مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۱-۳۵، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۳۵-۴۶

Original Article

ارائه‌ی مدل دوهدفه‌ی طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین خون با ملاحظه‌ی نظریه‌ی صف در شرایط بحران

فاطمه بیاتلو (کارشناس ارشد)
علی بزرگی امیری* (استادیار)
ابوالقاسم یوسفی بابادی (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

وقوع بحران‌های طبیعی سبب ایجاد حجم وسیعی از تقاضا برای اقلام اضطراری مختلف در مناطق بحران‌زده می‌شود. پس از وقوع بحران یکی از مسائل مهم امدادرسانی، سرعت و کاهش زمان انتظار افراد آسیب‌دیده برای دریافت اقلام ضروری است. خون یکی از این اقلام است که نقش مهمی در حفظ حیات و سلامتی افراد حادثه‌دیده دارد. بنابراین طراحی یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین خون، که درکنار کاهش هزینه‌ها، به مسئله‌ی مهم کاهش زمان انتظار برای دریافت این کالای حیاتی بپردازد، لازم و ضروری به‌نظر می‌رسد. در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی چنددوره‌یی ارائه می‌شود که در آن برای محاسبه‌ی دقیق زمان انتظار افراد آسیب‌دیده، از نظریه‌ی صف استفاده شده است. کارایی مدل پیشنهادی از طریق ارائه‌ی مثال کاربردی و تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: زنجیره‌ی تأمین خون، بهینه‌سازی دوهدفه، بحران، نظریه‌ی صف، تخصیص چندگانه.

fatemeh.bayatloo@ut.ac.ir
alibozorgi@ut.ac.ir
a.yousefibabadi@ut.ac.ir

۱. مقدمه

حوادث طبیعی مانند سیل، زلزله و خشک‌سالی سالانه مشکلات زیادی را در جهان به وجود می‌آورند. سیل در چین در سال ۱۹۳۱، زلزله‌ی بم در ایران در سال ۲۰۰۳، و زلزله‌ی ژاپن در سال ۲۰۱۱ فقط تعداد کمی از این حوادث هستند. واضح است که این حوادث اثر زیادی بر قسمت‌های حادثه‌دیده دارند و سبب ایجاد حجم بالایی از تقاضا برای اقلام ضروری می‌شوند.[۱] خون یکی از این اقلام است که نقش مهمی در حفظ سلامتی و حیات افراد حادثه‌دیده دارد. یکی از مشکلات اساسی سیستم‌های سلامت در دنیا فراهم‌آوردن خون کافی و مناسب در زمان بحران است. بنابراین یک مسئله‌ی مهم و نیازمند بررسی، طراحی یک زنجیره‌ی تأمین کارا و سودمند با درنظرداشتن شرایط دنیای واقعی به‌منظور فراهم‌آوردن فرآورده‌های خونی در شرایط بحران است. طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین، از تصمیمات راهبردی در مدیریت زنجیره‌ی تأمین است و در بخش‌های مختلف از جمله سیستم‌های سلامت، انرژی، مدیریت ضایعات، و لجستیک بشردوستانه مورد استفاده قرار می‌گیرد.[۲] مدل‌سازی ریاضی از ابزارهای پرکاربرد در زمینه‌ی طراحی شبکه‌های زنجیره‌ی تأمین است که سبب یاری سازمان‌ها در طول حوادث طبیعی شده است.[۳]

هزینه یکی از فاکتورهای مهم در طراحی زنجیره‌های تأمین، از جمله زنجیره تأمین خون، است. اگرچه در کشورهای توسعه‌یافته خون به‌صورت داوطلبانه اهدا می‌شود، اما فرایندهایی مانند آزمایش، جداسازی، ذخیره، و توزیع آن هزینه‌بر است. به‌طورکلی یک زنجیره‌ی تأمین خون کارا درکنار برآوردن تقاضا به کاهش کمبود خون و هزینه‌ها می‌پردازد.[۴] به‌علاوه نیاز به سایر توابع هدف از جمله تابع هدف زمان، در کنار تابع هدف هزینه، مسئله‌ی مهمی است و مطالعات زیادی به طراحی توابع هدف مرتبط با تحویل سریع کالاهای امدادی در زمان بحران پرداخته‌اند. اهداف در تحویل کالاهای امدادی در قالب پنج ویژگی قابل بیان هستند: مقدارکالای تحویلی، اولویت نوع کالا، اولویت مکان تحویل، سرعت تحویل، و هزینه‌های عملیاتی. مشخص است که تمام این ویژگی‌ها به‌طور کلی در یک زنجیره‌ی تأمین بشردوستانه دارای اهمیت است؛ اما با توجه به نوع کالای امدادی و ساختار زنجیره‌ی تأمین، انتخاب و درجه‌ی اهمیت این اهداف متفاوت می‌شود. برای مثال در زنجیره‌های تأمین اضطراری، سرعت و زمان تحویل کالا با توجه به عواقب دیرکرد از اهمیت بیش‌تری برخوردار است.[۵]

برنامه‌ریزی زنجیره‌ی تأمین خون و مدیریت این زنجیره در زمان بحران، یکی از دغدغه‌های اصلی بخش بهداشت و درمان است. در ساعات اولیه پس از وقوع بحران، تقاضا برای اقلام امدادی، معمولاً بیش از تقاضا در روزهای بعدی است. مدتی پس از وقوع بحران، مجروحان به بیمارستان‌ها منتقل و بیمارستان با حجم وسیعی از تقاضای خون برای انجام خدمات درمانی مواجه می‌شود. در این شرایط

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۸/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۶/۷/۱۶، پذیرش ۱۳۹۶/۸/۹.
DOI:10.24200/J65.2019.7063.1679

احتمال مواجهه با کمبود واحدهای خونی در بیمارستان‌ها بیشتر از شرایط عادی است و با توجه به اینکه بیمارستان‌ها براساس معیارهای مختلف از جمله تعداد تخت‌های فعال، نوع خدمت، و تعداد خدمت‌دهنده‌ها (گروه پزشکی) اقدام به پذیرش بیمار می‌کنند، تأمین خون مورد نیاز در شرایط کمبود، بر عهده‌ی بیمارستان است و بیمارکه مشتری این سیستم محسوب می‌شود، به دلیل کمبود خون اقدام به ترک بیمارستان نخواهد کرد. در چنین شرایطی، ایجاد صفی از مجروحان برای دریافت خون دور از انتظار نیست. با توجه به مطرح‌بودن شرایط بحران و اهمیت موضوع زمان و اثرگذاری آن در ارائه‌ی خدمت بهتر و نجات جان افراد، در این مقاله، در کنار تابع هدف هزینه به کاهش زمان انتظار مجروحان برای دریافت خون، به‌عنوان یک هدف مستقل پرداخته‌شده است. زمان انتظار مجروحان، شامل زمان انتظار در بیمارستان و مدت زمان انتقال خون از مرکز خون به بیمارستان در مواقع کمبود است.

در زمینه‌ی طراحی زنجیره‌ی تأمین خون، مقالات کمی به کمینه‌کردن زمان انتقال خون پرداخته‌اند[۵و۶] و ضعفی که در این مدل‌ها مشاهده می‌شود، عدم توجه به زمان انتظار مجروحان در بیمارستان است. این در حالی است که در شرایط بحران به دلیل ازدحام جمعیت در بیمارستان‌ها و ایجاد صفی از مجروحان، مدت زمان انتظار در بیمارستان، زمان قابل توجهی است و عدم پرداختن به آن سبب کاهش کارایی مدل خواهد شد. هدف از بهینه‌سازی در سیستم‌های صف، تعیین ظرفیت سیستم به‌گونه‌یی است که علاوه‌بر کاهش اتلاف وقت مشتریان، کاهش هزینه‌های عملیاتی نیز مورد توجه قرار گیرد؛ بنابراین می‌توان با طراحی یک مدل دوهدفه، با کنترل هزینه‌ها و تخصیص بهینه‌ی مجروحان به بیمارستان‌ها و خدمت‌دهنده‌ها در زمان بحران، طول صف و در نتیجه زمان انتظار مجروحان را کمینه کرد.

در شرایط بحران، به دلیل تغییر پارامترهای مؤثر از جمله تقاضا و تأمین در طول افق برنامه‌ریزی، طراحی یک زنجیره‌ی تأمین پویا سبب افزایش کارایی مدل و همچنین تصمیم‌گیری در هر دوره، بر اساس پارامترهای مربوط می‌شود. در مدل‌های پویا، تسهیلات موجود در شبکه می‌توانند به دو صورت ثابت و موقتی باشند. تسهیلات موقت، قابلیت تغییر مکان دارند و در هر دوره به‌منظور برآوردن تقاضا در بخش‌های مختلف شبکه جابه‌جا می‌شوند. مکان این تسهیلات با توجه به موازنه‌ی بین هزینه‌ی جابه‌جایی تسهیل و سود حاصل از این تغییر مکان تعیین می‌شود. همچنین زمان جابه‌جایی و تعداد جابه‌جایی‌ها از تصمیماتی هستند که باید مشخص شوند.[۷] در زنجیره‌ی تأمین خون نیز، تسهیلات موقت (مانند آمبولانس‌ها)، قابلیت جابه‌جایی دارند و می‌توانند در دوره‌های مختلف به‌منظور جمع‌آوری واحدهای خون، در شبکه‌ی طراحی‌شده جابه‌جا شوند.

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی چنددوره‌یی برای طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین خون در شرایط بحران ارائه شده است که اهداف کمینه‌کردن بیشینه‌ی زمان انتظار (شامل زمان انتظار در بیمارستان و زمان انتقال خون از مراکز خون به بیمارستان) و کمینه‌کردن هزینه‌های شبکه (شامل هزینه‌های جمع‌آوری و انتقال خون در شبکه، هزینه‌های جابه‌جایی تسهیلات موقت، هزینه‌های نگه‌داری خون در تسهیلات مختلف شبکه، و هزینه‌ی کمبود خون در بیمارستان‌ها) را در نظر می‌گیرد. مهم‌ترین ویژگی‌های این مقاله را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

۱. طراحی یک شبکه‌ی پنج‌سطحی برای زنجیره‌ی تأمین خون شامل اهداکنندگان، تسهیلات خون (دائم و موقت)، مراکز خون، نقاط تقاضا (بیمارستان‌ها) و مجروحان.

۲. ارائه‌ی یک مدل دوهدفه‌ی چنددوره‌یی برای زنجیره‌ی تأمین خون شامل اهداف کمینه‌کردن بیشینه‌ی زمان انتظار مجروحان و کمینه‌کردن هزینه‌ها.

۳. استفاده از نظریه‌ی صف به‌منظور محاسبه‌ی دقیق زمان انتظار مجروحان.

۴. درنظرداشتن شرایط مختلف برای موجودی مراکز خون (واحدهای خون نیازمند آزمایش و غربال‌گری، واحدهای خون آماده‌ی ارسال).

۵. تخصیص چندگانه‌ی اهداکنندگان به تسهیلات ثابت، موقت، و مرکز خون برای اهدای خون با درنظرداشتن ظرفیت و شعاع پوشش تسهیلات.

۶. درنظرداشتن کمبود موجودی خون در بیمارستان‌ها و مراکز خون.

در ادامه، سایر بخش‌های مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده‌اند: در بخش دوم به مرور مقالات در حوزه‌ی طراحی زنجیره‌ی تأمین خون پرداخته شده است. بخش سوم شامل ارائه‌ی فرضیات و مدل ریاضی پیشنهادی است. در بخش چهارم با ارائه‌ی مثال کاربردی، کارایی مدل پیشنهادی نشان داده شده است. همچنین به‌منظور تحلیل رفتار مدل، بر روی پارامترهای مهم و حساس، تحلیل حساسیت صورت گرفته و نهایتاً در بخش پنجم به نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی پرداخته شده است.

۲. مرور پژوهش‌های پیشین

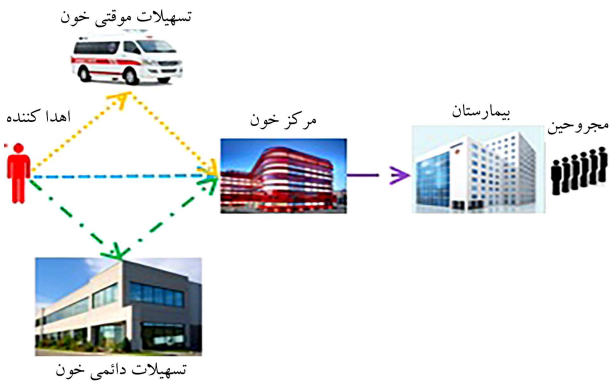
مدل‌های طراحی زنجیره‌ی تأمین خون را می‌توان در پنج گروه کلی دسته‌بندی کرد. چهار دسته‌ی اول شامل مدل‌هایی هستند که به بهینه‌سازی در هر یک از سطوح جمع‌آوری، تولید محصولات خون، موجودی و ذخیره‌سازی، و تحویل پرداخته‌اند. از این جمله می‌توان به مقاله‌ی دیلن و همکاران در سال ۲۰۱۷ اشاره کرد. در این مقاله مدلی برای مدیریت موجودی در زنجیره‌ی تأمین خون با درنظرداشتن فسادپذیری خون توسعه داده شده است.[۸] دسته‌ی آخر شامل مدل‌های یکپارچه است که بیش از یک سطح را پوشش می‌دهند. تعداد مقالاتی که به دنبال ایجاد ارتباط بین سطوح مختلف و ارائه‌ی مدل‌های یکپارچه هستند، در سال‌های اخیر افزایش یافته است. در این میان، تعدادی از مدل‌ها به طراحی شبکه در شرایط بحران پرداخته‌اند و ویژگی اصلی این مدل‌ها افق برنامه‌ریزی محدود و تصمیم‌گیری در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت است. برای اطلاع بیشتر از انواع دسته‌بندی مقالات در این زمینه می‌توان به مقالات مروری اسوریو و همکاران در سال ۲۰۱۵ و بلین و فورس در سال ۲۰۱۲ مراجعه کرد.[۴و۹] در زنجیره‌ی تأمین خون، نظریه‌ی صف در بخش مدیریت موجودی و برای مدل‌سازی جمع‌آوری خون به‌عنوان جریان ورودی سیستم صف به کار رفته است.[۸] برادهیم و همکاران در سال ۱۹۷۵ مدلی برای استفاده از زنجیره‌ی مارکوف در مدیریت موجودی و توزیع اقلام فسادپذیر ارائه کردند.[۱۰] کوپاچ و همکاران در سال ۲۰۰۸، مدل صفی ارائه کرده‌اند که شامل دو نوع تقاضا و راهبردهای متعدد برای برآوردن هرکدام از آن‌هاست.[۱۱] در ادامه به بررسی دقیق‌تر مقالات ارائه‌شده در زمینه‌ی طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین خون پرداخته می‌شود. ستین و سارول در سال ۲۰۰۹، یک مدل مکان‌یابی چندهدفه، برای تعیین مکان بانک‌های خون در بین بیمارستان‌ها و کلینیک‌ها ارائه و برای حل مدل از روش برنامه‌ریزی غیرخطی آرمانی استفاده کرده‌اند. اهداف مدل شامل کمینه‌کردن هزینه‌ی ثابت احداث بانک‌های خون، کمینه‌کردن فاصله‌ی طی‌شده بین بانک‌های خون و بیمارستان‌ها و بیان هدفی به‌منظور برقراری عدالت در میزان فاصله است.[۱۲] دلن و همکاران در سال ۲۰۱۱، به‌منظور تصمیم‌گیری و مدیریت بهتر زنجیره‌ی تأمین خون از داده‌کاوی و سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده کردند.[۱۳] شا و هانگ در سال ۲۰۱۲، یک مدل چنددوره‌یی مکان‌یابی ـ تخصیص، برای زمان‌بندی زنجیره‌ی تأمین خون در شرایط بحران ارائه داده و برای حل آن از یک روش ابتکاری بر مبنای آزادسازی لاگرانژ استفاده کرده‌اند.

شبکه‌ی پیشنهادی شامل اهداکنندگان، تسهیلات خون، و مرکز خون است.[۱۴] ناگورنی و همکاران در سال ۲۰۱۲، مدلی برای طراحی/بازطراحی یک شبکه‌ی پایدار برای زنجیره‌ی تأمین خون ارائه کردند. شبکه‌ی پیشنهادی شامل نقاط جمع‌آوری خون، مرکز خون، آزمایشگاه‌ها، تسهیلات ذخیره‌سازی، مراکز توزیع، و نقاط تقاضاست. در این مقاله فسادپذیری خون و هزینه‌ی ضایعات نیز درنظرگرفته شده است.[۱۵] چانگ و لیاوو در سال ۲۰۱۲، یک مدل استوار برای طراحی زنجیره‌ی تأمین خون با درنظرداشتن هزینه‌ها و ایمنی خون منتقل‌شده به بیماران ارائه دادند. در این مقاله برای تنظیم فاکتورهای کنترل در زنجیره‌ی تأمین خون از مجموعه‌ی پویای تاگوچی استفاده شده است. همچنین به‌منظور حل مدل، الگوریتم ژنتیک و شبکه‌ی عصبی به‌کار گرفته شده‌اند.[۱۶] دوان و لیاوو در سال ۲۰۱۴، یک مدل بهینه‌سازی ـ شبیه‌سازی برای مدیریت موجودی در زنجیره‌ی تأمین خون، با درنظرداشتن گروه‌های خونی و عمر قفسه‌یی محصولات خون ارائه داده‌اند. هدف از ارائه‌ی این مدل کمینه‌کردن متوسط نرخ هدررفت خون است.[۱۷] جبارزاده و همکاران در سال ۲۰۱۴، یک مدل پویای مکان‌یابی ـ تخصیص، برای طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین خون در شرایط بحران ارائه دادند. شبکه‌ی پیشنهادی شامل اهداکنندگان، تسهیلات دائم و موقت خون و مرکز خون است. در این مقاله کارایی مدل ارائه‌شده با مطالعه‌ی موردی بررسی شده است.[۱۸] ظهیری و همکاران در سال ۲۰۱۴، یک مدل غیرخطی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با هدف بهینه‌سازی مکان تسهیلات و جریان بین آن‌ها در زنجیره‌ی تأمین خون ارائه دادند. مدل پیشنهادی شامل سه سطح اهداکننده، تسهیلات موقت، و تسهیلات ثابت است.[۱۹] عاروان و همکاران در سال ۲۰۱۵، شبکه‌یی شامل اهداکنندگان، آزمایشگاه‌ها، مرکز خون و نقاط تقاضا برای طراحی زنجیره‌ی تأمین محصولات خون پیشنهاد دادند که شامل تصمیمات مکان‌یابی و تخصیص است. از ویژگی‌های این مقاله می‌توان به امکان انتقال عرضی بین بیمارستان‌ها اشاره کرد. اهداف مدل شامل کمینه‌کردن هزینه‌ها و زمان رسیدن محصولات خون است. برای حل این مدل دوهدفه از روش اپسیلون ـ محدودیت استفاده شده است.[۶] فهیم‌نیا و همکاران در سال ۲۰۱۵، مدلی برای طراحی زنجیره‌ی تأمین خون با اهداف کمینه‌کردن هزینه و زمان تحویل خون در شرایط بحران ارائه دادند. شبکه‌ی پیشنهادی شامل اهداکنندگان، تسهیلات موقت، تسهیلات منطقه‌یی و محلی خون و همچنین نقاط تقاضاست. برای حل این مدل از روش آزادسازی لاگرانژ و اپسیلون ـ محدودیت استفاده شده است.[۵] ظهیری و همکاران در سال ۲۰۱۵، یک مدل غیرقطعی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، برای طراحی یک سیستم جمع‌آوری خون با تصمیمات راهبردی و فنی طراحی کردند. کاربرد مدل با مطالعه‌ی موردی در ایران نشان داده شده است.[۲] گانپینار و سنتو در سال ۲۰۱۵، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح به‌منظور کمینه‌کردن هزینه‌ها و همچنین کمینه‌کردن ضایعات و کمبود خون در بیمارستان‌ها در طول افق برنامه‌ریزی ارائه دادند.[۲۰] چایوتیساک و همکاران در سال ۲۰۱۶، یک مدل تک‌هدفه‌ی مکان‌یابی ـ تخصیص به‌منظور بهبود عملکرد زنجیره‌ی تأمین خون در کشور تایلند ارائه داده‌اند. شبکه‌ی ارائه‌شده شامل نقاط تقاضا، تسهیلات خون و مرکز خون است.[۲۱] نهفتی و همکاران در سال ۲۰۱۶، یک مدل غیرقطعی و دوهدفه‌ی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای زنجیره‌ی تأمین محصولات خون در شرایط بحران ارائه دادند. شبکه‌ی پیشنهادی شامل اهداکنندگان، تسهیلات دائم و موقت اهدای خون، بانک خون و نقاط تقاضاست. هدف از این مدل‌سازی به کمینه‌کردن هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین محصولات خون و بیشینه‌کردن پوشش اهداکنندگان توسط تسهیلات موقت است. همچنین برای بررسی کارایی مدل از داده‌های یک مطالعه‌ی موردی در شهر تهران استفاده شده است.[۳] اسوریو و همکاران در سال ۲۰۱۶ یک مدل بهینه‌سازی ـ شبیه‌سازی به‌منظور برنامه‌ریزی تولید در زنجیره‌ی تأمین خون ارائه دادند. در این مقاله از شبیه‌سازی به‌منظور تعیین جریان در شبکه‌یی شامل بخش‌های جمع‌آوری، تولید، ذخیره‌سازی، و توزیع استفاده شده است. همچنین یک مدل بهینه‌سازی چنددوره‌یی برای تصمیم‌گیری‌های روزانه با درنظرداشتن گروه‌های خونی ارائه شده است.[۲۲] رمضانیان و بهبودی در سال ۲۰۱۷ مدلی برای طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین خون با درنظرگرفتن ابعاد اجتماعی از طریق محاسبه‌ی تابع مطلوبیت تسهیلات از دیدگاه اهداکنندگان ارائه کردند. در محاسبه‌ی این تابع، چندین معیار از جمله فاصله‌ی اهداکنندگان از تسهیلات و بودجه‌ی تخصیص‌یافته به تسهیلات برای تشویق اهداکنندگان به‌کار رفته است.[۲۳] تعدادی از مقالات اخیری که در این حوزه ارائه شده‌اند، رابطه‌ی بین گروه‌های خونی مختلف و همچنین فرآورده‌های حاصل از خون را در مدل خود در نظر داشته‌اند. صالحی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین خون در شرایط بحران پرداخته و برای مواجهه با عدم قطعیت‌های موجود در مدل، از روش ترکیبی استوار ـ تصادفی استفاده کرده‌اند. در این مقاله به تعامل بین گروه‌های خونی مختلف و نیز فرآورده‌های خون از جمله پلاسما و پلاکت پرداخته شده است. شبکه‌ی پیشنهادی شامل سه سطح اهداکنندگان، مراکز جمع‌آوری و مرکز خون است و شهر تهران برای مطالعه موردی انتخاب شده است.[۲۴] ظهیری و پیشوایی در سال ۲۰۱۷ یک مدل دوهدفه شامل کمینه‌سازی هزینه‌ها و کمبود خون برای طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین ارائه کردند. درنظرداشتن انواع گروه‌های خونی و امکان جایگزین‌شدن آن‌ها با یکدیگر از ویژگی‌های این مدل است.[۲۵] انصافیان و یعقوبی در سال ۲۰۱۷ دو مقاله در زمینه‌ی طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین پلاکت ارائه کردند. آن‌ها در کار اول خود یک مدل غیرقطعی دوهدفه به‌منظور کاهش هزینه‌ها و بیشینه کردن تازگی پلاکت‌ها توسعه دادند. در این مدل سن پلاکت‌های دریافتی برای استفاده‌های مختلف در بیمارستان‌ها در نظر گرفته شده است.[۲۶] در مقاله‌ی دوم از زنجیره‌ی مارکوف برای پیش‌بینی تعداد اهداکنندگان در هر دوره استفاده شده است.[۲۷]

با توجه به پژوهش‌های پیشین در این زمینه، نوآوری‌های این مقاله شامل ارائه‌ی یک مدل پنج‌سطحی با درنظرداشتن اهداکنندگان، تسهیلات موقت و دائمی خون، مرکز خون، بیمارستان‌ها و مجروحان به‌منظور طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین خون در ساعات اولیه پس از وقوع بحران است. در پژوهش‌های پیشین یک تا سه سطح از این زنجیره در نظرگرفته نشده است؛ در حالی که پرداختن به تمام این سطوح در یک مدل یکپارچه سبب افزایش کارایی مدل ارائه شده خواهد شد. با توجه به مطرح‌بودن شرایط بحران و اهمیت موضوع زمان در ارائه‌ی خدمت بهتر و نجات جان افراد، در این مقاله، درکنار تابع هدف هزینه به کاهش زمان انتظار مجروحان با استفاده از نظریه‌ی صف، به‌عنوان یک هدف مستقل پرداخته شده است. زمان انتظار مجروحان، شامل زمان انتظار در بیمارستان و مدت زمان انتقال خون از مرکز خون به بیمارستان در مواقع کمبود است. همچنین برای موجودی مرکز خون و بیمارستان حالات مختلفی در نظرگرفته شده است. در شرایطی که مرکز خون دارای موجودی باشد، این موجودی می‌تواند شامل واحدهای آماده‌ی ارسال به بیمارستان‌ها و واحدهای نیازمند آزمایش و غربال‌گری باشد. زمانی که مرکز خون دارای موجودی نباشد، باید مدتی را منتظر رسیدن واحدهای خون از سایر تسهیلات یا اهدای مستقیم اهداکنندگان باشد. هر کدام از این شرایط در محاسبه‌ی زمان انتظار مجروحان اثرگذار است.

۳. تشریح مسئله

در شبکه‌ی مورد بررسی که در شکل ۱ نشان داده شده است، بیمارستان‌ها نقاط



شکل ۱. طرح شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین خون.

تقاضا هستند و بخشی از شبکه‌ی طراحی شده را تشکیل می‌دهند. سایر قسمت‌های این شبکه شامل اهداکنندگان، تسهیلات موقت و دائمی جمع‌آوری خون، مراکز خون و مجروحان است. مکان اهداکنندگان از قبل مشخص است و با نظر کارشناسان و بر اساس معیارهایی مانند تراکم جمعیت و تقسیمات جغرافیایی تعیین می‌شود. هرگروه از اهداکنندگان، شامل جمعیتی از افراد است که توانایی اهدای خون تا حد مشخصی را دارند.

تسهیلات دائمی خون در واقع مراکزی هستند که با یک هزینه‌ی اولیه ساخته شده و وظیفه‌ی دریافت و جمع‌آوری خون از اهداکنندگان و ارسال آن به مراکز خون را بر عهده دارند. مکان ساخت این تسهیلات از جمله تصمیماتی است که توسط مدل مشخص می‌شود و تا پایان افق برنامه‌ریزی بدون تغییر باقی می‌ماند. نوع دیگری از تسهیلات جمع‌آوری خون، تسهیلات موقت هستند که قابلیت جابه‌جایی و تغییر مکان دارند و وجود آن‌ها به‌ویژه در شرایط بحران، به دلیل مشکلاتی از جمله به وجود آمدن محدودیت‌های رفت‌وآمد، سبب افزایش دسترسی افراد برای اهدای خون می‌شود. با توجه به شرایط مسئله و میزان تقاضای موجود، امکان جابه‌جایی این تسهیلات در دوره‌های مختلف وجود دارد. مشخص است که این تسهیلات نسبت به تسهیلات دائمی از ظرفیت پایینی برای دریافت خون برخوردار هستند اما مزیت‌هایی از جمله هزینه‌ی راه‌اندازی کم، قابلیت جابه‌جایی در دوره‌های مختلف و افزایش دسترسی ضرورت وجود این تسهیلات در شبکه‌ی طراحی شده را نشان می‌دهند. خون اهداشده در این تسهیلات مستقیماً به مراکز خون فرستاده می‌شود. در مراکز خون برای کسب اطمینان از سلامت خون دریافت‌شده آزمایش‌های لازم انجام گرفته و پس از تأیید سلامت، واحدهای خون برای استفاده‌ی بیماران به بیمارستان‌ها ارسال می‌شوند. در مدل پیشنهادی، اهدای خون در مراکز خون نیز امکان‌پذیر است. بنابراین اهداکنندگان با توجه به محدودیت‌هایی از جمله ظرفیت اهدای خون، ظرفیت تسهیلات، میزان تقاضای موجود، و شعاع پوشش تسهیلات برای اهدای خون به تسهیلات موقت، دائمی یا مراکز خون تخصیص پیدا می‌کنند. بیمارستان‌ها و مراکز خون، از تجهیزات لازم برای نگه‌داری خون برخوردارند و نیازمند تعیین سطح بهینه‌ی موجودی در انتهای هر دوره هستند.

اهدافی که در این مدل به آن‌ها پرداخته شده است، عبارت‌اند از: کمینه‌کردن هزینه‌ها و کمینه‌کردن بیشینه‌ی زمان انتظار مجروحان. زمان انتظار مجروحان برای دریافت خون شامل زمان انتظار در بیمارستان و زمان لازم برای رسیدن واحدهای خون به بیمارستان در مواقع کمبود است. همچنین زمان انتظار در بیمارستان، برابر با مجموع زمان انتظار در صف و مدت زمان دریافت خدمت است. مجروحان بر اساس ظرفیت بیمارستان‌ها (تعداد خدمت‌دهنده‌ها و موجودی خون بیمارستان) به بیمارستان و خدمت‌دهنده‌ها تخصیص می‌یابند. تخصیص انجام‌شده با هدف کاهش طول صف و در نتیجه کاهش زمان انتظار مجروحان صورت می‌گیرد. به‌منظور رعایت عدالت در خدمت‌رسانی به مجروحان، در مدل پیشنهادی از تابع هدف کمینه‌کردن بیشینه‌ی زمان انتظار استفاده شده است. به‌طورکلی مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات، مقدار جریان خون در شبکه، تخصیص مجروحان به بیمارستان‌ها و خدمت‌دهنده‌ها، مدت زمان انتظار مجروحان، میزان کمبود و سطح موجودی از تصمیماتی هستند که توسط مدل مشخص خواهند شد.

در قسمت بعدی مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه می‌شود.

۱.۳. مدل ریاضی پیشنهادی

۱.۱.۳. مجموعه‌ها و شناساگرها

I: مجموعه‌ی گروه‌های اهداکننده‌ی خون $i \in I$؛

J: مجموعه‌ی نقاط کاندید تسهیلات موقت $j \in J$؛

L: مجموعه‌ی نقاط کاندید احداث تسهیلات دائمی $l \in L$؛

N: مجموعه‌ی مراکز آزمایش و غربال‌گری خون $n \in N$؛

K: مجموعه‌ی نقاط تقاضا (بیمارستان‌ها) $k \in K$؛

G: مجموعه‌ی مجروحان $g, g', g'' \in G$؛

T: مجموعه‌ی دوره‌های زمانی $t \in T$؛

F: مجموعه‌ی خدمت‌دهنده‌ها $f \in F$؛

۲.۱.۳. پارامترها

P: تعداد تسهیلات موقت؛

R: تعداد تسهیلات دائمی؛

$jd_{i,j}$: فاصله‌ی گروه اهداکننده i تا تسهیل موقت j؛

$ld_{i,l}$: فاصله‌ی گروه اهداکننده i تا تسهیل دائمی l؛

$nd_{i,n}$: فاصله‌ی گروه اهداکننده i تا مرکز خون n؛

$jc_{i,j,t}$: هزینه‌ی عملیاتی اهدای خون گروه اهداکننده i در تسهیل موقت j در دوره‌ی t؛

$nc_{i,n,t}$: هزینه‌ی عملیاتی اهدای خون گروه اهداکننده i در مرکز خون n در دوره‌ی t؛

$lc_{i,l,t}$: هزینه‌ی عملیاتی اهدای خون گروه اهداکننده‌ی i در تسهیل دائمی l در دوره‌ی t؛

$c_{j,n,t}$: هزینه‌ی انتقال یک واحد خون از تسهیل موقت j به مرکز خون n در دوره‌ی t؛

$c'_{l,n,t}$: هزینه‌ی انتقال یک واحد خون از تسهیل دائمی l به مرکز خون n در دوره‌ی t؛

$c''_{n,k,t}$: هزینه‌ی انتقال یک واحد خون از مرکز خون n به نقطه‌ی تقاضای k در دوره‌ی t؛

$cc_{j_1,j_2,t}$: هزینه‌ی جابه‌جایی تسهیل موقت از مکان j_1 به مکان j_2 در دوره‌ی t؛

$h_{k,t}$: هزینه‌ی نگه‌داری یک واحد خون در نقطه‌ی تقاضای k در دوره‌ی t؛

$b_{k,t}$: هزینه‌ی کمبود یک واحد خون در نقطه‌ی تقاضای k در دوره‌ی t؛

ρ_j: ظرفیت تسهیل موقت j؛

ρ'_l: ظرفیت تسهیل دائمی l؛

ρ''_n: ظرفیت مرکز خون n؛

ρ'''_k: ظرفیت نقطه‌ی تقاضای k؛

$\delta_{i,t}$: حداکثر میزان واحدهای خون که گروه اهداکننده‌ی i در دوره‌ی t می‌تواند اهدا کند؛

$t_{k,n}$: مدت زمان لازم برای انتقال خون از مرکز خون n به بیمارستان k؛

$E_{g,t}$: زمان ورود مجروح g به سیستم صف در دوره‌ی t؛

$D_{k,t}$: میزان تقاضای خون در نقطه‌ی تقاضای k در دوره‌ی t؛

β_n: درصدی از خون اهداشده که پس از آزمایش و غربالگری در مرکز خون n حذف می‌شود؛

r: شعاع پوشش بین تسهیل موقت و اهداکنندگان؛

r': شعاع پوشش بین تسهیل دائمی و اهداکنندگان؛

r'': شعاع پوشش بین مرکز خون و اهداکنندگان؛

M: عدد بسیار بزرگ؛

μ_k: نرخ خدمت‌دهی در بیمارستان k؛

μ'_n: نرخ خدمت‌دهی در مرکز خون n برای آماده‌سازی خون؛

t': بیشینه‌ی زمان رسیدن یک واحد خون به مرکز خون.

۳.۱.۳. متغیرهای تصمیم

X_l: اگر در مکان کاندید l تسهیل دائمی احداث شود، یک و در غیر این صورت صفر؛

$Y^t_{j_1,j_2}$: اگر تسهیل موقتی که در دوره‌ی $t-1$ در مکان j_1 قرار گرفته، در دوره‌ی t به مکان j_2 برود، یک و در غیر این صورت صفر؛

$W_{i,j,t}$: اگر گروه اهداکننده‌ی i در دوره‌ی t به تسهیل موقت j اختصاص یابد، یک و در غیر این صورت صفر؛

$W'_{i,l,t}$: اگر گروه اهداکننده‌ی i در دوره‌ی t به تسهیل دائمی l اختصاص یابد، یک و در غیر این صورت صفر؛

$W''_{i,n,t}$: اگر گروه اهداکننده‌ی i در دوره‌ی t به مرکز خون n اختصاص یابد، یک و در غیر این صورت صفر؛

$Q_{i,j,t}$: تعداد واحدهای خون که در دوره‌ی t توسط گروه اهداکننده‌ی i در تسهیل موقت j اهدا می‌شود؛

$Q'_{i,l,t}$: تعداد واحدهای خون که در دوره‌ی t توسط گروه اهداکننده‌ی i در تسهیل دائمی l اهدا می‌شود؛

$Q''_{i,n,t}$: تعداد واحدهای خون که در دوره‌ی t توسط گروه اهداکننده‌ی i در مرکز خون n اهدا می‌شود؛

$QT_{j,n,t}$: تعداد واحدهای خون که در دوره‌ی t از تسهیل موقت j به مرکز خون n منتقل می‌شود؛

$QT'_{l,n,t}$: تعداد واحدهای خون که در دوره‌ی t از تسهیل دائمی l به مرکز خون n منتقل می‌شود؛

$QT''_{n,k,t}$: تعداد واحدهای خون که در دوره‌ی t از مرکز خون n به نقطه‌ی تقاضای k منتقل می‌شود؛

$B_{k,t}$: میزان کمبود خون در نقطه‌ی تقاضای k در دوره‌ی t؛

$Z_{j,n,t}$: اگر تسهیل موقت j در دوره‌ی t به مرکز خون n اختصاص یابد، یک و در غیر این صورت صفر؛

$Z'_{l,n,t}$: اگر تسهیل دائمی l در دوره‌ی t به مرکز خون n اختصاص یابد، یک و در غیر این صورت صفر؛

$Z''_{n,k,t}$: اگر مرکز خون n در دوره‌ی t به نقطه‌ی تقاضای k اختصاص یابد، یک و در غیر این صورت صفر؛

$I_{k,t}$: سطح موجودی نقطه‌ی تقاضای k در پایان دوره‌ی t؛

$I'_{n,t}$: سطح موجودی مرکز خون n در پایان دوره‌ی t؛

$V_{g,k,t}$: اگر مجروح g در دوره‌ی t به بیمارستان k اختصاص یابد، یک و در غیر این صورت صفر؛

$O_{k,t}$: اگر نقطه‌ی تقاضای k در دوره‌ی t واحد خون داشته باشد، برابر یک و در غیر این صورت صفر؛

$O'_{n,t}$: اگر مرکز خون n در دوره‌ی t واحد خون داشته باشد، یک و در غیر این صورت صفر؛

$Oe_{n,t}$: اگر مرکز خون n در دوره‌ی t خون آماده برای آزمایش، که غیرمستقیم (خونی که در مرکز خون اهدا نشده است) از اهداکننده به مرکز خون رسیده است داشته باشد، یک و در غیر این صورت صفر؛

$Wq^t_{k,f,g}$: مدت زمان انتظار مجروح g در صف خدمت‌دهنده‌ی f در بیمارستان k ودر دوره‌ی t؛

$U^t_{g,f,k}$: اگر مجروح g در بیمارستان k و در دوره‌ی t به خدمت‌دهنده f اختصاص یابد، یک و در غیر این صورت صفر؛

$\varphi_{k,t,g}$: مدت زمان انتظار مجروح g برای دریافت خون در نقطه‌ی تقاضای k و دوره‌ی t.

۴.۱.۳. توابع هدف

$$\begin{aligned}\min Z_1 = &\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}\Bigg(\sum_{j=1}^{J} jc_{i,j,t}Q_{i,j,t} + \sum_{n=1}^{N} nc_{i,n,t}Q''_{i,n,t} \\ &+ \sum_{l=1}^{L} lc_{i,l,t}Q'_{i,l,t}\Bigg) + \sum_{t=1}^{T}\Bigg(\sum_{j=1}^{J}\sum_{n=1}^{N} c_{j,n,t}QT_{j,n,t} \\ &+ \sum_{l=1}^{L}\sum_{n=1}^{N} c'_{l,n,t}QT'_{l,n,t} + \sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} c''_{n,k,t}QT''_{n,k,t} \\ &+ \sum_{j_1=1}^{J}\sum_{j_2=1}^{J} cc_{j_1,j_2,t}Y^t_{j_1,j_2}\Bigg) \\ &+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K}\left(h_{k,t}I_{k,t} + b_{k,t}B_{k,t}\right) \qquad (1)\end{aligned}$$

$$\min Z_2 = \max_{k,t,g} \varphi_{k,t,g} \qquad (2)$$

تابع هدف ۱ بیان‌گر کمینه‌کردن هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین شامل هزینه‌های عملیاتی اهدای خون، هزینه‌ی انتقال واحدهای خون، هزینه‌ی جابه‌جایی تسهیلات موقت، هزینه‌ی کمبود در بیمارستان، و هزینه‌های نگه‌داری خون است. در تابع هدف ۲ بیشینه‌ی زمان انتظار مجروحان برای دریافت خون، کمینه می‌شود. تابع هدف دوم، بیان‌گر یک رابطه‌ی غیرخطی است. به‌منظور خطی‌کردن آن، متغیر φ جایگزین عبارت $\max\limits_{k,t,g} \varphi_{k,t,g}$ شده و از رابطه‌ی ۳ و ۴ استفاده می‌شود.

$$\varphi_{k,t,g} \le \varphi \qquad \forall k,g,t \qquad (3)$$

$$\min Z_2 = \max \varphi \qquad (4)$$

۵.۱.۳. محدودیت‌ها

$$\sum_{l=1}^{L} X_l = R \qquad (5)$$

$$\sum_{j_1=1}^{J} Y^t_{j_1,j_2} + \sum_{j_1=1 j_1\neq j_2}^{J} Y^t_{j_2,j_1} \le 1 \quad \forall j_2, t \ge 2 \tag{۶}$$

$$\sum_{j_2=1}^{J} Y^2_{j_1,j_2} \le Y^1_{0,j_1} \quad \forall j_1 \tag{۷}$$

$$\sum_{j_2=1}^{J} Y^t_{j_1,j_2} \le \sum_{j=1}^{J} Y^{t-1}_{j,j_1} \quad \forall j_1, t \ge 3 \tag{۸}$$

$$\sum_{j_1=1}^{J} Y^1_{0,j_1} = P \tag{۹}$$

$$\sum_{j_1=1}^{J}\sum_{j_2=1}^{J} Y^t_{j_1,j_2} = P \quad \forall t \ge 2 \tag{۱۰}$$

محدودیت ۵ بیان‌گر تعداد تسهیلات دائمی برای احداث است. در محدودیت ۶، j_2 به معنای مکانی است که تسهیل موقت در دوره‌ی t به آن مکان می‌رود. مکان j_2 دارای دو حالت است، یا تسهیلی در آن وجود ندارد یا از دوره‌ی قبل تسهیل موقتی در آن استقرار یافته است؛ در حالت اول بیشینه‌ی یک تسهیل می‌تواند در مکان j_2 استقرار یابد و در حالت دوم تسهیل استقرار یافته در این مکان حداکثر می‌تواند به یکی از نقاط کاندید دیگر برود. محدودیت‌های ۷ و ۸ تضمین می‌کنند که در صورتی تسهیل موقت از مکانی به مکان دیگر برود که در دوره‌ی قبل وارد مکان اول شده باشد. محدودیت‌های ۹ و ۱۰ تعداد تسهیلات موقت شبکه را مشخص می‌کنند (محدودیت ۹ در حالتی است که هنوز هیچ جابه‌جایی صورت نگرفته است).

$$W'_{i,l,t} \le X_l \quad \forall i, l, t \tag{۱۱}$$

$$W_{i,j,t} \le \sum_{j_1=1}^{J} Y^t_{j_1,j} \quad \forall i, j, t \tag{۱۲}$$

$$Z'_{l,n,t} \le X_l \quad \forall n, l, t \tag{۱۳}$$

$$Z_{j,n,t} \le \sum_{j_1=1}^{J} Y^t_{j_1,j} \quad \forall i, j, t \tag{۱۴}$$

محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲ بیان می‌کنند در صورتی اهداکننده‌ی i به یک تسهیل (موقت یا دائم) اختصاص می‌یابد، که آن تسهیل ایجاد شده باشد. محدودیت‌های ۱۳ و ۱۴ بیان می‌کنند در صورتی یک تسهیل (موقت یا دائم) به مرکز خون تخصیص می‌یابد که آن تسهیل ایجاد شده باشد.

$$QT_{j,n,l} \le Y^1_{0,j}.M \quad \forall n, j \tag{۱۵}$$

$$QT_{j,n,t} \le \sum_{j_1=1}^{J} Y^t_{j_1,j}.M \quad \forall j, n, t \ge 2 \tag{۱۶}$$

$$QT'_{l,n,t} \le X_l.M \quad \forall l, n, t \tag{۱۷}$$

محدودیت‌های ۱۵-۱۷، به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی امکان برقراری جریان بین تسهیلات موقت ـ مرکز خون و دائمی ـ مرکز خون هستند. در محدودیت ۱۵ اگر در ابتدای افق برنامه‌ریزی تسهیل موقتی مستقر بشود می‌تواند به مرکز خون ارسال داشته باشد. محدودیت ۱۶ تعمیم‌یافته‌ی محدودیت ۱۵ برای دوره‌های دوم به بعد است.

$$Q'_{i,l,t} \le W'_{i,l,t}.M \quad \forall i, l, t \tag{۱۸}$$

$$Q''_{i,n,t} \le W''_{i,n,t}.M \quad \forall i, n, t \tag{۱۹}$$

$$Q_{i,j,t} \le W_{i,j,t}.M \quad \forall i, j, t \tag{۲۰}$$

محدودیت‌های ۱۸-۲۰، به‌ترتیب بیان‌کننده‌ی شرط اهدای خون در تسهیل دائم، مرکز خون و تسهیل موقت هستند. به این معنی که در صورتی یک اهداکننده می‌تواند به یک تسهیل خون اهدا کند که به آن اختصاص یافته باشد.

$$QT_{j,n,t} \le Z_{j,n,t}.M \quad \forall j, n, t \tag{۲۱}$$

$$QT'_{l,n,t} \le Z'_{l,n,t}.M \quad \forall l, n, t \tag{۲۲}$$

$$QT''_{n,k,t} \le Z'_{n,k,t}.M \quad \forall k, n, t \tag{۲۳}$$

محدودیت‌های ۲۱-۲۳، تضمین می‌کنند تنها بین تسهیلاتی جریان وجود دارد که به یکدیگر تخصیص یافته‌اند. محدودیت ۲۱ مربوط به تسهیلات موقت و مراکز خون، محدودیت ۲۲ مربوط به تسهیلات دائمی و مراکز خون و محدودیت ۲۳ مربوط به بیمارستان‌ها و مراکز خون است.

$$\sum_{n=1}^{N} Z''_{k,n,t} \ge 1 \quad \forall k, t \tag{۲۴}$$

$$\sum_{j=1}^{J} Q_{i,j,t} + \sum_{l=1}^{L} Q'_{i,l,t} + \sum_{n=1}^{N} Q''_{i,n,t} \le \delta_{i,t} \quad \forall i, t \tag{۲۵}$$

محدودیت ۲۴ بیان می‌کند که در هر دوره، هر بیمارستان حداقل به یک مرکز خون تخصیص می‌یابد. محدودیت ۲۵ نشان‌دهنده‌ی بیشینه‌ی ظرفیت گروه اهداکننده‌ی i برای اهدای خون در دوره‌ی t است.

$$\sum_{n=1}^{N} QT_{j,n,t} \le \sum_{i=1}^{I} Q_{i,j,t} \quad \forall j, t \tag{۲۶}$$

$$\sum_{n=1}^{N} QT'_{l,n,t} \le \sum_{i=1}^{I} Q'_{i,l,t} \quad \forall l, t \tag{۲۷}$$

$$\sum_{k=1}^{K} QT''_{n,k,t} \le \sum_{i=1}^{I} Q''_{i,n,t} + \sum_{j=1}^{J} QT_{j,n,t} + \sum_{l=1}^{L} QT'_{l,n,t} \quad \forall n, t \tag{۲۸}$$

محدودیت‌های ۲۶-۲۸ محدودیت‌های تعادل جریان در شبکه هستند و به‌ترتیب مربوط به مرکز خون، تسهیلات دائم و موقت هستند (سمت راست محدودیت‌ها نشان‌دهنده‌ی مجموع جریان‌های ورودی و سمت چپ نشان‌دهنده‌ی مجموع جریان‌های خروجی از تسهیل است).

$$(1-\beta_n).[\sum_{i=1}^{I} Q''_{i,n,t} + \sum_{j=1}^{J} QT_{j,n,t} + \sum_{l=1}^{L} QT'_{l,n,t}] - \sum_{k=1}^{K} QT''_{n,k,t} + I'_{n,t-1} \le I'_{n,t} \quad \forall n, t \tag{۲۹}$$

$$\sum_{n=1}^{N} QT''_{n,k,t} + I_{k,t-1} - D_{k,t} = I_{k,t} - B_{k,t} \quad \forall k, t \tag{۳۰}$$

$$I'_{n,t} \le \sum_{i=1}^{I} Q''_{i,n,t} + \sum_{j=1}^{J} QT_{j,n,t} + \sum_{l=1}^{L} QT'_{l,n,t} \quad \forall n, t = 1 \tag{۳۱}$$

$$I_{k,t} \le \sum_{n=1}^{N} QT''_{n,k,t} \quad \forall k, t = 1 \tag{۳۲}$$

محدودیت ۲۹ بیان‌کننده‌ی سطح خون در مرکز خون n و در پایان دوره‌ی t است. سطح خون باقی‌مانده در انتهای دوره، برابر است با مجموع جریان‌های ورودی سالم

منهای جریان خروجی سالم به علاوه‌ی موجودی انتهای دوره‌ی قبل. محدودیت ۳۰ بیان‌کننده‌ی تعادل جریان در نقطه‌ی تقاضای k است. محدودیت‌های ۳۱ و ۳۲ بیان می‌کنند که در دوره‌ی اول در صورت عدم ورود جریان، موجودی پایان دوره صفر خواهد بود.

$$\sum_{i=1}^{I} Q_{i,j,t} \le \rho_j \qquad \forall j,t \tag{۳۳}$$

$$\sum_{i=1}^{I} Q_{i,l,t} \le \rho'_l \qquad \forall l,t \tag{۳۴}$$

$$I'_{n,t} \le \rho''_n \qquad \forall n,t \tag{۳۵}$$

$$I_{k,t} \le \rho'''_k \qquad \forall k,t \tag{۳۶}$$

محدودیت‌های ۳۳-۳۶ به‌ترتیب بیان‌کننده‌ی محدودیت ظرفیت تسهیلات موقت و دائم، مراکز خون و نقاط تقاضا در هر دوره هستند.

$$jd_{i,j}.W_{i,j,t} \le r \qquad \forall i,j,t \tag{۳۷}$$

$$ld_{i,l}.W'_{i,l,t} \le r' \qquad \forall i,l,t \tag{۳۸}$$

$$nd_{i,n}.W''_{i,n,t} \le r'' \qquad \forall i,n,t \tag{۳۹}$$

$$\sum_{j=1}^{J} W_{i,j,t} + \sum_{l=1}^{L} W'_{i,l,t} + \sum_{n=1}^{N} W''_{i,n,t} \ge 1 \qquad \forall i,t \tag{۴۰}$$

محدودیت‌های ۳۷-۳۹ محدودیت شعاع پوشش تسهیلات برای تخصیص اهداکنندگان هستند. محدودیت ۴۰ تضمین می‌کند که هر یک از اهداکنندگان به یکی از تسهیلات (موقت یا دائم) یا مراکز خون تخصیص می‌یابد.

برای محاسبه‌ی زمان انتظار مجروحان در بیمارستان، شامل زمان انتظار در صف و مدت زمان خدمت گرفتن، از قوانین لیتل استفاده شده است.[۲۸] طبق این قانون، محاسبه‌ی طول صف توسط رابطه‌ی ۴۱ امکان‌پذیر است. در این رابطه L_q نشان‌دهنده‌ی میانگین تعداد مشتریان در صف در دراز مدت، λ معرف آهنگ ورود مشتری و W_q میانگین مدت زمان انتظار یک مشتری در صف در دراز مدت است. مدت زمان انتظار مشتری در سیستم، طبق رابطه‌ی ۴۲ برابر است با مدت زمانی که در صف می‌گذراند، به اضافه‌ی مدت زمانی که مشغول دریافت خدمت است.

$$L_q = \lambda W_q \tag{۴۱}$$

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \tag{۴۲}$$

$$O_{k,t}[\frac{1}{\mu_k} + V_{g,k,t}.Wq^t_{k,f,g}] + (1-O_{k,t})\Bigg([\frac{1}{\mu_k} + V_{g,k,t}.Wq^t_{k,f,g} + \sum_n Z''_{k,n,t}(t_{k,n}.O'_{n,t} + (1-O'_{n,t})[(Oe_{n,t}(t_{k,n}+\frac{1}{\mu'_n}) + (1-Oe_{n,t})(t_{k,n}+\frac{1}{\mu'_n}+t'))]]\Bigg) \le \varphi_{k,t,g} \qquad \forall k,n,g,t \tag{۴۳}$$

محدودیت ۴۳ بیان‌کننده‌ی مدت زمان انتظار مجروح g در بیمارستان k و در دوره‌ی t است. قسمت اول محدودیت به این معناست که اگر بیمارستان واحد خون برای انتقال به بیماران داشته باشد، ($O_{k,t}=1$) مدت زمان انتظار فرد برابر با مجموع مدت زمان انتظار در صف و مدت زمان خدمت‌گرفتن خواهد بود (مشابه رابطه‌ی ۴۲). در این‌حالت قسمت دوم محدودیت توسط عبارت $(1-Q_{k,t})$ غیر فعال خواهد شد. در صورتی که $O_{k,t}=0$ باشد، به این معنا که بیمارستان واحد خون نداشته باشد، قسمت اول محدودیت حذف می‌شود و قسمت دوم فعال می‌شود. با توجه به قسمت دوم، در این حالت مدت زمان انتظار مجروح برابر با مجموع مدت زمان انتظار در صف بیمارستان، مدت زمان خدمت‌گرفتن و همچنین مدت زمان رسیدن واحدهای خون از مرکز خون تخصیص‌یافته به بیمارستان خواهد بود. برای محاسبه‌ی مدت زمان آماده‌سازی و رسیدن واحدهای خون از مرکز خون به بیمارستان عبارت زیر را که بخشی از محدودیت ۴۳ است، بررسی می‌کنیم:

$$t_{k,n}.O'_{n,t} + (1-O'_{n,t})[(Oe_{n,t}(t_{k,n}+\frac{1}{\mu'_n}) + (1-Oe_{n,t})(t_{k,n} + \frac{1}{\mu'_n} + t'))]$$

در قسمت اول این عبارت، اگر مرکز خون دارای خون آماده برای ارسال به بیمارستان باشد؛ $O_{n,t}=1$، مدت زمان انتظار مجروح، مجموع مدت زمان انتظار در بیمارستان و $t_{k,n}$ خواهد بود. در غیر این صورت دو حالت برقرار است: ۱. حالتی که مرکز خون، موجودی خون برای آماده‌سازی و آزمایش دارد؛ $Oe_{n,t}=1$، ۲. حالتی که مرکز خون موجودی ندارد و باید مدتی (t') برای رسیدن واحدهای خون منتظر باشد. بنابراین در حالت اول علاوه‌بر زمان‌های قبلی، زمان آماده‌سازی خون در مرکز خون هم اضافه می‌شود و در حالت دوم عبارت t'، زمان انتظار مجروح را طولانی‌تر خواهد کرد. مدت زمان t' بر اساس نظر کارشناس تعیین می‌شود. در واقع در شرایطی که مرکز خون با عدم موجودی مواجه شده باشد، بیشینه‌ی زمان رسیدن واحدهای خون به مرکز خون وابسته به عواملی از جمله تعداد و فاصله‌ی تسهیلات دائم و موقت اختصاص‌یافته به مرکز خون، تعداد و فاصله‌ی اهداکنندگانی که مستقیماً به مرکز خون اختصاص یافته‌اند و نیز زمان لازم برای دریافت خون از اهداکنندگان بستگی دارد. کارشناس مربوطه با درنظرگرفتن این موارد، عددی را به‌عنوان بیشینه‌ی زمان لازم برای ورود یک واحد خون به بخش آماده‌سازی مرکز خون برای ارسال به بیمارستان تعیین می‌کند.

$$B_{k,t} \le M.(1-O_{k,t}) \qquad \forall k,t \tag{۴۴}$$

$$\sum_{k=1}^{K} V_{g,k,t} = 1 \qquad \forall g,t \tag{۴۵}$$

$$\sum_{f,t,k} U^t_{gfk} = 1 \qquad \forall g \tag{۴۶}$$

$$U^t_{gfk} \le V_{g,k,t} \qquad \forall g,k, \quad \forall t,f \tag{۴۷}$$

محدودیت ۴۴ بیان‌گر رابطه‌ی بین کمبود در بیمارستان و موجودی خون است. محدودیت‌های ۴۵-۴۷ بیان‌کننده‌ی تخصیص هر مجروح به یک بیمارستان و یک خدمت‌دهنده در هر دوره هستند.

$$\frac{1}{\mu_k}\left(\sum_{g''=g'}^{g-1} U_{g'',f,k^t}\right) + U^t_{g',f,k}E_{g',t} - E_{g,t} \le Wq^t_{k,f,g}$$
$$\forall g \ge 2 \quad \forall g,f \quad \forall g-1 \ge g' \quad \forall t,k \tag{۴۸}$$

در محدودیت ۴۸ به‌منظور محاسبه‌ی زمان انتظار مجروح در صف ایجادشده در بیمارستان از استنتاج لیتل استفاده شده است. با توجه به رابطه‌ی ۴۱ قسمت اول

محدودیت ۴۸، بیان‌گر تعداد افراد در صف، قسمت دوم بیان‌گر زمان ورود نفر اول صف، و قسمت سوم نشان‌دهنده‌ی زمان ورود فردی است که W_q به ازای آن محاسبه می‌شود.

$$X_l, Y^t_{j_1,j_2}, W_{i,j,t}, W'_{i,l,t}, W''_{i,n,t}, Z_{j,n,t}, Z'_{l,n,t}, Z''_{n,k,t}, V_{g,k,t}, O_{k,t}, O_{n,t}, Oe_{n,t}, U^t_{g,f,k} \in \{0, 1\} \quad (49)$$

$$Q_{i,j,t}, Q'_{i,l,t}, Q''_{i,n,t}, QT_{j,n,t}, QT'_{l,n,t}, QT''_{n,k,t}, B_{k,t}, I_{k,t}, I'_{n,t}, Wq^t_{k,f,g}, \varphi_{k,t,g} \geq 0 \quad (50)$$

محدودیت‌های ۴۹ و ۵۰ بیان‌کننده‌ی نوع متغیرهای به‌کار رفته در مدل هستند.

۴. مثال عددی

در این بخش، ابتدا به توضیح روش حل مورد استفاده پرداخته شده است. سپس با ارائه‌ی یک مثال عددی کارایی مدل پیشنهادی بررسی شده و پس از آن نتایج حاصل از تحلیل حساسیت بر روی تعدادی از پارامترهای مدل ارائه شده است.

۱.۴. روش حل

مسائل بهینه‌سازی چندهدفه مسائلی هستند که در آن‌ها بیشینه و یا کمینه کردن دو یا چند هدف دارای ضرورت است. این اهداف معمولاً در تعارض با یکدیگر هستند و هدف از حل این مسائل دست‌یابی به جواب‌های پارتویی و انتخاب یکی از این جواب‌ها توسط تصمیم‌گیرنده است.[۲۹] در این مقاله از روش وزنی به‌منظور حل مدل دوهدفه استفاده شده است. در این روش به هر یک از اهداف نرمال‌شده یک ضریب وزنی تخصیص پیدا کرده و به این ترتیب مدل چندهدفه به یک مدل تک‌هدفه تبدیل شده است. تابع هدف مسئله‌ی جدید به‌صورت رابطه‌ی ۵۱ خواهد شد:

$$F = w_1 \frac{f_1}{f_1^*} + w_2 \frac{f_2}{f_2^*} + ... + w_k \frac{f_k}{f_k^*} \quad (51)$$

در این رابطه، k بیان‌گر تعداد اهداف، w_k ضرایب وزنی اهداف و $\frac{f_k}{f_k^*}$ مقدار نرمال‌شده‌ی هدف f_k است.[۳۰] مقدار ضرایب وزنی بنا به نظر کارشناسان و باتوجه به اهمیت نسبی اهداف تعیین می‌شود.

۲.۴. شرح مثال

شبکه‌یی شامل شش گره کاندید، برای قرارگیری تسهیلات موقت و سه گره کاندید برای احداث تسهیلات دائمی خون مفروض است. مکان استقرار اهداکنندگان مشخص است و شامل شش بخش می‌باشد. در قسمت میانی شبکه، یک مرکز خون قرار دارد که علاوه‌بر آزمایش و آماده‌سازی خون سبب برقراری ارتباط بین دو بخش اهداکنندگان و مجروحان می‌شود. قسمت دیگر شبکه شامل سه بیمارستان است که در واقع نقاط تقاضا و دریافت‌کننده‌ی نهایی واحدهای خون هستند. پس از وقوع بحران و در فاصله‌ی کوتاهی، آسیب‌دیدگان به بیمارستان‌ها منتقل می‌شوند که در این بین تعدادی از افراد نیازمند دریافت خون هستند. در مثال ارائه‌شده، ۱۵ نفر از افراد مجروح نیازمند دریافت خون هستند. همچنین بخش اورژانس هر بیمارستان دارای دو نیروی مسئول برای ارائه‌ی خدمت و انتقال خون است. با توجه به شرایط بحران و چنددوره‌یی بودن مدل ارائه شده در این مثال دو دوره‌ی زمانی ۶ ساعته پس از وقوع بحران مفروض است. در مثال ارائه‌شده سه تسهیل موقت و دو تسهیل دائمی مکان‌یابی می‌شوند. در ادامه، مقادیر پارامترهای ورودی مسئله با استفاده از اطلاعات موجود در پژوهش‌های پیشین و همچنین نظرات خبرگان تخمین زده شده است. جدول ۱ نشان‌دهنده‌ی پارامترهای هزینه‌یی (هزینه‌های عملیاتی اهدای خون، هزینه‌ی انتقال واحدهای خون و هزینه‌ی جابه‌جایی تسهیلات موقت) است که برای هر یک توزیع یکنواخت در بازه‌های از پیش‌تعیین‌شده برآورد شده است. این مقادیر بر اساس اطلاعاتی مانند هزینه‌ی تجهیزات لازم برای دریافت خون و فاصله‌ی تسهیلات از یکدیگر تخمین زده شده است. جدول ۲ بیان‌گر ظرفیت تسهیلات مختلف است. مقادیر گزارش‌شده به‌صورت توزیع یکنواخت و با توجه به اطلاعات موجود در پیشینه[۱۸] ذکر شده‌اند. جدول ۳ نیز شامل اطلاعات مربوط به میزان تقاضای بیمارستان‌ها برای واحدهای خونی در دوره‌های مختلف است.

۳.۴. نتایج و یافته‌ها

مثال ارائه‌شده در قسمت قبل با استفاده از نرم‌افزار GAMS ۲۴/۱ و حل‌کننده‌ی BARON بر روی رایانه‌یی با مشخصات Core i۷ CPU and ۴GB RAM اجرا شده است. به‌منظور انجام تعدادی از تحلیل حساسیت‌ها با توجه به لزوم افزایش ابعاد مدل از سرور بهینه‌سازی NEOS استفاده شده است.[۳۱] در این مسئله با توجه به اهمیت زمان، ضریب تابع هدف زمان ۰/۷ و ضریب تابع هدف هزینه ۰/۳ در نظر گرفته شده است. طبق نتایج حاصل، از بین مکان‌های کاندید برای احداث تسهیلات دائمی، مکان‌های ۱ و ۳ انتخاب شده‌اند ($x_1 = 1, x_3 = 1$).

جدول ۱. برآورد پارامترهای هزینه‌یی.

مقدار	هزینه
$U \sim (1, 4)$	هزینه‌ی اهدای خون در تسهیل موقت
$U \sim (5, 10)$	هزینه‌ی اهدای خون در مرکز خون
$U \sim (3, 7)$	هزینه‌ی اهدای خون در تسهیل دائمی
$U \sim (0/5, 2)$	هزینه‌ی انتقال خون از تسهیل موقت به مرکز خون
$U \sim (1, 3)$	هزینه‌ی انتقال خون از تسهیل دائمی به مرکز خون
$U \sim (5, 10)$	هزینه‌ی انتقال خون از مرکز خون به بیمارستان
$U \sim (2/5, 4)$	هزینه‌ی جابه‌جایی تسهیل موقت

جدول ۲. ظرفیت تسهیلات.

ظرفیت	تسهیلات
$U \sim (30, 40)$	تسهیل موقت
$U \sim (100, 150)$	تسهیل دائمی
$U \sim (500, 700)$	مرکز خون
$U \sim (100, 150)$	بیمارستان

جدول ۳. میزان تقاضا.

بیمارستان	$t = 1$	$t = 2$
۱	$U \sim (50, 70)$	$U \sim (70, 90)$
۲	$U \sim (60, 90)$	$U \sim (90, 110)$
۳	$U \sim (80, 100)$	$U \sim (100, 130)$

این مکان‌ها تا پایان افق برنامه‌ریزی بدون تغییر باقی می‌مانند. تسهیلات موقت در دوره‌ی اول در مکان‌های ۲، ۴ و ۵ قرارگرفته‌اند و در دوره‌ی بعد به‌صورت جدول ۴ جابه‌جا می‌شوند.

در هر دوره، اهداکنندگان برای اهدای خون و برآوردن تقاضای موجود در شبکه حداقل به یکی از تسهیلات خون اختصاص می‌یابند.

نحوه‌ی تخصیص هرگروه از اهداکنندگان در هر دوره به‌صورت جدول ۵ است. پس از تخصیص اهداکنندگان به تسهیلات اهدای خون صورت می‌گیرد و واحدهای خون پس از آزمایش در مرکز خون به بیمارستان منتقل می‌شوند. نحوه‌ی تخصیص مجروحان به بیمارستان‌ها و همچنین خدمت‌دهنده‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است. از بین ۱۵ مجروحی که به بیمارستان‌ها منتقل شده‌اند، ۱۰ مجروح مربوط به دوره‌ی اول و ۵ مجروح متعلق به دوره‌ی دوم هستند. با توجه به تخصیص‌های صورت‌گرفته مدت‌زمان انتظار هر مجروح در صف کمینه شده و طبق نتایج به‌دست آمده بیشینه‌ی زمان انتظار مجروحان در بیمارستان برابر با ۰٫۸ ساعت و همچنین مجموع هزینه‌ها برابر با ۵۱۸۸٫۶۸۷ واحد پولی است.

۴.۴. تحلیل حساسیت

در ادامه، دو تحلیل حساسیت بر روی هزینه‌ی کمبود خون و مدت زمان خدمت در بیمارستان انجام شده است. همچنین به‌منظور بررسی میزان بهبود حاصل در زمان انتظار مجروحان، با استفاده از مدل‌سازی سیستم صف، تحلیلی انجام شده و نتایج آن گزارش شده است. در انتها نیز با تغییر ضرایب وزنی دو تابع هدف، موازنه‌ی اهداف مورد بررسی قرار گرفته است.

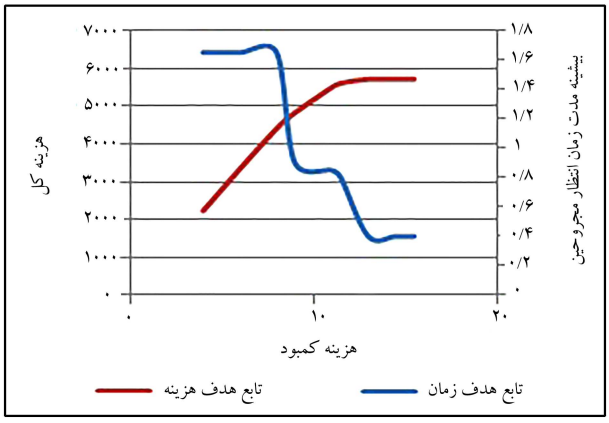
همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش هزینه‌ی کمبود خون در بیمارستان، میزان کمبود کاهش و در نتیجه به دلیل افزایش موجودی بیمارستان، زمان انتظار مجروحان کاهش می‌یابد.

در مقابل به‌دلیل بالارفتن هزینه‌ی کمبود و بیشترشدن هزینه‌های تأمین خون، مجموع هزینه‌ها افزایش خواهد داشت. بیشینه‌ی زمان انتظار مجروحان ۱٫۶۵ ساعت و درکمترین حالت برابر با ۰٫۴ ساعت است. در واقع زمانی که با افزایش هزینه‌ی کمبود، مقدار کمبود خون در بیمارستان به صفر می‌رسد، افزایش بیشتر این هزینه تأثیری درکاهش زمان انتظار و مجموع هزینه‌ها نخواهد داشت.

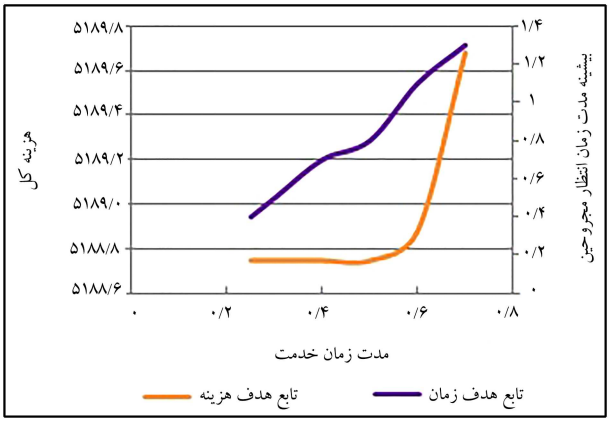
شکل ۳ بیان‌گر تأثیر مدت زمان خدمت بر بیشینه‌ی زمان انتظار مجروحان و مجموع هزینه‌هاست. همان‌طورکه مشاهده می‌شود با افزایش زمان خدمت، بیشینه‌ی زمان انتظار مجروحان افزایش داشته است اما مجموع هزینه‌های مطرح‌شده، تغییر

جدول ۴. جابه‌جایی تسهیلات موقت در دوره‌های مختلف.

$t=1$	$t=2$
$y_{2,2}=1$	$y_{2,2}=1$
$y_{4,4}=1$	$y_{4,3}=1$
$y_{5,5}=1$	$y_{5,5}=1$



شکل ۲. تأثیر هزینه‌ی کمبود بر تابع هدف زمان و هزینه.



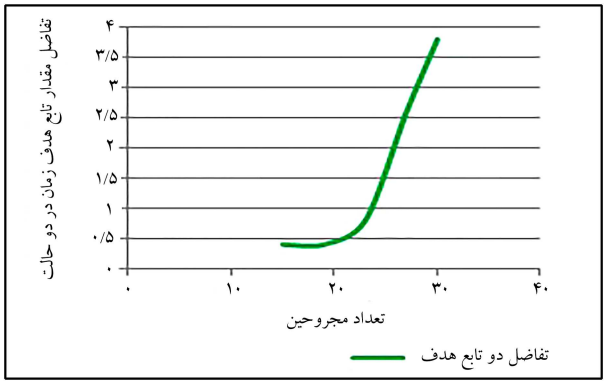
شکل ۳. تأثیر مدت زمان خدمت بر تابع هدف زمان و هزینه.

جدول ۵. نحوه‌ی تخصیص اهداکنندگان به تسهیلات.

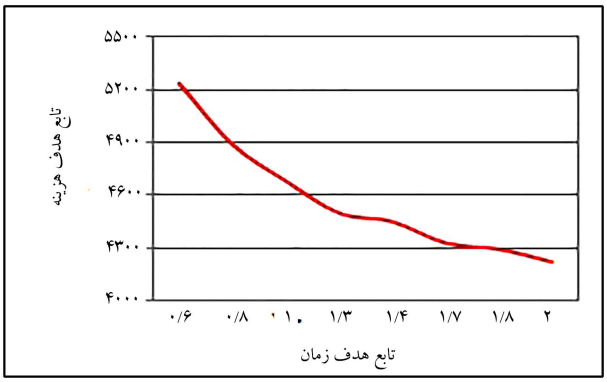
اهداکنندگان	$t=1$	$t=2$
$i=1$	$w_{1,2,1}=1, W'_{1,1,1}=1$	$w_{1,2,2}=1, W'_{1,1,2}=1$
$i=2$	$w_{2,5,1}=1, W'_{2,3,1}=1$	$w_{2,5,2}=1, W'_{2,3,2}=1$
$i=3$	$w_{3,4,1}=1, W'_{3,3,1}=1, w''_{3,3,1}=1$	$w_{3,3,2}=1, W'_{3,3,2}=1, w''_{3,1,2}=1$

جدول ۶. نحوه‌ی تخصیص مجروحان به بیمارستان‌ها و خدمت‌دهنده‌ها.

مجروحان	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
$t=1$	$k=3$ $f=1$	$k=3$ $f=2$	$k=3$ $f=1$	$k=3$ $f=2$	$k=3$ $f=2$	$k=3$ $f=2$	$k=3$ $f=1$	$k=3$ $f=1$	$k=3$ $f=1$	$k=3$ $f=1$					
$t=2$											$k=1$ $f=1$	$k=1$ $f=2$	$k=1$ $f=1$	$k=1$ $f=1$	$k=1$ $f=2$



شکل ۴. تفاضل بیشینه‌ی زمان انتظار مجروحان در دو حالت.



شکل ۵. موازنه‌ی اهداف.

محسوسی ندارند؛ بنابراین می‌توان با کاهش این زمان از طریق افزایش ظرفیت، نصب تجهیزات و به‌کارگیری نیروی انسانی بیشتر در زمان بحران، سبب کاهش اتلاف وقت مجروحان و بهبود خدمت‌رسانی به آن‌ها شد. برای بررسی میزان بهبود ایجاد شده در مدت زمان انتظار مجروحان، با استفاده از مدل‌سازی سیستم صف، مثال عددی قسمت قبل، بدون استفاده از نظریه‌ی صف (با حذف Wq و محدودیت ۴۹) حل شده و بر اساس تخصیص‌های داده‌شده مدت زمان انتظار مجروحان محاسبه شده است. طبق نتایج به‌دست آمده در حالت دوم (مدل‌سازی با درنظر داشتن صف) تمام مجروحان دوره‌ی اول به بیمارستان سه و خدمت‌دهنده‌ی یک و تمام مجروحان دوره‌ی دوم به بیمارستان یک و خدمت‌دهنده‌ی یک تخصیص یافته‌اند. تفاوت بیشینه‌ی زمان انتظار مجروحان در دو حالت (مدل‌سازی براساس نظریه‌ی صف و مدل‌سازی بدون درنظرداشتن صف) برابر با ۰/۴ ساعت است. به این معنی که با به‌کارگیری نظریه‌ی صف و تغییر نحوه‌ی تخصیص مجروحان به بیمارستان‌ها و خدمت‌دهنده‌ها، بیشینه‌ی زمان انتظار مجروحان، ۲۴ دقیقه کاهش یافته است. این میزان کاهش در شرایط بحران و با توجه به اهمیت زمان در انجام خدمات درمانی برای افراد آسیب‌دیده مطلوب است. به‌منظور بررسی بیشتر این مسئله، تفاضل تابع هدف زمان در دو حالت، به‌ازای تعداد مجروحان متفاوت محاسبه شده و در شکل ۴ نمایش داده شده است.

همان‌طور که مشخص است با افزایش تعداد مجروحان، بهبود ایجادشده قابل توجه بوده است به‌طوری‌که با افزایش تعداد مجروحان به بیش از سی نفر، تفاوت بیشینه‌ی زمان انتظار در دو حالت به بیش از سه ساعت خواهد رسید. علت این تفاوت مقدار، تخصیص نامناسب مجروحان به بیمارستان‌ها و خدمت‌دهنده‌ها در مدلی است که از نظریه‌ی صف در مدل‌سازی بهره گرفته نمی‌شود و تخصیص‌های لازم بدون توجه به ظرفیت سیستم صورت می‌گیرد. بنابراین تحلیل انجام‌شده بیانگر لزوم استفاده از نظریه‌ی صف در مدل پیشنهادی است.

در ادامه، با تغییر ضرایب وزنی دو تابع هدف، جواب‌های پارتو به‌دست‌آمده و در شکل ۵ گزارش شده‌اند. همان‌طور که مشخص است با کاهش بیشینه‌ی زمان انتظار مجروحان، تابع هدف هزینه افزایش خواهد داشت. به علاوه، افزایش تابع هدف هزینه در مقدارهای پایین تابع هدف زمان، با شیب بیشتری صورت می‌گیرد. به‌عبارت دیگر هزینه‌ی کاهش بیشینه‌ی زمان انتظار مجروحان به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله به موضوع طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین خون که بخش مهمی از نظام سلامت را تشکیل می‌دهد، پرداخته شده است. به این منظور، با بررسی سطوح مختلف این زنجیره‌ی تأمین در شرایط بحران، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی عدد صحیح مختلط، با قابلیت مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات ارائه شده است. با توجه به اهمیت موضوع زمان در امدادرسانی پس از وقوع بحران، در این مدل در کنار کاهش هزینه‌ها، کاهش بیشینه‌ی زمان انتظار مجروحان برای دریافت خون مورد توجه قرارگرفته و از نظریه‌ی صف برای محاسبه‌ی دقیق زمان انتظار مجروحان استفاده شده است. به علاوه، یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین پنج‌سطحی خون، شامل اهداکنندگان، تسهیلات دائم و موقت خون، مرکز خون، بیمارستان‌ها و مجروحان در نظرگرفته شده است. برای افزایش کارایی مدل ارائه‌شده تسهیلات دارای ظرفیت درنظرگرفته شده‌اند و تسهیلات جمع‌آوری خون دارای شعاع پوشش برای تخصیص اهداکنندگان هستند. تغییرات سریع شرایط و نوسانات تقاضا به‌خصوص در ساعات اولیه پس از وقوع بحران، سبب ارائه‌ی یک مدل چنددوره‌یی شده است، که دوره‌های آن بازه‌های زمانی کوتاه پس از وقوع بحران است. در آخر با ارائه‌ی یک مثال عددی کاربردی و انجام تحلیل حساسیت کارایی مدل پیشنهادی بررسی شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده با بهره‌گیری از مدل‌سازی سیستم صف بیشینه‌ی زمان انتظار مجروحان کاهش داشته و این بهبود با افزایش تعداد مجروحان، قابل توجه است. هزینه‌ی کمبود خون در بیمارستان و مدت زمان ارائه‌ی خدمت از عوامل مؤثر در زمان انتظار مجروحان هستند که با توجه به هزینه‌های عملیاتی، می‌توان با تغییر آن‌ها سبب بهبود در خدمت‌رسانی به مجروحان شد.

برای انجام تحقیقات آتی در این زمینه، می‌توان عدم قطعیت پارامترهایی از جمله زمان، تقاضا، و هزینه را وارد مدل‌سازی کرد که سبب افزایش کارایی و همچنین افزایش پیچیدگی مدل خواهد شد. توجه به انواع گروه‌های خونی و محصولات خون و همچنین استفاده از روش‌های ابتکاری و فرا‌ابتکاری برای حل مسئله در ابعاد بزرگ از جمله پیشنهادها برای انجام تحقیقات آتی است.

منابع (References)

1. Fereiduni, M. and Shahanaghi, K. "A robust optimization model for blood supply chain in emergency situations", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, **7**, pp. 535-554 (2016).
2. Zahiri, B., Torabi, S., Mousazadeh, M. and Mansouri, S.

"Blood collection management: Methodology and application", *Applied Mathematical Modelling*, **39**, pp. 7680-7696 (2015).

3. Kohneh, J.N., Teymoury, E. and Pishvaee, M.S. "Blood products supply chain design considering disaster circumstances (Case study: Earthquake disaster in Tehran)", *Journal of Industrial and Systems Engineering*, **9**, pp. 51-72 (2016).
4. Osorio, A.F., Brailsford, S.C. and Smith, H.K. "A structured review of quantitative models in the blood supply chain: A taxonomic framework for decision-making", *International Journal of Production Research*, **53**, pp. 7191-7212 (2015).
5. Fahimnia, B., Jabbarzadeh, A., Ghavamifar, A. and Bell, M. "Supply chain design for efficient and effective blood supply in disasters", *International Journal of Production Economics, Part C*, **183**, pp. 700-709 (2017).
6. Arvan, M., Tavakkoli-Moghaddam, R. and Abdollahi, M. "Designing a bi-objective and multi-product supply chain network for the supply of blood", *Uncertain Supply Chain Management*, **3**, pp. 57-68 (2015).
7. Arabani, A.B. and Farahani, R.Z. "Facility location dynamics: An overview of classifications and applications", *Computers & Industrial Engineering*, **62**, pp. 408-420 (2012).
8. Dillon, M., Oliveira, F. and Abbasi, B. "A two-stage stochastic programming model for inventory management in the blood supply chain", *International Journal of Production Economics*, **187**, pp. 27-41 (2017).
9. Beliën, J. and Forcé, H. "Supply chain management of blood products: A literature review", *European Journal of Operational Research*, **217**, pp. 1-16 (2012).
10. Brodheim, E., Derman, C. and Prastacos, G. "On the evaluation of a class of inventory policies for perishable products such as blood", *Management Science,* **21**(11), pp. 1320-1325 (1975).
11. Kopach, R., Balcıoğlu, B. and Carter, M. "Tutorial on constructing a red blood cell inventory management system with two demand rates", *European Journal of Operational Research*, **185**, pp. 1051-1059 (2008).
12. Cetin, E. and Sarul, L.S. "A blood bank location model: A multiobjective approach", *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, **2**, pp. 112-124 (2009).
13. Delen, D., Erraguntla, M., Mayer, R.J. and Wu, C.-N. "Better management of blood supply-chain with GIS-based analytics", *Annals of Operations Research,* **185**, pp. 181-193 (2011).
14. Sha, Y. and Huang, J. "The multi-period location-allocation problem of engineering emergency blood supply systems", *Systems Engineering Procedia*, **5**, pp. 21-28 (2012).
15. Nagurney, A. and Masoumi, A.H. "Supply chain network design of a sustainable blood banking system", in *Sustainable Supply Chains*, ed: Springer, pp. 49-72 (2012).
16. Li, Y.-C. and Liao, H.-C. "The optimal parameter design for a blood supply chain system by the Taguchi method", *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, **8**, pp. 7697-7712 (2012).
17. Duan, Q. and Liao, T.W. "Optimization of blood supply chain with shortened shelf lives and ABO compatibility", *International Journal of Production Economics*, **153**, pp. 113-129 (2014).
18. Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B. and Seuring, S. "Dynamic supply chain network design for the supply of blood in disasters: A robust model with real world application", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **70**, pp. 225-244 (2014).
19. Zahiri, B., Mousazadeh, M. and Bozorgi-Amiri, A. "A robust stochastic programming approach for blood collection and distribution network design", *International Journal of Research in Industrial Engineering*, **3**(2), p. 1-11 (2014).
20. Gunpinar, S. and Centeno, G. "Stochastic integer programming models for reducing wastages and shortages of blood products at hospitals", *Computers & Operations Research,* **54**, pp. 129-141 (2015).
21. Chaiwuttisak, P., Smith, H., Wu, Y., Potts, C., Sakuldamrongpanich T. and Pathomsiri, S. "Location of low-cost blood collection and distribution centres in Thailand", *Operations Research for Health Care*, **9**, pp. 7-15 (2016).
22. Osorio, A.F., Brailsford, S.C., Smith, H.K., Forero-Matiz, S.P. and Camacho-Rodríguez, B.A. "Simulation-optimization model for production planning in the blood supply chain", *Health Care Management Science*, **20**(4), pp. 548-564 (2017).
23. Ramezanian, R. and 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**, pp. 69-82 (2017).
24. Salehi, F., Mahootchi, M. and Husseini, 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*, pp. 1-25 (2017).
25. Zahiri, B. and Pishvaee, M.S. "Blood supply chain network design considering blood group compatibility under uncertainty", *International Journal of Production Research*, **55**(7), pp. 2013-2033 (2017).
26. Ensafian, H. and Yaghoubi, S. "Robust optimization model for integrated procurement, production and distribution in platelet supply chain", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **103**, pp. 32-55 (2017).
27. Ensafian, H., Yaghoubi, S. and Yazdi, M.M. "Raising quality and safety of platelet transfusion services in a patient-based integrated supply chain under uncertainty", *Computers & Chemical Engineering*, **106**, pp. 355-372 (2017).

28. Gross, D., Shortle, J.F., Thompson, J.M. and Harris, C.M., *Fundamentals of Queueing Theory*, 4th Edition, Wiley, 528 p. (Sep. 2011).

29. Pillai, A.S., Singh, K., Saravanan, V., Anpalagan, A., Woungang, I. and Barolli, L. "A genetic algorithm-based method for optimizing the energy consumption and performance of multiprocessor systems", *Soft Computing*, **22**(10), pp. 3271-3285 (2018).

30. Marler, R.T. and Arora, J.S. "Survey of multi-objective optimization methods for engineering", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **26**(6), pp. 369-395 (2004).

31. Czyzyk, J., Mesnier, M.P. and Moré, J.J. "The NEOS server", *IEEE Computational Science and Engineering*, **5**(3), pp. 68-75 (1998).