



Kharazmi University

Development of a Bi-Objective Stochastic Location-Allocation Model for a Blood Supply Chain Considering Reliability under the Uncertainty of the Main Centers Capacities

Y. Aali¹, E. Monabbati²✉, Z. Alipour³

1. Department of Mathematics, Faculty of Mathematical Sciences, Alzahra University, Tehran, Iran. E-mail: yosraaal98@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Mathematics, Faculty of Mathematical Sciences, Alzahra University, Tehran, Iran. ✉ E-mail: e.monabbati@alzahra.ac.ir
3. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khatam University, Tehran, Iran. E-mail: z.alipour@khatam.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 14 September 2024
Received in revised form:
29 May 2025
Accepted: 7 June 2025
Published online:
4 October 2025

Keywords:

Blood Supply Chain,
Location-Allocation,
Reliability,
Uncertainty.

ABSTRACT

Introduction

Blood supply is vital to public health, and its management under uncertainty challenges healthcare systems. This study introduces a bi-objective MILP model to optimize the supply chain with capacity uncertainty at key donation centers, aiming to reduce costs and enhance reliability.

Material and Methods

A probabilistic model assesses supply chain reliability under capacity uncertainty. Using stochastic programming with chance constraints, a deterministic equivalent is derived. The bi-objective model is reformulated via the Lp-metric to minimize unavailability. A Relax-and-Fix heuristic yields feasible solutions, compared with CPLEX.

Results and discussion

The model determines optimal locations for main and temporary centers, assigns donors, and optimizes allocation and blood flow. The Relax-and-Fix heuristic produces near-optimal solutions, demonstrating strong performance on large-scale instances.

Conclusion

The proposed model, aimed at minimizing supply chain unavailability and reducing costs, supports more effective decision-making in blood supply management. Its implementation in Julia and comparison with CPLEX show acceptable accuracy and robustness. This approach can contribute to a more reliable and cost-effective blood supply system.

How to cite: Aali, Y., Monabbati, E., & Alipour, Z. (2025). Development of a bi-objective stochastic location-allocation model for a blood supply chain considering reliability under the uncertainty of the main centers capacities. *Mathematical Researches*, **11** (1), 35 – 56.



© The Author(s).

Publisher: Kharazmi University

توسعه مدل تصادفی دوهدفه مکان‌یابی-تخصیص زنجیره تأمین خون با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان تحت شرایط عدم قطعیت ظرفیت مراکز

یسری عالی^۱، سید احسان منبئی^۲✉، زهره علی‌پور^۳

۱. گروه ریاضی، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه الزهرا (س)، تهران، ایران. رایانامه: yosraaal98@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه ریاضی، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه الزهرا (س)، تهران، ایران. رایانامه: e.monabbati@alzahra.ac.ir

۳. گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خاتم، تهران، ایران. رایانامه: z.alipour@khatam.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	خون یکی از عوامل حیاتی در بهبود و حفظ سلامتی انسان‌ها است. تأمین خون سالم و کافی در تمام شرایط، چالشی است که سیستم سلامت دولت‌ها همواره با آن مواجه هستند. مدیریت زنجیره تأمین خون، با تأمین به‌موقع و به‌نحوی که نیازهای پزشکی را رفع کند، جایگاه ویژه‌ای در حوزه بهداشت دارد. در این پژوهش، یک مدل ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین خون شامل اهداکنندگان، مراکز موقت اهدای خون، مراکز اصلی اهدای خون، آزمایشگاه‌ها و بیمارستان‌ها ارائه شده است. توابع هدف مدل، کمینه‌سازی هزینه کل و کمینه‌سازی دسترس‌ناپذیری (بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان) زنجیره تأمین خون است. در این تحقیق یک مدل کمی جدید برای تعریف قابلیت اطمینان زنجیره تأمین خون بر اساس ظرفیت واقعی مراکز توسعه شده است. برای حل مدل ابتدا به کمک روش برنامه‌ریزی احتمالی با قیود شانسی، محدودیت غیرقطعی ناشی از پارامتر تصادفی ظرفیت مراکز اصلی به یک محدودیت قطعی تبدیل شده است. سپس مدل دو هدفه با کمک روش معیار جامع به یک مدل تک‌هدفه تبدیل شده است. تابع هدف دوم (دسترس‌ناپذیری) به دلیل وجود حاصل‌ضرب متغیرهای دودویی غیر خطی بوده که خطی‌سازی شده و سپس با حل مدل، مکان بهینه مراکز اصلی و مراکز موقت، تخصیص اهداکنندگان به مراکز، تخصیص مراکز موقت به مراکز اصلی و مقدار بهینه خون جریان‌یافته در زنجیره تأمین باتوجه به تقاضا تعیین می‌شود. در نهایت الگوریتم ابتکاری Relax & Fix را برای به‌دست آوردن جواب‌های اولیه شدنی مسأله پیاده‌سازی و جواب‌های حاصل از آن را با جواب‌های حاصل از حل‌کننده CPLEX مقایسه می‌کنیم. نتایج حاصل از محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که با پیاده‌سازی الگوریتم، در زمان کوتاه یک جواب شدنی از مسأله به‌دست می‌آید که فاصله نسبی کمی با جواب بهینه حاصل از حل‌کننده CPLEX دارد.
واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین خون، مکان‌یابی-تخصیص، قابلیت اطمینان، عدم قطعیت.	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۶/۲۴	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۳/۱۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۱۷	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۷/۱۲	

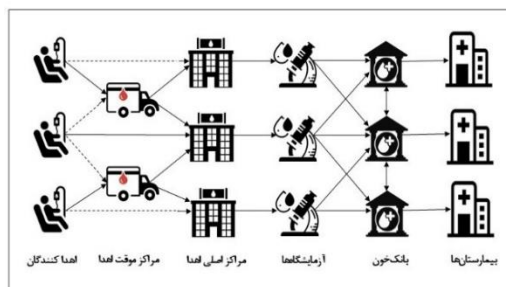
استناد: عالی، یسری؛ منبئی، سید احسان؛ و علی‌پور، زهره (۱۴۰۴). توسعه مدل تصادفی دوهدفه مکان‌یابی-تخصیص زنجیره تأمین خون با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان تحت شرایط عدم قطعیت ظرفیت مراکز. پژوهش‌های ریاضی، ۱۱ (۱)، ۳۵ - ۵۶.



مقدمه

زنجیره تأمین یک سیستم پیچیده متشکل از افراد، شرکت‌ها و سازمان‌ها است که به منظور تأمین محصولات و خدمات از ابتدایی‌ترین مرحله تولید تا تحویل نهایی به مصرف‌کننده فعالیت می‌کند [۱]. یکی از زنجیره‌های تأمین مهم در حوزه بهداشت و درمان، زنجیره تأمین خون است. خون انسان یک منبع کمیاب است که تاکنون بشر از جایگزینی برای آن ناتوان بوده است. تأمین خون سالم و کافی مورد نیاز بیمارستان‌ها و مدیریت آن در شرایط عادی و بحرانی چالشی است که سیستم سلامت دولت‌ها همواره با آن مواجه هستند.

مدیریت زنجیره تأمین خون بسیار حیاتی است. عدم دسترسی به خون می‌تواند منجر به مشکلات جدی و یا حتی مرگ برای بیماران گردد. بنابراین مدیریت و تصمیم‌گیری بهینه در مورد خون و فرآورده‌های آن در زنجیره تأمین از اهمیت و پیچیدگی بالایی برخوردار است [۲]. زنجیره تأمین خون جریان فرآورده‌های خون را از اهداکنندگان تا بیمارانی که به خون نیاز دارند، مدیریت می‌کند. زنجیره تأمین خون از چهار فرایند اصلی شامل، جمع‌آوری، تولید، ذخیره‌سازی و توزیع تشکیل شده است. این فرایندها توسط تسهیلات مختلف از جمله مراکز موقت (که عمدتاً بسیار هستند)، مراکز اصلی، آزمایشگاه‌ها، بانک خون و بیمارستان‌ها پشتیبانی می‌شوند. اولین فرایند زنجیره تأمین خون، جمع‌آوری است که به تهیه و جمع‌آوری خون مربوط می‌شود. اهدای خون معمولاً داوطلبانه است و اهداکنندگانی که در نقاط جغرافیایی مختلف پراکنده هستند، برای اهدای خون می‌توانند به مراکز موقت یا مراکز اصلی اهدای خون مراجعه کنند. عمده مراکز موقت، سیار هستند و دارای امکانات و تجهیزات کمی هستند که فقط وظیفه جمع‌آوری خون را برعهده دارند. سطوح ظرفیت این مراکز محدود و برای پوشش تقاضا و اهداکنندگان به مراتب مقرون‌به‌صرفه‌تر و انعطاف‌پذیرتر هستند. بنابراین؛ مراکز موقت، فرایند اهدای خون را تسهیل می‌کنند. پس از جمع‌آوری، خون برای فرآیند تولید به آزمایشگاه‌ها منتقل می‌شود. این فرآیند شامل بررسی سلامت خون‌های اهداشده به منظور تشخیص آلودگی‌های احتمالی و تفکیک آن‌ها به فرآورده‌های مختلف خون، نظیر گلبول‌های قرمز، پلاکت و پلاسما است که از پرکاربردترین فرآورده‌ها به شمار می‌روند. بنابراین، زنجیره تأمین خون ابتدا از یک محصول واحد یعنی خون کامل تشکیل می‌شود و تک محصولی است و پس از مرحله تولید، به یک زنجیره تأمین چند محصولی تبدیل می‌شود که شامل تمام فرآورده‌های خون آماده برای انتقال است. فرآورده‌های خون پس از تولید، معمولاً در بانک‌های خون ذخیره‌سازی می‌شوند و پس از آن در صورت درخواست در نقاط تقاضا که همان بیمارستان‌ها هستند، توزیع می‌شوند. در طراحی یک شبکه زنجیره تأمین خون، می‌توانیم مراکز اصلی، آزمایشگاه‌ها و مراکز توزیع را یکی در نظر بگیریم، همچنین می‌توانیم مراکز ذخیره‌سازی را با بیمارستان‌ها یکی بگیریم. در شکل ۱ فرایندهای مختلف زنجیره تأمین خون و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر نشان داده شده است.



شکل ۱. فرایندهای مختلف زنجیره تأمین خون

مطالعه زنجیره تأمین خون در سال‌های اخیر مورد توجه تعداد زیادی از پژوهشگران بوده است. اولین پژوهش‌های این حوزه، توسط میلارد [۳] در سال ۱۹۵۹ و ون زیل [۴] در سال ۱۹۶۳ انجام شده است. زهیری و همکاران [۵] یک مدل خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه زنجیره تأمین خون تک محصولی و چنددوره‌ای ارائه کردند. تابع هدف آن‌ها، به حداقل رساندن هزینه کل است. همچنین زهیری و پیشوایی [۶] یک مدل عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه زنجیره تأمین خون چنددوره‌ای و چندمحصولی با در نظر گرفتن سازگاری گروه‌های خونی ارائه کردند. توابع هدف آن، به حداقل رساندن هزینه کل و به حداکثر رساندن برآورده‌سازی تقاضا است. رضانیان و بهبودی [۷] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای مسأله مکان‌یابی-تخصیص با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و هزینه‌ها ارائه نموده و از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مواجهه با عدم قطعیت پارامترها استفاده نموده‌اند. زهیری و همکاران [۸] به توسعه مدل خود پرداخته و مدل دوهدفه برای مسأله تخصیص، تولید، توزیع و مسیریابی زنجیره تأمین خون با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی سناریومحور ارائه نموده‌اند. همچنین از الگوریتم‌های فراابتکاری جهت حل مدل دوهدفه استفاده نموده‌اند. فلاحی و همکاران [۹] مدل بهینه‌سازی دوهدفه را جهت طراحی شبکه زنجیره تأمین خون تحت شرایط کووید-۱۹ ارائه نموده‌اند. تابع هدف اول کمینه‌سازی هزینه کل و تابع هدف دوم کمینه‌سازی انتشار کربن است. همچنین از روش محدودیت افسیلون برای مواجهه با مدل چندهدفه استفاده شده است. زو و همکاران [۱۰] به مدل‌سازی کنترل موجودی و تخصیص در زنجیره تأمین خون با در نظر گرفتن عمر محصول پرداخته‌اند. تابع هدف اول بهینه‌سازی میزان ارسال و تابع هدف دوم بهینه‌سازی عمر محصول ارسالی است. اقسامی و همکاران [۱۱] یک مدل ریاضی برای طراحی زنجیره تأمین خون چنددوره‌ای پیشنهاد کردند. تابع هدف آن به حداقل رساندن هزینه کل زنجیره تأمین است. یوستی و همکاران [۱۲] یک مدل برای طراحی شبکه زنجیره تأمین خون با رویکرد قابلیت اطمینان ارائه کردند. توابع هدف آن، به حداقل رساندن هزینه‌ها و حداکثرسازی قابلیت اطمینان زنجیره تأمین با در نظر گرفتن آن به عنوان یک سیستم سری- موازی است.

باتوجه به ادبیات بررسی‌شده، بسیاری از مقالات به زنجیره تأمین خون تحت عدم قطعیت و احتمال اختلال با استفاده از برنامه‌ریزی در شرایط عدم قطعیت پرداخته‌اند. تنها در مقاله یوستی و همکاران به قابلیت اطمینان در زنجیره تأمین خون اشاره شده است. در این مقاله، قابلیت اطمینان به عنوان یک پارامتر است [۱۲]. تابع هدف قابلیت اطمینان غیرخطی است که بر پیچیدگی مدل می‌افزاید. در این پژوهش با بررسی مقالات و شناخت شکاف تحقیقاتی، به طراحی زنجیره تأمین خون چنددوره‌ای و چندمحصولی با در نظر گرفتن دو جنبه اساسی یعنی برنامه‌ریزی عدم قطعیت و محاسبه کمی قابلیت اطمینان به منظور ارزیابی یک رویداد ریسک برای طراحی زنجیره تأمین خون استوار می‌پردازیم. در جدول ۱ مقالات مرور شده در زمینه زنجیره تأمین خون از جهات مختلف مدل‌سازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا به خوبی شکاف تحقیقاتی به دست بیاید و چرایی انجام پژوهش فعلی به خوبی مشخص گردد. در پژوهش حاضر، مدل ارائه شده توسط زهیری و پیشوایی [۶] برای طراحی شبکه زنجیره تأمین خون پنج سطحی شامل اهداکنندگان، مراکز موقت، مراکز اصلی، آزمایشگاه‌ها و بیمارستان‌ها توسعه داده شده است.

با بهره‌گیری از مفهوم قابلیت اطمینان که توسط ها و همکاران [۱۳] ارائه شده است، قابلیت اطمینان زنجیره تأمین را با فرض غیرقطعی بودن ظرفیت مراکز اصلی محاسبه و مدل دوهدفه کمینه‌سازی هزینه کل و دسترس‌ناپذیری کل زنجیره را در نظر

می‌گیریم. در این پژوهش، قابلیت اطمینان به‌عنوان احتمال موفقیت یک مرکز در تأمین تقاضای تخصیص‌یافته در هر دوره زمانی تعریف شده است. با توجه به اینکه ظرفیت عملیاتی مراکز ممکن است به دلایل مختلفی مانند خرابی تجهیزات، کمبود منابع یا خطای انسانی از ظرفیت اسمی کمتر باشد، این ظرفیت به‌صورت یک متغیر تصادفی مدل‌سازی شده است. به‌منظور نمایش رفتار احتمالاتی ظرفیت تحقق‌یافته، از توزیع بتا استفاده شده. این توزیع به‌دلیل تعریف‌شدن در بازه $[0, 1]$ و انعطاف‌پذیری در شکل‌پذیری، برای مدل‌سازی ظرفیت مناسب است. در ادامه به توضیحات مختصری در مورد این توزیع اشاره می‌کنیم.

از آنجایی که توزیع بتا نه تنها از نظر ریاضی آسان است، بلکه به‌عنوان یک توزیع پیوسته، توزیع مناسبی است که قادر به بیان ظرفیت عملیاتی است. همچنین، طراحی شکل توزیع با استفاده از دو پارامتر α, β به راحتی امکان‌پذیر است. به همین دلیل توزیع بتا می‌تواند برای مدل‌سازی پدیده‌های تصادفی که مجموعه مقادیر ممکن آن در یک فاصله متناهی است به کار رود.

متغیر تصادفی X دارای توزیع بتا است اگر چگالی آن به صورت زیر باشد:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} & 0 < x < 1 \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

به‌طوری‌که:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx$$

تابع توزیع تجمعی توزیع بتا، $I_h(\alpha, \beta)$ به صورت زیر حاصل می‌شود

$$F(h; \alpha, \beta) = \Pr(X \leq h) = \int_0^h \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} \int_0^h x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx \\ = \frac{B(h; \alpha, \beta)}{B(\alpha, \beta)}$$

به‌طور کلی نوآوری‌های مدل ارائه‌شده به شرح زیر است:

- مدل‌سازی قابلیت اطمینان زنجیره تأمین خون براساس تعریف جدید
- توسعه مدل دوهدفه مکان‌یابی-تخصیص زنجیره تأمین خون
- بررسی عملکرد الگوریتم ابتکاری در حل مدل توسعه داده شده

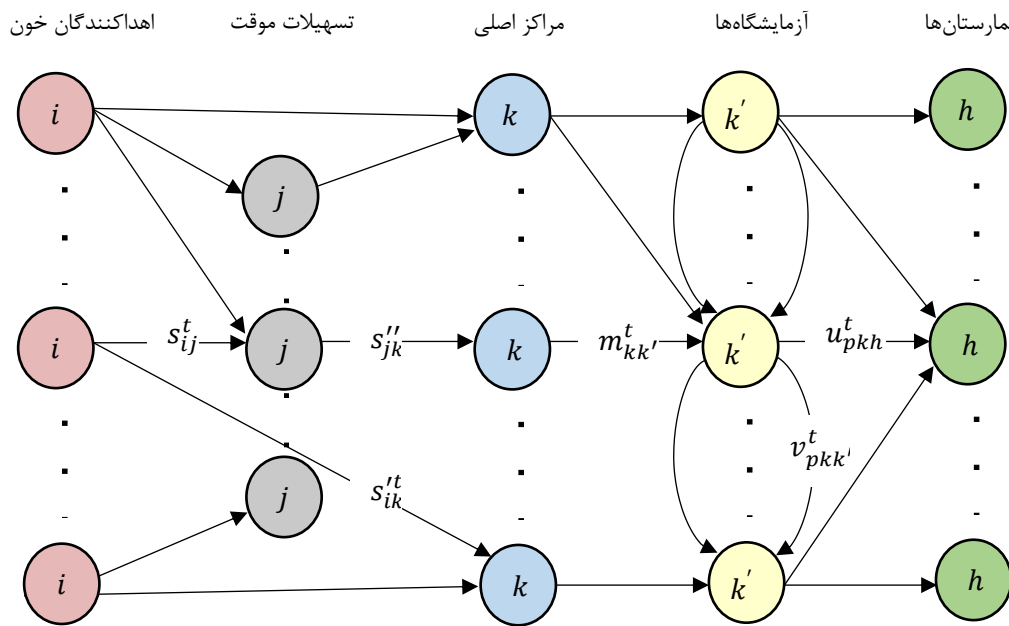
جدول ۱. مرور ادبیات

مرجع	مدل	مسأله	محصول	تابع هدف	روش حل	عدم قطعیت
Zahiri, Torabi [5]	MILP	مکان‌یابی و تخصیص	تک محصولی	هزینه کل	نرم افزارهای تجاری	برنامه‌ریزی فازی-استوار
Zahiri, Pishvaei [6]	MILP	مکان‌یابی و تخصیص	تک محصولی و چند محصولی	دو هدفه: هزینه کل و حداکثر تقاضای برآورده نشده	نرم افزارهای تجاری	برنامه‌ریزی فازی-استوار
Ramezaniyan, Behboodi [7]	MILP	مکان‌یابی و تخصیص	تک محصولی	هزینه کل	نرم افزارهای تجاری	بهینه‌سازی استوار
Zahiri, Torabi [8]	MINLP	تخصیص، تولید، توزیع، مسیریابی	چند محصولی	دو هدفه: هزینه کل و بیشینه کردن عمر باقی مانده محصول	فراابتکاری	برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور
Fallahi, Mousavian Anaraki [9]	MILP	طراحی شبکه	تک محصولی	دو هدفه: هزینه کل و کمینه سازی انتشار کربن	نرم افزارهای تجاری	قطعی و روش محدودیت افسیلون
Zhou, Zou [10]	MINLP	کنترل موجودی و تخصیص	چند محصولی	دو هدفه: بیشینه سازی عمر محصول و ارسال	نرم افزارهای تجاری	قطعی
مقاله ما	MILP	مکان‌یابی و تخصیص	تک محصولی و چند محصولی	دو هدفه: هزینه کل و کمینه‌سازی دسترس ناپذیری	الگوریتم ابتکاری و نرم افزارهای تجاری	برنامه‌ریزی احتمالی با قیود شانس

۱. تعریف مسأله

مسأله مورد بررسی، ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح آمیخته دوهدفه به منظور طراحی یک شبکه زنجیره تأمین خون پنج‌سطحی شامل اهداکنندگان، مراکز موقت اهدای خون، مراکز اصلی اهدای خون، آزمایشگاه‌ها و بیمارستان‌ها است. در شبکه زنجیره تأمین در نظر گرفته شده، اهداکنندگان می‌توانند به هریک از مراکز موقت یا مراکز اصلی برای اهدای خون

مراجعه کنند. مراکز موقت به منظور تسهیل رفت و آمد اهداکنندگان و کوتاه شدن مسافت طی شده توسط اهداکنندگان ایجاد شده‌اند ولی ظرفیت و تجهیزات محدودی دارند. مراکز اصلی ظرفیت بالاتر، دارای امکانات بیشتری هستند. خون‌های جمع‌آوری شده در مراکز اصلی مجهز به آزمایشگاه، فراوری شده و در نهایت به بیمارستان‌ها به عنوان متقاضیان نهایی ارسال می‌شوند. مدل ارائه شده، دارای دو تابع هدف است که هدف اول کمینه‌سازی هزینه کل (شامل مجموع هزینه احداث مراکز جمع‌آوری خون، هزینه جابه‌جایی مراکز موقت طی دوره‌های متوالی و هزینه‌های ارسال خون) و هدف دوم کمینه‌سازی دسترس‌ناپذیری (بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان کل زنجیره تأمین) است. قابلیت اطمینان کل زنجیره تأمین نیز وابسته به قابلیت اطمینان مراکز اصلی می‌باشد. همچنین ظرفیت واقعی مراکز اصلی به صورت پارامتر غیرقطعی (تصادفی) در نظر گرفته شده است. نمای کلی زنجیره تأمین خون مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمای کلی زنجیره تأمین مورد بررسی

در ادامه به تعریف مفهوم قابلیت اطمینان و بیان فرض‌های در نظر گرفته برای مسأله می‌پردازیم.

۱.۱ قابلیت اطمینان: قابلیت اطمینان زنجیره تامین احتمال برآورده سازی مقدار سفارش یک محصول یا یک خدمت توسط زنجیره تامین (یا یک جزء) به مشتری در بازه زمانی مشخص (سررسید) و تحت شرایط عملیاتی از پیش تعیین شده است [۱۳]. به بیان دقیق‌تر، قابلیت اطمینان یک زنجیره تأمین را به صورت احتمال این‌که زنجیره تأمین مقدار سفارش یک محصول یا خدمات را در زمان مشخص تحت شرایط عملیاتی تعیین شده به مشتری برساند تعریف می‌نماییم. فرض کنیم متغیر تصادفی C ظرفیت واقعی (توان عملیاتی) یک مرکز در هر واحد زمان و متغیر q مقدار سفارش در هر واحد زمان باشد. قابلیت اطمینان یک مرکز به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۱۱].

$$R(q) = \Pr(C > q) = 1 - F(q) = 1 - \int_0^q f(u)du = \int_q^\infty f(u)du \quad (۱)$$

در این مدل پارامتر ظرفیت مراکز را غیرقطعی (تصادفی) در نظر گرفته‌ایم زیرا به خطاهای نیروی انسانی و شکست تجهیزات وابسته است. طبق تعریف فوق، قابلیت اطمینان مرکز اصلی k در دوره زمانی t که همان R_k^t است از رابطه (۲) محاسبه می‌شود. در این رابطه، نماد ظرفیت لحظه‌ای مرکز k در زمان t است که پارامتر تصادفی با تابع توزیع بتا و پارامترهای α_k^t و β_k^t و تابع چگالی تجمعی F است. حداکثر ظرفیت مراکز معلوم است ولی توزیع پارامتر تصادفی ظرفیت در هر دوره نامشخص است. با تقسیم پارامتر تصادفی ظرفیت بر حداکثر ظرفیت، پارامتر تصادفی ظرفیت لحظه‌ای با توزیع بتا بدست می‌آید. [۱۱].

$$R_k^t = \Pr\left(\tilde{Q}_k^t > \frac{\varphi_k D^t}{v_{k,max}''}\right) = 1 - F\left(\frac{\varphi_k D^t}{v_{k,max}''}\right) = \frac{B\left(\frac{\varphi_k D^t}{v_{k,max}''}; \alpha_k^t, \beta_k^t\right)}{B(\alpha_k^t, \beta_k^t)} \quad (۲)$$

در زنجیره تأمین مورد بررسی فرض بر این است که قابلیت اطمینان کل وابسته به قابلیت اطمینان مراکز اصلی دارای آزمایشگاه است و قابلیت اطمینان سایر مراکز یک در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که با کار کردن هر یک از مراکز اصلی دارای آزمایشگاه، زنجیره تأمین کار می‌کند، یعنی مراکز دارای آزمایشگاه، به صورت موازی به هم مرتبط‌اند. بنابراین قابلیت اطمینان کل زنجیره تأمین به صورت زیر به دست می‌آید. نمادهای به کار رفته در رابطه (۱) و (۲) در جدول ۲ تعریف شده‌اند.

$$Re = 1 - \sum_{t \in T} \prod_{k \in K} (1 - R_k^t) \quad (۳)$$

۲.۱. فرض‌های مسأله: برای معرفی مدل، لازم است ابتدا فرض‌های در نظر گرفته شده برای مدل را به شرح زیر بیان کنیم:

- در مدل، مکان‌یابی-تخصیص با در نظر گرفتن مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز اصلی اهدا (ثابت) و مراکز موقت (سیار) انجام می‌گیرد.
- ظرفیت مراکز موقت کمتر از مراکز اصلی است.
- با صرف هزینه اضافی، مکان تسهیلات موقت قابل تغییر در افق برنامه‌ریزی است. این هزینه وابسته به حجم تقاضا و توزیع جغرافیایی تقاضا در هر دوره زمانی است.
- مراکز اصلی باید در ابتدای افق برنامه‌ریزی تأسیس شوند و مکان آن‌ها در طول افق برنامه‌ریزی قابل تغییر نیست.
- اهداکنندگان می‌توانند به مراکز اصلی خون اهدا کنند یا از طریق مراکز موقت اقدام نمایند.
- خون‌های جمع‌آوری شده در مراکز موقت به یک یا چند مرکز اصلی در هر دوره ارسال می‌شود.
- مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز اصلی و موقت و مناطق اهداکنندگان جزو داده‌های مسأله می‌باشد.
- هریک از فرآورده‌های خون، طول عمر مشخصی دارند و پس از گذشت آن زمان فاسد می‌شوند. فسادپذیری فرآورده‌های خون تنها در مسیرهای انتقال خون از آزمایشگاه‌ها به بیمارستان‌ها در نظر گرفته شده است.
- آزمایشگاه‌ها در برخی از مراکز اصلی دایر می‌شوند.

- زنجیره تأمین تا سطح مراکز اصلی تک‌محصولی و پس از فراوری در آزمایشگاه‌ها به صورت چندمحصولی است.
- امکان ارسال خون بین آزمایشگاه‌ها وجود دارد.

۲. مدل‌سازی

در این بخش به نمادگذاری و تعریف مدل می‌پردازیم. اندیس‌های مدل در جدول ۲، پارامترها در جدول ۳ و متغیرهای تصمیم در جدول ۴ تعریف شده‌اند.

جدول ۱. اندیس‌های مدل

اندیس	توضیح	اندیس	توضیح	اندیس	توضیح
i	گروه اهداکننده خون، $i \in I$	j	مکان بالقوه برای تسهیل موقت، $j \in J$	k	مکان بالقوه برای تأسیس مرکز اصلی، $k \in K$
p	فراورده خون، $p \in P$	t	دوره زمانی، $t \in T$	h	بیمارستان، $h \in H$

جدول ۲. پارامترهای مدل

پارامتر	توضیح	پارامتر	توضیح
c'_k, c''_k	پارامترهای مربوط به هزینه تأسیس	$a_{ij}, a'_{ik}, a''_{jk}, b_{kk'}, b_{kk'k}, b''_{kh}$	پارامترهای مربوط به هزینه حمل و نقل
$r_{ij}, w_{ik}, q_{jk}, h_{kk'}, f_{kh}$	پارامترهای مربوط به مسافت	r', w', q'	پارامترهای مربوط به شعاع پوشش
d_{ph}^t, D^t, M, η	پارامترهای مربوط به تقاضا	$v'_{max}, v''_{k,max}, v^t_{i,max}, \tilde{v}''^t_k$	پارامترهای مربوط به ظرفیت
$\alpha_k^t, \beta_k^t, \varphi_k$	پارامترهای مربوط به قابلیت اطمینان	f'_{pkh}, tp_p	پارامترهای مربوط به طول عمر خون
c_{j1j2}, N	پارامترهای مربوط به هزینه جابه‌جایی مراکز موقت و تعداد مراکز موقت	ϑ	پارامتر مربوط به درصد خون‌های معتبر

جدول ۳. متغیرهای تصمیم مدل

متغیر تصمیم دودویی	توضیح	متغیر تصمیم دودویی	توضیح
z_k, l_k	متغیرهای مربوط به تأسیس مراکز	$x_{ij}^t, x_{ik}^t, x_{jk}^t$	متغیرهای مربوط به تخصیص
$y_{j_1 j_2}^t$	متغیر مربوط به جابه‌جایی مراکز موقت	y_{pkh}^t	متغیر کمکی
متغیر تصمیم عدد صحیح	توضیح	متغیر تصمیم پیوسته	توضیح
nf^t	متغیر مربوط به تعداد مراکز موقت	R_k^t	متغیر مربوط به قابلیت اطمینان
متغیر تصمیم پیوسته	توضیح	متغیر تصمیم پیوسته	توضیح
	(برحسب واحد خون)		(برحسب واحد خون)
$s_{ij}^t, s_{ik}^t, s_{jk}^t$	متغیرهای مربوط به حجم خون ارسالی به مراکز	$m_{kk}^t, v_{pkk}^t, u_{pkh}^t$	متغیرهای مربوط به حجم خون ارسالی به آزمایشگاه‌ها و بیمارستان

توابع هدف:

$$\begin{aligned} \min TC = & \sum_{k \in K} z_k c'_k + \sum_{k \in K} l_k c''_k + \sum_{j_1, j_2 \in J, t \in T} y_{j_1 j_2}^t c_{j_1 j_2} + \sum_{i \in I, j \in J, t \in T} a_{ij} s_{ij}^t \\ & + \sum_{i \in I, k \in K, t \in T} a'_{ik} s'_{ik} + \sum_{j \in J, k \in K, t \in T} a''_{jk} s''_{jk} + \sum_{k, k' \in K, t \in T} b_{kk'} m_{kk'}^t \\ & + \sum_{k \in K, h \in H, p \in P, t \in T} b''_{kh} u_{pkh}^t + \sum_{k, k' \in K, p \in P, t \in T} b_{kk'} v_{pkk'}^t \end{aligned} \quad (۴)$$

$$\min U nAv = 1 - Re = \sum_{t \in T} \prod_{k \in K} (1 - R_k^t) \quad (۵)$$

محدودیت‌ها:

$$y_{j,j}^t = 0, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (۶)$$

$$nf^t \leq N, \quad \forall t \in T \quad (۷)$$

$$\sum_{j_1, j_2 \in J} y_{j_1, j_2}^t = nf^t, \quad \forall t \in T \quad (۸)$$

$$\sum_{j_1 \in J} y_{j_1, j_2}^t + \sum_{j_2 \in J} y_{j_1, j_2}^t \leq 1, \quad \forall j_1 \in J, t \in T \quad (۹)$$

$$y_{j_1, j_2}^t + y_{j_1, j_2}^{t-1} \leq 1, \quad \forall j_1, j_2 \in J, t \in T, t \geq 2 \quad (۱۰)$$

$$\sum_{j_2 \in J} y_{j_1, j_2}^t \leq \sum_{j_1 \in J} y_{j_1, j_2}^{t-1}, \quad \forall j_1 \in J, t \in T, t \geq 2 \quad (۱۱)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij}^t + \sum_{k \in K} x_{ik}^t \leq 1, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (۱۲)$$

$$x_{ij}^t r_{ij} \leq r' \sum_{j_1 \in J} y_{j_1, j}^t, \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (۱۳)$$

$$x_{ik}^t w_{ik} \leq w' z_k, \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (۱۴)$$

$$x_{jk}^t q_{jk} \leq q' \sum_{j_1 \in J} y_{j_1, j}^t z_k, \quad \forall j \in J, k \in K, t \in T \quad (۱۵)$$

$$s_{ij}^t \leq M x_{ij}^t, \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (۱۶)$$

$$s_{ik}^t \leq M x_{ik}^t, \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (۱۷)$$

$$s_{jk}^t \leq M x_{jk}^t, \quad \forall j \in J, k \in K, t \in T \quad (۱۸)$$

$$\sum_{j \in J} s_{jk}^t + \sum_{i \in I} s_{ik}^t \leq \tilde{v}_k^t, \quad \forall k \in K, t \in T \quad (۱۹)$$

$$\sum_{i \in I} s_{ij}^t \leq v', \quad \forall j \in J, t \in T \quad (۲۰)$$

$$\sum_{j \in J} s_{ij}^t + \sum_{k \in K} s_{ik}^t \leq v_i^t, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (۲۱)$$

$$\sum_{i \in I} s_{ij}^t = \sum_{k \in K} s_{jk}^t, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (۲۲)$$

$$\sum_{k \in K} u_{pkk'}^t \leq M l_{k'}, \quad \forall p \in P, k' \in K, t \in T \quad (۲۳)$$

$$\sum_{k \in K} m_{kk'}^t \leq M l_{k'}, \quad \forall k' \in K, t \in T \quad (۲۴)$$

$$\sum_{j \in J} s_{jk}^t + \sum_{i \in I} s_{ik}^t = \sum_{k' \in K} m_{kk'}^t, \quad \forall k \in K, t \in T \quad (۲۵)$$

$$\sum_{h \in H} u_{pk'h} \leq \quad (۲۶)$$

$$\vartheta(\sum_{k \in K} m_{kk'}^t + \sum_{k \in K} v_{kk'}^t - \sum_{k \in K} v_{k'k}^t), \quad \forall p \in P, k' \in K, t \in T$$

$$\sum_{h \in H} u_{pk'h}^t \leq M l_{k'}, \quad \forall p \in P, k' \in K, t \in T \quad (۲۷)$$

$$\sum_{k \in K} z_k \geq 1, \quad \forall k \in K \quad (۲۸)$$

$$l_k \leq z_k, \quad \forall k \in K \quad (۲۹)$$

$$u_{pkh}^t \leq M y_{pkh}^t, \quad \forall p \in P, k \in K, h \in H, t \in T \quad (۳۰)$$

$$y_{pkh}^t \leq M, \quad \forall p \in P, k \in K, h \in H, t \in T \quad (۳۱)$$

$$(f'_{pkh} - t p_p) y_{pkh}^t \leq \varepsilon y_{pkh}^t, \quad \forall p \in P, k \in K, h \in H, t \in T \quad (۳۲)$$

$$\sum_{k \in K} u_{pkh}^t \geq \eta d_{ph}^t, \quad \forall p \in P, h \in H, t \in T \quad (33)$$

$$R_k^t = \left(\frac{B\left(\frac{\varphi_k D^t}{v_{k,max}^t}; \alpha_k^t, \beta_k^t\right)}{B(\alpha_k^t, \beta_k^t)} \right) l_k, \quad \forall k \in K, t \in T \quad (34)$$

$$x_{ij}^t, x_{ik}^t, x_{jk}^t, x_{j_1 j_2}^t, y_{j_1 j_2}^t, z_k, l_k, y_{pkh}^t \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (35)$$

$$nf^t \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall t \in T \quad (36)$$

$$s_{ij}^t, s_{ik}^t, s_{jk}^t, m_{kk'}^t, v_{pkk'}^t, u_{pkh}^t, R_k^t \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (37)$$

تابع هدف مربوط به کمینه‌سازی هزینه‌ها: برای هر زنجیره تأمین خون، حالت ایده‌آل این است که به تعداد کافی در مکان‌های مختلف، مراکز موقت و ثابت اهدای خون داشته باشیم تا در مواقع اضطراری با کمبود خون مواجه نشویم. اما از آنجایی که همواره با محدودیت بودجه مواجه هستیم، ناچاریم طوری برنامه‌ریزی کنیم که هم‌زمان با تأمین به‌موقع و کافی خون، هزینه‌ها کمینه شوند. از این رو، تابع هدف اول مسأله در رابطه (۴)، کمینه‌سازی هزینه‌های کل زنجیره تأمین، شامل مجموع هزینه‌های تأسیس هر یک از مراکز اصلی، مجموع هزینه‌های تأسیس آزمایشگاه در هر مرکز اصلی، مجموع هزینه‌های جابجایی مراکز موقت، مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل گروه‌های اهداکننده به مراکز موقت، مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل گروه‌های اهداکننده به مراکز اصلی، مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل برای ارسال خون از مراکز موقت به مراکز اصلی، مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل برای ارسال خون از مراکز اصلی به آزمایشگاه‌ها، مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل برای ارسال خون مابین آزمایشگاه‌ها و مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل برای ارسال خون از آزمایشگاه‌ها به بیمارستان‌ها است.

تابع هدف مربوط به کمینه‌سازی دسترس‌ناپذیری کل زنجیره تأمین: با توجه به این‌که خون یک محصول حیاتی است و کمبود آن عواقب جبران‌ناپذیری دارد. در طراحی یک زنجیره تأمین خون، لازم است با در نظر گرفتن عوامل مختلفی که زنجیره تأمین خون را تحت تاثیر قرار می‌دهند یک زنجیره تأمین با قابلیت اطمینان بالا طراحی کنیم تا در شرایط از کارافتادگی تسهیلات نیز، کارایی لازم را داشته باشد. تابع هدف دوم مسأله در رابطه (۵) به حداقل رساندن دسترس‌ناپذیری کل زنجیره تأمین است. این تابع هدف به‌صورت غیرخطی است و آن را در زیربخش ۱،۳ به‌صورت خطی بازنویسی خواهیم کرد.

محدودیت‌های مربوط به تعداد و جابه‌جایی مراکز موقت: محدودیت‌های تعریف‌شده در رابطه (۶) تا (۱۱) محدودیت‌های مربوط به مراکز موقت است. به‌طور کلی این محدودیت‌ها تعداد تسهیلات در یک دوره زمانی را مشخص می‌کنند و تضمین می‌کنند تعداد تسهیلات در یک دوره بیشتر از کل تسهیلات موجود نباشد. همچنین تضمین می‌کنند تسهیلات موقت در یک زمان مشخص، از یک مکان به همان مکان جابه‌جا نشوند. همچنین این محدودیت‌ها تضمین می‌کنند در یک زمان مشخص به یک مکان کاندیدا بیش از یک تسهیل موقت جابجا نشود.

محدودیت‌های مربوط به تخصیص: محدودیت‌های تعریف‌شده در رابطه (۱۲) تا (۱۸) محدودیت‌های مربوط به تخصیص اهداکنندگان به مراکز موقت و مراکز اصلی و تخصیص مراکز موقت به مراکز اصلی است. همچنین محدودیت (۱۵) غیرخطی است که آن را در زیربخش ۲،۳ به صورت خطی بازنویسی خواهیم کرد.

محدودیت‌های مربوط به ظرفیت: محدودیت‌های تعریف‌شده در رابطه (۱۹) تا (۲۱) محدودیت‌های مربوط به ظرفیت مراکز اصلی و مراکز موقت و ظرفیت اهداکنندگان است. به‌طورکلی محدودیت‌های (۱۹) و (۲۰) تضمین می‌کنند خون‌های جمع‌آوری‌شده در مراکز موقت و مراکز اصلی بیشتر از ظرفیت آن مراکز نباشند و محدودیت (۲۱) نیز محدود بودن اهدای خون توسط گروه‌های اهداکننده را نشان می‌دهد. همچنین سمت راست محدودیت (۱۹) پارامتر غیرقطعی است که آن را در بخش ۴ به صورت یک محدودیت قطعی بازنویسی خواهیم کرد.

محدودیت‌های مربوط به مقدار خون جریان‌یافته در زنجیره تأمین: محدودیت‌های تعریف‌شده در رابطه (۲۲) تا (۲۷) مقدار خون جریان‌یافته در بخش‌های مختلف زنجیره تأمین را نشان می‌دهند.

محدودیت‌های مربوط به تأسیس مرکز اصلی و آزمایشگاه: محدودیت (۲۸) تضمین می‌کند حداقل یک مرکز اصلی تأسیس شود و محدودیت (۲۹) تضمین می‌کند در صورتی که در یک مکان کاندیدا، مرکز اصلی تأسیس شود، در آن مرکز می‌توان آزمایشگاه دایر کرد.

محدودیت مربوط به فسادپذیری فراورده‌های خون: محدودیت‌های تعریف‌شده در رابطه (۲۹) تا (۳۲) مربوط به فسادپذیری فراورده‌های خون است. هر یک از فراورده‌های خون، طول عمر مشخصی دارند و پس از گذشت آن زمان فاسد می‌شوند. این محدودیت‌ها تضمین می‌کنند فراورده‌های خون زودتر از مدت زمان فاسد شدن از آزمایشگاه به بیمارستان ارسال شوند. اعمال این محدودیت زمانی برجسته می‌شود که مدل در موارد بزرگ مقیاس اعمال شود، زمانی که یک تسهیلات خاص باید نقاط تقاضای دور را پوشش دهد.

محدودیت‌های مربوط به اطمینان از برآورده‌سازی تقاضا: محدودیت (۳۳) تضمین می‌کند مجموع فراورده‌های خون ارسال شده از تمام آزمایشگاه‌ها به هر یک از بیمارستان‌ها در یک دوره زمانی، درصد مشخصی از تقاضای آن بیمارستان برای آن فراورده‌ها را برآورده می‌کند. از آنجایی که ارتباط آزمایشگاه‌ها با یکدیگر به صورت ساختار موازی در نظر گرفته شده است، حتی اگر در شرایطی فقط یکی از آزمایشگاه‌ها دایر باشد، آن آزمایشگاه درصدی از تقاضا را برآورده می‌کند.

محدودیت‌های مربوط به محاسبه قابلیت اطمینان در مراکز دارای آزمایشگاه: محدودیت (۳۴) نشان می‌دهد تنها در صورتی می‌توان قابلیت اطمینان یک مرکز اصلی را محاسبه کرد که آزمایشگاه در آن مرکز دایر شده باشد.

۳. خطی‌سازی

همان‌طور که از مدل فوق مشاهده می‌شود، تابع هدف دوم و محدودیت (۱۵) شامل حاصل‌ضرب متغیرهای دودویی‌اند. این عبارت‌ها را به کمک لم زیر خطی‌سازی می‌کنیم.

لم ۱.۳. فرض کنید a_1, a_2, \dots, a_n متغیرهای دودویی‌اند. در این صورت حاصل ضرب این متغیرها برابر مقدار Z حاصل از محدودیت‌های زیر است [۱۲].

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n a_i - (n-1) &\leq z \\ z &\leq a_i \quad i = 1, 2, \dots, n \\ z &\geq 0 \end{aligned}$$

۱.۳. خطی‌سازی تابع هدف دوم: برای خطی‌سازی تابع هدف دوم، مقدار قابلیت اطمینان مرکز اصلی k در زمان t را که در رابطه (۲) محاسبه کردیم، با نماد θ_k^t نمایش می‌دهیم. در این صورت با توجه به محدودیت (۳۴) و با فرض اینکه تعداد اعضای مجموعه K برابر n است، رابطه (۶) را می‌توانیم به صورت گسترده زیر بنویسیم:

$$\begin{aligned} UnAv &= \sum_{t \in T} ((1 - \theta_1^t l_1) \cdot (1 - \theta_2^t l_2) \dots (1 - \theta_n^t l_n)) \\ &= \sum_{t \in T} (\theta_1^t l_1 - \theta_2^t l_2 + \theta_1^t \theta_2^t l_1 l_2 + \dots - \theta_n^t l_n + (-1)^n \theta_1^t \dots \theta_n^t l_1 \dots l_n) \end{aligned} \quad (39)$$

رابطه فوق شامل تعدادی جمله غیرخطی شامل حاصل ضرب متغیرهای دودویی است. هر یک از این جملات را به کمک لم ۱.۳، خطی‌سازی می‌کنیم. برای سادگی ابتدا اندیس t را نادیده می‌گیریم. هر یک از جملات را می‌توان با یک رشته دودویی به طول n نظیر کرد. بدین ترتیب که هر مکان رشته دودویی داده شده که عدد یک قرار گرفته است، جمله مربوط به آن در حاصل ضرب ظاهر شود. به طور مثال اگر $n = 5$ و رشته (10010) را داشته باشیم، جمله مربوط به آن به صورت $\theta_1 \theta_4 l_1 l_4$ است. بنابراین اگر مجموعه تمام رشته‌های دودویی به طول n را LS بنامیم، نظیر هر $ls \in LS$ می‌توان متغیر تصمیم Z'_{ls} را با استفاده از لم ۱.۳، تعریف کنیم. همچنین نظیر هر $ls \in LS$ و $t \in T$ حاصل ضرب پارامترهای θ_k^t را با پارامتر O_{ls}^t نمایش می‌دهیم که به صورت رابطه (۴۰) محاسبه می‌شود. بنابراین تابع هدف قابلیت اطمینان را می‌توان به صورت $\sum_{t \in T} \sum_{ls \in LS} O_{ls}^t Z'_{ls}$ نوشت، به شرطی که محدودیت‌های زیر به مدل اضافه شوند.

$$O_{ls}^t = (-1)^{\sum_{k \in K} ls_k} (\prod_{k \in K} (1 - ls_k + ls_k \theta_k^t)) \quad \forall ls \in LS, t \in T \quad (40)$$

$$Z'_{ls} \leq ls_k l_k + (1 - ls_k) \quad \forall ls \in LS, k \in K \quad (41)$$

$$Z'_{ls} \geq \sum_{k \in K} ls_k l_k - \sum_{k \in K} ls_k + 1 \quad \forall ls \in L \quad (42)$$

$$Z'_{ls} \geq 0 \quad \forall ls \in L \quad (43)$$

۲.۳. خطی‌سازی محدودیت: برای خطی‌سازی محدودیت (۱۵) حاصل ضرب متغیرهای دودویی $y_{j_1 j}^t Z_k$ را با متغیر پیوسته $e_{j_1 j k}^t$ جایگزین و محدودیت‌های زیر را با محدودیت (۱۵) جایگزین می‌کنیم.

$$X_{jk}''' q_{jk} \leq q' \sum_{j_1 \in J} e_{j_1 j k}^t \quad \forall j_1, j \in J, k \in K, t \in T \quad (44)$$

$$e_{j_1jk}^t \geq z_k + y_{j_1j}^t - 1 \quad \forall j_1, j \in J, k \in K, t \in T \quad (۴۵)$$

$$e_{j_1jk}^t \leq y_{j_1j}^t \quad \forall j_1, j \in J, k \in K, t \in T \quad (۴۶)$$

$$e_{j_1jk}^t \leq z_k \quad \forall j_1, j \in J, k \in K, t \in T \quad (۴۷)$$

$$0 \leq e_{j_1jk}^t \leq 1 \quad \forall j_1, j \in J, k \in K, t \in T \quad (۴۸)$$

۴. برنامه‌ریزی عدم قطعیت

همان‌طور که از مدل مشاهده می‌شود، سمت راست محدودیت (۱۹) ظرفیت مرکز اصلی k در دوره زمانی t است. از آنجا که ظرفیت هر یک از مراکز به تجهیزات و نیروی انسانی وابسته است، این پارامتر، یک پارامتر غیرقطعی در نظر گرفته شده است. حداکثر ظرفیت مراکز اصلی، معلوم و قطعی است ولی توزیع متغیر تصادفی ظرفیت در هر دوره نامشخص است. با تقسیم طرفین این محدودیت بر حداکثر ظرفیت داریم:

$$\frac{\sum_{j \in J} s''_{jk} + \sum_{i \in I} s''_{ik}}{v''_{k,max}} \leq \bar{Q}_k^t \quad \forall k \in K, t \in T \quad (۴۹)$$

سمت راست رابطه فوق، $\bar{Q}_k^t = \frac{\bar{v}_k^t}{v''_{k,max}}$ متغیر تصادفی با توزیع بتا است. حال، رابطه (۴۹) یک محدودیت با سمت راست غیرقطعی است که تابع توزیع احتمال متغیر تصادفی \bar{Q}_k^t مشخص است. محدودیت (۱۹) را با رابطه (۴۹) جایگزین می‌کنیم و با بهره‌گیری از روش برنامه‌ریزی احتمالی مقید به شانس این محدودیت را به محدودیت قطعی تبدیل می‌کنیم.

۱.۴. برنامه‌ریزی احتمالی با قیود شانسی: یک روش برای مواجهه با مسائل بهینه‌سازی که برخی از پارامترهای آن‌ها غیرقطعی است، استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی است. یکی از زیرشاخه‌های برنامه‌ریزی تصادفی، برنامه‌ریزی احتمالی با قیود شانسی است. در برنامه‌ریزی احتمالی یا برنامه‌ریزی با قیود شانسی، باید تصمیماتی اتخاذ گردد که شذنی بودن را تا حد امکان تضمین کند و قیود به جز در شرایط اضطراری و غیرقابل پیش‌بینی نباید نقض شوند. به‌طور کلی فرض کنیم $Ax \leq \bar{b}$ محدودیتی است که سمت راست آن، متغیر تصادفی است و توزیع احتمال آن معلوم است. یک محدودیت شانسی یا احتمالی این محدودیت به فرم کلی $\Pr(Ax \leq \bar{b}) \geq \gamma$ در نظر گرفته می‌شود. در این حالت، محدودیت، با احتمال حداقل $1 - \gamma$ تحقق می‌پذیرد که $0 \leq \gamma < 1$. در واقع γ سطح اطمینان برآورده‌سازی محدودیت شانسی در نظر گرفته می‌شود. این محدودیت را می‌توانیم به صورت زیر، به فرم یک محدودیت معمولی بنویسیم که در آن، $F^{-1}(\cdot)$ تابع معکوس تابع توزیع تجمعی متغیر تصادفی است.

باتوجه به توضیحات فوق، رابطه (۴۹) را می‌توانیم به فرم قطعی زیر بنویسیم و آن را با محدودیت (۱۹) جایگزین کنیم.

$$\frac{\sum_{j \in J} s''_{jk} + \sum_{i \in I} s''_{ik}}{v''_{k,max}} \leq F^{-1}(1 - \gamma) \quad \forall k \in K, t \in T \quad (۵۱)$$

۵. برنامه‌ریزی چندهدفه

مدل ریاضی ارائه‌شده، یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه است. برای حل این نوع مسائل، لازم است از رویکردهای حل مسائل

چندهدفه استفاده کنیم. در این پژوهش، از روش معیار جامع که یک روش هم‌مقیاس‌سازی است، استفاده می‌کنیم. این روش، یک روش غیرترجیحی است و در آن هیچ اطلاعاتی از ترجیحات تصمیم‌گیرنده به کار برده نمی‌شود. رویکرد کلی این روش، به حداقل رساندن انحراف توابع هدف از یک نقطه ایده‌آل است [۱۸]. رابطه (۵۲) تابع هم‌مقیاسی مدل ارائه شده است. در رابطه زیر، TC تابع هدف هزینه کل، TC_{min} مقدار بهینه حاصل از کمینه‌سازی TC ، $UnAv$ تابع هدف دسترس‌ناپذیری و $UnAv_{min}$ مقدار بهینه حاصل از کمینه‌سازی $UnAv$ است. پارامترهای γ_1 و γ_2 به ترتیب، وزن تابع هدف هزینه کل و دسترس‌ناپذیری را نشان می‌دهند.

$$\min L_p = \gamma_1 \left(\frac{TC - TC_{min}}{TC_{min}} \right) \gamma_2 \left(\frac{UnAv - UnAv_{min}}{UnAv_{min}} \right) \quad (52)$$

۶. الگوریتم حل

باتوجه به این که مدل شامل یک مسأله مکان‌یابی باظرفیت است به نظر می‌رسد یک مسأله NP-سخت باشد. ولی ما اثبات دقیقی برای آن نیاورده‌ایم. در این نوع مسائل، امکان دست‌یابی به جواب‌های بهینه برای مدل در ابعاد بزرگ با استفاده از حل‌کننده‌های صنعتی وجود ندارد. در این پژوهش برای تولید جواب‌های اولیه از الگوریتم R&F^۲ استفاده می‌کنیم.

۱.۶ الگوریتم R&F: الگوریتم R&F نخستین بار در دهه ۱۹۹۰ میلادی به‌عنوان یک روش ابتکاری برای حل مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته مطرح شد و ساختار آن بر پایه تثبیت تدریجی متغیرها در طول افق برنامه‌ریزی و حل گام‌به‌گام زیرمسأله‌ها استوار است [۱۵]. اساس کار این الگوریتم، تجزیه مسأله اصلی به چند زیرمسأله با متغیرهای عدد صحیح یا دودویی کمتر است. در هر مرحله، تنها بخشی از متغیرهای عدد صحیح به‌صورت عدد صحیح در نظر گرفته می‌شوند، در حالی که سایر متغیرها آزادسازی شده و به‌صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شوند. با این رویکرد، فضای جست‌وجو در هر تکرار محدودتر شده و حل زیرمسأله‌ها ساده‌تر و سریع‌تر انجام می‌شود. پس از حل هر مرحله، مقادیر متغیرهای صحیح ثابت‌سازی شده و الگوریتم به مرحله بعدی منتقل می‌شود. این الگوریتم، به دلیل داشتن ساختار مرحله‌ای و انعطاف‌پذیر برای حل مسائل بهینه‌سازی بزرگ‌مقیاس، به‌ویژه در مدل‌های چنددوره‌ای، مناسب و کاربردی است [۱۶].

در این پژوهش، مسأله را براساس افق زمانی تجزیه می‌کنیم. افق زمانی در این روش، به سه پنجره؛ پنجره ثابت، پنجره بهینه‌سازی و پنجره آزادسازی تقسیم می‌شود. نقطه شروع و پایان پنجره بهینه‌سازی را به ترتیب با t^s و t^f نمایش می‌دهیم. بنابراین، دوره زمانی پنجره بهینه‌سازی (t^s, t^f) است. دوره زمانی پنجره ثابت $(1, t^s - 1)$ و دوره زمانی پنجره آزادسازی $(t^s + 1, |T|)$ است، به طوری که $|T|$ تعداد دوره‌های زمانی مسأله است. برای تعریف هر یک از پنجره‌ها، لازم است پارامتر α (طول بازه‌ها) و β (هم‌پوشانی دوره‌ها) را تعریف کنیم. پارامتر α تعداد واحدهای زمانی پنجره بهینه و β تعداد واحدهای زمانی که مجدد بهینه می‌شوند را نشان می‌دهد.

الگوریتم R&F با زمان $t=1$ شروع می‌شود و براساس پارامتر α پنجره‌های بهینه‌سازی و آزادسازی تعریف می‌شوند. در تکرار

¹ Lp-metric

² Relax & Fix

اول الگوریتم، پنجره ثابت وجود ندارد. متغیرهای دودویی و عدد صحیح وابسته به زمان، در پنجره آزادسازی، پیوسته در نظر گرفته می‌شوند و زیرمسئله حاصل حل می‌شود. مقادیر به‌دست‌آمده برای متغیرهای دودویی و عدد صحیح، در پنجره بهینه‌سازی، در تکرار بعدی ثابت در نظر گرفته می‌شوند و پنجره بهینه‌سازی و آزادسازی جدید براساس پارامترهای α و β تعریف می‌شوند. این روند، تا پایان افق زمانی، تکرار می‌شود [۱۶].

مدل ارائه‌شده، شامل هفت نوع متغیر تصمیم دودویی، $x_{ij}^t, x_{ik}^t, x_{jk}^t, y_{j_1j_2}^t, z_k, l_k, y_{pkh}^t$ و یک نوع متغیر تصمیم عدد صحیح nf^t است. به دلیل وجود متغیر دودویی $y_{j_1j_2}^t$ که جابه‌جایی مکان مراکز موقت در دو دوره زمانی متوالی را نشان می‌دهد، هم‌پوشانی بین بازه‌ها را حتماً در نظر می‌گیریم ($\beta \geq 1$).

در هر تکرار الگوریتم، محدودیت‌های جدید به مسئله اصلی اضافه می‌شود تا یک زیرمسئله عدد صحیح آمیخته جدید ($SubMIP^{RF}$) ایجاد شود. متغیرهای دودویی z_k و l_k به زمان وابستگی ندارند. بنابراین یک‌بار در تکرار اول در پنجره بهینه‌سازی بهینه می‌شوند و پس از آن در پنجره ثابت قرار می‌گیرند. در هر تکرار، مقادیر به‌دست آمده برای متغیرهای دودویی و عدد صحیح در پنجره بهینه‌سازی، به صورت $\tilde{x}_{ij}^t, \tilde{x}_{ik}^t, \tilde{x}_{jk}^t, \tilde{y}_{j_1j_2}^t, \tilde{z}_k, \tilde{l}_k, \tilde{y}_{pkh}^t, \tilde{nf}^t$ نام‌گذاری می‌شود. محدودیت‌های اضافه شده به مسئله اصلی در تکرار اول و سایر تکرارها برای ایجاد ($SubMIP^{RF}$) در جدول ۴ و جدول ۵ ارائه شده و ساختار کلی الگوریتم در الگوریتم ۱ نشان داده شده است.

جدول ۴. محدودیت‌های تکرار اول الگوریتم

نام پنجره	بازه زمانی	محدودیت‌ها
بهینه‌سازی	$t \in \{t^s, t^f\}$	$x_{ij}^t, x_{ik}^t, x_{jk}^t, y_{j_1j_2}^t, z_k, l_k, y_{pkh}^t, nf^t \in \{0,1\} \quad \forall i, j, j_1, j_2, k, p, h$
آزادسازی	$t \in \{t^f + 1, T \}$	$x_{ij}^t, x_{ik}^t, x_{jk}^t, y_{j_1j_2}^t, y_{pkh}^t, nf^t \in [0,1] \quad \forall i, j, j_1, j_2, k, p, h$

جدول ۵. محدودیت‌های سایر تکرارهای الگوریتم

نام پنجره	بازه زمانی	محدودیت‌ها
ثابت	$t \in \{1, t^s\}$	$x_{ij}^t = \tilde{x}_{ij}^t, x_{ik}^t = \tilde{x}_{ik}^t, x_{jk}^t = \tilde{x}_{jk}^t, y_{j_1j_2}^t = \tilde{y}_{j_1j_2}^t, z_k = \tilde{z}_k, l_k = \tilde{l}_k, y_{pkh}^t = \tilde{y}_{pkh}^t, nf^t = \tilde{nf}^t \quad \forall i, j, j_1, j_2, k, p, h$
بهینه‌سازی	$t \in \{t^s, t^f\}$	$x_{ij}^t, x_{ik}^t, x_{jk}^t, y_{j_1j_2}^t, y_{pkh}^t, nf^t \in \{0,1\} \quad \forall i, j, j_1, j_2, k, p, h$
آزادسازی	$t \in \{t^f + 1, T \}$	$x_{ij}^t, x_{ik}^t, x_{jk}^t, y_{j_1j_2}^t, y_{pkh}^t, nf^t \in [0,1] \quad \forall i, j, j_1, j_2, k, p, h$

الگوریتم ۱. الگوریتم ابتکاری (R&F)

Require: α, β

1. $t^s \leftarrow 1$
2. $t^f \leftarrow \alpha$
3. **while** $t^s \leq T$ **do**
4. solve $SubMIP^{RF}$
5. $x_{ij}^t = \tilde{x}_{ij}^t, x_{ik}^t = \tilde{x}_{ik}^t, x_{jk}^t = \tilde{x}_{jk}^t, y_{j_1 j_2}^t = \tilde{y}_{j_1 j_2}^t, z_k = \tilde{z}_k, l_k = \tilde{l}_k, y_{pkh}^t = \tilde{y}_{pkh}^t, n f^t = \tilde{n} f^t$
6. $t^s \leftarrow t^f - \beta + 1$
7. $t^f \leftarrow t^f + \alpha - \beta$
8. **if** $t^f > T$ **then**
9. $t^f \leftarrow T$
10. **end if**
11. **end while**

۷. نتایج عددی

مدل ریاضی خطی سازی شده که ابتدا دوهدفه بوده، با استفاده از روش معیار جامع در بخش ۵ به مدل تک‌هدفه تبدیل و سپس در محیط Julia پیاده‌سازی شده است. در این پژوهش، مجموعه‌ای از نمونه‌مسئله‌ها با ابعاد مختلف به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم و حل مدل پیشنهادی طراحی شده‌اند. پارامترهای این نمونه‌مسئله‌ها به صورت مصنوعی و بر پایه داده‌های شبیه‌سازی شده تولید شده‌اند. برای این منظور، از توزیع‌های یکنواخت در بازه‌های منطقی برای متغیرهایی نظیر هزینه، ظرفیت، فاصله، زمان و تقاضا استفاده شده است. جزئیات نحوه مقداردهی پارامترها در جدول ۶ ارائه شده است. برای به‌دست‌آوردن جواب‌های دقیق نمونه‌مسئله‌های با ابعاد کوچک و متوسط، از حل‌کننده CPLEX استفاده شده است. برای اعتبارسنجی الگوریتم معرفی شده در بخش ۶، آن را روی همین نمونه‌مسئله‌ها پیاده‌سازی کردیم و نتایج حاصل از الگوریتم با جواب‌های به‌دست‌آمده از CPLEX در جدول ۸ مقایسه شده است. ابعاد نمونه‌مسئله‌های استفاده شده نیز در جدول ۷ گزارش شده‌اند. مسئله‌های شماره ۱ و ۲ در دسته مسائل با ابعاد کوچک، مسئله‌های شماره ۳ و ۴ با ابعاد متوسط و مسئله شماره ۵ به‌عنوان یک نمونه با ابعاد بزرگ در نظر گرفته شده‌اند.

مقدار تابع هدف گزارش شده در نتایج عددی، مربوط به مدل تک‌هدفه‌ای است که با استفاده از روش معیار جامع از مدل دوهدفه اولیه به‌دست آمده است. این مقدار ترکیبی از دو تابع هدف هزینه کل و دسترس‌ناپذیری شبکه است که بر اساس رابطه (۵۲) محاسبه شده و وزن‌دهی آن توسط ضرایب γ_1 و γ_2 انجام شده است.

جدول ۶. نحوه تولید و مقداردهی پارامترهای مسئله

پارامتر	مقدار	واحد	پارامتر	مقدار	واحد
c_{j1j2}	$\sim Uniform[100,400]$	هزار تومان	c'_k	$\sim Uniform[10^7, 5 \times 10^7]$	هزار تومان
r_{ij}	$\sim Uniform[0.2,20]$	کیلومتر	a_{ij}	$r_{ij} \times 5$	هزار تومان
w_{ik}	$\sim Uniform[1,40]$	کیلومتر	a'_{ik}	$w_{ik} \times 8$	هزار تومان
q_{jk}	$\sim Uniform[3,50]$	کیلومتر	a''_{jk}	$q_{jk} \times 12$	هزار تومان
$h_{kk'}$	$\sim Uniform[5,50]$	کیلومتر	$b_{kk'}$	$h_{kk'} \times 30$	هزار تومان
f_{kh}	$\sim Uniform[1,50]$	کیلومتر	b''_{kh}	$h_{kk'} \times 30$	هزار تومان
c''_k	$\frac{c'_k}{10}$	هزار تومان	r'	۲۰	کیلومتر
w'	۳۰	کیلومتر	q'	۴۵	کیلومتر
f'_{pkh}	$\sim Uniform[1,10]$	روز	tp_p	$[7,42,360]^T$	روز
$v^t_{i,max}$	$\sim Uniform[100,800]$	واحد خون	d^t_{ph}	$\sim Uniform[5,500]$	واحد خون
v'_{max}	$400 \times T $	واحد خون	$v''_{k,max}$	$\sim Uniform[100000,300000]$	واحد خون
α^t_k	$\sim Uniform[1,2]$		β^t_k	$\sim Uniform[0.5,1.2]$	
η	$\sim Uniform[0.6,0.9]$		N	۴	

جدول ۷. ابعاد نمونه مسئله‌ها

شماره مسئله					توضیح	مجموعه
۵	۴	۳	۲	۱		
۴۰	۲۳	۱۷	۱۵	۸	تعداد گروه‌های اهداکننده	$ I $
۱۲	۶	۶	۵	۵	تعداد مکان‌های کاندیدا برای تسهیل موقت	$ J $
۱۰	۵	۵	۴	۴	تعداد مکان‌های کاندیدا برای تأسیس مرکز اصلی	$ K $
۳	۳	۳	۳	۳	تعداد فرآورده‌های خون	$ P $
۱۲۰	۹۵	۷۲	۶۵	۴۵	تعداد بیمارستان‌ها	$ H $
۱۲	۱۲	۱۲	۹	۹	تعداد دوره‌های زمانی	$ T $

جدول ۸. مقایسه جواب‌های حاصل از الگوریتم R&F و CPLEX

شماره مسأله	وزن ۱	وزن ۲	نتایج CPLEX		نتایج R&F		درصد فاصله نسبی (درصد)
	γ_1	γ_2	زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف (Z^{IP})	زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف (Z^{RF})	$\frac{Z^{RF} - Z^{IP}}{Z^{IP}} \times 100$
۱	۱/۵	۰/۵	۲/۵۸	۰/۴۲۴۴	۲/۳۰	۰/۴۲۴۵	۰/۰۴
۲	۱/۵	۰/۵	۱/۴۳	۰/۳۲۱۶	۱/۶۵	۰/۱۶۳۶	۰/۰۲
۳	۱/۵	۰/۵	۶۸/۱۷	۰/۰۶۶۹	۲۱/۹۶	۰/۰۷۱	۶/۳۶
۴	۱/۵	۰/۵	۱۲۴	۰/۰۶۸۸	۲۰/۲۹	۰/۰۷۷۱	۱۲/۰۰

با توجه به جدول فوق، زمان حل و مقادیر تابع هدف حاصل از جواب شدنی الگوریتم و جواب بهینه CPLEX برای نمونه مسأله‌های کوچک، تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. کم بودن درصد فاصله نسبی مقادیر تابع، نشان‌دهنده این است که برای نمونه مسأله‌های با ابعاد کوچک، الگوریتم R&F به خوبی قادر به تولید جواب‌های بسیار نزدیک به جواب بهینه است. همچنین، مقادیر تابع هدف حاصل از جواب شدنی الگوریتم و جواب بهینه CPLEX برای نمونه مسأله‌های متوسط، حداکثر به اندازه ۱۲ درصد با یکدیگر فاصله دارند. زمان حل CPLEX و الگوریتم تفاوت نسبتاً زیادی دارد و الگوریتم در زمان سریع‌تری نسبت به حل‌کننده جواب شدنی برای مسأله‌های ۳ و ۴ به دست می‌آورد. با توجه به این که حل‌کننده CPLEX قادر به حل نمونه مسأله با ابعاد بزرگ در زمان معقول نیست، با استفاده از الگوریتم ارائه شده، یک جواب شدنی برای مسأله با ابعاد بزرگ به دست می‌آوریم. نتایج حاصل در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۹. نتایج پیاده‌سازی الگوریتم برای نمونه مسأله بزرگ

شماره مسأله	وزن ۱	وزن ۲	نتایج R&F	
	γ_1	γ_2	زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف (Z^{RF})
۵	۱/۵	۰/۵	۴۱۵۶	۰/۲۲۷۰۹۱

با توجه به جدول نتایج فوق یک جواب شدنی برای نمونه مسأله بزرگ به کمک الگوریتم R&F در مدت زمان ۴۱۵۶ ثانیه، که تقریباً معادل با ۶۹ دقیقه است، به دست آمده است.

۶. جمع‌بندی

در این تحقیق، با مطالعه قرار دادن شبکه زنجیره تأمین خون به عنوان بخش مهمی از حوزه سلامت و بهداشت، از کاربرد بهینه‌سازی در بخش سلامت استفاده نمودیم. به عنوان نوآوری پژوهش، با در نظر گرفتن ارتباط مراکز اصلی به صورت موازی

و ارائه یک تعریف کمی جدید برای قابلیت اطمینان زنجیره تأمین خون، دسترس‌ناپذیری کل زنجیره تأمین را به حداقل رساندیم. مسأله ارائه‌شده یک مدل دو هدفه برای مکانیابی - تخصیص زنجیره تأمین خون با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتر ظرفیت واقعی مراکز اصلی است. زنجیره تأمین شامل تسهیلات موقت جهت تسهیل در جمع‌آوری خون از اهداکنندگان و مراکز اصلی جمع‌آوری خون می‌باشد. خون در مراکز اصلی دارای آزمایشگاه فرآوری شده و به بیمارستان‌ها ارسال می‌شود. تابع هدف اول کمینه‌سازی هزینه کل زنجیره تأمین که شامل مجموع هزینه‌های احداث مراکز اصلی و تسهیلات موقت و هزینه ارسال خون می‌باشد. تابع هدف دوم کمینه‌سازی دسترس‌ناپذیری بوده که به دلیل وجود متغیرهای دودویی غیرخطی شده است که خطی‌سازی انجام شد. همچنین محدودیت غیرقطعی وابسته به پارامتر تصادفی ظرفیت مراکز اصلی با کمک روش برنامه‌ریزی احتمالی با قیود شانسی قطعی شد. همچنین برای یک مسأله با سائز متوسط مدل با کمک الگوریتم ابتکاری حل شد.

با توجه به ساختار مدل و پارامترهای در نظر گرفته‌شده، نتایج این پژوهش می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با طراحی و بهینه‌سازی شبکه‌های تأمین خون در شرایط عدم قطعیت مورد استفاده قرار گیرد. هرچند این مدل با داده‌های شبیه‌سازی شده بررسی شده، اما قابلیت انطباق با داده‌های واقعی را داشته و می‌تواند در سنجش سناریوهای مختلف و مقایسه راهکارهای پیشنهادی برای مدیران مراکز سلامت و انتقال خون مفید واقع شود.

به عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آتی می‌توان عدم قطعیت سایر پارامترها همچون تقاضا و هزینه‌ها را نیز در مدل لحاظ نمود. همچنین برای حل مدل برای مسائل واقعی با ابعاد بزرگ می‌توان به توسعه الگوریتم‌های ابتکاری متناسب با ویژگی‌های مدل پرداخت. به عنوان پیشنهاد دیگر می‌توان گروه‌های خونی را هم در مدل لحاظ نمود. دیدن اتلاف حین ارسال یا در مراکز جمع‌آوری و فرآوری خون و در نظر گرفتن به‌عنوان محدودیت و یا به‌عنوان هزینه در تابع هدف نیز پیشنهاد می‌شود.

References

1. Kozlenkova IV, Hult GT, Lund DJ, Mena JA, Kekec P. The role of marketing channels in supply chain management. *Journal of retailing*. 2015 Dec 1;91(4):586-609.
2. Pirabán A, Guerrero WJ, Labadie N. Survey on blood supply chain management: Models and methods. *Computers & Operations Research*. 2019 Dec 1;112:104756.
3. Millard DW. Industrial inventory models as applied to the problem of inventorying whole blood (Master's thesis, The Ohio State University).
4. Van Zyl GJ. Inventory control for perishable commodities. North Carolina State University. Dept. of Statistics; 1963.
5. Zahiri B, Torabi S, Mousazadeh M, Mansouri S. Blood collection management: A robust possibilistic programming approach. *Appl. Math. Model*. 2015 Dec;39(23-24):7680-96.
6. Zahiri B, Pishvae MS. Blood supply chain network design considering blood group compatibility under uncertainty. *International journal of production research*. 2017 Apr 3;55(7):2013-33.
7. Ramezani R, Behboodi Z. Blood supply chain network design under uncertainties in supply and demand considering social aspects. *Transportation research part E: logistics and transportation review*. 2017 Aug 1;104:69-82.

8. Zahiri B, Torabi SA, Mohammadi M, Aghabegloo M. A multi-stage stochastic programming approach for blood supply chain planning. *Computers & Industrial Engineering*. 2018 Aug 1;122:1-4.
9. Fallahi A, Mousavian Anaraki SA, Mokhtari H, Niaki ST. Blood plasma supply chain planning to respond COVID-19 pandemic: a case study. *Environment, development and sustainability*. 2024 Jan;26(1):1965-2016.
10. Zhou Y, Zou T, Liu C, Yu H, Chen L, Su J. Blood supply chain operation considering lifetime and transshipment under uncertain environment. *Applied Soft Computing*. 2021 Jul 1;106:107364.
11. Aghsami A, Abazari SR, Bakhshi A, Yazdani MA, Jolai S, Jolai F. A meta-heuristic optimization for a novel mathematical model for minimizing costs and maximizing donor satisfaction in blood supply chains with finite capacity queueing systems. *Healthcare Analytics*. 2023 Nov 1;3:100136.
12. Yuesti A, Chetthamrongchai P, Ahmed AA, Anitra V, Aravindhana S, Akhmadeev R, Kurniady DA, Rotinsulu CN, Kavitha M. Optimizing the issue of blood supply chain network design with a reliability approach. *Industrial Engineering & Management Systems*. 2022;21(2):355-65.
13. Ha C, Jun HB, Ok C. A mathematical definition and basic structures for supply chain reliability: A procurement capability perspective. *Computers & Industrial Engineering*. 2018 Jun 1;120:334-45.
14. Liberti L. Reformulation techniques in mathematical programming (Doctoral dissertation, Université Paris Dauphine).
15. Dillenberger C, Escudero LF, Wollensak A, Zhang W. On practical resource allocation for production planning and scheduling with period overlapping setups. *European Journal of Operational Research*. 1994 Jun 9;75(2):275-86.
16. Escudero LF, Pizarro Romero C. On solving a large-scale problem on facility location and customer assignment with interaction costs along a time horizon. *Top*. 2017 Oct;25(3):601-22.
17. Alipour Z, Jolai F, Monabbati E, Zaerpour N. General lot-sizing and scheduling for perishable food products. *RAIRO-Operations Research*. 2020 May 1;54(3):913-31.

۱۸. اصغرپور، محمدجواد. تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره. انتشارات دانشگاه تهران ۱۳۹۷.