطقه‌یی، از مراکز محلی به مراکز منطقه‌یی، و از مراکز محلی و منطقه‌یی به بیمارستان‌ها و نیز حمل و نقل بین بیمارستان‌ها را محاسبه می‌کند. رابطه‌ی ۶ مجموع هزینه‌های نگه‌داری در مراکز محلی، منطقه‌یی و بیمارستان‌ها را نشان می‌دهد. با استفاده از اجزای هزینه، تابع هدف به صورت رابطه‌ی ۷ فرمول‌بندی می‌شود. محدودیت‌های مدل به صورت زیر می‌باشند. محدودیت ۸ تضمین می‌کند که تعداد تسهیلات سیار به کار گرفته شده در هر دوره از تعداد تسهیلات راه‌اندازی شده تجاوز نمی‌کند. محدودیت ۹ مشخص می‌کند که در هر محل بیشینه‌ی یک تسهیل مستقر شود. محدودیت ۱۰ اطمینان ایجاد می‌کند که هر محل توسط بیشینه‌ی یک تسهیل سیار بازدید شود. محدودیت ۱۱ تضمین می‌کند که تخصیص اهداکنندگان فقط به تسهیلات راه‌اندازی شده انجام پذیرد. محدودیت ۱۲ ظرفیت تأمین خون توسط هر گروه از اهداکنندگان را معین می‌کند. محدودیت ۱۳ ظرفیت هر تسهیل سیار را بیان می‌کند. محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵ تضمین می‌کنند که جمع‌آوری خون از تسهیلات سیاری که حداقل یک گروه اهداکننده به آن اختصاص داده شده است، صورت می‌پذیرد. محدودیت ۱۶ نشان می‌دهد که جمع‌آوری خون از مراکز محلی که حداقل یک گروه اهداکننده به آن اختصاص داده شده است، انجام می‌گیرد. محدودیت‌های ۱۷ و ۱۸ تضمین می‌کنند که تسهیلات سیار و محلی تنها به اهداکنندگانی که در محدوده‌ی پوشش آن‌ها باشند، خدمت‌دهی می‌کنند. محدودیت ۱۹ بیان می‌کند که هر مرکز محلی حداکثر به یک مرکز منطقه‌یی تخصیص داده می‌شود. محدودیت ۲۰ بیان می‌کند که انتقال از مرکز محلی به مرکز منطقه‌یی که به آن تخصیص داده نشده است، انجام نمی‌گیرد. محدودیت ۲۱ بیشینه‌ی میزان خونی را که می‌تواند از مرکز محلی به منطقه‌یی رسانیده شود، نشان می‌دهد. این محدودیت نشان می‌دهد که ارجاع خون از مرکز محلی به منطقه‌یی (برای تولید فرآورده‌های خونی) به طور مستقیم با نرخ  $\beta$  انجام می‌پذیرد. همچنین میزان خونی که از مرکز محلی آماده‌ی ارسال است با نرخ  $\alpha$  به دلایلی از جمله وجود بیماری از بین می‌رود و نیز میزان خون جمع‌آوری شده در مراکز محلی و نیز تسهیلات سیار به دلیل

منطقه‌یی لازم است مقادیر انتقال خون با توجه به انواع محصولات خونی و سناریوهای مختلف بهینه‌سازی شود. در این مرحله با تبدیل متغیرهای مکان‌یابی و تخصیص به پارامتر (با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده از گام اول) مدل ارائه‌شده به‌کمک نرم‌افزار CPLEX بهینه‌سازی می‌شود. با توجه به کاهش تعداد متغیرها و محدودیت‌ها در مدل جدید، حل مدل خطی ارائه‌شده در زمان‌های پایین منطقی است.

گام سوم) پس از تعیین سایر متغیرها و مقدار تابع هدف، لازم است هر یک از جواب‌های ارائه‌شده در جمعیت اولیه ارزیابی شود و در نهایت جواب‌ها با توجه به مقدار تابع هدف برای تولید نسل بعدی انتخاب شوند. نحوه‌ی اجرای هر یک از عملگرهای ژنتیک در ادامه نشان داده می‌شود.

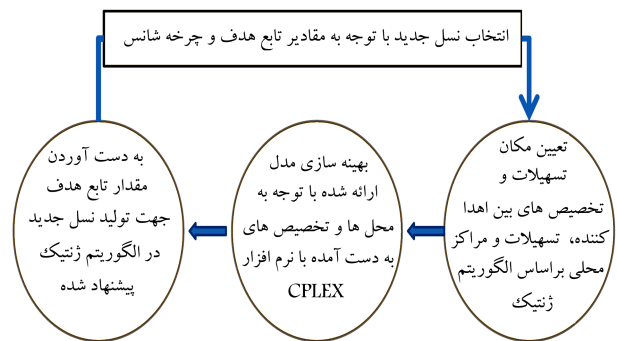
۱.۴. تشریح عملگرهای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

۱. عملگر تقاطع: به‌منظور اجرای عملگر تقاطع بر روی کروموزوم‌های جواب، تقاطع تک‌نقطه‌یی بر روی کروموزوم‌های چهارلایه‌ی والدین انجام شده است. شکل ۴ چگونگی انجام این عملگر و فرزندان تولیدشده را نشان می‌دهد.
۲. عملگر جهش: در الگوریتم ژنتیک به‌منظور جلوگیری از هم‌گرایی زودرس الگوریتم به جواب‌های بهینه‌ی محلی از عملگر جهش استفاده می‌شود. در این مقاله، به‌ازای هر یک از ژن‌های موجود در هر سطح از کروموزوم یک عدد تصادفی تولید شد و با نرخ جهش در نظر گرفته شده مقایسه شد. در صورتی‌که عدد تصادفی از نرخ جهش بیشتر باشد عدد مربوط به آن با یکی از اعداد موجود در مجموعه‌ی هم‌جنس خود جابه‌جا می‌شود (شکل ۵).
۳. انتخاب: در این مقاله، برای انتخاب یک نسل با توجه به چرخه‌ی شانس (یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌ها برای انتخاب جمعیت) استفاده شده است. بر همین

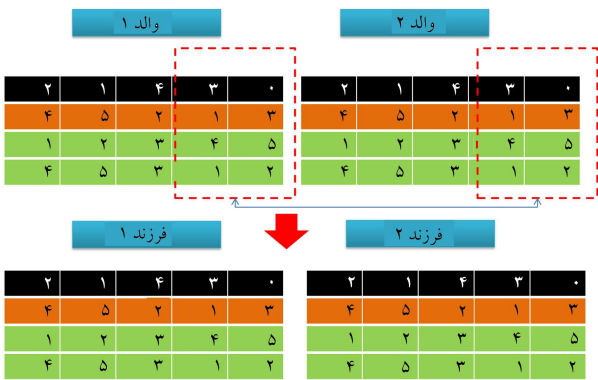
بسیار زمان‌بر است.<sup>[۲۰]</sup> از طرفی به‌این دلیل که در مدل پیشنهادشده تعداد متغیرها و محدودیت‌ها زیاد است و نیز با توجه به فضای عدم قطعیت در نظر گرفته شده، استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مدل ارائه‌شده علاوه‌بر افزایش بسیار زیاد زمان، دقت پایینی نیز خواهد داشت. بر همین اساس در این مقاله سعی شده است با ارائه‌ی یک رویکرد ترکیبی از یک الگوریتم فراابتکاری و روش ابتکاری روش حل ارائه‌شده بهبود داده شود که در ادامه رویکرد پیشنهادی که در شکل ۲ نشان داده شده است، در سه گام تشریح می‌شود.

گام اول) مکان تسهیلات و تخصیص‌ها براساس الگوریتم فراابتکاری تعیین می‌شود. الگوریتم ژنتیک روشی شناخته‌شده در بین الگوریتم‌های فراابتکاری است.<sup>[۲۱]</sup> در الگوریتم ژنتیک، هر جواب به‌عنوان یک کروموزوم شناخته می‌شود و از مجموعه‌یی از ژن‌ها تشکیل می‌شود. یک جمعیت مجموعه‌یی از جواب‌ها (کروموزوم) را شامل می‌شود. به طریقی هر یک از جواب‌ها ارزیابی می‌شوند و براساس مقادیر برازندگی آن‌ها و نیز عملگرهای ژنتیک، یک جمعیت جدید ایجاد می‌شود. در این مطالعه دو عملگر ژنتیک تقاطع و جهش مورد استفاده قرار می‌گیرد. از میان جمعیت ایجادشده به روش‌های متفاوت، جمعیت نسل بعد انتخاب می‌شوند و این چرخه تا وقوع شرط خاتمه ادامه می‌یابد. شکل ۳ این چرخه را نشان می‌دهد. از آنجایی‌که یکی از مهم‌ترین موارد در الگوریتم‌های فراابتکاری مشخص کردن نمایش جواب است، در این بررسی سعی شده است تمام مکان‌ها و تخصیص‌ها در یک کروموزوم چهارسطحی تعیین شود. شکل ۳ نمایی از یک جواب را به‌ازای یک سناریو نشان می‌دهد.

گام دوم) پس از تعیین مکان تسهیلات سیار، نحوه‌ی تخصیص اهداکننده‌ها به تسهیلات، تخصیص اهداکننده به مراکز محلی و تخصیص مرکز محلی به مراکز



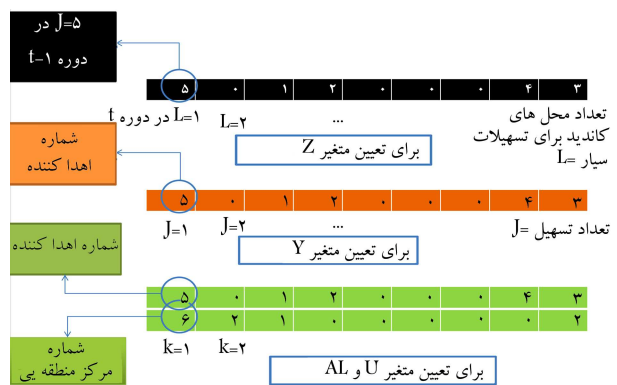
شکل ۲. رویکرد پیشنهادی برای حل مدل.



شکل ۴. نحوه‌ی اقدام عملگر تقاطع.

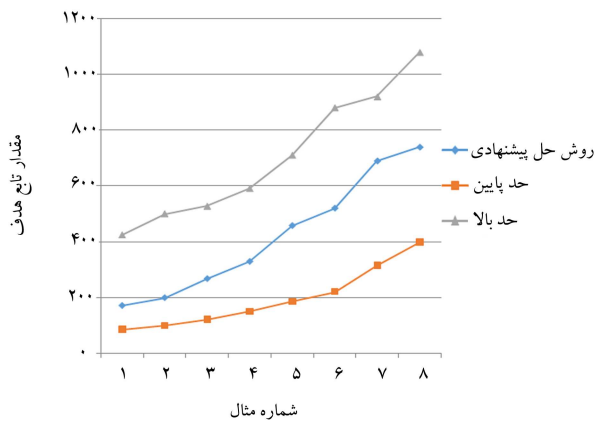


شکل ۵. نحوه‌ی اقدام عملگر جهش.

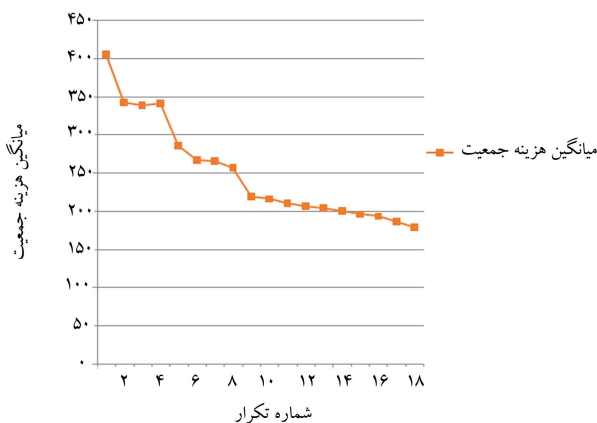


شکل ۳. نحوه‌ی نمایش کروموزومی جواب.





شکل ۶. مقایسه مقادیر تابع هدف برای مثال‌های عددی به دست آمده از روش پیشنهادی با کران‌های بالا و پایین.



شکل ۷. مقادیر در تابع هدف مثال ۱ به‌ازای تعداد تکرارها.

موجب می‌شود مسئله ساده‌تر شود. حتی اگر که این اقدام سبب نشدنی شدن جواب شود.<sup>[۲۳،۲۲]</sup> در مطالعه‌ی حاضر، محدودیت‌های ۲۱، ۳۵ و ۳۷ برای آزادسازی انتخاب شدند و مقدار تابع هدف به‌دست‌آمده پس از آزادسازی مدل به‌عنوان کران پایین در نظر گرفته شد. کران بالا نیز مقدار تابع هدف معادل با یک نقطه‌ی شدنی در فضای جواب محاسبه شد. در نمودار شکل ۷ مشاهده می‌شود که مقدار تابع هدف به‌دست‌آمده به‌ازای همه‌ی مثال‌ها به کران پایین نزدیک‌تر است که این مسئله نشان‌گر مقبولیت رویکرد پیشنهادی است.

در نتیجه‌ی محاسبات انجام‌شده مشخص شد که با افزایش تعداد تکرارها، جواب مناسب‌تری به دست می‌آید؛ مثلاً نمودار شکل ۷، این یافته را در باره‌ی مثال عددی شماره ۱ نشان می‌دهد.

به‌منظور ارزیابی رویکرد ابتکاری پیشنهادی، مثال‌های عددی با استفاده از CPLEX، الگوریتم ژنتیک نیز حل شد. مقادیر تابع هدف به‌دست‌آمده از هر یک از سه روش و نیز زمان محاسبه در جدول ۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اگرچه روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک زمان محاسبات کمتری دارد، مقادیر به‌دست‌آمده از آن اختلاف زیادی با کران پایین دارد. در مورد روش دقیق هم برای مجموعه مثال‌های ۳ به بعد در زمان ۲۴ ساعت جواب شدنی برای مسئله بر روی سیستم Intel Core i5 با CPU ۲/۲ هرتز و ۴ گیگابایت RAM حاصل نشد. به‌منظور حل مثال‌های ۴ تا ۸ از یک ابررایانه با پردازنده‌ی ۸ هسته، با ۱۶ گیگابایت RAM استفاده شد و برای مثال‌های ۷ و ۸، اجرای برنامه با خطای کمبود حافظه

جدول ۱. مشخصات مثال‌های عددی.

شماره‌ی مثال	اندازه‌ی مسئله I/J/K/R/H/P/T/S
۱	۳/۲/۲/۲/۱/۱/۲/۲
۲	۵/۴/۳/۴/۳/۳/۴/۵
۳	۸/۵/۵/۴/۵/۴/۶/۸
۴	۸/۱۰/۵/۶/۷/۴/۸/۱۰
۵	۹/۱۰/۶/۷/۷/۴/۸/۱۲
۶	۱۲/۱۲/۸/۹/۹/۴/۱۱/۱۵
۷	۱۵/۱۴/۱۱/۱۲/۴/۱۴/۱۸
۸	۲۰/۱۶/۱۵/۱۳/۴/۱۶/۲۱

اساس با توجه به مقدار تابع هدف یک بازه‌ی احتمالی به هر یک از کروموزوم‌ها داده می‌شود. بدیهی است که مقادیر احتمالی برای مقدار تابع هدف کمتر، بیشتر است. در احتمال با تولید یک عدد تصادفی، کروموزومی که بازه‌ی عددی آن شامل آن عدد تصادفی است، انتخاب می‌شود.

## ۵. نتایج محاسباتی

در این بخش نتایج محاسباتی مربوط به اعتبارسنجی مدل و رویکرد حل پیشنهادی و نیز تحلیل حساسیت با توجه به پارامترهای ورودی مدل ارائه می‌شود.

### ۱.۵. اعتبارسنجی مدل و رویکرد حل پیشنهادی

به‌منظور اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده و نیز روش حل پیشنهادی، ابتدا هشت مثال عددی با اندازه‌های مختلف به‌صورت تصادفی تولید شدند، جدول ۱ مشخصات مثال‌های عددی مورد استفاده را نشان می‌دهد. به‌منظور ایجاد سناریوهای مختلف، برای هر یک از پارامترهای غیرقطعی مدل، که در بخش ۱.۳ معرفی شدند به جز تقاضا، یک توزیع یکنواخت در نظر گرفته می‌شود (برای تقاضا، توزیع نرمال در نظر گرفته می‌شود) و به تعداد سناریوهای لازم، اعداد تصادفی در بازه‌ی مربوطه تولید می‌شود.

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی در مقاله‌ی حاضر، بررسی‌های زیر انجام می‌گیرد:

- برای هر یک از ۸ مثال عددی تولیدشده، یک کران بالا و یک کران پایین محاسبه می‌شود و جواب به‌دست‌آمده از طریق الگوریتم حل پیشنهادی با آن‌ها مقایسه می‌شود.
- نتایج به‌کارگیری رویکرد پیشنهادی از منظر مقدار تابع هدف و زمان حل با جواب به‌دست‌آمده از طریق الگوریتم ژنتیک و نیز CPLEX مقایسه می‌شود.
- از آنجایی‌که مقاله‌ی حاضر، توسعه‌ی بی‌مقاله‌ی فهمیم‌نیا و همکاران<sup>[۲۹]</sup> محسوب می‌شود، نتایج به‌کارگیری الگوریتم حل پیشنهادی برای مثال‌های عددی ارائه‌شده با رویکرد پیشنهادی فهمیم‌نیا و همکاران<sup>[۲۹]</sup> نیز مقایسه می‌شود.

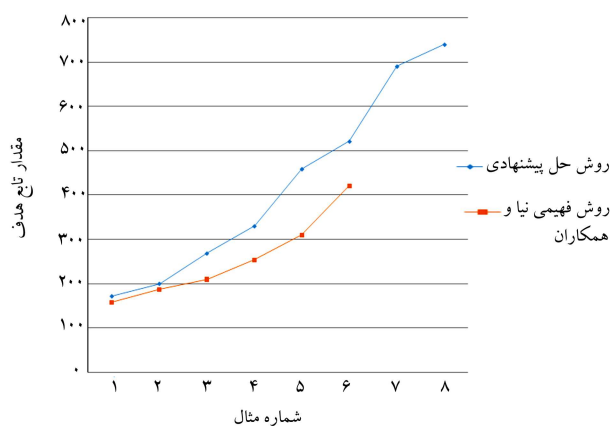
نمودار شکل ۶ میزان تابع هدف به‌دست‌آمده از طریق رویکرد پیشنهادی در مقایسه با کران بالا و پایین مربوط به تابع هدف هر یک از مثال‌های عددی را نمایش می‌دهد. یک کران پایین از طریق آزادکردن تعدادی از محدودیت‌ها به‌دست می‌آید که

جدول ۲. مقایسه‌ی روش پیشنهادی با روش‌های دقیق و GA برای مثال‌های عددی ارائه‌شده.

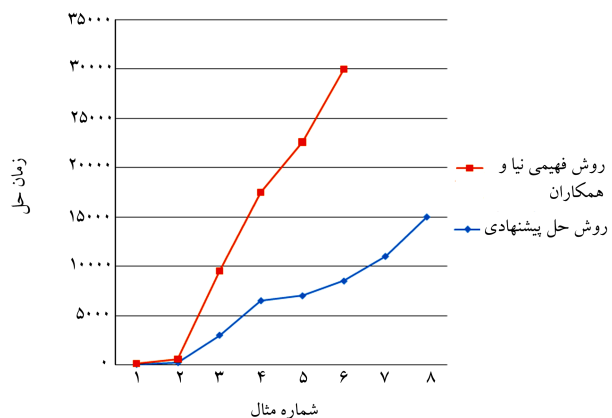
شماره‌ی مثال	اندازه‌ی مسئله I/J/K/R/H/P/T/S	روش ابتکاری		روش دقیق		روش GA		روش فهیمی نیا و همکاران [۲۹]	
		مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)
۱	۲/۲/۱/۱/۲/۲/۲/۳	۱۷۲,۱۲*	۵۰	۱۷۲,۱۲	۵۰۰	۲۲۰,۶۹	۳۵	۱۷۲,۱۲	۷۵
۲	۵/۴/۳/۳/۴/۳/۴/۵	۲۰۰,۲۳	۲۲۰	۱۹۱,۱۳	۷۵۰	۲۲۱,۹۶	۱۸۵	۱۹۸,۶۳	۳۵۰
۳	۸/۶/۴/۵/۴/۵/۵/۸	۲۶۸,۵۸	۳۰۰۰	۲۱۲,۳۶	۷۰۰۰	۳۵۴,۸۹	۲۲۰۰	۲۱۰,۳۶	۶۵۰۰
۴	۱۰/۸/۴/۷/۶/۵/۱۰/۸	۳۳۰,۱۲	۶۵۰۰	۲۲۶,۳۱	۱۴۵۰۰	۳۸۶,۲۳	۴۱۵۰	۲۵۴,۳۶	۱۱۰۰۰
۵	۱۲/۸/۴/۷/۷/۶/۱۰/۹	۴۵۹,۰۱	۷۰۰۰	۳۰۱,۵۴	۴۵۰۰۰	۴۴۶,۵۶	۵۶۰۰	۳۱۰,۲۵	۱۵۶۰۰
۶	۱۵/۱۱/۴/۹/۸/۱۲/۱۲	۵۲۱,۳۲	۸۵۰۰	۴۱۱,۵۲	۶۰۰۰۰	۵۲۳,۴۶	۶۰۰۰	۴۲۱,۳۶	۲۱۵۰۰
+۷	۱۸/۱۴/۱۴/۱۲/۱۱/۱۴/۱۵	۶۹۰,۶۶	۱۱۰۰۰	۵۸۹,۳۱	۸۸۰۰۰	۶۰۱,۲۲	۹۵۰۰	-	-
۸	۲۱/۱۶/۴/۱۳/۱۵/۱۶/۲۰	۷۴۰,۰۳	۱۵۰۰۰	۷۶۵,۹۶	۹۳۰۰۰	۸۳۶,۴۹	۱۱۱۵۰	-	-

\* هزینه‌ها ضرب در ۱۰۰۰۰۰۰ می‌شوند.

+ برای مثال ۷ و ۸ در روش دقیق، جواب با شکاف ۵ درصد حاصل شد.



شکل ۸. مقادیر تابع هدف برای مثال‌های عددی با روش ابتکاری پیشنهادی و فهیمی نیا و همکاران [۲۹].



شکل ۹. زمان حل برای مثال‌های عددی با روش ابتکاری پیشنهادی و فهیمی نیا و همکاران [۲۹].

روبرو شد و در مدت زمان نشان داده شده در جدول ۲، جواب‌ها با شکاف ۰.۵٪ حاصل شد.

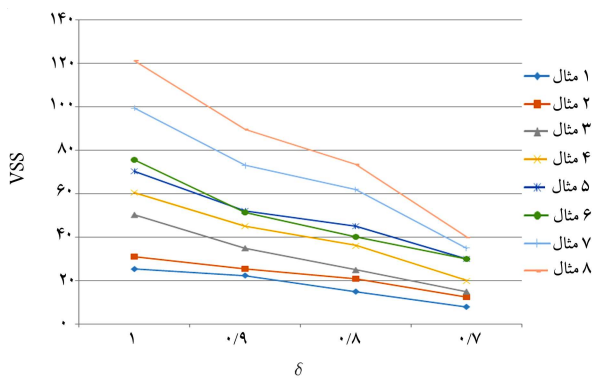
همچنین به‌منظور مقایسه‌ی رویکرد پیشنهادی با مطالعات مشابه در این حوزه، مثال‌های عددی تولیدشده در این مقاله با روش ارائه‌شده در فهیمی نیا و همکاران [۲۹] (یک روش حل دقیق بر مبنای آزادسازی لاگرانژ) نیز حل شد. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، زمان حل روش [۲۹] به‌ازای مثال‌های با اندازه‌ی کوچک در مقایسه با روش پیشنهادی در این مقاله پایین‌تر است و همچنین مقادیر تابع هدف نزدیک‌تری به کران پایین به‌دست می‌دهد. اما با افزایش اندازه‌ی مسئله، رویکرد ابتکاری پیشنهادی در مقاله‌ی حاضر از نظر زمان حل دارای مزیت بالاتری است. اگرچه جواب‌های روش [۲۹] در مقایسه با رویکرد ابتکاری کمتر هستند، با توجه به افزایش زمان حل، این میزان اختلاف معنادار نخواهد بود. در مورد مثال‌های ۷ و ۸ در مدت زمان ۱۲ ساعت جوابی برای مسئله با روش فهیمی نیا و همکاران [۲۹] حاصل نشد. از آنجایی‌که تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی باید سریع انجام گیرد، زمان بیش‌تری برای دست‌یابی به جواب در نظر گرفته نشد. نمودارهای شکل‌های ۸ و ۹ به‌ترتیب زمان حل و میزان تابع هدف را برای هر یک از مثال‌های عددی برای دو روش مورد مقایسه نشان می‌دهند.

## ۲.۵. تحلیل حساسیت

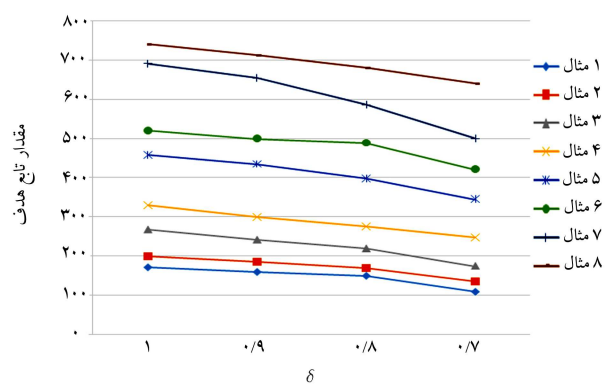
در این بخش، آزمایش‌هایی به‌منظور تعیین میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر نتایج و نیز ارزیابی بهره‌گیری از رویکرد دومرحله‌ی تصادفی در مقایسه با رویکرد مقدار میانگین انجام می‌گیرد. نتایج نشان دادند که با افزایش سطح اطمینان در تأمین تقاضا ( $\delta$ ) و همچنین افزایش در میزان دور ریز خون پس از آزمایش‌ها ( $\alpha$ ) و نرخ فساد در نتیجه‌ی حمل‌ونقل ( $\gamma$ ) میزان هزینه‌ها و نیز تعداد تسهیلات سیار به‌منظور تأمین نیاز افزایش می‌یابد. به‌عنوان نمونه، جدول ۳ اثر تغییر مقادیر پارامترهای  $\alpha$ ،  $\gamma$  و  $\delta$  را بر تابع هدف و تعداد تسهیلات سیار لازم برای مثال عددی ۵ را نشان می‌دهد. برای

جدول ۳. تأثیر تغییر پارامترهای  $\alpha, \gamma, \delta$  بر تابع هدف و تعداد تسهیلات سیار در مثال ۵.

تغییر هدف	۰,۸				۰,۶				۰,۴				۰,۲				تعداد سیار
	۰	۰,۲	۰,۴	۰,۸	۰	۰,۲	۰,۴	۰,۸	۰	۰,۲	۰,۴	۰,۸	۰	۰,۲	۰,۴	۰,۸	
۱۴۲۶,۳۶	۱۳۸۵,۲۴	۱۲۵۰,۰۵	۱۱۱۴,۳۲	۱۰۱۰,۳۵	۹۰۰,۴۵	۸۸۶,۳۳	۸۲۱,۴۱	۷۴۶,۲۱	۷۰۰,۶۹	۶۸۹,۲۵	۶۴۰,۳۲	۷۹۰,۱۲	۷۹۹,۳۲	۷۹۹,۳۲	۷۹۹,۳۲	۷۹۹,۳۲	۱۹
۱۴۲۶,۳۶	۱۳۸۵,۲۴	۱۲۵۰,۰۵	۱۱۱۴,۳۲	۱۰۱۰,۳۵	۹۰۰,۴۵	۸۸۶,۳۳	۸۲۱,۴۱	۷۴۶,۲۱	۷۰۰,۶۹	۶۸۹,۲۵	۶۴۰,۳۲	۷۹۰,۱۲	۷۹۹,۳۲	۷۹۹,۳۲	۷۹۹,۳۲	۷۹۹,۳۲	۱۹
۱۴۱۲,۳۲	۱۳۶۰,۲۱	۱۰۵۰,۳۶	۹۹۵,۲۱	۹۷۸,۲۲	۹۳۲,۱۴	۸۸۰,۳۲	۸۰۰,۲۲	۶۹۹,۲۱	۶۸۰,۳۱	۶۴۱,۰۹	۵۹۸,۳۵	۷۱۰,۳۱	۷۷۸,۰۱	۷۷۸,۰۱	۷۷۸,۰۱	۷۷۸,۰۱	۱۸
۱۳۵۱,۲۳	۱۳۳۰,۲۵	۱۰۰۰,۰۸	۹۹۰,۸۷	۹۶۵,۴۱	۹۱۲,۵۶	۸۸۰,۸۹	۸۵۶,۸۸	۷۹۴,۴۱	۶۶۲,۲۲	۶۷۵,۰۶	۵۸۴,۰۰	۶۹۲,۲۵	۷۷۰,۰۸	۷۷۰,۰۸	۷۷۰,۰۸	۷۷۰,۰۸	۱۶
۱۱۵۰,۶۵	۱۰۰۰,۲۳	۹۹۰,۵۶	۹۶۲,۲۶	۹۴۵,۶۸	۹۰۰,۱۴	۷۹۸,۲۲	۷۴۵,۸۹	۶۶۶,۶۶	۶۱۵,۴۵	۶۰۰,۳۹	۵۸۷,۹۶	۶۹۸,۲۵	۷۱۰,۳۵	۷۱۰,۳۵	۷۱۰,۳۵	۷۱۰,۳۵	۱۵



شکل ۱۱. مقادیر VSS برای مثال‌های عددی ( $\gamma = 0.1, \alpha = 0.1$ ).



شکل ۱۰. مقادیر VSS برای مثال‌های عددی ( $\gamma = 0.2, \alpha = 0.2$ ).

برای بررسی مزیت برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای است. VSS به صورت زیر فرمول‌سازی می‌شود:

$$VSS = z_{EEV} - z_{HN} \quad (44)$$

به طوری که  $z_{EEV}$  و  $z_{HN}$  به ترتیب بیانگر مقادیر توابع هدف، تحت رویکرد ارزش میانگین و رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی هستند. شکل ۱۱ نتایج محاسبه‌ی VSS

سایر مثال‌ها نیز نتایج مشابهی حاصل شد. شکل ۱۰ نتیجه‌ی تغییر پارامتر  $\delta$  بر تمام مثال‌های عددی را نشان می‌دهد. در بررسی انجام گرفته، کمینه‌ی سطح تأمین ۷۰ درصد در نظر گرفته شده است.

معیارهای متعددی برای ارزیابی رویکردهای مبتنی بر سناریو وجود دارد. ارزش جواب تصادفی (VSS) معرفی شده توسط بریج، یکی از معیارهای رایج

تقاضا در زمان استاندارد است. اگرچه که تأمین تمام تقاضا در اولویت قرار دارد اما در واقعیت این امر ممکن است در زمان مورد نظر و لازم امکان پذیر نباشد؛ به این دلیل، در این مقاله محدودیت‌های مربوط به تأمین تقاضا به صورت احتمالی در نظر گرفته شد. حل مدل به منظور تصمیم‌گیری در کوتاه‌ترین زمان ممکن و با دقت قابل قبول خود حائز اهمیت است. بنابراین برای حل مدل ارائه شده از یک روش حل ابتکاری استفاده شد. ابتدا تمام تخصیصات لازم بر اساس الگوریتم ژنتیک انجام شد و سپس مدل دقیق مسئله با محدودیت‌ها و متغیرهای کم‌تر با استفاده از نرم‌افزار CPLEX حل شد. رویکرد حل پیشنهادی برای هشت مجموعه مثال عددی مقایسه شد. با استفاده از مجموعه‌ی مثال‌ها، کارایی مدل و روش حل معرفی شده بررسی شد. همچنین رویکرد پیشنهادی برای اندازه‌های مختلف با رویکرد ارائه شده توسط فهم‌نیا و همکاران<sup>[۲۹]</sup> مقایسه و نشان داده شد که روش حل ابتکاری پیشنهادی در این مقاله برای مسائل با اندازه‌های بزرگ در مدت زمان کوتاه‌تری به جواب مقبول دست پیدا می‌کند. به منظور مطالعات آتی می‌توان، مدل ارائه شده را با توجه نحوه‌ی حمل‌ونقل و مسیریابی تسهیلات سیار در شرایط بحران که ممکن است راه‌های ارتباطی یا هر کدام از مراکز دچار اختلال باشند، گسترش داد.

برای مثال‌های عددی بر اساس مقادیر  $\delta$  را نشان می‌دهد. نتایج گویای آن است که در مقادیر بالاتر  $\delta$  (سطح اطمینان از تأمین تقاضا)، ارزش استفاده از رویکردهای برنامه‌ریزی تصادفی حائز اهمیت است.

## ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی زنجیره‌ی تأمین فرآورده‌های خونی توسعه داده شد. در مطالعه‌ی حاضر، مدل ارائه شده توسط فهم‌نیا و همکاران<sup>[۲۹]</sup> گسترش داده شد و با اضافه کردن مفروضاتی مدل برای کاربرد در مسائل واقعی مناسب‌تر شد. در این مطالعه، یک زنجیره‌ی تأمین چهار-سطحی متشکل از اهداکنندگان، مراکز محلی، مراکز منطقه‌ی، تسهیلات سیار و بیمارستان‌ها بررسی شد. فرض شد که تقاضای بیمارستان‌ها در صورت لزوم قابل تأمین از طریق سایر بیمارستان‌ها نیز باشد. به منظور طراحی یک مدل واقع‌بینانه در مراحل مختلف درصدی از خون به دلایلی از جمله فساد یا حمل‌ونقل نامناسب از چرخه‌ی تأمین و انتقال حذف شد. هدف مدل ارائه شده کمینه‌کردن همه‌ی هزینه‌های زنجیره با توجه به تأمین بیشینه‌ی

## پانوشت

1. value of the stochastic solution

## منابع (References)

1. Sha, Y. and Huang, J. "The multi-period location-allocation problem of engineering emergency blood supply systems", *Systems Engineering Procedia*, **5**, pp. 21-28 (2012).
2. Mete, H.O. and Zabinsky, Z.B. "Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management", *International Journal of Production Economics*, **126**, pp. 76-84 (2010).
3. Starr, M.K., Van Wassenhove, L.N. "Introduction to the special issue on hum operations and crisis management", *Production and Operations Management*, **23**, pp. 925-937 (2014).
4. Cohen, M.A. and Pierskalla, W.P. "Management policies for a regional blood bank", *Transfusion*, **15**(1), pp. 57-67 (1975).
5. Beliën, J. and Forcé, H. "Supply chain management of blood products: A literature review", *Operational Research*, **217**(1), pp. 1-16 (2012).
6. DHHS, *The 2011 National Blood Collection and Utilization Survey Report*, Washington, DC: Department of Health and Human Services (2013).
7. Gerberding, J.L., Falk, H., Arias, I. and Hunt, R.C., *In a Moment's Notice: Surge Capacity for Terrorist Bombings*, U.S. Department of Health and Human Sciences, Atlanta, Georgia (2007).
8. Arvan, M., Tavakkoli-Moghaddama, R. and Abdollahi, M. "Designing a bi-objective, multi-product supply chain network for blood supply", *Uncertain Supply Chain Management*, **3**, pp. 57-68 (2015).
9. Yongming, Z. "A brief introduction to American blood taking system", *Clinical Transfusion and Inspection*, **1**(3), pp.56-72 (1999).
10. Anli, L., Yangpei, Z. and Quanli, W. "An experience on studying the American blood transfusion research", *Chinese Journal of Blood Transfusion*, **13**(4), pp.539-543 (2000).
11. Da, C., Yan, C. and Yingchun, C. "An analysis on the inventory management of blood scheduling after Wen Chuan Earthquake", *Chinese Journal of Blood Transfusion*, **21**(8), pp.180-200 (2008).
12. Hao, Y., Yan, C., Shurong, W., Qun, W. and Jianyun, L. "A method on blood supply in an emergency", *Chinese Journal of Blood Transfusion*, **19**(1), pp. 93-94 (2008).
13. Cheng, L., Bin, S., Weixing, W. and Min, Y. "An introduction to the research of the blood security system in an emergency", *People's Military Surgeon*, **51**(3), pp.491-498 (2008).
14. Daskin, M., Coullard, C. and Shen, Z.-J. "An inventory-location model: Formulation, solution algorithm and computational results", *Annals of Operations Research*, **110**, pp. 83-106 (2002).
15. Shen, Z.-J.M., Coullard, C. and Daskin, M.S. "A Joint location-inventory model", *Transportation Science*, **37**, pp. 40-55 (2003).

16. Şahin, G., Süral, H. and Meral, S. "Locational analysis for regionalization of Turkish Red Crescent blood services", *Computers and Operations Research*, **34**, pp. 692-704 (2007).
17. Zhou, D., Leung, L.C. and Pierskalla, W.P. "Inventory management of platelets in hospitals: Optimal inventory policy for perishable products with regular and optional expedited replenishments", *Manuf and Serv Oper Manag*, **13**(4), pp. 420-438 (2011).
18. Alfonso, E., Xie, X. and Augusto, V. "Modeling and simulation of blood collection systems", *Health Care Manag. Sci.*, **15**(1), pp. 63-78 (2012).
19. Vafa Arani, H. and Bozorgi-Amiri, A. "A dynamic multi-objective model for location-allocation problem in emergency network design for blood supply", *Iran University of Science and Technology Magazine*, **35**, pp.695-707 (2013).
20. Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B. and Seuring, S. "Dynamic supply chain network design for the supply of blood in disasters: A robust model with real world application", *Transportation Research Part E.*, **70**, pp. 244-255 (2014).
21. Zahiri, B., Mousazadeh, M. and Bozorgi-Amiri, A. "A robust stochastic programming approach for blood collection and distribution network design", *Int. J. Research in Industrial Engineering*, **3**(2), pp. 1-11 (2014).
22. Cheraghi, S. and Hosseini-Motlagh, S.M. "Optimal blood transportation in disaster relief considering facility disruption and route reliability under uncertainty", *Int. J. Transp. Eng.*, **4**(3), pp. 225-254 (2017).
23. Fereiduni, M. and Shahanaghi, K. "A robust optimization model for blood supply chain in emergency situations", *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, **7**(4), pp. 535-554 (2016).
24. Kohneh, J.N., Teymoury, E. and Pishvae, M.S. "Blood products supply chain design considering disaster circumstances (Case study: Earthquake disaster in Tehran)", *J. Ind. Syst. Eng.*, **9**, pp. 51-72 (2016).
25. Zahiri, B. and Pishvae, M.S. "Blood supply chain network design considering blood group compatibility under uncertainty", *Int. J. Prod. Res.*, **7543**, pp. 1-21 (2016).
26. Dillon, M., Oliveira, F. and Abbasi, B. "A two-stage stochastic programming model for inventory management in the blood supply chain", *Int. J. Prod. Econ.*, **187**, pp. 27-41 (2017).
27. Ensafian, H. and Yaghoubi, S. "Robust optimization model for integrated procurement, production and distribution in platelet supply chain", *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, **103**, pp. 32-55 (2017).
28. Ensafian, H., Yaghoubi, S. and Modarres Yazdi, M. "Raising quality and safety of platelet transfusion services in a patient-based integrated supply chain under uncertainty", *Comput. Chem. Eng.*, **106**, pp. 355-372 (2017).
29. Fahimnia, B., Jabbarzadeh, A., Ghavamifar, A. and Bell, M. "Supply chain design for efficient and effective blood supply in disasters", *Intern. Journal of Production Economic*, **183**, pp. 700-709 (2015).
30. Hinojosa, Y., Kalcsics, J., Nickel, S., Puerto, J. and Velten, S. "Dynamic supply chain design with inventory", *Computers and Operations Research*, **35**, pp. 373-391 (2008).
31. Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Reading MA: Adison Wesley (1989).
32. Fisher, M.L. "The Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems", *Management Science*, **50**, pp. 1861-1871 (2004).
33. Fakhrzad, M.B. and Sadri Sfahani, A. "Modeling the time windows vehicle routing problem in cross-docking strategy using two meta-heuristic algorithms", *International Journal of Engineering-Transactions A: Basics*, **27**(7), pp. 1113-1126 (2013).