

یک مدل ریاضی دوهدفه فازی به منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین خون با در نظر گرفتن اختلال: رویکرد صف $M/M/1$

سمیرا خجسته اقبالی^۱، سید میثم موسوی^۲، سینا سلیمیان^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران؛ s.khojasteh.e@gmail.com

^۲ دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران؛ sm.mousavi@shahed.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران؛ snsalimian422.ss@gmail.com

* نویسنده مسئول: سمیرا خجسته اقبالی

چکیده

شبکه زنجیره تأمین خون با توجه به جایگاه ویژه‌ای که در نظام سلامت یک کشور دارد؛ در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. اهمیت آن زمانی دوچندان می‌شود که وقوع حوادث، منجر به بروز اختلال در شبکه زنجیره تأمین خون شده و به تبع آن نیاز به خون و فرآورده‌های آن به شدت افزایش یابد. در این مطالعه یک مدل ریاضی غیرخطی مختلط دوهدفه با در نظر گرفتن ملاحظات از قبیل استفاده از تسهیلات موقتی علاوه بر تسهیلات دائمی موجود در شبکه و نیز استفاده از تئوری صف به منظور کاهش طول صف و زمان‌های انتظار در تسهیلات، ارائه می‌شود. به منظور مواجهه با محیط غیرقطعی موجود در شبکه، از روش برنامه‌ریزی فازی، استفاده می‌شود. از روش برنامه‌ریزی آرمانی نیز به عنوان رویکرد حل مسئله طراحی شده بهره گرفته می‌شود. سرانجام، به بررسی کاربرد مدل پیشنهادی، از طریق یک مثال کاربردی پرداخته و طبق نتایج به دست آمده، اعمال عدم قطعیت در مسئله، منجر به نزدیک شدن جواب تابع هدف زمان به مقدار بهینه می‌شود.

کلمات کلیدی
زنجیره تأمین خون، اختلال، تئوری صف، برنامه‌ریزی آرمانی

A fuzzy bi-objective mathematical model for a blood supply chain network design with disruption considerations: $M/M/1$ queueing approach

Samira Khojasteh Eghbali¹, Seyed Meysam Mousavi², Sina Salimian³

¹ M.Sc. Student, Department of Industrial Engineering, Shahed University, Tehran, Iran; s.khojasteh.e@gmail.com

² Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Shahed University, Tehran, Iran; sm.mousavi@shahed.ac.ir

³ Ph.D. Student, Department of Industrial Engineering, Shahed University, Tehran, Iran; snsalimian422.ss@gmail.com

Abstract

The blood supply chain network has been focused on by many researchers due to the existence necessity in the health system of a country. The importance is doubled when the disaster occurrence leads to disruptions in a blood supply chain network and, consequently, the need for blood products increases sharply. In this paper, a new mixed-integer nonlinear programming model is presented by taking into considerations like utilizing temporary blood collection centers along with permanent ones in the network and also the use of queue theory to reduce queue length and waiting times in the facilities. Likewise, as the operations related to disaster responses deal with uncertainties, this paper utilizes the fuzzy programming method to handle them. The proposed multi-objective model is solved using the goal programming method. Finally, the application of the proposed model is examined through a numerical example and the results are analyzed.

Keywords: Blood supply chain, Disruption, Queue theory, Goal programming approach

۱- مقدمه

مدیریت تأمین خون و فرآورده‌های آن، مسئله بسیار مهم و حیاتی برای بشر است و یک حادثه می‌تواند جنبه‌های بسیاری از یک زنجیره تأمین خون را به طور مثال با ایجاد اختلال در مراکز جمع‌آوری خون، غیرقابل دسترس کردن فرآورده‌های خون و نیز بانک‌های خون به دلیل اختلال در جاده‌ها و مسیرهای منتهی به تسهیلات، ترافیک و یا دلایل دیگر، تحت تأثیر قرار دهد [۱]؛ بنابراین، مدیریت و جمع‌آوری و توزیع آن‌ها، نیاز به برنامه‌ریزی جامع و دقیق دارد. زنجیره تأمین خون با اهدای خون آغاز می‌شود و اهداکنندگان داوطلب به منظور اهدا به مراکز خون‌گیری مراجعه می‌کنند. خون‌گیری می‌تواند در مراکز خون‌سیار یا در مراکز اهدای خون دائمی اتفاق بیفتد. سپس واحدهای خون جمع‌آوری شده جهت پردازش و انجام آزمایش‌های باکتریایی و چندین آزمایش اجباری دیگر، به بانک‌های خون منتقل می‌شوند. واحدهای خون پردازش شده در بانک خون نگهداری می‌شوند تا از طریق وسایل نقلیه تعبیه‌شده، در مراکز درمانی و بیمارستان‌های مرکزی توزیع شده و خون به افراد نیازمند تزریق شود [۲]. هدف اصلی از طراحی شبکه زنجیره تأمین خون، مکان‌یابی تسهیلات، تعیین ظرفیت آن‌ها، پیش‌بینی تقاضا به طور کارآمد و برآوردن آن با هزینه کم و نیز حداقل زمان است [۳]. هنگامی که در سیستم سلامت یک کشور به سبب وقوع حوادث اختلالاتی رخ می‌دهد، اغلب شبکه زنجیره تأمین خون دچار مشکل شده و تقاضا برای خون به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و به تبع آن سیستم با کمبود شدید خون مواجه می‌شود. در این شرایط عرضه خون و فرآورده‌های آن تا حدودی به طور نامنظم انجام می‌گیرد و تقاضای آن نیز نسبتاً تصادفی خواهد بود [۴].

برای نخستین بار پژوهش درباره مدیریت زنجیره تأمین محصولات فسادپذیر و به خصوص فرآورده‌های خون، توسط ون زایل [۵] آغاز شد. مطالعه بلین و فورس [۴] مروری بر زنجیره تأمین خون و فرآورده‌های آن داشته است. علاوه بر این، بر موضوعاتی از قبیل مدیریت موجودی و تخصیص آن، توزیع و برنامه‌ریزی تأکید شده است. در مطالعه دوآن و لیاوو [۶] یک چارچوب بهینه‌سازی شبیه‌سازی برای مدیریت زنجیره تأمین خون پیشنهاد شده است. این مطالعه برای دستیابی به چارچوب مدنظر خود، حداکثر طول عمر متفاوتی را برای گلبول‌های قرمز در چندین سناریو تصور کرده است. مطالعه خلیل پور آذری و ارشدی خامش [۷] با توسعه یک مدل ریاضی چندهدفه، به طراحی شبکه زنجیره تأمین خون پایدار در زلزله پرداخته است که به این منظور از دامنه‌های مختلف شعاع تخریب در زلزله، استفاده شده است. ظهیری و پیشوائی [۸] با توجه به سازگاری گروه‌های خونی، به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین خون پرداخته‌اند. در این مطالعه به توسعه رویکرد ترکیبی احتمالی استوار مبتنی بر اندازه اعتبار پرداخته شده است. مطالعه دیابت و حمدان [۹] با ارائه یک مسئله برنامه‌ریزی احتمالی دومرحله‌ای به بررسی عدم قطعیت‌های عرضه، تقاضا، فسادپذیری خون، یکپارچه‌سازی تصمیمات مربوط به موجودی و توزیع و جایگزینی انواع گروه‌های خون پرداخته است. کوچکی تاجانی و همکاران [۱۰] در مطالعه مربوط به زنجیره تأمین خون پیشنهادی خود، به دنبال کمینه‌سازی هزینه‌های متحمل شده و نیز کمبود محصولات خونی بوده‌اند.

پژوهش‌های مهم انجام شده در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که اگرچه به کارگیری نظریه صف در مدیریت زمان‌های انتظار، تعداد کارکنان و به‌ویژه کاهش تراکم ناشی از تجمع اهداکنندگان و یا فرآورده‌های خونی در مراکز حائز اهمیت است، اما در میان مطالعات مربوط به مدیریت زنجیره تأمین خون، روش ذکر شده برای مواجهه با این مسئله با عدم توجه کافی در میان مطالعات گذشته روبرو بوده است. علاوه بر این، در نظر گرفتن سناریوهای مختلف حوادث با اعمال احتمال وقوع آن‌ها که می‌تواند کارایی مدل را در شرایط واقعی افزایش دهد، در ادبیات کمتر مورد بحث قرار گرفته است. با وجود اینکه یک جریان عملیات کامل جهت بررسی مورد نیاز است، در اکثر مطالعات تنها یک شبکه تک سطحی مورد مطالعه قرار گرفته است.

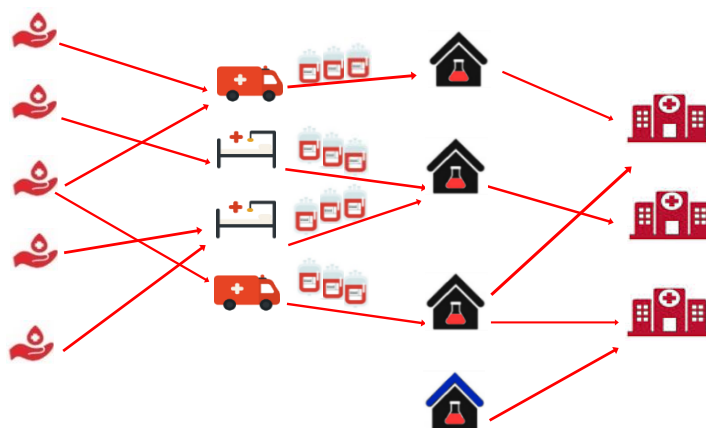
پژوهش حاضر با ارائه یک مدل ریاضی غیرخطی عدد صحیح مختلط به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین خون چهار سطحی پرداخته که درصد کمینه‌سازی هزینه‌های تجهیز و راه‌اندازی تسهیلات شبکه و نیز زمان‌های حمل‌ونقل و انتظار در شبکه است. به منظور ارتقاء انعطاف‌پذیری هرچه بیشتر مدل در شرایط غیرقطعی، مدل ارائه شده تحت عدم قطعیت فازی در نظر گرفته شده و از روش برنامه‌ریزی فازی خیمنز و همکاران [۱۱] جهت مواجهه با عدم قطعیت بهره گرفته شده است. در این مطالعه ملاحظات جدیدی از قبیل استفاده از مراکز خون‌گیری موقتی در کنار بهره‌مندی از تسهیلات ثابت، در نظر گرفتن احتمال بروز اختلال در برخی از تسهیلات و مسیرها، استفاده از رویکرد صف با محدودیت در تعداد خدمت‌دهندگان و نیز استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی به منظور تبدیل مدل دوهدفه پیشنهادی به یک مدل تک‌هدفه، اعمال شده‌اند.

۲- بیان مسئله و مدل‌سازی

در این بخش ابتدا مسئله مورد مطالعه به تفصیل شرح داده شده و سپس با معرفی مجموعه‌ها و نمادها مدل‌سازی ریاضی فازی ارائه می‌شود. در بخش بعد نیز به منظور مواجهه با عدم قطعیت از روش برنامه‌ریزی فازی استفاده شده و در نهایت با ارائه یک مثال عددی به تحلیل نتایج پرداخته می‌شود.

۱.۲- بیان مسئله

مسئله مورد نظر مربوط به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین خون مبتنی بر سه جزء جمع‌آوری خون، پردازش و ارسال آن است. در این مسئله که دربرگیرنده سناریوهای مختلف حوادث است، دو نوع تسهیل جمع‌آوری خون ثابت و سیار در نظر گرفته شده است. در صورت وجود کمبود خون در شبکه، واحدهای خون از بانک خون‌های واقع در سایر شهرها نیز برای جبران این کمبود به بیمارستان‌ها و مراکز درمانی ارسال می‌شوند. واحدهای خون دریافت شده در مراکز جمع‌آوری خون توسط وسایل نقلیه به بانک‌های خون منتقل می‌شوند و مورد پردازش قرار می‌گیرند. مقادیر زیادی از انواع فرآورده‌های خونی اعم از پلاسما، پلاکت و گلبول‌های قرمز خون در صف ارسال به بانک‌های خون قرار می‌گیرند. در نهایت، نوبت به ارسال خون و فرآورده‌های آن به بیمارستان‌ها و مراکز درمانی می‌رسد. به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین خون ذکر شده که درصدد کاهش اثرات ناشی از حوادث، بهینه‌سازی هزینه‌های کل، کمینه‌سازی زمان تحویل واحدهای خون در فاز پس از حادثه و نیز زمان‌های انتظار کل سیستم است، یک مدل ریاضی ارائه شده است. زنجیره تأمین خون در نظر گرفته شده، دارای چهار سطح متشکل از اهداکنندگان، مراکز خون‌گیری (مراکز ثابت و سیار)، بانک خون‌ها و بیمارستان‌ها است. به‌منظور بهره‌گیری از مدل در شرایط واقعی، احتمال وقوع حوادث نیز در نظر گرفته شده است که می‌تواند منجر به تخریب یا وارد شدن آسیب‌هایی به بانک خون‌ها و یا مسیرهای منتهی به بانک خون‌ها و بیمارستان‌ها شود.



شکل ۱. زنجیره تأمین خون پیشنهادی



۲.۲- مدلسازی ریاضی

مجموعه‌ها

$$p \in \{1, 2, \dots, |P|\}$$

$$d \in \{1, 2, \dots, |D|\}$$

$$j \in J' = \{1, 2, \dots, |n|\}$$

$$j \in J'' = \{1+n, 2, \dots, N\}$$

$$j \in J = J' \cup J''$$

$$bk \in \{1, 2, \dots, |BK|\}$$

$$h \in \{1, 2, \dots, |H|\}$$

مجموعه فرآورده‌های خونی مختلف

مجموعه مکان‌های اهداکنندگان

مجموعه مکان‌های مراکز خون‌گیری ثابت

مجموعه مکان تسهیلات جمع‌آوری خون سیار

مجموعه مکان‌های ممکن برای مراکز خون‌گیری ثابت یا سیار

مجموعه بانک خون‌ها

مجموعه بیمارستان‌ها و مراکز پزشکی

$t \in \{1, 2, \dots, |T|\}$, $i \in \{1, 2, \dots, |I|\}$
 $r \in \{1, 2, \dots, |R|\}$
 $s \in \{1, 2, \dots, |S|\}$

مجموعه دوره‌های زمانی
مجموعه مسیرها
مجموعه سناریوها

پارامترها

mc هزینه ثابت راه‌اندازی هر مرکز خون‌گیری سیار
 fc هزینه تجهیز همه مراکز خون‌گیری ثابت
 N تعداد کل مکان‌های مراکز خون‌گیری ثابت و مکان‌های کاندید برای تسهیلات جمع‌آوری خون سیار
 ET_p مدت انقضای فرآورده‌ی خونی p
 cb_{bk} ظرفیت بانک خون bk
 cf_j ظرفیت مرکز خون‌گیری ثابت در مکان j
 cm_j ظرفیت مرکز خون‌گیری سیار در مکان j
 bs_{pdt}^s حداکثر عرضه فرآورده خونی p در مکان d در دوره t تحت سناریو s
 bd_{pht}^s تقاضای فرآورده خونی p در بیمارستان h در دوره t تحت سناریو s
 to_{ht} زمان سفر از بانک خون‌های واقع در سایر شهرها به بیمارستان h در دوره t
 $tq_{j,bk,r}$ زمان سفر از مرکز خون‌گیری j به بانک خون bk با استفاده از مسیر r
 $tk_{bk,h}$ زمان سفر از بانک خون bk به بیمارستان h
 α_{dt}^s اگر مرکز خون‌گیری j در دوره t تحت سناریو s تخریب نشده باشد، ۱ و در غیر این صورت ۰.
 $\beta_{bk,t}^s$ اگر بانک خون bk در دوره t تحت سناریو s تخریب نشده باشد، ۱ و در غیر این صورت ۰.
 $\gamma_{j,bk,r,t}^s$ اگر مسیر بین مرکز خون‌گیری j و بانک خون bk در دوره t تحت سناریو s تخریب نشده باشد، ۱ و در غیر این صورت ۰.
 π_s احتمال وقوع سناریو s
 M یک عدد بزرگ

متغیرهای تصمیم‌گیری

$IN_{p,bk,t}^s$ مقدار موجودی فرآورده خونی p در بانک خون bk در انتهای دوره t تحت سناریو s
 $QA_{p,j,bk,r,t}^s$ مقدار فرآورده خونی p منتقل شده از مرکز j به بانک خون bk با استفاده از مسیر r در دوره t تحت سناریو s
 $QB_{p,bk,h,t}^s$ مقدار فرآورده خونی p منتقل شده از بانک خون bk به بیمارستان h در دوره t تحت سناریو s
 U_{pdjt}^s مقدار فرآورده خونی p اهداشده در مکان d در دوره t برای انتقال به مرکز j تحت سناریو s
 QC_{pht}^s مقدار فرآورده خونی p منتقل شده از بانک خون‌های bk واقع در سایر شهرها به بیمارستان h
 $EX_{p,bk,t}^s$ مقدار فرآورده خونی p منقضی شده در بانک خون bk در دوره t تحت سناریو s
 $\pi_{0,p,bk,t}^s$ احتمال عدم وجود فرآورده خونی در بانک خون bk در دوره t تحت سناریو s
 $\rho_{p,bk,t}^s$ ضریب بهره‌برداری
 $Wq_{p,bk,t}^s$ زمان انتظار فرآورده خونی p در بانک خون bk در دوره t تحت سناریو s
 $WT_{p,bk,t}^s$ زمان کل سیستم در بانک خون bk در دوره t تحت سناریو s
 G_j اگر مرکز خون‌گیری j تجهیز شده باشد، ۱ و در غیر این صورت ۰.
 W_{jt} اگر یک مرکز خون‌گیری سیار در مکان j در دوره t تحت سناریو s راه‌اندازی شده باشد، ۱ و در غیر این صورت ۰.
 X_{djt}^s اگر اهداکنندگان در مکان d در دوره t تحت سناریو s به مرکز خون‌گیری j تخصیص پیدا کنند، ۱ و در غیر این صورت ۰.
 $Y_{j,bk,r,t}^s$ اگر مرکز j به بانک خون bk با استفاده از مسیر r در دوره t تحت سناریو s تخصیص یابد، ۱ و در غیر این صورت ۰.
 $\Delta_{s,p,bk,t}$ اگر عبارت سمت راست محدودیت بیستم منفی باشد، ۱ و در غیر این صورت ۰.

مدل ریاضی فازی

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z1 = & \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{bk \in BK} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \pi^s Q A_{p,j,bk,r,t}^s \widetilde{q}_{j,bk,r} \\
 & + \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \pi^s Q B_{p,bk,h,t}^s \widetilde{k}_{bk,h} + \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \pi^s Q C_{pht}^s \widetilde{o}_{ht} \\
 & + \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} W T_{p,bk,t}^s
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\text{Min } Z2 = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J'} mc \pi^s W_{jt} + \sum_{j \in J'} fc G_j \tag{2}$$

Subject to:

$$U_{pdjt}^s \leq bs_{pat}^s X_{ajt}^s \quad \forall p, d, j, t, s \tag{3}$$

$$\sum_{j \in J} U_{pdjt}^s \leq bs_{pdt}^s \quad \forall p, d, t, s \tag{4}$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{p \in P} U_{pdjt}^s \leq cf_j G_j + cm_j W_{jt} \quad \forall j, t, s \tag{5}$$

$$G_j + W_{jt} \leq 1 \quad \forall j, t, s \tag{6}$$

$$X_{ajt}^s \leq \alpha_{jt}^s G_j + W_{jt} \quad \forall d, j, t, s \tag{7}$$

$$\sum_{bk \in BK} \sum_{r \in R} Q A_{p,j,bk,r,t}^s \leq \sum_{d \in D} U_{pdjt}^s \quad \forall p, j, t, s \tag{8}$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} Q A_{p,j,bk,r,t}^s \leq cb_{bk} \beta_{kt}^s \quad \forall bk, t, s \tag{9}$$

$$Y_{j,bk,r,t}^s \leq \alpha_{jt}^s \beta_{kt}^s Y_{j,bk,r,t}^s G_j \quad \forall j \in J', \forall bk, t, r, s \tag{10}$$

$$Y_{j,bk,r,t}^s \leq W_{jt} \beta_{kt}^s Y_{j,bk,r,t}^s \quad \forall j \in J'', \forall bk, t, r, s \tag{11}$$

$$\sum_{r \in R} Y_{j,bk,r,t}^s \leq 1 \quad \forall j \in J'', \forall bk, t, s \tag{12}$$

$$\sum_{p \in P} Q A_{p,j,bk,r,t}^s \leq cf_j Y_{j,bk,r,t}^s \quad \forall j \in J', \forall bk, t, r, s \tag{13}$$

$$\sum_{p \in P} Q A_{p,j,bk,r,t}^s \leq cm_j Y_{j,bk,r,t}^s \quad \forall j \in J'', \forall bk, t, r, s \tag{14}$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{h \in H} QB_{p,bk,h,t}^s \leq cb_{bk} \beta_{kt}^s \quad \forall bk, t, s \quad (15)$$

$$bd_{pht}^s - \sum_{bk \in BK} QB_{p,bk,h,t}^s = QC_{pht}^s \quad \forall p, h, t, s \quad (16)$$

$$IN_{p,bk,t-1}^s + \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} QA_{p,j,bk,r,t}^s = IN_{p,bk,t}^s + \sum_{l \in L} QB_{p,bk,h,t}^s + EX_{p,bk,t}^s \quad \forall t \geq 2, \forall p, bk, s \quad (17)$$

$$EX_{p,bk,t}^s \geq IN_{p,bk,t-ET_p}^s - \sum_{l \in L} \sum_{i=t-ET_p}^t QB_{p,bk,h,t}^s - \sum_{i=t-ET_p}^t EX_{p,bk,t}^s \quad \forall t \geq 2, \forall p, bk, s \quad (18)$$

$$EX_{p,bk,t}^s \leq (1 - \Delta_{s,p,bk,t}) \cdot M \quad \forall t \geq 2, \forall p, bk, s \quad (19)$$

$$EX_{p,bk,t}^s \leq IN_{p,bk,t-ET_p}^s - \sum_{l \in L} \sum_{i=t-ET_p}^t QB_{p,bk,h,t}^s - \sum_{i=t-ET_p}^t EX_{p,bk,t}^s + \Delta_{s,p,bk,t} \cdot M \quad \forall t \geq 2, \forall p, kb, s \quad (20)$$

$$\sum_{j \in J'} W_{jt} \leq N - n \quad \forall t, s \quad (21)$$

$$\sum_{p \in P} IN_{p,bk,t}^s \leq cb_{bk} \quad \forall bk, t, s \quad (22)$$

$$\lambda_{p,bk,t}^s = \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} QA_{p,j,bk,r,t}^s \quad \forall p, bk, s, t \quad (23)$$

$$\rho_{p,bk,t}^s = \frac{\lambda_{p,bk,t}^s}{\mu_{p,bk,t}^s} \quad \forall p, bk, s, t \quad (24)$$

$$\pi_{0p,bk,t}^s = 1 - \rho_{p,bk,t}^s \quad \forall p, bk, s, t \quad (25)$$

$$Wq_{p,bk,t}^s = \frac{\lambda_{p,bk,t}^s}{\mu_{p,bk,t}^s (\mu_{p,bk,t}^s - \lambda_{p,bk,t}^s)} \quad \forall p, bk, s, t \quad (26)$$

$$WT_{p,bk,t}^s = Wq_{p,bk,t}^s + \frac{1}{\mu_{p,bk,t}^s} \quad \forall p, bk, s, t \quad (27)$$

$$IN_{p,bk,t}^s, QA_{p,j,bk,r,t}^s, QB_{p,bk,h,t}^s, U_{pdjt}^s, QC_{pht}^s, EX_{p,bk,t}^s, \pi_{0p,bk,t}^s, Wq_{p,bk,t}^s, WT_{p,bk,t}^s \geq 0 \quad \forall p, i, j, bk, l, t, r, s \quad (28)$$

$$G_j \cdot W_{jt} \cdot X_{djt}^s \cdot Y_{j,bk,r,t}^s \in \{0,1\} \quad \forall p, d, j, bk, l, t, r, s \quad (29)$$

تابع هدف اول درصدد به حداقل رساندن زمان تحویل فرآورده‌های خون است و متشکل از زمان‌های حمل‌ونقل میان تسهیلات است. تابع هدف دوم نیز هزینه کل سیستم را به حداقل می‌رساند. روابط (۳) و (۴) میزان اهدای هر نوع فرآورده‌ی خونی را در هر منطقه محدود می‌کنند. رابطه (۵) ظرفیت هر مرکز خون‌گیری را تعیین می‌کند. رابطه (۶) نشان‌دهنده امکان استقرار حداکثر یکی از تسهیلات ثابت یا سیار در هر نقطه است. طبق رابطه (۷) اهداکنندگان تنها می‌توانند به تسهیلات سیاری که به آن مکان تخصیص یافته‌اند و یا به مراکز ثابت مجهزی که دچار تخریب نشده‌اند مراجعه کنند. رابطه (۸) میزان خون انتقال‌یافته از مراکز جمع‌آوری خون را محدود می‌کند. رابطه (۹) محدودیت مربوط به ظرفیت بانک خون‌ها است. رابطه (۱۰) مربوط به تخصیص مراکز خون‌گیری ثابت است. طبق رابطه (۱۱) اگر یک مرکز خون‌گیری سیار به یک بانک خون مشخصی تخصیص یابد، آن تسهیل دچار تخریب نمی‌شود. رابطه (۱۲) مربوط به تخصیص یک مسیر میان هر مرکز جمع‌آوری خون و بانک خون است. روابط (۱۳) و (۱۴) انتقال فرآورده‌های خونی را از یک مرکز خون‌گیری به بانک خونی که به آن تسهیل تخصیص پیدا نکرده است، محدود می‌کند. رابطه

(۱۵) شرط تخصیص بانک خون به بیمارستان را مشخص می‌کند. رابطه (۱۶) نشان‌دهنده مقدار فرآورده‌های خونی تحویل داده‌شده از سایر شهرهاست. رابطه (۱۷) محدودیت مربوط به تعادل موجودی خون در هر بانک خون است. روابط (۱۸) تا (۲۰) تعداد واحدهای خونی منقضی شده در هر دوره را مشخص می‌کند. رابطه (۲۱) تعیین‌کننده تعداد مراکز جمع‌آوری خون سیار است. رابطه (۲۲) مربوط به ظرفیت بانک خون‌ها است. روابط (۲۳) تا (۲۷) مربوط به سیستم صف $M/M/1$ است که به منظور مدل‌سازی صف‌های مربوط به فرآورده‌های خونی به کار گرفته شده است. آهنگ ورود فرآورده‌های خونی به بانک خون‌ها مطابق با فرآیند پواسون فرض شده است و طبق رابطه (۲۳) تعیین می‌شود. رابطه (۲۴) ضریب بهره‌برداری را محاسبه می‌کند که در آن، آهنگ خدمت‌دهی برای هر محصول خونی مطابق با توزیع نمایی در نظر گرفته شده است. رابطه (۲۵) نشان‌دهنده احتمال عدم وجود فرآورده خونی در بانک خون است. رابطه (۲۶) زمان انتظار فرآورده‌های خونی را در بانک خون‌ها تعیین می‌کند. رابطه (۲۷) زمان انتظار کل سیستم را محاسبه می‌کند. روابط (۲۸) و (۲۹) نشان‌دهنده متغیرهای باینری و پیوسته است.

۳.۲- رویکرد مواجهه با عدم قطعیت

به منظور اعمال شبکه زنجیره تأمین خون طراحی شده در مسائل دنیای واقعی، مدل ریاضی پیشنهادی تحت شرایط عدم قطعیت فازی در نظر گرفته شده است. در این مطالعه پارامترهای زمان به عنوان پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند. به منظور دستیابی به مدل معادل قطعی، از روش ارائه شده توسط خیمنز و همکاران [۱۱] بهره گرفته شده است. طبق روش‌های ذکر شده، مدل معادل قطعی به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\text{Min } z = \text{EV}[\tilde{C}]x \quad (30)$$

Subject to:

$$[(1 - \alpha)E_2^{a_i} + \alpha E_1^{a_i}]x \geq \alpha E_2^{b_i} + (1 - \alpha)E_1^{b_i} \quad \forall (i = 1, 2, \dots, m) \quad (31)$$

$$\left[\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)E_2^{a_i} + \frac{\alpha}{2}E_1^{a_i} \right]x \geq \frac{\alpha}{2}E_2^{b_i} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)E_1^{b_i} \quad \forall (i = l + 1, \dots, m) \quad (32)$$

$$\left[\frac{\alpha}{2}E_2^{a_i} + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)E_1^{a_i} \right]x \leq \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)E_2^{b_i} + \frac{\alpha}{2}E_1^{b_i} \quad \forall (i = l + 1, \dots, m) \quad (33)$$

$$x \geq 0 \quad (34)$$

در مدل فوق مقدار انتظاری^۱ هر پارامتر فازی \tilde{C} به عنوان یک عدد فازی مثلثی (C_1, C_2, C_3) ، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{EV}(\tilde{C}) = \frac{C_1 + 2C_2 + C_3}{4} \quad (35)$$

همچنین بازه^۲ انتظاری هر پارامتر فازی \tilde{A} به عنوان یک عدد فازی مثلثی (a_1, a_2, a_3) ، در محدودیت‌های مدل معادل قطعی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{EI}(\tilde{A}) = [E_1^{a_i} + E_2^{a_i}] = \left[\frac{1}{2}(a_1 + a_2), \frac{1}{2}(a_2 + a_3) \right], \quad (36)$$

روابط فوق برای عدد فازی مثلثی (b_1, b_2, b_3) ، نیز برقرار است.

در تابع هدف مدل ارائه شده، پارامترهای زمان سفر از مراکز خون‌گیری به بانک خون‌ها $(\widetilde{tq}_{j,bk,r})$ ، زمان سفر از بانک خون‌ها به بیمارستان‌ها $(\widetilde{tk}_{bk,h})$ و زمان سفر از بانک خون‌های واقع در سایر شهرها به بیمارستان‌ها (\widetilde{to}_{ht}) به عنوان اعداد فازی مثلثی در نظر گرفته شده‌اند و مقادیر انتظاری هریک، از رابطه (۳۵) محاسبه شده و در مدل نهایی گنجانده شده‌اند.

¹ Expected value

² Expected interval

۴.۲- رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی

پس از قطعی سازی مدل فازی پیشنهادی، از نوع خاصی از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی به منظور تبدیل مدل دوهدفه ارائه‌شده به یک مدل تک هدفه استفاده شده است. برنامه‌ریزی آرمانی برای اولین بار توسط چارنز و کوپر [۱۲] پیشنهاد شد که پس از آن توسعه‌های بسیاری توسط محققان صورت گرفته است. مسئله برنامه‌ریزی آرمانی که درصدد به حداقل رساندن مجموع انحرافات اهداف است، به صورت زیر فرموله شده است:

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

Subject to:

$$f_i(x) - d_i^+ + d_i^- = y_i \quad \forall i = 1.2. \dots, m, \quad (37)$$

$$d_i^+ \cdot d_i^- \geq 0 \quad \forall i = 1.2. \dots, m, \quad (38)$$

در روابط فوق d_i^+ و d_i^- به ترتیب نشان‌دهنده انحرافات مثبت و منفی میان i امین تابع هدف، $f_i(x)$ و y_i نشان‌دهنده سطح آرمان است که توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود.

مدل نهایی:

$$\text{Min}(d_1^+ + d_1^- + d_2^+ + d_2^-) \quad (39)$$

Subject to:

$$\sum_{m \in M} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \pi^s Q A_{p,j,bk,r,t}^s \left(\frac{t q_{j,bk,r}^1 + 2t q_{j,bk,r}^2 + t q_{j,bk,r}^3}{4} \right) + \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \pi^s Q B_{p,bk,h,t}^s \left(\frac{t k_{bk,h}^1 + 2t k_{bk,h}^2 + t k_{bk,h}^3}{4} \right) \quad (40)$$

$$+ \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{a \in A} \pi^s Q C_{pht}^s \left(\frac{t o_{ht}^1 + 2t o_{ht}^2 + t o_{ht}^3}{4} \right)$$

$$+ \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} W T_{p,bk,t}^s - d_1^+ + d_1^- = y_1$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J'} mc \pi^s W_{jt} + \sum_{j \in J'} fc G_j - d_2^+ + d_2^- = y_2 \quad (41)$$

$$d_i^+ \cdot d_i^- \geq 0 \quad \forall i = 1.2 \quad (42)$$

رابطه (۳۹) به عنوان تابع هدف، انحرافات از آرمان‌ها را به حداقل می‌رساند. روابط (۴۰) و (۴۱) نیز طبق روش برنامه‌ریزی فازی خیمنز و همکاران [۱۱] و رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی بازنویسی شده‌اند. سایر محدودیت‌های مدل اصلی نیز بدون هیچ‌گونه تغییری در مدل فوق قرار داده می‌شوند.

۵.۲- یک مثال عددی

در این بخش به منظور بررسی کارایی مدل پیشنهادی، یک مثال عددی ارائه شده است. مسئله طراحی شده شامل شبکه زنجیره تأمین خون با در نظر گرفتن انواع فرآورده‌های خونی اعم از پلاکت، گلبول‌های قرمز و پلاسما است. در این شبکه دو بیمارستان در نظر گرفته شده است که در صورت اعلام

نیاز، در طول جریان این شبکه، فرآورده‌های خونی پس از جمع‌آوری از اهداکنندگان و انتقال به بانک خون‌ها، به تقاضای آن‌ها پاسخ داده می‌شود. برخی از پارامترهای مدل در جدول ۱ ارائه شده است. به‌منظور نشان دادن اثر تغییرات در پارامترهای اصلی مدل ریاضی بر توابع هدف، تحلیل حساسیت صورت گرفته است. در جدول ۲، اثر تغییرات در میزان عرضه و تقاضای محصولات خونی بر توابع هدف زمان و هزینه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش اندکی در میزان پارامتر تقاضا منجر به افزایش زیادی در تابع هدف زمان شده و افزایش میزان عرضه واحدهای خونی منجر به کاهش مقدار این تابع هدف می‌شود. اثر این تغییرات در پارامترهای اصلی در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به اینکه برای مواجهه با عدم قطعیت در نظر گرفته شده از روش فازی استفاده شده است، نتایج حاصل از حل مدل در هر دو حالت قطعی و غیرقطعی در جدول ۳ نمایش داده شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، اعمال عدم قطعیت در مسئله، منجر به نزدیک شدن جواب تابع هدف زمان به مقدار بهینه شده است.

جدول ۱. مقادیر برخی از پارامترهای مدل

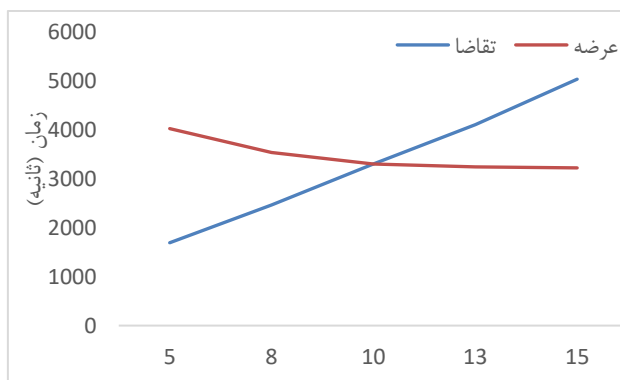
پارامترها	مقادیر	پارامترها	مقادیر
ET_p	۹۰، ۲۱، ۵	cf_j	۴۰، ۳۵، ۲۰
cb_p	۵۰، ۴۰	cm_j	۳۰، ۲۰، ۱۰
bs_{pdt}^s	UI(5,30)	fc	۱۰۰۰
bd_{pht}^s	UI(5,30)	mc	۲۵۰۰

جدول ۲. اثر تغییرات در میزان عرضه و تقاضای محصولات خونی بر تابع هدف زمان

تابع هدف هزینه	تابع هدف زمان	تغییر (%)	پارامتر
۵۰۰۰	۴۰۲۱	-۵۰	bs_{pdt}^s
۵۰۰۰	۲۵۳۶	-۲۵	
۵۰۰۰	۳۲۴۱	+۲۵	
۵۰۰۰	۳۲۲۰	+۵۰	
۵۰۰۰	۱۶۹۱	-۵۰	bd_{pht}^s
۵۰۰۰	۲۴۶۳	-۲۵	
۵۰۰۰	۴۱۰۲	+۲۵	
۵۰۰۰	۵۰۳۲	+۵۰	

جدول ۳. نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل

حالت غیرقطعی	حالت قطعی	تابع هدف
۳۳۷۳	۳۳۹۵	زمان
۵۰۰۰	۵۰۰۰	هزینه



شکل ۲. تغییرات عرضه و تقاضا نسبت به زمان

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین خون پرداخته شد که شامل جمع‌آوری خون و فرآورده‌های آن، پردازش و توزیع آن‌ها است. در شبکه ارائه‌شده که به دنبال به حداقل رساندن هزینه‌ها و زمان کل سیستم است، از تسهیلات جمع‌آوری خون موقتی علاوه بر تسهیلات خون‌گیری ثابت جهت افزایش ظرفیت مراکز، کاهش زمان کل سیستم و تسریع در امر توزیع استفاده شده است. با توجه به اینکه احتمال وقوع حوادث و بروز اختلال در شبکه و به دنبال آن امکان بروز تراکم واحدهای خونی در بانک خون‌ها لحاظ شده است، از رویکرد صف $M/M/1$ جهت کاهش زمان انتظار و جلوگیری از بروز صف‌های طولانی، استفاده شده است. در این مطالعه، جهت طراحی مسئله مطابق با دنیای واقعی، مدل پیشنهادی در شرایط عدم قطعیت در نظر گرفته شده است و به این منظور از روش برنامه‌ریزی فازی بهره گرفته شده است. رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی نیز جهت تبدیل مدل دوهدفه به مدل تک هدفه اعمال شده است. با توجه به نتایج حاصل از حل مدل از طریق روش‌های مذکور، استفاده از رویکرد عدم قطعیت در این مسئله باعث بهبود توابع هدف شده است. با استفاده از مدل ریاضی ارائه‌شده می‌توان با تعیین تعداد و مکان مراکز جمع‌آوری خون موقتی مورد نیاز و با تخصیص صحیح آن‌ها به بانک خون‌ها و مکان اهداکنندگان، به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین خون با ملاحظات احتمال بروز اختلال در تسهیلات و مسیرها پرداخت که تا میزان زیادی می‌تواند در کاهش میزان مرگ‌ومیرهای ناشی از عدم برنامه‌ریزی و مدیریت در شرایط بحران و بروز تراکم در تسهیلات، مؤثر واقع شود. در پژوهش‌های آتی می‌توان با توسعه رویکردهای ابتکاری و فرا ابتکاری، مسئله پیشنهادی را در ابعاد بزرگ حل کرد. همچنین می‌توان از رویکردهای دیگری از جمله بهینه‌سازی استوار جهت مواجهه با عدم قطعیت استفاده نمود و نتایج حاصل را مقایسه و مورد بررسی و تحلیل قرار داد. به‌علاوه می‌توان جهت افزایش کارایی مدل، فسادپذیری واحدهای خونی را نیز در نظر گرفت تا واحدهای خونی تازه بر واحدهای خونی قدیمی ترجیح داده شود.

۴- مراجع

- [1] Jabbarzadeh, A., Naini, G., & Davoudpour, H.; "Designing a supply chain network under the risk of disruption", *Mathematical Problems in Engineering*, No. 7, pp. 1-23, 2012.
- [2] W. O. (WHO).; "Gender and health in disasters Geneva: World Health Organization", 2002.
- [3] Cohen, M. A., Pierskalla, W. P.; "Management policies for a regional blood bank", *Transfusion*, Vol. 15, No. 1, pp. 58-67, 1975.
- [4] Beliën, J., Force H.; "Supply chain management of blood products: a literature review", *European Journal of Operational Research*, Vol. 217, No. 1, pp. 1-16, 2012.
- [5] Van Zyl, G.J.J.; "Inventory control for perishable commodities", *Dissertation University of North of California*, 1964.
- [6] Duan, Q., Liao, T. W.; "Optimization of blood supply chain with shortened shelf lives and ABO compatibility", *International Journal of Production Economics*, Vol. 153, pp. 113-129, 2014.
- [7] Khalilpourazari, S., Arshadi Khamseh, A. "Bi-objective emergency blood supply chain network design in earthquake considering earthquake magnitude: a comprehensive study with real world application", *Annals of Operations Research*, Vol. 283, pp. 355-393, 2019.
- [8] Zahiri, B., Pishvae, M. S.; "Blood supply chain network design considering blood group compatibility under uncertainty", *International Journal of Production Research*, Vol. 55, No. 7, 2017.
- [9] Diabat, A., Hamdan, B.; "A two-stage multi-echelon stochastic blood supply chain problem", *Computers and Operations Research*, Vol. 101, pp. 130-143, 2019.
- [10] Kouchaki Tajani, T., Mohtashami, A., Amiri, M., Ehtesham Rasi, R.; "Presenting a Robust Optimization Model to Design a Comprehensive Blood Supply Chain under Supply and Demand Uncertainties", *Journal of Industrial Management Perspective*, Vol. 11, No. 1, pp. 81-116, 2021.
- [11] Jimenez, M. Arenas, M., Bilbao, A. and Rodri, M.V.; "Linear programming with fuzzy parameters: an interactive method resolution", *European Journal of Operational Research*, Vol. 177, pp. 1599-1609, 2007.
- [12] Charnes, A., Cooper, W. W.; "Chance-Constrained Programming", *Management Science*, Vol. 6, No. 1, pp. 73-79, 1959.