چهارمین کنفرانس بین المللی
مدیریت، اقتصاد کارآفرینی و مهندسی صنایع
4th International Conference on
Management, Economics, Entrepreneurship and Industrial Engineering
www.cem.cdsts.ir

طراحی زنجیره تامین خون چند هدفه و چند سطحی مقاوم در برابر بلا های طبیعی

آرش اپرناک، مهرناز بیات، سنا قنبرپور، نیکا دهقان

دکتری مهندسی صنایع دانشگاه تهران و عضو هیات علمی دانشگاه ؛ تهران؛ ایران

(Arash.apornak@ut.ac.ir)

مهندسی صنایع؛ دانشگاه هنر و معماری پارس ، تهران، ایران

مهندسی صنایع؛ دانشگاه هنر و معماری پارس ، تهران، ایران

مهندسی صنایع؛ دانشگاه هنر و معماری پارس ، تهران، ایران

چکیده

این مقاله، یک مدل بهینه سازی مقاوم برای طراحی شبکه زنجیره تأمین خون در حالات بحرانی و در قالب سه سطح (تامین، فرآوری و توزیع)و در دوره های زمانی متعدد ارائه میدهد. شبکه شامل اهدا کنندگان خون است که در مراکز موقت و دائمی خون، خون اهدا میکنند. واحد های خونی جمع آوری شده و به مراکز خون منتقل میشوند تا فرآوری شوند. خون سالم پس از فرآوری، بر اساس نیاز و ظرفیت، به مراکز درمانی ارسال میشود. هدف از این مدل، تعیین میزان و مکان مراکز خون و بهترین استراتژی برای تخصیص آنها در سه سناریو مختلف است؛ در حالیکه دو هدف اصلی، کاهش هزینه ها و کمبود های خون میباشد.

کلمات کلیدی : زنجیره تأمین خون، طراحی شبکه زنجیره تأمین، بهینه‌سازی مقاوم، مدیریت بحران، برنامه‌ریزی چنددوره‌ای

۱- مقدمه

در کل، بلا به رویدادی گفته میشود که یا به صورت طبیعی یا انسان ساخت، به صورت ناگهانی یا با تکرار اتفاق میافتد و باعث مشکلات و دردسرهای زیادی برای جامعه میگردد. برای مقابله با این وضعیت، نیاز است اقدامهای اساسی انجام شود. بلایای طبیعی مانند سیلاب، زلزله و طوفان، هر ساله در بخش هایی از جهان رخ میدهند و منجر به خرابی، تهدید حیات و خسارتهای مالی میشوند. پس از وقوع این حوادث، نیاز به کمک و امداد رسانی گستردهای احساس میشود. در سال های اخیر، چنین حوادثی در ایران و دیگر کشورهای دنیا رخ داده است. بر اساس آمارهای جهانی، ایران هفتمین کشور در معرض خطر حوادث است و در لیست کشورهای پرحادثه قرار دارد. طبق گزارشهای منتشر شده، در بیست سال گذشته، حدود ۱۰ درصد جمعیت ایران کشته

یا مجروح شده اند، که این رقم بسیار قابل توجه است. یکی از مخرب ترین حوادث، زلزله است. کمبود خون، هزینه های غیرقابل جبران برای جامعه است؛ زیرا افزایش نرخ مرگ و میر به دلیل کمبود خون، پیامد های جبران ناپذیری دارد.

البته، ضایعات خون نیز جبران ناپذیر است؛ زیرا اهدای خون تنها توسط افراد امکان پذیر است و همچنین باید دوره زمانی مشخصی بین دو اهدای خون توسط هر فرد رعایت شود. بنابراین، نگهداری مقدار کافی خون و مدیریت آن برای پاسخگویی به نیازها، امری مهم و حیاتی است.

به دلیل محدودیت تاریخ انقضای خون و محصولات آن و ضرورت نگهداری در محدوده دمایی خاص، محدودیت هایی در نگهداری و حمل و نقل آن وجود دارد. خون باید در مکانی خنک مانند یخچال نگهداری شود. بنابراین، برای حملونقل آن به یخچال های مخصوص نیاز داریم. همچنین باید در نظر داشت که حمل و نقل خون در شرایط بحران شدید، یک مسئله نگران کننده است؛

برای برنامه ریزی مدیریت سیستم خون، ابتدا باید تأثیر بلا بر عناصر اصلی را شناسایی کرده و سپس برای اقدامات پیشگیرانه برنامه ریزی کنیم. با توجه به موارد ذکر شده، طراحی یک زنجیره تأمین خون کافی و مناسب قبل از وقوع بلا ضروری است.

هدف این مقاله، طراحی یک شبکه یکپارچه زنجیره تأمین خون برای دستیابی به بهترین عملکرد در سیستم بهداشت و درمان است.

۲- مرور ادبیات :

مقالات موجود در زمینه عملیات امداد رسانی را میتوان در چند موضوع دسته بندی کرد. بیشتر آن ها در حوزه زنجیره تأمین امداد کالا ها هستند و تعداد کمتری به موضوع خون پرداخته اند. در این بخش، ابتدا به مقالاتی اشاره میکنیم که در مورد خون، انواع گروه های خونی و مدیریت سیستم خون هستند. همچنین، مطالعات مرتبط با زنجیره تأمین خون اغلب در شرایط عادی و نه در شرایط بحران یا اضطراری انجام شده اند. سپس، به برخی از مقالات اخیر و مرتبط در این زمینه اشاره خواهیم کرد. گروه های خونی "ABO" مواد آنتی ژنیک، ژنتیکی و پلیمورفیک هستند که بر روی سطح گلبول های قرمز خون [1] و برخی دیگر از سلول ها و بافت ها ایجاد میشوند . در سال ۱۹۰۰، کارل لندشتاینر گروههای خونی "ABO" را کشف کرد. گروههای خونی "ABO" و "Rh" مهم ترین سیستم های گروه خونی انسان با اهمیت اصلی در پزشکی انتقال خون هستند. گروه های خونی با اپیتوپ های کربوهیدراتی کوچک مشخص می شوند که به وجود یا عدم وجود ژن "A" و "B" واقع در کروموزوم 9q34 بستگی دارد. سیستم گروه خونی "ABO" شامل چهار فنوتیپ اصلی ""A"، "B"، O"" و "AB" است. ۸ گروه خونی اصلی وجود دارد: +A، -A، +B، -B، +AB، -AB، +O، -O. یک مدیریت خون کارآمد که در عمل قابل اجرا باشد، باید برای محصولات خونی متعدد بررسی شود؛ زیرا این امر شامل ۸ گروه خونی و گروهبندی رزوس است که همگی باید به طور همزمان کنترل شوند.

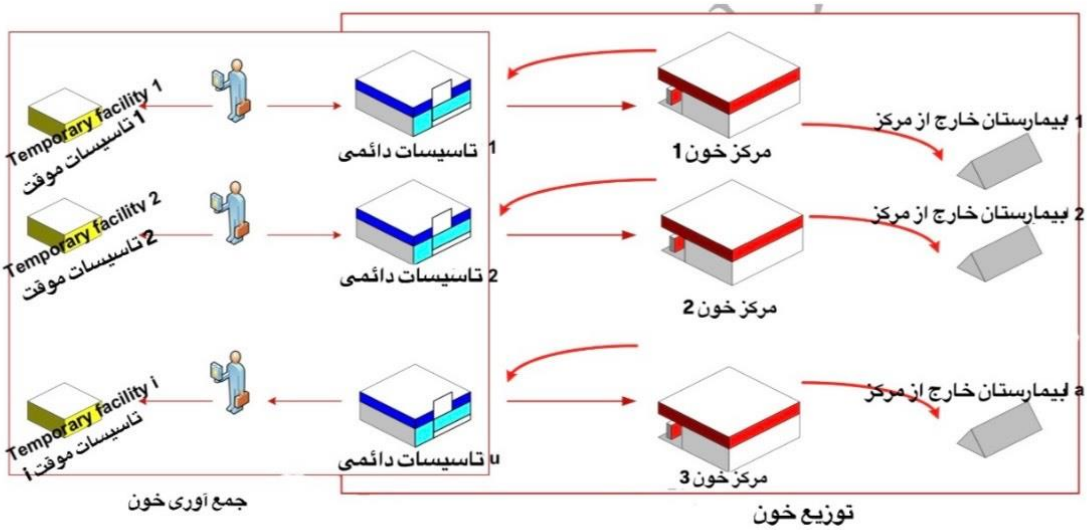
[1] Red blood cells

۳- بیان مسئله:

۳-۱- شرح مسئله در این مقاله، مسئله اصلی، تأمین و توزیع خون به شیوه ای کافی و به موقع است، به طوری که هزینه ها کاهش یافته و در عین حال، کمبود واحد های خونی تا حد امکان به حداقل برسد. شکل ۱ نمایی کلی از این مسئله را نشان می دهد. به طور کلی، شبکه در این مقاله شامل تأسیسات مختلفی است. خون میتواند در تأسیسات انتقال خون اهدا شود. این تأسیسات دو نوع هستند:

الف) تأسیسات انتقال خون موقت: با ظرفیت کم و قابلیت استقرار در مکان های مختلف، مانند اتوبوس های اهدای خون.

ب) تأسیسات انتقال خون دائمی: با ظرفیت بیشتر و مکان ثابت، مانند بیمارستان ها و کلینیک ها. معمولاً چندین تأسیسات دائمی در هر منطقه وجود دارد و در صورت نیاز می توان برای ایجاد تأسیسات جدید تصمیم گیری کرد.



شکل ۱. نمای کلی مشکل

۳-۲- مدل ریاضی

۳-۲-۱- نماد گذاری [2]

[2] Notations

نمادگذاری زیر برای فرمولبندی مدل استفاده میشود:

شاخصها [3]:

i: مکان بالقوه برای تأسیسات موقت خون (blood temporary facility)
j: مکان بالقوه برای تأسیسات دائمی خون (permanent facility)
k: مکان تأسیسات دائمی خون موجود (existent permanent facility)
a: مکان بالقوه بیمارستان صحرایی (outdoor hospital)
b: مرکز خون موجود (existent blood center)
l: مکان بالقوه برای مرکز خون (potential blood center)
t: دوره زمانی (time period)

متغیر های تصمیم گیری :

CH_{its} : نشان‌دهنده مقدار خون جمع‌آوری‌شده در مرکز موقت i در دوره زمانی t تحت سناریوی s

BH_{uts} : نشان‌دهنده مقدار خون جمع‌آوری‌شده در مرکز دائمی u در دوره زمانی t تحت سناریوی s

QT_{izts} : نشان‌دهنده میزان خون منتقل‌شده از مرکز موقت i به مرکز خونz در دوره زمانی t تحت سناریوی s

QC_{uzts} : نشان‌دهنده مقدار خون منتقل‌شده از مرکز دائمیu به مرکز خونz در دوره زمانی t تحت سناریوی s

TH_{znts} : نشان‌دهنده مقدار خون منتقل‌شده از مرکز خونz به مرکز درمانی n در دوره زمانی t تحت سناریوی s

IN_{zts} : نشان‌دهنده موجودی خون درمرکز خونz در پایان دوره زمانیt

Ib_{ts} : نشان‌دهنده کمبود خون در دوره زمانی t تحت سناریوی s

X_{is} : اگر مرکز موقت در محل i تحت سناریوی s باشد ،متغیر دوگانه مساوی با ۱ است ،در غیر اینصورت ۰

Y_j : اگر مرکز دائمی جدید تثبیت شده در محل j باشد۱ ،در غیر اینصورت ۰

W_l : اگر مرکز خون جدید تثبیت شده در محل j باشد۱ ،در غیر اینصورت ۰

[3] Indices

اگر بیمارستان صحرایی در محل a تحت سناریوی s باز باشد ۱، در غیر اینصورت ۰ : F_{as}

۳-۲-۲-صورت‌بندی توابع هدف

در شرایط ایده‌آل، مطلوب آن است که تعداد کافی از مراکز تأسیس و فعال شوند و میزان مناسبی از خون ذخیره گردد، به‌گونه‌ای که هیچ‌گونه کمبود خون یا کمبود مرکز ارائه‌دهنده خدمات درمانی رخ ندهد. با این حال، همواره محدودیت‌هایی نظیر محدودیت‌های بودجه‌ای، ظرفیتی و سایر قیود عملیاتی وجود دارد. ازاین‌رو، برنامه‌ریزی باید به‌گونه‌ای انجام گیرد که ضمن تضمین تأمین مناسب، هزینه‌ها نیز تا حد امکان به حداقل برسند.

مدل پیشنهادی با هدف تعیین تصمیم‌های مرتبط با زنجیره تأمین خون در هر سناریو ارائه شده است؛ به‌گونه‌ای که مجموع هزینه‌های شبکه به حداقل رسیده و هم‌زمان میزان کمبود خون نیز کمینه شود. صورت‌بندی ریاضی این اهداف در ادامه ارائه می‌شود.

$$\text{Min } z1_s = \sum_i X_{is} f1_{is} + \sum_j f2_j Y_j + \sum_a f3_s F_{as} + \sum_l f4_l W_l +$$
$$\sum_t \left[\text{Cost} \times \left(\sum_i \sum_z disct_{iz} \left[\frac{\sum_i QT_{izts}}{CV} \right] + \sum_u \sum_z discc_{uz} \left[\frac{\sum_u QC_{uzts}}{CV} \right] \right) \right] +$$
$$Co \times \left(\sum_i \sum_z \sum_t QT_{izts} + \sum_u \sum_z \sum_t QC_{uzts} \right) + Ih \times \sum_z \sum_t IN_{zts} +$$
$$\sum_t \left[\text{Cost} \times \left(\sum_n \sum_z discc_{nz} \left[\frac{\sum_z TH_{znts}}{CV} \right] \right) \right]$$

نخستین تابع هدف، حداقل‌سازی هزینه‌ها است. این هزینه‌ها شامل موارد زیر می‌شود: هزینه راه‌اندازی مراکز موقت، هزینه تأسیس مراکز دائمی، هزینه افتتاح بیمارستان‌های صحرایی، هزینه ایجاد مراکز خون، هزینه جمع‌آوری واحدهای خون از مراکز موقت و دائمی و انتقال آن‌ها به مراکز خون، هزینه انجام آزمایش‌ها و فرآوری خون در مراکز خون، هزینه نگهداری واحدهای خون، و در نهایت هزینه توزیع واحدهای خون از مراکز خون به مراکز ارائه‌دهنده خدمات، شامل بیمارستان‌های صحرایی و مراکز دائمی.

$$\text{Min } Z2_s = \sum_t \frac{IB_{ts}}{dem_{ts}}$$

تابع هدف دوم به حداقل‌سازی کمبود خون در دوره‌های زمانی مختلف اختصاص دارد. ازاین‌رو، در مدل حاضر تلاش می‌شود نسبت بیشینه کمبود خون به میزان تقاضا در دوره‌های زمانی گوناگون تا حد امکان کاهش یابد. به بیان دیگر، هدف آن است که بیشترین میزان کمبود نسبت به تقاضای موجود در هر دوره زمانی به حداقل برسد.

۳-۲-۳- قیود

با توجه به ظرفیت محدود مراکز خون در انجام آزمایش و فرآوری، ظرفیت محدود مراکز موقت و دائمی در زمینه اهدای خون، درمان و نگهداری خون، و همچنین ظرفیت محدود وسایل نقلیه برای جمع‌آوری و توزیع خون، با یک‌سری قیود روبه‌رو هستیم. افزون بر این، در تخصیص مراکز اهدای خون به مراکز خون در رده تأمین، و تخصیص مراکز خون به مراکز درمانی در رده توزیع، با در نظر گرفتن فاصله میان این مراکز، محدودیت‌هایی وجود دارد. قیود مدل به شرح زیر هستند.

$$CH_{its} \le Capa_{its} \qquad \forall i,t,s \qquad (1)$$

$$CH_{its} \le M \times X_{is} \qquad \forall i,t,s \qquad (2)$$

$$BH_{uts} \le Capb_{uts} \qquad \forall u,t,s \qquad (3)$$

$$BH_{uts} \le M \times Y_{j} \qquad \forall u \in j,t,s \qquad (4)$$

$$CH_{its} = \sum_{z} QT_{izts} \qquad \forall i,t,s \qquad (5)$$

$$BH_{uts} = \sum_{z} QC_{uzts} \qquad \forall u,t,s \qquad (6)$$

$$\sum_{i} QT_{izts} + \sum_{u} QC_{uzts} \le Capd_{zts} \qquad \forall z,t,s \qquad (7)$$

$$QT_{izts} \le M \times W_{l} \qquad \forall i,z \in l,t,s \qquad (8)$$

$$QC_{uzts} \le M \times W_{l} \qquad \forall u,z \in l,t,s \qquad (9)$$

$$QT_{izts} \le M \times X_{is} \qquad \forall i,z,t,s \qquad (10)$$

$$QC_{uzts} \le M \times Y_{j} \qquad \forall u \in j,z,t,s \qquad (11)$$

$$\left(\left(\sum_{i} QT_{izts} + \sum_{u} QC_{uzts}\right) \times \beta\right) + IN_{zt-1,s} - \sum_{n} TH_{znts} = IN_{zts} \qquad \forall z,t,s \qquad (12)$$

$$\sum_{z} TH_{znts} \le Capf_{ns} \qquad \forall n,t,s \qquad (13)$$

$$\sum_{z}\sum_{n} TH_{znts} + IB_{ts} = dem_{ts} \times \alpha \qquad \forall t,s \qquad (14)$$

$$TH_{znts} \le M \times W_{l} \qquad \forall z \in l,n,t,s \qquad (15)$$

$$TH_{znts} \le M \times Y_{j} \qquad \forall z,n \in j,t,s \qquad (16)$$

$$TH_{znts} \le M \times F_{as} \qquad \forall z,n \in a,t,s \qquad (17)$$

$$\sum_{z}\sum_{n} TH_{znts} \ge \lambda \times (dem_{ts} \times \alpha) \qquad \forall n,t,s \qquad (18)$$

$$X_{is}, Y_{j}, W_{l}, F_{as} \in [0,1] \qquad (19)$$

$$CH_{its}, BH_{uts}, QT_{izts}, QC_{uzts}, TH_{znts}, IN_{zts}, IB_{ts} \ge 0 \;\&\; \text{int} \qquad (20)$$

قید (۱) بیانگر ظرفیت تأسیسات موقت i است.

قید (۲) تضمین می‌کند که اهداکنندگان تنها در تأسیسات موقتِ فعال i قادر به اهدای خون باشند.

قید (۳) ظرفیت تأسیسات دائمی uرا بیان می‌کند.

قید (۴) تضمین می‌کند که اهداکنندگان فقط در تأسیسات دائمیِ تأسیس‌شده j امکان اهدای خون داشته باشند.

قیود (۵) و (۶) تضمین می‌کنند که مقدار خون جمع‌آوری‌شده از تأسیسات، برابر با مقدار خونی باشد که به مراکز خون منتقل می‌شود.

قید (۷) ظرفیت مراکز خون را بیان می‌کند.

قیود (۸) و (۹) تضمین می‌کنند که خون جمع‌آوری‌شده از تأسیسات موقت و دائمی، به‌ترتیب، تنها به مرکز خونِ تأسیس‌شده l تخصیص داده شود.

قید (۱۰) تضمین می‌کند که خون تنها در صورتی به مراکز خون ارسال شود که تأسیسات موقت i افتتاح شده باشد.

قید (۱۱) تضمین می‌کند که ارسال خون به مراکز خون تنها در صورتی انجام گیرد که تأسیسات دائمی j تأسیس شده باشد.

قید (۱۲) سطح موجودی را در پایان هر دوره تعیین می‌کند که برابر است با مقدار خون فرآوری‌شده به‌علاوه موجودی دوره قبل، منهای مقدار خونی که به مراکز درمانی منتقل شده است.

قید (۱۳) ظرفیت مراکز درمانی را بیان می‌کند.

قید (۱۴) مشخص می‌کند که تقاضا یا از سوی مراکز خون پاسخ داده می‌شود یا با کمبود مواجه خواهد شد.

قید (۱۵) نشان می‌دهد که انتقال خون از مرکز خون l به مراکز درمانی تنها در صورتی امکان‌پذیر است که مرکز خون l تأسیس شده باشد.

قیود (۱۶) و (۱۷) تضمین می‌کنند که انتقال خون از مراکز خون به بیمارستان‌های صحرایی a و تأسیسات دائمی j تنها در صورتی انجام شود که به‌ترتیب بیمارستان‌های صحرایی a افتتاح و تأسیسات دائمی j تأسیس شده باشند.

قید (۱۸) بیان می‌کند که مقدار تقاضای پاسخ‌داده‌شده باید از درصد مشخصی از کل تقاضا بیشتر باشد.

قیود (۱۹) و (۲۰) دامنه متغیرهای تصمیم را تعیین می‌کنند.

۴. بهینه‌سازی مقاوم

بیشتر مسائل بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی ریاضی در دنیای واقعی با عدم قطعیت داده‌ها مواجه هستند.

الف) برخی داده‌ها در زمان حل مسئله در دسترس نیستند.

ب) برخی داده‌ها با دقت کامل قابل اندازه‌گیری نیستند.

ج) گاهی متغیرهای تصمیم دقیقاً همان‌گونه که محاسبه شده‌اند، در عمل اجرا نمی‌شوند.

۱-۴. بهینه‌سازی مقاوم مبتنی بر سناریو

اصطلاح «بهینه‌سازی مقاوم» در اواسط دهه ۱۹۹۰ رواج یافت. مولوی و همکاران، توصیفی از داده‌ها بر اساس سناریو ارائه کردند و با در نظر گرفتن سطح مشخصی از ریسک ــ که توسط تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌شود ــ مقدار جریمه‌ای را برای واریانس راه‌حل بهینه در هر سناریو لحاظ کردند [۲۳]. برای مفهوم مقاومت در رویکرد مولوی دو تعریف ارائه شده است.

الف) مقاومتِ راه‌حل[4] :به راه‌حلی اطلاق می‌شود که در تمام سناریوها تقریباً بهینه باقی بماند.

ب) مقاومتِ مدل[5] :به راه‌حلی گفته می‌شود که در تمامی سناریوها تقریباً قابل اجرا باشد.

مدل زیر، یک چارچوب عمومی از رویکرد بهینه‌سازی مقاوم را ارائه می‌کند که در ادامه تشریح می شود.

$$
\begin{aligned}
&Min\ c^t x + d^t y \\
&s.t. \\
&Ax = b \\
&Bx + Cy = e \\
&x, y \geq 0
\end{aligned}
$$

به دلیل عدم قطعیت موجود در پارامترها، ممکن است مدل در برخی سناریوها غیرقابل اجرا شود. در این حالت، δsنشان‌دهنده میزان عدم امکان‌پذیری مدل در سناریوی s است. اگر مدل در یک سناریو قابل اجرا باشد، مقدارδs برابر صفر

[4] Solution robustness
[5] Model robustness

خواهد بود؛ در غیر این صورت،δ_s مقدارمثبتی به خود می‌گیرد. بر این اساس، مدل بهینه‌سازی مقاوم مبتنی بر رویکرد مولوی و همکاران به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود.

$$
\begin{aligned}
&Min\ \sigma(x, y_1, y_2, \ldots, y_s) + \omega\rho(\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_s) \\
&s.t. \\
&Ax = b \\
&B_s x + C_s y = e_s \qquad \forall s \in S \\
&x, y \geq 0
\end{aligned}
$$

در تابع هدف، جمله‌ی نخست بیانگر پایداری راه‌حل و جمله‌ی دوم نمایانگر پایداری مدل است. هنگامی که مسئله در قالب چند سناریو بررسی می‌شود، تابع هدف $\xi = c^t x + d^t y$ به‌صورت یک متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شود که اندازه‌گیری آن در هر سناریو به شکل زیر تعریف می‌گردد: $\xi_s = c_s^t x + d_s^t y_s$ و احتمال وقوع هر سناریو برابر با p_s است.

به منظور دستیابی به راه‌حلی نزدیک به مقدار بهینه‌ی مقاوم، می‌توان جمله‌ی نخست تابع هدف را بر اساس امید ریاضی (ارزش انتظاری) و واریانس آن بازنویسی کرد. از سوی دیگر، برای دستیابی به راه‌حلی واقعاً مقاوم، می‌توان ریسک را با بهینه‌سازی امید ریاضی تابع هدف در هر سناریو و نیز با کمینه‌سازی واریانس تابع هدف میان سناریوهای مختلف کاهش داد. بر پایه‌ی این رویکرد، تابع هدف را می‌توان در قالب امید ریاضی و واریانس به صورت زیر تبدیل و بیان نمود.

$$
\sigma(.) = \sum_{s \in S} P_s \xi_s + \gamma \sum_{s \in S} P_s \left(\xi_s - \sum_{s \in S} P_s \xi_s \right)^2
$$

پارامتر w ، درجه‌ی ریسک‌گریزی را بیان می‌کند. همان‌طور که مشخص است، عبارت یادشده شامل یک جمله‌ی درجه‌ی دوم است. یو و لی، برای ساده‌سازی ساختار مدل، آن را به قالبی ساده‌تر تبدیل کرده‌اند؛ این نسخه‌ی اصلاح‌شده در منبع [۲۴] گزارش شده است.

$$\sigma(.) = \sum_{s \in S} P_s \xi_s + \gamma \sum_{s \in S} P_s \left| \xi_s - \sum_{s \in S} P_s \xi_s \right|$$

تابع هدف در حالت اولیه همچنان غیرخطی باقی می‌ماند. یو و لی برای خطی‌سازی آن، یک محدودیت اضافی و یک متغیر انحرافی نامنفی به ازای هر سناریو معرفی کردند. در نتیجه، ساختار مدل به شکل زیر بازنویسی و تبدیل می‌شود:

$$Min \sum_{s \in S} P_s \xi_s + \gamma \sum_{s \in S} P_s \left[\left(\xi_s - \sum_{s \in S} P_s \xi_s \right) + 2\theta_s \right] + 2\theta_s$$

$$S.t.$$

$$\xi_s - \sum_{s \in S} P_s \xi_s + \theta_s \geq 0 \geq 0 \qquad \forall s \in S$$

$$\theta_s \geq 0 \qquad \forall s \in S$$

چنانچه شرط $\xi_s - \sum_s p_s \xi_s \geq 0$ برقرار باشد، فرایند کمینه‌سازی ایجاب می‌کند که مقدار $\theta_s=0$ انتخاب شود. در این حالت، تابع هدف به شکل $\sum_s p_s \xi_s + \gamma \sum_s p_s (\xi_s - \sum_s p_s \xi_s)$ درخواهد آمد. از سوی دیگر، $\xi_s - \sum_s p_s \xi_s = \theta_s$ در نظر گرفته شود، تابع هدف به صورت $\sum_s p_s \xi_s + \gamma \sum_s p_s (\sum_s p_s \xi_s - \xi_s)$ بیان می‌شود.

بنابراین، با استفاده از این روش، فرم نهایی و خطی تابع هدف به دست می‌آید که در ادامه ارائه می‌شود.

$$Min \sum_{s\in S} P_s\xi_s + \gamma \sum_{s\in S} P_s \left[\left(\xi_s - \sum_{s\in S} P_s\xi_s \right) + 2\theta_s \right] + \omega \sum_{s\in S} P_s\delta_s$$

$$s.t.$$

$$Ax = b$$

$$x \geq 0,\ y_s \geq 0 \qquad \forall s \in S$$

$$\xi_s - \sum_{s\in S} P_s\xi_s + \theta_s \geq 0 \qquad \forall s \in S$$

$$\theta_s \geq 0 \qquad \forall s \in S$$

۲-۴- به‌کارگیری این رویکرد در مدل پژوهش

در مدل ارائه‌شده، مجموعه‌ای از پارامترهای نامطمئن وجود دارد؛ از جمله میزان تقاضای مناطق آسیب‌دیده، مقدار کمبودها و سطح موجودی واحدهای خون در هر دوره، و نیز هزینه‌های مربوط به راه‌اندازی و ایجاد مراکز، که همگی متأثر از شرایط اضطراری ناشی از وقوع بحران هستند. همان‌طور که در بخش پیشین توضیح داده شد، بهینه‌سازی مقاوم یکی از کارآمدترین و پرکاربردترین رویکردها در مواجهه با این‌گونه عدم‌قطعیت‌هاست و ساختار آن نیز پیش‌تر تشریح شده است. در این بخش، این ساختار در مدل پیشنهادی به کار گرفته می‌شود. بر اساس این رویکرد، تابع هدف مدلی که ارائه می‌شود به شکل جدیدی سازمان می‌یابد و افزون بر آن، برای هر تابع هدف یک محدودیت اضافی جهت برقراری سازگاری اعمال می‌گردد. در نهایت، توابع هدف پیشنهادی به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$Min\ \mathrm{FF1}=\sum_s P_s Z1_s+\gamma\sum_s P_s\left(Z1_s-\sum_s P_s Z1_s+2\theta 1_s\right)+\omega\sum_s\sum_t P_s IB_{ts}$$

$$Min\ \mathrm{FF2}=\sum_s P_s Z2_s+\gamma\sum_s P_s\left(Z2_s-\sum_s P_s Z2_s+2\theta 2_s\right)$$

همچنین، مطابق تشریح انجام‌شده در بخش گذشته، مجموعهٔ زیر از محدودیت‌ها ـ شامل محدودیت‌های (۱) تا (۲۰) و موارد تکمیلی ـ به مدل افزوده خواهد شد.

$$Z1_s-\sum_s P_s Z1_s+\theta 1_s\geq 0 \qquad \forall s \qquad (21)$$

$$Z2_s-\sum_s P_s Z2_s+\theta_{2s}\geq 0 \qquad \forall s \qquad (22)$$

$$\theta 1_s,\theta_{2s}\geq 0 \qquad (23)$$

۵. مسئله چندهدفه و روش حل

مسائل چندهدفه شامل چندین تابع هدف هستند که لزوماً در یک راستا قرار ندارند و در بسیاری از موارد میان آن‌ها تعارض وجود دارد. در چنین شرایطی، بهینه‌سازی یک تابع هدف ممکن است موجب تضعیف یا بدتر شدن تابع هدف دیگر شود؛ ازاین‌رو دستیابی به بهینه‌ی همزمان برای همه اهداف عملاً امکان‌پذیر نیست. بنابراین باید به دنبال راه‌حلی بود که تعادلی رضایت‌بخش میان اهداف مختلف برقرار سازد.

۵-۱. رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی

مبنای روش برنامه‌ریزی آرمانی کمینه‌سازی انحرافات نامطلوب از سطوح هدف است. در این روش، برای هر تابع هدف مقدار یا سطحی به عنوان سطح مطلوب یا سطح انتظار تعیین می‌شود و سپس تلاش می‌گردد مجموع انحراف‌ها از این سطوح تا حد امکان کاهش یابد.

در برخی موارد لازم است متغیرهای انحرافی که در یک سطح اولویت قرار دارند، وزن‌دهی شوند تا میزان اهمیت نسبی آن‌ها در مدل مشخص گردد. چارچوب کلی مدل برنامه‌ریزی آرمانی وزن‌دار به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{n} W_i \left(d_i^+ + d_i^-\right)$$

$$s.t:$$

$$h_k(X) = (\leq or \geq) 0 \qquad k = 1,2,...,q$$

$$f_i(X) - d_i^+ + d_i^- = g_i \qquad i = 1,2...,n$$

$$d_i^+, d_i^- \geq 0 \qquad i = 1,2...,n$$

در اهداف سودمحور[6]، باید انحرافات منفی حداقل شوند؛ در مقابل، در اهداف هزینه‌محور[7]، انحرافات مثبت باید کمینه گردند.

در این چارچوب:$h_k(x)$نشان‌دهنده قید kام در سیستم است.

$F_i(x)$بیانگر هدف iام است.g_i به عنوان سطح مطلوب یا سطح انتظار برای هدف i تعریف می‌شود. d_{i^+} معرف انحراف مثبت از مقدار هدف i است (تحقق بیش از سطح هدف). d_{i^-} بیانگر انحراف منفی از مقدار هدف i است (تحقق کمتر از سطح هدف).

[6] **Benefit type goals**
[7] **Cost type goals**

$$d_i^- = \begin{cases} g_i - f_i(X) & \text{if } f_i(X) < g_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$d_i^+ = \begin{cases} f_i(X) - g_i & \text{if } f_i(X) > g_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

ضرایب W_i مقادیر وزن‌دهی مثبت هستند که میزان اهمیت نسبی اهداف را تعیین می‌کنند و شرط نرمال‌ساز $\sum W_i=1$ در مورد آن‌ها برقرار است.

در به‌کارگیری این روش برای مدل حاضر، دو تابع هدف اصلی در نظر گرفته شده است:

برای حل مدل پیشنهادی از روش برنامه‌ریزی آرمانی بهره گرفته شده است. ساختار و مبانی این روش پیش‌تر تشریح شد و اکنون از همان چارچوب برای مدل‌سازی مسئله استفاده می‌شود. بر اساس مطالب بیان‌شده، فرم ریاضی مدل مسئله ارائه‌شده در این پژوهش به صورت زیر تنظیم می‌گردد:

$$\text{Min } Z = W_1\left(\frac{d_1^+ + d_1^-}{g_1}\right) + W_2\left(\frac{d_2^+ + d_2^-}{g_2}\right)$$

s.t:

constraints (1)- (23) and

$$FF_1 - d_1^+ + d_1^- = g_1 \qquad (24)$$

$$FF_2 - d_2^+ + d_2^- = g_2 \qquad (25)$$

$$d_1^+, d_1^-, d_2^+, d_2^- \geq 0 \qquad (26)$$

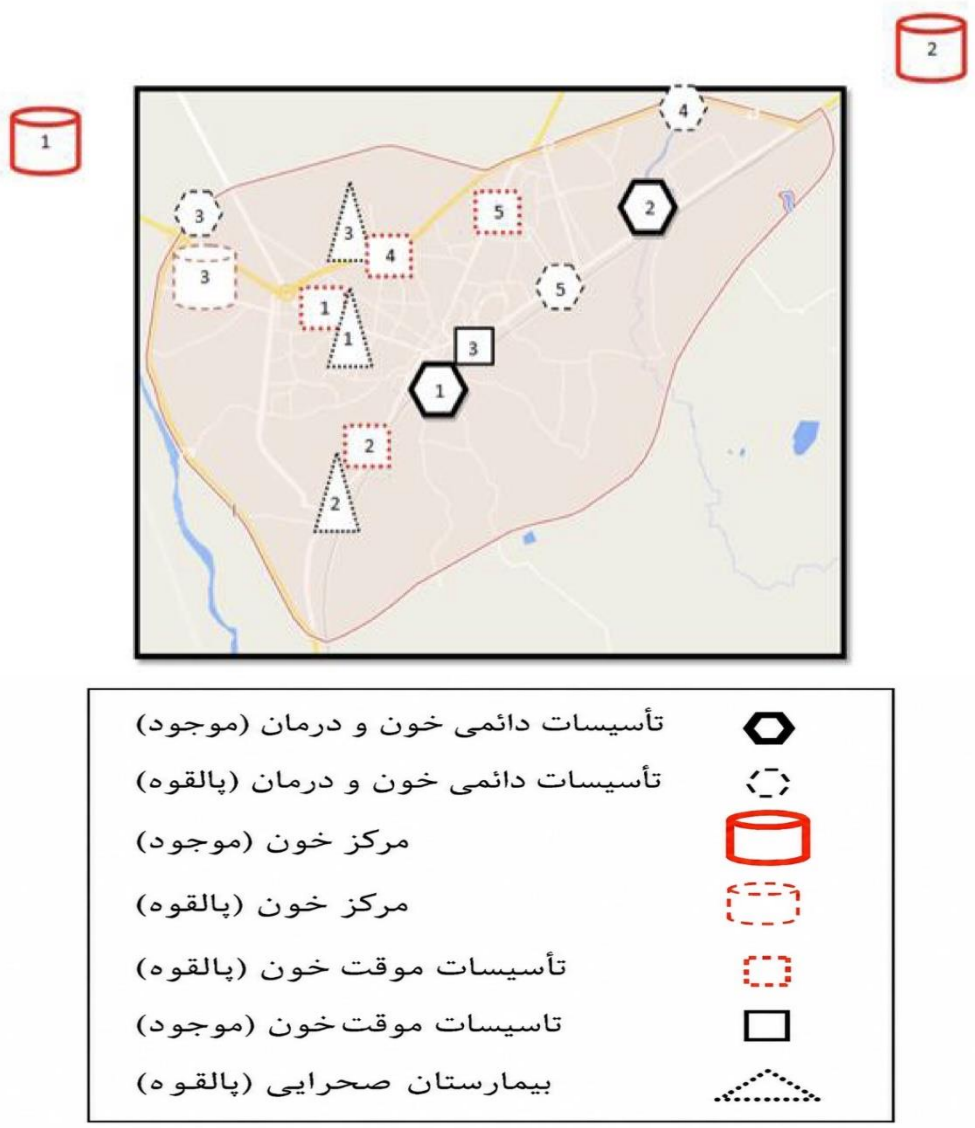
۶. مطالعه موردی

۶-۱. معرفی مطالعه موردی

ایران از جمله کشورهای بسیار زلزله‌خیز جهان به شمار می‌آید و در سال‌های اخیر زمین‌لرزه‌های مخرب متعددی را تجربه کرده است. یکی از چالش‌های اساسی در حین وقوع بحران و همچنین در دوره پس از آن، تأمین به‌موقع و کافی خون برای مراکز درمانی است. در این پژوهش، یک مدل ریاضی دوهدفه به منظور طراحی یک شبکه بهینه برای تأمین، پردازش و توزیع خون ارائه شده است. هدف این مدل، کمینه‌سازی هزینه‌ها و کاهش کمبود خون در دوره‌های زمانی مختلف پیش از وقوع و پس از وقوع بحران است.

۶-۲. پارامترهای ورودی

در این مسئله، همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، شبکه شامل پنج مرکز موقت خون‌گیری، پنج مرکز دائمی خون‌گیری، سه مرکز انتقال خون و پنج بیمارستان صحرایی است. با توجه به لزوم آمادگی برای شرایط بحران و افزایش ناگهانی تقاضای خون، هدف این پژوهش تعیین تعداد و مکان بهینه استقرار تسهیلات اضافی به منظور پاسخگویی مؤثر به نیازهای اضطراری است.



راهنمای شکل

شکل ۲. نقشه شهر قائم‌شهر همراه با تسهیلات موجود و مکان‌های بالقوه استقرار تسهیلات در این مطالعه

جدول ۲:هزینه ایجاد و راه اندازی مراکز موقت و دائم خون و درمان در سناریو های مختلف(تومان)

کلینیک اسد الله پور(بالقوه)	بیمارستان نیما (بالقوه)	بیمارستان قائم (بالقوه)	بیمارستان ولیعصر (موجود)	بیمارستان رازی (موجود)	مراکز دائمی خون و درمان
۱۰.۰۰۰.۰۰۰	۸۰۰.۰۰۰.۰۰۰	۳۰۰.۰۰۰.۰۰۰	۰	۰	هزینه ایجاد
خیابان خزر (بالقوه)	خیابان کوچک سرا (بالقوه)	خیابان کارگر (موجود)	خیابان صالحی (بالقوه)	خیابان امام خمینی (بالقوه)	مراکز موقت خون
۳۰.۰۰۰.۰۰۰	۳۰.۰۰۰.۰۰۰	۰	۳۰.۰۰۰.۰۰۰	۳۰.۰۰۰.۰۰۰	سناریو۱
۲۵.۰۰۰.۰۰۰	۲۵.۰۰۰.۰۰۰	۰	۲۵.۰۰۰.۰۰۰	۲۵.۰۰۰.۰۰۰	سناریو۲
۲۰.۰۰۰.۰۰۰	۲۰.۰۰۰.۰۰۰	۰	۲۰.۰۰۰.۰۰۰	۲۰.۰۰۰.۰۰۰	سناریو۳

جدول۳:فاصله بین مراکزموقت خون و مراکز خون(کیلومتر)

		مرکز خون		
		شهر بابل (موجود)	شهر ساری (موجود)	شهر قائم شهر (بالقوه)
مراکز موقت خون	۱	۲۰	۲۵	۵
	۲	۲۲	۲۶	۵/۵
	۳	۲۱	۲۲	۵
	۴	۲۲	۲۴	۵
	۵	۲۲	۲۴	۶

جدول ۴ :فاصله بین مراکز درمان و مراکز خون(کیلومتر)

		مرکز خون		
		۱	۲	۳
مرکز درمان	بیمارستان رازی (موجود)	۲۱	۲۳	۴/۵
	بیمارستان ولیعصر(موجود)	۲۵	۲۰	۹
	بیمارستان قائم(بالقوه)	۲۱	۲۶	۰
	بیمارستان نیما(بالقوه)	۲۲	۲۳	۸
	کلینیک اسد الله پور(موجود)	۲۵	۲۲	۸/۵
	بیمارستان صحرایی(بالقوه)	۱۸	۲۳	۵
	بیمارستان صحرایی(بالقوه)	۲۱	۲۵	۵/۵
	بیمارستان صحرایی(بالقوه)	۲۰	۲۴	۵

با مراجعه به داده‌های تاریخی مربوط به زلزله‌های رخداده در گذشته و با در نظر گرفتن تأثیر شدت زلزله بر میزان تخریب و تقاضای ایجادشده، در این پژوهش سه سناریوی محتمل به شرح زیر تعریف شد:

کمتر از ۵ ریشتر: در این سطح از شدت، هیچ مصدومی که نیازمند خون یا برنامه‌ریزی در شبکه تأمین خون باشد وجود ندارد؛ ازاین‌رو این حالت به عنوان سناریو در نظر گرفته نشد.

بین ۵ تا ۵٫۵ ریشتر: این سطح از زلزله نسبتاً شدید تلقی می‌شود و با بروز تعدادی مصدوم همراه است؛ بنابراین نیاز به برنامه‌ریزی برای شبکه تأمین و توزیع خون دارد. به همین دلیل، این حالت به عنوان **سناریوی نخست** در نظر گرفته شد.

بین ۵٫۵ تا ۶ ریشتر: این زلزله از شدت بالاتری برخوردار است و مستلزم برنامه‌ریزی مناسب و دقیق برای مدیریت منابع خون می‌باشد؛ ازاین‌رو به عنوان **سناریوی دوم** در نظر گرفته شد.

بین ۶ تا ۶٫۵ ریشتر: این حالت بیانگر زلزله‌ای با شدت بسیار بالا و تعداد زیاد مصدومان است که مستلزم طراحی و برنامه‌ریزی یک شبکه توانمند تأمین خون می‌باشد؛ بنابراین این وضعیت به عنوان **سناریوی سوم** لحاظ گردید.

به طور کلی، احتمال وقوع بلایای با شدت کمتر، بیشتر از رخدادهای با شدت بالاتر است. ازاین‌رو، با استناد به زلزله‌های رخداده در این منطقه و با بهره‌گیری از نظر خبرگان، احتمال وقوع هر یک از سناریوها و میزان تقاضای مربوط به آن‌ها برآورد شد.

جدول ۵: تقاضای افراد مصدوم در سناریوهای مختلف (واحد:نفر)

دوره زمانی	1	2	3	4
سناریوی ۱	500	800	1000	1000
سناریوی ۲	600	900	1200	1200
سناریوی ۳	700	1000	1400	1400

جدول۶: ظرفیت مراکز موقت خون گیری در سناریوی نخست

	دوره زمانی ۱	دوره زمانی ۲	دوره زمانی ۳	دوره زمانی۴
مرکز موقت ۱	90	180	270	630
مرکز موقت ۲	55	110	165	385
مرکز موقت ۳	90	180	270	630
مرکز موقت ۴	55	110	165	385
مرکز موقت ۵	20	40	60	140

جدول ۷:ظرفیت مراکز دائمی خون گیری در سناریوی نخست

	دوره زمانی ۱	دوره زمانی ۲	دوره زمانی ۳	دوره زمانی ۴
مرکز دائمی ۱	80	160	240	560
مرکز دائمی۲	80	160	240	560
مرکز دائمی۳	75	150	225	525
مرکز دائمی۴	70	140	210	490
مرکز دائمی ۵	70	140	210	490

جدول۸: ظرفیت فراوری خون در مراکز انتقال خون

مرکز انتقال خون	دوره زمانی۱	دوره زمانی۲	دوره زمانی۳	دوره زمانی ۴
۱	250	500	750	1750
۲	250	500	750	1750
۳	180	360	540	1260

نتایج ۳-۶

همان‌گونه که در بخش‌های پیشین بیان شد، این مسئله یک مدل دو هدفه با دو هدف متضاد است: حداقل‌سازی هزینه‌ها و حداقل‌سازی کمبود خون. در این راستا، دو زیرمسئله به صورت جداگانه حل شدند. نتایج حاصل نشان داد که مقدار تابع هدف اول (حداقل‌سازی هزینه‌ها) برابر با ۱,۰۳۱,۲۴۳,۰۰۰ و مقدار تابع هدف دوم (حداقل‌سازی کمبودها) برابر با ۰.۰۶ است. با استفاده از این دو مقدار به عنوان ارزش هدف نخست (g1) و دوم (g2)، و همچنین با تخصیص وزن به هریک از توابع هدف متناسب با درجه اهمیت آن ها_به طوری که برای هدف اول وزن ۰.۴۵ و برای هدف دوم وزن ۰.۵۵ در نظر گرفته شده است_مسئله از یک مسئله چند هدفه به یک مسئله تک هدفه تبدیل می شود.

علت انتخاب این اوزان را در بخش‌های بعدی تشریح خواهیم کرد. همچنین، به‌دلیل به‌کارگیری روش برنامه‌ریزی آرمانی و تبدیل مسئله به یک مسئله تک‌هدفه، برای هر تابع هدف، یک محدودیت جدید علاوه بر محدودیت‌های نظام‌مند موجود به مدل افزوده می‌شود. پس از حل مسئله با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی و ادغام دو مسئله، مقدار تابع هدف نخست به ۲٬۲۱۹٬۳۹۴٬۰۰۰ و مقدار تابع هدف دوم به ۰/۱۷ افزایش یافت.

۴-۶-تحلیل حساسیت

۱-۴-۶ تحلیل جریمه

به‌منظور تعیین مناسب‌ترین مقدار برای پارامتر جریمه، مسئله با در نظر گرفتن مقادیر مختلف این پارامتر حل شد. جدول ۱۳ میزان هزینه و مجموع کمبود خون را در چهار دوره زمانی پس از وقوع حادثه و در هر سه سناریو(IBB) [8]برای

[8] Iranian Blood Bank

مقادیر متفاوت جریمه نشان میدهد. بهترین مقدار جریمه مقداری است که تعادلی مناسب میان هزینه ها و میزان کمبود ایجاد کند.

همان‌گونه که در جدول زیر مشاهده می‌شود، با کاهش مقدار جریمه، میزان کمبود کاهش می‌یابد، اما در مقابل هزینه‌ها افزایش پیدا می‌کند. افزون بر این، در چارچوب این مسئله، حداقل‌سازی کمبود از اهمیت بیشتری نسبت به هزینه‌ها برخوردار است. ازاین‌رو، مقدار ۱٬۳۵۰٬۰۰۰ به‌عنوان مناسب‌ترین مقدار برای پارامتر جریمه انتخاب شد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار جریمه از ۱٬۳۵۰٬۰۰۰ به مقادیر بزرگ‌تر، هزینه‌ها به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد، در حالی که میزان کمبود دیگر تغییری نمی‌کند. بنابراین، مقدار انتخاب‌شده را می‌توان بهترین گزینه برای پارامتر جریمه در این مدل دانست.

۷ –نتیجه‌گیری

مهم‌ترین دستاوردها و بینش‌های مدیریتی این پژوهش به شرح زیر است:

•اطلاع‌رسانی به مردم درباره مراکز موقت خون‌گیری پیش از وقوع بحران: یکی از مشکلات اساسی در شرایط بحرانی، محدودیت دسترسی به رسانه‌ها و سامانه‌های اطلاع‌رسانی مدیریت بحران است. ازاین‌رو، ضروری است اطلاعات موردنیاز درباره محل استقرار مراکز موقت خون‌گیری و نحوه مراجعه به آن‌ها پیش از وقوع حادثه در اختیار عموم مردم قرار گیرد.

•اولویت‌بندی مصدومان و در برخی موارد مناطق آسیب‌دیده: در زمان وقوع بحران، کودکان، سالمندان و بیماران در اولویت دریافت خدمات درمانی قرار دارند. افزون بر این، در صورتی که حادثه در ساعات روز رخ دهد، مدارس از جمله مهم‌ترین مکان‌هایی هستند که می‌توانند در فرایند امدادرسانی و اسکان موقت مورد استفاده قرار گیرند.

•آگاه‌سازی مردم درباره اهدای خون و شرایط اهداکنندگان واجد صلاحیت: اطلاع‌رسانی صحیح درباره اهدای خون و شناسایی افرادی که امکان اهدای خون سالم را دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین باید از اهدای خون توسط افرادی که دارای بیماری‌های خاص هستند جلوگیری شود. این امر موجب کاهش زمان موردنیاز برای پردازش، غربالگری و تفکیک خون‌های سالم و ناسالم خواهد شد.

منابع :

[1]http://www.iranicaonline.org/articles/bam-earthquake-2003.

[2j Beliën, J., Forcé, H., 2012. Supply chain management of blood products. European Journal of Operational Research . 217(1), 1-16

[3] Jabbarzadeh, A., Behnam, F., Seuring, S., 2014. 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.

[4] Zahiri, S.A. Torabi, M. Mousazadeh, Mansouri, S.A., 2015, Blood collection management: methodology and application, Applied Mathematical Modelling, 39, 7680-7696.

[5] Kumudu, K.S., Kuruppu, 2010. Managment of blood system in disasters. Biologicals, 38(1), 87-90.

[6] Mahdavi, I., Paydar, M.M., Shahabnia, G., Jouzdani, J., 2015, A Fuzzy Multi-Objective Model For Logistic Planning In Disaster Relief Operations, International Journal of Industrial Engineering

[7] Zhang, Z.-H. Jiang, H., 2014. A robust counterpart approach to the bi-objective emergency medical service design problem. Applied Mathematical Modelling, 38(3), 1033-1040.

[8] Hasanzadeh, H., Bashiri M., 2016. An efficient network for disaster management: Model and solution. Applied Mathematical Modelling, 40(5-6), 3688-3702.

[9]https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F3-540-27806-0_3

[10] Siransy, L.K., nanga, Z.Y., 2015, ABO/Rh Blood Groups and Risk of HIV Infection and Hepatitis B Among Blood Donors of Abidjan, Côte Divoire. European Journal of Microbiology

Immunology, 18, 205-209.

[11] Farhud, D.D., Yeganeh, M.Z., A brief history of human blood groups, 2013, Iranian Journal of

Public Health, 42, 1-6.

[12] Wang, H., Du, L., Ma, S., 2014. Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake. Transportation Research Part E: Logistics and

[13] Shishebori, D., Yousefi, A., 2015. Robust and reliable medical services network design under uncertain environment and system disruptions. Transportation Research Part E: Logistics and

[14] Hsieh, C., 2014. An Evolutionary-Based Optimization for a Multi-Objective Blood Banking Supply Chain Model. Modern Advances in Applied Intelligence, 511-520.

[15] Gunpinar, S., Centeno, G., 2015. Stochastic integer programming models for reducing wastages and shortages of blood products at hospitals. Computers & Operations Research. 54, 129-141.

[16] Abdulwahab, U., Wahab, M.I.M., 2014. Approximate dynamic programming modeling for a typical blood platelet bank. Computers & Industrial Engineering. 78, 259-270.

[17] Duan, Q., Liao, T.W., 2014. Optimization of blood supply chain with shortened shelf lives and ABO compatibility. International Journal of Production Economics. 153, 113-129.

[18] Elalouf, A., Hovav, Sh., Tsadikovich, D., Yedidsion, L., 2015. Minimizing operational costs by restructuring the blood sample collection chain. Operations Research for Health Care. 7, 81-93.

[19] Sha, Y., Huang, J., 2012. The Multi-period Location-allocation Problem of Engineering Emergency Blood Supply Systems. Systems Engineering Procedia.5, 21-28.

[20] Fahimnia, B., Jabbarzadeh, A., Ghavamifar, A., Bell. M., 2017. Supply Chain Design for Efficient and Effective Blood Supply in Disasters. International Journal of Production Economics,