

ناعمه زرین پور^{۱*}، سید محسن علی زاده^۲

۱. ناعمه زرین پور^۱، دانشیار (مسئول مکاتبات)، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران.

ایمیل: zarrinpoor@sutech.ac.ir

۲. سید محسن علی زاده، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران.

ایمیل: mohsen.alizade44@yahoo.com

چکیده

با توجه به محدود بودن منابع تامین خون، فسادپذیری آن و خطرات ناشی از کمبود خون در بیمارستان‌ها، مدیریت زنجیره تامین خون با هدف تامین خون سالم و کافی یکی از چالش‌های مدیریت سیستم‌های سلامت محسوب می‌شود. در این مقاله، یک مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تامین خون بر اساس شعاع پوشش، بودجه، تاریخ انقضای خون در شرایط عدم قطعیت پارامترها ارائه می‌شود. بر اساس اهداف توسعه پایدار، مدل پیشنهادی کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تامین، کمینه‌سازی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و بیشینه‌سازی موقعیت‌های شغلی را میسر می‌سازد. برای مدیریت عدم قطعیت پارامترها از رویکرد برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس و برای حل مدل از برنامه‌ریزی فازی استفاده می‌شود. نتایج حاصل از مطالعه موردی نشان می‌دهد که مدل غیرقطعی بر اساس ضرایب اطمینان، حالت‌های مختلف جواب بهینه مکان‌یابی تسهیلات و جریان خون را در اختیار مدیران قرار می‌دهد. همچنین توابع هدف نسبت به حالت قطعی افزایش و تسهیلات موقتی بیشتری جهت کاهش کمبود خون استقرار می‌یابند.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تامین خون، اهداف توسعه پایدار، برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس، مکان‌یابی - تخصیص

^۱ شیراز، بلوار مدرس، دانشگاه صنعتی شیراز، دانشکده مهندسی صنایع.

۱. مقدمه

با توجه به رشد روزافزون جمعیت، شاهد افزایش بیماری‌ها، حوادث و آلودگی‌ها در جوامع بشری هستیم و برای کاهش عواقب چنین خطراتی، وجود یک سیستم سلامت کارآمد ضروری است. تامین خون سالم و کافی نقشی اساسی در مدیریت سیستم‌های سلامت ایفا می‌کند و هزینه‌های مربوط به تامین خون و مشتقات آن نیز بخش مهمی از مخارج بهداشتی جوامع را تشکیل می‌دهد.^[۱] فرآورده‌های خونی برای نجات جان انسان‌ها بسیار ضروری است و فقدان آن ممکن است باعث به خطر انداختن سلامت و ایمنی انسان شود.^[۲] برای فرآیندهای درمانی در بیمارستان نظیر پیوند اعضا، درمان سرطان، کم خونی و انجام جراحی‌های بزرگ نظیر جراحی قلب باز، خون مورد نیاز است. از هر سه نفر، یک نفر در طول زندگی به انتقال خون و فرآورده‌های خونی نیاز دارد. هر ساله حدود ۵ میلیون بیمار در آمریکا خون یا محصولات خونی مانند سلول‌های قرمز خون، پلاکت یا پلاسما را از طریق تزریق خون دریافت می‌کنند.^[۳]

خون انسان یک منبع کمیاب است که فقط به وسیله خود انسان تولید می‌شود و در حال حاضر هیچ محصول فرآیند شیمیایی دیگری به عنوان جایگزین آن وجود ندارد.^[۴] بر اساس آمار و اطلاعات موجود، تنها حدود پنج درصد از اهداکنندگان واجد شرایط واقعا خون خود را اهدا می‌کنند.^[۵] با توجه به نیاز مبرم به خون و همچنین توجه به این موضوع که اهداکنندگان باید برای اهدای خون زمان مشخصی را به مراکز خون مراجعه کنند، جهت تکریم و افزایش اهداکنندگان و صرفه‌جویی در وقت آن‌ها نیاز هست که اهداکننده رزرو و غیر رزرو در نظر گرفته شود.^[۶] اهداکنندگان رزرو، افرادی هستند که به علت مشکلات شخصی نمی‌توانند همه ساعته به مراکز خون مراجعه کنند.^[۶] این موضوع در بلندمدت رضایت و تشویق اهداکنندگان جهت اهدای خون و همچنین افزایش عرضه در زنجیره تامین خون را در پی خواهد داشت. اهداکنندگان غیر رزرو نیز افرادی هستند که می‌توانند در هر ساعت از شبانه‌روز به مراکز خون جهت اهدای خون مراجعه کنند و ممکن است به علت شلوغی مرکز انتقال خون مدت زمانی

را معطل بمانند.^[۶] شایان ذکر است که در دنیای واقعی نیز دو نوع فرآیند اهدا به دو صورت رزرو و غیررزرو وجود دارد. در سایت سازمان انتقال خون نیز سامانه نوبت‌دهی اینترنتی اهدای خون اضافه شده است که بر اساس آن اهداکننده می‌تواند نوبت اهدای خون را رزرو نماید و برای مشاهده، پیگیری یا ابطال نوبت رزرو شده بر اساس کد رهگیری اقدام نماید.^[۷]

به همین دلیل، تهیه خون سالم و کافی هم در هنگام فاجعه و هم در شرایط عادی، یک چالش بزرگ برای سیستم‌های بهداشتی دولت‌ها محسوب می‌شود. با توجه به اهمیت خون در سیستم‌های سلامت، طراحی یک زنجیره تامین خون کارا با در نظر گرفتن مواردی نظیر اهداکنندگان، تعیین تعداد و مکان بهینه مراکز خون، نحوه تخصیص خون، میزان موجودی خون و تعیین نواحی خدمت‌رسانی تسهیلات ضروری به نظر می‌رسد.^[۸]

طراحی یک شبکه یکپارچه تامین و توزیع خون می‌تواند تا حد زیادی موجب کاهش خسارات جانی ناشی از کمبود خون شود و همچنین موجب صرفه‌جویی در هزینه‌ها و رضایت مصرف‌کنندگان شود.^[۹] اگرچه، نیاز به اهداکنندگان خون برای تامین فرآورده‌های خونی وجود دارد، اما تامین نامنظم خون و غیرقطعی بودن تعداد اهداکنندگان خون، زمان اهدا و میزان تقاضا برای فرآورده‌های خونی موجب شده است که ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضای خون بسیار دشوار باشد.^[۱۰]

بررسی موضوع پایداری در مدیریت زنجیره تامین به دلیل مقررات دولت‌ها و مسئولیت‌های اجتماعی سازمان‌ها موضوعی غیرقابل اجتناب است. در سال‌های اخیر طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار به عنوان ابزاری برای مقابله با مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی به همراه جنبه اقتصادی زنجیره تامین توسعه یافته است.^[۱۰]

سازمان جهانی بهداشت توصیه می‌کند که فرآیندهای مختلف یک سیستم سلامت که در آن خون و فرآورده‌های خونی وجود دارند، باید از طریق یک شبکه پایدار و یکپارچه هماهنگ شوند تا ایمنی و امکان تولید فرآورده‌های کافی فراهم شود.^[۱۱،۱۲] با توجه به هزینه‌های بالای زنجیره تامین خون، وجود منابع محدود برای تامین خون، بودجه

کمینه و بر اساس بعد اجتماعی مشاغل ایجاد شده بیشینه می‌شود.

در مدل پیشنهادی، محدودیت بودجه برای ساخت تجهیزات موقتی، میزان کمبود و موجودی خون در دوره‌های زمانی مختلف و هزینه تست آزمایش خون بررسی شده است. با توجه به ماهیت غیرقطعی پارامترها در دنیای واقعی، عدم قطعیت پارامترهای کلیدی زنجیره تامین خون نظیر تقاضای خون، هزینه‌های سیستم و بودجه در نظر گرفته شده است. برای برخورد با عدم قطعیت پارامترها از رویکرد فازی محدودیت شانس و برای حل مدل چندهدفه نیز از رویکرد فازی تعاملی استفاده شده است. در پایان نیز یک مطالعه موردی برای نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی در حل مسائل دنیای واقعی ارائه شده است. ادامه این مقاله به این صورت سازماندهی شده است که در بخش دوم پیشینه پژوهش ارائه می‌شود. در بخش سوم، مدل پیشنهادی و مفروضات آن بیان می‌شود. در بخش چهارم، رویکرد برخورد با عدم قطعیت تشریح می‌شود. در بخش پنجم روش حل مسئله بیان می‌شود. در بخش ششم، نتایج عددی و تحلیل حساسیت مدل بیان خواهد شد. در بخش هفتم بینش‌های مدیریتی بیان می‌شود و در بخش آخر نتیجه‌گیری و جهت‌های تحقیقات آتی آورده شده است.

۲. پیشینه پژوهش

رویکردهای مختلفی در مدل‌سازی زنجیره تامین خون وجود دارد که می‌توان به مدل‌های شبیه‌سازی، برنامه‌ریزی عدد صحیح، برنامه‌ریزی آرمانی و برنامه‌ریزی پویا اشاره کرد. نخستین بار ون زایل [۲۳]، مطالعاتی در زمینه مدیریت زنجیره تامین مواد فاسدشدنی و فرآورده‌های خونی انجام داد. اولین مدل ریاضی جهت مدیریت موجودی محصولات خونی نیز توسط نامیاس [۲۴]، ارائه شد. ساو و هوانگ [۲۵]، مدلی برای برنامه‌ریزی توزیع خون در شرایط فاجعه با هدف کمینه‌سازی هزینه حمل و نقل، هزینه جابجایی تسهیلات ارائه نمودند. جبارزاده و همکاران [۲۶]، یک مدل برای طراحی زنجیره تامین خون با هدف کمینه‌سازی هزینه حمل و نقل، هزینه نگهداری موجودی، هزینه استقرار تسهیلات و هزینه عملیاتی ارائه دادند. گانپینار و سنترو [۴]، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح جهت کمینه‌سازی هزینه‌ها، کمبود و

کنترل‌شده، بررسی مسائل زیست‌محیطی نظیر ضایعات خون با توجه به بحث فاسدشدن خون و فرآورده‌های آن ضروری است تا به موجب آن امکان طراحی و تدوین استراتژی‌هایی برای تامین تقاضا و عرضه خون از طریق خدمات با کیفیت پایدار میسر شود. [۱۲] به این دلایل، با در نظر گرفتن سه رکن زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی برای جلوگیری از مرگ و میر، ضایعات خون و جلوگیری از تحمیل هزینه‌های بالا، استفاده از پایداری در زنجیره تامین خون امری ضروری است. [۱۴-۱۲] افزون بر ضایعات خون، افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی یکی دیگر از مسائل مهم و چالش‌های زنجیره تامین خون است. تاثیرات زیست‌محیطی هنگام تاسیس مراکز خون [۱۳، ۱۵]، انتقال خون از مراکز موقت به مراکز دائم خون [۱۳-۱۸]، انتقال خون از مراکز خون به آزمایشگاه و از آزمایشگاه به نقاط تقاضا [۱۸-۱۳]، نمونه‌هایی از فعالیت‌های حمل و نقل در زنجیره تامین خون است که سبب تولید و افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی در زنجیره تامین خون می‌شود. [۱۶-۱۸] همچنین دفن خون‌های فاسدشده نیز یکی دیگر از منابع تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی است. [۱۳-۱۶] یکی دیگر از ابعاد مهم پایداری، مسئولیت اجتماعی است که با مسائلی مانند ایجاد شغل، ایمنی محیط کار، کاهش نرخ اخراج کارکنان، توسعه منطقه، تسهیلات رفاهی کارکنان، آموزش کارکنان و غیره بررسی می‌شود. [۱۹] بررسی بعد اجتماعی نقش مهمی در عملکرد زنجیره تامین در هر صنعتی و از جمله در زمینه خون و فرآورده‌های خونی دارد. [۲۰] بعد اجتماعی در زنجیره تامین خون در پارامترهایی نظیر فرصت‌های شغلی ایجاد شده در مراکز دائم و موقتی خون [۱۴، ۱۶، ۲۰] و شاخص سلامت و ایمنی مصرف‌کننده و اهداکننده [۲۱، ۲۲] بررسی شده است.

در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی چندسطحی و چند دوره‌ای برای طراحی زنجیره تامین خون با در نظر گرفتن اهداف توسعه پایدار ارائه شده است. بر اساس بعد اقتصادی پایداری، هزینه‌های زنجیره تامین خون کمینه خواهد شد. بر اساس بعد زیست‌محیطی، تاثیرات زیست‌محیطی تاسیس مراکز خون موقت و دائم و جریان خون ارسال شده بین سطوح مختلف زنجیره تامین

میزان ضایعات فرآورده‌های خونی در بیمارستان در یک افق برنامه‌ریزی مورد بررسی قرار دادند. در مدل آن‌ها، تمرکز اصلی روی گلبول‌های قرمز و اجزای پلاکت کل سلول‌های خون بود. فریدونی و شهانقی^[۲۷]، یک مدل برنامه‌ریزی چنددوره‌ای برای طراحی زنجیره تامین خون با هدف تعیین مکان و توزیع فرآورده‌های خونی در شرایط وقوع فاجعه پیشنهاد دادند. رضانیان و بهبودی^[۲۸]، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با هدف کمینه‌سازی هزینه مکان‌یابی تسهیلات دائمی، هزینه انتقال تسهیلات موقت، هزینه حمل و نقل از تاسیسات به مراکز خون، هزینه نگهداری موجودی و هزینه کمبود طراحی کردند. در مدل آن‌ها، پارامترهای هزینه و تقاضا غیرقطعی است و از یک رویکرد برنامه‌ریزی استوار برای برخورد با عدم قطعیت پارامترها استفاده شده است. اسکندری خانقاهی و همکاران^[۱۳]، یک شبکه زنجیره تامین خون پایدار تحت شرایط عدم قطعیت پارامترها در زمان بحران توسعه دادند. در مدل آن‌ها، اهداف کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی جمع‌آوری خون و هزینه‌های زنجیره تامین و بیشینه‌سازی اثرات اجتماعی از جمله تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده در نظر گرفته شده است. حیدری فاتحیان و پسندیده^[۱۴]، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌های زنجیره، کمینه‌سازی مقدار کمبود و خون فاسدشده در بیمارستان‌ها و اثرات زیست‌محیطی جهت طراحی یک شبکه زنجیره تامین خون ارائه دادند. اسوریو و همکاران^[۲۹]، یک مدل برنامه‌ریزی استوار با هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌ها و تعیین تعداد اهداکنندگان در دسترس ارائه دادند. سامانی و همکاران^[۳۰]، یک مدل ریاضی با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌ها، تقاضای از دست رفته و فاصله بین تولید خون در مراکز خون و مصرف در بیمارستان‌ها در شرایط فاجعه طراحی کردند. لاریمی و یعقوبی^[۶]، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی تحت شرایط عدم قطعیت با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌ها و بیشینه‌سازی واحدهای پلاکت خون در بیمارستان‌ها ارائه نمودند. دیابت و همکاران^[۳۱]، یک مدل ریاضی با هدف کمینه‌سازی زمان و هزینه تحویل محصولات به نقاط تقاضا بعد از وقوع فاجعه با در نظر گرفتن امکان اختلال در تسهیلات زنجیره تامین خون پیشنهاد کردند. راجندران و راویندان^[۳۲]، یک مدل بهینه‌سازی استوار به منظور کمینه‌سازی ضایعات و کمبود پلاکت برای تعیین سیاست‌های سفارش‌دهی در زنجیره تامین خون در

شرایط عدم قطعیت تقاضا ارائه دادند. صالحی و همکاران^[۳۳]، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی جهت طراحی شبکه توزیع خون در شرایط وقوع فجایع طبیعی پیشنهاد کردند. بهبهانی و همکاران^[۲۱]، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تامین خون با اهداف کمینه‌سازی زمان تحویل فرآورده‌های خونی و کل هزینه‌های زنجیره و بیشینه‌سازی تاثیرات اجتماعی نظیر شاخص سلامت مصرف‌کننده و میزان اهداکنندگان منظم خون ارائه دادند. جمائی و همکاران^[۳۴]، مدلی جهت طراحی شبکه زنجیره تامین پلاکت با اهداف کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی جمع‌آوری پلاکت بین سطوح زنجیره و کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره ارائه دادند. حق جو و همکاران^[۳۵]، یک مدل مکان‌یابی-تخصیص برای طراحی یک شبکه زنجیره تامین خون در شرایط بحران و با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف جهت مدل‌سازی عدم قطعیت تقاضا و اختلالات تسهیلات پیشنهاد دادند. همدان و دیابت^[۳۶]، یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه جهت طراحی زنجیره تامین با هدف کمینه‌سازی زمان و هزینه ارسال خون به بیمارستان‌ها پس از وقوع فاجعه پیشنهاد دادند. آن‌ها امکان وقوع اختلالات احتمالی در تسهیلات خون و مسیرهای حمل و نقل را بررسی نمودند. حسینی مطلق و همکاران^[۳۷]، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی جهت مدیریت زنجیره تامین گلبول‌های قرمز ارائه دادند که هدف آن کمینه‌سازی هزینه کل شامل هزینه ثابت استقرار تسهیلات، هزینه عملیاتی، هزینه نگهداری موجودی و هزینه حمل و نقل است. قهرمانی و همکاران^[۳۸]، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی جهت طراحی شبکه زنجیره تامین خون با هدف کمینه‌سازی هزینه تاسیس مراکز دائم، هزینه حمل و نقل خون بین سطوح زنجیره و هزینه نگهداری موجودی خون ارائه کردند. شیرازی و همکاران^[۳۹]، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی جهت طراحی شبکه زنجیره تامین خون با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌ها و زمان‌های حمل و نقل بین سطوح زنجیره پیشنهاد دادند. آرانی و همکاران^[۱۵]، مدلی جهت طراحی یک شبکه زنجیره تامین خون پایدار با اهداف کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی جمع‌آوری خون، کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره و بیشینه‌سازی اثرات اجتماعی از جمله تعداد فرصت‌های شغلی ایجادشده از تاسیس مراکز دائم و موقت طراحی کردند. اسدپور و همکاران^[۱۶]، یک مدل ریاضی با اهداف کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی

جمع‌آوری خون بین سطوح زنجیره و کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره در پیشنهاد دادند. اسکندری و فیلی^[۱۷]، مدلی جهت طراحی یک شبکه زنجیره تامین خون با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره، کمینه‌سازی تقاضای برآورده‌نشده و کمینه‌سازی اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از حمل و نقل خون بین سطوح زنجیره ارائه کردند. قهرمانی و همکاران^[۱۸]، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی جهت طراحی شبکه زنجیره تامین خون با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره و کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی ناشی از حمل و نقل خون بین سطوح زنجیره ارائه کردند. تیرکلاهی و همکاران^[۲۰]، مدلی جهت طراحی شبکه زنجیره تامین خون با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره و بیشینه‌سازی اثرات مثبت اجتماعی از جمله ایجاد فرصت شغلی در مراکز موقت و دائم خون و بیمارستان‌ها طراحی کردند. اسلامی‌پور و نوبری^[۴۰]، مدلی جهت طراحی شبکه زنجیره تامین خون با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره، کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی ناشی از ایجاد مراکز خون، حمل و نقل بین سطوح زنجیره و دفن خون‌های فاسدشده و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان از تامین خون پیشنهاد دادند. خداوردی و همکاران^[۴۱]، یک مدل ریاضی جهت طراحی شبکه زنجیره تامین خون با اهداف کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی ناشی از حمل و نقل بین سطوح زنجیره و دفن خون‌های فاسدشده، کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره و کمینه‌سازی کمبود خون طراحی کردند.

در جدول ۱ خلاصه‌ای از تحقیقات پیشین و ویژگی‌های آن‌ها بررسی شده است. سطر آخر جدول نیز، ویژگی‌های پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. اگر چه، بعد اقتصادی پایداری با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها از مسائل کلیدی در طراحی شبکه زنجیره تامین خون به حساب می‌آید، اما در سال‌های اخیر مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی در طراحی زنجیره تامین در بخش سلامت و مراقبت‌های بهداشتی به ویژه زنجیره تامین خون نیز بسیار مورد توجه نویسندگان قرار گرفته است. اما استفاده از هر سه بعد پایداری تنها در دو مقاله اسکندری خانقاهی و همکاران^[۱۳]، آرانی و همکاران^[۱۵] مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر تقاضای خون، بسیاری از پارامترها در طراحی شبکه زنجیره تامین خون در دنیای واقعی نظیر بودجه برای راه‌اندازی تسهیلات موقتی و هزینه‌های زنجیره تامین در هر دوره ماهیت

غیرقطعی دارند. بنابراین لزوم استفاده از رویکردهای عدم‌قطعیت جهت افزایش کارایی مدل امری ضروری است. شایان ذکر است که در این مطالعه تقاضا، بودجه برای راه‌اندازی تسهیلات موقتی و هزینه‌های سیستم به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند، که در ادبیات موضوع استفاده از عدم‌قطعیت برای پارامترهای ذکرشده به طور همزمان در هیچ پژوهشی یافت نشده است. در بخش ویژگی‌های مدل، تنها در مقاله حق‌جو و همکاران^[۳۵] محدودیت بودجه برای راه‌اندازی تسهیلات جمع‌آوری خون استفاده شده است. سطح انقضاء خون در مقالات اندکی از جمله لاریمی و یعقوبی^[۶]، راجندران و راویندان^[۳۲] و اسدپور و همکاران^[۱۶]، مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین تمام ویژگی‌های مدل‌سازی نظیر مکان‌یابی، تخصیص، موجودی، بودجه، سطح انقضاء و شعاع پوشش به طور همزمان در هیچ پژوهشی یافت نشده است. جهت افزایش اهداکنندگان و صرفه‌جویی در وقت برای اهداکنندگان نیاز هست که اهداکننده رزرو و غیر رزرو در مدل‌سازی ریاضی جهت افزایش میزان عرضه در نظر گرفته شود، که تنها در مقاله لاریمی و یعقوبی^[۶]، به این موضوع پرداخته شده است. با تعیین شکاف‌های تحقیقاتی در مطالعات پیشین مطابق جدول ۱ و توضیحات مطرح شده، نوآوری‌های پژوهش حاضر به صورت زیر است:

- توسعه یک مدل ریاضی چند هدفه با در نظر گرفتن هر سه بعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به طور همزمان؛
- ارائه یک مدل یکپارچه مکان‌یابی - تخصیص - موجودی با در نظر گرفتن فاکتورهایی نظیر بودجه برای تسهیلات جمع‌آوری خون، شعاع پوشش، انواع اهداکنندگان و سطح انقضاء؛
- در نظر گرفتن عدم‌قطعیت پارامترهایی نظیر تقاضای خون، هزینه‌های سیستم و بودجه و استفاده از یک رویکرد فازی محدودیت شانس جهت برخورد با عدم‌قطعیت؛
- استفاده از روش برنامه‌ریزی فازی تعاملی برای حل مدل چندهدفه پیشنهادی؛
- استفاده از مطالعه موردی واقعی شهر شیراز برای نشان دادن کاربردی بودن مدل پیشنهادی.

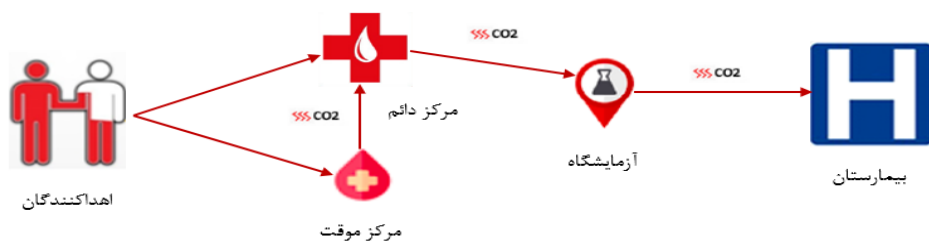
جدول ۱. خلاصه مقالات زنجیره تامین خون.

مطالعه موردی	روش حل			ویژگی‌های مدل							تابع هدف			پارامتر دارای عدم قطعیت			نوع پارامترها		مرجع
				اهدایکنندگان زرزو و غیرزرزو	تاریخ تاریخ انقضا	شعاع پوشش	بودجه	موجودی	تخصیص	مکان یابی	زیست‌محیطی	اجتماعی	اقتصادی	بودجه	تقاضا	هزینه‌های سیستم	عدم قطعیت	غیر قطعی	
	دوقیتی	ابتکاری	فرا ابتکاری																
*	*	*	*					*	*	*							*	[۲۵]	
*	*	*	*			*		*	*	*		*	*	ترکیبی	*		*	[۲۶]	
			*					*	*	*		*	*	تصادفی	*		*	[۴]	
*	*	*	*			*		*	*	*		*	*	ترکیبی	*		*	[۲۷]	
*	*	*	*			*		*	*	*		*	*	استوار	*		*	[۲۸]	
*	*	*	*			*		*	*	*		*	*	استوار	*		*	[۲۹]	
*	*	*	*			*		*	*	*		*	*	ترکیبی	*		*	[۳۰]	
*	*	*	*	*		*		*	*	*		*	*	استوار	*		*	[۶]	
*	*	*	*			*		*	*	*		*	*	ترکیبی	*		*	[۳۱]	
*	*	*	*	*		*		*	*	*		*	*	استوار	*		*	[۳۲]	
*	*	*	*			*		*	*	*		*	*	ترکیبی	*		*	[۳۳]	
*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*	ترکیبی	*		*	[۲۱]	
*	*	*	*			*		*	*	*	*	*	*			*	*	[۳۴]	
*	*	*	*			*	*	*	*	*		*	*	ترکیبی	*		*	[۳۵]	
*	*	*	*			*	*	*	*	*		*	*	ترکیبی	*		*	[۳۶]	
*	*	*	*			*	*	*	*	*		*	*	ترکیبی	*		*	[۳۷]	
		*	*			*	*	*	*	*		*	*	استوار	*		*	[۳۸]	
*	*	*	*			*	*	*	*	*		*	*	تصادفی	*		*	[۳۹]	
		*	*			*	*	*	*	*	*	*	*	ترکیبی	*		*	[۱۵]	
*	*	*	*	*		*	*	*	*	*		*	*	تصادفی	*		*	[۱۶]	
*	*	*	*			*	*	*	*	*		*	*	استوار	*		*	[۱۷]	
*	*	*	*			*	*	*	*	*		*	*	ترکیبی	*		*	[۱۸]	
*	*	*	*			*	*	*	*	*	*	*	*	فازی	*		*	[۲۰]	
*	*	*	*			*	*	*	*	*		*	*			*	*	[۴۰]	
*	*	*	*			*	*	*	*	*		*	*	ترکیبی	*		*	[۴۱]	
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	فازی	*		*	این مطالعه	

شبکه زنجیره تامین خون با در نظر گرفتن اهداکنندگان، مراکز موقت و دائم انتقال خون، آزمایشگاه‌ها و بیمارستان‌ها (نقاط تقاضا) ارائه شده است. شکل ۱ نمای کلی زنجیره تامین خون پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۳. مدل ریاضی
۳.۱. تعریف مسئله

در این مقاله یک مدل مکان‌یابی - تخصیص برای طراحی



شکل ۱. شبکه زنجیره تامین خون.

(۷) در مراکز موقت هیچ ذخیره‌سازی وجود ندارد و خون تنها در مراکز دائم و آزمایشگاه ذخیره می‌شود. [۳۳،۴۳،۴۴]

۳.۳. نمادهای مدل

مجموعه‌ها:

K : مجموعه اهداکنندگان

M : مجموعه مراکز دائم

J : مجموعه مراکز موقت

L : مجموعه آزمایشگاه‌ها

U : مجموعه بیمارستان‌ها

T : مجموعه دوره‌های زمانی

پارامترها:

\tilde{D}_{ut} : تقاضای خون بیمارستان u در دوره t

\tilde{B} : حداکثر بودجه برای ساخت تسهیلات

d_{kt} : حداکثر میزان اهدای خون اهداکننده k در دوره t

Φ_{kt} : میزان خون دریافت شده از اهداکننده k در دوره t

r : شعاع پوشش مراکز دائم خون

r_w : شعاع پوشش مراکز موقت خون

m_{jm} : فاصله بین مرکز موقت j و مرکز دائم m

ru_{ml} : فاصله بین مرکز دائم m و آزمایشگاه l

rl_{lu} : فاصله بین آزمایشگاه l و بیمارستان u

\tilde{Q}_{mt} : هزینه کمبود در مرکز دائم m در دوره t

\tilde{C}_{mt} : هزینه تدارکات برای جمع‌آوری خون از

اهداکنندگان رزرو در مرکز دائم m در دوره t

\tilde{C}'_{mt} : هزینه تدارکات برای جمع‌آوری خون از

اهداکنندگان غیررزرو در مرکز دائم m در دوره t

\tilde{C}_{jmt} : هزینه انتقال یک واحد خون از مرکز موقت j به

مرکز دائم m در دوره t

$\tilde{C}T_{mlt}$: هزینه انتقال یک واحد خون از مرکز دائم m به

آزمایشگاه l در دوره t

$\tilde{C}n_{lut}$: هزینه انتقال یک واحد خون از آزمایشگاه l به

بیمارستان u در دوره t

FR_m : هزینه ثابت ساخت مرکز دائم خون m

Fu : هزینه ثابت راه‌اندازی مرکز خون موقت

در مدل پیشنهادی، اهداکنندگان برای اهدای خون به مراکز موقت یا دائم مراجعه می‌کنند. خون‌های اهدا شده از مراکز موقت به مراکز دائم منتقل می‌شوند. سپس، خون‌های جمع‌آوری شده در مراکز دائم به آزمایشگاه‌ها منتقل می‌شوند و پس از تایید سلامت در بیمارستان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مدل ارائه شده، تصمیمات بهینه در مورد مکان‌یابی مراکز خون (دائم و موقت)، تخصیص اهداکنندگان به مراکز خون دائم یا موقتی، جریان خون در کل زنجیره، میزان موجودی و میزان کمبود خون در هر دوره زمانی اتخاذ می‌شود. در مدل پیشنهادی اهداف توسعه پایدار لحاظ شده است. بر اساس بعد اقتصادی پایداری، هزینه‌های زنجیره تامین خون کمینه خواهد شد. بر اساس بعد زیست‌محیطی، تاثیرات زیست‌محیطی ناشی از ایجاد مراکز خون و حمل و نقل خون کمینه و بر اساس بعد اجتماعی مشاغل ایجاد شده جهت تاسیس مراکز دائم و موقت بیشینه می‌شود. در مدل ریاضی، محدودیت‌های دنیای واقعی نظیر بودجه برای ساخت مراکز موقت، موجودی جهت کاهش خطر مرگ و میر ناشی از کمبود خون، برآورده شدن تقاضای خون در هر دوره و سطح انقضای خون در مراکز دائم و آزمایشگاه بررسی می‌شود. عدم قطعیت پارامترهای تقاضای خون، هزینه‌های سیستم، ضایعات خون و بودجه نیز در نظر گرفته می‌شود. در ادامه نوشتار مفروضات، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم و مدل ریاضی تشریح می‌شود.

۳.۲. مفروضات

(۱) فرآیند اهدای خون به دو صورت رزرو و غیر رزرو

قابل انجام است. [۶،۷]

(۲) برای مقابله با کمبود خون، واحدهای خون به عنوان ذخیره در بانک خون نگهداری می‌شود.

(۳) هر اهداکننده در هر زمان می‌تواند تنها به یک مرکز موقت یا یک مرکز دائم، خون اهدا کند. [۳۵،۴۲]

(۴) بودجه برای احداث تسهیلات خون محدود است.

(۵) برای کنترل بهتر تصمیمات میان‌مدت و نوسانات در دوره‌های تقاضا، برنامه‌ریزی در دوره‌های زمانی مختلف انجام می‌شود.

(۶) خون‌های جمع‌آوری شده در مراکز موقت و دائم برای آزمایش سلامت خون باید به آزمایشگاه منتقل شوند.

متغیرهای تصمیم:

XR_m : اگر یک مرکز خون دائم در مکان m ایجاد شود یک و در غیر این صورت صفر است.

YU_{kjt} : اگر اهداکننده k به مرکز موقت j در دوره t تخصیص یابد یک و در غیر این صورت صفر است.

YR_{kmt} : اگر اهداکننده k به مرکز دائم m در دوره t تخصیص یابد یک و در غیر این صورت صفر است.

R_{jmt} : اگر مرکز موقت j به مرکز دائم m در دوره t تخصیص یابد یک و در غیر این صورت صفر است.

RT_{mlt} : اگر مرکز دائم m به آزمایشگاه l در دوره t تخصیص یابد یک و در غیر این صورت صفر است.

RN_{lut} : اگر آزمایشگاه l به بیمارستان u در دوره t خون تخصیص دهد یک و در غیر این صورت صفر است.

QN_{lut} : مقدار خون منتقل شده از آزمایشگاه l به بیمارستان u در دوره t

Q_{mlt}'' : مقدار خون منتقل شده از مرکز دائم m به آزمایشگاه l در دوره t

Q_{mkt}'' : مقدار خون جمع‌آوری شده در مرکز دائم m از اهداکننده k در دوره t

Q'_{jmt} : مقدار خون منتقل شده از مرکز موقت j به مرکز دائم m در دوره t

Q_{jkt} : مقدار خون جمع‌آوری شده در مرکز موقت j از اهداکننده k در دوره t

er_t : تعداد تسهیلات موقت مورد نیاز در دوره t

X_{lt} : تعداد اهداکنندگان خون غیر رزرو k در دوره t

S_{kt} : تعداد اهداکنندگان خون رزرو k در دوره t

SH_{mt} : میزان کمبود خون در مرکز دائم m در دوره t

IL_{lt} : سطح موجودی خون در آزمایشگاه l در دوره t

IH_{mt} : سطح موجودی خون در مرکز دائم m در دوره t

XM_{jj1t} : اگر مرکز موقت در مکان j استقرار یابد و به مکان l در دوره t انتقال یابد یک و در غیر این صورت صفر است.

\tilde{C}_{mkt} : هزینه عملیاتی واحد برای جمع‌آوری خون در مرکز دائم m از اهداکننده k در دوره t

\tilde{C}_{jkt} : هزینه عملیاتی واحد برای جمع‌آوری خون در مرکز موقت j از اهداکننده k در دوره t

$\tilde{C}H_{lt}$: هزینه نگهداری یک واحد خون در آزمایشگاه l در دوره t

\tilde{C}_l : هزینه تست هر واحد خون در آزمایشگاه l در دوره t

$\tilde{C}H_{mt}$: هزینه نگهداری یک واحد خون در مرکز دائم m در دوره t

$\tilde{C}V_{jj1t}$: هزینه انتقال مرکز موقت از مکان j به مکان l در دوره t

$Pmax$: حداکثر تعداد تسهیلات موقت

SA_{mt} : مقدار ذخیره ایمنی خون در مرکز دائم m در دوره t

EB_m : تاثیرات زیست‌محیطی ایجاد مرکز خون دائم m
 EF : تاثیرات زیست‌محیطی ایجاد یک مرکز خون موقت
 ET : تاثیرات زیست‌محیطی حمل و نقل یک واحد خون به ازای هر کیلومتر

jo : فرصت‌های شغلی ایجاد شده با احداث یک مرکز موقت

jo'_m : فرصت‌های شغلی ایجاد شده با احداث مرکز دائم m

To_{lt} : زمان انجام عملیات در آزمایشگاه l در دوره t

Tn_{jt} : کل زمان جمع‌آوری خون در مرکز موقت j در دوره t

Tu_{mt} : کل زمان جمع‌آوری خون در مرکز دائم m در دوره t

Tb_{jmt} : زمان حمل و نقل از مرکز موقت j به مرکز دائم m در دوره t

TP_{mlt} : زمان حمل و نقل از مرکز دائم m به آزمایشگاه l در دوره t

Tr_{lut} : زمان حمل و نقل از آزمایشگاه l به بیمارستان u در دوره t

Tb_{max} : تاریخ انقضای خون

M : عددی بسیار بزرگ

محدودیت ۵، تضمین می‌کند که تسهیلات موقتی تنها در صورتی می‌توانند در هر دوره به مکانی دیگر انتقال یابند که در آن جا یک تسهیل وجود داشته باشد.

$$\sum_{j2} XM_{j1,j2t} \leq \sum_j XM_{jj1t-1} \quad \forall j1,t \quad (5)$$

محدودیت ۶، تضمین می‌کند که اهداکنندگان در صورتی می‌توانند خون خود را به یک مرکز موقت اهدا کنند که آن مرکز استقرار یافته باشد.

$$\sum_k yu_{kjt} \leq \sum_{j1} XM_{jj1t} \quad \forall j,t \quad (6)$$

محدودیت ۷، تضمین می‌کند که مرکز موقت Z می‌تواند به یک مرکز خون دائم اختصاص یابد به شرطی که مرکز موقت در آن مکان وجود داشته باشد.

$$\sum_m R_{jmt} \leq \sum_{j1} XM_{jj1t} \quad \forall j,t \quad (7)$$

محدودیت ۸، بودجه ساخت تسهیلات را نشان می‌دهد.

$$\sum_t Fu \times er_t + \sum_m FR_m \times XR_m \leq \tilde{B} \quad (8)$$

محدودیت‌های ۹ تا ۱۳ جریان بین متغیرهای مثبت و باینری در سطوح زنجیره را مشخص می‌کند.

$$Q_{jkt} \leq M yu_{kjt} \quad \forall j,k,t \quad (9)$$

$$Q'_{jmt} \leq M R_{jmt} \quad \forall m,j,t \quad (10)$$

$$Q''_{mkt} \leq M YR_{kmt} \quad \forall m,k,t \quad (11)$$

$$Q'''_{mlt} \leq M RT_{mlt} \quad \forall m,l,t \quad (12)$$

$$QN_{lut} \leq M RN_{lut} \quad \forall l,u,t \quad (13)$$

محدودیت ۱۴، تعداد تسهیلات موقتی مورد نیاز در هر دوره را نشان می‌دهد.

$$\sum_j \sum_{j1} XM_{jj1t} = er_t \quad \forall t \quad (14)$$

محدودیت ۱۵، نشان می‌دهد که تعداد تسهیلات موقتی در هر دوره نمی‌توانند از یک حد مجاز بیشتر باشند.

$$er_t \leq Pmax \quad \forall t \quad (15)$$

محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷، شعاع پوشش مراکز دائم و موقت را نشان می‌دهد.

$$r_{jm} R_{jmt} \leq rw \quad \forall m,j,t \quad (16)$$

$$r_{ul} RT_{mlt} \leq r \quad \forall m,l,t \quad (17)$$

تابع هدف (۱)، هزینه‌های زنجیره تامین خون را کمینه می‌کند. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های ثابت استقرار تسهیلات، هزینه جمع‌آوری خون اهداکنندگان در مراکز خون، هزینه حمل و نقل بین سطوح مختلف زنجیره تامین، هزینه انتقال مراکز موقتی، هزینه نگهداری موجودی خون، هزینه کمبود، هزینه تدارکات جهت جمع‌آوری خون و هزینه تست سلامت خون است.

$$\begin{aligned} \min z_1 = & \sum_t Fu \times er_t + \sum_m FR_m \times XR_m \\ & + \sum_j \sum_k \sum_t \tilde{C}_{jkt} \times Q_{jkt} + \sum_m \sum_k \sum_t \tilde{C}_{mkt} \times Q''_{mkt} \quad (1) \\ & + \sum_j \sum_m \sum_t \tilde{C}'_{jmt} \times Q'_{jmt} + \sum_m \sum_l \sum_t \tilde{C}T_{mlt} \times Q'''_{mlt} \\ & + \sum_l \sum_u \sum_t \tilde{C}n_{lut} \times QN_{lut} + \sum_j \sum_{j1} \sum_t \tilde{C}v_{jj1t} \times XM_{jj1t} \\ & + \sum_m \sum_t \tilde{C}H_{mt} \times IH_{mt} + \sum_l \sum_t \tilde{C}H_{lt} \times IL_{lt} \\ & + \sum_m \sum_t \tilde{Q}c_{mt} \times SH_{mt} + \sum_k \sum_m \sum_t \tilde{C}_{mt} \times S_{kt} \\ & + \sum_k \sum_m \sum_t \tilde{C}'_{mt} \times X_{kt} + \sum_m \sum_l \sum_t \tilde{C}_{lt} \times Q'''_{mlt} \end{aligned}$$

تابع هدف (۲)، کل تاثیرات زیست‌محیطی زنجیره تامین خون طراحی شده را کمینه می‌نماید. این تابع هدف شامل تاثیرات زیست‌محیطی تاسیس مراکز خون موقت و دائم و تاثیرات زیست‌محیطی ارسال واحدهای خون جمع‌آوری شده بین سطوح زنجیره است.

$$\begin{aligned} \min z_2 = & \sum_m EB_m \times XR_m + \sum_t EF \times er_t \\ & + \sum_j \sum_m \sum_t ET \times Q'_{jmt} \times r_{jm} + \sum_m \sum_l \sum_t ET \times Q'''_{mlt} \times r_{ul} \quad (2) \\ & + \sum_l \sum_u \sum_t ET \times QN_{lut} \times r_{lu} \end{aligned}$$

تابع هدف (۳)، تاثیرات اجتماعی زنجیره تامین خون شامل مشاغل ایجاد شده جهت تاسیس مراکز خون دائم و موقت را بیشینه می‌نماید.

$$\max z_3 = \sum_m jo'_m \times XR_m + \sum_t jo \times er_t \quad (3)$$

محدودیت ۴، تضمین می‌کند که حداکثر یکی از تسهیلات می‌تواند در هر دوره به مکان j_1 انتقال یابد.

$$\sum_j XM_{jj1t} \leq 1 \quad \forall j1,t \quad (4)$$

$$Q_{jkt}, Q'_{jmt}, Q''_{mkt}, QN_{lut}, Q'''_{mlt}, IH_{lt}, IH_{mt}, SH_{mt}, \quad (27)$$

$$er_t, S_{kt}, X_{kt}, \geq 0 \quad \forall j, k, m, l, u, t$$

۴. رویکرد برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس

تصادفی بودن و عدم قطعیت ذاتی دو نوع عدم قطعیت هستند که می‌توانند در داده‌های ورودی رخ دهند. زمانی عدم قطعیت داده‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی مدل‌سازی می‌شود که داده‌های تاریخی قابل اعتماد کافی برای توصیف پارامترهای غیرقطعی با استفاده از توزیع‌های احتمالی وجود داشته باشد. عدم وجود دانش در مورد مقادیر دقیق پارامترهای مدل و اطلاعات ناکافی از داده‌های تاریخی باعث ایجاد عدم قطعیت ذاتی می‌شود^[۴۵]. داده‌های کافی برای برآورد مناسب توزیع احتمال پارامترهای غیرقطعی زنجیره تامین خون به دلیل ماهیت دینامیکی و پویای آن وجود ندارد. در چنین مواردی، عدم قطعیت توسط توزیع‌های امکانی به شکل اعداد فازی مثلثی یا دوزنقه‌ای بر اساس نظرات کارشناسان خبره به دست می‌آید^[۴۶]. در برنامه‌ریزی فازی از ضرایب اطمینان فازی و توابع عضویت برای بیان عدم قطعیت یا فقدان دانش در مورد پارامترها استفاده می‌شوند^[۴۷]. بر خلاف رویکرد تصادفی، که نیاز به دانش کافی از توزیع پارامترهای غیرخطی دارد، رویکرد فازی مدل کارآمدتری را ارائه می‌کند، زیرا کمتر به اطلاعات تاریخی وابسته است. همچنین با توجه به این‌که بهینه‌سازی فازی از درجه عضویت برای پارامترهای غیرقطعی استفاده می‌کند، به مدیران زنجیره تامین این امکان را می‌دهد که بر اساس درجه عضویت پارامترها تصمیم‌گیری انعطاف‌پذیرتری را ارائه دهند^[۴۸].

برخی از پارامترهای کلیدی مدل پیشنهادی دارای عدم قطعیت هستند. در این مقاله از رویکرد فازی محدودیت شانس استفاده شده است. این رویکرد از روش‌های پرکاربرد برای مهار عدم قطعیت پارامترها است که بر پایه مفاهیم ریاضی قوی نظیر میانگین مورد انتظار یک عدد فازی، عملگرهای لزوم و امکان، تصمیم‌گیرنده را قادر می‌سازد تا سطح محافظه‌کارانه برآوره‌سازی محدودیت‌ها را کنترل کند.^[۴۹]

برای تبدیل مدل غیرقطعی به یک مدل معادل قطعی، از مقدار مورد انتظار برای مدل‌سازی پارامترهای غیرقطعی تابع هدف و از مقیاس *Nec* برای مدل‌سازی محدودیت‌های

محدودیت ۱۸، میزان خون‌های اهدا شده در هر دوره توسط هر گروه از اهداکنندگان در مراکز موقت و دائم را محدود می‌کند.

$$\sum_j Q_{jkt} + \sum_m Q''_{mkt} \leq d_{kt} \quad \forall k, t \quad (18)$$

محدودیت ۱۹ مشخص می‌کند که در هر دوره باید تقاضای بیمارستان‌ها برآورده شود.

$$\sum_j \sum_m Q'_{jmt} + \sum_m \sum_k Q''_{mkt} = \sum_u \tilde{D}_{ut} \quad \forall t \quad (19)$$

محدودیت ۲۰ مشخص می‌کند که مجموع زمان انتقال خون از مراکز موقت به دائم، زمان انتقال خون از مرکز دائم به آزمایشگاه، زمان انتقال خون از آزمایشگاه به بیمارستان و زمان‌های عملیاتی لازم در آزمایشگاه و مرکز دائم باید کوچک‌تر یا مساوی تاریخ انقضای خون باشد.

$$(Tn_{jt} + Tb_{jmt})R_{jmt} + Tu_{mt}XR_m + (TP_{mlt} + To_{lt})RT_{mlt} + Tr_{lut}RN_{lut} \leq Tb_{max}, \quad \forall j, m, l, u, t \quad (20)$$

محدودیت‌های ۲۱ و ۲۲ به ترتیب میزان موجودی خون در هر دوره در مراکز دائم و آزمایشگاه‌ها را نشان می‌دهد.

$$IH_{mt} = IH_{m,t-1} + \sum_k Q''_{mkt} + \sum_j Q'_{jmt} - \sum_l Q'''_{mlt} + SH_{mt} - SA_{mt} \quad \forall m, t \quad (21)$$

$$IH_{lt} = IH_{l,t-1} + \sum_m Q'''_{mlt} - \sum_u QN_{lut} \quad \forall l, t \quad (22)$$

محدودیت‌های ۲۳ و ۲۴، میزان خون جمع‌آوری شده در هر دوره زمانی از هر اهداکننده در هر مرکز دائم و موقت را محاسبه می‌کند.

$$Q''_{mkt} = \varphi_{kt} YR_{kmt} \quad \forall m, k, t \quad (23)$$

$$Q_{jkt} = \varphi_{kt} yu_{kjt} \quad \forall j, k, t \quad (24)$$

محدودیت ۲۵، اهداکنندگان رزرو و غیر رزرو را مشخص می‌کند.

$$X_{kt} + S_{kt} = \sum_m YR_{kmt} \quad \forall k, t \quad (25)$$

(۲۵)

محدودیت‌های ۲۶ و ۲۷، حدود متغیرهای تصمیم مسئله را مشخص می‌کنند.

$$XM_{jjlt}, XR_m, yu_{kjt}, R_{mjt}, RT_{mlt}, RN_{lut}, YR_{mkt} \in \{0, 1\} \quad \forall j, k, m, l, u, t \quad (26)$$

یک روش برنامه‌ریزی فازی تعاملی استفاده می‌شود که نخستین بار توسط ترابی و حصینی^[۵۱] در سال ۲۰۰۸ ارائه شده است. کلیات این روش به قرار زیر است:

گام اول: راه‌حل ایده‌آل مثبت (PIS) و راه‌حل ایده‌آل منفی (NIS) برای سه تابع هدف را می‌توان طبق معادلات (۳۲) تا (۳۴) تعیین کرد.

$$z_1^{NIS} = \max z_1, z_1^{PIS} = \min z_1 \quad (32)$$

$$z_2^{NIS} = \max z_2, z_2^{PIS} = \min z_2 \quad (33)$$

$$z_3^{NIS} = \min z_3, z_3^{PIS} = \max z_3 \quad (34)$$

گام دوم: تابع عضویت خطی برای هر تابع هدف به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$\mu_1(z_1) = \begin{cases} 1 & \text{if } z_1 < z_1^{PIS} \\ \frac{z_1^{NIS} - z_1}{z_1^{NIS} - z_1^{PIS}} & \text{if } z_1^{PIS} \leq z_1 \leq z_1^{NIS} \\ 0 & \text{if } z_1 > z_1^{NIS} \end{cases} \quad (35)$$

$$\mu_2(z_2) = \begin{cases} 1 & \text{if } z_2 < z_2^{PIS} \\ \frac{z_2^{NIS} - z_2}{z_2^{NIS} - z_2^{PIS}} & \text{if } z_2^{PIS} \leq z_2 \leq z_2^{NIS} \\ 0 & \text{if } z_2 > z_2^{NIS} \end{cases} \quad (36)$$

$$\mu_3(z_3) = \begin{cases} 1 & \text{if } z_3 > z_3^{PIS} \\ \frac{z_3 - z_3^{NIS}}{z_3^{PIS} - z_3^{NIS}} & \text{if } z_3^{NIS} \leq z_3 \leq z_3^{PIS} \\ 0 & \text{if } z_3 < z_3^{NIS} \end{cases} \quad (37)$$

گام سوم: با استفاده از رابطه‌های (۳۸) تا (۴۱) یکپارچه‌سازی توابع هدف انجام می‌شود. پارامتر γ ضریب جبران، فضای شدنی مدل، $F(v)$ درجه تامین تابع هدف و φ_h اهمیت نسبی تابع هدف را نشان می‌دهد. λ_0 حد پایین درجه تامین تابع هدف است و به صورت $\lambda_0 = \min_h [\mu_h(v)]$ محاسبه می‌شود.

$$\text{MAX } \lambda(v) = \gamma \lambda_0 + (1 - \gamma) \sum_h \varphi_h \mu_h(v) \quad (38)$$

$$\lambda_0 \leq \mu_h(v) \quad h = 1, 2, 3 \quad (39)$$

$$v \in F(v), \lambda_0, \gamma \in [0, 1] \quad (40)$$

۶. نتایج عددی

شانس استفاده می‌شود. با توجه به این‌که از توزیع فازی دوزنقه‌ای برای پارامترهای دارای عدم قطعیت استفاده می‌شود، لذا در تابع هدف از مقدار مورد انتظار یک عدد فازی دوزنقه‌ای استفاده شده است.

بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس، معادل قطعی مدل غیرقطعی پیشنهادی به صورت زیر خواهد بود: [۵۰]

$$\begin{aligned} \min E[z_1] = & \sum_t Fu \times er_t + \sum_m FR_m \times XR_m \\ & + \sum_j \sum_k \sum_t \sum_{r=1}^4 \frac{C_{jkr}}{4} \times Q_{jkt} + \sum_m \sum_k \sum_t \sum_{r=1}^4 \frac{C_{mkr}}{4} \times Q_{mkt}^* \quad (28) \\ & + \sum_j \sum_m \sum_t \sum_{r=1}^4 \frac{C_{jmr}}{4} \times Q'_{jmt} + \sum_m \sum_l \sum_t \sum_{r=1}^4 \frac{CT_{mltr}}{4} \times Q''_{mlt} \\ & + \sum_m \sum_l \sum_t \sum_{r=1}^4 \frac{Cn_{lutr}}{4} \times QN_{lut} + \sum_j \sum_{j1} \sum_t \sum_{r=1}^4 \frac{Cv_{j1ltr}}{4} \times XM_{j1lt} \\ & + \sum_m \sum_t \sum_{r=1}^4 \frac{CH_{mtr}}{4} \times IH_{mt} + \sum_l \sum_t \sum_{r=1}^4 \frac{CH_{ltr}}{4} \times IL_{lt} \\ & + \sum_m \sum_t \sum_{r=1}^4 \frac{Qc_{mtr}}{4} \times SH_{mt} + \sum_k \sum_m \sum_t \sum_{r=1}^4 \frac{C_{mtr}}{4} \times S_{kt} \\ & + \sum_k \sum_m \sum_t \sum_{r=1}^4 \frac{C'_{mtr}}{4} \times X_{kt} + \sum_m \sum_l \sum_t \sum_{r=1}^4 \frac{C_{ltr}}{4} \times Q''_{mlt} \\ & \min z_2 \\ & \max z_3 \end{aligned}$$

$$s.t: (4) - (7), (9) - (18), (20) - (27)$$

$$\sum_t Fu \times er_t + \sum_m FR_m \times XR_m \quad (29)$$

$$\leq (1 - \alpha) \times B_2 + (\alpha) \times B_1$$

$$\sum_j \sum_m Q'_{mjt} + \sum_k \sum_m Q''_{mkt} \geq \sum_u D_{ut(2)} \forall t \quad (30)$$

$$\sum_j \sum_m Q'_{mjt} + \sum_k \sum_m Q''_{mkt} \leq \sum_u D_{ut(3)} \forall t \quad (31)$$

در محدودیت (۲۹)، α سطح اطمینان برآورده شدن محدودیت را مشخص می‌کند و مقدار آن بین ۰/۵ تا ۱ در نظر گرفته می‌شود.

۵. روش حل

برای حل مسائل چندهدفه روش‌های مختلفی نظیر روش محدودیت اپسیلون، روش معیار جامع، روش جمع وزنی و برنامه‌ریزی آرمانی وجود دارد. در این پژوهش، از

در این بخش به منظور اعتبار سنجی مدل پیشنهادی، یک مطالعه موردی در شهر شیراز بررسی و در انتها تحلیل حساسیت تابع هدف نسبت به پارامترهای مدل انجام می‌شود. مدل ریاضی ارائه شده در نرم افزار GAMS 24.1.2 کدنویسی شده است.

۱.۶. مطالعه موردی

شیراز یکی از کلان شهرهای ایران با جاذبه گردشگری فراوان و سومین شهر مذهبی ایران و مرکز استان فارس واقع در جنوب ایران است. شیراز پنجمین شهر بزرگ و پرجمعیت ایران و پرجمعیت‌ترین شهر جنوب کشور به شمار می‌رود.^[۵۲] به علت نیاز مبرم به خون در بیمارستان‌ها و مراکز درمانی و برای جبران کمبود خون و پاسخگویی به نرخ تقاضا، طراحی یک زنجیره تامین خون کارا ضروری به نظر می‌رسد. بر اساس اطلاعات سالنامه آماری شیراز،

فعالیت‌های خون‌گیری سازمان انتقال خون در سطح شهر شیراز برای سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۰ در جدول ۲ نشان داده شده است.^[۵۲] در سطح شیراز ۷ نقطه به عنوان کاندید برای استقرار تسهیلات موقت در نظر گرفته شده است. خون‌های اهداشده در مراکز موقت (اتوبوس‌های سیار) به مرکز خون دائم منتقل می‌شوند. سپس خون‌های جمع‌آوری شده از مراکز موقت و دائم به آزمایشگاه انتقال خون شیراز واقع در خیابان نمازی منتقل شده و پس از انجام تست آزمایش سلامت خون در اختیار بیمارستان‌ها و مراکز درمانی قرار می‌گیرند. در این مطالعه ۶ بیمارستان به عنوان نقاط تقاضا در نظر گرفته شده است. جدول ۳ اطلاعات ۶ نقطه تقاضا را نشان می‌دهد. در این مطالعه یک افق برنامه‌ریزی ۳ ماهه در نظر گرفته شده است و هر واحد زمان یک دوره یک‌ماهه را نشان می‌دهد.^[۵۳]

جدول ۲. فعالیت خون‌گیری سازمان انتقال خون در سطح شیراز.

سال	تعداد داوطلبین	تعداد مردودین	تعداد اهداکنندگان خون
۱۳۹۳	۱۲۵۱۶۲	۳۷۹۲۶	۸۷۲۳۶
۱۳۹۴	۱۲۸۸۹۳	۳۸۲۱۱	۹۰۶۸۲
۱۳۹۵	۱۳۱۹۶۶	۳۹۲۷۸	۹۲۶۸۸
۱۳۹۶	۱۲۸۶۱۹	۴۱۸۵۹	۸۶۷۶۰
۱۳۹۷	۱۵۳۴۶۲	۳۵۳۳۱	۱۰۲۹۷۹
۱۳۹۸	۱۴۲۵۶۹	۳۲۸۳۵	۹۸۰۷۰
۱۳۹۹	۱۲۸۶۸۶	۳۶۰۸۲	۹۲۶۰۴
۱۴۰۰	۱۳۰۴۴۱	۳۱۸۵۸	۹۸۵۸۳

جدول ۳. اطلاعات نقاط تقاضا.

ردیف	نام بیمارستان	نوع بیمارستان	تعداد تخت
۱	بیمارستان نمازی	دولتی	۷۸۰
۲	بیمارستان پارس	خصوصی	۴۵
۳	بیمارستان شهریار	خصوصی	۵۹
۴	بیمارستان شهید دکتر بهشتی	دولتی	۲۲۴
۵	بیمارستان زینبیه	دولتی	۱۷۹
۶	بیمارستان مسلمین	دولتی	۱۳۵

سال ۲۰۱۹^[۶]، قهرمانی و همکاران ۲۰۲۲^[۳۸] و باغبانی ۲۰۲۲^[۴۲] در جدول ۴ نشان داده شده است. در این جدول فاصله‌ها بر حسب کیلومتر، ذخیره ایمنی خون، تقاضا و میزان خون اهداکنندگان بر حسب لیتر،

مقدار اکثر پارامترهای مدل بر اساس داده‌های واقعی از سایت سازمان انتقال خون استان فارس و بیمارستان‌های شهر شیراز جمع‌آوری شده است^[۵۳]. مقدار برخی از پارامترها نیز از مقالات مختلف نظیر لاریمی و یعقوبی در

تأثیرات زیست‌محیطی بر حسب مترمکعب، زمان انتقال و جمع‌آوری خون و انقضا بر حسب دقیقه و فرصت‌های شغلی بر حسب تعداد افراد است.

جدول ۴. داده‌های مربوط به پارامترهای مدل.

پارامتر	ارزش	پارامتر	ارزش	پارامتر	ارزش
rn_{jm}	[۱۰.۶۰]	d_{kt}	[۳۰.۱۵۰]	EF	۶۳۰۰۰
Tu_{mt}	[۳۶۰.۱۴۴۰]	r	۴۰	Φ_{kt}	[۰/۴۵۰/۵]
TP_{mt}	[۲۰.۹۰]	rw	۷۰	Tn_{jt}	[۳۶۰.۷۲۰]
M	۱۰۰۰۰۰۰۰	EB_m	[۲۵۰۰۰.۶۵۰۰۰]	Tr_{lut}	[۵.۹۰]
Tb_{max}	۴۳۲۰۰	\tilde{D}_{ut}	[۸۰۰.۱۰۰۰]	Φ_{kt}	[۰/۴۵۰/۵]
P_{max}	۱۰	rl_{lu}	[۱.۶۰]	Tb_{jmt}	[۲۰.۶۰]
ru_{ml}	[۲۰.۶۰]	To_{lt}	[۱۴۴۰.۱۴۴۰۰]	jo / jo'_m	[۱.۳۰]

در این صورت فرصت‌های شغلی ایجادشده نیز کاهش پیدا می‌کند. دوم، به منظور افزایش فرصت‌های شغلی سطح پارامتر α را افزایش دهد که در این صورت هزینه‌های سیستم و تأثیرات منفی زیست‌محیطی افزایش پیدا خواهد کرد.

جدول ۵ مقدار توابع هدف در حالت قطعی و غیرقطعی را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۵ با افزایش مقدار پارامتر α ، هزینه‌های سیستم، تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین تصمیم‌گیرنده با دو رویکرد مواجه می‌شود. اول، به منظور کاهش هزینه‌های سیستم و تأثیرات زیست‌محیطی سطح پارامتر α را کاهش دهد که

جدول ۵. مقدار توابع هدف در شرایط قطعی و غیر قطعی.

α	مقدار تابع هدف در شرایط عدم قطعیت			مقدار تابع هدف در شرایط قطعی		
	z_1	z_2	z_3	z_1	z_2	z_3
۰/۶	۳,۰۵۲۷۱E+۱۰	۹,۷۸۸۵۲۱ E+۸	۸۰	۲,۷۸۳۵۷E+۱۰	۹,۲۵۶۱۵۷E+۸	۷۶
۰/۸	۳,۰۸۴۸۹ E+۱۰	۹,۸۸۶۵۷۸ E+۸	۸۵			
۰/۹	۳,۱۵۵۷۴ E+۱۰	۹,۹۳۴۵۸۹ E+۸	۹۱			

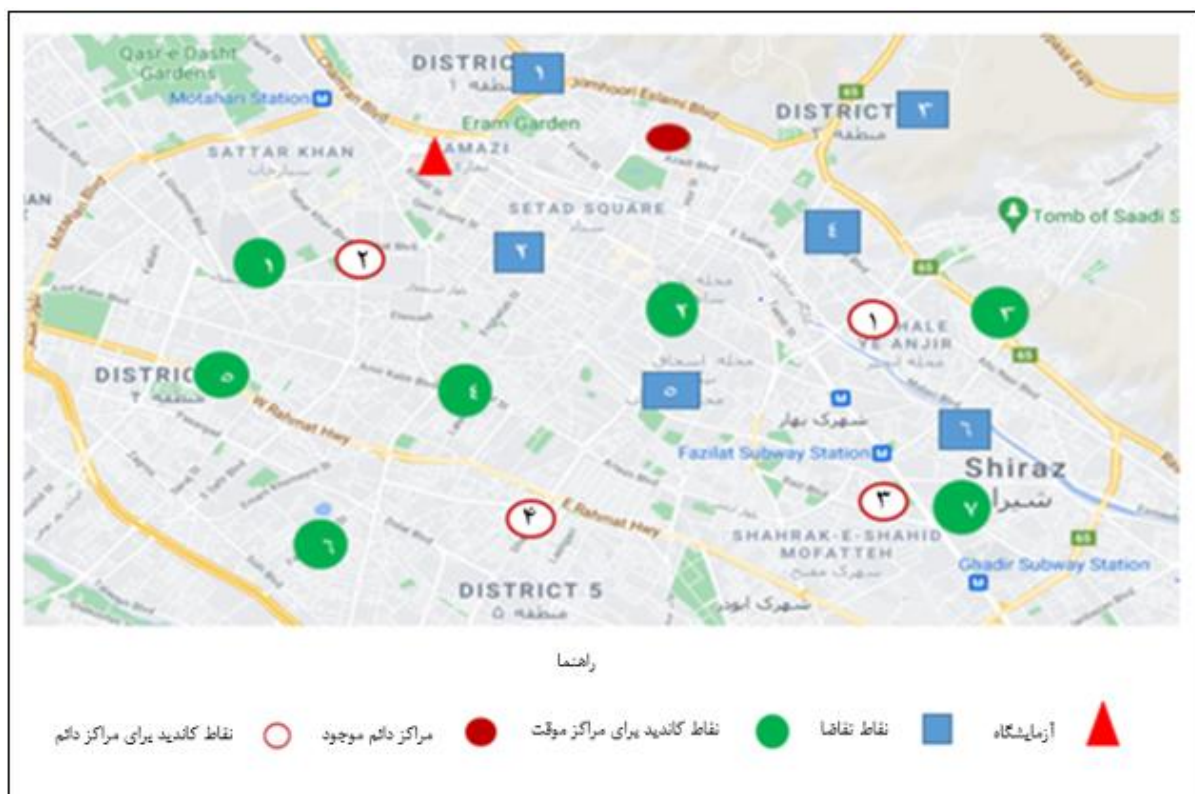
تقاضای بیمارستان‌ها در دوره اول و در سطح α برابر ۰,۶ نقاط بسیار ۲,۱ و ۷, در سطح α برابر ۰,۸ علاوه بر نقاط قبلی نقطه ۴ و در سطح α برابر ۰,۹ نیز علاوه بر نقاط دو سطح قبل نقطه ۵ جهت پاسخگویی به تقاضای بیمارستان‌ها در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به نتایج عددی و شکل ۳ می‌توان بیان نمود که با افزایش سطح عدم قطعیت پارامترها، توابع هدف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی افزایش پیدا می‌کنند. بنابراین نمی‌توان عدم قطعیت پارامترهای مدل پیشنهادی

شکل ۲ شبکه مطالعه موردی قبل از حل مدل و شکل ۳ شبکه مطالعه موردی بعد از حل مدل به ازای سطوح مختلف پارامتر α را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که به دلیل صرفه‌جویی در فضا، تنها دوره یک نشان داده شده است. با افزایش پارامتر α ، جهت پاسخگویی به افزایش تقاضا تعداد تسهیلات بسیار نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین با توجه به میزان تقاضا، هیچ مرکز دائم جدیدی ایجاد نشده است و مرکز دائم موجود و مراکز موقت استقرار یافته می‌تواند تقاضای خون بیمارستان‌ها را برآورده نماید.

توجه به توابع اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی به ازای سطوح اطمینان مختلف می‌توانند بهترین جواب را اختیار نمایند. باید توجه داشت که در نظر گرفتن عدم قطعیت با سطح اطمینان بالا باعث می‌شود که طرح به دست آمده برای شبکه زنجیره تامین خون حتی در حالت‌هایی که عدم قطعیت پارامترها بسیار زیاد است، بهینه باشد.

را نادیده گرفت، زیرا هزینه‌های سیستم، اثرات مخرب زیست‌محیطی و اثرات مثبت اجتماعی به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر عدم قطعیت قرار دارند. از سوی دیگر، با در نظر گرفتن سطوح اطمینان مختلف، جواب‌های بهینه مختلفی بر اساس مکان تسهیلات و جریان‌های خون به دست خواهد آمد. بنابراین مدیران سیستم‌های سلامت با



شکل ۲. شبکه مطالعه موردی قبل از حل مدل



شکل ۳. شبکه مطالعه موردی بعد از حل مدل در دوره $t = 1$.

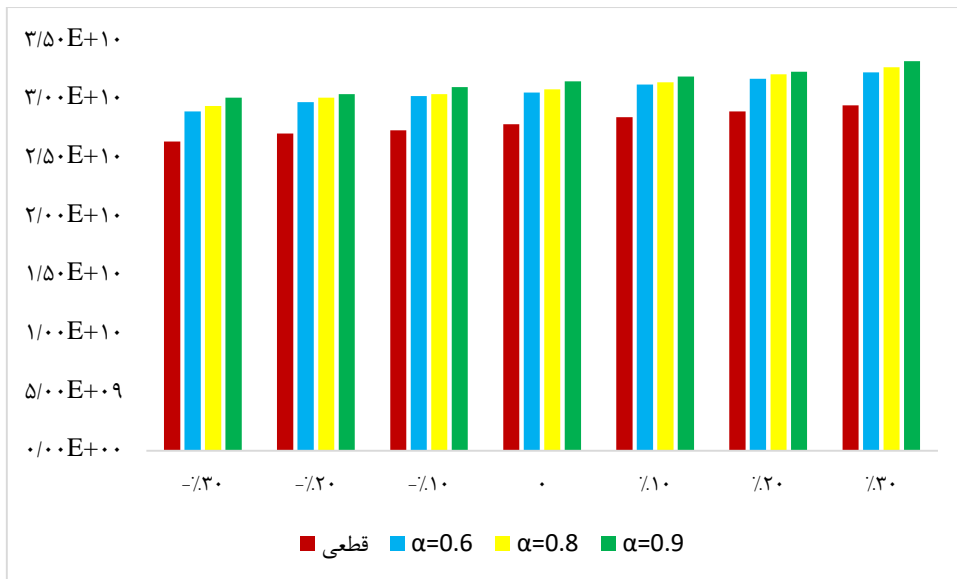
افزایش هزینه‌های حمل و نقل را در پی خواهد داشت. همچنین در آزمایشگاه باید تست سلامت برای میزان خون بیشتری انجام شود. با افزایش هزینه‌های عملیاتی سیستم، تابع هدف اقتصادی افزایش خواهد یافت. همان‌طور که بیان شد با افزایش نرخ تقاضا، میزان خون جمع‌آوری شده و انتقال یافته بین سطوح مختلف زنجیره تامین افزایش خواهد یافت. در نتیجه با افزایش حمل و نقل، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش می‌یابد. بنابراین همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، تابع هدف زیست‌محیطی با افزایش تقاضا، افزایش خواهد یافت. با توجه به شکل ۶، می‌توان بیان نمود که با افزایش نرخ تقاضا تابع هدف اجتماعی افزایش یافته است، زیرا جهت برآورده نمودن تقاضای افزایش یافته، نیاز به استقرار مراکز دائم و موقت بیشتری است که در پی آن تعداد فرصت‌های شغلی افزایش خواهد یافت.

۲.۶. تحلیل حساسیت

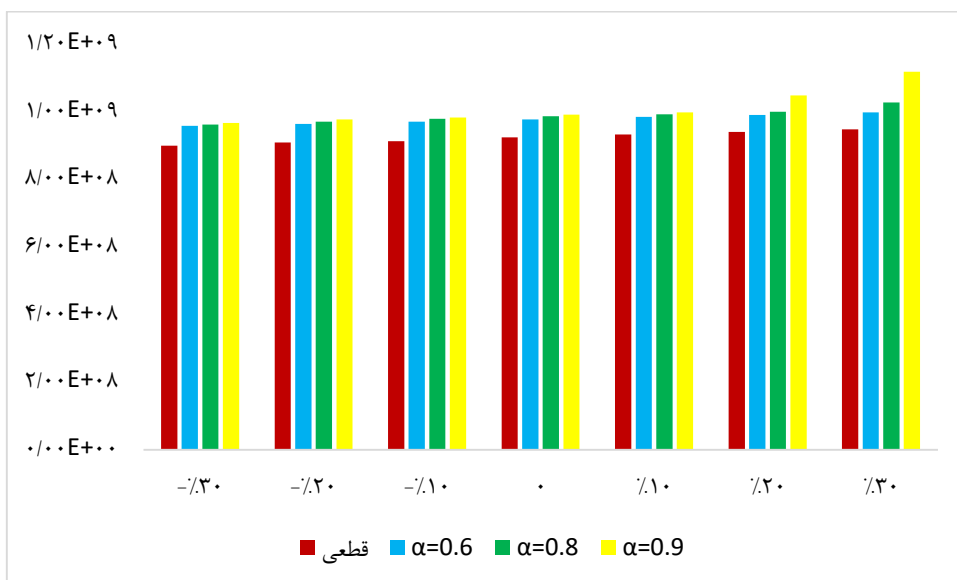
در این بخش، تغییرات توابع هدف نسبت به مقادیر مختلف تقاضا و بودجه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۱.۲.۶. تقاضا

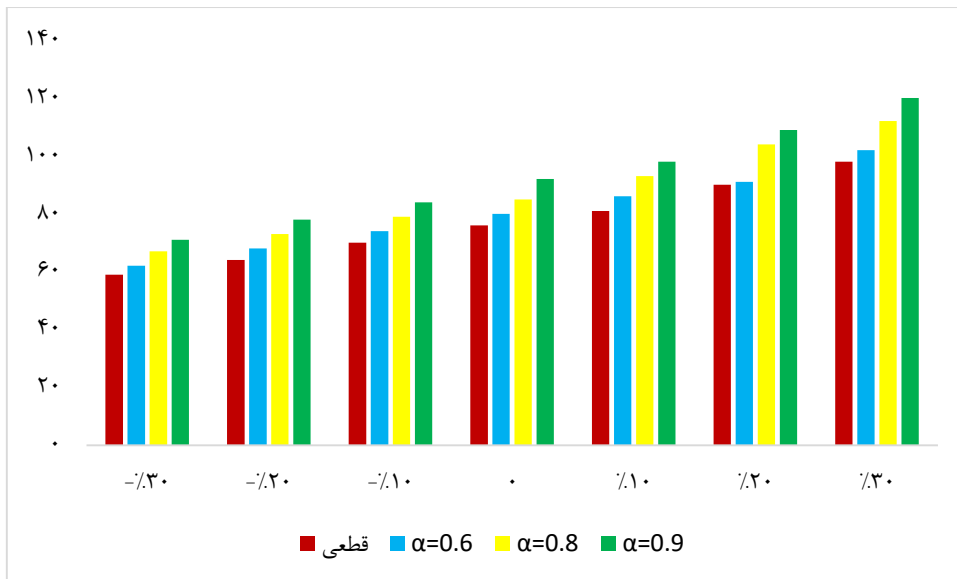
یکی از پارامترهای کلیدی که تاثیر زیادی بر توابع هدف می‌گذارد میزان تقاضای خون است. تاثیر تقاضای خون بر روی ۳ تابع هدف به ترتیب در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ می‌توان بیان نمود که با افزایش تقاضا، نیاز است که میزان خون بیشتری در مراکز موقت و دائم جمع‌آوری شوند که بر اساس آن هزینه عملیاتی جمع‌آوری خون افزایش می‌یابد. همچنین نیاز است که مراکز موقت و دائم بیشتری در شبکه استقرار یابند تا برآورده‌سازی تقاضای بیمارستان‌ها میسر شود. جهت برآورده نمودن تقاضای بیمارستان‌ها، میزان خون بیشتری بین سطوح مختلف زنجیره تامین یعنی مراکز موقت، مراکز دائم، آزمایشگاه‌ها و بیمارستان‌ها انتقال خواهد یافت که



شکل ۴. تغییرات z_1 نسبت به تغییرات تقاضا در مدل‌های قطعی و فازی محدودیت شانس.



شکل ۵. تغییرات z_2 نسبت به تغییرات تقاضا در مدل‌های قطعی فازی محدودیت شانس.

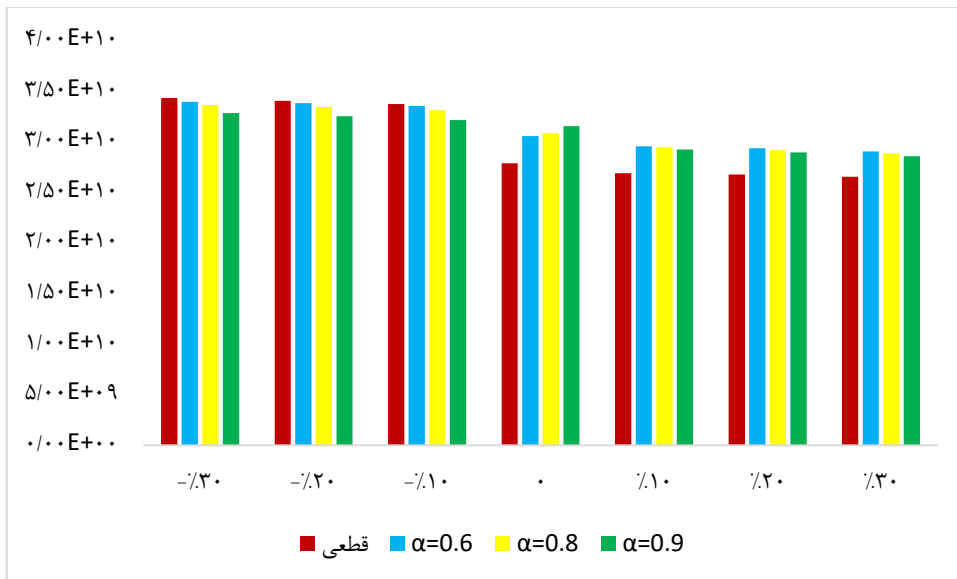


شکل ۶. تغییرات نسبت به تغییرات تقاضا در مدل‌های قطعی و فازی محدودیت شانس.

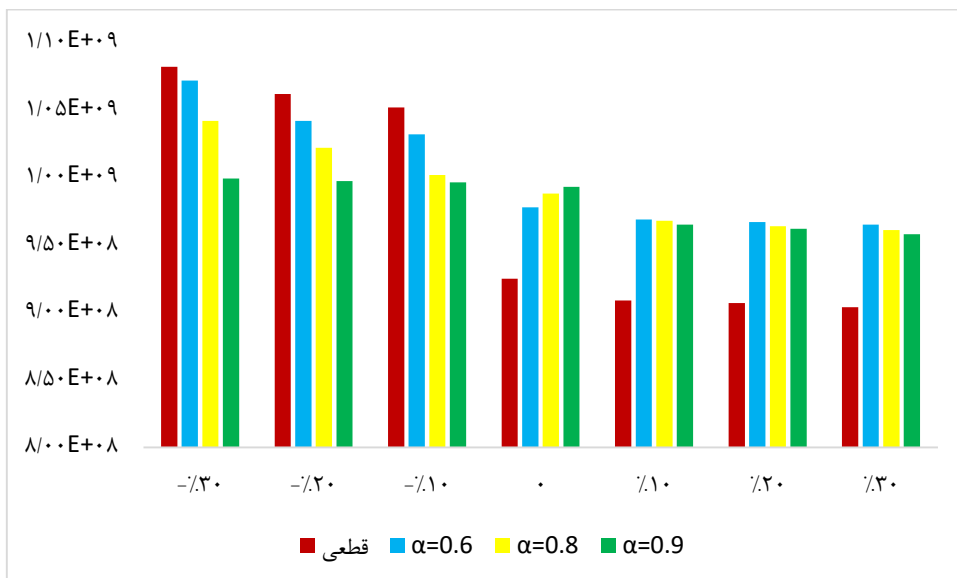
کاهش خواهد یافت. شکل ۸ تاثیر افزایش و کاهش بودجه روی تابع زیست‌محیطی را نشان می‌دهد. با افزایش بودجه، از یک سو امکان استقرار تسهیلات بیشتر در شبکه میسر می‌شود که این موضوع منجر به افزایش میزان انتشار مربوط به تاسیس مراکز موقت و دائم خواهد شد. از سوی دیگر با توجه به این که میزان حمل و نقل کل در شبکه کاهش خواهد یافت، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل و نقل به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. با توجه به این که حمل و نقل از تصمیمات عملیاتی زنجیره تامین است و در کل افق برنامه‌ریزی وجود دارد، بنابراین صرفه‌جویی ناشی از کاهش حمل و نقل بیشتر از افزایش انتشار در اثر تاسیس مراکز دائم و موقت است و این موضوع منجر به کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. با توجه به شکل ۹، با افزایش بودجه، تعداد مراکز دائم و موقت افزایش خواهد یافت که در پی آن تعداد فرصت‌های شغلی ایجادشده در شبکه زنجیره تامین و تابع هدف اجتماعی نیز افزایش می‌یابد.

۲.۲.۶. بودجه

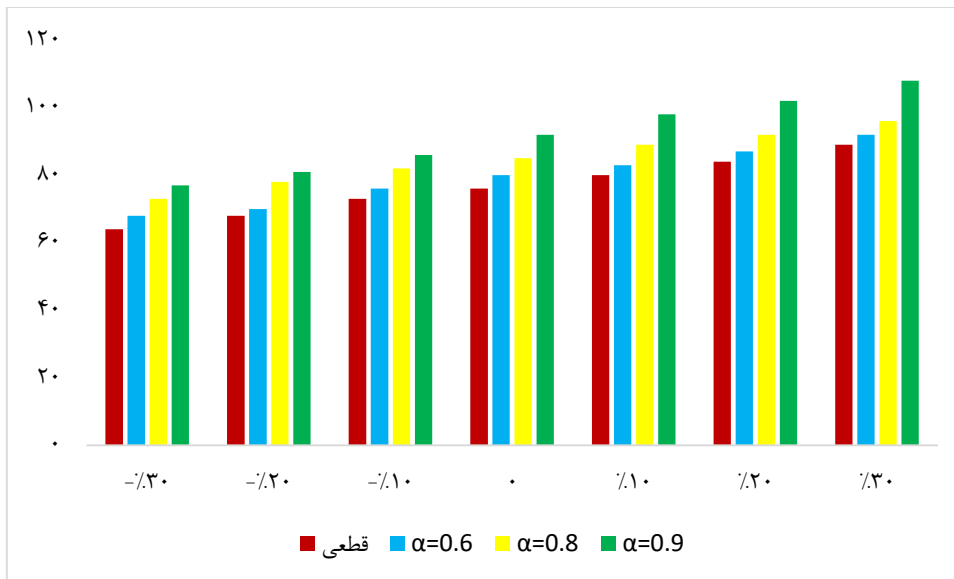
یکی دیگر از پارامترهای که می‌تواند بر توابع هدف تاثیر بگذارد بودجه است. تاثیر بودجه بر روی ۳ تابع هدف به ترتیب در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷، می‌توان بیان نمود که با افزایش بودجه می‌توان تعداد تسهیلات موقت و دائمی بیشتری جهت اهدای خون تاسیس کرد که این امر سبب افزایش هزینه استقرار تسهیلات می‌شود. از سوی دیگر، با افزایش تعداد تسهیلات در زنجیره تامین خون هزینه حمل و نقل به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد، زیرا امکان تخصیص مراکز موقت به مراکز دائم نزدیک‌تر و همچنین تخصیص مراکز دائم به آزمایشگاه‌ها در فواصل کوتاه‌تر میسر خواهد شد. با توجه به این که کاهش هزینه حمل و نقل می‌تواند افزایش هزینه در نتیجه استقرار تسهیلات را جبران نماید، بنابراین با افزایش بودجه استقرار تسهیلات، هزینه‌های سیستم



شکل ۷. تغییرات z_1 نسبت به بودجه در مدل‌های قطعی و فازی محدودیت شانس.



شکل ۸. تغییرات z_2 نسبت به بودجه در مدل‌های قطعی فازی محدودیت شانس.



شکل ۹. تغییرات λ_3 نسبت به بودجه در مدل‌های قطعی و فازی محدودیت شانس.

$$MAX \lambda(v) = \lambda_0 + \delta \sum_h \varphi_h \mu_h(v) \quad (41)$$

$$s.t \lambda_0 \leq \mu_h(v) \quad h = 1, 2, 3 \quad (42)$$

$$v \in F(v), \lambda_0 \in [0, 1] \quad (43)$$

در روش SO با استفاده از رابطه‌های (۴۴) تا (۴۶) یکپارچه‌سازی توابع هدف به صورت زیر انجام می‌شود.

$$MAX \lambda(v) = \gamma \lambda_0 + (1 - \gamma) \sum_h \varphi_h \lambda_h \quad (44)$$

$$s.t \lambda_0 + \lambda_h \leq \mu_h(v) \quad h = 1, 2, 3 \quad (45)$$

$$v \in F(v), \gamma, \lambda_h, \lambda_0 \in [0, 1] \quad (46)$$

جدول ۶، نتایج حاصل از حل مدل ریاضی چندهدفه با استفاده از سه روش ذکر شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، روش ترابی-حصینی^[۵۱] (TH) در هر دو حالت قطعی و غیرقطعی منجر به جواب‌های بهتری برای هر سه تابع هدف خواهد شد.

۳.۶. مقایسه نتایج برنامه‌ریزی چند هدفه

روش‌های متنوعی برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه ارائه شده است. از میان این روش‌ها، امروزه روش‌های برنامه‌ریزی فازی به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و قابلیت محاسبه درجه ارضای هر یک از توابع هدف به طور گسترده مورد استفاده می‌گیرند.^[۵۴] با توجه به این که در این پژوهش از روش ترابی-حصینی^[۵۱] که از روش‌های برنامه‌ریزی فازی تعاملی است، استفاده شده است. در این بخش، عملکرد این روش با دو روش برنامه‌ریزی فازی تعاملی مشهور دیگر شامل روش لی و هوانگ (LH)^[۵۵] و روش سلیم و اوزکاراهان (SO)^[۵۶]، مقایسه شده است.

در روش LH ، با استفاده از رابطه‌های (۴۱) تا (۴۳) یکپارچه‌سازی توابع هدف به صورت زیر انجام می‌شود. در این روابط λ_0 حد پایین درجه عضویت h امین تابع هدف است و به صورت $(\lambda_0 = \min_h [\mu_h(v)])$ محاسبه می‌شود.

جدول ۶. مقدار تابع هدف در شرایط قطعی و غیرقطعی.

روش حل	α	مقدار تابع هدف در شرایط عدم قطعیت			مقدار تابع هدف در شرایط قطعی		
		Z_1	Z_2	Z_3	Z_1	Z_2	Z_3
TH	۰.۶	۳,۰۵۲۷۱E+۱۰	۹,۷۸۸۵۲۱ E+۸	۸۰	۲,۷۸۳۵۷E+۱۰	۹,۲۵۶۱۵۷E+۸	۷۶
	۰.۸	۳,۰۸۴۸۹ E+۱۰	۹,۸۶۵۵۷۸ E+۸	۸۵			
	۰.۹	۳,۱۵۵۷۴ E+۱۰	۹,۹۳۴۵۸۹ E+۸	۹۱			
SO	۰.۶	۳,۱۶۲۵۷E+۱۰	۹,۸۲۸۴۵۱ E+۸	۷۶	۲,۸۱۳۴۵E+۱۰	۹,۳۴۴۵۷۶E+۸	۷۰
	۰.۸	۳,۲۰۷۴۶ E+۱۰	۹,۸۷۹۸۱۳ E+۸	۸۱			
	۰.۹	۳,۳۱۵۴۹ E+۱۰	۹,۹۴۴۵۹۲ E+۸	۸۷			
LH	۰.۶	۳,۱۹۵۱۹E+۱۰	۹,۸۶۲۷۸۵ E+۸	۷۴	۲,۸۳۷۶۱E+۱۰	۹,۴۸۷۸۴۹E+۸	۷۳
	۰.۸	۳,۲۳۷۱۹ E+۱۰	۹,۹۲۶۵۱۴ E+۸	۷۸			
	۰.۹	۳,۲۷۶۷۱ E+۱۰	۹,۹۸۷۴۲ E+۸	۸۳			

بیشترین مقدار درجه عضویت توابع هدف و $\min_h(\mu_h(v))$ کمترین درجه توابع هدف است.

$$RSD = \max_h(\mu_h(v)) - \min_h(\mu_h(v)) \quad (48)$$

جدول ۷ نتایج حاصل از مقایسه روش‌های حل را بر اساس دو شاخص ذکر شده نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، روش TH از نظر شاخص فاصله و شاخص درجه رضایت از هر دو روش SO و LH بهتر است. همچنین روش SO از نظر شاخص فاصله و شاخص درجه رضایت از روش LH بهتر است. باید توجه داشت که هر چه شاخص درجه رضایت بیشتر باشد، جواب‌های تولید شده توازن کمتری خواهند داشت و بین درجه عضویت توابع هدف تفاوت بیشتری به وجود خواهد آمد.

دو شاخص برای ارزیابی روش‌های ذکر شده شامل شاخص فاصله و درجه رضایت نیز استفاده شده است. شاخص فاصله (d_p) ، برای اندازه‌گیری فاصله و تعیین درجه نزدیکی هر راه‌حل نسبت به راه‌حل ایده‌آل مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص فاصله از رابطه (۴۷) بدست می‌آید^[۵۱]. شایان ذکر است که ϕ_h اهمیت نسبی تابع هدف $\mu_h(v)$ ، درجه تامین تابع هدف h ام و p نشان‌دهنده توان پارامتر فاصله است.

$$d_p(v) = \left[\sum_h \phi_h^p (1 - \mu_h(v))^p \right]^{1/p}, \quad p \geq 1 \text{ and integer.} \quad (47)$$

شاخص درجه رضایت (RSD)، حداکثر تفاوت بین درجه عضویت اهداف را با استفاده از رابطه (۴۸) محاسبه می‌کند^[۵۱]. شایان ذکر است که $\max_h(\mu_h(v))$

جدول ۷. مقایسه روش‌های حل.

روش حل	d_1	d_2	d_3	RSD
LH	۰.۳۰۹	۰.۱۹۸	۰.۱۸۵	۰.۲۱۳
SO	۰.۲۹۲	۰.۱۷۵	۰.۱۶۸	۰.۲۰۳
TH	۰.۲۷۴	۰.۱۶۷	۰.۱۲۵	۰.۱۸۶

همچنین نیاز می‌برم به خون و فرآورده‌های آن در بیمارستان‌ها و مراکز درمانی و برای جبران کمبود خون و پاسخگویی به نرخ تقاضا، طراحی یک زنجیره تامین خون پایدار و کارا ضروری به نظر می‌رسد. بر اساس مدل طراحی

۷. بینش مدیریتی

شیراز پنجمین شهر بزرگ و پر جمعیت ایران و پر جمعیت‌ترین شهر جنوب کشور به شمار می‌رود. به علت شرایط اضطراری و کمبود خون در سطح شهر شیراز و

شده و نتایج حاصل از حل مدل، برخی از مهم‌ترین بینش‌های مدیریتی این مقاله را می‌توان به صورت زیر عنوان نمود:

- استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره تامین خون، یک ابزار مناسب را در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان بخش سلامت قرار می‌دهد تا با صرف هزینه‌های محدود بهترین عملکرد را در خون‌رسانی به مناطق تقاضا داشته باشند. با در نظر گرفتن بعد اجتماعی فرصت‌های شغلی در حوزه سیستم‌های سلامت افزایش پیدا می‌کند و با در نظر گرفتن بعد زیست‌محیطی ابزار مناسبی برای مدیران جهت کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی فراهم می‌شود.
- عدم قطعیت جز جدایی ناپذیر در دنیای واقعی است و نمی‌توان آن را نادیده گرفت. با افزایش سطح عدم قطعیت پارامترها، توابع هدف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی افزایش پیدا می‌کنند. بنابراین مدیران ارشد سازمان انتقال خون می‌توانند با بررسی سطوح عدم قطعیت مختلف، بهترین تصمیم استراتژیک و عملیاتی را از بین انبوه جواب‌های ارائه شده انتخاب نمایند.
- توجه به محدودیت‌های دنیای واقعی نظیر زمان انقضاء خون جهت کاهش فاسدشدن این محصول، توجه به موجودی جهت جلوگیری از خطر مرگ و میر ناشی از کمبود خون و استقرار تسهیلات موقت جهت افزایش میزان عرضه خون می‌تواند به مدیران ارشد حوزه سلامت و سازمان انتقال خون در اتخاذ تصمیمات عملیاتی و راهبردی سطوح زنجیره تامین خون کمک شایانی کند.
- در نظر گرفتن فرآیند اهدای خون به دو صورت رزرو و غیر رزرو سبب رضایت و تشویق اهداکنندگان جهت اهدای خون و همچنین افزایش عرضه در زنجیره تامین خون خواهد شد.
- در نظر گرفتن شعاع پوشش مناسب برای مراکز دائم و موقت سبب تخصیص بهینه خون در زنجیره تامین با توجه به بعد فاصله خواهد شد.

- با افزایش میزان تقاضا، هزینه‌های سیستم و اثرات مخرب زیست‌محیطی و اثرات مثبت اجتماعی افزایش پیدا می‌کند و بدین ترتیب جهت کاهش کمبود می‌توان ذخیره ایمنی خون را افزایش داد تا علاوه بر کنترل هزینه‌های زنجیره، اثرات مخرب زیست‌محیطی و اثرات مثبت اجتماعی نیز بهینه شود.

۸. نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این مقاله، یک مدل ریاضی چندهدفه و چنددوره‌ای، برای طراحی زنجیره تامین خون با در نظر گرفتن سطوح مختلفی نظیر اهداکنندگان، تسهیلات جمع‌آوری خون (مراکز موقت و دائم خون)، بیمارستان‌ها و آزمایشگاه جهت آزمایش تست سلامت خون ارائه شده است. در این مدل، تصمیمات بهینه استراتژیک و عملیاتی نظیر مکان‌یابی، تخصیص، جریان خون، سطوح موجودی، کمبود و تعداد اهداکنندگان اتخاذ می‌شود. محدودیت‌های دنیای واقعی نظیر تقاضا، میزان عرضه خون، موجودی خون جهت کاهش کمبود و جلوگیری از خطر کاهش مرگ و میر، تاریخ انقضای خون، بودجه جهت استقرار تسهیلات و شعاع پوشش نیز در مدل لحاظ شده است. برای طراحی شبکه زنجیره تامین خون علاوه بر بعد اقتصادی که شامل کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تامین خون است، ابعاد زیست‌محیطی و اقتصادی نیز در نظر گرفته شده است. بر اساس بعد زیست‌محیطی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از استقرار تسهیلات و حمل و نقل خون بین سطوح زنجیره تامین کمینه می‌شود. بر اساس بعد اجتماعی نیز تعداد فرصت‌های شغلی ایجادشده در اثر تاسیس مراکز موقت و دائم خون بیشینه می‌شود.

در این پژوهش، جهت افزایش کارایی مدل پیشنهادی عدم قطعیت پارامترهای کلیدی نظیر تقاضای خون، هزینه‌های زنجیره تامین، بودجه جهت استقرار تسهیلات موقت خون غیرقطعی در نظر گرفته شده است. برای تبدیل مدل غیرقطعی به معادل قطعی، از یک رویکرد برنامه‌ریزی فازی محدودیت شانس استفاده شده است. با توجه به اینکه مدل پیشنهادی یک مدل چندهدفه است، برای حل مدل مورد

نظر از یک روش برنامه‌ریزی فازی تعاملی، روش TH استفاده شده است. برای بررسی کارایی مدل پیشنهادی از یک مطالعه موردی استفاده شد. تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای تقاضا و بودجه نیز انجام شد. در پایان، نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی با دو روش برنامه‌ریزی فازی مقایسه بر اساس ۲ شاخص فاصله و درجه رضایت مقایسه شد.

با توجه به نتایج عددی می‌توان بیان نمود که با افزایش سطح عدم قطعیت پارامترها، تعداد تسهیلات خون استقرار یافته در شبکه جهت پاسخگویی به تقاضای خون افزایش می‌یابد. همچنین مقادیر توابع هدف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی با افزایش سطح عدم قطعیت افزایش پیدا می‌کنند. از سوی دیگر، چون با در نظر گرفتن سطوح عدم قطعیت مختلف، جواب‌های بهینه متفاوتی بر اساس مکان تسهیلات و جریان‌های خون به دست خواهد آمد. بنابراین مدیران سیستم‌های سلامت می‌توانند با توجه به مقادیر تابع هدف و سطح اطمینان بهترین جواب را اختیار نمایند.

نتایج حاصل از حل مدل ریاضی چندهدفه با استفاده از سه روش TH ، SO و LH نشان می‌دهد که روش TH جواب بهتری را برای توابع اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی تولید می‌کند. همچنین، عملکرد روش TH از نظر شاخص فاصله و شاخص درجه رضایت از هر دو روش بهتر است.

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که، با افزایش تقاضا، تعداد مراکز موقت و دائم بیشتری در شبکه استقرار می‌یابند تا امکان جمع‌آوری میزان خون بیشتری برای برآورده‌سازی تقاضای بیمارستان‌ها میسر شود. این موضوع افزایش هزینه‌های ثابت استقرار و هزینه‌های عملیاتی نظیر هزینه جمع‌آوری، هزینه حمل و نقل و هزینه تست سلامت خون و در نهایت افزایش تابع هدف اقتصادی را در پی خواهد داشت. با افزایش حمل و نقل و تعداد تسهیلات، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و تابع هدف زیست‌محیطی، افزایش خواهد یافت. افزایش نرخ تقاضا همچنین موجب افزایش تابع هدف اجتماعی می‌شود، زیرا

جهت برآورده نمودن تقاضای افزایش یافته، نیاز به استقرار مراکز دائم و موقت بیشتری است که در پی آن تعداد فرصت‌های شغلی افزایش خواهد یافت. پارامتر بودجه نیز یکی از تاثیرگذارترین پارامترهای مدل پیشنهادی است که با افزایش آن امکان استقرار تسهیلات موقت و دائمی بیشتری جهت اهدای خون میسر می‌شود. با افزایش تعداد تسهیلات در زنجیره تامین، امکان تخصیص مراکز موقت به مراکز دائم نزدیک‌تر و همچنین تخصیص مراکز دائم به آزمایشگاه‌ها در فواصل کوتاه‌تر میسر خواهد شد. با توجه به این که کاهش هزینه حمل و نقل می‌تواند افزایش هزینه در نتیجه استقرار تسهیلات را جبران نماید، بنابراین با افزایش بودجه استقرار تسهیلات، هزینه‌های سیستم کاهش خواهد یافت. با افزایش بودجه، از یک سو میزان انتشار مربوط به تاسیس مراکز موقت و دائم افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با کاهش میزان حمل و نقل، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل و نقل به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد. با توجه به این که حمل و نقل از تصمیمات عملیاتی زنجیره تامین است و در کل افق برنامه‌ریزی وجود دارد، بنابراین صرفه‌جویی ناشی از کاهش حمل و نقل بیشتر از افزایش انتشار در اثر تاسیس مراکز دائم و موقت است و این موضوع منجر به کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. با افزایش بودجه، تعداد مراکز دائم و موقت افزایش و در پی آن تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده در شبکه زنجیره تامین و تابع هدف اجتماعی نیز افزایش می‌یابد. بر اساس تحلیل حساسیت و نتایج عددی می‌توان بیان کرد که مدل ریاضی ارائه شده با حفظ کاهش هزینه‌های زنجیره، توجه به آلودگی زیست‌محیطی و افزایش اثرات مثبت اجتماعی ابزار مناسبی را در اختیار مدیران ارشد سازمان انتقال خون شیراز قرار می‌دهد تا بتوانند جهت کاهش کمبود خون در این منطقه از استان فارس تصمیمات بهینه و استراتژیکی را اتخاذ نمایند.

لازم به ذکر است این مطالعه نیز مانند هر مطالعه دیگری دارای محدودیت‌هایی است. نخست، داده‌های مدل پیشنهادی به طور کامل در دسترس نبودند، بنابراین برخی از داده‌ها به صورت غیرقطعی و به شکل فازی دوزنقه‌ای برآورد شده‌اند. همچنین مدل پیشنهادی فقط برای زمان عادی در زنجیره تامین خون کاربرد دارد، اما در شرایط فاجعه مانند سیل و زلزله که تقاضا به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد، ممکن است کارایی بالایی نداشته باشد. در

شغلی کارکنان، روزهای از دست رفته کاری و توسعه منطقه در نتیجه بهبود شاخص سلامت و کاهش بیکاری از دیگر جهت‌های تحقیقات آتی مناسب خواهد بود. می‌توان امکان انتقال عرضی خون از بیمارستان‌های کوچکتر به بیمارستان‌های بزرگتر را بررسی نمود. این موضوع، از کمبود خون در بیمارستان‌های بزرگتر و ائتلاف آن در بیمارستان‌های کوچکتر جلوگیری می‌کند. بررسی عدم قطعیت پارامترهای زیست‌محیطی و اجتماعی نیز می‌تواند برای تحقیقات آتی دنبال شود. استفاده از دیگر رویکردهای برخورد با عدم قطعیت مانند برنامه‌ریزی استوار و تصادفی و مقایسه نتایج با رویکرد فازی محدودیت شانس نیز می‌تواند در پژوهش‌های آتی استفاده شود. در نهایت، می‌توان از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری جهت حل مدل پیشنهادی برای حل مسائل با ابعاد بزرگتر نظیر زنجیره تامین خون استان فارس و یا کل کشور استفاده نمود.

این پژوهش، بحث سازگاری گروه‌های خونی مطرح نشده است و در پژوهش‌های آتی بحث گروه‌های خونی می‌تواند مدل را به واقعیت نزدیک‌تر کند.

در پژوهش حاضر، توابع اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در طراحی زنجیره تامین بررسی شد و برای پژوهش‌های آتی کمینه‌نمودن زمان‌های انتقال خون به عنوان تابع هدف چهارم پیشنهاد می‌شود. با توجه به این که خون که از منابع کمیاب و حیاتی برای سیستم‌های سلامت است و عمر کوتاهی دارد، کمینه نمودن زمان انتقال می‌تواند، میزان فساد خون را به حداقل برساند. برای پژوهش‌های آتی می‌توان یک مدل چندمحصولی با در نظر گرفتن دیگر فرآورده‌های خون نظیر پلاسما، پلاکت، گلبول سفید و قرمز با توجه به عمر محصولات و میزان تقاضای هر یک از این محصولات را توسعه داد. توسعه تابع هدف اجتماعی با در نظر گرفتن فرصت‌های شغلی متغیر در نتیجه جمع‌آوری، حمل و نقل و تست سلامت خون، رضایت

منابع (References)

extraction technologies". *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106014 (2019).

7. [https:// www.IBTO.ir](https://www.IBTO.ir)

8. Pishvaei, M. S., Razmi, J., & Torabi, S.A. "Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach", *Fuzzy sets and systems*, 206, 1-20 (2012).

9. Riahi, N., Hosseini-Motlagh, S. M., & Teimourpour, B. "A three-phase hybrid time's series modeling framework for improved hospital inventory demand forecast", *International Journal of Hospital Research*, 2(3), 133-142 (2013).

10. Roshan, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Rahimi, Y. "A two-stage approach to agile pharmaceutical supply chain management with product substitutability in crises", *Computers & Chemical Engineering*, 127, 200-217, (2019).

11. World Health Organization. Blood safety and availability. Accessed in January, 2021, from.

12. Torrado, A. S., & Barbosa-Póvoa, "A. towards an Optimized and Sustainable Blood Supply Chain Network under Uncertainty: A

1. Nidhi, M. B., Chandran, A. G., & Pillai, V. M. "Sustainability assessment of blood bag supply chain: A case study", In 2013 IEEE Global Humanitarian Technology Conference: South Asia (2013).

2. Beliën, J., & Forcé, H. "Supply chain management of blood products: A literature review", *European Journal of Operational Research*, 217(1), 1-16 (2012).

3. American Red Cross, 2014a. <http://www.redcrossblood.com>.

4. Gunpinar, S., & Centeno, G. "Stochastic integer programming models for reducing wastages and shortages of blood products at hospitals", *Computers & Operations Research*, 54, 129-141 (2015).

5. Delen, D., Erraguntla, M., Mayer, R. J., & Wu, C. N. "Better management of blood supply-chain with GIS-based analytics", *Annals of Operations Research*, 185, 181-193 (2011).

6. Larimi, N. G., & Yaghoobi, S. "A robust mathematical model for platelet supply chain considering social announcements and blood

22. Mousavi, R., Salehi-Amiri, A., Zahedi, A., & Hajiaghayi-Keshteli, M. "Designing a supply chain network for blood decomposition by utilizing social and environmental factor", *Computers & Industrial Engineering*, 160, 107501 (2021).
23. Van Zyl G.J.J. "Inventory control for perishable commodities", Dissertation, University of North Carolina (1964).
24. Nahmias, S. "Perishable inventory theory: a review", *Operation Research*. Vol. 30, No. 4, PP. 680-708 (1982).
25. Sha, Y., & Huang, J. "The multi-period location-allocation problem of engineering emergency blood supply systems", *Systems Engineering Procedia*, 5, 21-28 (2012).
26. Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., & 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: Logistics and Transportation Review*, 70, 225-244 (2014).
27. Fereiduni, M., & Shahanaghi, K. "A robust optimization model for blood supply chain in emergency situations", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(4), 535-554 (2016).
28. Ramezani, R., & Behboodi, Z. "Blood supply chain network design under uncertainties in supply and demand considering social aspects", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 104, 69-82 (2017).
29. Osorio, A. F., Brailsford, S. C., & Smith, H. K. "Whole blood or apheresis donations? A multi-objective stochastic optimization approach", *European Journal of Operational Research*, 266(1), 193-204 (2018).
30. Samani, M. R. G., & Hosseini-Motlagh, S. M. "An enhanced procedure for managing blood supply chain under disruptions and uncertainties", *Annals of Operations Research*, 283(1), 1413-1462 (2019).
31. Diabat, A., Jabbarzadeh, A., & Khosrojerdi, A. "A perishable product supply chain network design problem with reliability and disruption considerations", *International Journal of Production Economics*, 212, 125-13(2019).
32. Rajendran, S., & Ravindran, A. R. "Inventory management of platelets along blood supply chain to minimize wastage and shortage", *Computers & Industrial Engineering*, 130, 714-730 (2019).
- Literature Review", *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 100028 (2022).
13. Eskandari-Khanghahi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Taleizadeh, A. A., & Amin, S. H. "Designing and optimizing a sustainable supply chain network for a blood platelet bank under uncertainty", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 71, 236-250 (2018).
14. Heidari-Fathian, H., & Pasandideh, S. H. R. "Green-blood supply chain network design: Robust optimization, bounded objective function & Lagrangian relaxation", *Computers & Industrial Engineering*, 122, 95-105 (2018).
15. Arani, M., Chan, Y., Liu, X., & Momenitabar, M. "A lateral resupply blood supply chain network design under uncertainties", *Applied Mathematical Modelling*, 93, 165-187 (2021).
16. Asadpour, M., Boyer, O., & Tavakkoli-Moghaddam, R. "A blood supply chain network with backup facilities considering blood groups and expiration date: a real-world", application *International Journal of Engineering*, 34(2), 470-479 (2021).
17. Eskandari, R., & Feili, H. R. "Designing and Solving Location-Routing-Allocation Problems in a Sustainable Blood Supply Chain Network of Blood Transport in Uncertainty Conditions", *International Journal of Innovation in Management, Economics and Social Sciences*, 1(4), 32-49 (2021).
18. Ghahremani-Nahr, J., Kian, R., Sabet, E., & Akbari, V. "A bi-objective blood supply chain model under uncertain donation, demand, capacity and cost: a robust possibilistic-necessity approach", *Operational Research*, 1-39 (2022).
19. Zarrinpoor, N. "Designing a sustainable supply chain network for producing high-value products from waste glass", *Waste Management & Research*, 39(12), 1489-1500 (2021).
20. Tirkolaee, E. B., Golpîra, H., Javanmardan, A., & Maihami, R. "A socio-economic optimization model for blood supply chain network design during the COVID-19 pandemic: an interactive possibilistic programming approach for a real case study", *Socio-Economic Planning Sciences*, 101439 (2023).
21. Mohammadian-Behbahani, Z., Jabbarzadeh, A., & Pishvaei, M. S. "A robust optimisation model for sustainable blood supply chain network design under uncertainty", *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 31(4), 475-494 (2021).

19: A Real Case in Iran”, *Discrete Dynamics in Nature and Society*, (2022).

43. Kohneh, J. N., Teymoury, E., & Pishvae, M. S. “Blood products supply chain design considering disaster circumstances (Case study: earthquake disaster in Tehran)”, *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 9(special issue on supply chain), 51-72 (2016).

44. Salehi, F., Allahyari Emamzadeh, Y., Mirzapour, A. E., Hashem, S. M. J., & Shafiei Aghdam, R. “An L-Shaped Method to Solve a Stochastic Blood Supply Chain Network Design Problem in a Natural Disaster”, *Advances in Industrial Engineering*, 55(1), 47-68 (2021).

45. Oberkampf, W. L., DeLand, S. M., Rutherford, B. M., Diegert, K. V., & Alvin, K. F. “Error and uncertainty in modeling and simulation”, *Reliability Engineering & System Safety*, 75(3), 333-357 (2002).

46. Zarrinpoor, N., & Pishvae, M. S. “Designing a municipal solid waste management system under disruptions using an enhanced L-shaped method”, *Journal of Cleaner Production*, 299, 126672 (2021).

47. Pishvae, M. S., Rabbani, M., & Torabi, S. A. “A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty”, *Applied mathematical modelling*, 35(2), 637-649 (2011).

48. Pishvae, M. S., & Khalaf, M. F. “Novel robust fuzzy mathematical programming methods”, *Applied Mathematical Modelling*, 40(1), 407-418 (2016).

49. Inuiguchi, M., & Ramik, J. “Possibilistic linear programming: a brief review of fuzzy mathematical programming and a comparison with stochastic programming in portfolio selection problem”, *Fuzzy sets and systems*, 111(1), 3-28 (2000).

50. Talaei, M., Moghaddam, B. F., Pishvae, M. S., Bozorgi-Amiri, A., & Gholamnejad, S. “A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry”, *Journal of Cleaner Production*, 113, 662-673 (2016).

51. Torabi, S. A., & Hassini, E. “An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning”, *Fuzzy sets and systems*, 159(2), 193-214 (2008).

52. <https://moba.shiraz.ir/ImageGallery/FCKUpl oadedImages/58/file/Salname1400.pdf>

33. Salehi, F., Mahootchi, M., & Hussein, S. M. M. “Developing a robust stochastic model for designing a blood supply chain network in a crisis: a possible earthquake in Tehran”, *Annals of Operations Research*, 283(1-2), 679-703(2019).

34. Jemai, J., Do Chung, B., & Sarkar, B. “Environmental effect for a complex green supply-chain management to control waste: A sustainable approach”, *Journal of cleaner production*, 277, 122919 (2020).

35. Haghjoo, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Shahmoradi-Moghaddam, H., & Rahimi, Y. “Reliable blood supply chain network design with facility disruption: A real-world application”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 90, 103493 (2020).

36. Hamdan, B., & Diabat, A. “Robust design of blood supply chains under risk of disruptions using Lagrangian relaxation”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 134, 101764 (2020).

37. Hosseini-Motlagh, S. M., Samani, M. R. G., & Homaei, S. “Blood supply chain management: robust optimization, disruption risk, and blood group compatibility (a real-life case) ”, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11(3), 1085-1104 (2020).

38. Ghahremani-Nahr, J., Nozari, H., & Bathaee, M. “Robust Box Approach for Blood Supply Chain Network Design under Uncertainty: Hybrid Moth-Flame Optimization and Genetic Algorithm”, *International Journal of Innovation in Engineering*, 1(2), 40-62 (2021).

39. Shirazi, H., Kia, R., & Ghasemi, P. “A stochastic bi-objective simulation–optimization model for plasma supply chain in case of COVID-19 outbreak”, *Applied Soft Computing*, 112, and 107725 (2021).

40. Eslamipour, R., & Nobari, A. “A reliable and sustainable design of supply chain in healthcare under uncertainty regarding environmental impacts”, *Journal of Applied Research on Industrial Engineering* (2022).

41. Khodaverdi, R., Shahbazi, M., Azar, A., & Fathi, M. R. “A Robust Optimization Approach for Sustainable humanitarian supply chain management of blood products”, *International Journal of Hospital Research*, 11 (2022).

42. Baghbani, B. “A Mixed Integer Programming Optimization of Blood Plasma Supply Chain in the Uncertainty Conditions during COVID-

fuzzy goal programming-based solution approach”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(3), 401-418 (2008).

56. Lai, Y. J., & Hwang, C. L. “Fuzzy multiple objective decision making”, In *Fuzzy multiple objective decision making* (pp. 139-262). Springer, Berlin, Heidelberg (1994).

53. [https:// www.fars.ibto.ir](https://www.fars.ibto.ir).

54. Lai, Y. J., & Hwang, C. L. “Possibilistic linear programming for managing interest rate risk”, *Fuzzy Sets and Systems*, 54(2), 135-146 (1993).

55. Selim, H., & Ozkarahan, I. “A supply chain distribution network design model: an interactive

Mathematical optimization model for designing a sustainable blood supply chain network under uncertain conditions

*Naeme Zarrinpoor^{*1}, Seyed Mohsen Alizadeh²*

1. Assistant Prof, Shiraz University of Technology, Faculty of Industrial Engineering, Shiraz, Iran. Email: zarrinpoor@sutech.ac.ir

2. MSc. Student, Shiraz University of Technology, Faculty of Industrial Engineering, Shiraz, Iran. Email: Mohsen.alizade@yahoo.com

Abstract

Adequate blood supply plays an essential role in the management of health systems, and the cost of blood supply and its derivatives is an important part of community health expenditures. Due to the lack of alternatives to blood, its production only by humans and its non-production by chemical processes, designing an efficient and effective blood supply chain seems necessary. In this paper, a multi-level and multi-period mixed integer programming model is provided for designing the blood supply chain considering donors, hospitals, temporary centers and laboratories. In the mathematical modeling, the goals of sustainable development are considered in order to minimize supply chain costs, minimize greenhouse gas emissions and maximize job opportunities created by the establishment of facilities. Using the proposed model, several decisions are made including the location of facilities, the blood flow between different levels of the supply chain, inventory level, deficiency, and the number of donors according to restrictions related to coverage radius, budget and the expiration of blood. Due to the uncertain nature of the parameters in the real world, the uncertainty of the key parameters of the blood supply chain such as blood demand, costs of systems, wastes and budget are considered. To deal with the uncertainty, the chance constrained fuzzy programming approach is used. Ultimately, a case study is presented to show the effectiveness of the model. The proposed model can provide a suitable tool for health department managers in making operational and strategic decisions of blood supply chain levels by optimizing all three dimensions of sustainability. Numerical results confirm the effectiveness of the proposed model and show that the uncertain nature of parameters of the proposed model cannot be ignored because the costs of the system, the harmful environmental effects and the positive social effects are significantly affected by the uncertainty. Also, the results obtained from solving the mathematical model show that when the level of uncertainty is increased, in order to meet the demand, it is necessary to establish more temporary facilities to increase blood supply and reduce its shortage.

Keywords: Blood supply chain, Sustainable development goals, Chance constrained fuzzy programming, Location-allocation