

Inventory Control of Blood Products in the Hospital Network under Uncertainty

Vida Yousefinezhad*, Ehsan Nikbakhsh**

Abstract

Inventory control of blood and its products is the most important challenge in efficiently managing a blood supply chain as blood products are perishable. In addition, the replenishment of blood, which donors supply, and the demand of patients for blood products are uncertain. In particular, platelets with the shortest lifespan, up to five days, are the most expensive blood products. Therefore, this study investigates the problem of platelet inventory control in a hospital network using integer programming. Due to the uncertainty of the demand of patients in hospitals, a scenario-based robust optimization approach is applied to minimize the worst-case performance of the system. The proposed model is coded and solved using GAMS software. The results demonstrate that using a robust optimization approach reduces hospital costs by 7.6% on average compared to a solution that ignores uncertainty. Moreover, the efficiency of hospitals' inventory control depends on the capacity of the Blood Transfusion Organization to deliver fresh platelets.

Keywords: Blood Supply Chain; Perishable Inventory; Inventory control; Robust Optimization; Nonlinear Integer Programming.

Received: Mar. 15, 2020; Accepted: Aug. 02, 2021.

* M.Sc., Tarbiat Modares University.

** Assistant Professor, Tarbiat Modares University (Corresponding Author).

Email: nikbakhsh@modares.ac.ir

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

شاپای چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپای الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵

سال یازدهم، شماره ۴۳، پاییز ۱۴۰۰، صص ۱۳۱ - ۱۵۲ (نوع مقاله: پژوهشی)

DOI: [10.52547/JIMP.11.3.131](https://doi.org/10.52547/JIMP.11.3.131)

کنترل موجودی فرآورده‌های خونی در شبکه بیمارستانی تحت شرایط عدم قطعیت

ویدا یوسفی نژاد*، احسان نیک‌بخش**

چکیده

بحث کنترل موجودی خون و فرآورده‌های خونی مهم‌ترین چالش در مدیریت کارآمد زنجیره تأمین خون است؛ زیرا فرآورده‌های خونی فسادپذیر هستند؛ همچنین عرضه خون از سوی اهداکنندگان و تقاضا برای فرآورده‌های خونی از سوی بیماران غیرقطعی است. به صورت خاص، پلاکت با کوتاه‌ترین طول عمر، حداکثر پنج روز، گران‌ترین فرآورده خونی است؛ از این رو در این پژوهش مسئله کنترل موجودی پلاکت را در شبکه بیمارستانی با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مطالعه می‌شود. با توجه به وجود عدم قطعیت تقاضای عادی بیماران در بیمارستان‌ها از رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریومحور استفاده شده است. مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار GAMS کدنویسی و حل شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار به طور متوسط ۷/۶ درصد هزینه‌های بیمارستان‌ها را نسبت به جوابی که عدم قطعیت را نادیده می‌گیرد، کاهش می‌دهد؛ همچنین کارآمدی کنترل یکپارچه موجودی بیمارستان‌ها به ظرفیت سازمان انتقال خون برای عرضه پلاکت تازه وابسته است.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین خون؛ موجودی فسادپذیر؛ کنترل موجودی؛ بهینه‌سازی استوار؛ برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱.

* کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس.

** استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس (نویسنده مسئول).

Email: nikbakhsh@modares.ac.ir

۱. مقدمه

خون منبعی کمیاب است که تنها توسط انسان تولید می‌شود و دانشمندان هنوز جایگزین مناسبی برای آن پیدا نکرده‌اند [۱]. عرضه خون توسط اهداکنندگان به صورت نامنظم است؛ زیرا اهدای خون امری انسان‌دوستانه محسوب می‌شود و ماهیت آن دارای پیچیدگی خاصی است [۱۵]؛ همچنین تقاضا برای آن نیز از سوی بیماران غیرقطعی است [۸]. به‌علاوه، خون محصولی فسادپذیر است که به‌محض خارج شدن از بدن انسان با نرخ تدریجی و پس از طی عمری محدود فاسد می‌شود و دیگر قابل استفاده نیست. این محصول شامل مشتقاتی از جمله گلبول قرمز، پلاکت و پلاسما است که هر یک از این فرآورده‌های خونی در درمان بیماری‌های مختلفی کاربرد دارد. برای مثال، پلاکت پس از تولید به روش مستقیم یا به‌وسیله دستگاه آفرزیس، برای درمان سرطان، پیوند مغزاستخوان و جراحی‌های عمومی استفاده می‌شود [۸]. سرانجام هزینه زنجیره تأمین خون به‌عنوان بخشی از سیستم سلامت در بسیاری از کشورها، به‌خصوص در کشورهای درحال توسعه، رو به افزایش است [۶].

مطالب ذکر شده بخشی از دلیل توجه بسیاری از پژوهشگران به زنجیره تأمین خون را نشان می‌دهد. چهار مرحله اصلی زنجیره تأمین خون به ترتیب شامل جمع‌آوری، تولید، ذخیره‌سازی و توزیع است [۲۰]. خون‌های اهدایی از سوی داوطلبان توسط تسهیلات سیار و ثابت به تأمین‌کننده خون، یعنی سازمان انتقال خون، فرستاده می‌شوند. این سازمان وظیفه انجام آزمایش‌های لازم برای اطمینان از سالم بودن خون‌های جمع‌آوری شده را بر عهده دارد. در این مرحله فرآورده‌های خونی تولید و بسته‌بندی می‌شوند. در نهایت این زنجیره با توزیع خون و فرآورده‌های آن بین بانک خون بیمارستان‌ها و مراکز درمانی برای درمان بیماران پایان می‌یابد. مدیریت این زنجیره همواره درگیر تصمیمات متعددی است. تصمیم‌گیرندگان باید به پرسش‌هایی نظیر مکان تسهیلات جمع‌آوری، ظرفیت تسهیلات جمع‌آوری و مراکز خون، مسیریابی توزیع خون و فرآورده‌های خونی پاسخ دهند؛ اما مهم‌ترین چالش مدیریت آن به کنترل موجودی، یعنی کاهش کمبود و اتلاف آن، مربوط است [۸]. از طرفی مهم‌ترین و گران‌ترین فرآورده‌ی مشتق شده از خون کامل، پلاکت است؛ زیرا این محصول با طول عمر پنج روز، زودتر از بقیه فرآورده‌های خونی فاسد می‌شود و مدیریت موجودی آن پیچیده است. مدت‌زمان نگهداری این فرآورده نیز بر کاربرد آن مؤثر است. برای مثال، بیماران مبتلا به اختلال عملکرد پلاکت به پلاکت‌های تازه نیاز دارند. در مقابل، بیمارانی هم هستند که به‌طور موقت پس از خونریزی عمده ناشی از جراحی دچار کمبود پلاکت می‌شوند و به پلاکت به هر سنی تا حداکثر پنج روز نیاز دارند [۱۰].

کمبود پلاکت در بیمارستان باعث به‌تعویق افتادن بسیاری از جراحی‌ها و به‌خطر افتادن جان بیماران می‌شود. در مقابل سفارش زیاد آن مقدار اتلاف را افزایش می‌دهد؛ بنابراین ایجاد تعادل

بین کمبود و اتلاف پلاکت‌ها با توجه به فسادپذیری آن و وجود عدم قطعیت در تقاضای بیماران کار دشواری است. این موضوع دلیل اصلی طرح پژوهش حاضر است. در پژوهش حاضر مسئله مدیریت موجودی پلاکت با در نظر گرفتن تقاضای دو گروه از بیماران با تمرکز بر کاهش هزینه‌های موجودی بانک خون چند بیمارستان با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح محض مطالعه می‌شود؛ همچنین با توجه به وجود عدم قطعیت در تقاضای مصرف روزانه بیمارستان‌ها از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مواجهه با عدم قطعیت استفاده می‌شود. استفاده از روش بهینه‌سازی استوار در کنار کنترل موجودی متمرکز چند بیمارستان در نقطه مصرف به‌عنوان نوآوری، پژوهش حاضر را از سایر پژوهش‌های پیشین در پیشینه موجودی زنجیره تأمین خون متمایز می‌کند. این پژوهش بر انتهای زنجیره تأمین خون، یعنی مدل‌سازی ارتباط یک مرکز خون و چند بیمارستان، تمرکز دارد. بیمارستان در ابتدای هر دوره زمانی سفارش‌های (پلاکت‌های تازه) خود را از سازمان انتقال خون دریافت می‌کند. در ادامه پلاکت‌ها با رعایت سیاست مصرف خروج به ترتیب ورود (FIFO)^۱ برای برآورده‌ساختن تقاضای عادی بیماران در بیمارستان مصرف می‌شوند. افق زمانی پژوهش یک هفته است و مسئله به‌صورت چنددوره‌ای برای تک‌محصول فسادپذیر، به‌طور خاص پلاکت، مدل‌سازی می‌شود. شایان‌ذکر است، هدف از تصمیمات حداقل کردن هزینه‌های کمبود، فساد و نگهداری موجودی به‌نحوی است که تقاضای عادی هر دو نوع از بیماران ارضا شود؛ سپس مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار GAMS کدنویسی و حل می‌شود.

ادامه این مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده است. بخش دوم به مرور پژوهش‌های پیشین و بخش سوم به تشریح دقیق مسئله پژوهش و مدل ریاضی آن بر اساس رویکرد بهینه‌سازی استوار اختصاص دارد. در بخش چهارم نتایج محاسباتی و تحلیل حساسیت مدل ارائه خواهد شد. در نهایت جمع‌بندی و پیشنهادهای آتی در بخش پنجم ارائه می‌شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در این بخش، پژوهش‌های اخیر مرتبط با موضوع مسئله، یعنی مسائل موجودی خون و فرآورده‌های خونی، بررسی می‌شود. بررسی‌های اولیه درباره کنترل موجودی کالاهای فسادپذیر و به‌طور خاص خون و فرآورده‌های خونی به دهه ۱۹۶۰ برمی‌گردد [۱۸]. (برای جدیدترین مقاله‌های مروری در حوزه زنجیره تأمین خون به منابع شماره ۳، ۱۷ و ۲۰، مراجعه شود).

مقاله‌های بسیاری با به‌کارگیری رویکردهای مدل‌سازی نرم (مانند شبیه‌سازی و تحلیل آماری) و سخت (برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی عدد صحیح و برنامه‌ریزی پویا تصادفی) تاکنون چاپ شده است [۱۳، ۲۱]. بعضی از پژوهشگران نیز از روش‌های ترکیبی برای ارائه مدل‌ها بهره

1. First-In, First-Out

برده‌اند. برای مثال، کوپاچ و کارتر^۱ (۲۰۰۸) یک مدل موجودی با در نظر گرفتن دو نوع تقاضای عادی و اورژانسی برای گلبول قرمز خون با استفاده از نظریه صف پیشنهاد کردند [۱۴]. به علاوه پژوهشگران با استفاده از شبیه‌سازی، عملکرد یک مرکز خون در کانادا را با مدل پیشنهادی مقایسه کردند. در مثالی دیگر، ون دیجک^۲ و همکاران (۲۰۰۹) از رویکرد جدیدی مبتنی بر ترکیب برنامه‌ریزی پویا تصادفی و شبیه‌سازی برای تجزیه و تحلیل برنامه‌ریزی تولید و کنترل موجودی پلاکت‌ها استفاده کردند [۲۲].

گونپینار و سنتنو^۳ (۲۰۱۵) مدل موجودی چنددوره‌ای را با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و در نظر گرفتن سیاست مصرف FIFO برای دو نوع بیمار (گروه اول بیماران نیازمند به خون تازه و گروه دوم آن‌ها نسبت به سن خون دریافت کرده بی تفاوت هستند) و برای دو نوع فرآورده خونی (گلبول قرمز و پلاکت) پیشنهاد دادند [۸]. پژوهشگران با در نظر گرفتن سن فرآورده‌های خونی (فسادپذیری) و عدم قطعیت در تقاضای بیماران از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای و سناریوها برای نمایش عدم قطعیت تقاضا با هدف کمینه‌سازی مقدار مورد انتظار هزینه‌ها استفاده کردند. یعقوبی و کامور (۲۰۱۷)، مدل گونپینار و سنتنو را با در نظر گرفتن چند بیمارستان و امکان تبادل افقی توسعه دادند [۲۳]. دیلون^۴ و همکاران (۲۰۱۷) نیز یک مدل موجودی چنددوره‌ای با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای با هدف کمینه‌سازی مقدار مورد انتظار هزینه‌ها با توجه به وجود عدم قطعیت تقاضای بیماران برای مدیریت موجودی گلبول قرمز خون و با در نظر گرفتن فسادپذیری، جایگزینی گروه‌های خونی در جهت تعیین سیاست بهینه بازپرسازی دوره‌ای (R, S) طراحی کردند [۷]. حسینی فرد و عباسی (۲۰۱۸) برای نخستین بار تأثیر تمرکز موجودی را در لایه‌ای از زنجیره تأمین خون بین یک مرکز خون و چندین بیمارستان مطالعه کردند. آن‌ها یک مدل موجودی تک‌دوره‌ای با در نظر گرفتن سن خون (فسادپذیری)، عرضه و تقاضای تصادفی با تابع هدف حداقل‌سازی هزینه‌های سفارش‌دهی، اتلاف و کمبود به علاوه هزینه حمل و نقل بین بیمارستان‌ها به منظور تعیین سیاست بهینه بازپرسازی (s-1, S) بیمارستان ارائه کردند [۱۲]. در پژوهشی دیگر، نجفی و همکاران (۲۰۱۷) از برنامه‌ریزی عدد صحیح چندهدفه برای تجزیه و تحلیل مدیریت موجودی بانک خون یک بیمارستان با در نظر گرفتن تبادل افقی واحدهای خونی نزدیک به فساد استفاده کردند [۱۹]. به علاوه امکان جایگزینی انواع خون با توجه به تطابق سیستم ABO/RH و دو نوع تقاضا (خون تازه و خون معمولی) نیز در مدل لحاظ شده است. پژوهشگران با توجه به عدم قطعیت در عرضه و تقاضا از رویکرد محدودیت شانس برای مواجهه با عدم قطعیت استفاده کردند. دهقانی و

1. Kopach & Carter
 2. Van Dijk
 3. Gunpinar & Centeno
 4. Dillon

عباسی (۲۰۱۸) مدلی تک‌دوره‌ای برای تبادل افقی واکنشی بین بیمارستان‌ها در صورت وقوع کمبود در یک نقطه با در نظر گرفتن تقاضای تصادفی و سیاست بازپرسازی (s-1, S) پیشنهاد دادند [۴]. سرانجام، دهقانی و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل موجودی و تبادل افقی چنددوره‌ای برای یک شبکه بیمارستانی با هدف کمینه‌سازی مقدار مورد انتظار هزینه‌های موجودی در مواجهه با عدم قطعیت تقاضای بیماران توسعه دادند [۵]. ویژگی‌های پژوهش حاضر نسبت به پژوهش‌های انجام‌شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مروری بر پژوهش‌های پیشین در حوزه مسائل موجودی خون

وجود شبکه بیمارستانی متصل به مرکز خون	دوره زمانی	تصمیم	هدف	رویکرد مواجهه با عدم قطعیت			نمونه مدل‌سازی	پژوهش
				شانس محدود	بهبودسازی استوار	بهبودسازی تصادفی		
	چند دوره‌ای	موجودی	کمینه‌سازی هزینه اتلاف و سفارش با تأخیر				شبهه-سازی	[۲۱]
	چند دوره‌ای	موجودی	بیشینه‌سازی عملکرد کل زنجیره تأمین از نقطه اهدا تا نقطه مصرف خون شامل تعداد اتلاف، کمبود، ارسال سفارش				شبهه-سازی	[۱۳]
	تک دوره‌ای	موجودی	پیدا کردن سیاستی بهینه با در نظر گرفتن چندین معیار شامل سطح خدمت، هزینه‌های کمبود و اتلاف، دو نرخ تقاضای عادی و اورژانسی و هزینه‌های عملیاتی				نظریه صف و شبهه-سازی	[۱۴]
	چند دوره‌ای	تولید و موجودی	کمینه‌سازی هزینه‌های اتلاف و کمبود				برنامه-ریزی پویا تصادفی و شبهه-سازی	[۲۲]

پژوهش	نمونه مدل سازی	رویکرد مواجهه با عدم قطعیت			وجود شبکه بیمارستانی متصل به مرکز خون
		بهبودسازی تصادفی	بهبودسازی استوار	شانس محدود	
[۸]	عدد صحیح مختلط	•			وجود شبکه بیمارستانی متصل به مرکز خون
					دوره زمانی
					تصمیم
					هدف
					وجود شبکه بیمارستانی متصل به مرکز خون
[۲۳]	عدد صحیح مختلط	•			•
					دوره زمانی
					تصمیم
					هدف
					وجود شبکه بیمارستانی متصل به مرکز خون
[۷]	عدد صحیح مختلط	•			•
					دوره زمانی
					تصمیم
					هدف
					وجود شبکه بیمارستانی متصل به مرکز خون
[۱۹]	عدد صحیح مختلط	•			•
					دوره زمانی
					تصمیم
					هدف
					وجود شبکه بیمارستانی متصل به مرکز خون
[۴]	برنامه-ریزی غیر خطی				تک دوره‌ای
					تصمیم
					هدف
					وجود شبکه بیمارستانی متصل به مرکز خون
[۱۲]	برنامه-ریزی غیر خطی				•
					دوره زمانی
					تصمیم
					هدف
					وجود شبکه بیمارستانی متصل به مرکز خون
[۵]	عدد صحیح مختلط	•			•
					دوره زمانی
					تصمیم
					هدف
					وجود شبکه بیمارستانی متصل به مرکز خون

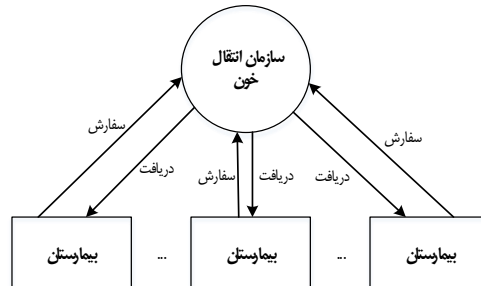
پژوهش	نمونه مدل سازی	رویکرد مواجهه با عدم قطعیت			تصمیم	دوره زمانی	وجود شبکه بیمارستانی متصل به مرکز خون
		بهبودسازی تصادفی	بهبودسازی استوار	شانس محدود			
پژوهش حاضر	عدد صحیح	•	•	•	چند دوره‌ای	•	وجود شبکه بیمارستانی متصل به مرکز خون
					موجودی (مقدار سفارش)		
					کمیته‌سازی هزینه‌های خرید، نگهداری موجودی، اتلاف و کمبود		

با توجه به پژوهش‌های پیشین، یک شکاف پژوهشی، عدم استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار در مواجهه با عدم قطعیت پارامتر تقاضا در مدیریت موجودی خون است. علی‌رغم اینکه برنامه‌ریزی تصادفی رویکردی خنثی به ریسک دارد، این رویکرد تاکنون بیشتر مورد توجه پژوهشگران برای برنامه‌ریزی زنجیره تأمین خون در شرایط عدم قطعیت تقاضای بیماران بوده است. در حالی که با توجه به اهمیت جان بیماران در سیستم‌های سلامت، برنامه‌ریزی با رویکرد بدترین حالت ممکن می‌تواند منطقی و کاربردی‌تر باشد. با این حال، تاکنون استفاده از رویکردهای بدترین حالت ممکن در یک شبکه بیمارستانی نادیده گرفته شده است. همچنین توسعه مدل‌های موجودی چنددوره‌ای با تمرکز بر ارتباط یک مرکز خون و چند بیمارستان در پیشینه پژوهش کم‌رنگ است. بنابراین در این پژوهش، یک مدل موجودی چنددوره‌ای با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریومحور در مواجهه با عدم قطعیت پارامتر تقاضای دو گروه از بیماران با هدف کاهش کمبود و اتلاف پلاکت‌ها در چند بیمارستان مطالعه می‌شود.

۳. روش‌شناسی پژوهش

تعریف مسئله. در پژوهش حاضر مسئله موجودی فرآورده‌های خونی، به صورت خاص پلاکت، در طول افق برنامه‌ریزی محدود یک هفته‌ای به صورت یک مدل چنددوره‌ای مطالعه می‌شود. اعضای مدل پیشنهادی شامل یک تأمین‌کننده خون، چند بیمارستان و بیماران هستند. بیمارستان‌ها با پیش‌بینی مصرف روبه‌جلوی خود در ابتدای هفته به سازمان انتقال خون سفارش می‌دهند. به دنبال آن سازمان انتقال خون با هدف ارتقای سلامت بیماران جامعه، هر روز پلاکت تازه با قیمت تعیین شده توسط خودش به بیمارستان‌ها ارسال می‌کند. زمان ارسال پلاکت‌ها با توجه به ارسال روزانه پلاکت‌ها از سازمان انتقال خون به بیمارستان‌ها و مقادیر تقاضای روزانه بیماران در بیمارستان‌ها قابل چشم‌پوشی است. تقاضای عادی وارد شده از سوی بیماران به

بیمارستان‌ها دارای عدم قطعیت است؛ بنابراین مقدار سفارش بهینه هر بیمارستان باید در طول افق برنامه‌ریزی طوری تعیین شود که هزینه‌های موجودی کل سیستم حداقل گردد. شکل ۱، این فرآیند را نشان می‌دهد.



شکل ۱. ساختار زنجیره تأمین مسئله پژوهش

مفروضات مسئله پژوهش به شرح زیر است:

- یک مسئله چنددوره‌ای با افق برنامه‌ریزی یک‌هفته‌ای برای تک فرآورده خونی پلاکت با عمر حداکثر پنج روز بررسی می‌شود؛
- ظرفیت سازمان انتقال خون برای تأمین پلاکت موردنیاز بیمارستان‌ها محدود است؛
- زمان ارسال سفارش‌ها از سازمان انتقال خون به بیمارستان‌ها با توجه به ارسال روزانه آن‌ها صفر فرض می‌شود؛
- سازمان انتقال خون هر روز پلاکت‌های تازه به بیمارستان‌ها می‌فرستد که از سن هر واحد پلاکت در طول دوره‌های زمانی روزانه، یک واحد کاسته می‌شود. این مفروض بر اساس سیاست حال حاضر سازمان انتقال خون و با هدف ارتقای سلامت بیماران جامعه در نظر گرفته شده است؛
- بیمارستان‌ها از سیاست مصرف FIFO برای ارضای تقاضای بیماران پیروی می‌کنند که بر طبق آن پلاکت‌هایی که عمر کمتری از آن‌ها باقی مانده است، زودتر مصرف می‌شوند؛
- در سیستم موجودی بانک خون هر بیمارستان موجودی اولیه وجود دارد؛
- دو گروه بیمار در نظر گرفته شده است که یک گروه متقاضی پلاکت تازه (یک‌روزه و دوروزه) هستند و گروه دیگر نسبت به سن پلاکت بی‌تفاوت هستند. این مفروض با توجه به این واقعیت لحاظ شده است که برای درمان بعضی بیماران بخش آنکولوژی و خون تنها پلاکت تازه ترجیح داده می‌شود. در مقابل، بیماران مرتبط با بعضی از جراحی‌های عمومی می‌توانند از گروه‌های سنی متفاوت، پلاکت دریافت کنند [۸]؛
- تقاضای عادی بیماران واردشده بر بیمارستان‌ها دارای عدم قطعیت است که با مجموعه‌ای از سناریوها قابل‌بازنمایی است؛

- تابع هدف نیز به دنبال کمینه‌سازی هزینه‌های خرید، نگهداری، اتلاف و کمبود در بدترین حالت ممکن است؛

- در صورت وقوع کمبود (برآورده‌نشدن تقاضا) و اتلاف (به‌پایان‌رسیدن عمر فرآورده خونی موردنظر) به‌ترتیب هزینه اتلاف و هزینه کمبود به سیستم تحمیل می‌شود. یادآوری این نکته لازم است که ارضانگشتن تقاضای عادی بیماران در واقعیت منجر به تعویق‌افتادن عمل‌های برنامه‌ریزی‌شده در بیمارستان می‌شود که هزینه‌ای به‌مراتب بیشتر نسبت به تمام‌شدن مهلت استفاده از پلاکت بر بیمارستان‌ها تحمیل می‌کند.

مدل‌سازی ریاضی. با توجه به مفروضات ذکرشده، در ادامه مدل ریاضی مسئله ارائه می‌شود. ابتدا اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها برای مدل‌سازی مسئله در جدول‌های ۲ تا ۴، تعریف می‌شوند.

جدول ۲. اندیس‌های مدل پیشنهادی

اندیس	توضیحات
T	دوره‌های زمانی
I	سن پلاکت
J	بیمارستان‌ها
K	سناریوها

جدول ۳. پارامترهای مدل پیشنهادی

پارامترها	توضیحات
T	طول افق برنامه‌ریزی
c	هزینه خرید پلاکت تازه از سازمان انتقال خون
H	هزینه نگهداری هر واحد پلاکت در بانک خون بیمارستان‌ها
E	هزینه کمبود هر واحد پلاکت
f	هزینه اتلاف هر واحد پلاکت
$d1_{t,k}^j$	تقاضای بیماران بی‌تفاوت به سن خون در هر دوره زمانی t برای سناریو k در هر بیمارستان j
$d0_{t,k}^j$	تقاضای بیماران نیازمند به پلاکت تازه در هر دوره زمانی t برای سناریو k در هر بیمارستان j
$v0_t^j$	مقدار موجودی اولیه از گروه‌های سنی مختلف در هر بیمارستان j
cap	ظرفیت سازمان انتقال خون

جدول ۴. متغیرهای تصمیم مدل پیشنهادی

متغیرهای تصمیم	توضیحات
$w_{t,k}^j$	تعداد پلاکت‌های هدررفته در انتهای هر دوره زمانی t برای سناریو k در هر بیمارستان j
$s1_{t,k}^j$	تعداد کل کمبود پلاکت‌ها در انتهای هر دوره زمانی t برای سناریو k در هر بیمارستان j
$s2_{t,k}^j$	تعداد کمبود پلاکت‌های تازه در انتهای هر دوره زمانی t برای سناریو k در هر بیمارستان j
x_t^j	تعداد پلاکت‌های تازه که هر بیمارستان j در ابتدای هر روز از سازمان انتقال خون دریافت می‌کند.
$v_{t,t,k}^j$	سطح موجودی پلاکت i روزه در انتهای هر دوره زمانی t برای سناریو k در هر بیمارستان j
$\pi_{t,t,k}^j$	مقدار تقاضای برآورده نشده توسط پلاکت‌های i روزه در هر دوره زمانی t برای سناریو k در هر بیمارستان j

بهترین راه برای مدیریت و تصمیم‌گیری تحت شرایط عدم قطعیت، پذیرش عدم قطعیت و تلاش برای یافتن راهی به‌منظور تخفیف یا از بین بردن اثرات منفی عدم قطعیت است. بهینه‌سازی استوار رویکردی است که بر این مبنای بنا شده و روشی مؤثر برای ساخت مدل در شرایط عدم قطعیت و تصمیم‌گیری در حضور آن است. استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مدل‌سازی شرایطی که حالت‌های عدم قطعیت حدی هزینه‌های بسیار زیادی به سیستم تحمیل می‌کنند یا هنگام وقوع بحران که اطلاعات کافی در مورد شدت حادثه و خسارت وارد شده در دسترس نیست، عملکرد خوبی از خود نشان داده است [۲]. معیارهای مختلفی برای انتخاب در میان تصمیمات استوار وجود دارد. یکی از این معیارها، تصمیم استوار مطلق است. تصمیم استوار مطلق، X_A ، به‌عنوان تصمیمی تعریف می‌شود که سعی دارد بیشینه مقدار هزینه کل را از میان تمام جواب‌های موجه برای تمام تحقق‌های ممکن پارامترهای غیرقطعی (به‌عبارت‌دیگر سناریوها)، کمینه کند [۱۶]. این معیار دارای ماهیت محافظه‌کاری است؛ زیرا اساس آن بر پیش‌بینی بدترین وضعیت ممکن است. تعریف ریاضی تصمیم استوار مطلق به‌صورت رابطه ۱، است [۱۶].

$$z_A = \max_{S \in S} f(X_A, D^S) = \min_{X \in \bigcap_{S \in S} F_S} \max_{S \in S} f(X, D^S) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه بالا، z_A مقدار تابع هدف متناظر تصمیم استوار مطلق، S مجموعه کلیه سناریوها، D^S بردار مقادیر پارامترهای غیرقطعی تحت سناریوی S و F_S مجموعه جواب‌های موجه تحت سناریوی S هستند.

حال در این بخش با توجه به قطعی نبودن پارامتر تقاضا، مدل پیشنهادی با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار و معیار معرفی شده ارائه می‌شود. در مدل استوار پیشنهادی، تقاضا پارامتری غیرقطعی است که با سناریوها نمایش داده می‌شود. رفتار تقاضا در طول روزهای هفته نیز مانا فرض می‌شود؛ بنابراین مدل همتای استوار پیشنهادی با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح به‌صورت رابطه ۲، است.

$$\min \max_{k=1, \dots, K} \left(\sum_{j=1}^n \left(\sum_{t=1}^T c \cdot x_t^j + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I h \cdot v_{i,t,k}^j + \sum_{t=1}^T f \cdot w_{t,k}^j + \sum_{t=1}^T e \cdot s_{2,t,k}^j + \sum_{t=1}^T e \cdot (s_{1,t,k}^j - s_{2,t,k}^j)^+ \right) \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

s.t.

$$\sum_j x_t^j \leq \text{cap} \quad \forall t \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$v_{1,t,k}^j = \left(x_t^j - (d_{0,t,k}^j + \pi_{3,t,k}^j - v_{1,t-1,k}^j) \right)^+ \quad \forall t, \forall j, \forall k \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$v_{2,t,k}^j = \left(v_{1,t-1,k}^j - d_{0,t,k}^j - \pi_{3,t,k}^j \right)^+ \quad \forall t, \forall j, \forall k \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$v_{3,t,k}^j = \left(v_{2,t-1,k}^j - \pi_{4,t,k}^j \right)^+ \quad \forall t, \forall j, \forall k \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$v_{4,t,k}^j = \left(v_{3,t-1,k}^j - \pi_{5,t,k}^j \right)^+ \quad \forall t, \forall j, \forall k \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$v_{5,t,k}^j = \left(v_{4,t-1,k}^j - d_{1,t,k}^j \right)^+ \quad \forall t, \forall j, \forall k \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$s_{1,t,k}^j = \left(d_{0,t,k}^j + d_{1,t,k}^j - \sum_{i=1}^{I-1} v_{i,t-1,k}^j - x_t^j \right)^+ \quad \forall t, \forall j, \forall k \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$s_{2,t,k}^j = \left(d_{0,t,k}^j - v_{1,t-1,k}^j - x_t^j \right)^+ \quad \forall t, \forall j, \forall k \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$w_{t,k}^j = v_{1,t,k}^j \quad \forall t, \forall j, \forall k \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\pi_{i,t,k}^j = \left(\pi_{i+1,t,k}^j - v_{i-1,t-1,k}^j \right)^+ \quad i = 3, 4, 5, \forall t, \forall j, \forall k \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\pi_{6,t,k}^j = d_{1,t,k}^j \quad \forall t, \forall j, \forall k \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$x_t^j \in \mathbb{Z}^+ \quad i = 1, \forall t, \forall j \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$v_{i,t,k}^j \in \mathbb{Z}^+ \quad i = 1, 2, \dots, I, \forall t, \forall j, \forall k \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$w_{t,k}^j, s_{1,t,k}^j, s_{2,t,k}^j \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall t, \forall j, \forall k \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\pi_{i,t,k}^j \in \mathbb{Z}^+ \quad i = 3, 4, 5, \forall t, \forall j, \forall k \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

تابع هدف ۲، به‌ترتیب به دنبال حداقل کردن هزینه خرید پلاکت تازه از سازمان انتقال خون، هزینه نگهداری موجودی، هزینه اتلاف، هزینه کمبود پلاکت تازه و هزینه برآورده‌نشدن تقاضای بیماران بی‌تفاوت نسبت به گروه سنی برای همه بیمارستان‌ها است. محدودیت ۳، ظرفیت سازمان انتقال خون را به‌ازای هر روز نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۴ تا ۸، سطح موجودی پلاکت‌ها در هر بیمارستان را در پایان هر دوره زمانی و برای هر سناریو تحت سیاست FIFO به‌روزرسانی می‌کنند. محدودیت‌های ۹ و ۱۰، مقدار کمبود پلاکت‌ها را در صورت برآورده‌نشدن به‌ترتیب تقاضای بیماران نیازمند به پلاکت تازه و بی‌تفاوت نسبت به گروه سنی نشان می‌دهند. محدودیت ۱۱، مقدار اتلاف در پایان هر دوره را اندازه می‌گیرد. محدودیت‌های ۱۲ و ۱۳ برای محاسبه مقدار تقاضای برآورده‌نشده از پلاکت کهنه‌تر هستند. محدودیت‌های ۱۴ تا ۱۷ برای تعریف متغیرها و نامنفی بودن آن‌ها تعریف می‌شود. به‌طورکلی تعداد محدودیت‌ها و متغیرهای مدل پیشنهادی به‌ترتیب $kT(7J + IJ + 1)$ و $TJ(4Ik + (I - 2)k + 1)$ است. این مدل همچنین یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی (به‌دلیل وجود جملات Max در تابع هدف و محدودیت‌ها غیرخطی است) است که حتی پس از خطی‌سازی همچنان متعلق به کلاس پیچیدگی Np-Hard است و حل آن در زمان چندجمله‌ای برای ابعاد بزرگ ممکن نیست [۹].

خطی‌سازی مدل. زمان حل مدل پیشنهادی به‌دلیل غیرخطی بودن مدل ناشی از محدودیت‌های ۴ تا ۱۲، افزایش می‌یابد و تضمینی برای یافتن جواب بهینه سراسری در آن وجود ندارد؛ از این رو محدودیت‌های یادشده با تکنیک زیر، به حالت خطی تبدیل می‌شوند:

$$y = \max\{x_1, x_2\} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$y \geq x_1 \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$y \geq x_2 \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$y \leq x_1 + M(1 - z_1) \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$y \leq x_2 + M(1 - z_2) \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$z_1 + z_2 = 1 \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$x_1, x_2, y \geq 0 \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

z_1 و z_2 متغیرهای باینری هستند که به‌ترتیب اگر x_1, x_2 مقدار بیشینه بگیرند، مقدار یک و در غیر این صورت صفر می‌شوند [۲۳]؛ همچنین تابع هدف ۱، به روش تغییر متغیر زیر خطی‌سازی می‌شود [۱۱].

$$y = \max\{x\} \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$y \geq x \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$x \geq 0 \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

پس از خطی‌سازی، تابع هدف ۱ با متغیر u جایگزین می‌شود و محدودیت ۲۸، به مدل پیشنهادی اضافه می‌شود.

$$u \geq \sum_{j=1}^n \left(\sum_{t=1}^T c. x_t^j + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I h. v_{i,t,k}^j + \sum_{t=1}^T f. w_{t,k}^j + \sum_{t=1}^T e. s2_{t,k}^j + \sum_{t=1}^T e. (s1_{t,k}^j - s2_{t,k}^j)^+ \right) \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

داده‌ها. در این بخش داده‌های موردنیاز برای حل مدل و تجزیه و تحلیل نتایج ارائه می‌شود. جدول ۵، مقادیر پارامترها را نشان می‌دهد. داده‌های مربوط به پارامتر تقاضا از سه بیمارستان در سطح شهر تهران جمع‌آوری شده است که جدول ۶، میانگین روزانه تقاضا را به ترتیب برای روزهای شنبه تا جمعه نشان می‌دهد. ۱۰ درصد تقاضای آخرین روز هفته هر بیمارستان به‌عنوان مقدار اولیه گروه‌های سنی مختلف و مقدار ظرفیت سازمان انتقال خون در هر روز ۱۰۰ کیسه پلاکت تازه با توجه به مجموع تقاضای بیمارستان‌ها فرض می‌شود. با توجه به در نظر گرفتن دو نوع بیمار در مدل پیشنهادی، به ترتیب ۱/۸ و ۷/۸ میانگین تقاضای روزانه به بیماران نیازمند به پلاکت تازه و بیماران بی تفاوت نسبت به عمر پلاکت اختصاص یافته است [۸]. در این پژوهش همچنین سه، پنج و هفت سناریو نیز برای حل مدل استوار به ترتیب با فاصله ۱۰ درصدی، ۲۰ درصدی و ۳۰ درصدی از میانگین روزانه به صورت تصادفی به نحوی تولید شده‌اند که رفتارهای متفاوتی از بیمارستان‌ها برای روزهای با تقاضای بالا، کم و متوسط را نشان دهند.

جدول ۵. مقادیر پارامترها [۷]

پارامتر	توضیحات	مقدار پارامتر
c	هزینه خرید پلاکت تازه از سازمان انتقال خون	$538 \frac{\$}{unit}$
h	هزینه نگهداری پلاکت در هر بیمارستان	$1725 \frac{\$}{unit}$
e	هزینه کمبود در هر بیمارستان	$1500 \frac{\$}{unit}$
f	هزینه اتلاف	$150 \frac{\$}{unit}$

جدول ۶. مقادیر تقاضا برای روزهای شنبه تا جمعه

تقاضا	توضیحات	مقدار
d_t^1	مقدار تقاضای عادی بیمارستان اول در هر روز	۵۲، ۷۳، ۶۰، ۶۸، ۷۵، ۹۹، ۵۹
d_t^2	مقدار تقاضای عادی بیمارستان دوم در هر روز	۱۷، ۱۵، ۲۸، ۳۲، ۳۱، ۳۹، ۱۶
d_t^3	مقدار تقاضای عادی بیمارستان سوم در هر روز	۸، ۷، ۱۰، ۹، ۹، ۶

نتایج. مدل پیشنهادی به کمک نرم‌افزار GAMS ۲۴/۳/۱ توسط حل‌کننده CPLEX روی رایانه‌ای با پردازنده Intel Core i5 با سرعت ۱/۱۰ گیگاهرتز و حافظه داخلی هشت گیگابایت شد و حداکثر سه ساعت به نرم‌افزار برای یافتن جواب بهینه اجازه داده شده است. جدول ۷، نتایج حل مدل را در حالت قطعی و غیرقطعی بودن پارامتر تقاضا نشان می‌دهد. در مدل قطعی، بیمارستان‌ها بر اساس میانگین مقادیر تقاضا در گذشته و با توجه به موجودی اولیه در بانک خون خود، صرفاً به اندازه مصرف بیماران خود سفارش می‌دهند؛ در نتیجه سیستم موجودی شبکه بیمارستانی موردنظر با اتلاف مواجه نمی‌شود. در مقابل این سیستم موجودی با کمبود مواجه می‌شود؛ زیرا مجموع میانگین تقاضای روزانه بیمارستان‌ها نسبت به ظرفیت روزانه سازمان انتقال خون بیشتر است. جدول ۷، همچنین نتایج محاسباتی مدل استوار را با در نظر گرفتن تعداد سناریوهای مختلف نیز نشان می‌دهد. در این حالت، مقدار تابع هدف به دلیل تحمیل هزینه بیشتر ناشی از نوسان تقاضا از مقدار تابع هدف در حالت قطعی بیشتر است.

جدول ۷. نتایج عددی مدل پایه در حالت قطعی و استوار

نوع مدل	تعداد سناریو	GAP (%)	زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف	مقدار سفارشی	مقدار موجودی نگهداری شده	مقدار اتلاف	مقدار کمبود
قطعی	-	۰	۱۳	۳۷۵۵۴۸/۷۵۰	۶۷۰	۷۱	۰	۱۰
استوار	۳	۰/۰۱	۱۰۸۰۰	۷۳۲۸۳۹/۵۰۰	۶۷۹	۸۷۰	۴۳	۲۴۰
استوار	۵	۰/۰۱	۱۰۸۰۰	۸۱۰۴۵۸/۷۵۰	۷۰۰	۵۲۷	۸	۲۸۸
استوار	۷	۰/۰۵	۱۰۸۰۰	۸۲۸۴۲۷/۵۰۰	۷۰۰	۲۶۲	۰	۲۹۹

در دنیای واقعی، استفاده از جواب انتظار و دیدن وقت‌گیر یا حتی غیرممکن است؛ زیرا ممکن است اطلاعات کامل به هر دلیلی قابل‌دستیابی نباشند. از طرف دیگر، در بعضی موارد ممکن است پیدا کردن تابع توزیع پارامترهای تصادفی، ساخت مدل تصادفی یا استوار و حل آن نیز دشوار باشد؛ در نتیجه یک رویکرد ساده، جایگزین کردن پارامترهای تصادفی با مقدار میانگین آن‌ها است (مشابه رویکرد جواب طرح‌شده در سطر اول جدول ۷). حل مسئله پژوهش با این رویکرد به مواجه شدن مدل با اتلاف و کمبود در شرایط عدم قطعیت منجر می‌شود که هزینه

زیادی را به بیمارستان‌ها تحمیل می‌کند. درحالی‌که به‌طور خاص در این پژوهش، استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار با در نظر گرفتن سناریو و حل آن به کم‌شدن هزینه‌ها منجر می‌شود. ضرر ناشی از نادیده گرفتن عدم قطعیت، «ارزش جواب استوار» (VRS)^۱ نامیده می‌شود. برای محاسبه ارزش جواب استوار از رابطه ۲۹، استفاده می‌شود که در آن WEV^۲، عملکرد بدترین حالت ممکن جواب مقدار میانگین را تحت سناریوهای مختلف محاسبه می‌کند. برای محاسبه VRS از فرمول زیر استفاده می‌شود. در این رابطه، RS^۳ مقدار تابع هدف مدل استوار است.

$$VRS = WEV - RS \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

محاسبه VRS به ترتیب برای سه، پنج و هفت سناریو در جدول ۸، نشان می‌دهد که استفاده از رویکرد استوار به‌طور متوسط ۷/۶ درصد صرفه‌جویی در هزینه‌ها نسبت به نادیده گرفتن عدم قطعیت ایجاد می‌کند.

جدول ۸. ارزش جواب استوار به تفکیک سناریوها

تعداد سناریوها	WEV	VRS	(VRS/RS)*100
سه	۸۴۶۰۸۲/۰۰۰	۱۱۳۲۴۲/۵	۱۵/۴۵
پنج	۸۳۵۲۴۶/۷۵۰	۲۴۷۸۸	۳/۰۵
هفت	۸۶۴۰۹۳/۵۰۰	۳۵۶۶۶	۴/۳۰

تحلیل حساسیت. در این قسمت دو پارامتر ظرفیت سازمان انتقال خون و هزینه کمبود برای تحلیل حساسیت عملکرد مدل پیشنهادی انتخاب شده است. نتایج محاسباتی مدل استوار با در نظر گرفتن سه، پنج و هفت سناریو نشان داده می‌شود. در نخستین حالت، تغییر ظرفیت سازمان انتقال خون با ثابت نگه‌داشتن هزینه‌های موجودی تحلیل شده است. شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نمایان‌گر نتایج به‌دست‌آمده به تفکیک تعداد سناریوهای مختلف هستند. نتایج جدول‌های ۹، ۱۰ و ۱۱، نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت سازمان انتقال خون تا سطح مشخصی، مقدار سفارش بیمارستان‌ها افزایش و متعاقباً مقدار کمبود کاهش می‌یابد و در ادامه، افزایش ظرفیت بیش از این مقدار، بی‌اثر است؛ همچنین ارزش جواب استوار نیز با افزایش سطح ظرفیت از نقطه ۷۵ به ۱۷۵، به‌طور متوسط ۸ درصد در هزینه‌های سیستم موجودی صرفه‌جویی ایجاد می‌کند. بیشتر مدل‌ها در مدت‌زمان داده‌شده به‌صورت بهینه حل نشده‌اند؛ اما شکاف قابل‌قبولی بین جواب نهایی و کران پایین مسئله وجود دارد.

1. Value of Robust Solution
2. Worst-case of Expected Value
3. Robust Solution

جدول ۹. بررسی تغییرات ظرفیت سازمان انتقال خون با در نظر گرفتن سه سناریو

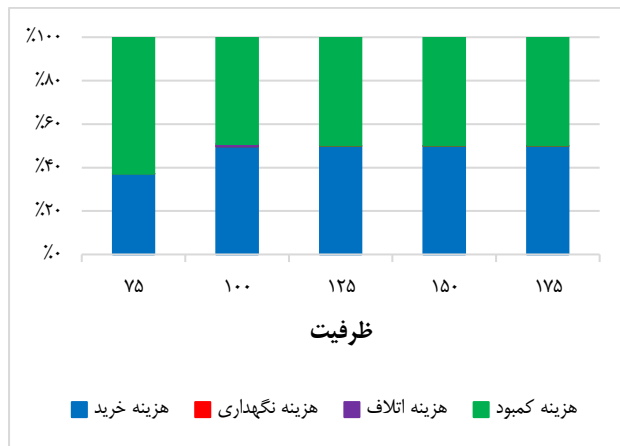
ظرفیت سازمان انتقال خون	زمان حل (ثانیه)	GAP (%)	مقدار تابع هدف	VRS	WEV	(VRS/RS)*100
۷۵	۱۰۸۰۰	۰	۷۶۱۹۳۸/۷۵۰	۹۳۷۱۵/۷۵	۸۵۵۶۵۴/۵۰۰	۱۲/۲۹
۱۰۰	۱۰۸۰۰	۰/۰۱	۷۳۲۸۳۹/۵۰۰	۱۱۳۲۴۲/۵	۸۴۶۰۸۲/۰۰۰	۱۵/۴۵
۱۲۵	۱۰۸۰۰	۰/۰۱	۷۳۰۸۲۰/۷۵۰	۱۱۷۲۲۵/۷۵	۸۴۸۰۴۶/۵۰۰	۱۶/۰۴
۱۵۰	۱۰۸۰۰	۰/۱۱	۷۳۰۷۹۷/۰۰۰	۱۱۷۲۳۵/۷۵	۸۴۸۰۳۲/۷۵۰	۱۶/۰۴
۱۷۵	۱۰۸۰۰	۰/۳۱	۷۳۰۷۹۷/۰۰۰	۱۱۷۲۳۵/۷۵	۸۴۸۰۳۲/۷۵۰	۱۶/۰۴

جدول ۱۰. بررسی تغییرات ظرفیت سازمان انتقال خون با در نظر گرفتن پنج سناریو

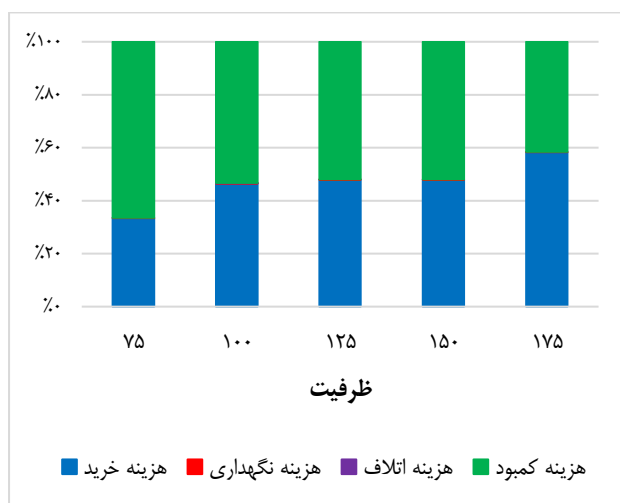
ظرفیت سازمان انتقال خون	زمان حل (ثانیه)	GAP (%)	مقدار تابع هدف	WEV	VRS	(VRS/RS)*100
۷۵	۱۰۸۰۰	۰/۰۱	۸۴۳۶۵۱/۲۵۰	۸۸۴۱۷۰/۷۵۰	۴۰۵۱۹/۵۰	۴/۸۰
۱۰۰	۱۰۸۰۰	۰/۰۱	۸۱۰۴۵۸/۷۵۰	۸۳۵۲۴۶/۷۵۰	۲۴۷۸۸/۰۰	۳/۰۵
۱۲۵	۱۰۸۰۰	۰/۵۹	۸۰۶۳۰۳/۲۵۰	۸۳۴۹۵۱/۷۵۰	۲۸۶۴۸/۵۰	۳/۵۵
۱۵۰	۱۰۸۰۰	۰/۰۲	۸۰۶۱۷۳/۲۵۰	۸۳۴۹۳۸/۰۰۰	۲۸۷۶۴/۷۵	۳/۵۶
۱۷۵	۱۰۸۰۰	۰/۰۴	۸۰۶۱۵۵/۷۵۰	۸۳۴۹۳۸/۰۰۰	۲۸۷۸۲/۲۵	۳/۵۷

جدول ۱۱. بررسی تغییرات ظرفیت سازمان انتقال خون با در نظر گرفتن هفت سناریو

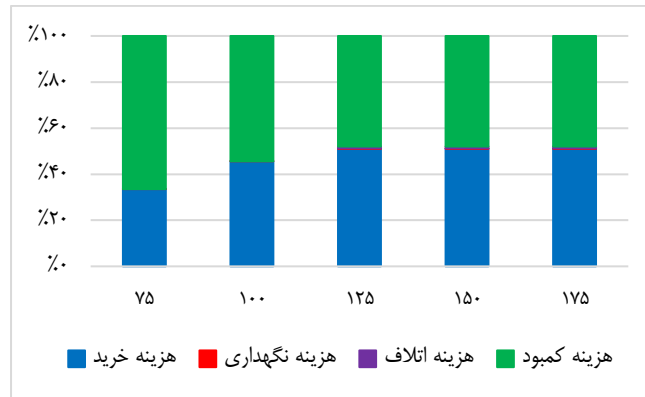
ظرفیت سازمان انتقال خون	زمان حل (ثانیه)	GAP (%)	مقدار تابع هدف	WEV	VRS	(VRS/RS)*100
۷۵	۱۰۸۰۰	۰/۰۲	۸۴۳۶۵۱/۲۵۰	۸۸۷۰۲۵/۰۰۰	۴۳۳۷۳/۷۵	۵/۱۴
۱۰۰	۱۰۸۰۰	۰/۰۵	۸۲۸۴۲۷/۵۰۰	۸۶۴۰۹۳/۵۰۰	۳۵۶۶۶/۰۰	۴/۳۰
۱۲۵	۱۰۸۰۰	۰/۵۹	۸۱۵۵۴۶/۵۰۰	۸۶۲۹۲۲/۷۵۰	۴۷۳۷۶/۳۵	۵/۸۰
۱۵۰	۱۰۸۰۰	۰/۵۹	۸۱۵۵۴۶/۵۰۰	۸۶۲۹۱۴/۰۰۰	۴۷۳۶۷/۵۰	۵/۸۰
۱۷۵	۱۰۸۰۰	۳/۱۸	۸۱۵۵۴۶/۵۰۰	۸۶۲۹۱۴/۰۰۰	۴۷۳۶۷/۵۰	۵/۸۰



شکل ۲. اثر ظرفیت سازمان انتقال خون بر هزینه‌های موجودی با در نظر گرفتن سه سناریو



شکل ۳. اثر ظرفیت سازمان انتقال خون بر هزینه‌های موجودی با در نظر گرفتن پنج سناریو



شکل ۴. اثر ظرفیت سازمان انتقال خون بر هزینه‌های موجودی با در نظر گرفتن پنج سناریو

در دومین حالت، اثر تغییرات هزینه کمبود بر مدل به تفکیک سناریوها ارائه شده است. جدول‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهند که با افزایش هزینه کمبود، مقدار سفارش و مقدار کمبود به ترتیب از روندی افزایشی و کاهشی پیروی می‌کنند. با توجه به تغییر این پارامتر، منطقی است که بیمارستان مقدار سفارش خود را افزایش دهد و مقدار کمبود کاهش یابد؛ اما مقدار سفارش با توجه به ظرفیت BTO در مدل پایه (مقدار ۱۰۰ واحد پلاکت برای هر روز) می‌تواند تا سقف ۷۰۰ واحد پلاکت در هفته افزایش یابد؛ همچنین نتایج VRS در این حالت در بازه ۲/۲۳ تا ۱۶/۴۳ تغییر می‌کند که معادل انحراف متوسط ۸/۷۳۴ درصدی مقادیر WEV از RS است.

جدول ۱۱. بررسی تغییرات هزینه کمبود با در نظر گرفتن سه سناریو

هزینه کمبود	زمان حل (ثانیه)	GAP (%)	مقدار تابع هدف	مقدار سفارشی	مقدار کمبود	WEV	VRS	(VRS/RS)*100
۱۰۰۰	۱۰۰۰	-/۱۱	۵۹۳۵۸۸/۲۵۰	۳۰۹	۴۲۷	۶۸۶۰۵/۷۵۰	۹۳۰۱۷/۵	۱۵/۶۷
۱۲۵۰	۱۰۰۰	۰	۶۷۲۳۳۱/۵۰۰	۶۷۸	۲۴۵	۷۶۶۱۲۸/۲۵۰	۹۳۷۹۶/۷۵	۱۳/۹۵
۱۵۰۰	۱۰۰۰	-/۰۱	۷۳۲۸۳۹/۵۰۰	۶۷۹	۲۴۰	۸۴۶۰۸۲/۰۰۰	۱۱۳۲۴۲/۵	۱۵/۴۵
۱۷۵۰	۱۰۰۰	۰	۷۹۳۴۲۴/۵۰۰	۶۷۹	۲۴۴	۹۲۵۷۸۲/۰۰۰	۱۳۳۲۵۷/۵	۱۶/۶۸
۲۰۰۰	۱۰۰۰	-/۰۱	۸۵۲۴۷۰/۰۰۰	۷۰۰	۲۳۲	۱۰۰۵۴۲۰/۷۵۰	۱۵۲۹۵۰/۷۵	۱۷/۹۴

جدول ۱۲. بررسی تغییرات هزینه کمبود با در نظر گرفتن پنج سناریو

هزینه کمبود	زمان حل (ثانیه)	GAP %	مقدار تابع هدف	مقدار سفارش	مقدار کمبود	WEV	VRS	(VRS/R S)*100
۱۰۰۰	۱۰۸۰۰	-۰/۰۷	۶۴۹۴۵۱	۳۴۲	۴۶۵	۷۵۶۲۱۰/۵۰۰	۱۰۶۷۵۹/۵	۱۶/۴۳
۱۲۵۰	۱۰۸۰۰	.	۷۳۸۹۶۵	۷۰۰	۲۷۲	۷۵۶۲۱۰/۵۰۰	۱۷۳۴۵/۵	۲/۳۳
۱۵۰۰	۱۰۸۰۰	.	۸۱۰۴۵۸/۷۵۰	۷۰۰	۲۸۸	۸۳۵۲۴۶/۷۵۰	۲۴۷۸۸	۳/۰۵
۱۷۵۰	۱۰۸۰۰	.	۸۸۱۹۶۳/۷۵۰	۷۰۰	۲۸۴	۹۱۴۳۰۳/۰۰۰	۳۳۳۳۹/۲۵	۳/۶۶
۲۰۰۰	۱۰۸۰۰	.	۹۵۳۴۶۷/۵۰۰	۷۰۰	۲۸۴	۹۹۲۴۸۸/۰۰۰	۳۹۰۲۰/۵	۴/۰۹

جدول ۱۳. بررسی تغییرات هزینه کمبود با در نظر گرفتن هفت سناریو

هزینه کمبود	زمان حل (ثانیه)	GA P%	مقدار تابع هدف	مقدار سفارش	مقدار کمبود	WEV	VRS	(VRS/R S)*100
۱۰۰۰	۱۰۸۰۰	-۰/۱۱	۶۶۹۵۴۳/۷۵۰	۵۴۰	۳۷۹	۶۹۶۵۴۷/۲۵۰	۲۷۰۰۳/۵	۴/۰۳
۱۲۵۰	۱۰۸۰۰	-۰/۰۴	۷۵۳۵۷۱/۲۵۰	۷۰۰	۲۹۶	۷۸۰۷۹۸/۵۰۰	۲۷۲۲۷/۲۵	۳/۶۱
۱۵۰۰	۱۰۸۰۰	-۰/۰۵	۸۲۸۴۲۷/۵۰۰	۷۰۰	۲۹۹	۸۶۴۰۹۳/۵۰۰	۳۵۶۶۶	۴/۳۰
۱۷۵۰	۱۰۸۰۰	-۰/۰۶	۹۰۳۱۳۰/۷۵۰	۶۹۹	۲۹۸	۹۴۵۵۶۳/۵۰۰	۴۲۴۳۲/۷۵	۴/۶۹
۲۰۰۰	۱۰۸۰۰	-۰/۰۶	۹۷۷۵۴۵/۰۰۰	۷۰۰	۲۹۷	۱۰۲۸۳۹۴/۷۵۰	۵۰۸۴۹/۷۵	۵/۲۰

بینش مدیریتی. وجود تقاضای غیرقطعی در زنجیره تأمین خون، چالشی مهم برای مدیریت کارآمد سیستم موجودی خون در بیمارستان‌ها محسوب می‌شود. با توجه به اینکه خون و فرآورده‌های خونی، به‌خصوص پلاکت‌ها، کالاهایی هستند که می‌توانند جان انسان‌ها را نجات دهند، استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار، به دلیل بهره‌گیری از رویکردی محافظه‌کارانه، می‌تواند نقش مهمی در حفظ جان بیماران و نیز کنترل هزینه‌های ناشی از لغو عملیات درمان داشته باشد. همچنین نتایج محاسباتی بینش مفیدی برای تصمیم‌گیرندگان و مدیران زنجیره تأمین خون فراهم کرده است. به‌صورت خاص، هزینه نادیده‌گرفتن عدم‌قطعیت می‌تواند بسیار قابل‌توجه باشد و به کمبود زیادی در سیستم منجر شود. به‌تبع استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار باعث صرفه‌جویی زیادی در هزینه‌های سیستم شده است؛ همچنین دو عامل ظرفیت سازمان انتقال خون برای برآورده کردن تقاضای بیمارستان‌ها و هزینه کمبود دو پارامتر مهم و تأثیرگذار بر عملکرد سیستم هستند. در صورت افزایش هزینه‌های کمبود، بیمارستان‌ها به سمت افزایش سفارش سوق داده می‌شوند. حال چنانچه ظرفیت سازمان انتقال خون برای برآورده کردن مقادیر افزایش یافته سفارش کافی نباشد، سیستم دچار مقدار کمبود شدیدی خواهد شد؛ بنابراین ظرفیت سازمان انتقال خون به‌عنوان یک عامل اهرمی می‌تواند میزان کارایی سیستم را تحت

تأثیر قرار دهد؛ در حالی که هزینه کمبود به‌عنوان پارامتر نشان‌دهنده میزان اهمیت بیمارستان‌ها به عدم‌لغو عمل‌های جراحی و درمانی، می‌تواند بر رفتار سفارش‌دهی آنها اثرگذار باشد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پلاکت به‌عنوان مایعی حیاتی مشتق‌شده از خون انسان در درمان بیماری‌های متعددی مثل کم‌خونی، سرطان و بسیاری از جراحی‌های عمومی کاربرد دارد. تنها تولیدکننده این مایع فسادپذیر، انسان‌هایی هستند که داوطلبانه خون خود را اهدا می‌کنند؛ از این‌رو عرضه آن از سوی اهداکنندگان نامنظم است؛ همچنین، تقاضای بیماران نیز دارای عدم‌قطعیت است. کمینه‌سازی کمبود در درجه نخست و اتلاف در درجه دوم، مهم‌ترین چالش در زنجیره تأمین خون محسوب می‌شود و ایجاد تعادل بین مقدار اتلاف و کمبود پلاکت با توجه به طول عمر محدود آن بسیار مشکل است. کمبود پلاکت در نقطه تقاضا باعث افزایش مرگ‌ومیر می‌شود و هزینه‌های زیادی را بر جامعه تحمیل می‌کند. از طرفی اتلاف آن علاوه بر تحمیل هزینه‌هایی مثل هزینه نگهداری و تولید، احتمال کمبود در آینده را افزایش می‌دهد؛ بنابراین در این پژوهش ابتدا یک مدل عدد صحیح با در نظر گرفتن فسادپذیری و دو گروه از بیماران و چند بیمارستان در ارتباط با یک مرکز خون ارائه شد. سپس با توجه به وجود عدم قطعیت تقاضای بیماران مدل هم‌تای استوار آن نیز ارائه شد؛ سپس نتایج محاسبات با جمع‌آوری داده‌های واقعی از سه بیمارستان تهران به کمک نرم‌افزار GAMS به‌دست آمد. نتایج حاکی از آن است که مقدار کمبود بیمارستان‌ها به ظرفیت مرکز خون وابسته است؛ به‌علاوه استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار به کاهش کمبود و اتلاف در مقایسه با جواب‌های مدل ریاضی مسئله با فرض قطعیت پارامترها و در نتیجه صرفه‌جویی در هزینه‌های بیمارستان منجر می‌شود.

زمینه‌های پژوهشی مختلفی در ادامه این پژوهش می‌توانند بررسی شوند. در ادامه با این فرض که اعلام سفارش و دریافت فرآورده‌های خونی روزانه باشد، می‌توان این مدل را به مدل‌های تصادفی چند مرحله‌ای یا بهینه‌سازی استوار تطبیق‌پذیر در یک شبکه بیمارستانی توسعه داد. یکی از مفروضات این تحقیق، در نظر گرفتن تقاضای عادی است. پس می‌توان مدل پیشنهادی را برای حالت تقاضای اورژانسی بیماران نیز توسعه داد. استفاده از روش حل دقیق نیز یکی دیگر از زمینه‌های پژوهشی است که می‌تواند مورد توجه قرار گیرد؛ همچنین با توجه به نامنظم بودن اهدای خون از سوی داوطلبان، ظرفیت سازمان انتقال خون نیز به‌عنوان پارامتری غیرقطعی یا تصمیمات مرتبط با تولید می‌توانند مورد توجه پژوهشگران آتی قرار گیرند.

منابع

1. Beliën, J., & Forcé, H. (2012). Supply chain management of blood products: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 217(1), 1–16.
2. Bozorgi Amiri, A., Mansoori, S., Pishvae, M. (2017). Multi-objective Relief Chain Network Design for Earthquake Response under Uncertainties. *Journal of Industrial Management Perspective*, 7(1), 9-36. (In Persian)
3. Cohen, M. A., & Pierskalla, W. P. (1975). Management Policies for a Regional Blood Bank. *Transfusion*, 15(1), 58–67.
4. Dehghani, M., & Abbasi, B. (2018). An age-based lateral-transshipment policy for perishable items. *International Journal of Production Economics*, 198, 93–103.
5. Dehghani, M., Abbasi, B. & Oliveira, F. (2021). Proactive transshipment in the blood supply chain: A stochastic programming approach. *Omega*, 98, 102112.
6. Doodman, M., Bozorgi Amiri, A. (2020). Integrate Blood Supply Chain Network Design with Considering Lateral Transshipment under Uncertainty. *Journal of Industrial Management Perspective*, 9(4), 9-40. (In Persian)
7. Dillon, M., Oliveira, F., & Abbasi, B. (2017). A two-stage stochastic programming model for inventory management in the blood supply chain. *International Journal of Production Economics*, 187, 27–41.
8. Gunpinar, S., & Centeno, G. (2015). Stochastic integer programming models for reducing wastages and shortages of blood products at hospitals. *Computers and Operations Research*, 54, 129–141.
9. Garey, M.R. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman & Co., New York, NY.
10. Haijema, R., Wal, J. Van Der, & Dijk, N. M. Van. (2005). Blood Platelet Production: a multi-type perishable inventory problem. *Operations Research Proceedings 2004*, Springer, New York, NY.
11. Hasani, A., Zegordi, S. H., & Nikbakhsh, E. (2012). Robust closed-loop supply chain network design for perishable goods in agile manufacturing under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 50, 37–41.
12. Hosseini, Z., & Abbasi, B. (2018). The inventory centralization impacts on sustainability of the blood supply chain. *Computers and Operations Research*, 89, 206–212.
13. Katsaliaki, K., & Brailsford, S. (2007). Using simulation to improve the blood supply chain. *Journal of the Operational Research Society*, 58, 219–227.
14. Kopach, R., & Carter, M. (2008). Tutorial on constructing a red blood cell inventory management system with two demand rates. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1051–1059.
15. Kouchaki Tajani, T., Mohtashami, A., Amiri, M., Ehtesham Rasi, R. (2021). 'Presenting a Robust Optimization Model to Design a Comprehensive Blood Supply Chain under Supply and Demand Uncertainties. *Journal of Industrial Management Perspective*, 11(1), 81-116 (In Persian).
16. Kouvelis, P., & Yu, G. (1997). *Robust Discrete Optimization and Its Applications*. Springer, New York, NY.
17. Labadie, N., Guerrero, W. J., & Labadie, N. (2019). Survey on Blood Supply Chain Management: Models and Methods. *Computers & Operations Research*, 112, 104756.

18. Nahmias, S. (1982). Perishable Inventory Theory: A Review. *Operations Research*, 30(4), 680-708.
19. Najafi, M., Ahmadi, A., & Zolfagharinia, H. (2017). Blood inventory management in hospitals: Considering supply and demand uncertainty and blood transshipment possibility. *Operations Research for Health Care*, 15, 43-56.
20. Osorio, A. F., Brailsford, S. C., & Smith, H. K. (2015). A structured review of quantitative models in the blood supply chain: A taxonomic framework for decision-making. *International Journal of Production Research*, 53(24), 7191–7212.
21. Ryttilä, J. S., & Spens, K. M. (2006). Using simulation to increase efficiency in blood supply chains. *Management Research News*, 29(12), 801–819.
22. Van Dijk, N., Haijema, R., Van Der Wal, J. & Sibinga, C.S. (2009). Blood platelet production: a novel approach for practical optimization. *Transfusion*, 49(3), 411-420.
23. Yaghoubi, S., & Kamvar, M. (2017). Management of Products Consumption in Blood Supply Chain Considering Lateral Transshipment between Hospitals. *Industrial Management Studies*, 15(47), 93-119. (In Persian)