

ارائه یک مدل بهینه‌سازی استوار دوهدفه برای طراحی شبکه تأمین خون اضطراری تحت عدم قطعیت

سهیل منصوری^۱، علی بزرگی امیری^{۲*}، فاطمه بیاتلو^۳

- ۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۲- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

پذیرش: ۱۳۹۶/۶/۲۱

دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۹

چکیده

وقوع بحران‌های طبیعی و غیرطبیعی از امور اجتناب‌ناپذیری است که سالیانه تلفات جانی و مالی هنگفتی را در زندگی بشر به دنبال دارد. در زمان بحران، تقاضا برای اقلام ضروری از قبیل دارو و اقلام بهداشتی افزایش قابل توجهی داشته و پاسخ به این تقاضا به منظور حفظ سلامتی افراد از اهمیت بالایی برخوردار است. بر این اساس، یک مدل دوهدفه مکان‌یابی-تخصیص برای عرضه خون تحت عدم قطعیت در این مقاله ارائه شده است. اهداف مدل دربرگیرنده کمینه‌کردن میزان کمبود خون در مراکز خون و نیز کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های عملیاتی شامل هزینه‌های جابه‌جایی تسهیلات موقت و هزینه جمع‌آوری و انتقال خون در دوره‌های زمانی پس از وقوع بحران است. با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی در مورد ویژگی‌های بحران و به منظور برنامه‌ریزی دقیق‌تر، میزان تقاضا، حجم خون اهدایی، هزینه‌های ارسال خون و جابه‌جایی تسهیلات به صورت مولفه‌های غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند. برای مدل‌سازی عدم قطعیت، از روش بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه عدم قطعیت جعبه‌ای بهره گرفته شده است و برای حل مدل دوهدفه از روش جامع وزنی چبیشف استفاده شده است. در نهایت با اجرای مثال عددی، همتای استوار مدل پیشنهادی با مدل قطعی مقایسه شده و نتایج حاصل از تحلیل حساسیت‌های مختلف ارائه شده است.

واژگان کلیدی: شبکه تأمین خون؛ مکان‌یابی-تخصیص؛ بهینه‌سازی استوار؛ برنامه‌ریزی چندهدفه.

۱- مقدمه

هرساله در اثر وقوع بلایای طبیعی و غیرطبیعی همچون زلزله، حمله‌های تروریستی، سیل و سونامی، خسارت‌های مالی و جانی فراوانی گریبان‌گیر کشورهای متعددی می‌شود (به‌عنوان مثال: زلزله ۲۰۰۳ ایران، سونامی ژاپن ۲۰۱۱، زلزله هایتی ۲۰۱۰، زلزله ایتالیا و حمله تروریستی در فرانسه ۲۰۱۶) [۱]. افزایش سطح خدمت و تأمین تقاضای اقلام ضروری همواره از اهداف مهم در زمان وقوع بحران است. لازمه‌ی بهبود خدمت‌رسانی، برنامه‌ریزی صحیح برای جمع‌آوری، ذخیره و توزیع این اقلام است [۲]. این موضوع توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است و هدف آن‌ها از برنامه‌ریزی این است که بتوانند در زمان وقوع بحران با بهترین عملکرد در تأمین و توزیع کالاهای ضروری، از تلفات پس از وقوع بحران جلوگیری نمایند. در زمان وقوع حوادث، به دلیل آسیب‌های ایجادشده در افراد، خون یکی از مهم‌ترین کالاهای درخواستی برای حفظ حیات مصدومان است که برنامه‌ریزی نادرست در تأمین آن می‌تواند فاجعه‌های جبران‌ناپذیری بعد از وقوع بحران به دنبال داشته باشد؛ به عنوان مثال، مشکلات تأمین و توزیع در زلزله ۲۰۰۸ ون‌چوان چین نشانگر این برنامه‌ریزی نادرست است [۳].

یکی از اساسی‌ترین مشکلات در برنامه‌ریزی‌های پیش از وقوع بحران، عدم وجود اطلاعات کافی در مورد شدت حادثه و میزان خسارت وارده است [۴]. عدم قطعیت و نداشتن اطلاعات کافی و درست، تصمیمات برای پشتیبانی و فعالیت‌های آماده‌سازی برای مدیریت بحران را با مشکل جدی روبه‌رو ساخته است [۵]؛ بنابراین، وجود چنین موانعی موجب اختلال در برنامه‌ریزی درست و کارا توسط تصمیم‌گیران آماد امداد شده است. در این شرایط، بهینه‌سازی استوار به عنوان یک ابزار مناسب برای مدل‌سازی عدم قطعیت داده‌های ورودی، به خوبی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. در رویکرد بهینه‌سازی استوار، مولفه‌های غیرقطعی، به صورت گسسته یا در یک بازه پیوسته بدون تعریف تابع توزیع احتمالی، تعریف می‌شوند. هدف این روش، دستیابی به جوابی است که کمترین حساسیت را نسبت به تغییر مولفه‌ها داشته باشد [۶].

در ادامه، بخش‌های مختلف مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش دوم، به مرور مقالات مربوط به حوزه زنجیره تأمین خون و مسائل مکان‌یابی-

تخصیص در حوزه بحران پرداخته می‌شود. بخش سوم شامل مفروضات مسئله و مدل ریاضی پیشنهادی است. همتای استوار مدل پیشنهادی و روش حل به ترتیب در بخش‌های چهارم و پنجم آمده‌اند. در بخش ششم نیز به منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی یک مثال عددی ارائه شده و در نهایت، پیشنهادهای آتی برای بهبود مقاله در بخش هفتم شرح داده شده است.

۲- پیشینه تحقیق

تصمیم‌گیری در مورد مکان احداث تسهیلات و همچنین نحوه تخصیص آن‌ها در زمان وقوع بحران، اهمیت بالایی دارد. آراز و همکاران یک مدل چندهدفه فازی برای مسئله مکان‌یابی تسهیلات اضطراری ارائه داده و آن را با روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی حل نموده‌اند [۷]. آباناسر و همکاران یک مسئله‌ی چندهدفه مکان‌یابی-حمل‌ونقل در شرایط بحران با سه هدف زمان حمل‌ونقل، تعداد مراکز توزیع و میزان تقاضاهای برآورده نشده، ارائه داده‌اند [۸]. نجفی و همکاران مدلی چندهدفه، چند کالایی و چند دوره‌ای احتمالی برای مدیریت آماد کالا و مصدومان در زلزله توسعه داده‌اند. همچنین یک مدل استوار را توسعه داده و برای اطمینان از اجرای درست برنامه‌ریزی توزیع، آن را تحت موقعیت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار داده‌اند [۸]. عظیمی و همکاران یک مسئله مکان‌یابی ماهواره‌ای مراکز توزیع برای تأمین کمک‌های انسان دوستانه به افراد آسیب‌دیده در منطقه حادثه‌دیده توسعه داده‌اند [۹]. بزرگی و همکاران یک مدل چندهدفه استوار در آماد بشردوستانه ارائه نمودند. در این مدل، علاوه بر میزان تقاضا، تأمین اقلام امدادی و هزینه‌های تدارک و حمل‌ونقل غیرقطعی بوده و مسئله با در نظر داشتن سناریوهای مربوط به بحران مدل‌سازی شده است [۱۰].

اهمیت بحران و مدیریت تأمین و عرضه‌ی خون پس از وقوع بحران، محققان زیادی را بر آن داشت تا با بررسی شرایط، مقالاتی را در این حوزه منتشر کنند. بلین و فورس مقاله‌ای مروری در حوزه مدیریت موجودی و زنجیره تأمین محصولات خون ارائه نمودند. آن‌ها مقالات این حوزه را بر اساس ویژگی‌های مختلف از جمله نوع مدل‌سازی، روش حل و اجرای مدل دسته‌بندی نموده‌اند [۱۱]. ستین و سارول یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه نمودند که ترکیبی از مدل مجموعه پوشش در مکان‌یابی گسسته و مدل

مرکز ثقل از مدل‌های مکان‌یابی پیوسته است و برای مکان‌یابی انبار خون بین بیمارستان‌ها به کار رفته است [۱۲]. ساهین و همکاران سیستم مدیریت خون را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها یک مدل ریاضی سلسله مراتبی دوسطحی برای مسئله مکان‌یابی-تخصیص با غیرقطعی در نظر گرفتن تقاضا توسعه داده‌اند که سطح اول آن شامل مراکز منطقه‌ای خون و سطح دوم نیز شامل ایستگاه‌های دریافت، عرضه خون و همچنین واحدهای سیار است [۱۳]. یان و همکاران و سونگ و همکاران به مسئله تأمین خون در مواقع بحران پرداخته و این سیستم را از نظر کمبود موجودی و سلامت خون مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۴:۱۵]. سئو و چن مدیریت موجودی را در زمان‌بندی سیستم تأمین خون در زلزله ون‌چوان سال ۲۰۰۸ چین مدل‌سازی کرده‌اند [۱۶]. ناگورنی و معصومی مدلی چندهدفه برای طراحی/بازطراحی شبکه تأمین و عرضه خون با هدف کمینه‌کردن ریسک عرضه، کمبود خون و ریسک جانبی توسعه دادند [۱۷]. جبارزاده و همکاران یک مدل استوار پویا جهت طراحی شبکه تأمین خون در شرایط بحران توسعه داده و به تصمیم‌گیری درباره‌ی مکان و نحوه‌ی تخصیص تسهیلات خون در این شبکه پرداخته‌اند. آن‌ها با در نظر گرفتن سناریوهای مربوط به بحران، برای مدل‌سازی عدم قطعیت مولفه‌هایی از جمله تقاضا و ظرفیت، از روش بهینه‌سازی استوار سناریویی استفاده نموده و مدل خود را روی یک مطالعه موردی اجرا کرده‌اند [۱۸]. فهیم‌نیا و همکاران با ارائه مدلی دومرحله‌ای به مدل‌سازی زنجیره تأمین خون پرداخته و مولفه‌هایی از جمله تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل را سناریویی در نظر گرفتند [۱۹]. صالحی و همکاران یک مدل استوار دومرحله‌ای با در نظر داشتن گروه‌های خونی ارائه کردند [۲۰]. عقیانی و همکاران یک مدل استوار سناریو محور با در نظر داشتن قابلیت اطمینان تسهیلات برای تأمین خون در زمان بحران توسعه دادند [۲۱].

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که تعداد مقالات با در نظر داشتن عدم قطعیت مولفه‌ها در مقایسه با مدل‌سازی‌های قطعی، کمتر بوده و بیشتر مقالات غیرقطعی که مسئله خود را در شرایط بحران تعریف نموده‌اند، برای مدل‌سازی عدم قطعیت از روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی یا بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو بهره گرفته‌اند. در سال‌های اخیر، پرداختن به سایر رویکردهای مدل‌سازی عدم قطعیت مورد توجه قرار گرفته است. رمضانیان و بهبودی با روش بهینه‌سازی استوار برتسیمس و سیم به مدل‌سازی عدم قطعیت در زنجیره تأمین خون پرداخته‌اند [۲۲]. نهفتی و

تیموری مدلی دوهدفه برای طراحی شبکه خون توسعه دادند که امکان انتقال خون از سایر استان‌ها به استان حادثه‌دیده را در نظر می‌گیرد و تحت عدم قطعیت فازی مدل‌سازی شده است [۲۳].

عدم قطعیت از عوامل اثرگذار بر برنامه‌ریزی‌های استراتژیک و عملیاتی است [۲۴]. با توجه به اینکه ماهیت بحران‌های طبیعی و غیرطبیعی به صورتی است که همواره با عدم دسترسی به اطلاعات کافی مواجه هستیم، در نظر نداشتن این عدم قطعیت سبب برنامه‌ریزی نادرست و درنهایت، افزایش تلفات پس از وقوع بحران خواهد شد. به علاوه، همان‌طور که اشاره شد، اکثر مقالات حوزه بحران، عدم قطعیت را در قالب سناریوهای بحران مدل‌سازی نموده‌اند؛ در صورتی که ایجاد این سناریوها و تخمین احتمال وقوع آن‌ها، با توجه به نبود اطلاعات کافی، به سادگی امکان‌پذیر نیست و این مقالات مدل خود را با فرض دسترسی به اطلاعات توسعه داده‌اند. در این مقاله، با توجه به شرایط واقعی بحران، یک مدل دوهدفه استوار برای تأمین نیاز اضطراری خون، توسعه داده شده است که در آن علاوه بر تقاضا، حجم خون اهداءشده، هزینه‌های جابه‌جایی تسهیلات موقت و انتقال خون غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین برای مواجهه با عدم قطعیت از روش استوار مبتنی بر مجموعه عدم قطعیت جعبه‌ای^۱ بهره گرفته شده است که به ندرت در مطالعات پیشین مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر کاهش هزینه‌ها، افزایش پاسخگویی به تقاضا در دوره‌های زمانی پس از وقوع بحران، هدف دیگر این مدل است. همچنین به منظور تولید جواب‌های پارتویی کارا^۲، روش ارضاء جامع وزنی چیشف به کار گرفته شده است. درنهایت، عملکرد مدل پیشنهادی توسط مثال عددی مورد بررسی و تحلیل‌های مختلف قرار گرفته است.

۲-۱- بهینه‌سازی استوار

پیشوایی و همکاران [۲۵] براساس مقاله بن-تال و نمیرفسکی [۲۶] یک مدل بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه بسته‌ی عدم قطعیت جعبه‌ای ارائه کردند. این رویکرد مستقل از تابع توزیع مولفه‌های تصادفی عمل می‌کند و در شرایط بحران

1. Box uncertainty set
2. Efficient pareto optimal solutions

بسیار کارا است. در ادامه، تشریح این رویکرد آمده است. مسئله زیر را در نظر بگیرید:

$$RO : \text{Min} Z = cx + d$$

S.t.

$$Ax \leq b$$

$$c, d, A, b \in U_{BOX}$$

که مولفه‌های تصادفی c, d, A و b در مجموعه بسته عدم قطعیت U قرار می‌گیرند. بن-تال و همکاران [۲۷] همتای استوار مسئله (RO) را به صورت زیر تعریف می‌کنند:

$$ROC : \text{Min}\{\hat{c}(x) = \text{SUP}_{(c,d,A,b) \in U_{BOX}} [cx + d] : Ax \leq b \quad \forall (c,d,A,b)\}$$

جواب بهینه مسئله (ROC) یک جواب بهینه استوار برای مسئله (RO) است؛ به طوری که در واقع‌نمایی، در تمامی محدودیت‌ها صدق می‌کند. در این مدل فرض می‌شود داده‌های تصادفی در مجموعه جعبه‌ای به صورت زیر تغییر می‌کنند:

$$U_{BOX} = \{\xi \in \mathbb{R}^n : |\xi_t - \bar{\xi}_t| \leq \rho G_t\} \quad t = \{1, 2, 3, \dots, n\}$$

در عبارت فوق، $(\bar{\xi}_t)$ مقدار اسمی بردار تصادفی n بعدی (ξ_t) است. همچنین G_t مقیاس عدم قطعیت و $\rho > 0$ سطح عدم قطعیت است. هرچقدر مقیاس و سطح عدم قطعیت را بیشتر کنیم، میزان محافظه‌کاری افزایش می‌یابد.

۳- مدل ریاضی پیشنهادی

۳-۱- شرح مسئله

فرض شده که شبکه خون شامل سه سطح است: سطح اول، مراکز جمع‌آوری خون (مراکز ثابت)، سطح دوم، مکان‌های بالقوه برای استقرار تسهیلات موقت جمع‌آوری خون و سطح سوم شامل گروه‌های اهداءکننده خون است. گروه‌های اهداءکننده برای اهدای خون می‌توانند به تسهیلات موقت و همچنین مستقیماً به مراکز جمع‌آوری خون تخصیص

پیدا کنند. به منظور پوشش تمام مناطق اهداءکننده، تسهیلات موقت می‌توانند در دوره‌های مختلف در بین مکان‌های بالقوه جابه‌جا شوند و از گروه‌های اهداءکننده، خون دریافت کنند. آن بخشی از خون که به تسهیلات موقت اهداء شده است، به مراکز ثابت خون ارسال می‌شوند. در مراکز خون، خون‌های جمع‌آوری شده آزمایش، فرآوری و نگهداری می‌شوند. تمامی فرآیندها از قبیل جمع‌آوری خون، حمل حجم‌های خونی بین گره‌های مختلف و جابجایی تسهیلات موقت، مستلزم صرف هزینه است. مهم‌ترین مفروضات مدل پیشنهادی به صورت زیر معرفی می‌شود: (۱) هر یک از مناطق، یک گروه اهداءکننده خون فرض می‌شود؛ (۲) هر گروه اهداءکننده می‌تواند برای اهدای خون به تسهیلات موقت خون یا مراکز ثابت خون تخصیص یابد؛ (۳) افق برنامه‌ریزی، چنددوره‌ای است و دوره‌ها ساعات اولیه پس از وقوع بحران هستند؛ (۴) تسهیلات موقت می‌توانند در بین مکان‌های معلوم و بالقوه دریافت خون، برای جمع‌آوری خون جابه‌جا شوند. این فرآیند مستلزم صرف هزینه است؛ (۵) هر گروه اهداءکننده زمانی می‌تواند به تسهیلات ثابت و موقت، خون اهداء کند که در شعاع پوشش آن باشد؛ (۶) خون‌های جمع‌آوری شده در تسهیلات موقت، برای آزمایش و فرآوری به مراکز ثابت خون ارسال خواهند شد؛ (۷) حجم خون اهداء شده، میزان تقاضای خون، هزینه‌های جمع‌آوری و انتقال حجم‌های خون غیرقطعی فرض می‌شوند.

۲-۳- مجموعه‌ها

i	مجموعه‌ی گروه اهداکنندگان خون $i \in I$ ؛
J	مجموعه‌ی مکان‌های بالقوه برای استقرار تسهیلات موقت جمع‌آوری خون $J \in J$ ؛
n	مجموعه مراکز خون $n \in N$ ؛
t	مجموعه دوره‌های زمانی $t \in T$.

۳-۳- مولفه‌های قطعی

r_{ij}	فاصله گروه اهداءکننده i ام از مکان استقرار تسهیل موقت j ام؛
r	شعاع پوشش تسهیلات موقت جمع‌آوری خون؛
$S_{i,n}$	فاصله گروه اهداءکننده i ام از مرکز خون n ام؛
S	شعاع پوشش مراکز خون برای گروه اهداکنندگان؛

C	هزینه کمبود واحد حجم خون؛
P	تعداد تسهیلات موقت در دسترس برای جمع‌آوری خون؛
m_j	ظرفیت حجمی هر یک از تسهیلات موقت جمع‌آوری خون؛
V_n	ظرفیت حجمی مرکز خون n ام.

۳-۴- مولفه‌های غیرقطعی

$C_{j,n}$	هزینه انتقال واحد حجم خون از مکان j ام تا مرکز خون n ام؛
C_{j_1, j_2}	هزینه جابه‌جایی تسهیل موقت خون از مکان j_1 به مکان j_2 ؛
$C_{i,j}$	هزینه دریافت واحد حجم خون از اهداءکننده گروه i ام به تسهیل موقت j ام؛
$C_{i,n}$	هزینه دریافت واحد حجم خون از گروه اهداءکننده i ام به مرکز خون n ام؛
D_n^t	میزان تقاضای خون در دوره t ام و در مرکز خون n ام؛
d_i^t	حداکثر حجم خون قابل اهدا توسط گروه اهداءکننده i ام.

۳-۵- متغیرهای تصمیم

$X_{i,j}^t$	متغیر صفر و یک؛ اگر گروه اهداءکننده i ام به تسهیل موقت جمع‌آوری خون j ام در دوره t ام تخصیص پیدا کند، یک و در غیر این صورت صفر؛
y_{j_1, j_2}^t	اگر تسهیل موقت در دوره $t-1$ ام در مکان j_1 باشد و در دوره t ام به مکان j_2 منتقل شود، یک و در غیر این صورت صفر؛
$Z_{i,n}^t$	اگر گروه اهداءکننده i ام در دوره t ام به مرکز خون n ام تخصیص پیدا کند، یک و در غیر این صورت صفر؛
$d_{i,j}^t$	حجم خونی که گروه اهداءکننده i ام به تسهیل موقت در مکان j ام، در دوره t ام اهداء می‌کند؛
$T_{i,n}^t$	حجم خونی که گروه اهداءکننده i ام به مرکز خون n ام در دوره t ام اهداء می‌کند؛
$Q_{j,n}^t$	حجم خونی که از تسهیل موقت j ام به مرکز خون n ام در دوره t ام منتقل می‌شود؛
I_n^t	حجم خون مازاد بر تقاضا در مرکز خون n ام در انتهای دوره t ام؛
b_n^t	کمبود خون در مرکز خون n ام در انتهای دوره t ام.

۳-۶- تابع هدف و محدودیت‌ها

$$\min Z_1 = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \left[D_n^t - \left(\sum_{j=1}^J Q_{j,n}^t + \sum_{i=1}^I T_{i,n}^t \right) \right] \quad (1)$$

$$\min Z_2 = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{i,j} \cdot d_{i,j}^t + \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N C_{i,n} \cdot T_{i,n}^t \right) + \sum_{t=1}^T \left(\sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N C_{j,n} \cdot Q_{j,n}^t + \sum_{j_1=1}^J \sum_{j_2=1, j_1 \neq j_2}^J C_{j_1, j_2} \cdot y_{j_1, j_2}^t + C \sum_{n=1}^N b_n^t \right) \quad (2)$$

$$\sum_{j_1=1}^J y_{j_1, j_2}^t \leq 1 \quad ; \forall j_2, t \quad (3)$$

$$\sum_{j_2=1}^J y_{j_1, j_2}^t \leq \sum_{j=1}^J y_{j, j_1}^{t-1} \quad ; \forall j_1, t \geq 2 \quad (4)$$

$$\sum_{j_1=1}^J y_{j_1, j_2}^t + \sum_{j_1=1, j_1 \neq j_2}^J y_{j_2, j_1}^t \leq 1 \quad ; \forall j_2, t \geq 2 \quad (5)$$

$$\sum_{j_1=1}^J \sum_{j_2=1}^J y_{j_1, j_2}^t = P \quad ; \forall t \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I d_{i,j}^t \leq \sum_{j_1=1}^J y_{j_1, j}^t \cdot m_j \quad ; \forall j, t \quad (7)$$

$$X_{i,j}^t \cdot r_{i,j} \leq r \cdot \sum_{j_1=1}^J y_{j_1, j}^t \quad ; \forall j, i, t \quad (8)$$

$$Z_{i,n}^t \cdot S_{i,n} \leq S \quad ; \forall i, n, t \quad (9)$$

$$d_{i,j}^t \leq X_{i,j}^t M \quad ; \forall j, i, t \quad (10)$$

$$T_{i,n}^t \leq Z_{i,n}^t M \quad ; \forall j, i, t \quad (11)$$

$$\sum_{n=1}^N Q_{j,n}^t \leq \sum_{i=1}^I d_{i,j}^t \quad ; \forall j, t \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^T \left[\sum_{j=1}^J d_{i,j}^t + \sum_{n=1}^N T_{i,n}^t \right] \leq d_i' \quad ; \forall i \quad (13)$$

$$\left[\sum_{i=1}^I T_{i,n}^t + \sum_{j=1}^J Q_{j,n}^t \right] - D_n^t = I_n^t - b_n^t \quad ; \forall n, t \quad (14)$$

$$I_n^t \leq V_n \quad ; \forall n, t \quad (15)$$

$$X_{i,j}^t, y_{j_1, j_2}^t, Z_{i,n}^t = \{0, 1\} \quad ; \forall i, j, n, t \quad (16)$$

$$d_{i,j}^t, T_{i,n}^t, Q_{j,n}^t, I_n^t, b_n^t \geq 0 \quad ; \forall i, j, n, t \quad (17)$$

هدف اول (۱) بیانگر کمینه‌کردن کمبود خون در مراکز خون است. هدف دوم (۲) به دنبال کمینه‌کردن هزینه‌های انتقال خون، هزینه‌های جمع‌آوری خون، هزینه‌ی انتقال تسهیلات موقت و هزینه کمبود خون است. محدودیت ۳ نشان می‌دهد که حداکثر یک تسهیل موقت می‌تواند به مکان j_2 انتقال یابد. محدودیت ۴ بیان می‌کند که در صورتی یک تسهیل می‌تواند در دوره t ام از مکان j_1 به مکان j_2

منتقل شود که در دوره $t-l$ ام در مکان z_l باشد. محدودیت ۵ بیان می‌کند که در هر مکان، اگر تسهیل موقتی موجود باشد، این تسهیل حداکثر به یک گروه دیگر می‌تواند برود و اگر تسهیلی موجود نباشد، حداکثر یک تسهیل می‌تواند به آن گروه وارد شود. محدودیت ۶ نشان‌دهنده تعداد کل تسهیلات موقت است. محدودیت ۷ بیانگر آن است که حجم خونی که به تسهیل موقت اهداء می‌شود، باید کمتر از ظرفیت آن تسهیل باشد و همچنین نشان‌دهنده آن است که گروه اهداءکننده i ام در صورتی می‌تواند به تسهیل موقت در مکان z ام خون اهداء کند که یک تسهیل موقت در آن مکان وجود داشته باشد. محدودیت ۸ بیان‌کننده آن است که گروه اهداءکننده i ام زمانی می‌تواند به تسهیل موقت در مکان z ام خون اهداء کند که در شعاع پوشش آن باشد. محدودیت ۹ نیز نشان می‌دهد که گروه اهداءکننده i ام زمانی می‌تواند به مرکز خون n ام، خون اهداء کند که در شعاع پوشش آن باشد. با توجه به محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱، در صورتی گروه اهداءکننده i ام به تسهیلات جمع‌آوری، خون اهدا می‌کند که به آن‌ها تخصیص پیدا کرده باشد. محدودیت ۱۲ بیان می‌کند که حجم خونی که از تسهیل موقت z ام به مرکز خون n ام ارسال می‌شود، باید کمتر از حجم خون اهداء شده به این تسهیل باشد. محدودیت ۱۳ تضمین می‌کند حجم خونی که از گروه اهداءکننده i ام به تسهیلات موقت و مرکز خون داده می‌شود، کمتر از حداکثر حجم خون اهدایی گروه اهداءکننده i ام است. محدودیت ۱۴، محدودیت تعادلی است که رابطه بین موجودی، کمبود و مقدار تقاضای خون در هر دوره را مشخص می‌کند. محدودیت ۱۵ تضمین می‌کند که موجودی مازاد بر تقاضا باید کمتر از ظرفیت حجمی مرکز خون n ام باشد. محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷ نوع متغیرهای مسئله را بیان می‌کنند.

۴- همتای استوار مدل پیشنهادی

برای عملکرد مناسب بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه‌های عدم قطعیت، محدودیت‌هایی که شامل مولفه‌های تصادفی هستند، باید به صورت «کوچک‌تر مساوی» یا «بزرگ‌تر مساوی» باشند [۸]، [۹]. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، محدودیت ۱۴ یک محدودیت مساوی و شامل مولفه تصادفی است. با حذف متغیر

مثبت (I_n^t) از محدودیت ۱۴، این محدودیت به یک محدودیت نامساوی تبدیل می‌شود:

$$\left[\sum_{i=1}^I T_{i,n}^t + \sum_{j=1}^J Q_{j,n}^t \right] + b_n^t \geq D_n^t \quad ; \forall n, t \quad (18)$$

تابع هدف ۱ و ۲ و همچنین محدودیت‌های ۱۳ و ۱۸ شامل مولفه تصادفی هستند. همتای استوار توابع هدف به شکل روابط ۱۹ و ۲۰ نوشته شده و محدودیت‌های ۲۱ الی ۲۴ نیز به مدل اضافه می‌شوند. همتای استوار محدودیت‌های ۱۳ و ۱۸ نیز در محدودیت‌های ۲۵ و ۲۶ آمده‌اند.

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \left[\bar{D}_n^t + \rho^D G_{t,n}^D - \left(\sum_{j=1}^J Q_{j,n}^t + \sum_{i=1}^I T_{i,n}^t \right) \right] \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_2 = & \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \bar{C}_{i,j} \cdot d_{i,j}^t + \eta_{ij}^{c_{ij}} + \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \bar{C}_{i,n} \cdot T_{i,n}^t + \eta_{in}^{c_{in}} \right) \\ & + \sum_{t=1}^T \left(\sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \bar{C}_{j,n} \cdot Q_{j,n}^t + \eta_{jn}^{c_{jn}} + \sum_{j_1=1}^J \sum_{j_2=1}^J \bar{C}_{j_1,j_2} \cdot y_{j_1,j_2}^t + \eta_{j_1 j_2}^{c_{j_1 j_2}} + C \sum_{n=1}^N b_n^t \right) \quad (20) \end{aligned}$$

S.t.

$$\begin{aligned} \rho^{c_{ij}} \cdot G_{ij}^{c_{ij}} \cdot d_{i,j}^t & \leq \eta_{ij}^{c_{ij}} \\ \rho^{c_{ij}} \cdot G_{ij}^{c_{ij}} \cdot d_{i,j}^t & \geq -\eta_{ij}^{c_{ij}} \end{aligned} \quad ; \forall j, i \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \rho^{c_{in}} \cdot G_{in}^{c_{in}} \cdot T_{i,n}^t & \leq \eta_{in}^{c_{in}} \\ \rho^{c_{ij}} \cdot G_{ij}^{c_{ij}} \cdot T_{i,n}^t & \geq -\eta_{in}^{c_{in}} \end{aligned} \quad ; \forall i, n \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \rho^{c_{jn}} \cdot G_{jn}^{c_{jn}} \cdot Q_{j,n}^t &\leq \eta_{jn}^{c_{jn}} && ; \forall i, n \quad (23) \\ \rho^{c_{jn}} \cdot G_{jn}^{c_{jn}} \cdot Q_{j,n}^t &\geq -\eta_{jn}^{c_{jn}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho^{c_{j_1 j_2}} \cdot G_{j_1 j_2}^{c_{j_1 j_2}} \cdot y_{j_1, j_2}^t &\leq \eta_{j_1 j_2}^{c_{j_1 j_2}} && ; \forall j_1, j_2 \quad (24) \\ \rho^{c_{j_1 j_2}} \cdot G_{j_1 j_2}^{c_{j_1 j_2}} \cdot y_{j_1, j_2}^t &\geq -\eta_{j_1 j_2}^{c_{j_1 j_2}} \end{aligned}$$

$$\sum_{t=1}^T \left[\sum_{j=1}^J d_{i,j}^t + \sum_{n=1}^N T_{i,n}^t \right] \leq \bar{d}_i - \rho^{d_i} \cdot G_i^{d_i} \quad ; \forall i \quad (25)$$

$$\left[\sum_{i=1}^I T_{i,n}^t + \sum_{j=1}^J Q_{j,n}^t \right] + b_n^t \geq \bar{D}_n^t + \rho^D \cdot G_m^D \quad ; \forall n, t \quad (26)$$

با حذف متغیر (I_n^t) ، محدودیت (۱۵) نیز به محدودیتی تبدیل می‌شود که شامل مولفه تصادفی (D_n^t) است. همتای استوار این محدودیت به صورت محدودیت ۲۷ است. سایر محدودیت‌های مدل بدون تغییر باقی می‌مانند.

$$\left[\sum_{i=1}^I T_{i,n}^t + \sum_{j=1}^J Q_{j,n}^t \right] + b_n^t - \bar{D}_n^t - \rho^D \cdot G_m^D \leq V_n \quad ; \forall n, t \quad (27)$$

(۳)-(۱۲)، (۱۶)، (۱۷)

۵- روش حل

برنامه‌ریزی چندهدفه در بسیاری از مدل‌های ریاضی به‌کار گرفته شده است [۲۸]. روش ارضاء جامع وزنی چبیشف^۱ یک روش کارا در بهینه‌سازی چندهدفه است. در

1. Lexicographic weighted Tchebycheff method (LWT)

این روش، ابتدا هر یک از توابع اهداف به صورت منفرد بهینه می‌شود و سپس، یک هدف کلی به منظور حداقل نمودن حداکثر انحراف وزنی هر یک از توابع از مقدار بهینه‌شان، تعریف می‌شود. این روش ممکن است جواب‌های پارتویی ضعیف نیز تولید کند؛ در نهایت، از یک رابطه به منظور حذف جواب پارتویی ضعیف از مجموعه جواب تولید شده استفاده می‌شود. در ادامه، شرح مختصری از این روش ارائه می‌شود. یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با n متغیر تصمیم و m تابع هدف را به صورت زیر تعریف می‌کنیم [۲۹]:

$$\text{LWT: Min } H(y) = \{h_1(y), h_2(y), h_3(y), \dots, h_m(y)\}$$

S.t.

$$y \in Y_h$$

که در آن y یک جواب شدنی مسئله (LWT) است. $Y_h \subseteq Y$ نیز مجموعه جواب‌های شدنی مسئله (LWT) هستند. در گام اول، مقدار بهینه تک تک اهداف به صورت منفرد و مانند زیر بهینه می‌شود:

$$Z_t^* = \min \{h_t(y) | y \in Y_h\} - \varepsilon_t$$

که در رابطه بالا ε_t یک مقدار مثبت و کوچک است. در گام بعدی برنامه‌ریزی چندهدفه (LWT) را به یک برنامه‌ریزی تک هدفه به صورت زیر تبدیل می‌کنیم:

$$\text{LWTW: Min } \alpha$$

S.t.

$$\alpha \geq \lambda_t (h_t(y) - Z_t^*)$$

$$\sum_{t=1}^p \lambda_t = 1, 0 \leq \lambda_t \leq 1, y \in Y_h$$

در عبارت بالا، (λ_i) اهمیت هر تابع هدف است. این مسئله بهینه‌سازی به دنبال حداقل کردن حداکثر انحراف هر تابع هدف از مقدار بهینه خود، در فضای شدنی Y است. مسئله (LWTW) ممکن است در برخی حالات جواب پارتویی ضعیف تولید کند؛ بنابراین، ممکن است برخی از جواب‌های پارتویی بر جواب‌های ضعیف غلبه داشته باشند. از مسئله (LWTS) برای حذف جواب‌های پارتویی ضعیف کمک می‌گیریم. اگر «مجموعه جواب‌های پارتویی مسئله (LWTW) باشد، به صورت زیر خواهیم داشت:

$$\text{LWTS: } \text{Min } \sum_{t=1}^m (H_t(y) - Z_t^*)$$

S.t.

$$y \in Y_w$$

مسئله (LWTS) تمامی جواب‌های پارتویی ضعیف را از برنامه‌ریزی (LWTW) حذف خواهد نمود.

۶- مثال عددی

در این مسئله، نه گروه اهداءکننده خون، ۱۰ مکان کاندیدا برای استقرار تسهیلات موقت و سه مرکز خون وجود دارند و افق برنامه‌ریزی سه دوره در نظر گرفته شده است. همچنین پنج تسهیل موقت خون در دسترس هستند که می‌توانند بین مکان‌های کاندیدا، جهت جمع‌آوری خون در دوره‌های زمانی مختلف جابه‌جا شوند. مسئله با سطح عدم قطعیت ۰/۶ و مقیاس عدم قطعیت $G_i=C_i$ ، در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS 24.0.1 و با حل‌کننده CPLEX حل شده است. نتایج نشان می‌دهد که در دوره اول، تسهیلات موقت در مکان‌های ۱، ۲، ۳، ۵ و ۸ مستقر شده‌اند. مقدار خون جمع‌آوری شده از اهداکنندگان در هر یک از تسهیلات و همچنین مکان تسهیلات موقت در دوره‌های زمانی، در جداول ۱، ۲ و ۳ آورده شده است. در بین اهداکنندگان، تنها گروه‌های ۱، ۲ و ۳ به مراکز خون ۱ و ۳ اختصاص یافته‌اند و جمع‌آوری خون از بقیه گروه‌ها توسط تسهیلات موقت صورت گرفته است.

جدول ۱ میزان خون دریافت شده از اهداءکنندگان در مراکز خون

مراکز خون	دوره	اهداءکنندگان		
		۱	۲	۳
۱	اول	۱۷۰/۷۴۹		۹۳/۹۹۶
۳			۲۱/۹۳۸	
۱	دوم	۱۷۰/۷۴۹		۹۳/۹۹۶
۳			۲۱/۹۳۸	
۱	سوم	۱۷۰/۷۴۹		۹۳/۹۹۶
۳			۲۱/۹۳۸	

جدول ۲ مکان قرارگیری تسهیلات موقت خون در هر دوره

دوره	مکان قرارگیری تسهیلات موقت				
۱	۱	۲	۳	۵	۸
۲	۱	۲	۶	۵	۸
۳	۴	۱	۳	۵	۲

جدول ۳ میزان خون جمع‌آوری شده از اهداءکنندگان توسط تسهیلات موقت

تسهیلات موقت	دوره	اهداءکنندگان								
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	اول				۲۸۰/۴۷۸					
۳		۲۰۹/۳۹۲				۲۵۹/۹۲۸		۲۵۰/۶۰۷		
۵									۱۸۷/۲۹۹	۲۸۰/۳
۸							۱۹۰/۳۹۸			
۱	دوم				۲۸۰/۴۷۸					
۳										
۵									۱۸۷/۲۹۹	۲۸۰/۳
۸							۱۹۰/۳۹۸			
۱	سوم									
۳		۲۰۹/۳۹۲				۲۵۹/۹۲۸		۲۵۰/۶۰۷		
۵									۱۸۷/۲۹۹	
۸							۱۹۰/۳۹۸			

در ادامه، نتایج حاصل از حل مدل‌های قطعی و استوار با داده‌های اسمی، مقایسه شده و در جداول ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است. در حل مدل استوار، سه سطح

ارائه یک مدل بهینه‌سازی استوار دوهدفه ... _____ سهیل منصوری و همکاران

عدم قطعیت $(\rho=2, 0/4, 0/6)$ ، دو مقیاس عدم قطعیت $(G_i=C_i)$ و $(G_i=2/3 C_i)$ و پنج مجموعه وزنی (λ_1, λ_2) برای توابع هدف در نظر گرفته شده است.

جدول ۴ خلاصه نتایج به دست آمده از حل مدل قطعی با داده‌های اسمی

Z_1^*	α	Z_2^*	مجموعه وزنی
۵۹۲۹۱		۴۸۰۹۷۲۳	
۶۰۷۳۶	۴۳۳	۱۲۳۴۶۵	$\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7$
۶۰۵۳۶	۴۹۷	۱۲۳۶۷۶	$\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6$
۶۰۳۳۵	۵۲۱	۱۲۳۸۹۰	$\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5$
۶۰۱۳۲	۵۰۴	۱۲۴۱۰۷	$\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4$
۵۹۹۲۶	۴۴۴	۱۲۴۳۲۸	$\lambda_1=0/7, \lambda_2=0/3$
$Z_1^*=۶۱۳۴۵$		$Z_2^*=۱۲۲۸۴۶$	

جدول ۵ خلاصه نتایج به دست آمده از حل مدل استوار با داده‌های اسمی و مقیاس عدم قطعیت $(G_t=2.3 C_t)$

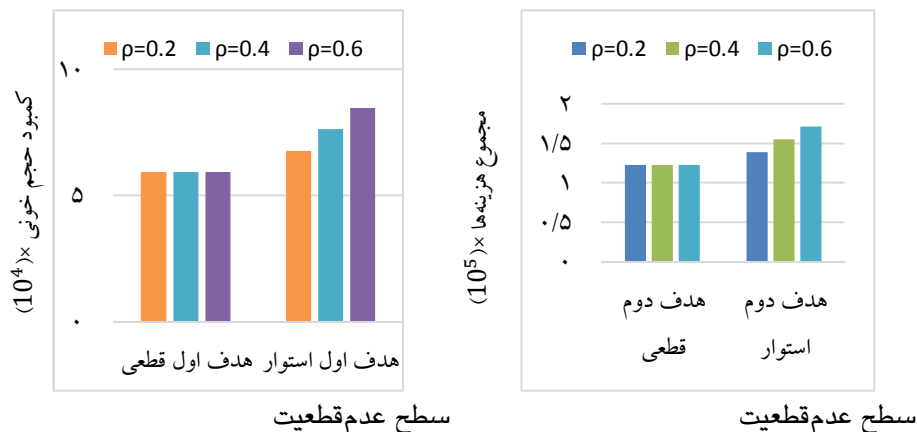
ρ	Z_1^*	α	Z_2^*	مجموعه وزنی
	۶۹۱۰۹	۴۰۹	۱۳۹۷۹۷	$\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7$
	۶۸۹۵۶	۴۸۴	۱۴۰۰۱۹	$\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6$
۰/۲	۶۸۷۹۲	۵۲۳	۱۴۰۲۵۹	$\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5$
	۶۸۶۱۶	۵۲۲	۱۴۰۵۱۹	$\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4$
	۶۸۴۲۶	۴۷۶	۱۴۰۸۰۱	$\lambda_1=0/7, \lambda_2=0/3$
	$Z_1^*=۶۹۵۲۵$		$Z_2^*=۱۳۹۲۱۲$	
ρ	$Z_1^*=۷۶۱۹۸$		$Z_2^*=۴۸۱۳۱۴۹$	مجموعه وزنی
	۷۷۴۱۵	۳۶۵	۱۵۶۰۹۲	$\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7$
	۷۷۳۰۰	۴۴۰	۱۵۶۳۰۵	$\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6$
۰/۴	۷۷۱۷۱	۴۸۶	۱۵۶۵۴۴	$\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5$
	۷۷۰۳۷	۴۹۷	۱۵۶۸۱۵	$\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4$
	۷۶۸۶۳	۴۶۵	۱۵۷۱۲۳	$\lambda_1=0/7, \lambda_2=0/3$
	$Z_1^*=۷۷۷۰۴$		$Z_2^*=۱۵۵۵۷۱$	
ρ	$Z_1^*=۸۴۶۵۱$		$Z_2^*=۴۸۱۳۱۴۹$	مجموعه وزنی
	۸۵۶۸۳	۳۰۹	۱۷۲۳۷۲	$\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7$
	۸۵۵۹۸	۳۷۸	۱۷۲۵۶۱	$\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6$
۰/۶	۸۵۵۰۱	۴۲۵	۱۷۲۷۸۰	$\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5$
	۸۵۳۸۹	۴۴۲	۱۷۳۰۳۶	$\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4$
	۸۵۲۵۶	۴۲۳	۱۷۳۳۴۰	$\lambda_1=0/7, \lambda_2=0/3$
	$Z_1^*=۸۵۸۸۴$		$Z_2^*=۱۷۱۹۲۹$	

جدول ۶ خلاصه نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل استوار با داده‌های اسمی و مقیاس عدم قطعیت (Gt=Ct)

ρ	$Z1^*=71971$	α	$Z2^*=4812756$	مجموعه وزنی
	۷۳۲۶۸	۳۸۹	۱۴۷۹۴۷	$\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7$
	۷۳۱۳۵	۴۶۵	۱۴۸۱۶۷	$\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6$
۰/۲	۷۲۹۸۹	۵۰۹	۱۴۸۴۰۹	$\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5$
	۷۲۸۲۹	۵۱۴	۱۴۸۶۷۸	$\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4$
	۷۲۶۵۱	۴۷۵	۱۴۸۹۷۷	$\lambda_1=0/7, \lambda_2=0/3$
	$Z1=73614$		$Z2^*=147391$	
ρ	$Z1^*=84651$	α	$Z2^*=4813149$	مجموعه وزنی
	۸۵۶۸۳	۳۰۹	۱۷۲۳۷۲	$\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7$
	۸۵۵۹۸	۳۷۸	۱۷۲۵۶۱	$\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6$
۰/۴	۸۵۵۰۱	۴۲۵	۱۷۲۷۸۰	$\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5$
	۸۵۳۸۹	۴۴۲	۱۷۳۰۳۶	$\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4$
	۸۵۲۵۶	۴۲۳	۱۷۳۳۴۰	$\lambda_1=0/7, \lambda_2=0/3$
	$Z1=85884$		$Z2^*=171929$	
ρ	$Z1^*=97331$	α	$Z2^*=4811329$	مجموعه وزنی
	۹۸۰۴۴	۲۱۳	۱۹۶۷۷۳	$\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7$
	۹۷۹۹۵	۲۶۵	۱۹۶۹۱۰	$\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6$
۰/۶	۹۷۹۳۸	۳۰۳	۱۹۷۰۷۴	$\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5$
	۹۷۸۶۸	۳۲۲	۱۹۷۲۷۴	$\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4$
	۹۷۷۸۳	۳۱۶	۱۹۷۵۲۱	$\lambda_1=0/7, \lambda_2=0/3$
	$Z1=98153$		$Z2=196468$	

با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده درمی‌یابیم مقدار تابع هدف‌های مدل استوار نسبت به مدل قطعی در تمام سطوح و مقیاس‌های عدم قطعیت بدتر شده است. با ثابت در نظر گرفتن مقیاس عدم قطعیت (G) و با افزایش سطح عدم قطعیت (ρ)، مقدار تابع هدف‌های استوار در هر گام افزایش یافته است. در نمودار (۱)، مقدار بهینه دو تابع هدف مدل

قطعی و استوار با مقیاس عدم قطعیت $(G_i=2/3 C_i)$ ، نسبت به سطح عدم قطعیت (0.6) و $(0.4, 0.2)$ رسم شده است.



نمودار ۱ رسم مقدار بهینه تابع هدف‌های مدل‌های قطعی و استوار نسبت به سطح عدم قطعیت با مقیاس عدم قطعیت $(G_i=2/3 C_i)$.

همان‌طور که در نمودار ۱ مشخص است با افزایش سطح عدم قطعیت، مقدار بهینه تابع هدف اول (Z_1) و دوم (Z_2) مدل استوار افزایش یافته است. همچنین مقدار بهینه تابع هدف اول (Z_1) استوار بیشتر از تابع هدف اول مدل قطعی و مقدار بهینه تابع هدف دوم (Z_2) مدل استوار نیز بیشتر از تابع هدف دوم مدل قطعی، در تمامی سطوح محافظه‌کاری است. این روند در مقیاس عدم قطعیت $(G_i=C_i)$ نیز به همین صورت است. از جداول ۵ و ۶ مشاهده می‌کنید که بدترین حالت ممکن برای هر دو تابع هدف استوار، در سطح عدم قطعیت $(\rho=0.6)$ و مقیاس عدم قطعیت $(G_i=C_i)$ اتفاق افتاده است که بیشترین سطح محافظه‌کاری را بین سطوح مطرح شده دارد. با افزایش سطح و مقیاس عدم قطعیت، میزان محافظه‌کاری افزایش می‌یابد. انتظار داریم که با افزایش میزان محافظه‌کاری، مقدار تابع هدف‌های استوار در هر گام بهتر نشوند؛ نتایج حاصل شده نیز گواه بر این ادعا است. همچنین با ثابت در نظر گرفتن سطح عدم قطعیت و با افزایش مقیاس عدم قطعیت، هر دو تابع هدف استوار بدتر شده‌اند. به عنوان نمونه مقدار بهینه هر

دو تابع هدف نسبت به مقیاس عدم قطعیت ($G_t=C_t$ و $G_t=2/3 C_t$) و در سطح عدم قطعیت ۰/۴ در نمودار ۲ رسم شده است. ملاحظه می‌کنید که با افزایش سطح عدم قطعیت از ($G_t=2/3 C_t$) به ($G_t=C_t$)، مقدار بهینه هر دو تابع هدف افزایش یافته است. هر دو تابع هدف مسئله پیشنهادی کمینه‌سازی است و لذا هر دو تابع هدف با افزایش مقیاس عدم قطعیت، بیشتر شده‌اند. اگرچه با در نظر گرفتن سطحی از محافظه‌کاری، جواب بهینه مدل استوار نسبت به مدل قطعی بهتر نمی‌شود، اما تصمیماتی که در این شرایط اتخاذ می‌شود، سطحی از اطمینان را به تصمیم‌گیرنده می‌دهد. در واقع در این شرایط، تصمیم‌گیرنده هزینه‌ای را صرف محافظه‌کاری خواهد نمود و در مقابل به میزانی از استواری دست پیدا خواهد کرد. تصمیم‌گیرنده با اتکا به این سطح از اطمینان، تصمیم‌گیری خواهد نمود.



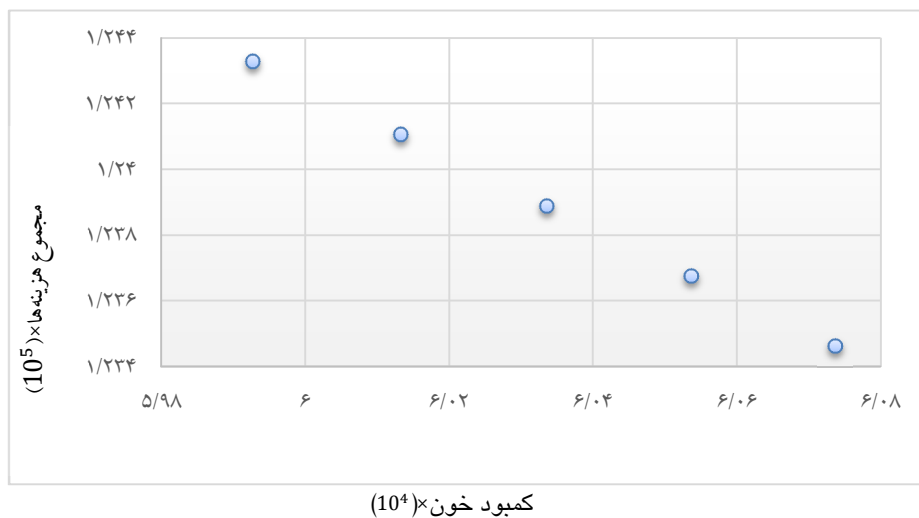
نمودار ۲ رسم تابع هدف‌های قطعی و استوار در سطح عدم قطعیت (۰/۴) نسبت به مقیاس عدم قطعیت

در ادامه، به منظور تولید جواب پارتویی، مدل‌های قطعی و استوار با روش ارضاء جامع وزنی چپیشفی حل شده‌اند. یکی از ویژگی‌های مهم جواب‌های پارتویی این است که یک مجموعه جواب نباید بر مجموعه دیگر غلبه داشته باشد. اگر یک جواب بر مجموعه دیگر غلبه داشته یا مغلوب شود، گفته می‌شود که جواب پارتویی ضعیف

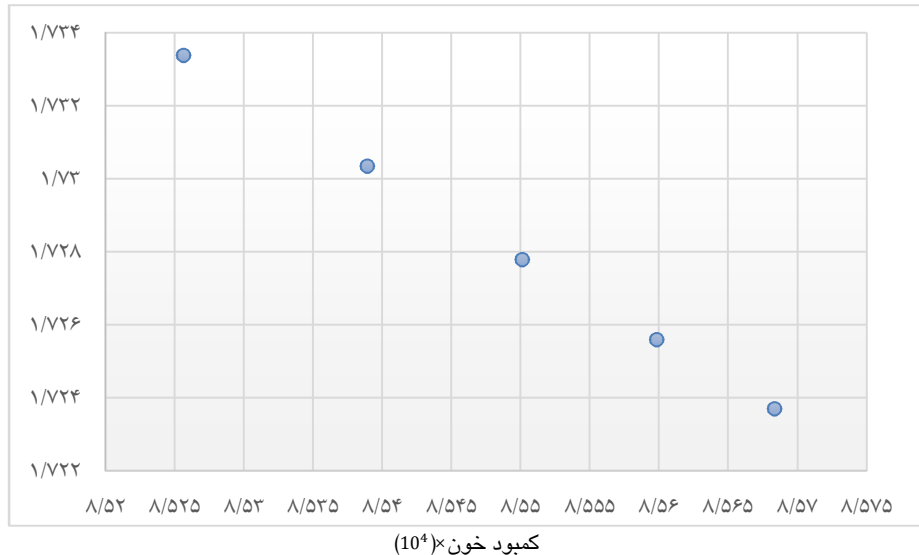
تولید شده است. اگر نمودار پارتویی شیب یکنوایی نداشته باشد، می‌توان گفت جواب پارتویی ضعیف تولید شده است.

در مثال عددی حل شده، در تمامی سطوح و مقیاس‌های عدم قطعیت، جواب‌های پارتویی قوی تولید شده‌اند. نمودار ۳، نمودار پارتویی مدل قطعی و نمودار ۴، نمودار پارتویی مدل استوار در سطح عدم قطعیت $(\rho=0.4)$ و مقیاس عدم قطعیت $(G_t=C_t)$ هستند.

پاسخ دادن به تقاضای خون مستلزم صرف هزینه بوده و دو تابع هدف در تقابل با یکدیگر قرار دارند. افزایش هزینه‌ها برای تابع هدف دوم نامطلوب تلقی می‌شود و تا حد ممکن به مقابله با این شرایط می‌پردازد. با افزایش اهمیت تابع اول (λ_1) ، نمودار پارتویی به سمت محور افقی متمایل می‌شود و همین‌طور با افزایش اهمیت تابع هدف دوم (λ_2) ، نمودار پارتویی به سمت محور عمودی متمایل می‌شود. با افزایش تابع هدف اول (Z_1) ، تابع هدف دوم (Z_2) کاهش یافته است و همچنین با افزایش تابع هدف دوم، تابع هدف اول کاهش یافته است. این روند، تقابل اهداف را نسبت به یکدیگر نشان می‌دهد. به علاوه، یکنوا بودن شیب نمودارهای پارتویی ۳ و ۴ نشان می‌دهد که جواب‌های پارتویی قوی تولید شده است.



نمودار ۳ رسم نمودار پارتویی مدل قطعی در حل با داده‌های اسمی



نمودار ۴ رسم نمودار پارتویی مدل استوار در حل با داده‌های اسمی در سطح عدم قطعیت $(\rho=0/4)$ و مقیاس عدم قطعیت $(Gt=Ct)$

۷- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد

با توجه به ضرورت تأمین تقاضای خون برای حفظ حیات افراد آسیب‌دیده در زمان وقوع بحران، در این مقاله یک مدل دوهدفه برای طراحی شبکه تأمین خون تحت عدم قطعیت ارائه شده است. شبکه پیشنهادی شامل سه سطح مراکز خون، تسهیلات موقت و اهداءکنندگان بوده که با استفاده از آن در مورد نحوه جابه‌جایی تسهیلات موقت و همچنین نحوه تخصیص تسهیلات به یکدیگر تصمیم‌گیری می‌شود. هدف اول به دنبال کمینه‌کردن کمبود خون در مراکز خون و هدف دوم به دنبال کمینه‌کردن هزینه‌های عملیاتی شبکه است. برای تولید جواب‌های پارتویی قوی از روش ارضاء جامع وزنی چیشف استفاده شده است. در مدل ارائه‌شده، تقاضا، حجم خون اهدایی، هزینه اهداء و انتقال خون غیرقطعی فرض شده و برای مدل‌سازی عدم قطعیت، از روش بهینه‌سازی استوار بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان می‌دهند که مدل استوار در تمام سطوح محافظه‌کاری دارای هزینه بالاتر و کمبود

خون بیشتر است. به علاوه، نتایج محاسباتی، تقابل اهداف را به خوبی نشان می‌دهند؛ به عبارتی، افزایش پاسخ به تقاضای خون مستلزم صرف هزینه بیشتر است. در نهایت، پیشنهادهای آتی برای بهبود مدل بدین شکل مطرح می‌شود: (۱) به منظور پاسخ‌دهی سریع، زمان پاسخ می‌تواند به عنوان یکی از اهداف اساسی مطرح شود؛ (۲) برای حل مسئله در مقیاس بزرگ می‌توان از روش‌های حل دقیق و فراابتکاری بهره گرفت؛ (۳) برای افزایش کارایی سیستم در شرایط عدم اطمینان، می‌توان سایر روش‌های بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه‌های عدم قطعیت (نظیر بیضوی، چندوجهی و...) را به صورت مجزا توسعه داد و در شرایط یکسان، عملکرد این روش‌ها را مقایسه نمود؛ (۴) می‌توان علاوه بر پرداختن به مسئله مکان‌یابی-تخصیص، به مسیریابی وسایل حمل‌ونقل نیز توجه نمود.

۸- منابع

- [1] Abounacer R., Rekik M., Renaud J. "An exact solution approach for multi-objective location-transportation problem for disaster response"; *Computers & Operations Research*, 41, 2014, 83-93.
- [2] Van Wassenhove L. N., Pedraza Martinez A. J. "Using OR to adapt supply chain management best practices to humanitarian logistics"; *International Transactions in Operational Research*, 19(1-2), 2012, 307-322.
- [3] Sha Y., Huang J. "The multi-period location-allocation problem of engineering emergency blood supply systems"; *Systems Engineering Procedia*, 5, 2012, 21-28.
- [4] Rawls C. G., Turnquist M. A. "Pre-positioning of emergency supplies for disaster response"; *Transportation research part B: Methodological*, 44(4), 2010, 521-534.
- [5] Mete H. O., Zabinsky Z. B. "Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management"; *International Journal of Production Economics*, 126(1), 2010, 76-84.

- [6] Farrokh M., Azar A., Jandaghi G. "A novel robust fuzzy programming approach for closed loop supply chain design"; *Modern Research in Decision Making*, 1(3), 2016,131-160.
- [7] Araz C., Selim H., Ozkarahan I. "A fuzzy multi-objective covering-based vehicle location model for emergency services"; *Computers & Operations Research*, 34(3),2007, 705-726.
- [8] Najafi M., Eshghi K., Dullaert W. "A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase"; *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1),2013, 217-249.
- [9] Naji-Azimi Z., Renaud J., Ruiz A., Salari M. "A covering tour approach to the location of satellite distribution centers to supply humanitarian aid"; *European Journal of Operational Research*, 222(3),2012, 596-605.
- [10] Bozorgi-Amiri A., Jabalameli M. S., Al-e-Hashem S. M. (2013) "A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty"; *OR spectrum*, 35(4),2013, 905-933.
- [11] Beliën J., Forcé H. "Supply chain management of blood products: A literature review"; *European Journal of Operational Research*, 217(1),2012, 1-16.
- [12] Cetin E., Sarul L. S. "A blood bank location model: A multiobjective approach"; *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2(1),2009, 112-124.
- [13] Şahin G., Süral H., Meral S."Locational analysis for regionalization of Turkish Red Crescent blood services"; *Computers & Operations Research*, 34(3),2007, 692-704.
- [14] Yan H., Cheng Y., Wang S., Wang Q., Liu J. "A method on blood supply in an emergency"; *Chinese Journal of Blood Transfusion*, 19(1),2006, 93-94.
- [15] Li Ch., Song B., Wu W., Yu M. (2008) "An introduction to the research of the blood security system emergency in an Emergency people"; *Military Surgeon*, 51(0).3.2008

- [16] Cuo D., Cheng Y., Chen Y. "An analysis on the inventory management of blood scheduling after WenChuan Earthquake"; *Chinese Journal of Blood Transfusion*, 2008, 21(8).
- [17] Nagurney A., Masoumi A. H. "Supply chain network design of a sustainable blood banking system"; *In Sustainable supply chains*, Springer, New York, NY. 2012, 49-72.
- [18] 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, 2014, 225-244.
- [19] Fahimnia B., Jabbarzadeh A., Ghavamifar A., Bell M. "Supply chain design for efficient and effective blood supply in disasters"; *International Journal of Production Economics*, 183, 2017, 700-709.
- [20] 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*, 2017, 1-25.
- [21] Aghiani M., Jabbarzadeh A., Sadjadi S.J. "A robust optimization model for blood supply chain network design considering reliability in disaster"; *Journal of quality Engineering and Management*, 5(2), 2015, 85-96.
- [22] 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, 2017, 69-82.
- [23] Nahofti Kohneh J., Teimoury E. "A model for the design of blood products supply chain at the time of the earthquake disaster considering the transfer from the other provinces (Case Study: Tehran blood transfusion network)"; *Industrial Management*, 8(3), 2016, 487-513.
- [24] Hanafizadeh P., Arabi S. M., Hashemi A. "Robust Strategic Planning: Using Scenario Planning and Fuzzy Inference System"; *The Modares Journal of Management Research in Iran*, 10, Supplementary Issue (Tome 46), 2006, 137-170.

- [25] 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), 2011, 637-649.
- [26] Ben-Tal, A., Nemirovski, A. "Robust convex optimization"; *Mathematics of operations research*, 23(4), 1998, 769-805.
- [27] Ben-Tal A., Nemirovski A. "Robust solutions of uncertain linear programs"; *Operations research letters*, 25(1), 1999, 1-13.
- [28] Soltani Tehrani M., Hassanpour H., Ramezani S. "Two-objective optimization model of costs and carbon dioxide in closed loop supply chain"; *The Modares Journal of Management Research in Iran*, 19(1), 2015, 169-189.
- [29] Liu C. H., Tsai W. N. "Multi-objective parallel machine scheduling problems by considering controllable processing times"; *Journal of the Operational Research Society*, 67(4), 2015, 654-663.