چشم‌انداز مدیریت صنعتی
سال نهم، شماره ۳۶، زمستان ۱۳۹۸
شاپا چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵
ص‌ص ۴۰ – ۹

طراحی شبکه زنجیره تأمین یکپارچه خون تحت شرایط عدم‌قطعیت با درنظرگرفتن انتقالات جانبی

منصور دودمان*، علی بزرگی امیری**

چکیده

یکی از کلیدی‌ترین بخش‌های یک سیستم سلامت، زنجیره تأمین خون است که سهم زیادی از هزینه‌های این سیستم را به خود اختصاص داده است؛ بنابراین هرگونه پیشرفتی در عملکرد زنجیره تأمین خون می‌تواند به‌طور چشمگیری به بهبود کارایی و صرفه‌جویی در هزینه‌های سیستم‌های سلامت بیانجامد. در این پژوهش، یک مدل دوهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین خون با هدف کاهش هزینه تأسیس تسهیلات ثابت و موقت، هزینه‌های انتقال فرآورده‌های خونی و حداقل‌کردن حداکثر میزان کمبود ارائه شده است. با توجه به عدم‌قطعیت‌های موجود در عرضه و تقاضا، برای مقابله با کمبود و افزایش سطح پاسخگویی، انتقالات جانبی بین بیمارستان‌ها در نظر گرفته شده است. مدل غیرقطعی به کمک روش فازی خیمنز به مدل قطعی تبدیل شده و در ادامه مدل دوهدفه با استفاده از روش ترابی و حسینی، به مدل تک‌هدفه تبدیل شده است. نتایج محاسباتی حاصل از مدل نشان می‌دهد در مدل فازی به‌دلیل وجود α-cut، مدل انعطاف‌پذیرتر شده؛ درحالی‌که در شرایط قطعیت، به‌دلیل قطعی‌بودن مقادیر پارامترها، اجازه انعطاف‌پذیری به مقادیر پارامترهای مدل داده نمی‌شود. مدل فازی علاوه بر نزدیک‌بودن به محیط واقعی، سبب می‌شود مدیران با توجه به عدم‌قطعیت موجود بر اساس میزان درجه مطلوبیت لازم اقدام به تصمیم‌گیری کنند.

کلیدواژه‌ها: مدیریت زنجیره تأمین خون؛ مکان‌یابی ـ تخصیص؛ عدم قطعیت؛ برنامه‌ریزی امکانی؛ انتقالات جانبی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۲۶.

* کارشناسی ارشد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.
** دانشیار، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول).
E-mail: alibozorgi@ut.ac.ir

۱. مقدمه

خون انسان یک منبع کمیاب است که فقط به‌وسیله خود انسان تولید می‌شود و در حال حاضر هیچ محصول یا فرآیند شیمیایی دیگری نیست که جایگزین آن شود. تأمین خون سالم و کافی موردنیاز بیمارستان‌ها و مدیریت آن در شرایط عادی، بحرانی چالشی است که سیستم سلامت دولت‌ها همیشه با آن مواجه هستند. نیاز به اهداکنندگان خون و فرآورده‌های آن همیشه وجود خواهد داشت؛ درحالی‌که عرضه آن از سوی اهداکنندگان تا حدودی نامنظم و تقاضا برای فرآورده‌های خونی اغلب تصادفی است [۳۴]. تطبیق عرضه و تقاضا به شیوه‌ای کارآمد درباره این محصول کار چندان ساده‌ای نیست. خون و فرآورده‌های خونی، محصولاتی فاسدشدنی هستند که این کار را مشکل‌تر می‌کند. کمبود خون هزینه‌های بالایی را برای جامعه به همراه می‌آورد، زیرا باعث افزایش نرخ مرگ‌ومیر می‌شود [۲۱]؛ بنابراین طراحی یک زنجیره تأمین مناسب برای تأمین خون موردنیاز، موضوعی است که باید به آن توجه کرد. در زنجیره تأمین خون، تأمین‌کنندگان، اهداکنندگانی هستند که به‌طور داوطلب با مراجعه به یکی از پایگاه‌های اهدای خون، اقدام به خون‌دهی می‌کنند. واحدهای خونی به‌دلیل فسادپذیری‌شان به مراکز جمع‌آوری و نگه‌داری منتقل می‌شوند و پس از انجام آزمایش‌های لازم در بانک خون به‌طور موقتی نگهداری و سپس بر حسب نیاز به دست مصرف‌کنندگان (بیمارستان‌ها و مراکز بهداشتی ـ درمانی) می‌رسند.

به‌طورکلی برنامه‌ریزی، مدیریت و کنترل عملیات یک زنجیره تأمین در مدیریت زنجیره تأمین صورت می‌گیرد. عملکرد یک زنجیره تأمین به‌شدت به طراحی شبکه آن زنجیره تأمین وابسته است و در طراحی شبکه زنجیره تأمین، عمدتاً در خصوص مواردی چون تعداد و مکان بهینه تسهیلات، نحوه تخصیص آن‌ها و نیز ظرفیت بهینه آن‌ها با هدف بهبود هزینه و کارایی زنجیره تصمیم‌گیری می‌شود. ازآنجاکه سیستم‌های سلامت، به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه از جمله ایران با مشکل افزایش هزینه مواجه هستند و بخش زیادی از هزینه‌های سیستم سلامت متوجه زنجیره تأمین خون است، هر گونه بهبود در کارایی و عملکرد این زنجیره موجب صرفه‌جویی در هزینه‌ها و رضایت مصرف‌کنندگان می‌شود؛ بنابراین این پژوهش به‌دنبال بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین خون[1] به‌عنوان بخش کلیدی در زنجیره تأمین سلامت است [۲۸].

در این پژوهش مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوهدفه به‌منظور یکپارچه‌سازی شبکه زنجیره تأمین خون از مرحله دریافت خون از اهداکنندگان تا توزیع خون بین بیمارستان‌ها ارائه شده است. مدل ریاضی دوهدفه پیشنهادی، به‌طور هم‌زمان، علاوه بر حداقل‌کردن هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین، حداکثر میزان کمبود را حداقل می‌کند؛ همچنین با توجه به اینکه میزان تقاضا و اهدای خون قطعی نیست، پارامترهای مرتبط با تقاضا، هزینه و اهدای خون نیز به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده

1. Blood supply chain network

است و از روش برنامه‌ریزی امکانی خیمنز به‌منظور برخورد با عدم‌قطعیت بهره گرفته شده و مدل دوهدفه با استفاده از روش ترابی و حسینی به مدل تک‌هدفه تبدیل شده است. در این مطالعه به‌منظور افزایش سطح پاسخگویی به تقاضای موردنیاز بیمارستان‌ها و مقابله با بروز کمبود، به‌علت نبود موجودی در بیمارستان‌ها، بین بیمارستان‌ها ارتباطات جانبی در نظر گرفته شده است؛ به‌طوری‌که در صورت بروز کمبود در یکی از بیمارستان‌ها، میزان خون موردنیاز می‌تواند از سایر بیمارستان‌ها که دارای موجودی اضافی هستند، تأمین شود. نوآوری‌های مقاله به‌صورت خلاصه در ادامه ارائه شده است:

۱. ارائه یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط با دو هدف برای تعیین مکان‌های بهینه تسهیلات جمع‌آوری خون (سیار و محلی) در طول افق برنامه‌ریزی چنددوره‌ای؛

۲. درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در میزان عرضه، تقاضای خون و هزینه‌ها و به‌کارگیری برنامه‌ریزی فازی امکانی به‌منظور مدل‌سازی عدم‌قطعیت؛

۳. طراحی شبکه یکپارچه زنجیره تأمین خون با درنظرگرفتن امکان ارسال واحدهای خونی بین مراکز درمانی (بیمارستان‌ها).

ادامه مقاله به این‌صورت است که در بخش دوم، مبانی نظری موجود در حوزه زنجیره تأمین خون بررسی می‌شود. در بخش سوم، مدل توسعه‌داده‌شده معرفی خواهد شد. در بخش چهارم، مدل چندهدفه به مدل تک‌هدفه تبدیل شده و روش برنامه‌ریزی امکانی خیمنز تشریح می‌شود. در بخش پنجم، مثال عددی و نتایج ارائه شده و درنهایت در بخش آخر نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی ذکر خواهد شد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

زنجیره تأمین خون، فرآیند جمع‌آوری، آزمایش، فرآوری و توزیع خون و محصولات خون از اهداکننده تا دریافت‌کننده را دربرمی‌گیرد. مطالعه درباره مدیریت زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی به‌طور کلی و فرآورده‌های خونی به‌طور خاص، توسط ون زایل و گیدئون (۱۹۶۴) شد [۳۴]. جاکوب و همکاران (۱۹۹۶)، پژوهشی در مورد مدل مکان‌یابی ـ تخصیص تسهیلات در زنجیره تأمین خون و مکان‌یابی مجدد و پیکربندی شبکه و تسهیلات ارائه دادند [۱۸]. در پژوهش سیام و کوته (۲۰۱۰) در سیستم‌های سلامت، آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مکان‌یابی ـ تخصیص را برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سیستم‌های سلامت با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های کل توسعه دادند و برای حل از روش فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید استفاده کردند [۳۱]. در پژوهش ناگرنی و معصومی (۲۰۱۲) که شبکه زنجیره تأمین خون مدنظر و استفاده‌شده در پژوهش حاضر بسیار شبیه شبکه خون مطرح‌شده در آن است، پژوهشگران مدلی غیرقطعی برای طراحی/ بازطراحی شبکه پایدار خون توسعه دادند. هزینه‌های مرتبط با کمبود و یا اضافی‌بودن

مقدار سفارش و همچنین هزینه‌های انهدام در مطالعه آن‌ها در نظر گرفته شده است [۲۳]. بحث زنجیره تأمین خون در شرایط بحران نیز در پژوهش فهیم‌نیا و همکاران در نظر گرفته شده است. آن‌ها یک مدل دوهدفه تصادفی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین ارائه دادند و از روش ترکیبی محدودیت اپسیلون و آزادسازی لاگرانژ برای حل مدل ارائه‌شده استفاده کردند [۷]. رایس و ویانا (۲۰۱۱) یک مقاله مروری در مورد کاربرد تحقیق در عملیات در مسائل مختلف مربوط به سیستم‌های سلامت ارائه دادند و مطالعات انجام‌شده در این حوزه‌ها را دسته‌بندی کردند [۲۵]. بلین و فورس (۲۰۱۲) در مقاله مروری خود پژوهش‌های پیشین در زمینه زنجیره تأمین خون را بررسی کردند. آن‌ها به بررسی و دسته‌بندی مبانی نظری مرتبط با موجودی و مدیریت زنجیره تأمین خون از دیدگاه‌های مختلفی مانند بررسی نوع محصولات خونی، روش‌های حل، نوع رویکرد و موارد دیگر پرداختند [۳]. جدیدترین مقاله مروری توسط اوسوریو و همکاران (۲۰۱۵) ارائه شد که در آن، زنجیره تأمین محصولات خونی به‌طور جامع و کاملی بررسی شد تا بتوانند مطالعات آینده و شکاف‌های پژوهشی را نشان دهند [۲۴].

در مدل برنامه‌ریزی غیرخطی آرمانی باینری ارائه‌شده توسط ستین و سورال (۲۰۰۹) ، سه هدف برای مدل ریاضی ارائه‌شده در نظر گرفته شده است که عبارت‌اند از: ۱. کمینه‌کردن هزینه‌های کل؛
۲. کمینه‌کردن فاصله بین نقاط تقاضا و مراکز عرضه خون و فرآورده‌های خونی و ۳. کمینه‌کردن تفاوت بین منابع [۵]. شن و همکاران (۲۰۰۳) یک مدل ریاضی غیرخطی که در آن مطالعه با دید مکان‌یابی ـ موجودی در زنجیره تأمین خون صورت گرفته بود را توسعه دادند که تعیین مکان‌های بهینه تأسیس مراکز توزیع و تعیین سطح موجودی به‌عنوان دو تابع هدف در مدل گنجانده شد [۳۲]. شاهین و همکاران (۲۰۰۷) با ارائه یک مدل ریاضی عدد صحیح، مسئله مکان‌یابی ـ تخصیص بانک‌های خونی در ترکیه را با استفاده از داده‌های واقعی بررسی کردند [۲۹].

زهیری و پیشوایی (۲۰۱۷) با ارائه یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط دوهدفه در زمینه طراحی زنجیره تأمین خون، سازگاری بین گروه‌های خونی را نیز در کار خود در نظر گرفتند. به‌خاطر وجود شرایط عدم‌قطعیت در برخی پارامترهای مدل، آن‌ها از دو روش جدید استوار امکانی در مدل ریاضی خود استفاده کردند و درنهایت با استفاده از یک مطالعه موردی نشان دادند که فاصله زیادی از نظر هزینه، در مقایسه با شبکه زنجیره تأمین خون فعلی وجود دارد [۳۵]. زهیری و همکاران (۲۰۱۵)، با ارائه یک مدل ریاضی عدد صحیح تک‌هدفه (کمینه‌کردن هزینه‌های کلی) به بحث جمع‌آوری خون از اهداکنندگان از طریق پایگاه‌های ثابت و سیار خون پرداختند. به‌علت وجود عدم‌قطعیت در برخی از پارامترها از رویکرد استوار امکانی استفاده شد. سطوح تصمیم‌گیری در این پژوهش شامل تصمیم‌های استراتژیک، نظیر تأسیس مراکز ثابت جمع‌آوری خون و همچنین در حوزه تصمیم‌های تاکتیکال بود و به تخصیص بهینه بین اهداکنندگان و مراکز سیار و ثابت خون

پرداخته شد. در یک مطالعه موردی در شهر بابل تحلیل حساسیت روی پارامترهای مدل صورت گرفته و تحلیل نتایج ارائه شده است [۱۴]. گونپینار و سنتنو (۲۰۱۵) با ارائه یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح تک‌هدفه، توجه زیادی را به فرآورده‌های خونی، نظیر پلاکت و گلبول‌های قرمز، معطوف کردند و هدف پژوهش را بر کمینه‌کردن هزینه کل و همچنین سطح کمبود و اتلاف فرآورده‌های خونی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که نرخ اتلاف محصولات خونی از ۲۰ درصد به حدود ۳ درصد می‌رسد [۱۰]. شا و هوانگ (۲۰۱۲) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح را برای مکان‌یابی ـ تخصیص تسهیلات بانکی خون در یک سیستم چنددوره‌ای ارائه دادند و برای حل آن از الگوریتم آزادسازی لاگرانژ استفاده کردند. برای اعتبارسنجی مدل از یک مطالعه موردی در چین استفاده شد [۳۰].

حسینی‌فرد و همکاران (۲۰۱۶)، بحث تمرکز موجودی در زنجیره تأمین خون را در لایه دوم یک زنجیره تأمین دولایه‌ای بررسی کردند که لایه اول آن مربوط به یک بانک خون است که دارای تأمین خون احتمالی از اهداکنندگان می‌باشد و در لایه دوم آن در بیمارستان‌ها از سیاست (s-1,s) استفاده می‌شد. آن‌ها نشان دادند که متمرکزکردن موجودی بیمارستان‌ها (کاهش تعداد بیمارستان‌هایی که خون نگهداری می‌کنند)، به‌ترتیب به کاهش در منسوخ‌شدگی و کمبود فرآورده‌های خونی به میزان ۲۰ و۴۰ درصد منجر می‌شود [۱۲]. کاوه و قبادی (۲۰۱۷)، با استفاده از روش p- میانه و الگوریتم‌های متاهیوریستیک، الگوریتمی را ارائه دادند که در آن با توجه به کمینه‌کردن فاصله کلی میان بیمارستان‌ها و مراکز پخش خون، تعدادی از مراکز خونی را به بیمارستان‌ها تخصیص می‌دهد [۲۰]. فونتاین و همکاران (۲۰۰۹)، با درنظرگرفتن اهمیت همکاری نزدیک مراکز خون و بیمارستان‌ها به‌دنبال بهبود زنجیره تأمین پلاکت خون بودند. آن‌ها تقابل بین فرآیندهایی مانند جمع‌آوری خون، گردش بین فرآیندها و مدیریت موجودی را مطالعه کردند تا زنجیره تأمین پلاکت خون را بهبود بخشند [۸].

قندفروش و سن (۲۰۱۰)، با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی به دنبال کمینه‌کردن هزینه‌های تولید پلاکت خون برای یک مرکز انتقال خون منطقه‌ای بوده‌اند. به‌دلیل غیرمحدب‌بودن تابع هدف ارائه‌شده، حل آن بسیار مشکل است و تضمینی برای رسیدن به یک جواب بهینه نمی‌دهد؛ بنابراین فرمولاسیون مدل به شکل ساده‌تری تبدیل شده است. آن‌ها با تبدیل تابع هدف و محدودیت‌های درجه دو به یک عبارت خطی و تبدیل آن به یک برنامه‌ریزی عدد صحیح، به حل مدل پرداختند [۱۱]. هیگما و همکاران (۲۰۱۰)، با به‌کارگیری برنامه‌ریزی دینامیکی مارکف و روش شبیه‌سازی، مدلی برای بانک خون هلند طراحی کردند. مطالعه آن‌ها بیشتر بر هزینه‌های تولید و مدیریت موجودی پلاکت خون تمرکز داشت [۱۵].

زو و همکاران (۲۰۱۱)، مدیریت موجودی پلاکت خون را با توجه به طول عمر سه‌روزه آن بررسی کرد. آن‌ها مدل خود را با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی فرموله کردند. تابع هدف آن‌ها

مرتبط با کمینه‌کردن هزینه‌های انتظاری بود و برای نشان‌دادن کارایی مدل خود از داده‌های واقعی استفاده کردند [۳۷]. هملمایر و همکاران (۲۰۱۰) با توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح به تصمیم‌گیری در مورد انتخاب بیمارستان‌هایی پرداخته‌اند که باید هر روز توسط وسایل حمل‌ونقل خون از پایگاه‌های اهدای خون پوشش داده شوند. پژوهشگران با درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در تقاضای خون در هر بیمارستان، مقدار خون ارسالی به آن‌ها را تعیین کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از روش فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر به حل مسئله با اطلاعات مربوط به مطالعه موردی در بیمارستان‌های کشور استرالیا پرداختند [۱۶].چراغی و حسینی‌مطلق (۲۰۱۷) از یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای طراحی زنجیره تأمین خون در لجستیک امداد استفاده کردند. آن‌ها برای برخورد با عدم‌قطعیت موجود در مدل خود از رویکرد فازی ـ تصادفی استفاده کردند. برای نشان‌دادن کارایی مدل از یک مطالعه موردی در کشور ایران استفاده شد [۴].

زهرایی و همکاران (۲۰۱۵)، برای بهبود کارایی شبکه زنجیره تأمین خون از شبیه‌سازی پویا و روش تاگوچی برای طراحی شبکه طراحی زنجیره تأمین استوار استفاده کردند. در این پژوهش از یک مطالعه موردی در «سازمان انتقال خون ایران» استفاده شد [۳۹]. آرون و همکاران (۲۰۱۵)، مدلی را برای طراحی شبکه زنجیره تأمین ارائه دادند که در آن انتقالات جانبی بین نقاط تقاضا در نظر گرفته شده بود. برای حل مدل دوهدفه ریاضی ارائه‌شده در این مقاله، آن‌ها از روش محدودیت اپسیلون و نمایش به‌صورت جواب پارتو استفاده کردند. برای نمایش کارایی کارشان نیز از چند مجموعه مسئله بهره بردند [۱].

در پژوهش فریدونی و شهانقی (۲۰۱۶)، یک مدل چنددوره‌ای برای طراحی شبکه زنجیره تأمین خون در مواقع ضروری، نظیر بلایای طبیعی همچون سیل و زلزله ارائه شد. در این پژوهش که شامل تصمیم‌های استراتژیک مکان‌یابی ـ تخصیص است، برای برخورد با عدم‌قطعیت موجود از رویکرد استوار استفاده شد [۹]. حسینی فرد و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی به‌منظور کنترل موجودی در شبکه زنجیره خون ارائه دادند؛ به‌طوری‌که شبکه شامل یک مرکز جمع‌آوری خون و تعدادی بیمارستان است که در هر دوره زمانی تقاضای بیمارستان برای واحدهای خونی که به‌صورت تصادفی است، توسط مرکز جمع‌آوری خون بازپرسازی می‌شود [۱۷]. زهیری و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندسطحی به‌منظور یکپارچه‌سازی شبکه زنجیره تأمین خون شامل جمع‌آوری، تولید و توزیع و تعیین تصمیم‌های بهینه مسیریابی ارائه دادند. تابع هدف ارائه‌شده در این مدل سعی در حداقل‌کردن کل هزینه‌های شبکه‌های زنجیره و تحویل سریع فرآورده‌های خونی به نقاط تقاضا را دارد؛ همچنین به‌منظور برخورد با عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای مسئله از روش فازی ـ تصادفی بهره گرفته شده است [۳۸].

اسکندری خانقاهی و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه به‌منظور طراحی پایدار شبکه زنجیره شامل اهداکنندگان، مراکز جمع‌آوری و توزیع، بیمارستان‌ها و نقاط

تقاضا ارائه دادند. آنان اهداف مرتبط با حداقل‌کردن کل هزینه‌های شبکه، حداقل‌کردن تأثیرات مخرب زیست‌محیطی و حداکثرکردن تأثیرات اجتماعی را به‌طور هم‌زمان در نظر گرفتند و به‌منظور حل مدل چندهدفه از روش محدودیت اپسیلون استفاده کردند [۶]. بهبهانی و همکارن (۲۰۱۹)، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه به‌منظور طراحی پایدار شبکه زنجیره تأمین خون ارائه دادند. اهداف درنظرگرفته‌شده در مدل آنان شامل حداقل‌کردن کل هزینه‌های شبکه، حداقل‌کردن زمان تحویل فرآورده‌های خونی و حداکثرکردن تأثیرات اجتماعی بود. آن‌ها به‌منظور برخورد با عدم‌قطعیت موجود از روش برنامه‌ریزی استوار بهره گرفتند [۲۲].

حسینی مطلق و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی به‌منظور تعیین مکان بهینه تسهیلات خون و ظرفیت آنان ارائه دادند. آن‌ها ملاحظات مرتبط با افزایش انگیزه اهداکنندگان به‌منظور اهدای خون را نیز در نظر گرفتند و با ارائه سازوکاری سعی در افزایش اهدای خون داشتند. در این مقاله به‌منظور برخورد با عدم‌قطعیت موجود در پارامترهای مسئله از روش امکانی استوار بهره گرفته شده است [۱۳]. همدان و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه تصادفی دوسطحی به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین خون ارائه دادند. در سطح اول مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه‌شده، تصمیم‌های مرتبط با مکان‌یابی تسهیلات به‌منظور جمع‌آوری واحدهای خونی مشخص شده و در سطح دوم تصمیم‌های مرتبط با میزان موجودی و میزان تولید فرآورده‌های خونی مشخص شد. مدل ریاضی ارائه‌شده کل هزینه‌های شبکه، زمان تحویل و تعداد واحدهای خونی فاسدشده را به‌طور همزمان حداقل می‌کند. آن‌ها از روش محدودیت اپسیلون به‌منظور حل مدل چندهدفه بهره گرفتند [۱۴].

جدول ۱، خلاصه‌ای از ویژگی‌های اصلی پژوهش‌های بررسی‌شده را نمایش می‌دهد و آن‌ها را با مدل توسعه داده شده در این مقاله مقایسه می‌کند. با توجه به مبانی نظری موجود در زنجیره تأمین خون و بررسی شکاف‌های پژوهشی موجود، در این مقاله، مدل ریاضی دوهدفه به‌منظور طراحی شبکه زنجیره خون ارائه شده و به‌منظور مقابله با کمبود خون در بیمارستان‌ها امکان ارسال جانبی بین بیمارستان‌ها در نظر گرفته شده است و میزان تقاضای خون توسط بیمارستان‌ها و میزان اهدای خون توسط اهداکنندگان به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده و از برنامه‌ریزی ریاضی فازی به‌منظور برخورد با عدم‌قطعیت بهره گرفته شده است؛ همچنین مدل دوهدفه ارائه‌شده توسط روش ترابی ـ حسینی به مدل تک‌هدفه تبدیل شده است.

جدول ۱. مرور مبانی نظری طراحی شبکه زنجیره تأمین خون

پژوهشگران	سال	رویکرد مدل‌سازی	تابع هدف		عدم‌قطعیت	دوره زمانی		انتقالات جانبی
			تک‌هدفه	چندهدفه		تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	
وانگ و لیانگ	۲۰۰۵	عدد صحیح مختلط کوادراتیک مخروطی		●	تصادفی	●		
شاهین و همکاران	۲۰۰۷	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	●		تصادفی	●		
ستین و سارول	۲۰۰۹	برنامه‌ریزی آرمانی غیرخطی عدد صحیح		●		●		
سیام و کوته	۲۰۱۰	برنامه‌ریزی عدد صحیح	●			●		
ژو و لیو	۲۰۱۱	برنامه‌ریزی فازی	●		فازی	●		
شا و هوانگ	۲۰۱۲	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی		●		●		
جبارزاده و همکاران	۲۰۱۴	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	●		تصادفی		●	
فهیم نیا و همکاران	۲۰۱۵	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط		●	تصادفی		●	
زهیری و همکاران	۲۰۱۵	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	●		تصادفی		●	
آرون و همکاران	۲۰۱۵	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی		●		●		
فریدونی و همکاران	۲۰۱۶	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	●		تصادفی		●	
نهفتی کهنه و همکاران	۲۰۱۶	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط		●	فازی		●	
چراغی و همکاران	۲۰۱۷	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	●		فازی		●	

پژوهشگران	سال	رویکرد مدل‌سازی	تابع هدف		عدم‌قطعیت	دوره زمانی		انتقالات جانبی
			تک‌هدفه	چندهدفه		تک‌دوره‌ای	چنددوره‌ای	
دیلون و همکاران	۲۰۱۷	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	●		تصادفی		●	
حسینی فرد و همکاران	۲۰۱۸	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	●		تصادفی	●		
زهیری و همکاران	۲۰۱۸	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط		●	فازی- تصادفی		●	
اسکندری خانقاهی و همکاران	۲۰۱۸	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط		●	-	●		
بهبهانی و همکاران	۲۰۱۹	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط		●	تصادفی	●		
حسینی مطلق و همکاران	۲۰۱۹	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط	●		فازی- تصادفی	●		
همدان و همکاران	۲۰۱۹	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط		●	تصادفی		●	
پژوهش حاضر	۲۰۱۹	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط		●	فازی		●	●

مالکیت مدل. به‌منظور شفاف‌سازی نوآوری‌های پژوهش جاری، در این بخش به مقایسه مقاله‌های حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین خون با مقاله جاری از منظر عدم‌قطعیت و رویکرد مواجهه با آن، توابع هدف و غیره پرداخته شده است. به‌صورت خلاصه با بررسی پژوهش جاری با پژوهش‌های پیشین می‌توان گفت:

- از منظر تصمیم‌های استراتژیک و عملیاتی، تصمیم‌های مرتبط با احداث تسهیلات سیار و ثابت در بیشتر مقاله‌های طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین خون در نظر گرفته شده است که در این پژوهش نیز تصمیم‌های استراتژیک (احداث تسهیلات ثابت) و عملیاتی (انتقال خون، میزان نگهداری موجودی و غیره) به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده است؛ بنابراین از این نظر، مدل با بیشتر مقاله‌های پیشین موجود در حوزه طراحی شبکه زنجیره خون مشابه است.
- با توجه به جدول ۱، درنظرگرفتن امکان ارسال واحدهای خونی بین مراکز تقاضا (انتقالات جانبی) در هیچ پژوهشی در مدل یکپارچه که شامل جمع‌آوری و توزیع واحدهای خونی است، در

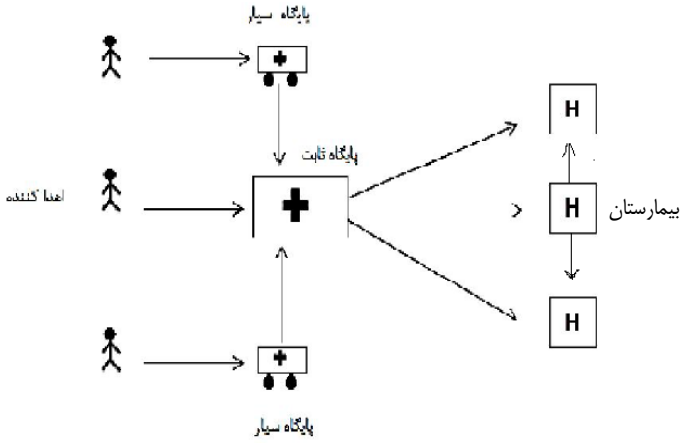
نظر گرفته نشده که در این پژوهش انتقالات جانبی بین مراکز تقاضا در نظر گرفته شده است که مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه‌شده را از پژوهش‌های پیشین متمایز می‌کند.

- مدل برنامه‌ریزی ارائه‌شده در این پژوهش یک مدل دوهدفه است که تابع هدف اول سعی در حداقل‌کردن کل هزینه‌های شبکه دارد و تابع هدف دوم حداکثر میزان کمبود در واحدهای خونی را حداقل می‌کند. تابع هدف اول در بیشتر پژوهش‌های پیشین بررسی شده است؛ ولی تابع هدف دوم در هیچ مدلی به‌طور هم‌زمان با انتقالات جانبی در نظر گرفته نشده است.
- رویکرد تلفیقی برنامه‌ریزی امکانی و روش حل مدل دوهدفه TH در این پژوهش به‌منظور برخورد با عدم‌قطعیت و حل مدل دوهدفه به‌صورت هم‌زمان به‌کار گرفته شده است که تعداد کمی از پژوهش‌ها از این رویکرد تلفیقی بهره گرفته‌اند.

۳. روش‌شناسی پژوهش

تعریف مسئله. در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوهدفه به‌منظور طراحی شبکه جمع‌آوری و توزیع خون با درنظرگرفتن تسهیلات ثابت و متحرک و نقاط عرضه ارائه شده است. شکل ۱، شبکه زنجیره تأمین موردنظر در این مسئله را نشان می‌دهد. زنجیره تأمین خون موردنظر شامل سه بخش اصلی اهداکنندگان، پایگاه‌های جمع‌آوری خون (تسهیلات ثابت و سیار جمع‌آوری خون) و نقاط تقاضا (بیمارستان‌ها) است. اهداکنندگان خون با مراجعه به تسهیلات متحرک یا ثابت جمع‌آوری خون، اقدام به اهدای خون می‌کنند. خون جمع‌آوری‌شده در تسهیلات متحرک به‌منظور انجام آزمایش‌های لازم به تسهیلات ثابت منتقل می‌شود و پس از دریافت سفارش از بیمارستان‌ها و مراکز درمانی توسط پایگاه‌های ثابت، فرآورده‌های خونی برای مصرف به نقاط تقاضا ارسال می‌شود.

تصمیم‌های مربوط به مکان و تعداد تسهیلات سیار در هر دوره، مکان تسهیلات ثابت و میزان انتقال خون بین تسهیلات و نقاط تقاضا در مسئله تعیین می‌شود. مراکز سیار جمع‌آوری خون می‌تواند در هر دوره زمانی تغییر کند؛ اما مکان مراکز ثابت جمع‌آوری خون ثابت بوده و ظرفیت مراکز ثابت جمع‌آوری خون بیشتر از ظرفیت مراکز سیار است. مکان تسهیلات ثابت جمع‌آوری خون و مکان تسهیلات سیار جمع‌آوری خون در هر دوره تعیین شده است و اهداکنندگان خون با توجه به هزینه و مسافت به یکی از مراکز سیار یا ثابت مراجعه کرده و اقدام به اهدای خون می‌کنند. به‌منظور مقابله با کمبود فرآورده‌های خونی، خون موردنیاز بیمارستان‌ها می‌تواند از طریق سایر بیمارستان‌ها برآورده شود. به‌دلیل وجود عدم‌قطعیت در مسائل دنیای واقعی، پارامترهای مرتبط با هزینه، میزان تقاضا و میزان اهدای خون به‌صورت فازی مثلثی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. شمایی از زنجیره تأمین خون موردنظر

مفروضات مسئله. مفروضات استفاده‌شده در مسئله به‌صورت زیر است:

– مکان‌های نامزد برای احداث تسهیلات محلی و قرارگیری تسهیلات سیار ازپیش‌تعیین‌شده هستند. مکان تسهیلات محلی در طول افق برنامه‌ریزی مشخص است؛ ولی تسهیلات سیار می‌توانند از دوره‌ای به دوره دیگر با پرداخت هزینه اضافی بر اساس حجم خون جمع‌آوری‌شده و موقعیت جغرافیایی نقاط تقاضا جابه‌جا شوند؛

– ازآنجاکه برنامه‌ریزی برای تک‌تک اهداکنندگان ممکن نیست، هر گروه از اهداکنندگان نماینده یک منطقه اهدا هستند؛

– اهدای خون می‌تواند در هر یک از تسهیلات جمع‌آوری (سیار و محلی) و نه به‌طور هم‌زمان در هر دوی آن‌ها صورت پذیرد؛

– واحدهای خون در هر دوره از تسهیلات سیار به تسهیلات محلی و ازآنجا به مراکز خون ارسال می‌شوند.

فرمول‌بندی مسئله

اندیس‌ها:

I: اندیس گروه‌های اهداکنندگان	$i \in I$
J: اندیس مکان‌های کاندید برای ایجاد تسهیلات سیار	$j \in J$
K: اندیس مکان‌های کاندید برای ایجاد تسهیلات ثابت	$k \in K$
M: اندیس نقاط تقاضا	$m \in M$
T:اندیس دوره‌های زمانی	$t \in T$

پارامترها

H^k: هزینه نگهداری هر واحد موجودی خون در تسهیلات ثابت

H^M: هزینه نگهداری هر واحد موجودی خون در بیمارستان‌ها

$H_{j1,j2}$: هزینه تغییر مکان تسهیل ثابت از مکان j_1 به j_2

H_k^m: هزینه احداث تسهیل ثابت در مکان k

H_{jk}^g: هزینه انتقال بسته‌های خونی از تسهیل موقت j به تسهیل ثابت k

H_{km}^l» هزینه انتقال بسته‌های خونی از تسهیل موقت k به نقاط تقاضای m

$H_{m'm}^f$: هزینه انتقال بسته‌های خونی از طریق انتقالات جانبی بین بیمارستان‌های m و m'

D_{tm}: تقاضای بیمارستان واقع در نقطه m در دوره t

r_{ij}: فاصله بین گروه‌های اهداکننده خون واقع در نقطه i و تسهیلات متحرک جمع‌آوری خون واقع در مکان j

cr_0: شعاع پوشش تسهیلات متحرک (اگر $r_{ij} \le cr_0$ ،i به‌وسیله j پوشش داده می‌شود).

W_{ik}: فاصله بین گروه‌های اهداکنندگان خون واقع در نقطه i و تسهیلات ثابت جمع‌آوری خون واقع در مکان k

W_0: شعاع پوشش تسهیلات ثابت (اگر $W_{ik} \le W_0$ ،i به‌وسیله k پوشش داده می‌شود).

q_{jk}: فاصله بین تسهیل موقت جمع‌آوری خون واقع در مکان jو تسهیلات متحرک جمع‌آوری خون واقع در مکان k

q_0: شعاع پوشش تسهیلات ثابت (اگر $q_{jk} \le vq_0$ ،j به‌وسیله k پوشش داده می‌شود).

$R_{m'm}$: فاصله بین بیمارستان‌های واقع در مکان‌های m و m'

R_0: شعاع پوشش برای انتقالات جانبی (اگر فاصله بیمارستان‌ها کمتر از شعاع پوشش باشد، انتقالات جانبی قابل‌انجام است).

ca_0: ظرفیت هر یک از تسهیلات متحرک جمع‌آوری خون

vc_k: ظرفیت هر یک از تسهیلات ثابت جمع‌آوری خون

d_{it}: ظرفیت اهدای خون توسط اهداکنندگان خون واقع در مکان i در دوره t

M: عدد بزرگ مثبت

B: حداقل درصد پاسخ به تقاضای نقاط تقاضا

متغیرهای تصمیم:

A_{ijt}: اگر گروه اهداکننده خون واقع در مکان i به تسهیل متحرک واقع در مکان j تخصیص داده شود، مقدار یک دارد؛ در غیر این‌صورت صفر.

A^m_{ikt}: اگر گروه اهداکنندگان خون واقع در مکان i به تسهیلات ثابت واقع در مکان k تخصیص داده شود مقدار یک دارد؛ در غیر این‌صورت صفر.

A^g_{jkt}: اگر تسهیل متحرک واقع در مکان j به تسهیل ثابت واقع در مکان k تخصیص داده شود، مقدار یک دارد؛ در غیر این‌صورت صفر.

$l_{m'mt}$: اگر بین بیمارستان‌های m و m' انتقالات جانبی انجام شود، مقدار یک دارد؛ در غیر این‌صورت صفر.

$L_{j1,j2,t}$: اگر تسهیل متحرک جمع‌آوری خون در دوره *t-1 در مکان* j_1 قرار گیرد و در دوره t به مکان j_2 تغییر مکان دهد، مقدار یک دارد؛ درغیر این‌صورت صفر.

Z_k اگر تسهیل ثابت در مکان k قرار گیرد، مقدار یک دارد؛ در غیر اینصورت صفر.

N_p: تعداد تسهیلات موردنیاز در هر دوره.

SS_{ijt}: میزان انتقال بسته‌های خونی از گروه اهداکننده خون واقع در مکان i به تسهیل متحرک واقع در مکان j در دوره t.

SS^m_{ikt}: میزان انتقال بسته‌های خونی از گروه اهداکننده خون واقع در مکان i به تسهیل ثابت واقع در مکان k در دوره t.

SS^g_{jkt}: میزان انتقال بسته‌های خونی از تسهیل متحرک واقع در مکان j به تسهیل ثابت واقع در مکان k در دوره t.

SS^l_{kmt}: میزان انتقال بسته‌های خونی از تسهیل ثابت واقع در مکان k به نقطه تقاضای واقع در مکان m در دوره t.

$SS^f_{m'mt}$: میزان انتقال بسته‌های خونی از طریق انتقالات جانبی بین بیمارستان‌های m و m'.

IB_{kt}: میزان موجودی در انتهای دوره t در تسهیل ثابت k.

IH_{mt}: میزان موجودی در انتهای دوره t در بیمارستان m.

مدل ریاضی

$$Min\ Z_1 = \sum_{j1,j2,t} L_{j1,j2,t}\, H_{j1,j2} + \sum_k Z_k H^m_k + \sum_{j,k,t} SS^g_{j,k,t}\, H^g_{jk} + \sum_{k,t} H^k\, IB_{kt} + \sum_{k,t} H^{m11}\, IH_{mt} + \sum_{k,m,t} SS^l_{kmt}\, H^l_{km} + \sum_{m',m,t} SS^f_{m'mt} H^f_{m'm} \quad (۱)$$

$$MinZ_2 = Max_t\left(D_{tm} - \left(\sum_k SS^l_{kmt} + \sum_{m'} SS^f_{m',m,t}\right)\right) \quad (۲)$$

$$\sum_{j1} L_{j1,j2,t} \le 1, \qquad \forall j2, t, \quad (۳)$$

$$\sum_{j1\neq j2} L_{j1,j2,t} = N_p, \qquad \forall t, \tag{۴}$$

$$\sum_{j2} L_{j1,j2,t} \leq \sum_{j} L_{j,j2,t-1}, \qquad \forall j1, t \geq 2, \tag{۵}$$

$$\sum_{j} A_{ijt} + \sum_{k} A^{m}_{ikt} \leq 1, \qquad \forall i, t, \tag{۶}$$

$$A_{ijt} r_{ij} \leq cr_0 \sum_{j1} L_{j1,j2,t,} \qquad \forall i, j, t, \tag{۷}$$

$$A^{m}_{ikt} W_{ik} \leq W_0 Z_k, \qquad \forall i, k, t, \tag{۸}$$

$$A^{g}_{jkt} q_{jk} \leq q_0 Z_k, \qquad \forall j, k, t, \tag{۹}$$

$$SS_{i,j,t} \leq MA_{ijt}, \qquad \forall i, j, t, \tag{۱۰}$$

$$SS^{m}_{i,k,t} \leq MA^{m}_{i,k,t}, \qquad \forall i, k, t, \tag{۱۱}$$

$$\sum_{i} SS^{m}_{ikt} + \sum_{j} SS^{g}_{jkt} \leq vc_k, \qquad \forall k, t, \tag{۱۳}$$

$$\sum_{j} SS_{ijt} + \sum_{k} SS^{m}_{ikt} \leq d_{it}, \qquad \forall i, t, \tag{۱۴}$$

$$\sum_{i} SS_{ijt} \leq ca_0, \qquad \forall j, t, \tag{۱۵}$$

$$A^{t}_{jkt} \leq \sum_{j1} L_{j1,j,t}\, m, \qquad \forall j, k, t, \tag{۱۶}$$

$$\sum_{m} SS^{l}_{kmt} \leq vc_k \qquad \forall t, k, \tag{۱۷}$$

$$\sum_{k} SS^{l}_{kmt} + \sum_{m'} SS^{f}_{m'mt} \geq BD_{mt}, \qquad \forall t, m, \tag{۱۸}$$

$$l_{m,mt}R_{m,m} \le R_0, \qquad \forall m, m', t, \tag{۱۹}$$

$$SS^f_{m,mt} \le M l_{m'mt}, \qquad \forall t, m, m', \tag{۲۰}$$

$$\sum_i SS_{ijt} = \sum_k SS^g_{jkt}, \qquad \forall j, t, \tag{۲۱}$$

$$\sum_m SS^l_{kmt} \le \sum_i SS^m_{ikt} + \sum_j SS^g_{jkt} \qquad \forall t, m, m' \tag{۲۲}$$

$$\sum_i SS^m_{ikt} + \sum_j SS^g_{jkt} + IB_{k(t-1)} = \sum_m SS^l_{kmt} + IB_{kt} \qquad \forall k, t, \tag{۲۳}$$

$$\sum_k SS^l_{kmt} + \sum_{m'} SS^f_{m'mt} + IH_{m(t-1)} = \sum_{m'} SS^f_{mm't} + BD_{mt} + IH_{mt} \quad \forall t, m \tag{۲۴}$$

$$A_{ijt}, A^m_{ikt}, A^g_{jkt}, L_{j1,j2,t}, Z_{k,}, l_{m'mt} \in \{0,1\}, \qquad \forall\, i, j, k, t \tag{۲۵}$$

$$SS_{ijt}, SS^m_{ikt}, SS^g_{jkt}, SS^l_{kmt}, SS^f_{m,mt}, N_p \ge 0, \qquad \forall i, j, k, t, \tag{۲۶}$$

تابع هدف ۱، سعی در حداقل‌کردن مجموع هزینه‌های احداث تسهیلات ثابت و متحرک، هزینه انتقال بسته‌های خونی از تسهیلات ثابت به متحرک، تسهیلات متحرک به نقاط تقاضا و هزینه انتقالات جانبی بین بیمارستان‌ها دارد. تابع هدف دوم ۲، سعی در حداقل‌کردن حداکثر میزان کمبود را دارد. محدودیت ۳، نشان می‌دهد که هر یک از تسهیلات متحرک جمع‌آوری خون با تغییر دوره‌های زمانی می‌تواند به یکی از نقاط نامزد برای احداث حرکت کند. محدودیت ۴، تعداد تسهیلات موقت جمع‌آوری خون موردنیاز در هر دوره را تعیین می‌کند. محدودیت ۵، نمایانگر محدودیت جابه‌جایی تسهیلات متحرک است. محدودیت ۶، تضمین می‌کند که اهداکنندگان خون می‌توانند در یکی از تسهیلات ثابت یا متحرک، خون اهدا کنند نه در هر دو. محدودیت ۷، نشان می‌دهد که اهداکنندگان خون در صورتی می‌توانند به تسهیلات متحرک جمع‌آوری خون تخصیص یابند که تسهیلات جمع‌آوری خون احداث شده باشند و اهداکنندگان خون در شعاع پوشش تسهیلات متحرک قرار داشته باشند. محدودیت ۸، نشان می‌دهد اهداکنندگان خون در صورتی می‌توانند در تسهیلات ثابت جمع‌آوری خون، خون اهدا کنند که تسهیلات ثابت احداث‌شده باشند

و اهداکنندگان خون در شعاع پوشش تسهیلات ثابت قرار داشته باشند. محدودیت ۹، تضمین می‌کند در صورتی می‌توان تسهیلات متحرک جمع‌آوری خون را به تسهیلات ثابت تخصیص داد که تسهیلات ثابت احداث‌شده تسهیلات متحرک در شعاع پوشش تسهیلات متحرک قرار بگیرد. محدودیت‌های ۱۰ و۱۱، نشان می‌دهند در صورتی بسته‌های خون از اهداکنندگان خون به تسهیلات ثابت یا متحرک خون منتقل می‌شود که اهداکنندگان خون به تسهیلات ثابت یا متحرک تخصیص داده‌شده باشند. محدودیت ۱۲، تضمین می‌کندکه خون جمع‌آوری‌شده در تسهیلات متحرک در صورتی می‌تواند به تسهیلات ثابت منتقل شود که تسهیلات متحرک به تسهیلات ثابت تخصیص داده‌شده باشند. محدودیت ۱۳، نشان می‌دهد مجموع مقداری خونی که اهداکنندگان خون در تسهیلات ثابت اهدا می‌کنند و مقدار خونی که از تسهیلات متحرک به تسهیلات ثابت ارسال می‌شود، نباید بیشتر از ظرفیت تسهیل ثابت باشد. محدودیت ۱۴، ظرفیت اهداکنندگان خون برای اهدای خون را نشان می‌دهد: به این‌صورت که مجموع مقدار خونی که اهداکنندگان در تسهیلات ثابت و متحرک اهدا می‌کنند نباید از ظرفیت گروه اهداکنندگان خون بیشتر باشد.

محدودیت ۱۵، نشان می‌دهد مجموع مقدار خونی که در تسهیلات متحرک جمع‌آوری می‌شود نباید از ظرفیت این تسهیلات بیشتر باشد. طبق محدودیت ۱۶، در صورتی تسهیلات متحرک در یک منطقه می‌توانند به تسهیلات ثابت جمع‌آوری خون تخصیص یابند که تسهیلات متحرک در آن منطقه احداث‌شده باشند. محدودیت ۱۷، تضمنی می‌کند مجموع مقداری خونی که از تسهیلات ثابت به نقاط تقاضا ارسال می‌شود، نباید از ظرفیت جمع‌آوری خون در تسهیلات ثابت بیشتر باشد. طبق محدودیت ۱۸، مجموع مقدار خونی که از تسهیلات ثابت به نقاط تقاضا ارسال می‌شود و مقدار خونی که از طریق انتقالات جانبی به نقطه تقاضا ارسال می‌شود باید حداقل تقاضا تعیین‌شده را برآورده کند. محدودیت‌های ۱۹ و ۲۰، نشان می‌دهند انتقالات جانبی بین بیمارستان‌ها در صورتی ممکن است که فاصله دو بیمارستان کمتر از شعاع تعیین‌شده باشد. محدودیت ۲۱، نشان می‌دهد مقدار خونی که در تسهیلات موقت جمع‌آوری می‌شود باید برابر مقدار خونی باشد که از مراکز جمع‌آوری موقت به مراکز ثابت ارسال می‌شود. محدودیت‌های ۲۲، ۲۳ و ۲۴، محدودیت‌های تعادلی در مراکز جمع‌آوری خون بیمارستان‌ها را نشان می‌دهند. محدودیت‌های ۲۴ و ۲۵، نوع متغیرهای تصمیم را مشخص می‌کنند.

روش حل پیشنهادی. در این بخش، روش حل برای مدل پیشنهادی در قالب دو مرحله ارائه خواهد شد:

مرحله نخست: تعیین مدل کمکی قطعی. تا قبل از معرفی مجموعه‌های فازی، تنها ابزارهای مدل‌سازی سیستم‌ها در شرایط عدم‌قطعیت استفاده از نظریه احتمالات و مدل‌سازی احتمالی بوده

است. هرچند نظریه احتمالات، ابزار مناسبی برای نمایش ریاضی عدم‌قطعیت در حالت تصادفی و مدل‌سازی فرآیندهای تصادفی است، برای سایر عدم‌قطعیت‌ها اصلاً مناسب نیست.

در این میان، فرآیندهای احتمالی ایستا که دسته معروفی از فرآیندهای تصادفی هستند، دارای سه مشخصه زیر می‌باشند:

۱. فضای نمونه از آزمایشی به آزمایش دیگر تغییر می‌کند؛ به‌عبارت‌دیگر فضای خروجی ثابت بوده و تغییر نمی‌کند؛

۲. احتمال وقوع یک رویداد (نتیجه خاص) در فضای نمونه ثابت و قابل‌اندازه‌گیری است و از آزمایشی به آزمایش دیگر تغییر نمی‌کند؛

۳. نتایج در اثر تکرار آزمایش‌ها تکرارپذیر بوده و نتیجه یک آزمایش تأثیری در دیگر آزمایش‌ها ندارد و نتایج آزمایش‌ها مستقل از یکدیگر است.

درنتیجه تاکنون دو ابزار سودمند برای مدل‌سازی سیستم‌ها در شرایط عدم‌قطعیت معرفی شده است:

۱. استفاده از نظریه احتمالات و مدل‌سازی در مواردی که عدم‌قطعیت موجود در اطلاعات و داده‌های دردسترس از نوع تصادفی است؛

۲. استفاده از نظریه مجموعه‌های فازی و مدل‌سازی فازی[1] در مواردی که داده‌های موجود از سیستم تحت بررسی از نوع غیر تصادفی بوده و دارای ماهیت مبهم و غیردقیق هستند.

کلید اصلی در درک اختلاف بین این دو رویکرد مدل‌سازی در شرایط عدم‌قطعیت در مفهوم دو واژه «فازی‌بودن» و «تصادفی‌بودن» نهفته است. در حالت تصادفی، عناصر فضای نمونه و نوع روابط کاملاً مشخص بوده و مسئله اصطلاحاً خوب تعریف شده است؛ ولی در حالت فازی خیلی از روابط غیرقطعی هستند و خوب تعریف نشده‌اند.

با توجه به مطالب بالا می‌توان گفت که مدل‌سازی فازی در موارد زیر قوی‌ترین و موفق‌ترین ابزار مدل‌سازی است:

۱. مدل‌سازی سیستم‌های خیلی پیچیده که اطلاعات موجود از آن‌ها کاملاً محدود بوده و اغلب به شکل کیفی و بر اساس نظرهای تخصصی افراد خبره در حوزه مربوطه بیان شده است؛

۲. مدل‌سازی فرآیندهایی که استدلال، درک و احساس انسانی در آن‌ها بسیار دخیل است و دقت زیاد در مورد آن‌ها نیاز نیست.

با توجه به ابهام و نااطمینانی موجود در اطلاعات اخذ شده از افراد خبره در این پژوهش به‌منظور برخورد با عدم‌قطعیت‌های موجود در پارامترهای مسئله از روش برنامه‌ریزی امکانی بهره گرفته شود. در ادامه برنامه‌ریزی امکانی به‌طور کامل تشریح خواهد شد.

---

1. Fuzzy Modeling

در این پژوهش به‌منظور برخورد با عدم‌قطعیت‌های موجود در پارامترهای مدل که شامل پارامترهای هزینه، عرضه و تقاضا است از روش فازی خیمنز به‌دلیل کارایی بالای آن استفاده شده است. این روش علاوه بر حفظ خطی‌بودن مسئله، تعداد توابع هدف و محدودیت‌های نامساوی را افزایش نمی‌دهد. روش فازی خیمنز و همکاران (۲۰۰۷) بر مبنای مقدار مورد انتظار و بازه‌ی مورد انتظار برنامه‌ریزی‌شده است [۲۶،۲۷،۱۷،۲]. به‌علت کارایی و سادگی محاسباتی از روش توزیع فازی مثلثی به‌منظور برخورد با پارامترهای غیردقیق مدل استفاده شده است. فرض کنید $\tilde{C}$ یک عدد فازی مثلثی است، تابع عضویت این عدد فازی $\mu_{\tilde{C}}(x)$ به‌صورت رابطه ۲۷، تعریف می‌شود:

$$\mu_{\tilde{C}}(x)=\begin{cases} f_c(x)=\dfrac{x-c_p}{c_m-c_p} & if\ c_p\le x\le c_m \\ 1 & if\ x=c_m \\ g_c(x)=\dfrac{c_o-x}{c_o-c_m} & if\ c_m\le x\le c_o \\ 0 & if\ x\le c_p\ or\ x\ge c_o \end{cases} \qquad (۲۷)$$

فاصله موردانتظار (EI) و امید ریاضی (EV) عدد فازی مثلثی از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$EI(\tilde{C})=[E_1^c,E_2^c]=\left[\int_0^1 f_c^{-1}(x)dx,\int_0^1 g_c^{-1}(x)dx\right]=\left[\frac{1}{2}(c_p+c_m),\frac{1}{2}(c_o+c_m)\right] \qquad (۲۸)$$

$$EV(\tilde{C})=\frac{E_1^c+E_2^c}{2}=\frac{c_p+2c_m+c_o}{4} \qquad (۲۹)$$

برای جفت عدد فازی $\tilde{a}$ و $\tilde{b}$، درجه بزرگ‌تربودن $\tilde{a}$ از $\tilde{b}$ با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_M(\tilde{a},\tilde{b})=\begin{cases} 1 & if\ E_1^a>E_2^b \\ \dfrac{E_2^a-E_1^b}{E_2^a-E_1^b-(E_1^a-E_2^b)} & if\ 0\epsilon[E_1^a-E_2^b,E_2^a-E_1^b] \\ 0 & if\ E_2^a<E_1^b \end{cases} \qquad (۳۰)$$

$\mu_M(\tilde{a},\tilde{b})\ge\alpha$ به این معنا است که دست‌کم در درجه α، $\tilde{a}$ از $\tilde{b}$ بزرگ‌تر مساوی و به‌صورت $\tilde{a}\ge_\alpha\tilde{b}$ تعریف می‌شود.

علاوه بر آنچه گفته شد، برای جفت عدد فازی $\tilde{a}$ و$\tilde{b}$ که در آن $\tilde{a}$ با $\tilde{b}$ برابر است داریم: $\tilde{a} \geq_{\frac{\alpha}{2}} \tilde{b}, \tilde{a} \leq_{\frac{\alpha}{2}} \tilde{b}$.

حال مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی زیر را که در آن همه پارامترها به‌صورت فازی در نظر گرفته‌شده‌اند در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} &\min z = \tilde{c}^t\ x \\ &\tilde{a}_i x \geq \tilde{b}_i, i = 1, \dots, l \\ &\tilde{a}_i x = \tilde{b}_i, i = l+1, \dots, m \\ &x \geq 0 \end{aligned} \qquad (۳۱)$$

با توجه به روش خیمنز برای حالتی که $\tilde{a}$ از $\tilde{b}$ بزرگ‌تر است داریم:

$$\frac{E_2^{a_i x} - E_1^{b_i}}{E_2^{a_i x} + E_2^{b_i} - E_1^{a_i x} - E_1^{b_i}} \geq \alpha, i = 1, \dots, l \qquad (۳۲)$$

برای حالتی که $\tilde{a}$ با $\tilde{b}$ برابر است داریم:

$$\frac{\alpha}{2} \leq \frac{E_2^{a_i x} - E_1^{b_i}}{E_2^{a_i x} + E_2^{b_i} - E_1^{a_i x} - E_1^{b_i}} \leq 1 - \frac{\alpha}{2}, i = l+1, \dots, m \qquad (۳۳)$$

که با توجه به روابط بالا داریم:

$$\begin{aligned} &\left[(1-\alpha)E_2^{a_i} + \alpha E_1^{a_i}\right]x \geq (1-\alpha)E_1^{b_i} + \alpha E_2^{b_i}, i = 1, \dots, l \\ &\left[\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)E_2^{a_i} + \frac{\alpha}{2}E_1^{a_i}\right]x \geq \left(1-\frac{\alpha}{2}\right)E_1^{b_i} + \frac{\alpha}{2}E_2^{b_i}, \\ &i = l+1, \dots, m \end{aligned} \qquad (۳۴)$$

$$\left[\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)E_1^{a_i} + \frac{\alpha}{2}E_2^{a_i}\right]x \leq \left(1-\frac{\alpha}{2}\right)E_2^{b_i} + \frac{\alpha}{2}E_1^{b_i}, \quad i = l+1, \dots, m$$

با توجه به روابط ارائه‌شده و شرایط روش فازی خیمنز می‌توان مدل برنامه‌ریزی فازی ذکرشده را به‌صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} &\min EV(\tilde{c})x \\ &\text{s.t.} \\ &\left[(1-\alpha)E_2^{a_i} + \alpha E_1^{a_i}\right]x \geq (1-\alpha)E_1^{b_i} + \alpha E_2^{b_i}, i = 1, \dots, l \\ &\left[\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)E_2^{a_i} + \frac{\alpha}{2}E_1^{a_i}\right]x \geq \left(1-\frac{\alpha}{2}\right)E_1^{b_i} + \frac{\alpha}{2}E_2^{b_i}, \end{aligned} \qquad (۳۵)$$

$$i = l+1, \dots, m$$

$$\left[\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)E_1^{a_i} + \frac{\alpha}{2}E_2^{a_i}\right]x \le \left(1-\frac{\alpha}{2}\right)E_2^{b_i} + \frac{\alpha}{2}E_1^{b_i},$$
$$i = l+1, \dots, m$$

در ادامه با توجه به معادلات و روابط گفته‌شده، مدل فازی مسئله به مدل قطعی تبدیل می‌شود؛ همچنین محدودیت‌هایی که در قسمت مدل قطعی کمکی آورده نشده‌اند، چون نیازی به تغییر نداشته‌اند به همان صورت در مدل قطعی کمکی استفاده می‌شوند.

$$\begin{aligned}
&\min Z_1 = F \\
&F \ge (\alpha\left(\frac{d_{mt}^m + d_{mt}^o}{2}\right) + (1-\alpha)\left(\frac{d_{mt}^p + d_{mt}^m}{2}\right)) \\
&\qquad - \sum_{i,k} SS_{ikt}^m - \sum_{j,k} SS_{jkt}^g
\end{aligned} \tag{۳۶}$$

$$\begin{aligned}
\min Z_2 \quad = & \sum_{j1,j2,t} L_{j1,j2,t}\left(\left(\frac{H_{j1,j2}^o + 2H_{j1,j2}^m + H_{j1,j2}^p}{4}\right)\right) \\
& + \sum_k Z_k\left(\left(\frac{H_k^{mo} + 2H_k^{mm} + H_k^{mp}}{4}\right)\right) \\
& + \sum_{j,k,t} SS_{j,k,t}^g (\left(\frac{H_{jk}^{go} + 2H_{jk}^{gm} + H_{jk}^{gp}}{4}\right) \\
& + \sum_{m',m,t} SS_{m'mt}^f\left(\left(\frac{H_{m'm}^{fo} + 2H_{m'm}^{fm} + H_{m'm}^{fp}}{4}\right)\right) \\
& + (1-\alpha)\left(\frac{d_{it}^o + d_{it}^m}{2}\right) \quad \forall i,t
\end{aligned} \tag{۳۷}$$

$$\begin{aligned}
&\sum_k SS_{kmt}^l + \sum_{m'} SS_{m'mt}^f + IH_{m(t-1)} \\
&\le \sum_{m'} SS_{mm't}^f + (\frac{\alpha}{2})\left(\frac{d_{it}^p + d_{it}^m}{2}\right) + (1-\alpha/2)\left(\frac{d_{it}^o + d_{it}^m}{2}\right) \\
&\qquad + IH_{mt} \quad \forall t,m
\end{aligned} \tag{۳۸}$$

$$\sum_k SS_{kmt}^l + \sum_{m'} SS_{m'mt}^f + IH_{m(t-1)} \tag{۳۹}$$

$$\geq \sum_{m'} SS^{f}_{mm't} + (1-\frac{\alpha}{2})\left(\frac{d^{p}_{it}+d^{m}_{it}}{2}\right) + (\alpha/2)\left(\frac{d^{o}_{it}+d^{m}_{it}}{2}\right) + IH_{mt} \quad \forall t,m$$

مرحله دوم: رویکرد حل فازی مدل چندهدفه قطعی. در ادامه پس از تبدیل مدل به مدل قطعی، با استفاده از روش پیشنهادی ترابی و حسینی (۲۰۰۸) جواب ایده‌آل مثبت (PIS) و جواب ایده‌آل منفی (NIS) برای توابع هدف مدل محاسبه شده و مدل چندهدفه به مدل تک‌هدفه تبدیل می‌شود [۳۳].

توابع عضویت به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1 & if\ Z_1 < Z_1^{PIS} \\ \dfrac{Z_1^{NIS} - Z_1}{Z_1^{NIS} - Z_1^{PIS}} & if\ Z_1^{PIS} \leq Z_1 \leq Z_1^{NIS} \\ 0 & if\ Z_1 \geq Z_1^{NIS} \end{cases} \quad (۴۰)$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 1 & if\ Z_2 < Z_2^{PIS} \\ \dfrac{Z_2^{NIS} - Z_2}{Z_2^{NIS} - Z_2^{PIS}} & if\ Z_2^{PIS} \leq Z_2 \leq Z_2^{NIS} \\ 0 & if\ Z_2 \geq Z_2^{NIS} \end{cases} \quad (۴۱)$$

$\mu_1(x)$ و $\mu_2(x)$ به‌ترتیب نشان‌دهنده درجه رضایت از توابع هدف اول و دوم هستند. در ادامه با استفاده از روش ترابی و حسینی (۲۰۰۸)، توابع هدف اول و دوم ادغام شده و جواب‌های کارا برای مدل را محاسبه شده است.

تابع ادغام‌سازی توابع هدف (TH):

$$\begin{aligned} &\max \beta(x) = \beta_0(\gamma) + (1-\gamma)\sum_{h} \theta_h \mu_h(x) \\ &\text{s.t. } \beta_0 \leq \mu_h(x),\ h = 1,2 \\ &x \in G(x), \beta\ and\ \beta_0\ \in [0,1] \end{aligned} \quad (۴۲)$$

$G(x)$ نشان‌دهنده ناحیه شدنی تشکیل‌شده بر اساس محدودیت‌های مدل قطعی کمکی است؛ همچنین θ_h و γ به‌ترتیب نشان‌دهنده درجه اهمیت hامین تابع هدف و ضریب تصحیح آن هستند.

٤. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش به‌منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مثال عددی با نرم‌افزار گمز بر روی رایانه‌ای با پردازشگر Intel core 2 Duo (2MB Cache, 2.6 GHz) و با حافظه 3GB حل شده است. پارامترهای موردنیاز با توجه به حدود دامنه‌های اشاره‌شده در مطالعاتی نظیر [۱،۱۰،۱۲] و به‌صورت تصادفی مطابق جدول ۲، تولید شده‌اند.

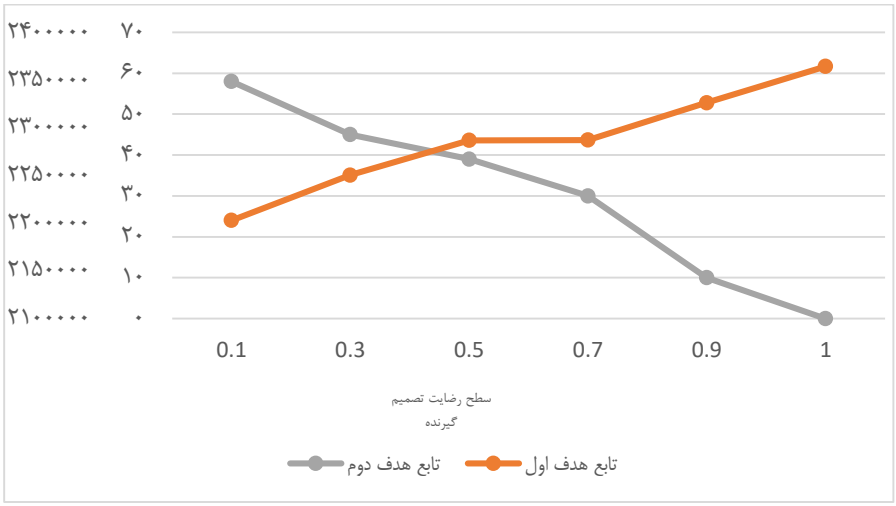
جدول ۲. داده‌های مثال عددی

$H_{j1,j2}$	***Uniform*(20,30)**
H^k	*Uniform*(70,100)
H^m	*Uniform*(70,100)
H_k^m	*Uniform*(700,1000)
H_{jk}^g	*Uniform*(100,200)
H_{km}^l	*Uniform*(100,200)
$H_{m'm}^f$	*Uniform*(100,200)
D_{tm}	*Uniform*(300,500)
d_{it}	*Uniform*(400,600)
I_{ij}	*Uniform*(100,200)
cr_0	*Uniform*(100,200)
q_0	*Uniform*(200,400)
q_{jk}	*Uniform*(200,400)
W_{ik}	*Uniform*(200,400)
$R_{m'm}$	*Uniform*(200,400)
R_0	*Uniform*(100,200)
ca_0	*Uniform*(400,500)
vc_k	*Uniform*(500,700)
B	*Uniform*(.5,.8)

یکی از پارامترهای مهم در مطالعه کارایی برنامه‌ریزی امکانی، بررسی تأثیر پارامتر α (حداقل سطح رضایت تصمیم‌گیرنده) است. جدول ۲، تغییرات توابع هدف اول و دوم و همچنین تغییرات تابع هدف TH را نسبت به تغییرات α نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۳، با افزایش رضایت تصمیم‌گیرنده، مقدار تابع هدف اول (کل هزینه‌های شبکه) به‌منظور پاسخ به تقاضای بیمارستان‌ها افزایش می‌یابد؛ از طرف دیگر با افزایش سطح رضایت با توجه به افزایش هزینه‌ها مقدار کمبود سیستم کاهش می‌یابد؛ بنابراین تصمیم‌گیرنده با دو تصمیم مواجه می‌شود: ۱- به‌منظور کاهش هزینه‌های سیستم، سطح رضایت (α) را کاهش دهد که در این‌صورت میزان کمبود نیز افزایش خواهد یافت؛ ۲- سطح رضایت (α) را به‌منظور حداکثرکردن پاسخ به تقاضای بیمارستان‌ها افزایش دهد که در این‌صورت متحمل هزینه‌های زیادی خواهد شد.

جدول ۳. تأثیر مقادیر مختلف حداقل سطح رضایت بر توابع هدف

سطح رضایت	مقدار تابع هدف TH	مقدار توابع هدف	
α	Z	z_1	z_2
۰/۱	۰/۷۹۹	۲۲۰۲۸۸۷	۵۸
۰/۳	۰/۸۰۳	۲۲۵۰۴۱۴	۴۵
۰/۵	۰/۸۳۰	۲۲۸۶۸۴۵	۳۹
۰/۷	۰/۸۵۱	۲۲۸۷۲۰۱	۳۰
۰/۹	۰/۸۷۶	۲۳۲۶۲۰۰	۱۰
۱	۰/۸۸۶	۲۳۶۴۳۵۰	۰



شکل ۲. نمودار مقادیر توابع هدف به ازای سطوح رضایت مختلف

شکل ۲، تغییرات توابع هدف نسبت به تغییرات سطح رضایت تصمیم‌گیرنده را نشان می‌دهد که با افزایش α مقدار تابع هدف اول افزایش و مقدار تابع هدف دوم کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار، دو تابع هدف در نقطه‌ای با مقدار هزینه ۲۲۸۶۸۴۵ و مقدار کمبود ۳۹ به تعادل می‌رسند که سطح رضایت تصمیم‌گیرنده در این نقطه برابر ۰/۵ است.

جدول ۴، مسائل نمونه طراحی‌شده به‌منظور تحلیل حساسیت روی پارامترهای مدل را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه نتایج حاصل از حل مساله در حالت قطعی و روش خیمنز به ازای درجه αهای مختلف، ۵ مسئله نمونه طراحی و حل شده است که نتایج حاصل از حل مسائل نمونه در جدول ۵، ارائه شده است؛ همچنین مقایسه بین مقادیر تابع هدف اول (تابع هدف هزینه) در حالت قطعی و حالت فازی با درجه αهای مختلف در شکل ۳، نشان داده شده است طبق شکل ۳، با افزایش ابعاد مسئله، مقدار هزینه‌های سیستم افزایش می‌یابد و در حالت قطعی مقدار هزینه‌های

شبکه کمتر از حالت فازی با درجه αهای مختلف است؛ درمقابل مقدار کمبود در حالت قطعی خیلی بیشتر از سایر حالت‌ها است. تغییرات تابع هدف دوم در حالت قطعی و حالت فازی با درجه αهای مختلف در شکل ۴، مشاهده می‌شود. با مقایسه شکل‌های ۳ و ۴، می‌توان نتیجه گرفت که به‌منظور ایجاد تعادل بین اهداف، روش خیمنز از کارایی بالایی در مقایسه با حالت قطعی برخوردار است.

جدول ۴. نمونه مسائل طراحی‌شده

شماره مسئله	اهداکنندگان خون	تعداد تسهیلات سیار	تعداد تسهیلات ثابت	تعداد نقاط تقاضا
۱	۵	۴	۳	۳
۲	۹	۵	۶	۴
۳	۱۴	۷	۶	۶
۴	۱۵	۸	۱۰	۷
۵	۲۴	۸	۱۵	۱۰

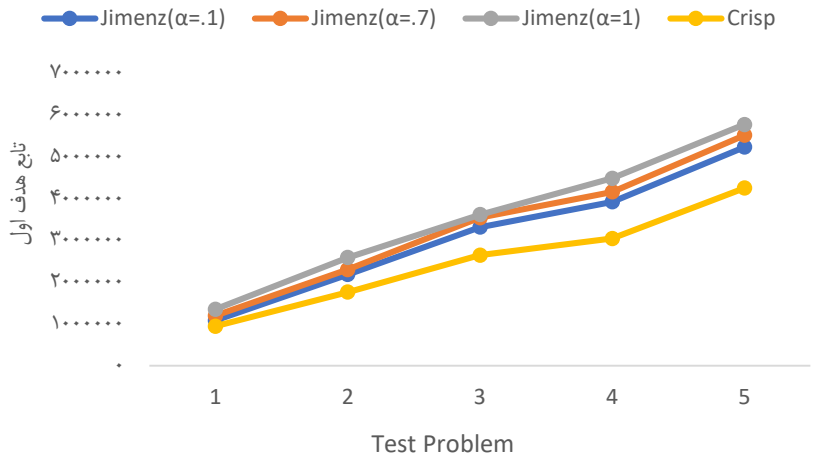
جدول ۵. نتایج عددی حاصل برای توابع هدف مدل قطعی و مدل قطعی شده به روش خیمنز

هدف دوم در حالت غیرقطعی	هدف اول در حالت غیرقطعی	α=۱		α=./۵		α=./۱		
		هدف دوم	هدف اول	هدف دوم	هدف اول	هدف دوم	هدف اول	شماره مسئله
۴۶	۹۴۴۰۰۰	۲۳	۱۱۵۲۶۲۵	۲۲	۱۰۹۶۰۲۵	۱۷	۱۰۸۳۷۳۵	۱
۵۲	۱۷۵۹۵۴۸	۱۴	۲۲۸۷۰۴۳	۱۹	۲۲۰۲۵۱۱	۲۵	۲۱۸۳۸۹۴	۲
۴۱	۲۶۴۵۶۷۱	۱۴	۳۴۱۳۹۲۵	۱۵	۳۴۴۰۹۳۷	۱۵	۳۳۱۴۲۴۶	۳
۵۰	۳۰۴۲۷۳۴	۱۱	۳۸۸۲۹۹۶	۱۳	۳۷۵۷۲۹۴	۱۶	۳۹۲۲۰۳۵	۴
۵۴	۴۲۴۹۶۴۳	۱۶	۵۴۷۱۰۹۴	۱۷	۵۳۱۳۵۷۸	۲۳	۵۲۲۹۷۵۵	۵

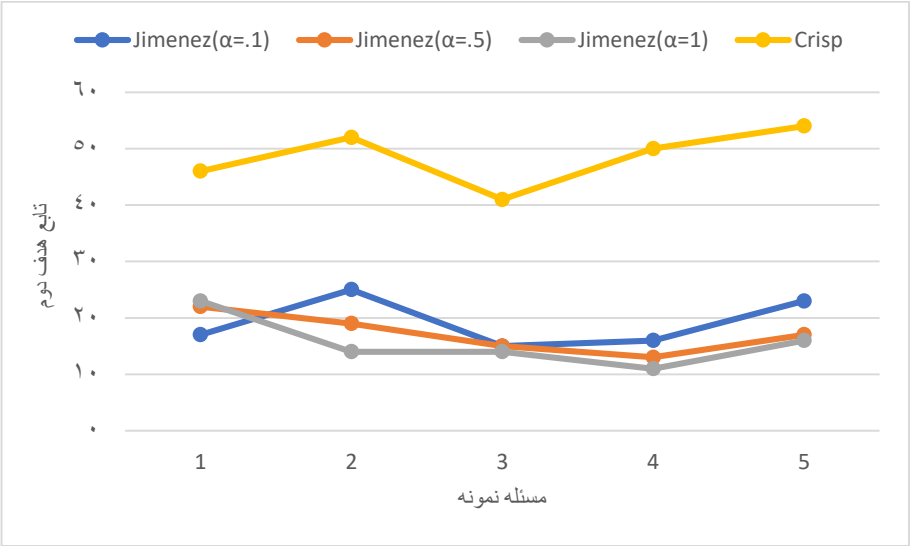
جدول ۶، مکان‌های انتخاب‌شده به‌منظور احداث تسهیلات ثابت برای مسئله نمونه دوم از جدول ۴ را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول از میان ۶ نقطه نامزد درنظرگرفته‌شده به‌منظور احداث تسهیلات ثابت، نقاط نامزد ۱، ۲ و ۶ به‌منظور احداث تسهیلات ثابت انتخاب شد؛ همچنین با توجه به نتایج حل مدل مشاهده شد که تسهیلات سیار در ۴ دوره زمانی درنظرگرفته‌شده به‌منظور حل مسئله در مکان اولیه خود ثابت بوده و تنها تسهیل سیار واقع در مکان دوم در انتهای دوره اول به مکان پنجم انتقال یافته است (۱ به‌معنای انتخاب و صفر به‌معنای عدم‌انتخاب مکان نامزد است).

جدول ۶. مکان‌های انتخاب‌شده به‌منظور تسهیلات ثابت

شماره مکان‌های نامزد	۱	۲	۳	٤	٥	٦
تأسیس/ عدم‌تأسیس	۱	۱	۰	۰	۰	۱

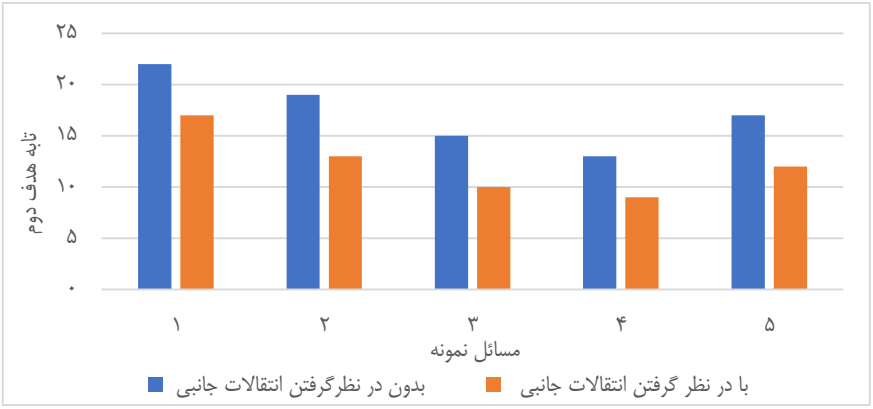


شکل ۳. نمودار مقادیر تابع هدف اول مدل قطعی و مدل قطعی‌شده با روش خیمنز



شکل ۴. نمودار مقادیر تابع هدف دوم مدل قطعی و مدل قطعی‌شده با روش خیمنز

شکل ۵، تغییرات تابع هدف دوم که سعی در حداقل‌کردن حداکثر میزان کمبود در هر یک از نقاط را دارد، برای حالت‌های بدون درنظرگرفتن انتقالات جانبی و با درنظرگرفتن انتقالات جانبی نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود برای تمام ۵ مسئله نمونه حل‌شده، مقدار تابع هدف با درنظرگرفتن انتقالات جانبی بسیار کمتر از مقدار تابع هدف بدون درنظرگرفتن انتقالات جانبی است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که درنظرگرفتن انتقالات جانبی می‌تواند با کاهش میزان کمبود در نقاط تقاضا موجب افزایش سطح رضایت شود.



شکل ۵. تغییرات تابع هدف دوم با درنظرگرفتن و بدون درنظرگرفتن انتقالات جانبی

جدول ۷، زمان حل مدل برای اندازه‌های مختلف مسئله را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این جدول می‌توان نتیجه گرفت که فازی‌بودن مدل تأثیر زیادی در پیچیدگی محاسبات و زمان حل مسئله ایجاد نمی‌کند.

جدول ۷. زمان حل مسائل نمونه (ثانیه)

مسئله نمونه	α=./۱	α=./۵	α=۱	حالت قطعی
۱	۲	۲	۳	۲
۲	۷	۸	۸	۵
۳	۱۰	۱۴	۱۶	۹
۴	۱۵	۱۶	۱۸	۱۰
۵	۱۷	۱۷	۲۱	۱۲

جدول ۸، زمان حل مسئله برای ابعاد مختلف را نشان می‌دهد. در سه مسئله نمونه اول، تعداد تمامی تسهیلات، تعداد اهداکنندگان و نقاط تقاضا ثابت نگه‌داشته شده و تعداد تسهیلات سیار در هر مسئله نمونه افزایش پیدا کرده است همان‌طور که مشخص است از مسئله نمونه اول به مسئله دوم و از مسئله دوم به سوم، زمان حل مسئله جهش قابل‌توجهی داشته است. در مسائل نمونه ۴، ۵ و ۶ نیز تعداد تسهیلات ثابت در هر مسئله افزایش یافته و تعداد سایر تسهیلات، اهداکنندگان و نقاط تقاضا ثابت باقی مانده است که در این سه مسئله نمونه هم زمان حل مسئله افزایش چشم‌گیری داشته باشد که این افزایش زمان به‌دلیل آن است که تصمیم‌های مرتبط با احداث تسهیلات ثابت و سیار از جنس متغیرهای صفر و یک (باینری) است و با افزایش تعداد تسهیلات، تعداد متغیرهای باینری مدل افزایش می‌یابد و موجب پیچیدگی حل مسئله می‌شود.

در مسائل نمونه ۶، ۷ و ۸، تعداد اهداکنندگان با ثابت نگه‌داشتن سایر تسهیلات، افزایش پیدا کرده است؛ ولی همان‌طورکه مشاهده می‌شود تغییر زیادی در زمان حل مسئله ایجاد نشده است؛ همچنین از مسئله نمونه ۸ به مسئله نمونه ۹، تعداد نقاط تقاضا افزایش یافته، ولی تغییر زیادی در زمان حل مسئله ایجاد نشده است؛ بنابراین افزایش تعداد اهداکنندگان خون و نقاط تقاضا باعث پیچیدگی مدل نمی‌شود و پیچیدگی مدل برنامه‌ریزی ارائه‌شده بیشتر به‌دلیل افزایش تعداد تسهیلات مرتبط با متغیرهای باینری است. با توجه به اینکه مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه‌شده به‌صورت یک مدل خطی مدل‌سازی شده، در کل، زمان حل مسئله بسیار پایین است.

جدول ۸. بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر روی زمان حل مسئله

شماره مسئله	اندازه مسئله	اهداکنندگان خون	تعداد تسهیلات سیار	تعداد تسهیلات ثابت	تعداد نقاط تقاضا	زمان حل
۱	کوچک	۵	۴	۳	۴	۲
۲		۵	۶	۳	۴	۶
۳		۵	۸	۳	۴	۹
۴		۵	۸	۵	۴	۱۲
۵	متوسط	۵	۸	۸	۴	۱۷
۶		۵	۱۰	۱۰	۴	۲۰
۷		۸	۱۰	۱۰	۴	۲۱
۸		۱۲	۱۰	۱۰	۴	۲۲
۹	بزرگ	۱۲	۱۰	۱۰	۸	۲۳
۱۰		۱۲	۱۶	۱۶	۱۲	۴۱
۱۱		۱۳	۱۶	۱۶	۱۴	۴۱
۱۲		۱۴	۱۷	۱۷	۱۴	۴۶

یافته‌های مدیریتی. مدیران و تصمیم‌گیرندگان در برنامه‌ریزی خود به‌منظور جمع‌آوری و نگهداری واحدهای خونی، باید به عدم‌قطعیت‌های موجود توجه جدی داشته باشند. با توجه به شکل ۴، درنظرگرفتن عدم‌قطعیت باعث کاهش قابل‌توجه در میزان کمبود واحدهای خونی در نقاط تقاضا می‌شود که درنهایت باعث افزایش سطح رضایت بیماران خواهد شد.

افزایش سطح سرویس با میزان هزینه‌های شبکه رابطه مستقیم دارد. با افزایش سطح رضایت تصمیم، سطح پاسخ به تقاضا افزایش پیدا می‌کند؛ در نتیجه میزان کمبود کاهش می‌یابد که در مقابل هزینه‌های کل شبکه افزایش می‌یابد؛ بنابراین مدیران و تصمیم‌گیرندگان باید این نکته مهم را مدنظر قرار دهند که با توجه به اهمیت واحدهای خونی، افزایش سطح سرویس مستلزم هزینه بیشتر در شبکه است.

در شرایطی که انتقال جانبی بین بیمارستان‌ها در نظر گرفته می‌شود، میزان کمبود در مقایسه با شرایطی که انتقال جانبی وجود ندارد، کاهش محسوسی داشته است. این موضوع نشان از اهمیت انتقال جانبی خون بین بیمارستان‌ها در کاهش میزان کمبود دارد و می‌تواند دیدگاه مثبتی نسبت به انتقال جانبی در ذهن تصمیم‌گیرندگان ایجاد کند.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، مدل ریاضی یکپارچه برای جمع‌آوری و عرضه محصولات خونی ارائه شده است. مراحل جمع‌آوری و توزیع به‌طور هم‌زمان در مدل ریاضی در نظر گرفته شده‌اند. در بخش جمع‌آوری، مکان‌یابی و تخصیص اهداکنندگان به هریک از پایگاه‌های ثابت و سیار خون در نظر گرفته شده است؛ سپس واحدهای خون جمع‌آوری‌شده توسط پایگاه‌های سیار نیز به پایگاه‌های ثابت خون منتقل و برای پاسخگویی به تقاضا، به بیمارستان‌ها منتقل می‌شوند. برای مدل‌سازی این مسئله از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط استفاده شد؛ سپس برای مواجهه با عدم‌قطعیت در برخی از پارامترهای مبهم مسئله، برنامه‌ریزی فازی به‌کار رفت. بعد از آن برای ابعاد مختلفی از مسائل نمونه، مسئله حل و نتایج آن تشریح و تحلیل حساسیت‌های لازم صورت گرفت. راهکارها و توصیه‌های مدیریتی حاصل از بررسی مدل ارائه‌شده به قرار زیر است:

با افزایش سطح رضایت تصمیم‌گیرنده، تقاضا در زنجیره موردنظر بالا می‌رود که به تبع آن هزینه‌ها و تقاضای ارضانشده افزایش پیدا می‌کند که مدیریت با کنترل آن می‌تواند هزینه‌ها و مقدار کمبود را در سطح قابل‌قبولی کنترل کند. برای مدیران، با توجه به درجه اهمیتی که هزینه‌ها و یا سطح سرویس‌دهی به بیمارستان‌ها دارند، می‌توانند موازنه‌ای بین هزینه‌ها و میزان تقاضای ارضانشده در شبکه انجام دهند. تأمین تقاضای بیمارستان‌ها به شکلی به‌موقع و به اندازه کافی، یک عامل بسیار مهم و کلیدی در تعیین کارایی و اثربخشی شبکه زنجیره تأمین خون است. زمانی که مدیریت می‌خواهد سطح سرویس‌دهی به نقاط تقاضا را در حداقل مقدار ممکن برقرار سازد، این عمل مستلزم صرف هزینه‌های بیشتری در زنجیره تأمین است. با توجه به شکل ۵، با افزایش سطح سرویس‌دهی، هزینه‌های شبکه به‌دلیل بالارفتن هزینه‌های سیستم جمع‌آوری خون، مانند تأسیس مراکز سیار یا ثابت خون، افزایش می‌یابد؛ اما بالارفتن سطح سرویس‌دهی به بیمارستان‌ها منجر به این می‌شود که تقاضای ارضانشده در زنجیره که معادل با تابع هدف دوم است، به‌شدت کاهش پیدا کند. با افزایش هزینه‌های نگهداری در مراکز منطقه‌ای، هزینه‌های کل شبکه بالا می‌رود و همچنین افزایش هزینه‌های نگهداری باعث می‌شود که این مراکز تمایل بیشتری به نگهداری موجودی کمتر داشته باشند و این امر می‌تواند به‌دلیل نگهداری موجودی کمتر باعث عدم‌تأمین به‌موقع و مناسب تقاضای بیمارستان‌ها شود؛بنابراین پایین نگه‌داشتن هزینه‌های

نگهداری، علاوه بر پایین نگه‌داشتن هزینه‌های شبکه می‌تواند به سطح سرویس بالاتر و تأمین تقاضای بیمارستان‌ها به مقدار بیشتر منجر شود.

برای مطالعات آینده موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

ـ می‌توان زنجیره تأمین فرآورده‌های خونی مختلف مانند پلاکت، پلاسما و غیره را از ابتدای دریافت از اهداکننده تا رسیدن به نقاط تقاضا بررسی کرد.

ـ در برخورد با عدم‌قطعیت می‌توان از رویکردهای دیگر نظیر بهینه‌سازی استوار و سناریومحور استفاده کرد و همچنین در حل مسائل با مقیاس بالا می‌توان از روش‌های ابتکاری و یا فراابتکاری بهره گرفت.

ـ از مفاهیمی نظیر اختلال در شبکه زنجیره تأمین می‌توان در ادامه این کار بهره برد. در بسیاری از موارد در دنیای واقعی، تأمین در زمان و حجم مناسب برای نقاط تقاضا توسط نقاط تأمین، ممکن است به‌درستی صورت نگیرد و در شبکه تأمین موردنظر اختلالی صورت بگیرد و کار را با مشکل همراه سازد.

ـ می‌توان با استفاده از یک مطالعه موردی، تأثیر مدل ارائه‌شده را در مسائل دنیای واقعی موردبررسی قرار داد و تفاوت هزینه‌ها قبل و بعد از بهینه‌سازی شبکه را مشاهده کرد.

منابع

1. Arvan, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Abdollahi, M. (2015). Designing a bi-objective and multi-product supply chain network for the supply of blood. *Uncertain Supply Chain Management, 3(1),* 57-68.
2. Barati, M. (2017). The Impact of Supply Chain Relationships Management on Competitiveness in Iranian Small and Medium-sized Enterprises in Automotive Parts Industry. *Journal of Industrial Management Perspective, 7(2),* 169-188 (in Persian).
3. Beliën, J., and Force, H. (2012). Supply chain management of blood products: A literature review. *European Journal of Operational Research, 217(1),* 1-16.
4. Cheraghi, S., & Hosseini-Motlagh, S.M. (2017). Optimal Blood Transportation in Disaster Relief Considering Facility Disruption and Route Reliability under Uncertainty. *International Journal of Transportation Engineereing, 4(3),* 225-254.
5. Cetin, E., & Sarul, L. S. (2009). A blood bank location model: A multi objective approach. *European Journal of Pure and Applied Mathematics, 2(1),* 112-124.
6. Eskandari-Khanghahi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Taleizadeh, A. A., & Amin, S. H. (2018). Designing and optimizing a sustainable supply chain network for a blood platelet bank under uncertainty. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 71,* 236-250.
7. Fahimnia, B., Jabbarzadeh, A., Ghavamifar, A., & Bell, M. (2015). Supply chain design for efficient and effective blood supply in disasters. *International Journal of Production Economics, 24,* 479–502.
8. Fontaine, M.J., Chung, Y.T., & Rogers, W.M. (2009). Improving platelet supply chains through collaborations between blood centers and transfusion services. *Tansfusion, 49(10),* 2040-2047.
9. Fereiduni, M., and Shahanaghi, K. (2016). A robust optimization model for blood supply chain in emergency situations. *International Journal of Industrial Engineering Computations, 7(4),* 535-554.
10. 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.
11. Ghandforoush, P., & Sen, T.K. (2010). A DSS to manage platelet production supply chain for regional blood centers. *Decision Support Systems, 50(1),* 32-42.
12. Hosseinifard, Z., and Abbasi, B. (2016). The inventory centralization impacts on sustainability of the blood supply chain. Computers & Operations Research, in press.
13. Hosseini-Motlagh, S. M., Samani, M. R. G., & Cheraghi, S. (2019). Robust and stable flexible blood supply chain network design under motivational initiatives. *Socio-Economic Planning Sciences, 1*00725.
14. Hamdan, B., & Diabat, A. (2019). A two-stage multi-echelon stochastic blood supply chain problem. *Computers & Operations Research, 101,* 130-143.
15. Haijema, R., Wal, J.V.D., and van Dijk, N.M. (2007). Blood platelet production: Optimization by dynamic programming and simulation. *Computers & Operations Research, 34(3),* 760-779.
16. Hemmelmayr, V., Doerner, K.F., & Hartl, R.F. (2010). Vendor managed inventory for environments with stochastic product usage. *European Journal of Operational Research, 202(3),* 686-695.
17. Hosseinifard, Z., & Abbasi, B. (2018). The inventory centralization impacts on sustainability of the blood supply chain. *Computers & Operations Research, 89,* 206-212.

18. Jacobs, D. A., Silan, M. N., & Clemson, B. A. (1996). An analysis of alternative locations and service areas of American Red Cross blood facilities. *Interfaces, 26(3),* 40-50.
19. Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., & Rodriguez, M. V. (2007). Linear programming with fuzzy parameters, An interactive method resolution. *European Journal of Operational Research, 177,* 1599–1609.
20. Kaveh, A., & Ghobadi, M. (2017). A Multistage Algorithm for Blood Banking Supply Chain Allocation Problem. *International Journal of Civil Engineering, 15(1),* 103-112.
21. Mohammadian, Z., & Jabbarzadeh, A. (2016). A location-allocation model of blood supply chain under uncertainty considering disruption and transshipment between hospitals. International Conference on New Researches in Engineering Sciences.
22. Mohammadian-Behbahani, Z., Jabbarzadeh, A., & Pishvaee, M. S. (2019). A robust optimization model for sustainable blood supply chain network design under uncertainty. *International Journal of Industrial and Systems Engineering, 31(4),* 475-494.
23. Nagurney, A. Masoumi, A. H. & Yu, M. (2012). Supply chain network operations management of a blood banking system with cost and risk minimization. *Computational Management Science, 9,* 205-231.
24. Osorio, A.F., Brailsford, S., and Smith, H.K. (2015). A structured review of quantitative models in the blood supply chain: a taxonomic framework for decision-making. *International Journal of Production Research, 53(24),* 7191–7212.
25. Rais, A., & Viana, A. (2011). Operations Research in Healthcare: a survey. *International transactions in operational research, 18(1),* 1-31.
26. Shahbandarzadeh, H., Paykam, A. (2015). Employment of a Weighted Fuzzy Multi-Objective Programming Model to Determine the Amount of Optimum Purchasing from Suppliers. *Journal of Industrial Management Perspective, 5(2),* 129-152 (in Persian).
27. Shaikh, R., Shambaiati, H. (2016). Locating Facilities in Uncertainty Conditions based on D Number Theory. *Journal of Industrial Management Perspective, 5(4),* 143-166 (in Persian).
28. Şahin, G., Süral, H., & Meral, S. (2007). Locational analysis for regionalization of Turkish Red Crescent blood services. *Computers & Operations Research, 34(3),* 692-704.
29. Şahin, G., Sural, H., & Meral, S. (2007). Locational analysis for regionalization of Turkish Red Crescent blood services. *Computers & Operations Research, 34(3),* 692-704.
30. Sha, Y., & Huang, J. (2012). The Multi-period Location-allocation Problem of Engineering Emergency Blood Supply Systems. *Systems Engineering Procedia, 5,* 21-28.
31. Syam, S.S., & Cote, M. (2010). A location–allocation model for service providers with application to not-for-profit health care organizations, *Omega, 38(3-4),* 157-166.
32. Shen, Z.J.M., Coullard, C., & Daskin, M.S. (2003). A Joint Location-Inventory Model. *Transportation Science, 37(1),* 40-55.
33. Torabi, S. A., & Hassini. E. (2008). An Interactive Possibilistic Programming Approach for Multiple Objective Supply Chain Master Planning An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. *Fuzzy sets and systems, 159(2),* 193-214.

34. Van Zyl G.J.J. (1964). *Inventory control for perishable commodities.* Dissertation, University of North of colifornia.
35. Zahiri, B., & Pishvaee, M.S. (2017). Blood supply chain network design considering blood group compatibility under uncertainty. *International Journal of Production Research, 55(7),* 2013-2033.
36. Zahiri, B., Torabi, S.A., Mousazadeh, M., & Mansouri, S.A. (2015). Blood collection management: Methodology and application. *Applied Mathematical Modelling, 39(23-24),* 7680-7696.
37. Zhou, Z., & Leung, L. (2011). Inventory Management of Platelets in Hospitals: Optimal Inventory Policy for Perishable Products with Regular and Optional Expedited Replenishments. *Manuf. & Serv. Oper. Manag, 1(4),* 420-438.
38. Zahiri, B., Torabi, S. A., Mohammadi, M., & Aghabegloo, M. (2018). A multi-stage stochastic programming approach for blood supply chain planning. *Computers & Industrial Engineering, 122,* 1-14.
39. Zahraee, S.M., Rouhani, J.M., & Firouzi, A. (2015). A Shahpanah Efficiency Improvement of Blood Supply Chain System Using Taguchi Method and Dynamic Simulation. *Procedia Manufacturing, 2,* 1-5.

Integrate Blood Supply Chain Network Design with Considering Lateral Transshipment under Uncertainty

Mansour Doodman[*], Ali Bozorgi Amiri[**]

Abstract

One of the most critical sections in a healthcare system, is blood supply chain that has owned significant portion of the costs of this system. So, any improvement in the blood supply chain performance can impressively lead to efficiency improvement and saving in the healthcare systems' costs. In this research, a bi-objective model is presented for blood supply chain network design with aiming at decreasing main and temporary facilities opening cost, transportation costs of blood-derived products and minimizing the maximum shortage. Due to uncertainty in supply and demand, for dealing with shortage and increasing of responsiveness, lateral transshipment among hospitals is considered. Uncertain model is converted to deterministic model using Jiménez fuzzy and then the bi-objective model is transformed to a single objective model using Torabi-Hassini's method. Computational results obtained from the model shows that in fuzzy model, because of α-cut, the model is more flexible while in the certainty situation, because of certainty in parameters, model's parameters value are not allowed to be flexible. Fuzzy model in addition to closeness to real environment, causes that managers make decisions based on uncertainty based on desirability. Also, model fuzzy has not significant impact on computational complexity and solving time.

Keywords: Blood Supply Chain Management; Location-Allocation; Uncertainty; Possibilistic Programming; Lateral Transshipment.

Received: May 04, 2018, Accepted: August 17, 2019.
* M.Sc., College of Engineering, University of Tehran.
** Associate Professor, College of Engineering, University of Tehran (Corresponding Author).
E-Mail: alibozorgi@ut.ac.ir