

مدیریت مصرف فرآورده‌ها در زنجیره‌ی تأمین خون با در نظر گرفتن امکان انتقال جانبی بین بیمارستان‌ها (مطالعه‌ی موردی: شهر تهران)

سعید یعقوبی*، مهدی کامور**

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۸ - تاریخ پذیرش: ۹۶/۴/۱۷

چکیده

وجود عواملی نظیر محدود بودن منابع تأمین خون، فسادپذیری، شرایط خاص لازم برای نگهداری فرآورده‌های خونی و هزینه‌های بالای ناشی از تلفات و کمبود خون در مراکز درمانی، موجب شده مدیریت مصرف فرآورده‌های خونی، به‌عنوان یکی از مسائل پیچیده و حائز اهمیت در حوزه‌ی سیستم‌های سلامت شناخته شود. در این مقاله، یک مدل ریاضی خطی به‌منظور بهینه‌سازی مصرف فرآورده‌های خونی در بیمارستان‌ها ارائه می‌شود که در آن علاوه بر امکان توزیع فرآورده‌ها توسط مرکز خون بین نقاط تقاضا، امکان انتقال جانبی خون بین نقاط تقاضا نیز به‌عنوان راهکاری جهت مقابله با عدم قطعیت تقاضا در نظر گرفته شده است. علاوه‌براین، معیار تازگی خون و لزوم مصرف خون تازه برای برخی عمل‌های جراحی که در دنیای واقعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است نیز در این مدل لحاظ شده است. در نهایت، به‌منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، یک مطالعه موردی با داده‌های مربوط به مرکز خون و بیمارستان‌های شهر تهران ارائه و نتایج حاصل از حل آن بررسی شده است.

واژگان کلیدی: زنجیره‌ی تأمین خون، فسادپذیری، انتقال جانبی، تازگی خون، شرایط عدم قطعیت.

* استادیار، دانشگاه علم و صنعت ایران، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

** دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران

مقدمه

مدیریت صحیح مصرف فرآورده‌های خونی در مراکز درمانی، امروزه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در حوزه‌ی سلامت و درمان شناخته می‌شود. علی‌رغم پیشرفت‌های گسترده‌ی صورت گرفته در زمینه‌های مختلف پزشکی، هنوز دانشمندان موفق به یافتن جایگزین مناسب و کاملی برای خون انسان نشده‌اند، در نتیجه تنها منبع برای جایگزینی خون یک فرد، خون اهدایی توسط سایر افراد است (آلفونسو، ۲۰۱۴). همه‌روزه تعداد بیماران زیادی بنا به دلایل مختلف نیاز به تزریق فرآورده‌های خونی پیدا می‌کنند، به نحوی که به‌طور متوسط از هر ۳ نفر، یک نفر در طول حیات خود نیاز به تزریق خون خواهد داشت. برخی افراد نظیر بیماران دیالیزی و مبتلایان به تالاسمی و هموفیلی، برای ادامه‌ی حیات به‌طور دائم نیاز به دریافت فرآورده‌های خونی دارند و برخی دیگر از بیماران به دلیل انجام عمل‌های جراحی، نیازمند دریافت فرآورده‌های خونی هستند (پیرسکالا، ۲۰۰۵). در مواردی نظیر عمل جراحی قلب باز یا عمل‌های جراحی مربوط به نوزادان، بنا به برخی الزامات پزشکی فقط باید از فرآورده‌های خونی با تازگی زیاد (سن کم) استفاده شود (اوسوریو، ۲۰۱۵).

میزان مصرف فرآورده‌های خونی در بیمارستان‌ها تابعی از تعداد حوادث و سوانح روزانه است و ماهیتی غیرقطعی دارد و این امر موجب می‌شود در اغلب موارد، پیش‌بینی میزان دقیق تقاضای روزانه‌ی بیمارستان‌ها با میزان تقاضای عملی آن‌ها مطابقت نداشته باشد (سیلوا، ۲۰۱۳). در چنین شرایطی بیمارستان‌ها ترجیح می‌دهند تا مقدار بیشتری از فرآورده‌های خونی سفارش دهند تا ذخیره‌ی اطمینانی جهت مقابله با کمبودهای احتمالی در اختیار داشته باشند؛ اما سفارش بیش از حد نیاز فرآورده‌های خونی توسط بیمارستان‌ها، به علت وجود برخی عوامل و محدودیت‌ها در زنجیره‌ی تأمین خون مقدور نیست. در این میان اولین و مهم‌ترین عامل، محدود بودن میزان خون موجود در مرکز خون ناحیه‌ای است. مرکز خون ناحیه‌ای مسئولیت توزیع خون بین بیمارستان‌های مختلف را عهده‌دار است و با توجه به محدود بودن میزان فرآورده‌های پردازش شده‌ی در دسترس، روزانه مقدار معینی از هر یک از فرآورده‌های خونی در اختیار دارد. دلیل دیگری که باعث می‌شود سفارش بیش از حد نیاز بیمارستان‌ها مشکل‌ساز

باشد، فسادپذیری فرآورده‌های خونی است. گلبول قرمز و پلاکت به‌عنوان پرمصرف‌ترین فرآورده‌های خونی، به ترتیب عمری معادل ۴۲ و ۵ روز دارند که به‌طور متوسط ۲ روز از این زمان نیز صرف انجام آزمایش‌ها و پردازش‌های لازم به‌منظور جداسازی این فرآورده‌ها از خون کامل می‌شود (فونتاین، ۲۰۱۰). در صورتی که فرآورده‌های خونی سفارش داده‌شده توسط بیمارستان‌ها، پیش از به اتمام رسیدن عمر مفیدشان مصرف نشوند، منقضی شده و باید معدوم گردند. از آنجا که هزینه‌های استحصال فرآورده‌های خونی بسیار بالاست، منقضی شدن هر واحد از فرآورده‌های خونی هزینه‌های زیادی در پی خواهد داشت. به‌طور مثال هزینه‌ی استحصال هر واحد پلاکت از خون کامل در آمریکا معادل ۸۴ دلار است (قندفروش، ۲۰۱۰). از سوی دیگر مدیریت فرآورده‌های خونی، از این لحاظ که با سلامتی و جان افراد در ارتباط است، حساسیت بالایی دارد، به‌طوری که وقوع کمبود در هر یک از نقاط تقاضا، هزینه‌های جبران‌ناپذیری به‌دنبال خواهد داشت. با توجه به این موارد، اغلب مطالعات صورت گرفته در حوزه‌ی نگهداری و توزیع خون به دنبال ارائه‌ی راهکارها و سیاست‌هایی جهت کمینه‌ساختن هزینه‌های ناشی از کمبود و اتلاف خون بوده‌اند. در این مقاله نیز، استفاده از انتقال جانبی خون بین بیمارستان‌ها، به‌عنوان راهکاری جهت افزایش قابلیت پاسخگویی به تقاضای بیمارستان‌ها و کاهش هزینه‌های ناشی از کمبود و اتلاف خون در زنجیره‌ی تأمین خون، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. انتقال جانبی خون بین بیمارستان‌ها در مواردی که مرکز خون بنا به هر دلیلی قادر به تأمین نیاز بیمارستان‌ها به‌طور کامل نباشد و یا عدم قطعیت در تقاضای روزانه‌ی بیمارستان‌ها موجب برهم خوردن پیش‌بینی‌های قبلی شود، می‌تواند از وقوع کمبود در بیمارستان‌ها جلوگیری کند و انعطاف‌پذیری سیستم جهت مقابله با عدم قطعیت را افزایش می‌دهد؛ این امر به‌خصوص در مناطق شهری و پرتردد که فاصله‌ی بیمارستان‌ها از یکدیگر کم و فاصله‌ی مرکز خون از برخی بیمارستان‌ها زیاد باشد، نمود بیشتری خواهد داشت.

مرور ادبیات

از سال ۱۹۶۰ که مباحث مربوط به زنجیره‌ی تأمین خون، توجه محققین را به خود جلب نموده تا به‌حال، مطالعات زیادی در زمینه‌ی چگونگی توزیع و نگهداری فرآورده‌های خونی

صورت گرفته است. پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه، علاوه بر کاربرد درزمینه‌ی خون، سهم بسزایی در توسعه‌ی روش‌های اثربخش درزمینه‌ی مدیریت موجودی سایر محصولات فسادپذیر نیز داشته‌اند (ناهمیاس، ۱۹۸۲).

(پگلز و همکاران، ۱۹۷۰)، با استفاده از مفاهیم زنجیره مارکوف، عملکرد سیاست‌های مختلف مصرف خون در بیمارستان‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از سیاست مصرف فایفو^۱ که در آن اولویت مصرف با فرآورده‌های دارای عمر باقیمانده‌ی کمتر است، موجب کاهش میزان اتلاف خون در بیمارستان‌ها و بهبود عملکرد بیمارستان می‌شود. مقالات (پیرسکالا و همکاران، ۱۹۷۲) و (کوهن و همکاران، ۱۹۷۵) نیز درزمینه‌ی مقایسه‌ی عملکرد بیمارستان‌های مختلف از نظر مصرف خون، برتری سیاست مصرف فایفو نسبت به سایر سیاست‌های مصرف را نشان می‌دهند.

یکی دیگر از موضوعات زنجیره تأمین خون که مطالعات زیادی پیرامون آن صورت گرفته، ارزیابی عملکرد بیمارستان‌ها بر اساس میزان خون فاسد شده در آن‌ها است. (یاهنکه و همکاران، ۱۹۷۳)، شاخصی جدید برای مقایسه‌ی عملکرد بیمارستان‌ها بر اساس میزان خونی که در بانک خون هر بیمارستان منقضی می‌شود ارائه دادند. ساپوتتریس، (۱۹۸۵)، مطالعه‌ای تحلیلی بر روی مقایسه‌ی عملکرد بیمارستان‌ها در شرایط گوناگون انجام داد و به این نتیجه رسید که عملکرد بیمارستان‌ها رابطه‌ی مستقیمی با متوسط سن فرآورده‌های خونی که توسط مرکز خون به آن‌ها تحویل داده می‌شود دارد، به طوری که هر چه متوسط سن خون‌های ارسالی به بیمارستان بیشتر باشد، احتمال فاسد شدن خون در بیمارستان بیشتر می‌شود.

مطالعه در خصوص سیاست‌های مختلف توزیع فرآورده‌های خونی بین بیمارستان‌ها، از دیگر مباحثی است که در مقالات مختلف این حوزه، پیرامون آن بحث و بررسی صورت گرفته است. سیاست گردش^۲ و سیاست توقیفی^۳، دو سیاست کلی هستند که به منظور توزیع خون بین بیمارستان‌ها توسط مراکز خون قابل استفاده هستند. در سیاست گردش^۱، خون توسط مرکز

1- FIFO(First In First Out)

2- Rotation Policy

3- Retention Policy

خون به بیمارستان تخصیص داده می‌شود و در صورتی که پس از سپری شدن دوره‌ای مشخص، خون ارسالی در آن بیمارستان مصرف نشده باشد، به منظور توزیع مجدد به مرکز خون ارجاع داده می‌شود؛ اما در سیاست توقیفی، خون ارسالی به بیمارستان دیگر به مرکز خون عودت داده نمی‌شود و تا آخر عمر مفیدش در همان بیمارستان باقی می‌ماند. (پراستاکوس و همکاران، ۱۹۸۱، ۱۹۸۰، ۱۹۷۸)، به مقایسه‌ی عملکرد دو سیاست گردشی و توقیفی و تأثیر به کارگیری آن‌ها در هزینه‌های کمبود و تلفات زنجیره تأمین خون، تحت شرایط و مفروضات مختلف پرداختند.

(هملمایر و همکاران، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰)، بهینه‌سازی فرآیند تحویل خون به بیمارستان‌ها را تحت حالتی که مقدار و تاریخ ارسال فرآورده‌ها به بیمارستان‌ها توسط مرکز خون تعیین شود (بیمارستان‌ها نقشی در صدور سفارش نداشته باشند) و تقاضای بیمارستان‌ها قطعی و مشخص باشد (عدم وقوع کمبود) بررسی نمودند.

(هایجما و همکاران، ۲۰۰۷)، با استفاده از مفاهیم برنامه‌ریزی پویا و به کمک شبیه‌سازی، بهینه‌سازی تولید و نگهداری پلاکت در بانک‌های خون را با توجه به هزینه‌های قسمت‌های مختلف بررسی نمودند و معیار تازگی خون را نیز در مسئله‌شان در نظر گرفتند.

(گانپینار و همکاران، ۲۰۱۵)، با ارائه‌ی مدلی ریاضی معیار تازگی خون را نیز در تقاضای بیمارستان‌ها در نظر گرفتند. این مدل برای یک مرکز خون و یک بیمارستان ارائه شده است، در حالی که مدل مقاله‌ی حاضر، شبکه‌ای متشکل از یک مرکز خون و تعدادی بیمارستان را شامل می‌شود.

(عاروان و توکلی مقدم، ۲۰۱۵)، یک مدل طراحی شبکه ارائه کردند که مکان‌یابی تسهیلات را باهدف حداقل کردن هزینه‌ها و زمان و در نظر گرفتن فسادپذیری بررسی می‌نماید و ارتباط عرضی بین بیمارستان‌ها نیز در آن در نظر گرفته شده است. در این مطالعه مراکز جمع‌آوری و مراکز خون مکان‌یابی شده‌اند و سپس تخصیص بیمارستان‌ها و مراکز صورت گرفته است.

(حسینی فرد و همکاران، ۲۰۱۶)، اهمیت وجود یک سیستم متمرکز کنترل موجودی در سطح مراکز درمانی را بررسی نمودند. در این مقاله سیاست کنترل موجودی به صورت $(s-1, s)$ در نظر گرفته شده است و بازپرسازی توسط سطح اول زنجیره تأمین خون (مرکز خون ناحیه‌ای) و به صورت احتمالی انجام می‌پذیرد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که داشتن یک سیستم موجودی متمرکز در زنجیره تأمین خون منجر به افزایش پایداری و کاهش میزان کمبود و اتلاف در بیمارستان‌ها خواهد شد. در این خصوص می‌توان برای مطالعات بیشتر به (امیری و همکاران، ۱۳۹۳) مراجعه نمود.

سؤالات تحقیق

- ۱- استفاده از سیاست ارسال جانبی خون بین بیمارستان‌ها، چه تأثیری بر عملکرد سیستم توزیع خون و پاسخگویی سیستم به تقاضای بیمارستان‌ها دارد؟
- ۲- به کارگیری سیاست ارسال جانبی خون بین بیمارستان‌ها، چه تأثیری بر هزینه‌های مختلف زنجیره‌ی تأمین خون (شامل هزینه‌های حمل و نقل، نگهداری موجودی، هزینه‌های کمبود و هزینه‌های مربوط به اتلاف فرآورده‌ها) دارد و در مجموع آیا استفاده از این راهکار موجب کاهش هزینه‌های کل سیستم می‌شود یا خیر؟
- ۳- آیا به کارگیری سیاست مصرف فایفو برای مصرف فرآورده‌های خونی در بیمارستان‌ها موجب از بین رفتن اتلاف خون در بیمارستان‌ها می‌شود؟

مدل‌سازی

در این قسمت پس از بیان مفروضات مسئله‌ی موردنظر و تعریف مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم لازم، مدل ریاضی مسئله‌ی توزیع پلاکت ارائه و تشریح خواهد شد.

مفروضات مدل

- این مدل قابل به کارگیری برای شبکه‌ای متشکل از یک مرکز خون ناحیه‌ای و تعدادی بیمارستان متقاضی دریافت فرآورده‌های خونی می‌باشد. مرکز خون ناحیه‌ای وظیفه‌ی پاسخگویی به سفارش بیمارستان‌ها را بر عهده دارد و باید در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی،

موجودی فرآورده‌های خونی را به گونه‌ای مدیریت نماید که هزینه‌های کل سیستم کمینه شود.

• مدل قابل استفاده برای فرآورده‌های فسادپذیر مشتق از خون کامل (پلاکت و گلبول قرمز) است.

• به طور متوسط دو روز برای انجام فرآیندهای مربوط به آزمایش و تبدیل خون کامل به زیر فرآورده‌ها لازم است، در این مدل چون فقط مسئله‌ی نگهداری و توزیع فرآورده‌ها مدنظر است و به فرآیند تولید فرآورده‌ها نمی‌پردازیم، این گونه فرض می‌شود که فرآورده‌ها پس از پردازش کامل و درحالی که دو روز از عمر مفید آن‌ها سپری شده، در اختیار مرکز خون ناحیه‌ای قرار داده شده‌اند و آماده‌ی ارسال به نقاط تقاضا هستند.

• علاوه بر امکان ارسال مستقیم فرآورده توسط مرکز خون به بیمارستان‌ها، امکان انتقال جانبی بین بیمارستان‌ها نیز در مدل لحاظ شده است. تنها در صورتی اجازه‌ی انتقال جانبی بین دو بیمارستان توسط مدل صادر خواهد شد که بیمارستان ارسال کننده، بیش از یک مقدار مشخص از فرآورده‌ی موردنظر در بانک خون خود داشته باشد تا پس از ارسال آن به سایر بیمارستان‌ها، خود دچار کمبود نشود.

• در این مدل عدم قطعیت فقط برای تقاضای پلاکت و در قالب سناریوهای مختلف با احتمال وقوع مشخص در نظر گرفته شده است و برای ظرفیت تولید و عرضه‌ی پلاکت توسط مرکز خون در هر دوره مقداری مشخص و قطعی در نظر گرفته می‌شود.

• مدل ارائه شده یک مدل دو مرحله‌ای است؛ X_{jt} و Y_{ijt} متغیرهای تصمیم مرحله‌ی اول و مستقل از سناریوهای مربوط به تقاضا هستند و میزان پلاکت ارسالی به بیمارستان‌های مختلف در ابتدای هر روز را نشان می‌دهند. سایر متغیرهای تصمیم، متغیرهای مرحله دو و وابسته به سناریوهای احتمالی تقاضا هستند.

• سیاست مصرف فرآورده در بیمارستان‌ها، سیاست فایفو است.

حال با توجه به این مفروضات، مدل ریاضی مسئله را ارائه می‌کنیم.

مجموعه‌ها

I : مجموعه‌ی مقادیر ممکن برای سن فرآورده‌ها که در آن عمر مفید فرآورده I روز است و فرآورده‌های با سن کمتر یا مساوی f تازه محسوب می‌شوند.

$$(i \in I \text{ و } i = 1, 2, \dots, f, \dots, I)$$

J : مجموعه‌ی بیمارستان‌ها ($j, h \in J$)

T : مجموعه‌ی روزهای افق برنامه‌ریزی ($t \in T$)

S : مجموعه‌ی سناریوهای مختلف برای تقاضای فرآورده‌ها

پارامترها

b : هزینه‌ی کمبود هر واحد فرآورده خونی

w : هزینه‌ی منقضی شدن هر واحد از فرآورده خونی

h : هزینه‌ی نگهداری هر واحد فرآورده خونی در بانک خون بیمارستان‌ها

c : هزینه‌ی انتقال هر واحد فرآورده خونی از مرکز خون به بیمارستان‌ها

α : هزینه‌ی انتقال جانبی هر واحد فرآورده خونی بین بیمارستان‌ها

M_j : فاصله‌ی بیمارستان j از مرکز خون

N_{jh} : فاصله‌ی بیمارستان j از بیمارستان h

θ : پارامتر مربوط به توزیع سنی فرآورده‌های ارسالی از مرکز در دوره‌ی t

$$(\sum_{i=1}^I \theta_{it} = 1)$$

P_t : کل مقدار فرآورده‌ای که مرکز در دوره‌ی t به بیمارستان‌ها می‌تواند

تخصیص دهد.

DY_{jts} : میزان تقاضای فرآورده‌ی تازه در بیمارستان j در دوره t و تحت سناریو s

DO_{jts} : میزان تقاضای بیمارستان j در دوره t و تحت سناریو s که فاکتور تازگی در

آن اهمیت ندارد.

CL_j : موجودی اطمینان موردنیاز از فرآورده‌ی خونی در بیمارستان j

$capH_j$: ظرفیت نگهداری فرآورده در بیمارستان j

M : عدد به مقدار کافی بزرگ

P_s : احتمال وقوع سناریو S

متغیرهای تصمیم

x_{jt} : مقدار فرآورده‌ی ارسالی از طرف مرکز به بیمارستان j در دوره t

y_{ijt} : مقدار فرآورده‌ی i روزه که در دوره‌ی t از طرف مرکز خون به بیمارستان j فرستاده می‌شود.

Q_{ijhts} : مقدار فرآورده‌ی i روزه که در دوره‌ی t و تحت سناریو S از بیمارستان j به بیمارستان h ارسال می‌گردد.

S_{ijts} : متغیر کمکی، نشان‌دهنده‌ی مقدار فرآورده i روزه‌ای است که در دوره‌ی t و تحت سناریو S مصرف نشده و به دوره‌ی بعد منتقل می‌شود.

r_{jts} : میزان کمبود در بیمارستان j در دوره‌ی t و تحت سناریو S

Inv_{ijts} : میزان موجودی فرآورده i روزه در بیمارستان j در انتهای دوره‌ی t و تحت سناریو S

V_{jts} : میزان فرآورده منقضی شده در انتهای دوره‌ی t در بیمارستان j و تحت سناریو S

Z_{ijts} : متغیر صفر و یک؛ در صورت مصرف شدن فرآورده i روزه در دوره‌ی t و تحت سناریو S در بیمارستان j مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

تابع هدف و محدودیت‌ها

$$\text{Min } Z = \sum_j \sum_t c_j \cdot x_{jt} + \sum_s P_s \cdot (\sum_i \sum_j \sum_t h_i \cdot \text{Inv}_{ijts} + \sum_j \sum_t w_j \cdot V_{jts} + \sum_j \sum_t b_j \cdot r_{jts} + \sum_i \sum_j \sum_h \sum_t \alpha_{jh} \cdot N_{ijh} \cdot Q_{ijh} \cdot Q_{ijh}) \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_j x_{jt} \leq P_t \quad \forall t \quad (2)$$

$$y_{ijt} = x_{jt} \cdot \theta_{it} \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (3)$$

$$Z_{ijts} \geq Z_{(i-1)jts}, \quad i = 1, \dots, f, \forall j, t, s \quad (4)$$

$$Z_{ijts} \geq Z_{(i-1)jts} \quad (5)$$

$$i = (f + 2), \dots, I, \forall j, t, s$$

$$(Z_{ijts} - Z_{(i-1)jts})(\text{Inv}_{(i-1)j(t-1)s} + y_{ijt} + \sum_h Q_{ihjts} - \sum_h Q_{ijh} \cdot Q_{ijh}) \geq S_{ijts} \quad (6)$$

$$, i = 1, \dots, f, \forall j, \forall t, \forall s$$

$$(Z_{ijts} - Z_{(i-1)jts})(\text{Inv}_{(i-1)j(t-1)s} + y_{ijt} + \sum_h Q_{ihjts} - \sum_h Q_{ijh} \cdot Q_{ijh}) \geq S_{ijts} \quad (7)$$

$$, i = (f + 2), \dots, I, \forall j, \forall t, \forall s$$

$$DY_{jts} + \pi_{jts} = \sum_{i=1}^f [(\text{Inv}_{(i-1)j(t-1)s} + y_{ijt} + \sum_h Q_{ihjts} - \sum_h Q_{ijh} \cdot Q_{ijh}) \cdot Z_{ijts} - S_{ijts}] + r_{jts} \quad (8)$$

$$, \forall j, \forall t, \forall s$$

$$DO_{jts} - \pi_{jts} = \sum_{i=f+1}^I [(\text{Inv}_{(i-1)j(t-1)s} + y_{ijt} + \sum_h Q_{ihjts} - \sum_h Q_{ijh} \cdot Q_{ijh}) \cdot Z_{ijts} - S_{ijts}] \quad (9)$$

$$, \forall j, \forall t, \forall s$$

$$DY_{jts} + DO_{jts} - \sum_i (\text{Inv}_{(i-1)j(t-1)s} + y_{ijt} + \sum_h Q_{ihjts} - \sum_h Q_{ijh} \cdot Q_{ijh}) \leq r_{jts} \quad (10)$$

$$, \forall j, \forall t, \forall s$$

$$Inv_{ijts} = (1 - Z_{ijts})(Inv_{(i-1)j(t-1)s} + y_{ijt} + \sum_h Q_{ihjts} - \sum_h Q_{ijhts}) + (Z_{ijts} - Z_{(i-1)jts}) \cdot S_{ijts}, \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (11)$$

$$\sum_i Q_{ijhts} \leq \sum_{i=1}^I Inv_{(i-1)j(t-1)s} + x_{jt} - CL_j, \forall j, \forall h, \forall t, \forall s \quad (12)$$

$$V_{jts} = Inv_{ijts} \quad i = I, \forall j, \forall t \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{I-1} Inv_{ijts} \leq capH_j, \forall j, \forall t, \forall s \quad (14)$$

$$Inv_{ijts} = 0 \quad i = 0, \forall j, \forall t, \forall s \quad (15)$$

$$Inv_{ijts} = 0 \quad t = 0, \forall j, \forall i, \forall s \quad (16)$$

$$x_{jt}, r_{jts}, V_{jts}, Inv_{ijts}, S_{ijts}, Q_{ijhts}, y_{ijt} \geq 0 \\ Z_{ijt} \in \{0,1\} \quad (17)$$

رابطه‌ی (۱) به‌عنوان تابع هدف مسئله، به دنبال کمینه ساختن کل هزینه‌های سیستم توزیع و نگهداری فرآورده‌ی خونی است. این هزینه‌ها به ترتیب عبارت‌اند از: هزینه‌ی ارسال فرآورده از مرکز خون به بیمارستان‌ها، هزینه‌ی نگهداری فرآورده در بیمارستان‌ها، هزینه‌ی ناشی از منقضی شدن فرآورده‌ی خونی در بیمارستان‌ها، هزینه‌ی مواجهه با کمبود در بیمارستان‌ها و در نهایت هزینه‌های انتقال جانبی فرآورده بین بیمارستان‌ها. محدودیت (۲) مربوط به ظرفیت ارسال فرآورده توسط مرکز خون به بیمارستان‌ها در هر دوره است. محدودیت (۳) توزیع سنی فرآورده‌های فرستاده‌شده توسط مرکز خون را مشخص می‌کند. محدودیت (۴) و (۵) مربوط به سیاست مصرف فرآورده‌ها به‌صورت فایفو در بیمارستان‌ها هستند، محدودیت (۴) برای فرآورده‌های با تازگی بالا و محدودیت (۵) مختص فرآورده‌های غیرتازه هستند و با توجه به اینکه تقاضا در دو کلاس مجزا در نظر گرفته شده است می‌بایست نحوه‌ی مصرف این دو دسته به‌صورت مجزا کنترل شود. محدودیت (۶) حد بالایی متغیر کمکی S_{ijts} را برای فرآورده‌های با تازگی بالا مشخص می‌کند، این متغیر کمکی میزان پلاکت i روزه‌ای که در

دوره‌ی t در بیمارستان J مصرف نشده و باید با در نظر گرفتن یک روز افزایش سن به دوره‌ی بعد منتقل شود را نشان می‌دهد. محدودیت (۷) مشابه محدودیت (۶) است، با این تفاوت که برای فرآورده‌های غیر تازه نوشته شده است. محدودیت (۸) مربوط به برآورده شدن تقاضای خون تازه است و محدودیت (۹) مربوط به برآورده شدن تقاضای خون غیر تازه π_{jtS} میزانی از تقاضای خون غیر تازه است که به دلیل عدم دسترسی بودن خون غیر تازه در بیمارستان J، با خون تازه پاسخ داده می‌شود. مقدار کمبود فقط برای خون تازه و رابطه‌ی (۸) لحاظ شده و در رابطه‌ی (۹) در نظر گرفته نشده، دلیل این امر آن است که اگر خون غیر تازه با کمبود مواجه شود، جهت پاسخ به تقاضای آن به سراغ خون تازه می‌رویم، لذا در نظر گرفتن کمبود در رابطه‌ی (۸) کافی است. محدودیت (۱۰) حد پایین میزان کمبود خون در هر بیمارستان را با توجه به مقادیر ورودی و خروجی هر بیمارستان در هر دوره مشخص می‌کند. محدودیت (۱۱) رابطه‌ی تعادل موجودی برای فرآورده‌ی خونی است که به کمک آن فرآورده‌هایی که طی دوره‌ی جاری در بیمارستان مصرف شده‌اند، با یک روز افزایش سن به دوره‌ی بعدی منتقل می‌شوند. محدودیت (۱۲) سقف میزان خونی که هر بیمارستان در هر دوره می‌تواند به سایر بیمارستان‌ها ارسال کند را با در نظر گرفتن میزان موجودی اطمینان مورد نیاز خود بیمارستان مشخص می‌کند. محدودیت (۱۳) فرآورده‌هایی که در پایان عمر مفید خود قرار دارند و هنوز مصرف نشده‌اند را به‌عنوان فرآورده‌های منقضی شده در نظر می‌گیرد. محدودیت (۱۴) مربوط به ظرفیت نگهداری فرآورده‌ها در بانک خون هر بیمارستان است. مطابق محدودیت (۱۵) فرآورده‌ی صفر روزه نداریم و بر طبق محدودیت (۱۶) نیز موجودی اولیه‌ی همه‌ی بیمارستان‌ها صفر در نظر گرفته می‌شود. رابطه‌ی (۱۷) نیز دامنه‌ی مقادیر مجاز برای متغیرهای تصمیم مسئله را مشخص می‌کند.

خطی سازی

به منظور خطی سازی مدل، از تکنیک خطی سازی شرالی و امین که برای خطی ساختن حاصل ضرب متغیرهای عدد صحیح در پیوسته ارائه شده است استفاده می‌کنیم (شرالی و امین، ۱۹۹۲)، (یحیی زاده اندواری و همکاران، ۱۳۹۵).

روابط (۱۸) تا (۲۱) مربوط به خطی سازی حاصل ضرب $Z_{ijts} \cdot Inv_{(i-1)j(t-1)s}$ هستند.

$$Z_{ijts} \cdot Inv_{(i-1)j(t-1)s} = ZI_{ijts} \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (18)$$

$$ZI_{ijts} \leq Inv_{(i-1)j(t-1)s} \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (19)$$

$$ZI_{ijts} \leq Z_{ijts} \cdot M \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (20)$$

$$ZI_{ijts} \geq (Z_{ijts} - 1) \cdot M + Inv_{(i-1)j(t-1)s} \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (21)$$

روابط (۲۲) تا (۲۵) مربوط به خطی سازی حاصل ضرب $Z_{(i-1)jts} \cdot Inv_{(i-1)j(t-1)s}$ هستند.

$$Z_{(i-1)jts} \cdot Inv_{(i-1)j(t-1)s} = ZII_{(i-1)jts} \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (22)$$

$$ZII_{(i-1)jts} \leq Inv_{(i-1)j(t-1)s} \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (23)$$

$$ZII_{(i-1)jts} \leq Z_{(i-1)jts} \cdot M \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (24)$$

$$ZII_{(i-1)jts} \geq (Z_{(i-1)jts} - 1) \cdot M + Inv_{(i-1)j(t-1)s} \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (25)$$

روابط (۲۶) تا (۲۹) مربوط به خطی سازی حاصل ضرب $Z_{ijts} \cdot y_{ijt}$ هستند.

$$Z_{ijts} \cdot y_{ijt} = ZY_{ijts} \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (26)$$

$$ZY_{ijts} \leq y_{ijt} \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (27)$$

$$ZY_{ijts} \leq Z_{ijts} \cdot M \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (28)$$

$$ZY_{ijts} \geq (Z_{ijts} - 1) \cdot M + y_{ijt} \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (29)$$

روابط (۳۰) تا (۳۳) مربوط به خطی سازی حاصل ضرب $Z_{(i-1)jts} \cdot y_{ijt}$ هستند.

$$Z_{(i-1)jts} \cdot y_{ijt} = ZYY_{ijts} \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (30)$$

$$ZYY_{ijts} \leq y_{ijt} \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (31)$$

$$ZYY_{ijts} \leq Z_{(i-1)jts} \cdot M \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (32)$$

$$ZYY_{ijts} \geq (Z_{(i-1)jts} - 1) \cdot M + y_{ijt} \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (33)$$

روابط (۳۴) تا (۳۷) مربوط به خطی سازی حاصل ضرب $Z_{ijts} \cdot Q_{ihjts}$ هستند.

$$Z_{ijts} \cdot Q_{ihjts} = ZQ_{ijts} \quad , \forall i, \forall j, \forall h, \forall t, \forall s \quad (34)$$

$$ZQ_{ijts} \leq Q_{ihjts} \quad , \forall i, \forall j, \forall h, \forall t, \forall s \quad (35)$$

$$ZQ_{ijts} \leq Z_{ijts} \cdot M \quad , \forall i, \forall j, \forall h, \forall t, \forall s \quad (36)$$

$$ZQ_{ijts} \geq (Z_{ijts} - 1) \cdot M + Q_{ihjts} \quad , \forall i, \forall j, \forall h, \forall t, \forall s \quad (37)$$

روابط (۳۸) تا (۴۱) مربوط به خطی سازی حاصل ضرب $Z_{(i-1)jts} \cdot Q_{ihjts}$ هستند.

$$Z_{(i-1)jts} \cdot Q_{ihjts} = ZQQ_{ijts} \quad , \forall i, \forall j, \forall h, \forall t, \forall s \quad (38)$$

$$ZQQ_{ijts} \leq Q_{ihjts} \quad , \forall i, \forall j, \forall h, \forall t, \forall s \quad (39)$$

$$ZQQ_{ijts} \leq Z_{(i-1)jts} \cdot M \quad , \forall i, \forall j, \forall h, \forall t, \forall s \quad (40)$$

$$ZQQ_{ijts} \geq (Z_{(i-1)jts} - 1) \cdot M + Q_{ihjts}, \forall i, \forall j, \forall h, \forall t, \forall s \quad (41)$$

روابط (۴۲) تا (۴۵) مربوط به خطی سازی حاصل ضرب $Z_{ijts} \cdot S_{ijts}$ هستند.

$$Z_{ijts} \cdot S_{ijts} = ZS_{ijts}, \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (42)$$

$$ZS_{ijts} \leq S_{ijts}, \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (43)$$

$$ZS_{ijts} \leq Z_{ijts} \cdot M, \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (44)$$

$$ZS_{ijts} \geq (Z_{ijts} - 1) \cdot M + S_{ijts}, \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (45)$$

روابط (۴۶) تا (۴۹) مربوط به خطی سازی حاصل ضرب $Z_{(i-1)jts} \cdot S_{ijts}$ هستند.

$$Z_{(i-1)jts} \cdot S_{ijts} = ZSS_{ijts}, \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (46)$$

$$ZSS_{ijts} \leq S_{ijts}, \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (47)$$

$$ZSS_{ijts} \leq Z_{(i-1)jts} \cdot M, \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (48)$$

$$ZSS_{ijts} \geq (Z_{(i-1)jts} - 1) \cdot M + S_{ijts}, \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (49)$$

با اعمال تغییر متغیرهای ذکر شده در روابط (۱۸)، (۲۲)، (۲۶)، (۳۰)، (۳۴)، (۳۸)، (۴۲) و (۴۶)، محدودیت‌های (۶)، (۷)، (۸)، (۹)، (۱۱) در مدل اولیه، به ترتیب به محدودیت‌های خطی (۵۰) تا (۵۴) تبدیل می‌شوند:

$$\begin{aligned} & (ZI_{ijts} + ZY_{ijts} + \sum_h ZQ_{ihjts} - \sum_h ZQ_{ijhts}) - (ZII_{(i-1)jts} - \\ & ZYY_{ijts} + \sum_h ZQQ_{ihjts} - \sum_h ZQQ_{ijhts}) \geq S_{ijts} \quad (50) \\ & , i = 1, \dots, f, \forall j, \forall t, \forall s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (ZI_{ijts} + ZY_{ijts} + \sum_h ZQ_{ihjts} - \sum_h ZQ_{ijhts}) - (ZII_{(i-1)jts} - \\ & ZYY_{ijts} + \sum_h ZQQ_{ihjts} - \sum_h ZQQ_{ijhts}) \geq S_{ijts} \quad (51) \\ & , i = (f + 2), \dots, I, \forall j, \forall t, \forall s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DY_{jts} + \pi_{jts} = \sum_{i=1}^f [ZI_{ijts} + ZY_{ijts} + \sum_h ZQ_{ihjts} - \\ \sum_h ZQ_{ijhts} - S_{ijts}] + r_{jts} \quad , \forall j, \forall t, \forall s \quad (52) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DO_{jts} - \pi_{jts} = \sum_{i=f+1}^I [ZI_{ijts} + ZY_{ijts} + \sum_h ZQ_{ihjts} - \\ \sum_h ZQ_{ijhts} - S_{ijts}] \quad , \forall j, \forall t, \forall s \quad (53) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Inv_{ijts} = (Inv_{(i-1)j(t-1)s} + y_{ijt} + \sum_h Q_{ihjts} - \sum_h Q_{ijhts}) - \\ (ZI_{ijts} + ZY_{ijts} + \sum_h ZQ_{ihjts} - \sum_h ZQ_{ijhts}) + ZS_{ijts} - \\ ZSS_{ijts} \quad , \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (54) \end{aligned}$$

مطالعه‌ی موردی

به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، یک مطالعه‌ی موردی با داده‌های مربوط به یک مرکز خون و ۸ بیمارستان (بیمارستان امام خمینی (ره)، دکتر شریعتی، آیت... طالقانی، رسول اکرم (ص)، بیمارستان علی اصغر (ع)، میلاد، بقیه‌الله و بیمارستان کودکان مفید) در شهر تهران در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بیمارستان‌های فرآوردی مورد بررسی در این مثال، پلاک خون است. عمر مفید پلاکت ۵ روز است که دو روز از این زمان صرف جداسازی پلاکت از خون کامل و انجام تست‌های تعیین سلامت این فرآورده می‌شود. بنابراین پلاکت‌هایی که به منظور ارسال به بیمارستان‌ها در اختیار مرکز خون قرار می‌گیرد، حداکثر ۳ روز از عمر مفیدشان باقی است. ($I = 3$). طبق قوانین پزشکی، پلاکت‌هایی که سن آن‌ها کمتر از ۳ روز است، پلاکت تازه محسوب می‌شوند (بلین و همکاران، ۲۰۱۲). در برخی موارد نظیر جراحی‌های تومور مغزی، پیوند مغز استخوان و برخی بیماری‌های خونی،

باید لزوماً از پلاکت تازه استفاده شود، در حالی که برای جراحی‌های عمومی، رادیودرمانی و شیمی‌درمانی، می‌توان از پلاکت‌های غیرتازه نیز استفاده نمود (ون دیک و همکاران، ۲۰۰۹). شهر تهران دارای ۱۷ مرکز جمع‌آوری ثابت خون در ۲۲ منطقه است. خون‌های جمع‌آوری شده در این مراکز پس از پالایش اولیه، جهت انجام تست و پردازش کامل‌تر به مرکز خون وصال، واقع در خیابان وصال شیرازی ارسال می‌شوند و پس از تبدیل خون کامل به فرآورده‌های مختلف خونی از جمله پلاکت، این فرآورده‌ها بین بیمارستان‌ها و مراکز درمانی توزیع می‌شوند. اطلاعات مربوط به ۸ بیمارستان واقع در شهر تهران که بیشترین مصرف پلاکت را در میان بیمارستان‌های این شهر دارند، جمع‌آوری شده است. فواصل بیمارستان‌ها تا مرکز خون و فاصله‌ی بیمارستان‌ها از یکدیگر، با استفاده از نقشه‌های گوگل محاسبه شده‌اند.

مقادیر مربوط به هزینه‌های کمبود و منقضی شدن هر واحد پلاکت به ترتیب معادل ۳۵۰ هزار تومان، ۲۲۰ هزار تومان و هزینه‌ی نگهداری هر واحد پلاکت در هر روز ۵۰۰ تومان در نظر گرفته شده‌اند. هزینه‌ی حمل هر واحد پلاکت از مرکز خون به بیمارستان‌ها برابر ۵ تومان به ازای هر یک متر و هزینه‌ی انتقال جانبی خون بین بیمارستان‌ها نیز ۱۰ تومان به ازای هر یک متر در نظر گرفته شده است. ظرفیت عرضه‌ی پلاکت توسط مرکز خون دارای توزیع تصادفی در بازه‌ی [۲۵۰ و ۵۰۰] در نظر گرفته شده است.

جهت نشان دادن عدم قطعیت موجود در بخش تقاضای پلاکت، میزان تقاضای روزانه‌ی بیمارستان‌ها، تحت سه سناریوی بدینانه، واقع بینانه و خوش بینانه منظور شده است (در حالت خوشبینانه تقاضای روزانه‌ی پلاکت در کمترین مقدار خود قرار دارد و در حالت بدبینانه با بیشترین مقدار ممکن برای تقاضای پلاکت بیمارستان‌ها مواجه خواهیم بود). در حالت واقع بینانه، تقاضای پلاکت تازه در هر یک از بیمارستان‌ها دارای توزیع تصادفی یکنواخت در بازه‌ی [۸ و ۱۲] و تقاضای پلاکت غیرتازه دارای توزیع یکنواخت در بازه‌ی [۲۵ و ۴۵] در نظر گرفته شده‌اند. در حالت بدبینانه که تقاضای پلاکت تازه و غیرتازه در بیمارستان‌ها بیشتر از حالت عادی خواهد بود، تقاضای پلاکت تازه، به صورت تصادفی در بازه‌ی [۱۲ و ۱۶] و

تقاضای پلاکت غیرتازه در بازه‌ی [۳۰ و ۵۰] در نظر گرفته شده است. در سناریوی خوش‌بینانه‌ی تقاضا نیز، مقادیر تقاضای پلاکت تازه در بازه‌ی [۵ و ۹] و تقاضای پلاکت غیرتازه در بازه‌ی [۱۸ و ۳۸] قرار دارند. طول دوره‌ی موردبررسی نیز یک هفته است.

حل مدل و تحلیل نتایج

مدل خطی شده‌ی مسئله، با داده‌های ذکر شده در قسمت قبل، توسط نرم‌افزار گمز و حل‌کننده‌ی سیپلکس، یک‌بار تحت شرایطی که انتقال جانبی پلاکت بین بیمارستان‌ها مجاز است و یک‌بار تحت شرایطی که انتقال پلاکت بین بیمارستان‌ها مجاز نیست حل شده که خلاصه‌ی نتایج به‌دست آمده در جدول (۱) قابل مشاهده است. شایان ذکر است که مقادیر ارائه شده در جدول (۱) به تفکیک سناریوهای سه‌گانه‌ی تقاضای پلاکت ارائه شده و سطر آخر جدول متوسط هزینه‌های حاصل از سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج حاصل از حل مثال عددی در جدول (۱)، می‌توان مقایسه‌ای بین هزینه‌های نگهداری موجودی، توزیع، کمبود، ائتلاف و مجموع هزینه‌های کل شبکه در دو حالت ذکر شده انجام داد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به کارگیری سیاست انتقال جانبی خون بین بیمارستان‌ها در حالت دوم، موجب شده است که کمبود خون در بیمارستان‌ها در هر سه سناریو از بین برود؛ این در حالی است که در حالت عدم استفاده از انتقال جانبی خون بین بیمارستان‌ها، در سناریوهای واقع‌بینانه و بدبینانه بخشی از تقاضای بیمارستان‌ها توسط مرکز خون بدون پاسخ مانده و این امر موجب ایجاد کمبود در سیستم شده است. میزان کمبود در سناریوی بدبینانه ۲۷ واحد پلاکت است که میزان قابل توجهی به شمار می‌رود.

جدول (۱). خلاصه‌ی نتایج حاصل از حل مدل

حالت (۲): وجود انتقال جانبی بین بیمارستان‌ها			حالت (۱): عدم وجود انتقال جانبی بین بیمارستان‌ها			سناریوهای مختلف برای تقاضا
بدبینانه	واقع‌بینانه	خوش‌بینانه	بدبینانه	واقع‌بینانه	خوش‌بینانه	

0	0	0	27	6	0	میزان کمبود پلاکت (تعداد واحد)
0	0	0	0	0	0	میزان پلاکت منقضی شده
1605	1605	1605	1424	1424	1424	میزان خون ارسالی از مرکز به بیمارستان‌ها
441	401	249	0	0	0	میزان انتقال جانبی خون بین بیمارستان‌ها
2343	1794	851	1983	1047	216	میزان خون نگهداری شده در بیمارستان‌ها
0	0	0	9450000	2100000	0	هزینه‌های کمبود (تومان)
1171500	897000	425500	991500	523500	108000	هزینه‌ی نگهداری (تومان)
13230000	12030000	7470000	0	0	0	هزینه‌ی انتقال‌های جانبی (تومان)
	40029827			49837119		متوسط مجموع هزینه‌ها (تومان)

میزان پلاکت منقضی شده در همه‌ی حالات صفر شده و این امر نشان می‌دهد استفاده از سیاست مصرف فایفو در بیمارستان‌ها، از منقضی شدن پلاکت در آن‌ها جلوگیری می‌کند. مجموع پلاکت‌های ارسال شده از مرکز خون به بیمارستان‌ها در حالت وجود انتقال جانبی بین بیمارستان‌ها، بیشتر از حالت اول شده است، دلیل این امر این است که در شرایطی که انتقال جانبی مجاز است، مرکز خون می‌تواند از برخی بیمارستان‌ها به‌عنوان عامل کمکی برای توزیع خون به سایر بیمارستان‌ها استفاده نماید، بدین ترتیب که با ارسال پلاکت بیشتر برای برخی بیمارستان‌های بزرگ، شرایط را برای ارسال خون از آن بیمارستان‌ها به بیمارستان‌های مجاور فراهم آورد. این امر، اگرچه موجب افزایش هزینه‌های نگهداری موجودی خون در بیمارستان‌ها می‌شود، اما قدرت پاسخگویی سیستم تأمین خون را افزایش می‌دهد، به‌خصوص در مناطق شهری پرتعداد نظیر تهران که حمل‌ونقل در آن دشوار است و باید حتی‌المقدور از

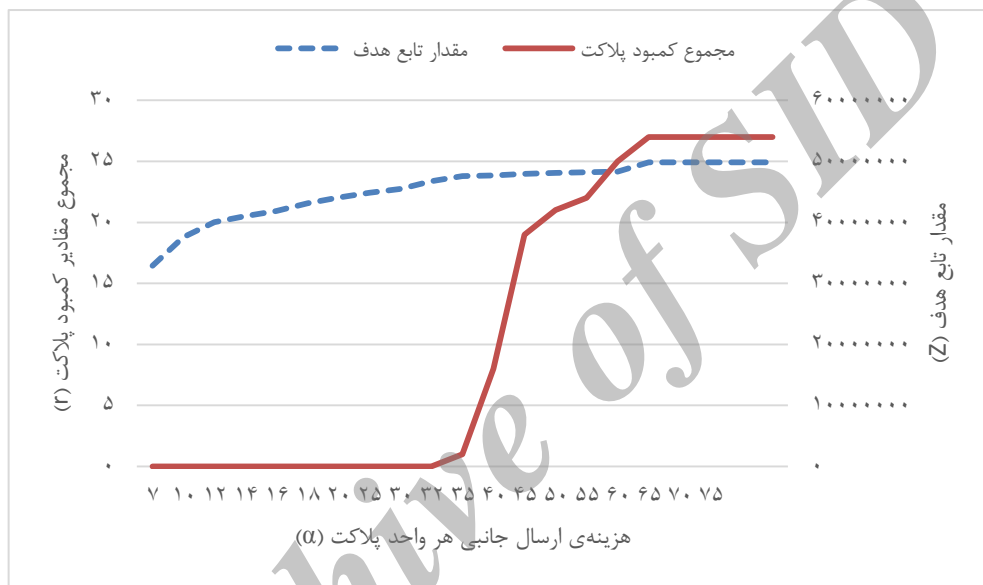
حمل و نقل‌های با مسافت بلند اجتناب نمود. بنابراین افزایش هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری موجودی تحت حالت مجاز بودن انتقال جانبی بین بیمارستان‌ها، به دلیل اینکه از وقوع کمبود پلاکت در بیمارستان‌ها جلوگیری می‌کند و هزینه‌های کلی سیستم را کاهش می‌دهد، قابل پذیرش است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود متوسط مجموع هزینه‌ها تحت سه سناریوی مختلف، برای حالت اول ۴۹۸۳۷۱۱۹ میلیون تومان و در حالت دوم ۴۰۰۲۹۸۲۷ میلیون تومان به دست آمده است، این بدان معناست که استفاده از سیاست انتقال جانبی بین بیمارستان‌ها موجب صرفه‌جویی ۱۹,۶۷ درصدی در کل هزینه‌های سیستم خواهد شد.

از مقایسه‌ی مقادیر ارسال جانبی پلاکت در حالت مجاز بودن انتقال جانبی برای سه سناریوی تقاضا می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش میزان تقاضای روزانه‌ی پلاکت از سناریوی خوشبینانه به بدبینانه، میزان انتقال جانبی خون بین بیمارستان‌ها نیز افزایش می‌یابد و در واقع سیستم در این حالت به دلیل برخورداری از قابلیت انتقال جانبی خون بین بیمارستان‌ها انعطاف‌پذیری بیشتری برای مواجهه با عدم قطعیت ناشی از تقاضای روزانه خواهد داشت. این در حالیست که در حالت مجاز نبودن انتقال جانبی بین بیمارستان‌ها، این قابلیت از سیستم سلب شده و هزینه‌های ناشی از عدم پاسخگویی به تقاضای بیمارستان‌ها و مواجهه با کمبود (که به مراتب بیشتر از هزینه‌های انتقال جانبی است) به سیستم تحمیل خواهد شد.

تحلیل حساسیت

در این بخش به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر به کارگیری انتقال جانبی بین بیمارستان‌ها، تحلیل حساسیتی روی پارامتر α که هزینه‌ی واحد انتقال جانبی پلاکت‌ها است، انجام می‌شود. نمودار (۱) روند تغییرات مقدار تابع هدف مسئله و مجموع کل کمبود پلاکت در بیمارستان‌ها را بر اساس مقادیر مختلف پارامتر α نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار پارامتر α ، مقدار تابع هدف مسئله و مجموع کل کمبود به تدریج افزایش می‌یابد؛ به طوری که در $\alpha = 30$ ، به دلیل افزایش هزینه‌های انتقال جانبی، مدل با ۱ واحد کمبود پلاکت مواجه می‌شود. همان‌طور که در نمودار (۱) مشخص است، مقدار تابع هدف و میزان کمبود تا

هنگامی که مقدار α به ۵۵ می‌رسد، با روندی صعودی افزایش می‌یابد و پس از آن به دلیل اینکه انتقال جانبی با توجه به افزایش مقدار هزینه‌ها به صرفه نیست، جواب بهینه مشابه جواب بهینه‌ی حالتی که انتقال جانبی مجاز نیست می‌شود. در واقع می‌توان این گونه نتیجه گرفت که تا زمانی که مقدار α کمتر از ۵۵ واحد است، استفاده از امکان ارسال جانبی پلاکت بین بیمارستان‌ها می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های سیستم گردد. شایان ذکر است که هزینه‌ی ارسال هر واحد پلاکت توسط مرکز خون معادل ۵ واحد در نظر گرفته شده است.



نمودار (۱). تأثیر تغییر پارامتر α بر تابع هدف و میزان کمبود پلاکت

یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار در مدل، حداکثر فاصله‌ی مجاز برای ارسال عرضی است. با توجه به اینکه در شهرهای پر تردد نظیر تهران، رفت و آمد وسایل نقلیه در مسیرهای طولانی در بسیاری از ساعات روز به سادگی ممکن نیست و زمان و هزینه‌ی زیادی می‌طلبد، طبیعتاً ارسال فرآورده‌های خونی بین همه‌ی بیمارستان‌های سطح شهر مقدور نخواهد بود. لذا

به منظور بررسی تأثیر این امر، رابطه‌ی (۵۵) را به عنوان محدودیتی جدید به مدل اولیه اضافه می‌کنیم:

$$Q_{ijhts} \leq \varphi_{jh} \cdot M \quad \forall i, j, h, t, s \quad (55)$$

در این رابطه، پارامتر صفر و یکی است که در صورت کوچکتر بودن فاصله‌ی دو بیمارستان h و j مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر خواهد داشت. M نیز یک عدد به مقدار کافی بزرگ است. طبق این محدودیت، در صورتی که پارامتر φ_{jh} صفر باشد، متغیر Q_{ijhts} نیز صفر خواهد بود و این به معنای آن است که مدل اجازه‌ی ارسال پلاکت بین دو بیمارستان h و j را صادر نخواهد کرد.

در مثال مورد نظر، طولانی‌ترین فاصله‌ی بین بیمارستان‌ها، مربوط به بیمارستان امام خمینی (ره) و بیمارستان شهید طالقانی است که ۱۰۳۶۰ متر با هم فاصله دارند. بر این اساس با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای شعاع پوشش و افزودن محدودیت (۵۵) به مدل مسئله، حالات مختلفی از لحاظ شعاع مجاز برای ارسال پلاکت بین بیمارستان‌ها برای حل مدل بررسی شد که نتایج حاصل از آن در جدول (۲) قابل مشاهده است.

جدول (۲). نتایج حل مدل با در نظر گرفتن شعاع پوشش‌های مختلف

R=0	R=۲۰۰۰	R=۴۰۰۰	R=۶۰۰۰	R=۸۰۰۰	R=۱۰۳۶۰	
۴۹۸۹۷۵۶۵	۴۳۹۰۱۰۲۵	۴۲۴۵۸۹۶۰	۴۱	۳۶۲۳۲۰۰۰	۴۰۵۴۸۲۵۰	جواب بهینه
۲۷	۱۸	۱۱	۷	۲	۰	کل کمبود پلاکت
۰	۲۸۹	۳۲۹	۳۵۸	۳۸۱	۴۰۱	کل ارسال‌های

						عرضی
--	--	--	--	--	--	------

همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار شعاع پوشش، ارسال عرضی پلاکت بین بیمارستان‌ها بیشتر می‌شود و این امر موجب کاهش مقدار کل کمبود و کاهش مقدار کل اتلاف پلاکت در بیمارستان‌ها می‌گردد. در حالتی که شعاع مجاز برای ارسال پلاکت بین بیمارستان‌ها صفر است، بیشترین مقدار کمبود را شاهد هستیم، به طوری که هزینه‌های سیستم به ۴۹۸۹۷۵۶۵ رسیده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش شعاع پوشش از ۰ به ۲۰۰۰ متر، هزینه‌های سیستم به میزان قابل توجهی کاهش یافته که این امر نشان‌دهنده‌ی این است که اغلب ارسال‌های جانبی در فواصل کوتاه صورت پذیرفته است و اثربخشی ارسال عرضی در فواصل کوتاه زیاد است. البته باید این نکته را نیز در نظر گرفت که انتخاب میزان شعاع پوشش مجاز بیمارستان‌ها، با توجه به در نظر گرفتن مواردی نظیر میزان ترافیک شهری و حداکثر زمان مجاز برای حمل فرآورده‌های فسادپذیر خونی باید انجام پذیرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله، یک مدل ریاضی برای یک زنجیره‌ی تأمین پلاکت شامل یک مرکز خون و چند بیمارستان، با هدف کمینه ساختن کل هزینه‌های لجستیکی سیستم و با در نظر گرفتن معیار تازگی فرآورده‌های خونی ارائه شد و امکان انتقال جانبی پلاکت بین بیمارستان‌ها به‌عنوان راهکاری جهت افزایش قابلیت پاسخگویی سیستم در مواجهه با عدم قطعیت، مطرح شد. سپس مدل ارائه‌شده با استفاده از تکنیک‌های خطی سازی از حالت غیرخطی خارج شد تا جواب‌های حاصل از حل آن از نظر ریاضیاتی و تحدب فضای حل، قابل اعتماد باشند. در قسمت نهایی نیز مدل مذکور، با توجه به ویژگی‌های پلاکت خون، برای حل مسئله‌ای با داده‌های مربوط به ۸ بیمارستان واقع در شهر تهران و برای مدت‌زمان ۷ روز و تحت سه سناریوی مختلف برای تقاضای خون در بیمارستان‌ها، حل شد و نتایج حاصل از آن نشان داد که وجود انتقال جانبی پلاکت بین بیمارستان‌ها، علی‌رغم افزایش برخی از هزینه‌های عملیاتی کل سیستم، در نهایت موجب افزایش انعطاف‌پذیری و قدرت پاسخگویی سیستم توزیع

پلاکت می شود و به سبب کاهش هزینه های مواجهه با کمبود در نقاط تقاضا، صرفه جویی ۱۹,۶۷ درصدی در بخش هزینه های کلی زنجیره ی تأمین را به همراه خواهد داشت. همچنین تحلیل حساسیت روی پارامتر مربوط به هزینه ی انتقال جانبی پلاکت بین بیمارستان ها، نشان دهنده ی این بود که حتی اگر هزینه های انتقال جانبی خون بین بیمارستان ها ۱۰ برابر گران تر از هزینه های ارسال عادی پلاکت توسط مرکز خون بین بیمارستان ها باشد، باز هم می تواند منجر به کاهش هزینه های سیستم باشد. لذا بهره گیری از راهکار انتقال جانبی پلاکت بین بیمارستان ها، در دنیای واقعی قطعاً راهگشا خواهد بود. علاوه بر این تحلیل حساسیت روی پارامتر مربوط به شعاع ارسال جانبی مجاز نشان داد که ارسال های جانبی اغلب در فواصل کوتاه و بین بیمارستان های نزدیک به هم انجام می پذیرند و منجر به بهبود قدرت پاسخگویی به تقاضای بیمارستان ها در شرایط عدم قطعیت می شوند.

مطالعات بعدی در این زمینه می توانند به موضوعاتی نظیر بررسی تأثیر وجود انتقال های جانبی بین مراکز خون در شبکه ای با چند مرکز خون، اتخاذ تدابیر و راهکارهایی نظیر خوشه بندی بیمارستان ها جهت پشتیبانی از یکدیگر در شبکه های بزرگ و تحت شرایط عدم قطعیت، در نظر گرفتن مسئله ی مسیریابی در توزیع پلاکت توسط مراکز خون بین بیمارستان ها و تأثیر آن در هزینه های سیستم، پردازند. همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت در بخش جمع آوری خون نیز می تواند در مطالعات بعدی مورد توجه قرار گیرد. ضمن اینکه می توان با استفاده از تکنیک های پیش بینی عرضه و تقاضای فرآورده های خونی را به عنوان ورودی های اصلی برای مدل ارائه شده، برآورد نمود تا از این طریق اعتبار خروجی های مدل افزایش یابد و کاربرد آن در دنیای واقعی نتایج ارزشمندتری در پی داشته باشد.

منابع

- امیری مقصود، نایبی محمد امین، زرابادی پور اویس (۱۳۹۳)، توسعه مدل‌های کنترل موجودی (R, T) و (r, Q) . مطالعات مدیریت صنعتی، دوره ۱۲، شماره ۳۳، صص ۱۵۰-۱۲۵.
- یحیی زاده اندواری بلدا، الفت لعیاء، امیری مقصود (۱۳۹۵)، رویکرد بهینه سازی استوار در انتخاب تأمین کننده و تخصیص سفارش. مطالعات مدیریت صنعتی، دوره ۱۴، شماره ۴۰، صص ۵۲-۲۵.
- Alfonso, E., Augusto, V., & Xie, X. (2015). Mathematical programming models for annual and weekly bloodmobile collection planning. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12(1), 96-105.
- Arvan, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Abdollahi, M. (2015). Designing a bi-objective and multi-product supply chain network for the supply of blood. *Uncertain Supply Chain Management*, 3(1), 57-68.
- Beliën, J., & Forcé, H. (2012). Supply chain management of blood products: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 217(1), 1-16.
- Cohen, M. A., & Pierskalla, W. P. (1975). Management policies for a regional blood bank. *Transfusion*, 15(1), 58-67.
- Fontaine, M. J., Chung, Y. T., Erhun, F., & Goodnough, L. T. (2010). Age of blood as a limitation for transfusion: potential impact on blood inventory and availability. *Transfusion*, 50(10), 2233-2239.
- Ghandforoush, P., & Sen, T. K. (2010). A DSS to manage platelet production supply chain for regional blood centers. *Decision Support Systems*, 50(1), 32-42.
- Gunpinar, S., & Centeno, G. (2015). Stochastic integer programming models for reducing wastages and shortages of blood products at hospitals. *Computers & Operations Research*, 54, 129-141.
- Gunpinar, S. (2013). Supply chain optimization of blood products. University of South Florida, Scholar Commons.

Haijema, R., van der Wal, J., & van Dijk, N. M. (2007). *Blood platelet production: Optimization by dynamic programming and simulation*. *Computers & Operations Research*, 34(3), 760-779.

Hemmelmayr, V., Doerner, K. F., Hartl, R. F., & Savelsbergh, M. W. (2009). *Delivery strategies for blood products supplies*. *OR spectrum*, 31(4), 707-725.

Hemmelmayr, V., Doerner, K. F., Hartl, R. F., & Savelsbergh, M. W. (2010). *Vendor managed inventory for environments with stochastic product usage*. *European Journal of Operational Research*, 202(3), 686-695.

Hosseiniyard, Z., & Abbasi, B. (2016). *The inventory centralization impacts on sustainability of the blood supply chain*. *Computers & Operations Research*.

Nahmias, S. (1982). *Perishable inventory theory: A review*. *Operations research*, 30(4), 680-708.

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.

Pegels, C. C., & Jelmert, A. E. (1970). *An evaluation of blood-inventory policies: A Markov chain application*. *Operations Research*, 18(6), 1087-1098.

Pierskalla, W. P., & Roach, C. D. (1972). *Optimal issuing policies for perishable inventory*. *Management Science*, 18(11), 603-614.

Pierskalla, W. P. (2005). *Supply chain management of blood banks*. In *Operations research and health care* (pp. 103-145). Springer US.

Prastacos, G. P. (1978). *Optimal myopic allocation of a product with fixed lifetime*. *Journal of the operational Research Society*, 29(9), 905-913.

Prastacos, G. P., & Brodheim, E. (1980). *PBDS: a decision support system for regional blood management*. *Management Science*, 26(5), 451-463.

Prastacos, G. P. (1981). Allocation of a perishable product inventory. *Operations Research*, 29(1), 95-107.

Sapountzis, C. (1985). Analytical Evaluation of the Characteristic Curve of a Blood Bank and Its Usefulness in Blood Banking. *European Journal of Operational Research*, 19 (1): 20–32.

Silva Filho, O. S., Carvalho, M. A., Cezarino, W., Silva, R., & Salviano, G. (2013). Demand forecasting for blood components distribution of a blood supply chain. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(24), 565-571.

Sherali, H. D., & Alameddine, A. (1992). A new reformulation-linearization technique for bilinear programming problems. *Journal of Global optimization*, 2(4), 379-410.

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.

Yahnke, D. P., Rimm, A. A., Makowski, G. G., & Aster, R. H. (1973). Analysis and Optimization of a Regional Blood Bank Distribution Process: II. Derivation and Use of a Method for Evaluating Hospital Management Procedures. *Transfusion*, 13(3), 156-169.

Archive SID