



## A Robust Risk Management Model for the Blood Supply Chain in Corona Pandemic Condition

Abolfazl Babazadeh Rafiei\*

Tahmoures Sohrabi\*\*

Majid Motamedi\*\*\*

Mohammad Hossein Darvish Motevalli\*\*\*\*

### Abstract

**Introduction and objectives:** Supply chain risk management is a proactive approach to prevent potential and unexpected consequences. This research aims to develop a mathematical model to reduce the risk within the blood supply chain during pandemics. Specifically, a robust, multi-objective, scenario-based model has been proposed to mitigate the risk of the blood supply chain under critical conditions.

**Methods:** The COVID-19 pandemic disrupted the blood supply from donors, leading to a crisis in the blood supply chain. Unlike previous research that focused on increased demand due to crises like earthquakes or wars, this study addresses the disruption in supply. To overcome this uncertainty, a three-level model with two objectives was developed. The first objective is to minimize total cost, and the second is to maximize the reliability of the blood supply chain. The model is then made robust by considering uncertainty in blood supply. The novelty of this research lies in presenting a mathematical model that simultaneously optimizes the two conflicting objectives of cost and reliability while considering supply uncertainty. The weighted sum method was used to convert the multi-objective model into a single-objective one, and the model was solved using GAMS software and the BARON solver.

**Results and discussion:** To validate the model, the problem was tested under various scenarios using real-world data, and a sensitivity analysis was conducted to assess the model's stability against parameter changes. The total cost minimization in the robust model was calculated, and it was observed that as the weight of the cost minimization objective function increased, this objective function moved towards minimization and optimization, stabilizing at a weight of 0.1. By increasing the weight in the reliability maximization objective function, the value of this objective function stabilized at 0.5 and moved towards maximization, reaching its maximum at a weight of 1.

Received: Dec. 20, 2023; Revised: May. 14, 2024; Accepted: Jul. 20, 2024; Published Online: Aug. 11, 2024.

\* Department of Industrial Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

\*\* Department of Industrial Management, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

\*\*\* Department of Management, Nowshahr Branch, Islamic Azad University, Nowshahr, Iran.

\*\*\*\* Department of Industrial Management, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

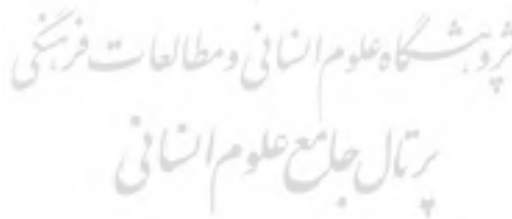
Corresponding Author: [Mhd.darvish@iau.ac.ir](mailto:Mhd.darvish@iau.ac.ir)



The Pareto solutions for changes in the cost function and stable reliability are presented, showing that as the stability of the cost objective function increases, the stable reliability function decreases significantly, and vice versa. Additionally, the relationship between reliability and the number of blood collection facilities was directly proportional. However, the reliability of the system did not increase beyond a certain point (15 facilities). Consequently, constructing more than 15 blood collection facilities is not cost-effective, indicating increased efficiency in the supply chain at the level of blood collection facilities when using the proposed model. The findings show that the presented model can determine the optimal amount of blood collected from donors, the number of collection centers, the blood inventory level at blood centers and hospitals, as well as the units of blood sent from blood centers to hospitals, aiming to reduce risk and manage the blood supply chain effectively during critical blood supply conditions like the COVID-19 pandemic.

**Conclusion:** The COVID-19 pandemic highlighted the importance of blood supply chain risk management. Since the blood supply chain is vital for public health, organizations and institutions involved in this field should implement robust plans and strategies to manage risks and enhance the stability of the blood supply chain during crises like pandemics. Therefore, implementing a robust risk management model for the blood supply chain in the context of the COVID-19 pandemic will help organizations ensure their stability and performance, effectively addressing society's blood supply needs.

**Keywords:** Risk management; Blood Supply Chain; Pandemic Conditions; Critical Conditions; Reliability.



**How to Cite:** Babazadeh Rafiei, Abolfazl; Sohrabi, Tahmoures; Motamedi, Majid; Darvish Motevalli, Mohammad Hossein (2024). A Robust Risk Management Model for the Blood Supply Chain in Corona Pandemic Condition. *Ind. Manag. Persp.*, 14(3), 56-78 (*In Persian*).



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## مدل استوار مدیریت ریسک زنجیره تأمین خون در شرایط پاندمی کرونا

ابوالفضل بابازاده رفیعی\*<sup>۱۵</sup>

طهمورث سهرابی<sup>۱۵</sup>\*\*

مجید معتمدی<sup>۱۵</sup>\*\*\*

محمدحسین درویش متولی<sup>۱۵</sup>\*\*\*\*

### چکیده

**مقدمه و اهداف:** مدیریت ریسک زنجیره تأمین یک رویکرد پیشگیرانه به منظور جلوگیری از عواقب احتمالی و غیرمنتظره به شمار می‌رود. هدف از این پژوهش ارائه یک مدل ریاضی در جهت کاهش ریسک زنجیره تأمین خون در شرایط پاندمی است که بر این اساس، یک مدل استوار چند هدفه مبتنی بر سناریو با هدف کاهش ریسک زنجیره تأمین خون در شرایط بحرانی ارائه شده است.

**روش‌ها:** پاندمی کرونا سبب ایجاد اختلال در عرضه خون توسط اهداکنندگان شده و در نتیجه منجر به بحران در زنجیره تأمین خون گردید. با توجه به اینکه پیش از همه‌گیری کرونا بحران‌هایی مانند زلزله، جنگ و غیره منجر به افزایش تقاضا در خون مورد نیاز می‌شدند، در نتیجه در تحقیقات گذشته، اختلال در عرضه خون توسط محققان کمتر مورد توجه قرار گرفته بود. لذا در این پژوهش، به منظور غلبه بر این عدم قطعیت مدلی سه سطحی با دو هدف ارائه گردید، که هدف اول هزینه کل را کاهش و هدف دوم قابلیت اطمینان زنجیره تأمین خون را افزایش می‌دهد و در نهایت مدل با در نظر گرفتن عدم قطعیت در عرضه خون، استوار گردید. ارائه مدلی ریاضی که همزمان دو محدودیت متضاد هزینه و قابلیت اطمینان را با در نظر گرفتن عدم قطعیت در عرضه بهینه می‌نماید، از جمله نوآوری‌های این تحقیق است. برای تبدیل مدل چندهدفه به تک هدف از روش مجموع وزن دار شده استفاده و برای حل مدل از نرم‌افزار GAMS و حل کننده BARON استفاده شده است.

**یافته‌ها:** برای اعتبارسنجی مدل، مسئله در ابعاد مختلف و با استفاده از داده‌های واقعی مورد آزمون قرار گرفت و به منظور تعیین پایداری مدل نسبت به تغییرات در پارامترها، تحلیل حساسیت انجام گرفته است. حداقل‌سازی هزینه کل در مدل استوار محاسبه شده و مشاهده می‌گردد که با افزایش مقدار وزن تابع هدف حداقل‌سازی هزینه، این تابع هدف به سمت حداقل‌سازی و بهینه شدن پیش می‌رود و مقدار آن در وزن ۰.۱ استوار می‌گردد. با افزایش وزن در تابع هدف حداکثرسازی قابلیت اطمینان، میزان این تابع هدف از ۰.۵ استوار بوده و به سمت حداکثرسازی و بهینه شدن پیش می‌رود و در وزن ۱ به حداکثر میزان خود می‌رسد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۲۱.

\*دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

\*\*استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

\*\*\*استادیار، گروه مدیریت، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران.

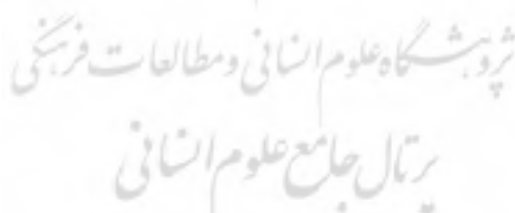
\*\*\*\*استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

## نوع مقاله: پژوهشی

در نمودار پارتو تغییرات تابع هزینه و قابلیت اطمینان استوار نشان داده شده است و مشاهده می‌گردد که با افزایش میزان استواری تابع هدف هزینه، تابع استوار قابلیت اطمینان به شدت کاهش می‌یابد و برعکس. همچنین، تغییرات قابلیت اطمینان در برابر تعداد تسهیلات جمع‌آوری خون رابطه مستقیم بین این دو مورد را نشان داده است. اما با افزایش تعداد تسهیلات جمع‌آوری، قابلیت اطمینان سیستم نیز افزایش می‌یابد. طبق نتایج نشان داده شده، قابلیت اطمینان با احداث بیش از ۱۵ تسهیل، افزایش پیدا نمی‌کند. در نتیجه، احداث و به‌کارگیری بیش از ۱۵ تسهیلات جمع‌آوری خون مقرون به صرفه نیست و این نشان‌دهنده افزایش بهره‌وری زنجیره تأمین در سطح تسهیلات جمع‌آوری خون در صورت استفاده از مدل ارائه شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل ارائه شده قادر است میزان بهینه خون جمع‌آوری شده از اهداکنندگان، تعداد مراکز جمع‌آوری، میزان موجودی خون در مرکز خون و بیمارستان و همچنین واحد خون ارسال شده از مرکز خون به بیمارستان را با هدف کاهش ریسک تعیین نماید و در جهت مدیریت ریسک زنجیره تأمین خون در شرایط بحرانی عرضه خون مانند پاندمی کرونا مورد استفاده قرار گیرد.

**نتیجه‌گیری:** در شرایط پاندمی، اهمیت مدیریت ریسک زنجیره تأمین خون بیش از پیش مشخص شد. از آنجایی که زنجیره تأمین خون یکی از عوامل حیاتی در سلامت عمومی جامعه است، لازم است که سازمان‌ها و نهادهای مرتبط با این زمینه، برنامه‌ها و استراتژی‌های استواری را برای مدیریت ریسک‌ها و افزایش پایداری زنجیره تأمین خون در شرایط بحرانی مانند پاندمی کرونا اجرا کنند. بنابراین، اجرای مدل استوار مدیریت ریسک زنجیره تأمین خون در شرایط پاندمی کرونا، به سازمان‌های مسئول کمک می‌کند تا پایداری و عملکرد خود را تضمین کرده و به بهترین شکل ممکن به نیازهای جامعه در زمینه تأمین خون پاسخ دهند.

**کلیدواژه‌ها:** مدیریت ریسک؛ زنجیره تأمین خون؛ شرایط پاندمی؛ شرایط بحرانی؛ قابلیت اطمینان.



**استناددهی:** بابازاده رفیعی، ابوالفضل؛ سهرابی، طهمورث؛ معتمدی، مجید؛ درویش متولی، محمدحسین (۱۴۰۳). مدل استوار مدیریت ریسک زنجیره تأمین خون در شرایط پاندمی کرونا. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴(۳)، ۵۶-۷۸.



## ۱. مقدمه

خون یکی از کالاهای حیاتی در حوزه سلامت و بهداشت می‌باشد که فقط به‌وسیله خود انسان تولید می‌شود و در حال حاضر هیچ محصول یا فرایند شیمیایی دیگری نیست که به عنوان جایگزین آن مورد استفاده قرار گیرد [۳۵] و از هر سه نفر، یک نفر در طول زندگی خود نیاز به انتقال خون و محصولات خونی دارد [۳۴،۳۱].

تأمین خون سالم و کافی مورد نیاز بیمارستان‌ها و مدیریت آن در شرایط عادی و بحرانی چالشی است که سیستم سلامت دولت‌ها همیشه با آن مواجه هستند. مدیریت خون از نگرانی‌های خاص برای نژاد بشر بوده و از این رو جمع‌آوری و توزیع خون، که در قالب مدیریت زنجیره تأمین خون مطرح است، نیازمند مدیریت و برنامه‌ریزی دقیق می‌باشد. اگرچه پیشرفت‌های تکنولوژیکی در زمینه جایگزینی برای محصولات خون صورت گرفته است، ولی خون در آزمایشگاه‌ها تولید نمی‌شود و تنها منبع خون، اهدای خون است که این امر مسئله خون را بسیار مشکل و حیاتی می‌کند و نیاز به اهدای خون و محصولات مشتق شده از آن همیشه وجود خواهد داشت [۳۴]. با توجه به اینکه عرضه خون از سوی اهداکنندگان تا حدودی نامنظم و تقاضا برای فرآورده‌های خونی اغلب تصادفی است [۷،۸]، این زنجیره با زنجیره تأمین کالای عادی متفاوت است. به همین دلیل انطباق عرضه و تقاضا به شیوه‌ای کارآمد، کاری پیچیده بوده و نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و جامع است.

مدیریت ریسک زنجیره تأمین یک پارادایم جدید در زنجیره تأمین خون است که می‌تواند برای مدیریت خطرات در شبکه‌های عرضه و تقاضای پیچیده و پویا مورد بررسی قرار گیرد [۲۲،۸]. انواع ریسک در زنجیره تأمین خون می‌تواند مطابق با ریسک زنجیره تأمین سنتی که شامل جریان‌های فیزیکی، مالی، اطلاعاتی و ارتباطی است طبقه‌بندی شود [۱۱، ۱۶]. کمبود خون و اتلاف خون، دو عدم قطعیت اصلی هستند که بیشترین تاثیر را بر کل زنجیره تأمین دارند، ضدسایدشین<sup>۱</sup> (۲۰۰۳)، ریسک در زنجیره تأمین، را به عنوان «احتمال بالقوه یک حادثه یا عدم دسترسی به فرصت‌ها با عرضه ورودی که نتایج آن منجر به زیان مالی شرکت می‌شود» توصیف کرده است [۵۰]. مارچ و شاپیرا<sup>۲</sup> (۱۹۸۷) نیز ریسک را به عنوان «تغییر در توزیع نتایج ممکن زنجیره عرضه، احتمال آن و ارزش ذهنی آنها» تعریف کرده‌اند [۲۷]. در نتیجه می‌توان گفت ریسک احتمال بالقوه شکست بین اجزای زنجیره تأمین است که ممکن است بر روی جریان اطلاعات، مواد و پول در شبکه زنجیره تأمین تاثیر بگذارد. مدیریت ریسک زنجیره تأمین یک رویکرد پیشگیرانه برای مدیریت ریسک‌ها در زنجیره تأمین است تا از عواقب احتمالی غیرمنتظره جلوگیری شود [۹]. برای مدیریت زنجیره تأمین خون و دستیابی به حداکثر بهره‌وری این زنجیره، مدیریت ریسک زنجیره تأمین خون امری اجتناب‌ناپذیر است. مطالعه ادبیات تحقیق بیانگر آن است که جز معدودی مطالعه، (مانند: [۳۳]) مطالعه‌ای در خصوص ارائه مدل ریاضی برای مدیریت ریسک زنجیره تأمین خون ارائه نشده و در آنها نیز تنها به مساله اتلاف پرداخته شده است و انجام این تحقیق با در نظر گرفتن جریان‌های فیزیکی، مالی، از جنبه‌های نوآوری این تحقیق می‌باشد. یک سیستم بهداشت و درمان کارآمد جهت افزایش بهره‌وری باید شامل یک برنامه مناسب برای مدیریت زنجیره تأمین خون باشد. اهداکنندگان داوطلب، منابع خون هستند و از آنجا که اهدای خون رایگان است، ممکن است تصور شود که هزینه تأمین خون حداقل است، در حالی که عوامل متعددی مانند پیشرفت‌های تکنولوژیکی، پیری جمعیت هزینه‌هایی را به صنعت مراقبت‌های بهداشتی تحمیل می‌کنند. علاوه بر موارد فوق، محصولات خون فاسدشدنی و دارای عمر محدود می‌باشند که این امر موجب پیچیده‌تر شدن اوضاع شده و کمبود آن منجر به هزینه‌های بالا برای جامعه می‌شود، چرا که می‌تواند موجب افزایش میزان مرگ و میر شود. شرایط همه‌گیری با کاهش تعداد اهداکنندگان، تاثیر بسیار منفی بر جامعه خون داشته و بر خدمات انتقال خون در سراسر جهان تأثیرگذار بود [۴۶،۳۸]. به‌طوری که در شرایط همه‌گیری کرونا محدودیت‌های اجتماعی، تعلیق فعالیت‌های عمومی، مدرسه و دانشگاه‌ها و تغییر کار، به کار در خانه، ترس و وحشت بین مردم برای اهدای خون و اقدامات فاصله‌گذاری اجتماعی که توسط دولت‌ها اعمال شده است، اهدای خون را تحت فشار زیادی قرار می‌دهد. عدم فعالیت کامل مراکز خون موقت طی یک دوره طولانی و ترس اهداکنندگان از ابتلا به ویروس کرونا بر لغو اهدای خون و عدم تمایل به حضور در مراکز اهدای خون برای اهدای خون افزود. در دوره پاندمی کرونا، بسیاری از مراکز خونی در سراسر جهان برای جمع‌آوری "خون کافی" برای برآوردن تقاضای بیمارستان با مشکلات زیادی روبرو شدند و خدمات انتقال خون با مشکلات مهمی برای حفظ یک منبع ایمن خون مواجه گردیده‌اند [۲۶]

1. Zsidisin, G.A

2. March, J. and Shapira, Z

و همه‌گیری کرونا از طریق کاهش اهدای خون و کاهش در دسترس بودن امکانات جمع‌آوری مناسب، بر عرضه خون تأثیر گذاشته است [۳۸]. بنابراین برای خدمات مطلوب خون و افزایش بهره‌وری زنجیره تأمین خون باید برای ارزیابی، برنامه‌ریزی و پاسخ مناسب به چالش‌ها و تدوین استراتژی‌های مناسب پس از انجام ارزیابی ریسک اقدام گردد.

با گسترش و پیچیدگی پاندمی کرونا و تأثیرات بی‌سابقه‌ای که بر جوامع جهانی گذاشته است، زنجیره تأمین خون به عنوان یکی از جوانب حیاتی و حساس در این شرایط بحرانی با چالش‌ها و مخاطرات جدیدی روبه‌رو شده است [۲۶]. مدیریت ریسک در زنجیره تأمین خون در این شرایط، اساسی و حیاتی به نظر می‌رسد، تا امکان ادامه فعالیت‌های ارزشمند این زنجیره و تأمین نیازهای حیاتی جامعه را در مقابل چالش‌های پاندمی حفظ کند [۴۲، ۴۳]. با توجه به این مسأله، در این مقاله به توسعه و ارائه یک مدل استوار مدیریت ریسک زنجیره تأمین خون در شرایط پاندمی کرونا پرداخته شده است. این مدل، با تأکید بر اهمیت و حساسیت زنجیره تأمین خون در شرایط بحرانی، بهبود قابلیت مدیریت ریسک‌ها، افزایش انعطاف‌پذیری و ایجاد پایداری در سیستم زنجیره تأمین خون را هدف قرار می‌دهد. با توجه به اینکه زنجیره تأمین خون نقش حیاتی در امداد رسانی و پشتیبانی از بیماران و افراد نیازمند دارد، ارائه یک مدل مدیریت ریسک استوار در شرایط پاندمی کرونا می‌تواند به بهبود عملکرد و پایداری این زنجیره کمک کرده و از تأمین نیازهای اساسی جامعه در این شرایط بحرانی حمایت نماید. این تحقیق اهمیت بالقوه‌ای دارد، زیرا بهبود و راهکارهای ارائه شده می‌تواند به مدیران و تصمیم‌گیران در حوزه بهداشت و درمان کمک کند تا بهترین تصمیمات را در مدیریت زنجیره تأمین خون در شرایط پاندمی کرونا اتخاذ نمایند.

با توجه به موارد فوق، هدف این تحقیق ارائه مدل بهینه استوار برای مدیریت ریسک زنجیره تأمین خون در شرایط پاندمی کرونا می‌باشد، مدل زنجیره‌تأمین خون ارائه شده یک مدل ۳ سطحی شامل سطوح اهداکنندگان خون، تسهیلات دائمی و موقت جمع‌آوری خون، مراکز انتقال خون و بیمارستان‌ها است. در این تحقیق با توجه به شرایط پاندمی کرونای موجود آمده در دنیا عرضه برای خون به صورت غیرقطعی در نظر گرفته می‌شود و سعی می‌گردد ریسک‌های زنجیره تأمین در شرایط پاندمی کرونا با ارائه مدل ریاضی استوار ریسک زنجیره تأمین خون، مدیریت گردد. هدف از حل مدل، کاهش ریسک شامل کاهش هزینه‌های انتقال خون، افزایش قابلیت اطمینان زنجیره تأمین، کاهش کمبود و نیز کاهش اتلاف می‌باشد. با توجه به اینکه در شرایط عدم اطمینان مانند شرایط پاندمی کرونا و تحقق پارامترهای غیر قطعی مسئله، مقادیر توابع هدف و متغیرهای بهینه مسئله می‌تواند بسیار متفاوت از توابع هدف و متغیرهای بدست آمده از این مدل باشد؛ لذا برای کاهش مقدار این تفاوت به ازای سناریوهای موجود، سعی می‌شود که مدل در برابر پارامترهای غیر قطعی استوار شود و در نهایت مدل با استفاده از داده‌های واقعی حل می‌گردد. بنابراین، مهم‌ترین نوآوری و سهم مشارکت تحقیق حاضر عبارت است از:

- طراحی یک مدل سه سطحی بهینه برای مدیریت ریسک زنجیره تأمین خون در شرایط پاندمی کرونا،
- طراحی زنجیره‌تأمین خون سه سطحی شامل اهداکنندگان خون، تسهیلات دائمی و موقت جمع‌آوری خون، مراکز انتقال خون و بیمارستان‌ها،
- طراحی بهینه برای مدیریت ریسک در زنجیره تأمین خون در شرایط پاندمی کرونا.

بنابراین، مهم‌ترین سوالی که در این تحقیق مطرح شده عبارت است از اینکه چگونه می‌توانیم یک مدل استوار برای مدیریت ریسک زنجیره تأمین خون در شرایط پاندمی طراحی کنیم؟

باقی‌مانده مقاله به این صورت سازماندهی شده است که در بخش دوم، مرور ادبیات برای شناسایی شکاف تحقیق ارائه می‌گردد. در بخش سوم، مدل‌سازی ریاضی تحقیق به همراه سایر مفروضات مدل ارائه شده است. در بخش چهارم، نتایج عددی حاصل از به‌کارگیری مدل پیشنهادی بیان خواهد شد، و در بخش پنجم، بحث کلی و نتیجه‌گیری به همراه پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

با بررسی ادبیات تحقیق مشاهده شد که اکثر مقالات و پژوهش‌های موجود در زمینه مدل‌سازی ریاضی زنجیره تأمین خون بر روی اختلالاتی که در اثر بحران‌های طبیعی مانند زلزله بر روی زنجیره تأمین خون تأثیر می‌گذارند، متمرکز بوده‌اند و این بحران‌ها بیشتر سطح تقاضا را با اختلال و عدم قطعیت مواجه می‌سازند. با وقوع پاندمی کرونا، همانند تمامی فعالیت‌های انسانی که درگیر این پاندمی شدند،

زنجیره تأمین خون نیز از این بحران در امان نماند و خدمات انتقال خون با مشکلات مهمی برای حفظ یک منبع ایمن خون مواجه گردید [۲۶]. پاندمی کرونا از طریق کاهش اهدای خون و کاهش در دسترس بودن امکانات جمع‌آوری مناسب، بر عرضه خون تأثیر گذاشته است [۳۸]. در نتیجه، برخلاف تمامی بحران‌های قبلی که سطح تقاضا را تحت تأثیر قرار می‌داد، این بار سطح عرضه خون تحت تأثیر قرار گرفت که در ادبیات تحقیق کمتر به آن پرداخته شده است و از نوآوری‌های مدل ارائه شده می‌باشد. از سوی دیگر، توجه به ریسک و عدم اطمینان در زنجیره تأمین انتقال خون در تحقیق‌های گذشته کمتر مورد توجه بوده و این تحقیق سعی در ارائه مدلی دارد تا بتواند اهداف مدل را با توجه به ریسک‌هایی که زنجیره تأمین خون در شرایط کرونا با آن مواجه می‌گردند مدل‌سازی و بهینه‌سازی نماید. همچنین تعداد کمی از مقالات از جمله [۳۰، ۱۰] را می‌توان یافت که به قابلیت اطمینان زنجیره تأمین خون توجه نموده باشند. در این تحقیقات، عموماً زنجیره تأمین انتقال خون به صورت چندسطحی دیده نشده است و در بیشتر مدل‌های ارائه شده، قابلیت اطمینان در تسهیلات انتقال خون یا در نظر گرفته نشده است و یا در قالب زنجیره‌های فاقد سطح‌بندی به آن پرداخته شده است. با بررسی مدل‌های ریاضی در زنجیره تأمین مشاهده شد که رویکرد مدل‌سازی در جهت کاهش هزینه انجام می‌گرفت و کمتر بهره‌وری و استفاده بهینه از منابع و امکانات مورد توجه بود که در مدل استوار ارائه شده بهره‌وری امکانات و تسهیلات جمع‌آوری خون مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر بیشتر تحقیقات در این زمینه به ارائه مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح پرداخته‌اند که باعث کوچکتر شدن فضای حل مساله می‌گردد و نتایج با واقعیت فاصله دارد [۳۰] و از الگوریتم‌های کارا تر به دلیل پیچیدگی در حل مدل استفاده چندانی نشده است، که این امر نیز بهره‌وری مدل‌های ارائه شده را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد که در این تحقیق با ارائه مدل ریاضی استوار غیرخطی مختلط مدنظر قرار گرفته شده است. برای مثال، حمدان و دیابات<sup>۱</sup> (۲۰۲۰) در مطالعه خود، یک مدل بهینه‌سازی استوار دوهدفه برای طراحی زنجیره‌های تأمین خون که در برابر سناریوهای فاجعه مقاوم هستند، ارائه کرده‌اند. برای این منظور، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای پیشنهاد شده است که با هدف به حداقل رساندن زمان و هزینه تحویل خون به بیمارستان‌ها پس از وقوع یک فاجعه در نظر گرفته شده است و یک الگوریتم مبتنی بر آزادسازی لاگرانژ توسعه داده شده است که قادر به حل نمونه‌های مقیاس بزرگ از مدل است [۲۱]. سهرابی و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای، چالش‌های سیستم‌های مراقبت‌های بهداشتی را در جهت مدیریت موجودی پایدار فرآورده‌های خونی بررسی کرده‌اند. در این راستا سه هدف اصلی دنبال شده است. برای دستیابی به این اهداف، یک مدل موجودی چند هدفه مبتنی بر تقاضا با استفاده از سیاست‌های ترکیبی در یک محیط نامشخص ارائه و سرانجام، یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی فازی ترکیبی برای ثبت عدم قطعیت‌های دنیای واقعی اعمال شده است [۴۴]. فریمان و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای بهینه‌سازی زنجیره‌های تأمین در سناریوهای پس از بحران با استفاده از اهداف چندگانه توسعه داده‌اند. مدل ارائه شده با توجه به موقعیت‌های احتمالی، خون را بر اساس کمیت و مکان مورد نیاز به تسهیلات مختلف تخصیص می‌دهد [۱۷]. علا و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۲۴) یک روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط احتمالی جدید را به منظور مقابله با توزیع و تصمیم‌گیری‌های مکانی پیشنهاد داده و سپس دو رویکرد راه‌حل شناخته شده از مطالعات موجود برای حل مساله چندهدفه احتمالی استوار را مورد استفاده قرار دادند [۲]. رکابی و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه خود، یک مدل غیرخطی اعداد صحیح مختلط چند دوره‌ای چند هدفه برای شبکه‌های زنجیره تأمین خون سبز کارآمد، پاسخگو و با در نظر گرفتن اقدامات تاب‌آوری ارائه کرده‌اند. برای برآورده شدن مدل پیشنهادی، ابتدا از روش LP-metric برای حل نمونه‌های مساله با اندازه کوچک و همچنین از روش آزادسازی لاگرانژی استفاده شده است [۳۹]. نتایج مطالعات پیشین به طور خلاصه در جدول ۱ آورده شده است.

1. Hamdan and Diabat  
 2. Sohrabi et al.  
 3. Fariman et al.  
 4. Ala et al.



جدول طبقه بندی مرور ادبیات

مقاله موردی	دوره زمانی		عدم قطعیت		روش حل		رویکرد مدل سازی	هدف		شبکه زنجیره تأمین					منبع	
	چند دوره	یک دوره	استوار	تصادفی-تسهیل سازی	فازی / احتمالی	فر ابتکاری		قطعی	تک هدفه	دو هدفه/چندهدفه	شرایط بحرانی	حمل و نقل	موجودی	تقاضا و توزیع		تزیین
•	•				•		•	Non-linear programming	حداقل سازی کمبود و اتلاف، موجودی بیمارستان، چرخه انتقال خون به بیمارستان	-		•	•		•	۲۷
•		•					•	MILP	حداقل سازی هزینه کل و حداکثر سازی سودمندی اهداکنندگان	-	•				•	۲۰
•	•			•			•	Multivariate time-series	-	پیش بینی اهدا و تقاضای خون در زمان کرونا			•		•	۳۳
•		•					•	MINLP	-	حداقل سازی هزینه کل	•	•				۱۹
•	•			•			•	Mixed-integer mathematical	حداقل سازی هزینه زیست محیطی، اجتماعی و لجستیک	-			•		•	۳
•	•						•	Non- Linear Multi-Objective Robust Model	حداقل سازی هزینه کل، حداکثر سازی قابلیت اطمینان	-	•			•	•	۳۰
		•					•	MILP	-	حداقل سازی هزینه- حداکثر سازی جمع آوری و پردازش خون	•			•	•	۱۵
•	•			•			•	Mixed Integer Linear Programming	-	حداکثر دریافت خون از اهداکنندگان						۵
•		•					•	Multiple objective integer linear programming	حداقل کردن هزینه کل جمع آوری خون و حداقل نمودن تعداد اهداکنندگان خون	-				•	•	۲۷
•	•			•			•	Mixed integer linear Programming	-	حداقل سازی هزینه مکان تسهیلات دائمی، هزینه انتقال امکانات موقت، هزینه حمل و نقل، موجودی و هزینه کمبود			•	•	•	۳۷
•	•						•	Robust multi-period stochastic model	حداقل سازی هزینه تاسیس امکانات دائمی، نگهداری، انتقال امکانات موقت، عملیاتی جمع آوری خون، تهیه خون از خارج از شبکه	-	•			•	•	۴۱
•		•					•	stochastic dynamic programming	-	حداقل سازی هزینه های کل جمع آوری						۴
•	•			•			•	Dynamic optimization model	-	حداقل سازی هزینه کل	•			•	•	۱۸
		•		•		•	•	multi-objective fuzzy mathematical programming	حداقل سازی هزینه سفر- حداکثر سازی مقدار خون جمع آوری شده	-		•				۳۶
•	•						•	bi objective mixed integer programming model	حداکثر سازی پوشش مناطق اهدا کننده خون، حداقل رساندن هزینه های مختلف	-	•		•	•	•	۳۴
		•					•	MILP	-	حداقل سازی کمبود خون، اتلاف و هزینه	•					۲۳
•	•						•	Network optimization model MCDM	حداقل سازی هزینه و حداقل سازی ریسک	-				•	•	۲۹
•	•						•	Non- Linear Multi-Objective Robust Model	حداقل سازی ریسک از طریق حداقل سازی هزینه کل و حداکثر سازی قابلیت اطمینان	-	•		•	•	•	زنجیره تأمین



### ۳. روش‌شناسی پژوهش

**بیان مسأله:** در این بخش از تحقیق، جزئیات دقیقی از مدل‌سازی ریاضی ارائه شده است. برای این منظور، ابتدا مسأله مدنظر بیان شده و سپس مفروضات لازم برای ساخت مدل ریاضی ارائه شده است. سرانجام با معرفی اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها نسبت به معرفی مدل ریاضی اقدام گردیده است.

در این تحقیق، یک زنجیره تأمین خون سه سطحی که شامل سطوح عرضه، پردازش و توزیع خون در شرایط همه‌گیری کرونا در نظر گرفته می‌شود که در آن تسهیلات دایمی و موقت، خون اهداکنندگان را جمع‌آوری می‌کنند و خون جمع‌آوری شده برای انجام آزمایش و تهیه محصولات مورد نیاز بیماران به مراکز خون منتقل می‌گردد. سپس مراکز خون، تقاضای خون بیمارستان‌ها را بر اساس نیازشان به خون برآورده می‌کنند [۳۰] حال با توجه به شرایط پاندمی کرونا مسأله این است که میزان خون جمع‌آوری شده از اهداکنندگان توسط تسهیلات جمع‌آوری، میزان خون ارسال شده از مراکز خون به بیمارستان، تعداد تسهیلات جمع‌آوری، میزان موجودی خون در مرکز خون را چه میزان تعیین کنیم تا هزینه کل زنجیره تأمین با توجه به حداقل‌سازی ریسک زنجیره تأمین، حداقل و در عین حال قابلیت اطمینان زنجیره تأمین خون حداکثر گردد.

قابلیت اطمینان حمل و تجهیزات خون در این زنجیره تأمین براساس معیارهای مختلفی ارزیابی می‌شود. این معیارها شامل امور فنی، عملیاتی، ایمنی و کیفیتی است. با ارزیابی و اعمال این معیارها، زنجیره تأمین می‌تواند از اطمینان حمل و تجهیزات خون به نحو احسن بهره‌بردار و امکان ارائه خدمات بهداشتی و درمانی با کیفیت و ایمن را فراهم کند.

استانداردهای ایمنی: شامل رعایت استانداردهای ایمنی در حمل و نقل خون، استفاده از تجهیزات ایمن و استانداردهای بهداشتی در تمام مراحل زنجیره تأمین می‌شود.

کیفیت و استانداردهای تجهیزات: اطمینان از استفاده از تجهیزات با کیفیت و استانداردهای مشخص در حمل و نقل خون، از جمله بررسی و تضمین استانداردهای تجهیزات و وسایل مورد استفاده.

بسته‌بندی و نگهداری: ارزیابی بسته‌بندی مناسب و نگهداری صحیح تجهیزات خون در زمان حمل و نقل تا اطمینان از حفظ کیفیت و ایمنی خون.

توانایی انتقال و حمل: ارزیابی توانایی و کارایی وسایل حمل و نقل برای حمل ایمن و موثر تجهیزات خون از یک نقطه به دیگری در زنجیره تأمین.

زمان بندی و انطباق با الگوهای زمانی: اطمینان از انطباق زمانبندی حمل و نقل با الگوهای زمانی مورد نیاز برای تجهیزات خون به منظور حفظ تازگی و کیفیت آنها.

پایداری و انعطاف‌پذیری: ارزیابی پایداری و انعطاف‌پذیری سیستم حمل و تجهیزات خون در مواجهه با مواقع بحرانی و شرایط غیرمنتظره.

**مفروضات تحقیق:** سایر مفروضات مدل به شرح زیر است:

- ظرفیت بانک خون در مراکز خون و نقاط تقاضا محدود است.
- میزان خون جمع‌آوری شده از اهداکنندگان توسط تسهیلات موقت با میزان خون ارسال شده از مراکز جمع‌آوری به مرکز خون برابر است.
- تنها در مراکز خون، ذخیره‌سازی وجود دارد.
- واحدهای خون به طور مستقیم از مراکز خون به مناطق تقاضا منتقل می‌شوند.
- خون در کل زنجیره به عنوان یک محصول واحد مورد توجه قرار گرفته است.
- هزینه‌های کمبود زمانی رخ می‌دهد که تقاضای درخواست شده توسط بیمارستان‌ها و مراکز خون به طور کامل توسط مرکز خون و مراکز جمع‌آوری برآورده نمی‌شود.
- هزینه‌های اتلاف زمانی رخ می‌دهد که در مراکز خون و بیمارستان‌ها واحد خون منقضی و فاسد شود.

- انتقال خون طبق استاندارد اتریش انجام می‌شود. کیسه‌های خون به هیچ وجه تا مصرف باز نمی‌گردند. در نتیجه هیچ‌گونه آلودگی و انتقال ویروس به خون در سطوح مختلف زنجیره تأمین خون انجام نمی‌گیرد. استاندارد اتریش در انتقال خون به عنوان یکی از استانداردهای بین‌المللی مربوط به انتقال و ذخیره‌سازی خون و محصولات خونی استفاده می‌شود. این استاندارد به عنوان ISO 9001:2015 شناخته شده است و در زمینه امنیت و کیفیت فرآیندهای مرتبط با انتقال خون در سازمان‌های بهداشتی و بانک‌های خون اجرا می‌شود [۳۹]، [۴۲].
- خونگیری تنها از افراد سالم انجام می‌گردد.
- در زنجیره تأمین خون، ضایعات واحدهای خون و محصولات یک مشکل جهانی است که از ۰ تا ۶ درصد در کشورهای مختلف متفاوت بوده و رسیدن به ضایعات کمتر از ۱ درصد شاخص بهبود کیفیت تلقی می‌شود و این میزان در کشور ایران بین ۲.۵ الی ۲.۹ درصد برآورد گردید [۳۰].
- قابلیت اطمینان برای حمل خون و قابلیت اطمینان تجهیزات جمع‌آوری خون به ترتیب ۸۰ و ۸۵ درصد فرض گردید. همچنین اطمینان نسبت به برآورده شدن تقاضا خون در مرکز خون ۸۵ درصد در نظر گرفته شد و فرض بر این است که قابلیت اطمینان سایر سطوح زنجیره تأمین ۱۰۰ درصد می‌باشد [۳۰].
- میزان خون اهدایی توسط اهداکنندگان با توجه به محدودیت‌های اعمال شده در شرایط همه‌گیری کرونا در دوره‌های مختلف دقیقاً مشخص نیست. بنابراین، سطح عرضه با عدم اطمینان در مورد برآورده ساختن تقاضای خون مواجه هستند. در نتیجه، عدم قطعیت عرضه در مدل تحقیق برای نزدیک شدن به شرایط واقعی مورد توجه قرار می‌گیرد.  
در جدول ۲، کلیه اندیس‌ها، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تحقیق نمادگذاری شده‌اند.

جدول ۲ نمادگذاری

نماد	توضیحات
<b>اندیس‌ها</b>	
$M$	مجموعه تسهیلات دائمی جمع‌آوری خون $m \in M$
$N$	مجموعه تسهیلات موقت جمع‌آوری خون $n \in N$
$K$	مجموعه مراکز خون $k \in K$
$H$	مجموعه بیمارستان‌ها $h \in H$
$T$	دوره زمانی $t \in T$
$S$	سناریوی احتمالی $s \in S$
<b>پارامترها</b>	
$Cb_{m_{mt}}$	هزینه جمع‌آوری هر واحد خون از اهداکنندگان توسط تسهیلات دائمی جمع‌آوری $m$ در دوره $t$
$Cb_{n_{nt}}$	هزینه جمع‌آوری هر واحد خون از اهداکنندگان توسط تسهیلات موقت جمع‌آوری $n$ در دوره $t$
$CV_{m_{mkt}}$	هزینه حمل هر واحد خون از تسهیلات دائمی جمع‌آوری $m$ به مرکز خون $k$ در دوره $t$
$CV_{n_{nkt}}$	هزینه حمل هر واحد خون از تسهیلات موقت جمع‌آوری $n$ به مرکز خون $k$ در دوره $t$
$CV_{kht}$	هزینه حمل هر واحد خون از مرکز خون $k$ به بیمارستان $h$ در دوره $t$
$CH'_{ht}$	متوسط هزینه نگهداری هر واحد خون در بیمارستان $h$ در دوره $t$
$CH''_{kt}$	متوسط هزینه نگهداری هر واحد خون در مرکز خون $k$ در دوره $t$
$CS_{kt}$	هزینه کمبود هر واحد خون در مرکز خون $k$ در دوره $t$
$CW'_k$	هزینه اتلاف هر واحد خون در مرکز خون $k$ در دوره $t$
$\bar{\alpha}_1$	متوسط اطمینان نسبت به شرایط و ایمنی حمل خون از لحاظ دما و سایر موارد از محل جمع‌آوری دائمی $m$ و موقت $n$ به مرکز خون $k$

نماد	توضیحات
$\bar{\alpha}_2$	متوسط اطمینان نسبت به کارکرد تجهیزات آزمایشگاهی در مراکز جمع‌آوری
$\bar{\alpha}_{3kt}$	متوسط اطمینان نسبت به برآورده شدن تقاضا خون در مرکز خون k از مراکز جمع‌آوری دائمی و موقت در دوره t.
$\delta_j^1$	متوسط درصد بسته‌بندی غیراستاندارد خون در محل جمع‌آوری دائمی و موقت خون
$Db_{mkt}$	میزان تقاضا در مرکز خون k از مراکز جمع‌آوری دائمی m در دوره t تحت سناریو S
$Db'_{nkt}$	میزان تقاضا در مرکز خون k از مراکز جمع‌آوری موقت n در دوره t تحت سناریو S
$AD_{ht}$	میزان تقاضای واقعی بیمارستان h برای خون در دوره t تحت سناریو S
$D_{kht}$	میزان تقاضا برای واحد خون از مرکز خون k توسط بیمارستان h در دوره t تحت سناریو S
$\mu_{kt}$	حداکثر ظرفیت مرکز خون k در دوره t
$\delta_m$	حداکثر ظرفیت تسهیلات جمع‌آوری دائمی m
$\gamma_n$	حداکثر ظرفیت تسهیلات جمع‌آوری موقت n
$\tau_{ht}$	حداکثر ظرفیت نگهداری خون در بیمارستان h در دوره t
$pro_s$	احتمال وقوع سناریو S
متغیرها	
$Xbm_{mt}^s$	میزان خون جمع‌آوری شده از اهداکنندگان توسط تسهیلات جمع‌آوری دائمی m در دوره t تحت سناریو S
$Xbn_{nt}^s$	میزان خون جمع‌آوری شده از اهداکنندگان توسط تسهیلات جمع‌آوری موقت n در دوره t تحت سناریو S
$Pb_{mkt}^s$	میزان خون ارسال شده از مراکز جمع‌آوری دائمی m به مرکز خون k در دوره t تحت سناریو S
$Tb_{nkt}^s$	میزان خون ارسال شده از مراکز جمع‌آوری موقت n به مرکز خون k در دوره t تحت سناریو S
$Q_{kht}^s$	میزان خون ارسال شده از مرکز خون k به بیمارستان h در دوره t تحت سناریو S
$N'_{mt}^s$	تعداد تسهیلات جمع‌آوری خون دائمی در دوره t تحت سناریو S
$N''_{nt}^s$	تعداد تسهیلات جمع‌آوری خون موقت در دوره t تحت سناریو S
$IN'_{kt}^s$	میزان عدم برآورد عرضه خون مورد نیاز مرکز خون، توسط اهداکنندگان از تسهیلات جمع‌آوری خون در دوره t تحت سناریو S
$IN''_{ht}^s$	میزان موجودی خون در مرکز خون k در دوره t تحت سناریو S
$De'_{kt}^s$	میزان موجودی خون در بیمارستان h در دوره t تحت سناریو S
$WB'_{kt}^s$	میزان کمبود خون در مرکز خون k در دوره t تحت سناریو S
$\varphi_{kmnt}^s$	میزان اتلاف خون در مرکز خون k در دوره t تحت سناریو S
$\gamma_1, \gamma_2$	متغیرهای باینری مربوط به محدودیت‌های این یا آن برنامه‌ریزی عدد صحیح است
$\theta_1^s, \theta_2^s$	میزان تأثیر سناریو S بر توابع هدف اول و دوم

مدل ریاضی. در این بخش ساختار مدل ریاضی توسعه داده شده ارائه شده است.

$$\text{MinZ1} = \sum_s pro_s ((\sum_m \sum_t^T Cbm_{mt} \times Xbm_{mt}^s) + (\sum_n \sum_t^T Cbn_{nt} \times Xbn_{nt}^s) + \quad (1)$$

$$(\sum_m^M \sum_k^K \sum_t^T Pb_{mkt}^s \times CVm_{mkt}) + (\sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T Tb_{nkt}^s \times CVn_{nkt}) + (\sum_k^K \sum_t^T IN'_{kt}^s \times CH'_{kt}) +$$

$$(\sum_h^H \sum_t^T IN''_{ht}^s \times CH''_{ht}) + (\sum_k^K \sum_h^H \sum_t^T Q_{kht}^s \times CV_{kht}) + (\sum_k^K \sum_t^T De'_{kt}^s \times CS_{kt}^K) +$$

$$\sum_m^M \delta_m^1 (\sum_t^T Cbm_{mt} \times Xbm_{mt}^s) + \sum_n^N \delta_n^1 (\sum_t^T Cbn_{nt} \times Xbn_{nt}^s) + (\sum_k^K \sum_t^T WB'_{kt}^s \times CW'_{kt})$$

$$\text{MaxZ2} = \sum_s pro_s ((\bar{\alpha}_1 \times (\sum_m^M \sum_k^K \sum_t^T (Pb_{mkt}^s \div Db_{mkt}) + \sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T (Tb_{nkt}^s \div Db'_{nkt}))) \times \quad (2)$$

$$(\bar{\alpha}_2 \times \sum_t^T ((N'_{mt} \times \delta_m \div (\sum_k^K (\sum_m^M Db_{mkt})) + (N''_{nt} \times \gamma_n \div (\sum_n^N Db'_{nkt})))) \times (\bar{\alpha}_3 \times$$

$$(\sum_m^M \sum_k^K \sum_t^T (Pb_{mkt}^s \div Db_{mkt}) + \sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T (Tb_{nkt}^s \div Db'_{nkt})))$$

St:

$$\sum_m^M Pb_{mkt}^s + \sum_n^N Tb_{nkt}^s \leq \mu_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T, s \in S \quad (3)$$

$$\sum_n^N T b_{nkt}^s = \sum_n^N X b_{nt}^s \quad \forall n \in N, t \in T, s \in S \quad (۴)$$

$$\sum_m^M P b_{mkt}^s = \sum_m^M X b_{mt}^s \quad \forall m \in M, t \in T, s \in S \quad (۵)$$

$$\sum_m^M X b_{mt}^s \leq \delta_m \quad \forall m \in M, t \in T, s \in S \quad (۶)$$

$$\sum_n^N X b_{nt}^s \leq \gamma_n \quad \forall n \in N, t \in T, s \in S \quad (۷)$$

$$\sum_m^M P b_{mkt}^s + \sum_n^N T b_{nkt}^s \geq \sum_h^H Q_{kht}^s \quad \forall k \in K, t \in T, s \in S \quad (۸)$$

$$I N_{ht}''^s \leq \tau_{ht} \quad \forall h \in H, t \in T, s \in S \quad (۹)$$

$$I N_{kt}'^s \leq \mu_{kt} \quad (۱۰)$$

$$N_{nt}'' \times \gamma_n + N_{mt}'' \times \delta_m \geq \sum_m^M X b_{mt}^s + \sum_n^N X b_{nt}^s \quad \forall m \in M, n \in N, t \in T, s \in S \quad (۱۱)$$

$$I N_{ht-1}''^s + \sum_k^K Q_{kht}^s + D e_{ht}^s = I N_{ht}''^s + A D_{hts} \quad \forall h \in H, t \in T, s \in S \quad (۱۲)$$

$$I N_{kt-1}'^s + \sum_m^M P b_{mkt}^s + \sum_n^N T b_{nkt}^s + D e_{kt}'' - \sum_h^H Q_{kht}^s = I N_{ht}''^s \quad \forall k \in K, t \in T, s \in S \quad (۱۳)$$

$$W B_{kt}'^s = I N_{kt-1}'^s + \sum_m^M P b_{mkt}^s + \sum_n^N T b_{nkt}^s - \sum_h^H D_{khts} - \sum_h^H D e_{ht}^s \quad \forall k \in K, t \in T, s \in S \quad (۱۴)$$

$$\sum_m^M X b_{mt}^s + \sum_n^N X b_{nt}^s + \geq A D_{hts} \quad \forall h \in H, t \in T, s \in S \quad (۱۵)$$

$$I N_{kt}'^s \leq M \times y_1 \quad (۱۶)$$

$$D e_{kt}'^s \leq M \times y_2 \quad (۱۷)$$

$$y_1 + y_2 = 1 \quad (۱۸)$$

$$\sum_m^M X b_{mt}^s + \sum_n^N X b_{nt}^s \leq \sum_m^M \sum_k^K D b_{mkt}^s + \sum_n^N \sum_k^K D b_{nkt}'^s \quad \forall t \in T, s \in S \quad (۱۹)$$

$$N_{nt}'' \times \gamma_n + N_{mt}'' \times \delta_m \leq \sum_m^M \sum_k^K D b_{mkt}^s + \sum_n^N \sum_k^K D b_{nkt}'^s \quad \forall t \in T, s \in S \quad (۲۰)$$

$$\sum_m^M X b_{mt}^s + \sum_n^N X b_{nt}^s + \varphi_{kmnt}^s + \sum_k^K I N_{kt-1}'^s - \sum_k^K I N_{kt}'^s = \sum_n \sum_k^K D b_{nkt}'^s + \sum_m \sum_k^K D b_{mkt}^s \quad \forall t \in T, s \in S \quad (۲۱)$$

$$Q_{kht}^s, N_{nt}'', N_{mt}'', W B_{kt}'^s, D e_{ht}^s \in Z^+ \quad (۲۲)$$

$$X b_{mt}^s, X b_{nt}^s, P b_{mkt}^s, T b_{nkt}^s, I N_{kt}'^s, I N_{ht}''^s, \varphi_{kmnt}^s \geq 0 \quad (۲۳)$$

$$y_1, y_2 \in \{0,1\} \quad (۲۴)$$

تابع هدف اول (۱)، هزینه کل زنجیره تأمین را که شامل هزینه اهدای خون توسط اهداکنندگان، هزینه حمل خون، هزینه ناشی از بسته‌بندی غیراستاندارد خون، هزینه نگهداری، هزینه اهدای خون، هزینه کمبود و هزینه اتلاف را حداقل می‌سازد. تابع هدف دوم (۲)، مقدار قابلیت اطمینان زنجیره تأمین خون شامل: اطمینان نسبت به شرایط و ایمنی حمل خون از لحاظ نوسانات دما، اطمینان نسبت به کارکرد تجهیزات آزمایشگاهی در مرکز جمع‌آوری خون، اطمینان نسبت به برآورده شدن تقاضای خون در مرکز خون، را حداکثر می‌سازد. محدودیت (۳) کل ورودی خون به مرکز خون از مراکز اهدای دائم و موقت کمتر از مجموع ظرفیت آن مرکز خون است. محدودیت‌های (۴) و (۵) برابری بین ورودی و خروجی جریان خون در مراکز دائمی و موقت اهدای خون می‌باشند. این محدودیت‌ها تعادل جریان را در تسهیلات جمع‌آوری تضمین می‌کنند و اینکه تمام خون دریافت شده توسط تسهیلات جمع‌آوری به مراکز خون منتقل می‌گردد. محدودیت‌های (۶) و (۷) ظرفیت اهدای خون توسط اهداکنندگان در مراکز اهدای خون دائم و موقت را نشان می‌دهند که حداکثر برابر با ظرفیت دریافت خون در این مراکز است. محدودیت (۸) این محدودیت تضمین می‌کند میزان خون ارسال شده به بیمارستان‌ها از میزان خون ارسال شده از مراکز جمع‌آوری به مرکز خون تجاوز نکند. محدودیت (۹) حداکثر ظرفیت نگهداری واحدهای خون در بیمارستان را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۰) حداکثر ظرفیت مرکز خون برای نگهداری خون را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۱) حداکثر ظرفیت تسهیلات جمع‌آوری برای جمع‌آوری خون را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۲) توازن موجودی در بیمارستان را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۳) توازن موجودی در مرکز خون را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۴) میزان اتلاف مرکز خون را مشخص می‌کند. محدودیت (۱۵) تضمین می‌کند میزان خون جمع‌آوری شده میزان تقاضا را پوشش دهد. محدودیت‌های (۱۶، ۱۷، ۱۸) تضمین می‌کند که در یک دوره در مراکز خون، یا موجودی داریم یا کمبود. محدودیت‌های (۱۹، ۲۰) میزان تقاضای مرکز خون را نشان می‌دهند. محدودیت (۲۱) محدودیت کنترلی برای عدم قطعیت در عدم برآورد عرضه خون مورد نیاز مرکز خون، توسط اهداکنندگان از تسهیلات جمع‌آوری خون را نشان می‌دهد که اگر مقدار  $\varphi_{kmnt}^s$  برابر

با صفر گردد دیگر عرضه برآورده نشده نداریم و عرضه میزان تقاضای مرکز خون را برآورد می‌کند و در غیر این صورت عرضه برآورده نشده داریم. محدودیت‌های (۲۲، ۲۳، ۲۴) نوع متغیرهای تصمیم را بیان می‌کنند.

با توجه به اینکه عرضه دارای نوسان و یا به عبارت دیگر همراه با عدم قطعیت می‌باشد مقادیر توابع هدف و متغیرهای بهینه مسئله می‌تواند بسیار متفاوت از توابع هدف و متغیرهای بدست آمده از این مدل باشد. لذا برای کاهش مقدار این تفاوت، به ازای سناریوهای موجود، سعی می‌شود که مدل در برابر پارامترهای غیر قطعی استوار شود. با توجه به اینکه پارامتر تقاضا دارای نوسان و به عبارت دیگر همراه با عدم قطعیت می‌باشد، از فرمول‌بندی استوار مالوی سیم و وندربی (۱۹۹۵) برای استوارسازی مدل استفاده شده است [۳۲]. استفاده از رویکرد استواری مالوی سیم و وندربی در مدیریت زنجیره تأمین خون دارای مزایای متعددی است. این رویکرد بهبود قابلیت مدیریت ریسک‌ها، افزایش انعطاف‌پذیری و ایجاد پایداری در سیستم زنجیره تأمین خون را هدف قرار می‌دهد. استفاده از رویکرد استواری مالوی سیم و وندربی منجر به افزایش استحکام و پایداری سیستم زنجیره تأمین خون می‌شود. این رویکرد امکان ادامه فعالیت‌های زنجیره تأمین در مواقع بحرانی را فراهم می‌کند. با توجه به اینکه زنجیره تأمین خون با چالش‌ها و مخاطرات زیادی روبه‌رو است، استفاده از رویکرد استواری مالوی سیم و وندربی به مدیران این امکان را می‌دهد تا مخاطرات را شناسایی کرده و اقدام لازم را جهت بهبود اعمال کنند. این رویکرد با ایجاد انعطاف‌پذیری در سیستم زنجیره تأمین، امکان سرعت بخشیدن به تغییرات و تطبیق با شرایط متغیر را فراهم می‌کند. استفاده از رویکرد استواری مالوی سیم و وندربی منجر به بهبود عملکرد کلی سیستم زنجیره تأمین خون می‌شود و کارایی زنجیره را افزایش می‌دهد. با بهبود مدیریت ریسک‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری، این رویکرد می‌تواند به کاهش هزینه‌های مرتبط با مدیریت بحران‌ها و مخاطرات کمک کند. به طور کلی، استفاده از رویکرد استواری مالوی سیم و وندربی در مدیریت زنجیره تأمین خون می‌تواند به بهبود عملکرد، کاهش مخاطرات، و افزایش انعطاف‌پذیری در مواجهه با شرایط پیچیده و بحرانی کمک کند. برای این منظور، ابتدا مدل بهینه‌سازی خطی (۲۵) الی (۲۸) را در نظر بگیرید:

$$\min z = C^T X + d^T Y_S \quad (25)$$

subject to:

$$AX = b \quad (26)$$

$$B_S X + C_S Y_S = e_S \quad \forall s \quad (27)$$

$$X, Y_S \geq 0 \quad (28)$$

در مدل فوق،  $X$  بردار متغیرهای طراحی و  $Y$  شامل متغیرهای کنترل است و  $S$  نشان‌دهنده مجموعه سناریوهای موجود است و احتمال وقوع هر سناریو برابر با  $P_S$  در نظر گرفته می‌شود، به طوری که  $\sum_{S=1}^S P_S = 1$  می‌باشد. محدودیت‌های (۲۶) و (۲۷) به ترتیب نشان‌دهنده محدودیت‌های ساختاری و کنترل مساله هستند.  $\delta_S$  بردار متغیرهای انحراف تعریف می‌شوند و میزان نشدنی بودن محدودیت‌های کنترل تحت سناریوی  $S$  را اندازه می‌گیرند. مدل ریاضی استوار برای مدل ریاضی شامل (۲۵) الی (۲۸) به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\min \sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_S) + \omega p(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_S) \quad (29)$$

subject to:

$$AX = b \quad (30)$$

$$B_S X + C_S Y_S + \delta_S = e_S \quad \forall s \quad (31)$$

$$X, Y_S \geq 0 \quad \forall s \quad (32)$$

در مدل فوق، عبارت  $\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_S)$  میزان استواری جواب و عبارت  $p(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_S)$  میزان استواری مدل را اندازه‌گیری می‌کند که برای این عبارات می‌توان توابع مختلفی تعریف نمود. برای مثال  $p(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_S)$  معمولاً برابر با  $\delta_S$  در نظر گرفته

می‌شود. مالوی و همکاران عبارت  $\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s)$  را طبق رابطه (۳۳) برابر با مجموع ارزش انتظاری و  $\lambda$  برابر واریانس تابع هدف، در نظر گرفتند.

$$\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) = \sum_{s \in S} P_s Z_s + \lambda \sum_{s \in S} P_s (Z_s - \sum_{s' \in S} P_{s'} Z_{s'})^2 \quad (33)$$

با جایگزینی  $\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s)$  در تابع هدف، یک مدل برنامه‌ریزی خطی درجه دوم حاصل خواهد شد. یو و لی (۲۰۰۰) پیشنهاد کردند که عبارت:  $\sum_{s \in S} P_s (Z_s - \sum_{s' \in S} P_{s'} Z_{s'})^2$  موجب افزایش زمان حل مسئله می‌شود را می‌توان با عبارت شامل قدرمطلق جایگزین نمود. لذا استواری حل مسئله به صورت (۳۴) تغییر می‌کند:

$$\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) = \sum_{s \in S} P_s Z_s + \lambda \sum_{s \in S} P_s |Z_s - \min \sum_{s' \in S} P_{s'} Z_{s'}| \quad (34)$$

تابع هدف (۲۹) یک معادله غیرخطی است و یو و لی (۲۰۰۰) اثبات کردند که حداقل‌سازی  $\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s)$  معادل مدل برنامه‌ریزی خطی شامل معادلات (۳۵) الی (۳۷) به شرح زیر است.

$$\min \sum_{s \in S} P_s Z_s + \lambda \sum_{s \in S} P_s (Z_s - \min \sum_{s' \in S} P_{s'} Z_{s'} + 2\theta_s) \quad (35)$$

subject to:

$$Z_s - \min \sum_{s' \in S} P_{s'} Z_{s'} + \theta_s \geq 0 \quad \forall s \quad (36)$$

$$\theta_s \geq 0 \quad \forall s \quad (37)$$

در نتیجه مدل بهینه‌سازی استوار (۲۵) الی (۲۸) به مدل زیر تبدیل خواهد شد:

$$\min \sum_{s \in S} P_s Z_s + \lambda \sum_{s \in S} P_s (Z_s - \sum_{s' \in S} P_{s'} Z_{s'} + 2\theta_s) + \sum_{s \in S} P_s \delta_s \quad (38)$$

subject to:

(۳۰) الی (۳۲)، (۳۶) و (۳۷)

برای استوارسازی مدل ریاضی مبتنی بر سناریوی تحقیق، با توجه به مدل [۳۳] توابع هدف (۲۵) و (۲۶) به ترتیب با توابع هدف (۳۹) و (۴۰) جایگزین و محدودیت‌های (۴۱)، (۴۲) و (۴۳) به مدل افزوده می‌گردد.

$$\begin{aligned} \text{Min} Z1 = & \sum_{s \in S} \text{pro}_s \left( ((\sum_m \sum_t^T Cbm_{mt} \times Xbm_{mt}^s) + (\sum_n \sum_t^T Cbn_{nt} \times Xbn_{nt}^s) + \right. & (39) \\ & (\sum_m^M \sum_k^K \sum_t^T Pbm_{mkt}^s \times Cvm_{mkt}) + (\sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T Tbn_{nkt}^s \times Cvn_{nkt}) + (\sum_k^K \sum_t^T IN_{kt}^s \times \\ & CH_{kt}^s) + (\sum_h^H \sum_t^T IN_{ht}^s \times CH_{ht}^s) + (\sum_k^K \sum_h^H \sum_t^T Q_{kht}^s \times CV_{kht}) + (\sum_k^K \sum_t^T De'_{kt}^s \times \\ & CS_{kt}^s) + \sum_m^M \delta_m^1 (\sum_t^T Cbm_{mt} \times Xbm_{mt}^s) + \sum_n^N \delta_n^1 (\sum_t^T Cbn_{nt} \times Xbn_{nt}^s) + \\ & (\sum_k^K \sum_t^T WB'_{kt}^s \times CW'_{kt}^s) \left. \right) + \lambda \sum_{s \in S} \text{pro}_s \left[ ((\sum_m \sum_t^T Cbm_{mt} \times Xbm_{mt}^s) + \right. \\ & (\sum_n \sum_t^T Cbn_{nt} \times Xbn_{nt}^s) + (\sum_m^M \sum_k^K \sum_t^T Pbm_{mkt}^s \times Cvm_{mkt}) + (\sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T Tbn_{nkt}^s \times \\ & Cvn_{nkt}) + (\sum_k^K \sum_t^T IN_{kt}^s \times CH_{kt}^s) + (\sum_h^H \sum_t^T IN_{ht}^s \times CH_{ht}^s) + (\sum_k^K \sum_h^H \sum_t^T Q_{kht}^s \times \\ & CV_{kht}) + (\sum_k^K \sum_t^T De'_{kt}^s \times CS_{kt}^s) + \sum_m^M \delta_m^1 (\sum_t^T Cbm_{mt} \times Xbm_{mt}^s) + \sum_n^N \delta_n^1 (\sum_t^T Cbn_{nt} \times \\ & Xbn_{nt}^s) + (\sum_k^K \sum_t^T WB'_{kt}^s \times CW'_{kt}^s) \left. \right) - \sum_{s \in S} \text{pro}_s \left( ((\sum_m \sum_t^T Cbm_{mt} \times Xbm_{mt}^s) + \right. \\ & (\sum_n \sum_t^T Cbn_{nt} \times Xbn_{nt}^s) + (\sum_m^M \sum_k^K \sum_t^T Pbm_{mkt}^s \times Cvm_{mkt}) + (\sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T Tbn_{nkt}^s \times \\ & Cvn_{nkt}) + (\sum_k^K \sum_t^T IN_{kt}^s \times CH_{kt}^s) + (\sum_h^H \sum_t^T IN_{ht}^s \times CH_{ht}^s) + (\sum_k^K \sum_h^H \sum_t^T Q_{kht}^s \times \\ & CV_{kht}) + (\sum_k^K \sum_t^T De'_{kt}^s \times CS_{kt}^s) + \sum_m^M \delta_m^1 (\sum_t^T Cbm_{mt} \times Xbm_{mt}^s) + \\ & \left. \sum_n^N \delta_n^1 (\sum_t^T Cbn_{nt} \times Xbn_{nt}^s) + (\sum_k^K \sum_t^T WB'_{kt}^s \times CW'_{kt}^s) \right) + 2\theta_s^1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Max} Z_2 = \sum_s \text{pro}_s & \left( (\bar{\alpha}_1 \times (\sum_m^M \sum_k^K \sum_t^T (Pb_{mkt}^s \div Db_{mkt}^s) + \sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T (Tb_{nkt}^s \div \right. \\ & Db'_{nkt}^s)) \times (\bar{\alpha}_2 \times \sum_t^T ((N'_{mt} \times \delta_m \div (\sum_k^K (\sum_m^M Db_{mkt}^s) + (N''_{nt} \times \gamma_n \div \\ & (\sum_n^N Db'_{nkt}^s)))) \times (\bar{\alpha}_3 \times \sum_t^T ((N'_{mt} \times \delta_m \div (\sum_k^K (\sum_m^M Db_{mkt}^s) + \sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T (Tb_{nkt}^s \div \\ & Db'_{nkt}^s)))) + \lambda \sum_{s \in S} \text{pro}_s [((\bar{\alpha}_1 \times (\sum_m^M \sum_k^K \sum_t^T (Pb_{mkt}^s \div Db_{mkt}^s) + \\ & \sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T (Tb_{nkt}^s \div Db'_{nkt}^s)) \times (\bar{\alpha}_2 \times \sum_t^T ((N'_{mt} \times \delta_m \div (\sum_k^K (\sum_m^M Db_{mkt}^s) + \\ & (N''_{nt} \times \gamma_n \div (\sum_n^N Db'_{nkt}^s)))) \times (\bar{\alpha}_3 \times \sum_t^T ((N'_{mt} \times \delta_m \div (\sum_k^K (\sum_m^M Db_{mkt}^s) + \\ & \sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T (Tb_{nkt}^s \div Db'_{nkt}^s)))) - \sum_{s \in S} \text{pro}_s ((\bar{\alpha}_1 \times (\sum_m^M \sum_k^K \sum_t^T (Pb_{mkt}^s \div Db_{mkt}^s) + \\ & \sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T (Tb_{nkt}^s \div Db'_{nkt}^s)) \times (\bar{\alpha}_2 \times \sum_t^T ((N'_{mt} \times \delta_m \div (\sum_k^K (\sum_m^M Db_{mkt}^s) + \\ & (N''_{nt} \times \gamma_n \div (\sum_n^N Db'_{nkt}^s)))) \times (\bar{\alpha}_3 \times \sum_t^T ((N'_{mt} \times \delta_m \div (\sum_k^K (\sum_m^M Db_{mkt}^s) + \\ & \sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T (Tb_{nkt}^s \div Db'_{nkt}^s)))) + 2\theta_2^s] \end{aligned} \quad (40)$$

subject to:

$$\begin{aligned} & (\bar{\alpha}_1 \times (\sum_m^M \sum_k^K \sum_t^T (Pb_{mkt}^s \div Db_{mkt}^s) + \sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T (Tb_{nkt}^s \div Db'_{nkt}^s)) \times \\ & (\bar{\alpha}_2 \times \sum_t^T ((N'_{mt} \times \delta_m \div (\sum_k^K (\sum_m^M Db_{mkt}^s) + (N''_{nt} \times \gamma_n \div (\sum_n^N Db'_{nkt}^s)))) \times (\bar{\alpha}_3 \times \sum_t^T \\ & ((N'_{mt} \times \delta_m \div (\sum_k^K (\sum_m^M Db_{mkt}^s) + \sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T (Tb_{nkt}^s \div Db'_{nkt}^s)))) + \theta_2^s \geq \\ & 0 \quad \forall s \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} & (\sum_m^M \sum_t^T Cbm_{mt} \times Xbm_{mt}^s) + (\sum_n^N \sum_t^T Cbn_{nt} \times Xbn_{nt}^s) + (\sum_m^M \sum_k^K \sum_t^T Pb_{mkt}^s \times \\ & CVm_{mkt}^s) + (\sum_n^N \sum_k^K \sum_t^T Tb_{nkt}^s \times CVn_{nkt}^s) + (\sum_k^K \sum_t^T IN'_{kt}^s \times CH'_{kt}^s) + (\sum_h^H \sum_t^T IN''_{ht}^s \times \\ & CH''_{ht}^s) + (\sum_k^K \sum_h^H \sum_t^T Q_{kht}^s \times CV_{kht}^s) + (\sum_k^K \sum_t^T De'_{kt}^s \times CS_{kt}^s) + \sum_m^M \delta_m^1 (\sum_t^T Cbm_{mt} \times \\ & Xbm_{mt}^s) + \sum_n^N \delta_n^1 (\sum_t^T Cbn_{nt} \times Xbn_{nt}^s) + (\sum_k^K \sum_t^T WB'_{kt}^s \times CW'_{kt}^s) + \theta_1^s \geq \\ & 0 \quad \forall s \end{aligned} \quad (42)$$

$$\theta_1^s, \theta_2^s \geq 0 \quad \forall s \quad (43)$$

**روش حل مسأله:** مسأله چندهدفه پیشنهاد شده در این تحقیق با استفاده از روش مجموع وزن دار شده حل شده است. بر طبق روش مجموع وزن دار شده، تصمیم گیرنده به اهداف مختلف وزن اختصاص می دهد و سپس توابع هدف را در وزن های مربوطه ضرب و در نهایت تابع هدف واحدی بوجود می آورد. یکی از روش های حل مسأله بهینه سازی چندهدفه تبدیل آن به یک مسأله بهینه سازی تک هدفه پارامتری است که به این نوع تبدیل کمی سازی می گویند. یکی از این نوع روش های کمی سازی، روش وزن دار شده<sup>۱</sup> می باشد [۴۵].

فرض کنید،  $Y \subseteq \mathbb{R}^p$  برای یک بردار وزنی دلخواه  $\hat{\lambda} = (\hat{\lambda}_1, \dots, \hat{\lambda}_p) \in \mathbb{R}_{\geq}^p$  باشد. مجموعه تمام جواب های بهینه سازی چندهدفه نسبت به بردار وزنی  $\hat{\lambda}$  به شکل رابطه ۴۴ تعریف می گردد.

$$S(\hat{\lambda}, Y) = \{\hat{y} \in Y : \langle \hat{\lambda}, \hat{y} \rangle = \min_{y \in Y} \langle \hat{\lambda}, y \rangle\} \quad (44)$$

که در آن  $\langle \hat{\lambda}, y \rangle$  ضرب اسکالر در  $\mathbb{R}^p$  است. فرض کنید  $\langle \hat{\lambda}, y \rangle = c$  که در آن  $c$  یک پارامتر است و  $y \in Y$  است. از بین تمام مقادیر  $c$  در حقیقت به دنبال کوچکترین مقدار  $c$  می باشیم که اشتراک بین ناحیه شدنی  $Y$  و  $\langle \hat{\lambda}, y \rangle = c$  مخالف با تهی باشد. از آنجایی که شرط  $\sum_{k=1}^p \lambda_k = 1$  را همواره می توان ساخت و این شرط تغییری در مجموعه جواب های غیرمغلوب مسأله بهینه سازی چندهدفه نسبت به شرط  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_p) \in \mathbb{R}_{\geq}^p$  ایجاد نمی کند، لذا همواره از شرط  $\sum_{k=1}^p \lambda_k = 1$  استفاده می کنیم. فرض کنید:

$$S(Y) = \bigcup_{\lambda \in \mathbb{R}_{\geq}^p} S(\lambda, Y) = \bigcup_{\{\lambda > 0 : \sum_{k=1}^p \lambda_k = 1\}} S(\lambda, Y) \quad (45)$$

و همچنین،

$$S_0(Y) = \bigcup_{\lambda \in \mathbb{R}_{\geq}^p} S(\lambda, Y) = \bigcup_{\{\lambda \geq 0 : \sum_{k=1}^p \lambda_k = 1\}} S(\lambda, Y) \quad (46)$$



که در روابط ۴۵ و ۴۶،  $S(Y)$  و  $S_0(Y)$  به ترتیب مجموعه تمام نقاط غیرمغلوب مسأله بهینه‌سازی چندهدفه را نسبت به بردار وزنی  $\lambda \in \mathbb{R}_{\geq}^p$  و  $\lambda \in \mathbb{R}_{\geq}^p$  را نشان می‌دهند [۴۵].

استفاده از روش مجموع وزن‌دار شده در برنامه‌ریزی چندهدفه به مدیران امکان می‌دهد تا اهداف مختلف و متنوعی که در برنامه‌ریزی چندهدفه وجود دارند را با انعطاف‌پذیری بالا مدیریت کنند. با تخصیص وزن‌های مختلف به اهداف، می‌توان به بهترین تعادل بین آن‌ها دست یافت. این روش، امکان ادغام اهداف مختلف را با هم فراهم می‌کند تا به یک ترکیب بهینه از اهداف دست یافته شود. با تعیین وزن‌های مناسب برای هر هدف، می‌توان به بهترین ترکیب اهداف رسید. این روش به مدیران کمک می‌کند تا تصمیمات هوشمندانه‌تری بگیرند. با در نظر گرفتن وزن‌های مختلف برای اهداف، تصمیم‌گیری‌ها به شکلی دقیق‌تر و منطقی‌تر انجام می‌شود. با استفاده از این روش، منابع مختلف مانند زمان، نیروی کار، و سرمایه به بهترین شکل ممکن تخصیص داده شده و این منجر به بهره‌وری بیشتر و بهبود عملکرد کلی سازمان می‌شود. با استفاده از روش مجموع وزن‌دار شده، ارزیابی عملکرد در راستای اهداف متعدد ساده‌تر می‌شود و پیگیری اجرای برنامه‌ها و پروژه‌ها بهبود می‌یابد. به طور کلی، استفاده از روش مجموع وزن‌دار شده در برنامه‌ریزی چندهدفه به مدیران کمک می‌کند تا به بهترین ترکیب اهداف دست یابند، تصمیمات هوشمندتری بگیرند و منابع را به بهترین شکل ممکن مدیریت کنند [۴۷].

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

**حل عددی مدل ریاضی.** برای بررسی قابلیت حل مدل در ابعاد مختلف، ۶ نمونه در اندازه‌های مختلف تولید شده که نتایج حل آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. در جدول ۳، ستون دوم نشان‌دهنده تعداد اعضای هر نمونه است. اعضا عبارتند از  $(m, n, k, h, t, s)$ ، که در آن  $m$  تعداد تسهیلات جمع‌آوری خون دائمی،  $n$  تسهیلات جمع‌آوری موقت،  $k$  تعداد مراکز خون،  $h$  تعداد بیمارستان،  $t$  تعداد دوره و  $s$  تعداد سناریو می‌باشد. برای حل مدل ریاضی ارائه شده از حل‌کننده BARON در نرم‌افزار ۲۵.۱.۲ GAMS در یک کامپیوتر خانگی استفاده شده است. مقدار کلیه پارامترهای مدل و همچنین سناریوهای مربوطه از مطالعه [۱۰] و [۳۴] گرفته شده است. همچنین، مدل پیشنهادی قابلیت بررسی دو سناریو را دارد. مدل پس از بی‌مقیاس‌سازی پارامترها بر اساس داده‌های فوق حل شده و برای تایید عملکرد آن بر روی تغییر پارامترهای هزینه اتلاف، کمبود و عملکرد توابع هدف، تحلیل حساسیت انجام شد که گزارش آن در ادامه آمده است.

جدول ۳. آزمایش‌های عددی

تعداد نمونه	اندازه نمونه	مقدار بهینه تابع هدف اول	مقدار بهینه تابع هدف دوم	مقدار بهینه تابع هدف مساله	زمان حل (ساعت)
۱	(۲، ۲، ۲، ۴، ۲، ۲)	۱.۵۲۶	۶۵۹.۰۸۶	۱.۵۴۲E+9	۰۲:۱۶:۱۰
۲	(۳، ۲، ۲، ۸، ۲، ۲)	۳.۶۳۹	۶۸۷.۷۶۵	۱.۴۷۸E+9	۰۲:۲۴:۱۶
۳	(۴، ۲، ۳، ۱۱، ۲، ۲)	۳.۹۰۱	۵۱۲.۶۲۴	۱.۶۹۸E+9	۰۲:۳۸:۲۷
۴	(۶، ۴، ۲، ۱۲، ۲، ۲)	۵.۴۹۷	۵۳۴.۹۱۵	۴.۴۹۳E+9	۰۱:۳۹:۴۵
۵	(۶، ۳، ۲، ۱۵، ۲، ۲)	۵.۲۸۳	۷۱۲.۸۷۳	۱.۲۳۹E+10	۰۲:۴۰:۴۵
۶	(۱۰، ۵، ۲، ۲۰، ۲، ۲)	۶.۸۹۶	۶۸۳.۹۰۱	۱.۳۴۷E+10	۰۳:۵۰:۳۴

**اعتبارسنجی مدل ریاضی استوار مبتنی بر سناریو.** برای اعتبارسنجی و صحت عملکرد مدل، تحلیل حساسیت بر روی هزینه اتلاف و کمبود و نیز تابع هدف انجام شد، به ازای ابعاد (۲، ۲، ۲، ۵، ۴، ۶)، که نتایج مطابق جدول (۵ و ۴) بدست آمد. **تحلیل حساسیت بر روی هزینه اتلاف و کمبود.** برای آزمون صحت مدل بر روی پارامترهای هزینه اتلاف و هزینه کمبود تحلیل حساسیت صورت گرفته است (جدول ۴ و ۵).

جدول ۴. تغییرات هزینه اتلاف در مرکز خون

مقادیر تابع هدف	میزان اتلاف در مرکز خون				وزن	هزینه اتلاف در مرکز خون	آزمایش
	دوره ۲		دوره ۱				
	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>			
۶.۴۹۲E+9	۹۹۸.۳۴۶	۱۸۶	۱۰۵	-	۱۴۷	K <sub>1</sub>	۱
		۱۸۶	۸	۱۳۸	۱۴۷	K <sub>2</sub>	
۶.۴۹۲E+9	۱۰۲۳.۴۵۶	۱۸۶	۱۰۵	۲۱	۱۴۷	K <sub>1</sub>	۲
		۱۸۶	۸	۱۸۶	۱۴۷	K <sub>2</sub>	
۶.۴۹۲E+9	۱۰۹۴.۰۷۸	۱۸۶	۱۴۷	۱۸۶	۲۱	K <sub>1</sub>	۳
		۱۸۶	۱۴۷	۱۸۶	۱۴۷	K <sub>2</sub>	
۶.۴۹۲E+9	۱۱۷۸.۶۴۱	۱۴۹	۱۴۷	۱۶۷	۵۶	K <sub>1</sub>	۴
		۱۸۶	۲۲۳	۱۳۸	۳۹	K <sub>2</sub>	
۶.۴۹۲E+9	۱۲۳۴.۳۰۹	۱۸۶	۱۴۷	۲۲۳	۸۶	K <sub>1</sub>	۵
		۱۴۹	۸۶	۱۳۸	۲۱	K <sub>2</sub>	

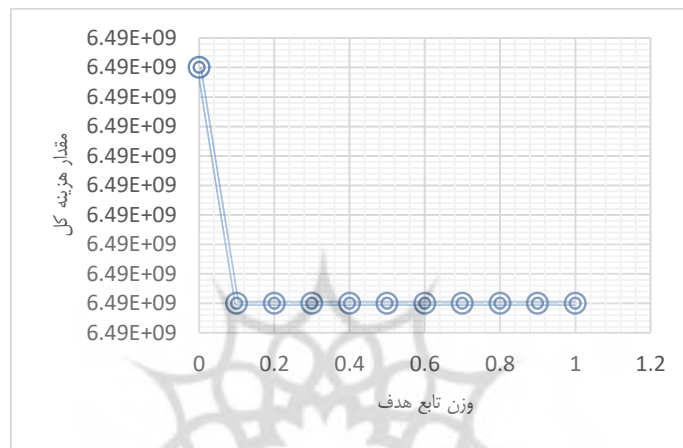
همان‌گونه که در جدول (۴) مشاهده می‌گردد، با افزایش هزینه اتلاف میزان اتلاف کاهش می‌یابد، که این امر افزایش هزینه کل زنجیره تأمین را در پی داشت، در حالی که میزان تابع هدف کل استوار باقی ماند. همچنین با افزایش هزینه کمبود میزان کمبود ثابت مانده و این امر افزایش مقدار تابع هزینه را در پی نداشت (جدول ۵)، که نتایج صحت مدل ارائه شده استوار را تایید می‌کنند.

جدول ۵. تغییرات هزینه کمبود در بیمارستان

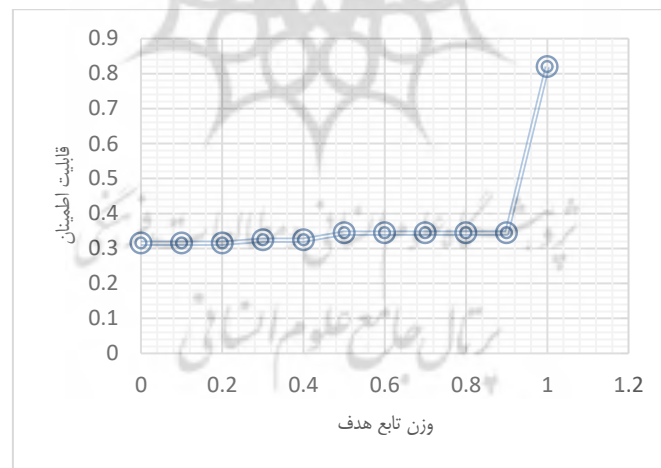
مقادیر تابع هدف	میزان کمبود در بیمارستان				هزینه کمبود در بیمارستان	آزمایش
	دوره ۲		دوره ۱			
	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>		
۱۰۹۴.۰۷۸	۱۹۱۵.۵	۳۸۱۲	۱۹۳۳.۷۵	۳۸۷۳	۰.۰	۱
		۳۸۱۱	۱۹۳۳.۲۵	۳۸۷۳	۰.۱۵۶۲۵	
۱۰۹۴.۰۷۸	۱۹۱۵.۵	۳۸۱۲	۱۹۳۴.۲۵	۳۸۷۳	۰.۳۱۲۵	۳
		۳۸۱۲	۱۹۳۴.۲۵	۳۸۷۳	۰.۶۲۵	
۱۰۹۴.۰۷۸	۱۹۱۵.۵	۳۸۱۲	۱۹۳۲.۷۵	۳۸۷۲	۱.۸۷۵	۵
		۳۸۱۱	۱۹۳۲.۷۵	۳۸۷۲	۱.۸۷۵	

تحلیل حساسیت تابع هدف. مدل ارائه شده یک مدل استوار چند هدفه برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی مختلط می‌باشد که دو تابع هدف مدل درصدد کاهش ریسک زنجیره تأمین خون از طریق حداقل‌سازی هزینه کل و حداکثرسازی قابلیت اطمینان می‌باشند. برای حل مدل از روش وزنی استفاده و برای تحلیل حساسیت، تابع هدف وزن‌های مختلف برای توابع هدف برای مساله‌ای با ابعاد (۲، ۲، ۲، ۴، ۶)، با ارزش وزنی (۰ الی ۱) ایجاد گردید. نتایج در شکل‌های ۱ الی ۴ ارائه شده است. شکل ۱ حداقل‌سازی هزینه کل در مدل استوار را نشان می‌دهد و مشاهده می‌گردد که با افزایش وزن تابع هدف حداقل‌سازی هزینه، تابع هدف به سمت حداقل‌سازی و بهینه شدن پیش می‌رود و مقدار آن در وزن ۰.۱ استوار می‌گردد. با افزایش وزن در

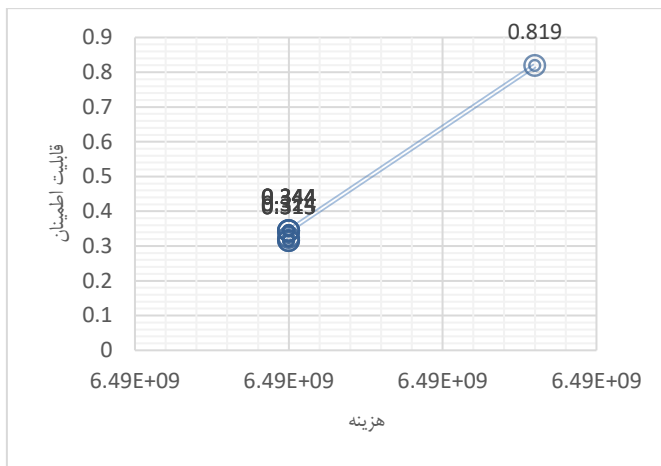
تابع هدف حداکثرسازی قابلیت اطمینان، میزان تابع هدف از ۰.۵ استوار بوده و به سمت حداکثرسازی پیش می‌رود و در وزن ۱ به حداکثر میزان خود می‌رسد (شکل ۲) که این امر بیانگر صحت عملکرد مدل استوار ارائه شده می‌باشد. در شکل ۳ پارتو تغییرات تابع هزینه و قابلیت اطمینان استوار نشان داده شده است و مشاهده می‌گردد که با افزایش میزان استواری تابع هدف هزینه، تابع استوار قابلیت اطمینان به شدت کاهش می‌یابد و برعکس. شکل ۴ نیز تغییرات قابلیت اطمینان در برابر تعداد تسهیلات جمع‌آوری خون را نشان می‌دهد که بین این دو رابطه مستقیم وجود دارد و با افزایش تعداد تسهیلات جمع‌آوری، قابلیت اطمینان سیستم نیز افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود قابلیت اطمینان با احداث بیش از ۱۵ تسهیل، افزایش پیدا نمی‌کند. در نتیجه، احداث و به‌کارگیری بیش از ۱۵ تسهیلات جمع‌آوری خون مقرون به صرفه نیست و این نشان‌دهنده افزایش بهره‌وری زنجیره تأمین در سطح تسهیلات جمع‌آوری خون در صورت استفاده از مدل ارائه شده است.



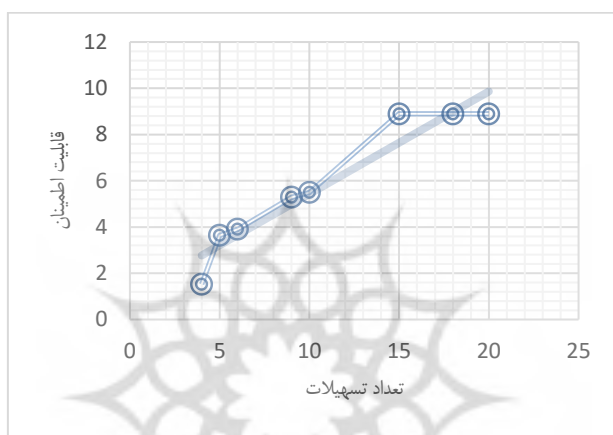
شکل ۱. حداقل‌سازی هزینه کل در مدل استوار



شکل ۲. حداکثرسازی قابلیت اطمینان



شکل ۳. قابلیت اطمینان در برابر هزینه کل



شکل ۴. تغییرات قابلیت اطمینان در برابر تعداد تسهیلات جمع‌آوری خون

با توجه به نتایج حاصل شده در بالا، مدل‌های پیش‌بینی و بهینه‌سازی در مدیریت زنجیره تأمین خون ابزارهای قدرتمندی هستند که به بهبود عملکرد و بهره‌وری در این صنعت کمک می‌کنند. این مدل‌ها از تحلیل داده‌ها، الگوریتم‌های بهینه‌سازی و روش‌های پیش‌بینی برای بهبود فرآیندها و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با زنجیره تأمین خون استفاده می‌کنند.

به عنوان مثال، از مدل‌های پیش‌بینی می‌توان برای پیش‌بینی نیازهای آینده برای محصولات خونی استفاده کرد. این پیش‌بینی‌ها می‌تواند به مدیران زنجیره تأمین خون کمک کند تا بهبودی در برنامه‌ریزی تولید، موجودی و توزیع خون داشته باشند. از طرف دیگر، مدل‌های بهینه‌سازی می‌توانند به مدیران کمک کنند تا بهینه‌سازی مسائلی مانند مسیرهای حمل‌ونقل، موجودی و تخصیص منابع را انجام دهند تا هزینه‌ها را کاهش و بهره‌وری را افزایش دهند. با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی، می‌توان بهبود در تخصیص منابع، موجودی و فرآیندهای تولید و توزیع داشت که منجر به کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری می‌شود. مدل‌های پیش‌بینی و بهینه‌سازی می‌توانند بهره‌وری در فرآیندها و تصمیم‌گیری‌ها را افزایش دهند و به مدیران اطلاعات دقیقی برای اتخاذ تصمیم‌های بهتر ارائه کنند. با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی، می‌توان نیازهای مشتریان را بهتر پیش‌بینی کرده و بهبود در تأمین محصولات خونی به آنها داشت. به طور کلی، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی و بهینه‌سازی در مدیریت زنجیره تأمین خون می‌تواند به بهبود عملکرد، افزایش بهره‌وری، و کاهش هزینه‌ها منجر شود و به خدمات بهتر و موثرتر به مشتریان منجر گردد.

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

شرایط همه‌گیری با کاهش تعداد اهداکنندگان و کاهش در دسترس بودن امکانات جمع‌آوری خون، تأثیر بسیار منفی بر زنجیره تأمین خون داشته است، که خدمات انتقال خون در سراسر جهان را متاثر ساخته است [۴۶،۳۸]. به طوری که در هفته‌های اولیه پس از همه‌گیری COVID-19، کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی در اهدای خون مشاهده شد و بر کل زنجیره تأمین خون تأثیر منفی گذاشت [۴۳]. در شرایط همه‌گیری کرونا محدودیت‌هایی که توسط دولت‌ها اعمال شد، اهدای خون را تحت فشار زیادی قرار داد. عدم فعالیت کامل مراکز خون موقت طی یک دوره طولانی و ترس اهداکنندگان از ابتلا به ویروس کرونا بر لغو اهدای خون و عدم تمایل به حضور در مراکز اهدای خون برای اهدای خون افزود. بسیاری از مراکز خون در سراسر جهان برای جمع‌آوری خون کافی، جهت برآوردن تقاضای بیمارستان با مشکلات زیادی روبرو شدند و خدمات انتقال خون با مشکلات اساسی برای حفظ موجودی ایمن خون مواجه گردیدند [۲۶]. در حالی که اطمینان از تأمین خون در زمان همه‌گیری کرونا از اهمیت بالایی برخوردار است، به موقع بودن و در دسترس بودن فرآورده‌های خونی با توجه به کاهش تعداد اهداکنندگان [۳۸] چالش مهمی را در زنجیره تأمین خون بوجود می‌آورد و در نتیجه برنامه‌ریزی و اقدام برای جلوگیری از ریسک‌های زنجیره تأمین خون و حداقل‌سازی تأثیرات مخرب این ریسک‌ها می‌تواند منجر به بهبود عملکرد زنجیره تأمین خون گردد. برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین کارآمد، داشتن شبکه مطلوب جمع‌آوری و توزیع خون اهمیت زیادی دارد [۴۸] و کارایی زنجیره‌های تأمین خون به طور قابل توجهی می‌تواند از طریق برنامه‌ریزی ریاضی مانند روش‌های تحقیق در عملیات بهبود یابد.

با توجه به موارد اشاره شده در بالا، در این تحقیق یک مدل استوار دو هدفه چند سطحی عدد صحیح مختلط غیرخطی مبتنی بر سناریو با هدف کاهش ریسک‌های زنجیره تأمین خون در شرایط پاندمی کرونا ارائه گردید. مدل طراحی شده در این تحقیق مقدار متغیرهای تصمیم شامل میزان خون جمع‌آوری شده از اهداکنندگان توسط تسهیلات جمع‌آوری دائمی و موقت، تعداد تسهیلات جمع‌آوری خون دائمی و موقت، میزان موجودی خون در هر مرکز و بیمارستان میزان خون ارسال شده از مراکز جمع‌آوری دائمی و موقت به مرکز خون، خون ارسال شده از مرکز خون به بیمارستان، را با هدف کاهش ریسک زنجیره تأمین خون از طریق کاهش هزینه کل و افزایش قابلیت اطمینان زنجیره تأمین خون تعیین و در عین حال اتلاف و کمبود در مرکز خون نیز حداقل می‌گردد. با توجه به جستجوی محققان در ادبیات موضوع تعداد مقاله‌های زنجیره تأمین خون که در مدل‌سازی قابلیت اطمینان را مورد توجه قرار داده‌اند بسیار محدود می‌باشد. نتایج تحقیق با یافته‌های تحقیق معتمدی و همکاران، هم راستا بوده و در هر دو تحقیق نتایج بیانگر رابطه مستقیم بین تعداد تسهیلات جمع‌آوری خون و قابلیت اطمینان زنجیره تأمین بوده‌اند [۳۰]. کاگلیانو و همکاران (۲۰۲۲)، نیز بیان کردند سطح موجودی خون بیشترین تأثیرپذیری را از همه‌گیری کرونا دارد [۱۰]. زنده دل و همکاران (۲۰۱۴) نیز در تحقیق خود تنها اختلال در محل استقرار را در نظر گرفتند و نتایج نشان دهنده اهمیت موضوع قابلیت اطمینان در بحث مکان‌یابی بود [۴۹]. قاسمی (۲۰۲۲) نیز در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که بین افزایش قابلیت اطمینان زنجیره تأمین خون و تعداد تسهیلات جمع‌آوری خون رابطه مستقیمی وجود دارد [۲۰]. همچنین نتایج بیانگر این بود که با مدیریت موجودی خون در مراکز خون می‌توان کمبود را تا حد صفر کاهش داد و نیز اتلاف را به حداقل رساند و اینکه با به‌کارگیری مدل ارائه شده می‌توان بهره‌وری را در استفاده از تسهیلات جمع‌آوری خون افزایش داد و از هزینه‌های اضافی در زمینه استفاده و به‌کارگیری تسهیلات جمع‌آوری خون بیشتر از ظرفیت عرضه کاست.

با توجه به اینکه می‌توان مهمترین مساله زنجیره تأمین خون را تأمین خون برای نقاط تقاضا دانست و کمبود خون منجر به خطر افتادن جان انسان‌ها می‌گردد در مدل ارائه شده میزان کمبود کمینه می‌گردد. مدل ارائه شده با هدف کاهش

ریسک‌های زنجیره تأمین خون در شرایط پاندمی کرونا که سطح عرضه خون را به شدت تحت تاثیر قرار داد موجب پایداری زنجیره خون شده و رسیدن به هدف زنجیره تأمین خون را که تأمین خون مورد نیاز برای نقاط تقاضا است را با حداقل هزینه کل محقق می‌سازد. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش تعداد تسهیلات جمع‌آوری خون می‌توان میزان خون ارسال شده از این مراکز به مراکز خون را افزایش داد که این امر کاهش ریسک‌ها و افزایش قابلیت اطمینان زنجیره تأمین خون و پاسخگویی به تقاضا را در پی دارد. همچنین با مدیریت موجودی می‌توان ریسک زنجیره تأمین را مدیریت کرده و آن را کاهش داد. برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود بررسی چگونگی تأثیرات پاندمی کرونا بر زنجیره تأمین خون، از جمله تأثیرات بر تقاضا، تأمین، توزیع، و مدیریت مخاطرات، مفید باشد. زیرا، پاندمی کرونا باعث افزایش ناپایدار تقاضا برای خون و محصولات خونی شده است. از یک سو برخی بیماران به دلیل بستری شدن در بیمارستان‌ها نیاز بیشتری به خون دارند و از سوی دیگر، برخی از مراکز خون‌گیری به دلیل شرایط سخت‌تر به دلیل شیوع بیماری، با کاهش داوطلبان خون مواجه شده‌اند. همچنین، برخی از مراکز خون‌گیری به دلیل شرایط بحرانی و نیاز به اعطای خون با مشکلات در تأمین خون مواجه شده‌اند. بسترهای بهداشتی و ایمنی بیشتری برای جمع‌آوری خون نیاز است که ممکن است باعث کاهش تأمین خون شود. بعلاوه مشکلات حمل و نقل و توزیع به دلیل محدودیت‌های مربوط به قرنطینه و محدودیت‌های اجتماعی ممکن است باعث تأخیر در تحویل خون به مقصد نهایی شود. این موضوع می‌تواند به کاهش بهره‌وری و افزایش هزینه‌ها منجر شود. همچنین، ارائه مدل‌های پیش‌بینی برای تأثیرات پاندمی بر زنجیره تأمین خون و توسعه مدل‌های مدیریت ریسک مناسب برای پاسخگویی به این شرایط بحرانی نیز ضروری است. با انجام این تحقیقات، می‌توان بهبود و راهکارهایی برای مدیریت ریسک زنجیره تأمین خون در شرایط پاندمی کرونا ارائه کرد و به بهبود عملکرد و پایداری این زنجیره کمک کرد.

**تعارض منافع.** برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.

## منابع

1. Aghiani, M., Jabbarzadeh, A., Sajjadi, S.J. (2015). Presenting a robust optimization model for designing blood supply chain network in crisis situations with regard to reliability, *Journal of Engineering and Quality Management*, 5 (2), 85-96 (In Persian)
2. Ala, A., Simic, V., Bacanin, N., & Tirkolaee, E. B. (2024). Blood supply chain network design with lateral freight: A robust possibilistic optimization model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108053.
3. Arani, M., Chan, Y., Xian, L., Momenitabar, M. (2021). A lateral resupply blood supply chain network design under uncertainties, *Applied Mathematical Modelling*, 93, 165-187.
4. Ayer, T., Zhang, C., Zeng, C., White III, C. C., & Joseph, V. R. (2019). Analysis and improvement of blood collection operations: winner—2017 M&SOM practice-based research competition. *Manufacturing & Service Operations Management*, 21(1), 29-46.
5. Andres F. Osorio, Sally C. Brailsford, Honora K. Smith., (2017). Whole Blood OR Apheresis Donations? A Multi-Objective Stochastic Optimization Approach. *European Journal of Operational Research*, doi: 10.1016/j.ejor.2017.09.005.
6. Babazadeh Rafiei, A., Sohrabi, T., Motamedi, M., & Darvish Motevalli, M. H. (2023). Identifying and ranking the risks of the blood supply chain in the conditions of the corona virus pandemic. *Sci J Iran Blood Transfus Organ*, 20 (2):111-122. (In Persian).
7. Babazadeh Rafiei, A., Motamedi, M., Tahmoores, S., & Darvish Motevalli, M. H. (2023). Design of a scenario-based multi-level and multi-objective mathematical model with the aim of reducing the risk of the blood supply chain in the conditions of the COVID-19 pandemic. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 10(2), 59-74.
8. Beliën, J., Forcé, H. (2012). Supply chain management of blood products: a literature review. *European Journal of Operational Research*, 217 (1), 1-16.

9. Brindley, C.S., RITCHIE, R.L., (2009). Effective management of supply chain risk and performance. Managing supply chain risk vulnerability. In: T. WU and J. BLACKHURST, eds., *managing supply chain risk vulnerability*. New York: Springer, 9-26.
10. Cagliano, A.C., Grimaldi, S., Rafele. Campanale, CH., (2022). An enhanced framework for blood supply chain risk management, *Sustainable Futures*, 4, 100091.
11. Cavinato, J.L., (2004). Supply chain logistics risks: From the back room to the board room. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(5), 383-387.
12. Cohen, M.A., W.P. Pierskalla, (1975). Management policies for a regional blood bank. *Transfusion*, 15, 58-67.
13. Davoodi Kiaklayeh. A., Paridar. M., Tougeh, Gh. (2012), calculating the unit cost of blood transfusion centers in Guilan province, *Blood Research Quarterly*, 9(3), 346-352. (In Persian).
14. Doodman, M., & Bozorgi Amiri, A. (2020). Integrate Blood Supply Chain Network Design with Considering Lateral Transshipment under Uncertainty. *Journal of Industrial Management Perspective*, 9(4), 9-40. (In Persian).
15. Ekici, A. Örsan Özener, O. Çoban, E. (2018). Blood Supply Chain Management and Future Research Opportunities. *Operations Research Applications in Health Care Management, International Series in Operations Research & Management Science*, 262, 10-25.
16. Faisal, M.N., (2009). Prioritization of risks in supply chains. In: T. Wu and J. Blackhurst, eds. *managing supply chain risk and vulnerability*. London: Springer. Ch.4.
17. Fariman, S. K., Danesh, K., Pourtalebiyan, M., Fakhri, Z., Motallebi, A., & Fozooni, A. (2024). A robust optimization model for multi-objective blood supply chain network considering scenario analysis under uncertainty: a multi-objective approach. *Scientific Reports*, 14(1), 9452.
18. Fereiduni, M., Shahanaghi, K., (2016). A robust optimization model for blood supply chain in emergency situations. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7, 535-554.
19. Ghahremani-Nahr, J., Nozari, H., Bathaee, M. (2021). Robust Box Approach for Blood Supply Chain Network Design under Uncertainty: Hybrid Moth-Flame Optimization and Genetic Algorithm. *International Journal of Innovation in Engineering*, 1(2), 40-62.
20. Ghasemi, P. Goodarzian, F. Abraham, A. Khanchehazzarin, S. (2022). A possibilistic-robust-fuzzy programming model for designing a game theory based blood supply chain network, *Applied Mathematical Modelling*, 112, 282-303.
21. Hamdan, B., & Diabat, A. (2020). Robust design of blood supply chains under risk of disruptions using Lagrangian relaxation. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 134, 101764.
22. Jittamai, P., & Boonyanusith, W. (2014). Risk assessment in managing the blood supply chain. In *Next Generation Supply Chains: Trends and Opportunities. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*, 18, 447-468. Berlin: epubli GmbH.
23. Jokar, A., Hosseini, Motlagh, S.M. (2015). Impact of Capacity of Mobile Units on Blood Supply Chain Performance: Results from a Robust Analysis. *International Journal of Hospital Research*, 4(3), 101-105.
24. Jüttner, U., (2005). Supply chain risk management. *International Journal of Logistics Management*, 16(1), 120-141.
25. Kouchaki Tajani, T., Mohtashami, A., Amiri, M., & Ehtesham Rasi, R. (2021). Presenting a Robust Optimization Model to Design a Comprehensive Blood Supply Chain under Supply and Demand Uncertainties. *Journal of Industrial Management Perspective*, 11(1), 81-116. (In Persian).
26. Leung J. N. S, Lee C. K. (2020). Impact of the COVID-19 – a regional blood center’s perspective. *ISBT Science Seriec*, 15, 362-364.
27. Maashisani F, Hajiaghaei-Keshteli M, Gholipour-Kanani Y, Harsej F. (2022). Optimization of the Blood Supply Chain Network with the Possibility of Lateral Delivery. *Jor*. 19 (3), 63-88.
28. March, J. and Shapira, Z., (1987). Managerial perspectives on risk and risk taking. *Management Science*, 33(11), 1404-1418.
29. Masoumi, A.H. Min Yu, Nagurney. A (2017). Mergers and Acquisitions in Blood Banking Systems: A Supply Chain Network Approach. *International Journal of Production Economics*, 193, 406-421.
30. Motamedi, M., Movahedi, M., Rezaian, J., & Rashidi Komijani, A. (2019). Designing a Non-Linear Mixed Integer Two-objective Math Model to Maximize the Reliability of Blood Supply Chain. *Engineering and Quality Management*, 8 (4), 259-274, (In Persian).
31. Motamedi. M., Movahedi. M. M., Rezaian Zaidi. J., Rashidi Komijan. A. (2020), Factors Affecting Blood Donation in the Blood Supply Chain Under Critical Conditions, *J Police Med*, 9(2), 71-78, (In Persian).
32. Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995), Robust optimization of large-scale systems, *Operations research*, 43(2), 264-281.
33. Nagurney, A., Masoumi, A. H., Yu, M. (2012). Supply chain network operations management of a blood banking system with cost and risk minimization, *Computational Management Science*, 9, 205-231.
34. Nahofti Kohneh, J., Teymouri, E. Pishvae, M. S. (2016). Blood products supply chain design considering disaster circumstances (Case study: earthquake disaster in Tehran). *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 9, 51 – 72.



35. Osorio, A. F., Brailsford, S. C., & Smith, H. K. (2018). Whole blood or apheresis donations? A multi-objective stochastic optimization approach. *European Journal of Operational Research*, 266(1), 193-204.
36. Rabbani, M., Aghabegloo M., Farrokhi.Asl, H., (2016). Solving a bi-objective mathematical programming model for bloodmobiles location routing problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8. Available online.
37. Ramezani, R., Behboodi, Z., (2017). Blood supply chain network design under uncertainties in supply and demand considering social aspects. *Transportation Research, Part E 104*, 69-82.
38. Raturia M, Kusumb A. (2020). The blood supply management amid the COVID-19 outbreak Gérer l’approvisionnement en sang à l’échelle de l’épidémie de COVID-19. *Transfusion Clinique ET Biologique*, 27, 147-151.
39. Rekabi, S., Garjan, H. S., Goodarzi, F., Pamucar, D., & Kumar, A. (2024). Designing a responsive-sustainable-resilient blood supply chain network considering congestion by linear regression method. *Expert Systems with Applications*, 245, 122976.
40. Rezaei Kallaj, M., Abolghasemian, M., Moradi Pirbalouti, S., Sabk Ara, M., & Pourghader Chobar, A. (2021). Vehicle routing problem in relief supply under a crisis condition considering blood types. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021(1), 7217182.
41. Salehi, F., Mahootchi, M., & Moattar Hussein, S. M., (2017). Developing a robust stochastic model for designing a blood supply chain network in a crisis: a possible earthquake in Tehran. *Applications of OR In Disaster Relief Operations*. 6(2), 25-42.
42. Jahangiri, S., Abolghasemian, M., Ghasemi, P., & Chobar, A. P. (2023). Simulation-based optimisation: analysis of the emergency department resources under COVID-19 conditions. *International journal of industrial and systems engineering*, 43(1), 1-19.
43. Shokouhifar, M., Ranjbarimesan, M. (2022). Multivariate time-series blood donation/demand forecasting for resilient supply chain management during COVID-19 pandemic, *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 5, 100078.
44. Sohrabi, M., Zandieh, M., & Shokouhifar, M. (2023). Sustainable inventory management in blood banks considering health equity using a combined metaheuristic-based robust fuzzy stochastic programming. *Socio-Economic Planning Sciences*, 86, 101462.
45. Spekman, R.E., Davis, E.W., (2004). Risky business: Expanding the discussion on risk and the extended enterprise. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(5), 414-433.
46. Teo, D. (2009). Blood supply management during an influenza pandemic. *ISBT Science Series*, 4, 293-8.
47. Yousefinezhad, V., & Nikbakhsh, E. (2021). Inventory Control of Blood Products in the Hospital Network under Uncertainty. *Journal of Industrial Management Perspective*, 11(3), 131-152. (In Persian).
48. Zahiri, B., Torabi, S. A., Mousazadeh, M., & Mansouri, S. A. (2015). Blood collection management: Methodology and application. *Applied Mathematical Modelling*, 39(23), 7680-7696.
49. Zandedel. M., Bozorgi Amiri. A., & Omrani. H. (2014). Presenting a model for locating blood donation sites with regard to disruption at the location, *Journal of Industrial Engineering*, 48, 33-43.
50. Zsidisin, G.A., (2003). A grounded definition of supply risk. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 9(5/6), 217-224.