روش شاخه و برش برای مسئله موجودی – مسیریابی واحدهای خون: یک مطالعه موردی

سید محمود کاظمی[۱]، مسعود ربانی[۲*]، رضا توکلی مقدم[۳]

دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۱۴

چکیده

در این مقاله، برای اولین بار در ادبیات موضوع، مسئله موجودی – مسیریابی واحدهای خون تعریف شده و یک فرمول‌بندی مختلط عددصحیح خطی برای آن ارائه شده است. این کار به کمک استفاده از مفاهیمی چون موجودی تخصیص‌یافته، نسبت انتقال به کراس‌مچ[۴] واحدهای خون و زمان رهاسازی واحدهای کراس‌مچ شده[۵] و مدل‌سازی و گنجاندن آنها در به‌روزترین مدل‌های موجودی – مسیریابی توسعه‌یافته برای اقلام فسادپذیر حاصل شده است. در انتها داده‌های مربوط به مصرف خون مرکز انتقال خون ساری برای سه ماه متوالی آورده شده و مسئله موجودی – مسریابی مربوطه به کمک روش شاخه و برش ابداعی به صورت بهینه حل شده است. نکته برجسته در مورد روش شاخه و برش پیشنهادی، استفاده از تکنیک جدید برای شناسایی و اضافه نمودن محدودیت‌های مربوط به حذف زیردورها است. در نهایت برتری مدل پیشنهادی نسبت به جدیدترین مدل‌های موجود در ادبیات موضوع به کمک مثال عددی نشان داده شده است. در انتها دستاوردهای مقاله جمع‌بندی شده و پیشنهادات برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: مسئله موجودی - مسیریابی خون، چندوسیله نقلیه، فسادپذیری، پلاکت، روش شاخه و برش

۱- مقدمه

مسئله موجودی – مسیریابی در زمینه سیستم‌های مدیریت موجودی توسط فروشنده معرفی شده است. در این سیستم‌ها مشتریان اطلاعات تقاضای خود را در اختیار تأمین‌کننده قرار می‌دهند و تأمین‌کننده با توجه به اطلاعات دریافتی در زمینه برنامه‌ریزی حمل و نقل شبکه و بازپرسازی موجودی‌ها تصمیم‌گیری می‌نماید. بنابراین مسئله موجودی – مسیریابی همزمان چهار تصمیم مهم زیر را اتخاذ می‌کند، به‌گونه‌ای که کل هزینه‌های موجودی و حمل و نقل شبکه کمینه گردد:

الف) چه زمانی کالاها باید برای تحویل ارسال شوند.
ب) کدام مشتریان در هر دوره زمانی باید ملاقات شوند.
ج) به‌هرکدام از مشتریان چه میزان کالا باید تحویل شود.
د) هرکدام از مشتریان به چه مسیری باید تخصیص یابند.

اولین تحقیق در زمینه مسئله موجودی – مسیریابی به ۳۱ سال قبل و بل[۶] و همکاران[۱] باز می‌گردد. پس از آن این مسئله به خوبی گسترش یافت به‌گونه‌ای که به‌خوبی پاسخ‌گوی بسیاری از چالش‌های جدید گشته و کاربردهای بسیاری در مسائل نو و واقعی یافت.

اما در طول پنج سال اخیر، توجه محققان بیش از پیش به این مسئله جلب شد، به‌طوری‌که تعداد مقالات چاپ شده به سرعت افزایش یافت. بخش عمده این تحقیقات به توسعه روش‌های دقیق و ابتکاری اختصاص یافت. برای مشاهده جدیدترین مرور ادبیات در زمینه مسائل موجودی – مسیریابی لطفاً به پژوهش[۲] مراجعه شود.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، پست الکترونیک؛ kazemi_m_s@ut.ac.ir
۲*- استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، نویسنده مسئول، پست الکترونیک: mrabani@ut.ac.ir، نشانی: پردیس، دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۳- استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، پست الکترونیک؛ tavakoli@ut.ac.ir

4- Transfusion to Crossmatch Ratio
5- Crossmatch Release Period
6- Bell

به‌رغم تمام پیشرفت‌های چشمگیری که در زمینه مسائل موجودی–مسیریابی به‌وقوع پیوسته است، نویسندگان نتوانستند پژوهشی با تمرکز بر محصولات خون در این زمینه بیابند. این مسئله با وجودی اتفاق افتاده است که به‌دلیل فسادپذیری محصولات خون و همچنین ضرورت وجود آنها برای بیماران (مشتریان)، اهمیت پرداختن به این زمینه را دوچندان کرده است. اگرچه اخیراً مطالعات خوبی با تمرکز بر فسادپذیری محصولات انجام شده است([۷ – ۳]) اما هیچ‌کدام از آنها را نمی‌توان برای حل مسائل موجود در زنجیره خون به‌کار برد. ولی قبل از شرح علت نارسایی ادبیات موجود، ابتدا به‌طور خلاصه به بررسی مطالعات انجام شده در زنجیره تأمین خون پرداخته می‌شود.

به‌تازگی مرور ادبیات جامعی بر مدیریت زنجیره تأمین خون توسط بلین و فورسی[۱] [۸] انجام شده است. براساس این مطالعه مشاهده می‌شود که مطالعات انجام گرفته در زمینه کاربرد روش‌های برنامه‌ریزی عددصحیح (مختلط عدد صحیح) در زنجیره تأمین خون بسیار محدود است (فقط ۳ مقاله تا سال ۲۰۱۲).

پیرسکالا[۲] [۹] یک مدل تلفیقی مکان‌یابی – تخصیص برای بانک‌های خون منطقه‌ای و مرکزی توسعه داد. آنها همچنین روش مناسبی برای محاسبه سطح موجودی هدف بانک‌های خون بیمارستان‌ها معرفی نمودند. ساهین[۳] و همکاران[۱۰] یک مدل مکان‌یابی تخصیص برای منطقه‌ای نمودن خدمات خون برای بخشی از جامعه هلال احمر ترکیه ارائه نمودند.

هلمایر[۴] و همکاران[۱۱] در تحقیق خود به صرفه بودن گذار از شرایط موجود به یک سیستم مدیریت موجودی توسط فروشنده را برای شبکه بانک خون هلال احمر اتریش بررسی کردند. این تحقیق توسط برنامه‌ریزی عددصحیح فرموله شد. محققان دو راهبرد را برای تحویل محصولات خونی در نظر گرفتند. اولین استراتژی چهار منطقه را برای بیمارستان‌ها در نظر می‌گیرد که در هرکدام از آنها یک مسیر ثابت تحویل، تعیین شده است. آنگاه فرمول‌بندی تعیین می‌کند که در هر روز کدام بیمارستان‌ها باید ملاقات شوند به‌گونه‌ای که هزینه تحویل و ضایعات کمینه شده و هیچ کمبودی در هیچ بیمارستانی مجاز نباشد. راهبرد دوم انعطاف‌پذیری بیشتری در انتخاب مسیرهای وسیله نقلیه در اختیار می‌گذارد که در واقع می‌توان آن را یک مسئله مسیریابی دوره‌ای وسیله نقلیه با محدودیت‌های طول مسیر و بدون محدودیت ظرفیت درنظر گرفت. کمی بعد به منظور پاسخ‌گویی به تقاضای غیرقطعی، هلمایر و همکاران[۱۲] در سال ۲۰۱۰ کار قبلی خود را توسعه دادند.

در سال ۲۰۱۳، گونپینار[۵] [۱۳] در رساله خود سه مدل ریاضی توسعه داد. مدل اول یک شبکه غیرمتمرکز متشکل از یک مرکز خون و یک بیمارستان را در نظر می‌گیرد و بیمارستان سطوح بهینه سفارش خود را به‌گونه‌ای تعیین می‌کند که مجموع هزینه‌های خود و سطوح کمبود و ضایعات را در حداقل ممکن حفظ نماید. مدل دوم یک شبکه متمرکز متشکل از یک مرکز خون و چندین بیمارستان را در نظر می‌گیرد که در آن مرکز خون از میزان موجودی و تقاضای هر بیمارستان آگاه است. آنگاه بدون در نظر گرفتن تصمیمات مربوط به مسیریابی، مدل مذکور راهبردهای توزیع مرکز خون را بهینه می‌نماید. نکته مهم درباره این تحقیق این است که مفاهیم مربوط به موجودی خون از قبیل موجودی تخصیص‌یافته و تخصیص‌نیافته و نسبت انتقال به کراس‌مچ را در مدل خود لحاظ نموده‌اند. به‌منظور مطالعه تحقیقات بیشتر در زمینه کاربرد مدل‌های بهینه‌سازی عددصحیح در زنجیره تأمین خون، خواننده محترم را به تحقیقات[۱۸ – ۱۴] ارجاع داده می‌شود.

با توجه به مرور ادبیات فراهم شده در زنجیره تأمین خون و مسائل موجودی – مسیریابی می‌توان نارسایی‌های ادبیات موضوع را با توجه به مسئله موجودی – مسیریابی محصولات خونی در موارد زیر خلاصه نمود:

الف) مطالعات بسیار کمی با تمرکز بر محصولات فسادپذیر وجود دارد که هیچ‌کدام از آنها مفاهیم بسیار مهم موجودی خون نظیر موجودی‌های تخصیص‌یافته و تخصیص‌نیافته، نسبت انتقال به کراس‌مچ، زمان رهاسازی کراس‌مچ و سیاست صدور مناسب اقلام خونی را در نظر نمی‌گیرند.

ب) در مسئله موجودی – مسیریابی خون با عدم قطعیت بسیار عمیقی در تقاضای بیماران اورژانسی مواجه بوده که توزیع این عدم قطعیت ذاتی از هیچ‌گونه تابع توزیع مشخصی پیروی نمی‌کند. لذا باید توسط روش‌هایی چون بهینه‌سازی استوار که برای چنین عدم قطعیت‌هایی بسیار مناسب هستند به خوبی مدیریت شود. کاربرد چنین روش‌های

1- Beliën & Forcé
2- Pierskalla
3- Şahin
4- Hemmelmayr
5- Gunpinar

بهینه‌سازی استوار در ادبیات موضوع بسیار محدود است.

ج) سیاست صدور واحدهای خون هم برای مراکز انتقال خون و هم برای بیمارستان‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که اقلام با عمر بیشتر زودتر برای تحویل ارسال شوند. یکپارچه‌سازی این سیاست در ادبیات موجودی – مسیریابی فقط به مطالعه [۷] محدود می‌شود. البته شایان ذکر است که برای برخی اعمال جراحی خاص مانند جراحی بایپس کاردیوپولمناری، عمل قلب باز اطفال و بیماران آنکولوژی و هماتولوژی فقط خون تازه مجاز است که در عمل باید مورد توجه قرار گیرد.

د) انتقال جانبی بین بیمارستان‌ها درصورتی‌که توسط مقررات حکومتی مجاز باشد باید در نظر گرفته شود.

ه) برای محافظت از زنجیره سرد محصولات خونی در طول حمل و نقل یک تابع هدف اضافی به‌گونه‌ای که کمینه‌سازی زمان حمل را در نظر بگیرد باید به مدل اضافه گردد. موضوعی که در ادبیات موضوع بسیار مورد اغفال واقع شده است. چنین امری طبعا با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های مسیریابی در تقابل است و نیازمند توسعه روش‌های حل چندهدفه مناسب می‌باشد.

در حالت ایده‌آل یک مدل کامل مسیریابی – موجودی خون باید قادر باشد به‌طور همزمان به تمام موارد فوق پاسخ دهد. اما این امر منجر به تشکیل چنان مدل ریاضی پیچیده‌ای می‌شود که حل بهینه آن حتی برای مسایل در ابعاد بسیار کوچک نیز دشوار می‌گردد. بنابراین در این تحقیق، تعدادی از ضروری‌ترین موارد ذکر شده در بالا انتخاب شده‌اند و برای اولین بار در ادبیات موضوع یک مدل موجودی – مسیریابی خون با تقاضای قطعی به‌طور رسمی تعریف‌شده و توسط برنامه‌ریزی مختلط عددصحیح فرمول‌بندی مناسبی برای آن ارائه می‌گردد. در نظرگرفتن سایر موارد برای مطالعات آتی توصیه می‌گردد. پس از آن برای حل دقیق مدل پیشنهادی در مطالعه حاضر، یک الگوریتم شاخه و برش جدید بر پایه یافتن محدودیت‌های ارضاء نشده مربوط به زیردورهای تشکیل شده و اضافه کردن آنها به صورت برش به مسئله اصلی، توسعه داده شده است.

ادامه مقاله به شرح زیر می‌آید. در بخش دو مسئله موجودی – مسیریابی خون به‌طور کامل شرح داده می‌شود. بخش سه مدل پیشنهادی را به همراه توضیحات کامل آن ارائه می‌کند. روش شاخه و برش پیشنهادی در بخش چهار توضیح داده می‌شود. بخش پنج مطالعه موردی مورد نظر را به‌صورت خلاصه بیان می‌کند. نتایج عددی در بخش شش ارائه می‌شوند و در نهایت در بخش هفت دستاوردهای مقاله جمع‌بندی‌شده و پیشنهادات برای تحقیقات آتی ارائه می‌شوند.

۲- شرح مسئله

گراف $G=(V,E)$ را در نظر بگیرید که در آن $V=\{0,\ldots,n\}$ مجموعه نقاط و $E=\{(i,j):i,j\in V, i<j\}$ مجموعه یال‌هاست. نقطه 0 نماینده مرکز انتقال خون و مجموعه سایر نقاط $V'=V\setminus\{0\}$ نماینده بانک خون بیمارستان‌هاست. همچنین مجموعه $T=\{1,\ldots,lp\}$ را افق زمانی در نظر بگیرید به‌طوری‌که lp طول افق زمانی را نشان می‌دهد. در هر دوره $t\in T$ مجموعه $K=\{1,\ldots,nv\}$ از وسایل نقلیه در مرکز انتقال خون در دسترس است. علاوه‌براین، برای هر واحد محصول خون گروه عمر g تعریف می‌شود که $g\in SL=\{0,\ldots sl\}$ و sl طول عمر محصول را نشان می‌دهد یعنی اگر عمر محصول از sl فراتر باشد، محصول دیگر فاسدشده در نظر گرفته شده و غیرقابل استفاده می‌گردد. هنگامی‌که یک واحد خون غیرقابل استفاده می‌گردد هزینه‌ای برابر oc به سیستم اعمال می‌شود. بانک خون هر بیمارستان یک سطح موجودی هدف از پیش تعیین شده برابر TIL_i دارد که هر وقت توسط وسیله نقلیه ملاقات می‌شود باید مقداری تحویل گیرد که سطح موجودی آن را به این مقدار برساند (سیاست OU). در شروع افق زمانی، مرکز انتقال خون از سطح موجودی اولیه خون در بانک خون بیمارستان‌ها آگاه است و تقاضای هر بیمارستان در هر دوره de_i^t را می‌داند. همچنین در ابتدای هر دوره r^t واحد خون تازه برای مرکز انتقال خون مهیا می‌شود. زمانی‌که وسیله نقلیه k مرکز انتقال خون را برای تأمین تقاضای مجموعه $S\subseteq V'$ از بیمارستان‌ها ترک می‌کند محدودیت ظرفیت آن به‌وسیله Qu باید رعایت شود، به هر بیمارستان i مقدار $\sum_{g\in SL} q_i^{gkt}$ واحد باید تحویل داده شود به‌گونه‌ای که سطح موجودی آن را به‌طور دقیق به TIL_i برساند و برای عبور از هر یال $(i,j)\in E$ هزینه‌ای معادل rc_{ij} باید لحاظ شود. هنگام وقوع تقاضا d_i^{gt} واحد مصرف می‌شود در شرایطی که نامساوی $de_i^t=\sum_{g\in SL} d_i^{gt}$ برقرار است. از این مقدار پس از R دوره نسبت $(1-p)$ برابر آن دوباره به موجودی تخصیص‌نیافته تبدیل می‌شود که در ابتدای آن دوره قابل استفاده است ولی عمر آن R واحد افزایش‌یافته است. در اینجا R زمان رهاسازی کراس‌مچ و p

نسبت انتقال به کراس‌مچ می‌باشد. برای هر واحد محصول با عمر g که در انتهای هر دوره در بیمارستان i بدون استفاده باقی بماند هزینه نگهداری برابر hc_i^g به سیستم تحمیل می‌گردد. حال مسئله این است که تعیین کنیم هر بیمارستان در کدام دوره ملاقات شود، چه مقدار به هرکدام از آنها تحویل شده و هر بیمارستان به مسیر کدام وسیله نقلیه اختصاص داده شود، به‌گونه‌ای که هزینه‌های فساد اقلام، حمل و نقل و موجودی کمینه گردد.

۲- مدل ریاضی پیشنهادی

۲-۱- فرمول‌بندی مسئله

جدول (۱): متغیرها

Inv_i^{gt}	سطح موجودی واحدهای خون با طول عمر g در پایان دوره‌ی t در هر بیمارستان
u_i^t	تعداد واحدهای خون فاسد شده در هر بیمارستان در پایان دوره t
x_{ij}^{kt}	تعداد دفعاتی که یال (i,j) توسط وسیله k در دوره t طی می‌شود.
q_i^{gkt}	مقدار واحدهای خون با عمر g که توسط وسیله k در دوره t به بیمارستان i تحویل داده می‌شود.
y_i^{kt}	متغیر باینری که برابر ۱ است اگر و فقط اگر بیمارستان i توسط وسیله k در دوره t ملاقات شود.
z_i^t	متغیر باینری که برابر ۱ است اگر و فقط اگر بیمارستان i در دوره t ملاقات شود.
β_i^{gt}	تعداد واحدهای با عمر g که در ابتدای دوره t از موجودی تخصیص‌یافته بیمارستان i به موجودی تخصیص‌نیافته باز می‌گردند.
d_i^{gt}	تعداد واحدهای خون با عمر g که برای پاسخ‌گویی به تقاضای بیمارستان i در دوره t کراس‌مچ می‌شوند.
L_i^{gt}	متغیر باینری برابر ۱ اگر و فقط اگر واحدهای خون با عمر g برای ارضای تقاضا در دوره t استفاده شوند.

۲-۲- تابع هدف

$$\min \sum_{i\in V}\sum_{g\in SL}\sum_{t\in T} hc_i^g \times Inv_i^{gt} + \sum_{i\in V'}\sum_{t\in T} oc \times u_i^t + \sum_{i\in V}\sum_{\substack{j\in V\\ i<j}}\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} rc_{ij} \times x_{ij}^{kt} \qquad (۱)$$

تابع هدف (۱) کل هزینه‌های سیستم شامل موجودی، فساد اقلام و مسیریابی را کمینه می‌نماید.

۲-۳- محدودیت‌های مربوط به سیاست (OU)

$$q_i^{gkt} \le TIL_i \times y_i^{kt} \qquad i\in V', g\in SL, k\in K, t\in T \qquad (۲)$$

$$\sum_{g\in SL}\sum_{k\in K} q_i^{gkt} + \sum_{g\in SL} Inv_i^{g-1,t-1} + \sum_{g\in SL}\beta_i^{gt} \le TIL_i \qquad i\in V', t\in T \qquad (۳)$$

$$\sum_{g\in SL}\sum_{k\in K} q_i^{gkt} \ge TIL_i \times z_i^t - \sum_{g\in SL} Inv_i^{g-1,t-1} - \sum_{g\in SL}\beta_i^{gt} \qquad i\in V', t\in T \qquad (۴)$$

محدودیت‌های (۴ – ۲) تواماً تضمین می‌کنند که سیاست موجودی OU اعمال می‌شود.

۲-۴- محدودیت‌های مربوط به سیاست (OF)

$$d_i^{gt} \le TIL_i \times L_i^{gt} \qquad i\in V', g\in SL, t\in T \qquad (۵)$$

$$L_i^{g-1,t} \le L_i^{gt} \qquad i\in V', g\in SL\setminus\{0\}, t\in T \qquad (۶)$$

$$TIL_i \times \left(1-L_i^{g-1,t}\right) \ge \sum_{j=g}^{sl} Inv_i^{j-1,t-1} + \sum_{j=g}^{sl}\sum_{k\in K} q_i^{jkt} + \sum_{j=g}^{sl}\beta_i^{jt} - de_i^t + 1 \qquad i\in V', g\in SL\setminus\{0\}, t\in T \qquad (۷)$$

محدودیت‌های (۷ – ۵) تواماً تضمین می‌کنند که سیاست صدور OF اعمال می‌شود. یعنی ابتدا از واحدهای کهنه‌تر باید استفاده شود.

۲-۵- محدودیت‌های بالانس موجودی

$$Inv_0^{gt} = Inv_0^{g-1,t-1} - \sum_{i\in V'}\sum_{k\in K} q_i^{gkt} \qquad g\in SL\setminus\{0\}, t\in T \qquad (۸)$$

$$Inv_0^{0t} = r^t \qquad t\in T \qquad (۹)$$

$$Inv_i^{gt} = Inv_i^{g-1,t-1} + \sum_{k\in K} q_i^{gkt} + \beta_i^{gt} - d_i^{gt} \qquad i\in V', g\in SL\setminus\{0\}, t\in T \qquad (۱۰)$$

$$Inv_i^{0t} = \sum_{k\in K} q_i^{0kt} - d_i^{0t} \qquad i\in V', t\in T \qquad (۱۱)$$

$$\beta_i^{gt} = \left\lfloor d_i^{g-R,t-R} \times (1-p) \right\rfloor \qquad g=1+R,\dots,sl+R,\ t=R+1,\dots,T,\ i\in V' \qquad (۱۲)$$

محدودیت (۸) بالانس موجودی را برای تأمین‌کننده نشان می‌دهد. محدودیت (۹) بیان می‌کند که در هر دوره

مقدار r^t واحد خون تازه برای تأمین‌کننده فراهم می‌شود. محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) بالانس موجودی خون را برای هریک از بیمارستان‌ها نشان می‌دهد. محدودیت (۱۲) نیز مقادیر خون برگشتی به موجودی تخصیص نیافته در ابتدای هر دوره را محاسبه می‌کنند.

۲-۶- محدودیت‌های ظرفیت

$$\sum_{g\in SL} Inv_i^{gt} \le TIL_i \qquad i\in V',t\in T \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{i\in V'}\sum_{g\in SL} q_i^{gkt} \le Qu\times y_0^{kt} \qquad k\in K,t\in T \qquad (۱۴)$$

$$de_i^t = \sum_{g\in SL} d_i^{gt} \qquad i\in V',t\in T \qquad (۱۵)$$

محدودیت (۱۳) محدودیت ظرفیت موجودی هر بیمارستان، محدودیت (۱۴) محدودیت ظرفیت هر وسیله نقلیه و محدودیت (۱۵) محدودیت استفاده از واحدهای خونی را اعمال می‌نمایند.

۲-۶- محدودیت‌های درجه هر نقطه و حذف زیردورها

$$\sum_{j\in V,i<j} x_{ij}^{kt} + \sum_{j\in V,j<i} x_{ji}^{kt} = 2\times y_i^{kt} \qquad \begin{matrix} i\in V,k\in K,\\ t\in T \end{matrix} \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{i\in S}\sum_{j\in S,i<j} x_{ij}^{kt} \le \sum_{i\in S} y_i^{kt} - y_m^{kt} \qquad \begin{matrix} S\subseteq V',k\in K,\\ t\in T,m\in S \end{matrix} \qquad (۱۷)$$

محدودیت (۱۶) تضمین می‌کند که درجه هر نقطه یا صفر است یا دو. این بدین معنی است که اگر یک وسیله به یک نقطه وارد شد حتماً باید از آن نیز خارج شود و در مورد تأمین‌کننده چنانچه وسیله‌ای از آن خارج شد حتماً در انتها باید به آن بازگردد. محدودیت (۱۷) نیز از تشکیل زیردورها ممانعت می‌کند.

۲-۷- سایر محدودیت‌ها

$$\sum_{k\in K} y_i^{kt} \le 1 \qquad i\in V',t\in T \qquad (۱۸)$$

$$u_i^t = \sum_{j=0}^{R} Inv_i^{sl+j,t} \qquad i\in V',t\in T \qquad (۱۹)$$

$$Inv_i^{gt} = \beta_i^{gt} \qquad \begin{matrix} g=sl+1,\dots,sl+R,\\ i\in V',t\in T \end{matrix} \qquad (۲۰)$$

$$\beta_i^{gt} = 0 \qquad \begin{matrix} g=1+R,\dots,sl+R,\\ t=1,\dots R,i\in V' \end{matrix} \qquad (۲۱)$$

$$\beta_i^{gt} = 0 \qquad \begin{matrix} g=0,\dots,R,\\ i\in V',t\in T \end{matrix} \qquad (۲۲)$$

$$z_i^t \le \sum_{k\in K} y_i^{kt} \qquad i\in V',t\in T \qquad (۲۳)$$

$$z_i^t \ge \frac{1}{nv}\times \sum_{k\in K} y_i^{kt} \qquad i\in V',t\in T \qquad (۲۴)$$

$$\begin{matrix} Inv_i^{gt}, d_i^{gt}, q_i^{gkt} \in \mathbb{Z}^+ \\ \alpha_i^{gt}, \beta_i^{gt}, u_i^t \in \mathbb{Z}^+ \end{matrix} \qquad \begin{matrix} i\in V',g\in SL\\ k\in K,t\in T \end{matrix} \qquad (۲۵)$$

$$\begin{matrix} x_{0i}^{kt}\in\{0,1,2\}, x_{ij}^{kt}\in\{0,1\} \\ L_i^{gt}\in\{0,1\}, y_i^{kt}\in\{0,1\} \end{matrix} \qquad \begin{matrix} i,j\in V',g\in SL\\ k\in K,t\in T \end{matrix} \qquad (۲۶)$$

محدودیت (۱۸) بیان می‌کند که در هر دوره فقط یک وسیله مجاز به ملاقات یک بیمارستان است. محدودیت‌های (۱۹)و (۲۰) مقادیر واحدهای فاسد شده را محاسبه می‌کند. محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲) بنا به تعریف برقرار می‌باشند. محدودیت‌های (۲۳) و (۲۴) برای محاسبه مقدار z_i^t در مدل گنجانده شده‌اند. محدودیت‌های (۲۵) و (۲۶) متغیرهای باینری و عددصحیح را نشان می‌دهد.

۲-۸- خطی‌سازی

مدل فوق به‌دلیل وجود محدودیت (۱۲) مدلی غیرخطی است چرا که از Floor Function در این محدودیت استفاده شده است. لذا می‌توان این محدودیت را به‌وسیله جایگزینی با دو محدودیت (۲۷) و (۲۸) خطی نمود.

$$\beta_i^{gt} \ge d_i^{g-R,t-R}\times(1-p)-1+\varepsilon \qquad \begin{matrix} g=1+R,\dots,sl+R,\\ t=R+1,\dots,T,i\in V' \end{matrix} \qquad (۲۷)$$

$$\beta_i^{gt} \le d_i^{g-R,t-R}\times(1-p)+\varepsilon \qquad \begin{matrix} g=1+R,\dots,sl+R,\\ t=R+1,\dots,T,i\in V' \end{matrix} \qquad (۲۸)$$

بنابراین مدل نهایی شامل تابع هدف (۱) و محدودیت‌های (۱۱ – ۲) و (۲۸ – ۱۳) می‌باشد که یک مدل مختلط عدد صحیح خطی است.

۳- الگوریتم شاخه و برش

۳-۱-گام‌های الگوریتم

گام اول: محدودیت (۱۷) را کنار بگذارید و باقیمانده مدل را توسط نرم‌افزار CPLEX حل کنید. زمان حل این مرحله در مقایسه با زمان حل مدل کامل (به همراه محدودیت‌های (۱۷)) به نسبت ناچیز است (شاید ۱۰ برابر کوتاه‌تر).

گام دوم: فرض کنید z^* جواب بهینه به‌دست آمده باشد که تابع هدف آن $f(z^*)$ است. بررسی کنید آیا جواب فعلی شامل زیردور است یا خیر.

اگر جواب خیر است، جواب به‌دست آمده جواب بهینه مسئله اصلی نیز می‌باشد و الگوریتم خاتمه می‌یابد.

اگر جواب بلی است، به کمک فرآیند شناسایی زیردورها (که در زیر توضیح داده شده است) کل زیردورهای تشکیل شده در z^* را بیابید. محدودیت‌های (۱۷) مربوط به زیردورهای تشکیل شده را شناسایی کرده و باید آن را به مدل اضافه کرده و به گام ۳ رفت.

گام سوم: مقدار $f(z^*)$ را به‌عنوان کران پایین مدل فعلی قراردهید. جواب z^* را به‌عنوان جواب نشدنی آغازین مدل جدید به CPLEX معرفی نمایید و با این شرایط جدید مدل را دوباره حل نمایید و به گام ۲ بازگردید.

به‌منظور استفاده بهتر از قابلیت‌های CPLEX ذکر چند نکته ضروری به نظر می‌رسد. اولاً برای اینکه الگوریتم زودتر همگرا شده و به جواب بهینه برسد باید نامساوی‌های معتبر (۳۳ – ۲۹) وارد مدل گردد.

جدول (۲): نامساوی‌های معتبر

$x_{0i}^{kt} \le 2 \times y_i^{kt}$	$i \in V, k \in K, t \in T$	(۲۹)
$x_{ij}^{kt} \le y_i^{kt}$	$i, j \in V', k \in K, t \in T$	(۳۰)
$y_i^{kt} \le y_0^{kt}$	$i \in V', k \in K, t \in T$	(۳۱)
$y_0^{kt} \le y_0^{k-1,t}$	$k \in K \setminus \{1\}, t \in T$	(۳۲)
$y_i^{kt} \le \sum_{j<i} y_j^{k-1,t}$	$i \in V, k \in K \setminus \{1\}, t \in T$	(۳۳)

نامساوی‌های (۳۳ – ۲۹) به CPLEX برای تولید برش‌های جدید بسیار کمک می‌کنند. دوماً توصیه می‌شود با توجه به دانش خود نسبت به مسئله اولویت‌های مختلف شاخه‌زنی برای متغیرهای مختلف تعیین کنید، به‌گونه‌ای‌که ابتدا شاخه‌زنی بر متغیرهای مهم‌تر انجام شود. برای مثال واضح است که $y_i^{kt} = 0 \Rightarrow x_{ij}^{kt} = 0$. بنابراین باید برای متغیر y اولویت شاخه‌زنی بالاتری تعریف گردد که ابتدا بر آن شاخه زده شود.

در گام سوم زمانی که z^* به‌عنوان جواب آغازین معرفی می‌شود، CPLEX تعدادی الگوریتم ابتکاری اجرا می‌نماید که جواب فعلی را تصحیح می‌کند و از روی آن به یک جواب شدنی می‌رسد و از آنجا CPLEX به سمت جواب بهینه حرکت می‌نماید. از آنجا که z^* جواب بهینه مسئله در گام قبلی است انتظار می‌رود جواب تصحیح شده به کران پایین (که برابر $f(z^*)$ قرارداده شده است) بسیار نزدیک باشد. این مکانیزم اثربخشی روش شاخه و برش پیشنهادی را به شدت افزایش می‌دهد.

۳-۲- فرآیند شناسایی زیردورها

نکته اساسی الگوریتم پیشنهادی شاخه و برش ما مربوط به تشخیص محدودیت‌های حذف زیردورهای ارضا نشده و اضافه‌نمودن‌این‌برش‌ها‌به‌مسئله‌و حل مجدد مسئله می‌باشد.

در اینجا برای دوره t و برای هر وسیله نقلیه k یک تور تعریف می‌شود. این تور از تأمین‌کننده حرکت خود را شروع کرده و سعی می‌کند با حرکت پیوسته در مسیر تور از هر نقطه به نقطه بعدی همه نقطه‌هایی را که در جواب به‌دست آمده مشخص شده است را که به‌وسیله نقلیه k در دوره t ملاقات می‌نماید از آن بگذرد و دوباره به تأمین‌کننده (نقطه ۱) بازگردد. اگرچنانچه پیش از ملاقات تمام نقطه‌های مورد نظر وسیله به نقطه ۱ بازگردد مشخص می‌شود که حداقل دو زیردور تشکیل شده است و لذا تور جدیدی تعریف می‌شود و از یکی از نقطه‌های مشاهده نشده به‌طور تصادفی دوباره شروع به پیمایش می‌کند تا بتواند تمام نقطه‌های مشاهده نشده در تور قبلی را مشاهده کند. اگر باز چنانچه این تور نیز به نقطه اول خود برسد ولی هنوز نقطه‌هایی وجود داشته باشد که در دو تور اول و دوم ملاقات نشده باشند تور سوم تشکیل می‌شود. این عمل تا آنجا ادامه می‌یابد که تمام نقطه‌ها ملاقات شوند. حال مشخص است که به تعداد زیردورها محدودیت حذف زیردورها وجود دارد که رعایت نشده‌اند که به همین تعداد، برش ایجاد شده و به مسئله افزوده می‌گردد و مسئله مجدد حل می‌شود.

۴- مطالعه موردی

برای اثبات کاربردی بودن مدل داده‌های تقاضا، برای سه ماه متوالی از مرکز انتقال خون ساری در استان مازندران جمع‌آوری گردید. این مرکز تأمین نیاز خون ۴۸ بیمارستان و مرکز درمانی را در شعاعی به طول ۱۵۰ کیلومتر بر عهده دارد. از میان این ۴۸ نقطه تقاضا در سه ماهی که داده‌های تقاضای آنها جمع‌آوری شدند فقط ۲۱ بیمارستان تقاضا داشتند و تقاضای ۲۷ بیمارستان دیگر در سه ماهه مورد نظر صفر بوده است. از میان این ۲۱ نقطه نیز ۹ تا از آنها در شهر ساری، ۴ تا در بهشهر، ۲ مورد در نکا و ۲ مورد در قائمشهر و ۱ نقطه در هرکدام از ۴ شهر گلوگاه، جویبار، بابل و زیراب قراردارند. از آنجا که برای مطالعه حاضر به

تفکیک داده‌های روزانه نیاز بود ولی فقط داده‌های ماهانه آن هم فقط برای سه ماه در اختیار گروه قرار داشت، به ناچار داده‌ها را بر ۳۰ روز تقسیم کرده و فرض شد که این داده‌های تعدیل‌شده برای سه روز متوالی است. محصول خونی را هم پلاکت با طول عمر دو روز در نظر گرفته شد. همچنین از آنجا که در عمل نقاط تقاضایی که در یک شهر واقع شده‌اند توسط ماشین مشابهی سرویس داده می‌شوند، همه نقاط تقاضای موجود در هر شهر را تجمیع کرده و تقاضای آنها نیز با یکدیگر جمع گردیده و به‌عنوان یک نقطه تجمیع شده در نظر گرفته شد. بنابراین هشت نقطه تقاضا با داده‌های تجمیع شده حاصل شد که به‌عنوان ورودی مسئله در نظر گرفته شدند. جدول (۳) مقادیر تقاضاهای تعدیل و تجمیع شده را نشان می‌دهد.

جدول (۳): داده‌های تقاضای تجمیع شده برای دوره‌های مختلف

نام شهر	دوره‌ها		
	۱	۲	۳
بهشهر	۳	۲	۳
ساری	۷۹	۹۷	۸۹
گلوگاه	۰	۱	۱
نکا	۶	۷	۷
جویبار	۴	۷	۶
قائمشهر	۳۲	۳۷	۳۶
زیراب	۳	۳	۳
بابل	۱	۰	۱

همچنین جدول (۴) مقادیر مسافت بین شهرهای تقاضا را که از خدمات برخط سرویس Google Map استخراج شده است نشان می‌دهد.

جدول (۴): مسافت بین شهرهای مختلف بر حسب کیلومتر

نام شهر	بهشهر	ساری	گلوگاه	نکا	جویبار	قائمشهر	زیراب	بابل
بهشهر	۰	۵۱	۲۵	۲۳	۷۲	۷۵	۱۱۸	۹۴
ساری	۵۱	۰	۷۵	۲۶	۲۱	۲۲	۶۵	۴۲
گلوگاه	۲۵	۷۵	۰	۵۲	۹۷	۹۹	۱۴۳	۱۴۳
نکا	۲۳	۲۶	۵۲	۰	۴۸	۵۰	۹۴	۷۰
جویبار	۷۲	۲۱	۹۷	۴۸	۰	۲۴	۸۴	۳۱
قائمشهر	۷۵	۲۲	۹۹	۵۰	۲۴	۰	۳۸	۲۱
زیراب	۱۱۸	۶۵	۱۴۳	۹۴	۸۴	۳۸	۰	۵۹
بابل	۹۴	۴۲	۱۴۳	۷۰	۳۱	۲۱	۵۹	۰

سه وسیله نقلیه برای تحویل محصولات خونی در دسترس می‌باشند. سایر عوامل متغیر به شرح زیر فرض شده‌اند:

$$CRP = 1, p = 0.5, r^1 = 293, r^2 = 350, r^3 = 334;$$
$$Qu = 140, oc = 10000, rc_{ij} = 80 \times dc_{ij};$$
$$TIL_1 = 5, TIL_2 = 100, TIL_3 = 5, TIL_4 = 10,$$
$$TIL_5 = 10, TIL_6 = 45, TIL_7 = 5, TIL_8 = 3$$

هزینه‌های نگهداری واحد موجودی نیز در جدول (۵) ذکر شده است.

جدول (۵): هزینه‌های نگهداری واحد موجودی

نام شهر	عمر محصول		
	۱	۲	۳
بهشهر	۸.۱۹	۲.۷۹	۴.۸۶
ساری	۵.۲۲	۳.۹۶	۷.۰۲
گلوگاه	۴.۵۹	۱.۴۴	۱.۸۹
نکا	۲.۱۶	۳.۳۳	۱۰.۶۲
جویبار	۴.۴۱	۹.۲۷	۴.۳۲
قائمشهر	۳.۵۱	۳.۸۷	۵.۱۳
زیراب	۸.۶۴	۱.۲۶	۶.۶۶
بابل	۰.۰۹	۳.۶	۹.۲۷

محاسبات نرم‌افزار CPLEX برای مسئله حاضر بر یک کامپیوتر شخصی با دوهسته 2.2 GHz و 2GB RAM انجام شده است و مدل پیشنهادی توسط الگوریتم شاخه و برش پیشنهادی در ۴ ثانیه حل گردیده شده است.

۵- نتایج عددی

براساس داده‌های بخش قبل، مقدار بهینه تابع هدف توسط روش شاخه و برش پیشنهادی برابر ۷۵۸۷۲.۵۲ واحد هزینه است که از این میزان ۷۳٪ آن مربوط به هزینه‌های مسیریابی، ۱۴٪ مربوط به هزینه‌های نگهداری موجودی و باقیمانده مربوط به هزینه‌های فساد اقلام خون می‌باشد. ۱۰۰۰۰ واحد برای هزینه فساد نشان می‌دهد که در جواب بهینه در مجموع سه دوره فقط یک واحد پلاکت دچار فساد شده است.

حال باید دید در نظر گرفتن مفاهیم جدید چه نقشی را در کاهش مجموع هزینه‌ها ایفا می‌نماید. برای این منظور مقایسه‌ای بین مدل موجودی - مسیریابی خون پیشنهادی در این مقاله و مدل پیشنهادی کوئلو و لاپورته[۷] انجام گردید. برای اینکه مقایسه دو مدل عادلانه باشد، بخش مربوط به هزینه فساد را از مدل خود و بخش مربوط به

درامدهای فروش از مدل[۷] حذف گردید. در ضمن مدل [۷]به کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های موجودی – مسیریابی تغییر یافت. همچنین از آنجا که مدل[۷] براساس سیاست موجودی سطح بیشینه است(ML)، ما نیز (۴) را از مدل خود حذف نمودیم. پس از انجام تغییرات ذکر شده هر دو مدل توسط روش شاخه و برش پیشنهادی حل گردید. نتایج به‌دست آمده جالب بود. هزینه بهینه مدل پیشنهادی ما برابر ۶۴۹۰۴.۵۴ شد، درحالی‌که هزینه بهینه مدل[۷] ۱۲ درصد بیشتر بود. علت این امر نیز افزایش چشمگیر ۱۵ درصدی در هزینه‌های مسیریابی در ازای ۴ درصد کاهش در هزینه‌های موجودی است. درک این میزان تفاوت در هزینه‌ها با بررسی نمودن مقدار متغیرهای β_i^{gt} آسان‌تر می‌شود. برای مثال $\beta_2^{33} = 48$ در جواب بهینه است. این بدین معناست که در شروع دوره ۳، ۴۸ واحد به موجودی تخصیص‌نیافته باز می‌گردد و دوباره برای استفاده در آن دوره قابل استفاده می‌شود. درحالی‌که چنین قابلیتی در مدل[۷] وجود ندارد. بنابراین مدل[۷] مجبور است برای جبران نبود این قابلیت، واحدهای مورد نیاز اضافی را از طریق حمل و نقل تأمین نماید که سبب افزایش قابل ملاحظه در هزینه‌های مسیریابی می‌گردد.

نتایج به‌دست آمده دوباره ادعای نویسندگان مبنی بر نارسایی ادبیات موضوع در پاسخ‌گویی به چالش‌های موجود در مسئله موجودی – مسیریابی خون را تأیید می‌نماید. بنابراین مدل پیشنهادی ذکرشده تا حدی این شکاف موجود در ادبیات را پوشش می‌دهد.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار مسئله موجودی – مسیریابی خون به‌طور رسمی تعریف شد و فرمول‌بندی مناسب برای آن ارائه گردید. از آنجا که در مدیریت موجودی محصولات خونی مفاهیم موجودی تخصیص‌یافته، سیاست‌های صدور کراس‌مچ، نسبت انتقال به کراس‌مچ و زمان رهاسازی کراس‌مچ بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند، مدل‌های موجود در ادبیات موضوع مدل‌های خوبی برای ارائه شمایی مناسب از فعالیت‌های مرتبط با خون به‌دست نمی‌دهند.

علاوه‌براین، یک روش شاخه و برش چندمرحله‌ای برای حل دقیق مدل پیشنهادی در ابعاد نه چندان گسترده توسعه داده شد. مهم‌ترین خصیصه این روش در این است که در تکرارهای بسیار کم می‌تواند کران‌های پایین مناسبی برای مسائل در اندازه‌های بزرگ به‌دست دهد. از این کران پایین در آینده می‌توان برای ارزیابی عملکرد رویکردهای ابتکاری و فراابتکاری جدید استفاده کرد.

همچنین به کمک مطالعه موردی با داده‌های واقعی و مشاهده نتایج نشان دادیم که چگونه مدل موجودی – مسیریابی خون پیشنهادی می‌تواند هزینه‌های زنجیره تأمین را در مقایسه با سایر مدل‌های موجودی – مسیریابی کاهش دهد. این حقیقت نیاز به توسعه مدل پیشنهاد داده شده را بیش از پیش برجسته می‌نماید. اگرچه ما ادعا نمی‌کنیم که مدل ما آنقدر کامل است که می‌تواند به تمام مشکلات موجود در مسئله موجودی – مسیریابی خون پاسخ دهد اما معتقدیم که مطالعه حاضر تا حدی از شکاف موجود در ادبیات موضوع کاسته و مسیر را برای انجام تحقیقات آتی هموارتر نموده است. همچنین می‌توان گفت که فضا برای تحقیقات آتی بسیار گسترده است. به عنوان مثال در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا بسیار مورد توجه است. به این منظور، توسعه روش‌های استوار جدید یا استفاده از نظریه برنامه‌ریزی امکانی استوار می‌تواند در نظر گرفته شود.

منابع

[1] Bell, Walter J, Louis M Dalberto, Marshall L Fisher, Arnold J Greenfield, Ramchandran Jaikumar, Pradeep Kedia, Robert G Mack, and Paul J Prutzman. ***"Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer"***. Review of. Interfaces 13 (6):4-23, 1983.

[2] L. C. Coelho, J.-F. Cordeau, and G. Laporte, ***"Thirty years of inventory routing"***. Transportation Science, vol. 48, pp. 1-19, 2013.

[3] L. C. Coelho and G. Laporte, Optimal Joint Replenishment and Delivery of Perishable Products, 2013.

[4] T. Le, A. Diabat, J.-P. Richard, and Y. Yih, ***"A column generation-based heuristic algorithm for an inventory routing problem with perishable goods"***. Optimization Letters, vol. 7, pp. 1481-1502, 2013.

[5] A. Al Shamsi, A. Al Raisi, and M. Aftab, ***"Pollution-Inventory Routing Problem with Perishable Goods"***. in Logistics Operations, Supply Chain Management and Sustainability, ed: Springer, pp. 585-596, 2014.

[6] T. Jia, X. Li, N. Wang, and R. Li, ***"Integrated Inventory Routing Problem with Quality Time Windows and Loading Cost for Deteriorating Items under Discrete Time"***. Mathematical Problems in Engineering, vol. 2014, p. 14, 2014.

[7] C. Coelho and G. Laporte, ***"Optimal joint replenishment, delivery and inventory management policies for perishable products"***. Computers & Operations Research, vol. 47, pp. 42-52, 2014.

[8] J. Beliën and H. Forcé, ***"Supply chain management of blood products: A literature review"***. European Journal of Operational Research, vol. 217, pp. 1-16, 2012.

[9] W. Pierskalla, ***"Supply Chain Management of Blood Banks"***. in Operations Research and Health Care. vol. 70, M. Brandeau, F. Sainfort, and W. Pierskalla, Eds., ed: Springer US, pp. 103-145, 2004.

[10] G. Şahin, H. Süral, and S. Meral, ***"Locational analysis for regionalization of Turkish Red Crescent blood services"***. Computers & operations research, vol. 34, pp. 692-704, 2007.

[11] V. Hemmelmayr, K. F. Doerner, R. F. Hartl, and M. W. Savelsbergh, ***"Delivery strategies for blood products supplies"***. *OR* spectrum, vol. 31, pp. 707-725, 2009.

[12] V. Hemmelmayr, K. F. Doerner, R. F. Hartl, and M. W. Savelsbergh, ***"Vendor managed inventory for environments with stochastic product usage"***. European Journal of Operational Research, vol. 202, pp. 686-695, 2010.

[13] S. Gunpinar, ***"Supply Chain Optimization of Blood Products"***. Doctoral dissertation, University of South Florida, 2013.

[14] D. A. Jacobs, M. N. Silan, and B. A. Clemson, ***"An analysis of alternative locations and service areas of American Red Cross blood facilities"***. Interfaces, vol. 26, pp. 40-50, 1996.

[15] P. Sivakumar, K. Ganesh, and P. Parthiban, ***"Multi-phase composite analytical model for integrated allocation-routing problem–application of blood bank logistics"***. International Journal of Logistics Economics and Globalisation, vol. 1, pp. 251-281, 2008.

[16] P. Ghandforoush and T. K. Sen, ***"A DSS to manage platelet production supply chain for regional blood centers"***. Decision Support Systems, vol. 50, pp. 32-42, 2010.

[17] E. Cetin and L. S. Sarul, ***"A blood bank location model: A multiobjective approach"***. European Journal of Pure and Applied Mathematics, vol. 2, pp. 112-124, 2009.

[18] P. Chaiwuttisak, H. Smith, Y. Wu, and C. Potts, ***"Blood supply chain with insufficient supply: a case study of location and routing in Thailand"***. Lecture Notes in Management Science, vol. 6, pp. 23-31, 2014.