



A Multi-Objective Possibilistic Model to Platelet Supply Chain Network Design Considering Uncertainty in Demand and Number of Donors

Marzieh Mozafari* , Soudabeh Sobhanimanesh

* Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received: 01/01/2025, Revised: 12/01/2025, Accepted: 11/02/2025, Published: 10/03/2025)
DOR: 20.1001.1.20089198.1403.26.85.5.8

ABSTRACT

In recent years, the need for blood and its products has increased due to various reasons including traffic accidents, natural disasters, spread of diseases such as cancer, etc. A very important issue regarding blood and blood products is their perishability. Excessive blood collection causes waste, while insufficient blood supply leads to shortages at demand points, which can result in irreparable costs. Given that the supply of blood from donors is not regular and continuous and the demand for blood products is not certain in the real world, appropriate planning for the collection and production of blood and its products has attracted the attention of many researchers. Among blood products, platelets are the most perishable blood product, with a lifespan of five days. In this paper, a mixed linear programming (MILP) model under supply and demand uncertainty is presented for the integrated design problem of platelet collection and production network in blood supply chain, which aims to minimize the total network costs and maximize the quality of platelets produced. The specific characteristics of this blood product, such as types of donors and two different platelet production methods (whole blood and apheresis), are considered. In order to solve the model using a probabilistic programming approach, the initial non-deterministic model is converted into a deterministic model and the model is solved exactly by the CPLEX solver in GAMS. The efficiency of the model is demonstrated with a case study related to the blood network of Tehran.

Keywords: Platelet Supply Chain, Location-Allocation Problem, Production and Inventory Planning, Multi-Objective Possibilistic Programming, Quality

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



* Corresponding Author Email: m_mozafari@azad.ac.ir

مدل برنامه ریزی امکانی چندهدفه برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین پلاکت با در نظر گیری عدم قطعیت در تقاضا و تعداد اهداکنندگان

مرضیه مظفری^{۱*} ID، سودابه سبحانی منش^۲

۱- استادیار گروه مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران ۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی صنایع، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

DOR: 20.1001.1.20089198.1403.26.85.5.8

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

چکیده

در سال‌های اخیر به دلایل گوناگونی نظیر شیوع بیماری‌هایی چون سرطان، تصادفات رانندگی، رخداد بلایای طبیعی و ... نیاز به خون و فرآورده‌های آن افزایش یافته است. موضوع بسیار مهم در مورد خون و فرآورده‌های خونی، فسادپذیری آن‌ها است. جمع‌آوری بیش‌ازحد خون باعث اتلاف شده، درحالی‌که موجودی ناکافی آن نیز منجر به کمبود و کاهش سطح خدمت در نقاط تقاضا می‌گردد که می‌تواند هزینه‌های جبران‌ناپذیری را در پی داشته باشد. با توجه به اینکه در دنیای واقعی عرضه خون از سوی اهداکنندگان دارای حالت منظم و مستمر نیست و تقاضا نیز برای فرآورده‌های خونی حالت قطعی ندارد، برنامه‌ریزی مناسب جهت جمع‌آوری و تولید خون و فرآورده‌های آن مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در بین فرآورده‌های خونی، پلاکت‌ها با داشتن طول عمری معادل پنج روز فسادپذیرترین فرآورده خونی می‌باشند. لذا در این مقاله به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی امکانی چنددوره‌ای تحت شرایط عدم قطعیت در عرضه و تقاضا برای مسئله طراحی یکپارچه شبکه جمع‌آوری و تولید پلاکت در زنجیره تأمین خون پرداخته شده که هدف آن مینیمم کردن هزینه‌های کل شبکه و ماکزیمم کردن کیفیت پلاکت‌های تولید شده است. مدل پیشنهادی، ویژگی‌های خاص این زنجیره شامل کیفیت پلاکت موردنیاز بیمار، انواع اهداکنندگان و دو روش متفاوت تولید پلاکت (خون کامل و آفرزيس) را در نظر می‌گیرد. پس از تبدیل مدل برنامه‌ریزی امکانی به یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)، مدل به صورت دقیق با استفاده از CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل شده و کارایی آن با مطالعه موردی شبکه تأمین خون شهر تهران نمایش داده شده است.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین پلاکت، مسئله مکان‌یابی-تخصیص، برنامه‌ریزی تولید و موجودی، رویکرد برنامه‌ریزی امکانی دوهدفه، کیفیت

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر نیاز به این محصول کمیاب محسوس‌تر شده، زیرا حجم وسیع تصادفات رانندگی، شیوع بیماری‌هایی چون سرطان و همچنین وقوع بلایای طبیعی سبب افزایش روزافزون بیماران نیازمند به خون شده است. بنابراین، جمع‌آوری خون به میزان کافی بسیار حائز اهمیت است. از طرفی تولید انواع مختلف فرآورده‌های خونی مستلزم دارا بودن فناوری‌های خاص و همچنین نیروی متخصص می‌باشد که این امر سبب صرف هزینه‌های بالایی می‌شود. از این‌رو، برنامه‌ریزی مناسب جهت جمع‌آوری خون و تولید فرآورده‌های خونی در سال‌های اخیر کانون توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در ساختار زنجیره تأمین فرآورده‌های خونی، اهداکنندگان نقش تأمین‌کنندگان اولیه، مراکز خون‌گیری به‌عنوان تأمین‌کنندگان اصلی،

زنجیره تأمین خون در نظام سلامت، همواره به‌عنوان یکی از بخش‌های استراتژیک بوده و از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. خون به‌عنوان عضو نجات‌بخش برای انسان، تنظیم سیستم‌های ایمنی بدن مانند تأمین اکسیژن و مواد مغذی به بافت‌ها، حمل‌ونقل هورمون در سراسر بدن و تنظیم دمای مرکزی بدن را بر عهده دارد. خون کالای حیاتی است که دارای ویژگی‌های زیر می‌باشد:

۱. انسان‌ها تنها تولیدکننده خون می‌باشند.
۲. برای نجات جان هر بیمار نیازمند به خون، تنها خون انسان‌های دیگر کاربرد دارد.
۳. در حوزه پزشکی، هیچ کالایی جایگزین خون نیست.

تأمین خون نیازمند طراحی یک شبکه جمع‌آوری- تولید مناسب برای تأمین خون بیماران نیازمند هستیم به‌نحوی که برآورده سازی نیاز به فرآورده‌های خونی با حداقل هزینه و حداکثر کیفیت رخ دهد. در این پژوهش اهداکنندگان به دودسته تقسیم می‌شوند:

۱. اهداکنندگان خون کامل: این دسته از اهداکنندگان بر اساس کمترین مسافت با مراکز خون‌گیری، به آن‌ها مراجعه کرده و اقدام به اهدای خون کامل می‌نمایند. اهدای خون کامل، یکی از رایج‌ترین روش‌های اهدا می‌باشد، که بنا بر آمار منتشرشده توسط سازمان انتقال خون ایران، بیشترین نوع اهدا در کشور به همین روش صورت می‌پذیرد. به پلاکتی که از خون کامل این نوع اهداکننده به‌دست‌آمده است، کنسانتره پلاکت تصادفی گویند.

۲. اهداکنندگان پلاکت آفرزیس: این اهداکنندگان به مرکز خون مراجعه نموده و به‌وسیله دستگاه آفرزیس پلاکت فرد اهداکننده جمع‌آوری و بقیه خون و اجزای آن به بدن فرد بازمی‌گردد. به پلاکتی که توسط این نوع اهداکننده تولید می‌شود، کنسانتره پلاکتی آفرزیس گویند. در این روش اغلب در مدت‌زمان حدود دو ساعت، تقریباً معادل پنج تا شش واحد پلاکت تک‌واحدی با حداقل حجم گلبول‌های قرمز و پلاسما از یک نفر اهداکننده پلاکت به دست می‌آید.

لذا، در این مقاله با توجه به ویژگی خاص پلاکت‌ها، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته برای مسئله طراحی یکپارچه جمع‌آوری- تولید پلاکت در شبکه زنجیره تأمین خون ارائه می‌شود که علاوه بر مکان‌یابی تسهیلات خون‌گیری، تخصیص اهداکنندگان به این مراکز، جریان انتقال خون مابین تسهیلات مختلف تعیین شده و به‌طور هم‌زمان ویژگی‌های خاص این محصول همچون انواع اهداکنندگان، تولید پلاکت به دو روش خون کامل و آفرزیس و همچنین اهداف چندگانه شبکه که شامل به حداقل رساندن هزینه- های شبکه که متشکل از هزینه استقرار تسهیلات سیار و تسهیلات ثابت خون‌گیری، هزینه جابجایی تسهیلات سیار در دوره‌های متوالی، هزینه‌های انتقال خون مابین تسهیلات مختلف و هزینه‌های تولید پلاکت، و به حداکثر رساندن کیفیت پلاکت تولیدشده را در نظر می‌گیرد.

با توجه به اینکه در دنیای واقعی عرضه خون از سوی اهداکنندگان دارای حالت منظم و مستمر نیست و تقاضا نیز برای فرآورده‌های خونی حالت قطعی ندارد، در مدل ارائه‌شده عدم قطعیت در پارامترهای عرضه و تقاضا در نظر گرفته‌شده است و این عدم قطعیت با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی که توسط پیشوایی، رزمی و ترابی (۲۰۱۲) [۱] ارائه شد، مدل غیرقطعی به قطعی تبدیل می‌شود. ادامه مقاله به‌این‌ترتیب سازمان‌یافته است. در بخش دوم مرور و ارزیابی مقالات مرتبط با پیشینه تحقیق انجام می‌پذیرد. در بخش سوم، به تعریف مسئله و بیان مفروضات خواهیم پرداخت و مدل برنامه‌ریزی ریاضی مربوطه که شامل پارامترها، متغیرها، تابع

مرکز انتقال خون در جایگاه تولیدکننده، مراکز درمانی مانند بیمارستان‌ها و درنهایت بیماران مشتریان زنجیره تأمین می‌باشند. تسهیلات جمع‌آوری پلاکت مراکزی هستند که باهدف جمع‌آوری پلاکت تأسیس می‌شوند و دارای نقش ویژه‌ای در تأمین پلاکت بیماران نیازمند هستند. بنابراین مکان‌یابی و تخصیص نامناسب تسهیلات، علاوه بر ناکارآمدی سیستم، مستقیماً باعث به خطر افتادن جان انسان‌ها خواهد شد. زنجیره تأمین در این مسئله دارای چهار سطح کلی جمع‌آوری خون، تولید فرآورده‌های خونی، ذخیره و نگهداری فرآورده‌ها و درنهایت توزیع آن‌ها به مراکز درمانی است. در مرحله جمع‌آوری، ابتدا اهداکنندگان خون به مراکز خون‌گیری که از قبل مکان‌یابی شده‌اند، مراجعه کرده و اقدام به اهدای خون می‌نمایند. سپس خون جمع‌آوری‌شده از مراکز خون‌گیری به مراکز تولید فرآورده‌ها انتقال می‌یابد تا در آنجا پس از انجام تست‌های لازم در جهت تضمین سلامت خون اهدایی، فرآورده‌های مختلفی خونی تهیه شود. در مرحله نگهداری فرآورده، محصولات مختلف خونی در داخل مراکز تولید و یا خارج آن ذخیره می‌شوند. سپس فرآورده‌های مختلف خونی با توجه به مقدار تقاضای بیمارستان‌ها و مراکز درمانی توزیع خواهند شد.

زنجیره تأمین خون دارای پیچیدگی‌هایی می‌باشد که ازجمله می‌توان به ویژگی فسادپذیری خون اشاره نمود از طرفی، عرضه خون از جانب اهداکنندگان نسبتاً نامنظم بوده و طبق آمار بررسی‌شده^۱ در سال ۱۳۹۸ توسط سازمان انتقال خون این رقم در ایران حدود ۲٫۵ درصد جمعیت کل است که معادل دو میلیون و ۱۰۰ هزار نفر است. از دیگر پیچیدگی‌ها، تولید فرآورده‌های مختلف و طول عمر متفاوت آن‌ها است. به‌طور مثال طول عمر مفید برای پلاکت‌ها حداکثر پنج روز و برای گلبول قرمز ۴۲ روز است. با توجه به اینکه همواره سعی بر آن است خطر ناشی از تزریق خون به حداقل کاهش یابد این مهم با استفاده از فرآورده خونی باکیفیت قابل دست یافتن می‌باشد. همان‌طور که گفته شد پلاکت‌ها، فسادپذیرترین فرآورده خونی، هم با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ از خون کامل حاصل می‌شود و همچنین می‌توان از طریق دستگاه آفرزیس^۲ آن را از یک اهداکننده جمع‌آوری نمود. به‌این‌ترتیب که خون اهداکننده وارد این دستگاه شده و به اجزای تشکیل‌دهنده آن تجزیه می‌شود. سپس پلاکت‌ها جمع‌آوری‌شده و در کیسه خاصی قرار می‌گیرد و بقیه فرآورده‌های خونی به رگ اهداکننده برگشت داده می‌شود. مدت نگهداری هر دو نوع پلاکت، حداکثر پنج روز و در دمای اتاق ۲۰ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد است که در تمام مدت باید در حال تکان خوردن با شیکر انکوباتور باشد تا تبادل گازهای اکسیژن و دی‌اکسید کربن به‌خوبی انجام گیرد و متابولیسم پلاکت‌ها مختل نشود. بنابراین، در زنجیره

^۱ بولتن خبری بین‌المللی سازمان انتقال خون

^۲Apheresis

انتقال خون در استان مازندران ایران با سه هدف کمینه‌سازی هزینه کل، حداکثر سازی پوشش و حداقل کردن کمبود بیمارستان‌ها در شرایط بحران موردبررسی قرار گرفت. ازجمله مقالات دیگری که مسئله طراحی زنجیره تأمین خون در شرایط وقوع بحران را مورد بررسی قرار دادند می‌توان به [۱۳] و [۱۴] اشاره کرد.

تحقیقات اندکی در زمینه زنجیره تأمین محصولات و فرآورده‌های خونی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به مدل پیشنهادی گیلانی و یعقوبی [۱۵] در شبکه زنجیره تأمین پلاکت تحت شرایط عدم قطعیت در تقاضا اشاره کرد که هدف آن افزایش تعداد اهداکنندگان از طریق آگهی‌های اجتماعی و فناوری‌های پیشرفته و مکان‌یابی بهینه و کاهش هزینه‌ها است. نویسندگان از رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته دو هدفه استفاده کردند. در مطالعه دیگری [۱۶] یک مدل بهینه‌سازی امکانی چندهدفه و چند دوره‌ای در شرایط عدم قطعیت در طول حوادث و پس‌از آن در شبکه زنجیره تأمین پایدار برای بانک پلاکت خون ارائه شده است. عناصر در نظر گرفته شده در این مطالعه گروه‌های اهداکننده، تسهیلات جمع‌آوری خون، مراکز توزیع و بیمارستان‌ها به عنوان نقاط تقاضا می‌باشند. مینیمم کردن کل هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی بعلاوه ماکزیمم کردن اثرات اجتماعی به عنوان اهداف افزایش کارایی شبکه در نظر گرفته شده‌اند و مدل با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری حل شده است. یعقوبی و همکاران [۱۷] مدلی استوار برای شبکه زنجیره تأمین پلاکت با اختلال و عدم قطعیت در تقاضا ارائه کردند. هدف مدل ایجاد موازنه میان هزینه‌ها و تازگی پلاکت‌ها در شبکه است. حسینی مطلق و همکاران [۱۸] یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای دوهدفه برای مدیریت گلبول‌های قرمز خون در زنجیره تأمین خون توسعه دادند. مدل مذکور تصمیم‌های مدیریت موجودی و مکان‌یابی-تخصیص را باهدف مینیمم کردن هزینه‌های کل زنجیره بهینه کرده و سطوح جایگزینی را جهت تزریق ایمن‌تر خون مینیمم می‌کند و برای مدیریت عدم قطعیت در زنجیره از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده شده است. در مطالعه دیگری حسینی مطلق و قطره سامانی [۱۹] برای بهبود هماهنگی میان اجزای شبکه زنجیره تأمین خون و تقاضا روشی پیشنهاد کردند و در آن سه مسئله انگیزه اهداکنندگان، مکان‌یابی بهینه و کنترل اعتبار و ثبات شبکه در شرایط ریسک را بررسی نمودند. رشیدیان [۲۰] یک مدل دو هدفه یکپارچه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین خون ارائه نمود که در آن هدف اول حداقل نمودن کل هزینه شبکه و هدف دوم به حداکثر رساندن ضریب کیفیت محصولات خونی است.

مسئله جمع‌آوری خون، مکان‌یابی تسهیلات ثابت و سیار خون‌گیری و تخصیص آن‌ها به اهداکنندگان خون در شرایط عدم

هدف و محدودیت‌ها می‌باشد، شرح داده می‌شود و شرایط عدم قطعیت موجود در مدل ارائه خواهد شد. در فصل چهارم، یک مطالعه موردی واقعی از شبکه خون ارائه می‌گردد و مسائل مطرح شده با داده‌های واقعی حل شده و نتایج ارائه می‌گردد. همچنین، تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترهای حساس شرح داده می‌شود. در نهایت در فصل پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای انجام تحقیقات آتی بیان می‌گردد.

۲- مروری بر ادبیات موضوع

مطالعه درباره زنجیره تأمین کالای فسادپذیر و محصولات خونی برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسط ون ژیل [۲] انجام گرفت. در سال‌های بعد نامیاس (۱۹۸۲) [۳] و پراستاکوس (۱۹۸۴) [۴] تحقیقات در این حوزه را توسعه دادند. بلین و فورس در سال ۲۰۱۲ در مقاله‌ای مروری [۵]، انواع محصولات خونی، سطوح سلسله مراتبی و روش‌های حل مسائل مختلف تصمیم‌گیری در زنجیره تأمین خون را موردبررسی قرار دادند. مقاله مروری دیگری توسط اوسوریو در سال ۲۰۱۵ [۶] ارائه شده است که در آن مدل‌های چند سطحی در زنجیره تأمین خون شامل سطح جمع‌آوری، تولید، نگهداری و توزیع موردبررسی قرار گرفته‌اند. طبق این پژوهش سهم عمده‌ای از مطالعات صورت گرفته در حوزه نگهداری و توزیع می‌باشد که بیشتر پژوهش‌ها مربوط به خون کامل بوده و به تدریج با پیشرفت فناوری تحقیقات به سمت فرآورده‌های مختلف خونی سوق داده شده است. در حوزه مکان‌یابی تسهیلات در زنجیره تأمین خون، اور و پیرسکالا [۷] مدلی ریاضی جهت تعیین مکان بهینه مراکز جمع‌آوری، نگهداری، انتقال خون و تخصیص آن‌ها ارائه کردند. در مقاله دیگری، داسکین و همکاران [۸] مسئله تعیین مکان بهینه مراکز توزیع خون به بیمارستان‌ها و همچنین سطح بهینه موجودی برای فرآورده‌های خونی را به صورت یک مدل برنامه‌ریزی آمیخته فرموله کردند و از الگوریتم آزادسازی لاگرانژ برای حل مدل استفاده کردند. در سال ۲۰۰۷، مسئله طراحی شبکه انتقال خون در کشور ترکیه توسط ساهین و همکاران [۹] مورد مطالعه قرار گرفت. در حوزه تصمیم‌گیری با اهداف چندگانه، ستین و سارول [۱۰] از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی جهت مدل‌سازی و حل مسئله مکان‌یابی مراکز خون استفاده نمودند که در آن علاوه بر کمینه‌سازی هزینه‌ها به کمینه‌سازی مسافت سفر بین مراکز توزیع و نقاط تقاضا توجه شده است. آروان و همکاران [۱۱] یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه جهت تعیین محل بانک‌های خون و مراکز اهدای خون ارائه کردند که کمینه‌سازی کل هزینه‌های شبکه و زمان محصولات باقی‌مانده خون به ترتیب اهداف اول و دوم در نظر گرفته شده بود. در مقاله قاسمی و همکاران [۱۲] مسئله مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات موقت خون‌گیری و مراکز

قطعیست مسئله‌ای حیاتی است که در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است [۲۱]. زنده‌دل و همکاران [۲۲] با در نظرگیری اختلال در محل قرارگیری تسهیلات، مدلی جهت تعیین مکان بهینه تسهیلات سیار خون‌گیری و تخصیص اهداکنندگان به مراکز مذکور ارائه کردند و از الگوریتم ابتکاری شبیه‌سازی تبرید برای حل مدل بهره گرفتند. یک مدل ریاضی استوار برای مکان‌یابی تسهیلات سیار و ثابت جمع‌آوری خون توسط چراغی و همکاران [۲۳] پیشنهاد شده است که در آن روش‌های تولید فراورده‌های خونی مورد مطالعه قرار گرفتند. رمضانیان و بهبودی [۲۴] در پژوهشی مسئله تعیین تعداد و مکان بهینه تسهیلات خون و تخصیص اهداکنندگان را تحت عدم قطعیت در تأمین و تقاضا مورد بررسی قرار داده و تأثیر جنبه‌های اجتماعی بر اهداکنندگان خون را در نظر گرفتند. مسئله به صورت تک هدفه به منظور حداقل کردن هزینه‌های کل شبکه مدل‌سازی و حل شده است. فهیم‌نیا و همکاران [۲۵] مدل طراحی زنجیره تأمین دو هدفه تصادفی را برای کاهش هزینه و زمان سفارش قابل اجرا برای تأمین خون در حوادث گوناگون ارائه دادند. شبکه شامل اهداکنندگان، تسهیلات خون موقت و مراکز خون محلی و نقاط تقاضا است. روش ترکیبی محدودیت E و آزادسازی لاگرانژ برای حل مدل استفاده شده است. حبیبی کوچکسرای و همکاران [۲۶] با مطالعه مسئله شبکه زنجیره تأمین خون دو هدفه چند دوره‌ای در حوادث گوناگون، یک مدل بهینه‌سازی استوار را در یک زنجیره تأمین سه سطحی پیشنهاد کردند. هدف مدل تعیین تعداد و مکان تسهیلات و بهترین استراتژی برای تخصیص در شرایط مختلف با حداقل کردن هزینه‌ها و کمبود خون در زنجیره است. همچنین مدل مکان‌یابی-تخصیص استوار پویا برای زنجیره تأمین خون تحت شرایط ریسک اختلال در تسهیلات و عدم قطعیت در حوادث مختلف در [۲۷] مورد مطالعه قرار گرفته است. از منظر رویکرد حل در مقالات مرتبط با زنجیره تأمین خون از روش‌های حل مختلفی استفاده شده است که روش‌های بهینه‌سازی با ۳۵٪، بیشترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند. پس از آن روش‌های شبیه‌سازی ۳۰٪، روش‌های تحلیلی ۲۱٪، روش‌های آماری ۸٪ و روش زنجیره مارکوف ۶٪ سهم داشته‌اند [۵]. در حوزه زنجیره تأمین پلاکت، خو و اسمرکوفسکی [۲۸] یک مدل برنامه تصادفی چند دوره‌ای را برای یک زنجیره تأمین خون یکپارچه ارائه می‌کند که دو محصول گلبول‌های قرمز و پلاکت را در نظر می‌گیرد و در عین حال تعاملات بین محصولی، عدم قطعیت تقاضا، اطلاعات سن خون، جایگزینی گروه خونی و سه نوع بیمار را مورد مطالعه قرار می‌دهد. هدف به حداقل رساندن کل هزینه‌های متحمل شده در طی مراحل جمع‌آوری، تولید، موجودی و توزیع تحت کنترل متمرکز است. در مقاله دیگری شی و همکاران [۲۹]

یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره برای مدیریت موجودی پلاکت در طول زنجیره تأمین خون فرموله کردند که سه معیار متناقض شامل کل هزینه‌های زنجیره تأمین، قدیمی بودن واحد و کمبود واحد تحت عدم قطعیت تقاضا را به حداقل می‌رساند. سوان و همکاران [۳۰] یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای بررسی فرصت ترکیب پلاکت‌های منجمد در یک زنجیره تأمین پلاکت که در آن پلاکت‌ها فقط به صورت مایع استفاده می‌شوند، پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها عدم قطعیت پارامتر تقاضا را در نظر گرفته و از رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید سناریوها بهره گرفتند. قطره سامانی و حسینی مطلق [۳۱] یک مکانیسم هماهنگی جدید را پیشنهاد می‌کند که در آن اعضای شبکه از طریق انتقال واکنشی بین بانک‌های خون بیمارستانی و بانک خون مرکزی با یکدیگر همکاری می‌کنند و امکان برنامه‌ریزی مجدد سفارشات جمع‌آوری خون را فراهم می‌کند. برای پرداختن به عدم قطعیت تقاضا، از یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی و شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید سناریوها استفاده نمودند. در مقاله دیگری [۳۲] یک مدل شبیه‌سازی جدید توسعه داده شده است که به عنوان یک ابزار پشتیبانی تصمیم برای شناسایی سطوح بهینه موجودی برای تضمین در دسترس بودن انبار و حذف هدررفت در زنجیره تأمین پلاکت عمل می‌کند. در سال ۲۰۲۴، رکابی و همکاران [۳۳] یک مدل غیرخطی اعداد صحیح مختلط چند دوره‌ای و چندهدفه برای شبکه‌های زنجیره تأمین خون سبز با در نظر گرفتن اقدامات تاب‌آوری ارائه کردند. هدف مدل پیشنهادی کاهش قابل توجه قیمت‌ها، زمان انتظار در سیستم، و آسیب‌های زیست‌محیطی است. برای حل مدل پیشنهادی، ابتدا از روش LP-metric برای حل نمونه‌های مسئله با اندازه کوچک و از روش آزادسازی لاگرانژی (LR) در نمونه‌های مسئله با اندازه بزرگ استفاده شده است. انتظاری و همکاران [۳۴] یک مدل دو هدفه را برای به حداقل رساندن هزینه و کمبود خون به طور هم‌زمان پیشنهاد کردند. از ویژگی‌های مهم مدل ارائه شده تقاضای نامشخص و تصمیمات مسیریابی وابسته به زمان است در حالی که عدم قطعیت عرضه و تقاضا به صورت برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مبتنی بر سناریو در شرایط پس از یک فاجعه در نظر گرفته شده است. به منظور جمع‌بندی آنچه در این بخش بیان شد، خلاصه‌ای از مشخصات مقالات مرتبط در ادبیات موضوع با توجه به فاکتورهای مهم شامل نوع محصول، ویژگی‌های مدل و روش حل در جدول ۱ آمده است. شایان‌ذکر است که آخرین سطر جدول مذکور مربوط به این تحقیق است و نوآوری مقاله حاضر را در مقایسه با تحقیقات پیشین مشخص می‌سازد که در ادامه به تشریح بیشتر ویژگی‌های منحصر به فرد مقاله حاضر می‌پردازیم.

جدول (۱): خلاصه بخش مرور ادبیات

مرجع	سال انتشار	نوع محصول	اهداف				ماهیت مدل				تعداد دوره‌ها	رویکرد مدل‌سازی و حل مسئله	
			هزینه	کیفیت	مسافت	زمان	قطعی	غیر قطعی					
								امکانی		احتمالی			
								عرضه	تقاضا	عرضه			تقاضا
اور و همکاران [۷]	۱۹۷۹	خون کامل	*				*					تک دوره‌ای	ابتکاری
داسکین و همکاران [۸]	۲۰۰۲	خون کامل	*				*					تک دوره‌ای	ابتکاری
سahین و همکاران [۹]	۲۰۰۷	خون کامل	*				*					تک دوره‌ای	ابتکاری
ستین و سارول [۱۰]	۲۰۰۹	خون کامل	*		*		*					تک دوره‌ای	آرمانی
چراغی و همکاران [۲۳]	۲۰۱۵	خون کامل	*							*		چند دوره‌ای	امکانی استوار
آروان و توکلی مقدم [۱۱]	۲۰۱۵	خون کامل	*			*	*					چند دوره‌ای	Eمحدودیت
زهیری و همکاران [۲۱]	۲۰۱۷	خون کامل	*	*		*	*					چند دوره‌ای	برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته
رمضانیان و بهبودی [۲۴]	۲۰۱۷	خون کامل	*		*				*			چند دوره‌ای	برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته
فهم نیا و همکاران [۲۵]	۲۰۱۷	خون کامل	*			*	*					تک دوره‌ای	Eمحدودیت لاگرانژ
حبیبی کوچک سراسی و همکاران [۲۶]	۲۰۱۸	خون کامل	*		*		*					چند دوره‌ای	بهینه‌سازی استوار
اسکندری و همکاران [۱۶]	۲۰۱۸	پلاکت	*		*					*		چند دوره‌ای	فرا ابتکاری
نیلوفر گیلانی و همکاران [۱۲]	۲۰۱۹	پلاکت	*			*				*		چند دوره‌ای	برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته
یعقوبی و همکاران [۱۷]	۲۰۲۰	پلاکت	*			*				*		چند دوره‌ای	بهینه‌سازی استوار
نازنین حق جو و همکاران [۲۷]	۲۰۲۰	خون کامل	*					*				چند دوره‌ای	فرا ابتکاری
حسینی مطلق و همکاران [۱۸]	۲۰۲۰	گلبول قرمز	*			*				*		چند دوره‌ای	بهینه‌سازی استوار
حسینی مطلق و همکاران [۱۹]	۲۰۲۰	خون کامل	*		*					*		تک دوره‌ای	برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته
خو و اسمرکوفسکی [۲۸]	۲۰۲۲	گلبول قرمز و پلاکت	*			*		*				چند دوره‌ای	برنامه‌ریزی تصادفی
شی و همکاران [۲۹]	۲۰۲۳	پلاکت	*			*	*					تک دوره‌ای	برنامه‌ریزی آرمانی
سوان و همکاران [۳۰]	۲۰۲۳	پلاکت منجمد	*			*	*					چند دوره‌ای	برنامه‌ریزی آرمانی چندهدفه
رکابی و همکاران [۳۳]	۲۰۲۴	خون کامل	*			*	*					چند دوره‌ای	برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته چندهدفه
انتظاری و همکاران [۳۴]	۲۰۲۴	خون کامل	*			*		*	*			چند دوره‌ای	برنامه‌ریزی تصادفی و Eمحدودیت
پژوهش حاضر		پلاکت	*	*						*	*	چند دوره‌ای	برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته چندهدفه

مراکز موقت دارای امکانات و ظرفیت بالاتری هستند. در خصوص مراکز جمع‌آوری خون باید ذکر نمود که تعداد و مکان مراکز خون‌گیری موقت در ابتدای هر دوره مشخص می‌شود ولی مراکز ثابت فقط در ابتدای دوره اول مکان آن‌ها مشخص می‌شود و در کل افق برنامه‌ریزی مکانشان غیرقابل تغییر می‌باشد. شایان‌ذکر است که در هر دو نوع مراکز ثابت و سیار خون‌گیری اهدای خون به‌صورت خون کامل صورت می‌گیرد. خون کامل اهداشده توسط مراکز موقت و ثابت جمع‌آوری خون به مرکز انتقال خون ارسال می‌شود تا در این مرکز برای اطمینان از سلامت خون‌ها، آزمایش بر روی آن‌ها انجام پذیرد و از خون‌های سالم فرآورده پلاکت تولید شود. همان‌طور که گفته شد، علاوه بر اهداکنندگان خون کامل، دسته دیگری از اهداکنندگان وجود دارند که قادر به اهدای پلاکت به روش آفرزیس می‌باشند، از طرفی چون تنها در مرکز انتقال خون امکان خون‌گیری به این روش میسر می‌باشد، اهداکنندگان پلاکت آفرزیس با مراجعه به مرکز انتقال خون اقدام به اهدای پلاکت می‌نمایند. سپس پلاکت‌های اهدایی بعد از انجام آزمودن‌های لازم در جهت تضمین سلامت آن‌ها، به همراه پلاکت‌های حاصل از خون کامل در مرکز انتقال خون ذخیره می‌گردند.

بیمارستان‌ها به‌عنوان نقاط تقاضا موظف به ارائه خدمات به بیماران می‌باشند، این مراکز با توجه به مقدار نیاز بیماران نیازمند به انتقال خون، میزان تقاضای موردنیاز را از مرکز خون درخواست می‌نمایند.

مقالات پیشین در حوزه زنجیره تأمین پلاکت عمدتاً بر کمینه‌سازی هزینه‌ها تمرکز داشته‌اند، این در حالی است که کیفیت پلاکت یک عامل بسیار مهم در تأمین نیاز بیماران این زنجیره محسوب می‌شود. با توجه به دو روش متفاوت تولید پلاکت شامل روش خون کامل و روش آفرزیس می‌دانیم پلاکت تولیدی از روش آفرزیس دارای کیفیت بسیار بالایی است. اما مسئله اصلی پلاکت آفرزیس هزینه بالا و زمان‌بر بودن روش اهدا می‌باشد. بنابراین اگر هزینه برای تصمیم‌گیرنده مهم بوده ولی کیفیت پلاکت اهمیتی نداشته باشد، پلاکت به روش خون کامل تولید می‌شود. ولی اگر بسته به شرایط بیمار و نوع بیماری، کیفیت اولویت بیشتری داشته باشد روش آفرزیس مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ هرچند که هزینه تجهیزات مورد استفاده در این روش بسیار بالاست. به‌طور مثال بیماران پیوند مغز استخوان یا پیوند عضو نیازمند دریافت پلاکت باکیفیت و جوان می‌باشند که برای تهیه دوز موردنیاز این دسته از بیماران، اهداکنندگان آفرزیس دارای اولویت می‌باشند ولی در جراحی‌های عمومی می‌توان از پلاکت‌های خون کامل نیز استفاده کرد.

با توجه به موارد مطرح‌شده، در این مقاله زنجیره تأمین یکپارچه پلاکت برای حصول اهداف زیر ارائه می‌گردد:

با توجه به جدول (۱)، اگرچه در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در حوزه زنجیره تأمین خون صورت پذیرفته است اما تحقیقات بسیار اندکی به چالش‌های برنامه‌ریزی تولید و موجودی پلاکت به‌عنوان یک فراورده خونی با بالاترین سطح فسادپذیری (عمر ۵ روز) و حساسیت بالا به کیفیت جهت درمان بیماری‌های خاص پرداخته‌اند. علاوه بر این تحقیقات انجام‌شده در حوزه فرآورده پلاکت اگرچه عدم قطعیت‌ها در طرف تقاضا را موردتوجه قرار دادند اما عدم قطعیت‌ها در طرف عرضه مانند غیرقطعی بودن تعداد اهداکنندگان که از جمله چالش‌های مهم در برنامه‌ریزی زنجیره تأمین پلاکت جهت جلوگیری از کمبود این فراورده خونی است، مورد غفلت واقع‌شده است. از آنجایی که خون منبع کمیابی است، در نظرگیری عدم قطعیت‌ها در طرف عرضه و تقاضا، در کاهش سطح کمبود و جلوگیری از هدررفت موجودی بسیار حائز اهمیت است. در این تحقیق برای نخستین بار مسئله طراحی شبکه و برنامه‌ریزی در زنجیره تأمین پلاکت با دو هدف متضاد حداقل سازی هزینه کل و حداکثرسازی کیفیت پلاکت‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. مکان‌یابی مراکز ثابت و سیار جمع‌آوری خون و همچنین برنامه‌ریزی تولید و موجودی پلاکت با در نظرگیری دو روش تولید خون کامل و آفرزیس به صورت یک مدل برنامه‌ریزی امکانی چندهدفه فرموله و حل می‌شود که می‌تواند راهکارهای مطمئن‌تری جهت تأمین پلاکت موردنیاز بیماران ارائه نماید.

۳- تعریف مسئله و مدل‌سازی

فرایند انتقال پلاکت از اهداکننده تا مصرف آن توسط بیماران شامل مراحل زیر است: ابتدا مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری خون صورت می‌گیرد. سپس اهداکنندگان خون کامل به مراکز جمع‌آوری ثابت و موقت و همچنین اهداکنندگان پلاکت آفرزیس به مرکز خون تخصیص داده می‌شوند. در مرحله بعد آزمایش سلامت انجام‌شده و از خون کامل پلاکت تهیه و ذخیره می‌شود. در آخر پلاکت‌های تهیه‌شده از خون کامل و روش آفرزیس به بیمارستان‌ها و مراکز درمانی برای درمان بیماران نیازمند ارسال می‌شود. در حالت کلی زنجیره تأمین پلاکت شامل اهداکنندگان خون کامل، اهداکنندگان پلاکت آفرزیس، مراکز جمع‌آوری موقت و ثابت اهدای خون، مرکز خون و بیمارستان‌ها می‌باشد (شکل ۱).

مراکز جمع‌آوری خون شامل مراکز موقت و ثابت اهدای خون می‌باشند که اهداکنندگان با مراجعه به این مراکز اقدام به اهدای خون می‌نمایند. مراکز موقت جمع‌آوری خون مانند اتوبوس‌های سیار یا چادرهایی هستند که به‌صورت موقت برای اهدای خون تجهیز می‌شوند اما مراکز ثابت مکان‌های دائمی می‌باشند که فرایند خون‌گیری در آن‌ها انجام می‌شود. این مراکز در مقایسه با

۲-۳- مدل ریاضی عدد صحیح چندهدفه برای مسئله مکان‌یابی و تخصیص فرآورده خونی پلاکت با در نظر گرفتن عدم قطعیت در اهداکنندگان و تقاضا

در این بخش با توجه به مفروضات مذکور، به تشریح مدل ریاضی می‌پردازیم. علائم ریاضی مورد استفاده جهت فرموله کردن مدل در جدول (۲) لیست شده است.

جدول (۲): علائم ریاضی

اندیس‌ها و مجموعه‌ها	
$m \in M$	اندیس گروه‌های اهداکننده
n	اندیس مکان کاندید برای تأسیس مرکز موقت جمع‌آوری خون $n, n', n1 \in N$
$o \in O$	اندیس مرکز ثابت جمع‌آوری خون
t	اندیس دوره‌های زمانی $t \in T$ (هر دوره یک روز در نظر گرفته شده است)
پارامترهای مدل	
l_a	ماکزیم شعاع پوشش دهی مرکز جمع‌آوری خون a ($a \in N \cup O$)
l'_{ab}	مسافت بین a و b (به‌طوری‌که $a, b \in N \cup O$) نشان‌دهنده مکان مرکز انتقال خون است)
$\tilde{b}$	تقاضای مرکز انتقال خون برای پلاکت
δ	درصد پلاکت تولیدشده از خون کامل
c	ظرفیت نگهداری پلاکت در مرکز انتقال خون
c'	ظرفیت جمع‌آوری پلاکت در مرکز انتقال خون
c''_a	ظرفیت مرکز جمع‌آوری خون a
γ	نسبت خون کامل قابل استفاده
γ'	نسبت پلاکت آفرزیش قابل استفاده
$\tilde{d}_m$	ماکزیم مقدار اهدای خون کامل توسط گروه اهداکننده m
$\tilde{d}'_m$	ماکزیم مقدار اهدای پلاکت آفرزیش توسط گروه اهداکننده m
w	وزن پلاکت تولیدشده از خون کامل
w'	وزن پلاکت تولیدشده از روش آفرزیش
θ	هزینه نگهداری یک واحد پلاکت در مرکز انتقال خون

۱- به حداقل رساندن هزینه‌های شبکه که متشکل از هزینه استقرار تسهیلات ثابت خون‌گیری، هزینه جابجایی تسهیلات سیار در دوره‌های متوالی، هزینه‌های انتقال خون مابین تسهیلات مختلف، هزینه‌های تولید پلاکت، هزینه نگهداری موجودی و هزینه کمبود پلاکت می‌باشد.

۲- حداکثر کردن کیفیت پلاکت تولیدشده

همچنین برای اینکه این مقاله به واقعیت نزدیک‌تر شود و با توجه به اینکه در دنیای واقعی عرضه خون از سوی اهداکنندگان دارای حالت منظم و مستمر نیست و همچنین تقاضا برای فرآورده‌های خونی حالت قطعی ندارد، در مدل ارائه شده عدم قطعیت در پارامترهای عرضه و تقاضا در نظر گرفته شده است. بنابراین، یک مدل دوهدفه چنددوره‌ای و غیرقطعی ارائه می‌شود که در آن به دنبال آنالیز دادوستد بین دو هدف متضاد فوق هستیم. مدلی که ارائه می‌شود ویژگی‌های خاص فرآورده خونی پلاکت همچون انواع اهداکنندگان و روش‌های متفاوت تولید را در نظر می‌گیرد.

۳-۱- مفروضات مسئله

مفروضات استفاده شده در مدل‌سازی مسئله به شرح زیر است:

- مراکز ثابت جمع‌آوری خون در ابتدای افق برنامه‌ریزی تأسیس می‌شوند و در طول افق زمانی نمی‌توانند تغییر مکان دهند.
- مراکز موقت جمع‌آوری خون مکان‌های سیاری هستند که در صورت نیاز به‌صورت موقت برای جمع‌آوری خون تجهیز می‌شوند. تعداد و مکان مراکز خون‌گیری موقت در ابتدای هر دوره مشخص می‌شود. مراکز جمع‌آوری خون دارای ظرفیت مشخص و محدودی هستند و همچنین ظرفیت مراکز ثابت جمع‌آوری در مقایسه با مراکز موقت جمع‌آوری خون بیشتر می‌باشد.
- برای جلوگیری از فاسدشدن خون‌های اهدایی از سوی اهداکنندگان در مراکز جمع‌آوری خون، باید سریعاً خون‌ها به مرکز انتقال خون ارسال گردند، لذا نگهداری موجودی در مراکز موقت و ثابت جمع‌آوری خون در نظر گرفته نشده است.
- اهداکنندگان خون برای اهدای خون کامل می‌توانند با مراجعه به هر یک از مراکز سیار یا ثابت، اقدام به اهدای خون کنند و اهداکنندگان پلاکت آفرزیش باید برای اهدا به مرکز انتقال خون بروند.
- بسته‌های خونی که در مراکز موقت و ثابت جمع‌آوری خون دریافت می‌شود به‌صورت خون کامل از اهداکنندگان گرفته شده و در مرکز انتقال خون، پس از انجام آزمایش‌های مختلف به پلاکت تبدیل می‌شود.
- برای کاربردی بودن مدل ارائه شده در این پژوهش و نزدیک شدن آن به واقعیت، بعضی از پارامترهای مدل به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند.

نگهداری پلاکت‌ها در مرکز انتقال خون و هزینه کمبود پلاکت است.

در تابع هدف دوم کیفیت پلاکت‌ها ماکزیمم می‌گردد. در بخش‌های گذشته به این موضوع اشاره شد که پلاکت تولیدی از روش آفریزس دارای کیفیت بسیار بالایی است. اما مسئله اصلی پلاکت آفریزس هزینه بالا و زمان بر بودن روش اهدا می‌باشد. بنابراین اگر هزینه برای تصمیم‌گیرنده مهم بوده ولی روش تولید اهمیتی نداشته باشد، پلاکت به روش خون کامل تولید می‌شود ولی اگر بسته به شرایط بیمار و نوع بیماری، کیفیت اولویت بیشتری داشته باشد روش آفریزس مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ هرچند که هزینه تجهیزات مورد استفاده در این روش بسیار بالاست. به طور مثال بیماران پیوند مغز استخوان یا پیوند عضو نیازمند دریافت پلاکت باکیفیت و جوان می‌باشند که برای تهیه دوز مورد نیاز این دسته از بیماران، اهداکنندگان آفریزس دارای اولویت می‌باشند ولی در جراحی‌های عمومی می‌توان از پلاکت‌های خون کامل نیز استفاده کرد. در این پژوهش هدف این است که بیماران با کمترین ریسک ناشی از تزریق خون مواجه شوند و این مهم با استفاده از فرآورده خونی باکیفیت قابل دست یافتن می‌باشد.

$$\begin{aligned} \text{Min} Z_1 = & \sum_t \tau \times q_t + \sum_t \tau' \times q'_t + \\ & \sum_o \beta''_o \times Y'_o + \sum_n \sum_{n'} \sum_t \beta'_{nn'} \times Y_{n,n',t} + \\ & \sum_m \sum_{a \in NUO} \sum_t \beta_a \times v_{a,m,t} + \sum_t \theta \times (I_t + \\ & I'_t) + \sum_t \theta' \times \alpha_t \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Max} Z_2 = & \gamma \times \delta \times \sum_m \sum_{a \in NUO} \sum_t v_{a,m,t} \times w + \\ & \gamma' \times \sum_m \sum_t v'_{m,t} \times w' \end{aligned} \quad (2)$$

و در ادامه به مدل‌سازی محدودیت‌های مسئله می‌پردازیم:

$$\sum_{a \in NUO} \sum_t v_{a,m,t} \leq \tilde{d}_m \quad \forall m \quad (3)$$

$$\sum_t v'_{m,t} \leq \tilde{d}'_m \quad \forall m \quad (4)$$

$$\sum_m v_{a,m,t} \leq c''_a \quad \forall a \in N \cup O, t \quad (5)$$

$$\sum_m v'_{m,t} \leq c' \quad \forall t \quad (6)$$

$$l'_{mo} \times X_{o,m,t} \leq l_o \times Y'_o \quad \forall m, o, t \quad (7)$$

$$l'_{mn} \times X_{n,m,t} \leq l_n \times \sum_{n_1} Y_{n_1,n,t} \quad \forall m, n, t \quad (8)$$

$$\sum_n Y_{n,n',t} \leq 1 \quad \forall n', t \quad (9)$$

$$\sum_{n_1} Y_{n_1,n,t} \leq \sum_n Y_{n,n',t-1} \quad \forall n', t \geq 2 \quad (10)$$

$$v_{a,m,t} \leq M \times X_{a,m,t} \quad \forall m, a \in N \cup O, t \quad (11)$$

$$q_t = \gamma \times \delta \times \sum_m \sum_{a \in NUO} v_{a,m,t} \quad \forall t \quad (12)$$

$$q'_t = \gamma' \times \sum_m v'_{m,t} \quad \forall t \quad (13)$$

$$I_t + I'_t \leq c \quad \forall t \quad (14)$$

$$I_{t-1} + q_t - I_t + I'_{t-1} + q'_t - \quad \forall t \quad (15)$$

θ' :	هزینه هر واحد کمبود پلاکت
β_a :	هزینه ارسال هر واحد خون کامل از a به مرکز انتقال خون
τ :	هزینه تولید یک واحد پلاکت از خون کامل
τ' :	هزینه تولید یک واحد پلاکت با روش آفریزس
β''_o :	هزینه ثابت تأسیس مرکز ثابت جمع‌آوری خون o
$\beta'_{nn'}$:	هزینه جابجایی هر مرکز موقت جمع‌آوری خون از مکان n به مکان n'
M:	یک عدد مثبت بسیار بزرگ
متغیرهای تصمیم	
$X_{a,m,t}$:	مقدار ۱ می‌گیرد اگر مرکز جمع‌آوری خون a به گروه اهداکننده خون کامل m در دوره t تخصیص یابد، در غیر این صورت ۰
Y'_o :	مقدار ۱ می‌گیرد اگر مرکز ثابت جمع‌آوری خون o در ابتدای افق زمانی تأسیس شود، در غیر این صورت ۰
$Y_{n,n',t}$:	مقدار ۱ می‌گیرد اگر مرکز موقت جمع‌آوری خون که در دوره t-1 در مکان n بوده، در دوره t به مکان n' انتقال یابد، در غیر این صورت ۰
q_t :	مقدار تولید پلاکت از خون کامل در مرکز انتقال خون در دوره t
q'_t :	مقدار تولید پلاکت از روش آفریزس در مرکز انتقال خون در دوره t
I_t :	مقدار موجودی پلاکت تولیدشده از خون کامل در دوره t
I'_t :	مقدار موجودی پلاکت تولیدشده از روش آفریزس در دوره t
α_t :	مقدار کمبود مرکز انتقال خون از پلاکت در دوره t

* پارامترهایی که علامت ~ بالای آن‌ها است غیرقطعی هستند.

تابع هدف اول هزینه‌های کل شبکه را مینیمم می‌کند که به ترتیب شامل هزینه تولید پلاکت از خون کامل و همچنین روش آفریزس در مرکز انتقال خون، هزینه ثابت تأسیس مراکز ثابت جمع‌آوری خون، هزینه جابجایی مراکز موقت جمع‌آوری خون، هزینه ارسال واحدهای خون کامل به مرکز انتقال خون، هزینه

موجودی این مرکز از هر دودسته پلاکت در هر دوره بعلاوه مقدار کمبود این فرآورده می‌باشد. محدودیت (۱۶) از تولید پلاکت اضافی و در نتیجه فساد جلوگیری می‌کند. محدودیت (۱۷) تضمین می‌کند همه اهداکنندگان خون کامل به یکی از مراکز جمع‌آوری ثابت یا سیار تخصیص می‌یابند. محدودیت (۱۸) متغیرهای تصمیم باینری را نشان می‌دهد و محدودیت (۱۹) نشان‌دهنده متغیرهای تصمیم پیوسته می‌باشد.

۳-۳- رویکرد برنامه‌ریزی امکانی

به‌طور کلی عدم قطعیت در داده‌ها به دودسته تقسیم می‌شود: دسته اول تصادفی بودن پارامترهای مدل می‌باشد که از ماهیت تصادفی رخدادها ناشی می‌شود و با عدم قطعیت مرتبط با عضویت یا عدم عضویت عناصر در یک مجموعه مقابله می‌کند و دسته دوم عدم قطعیت شناختی است که به کمبود دانش در ارتباط با پارامترهای مدل می‌پردازد. برای مقابله با این نوع عدم قطعیت از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استفاده می‌شود.

در کاربردهای مهندسی، تجزیه و تحلیل و ارزیابی‌های آماری و احتمالاتی نیاز به حداقل تعداد اطلاعات دارد که در بیشتر موارد در دسترس نمی‌باشند. در چنین شرایطی می‌توان از تئوری مجموعه‌های فازی استفاده نمود. مجموعه‌های فازی در مدل کردن ابهامات و آنچه به‌وضوح قابل تعریف نیست، مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای شرح و تفسیر ابهامات در یک مجموعه فازی از برنامه‌ریزی امکانی استفاده می‌شود. به‌طور کلی فرض بر این است که یک مجموعه فازی، عدم قطعیت و عدم دقت یک پارامتر حقیقی ارزیابی شده را توصیف می‌کند. در مسئله مورد بررسی در این پژوهش نیز به دلیل کامل نبودن و در دسترس نبودن اطلاعات کافی با عدم قطعیت در داده‌ها که از نوع عدم قطعیت شناختی می‌باشند مواجه هستیم لذا برای مدل‌سازی مسئله از برنامه‌ریزی امکانی روشی که توسط پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲) [۱] ارائه شده استفاده می‌کنیم.

ابتدا به‌منظور سهولت در تفهیم، مدل اولیه برنامه‌ریزی امکانی را در فرم ساده‌شده مدل اصلی به‌صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 &= \bar{A}y + \bar{B}x \\ \text{Max } Z_2 &= x \\ \text{s.t.} \\ Cx &= 0, \\ Dx &= \bar{H}, \\ Ex &\leq \bar{I}, \\ Fx &\geq \bar{J}, \\ Gy &\leq 1, \\ y &\in \{0,1\}, x \geq 0. \end{aligned} \quad (20)$$

به‌طوری‌که بردارهای x و y به ترتیب متغیرهای پیوسته و باینری، $\bar{A}$ ، $\bar{B}$ ، $\bar{H}$ ، $\bar{I}$ و $\bar{J}$ پارامترهای غیرقطعی، C ، D ، E ، F و G ماتریس‌های ضرایب برای مدل پیشنهادی هستند. با توجه به

$$I'_t + \alpha_t = \bar{b}_t \quad \forall t \quad (16)$$

$$\sum_{t=t+5}^{t+5} \bar{b}_t \geq I_t \quad \forall t \quad (17)$$

$$\sum_{a \in N_{UO}} X_{a,m,t} \geq 1 \quad \forall m, t \quad (18)$$

$$X_{a,m,t}, Y'_{o'}, Y_{n,n',t} \in \{0,1\} \quad \forall m, n, o, t \quad (19)$$

$$v_{a,m,t}, v_{m,t}, q_t, q'_t, I_t, I'_t, \alpha_t \geq 0 \quad \forall m, t$$

محدودیت اهداکنندگان برای اهدای خون کامل و آفرزین به ترتیب در محدودیت (۳) و (۴) نمایش داده شده که برابر آن تضمین می‌شود که مقدار خون اهداشده به مراکز موقت و ثابت جمع‌آوری خون و همچنین مرکز انتقال خون هیچ‌وقت از ظرفیت اهدای افراد اهداکننده تجاوز نخواهد کرد. در محدودیت (۵) ظرفیت مراکز جمع‌آوری خون نشان داده شده که بر طبق آن تضمین می‌شود که مقدار خون‌های اهداشده به مراکز موقت و ثابت جمع‌آوری خون از ظرفیت آن مراکز بیشتر نخواهد شد. در محدودیت (۶) ظرفیت جمع‌آوری پلاکت در مرکز انتقال خون بیان شده است و برابر آن تضمین می‌شود که مقدار پلاکت آفرزین اهدایی به این مرکز از ظرفیتش تجاوز نمی‌کند.

محدودیت (۷) شعاع پوشش دهی مرکز جمع‌آوری خون ثابت را نشان می‌دهد و در صورتی اهداکنندگان می‌توانند به آن تخصیص پیدا کنند که در شعاع پوششی مرکز ثابت قرار گیرند. در محدودیت (۸) شعاع پوششی مرکز موقت جمع‌آوری خون بیان شده که طبق آن، در صورتی گروه اهداکننده‌ای می‌تواند به آن مرکز تخصیص پیدا کند که در شعاع پوششی آن باشد. در محدودیت (۹) تضمین می‌شود که در هر دوره بیش از یک مرکز موقت جمع‌آوری خون که در دوره قبلی بوده، نمی‌تواند به مکان دیگری انتقال یابد. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که یک مرکز موقت جمع‌آوری خون تنها اگر در دوره فعلی باز باشد، می‌تواند به دوره بعدی منتقل شود. در محدودیت (۱۱) تضمین می‌شود که در صورتی خون‌های اهدایی از اهداکنندگان به مراکز موقت و ثابت جمع‌آوری خون ارسال می‌شود که تخصیص اهداکنندگان به مراکز مذکور از قبل انجام شده باشد. محدودیت (۱۲) مقدار تولید پلاکت از خون کامل را در هر دوره در مرکز انتقال خون نشان می‌دهد. باید توجه نمود که از خون کامل اهدایی مقدار γ قابل استفاده است که فرآورده پلاکت به میزان δ آن تولید می‌شود. در محدودیت (۱۳) مقدار تولید پلاکت آفرزین در مرکز انتقال خون و در هر دوره بیان شده است که از کل پلاکت‌های اهدایی به این روش، مقدار γ' مقدار آن قابل استفاده می‌باشد. ظرفیت نگهداری پلاکت در مرکز انتقال خون در محدودیت (۱۴) نشان داده شده است. تقاضای مرکز انتقال خون برای پلاکت در هر دوره در محدودیت (۱۵) نمایش داده شده که بر طبق آن میزان تقاضا برابر است با میزان موجودی پلاکت تولیدشده از خون کامل و همچنین از روش آفرزین در دوره قبلی بعلاوه مقدار تولید هر دو نوع پلاکت در همین دوره منهای

$$\begin{aligned} Dx &\leq \left(\frac{\lambda}{2}\right) H_{(3)} + \left(1 - \frac{\lambda}{2}\right) H_{(4)}, \\ Dx &\geq \left(\frac{\lambda}{2}\right) H_{(2)} + \left(1 - \frac{\lambda}{2}\right) H_{(1)}, \\ Ex &\leq (1 - \phi) I_{(2)} + \phi I_{(1)}, \\ Fx &\geq (1 - \rho) J_{(3)} + \rho J_{(4)}, \\ Gy &\leq 1, \\ y &\in \{0,1\}, x \geq 0. \end{aligned}$$

همان‌طور که ذکر شد در رویکرد برنامه‌ریزی امکانی برای کنترل سطح اعتماد برای برآورده شدن محدودیت‌های شانس‌ی تصمیم‌گیر، باید حداقل سطح رضایتمندی را برای این نوع محدودیت‌ها به‌عنوان یک حاشیه امنیتی مناسب تعیین کرد. بنابراین λ و ϕ حداقل سطح رضایتمندی ارضای محدودیت‌های شانس‌ی می‌باشند که تصمیم‌گیر آن‌ها را تعیین می‌کند و فرض بر این است که مقداری بیش از 0.5 دارند (یعنی $\lambda, \phi, \rho > 0.5$). بنابراین، در این روش چند مقدار برای λ ، ϕ و ρ تعیین‌شده و در یک رویکرد تعاملی، مقداری که بیشترین نظر تصمیم‌گیر را تأمین کند به‌عنوان مقدار نهایی انتخاب می‌شود.

با توجه به توضیحات فوق، مدل برنامه‌ریزی امکانی به مدل قطعی تبدیل می‌شود و در آن پارامترهای غیرقطعی عرضه و تقاضا قطعی می‌شوند. به دلیل اینکه توابع هدف فاقد پارامتر غیرقطعی می‌باشند بدون تغییر باقی‌مانده و محدودیت‌های (۳) و (۴) که بیانگر عدم قطعیت در عرضه می‌باشند به محدودیت‌های زیر

تبدیل می‌شوند:

$$\sum_{a \in NUO} \sum_t v_{a,m,t} \leq (1 - \phi_1) \times I_{(2)} + \phi_1 \times I_{(1)} \quad \forall m \quad (23)$$

$$\sum_t v'_{m,t} \leq (1 - \phi_2) \times I'_{(2)} + \phi_2 \times I'_{(1)} \quad \forall m \quad (24)$$

درنهایت، محدودیت (۱۵) که عدم قطعیت در تقاضا را نشان می‌دهد به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$I_{t-1} + q_t - I_t + I'_{t-1} + q'_t - I'_t + \alpha_t \geq \left(\frac{\lambda}{2}\right) \times H_{(2)} + \left(1 - \frac{\lambda}{2}\right) \times H_{(1)} \quad \forall t \quad (25)$$

$$I_{t-1} + q_t - I_t + I'_{t-1} + q'_t - I'_t + \alpha_t \leq \left(\frac{\lambda}{2}\right) \times H_{(3)} + \left(1 - \frac{\lambda}{2}\right) \times H_{(4)} \quad \forall t \quad (26)$$

باقی محدودیت‌ها به همان شکل اولیه در این مدل نیز ارائه می‌شوند.

۳-۴- رویکرد حل چندهدفه فازی

روش‌های متنوعی در مبانی نظری موضوع برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه (MOLP) ارائه‌شده است. از میان این روش‌ها، امروزه روش‌های برنامه‌ریزی فازی به دلیل قابلیت محاسبه درجه ارضای هر یک از توابع هدف و انعطاف‌پذیری بالا به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. ترابی و

نگاه ریسک‌گریز و محافظه‌کارانه این رویکرد و به‌منظور ایجاد مدل مذکور، ابتدا مدل فوق با استفاده از عملگر ارزش انتظاری یا امید ریاضی که مقدار مورد انتظار را محاسبه می‌کند و اندازه لزوم که لزوم رخداد یک پیامد را نشان می‌دهد (برای مطالعه بیشتر اندازه لزوم (Nec) به پژوهش [۱] مراجعه شود)، به یک مدل برنامه‌ریزی امکانی با محدودیت‌های شانس‌ی (محدودیت دارای پارامتر امکانی) به‌صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 &= E[\tilde{A}]y + E[\tilde{B}]x \\ \text{Max } Z_2 &= x \\ \text{s. t.} \\ Cx &= 0, \\ \text{Nec}\{Dx = \tilde{H}\} &\geq \lambda, \\ \text{Nec}\{Ex \leq \tilde{I}\} &\geq \phi, \\ \text{Nec}\{Fx \geq \tilde{J}\} &\geq \rho, \\ Gy &\leq 1, \\ y &\in \{0,1\}, x \geq 0. \end{aligned} \quad (21)$$

در مدل برنامه‌ریزی امکانی با محدودیت‌های شانس‌ی به دلیل وجود محدودیت‌هایی که دارای پارامترهای غیرقطعی هستند عدم قطعیت وارد سیستم شده و بنابراین محدودیت‌ها نمی‌توانند صد درصد برقرار می‌باشند. به همین دلیل در این رویکرد تلاش می‌شود تا سطح اطمینان معینی از برآورده شدن محدودیت‌ها تضمین گردد.

محدودیت‌های دوم تا چهارم در رابطه (۲۱) محدودیت‌های شانس‌ی نامیده می‌شوند که مقادیر λ ، ϕ و ρ حداقل سطح رضایتمندی ارضای این محدودیت‌ها می‌باشند. از نظر پیشوایی و همکاران [۱] در این مدل محدودیت‌های شانس‌ی باید برای سطوح اطمینان بزرگ‌تر از 0.5 ، برقرار باشند. تابع هدف دوم به دلیل نداشتن پارامتر غیرقطعی، در تمامی روش‌های قطعی‌سازی حالت کلی خود را اخذ می‌نماید و تغییری نمی‌کند.

در این مقاله، برای پارامترهای غیرقطعی توزیع امکانی دوزنقه‌ای در نظر گرفته شده است، به‌عنوان مثال داده غیرقطعی $\tilde{A}$ به‌صورت $\tilde{A} = (A_{(1)}, A_{(2)}, A_{(3)}, A_{(4)})$ نشان داده می‌شود. شایان ذکر است که انتخاب این نوع توزیع امکانی نسبت به توزیع مثلثی به این دلیل است که توزیع مثلثی با در نظر گرفتن $A_{(2)} = A_{(3)}$ حالت خاصی از این توزیع می‌شود، درنتیجه توزیع دوزنقه‌ای جامع‌تر است. بنابراین فرض، مدل امکانی پیشنهادی این مقاله به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 &= \left(\frac{A_{(1)} + A_{(2)} + A_{(3)} + A_{(4)}}{4} \right) y + \left(\frac{B_{(1)} + B_{(2)} + B_{(3)} + B_{(4)}}{4} \right) x \\ \text{Max } Z_2 &= x \\ \text{s. t.} \\ Cx &= 0, \end{aligned} \quad (22)$$

اولویت بالاتری داشته باشند. در نتیجه تابعی که وزن بیشتری دارد درجه عضویت بهتری هم خواهد داشت.

اگر توابع هدف اول و دوم ما به ترتیب با Z_1 و Z_2 نشان داده شوند، گام‌های استفاده از این روش به صورت زیر خواهد بود:

۱- حل ایده‌آل مثبت یا بهترین حالت ممکن (PIS) و حل ایده‌آل منفی یا بدترین حالت ممکن (NIS) را برای هر یک از توابع هدف با حل مسئله فازی تبدیل شده به حالت قطعی به صورت زیر به دست می‌آوریم:

$$\begin{aligned} Z_1^{PIS} &= \min Z_1, \quad Z_1^{NIS} = \max Z_1 \\ Z_2^{PIS} &= \max Z_2, \quad Z_2^{NIS} = \min Z_2 \end{aligned} \quad (28)$$

۲- برای هر تابع هدف یک تابع عضویت خطی به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\mu_1(v) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_1 < Z_1^{PIS} \\ \frac{Z_1^{NIS} - Z_1}{Z_1^{NIS} - Z_1^{PIS}} & \text{if } Z_1^{PIS} \leq Z_1 \leq Z_1^{NIS} \\ 0 & \text{if } Z_1 > Z_1^{NIS} \end{cases} \quad (29)$$

و به همین صورت

$$\mu_2(v) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_2 > Z_2^{PIS} \\ \frac{Z_2 - Z_2^{NIS}}{Z_2^{PIS} - Z_2^{NIS}} & \text{if } Z_2^{NIS} \leq Z_2 \leq Z_2^{PIS} \\ 0 & \text{if } Z_2 < Z_2^{NIS} \end{cases} \quad (30)$$

۳- مسئله چندهدفه قطعی خطی را با استفاده از رابطه (۲۷) به یک مسئله تک هدفه قطعی تبدیل می‌کنیم.

۴- با در نظر گرفتن پارامتر ϕ و اهمیت نسبی اهداف فازی (Δ_j) ، مدل ارائه شده قطعی تک هدفه را با همان محدودیت‌ها حل می‌نماییم.

۴- مطالعه موردی

در این بخش به منظور بررسی کارایی مدل پیشنهادی مطالعه موردی جمع‌آوری و تولید پلاکت در شهر تهران ارائه شده است. شهر تهران به عنوان پرجمعیت‌ترین شهر ایران می‌باشد که به ۲۲ منطقه مجزا تقسیم شده است. هر منطقه از مناطق ۲۲ گانه به عنوان یک گروه اهداکننده خون کامل در نظر گرفته شده است همچنین مکان بالقوه قرارگیری مراکز ثابت و موقت جمع‌آوری خون نیز در هر یک از این مناطق ۲۲ گانه میسر می‌باشد، بنابراین هر یک از این مناطق به عنوان مکان کاندید برای قرارگیری این مراکز می‌باشند. مرکز خون وصال در شهر تهران مجهز به آزمایشگاه‌هایی می‌باشد که در آن بعد از تست اولیه خون‌های دریافتی، فرآورده‌هایی همچون پلاکت تولید می‌شود. همچنین در

هسینی [۳۵] یک رویکرد تک فازی جدید برای حل مسائل MOLP ارائه کرده‌اند که رویکرد TH نامیده می‌شود. آن‌ها به صورت تحلیلی اثبات کردند روشی که ارائه کرده‌اند راه حل‌های کارآمد به دست می‌آورد. این رویکرد تصمیم‌گیرنده را قادر می‌سازد با انتخاب راه حل مناسب بر اساس درجه ارضاء و اولویت هر تابع هدف تصمیم نهایی را اتخاذ کند.

با توجه به ماهیت این پژوهش که عدم قطعیت مرتبط با نبود داده یا دانش در مورد مقدار دقیق پارامترهای ورودی مسئله است، استفاده از رویکرد فازی چندهدفه ترایی- هسینی مناسب می‌باشد. روش مذکور نواقص موجود در روش‌های دیگر را تا حد زیادی برطرف نموده است و در واقع تلفیق موفقی از آن‌ها می‌باشد. تابع یکپارچه‌سازی TH به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \text{Max } \lambda(x) &= \phi \lambda_0 + (1 - \phi) \sum_j \Delta_j \mu_j(x) \\ \text{s.t.} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\lambda_0 \leq \mu_j(x)$$

$$x \in F(x); \lambda_0, \phi \in [0, 1]$$

Δ_j بیانگر اهمیت نسبی تابع هدف j می‌باشد که مقدار این وزن بر اساس اهمیتی است که تصمیم‌گیرنده برای اهداف قائل می‌باشد. $\mu_j(x)$ و $\lambda_0 = \min\{\mu_j(x)\}$ به ترتیب نشان‌دهنده درجه تأمین تابع هدف j و حداقل درجه تأمین توابع هدف می‌باشند و بر اساس ترجیحات تصمیم‌گیرنده به نحوی تعیین می‌شوند که $\sum_j \Delta_j = 1$ و $\Delta_j > 0$ باشند و $F(x)$ نشان‌دهنده فضای جواب مسئله است. پارامتر ϕ اصطلاحاً "ضریب سازش" نامیده می‌شود که مینیمم درجه تأمین تابع هدف را کنترل می‌کند. هرچقدر ϕ بیشتر باشد نشان‌دهنده توجه به ایجاد یک حل ترکیبی است که در آن تعادل بیشتری بین جواب‌های توابع هدف فازی وجود دارد. مقادیر کمتر ϕ بیانگر توجه بیشتر برای به دست آوردن راه‌حلی با درجه رضایت بالا برای برخی اهداف با اهمیت نسبی بالاتر بدون در نظر گرفتن درجه رضایت اهداف دیگر است. به عبارت دیگر این پارامتر ضریبی را برای هر بخش تابع TH در نظر می‌گیرد که در آن بخش اول تابع به دنبال متوازن کردن درجه عضویت توابع هدف می‌باشد یعنی به نوعی تمایل دارد درجه عضویت‌ها در حل چندهدفه به هم نزدیک باشند و همگی تا سطح رضایت بخشی به میزان ایده‌آل خود نزدیک شوند. از طرفی بخش دوم تابع هدف به دنبال ارزش‌گذاری روی ضرایب اهمیت هر هدف می‌باشد به این معنی که وزن هر تابع هدف بیشتر باشد، آن تابع درجه عضویت و نزدیک شدن به میزان ایده‌آلش برای تصمیم‌گیرنده در اولویت است. حال بر اساس نظر تصمیم‌گیرنده، ضریب ϕ درجه اهمیتی به بخش‌های اول و دوم می‌دهد. هرچقدر ضریب بخش اول بیشتر باشد، برای تصمیم‌گیرنده موازنه و نزدیک کردن درجه عضویت‌ها اولویت بالاتری پیدا می‌کند و هرچه ضریب بخش دوم بیشتر باشد، نظر تصمیم‌گیرنده بر این است که اهمیت وزن‌های هر تابع

در آن یک دوره کامل است. جدول (۲) متوسط تقاضای پلاکت در هر دوره زمانی را نشان می‌دهد (اطلاعات در دوره‌های فرد گزارش شده است).

این مرکز اهدای پلاکت به روش آفرزیس نیز انجام می‌گیرد. در تحقیق حاضر میزان اهدای خون کامل و پلاکت آفرزیس و تقاضای آن‌ها در ۵۰ روز متوالی از سال، از اوایل ماه شهریور تا اواخر ماه مهر سال ۱۳۹۷ نظر گرفته شده است به‌طوری‌که هرروز

جدول (۲): متوسط تقاضای پلاکت در هر دوره زمانی

دوره زمانی	دوره ۱	دوره ۳	دوره ۵	دوره ۷	دوره ۹	دوره ۱۱	دوره ۱۳	دوره ۱۵	دوره ۱۷	دوره ۱۹	دوره ۲۱	دوره ۲۳	دوره ۲۵
متوسط تقاضا	۵۶/۶	۶۶/۱	۷۰	۶۵/۷	۶۲/۳	۶۶/۷	۶۷/۶	۷۲/۳	۶۵/۹	۶۸/۴	۶۱/۷	۵۸/۱	۶۴/۴

ادامه جدول (۲): متوسط تقاضای پلاکت در هر دوره زمانی

دوره زمانی	دوره ۲۷	دوره ۲۹	دوره ۳۱	دوره ۳۳	دوره ۳۵	دوره ۳۷	دوره ۳۹	دوره ۴۱	دوره ۴۳	دوره ۴۵	دوره ۴۷	دوره ۴۹
متوسط تقاضا	۶۹	۶۵/۷	۷۱/۱	۵۹/۳	۵۳/۶	۵۸	۵۷	۵۸/۹	۵۸/۳	۵۴/۴	۵۴/۱	۵۰/۶

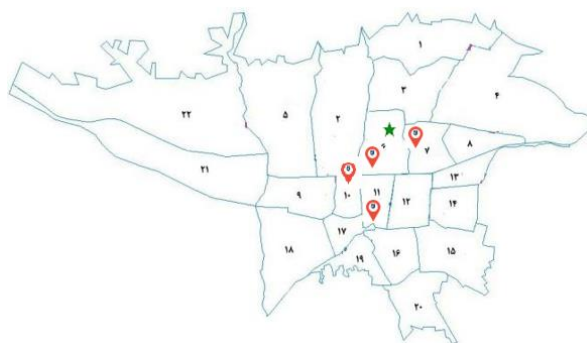
در شکل (۳) مکان احداث مراکز موقت جمع‌آوری خون شامل اتوبوس‌های سیار یا چادرها و کانکس‌های موقت نشان داده شده است.



شکل (۳): مکان احداث مراکز موقت جمع‌آوری خون

همان‌طور که در شکل (۳) قابل‌مشاهده است، با توجه به مکان مراکز ثابت جمع‌آوری خون و شعاع پوشش آن‌ها، نیاز به راه‌اندازی مراکز موقت در مناطق ۲، ۴، ۵، ۶، ۷، ۱۱، ۱۴ و ۱۵ وجود دارد. جدول (۳) و جدول (۴) به ترتیب تخصیص مراکز موقت و ثابت جمع‌آوری خون به اهداکنندگان خون کامل در هر دوره را مشخص می‌کنند. همان‌طور که در جدول (۳) قابل‌مشاهده است، با توجه به میزان تقاضا، تعداد اهداکنندگان و محدودیت ظرفیت مراکز ثابت، مراکز موقت مناطق ۲، ۴، ۵، ۶، ۷، ۱۱، ۱۴ و ۱۵ در همه دوره‌ها برپا هستند و برای سرویس‌دهی در این مناطق مورد استفاده قرار می‌گیرند. همان‌طور که قبلاً گفته شد، مراکز می‌توانند به اهداکنندگان سایر مناطق که در شعاع پوشش آن‌ها قرار دارند مورد استفاده قرار گیرند. مرکز

همچنین در شکل (۲) مکان احداث مراکز ثابت جمع‌آوری خون که در ابتدای افق برنامه‌ریزی تأسیس می‌شوند و در طول افق زمانی نمی‌توانند تغییر مکان دهند و همچنین مرکز خون وصال بر روی نقشه شهر تهران نشان داده شده است. این مکان‌ها به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل در نظر گرفته شده است.



شکل (۲): مکان احداث مراکز ثابت جمع‌آوری خون

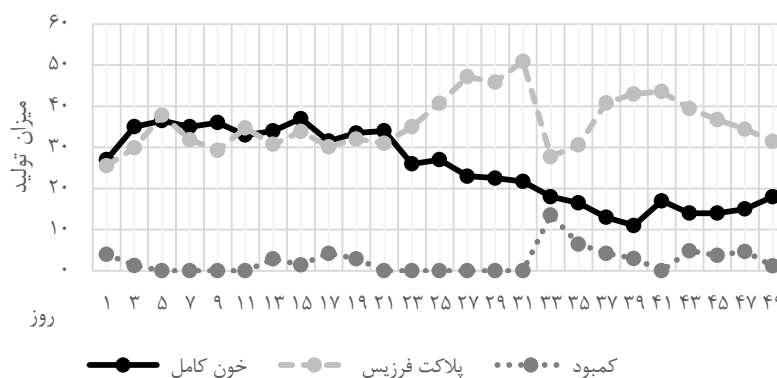
۴-۱- گزارش نتایج

در این قسمت از مدل پیشنهادی با استفاده از الگوریتم CPLEX با کد نویسی در نرم‌افزار GAMS و بر روی یک پردازنده Core i3 CPU ۳/۲ GHz با حافظه ۴ GB حل شده و نتایج حاصل از آن در ادامه گزارش شده است.

موقت جمع‌آوری خون در منطقه ۶ با توجه به موقعیت مکانی مرکزی و ظرفیت بالاتر، علاوه بر پوشش اهداکنندگان این منطقه در کل افق برنامه‌ریزی، از دوره سوم تا دوره هفدهم جهت سرویس‌دهی به منطقه ۱ و از دوره پنجم تا دوره بیست و یکم به

[illegible][illegible]

می‌روند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار تولید پلاکت از خون کامل از دوره بیست و یکم رو به کاهش رفته است. در مقابل تولید پلاکت آفرزیس افزایش یافته و در دوره سی و یکم به بیشترین مقدار خود رسیده و پس از آن کاهش یافته و در دوره سی و سوم کمترین میزان را داشته است.



نمودار (۱): مقدار تولید پلاکت از خون کامل، روش آفرزیس و میزان کمیود

کاهش هم‌زمان سطح تولید پلاکت از هر دو روش خون کامل و آفرزیس، بالاترین سطح کمیود مشاهده می‌شود. مقادیر کمیود در دوره‌های فرد در جدول (۵) گزارش شده است. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود بیشترین مقادیر کمیود به ترتیب مربوط به دوره‌های سی و سوم، سی و پنجم و چهل و سوم است.

جهت بررسی تعادل میان عرضه و تقاضا در افق برنامه ریزی، مقدار تولید پلاکت از خون کامل، روش آفرزیس و میزان کمیود پلاکت در مرکز انتقال خون در طول ۵۰ روز در نمودار (۱) نشان داده شده است. با توجه به محدودیت فسادپذیری، پلاکت‌های تولیدشده بیشتر از ۵ روز نمی‌توانند نگهداری شوند و از بین

همان‌طور که در نمودار (۱) مشاهده می‌شود، مادامی‌که میزان تولید پلاکت از روش خون کامل و روش آفرزیس پایدار است (دوره اول تا دوره بیست و یکم)، کمیود در حداقل است و مقداری نزدیک به صفر دارد. از دوره بیست و یکم افزایش تولید پلاکت آفرزیس، کاهش محسوس سطح تولید پلاکت از خون کامل را جبران می‌کند اگرچه در دوره سی و سوم با توجه به

جدول (۵): میزان کمیود در دوره‌های مختلف

دوره زمانی	دوره ۱	دوره ۳	دوره ۵	دوره ۷	دوره ۹	دوره ۱۱	دوره ۱۳	دوره ۱۵	دوره ۱۷	دوره ۱۹	دوره ۲۱	دوره ۲۳	دوره ۲۵
میزان کمیود	۴	۱/۳	۰	۰	۰	۰	۲/۹	۱/۴	۴/۲	۲/۹	۰	۰	۰

دوره زمانی	دوره ۲۷	دوره ۲۹	دوره ۳۱	دوره ۳۳	دوره ۳۵	دوره ۳۷	دوره ۳۹	دوره ۴۱	دوره ۴۳	دوره ۴۵	دوره ۴۷	دوره ۴۹
میزان کمیود	۰	۰	۰	۱۳/۶	۶/۵	۴/۲	۳	۰	۴/۹	۳/۷	۴/۷	۱/۱

داشته است. بنابراین در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در طرف اهداکنندگان و طرف تقاضا می‌تواند به‌طور مؤثری منجر به بهبود تصمیمات در شبکه تأمین پلاکت شود. در نتیجه مدل پیشنهادی در این تحقیق می‌تواند در تأمین مطمئن تر پلاکت جهت بیماران نیازمند و کاهش سطح کمیود این فرآورده خونی به‌طور مؤثری کمک‌کننده باشد.

مقدار هزینه در مدل امکانی	مقدار هزینه در مدل قطعی
۴,۱۵۳,۶۲۵	۳,۹۰۱,۹۴۹

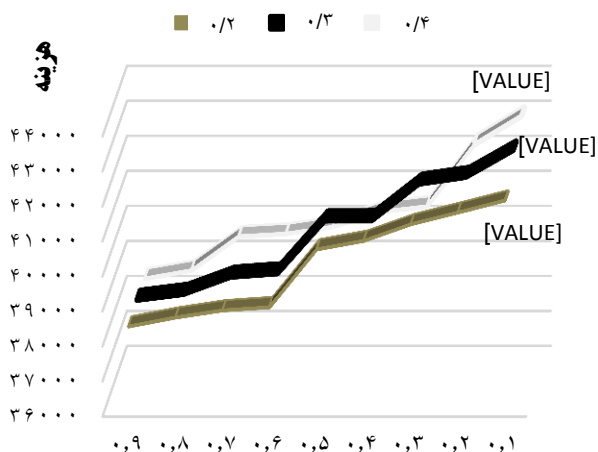
جدول (۶): مقدار تابع هدف در مدل امکانی و مدل قطعی

جهت مقایسه مدل امکانی (غیرقطعی) و مدل قطعی، مدل‌ها بر اساس تابع هدف هزینه مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، مقدار تابع هزینه در مدل امکانی بیشتر از مدل قطعی است که این امر به دلیل عدم تجاوز پارامترها از محدودیت‌ها می‌باشد. با این حال مقادیر متغیرهای میزان تولید و میزان کمیود حاصل از مدل امکانی حالت مطلوب‌تری نسبت به مدل قطعی دارند. مقدار تولید پلاکت از دو روش خون کامل و روش آفرزیس را در مدل قطعی در دوره‌های فرد در جدول (۷) آمده است. از مقایسه مقادیر تولید پلاکت در جدول (۷) با مقادیر تولید پلاکت در نمودار (۱) مشخص است که میزان تولید در روش امکانی بالاتر است و سطح کمیود کاهش

جدول (۷): میزان تولید پلاکت به دو روش خون کامل و پلاکت آفرزیس در مدل قطعی

نوع پلاکت	دوره ۱	دوره ۳	دوره ۵	دوره ۷	دوره ۹	دوره ۱۱	دوره ۱۳	دوره ۱۵	دوره ۱۷	دوره ۱۹	دوره ۲۱	دوره ۲۳	دوره ۲۵
خون کامل	۲۷	۳۵	۳۶/۵	۳۵	۳۶	۳۳	۳۴	۳۷	۳۱/۵	۳۳/۵	۳۴	۲۶	۲۷
پلاکت آفرزیس	۲۵/۶	۲۹/۹	۳۷/۹	۳۱/۹	۲۹/۳	۳۴/۷	۳۰/۷	۳۳/۹	۳۰/۱	۳۲	۳۱	۳۵	۴۰/۷

نوع پلاکت	دوره ۲۷	دوره ۲۹	دوره ۳۱	دوره ۳۳	دوره ۳۵	دوره ۳۷	دوره ۳۹	دوره ۴۱	دوره ۴۳	دوره ۴۵	دوره ۴۷	دوره ۴۹
خون کامل	۳۳	۲۲/۵	۳۱/۷	۱۸	۱۶/۵	۱۳	۱۱	۱۷	۱۴	۱۴	۱۵	۱۸
پلاکت آفرزیس	۴۷/۱	۴۵/۹	۵۰/۹	۲۷/۷	۳۰/۶	۴۰/۸	۴۳	۴۳/۶	۳۹/۴	۳۶/۷	۳۴/۴	۳۱/۴



بازه تغییرات دلتا

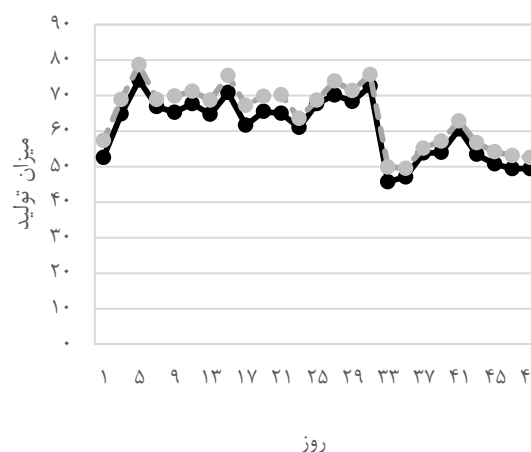
نمودار (۳): تغییرات تابع هزینه با تغییر وزن تابع هدف اول به ازای

مقادیر مختلف ϕ

نمودار (۳) مقدار تابع هزینه را در ازای مقادیر مختلف Δ_1 برای مقادیر $\phi = \{0.2, 0.3, 0.4\}$ نشان می‌دهد. همان‌طور که نمودار (۳) مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار ϕ و کاهش مقدار Δ_1 ، مقدار تابع هدف هزینه افزایش می‌یابد.

۴-۲-۲-۴- تحلیل حساسیت بر روی پارامتر ϕ یا ضریب سازش

در این بخش تحلیل حساسیت پارامتر ϕ موردتوجه قرار گرفته است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، هرچه قدر ϕ بیشتر باشد، نشان‌دهنده توجه تصمیم‌گیرنده به ایجاد یک حل ترکیبی است که در آن تعادل بیشتری بین جواب‌های توابع هدف مختلف یعنی مینیم کردن هزینه‌ها و ماکزیم کردن کیفیت پلاکت‌ها وجود دارد. نمودار (۴) مقادیر تابع هدف هزینه را به ازای مقادیر مختلف پارامتر ϕ نشان می‌دهد. با توجه به نمودار (۴) ملاحظه می‌شود افزایش هزینه هنگامی که ϕ در بازه ۰/۲ تا ۰/۷ تغییر می‌کند شیب ملایمی دارد در صورتی که در $\phi = 0.8$ مقدار هزینه تغییر محسوسی داشته است. بنابراین با توجه به شرایط مسئله، هر یک از مقادیر پارامتر ϕ که نظر تصمیم‌گیرنده را جلب نماید، انتخاب خواهد شد. مقادیر کمتر ϕ نیز بیانگر توجه بیشتر تصمیم‌گیرنده برای به دست آوردن راه‌حلی با درجه رضایت بالا



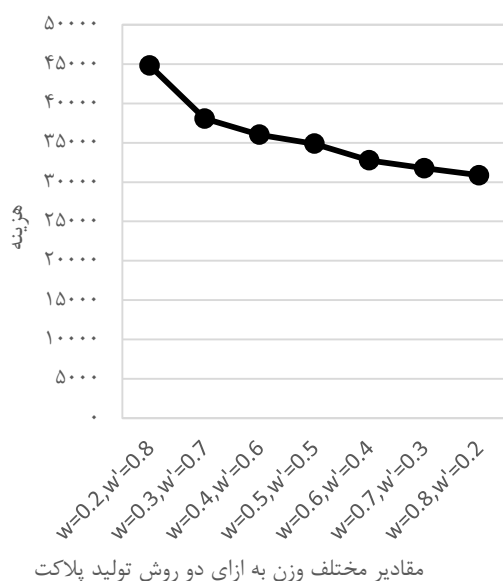
نمودار (۲): میزان تولید پلاکت در مدل اولیه و مدل امکانی

۴-۲-۴- تحلیل حساسیت بر روی برخی پارامترها

۴-۲-۴-۱- تحلیل حساسیت بر روی پارامتر وزنی تابع هدف

روش ترابی- هسینی [۳۵] یک روش تعاملی است که با استفاده از تعیین اولویت‌های گوناگون تصمیم‌گیرنده برای توابع هدف و وزن‌های مختلف برای درجه رضایت هر تابع هدف جواب‌های متفاوتی به دست می‌آورد. در این روش، پارامترهای گوناگون آثار مختلفی بر روی مقادیر توابع هدف دارند که در ادامه به تحلیل حساسیت بر روی آن‌ها می‌پردازیم. اولین پارامتری که در روش ترابی- هسینی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد وزن تابع هدف (Δ_j) می‌باشد، بر این اساس همان‌طور که در نمودار (۳) مشاهده می‌شود برای ϕ به ازای سه مقدار ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ با کاهش وزن تابع هدف اول از ۰/۹ به ۰/۱ هزینه‌های کل زیاد می‌شود و تابع کیفیت افزایش می‌یابد، بدین معنی که به‌منظور افزایش کیفیت پلاکت‌ها، سطح تولید پلاکت آفرزیس افزایش می‌یابد، از آنجایی که تولید پلاکت به روش آفرزیس هزینه بالاتری دارد افزایش بایستی هزینه بیشتری پرداخت نمود و افزایش در تابع هزینه توجیه‌پذیر است.

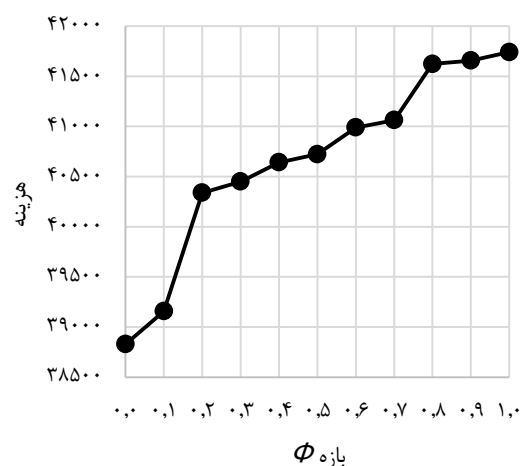
آفریزس دوز بالاتر پلاکت است به گونه‌ای که در روش پلاکت آفریزس می‌توان تعداد بیشتر و مؤثرتری پلاکت از یک اهداکننده به دست آورد که محتوای پلاکت به دست آمده برابر با پلاکت ۸ واحد خون کامل است که ۸ نفر آن را اهدا کرده‌اند. مزیت دیگر این روش این است که بیمار در معرض تماس با اهداکننده کمتری قرار می‌گیرد و بنابراین نقش مهمی در سازگاری خون و پلاکت شخص اهداکننده و گیرنده دارد که ضریب حساسیت و احتمال عدم پذیرش در بدن گیرنده کاهش می‌یابد. اما این روش هزینه بسیار بالاتری دارد و از این رو در تابع هدف دوم تصمیم‌گیرنده موازنه‌ای میان اهمیت پلاکت‌های تولیدی از دو روش خون کامل و آفریزس انجام می‌دهد که با توجه به محدودیت بودجه و منابع می‌تواند در بهره‌گیری از این دو روش تولید به وی کمک نماید. نمودار (۵) میزان تغییرات تابع هزینه را در ازای مقادیر مختلف ارجحیت پلاکت تهیه‌شده به روش خون کامل مقادیر (W) و روش آفریزس (W') نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار (۵) ملاحظه می‌شود با افزایش وزن ارجحیت پلاکت تهیه‌شده به روش خون کامل و کاهش وزن ارجحیت پلاکت آفریزس مقدار تابع هزینه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.



نمودار (۵): تغییرات در تابع هزینه به ازای مقادیر مختلف وزن ارجحیت در روش تولید خون کامل (W) و روش آفریزس (W')

همچنین نمودار (۶) تغییرات در تابع کیفیت را در ازای این مقادیر مختلف ارجحیت پلاکت تهیه‌شده به روش خون کامل (W) و روش آفریزس (W') نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، مشاهده می‌شود مقدار تابع کیفیت با افزایش ارجحیت روش تولید خون کامل کاهش می‌یابد. در نهایت مقداری از

برای رسیدن به هر یک از اهداف بدون در نظر گرفتن درجه رضایت اهداف دیگر است. در حالت خاص اگر $\phi = 1$ باشد کل اهمیت به موازنه کردن مقادیر توابع هدف داده می‌شود و در جواب نهایی حتی‌الامکان توابع به یک اندازه ارضا می‌شوند و برعکس وقتی $\phi = 0$ باشد، موازنه کردن برای تصمیم‌گیرنده هیچ اهمیتی نداشته و تابع TH به یک تابع وزنی ساده تبدیل شده و تلاش می‌شود طبق وزن هر هدف توابع ارضا شوند.

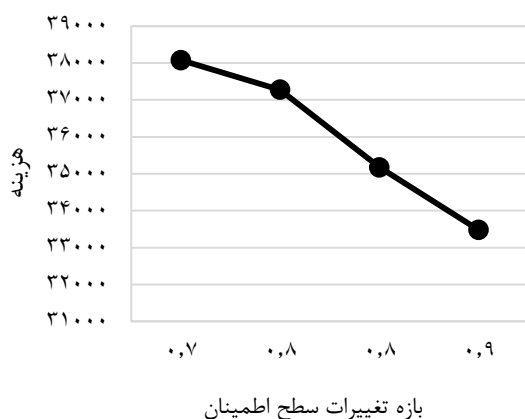


نمودار (۴): مقدار تابع هدف هزینه به ازای مقادیر مختلف ϕ

به عبارت دیگر، در مقادیر بیشتر ϕ ، تصمیم‌گیرنده به دادوستد درونی میان دو هدف هزینه و کیفیت در ایجاد تصمیمات کارا در شبکه تأمین پلاکت اهمیت بالاتری می‌دهد. یعنی به نوعی تمایل دارد درجه عضویت توابع هزینه و کیفیت در حل چندهدفه به هم نزدیک باشند و هر دو هدف تا سطح رضایت بخشی به میزان ایده‌آل خود نزدیک شوند. از طرفی کاهش ϕ به معنای افزایش اهمیت به وزن‌هایی است که تصمیم‌گیرنده به صورت بیرونی برای توابع هدف تعیین می‌کند. در حالت خاص وقتی $\phi = 0$ است، مدل دو هدفه تبدیل به یک تابع وزنی ساده از دو هدف شده و تلاش می‌شود طبق وزن بیرونی تخصیص داده‌شده به هر هدف توابع ارضا شوند. درواقع مقادیر کمتر ϕ در شرایطی که محدودیت بودجه یا محدودیت‌های بیرونی سخت‌گیرانه برای تصمیم‌گیرنده وجود دارد کاربردی‌تر است.

۲-۳-۴- تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای تابع کیفیت

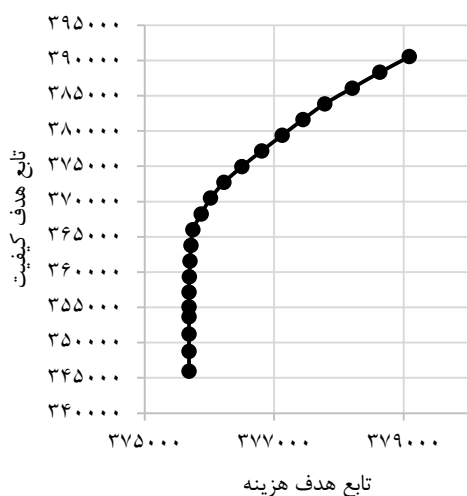
همان‌طور که ذکر شد از لحاظ کیفیت، پلاکت آفریزس نسبت به پلاکت خون کامل ارجحیت دارد. در هر بار خون دادن در روش اهدای خون کامل، خون اهداشده به پلاکت و گلبول قرمز و پلاسما تجزیه می‌شود و ۶ تا ۸ واحد خون کامل بایستی جداسازی شود تا پلاکت‌های آن‌ها به عنوان یک واحد پلاکت درمانی به بیمار تزریق شود. به عبارتی مزیت روش پلاکت



نمودار (۷)؛ تغییرات تابع هزینه به ازای مقادیر مختلف سطوح اطمینان

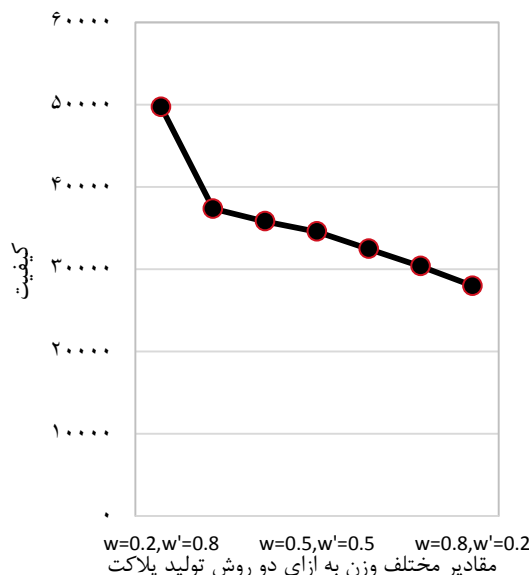
۴-۳- تعیین مرز پارتو

در تحقیق حاضر کمینه کردن هزینه‌ها و حداکثر کردن کیفیت محصول تحت محدودیت‌های خاص، یک مسئله بهینه‌سازی دوهدفه است که اولاً مقیاس توابع هدف متفاوت از یکدیگر بوده و ثانیاً جواب بهینه آن‌ها منطبق بر یکدیگر نیست و جواب ایده‌آل کلی وجود ندارد. در این حالت با مجموعه‌ای از بده بستان‌ها مابین توابع هدف مواجه هستیم که شامل بهترین انتخاب‌های توابع هدف فردی و تمام حالت‌های بینابین می‌شود. این مجموعه را مجموعه جواب‌های پارتو می‌نامیم. نمودار (۸) زیرمجموعه جواب‌های پارتو را برای مسئله این تحقیق نشان می‌دهد. نقاط جواب پارتو مجموعه جواب‌های نامغلوب مسئله هستند که هیچ‌یک بر دیگری ارجحیت و تسلط ندارند، و تصمیم‌گیرنده از میان این مجموعه جواب، بهترین جواب با توجه به شرایط موردنظر را برمی‌گزیند.



نمودار (۸): نمایش مرز پارتو برای مسئله تحقیق

پارامترها انتخاب می‌شوند که نظر تصمیم‌گیرنده را از منظر دو تابع هزینه و کیفیت تأمین نماید.



نمودار (۶): تغییرات در تابع کیفیت به ازای مقادیر مختلف وزن ارجحیت در روش تولید خون کامل (W) و روش آفرزیس (W')

۴-۲-۴- تحلیل حساسیت بر روی سطوح اطمینان

همان‌طور که گفته شد، در برنامه‌ریزی امکانی به دلیل وجود عدم قطعیت در محدودیت‌ها، سعی بر آن است تا سطح اطمینان معینی از برآورده شدن این محدودیت‌ها تضمین گردد. در این بخش می‌خواهیم تأثیر تغییر این سطوح را بر مقدار تابع هزینه بررسی نماییم. بدین منظور مدل در ازای ۴ مقدار سطح اطمینان ۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸ و ۰/۸۵ حل شده و مقادیر تابع هزینه را در جدول (۸) گزارش شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش سطوح اطمینان در مدل مقدار هزینه‌ها کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش هزینه بالای در نظر گرفته شده برای کمبود در مدل است که با افزایش سطح اطمینان و کاهش سطح کمبود پلاکت، هزینه کل کاهش می‌یابد. اگرچه مقدار کیفیت به دلیل عدم وجود پارامتر غیرقطعی در تابع هدف دوم تغییری نمی‌کند.

جدول (۸): تحلیل حساسیت بر روی سطوح اطمینان

سطح اطمینان	۰/۷	۰/۷۵	۰/۸	۰/۸۵
Z1	۳۸۰۷۴/۹۳	۳۷۲۷۳/۱۱	۳۵۱۷۲/۵۵	۳۳۴۷۴/۱۴

۵- نتیجه‌گیری و مطالعات آتی

پلاکت فراورده مهمی است که در درمان بیماری‌هایی چون خونریزی و اختلال عملکرد پلاکتی و همچنین بیماران سرطانی نقش بسزایی دارد. از این رو عدم کمبود این فراورده بسیار حائز اهمیت است. از طرفی به دلیل اینکه خون منبع کمیابی است و پلاکت به شدت فسادپذیر است، جلوگیری از اتلاف این فراورده نیازمند برنامه‌ریزی دقیق در زنجیره تأمین این فراورده است. این در حالی است که این شبکه با عدم قطعیت قابل توجهی در تقاضا و عرضه (تعداد اهداکنندگان) روبرو است و این امر سبب افزایش پیچیدگی‌ها در برنامه‌ریزی شبکه زنجیره تأمین خون و فراورده‌های خونی می‌شود. در این پژوهش به مطالعه زنجیره تأمین فراورده خونی پلاکت پرداخته شده است و یک مدل برنامه‌ریزی امکانی دو هدفه و چند دوره‌ای به شکل مدل خطی عدد صحیح آمیخته (MILP) جهت مسئله طراحی یکپارچه شبکه جمع‌آوری و تولید پلاکت در زنجیره تأمین خون پیشنهاد شده است. این مدل دو هدفه در زنجیره تأمین شامل سطوح جمع‌آوری و تولید پلاکت در نظر گرفته شده است و هدف اول آن کمینه کردن هزینه‌های کل شامل هزینه تولید پلاکت به دو روش مختلف خون کامل و آفریزس، هزینه حمل‌ونقل، هزینه نگهداری موجودی و هزینه کمبود می‌باشد. هدف دوم حداکثرسازی کیفیت پلاکت‌ها است تا بیماران با کمترین ریسک ناشی از تزریق خون مواجه شوند و این مهم با استفاده از فراورده خونی باکیفیت قابل دستیابی می‌باشد.

همان‌طور که ذکر شد به دلیل ماهیت غیرقطعی پارامترهای عرضه و تقاضا، از اعداد فازی دوزنقه‌ای و رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استفاده شده است. همچنین جهت تبدیل مدل به یک مدل تک هدفه قابل حل، رویکرد فازی چندهدفه ترابی-هسینی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور ارزیابی مدل ارائه شده، از داده‌های واقعی شهر تهران به عنوان مطالعه موردی استفاده شد و در نهایت نیز نتایج حاصل از حل مدل در نرم افزار GAMS به کمک الگوریتم CPLEX گزارش شده است. نتایج به دست آمده عملکرد بالاتر مدل پیشنهادی را نسبت به مدل قطعی در طراحی و برنامه‌ریزی شبکه تأمین پلاکت نشان می‌دهند. همچنین تحلیل حساسیت روی پارامترهای مهم مدل شامل ضرایب وزنی اهداف، پارامتر سازش در تابع هدف، پارامترهای تابع کیفیت و سطوح اطمینان صورت گرفته و دیدگاه‌های مدیریتی ارائه شده است.

در راستای توسعه این پژوهش، می‌توان موارد زیر را به عنوان مسیرهای پیشنهادی جهت تحقیقات آینده ارائه نمود:

در این تحقیق فازهای جمع‌آوری و تولید در نظر گرفته شده است، که در پژوهش‌های آینده می‌توان فاز توزیع و بیمارستان‌ها را نیز

اضافه نمود و برای حل مسئله در ابعاد بزرگ به دلیل اینکه حجم محاسباتی بیشتر می‌شود، می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری روش حل مناسبی برای مدل ارائه داد. در پژوهش‌های آینده می‌توان تأثیر عواملی چون آگاهی‌های اجتماعی و تبلیغات را بر میزان اهدای پلاکت در نظر گرفت. با توجه به اینکه این تحقیق به زنجیره تأمین پلاکت در حالت عادی پرداخته است، می‌توان زنجیره تأمین پلاکت را در حالت بحرانی و اورژانسی نیز مورد بررسی قرار داد.

۶- مراجع

- [1] M. S. Pishvae, J. Razmi, and S. A. Torabi, "Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 206, pp. 1-20, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2012.04.010>
- [2] G. Van Zyl, "Inventory control for perishable commodities," Ph.D. dissertation, University of North Carolina at Chapel Hill, 1960.
- [3] S. Nahmias, "Perishable inventory theory: A review," *Operations Research*, pp. 680-708, 1982. <https://doi.org/10.1287/opre.30.4.680>
- [4] G. Prastacos, "Blood inventory management: an overview of theory and practice," *Management Science*, pp. 777-800, 1984. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.7.777>
- [5] J. Beliën and H. Forcé, "Supply chain management of blood products: A literature review," *European Journal of Operational Research*, vol. 217, no. 1, pp. 1-16, 2012. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1974803>
- [6] A. F. Osorio, S. C. Brailsford, and H. K. Smith, "A structured review of quantitative models in the blood supply chain: a taxonomic framework for decision-making," *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 24, pp. 7191-7212, 2015. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1005766>
- [7] I. Or and W. P. Pierskalla, "A transportation location-allocation model for regional blood banking," *AIIE Transactions*, vol. 11, no. 2, pp. 86-95, 1979. <https://doi.org/10.1080/05695557908974447>
- [8] M. S. Daskin, C. R. Coullard, and Z. J. M. Shen, "An inventory-location model: Formulation, solution algorithm and computational results," *Annals of Operations Research*, vol. 110, pp. 83-106, 2002. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02568-6_33
- [9] G. Şahin, H. Süral, and S. Meral, "Locational analysis for regionalization of Turkish Red Crescent blood services," *Computers & Operations Research*, vol. 34, no. 3, pp. 692-704, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.020>
- [10] E. Cetin and L. S. Sarul, "A blood bank location model: A multiobjective approach," *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 2, no. 1, pp. 112-124, 2009.
- [11] M. Arvan, R. Tavakkoli-Moghaddam, and M. Abdollahi, "Designing a bi-objective and multi-product supply chain network for the supply of blood," *Uncertain Supply Chain Management*, vol. 3, no. 1, pp. 57-68, 2015. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2014.8.004>
- [12] P. Ghasemi, M. Ebrahimi, M. Norouzzadeh, and A. Gheibi, "Multi-objective location and allocation in the blood supply chain: Case study: Mazandaran province," *Supply Chain Management*, vol. 18, no. 53, pp. 56-68, 2016 (In Persian).
- [13] E. Teymoury and M.S. Pishvae, "Blood products supply chain design considering disaster circumstances (Case study: earthquake disaster in Tehran)," *Supply Chain Management*, vol. 17, no. 50, pp. 6-21, 2016 (In Persian).
- [14] M. Paydar and M. Habibi-Kouchaksaraei, "Designing a bi-objective multi-echelon robust blood supply chain in a disaster," *Supply Chain Management*, vol. 17, no. 50, pp. 82-95, 2016 (In Persian).
- [15] N. Gilani and S. Yaghoubi, "A robust mathematical model for platelet supply chain considering social announcements and blood

- [26] M. Habibi-Kouchaksaraei, M. Paydar, and E. Asadi-Gangraj, "Designing a bi-objective multi-echelon robust blood supply chain in a disaster," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 55, pp. 583-599, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.11.004>
- [27] N. Haghjoo, R. Tavakkoli-Moghaddam, H. Shahmoradi-Moghadam, and Y. Rahimi, "Reliable blood supply chain network design with facility disruption: A real-world application," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 90, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103493>
- [28] Y. Xu and J. Szmerekovsky, "A multi-product multi-period stochastic model for a blood supply chain considering blood substitution and demand uncertainty," *Health Care Management Science*, vol. 25, no. 3, pp. 441-459, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10729-022-09593-5>
- [29] H. Shih, A. Kasaie, and S. Rajendran, "A multiple criteria decision-making model for minimizing platelet shortage and outdated in blood supply chains under demand uncertainty," *Healthcare Analytics*, vol. 3, p. 100180, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.health.2023.100180>
- [30] Tsz Yu Suen, X. Song, and D. Jones, "A two-stage stochastic model for a multi-objective blood platelet supply chain network design problem incorporating frozen platelets," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 185, p. 109651, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109651>
- [31] M. R. G. Samani and S. M. Hosseini-Motlagh, "Collaborative activities for matching supply and demand in the platelet network," *Expert Systems with Applications*, vol. 231, p. 120629, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120629>
- [32] O. A. Ejowomu, J. Too, and D. J. Edwards, "A resilient approach to modelling the supply and demand of platelets in the United Kingdom blood supply chain," *International Journal of Management Science and Engineering Management*, vol. 16, no. 2, pp. 143-150, 2021. <https://doi.org/10.1080/17509653.2021.1892548>
- [33] Sh. Rekabi, H. Shokri Garjan, F. Goodarzian, D. Pamucar, and A. Kumar, "Designing a responsive-sustainable-resilient blood supply chain network considering congestion by linear regression method," *Expert systems with applications*, vol. 245, pp. 122976-122976, Jul. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122976>
- [34] S. Entezari, O. Abdolazimi, M. B. Fakhrzad, D. Shishebori, and J. Ma, "A Bi-objective stochastic blood type supply chain configuration and optimization considering time-dependent routing in post-disaster relief logistics," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 188, pp. 109899-109899, Jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109899>
- [35] S. A. Torabi and E. Hassini, "An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 159, no. 2, pp. 193-214, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2007.08.010>
- extraction technologies," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 137, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106014>
- [16] M. Eskandari-Khanghahi, R. Tavakkoli-Moghaddam, A. Taleizadeh, and S. Hassanzadeh, "Designing and optimizing a sustainable supply chain network for a blood platelet bank under uncertainty," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 71, pp. 236-250, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.03.004>
- [17] S. Yaghoubi, S.M Hosseini-Motlagh, S. Cheraghi, and N. Gilani Larimi, "Designing a robust demand-differentiated platelet supply chain network under disruption and uncertainty," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 11, pp. 3231-3258, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01501-0>
- [18] S.M Hosseini-Motlagh, M.R Gatreh Samani, and SH Homaei, "Blood supply chain management: robust optimization, disruption risk, and blood group compatibility (a real-life case)," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 11, pp. 1085-1104, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01315-0>
- [19] S. M. Hosseini-Motlagh and M. Ghatreh Samani, "Robust and stable flexible blood supply chain network design under motivational initiatives," *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 70, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2019.07.001>
- [20] F. Rashidian, "Presenting a Bi-objective Integrated Model of Blood Supply Chain Network Design with the Approach of Increasing the Quality of Products," *Industrial Innovations: Requirements and Strategies*, vol. 1, no. 3, pp. 255-270, 2023. <https://doi.org/10.61186/jii.1.3.255>
- [21] B. Zahiri and M. S. Pishvae, "Blood supply chain network design considering blood group compatibility under uncertainty," *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 7, pp. 2013-2033, 2017. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1262563>
- [22] M. Zendehtdel, A. Bozorgi-Amiri, and H. Omrani, "A location Model for Blood Donation Camps with Consideration of Disruption," *Special Issue*, vol. 48, pp. 33-43, 2014 (In Persian).
- [23] S. Cheraghi, S. M. Hosseini-Motlagh, and M. Ghatreh Samani, "Integrated planning for blood platelet production: a robust optimization approach," *Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 10, pp. 55-80, 2017.
- [24] R. Ramezani and Z. Behboodi, "Blood supply chain network design under uncertainties in supply and demand considering social aspects," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 104, pp. 69-82, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.06.004>
- [25] B. Fahimnia, A. Jabbarzadeh, A. Ghavamifar, and M. Bell, "Supply chain design for efficient and effective blood supply in disasters," *International Journal of Production Economics*, vol. 183, Part C, pp. 700-709, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.11.007>