University of Qom
Engineering Management and Soft Computing
JEMSC.QOM
Online ISSN: 2538-2675

Optimizing Red Blood Cell Consumption Using Markov's Decision-Making Process

(Case study: Blood Bank of Zanjan Province Blood Transfusion Center)

Mahdi Yousefi nejad[1]✉, Mehran Khayat Rasouli[2] and Zohreh Khalilpour[3]

1. Correspnding author, Assistance Prof. Department of industrial engineering, Faculty of engineering, Islamic azad university of Bonab branch, Bonab, iran. Email: mahdi_108108@yahoo.com
2. MSc. Department of industrial engineering, Faculty of engineering, Islamic azad university of Bonab branch, Bonab, iran. Email: mehran.khayatrasooli@yahoo.com
3. MSc. Department of industrial engineering, Faculty of engineering, Islamic azad university of Bonab branch, Bonab, iran. Email: zohreh.khalilpour@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 2022 May 24
Received in revised form 2022 Jul 27
Accepted 2022 Aug 1
Published online 2022 Sep 16

Keywords:
Fresh Blood,
Optimal Consumption,
Red Blood Cells.

ABSTRACT

In this research, a novel method is proposed to optimize the costs associated with the supply chain of short-lived blood products, which is different from other existing methods. According to the novelty of this approach and the lack of familiarity with its difficulties, a scaling is applied in order to reduce the size of problem space, which can lower the accuracy of the solution. On the other hand, with regard to the problem solving dimensions, the number of solution iterations would be limited. Ultimately, after solving the above problems, the collected data are entered into the formulation of Markov's decision-making process and solved using the successive approximation approach. The solution of this approach helps the decision-maker to choose one of (LIFO-LIFO), (FIFO-FIFO), and (LIFO, FIFO) policies. By investigating different costs and comparing various (LIFO-LIFO), (FIFO-FIFO), and (LIFO, FIFO) policies, it can be concluded over iterations that policies (LIFO-LIFO) and (LIFO - FIFO) policies have better performances than the (FIFO-FIFO) policy, and will cost much less in the long run

Cite this article: Yousefi nejad, M., & Others. (2022). Optimizing Red Blood Cell Consumption Using Markov's Decision-Making Process. *Enginiiring Management and Soft Computing*, *8* (1). 71-84. **DOI**: https://doi.org/10.22091/jemsc.2019.1296

© The Author(s)
DOI: https://doi.org/10.22091/jemsc.2019.1296
Publisher: University of Qom

JEMSC.QOM
شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۵-۲۵۳۸

مدیریت مهندسی و رایانش نرم

دانشگاه قم

بهینه‌سازی مصرف گلبول قرمز خون با استفاده از فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف

مهدی یوسفی‌نژاد عطاری[1]✉، مهران خیاط رسولی[2] و زهره خلیل‌پور[3]

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی صنایع، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران. رایانامه: mahdi_108108@yahoo.com
۲. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب، بناب، ایران. رایانامه: mehran.khayatrasooli@yahoo.com
۳. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب، بناب، ایران. رایانامه: zohreh.khalilpour@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۶/۲۵

کلیدواژه‌ها:
خون تازه،
گلبول قرمز خون،
مصرف بهینه.

چکیده

در این تحقیق روشی برای بهینه‌سازی هزینه‌های مرتبط با موجودی زنجیره تأمین محصولات خونی با عمر مفید کوتاه انتخاب شده است که نسبت به سایر روش‌های موجود متفاوت است. با توجه به جدید بودن این روش و عدم آشنایی با مشکلات این روش، مقیاس‌گذاری صورت گرفته است تا فضای وضعیت مسئله کوچکتر گردد که این مقیاس‌گذاری‌ها ممکن است دقت جواب مسئله را کمتر نماید. از سوی دیگر با توجه به ابعاد حل مسئله تعداد تکرارهای حل محدود شده است. در نهایت پس از حل مشکلات ذکر شده، داده‌های جمع‌آوری شده با قرار دادن در فرمولاسیون فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف و با روش تقریب متوالی حل شده است که جواب این حل برای تصمیم‌گیری انتخاب یکی از سیاست‌های((FIFO-FIFO،LIFO-LIFO)) و (LIFO,FIFO)) به تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند. با بررسی انواع هزینه و مقایسه انواع سیاست‌های ((LIFO-LIFO، FIFO-FIFO)) و(LIFO-FIFO) می‌توان در طول تکرار به این نتیجه دست پیدا کرد که سیاست‌های (LIFO-LIFO) و(-LIFO FIFO) به نسبت سیاست (FIFO-FIFO) بهتر عمل می‌کنند و هزینه به مراتب کمتری را در طولانی‌مدت به همراه دارند.

استناد: یوسفی‌نژاد عطاری، مهدی؛ خیاط رسولی، مهران و خلیل‌پور زهره. (۱۴۰۱). «بهینه‌سازی مصرف گلبول قرمز خون با استفاده از فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف». *مدیریت مهندسی و رایانش نرم، دوره ۸* (۱). صص: ۸۴-۷۱. https://doi.org/10.22091/jemsc.2019.1296

ناشر: دانشگاه قم

© نویسندگان.

۱) مقدمه

زنجیره‌تأمین خون شامل فرایندهای جمع‌آوری، آزمایش، پردازش و توزیع خون و محصولات خون، از اهداکننده تا گیرنده می‌باشد. محصولات خون به عنوان بخشی از درمان‌های معمول پزشکی یا عمل‌های جراحی و همچنین در شرایط اضطراری به بیماران انتقال می‌یابد. این بدان معنی است که در دسترس بودن محصولات مناسب خون بسیار مهم است، زیرا اگر در هنگام نیاز موجودی در دسترس نباشد، می‌تواند موجب از دست رفتن زندگی بیمار گردد. میزان اهداکننده خون در کشورهای مختلف متفاوت است. بر اساس آمار صلیب سرخ آمریکا، در سال ۲۰۱۴ تنها ده درصد افراد واجد شرایط خون اهدا می‌کنند و بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی، این میزان در کشورهای با درآمد کمتر، به مراتب پایین‌تر است. این بدان معنا است که تصمیم‌گیری برای زنجیره‌تأمین خون با توجه به تقاضای روزافزون محصولات خون و همچنین کاهش جمعیت اهداکنندگان چالش‌برانگیز است (سیفیرید و همکاران، ۲۰۱۱). یکی دیگر از عوامل مهم هزینه است؛ گرچه در کشورهای توسعه‌یافته خون به طور داوطلبانه اهدا می‌گردد اما بسیاری از هزینه‌ها در فرایند مانند تست، تقسیم‌بندی (جداسازی محصولات فرعی از خون کامل که به طور بالقوه محدوده وسیعی را شامل می‌شود)، ذخیره و توزیع را شامل می‌شود. به طور کلی، زنجیره تأمین کارآمد باید تقاضا را تأمین نماید و در عین حال موجب کاهش و کم کردن هزینه‌ها شود. همچنین کم بودن طول عمر اکثر محصولات خونی موجب پیچیدگی و افزایش محدودیت‌ها می‌گردد که باعث افزایش خطر ابتلا به کمبود و بی‌نظمی می‌گردد. با توجه به ارتباطات، ویژگی‌ها و پیچیدگی سیستم، لازم است روش‌های قوی برای پشتیبانی از فرآیند تصمیم‌گیری در تمام مراحل زنجیره تأمین تهیه شود. اهمیت واقعی دنیای زنجیره تأمین آشکار است، زیرا زندگی انسانی در خطر است. پیچیدگی زنجیره تأمین شاید کمتر آشکار باشد.

۲) پیشینهٔ تحقیق

بر اساس مطالعات (کاستسالیکی و باریلسفورد، ۲۰۰۷) بیشتر از ۱۰۰ نوع محصول و زیرمحصول از محصولات خونی گرفته می‌شود که مهم‌ترین آنها شامل سلول‌های قرمز خون[1]، پلاسما، پلاکت و... است. از کل انتقالات خونی حدود ۶۳ درصد آن شامل سلول‌های قرمز خون، ۱۸ درصد شامل پلاسما و ۱۴درصد شامل پلاکت‌های خون می‌باشد. هریک از اجزای خون در وضعیت‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال، گلبول قرمز خون در درمان کم‌خونی مورد نیاز است، در حالی که پلاکت‌ها برای بیماران سرطانی مورد نیاز است و پلاسما برای درمان بیماران با سوختگی مورد نیاز است. این لیست تنها نمونه‌هایی از کاربرد محصولات خونی را نشان می‌دهد. به هر حال هر جزء می‌تواند استفاده‌های زیادی در فرایندهای مراقبت‌های سلامتی داشته باشند. از سوی دیگر، جمع‌آوری خون نیاز به تلاش دائمی دارد، در کشورهایی که اهدا به صورت داوطلبانه انجام می‌گیرد بسیاری از عوامل مانند، راحتی در اهدا، خطرات احتمالی ناشی در زمان اهدا، تسهیلات تشویقی و قابلیت دسترسی می‌تواند در تصمیم‌گیری اهداکنندگان تأثیرگذار باشد. با این حال، بدیهی است برای پاسخگویی به تقاضا، خون کافی باید جمع‌آوری شود. تطبیق عرضه با تقاضا، در اصطلاح زنجیره‌تأمین، نیازمند توسعه زیرساختی برای جمع‌آوری، پردازش و توزیع خون و محصولات آن است. پیکربندی‌های مختلف زنجیره‌تأمین می‌تواند

[1] RBC

در دنیای واقعی و در ادبیات، از بانک‌های داخلی خون در بیمارستان‌ها تا مراکز جمع‌آوری و پردازش و توزیع چند مجموعه‌ای تقاضا وجود داشته باشد. استراتژی دنبال شده می‌تواند با توجه به سیاست‌های مراقبت بهداشتی در کشورهای مختلف متفاوت باشد. با این حال، هدف تأمین تقاضای محصولات خونی با کمترین هزینه و با کمترین فساد است. علاوه بر این، باید ویژگی‌های خاصی از خون و محصولات خون مورد توجه قرار گیرد. عواملی نظیر انواع خون، سازگاری و مدت زمان نگهداری محصولات خونی، به سیستم‌های زنجیره‌تأمین خون و فرآیند تصمیم‌گیری کمک می‌کنند. هشت گروه خونی اصلی شامل A، B، AB، O با علامت‌های مثبت و منفی می‌باشد و هر گروه نسبت متفاوتی در بین جمعیت بشر دارد. در ادامه عمر مفید محصولات خونی فاکتور مهم دیگری است که پلاسما، گلبول قرمز و پلاکت هر کدام دارای عمر مفید متفاوتی هستند. پلاکت‌ها با کمترین عمر مفید در بین محصولات خونی با ۵ روز عمر مفید می‌باشد و پلاسما با بیشترین عمر مفید، دارای یکسال عمر مفید می‌باشد. این بدان معنی است که اگر یک محصول خون قبل از پایان عمر مفید آن مصرف نشود، باید از بین برود. با توجه به اهمیت فرآورده‌های خونی و ویژگی‌های خاص این محصول که در بالا به آنها اشاره گردید، مدیریت بهینه مصرف این محصول با ارزش می‌تواند کمک شایانی در حوزه سلامت به جامعه بشر کرده باشد، از این رو هدف اصلی از انجام تحقیق حاضر کمک به جامعه پزشکی و جامعه بشر در تأمین سریع و به موقع فرآورده‌های خونی با کمترین هزینه می‌باشد.

اخیرا (گانپینار، ۲۰۱۳) و (گانپینار و سنتو، ۲۰۱۵) مدل‌های بهینه‌سازی را با هدف به حداقل رساندن هزینه کل (هزینه خرید، هزینه نگهداری، هزینه کمبود، هزینه تاریخ گذشتگی) ارائه داده‌اند. مدل‌ها به دنبال ایجاد یک طرح موجودی با توجه به پارامترهای داخلی مانند ظرفیت و آماده‌سازی هستند. سایر مقالاتی نظیر (اریکسون و همکاران، ۲۰۰۸) نتایج استفاده از قوانین تصمیم‌گیری را ارائه می‌دهد؛ با این حال، اطلاعات زیادی در مورد روش‌های استفاده شده برای تعریف پارامترها داده نمی‌شود.

(دوآن و لیو، ۲۰۱۴) روش‌های متاهیوریستیک را برای تولید یک برنامه موجودی، با توجه به سازگاری و کاهش عمر مفید محصولات خون ترکیب نموده است. یک چارچوب شبیه‌سازی برای ارزیابی سیاست‌های موجود در هر دو عرضه کننده و مشتری توسعه داده شده است (بلک و هاردی، ۲۰۱۴). با استفاده از سطوح پاسخی که توسط شبیه‌سازی تولید شده است، این روش منطبق بر رگرسیون‌ها است تا معادلاتی ایجاد کنند که بتوانند سطوح را نشان دهند. معادلات در یک توابع غیرخطی موزون هستند که در نهایت برای ایجاد تغییرات بهینه‌سازی شده برای سیاست‌های موجودی که برآورده کردن اهداف مانند از دست دادن، کمبود و تعداد سفارشات عادی و اضطراری است، ترکیب شده است. اکثر مدل‌های ارائه شده در این بخش مربوط به موجودی خون کامل و RBC هستند. (پلج و ژلمرت، ۱۹۷۰) از یک مدل زنجیره مارکوف برای ارزیابی دو سیاست مختلف صدور مجوز استفاده کرده و تأثیر آن بر موجودی خون محاسبه شده است. از سوی دیگر (بوردهیم و درمن و پرستاکوس، ۱۹۷۵) از یک مدل زنجیره مارکوف برای نشان دادن رفتار یک سیستم موجودی و سیاست‌های توزیع استفاده کرده است. این مدل تقاضای ثابت را در نظر می‌گیرد و با هدف محاسبه کمبود و نرخ تاریخ گذشتگی و نیز محدودیت‌ها و پارامترهای موجودی است. یکی از اهداف مقدار بهینه تولید یا سفارش ایجاد تعادل بین کمبود، محصولات تاریخ گذشته و موجودی می‌باشد. نتیجه سفارش بیش از اندازه محصولات باعث به وجود آمدن تعداد

محصولات تاریخ گذشته زیاد بعد از m دوره می‌گردد و از طرفی عدم سفارش به اندازه کافی موجب کمبود می‌گردد. بسته به زمینه تقاضای برآورده نشده، فروش از دست رفته یا ذخیره شده در نظر گرفته شده که در نهایت ممکن است یک سفارش اضطراری نیاز باشد.

۳) روش‌شناسی تحقیق

در این تحقیق مسئله موجودی فاسدشدنی که در بیمارستان‌ها و بانک‌های خون ناشی می‌گردد بررسی می‌شود که محصولات خونی برای تأمین نیاز تقاضاهای نامشخص در انبار نگهداری می‌شود. بانک‌های خون محل سفارش تولیدات و بیمارستان‌ها محل دوباره‌پرسازی برای نگهداری موجودی در سطح ایمن می‌باشد. مشکل اکثر مدیریت‌های موجودی در بررسی ریسک کمبود و تاریخ گذشته بودن ایجاد می‌گردد، چون تقاضا نامشخص است و تاثیر اقتصادی و اجتماعی کمبود و تاریخ گذشتگی زیاد است. مواد گران قیمت و تست‌های آزمایشگاهی برای تضمین انتقال ایمن صورت می‌گیرد. موقع حل این مشکل برای پیدا کردن اندازه مناسب سفارش، تعدادی از وضعیت‌های پیچیده نمود پیدا می‌کنند. در اینجا بدون این که وارد جزئیات شویم، توصیف وضعیت باید شامل توصیف تعداد گلبول قرمز خون‌ها با یک سن گروه خاص باشد. هر سن گروه مطابق با ابعاد فضای وضعیت می باشد. در نتیجه تعدادی از وضعیت‌ها که از محصولات با تعداد ممکن از هر وضعیت در هر ابعاد است، وقتی از داده‌های واقعی استفاده می‌شود خیلی بزرگ می‌شود. برای مثال، فرض حداکثر عمر مفید محصول ۲۱ روز است و حداکثر ۳۵ محصول در انبار برای هر ۲۱ گروه سنی است، بنابراین وضعیت انبار شامل حدود 35^{21} وضعیت می‌باشد. بر اساس مطالعه اخیر توسط موسسه پزشکی هاپکینز نشان داده شد که نگهداری بیشتر از ۳ هفته (۲۱ روز) گلبول‌های قرمز خون باعث از دست رفتن انعطاف می‌گردد و نیازمند دریافت از مویرگ‌های کوچک سراسر بدن می‌باشد و اگر آنها نتوانند در سراسر مویرگ‌ها حرکت کنند آنگاه گلبول‌های قرمز خون نمی‌توانند اکسیژن را به جاهایی که نیاز دارند انتقال دهند (فرانک و همکاران، ۲۰۱۳).علاوه بر این، از دست دادن انعطاف در گلبول‌های قرمز که بیشتر از ۳ هفته عمردارند پایدار باقی می‌ماند حتی اگر آنها در داخل بدن بیمار باشند. یک مطالعه در گذشته در مجله پزشکی انگلستان نشان می‌دهد که خطر مرگ برای بیمارانی که در عمل جراحی قلب از گلبول‌های قرمز خونی که بیش از ۲ هفته عمر دارند استفاده می‌شود در مقایسه با بیمارانی که از گلبول‌های قرمز با عمر ۱۰ روز استفاده می‌کنند ۲ برابر است (کوخ، جورکویین، فریر و اندرا، ۲۰۰۸).

۴) نمادها

m: حداکثر عمر مفید محصول

r : عمر باقی مانده محصول

x_r: تعداد گلبول قرمز خون با عمر باقی مانده r

X: وضعیت سیستم در ابتدای روز

Y: وضعیت سیستم در انتهای روز

n: روز تکرار

a: تصمیم گرفته شده بر اساس سیاست صدور I

I: سیاست صدور

J: تقاضاهای گلبول قرمز خون تازه

K: سایر تقاضاها

i^{y}_{r}: قسمتی از تقاضاهای گلبول قرمز خون تازه که به وسیله گلبول قرمز خون‌های با عمر باقی مانده r تأمین می‌شوند. به وضوح به (n, X, j, k, I) و این که سفارش با کدام یک از دو نوع تقاضا اتفاق می‌افتد بستگی دارد.

i^{A}_{r}: قسمتی از سایر تقاضاها که به وسیله گلبول قرمز خون‌های عمر باقی مانده r تأمین می‌شوند. به وضوح به (d, X, j, k, I) و این که سفارش با کدام یک از دو نوع تقاضا اتفاق می‌افتد بستگی دارد.

i^{y}: تعداد گلبول قرمز خون‌هایی که برای تأمین تقاضای گلبول قرمز خون تازه صادر می‌شود.

i^{A}: تعداد گلبول قرمز خون‌هایی که برای تأمین سایر تقاضاها صادر می‌شود.

C^{H}: هزینه نگهداری هر واحد محصول در هر روز در موجودی ابتدای روز

C^{O}: هزینه تاریخ گذشته شدن برای هر محصول تاریخ گذشته

C^{S}: هزینه کمبود هر واحد محصول که تقاضا را تأمین نکرده است (از دست رفته)

C^{S1}: هزینه هر واحد کمبود محصول عقب افتاده

C^{Y}_{r}: هزینه عدم تطابق هر محصول صادر شده با طول عمر باقی مانده r روز که اولویت سنی تقاضای جوان را نقض کرده است.

P^{A}_{d} (k): احتمال تقاضای سایر خون‌ها

P^{Y}_{d} (j): احتمال تقاضای گلبول قرمز خون تازه

$P^{a}_{(d.x).(d+1.y)}$: احتمال انتقال از روز d به d+1 بر اساس تصمیم a

C (d, X, j, k, I): هزینه مستقیم تحمیل شده در ابتدای بازه زمانی بر اساس هر کدام از سیاست‌های صدور سفارش و انواع تقاضا ها و وضعیت موجودی

EC^{I} (d.x): هزینه مستقیم مورد انتظار بر اساس سیاست صدور I و وضعیت موجودی و تکرار dام (هزینه مستقیم مورد انتظار وقتی وارد می‌شود که بر اساس احتمال انتقال $P^{a}_{(d.x).(d+1.y)}$ فعالیت a در وضعیت x انتخاب می‌شود.)

۵) مدلسازی فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف

فرایند تصمیم‌گیری مارکوف در نگهداری و تعمیرات، کنترل موجودی و قسمت‌های دیگر مدیریتی مورد استفاده قرار گرفته است. در این قسمت به طور مختصر به معرفی فرایند تصمیم‌گیری مارکوف پرداخته شده است.

فرایند تصمیم‌گیری مارکوف سیستمی است که از یک حالت مشخص به حالت‌های ممکن دیگر تغییر می‌کند. در هر مرحله تصمیم‌گیرنده مجبور است جهت انتخاب بهترین مجموعه از گزینه‌ها اقدام نماید. این عمل بر روی احتمالات

گذار بعدی تاثیر می‌گذارد و موجب یک افزایش (یا کاهش) فوری در این حالت و حالت‌های بعدی می‌گردد. مسئله‌ای که تصمیم‌گیرنده با آن مواجه است، تعیین دنباله‌ای از فعالیت‌ها جهت حداکثر کردن سود کلی می‌باشد.

اولین گام در رویکرد ما فرموله کردن گلبول قرمز خون به عنوان یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف است که می‌تواند به صورت عددی حل شود. فضای حالت باید به اندازه کافی کوچک باشد که اجازه دهد محاسبات در یک پنجره زمان معقول انجام شود. فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف توسط وضعیت سیستم تولید موجودی، تصمیمات گرفته شده، انتقال از یک حالت به حالت بعدی و مرتبط با ساختار هزینه مستقیم مشخص شده است. در وهله اول، ما نیازمند سیاست سفارش وابسته به زمان موجودی بهینه هستیم، از این رو، سن محصولات در موجودی قابل استناد است. همچنین برای ثبت تاریخ گذشته‌ها، ما به پیگیری محصولات کهنه نیازمندیم. فرض کنید حداکثر عمر مفید m روز است. اطلاعات دقیق در مورد تعداد گلبول قرمز در موجودی هر رده سنی یک بردار m بعدی است، $x\epsilon\mathbb{N}^m$ با عنصر x_r به عنوان تعداد گلبول قرمز با عمر مفید باقی‌مانده r روز با بررسی در ابتدای روز می‌باشد. هر روز صبح یک تصمیم برای تولید گلبول قرمز در طول روز گرفته می‌شود. در مدل فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف، فرض بر این است که در طول روز حجم تولید، مورد تجدیدنظر واقع نمی‌شود و خون کامل به اندازه کافی با این سطح تولید در دسترس است. در پایان روز، پس از ۲۴ ساعت، فقط قبل از شروع روز بعد، گلبول قرمز تولید شده منتشر شده و به موجودی افزوده می‌شود.

در انتقال از روز d به روز بعدی $d+1$ دنباله‌ای از وقایع اتفاق می‌افتد که در زیر آمده است:

- گلبول قرمز کسر شده از موجودی برای تأمین تقاضاهای گلبول قرمز تازه و سایر تقاضاها
- زمانی که تقاضای گلبول قرمز تازه با گلبول قرمز کهنه تأمین می‌شود، عدم تطابق رخ می‌دهد.
- وقتی تمام تقاضاها نتواند توسط موجودی پاسخ داده شوند، کمبود رخ می‌دهد.
- در پایان روز همه گلبول‌های قرمز یک روزه هستند.
- تعدادی از گلبول‌های قرمز ممکن است از رده خارج باشد.
- تولیدات، منتشر شده و به موجودی اضافه می‌شود.

در مدل زمان گسسته ما وقایع در سطحی بالاتر از سفارش اتفاق می‌افتد. بنابراین فرض می‌کنیم که میزان تولید قبل از تقاضا برای روزهای آتی که می‌دانیم، ثابت است. همچنین هر دسته تقاضا دارای یک سیاست صدور مشخص است که تعیین می‌کند کدام گلبول قرمزها را برای تأمین تقاضا انتخاب کند.

با استفاده از نمادهای معرفی شده ما به یک بیان ساده از تعداد گلبول قرمزهای رده خارج، مقدار کمبود و مقدار عدم انطباق‌ها می‌رسیم:

- تعداد گلبول قرمزهای خارج از رده که در پایان روز از موجودی حذف شده $x_m - i_m^y - i_m^A$ است.
- تعداد کل کمبود گلبول قرمزها $(j - i^y) + (k - i^A)$ است.
- وقتی تقاضاهای گلبول قرمز خون تازه ترجیحاً با گلبول قرمز خون‌هایی که با عمر مفید باقیمانده l روز یا بیشتر تأمین می‌شود، آنگاه تعداد عدم تطابق‌ها برابر $\sum_{r=1}^{l-1} i_r^y$ است.

عدم قطعیت در گلبول قرمز تنها توسط عدم قطعیت در حجم تقاضا تنظیم شده است. بنابراین توزیع نرمال تقاضا از تقاضای جوان و تقاضای سایر است. احتمال یک تقاضا برای گلبول قرمز خون‌های تازه و گلبول قرمز خون‌های سایر در روز های هفته d توسط $p_d^y(j)$ و $p_d^A(k)$ نشان داده می‌شود. تمام ترکیبات (j,k) به وضعیت موجودی مشابه y منجر می‌شود.

هزینه‌های ضروری و جاری برای تقاضای گلبول قرمز خون‌های تازه و سایر گلبول قرمز خون‌ها به صورت زیر است:

رابطه ۱)

$$C(d, X, j, k, I)= \begin{cases} .(x_m - i_m^y - i_m^A)C^O & \text{هزینه تاریخ گذشتگی} \\ .(j + k - i^y - i^A)+C^S & \text{هزینه کمبود} \\ .X+C^H & \text{هزینه نگهداری} \\ + \sum_{r=1}^{m} C_r^y r_i^y & \text{هزینه عدم تطابق} \end{cases}$$

با توجه به سیاست صدور سفارش I، هزینه مجاز مورد انتظار برای وضعیت (d, x) به صورت زیر است.

رابطه ۲)

$$EC^I(d.x) = \sum_{j.k} P_d^y(j)P_d^A(k)C(d.x.j.k.y)$$

۶) یافته‌های تحقیق

برنامه‌ریزی پویای احتمالی برای گلبول قرمزها توسط یک الگوریتم تقریب متوالی[۲] (SA) حل می‌شود. تقریب متوالی با استفاده از رابطه ۳ به دست می آید.

رابطه ۳)

$$V^n(x) = \min_{\forall(x) \in X}[EC^I(x) + \sum_{j.k} P^Y(j)P^A(k)\, V^{n-1}(Y(x.j.k.I))]$$

الگوریتم تقریب متوالی زمانی متوقف می‌شود که رابطه ۴ برقرار باشد.

رابطه ۴)

$$<\varepsilon|V^n(x) - V^{n-1}(Y(x.j.k.I))|$$

پیچیدگی‌های محاسباتی: حل یک مسئله افق نامحدود به وسیله تقریب متوالی نیازمند محاسبات معادله بالا برای تمام وضعیت‌های $x \in X$ است. تعداد بردارهای حالت $|x|$ به تعداد مقادیر هر عنصر از بردارحالت $X= (x_1, x_2, \ldots, x_m)$ بستگی دارد. برای هر وضعیت X تمام تصمیمات عملی سنجیده می‌شود. از این رو تعدادی از وضعیت‌ها را در تعدادی از طبقه‌بندی‌های سنی قرار می‌دهیم تا فضای وضعیت را کوچک‌تر کرده و امکان محاسبه عملیات را با ظرفیت رم کامپیوترهای امروزی فراهم کرده باشیم و همچنین، با توجه به امکان تکرارهای زیاد جهت رسیدن به همگرایی، ممکن است حافظه رم پاسخگوی تکرارهای زیاد نباشد و به این دلیل اگر تا تکرار ۲۷۸۲۵۶ به همگرایی مورد نظر دست نیابیم عملیات را متوقف می‌نماییم.

---

۲. الگوریتم تقریب متوالی

داده‌ها: داده‌های واقعی جهت استفاده در مدل و حل آن با استفاده از داده‌های بانک خون استان زنجان تهیه گردیده است.

حداکثر عمر مفید محصول: گلبول قرمز تهیه شده در دمای ۱ تا ۶ درجه سانتیگراد به مدت ۳۵ روز قابل نگهداری است. با این حال، بر اساس مطالعه اخیر توسط موسسه پزشکی هاپکینز (فرانک و همکاران، ۲۰۱۳) نشان داده شده است که نگهداری بیشتر از ۳ هفته (۲۱ روز) گلبول قرمز باعث از دست رفتن انعطاف می‌گردد و نیازمند دریافت از مویرگ‌های کوچک سراسر بدن می‌باشد و اگر آنها نتوانند در سراسر مویرگ‌ها حرکت کنند آنگاه گلبول‌های قرمز خون نمی‌توانند اکسیژن را به جاهایی که نیاز دارند انتقال دهند. از این رو، در این تحقیق گلبول قرمز با عمر کمتر از ۲۱ روز را گلبول قرمز خون تازه و با عمر ۲۱ الی ۳۵ روز را سایر در نظر گرفته‌ایم.

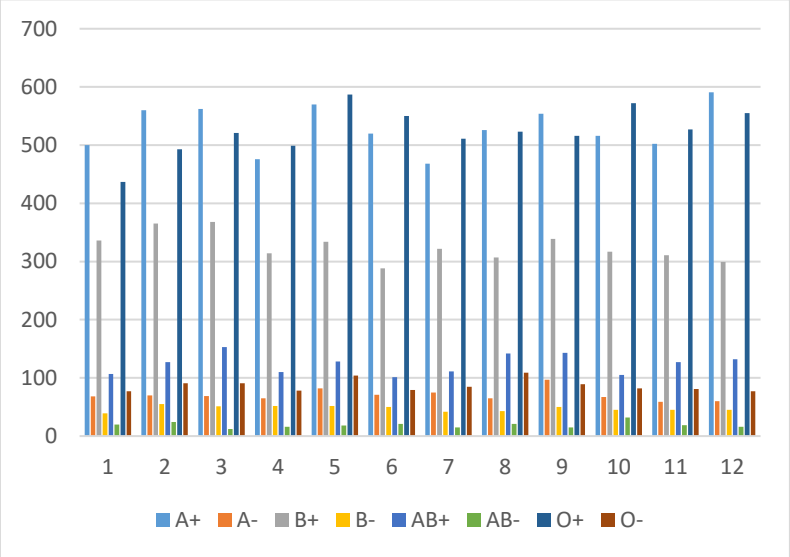
سیاست‌های صدور: در روش جاری سفارش‌های گلبول قرمز خون به صورت FIFO صادر می‌گردد، بدین صورت که ابتدا گلبول قرمز خون‌های کهنه صادر می‌گردد. در این تحقیق سیاست صدور ترکیبی I نشان می‌دهد که چگونه دو نوع تقاضا گلبول قرمز خون تازه و سایر از موجودی تأمین می‌گردد که سه نوع سیاست صدور در زیر توضیح داده شده است که در انتها پس از بررسی هزینه‌های حاصل از هر یک از این سیاست‌ها، در خصوص آنها تصمیم‌گیری خواهد شد.

(FIFO, FIFO): تمامی تقاضاها با گلبول قرمز خون‌های کهنه‌تر موجودی تأمین می‌شود.

(LIFO, LIFO): تمامی تقاضاها با گلبول قرمز خون‌های تازه‌تر موجودی تأمین می‌شود.

(LIFO, FIFO): LIFO برای تقاضاهای گلبول قرمز خون تازه و FIFO برای سایر تقاضاها به کار گرفته می‌شود.

تقاضا: توزیع تقاضا یک تقریب از میانگین تقاضا است که با استفاده از داده‌های گذشته به دست آمده است. میانگین تقاضا با توجه به داده‌های واقعی در یک سال در شکل (۱) آمده است.



شکل ۱. میانگین تقاضای انواع گروه‌های خونی به تفکیک هر ماه

ساختار هزینه: پارامترهای هزینه ممکن است ارزش‌های غیرواقعی را در نظر بگیرند، زیرا تنها مقادیر نسبی آنها برای متعادل کردن معیارهای معین به جای ارزش مطلق آنها اهمیت دارد. مقدار هزینه‌ها به صورت زیر دنبال می‌گردد:

- C^O برابر ۶۰۰۰۰ تومان برای هر واحد محصول است که هزینه تاریخ گذشتگی را نشان می‌دهد.
- C^S برابر ۲۰۰۰۰۰۰۰۰ تومان می‌باشد که در صورت کمبود محصول ممکن است منجر به فوت بیمار نیازمند گردد که بدون احتساب سایر هزینه‌های اجتماعی و با عرف جامعه محاسبه گردیده است.
- C^Y برابر ۱۰۰۰۰۰۰۰ تومان می‌باشد که هزینه عدم انطباق خون می‌باشد. یعنی زمانی که به گلبول قرمز خون تازه نیازمند هستیم ولی با خون‌های کهنه‌تر تقاضا را تأمین می‌کنیم با این هزینه مواجه می‌شویم. هزینه‌های عدم انطباق بالاتر از هزینه‌های کمبود است، چون کیفیت سرویس مهم‌تر از هزینه‌های تولید در نظر گرفته شده است.
- C^H برابر ۱۰۰۰ تومان برای هر واحد محصول در هر روز در نظر گرفته شده است.

مقیاس‌گذاری: برای داده‌های واقعی وضعیت‌های خیلی زیادی وجود دارد که باید در نظر گرفته شود. یک راه برای کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی مقیاس دادن به پارامترهای مسئله است. بنابراین ما داده‌ها را به گونه‌ای تغییر می‌دهیم که تقاضا در گروه‌هایی دسته‌بندی می‌شوند. بنابراین سطح موجودی x_r مجموعه‌ای از گروه‌ها است که موجب کوچک‌تر شدن فضای مسئله می‌شود. در خصوص داده‌های واقعی این دسته بندی خواهیم داشت:

$B_1 = (x_1)$
$B_2 = (x_2 . x_3 . \dots . x_8)$
$B_3 = (x_9 . x_{10} . \dots . x_{14})$
$B_4 = (x_{15} . x_{16} . \dots . x_{21})$
$B_5 = (x_{22} . x_{18} . \dots . x_{28})$
$B_6 = (x_{29} . x_{25} . \dots . x_{35})$

که گروه‌های $\mathbf{B_4}$، $\mathbf{B_5}$و $\mathbf{B_6}$ شامل خون‌های جوان و مابقی سایر خون‌ها می‌باشد.

ظرفیت ذخیره‌سازی با استفاده از میانگین تقاضا و میزان تقاضا به صورت تصادفی در بازه ۱ الی ۳۵ در نظر گرفته شده است. با توجه به مقیاس‌گذاری‌های بالا از این رو فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف مقیاس‌پذیر را می‌توان در یک زمان معقول حل کرد.

حل فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف مقیاس‌گذاری شده برای انواع سیاست‌های صدور: اکنون فرآیند تصمیم گیری مارکوف می‌تواند توسط الگوریتم تقریب متوالی حل گردد. با این تقریب‌ها می‌توان به یک نتیجه قابل قبول از حل مسئله دست یافت. از آنجا که نتایج به شدت به خط مشی صادر شده بستگی دارد، سه روش مختلف صدور سفارش در نظر گرفته می‌شود. در جدول (۱) ارزش پارامترهای فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف آورده شده است.

جدول ۱. ارزش پارامترهای فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف

m=35
$C^S = 200000000$
$C^O = 60000$
$C^H = 1000$
$C^Y = 10000000$

$I \in \{(FIFO\text{-}FIFO),(LIFO\text{-}LIFO),(LIFO\text{-}FIFO)\}$
$P^{Y}(j)$ و $P^{A}(k)$ = **بر اساس توزیع نرمال از تقاضای سالانه**

تمامی داده‌ها با در نظر گرفتن تمام عوامل کمبود، تاریخ گذشتگی، عدم انطباق‌ها و هزینه‌های نگهداری و برای سه نوع صدور سفارش I براساس الگوریتم تقریب متوالی و با استفاده از نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است.

۷) نتیجه‌گیری و پیشنهادات

انتخاب فعالیت‌هایی که دارای کمترین هزینه هستند یکی از دغدغه‌های اصلی مدیران هر سازمانی است. از این رو، تحقیقات زیادی جهت کاهش هزینه‌های سازمان‌های مختلف صورت گرفته است. کاهش هزینه‌های محصولات فاسدپذیر نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که محصولات خونی با توجه به فسادپذیر و استراتژیک بودن محصول در جایگاه ویژه‌ای قرار دارد. با توجه به این که اهداکنندگان خون معمولا به صورت نامنظم و تصادفی اقدام به اهدای خون می‌کنند و از طرفی هزینه‌های زیاد تولید محصول، کاهش هزینه‌های مربوط به نگهداری محصول و کاهش عدم انطباق‌ها و همچنین تاریخ گذشتگی‌ها مهم جلوه می‌کند. با توجه به اهمیت کیفیت خون که در این تحقیق به صورت خون جوان و سایر خون ها در نظر گرفته شده است، اگر به بیماری که نیاز حتمی به خون جوان دارد، از سایر خون‌ها تزریق گردد عدم انطباق رخ می‌دهد که موجب ایجاد هزینه می‌شود و از طرفی کمبود این محصول استراتژیک ممکن است موجب افزایش مرگ و میرها در جامعه گردد که هزینه بسیار زیادی را موجب خواهد شد.

جهت هماهنگی میان عدم کمبود و فاسد شدن و عدم‌انطباق و هزینه‌های نگهداری محصول و با توجه به غیر قابل پیش‌بینی بودن تقاضا، نیازمند روشی کارآمد و پویا هستیم. از طرفی فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف با توجه به خاصیت خود که فقط به آخرین رخداد موجود یعنی رخداد کنونی وابسته باشد نه به گذشته‌های دیگر، اهمیت پیدا می‌کند. فرایندهای تصمیم‌گیری مارکوف یک چارچوب ریاضی برای مدلسازی تصمیم‌گیری در شرایطی است که نتایج تا حدودی تصادفی و تا حدودی تحت کنترل یک تصمیم‌گیر است. مسئله اصلی در فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف پیدا کردن یک سیاست برای تصمیم‌گیر است. تصمیم‌گیری مارکوف برای مطالعه محدوده گسترده‌ای از مسایل بهینه‌سازی که تحت برنامه‌ریزی پویا و یادگیری حل می‌شوند مناسب است. به طور دقیق‌تر فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف یک فرآیند کنترل احتمالی با زمان قطعی است که توسط مجموعه‌ای از حالت‌ها مشخص می‌شود. در هر حالت عمل‌های زیادی برای انتخاب تصمیم‌گیرنده وجود دارند. تصمیم گیرنده پاداش یا هزینه‌ای را به ازای هر حالت به دست خواهد آورد. با داشتن حالت یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف در یک زمان احتمالات انتقال از این حالت به حالت بعدی مستقل از همه حالت و عمل‌های گذشته است.

در این تحقیق روشی برای بهینه‌سازی هزینه‌های مرتبط با موجودی زنجیره‌تأمین محصولات خونی با عمر مفید کوتاه انتخاب شده است که نسبت به سایر روش‌های موجود متفاوت است. با توجه به جدید بودن این روش و عدم آشنایی با مشکلات این روش، مقیاس‌گذاری صورت گرفته است تا فضای وضعیت مسئله کوچک‌تر گردد که این مقیاس‌گذاری‌ها ممکن است دقت جواب مسئله را کمتر نماید. از سوی دیگر با توجه به ابعاد حل مسئله تعداد تکرارهای حل محدود شده

است. در نهایت، پس از حل مشکلات ذکر شده داده‌های جمع‌آوری شده با قرار دادن در فرمولاسیون فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف و با روش تقریب متوالی حل شده است که جواب این حل برای تصمیم‌گیری انتخاب یکی از سیاست‌های LIFO-(LIFO)، (FIFO-FIFO) و (LIFO,FIFO) به تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند.

پس از اعمال داده‌های مسئله در کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب برای انواع گروه‌های خونی و ۲۷۸۲۵۶ تکرار، ارزش سیاست بهینه $V^n(x)$ به یک همگرایی نسبی دست پیدا می‌کند که به دلیل گسترده بودن جواب‌های بدست آمده و عدم امکان‌پذیری نمایش آنها در اینجا فقط خلاصه‌ای از جدول نتایج به دست آمده برای یک گروه خونی O+ در جدول (۲) آمده است که ستون تکرار از روز صفر شروع می‌گردد و با تمام شدن هر روز، روز جدید اضافه می‌گردد که به همراه یک $V^n(x)$ جدید برای آن روز می‌باشد و بعد از چندین تکرار می‌تواند به یک همگرایی نسبی در تکرار روز ۲۷۸۲۵۶ ام برسد. هزینه‌های هر سیاست نیز به صورت جداگانه و به صورت تجمعی اضافه می‌گردد که می‌توان در آخرین تکرار که به دلیل همگرایی متوقف شده است به نتیجه رسید. با توجه به میزان هزینه‌ها و مقایسه درصدهای هزینه برای هر سیاست بهینه در آخرین تکرار تفاوت چشمگیری در خصوص اختلاف هزینه‌ها قابل مشاهده است که بیانگر بهینه بودن سیاست (LIFO-FIFO) در مقایسه با سایر سیاست‌ها می‌باشد و این بیانگر این است که سیاست صدور سفارش LIFO برای برای سفارش‌های جوان و سیاست صدور سفارش FIFO برای خون‌های غیرجوان مناسب است.

جدول ۲. نتایج محاسبات انجام شده توسط نرم‌افزار متلب برای گروه خونی O+

تکرار	$V^{n+1}(x)$	درصد هزینه LF	درصد هزینه LL	درصد هزینه FF	مقدار هزینه LF	مقدار هزینه LL	مقدار هزینه FF
۰	۴۳۴۵۶۵۴۶۸۸۲	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۷	۶۴۰۰۰	۶۴۰۰۰	۶۵۰۰۰
۱	۲۴۵۶۳۷۸۵۹۳۷	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰۱۲۸۰۰۰	۱۲۸۰۰۰	۱۳۱۰۰۰
۲	۳۷۱۵۳۳۵۷۱۰۷	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۴	۱۹۲۰۰۰	۱۹۲۰۰۰	۱۹۸۰۰۰
۳	۲۷۶۳۹۷۵۹۱۱۵	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۴	۲۵۶۰۰۰	۲۵۶۰۰۰	۲۶۶۰۰۰
۴	۲۳۶۹۹۶۶۳۶۵۰	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۴	۳۲۰۰۰۰	۳۲۰۰۰۰	۳۳۵۰۰۰
۵	۲۸۹۹۷۷۰۹۰۴۴	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۴	۳۸۴۰۰۰	۳۸۴۰۰۰	۴۰۵۰۰۰
۶	۳۴۷۹۲۱۵۲۱۳۴	۰/۳۸	۰/۳۲	۰/۳۴	۴۴۸۰۰۰	۴۴۸۰۰۰	۴۶۹۰۰۰
۷	۲۵۸۰۷۷۲۸۲۸۴	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۴	۵۱۲۰۰۰	۵۱۲۰۰۰	۵۳۳۰۰۰
۸	۲۸۳۵۴۷۳۶۶۴۹	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۴	۵۷۶۰۰۰	۵۷۶۰۰۰	۵۹۷۰۰۰
۹	۲۹۶۰۶۳۵۴۶۸۵	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۴	۶۴۰۰۰۰	۶۴۰۰۰۰	۶۶۱۰۰۰
....	...	...	...	...	...	...	...
۱۸۹۱۹	۵۰۲۵۹۲۷۱۹۸۱	۲۱/۴	۳۹/۸	۳۸/۷	۱۰۶۴۳۵۱۶۲	۱۹۷۴۹۵۲۵۴	۲۰۵۴۸۰۳۷۱
...	...	...	...	...	...	...	...
۲۷۸۲۵	۱۴۴۷۳۸۵۰۹۵۴۵	۱۳/۶	۴۴/۸	۴۱/۴	۱۴۷۸۴۲۵۰۴۲۰	۴۸۵۱۳۵۲۳۴۹۳	۴۴۷۷۴۲۳۲۰۸۵
۲۷۸۲۵	۱۴۴۵۱۷۹۳۰۷۸۵	۱۳/۹	۴۵/۱	۴۱/۶	۱۴۲۵۴۹۳۱۳۱۸	۴۸۷۷۳۶۹۶۰۱۱	۴۵۰۴۵۱۵۰۶۷۰

با بررسی انواع هزینه و مقایسه انواع سیاست‌های (LIFO-LIFO)، (FIFO-FIFO) و (LIFO-FIFO) می‌توان در طول تکرار به این نتیجه دست پیدا کرد که سیاست‌های (LIFO-LIFO) و (LIFO-FIFO) به نسبت سیاست (FIFO-FIFO) بهتر عمل می‌کنند و هزینه به مراتب کمتری را در طولانی مدت به همراه دارند. در این تحقیق تلاش گردید با در نظر گرفتن هزینه‌های مختلف مرتبط با موجودی در خصوص انواع سیاست‌های صدور سفارش تصمیم‌گیری شود. با مطالعات گسترده‌تر در این خصوص حتما به نتایج به مراتب بهتر و دقیق‌تری می‌توان دست یافت که در ادامه پیشنهاداتی برای انجام تحقیقات آتی ارایه می‌گردد:

۱. مشابه این تحقیق را می‌توان برای سایر محصولات خونی نیز انجام داد ولی با توجه به این که فضای مسئله برای محصولات با عمر مفید زیاد خیلی بزرگ‌تر می شود و موجب کمتر شدن دقت مسئله می‌گردد پیشنهاد می‌شود برای محصولات با عمرمفید کمتر مانند پلاکت‌های خونی از این روش استفاده گردد.

۲. جهت حل چنین مسائلی می‌توان از روش های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده نمود که به مراتب پیچیدگی‌های این روش را با خود به همراه ندارند.

۳. از فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف برای حل مسائل مربوط به موجودی و همچنین موجودی‌های فاسدشدنی استفاده نمود.

۴. از روش مذکور در این مقاله می‌توان با توجه به معیارهای مربوط به مکان‌یابی جهت مدلسازی مکان‌یابی بهینه بانک‌های خون استفاده کرد.

منابع

Blake, J. T., & Hardy, M. (2014). A generic modelling framework to evaluate network blood management policies: The Canadian Blood Services experience. Operations Research for Health Care, 3(3), 116–128. DOI:10.1016/j.orhc.2014.05.002

Brodheim, E., Derman, C., & Prastacos, G. (1975). On the Evaluation of a Class of Inventory Policies for Perishable Products Such as Blood. Management Science, 21(11), 1320–1325. Doi: 10.1111/poms.13058

Duan, Q., & Liao, T. W. (2014). Optimization of blood supply chain with shortened shelf lives and ABO compatibility. International Journal of Production Economics, 153, 113–129. Doi: 10.1016/j.ijpe.2014.02.012

Erickson, M. L., Champion, M. H., Klein, R., Ross, R. L., Neal, Z. M., & Snyder, E. L. (2008). Management of blood shortages in a tertiary care academic medical center: the Yale-New Haven Hospital frozen blood reserve. Transfusion, 48(10), 2252–2263. DOI:10.1111/j.1537-2995.2008.01816.x

Frank, S. M., Abazyan, B., Ono, M., Hogue, C. W., Cohen, D. B., Berkowitz, D. E., … Barodka, V. M. (2013). Decreased Erythrocyte Deformability After Transfusion and the Effects of Erythrocyte Storage Duration. Anesthesia & Analgesia, 116(5), 975–981. DOI: 10.1213/ANE.0b013e31828843e6

Gunpinar, S. (2013). Supply Chain Optimization of Blood Products. Graduate Theses and Dissertations. DOI: 10.1213/ANE.0b013e31828843e6

Gunpinar, S., & Centeno, G. (2015). Stochastic integer programming models for reducing wastages and shortages of blood products at hospitals. Computers & Operations Research, 54(C), 129–141. Doi: 10.1016/j.cor.2014.08.017

Katsaliaki, K., & Brailsford, S. C. (2007). Using Simulation to Improve the Blood Supply Chain. The Journal of the Operational Research Society. Palgrave Macmillan JournalsOperational Research Society. DOI:10.1057/palgrave.jors.2602195

Koch, F., Jourquin, F., Ferrier, P., & Andrau, J.-C. (2008). Genome-wide RNA polymerase II: not genes only! Trends in Biochemical Sciences, 33(6), 265–73. DOI: 10.1016/j.tibs.2008.04.006

Pegels, C. C., & Jelmert, A. E. (1970). An Evaluation of Blood-Inventory Policies: A Markov Chain Application. Operations Research, 18(6), 1087–1098. DOI:10.1287/opre.18.6.1087

Seifried, E., H. Klueter, C. Weidmann, T. Staudenmaier, H. Schrezenmeier, R. Henschler, A. Greinacher, and M. M. M. (2011). How Much Blood is Needed? Vox Sanguinis, 100(1), 10–21. DOI: 10.1111/vox.13103