Industrial Management Perspective

Print ISSN: 2251-9874, Online ISSN: 2645-4165
Volume 12, Serial Number 45, Spring 2022, Pages 261-290 (Original Article)
DOI: 10.52547/JIMP.12.1.261

An Ambulance Routing Problem in Organ Transplant Supply Chain Considering Traffic Congestion

Seyed Mohammad Javad Mirzapour Al-e-hashem*, Hossein Amoozad Khalili, Rouhollah Khazaei Kouhpar*****

Abstract

Organ transplantation is one of the most important pillars of health systems and has helped to treat many incurable diseases. Every day, 7 to 10 patients in Iran die because they do not have a transplant on time. Due to the criticality of the organ transplant chain for human health, the management and planning of this chain is of great importance. Timely transfer of organ and patient from one hospital to transplant hospital is very important considering the effect of seconds on the quality of the transferred organ and the success of the transplant. In this paper, a mathematical model for scheduling the pickup and delivery of transplanted organs and routing the ambulances carrying organs transplant and patients is presented. The problem is formulated in the form of a mixed integer nonlinear programming and then transformed into an equivalent linear mathematical model using exact operations research methods. The proposed model seeks to find the optimal schedule and sequence of pickup and delivery of organs and patients; under the operational constraints such as cold ischemia, urban traffic and limited fleet. The proposed model is optimally solved in CPLEX 12.8 software, and the computational results confirm the applicability of the proposed model.

Keywords: Ambulance Routing Problem; Pickup and Delivery Problem; Organ Transplant Supply Chain; Urban traffic; Cold Ischemia.

Received: Jan. 30, 2021; Accepted: Oct. 30, 2021.

* Assistant Professor, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
** Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran. (Corresponding Author).
Email: Amoozad92@yahoo.com
*** MA., Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

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

سال دوازدهم، شماره ۴۵، بهار ۱۴۰۱، ص‌ص ۲۶۱ – ۲۹۰ (**نوع مقاله: پژوهشی**)

DOI: 10.52547/JIMP.12.1.261

ارائه یک مدل ریاضی برای مسیریابی آمبولانس‌های انتقال اعضای پیوندی و بیماران با درنظرگرفتن ترافیک شهری

سیدمحمدجواد میرزاپور آل‌هاشم*، حسین عموزاد خلیلی، روح‌الله خزایی کوه‌پر*****

چکیده

پیوند اعضا از ارکان مهم سیستم‌های سلامت است و به درمان بسیاری از بیماری‌های صعب‌العلاج کمک شایانی کرده است. روزانه ۷ تا ۱۰ نفر از بیماران نیازمند به پیوند در ایران به علت نرسیدن به‌موقع عضو پیوندی از دنیا می‌روند. با توجه به بحرانی‌بودن زنجیره پیوند عضو برای سلامتی انسان، مدیریت و برنامه‌ریزی این زنجیره از اهمیت فراوانی برخوردار است. انتقال به‌موقع عضو و بیمار از یک بیمارستان به بیمارستان محل پیوند با توجه به تأثیر ثانیه‌ها بر کیفیت عضو موردانتقال و موفقیت پیوند، بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش، مدلی ریاضی برای زمان‌بندی برداشت و تحویل اعضای پیوندی و مسیریابی آمبولانس‌های حامل اعضاء و بیماران پیوندی، به‌عنوان حلقه پایانی زنجیره تأمین پیوند اعضاء در شهر تهران ارائه شده است. مسئله در قالب یک برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط فرموله شده و در ادامه با استفاده از روش‌های دقیق به یک مدل ریاضی خطی معادل تبدیل شده است. مدل ارائه‌شده به دنبال یافتن زمان‌بندی و توالی بهینه برداشت و تحویل اعضا و بیماران، با توجه به محدودیت‌های عملیاتی نظیر زمان ایسکمی سرد، ترافیک شهری و نیز محدودبودن ناوگان حمل است. مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار CPLEX12.8 بصورت بهینه حل شده و نتایج محاسباتی بر کاربردپذیری آن صحه می‌گذارد.

کلیدواژه‌ها: مسئله مسیریابی آمبولانس؛ مسئله برداشت و تحویل؛ زنجیره تأمین پیوند اعضا؛ ترافیک شهری؛ ایسکمی سرد.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۰۸.

* استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ایران.

** استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران (نویسنده مسئول).

Email: Amoozad92@yahoo.com

*** کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ایران.

۱. مقدمه

موضوع اهدای عضو از سال ۱۳۶۸ در کشور آغاز شد و از سال ۱۳۷۹ و به دنبال مصوبه «مجلس شورای اسلامی« که قانون اهدای عضو تصویب شد، در دستور کار قرار گرفت و در ادامه شبکه فراهم آوری اعضا تشکیل شد. از سال ۱۳۸۱ هر سال شاهد روند رو به افزایش اهدای عضو در کشور هستیم؛ به‌طوری‌که در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰، این وضعیت تسریع شده است. سالانه ۵ تا ۸ هزار مرگ مغزی به‌دلیل آمار بالای تصادفات و حوادث شغلی در کشور رخ می‌دهدکه از این تعداد مرگ مغزی، ۵۰ درصد یعنی ۲۵۰۰ تا ۴۰۰۰ مورد قابلیت اهدا دارند و در بقیه به دلیل سن بالا و بیماری‌های واگیر امکان اهدای عضو وجود ندارد. با اینکه به‌طور متوسط می‌توان از ۳۰۰۰ مورد مرگ مغزی در کشور اهدای عضو داشت، تنها یک‌سوم از این تعداد، یعنی ۱۰۰۰ مورد مرگ مغزی اهدای عضو انجام می‌شود. برای مثال، در سال ۱۳۹۶، ۲۲۰۸ نفر به‌وسیله اعضای بیماران مرگ مغزی نجات پیدا کرده‌اند؛ به‌طوری‌که ۱۲۸۱ کلیه، ۷۶۵ کبد، ۱۳۱ قلب، ۱۰ ریه و ۲۱ پانکراس به بیماران نیازمند عضو پیوند زده شده است. طبق مصوبه «هیئت وزیران» و دستورالعمل «وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی» در سال ۱۳۸۱، کلیه بیمارستان‌های دولتی و خصوصی موظف هستند بیماران کمای عمیق خود را به مراکز اهدای عضو اطلاع دهند. به‌محض شناسایی بیمار کمای عمیق که احتمال مرگ مغزی آن می‌رود، کارکنان بیمارستان‌ها با واحدهای فراهم‌آوری اعضای پیوندی تماس می‌گیرند و آن‌ها را مطلع می‌کنند و یا مورد مرگ مغزی توسط بازرسین حضوری یا تلفنی مراکز فراهم‌آوری شناسایی می‌شود. اساس تأیید مرگ مغزی با معاینات بالینی است و هیچ پزشکی نمی‌تواند فقط با دیدن و بررسی تصویربرداری‌های مغزی و آزمایش‌ها در مورد مرگ مغزی نظر بدهد. معاینه‌کننده باید اثبات کند که هیچ یک از اعصاب دوازده‌گانه ساقه مغز فعالیت ندارند؛ همچنین طبق قانون ایران و بسیاری از کشورهای دیگر با گرفتن نوار مغزی و اثبات صاف‌بودن آن از عدم‌فعالیت نیمکره‌های مغز نیز مطمئن شود. روند جراحی پیوند شامل یک اهداکننده (کسی که عضوی را اهدا می‌کند) و یک گیرنده (بیماری که عضو را دریافت می‌کند) است. شبکه سیستم پیوند متشکل از اهداکنندگان، گیرندگان، بیمارستان‌ها و عوامل حمل‌ونقل است. داوطلبان اهدای یک عضو و یا بیماران مرگ مغزی در بیمارستان‌های اهدا نگهداری می‌شوند؛ درحالی‌که در مراکز پیوند، ثبت‌نام، نمونه‌گیری از خون و عمل جراحی برای پیوند متقاضیان انجام می‌شود. درنهایت عوامل حمل‌ونقل مسئولیت حمل‌ونقل اعضا، اهداکننده و تجهیزات موردنیاز از بیمارستان به مراکز پیوند را بر عهده دارند.

مراکز پیوند به‌طور مستقیم با اعمال جراحی و متعاقب آن جان انسان‌ها سروکار دارند. انتقال به‌موقع عضو و بیمار از یک بیمارستان به بیمارستان محل پیوند با توجه به تأثیر ثانیه‌ها بر کیفیت عضو مورد انتقال و موفقیت پیوند بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش، مسئله مسیریابی و زمان‌بندی برداشت و تحویل برای انتقال بیماران (اهداکنندگان/ دریافت‌کنندگان) و اعضای

پیوندی در یک شبکه پیوند اعضا در شهر تهران بررسی می‌شود. یکی از تفاوت‌های اصلی بین زنجیره تأمین معمولی و زنجیره تأمین پیوند اعضا، فسادپذیری محصولات و تنگنای زمانی مرتبط با آن است. در این پژوهش تلاش بر آن است با درنظرگرفتن محدودیت‌های خاص این مسئله، مدلی برای مسیریابی زنجیره تأمین پیوند اعضا ارائه شود. دستیابی به مسیرهای بهینه برای پاسخگویی به درخواست‌های برداشت و تحویل و نیز محاسبه تعداد آمبولانسی که می‌تواند نیازهای مربوط به حمل‌ونقل اعضا و بیماران را با حداقل تأخیرها پاسخ دهد نیز از اهداف این پژوهش است؛ همچنین اثر بار ترافیکی، زمان ایسکمی سرد و زمان سرویس در زمان‌بندی برداشت و تحویل‌ها فرموله شده و تأثیرپذیری زمان‌بندی و میزان تأخیرها از این پدیده موردارزیابی قرار گرفته است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

با جست‌وجو در مبانی نظری می‌توان پی برد که پژوهش‌های بسیار محدودی در حوزه زنجیره تأمین پیوند اعضا صورت گرفته است؛ به‌ویژه اینکه در پژوهش حاضر به ابعاد لجستیکی این مسئله پرداخته شده است. مسئله موردبررسی در این پژوهش به زمان‌بندی برداشت و تحویل اعضای پیوندی و بیماران می‌پردازد؛ بنابراین در دسته مسائل برداشت و تحویل با پنجره زمانی[1] (PDPTW) قرار می‌گیرد. ویژگی‌های اصلی مدل پیشنهادی درنظرگرفتن زمان پیوسته، اثر بار ترافیک و فرموله‌کردن آن از طریق یک تابع ریاضی چندضابطه‌ای و نیز منظورکردن امکان برداشت‌ها و تحویل‌های مختلط برای تقاضاهای جفت شده است؛ ازاین‌رو در ادامه به بررسی برخی پژوهش‌هایی که به کاربردهای مسائل PDPTW پرداخته‌اند یا به‌نوعی در حوزه‌های سلامت و بیمارستان تعریف مسئله شده‌اند، پرداخته خواهد شد.

یک الگوریتم شاخه و برش و قیمت توسط راپکه و کوردوا[2] (۲۰۰۹)، برای حل PDPTW با تقاضاهای جفت‌شده ارائه شد که در آن حد پایین با استفاده از روش تولید ستون محاسبه می‌شود. آن‌ها دو زیر مسئله قیمت‌گذاری را در تولید ستون در نظر گرفتند: یک مسئله کوتاه‌ترین مسیر ابتدایی و یک مسئله کوتاه‌ترین مسیر غیر ابتدایی. نامساوی‌های معتبر به‌صورت پویا برای مستحکم‌کردن آزادسازی‌ها اضافه می‌شد [۱۵]. بیودری[3] و همکاران (۲۰۱۰)، به بررسی و حل یک مسئله حمل‌ونقل بیمار در بیمارستان‌های بزرگ پرداختند. هدف آن‌ها این بود که خدمات حمل‌ونقل مؤثر و به‌موقع بیماران بین چندین مکان در یک پردیس بیمارستان ارائه شود. درخواست‌های حمل‌ونقل به‌صورت پویا به‌دست آمدند و روش‌شناسی راه‌حل باید بتواند به‌سرعت

1. Pickup and Delivery Problem with Time Windows
2. Ropke & Cordeau
3. Beaudry

درخواست‌های جدید را در مسیرهای جاری خودرو وارد کند. برخلاف مسئله شماره‌گیری ـ سواری، مسئله موردمطالعه آن‌ها شامل چندین محدودیت پیچیده بود که مختص محیط بیمارستان است. این پژوهش یک توصیف دقیق از مشکل ارائه کرد و یک روش دومرحله‌ای را که قادر به درنظرگرفتن بسیاری از ویژگی‌های آن است، ارائه داد. نتایج نشان داد که الگوریتم قادر به درک جنبه پویا مسئله و ارائه راه‌حل‌های باکیفیت بالا است. به‌طور خاص، آن الگوریتم در کاهش زمان انتظار برای بیماران با استفاده از وسایل نقلیه کمتر، موفق عمل کرد [۴]. بالداچی[1] و همکاران (۲۰۱۱)، الگوریتم دقیقی برای m-PDPTW بر اساس فرمول‌بندی پوشش مجموع ارائه کرده و یک رویه محدودسازی تعریف کردند که یک جواب دوگان نزدیک به بهینه به‌وسیله ترکیب‌کردن دو روش ابتکاری صعودی و یک رویه برش و تولید ستون برای آزادسازی خطی مسئله پیدا می‌کند. جواب دوگان نهایی برای تولید یک مسئله‌ی کاهش‌یافته که تنها شامل مسیرهایی است که هزینه‌ی کاهش‌یافته آن‌ها کوچک‌تر از شکاف بین حد بالای شناخته‌شده و حد پایین به‌دست‌آمده است، مورداستفاده قرار می‌گیرد[۳].

پارا[2] و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی، علاوه بر حالت‌های حمل‌ونقل و وسایل نقلیه متفاوت، همراهی افراد مختلف با بیمار را نیز در نظر گرفته‌اند. هدف آن‌ها ساخت مسیرهایی با حداقل هزینه بود که محدودیت‌های مربوط به خدمت‌دهی شامل پنجره زمانی و همچنین محدودیت‌های مربوط به راننده شامل محدودیت زمان مسیر و استراحت اجباری را ارضا کند. آن‌ها یک فرمول‌بندی سه‌اندیسی و یک فرمول‌بندی پوشش مجموع برای مسئله ارائه دادند. آن‌ها با ترکیب روش تولید ستون و یک روش ابتکاری مدل خود را حل کردند[۱۴]. لو[3] و همکاران (۲۰۱۵)، یک مسئله شماره‌گیری ـ سواری واقعی را موردمطالعه قرار دادند که به‌طور هم‌زمان چندین سفر، وسایل نقلیه ناهمگن، انواع درخواست‌های مختلف، ظرفیت وسایل قابل‌تنظیم و برنامه‌ریزی نیروی انسانی را در نظر می‌گرفت. برای فرمول‌بندی این مسئله، آن‌ها دو مدل ریاضی ارائه دادند که از روش‌های متفاوت برای برخورد با تقاضاهای مربوط به انبار استفاده می‌کردند. آن‌ها برای تقویت بیشتر مدل‌ها، هشت خانواده از نامساوی‌های معتبر پیشنهاد دادند و بر اساس آن‌ها الگوریتم شاخه و برش برای حل مسئله پیشنهاد شد. الگوریتم شاخه و برش به‌طور گسترده در مجموعه‌ای از نمونه‌های تولیدشده بر اساس داده‌های دنیای واقعی موردآزمایش قرار گرفت. نتایج محاسباتی نشان داد که هفت خانواده از نامساوی‌ها می‌توانند کران‌های پایین را به میزان زیادی بهبود بخشند و الگوریتم شاخه و برش می‌تواند مثال‌هایی را با حداکثر ۲۲ درخواست در عرض ۴ ساعت حل کند [۱۲]. ژانگ[4] و همکاران (۲۰۱۵)، مسئله‌ی

1. Baldacci
2. Parragh
3. Liu
4. Zhang

حمل‌ونقل عمومی بیماران در یکی از بیمارستان‌های هنگ‌کنگ را بررسی کردند که خدمات حمل‌ونقل آمبولانس را برای بیماران معلول و سالخوردگان فراهم می‌کرد. آن‌ها مسئله را به‌عنوان یک مسئله‌چند سفری شماره‌گیری ـ سواری[1] (MTDARP) مدل‌سازی کردند که نیاز به طراحی مسیرهای مختلف برای هر آمبولانس دارد. مسیر یک توالی از مکان‌ها است، شروع و پایان در انبار (بیمارستان) که بر اساس آن آمبولانس مشتریان را در مبدأ سوار کرده و در مقصد پیاده می‌کند. در صورتی که یک مسیر مجموعه‌ای از محدودیت‌های جانبی، مانند محدودیت‌های جفت و محدودیت، محدودیت ظرفیت، زمان سوارشدن، محدودیت زمان مسیر و پنجره‌های زمان را رعایت کند، امکان‌پذیر می‌شود. به‌طور خاص، به‌دلیل محدودیت زمان مسیر، هر آمبولانس طوری برنامه‌ریزی شده است که چندین مسیر را طی دوره‌ی کاری انجام دهد. برای جلوگیری از گسترش بیماری، داخل آمبولانس‌ها باید در محل انبار (بیمارستان) بین دو سفر متوالی ضدعفونی شود. هدف اصلی این بود که درخواست‌های بیشتری با منابع موجود پاسخ داده شود و هزینه کل سفر برای همان تعداد درخواست‌ها به حداقل برسد. آن‌ها یک فرمول‌بندی ریاضی برای مسئله ارائه کردند و یک الگوریتم ممتیک را با یک اپراتور بازسازی سفارشی توسعه دادند؛ همچنین روش ارزیابی مبتنی بر بخش برای بررسی سریع حرکت به‌کار رفت. عملکرد الگوریتم پیشنهادشده با استفاده از داده‌های دنیای واقعی از سال ۲۰۰۹ و با نتایج حاصل از حل مدل ریاضی مقایسه شد. علاوه بر این، الگوریتم پیشنهادی برای حل نمونه‌های DARP[2] کلاسیک مورداستفاده قرار گرفت و در نمونه‌های متوسط به‌خوبی عمل کرد [۱۸].

دتی[3] و همکاران (۲۰۱۷)، یک مسئله شماره گیری ـ سواری چندانباری ناشی از درخواست مراقبت‌های بهداشتی در دنیای واقعی را بررسی کردند که حمل‌ونقل غیراورژانسی بیماران را موردتوجه قرار داده است. در این مسئله، بیمار می‌تواند فراهم‌آورنده خدمت را از میان سازمان‌های غیرانتفاعی انتخاب کند. این مسئله دارای چندین محدودیت و ویژگی مانند وسایل نقلیه ناهمگن، محدودیت سازگاری وسایل نقلیه ـ بیمار، کیفیت خدمات موردنیاز، ترجیحات بیماران و تعرفه‌ها بسته به زمان انتظار وسایل نقلیه است. آن‌ها الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر و الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه را برای حل تمام ویژگی‌های این مسئله پیشنهاد دادند. فرمول‌بندی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته نیز ارائه شد. نتایج محاسباتی در مورد نمونه‌های تصادفی و مثال‌های واقعی اثربخشی روش‌های پیشنهادی را تأیید کرد [۸]. فورتادو[4] و همکاران (۲۰۱۷)، نیز یک فرمول‌بندی جدید برای PDPTW، بر اساس یک استراتژی جدید که امکان تخصیص وسایل نقلیه به مسیرها با یک فرمول‌بندی دواندیسی می‌دهد، ارائه کردند. این روش می‌تواند

1. Multi-Trip Dial-A-Ride Problem
2. Dial-A-Ride Problem
3. Detti
4. Furtado

برای ارائه یک فرمول‌بندی فشرده برای افرادی که علاقه‌مند به حل مسائل تحقیق در عملیات با استفاده از نرم‌افزارهای بهینه‌سازی عمومی هستند، مفید باشد. فورتادو و همکاران (۲۰۱۷)، برای حل مدل خود از نرم‌افزار CPLEX استفاده کردند. نتایج محاسباتی نشان داد که فرمول‌بندی ارائه‌شده دارای ویژگی‌های جالبی بوده و در میان تمامی فرمول‌بندی‌های فشرده‌ی دیگر، دارای بهترین عملکرد است [۱۰]. بابایی و همکاران (۲۰۱۸)، مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل اضطراری برای تعیین شبکه بهینه برای انجام سفرهای پاسخ اضطراری با اولویت بالا پس از زلزله را پیشنهاد کردند. این مسئله دارای سه تابع هدف تعیین‌شده برای شناسایی مسیرهای بهینه برای وسایل نقلیه اضطراری با درنظرگرفتن طول، زمان سفر و تعداد مسیرها به‌عنوان معیارهای عملکرد آسیب‌پذیری شبکه بود. یک رویکرد ترکیبی برای درنظرگرفتن سه هدف شامل مجموع وزنی و روش‌های لکسیکوگراف استفاده شد. مدل پیشنهادی با استفاده از روش حل شاخه و برش حل شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه معروف سیوکس فالز و شبکه دنیای واقعی کلان‌شهر تهران، ایران آزمایش شد. آزمایش‌های محاسباتی برای بررسی اثرات تغییر طول شبکه ماکزیمم و وزن نسبی اهداف دیگر صورت گرفت [۲]. سووین[1] و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی با عنوان «یک مدل مسیریابی آمبولانس پویا با پاسخ چندگانه»، نحوه هدایت آمبولانس‌ها به بیماران را بررسی کردند. در زمان ارسال، عدم‌قطعیت در مورد نوع آمبولانس موردنیاز بیمار وجود دارد. آن‌ها همچنین زمان اعزام یک آمبولانس و زمان ارسال آمبولانس‌های متعدد را بررسی کردند. سیستم‌های خدمات پزشکی اورژانس واکنش سریع مجهز به هر دو وسیله نقلیه اورژانس پیشرفته و پایه اغلب هر دو نوع وسیله نقلیه را به یک تماس ارسال می‌کنند که «پاسخ چندگانه» نامیده می‌شود. پاسخ چندگانه زمان پاسخ سریع‌تر با هزینه بالقوه دردسترس‌نبودن وسایل نقلیه بیشتر برای سرویس را ممکن می‌سازد. برای ارزیابی مقدار پاسخ چندگانه، آن‌ها یک مدل فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف را فرمول‌بندی کردند که به‌صورت پویا نوع وسیله نقلیه برای ارسال را تعیین می‌کند. آن‌ها نشان دادند که سیاست‌های بهینه قابل‌جداسازی هستند. آزمایش‌ها عددی نشان می‌دهند زمانی که نیازهای سلامت بیماران نامشخص هستند، پاسخ‌های چندگانه می‌توانند عملکرد سیستم را به میزان زیادی بهبود بخشند [۱۶].

بزرگی و همکاران (۱۳۹۸)، یک مدل دوهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین خون با هدف کاهش هزینه تأسیس تسهیلات ثابت و موقت، هزینه‌های انتقال فرآورده‌های خونی و حداقل‌کردن حداکثر میزان کمبود ارائه کردند. آن‌ها با توجه به عدم‌قطعیت‌های موجود در عرضه و تقاضا، برای مقابله با کمبود و افزایش سطح پاسخگویی، انتقالات جانبی بین بیمارستان‌ها را در نظر گرفتند؛ همچنین مدل غیرقطعی را به کمک روش فازی خیمنز به مدل قطعی تبدیل کرده و

1. Soovin

مدل دوهدفه را با استفاده از روش ترابی و حسینی (۲۰۱۲) به مدل تک‌هدفه تبدیل کردند. نتایج محاسباتی حاصل از مدل آن‌ها نشان داد در مدل فازی به‌دلیل وجود α-cut، مدل انعطاف‌پذیرتر شده است؛ درحالی‌که در شرایط قطعیت، به‌دلیل قطعی‌بودن مقادیر پارامترها، اجازه انعطاف‌پذیری به مقادیر پارامترهای مدل داده نمی‌شود [۵]. دانیل[1] و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی در خصوص مطالعه زنجیره تأمین پیوند کبد در «ایالت سائو پائولو» به بررسی روند اهدای خون، بازیابی اعضای بدن و پیوند با استفاده از روش‌های مهندسی مبتنی بر تجزیه‌وتحلیل لجستیک پرداختند. روند پیوند کبد بر اساس یک روش زنجیره تأمین با استفاده از این دانش و کنار هم قراردادن علوم پزشکی و مهندسی برای ارتقای اثربخشی و کارایی و نتایج بهتر برای برنامه پیوند، تجزیه‌وتحلیل شد. داده‌ها بین سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۸ جمع‌آوری شد و شامل ۵۵۰۲ اهداکننده کبد و ۲۶۷۸ (۴۸/۷ درصد) بیمار بود که اعضای پیوند کبد را دریافت کرده‌اند. درمجموع ۲۸۲۴ عضو به‌دلیل مسائل لجستیکی (حمل‌ونقل و جابه‌جایی) رد شدند. مصاحبه‌های متخصصان مراقبت‌های بهداشتی امکان طراحی نقشه فرایندی را فراهم کرد که در آن ۴ ذی‌نفع شامل بیمار، پزشک، عضو و اطلاعات شناسایی شدند [۷]. فومی هیتو[2] و همکاران (۲۰۲۰)، به ارزیابی هدف در کوتاه‌ترین فاصله زمانی از حرکت آتش‌نشانی تا ورود به بیمارستان در خدمات فوریت‌های پزشکی با استفاده از یک سیستم موقعیت‌یابی جهانی – بالقوه برای صرفه‌جویی در وقت در هنگام حرکت آمبولانس پرداختند. درمجموع ۶۸ بیمار که به مرکز فوریت‌های پزشکی «دانشگاه پزشکی جیچی» منتقل شده بودند، هدف قرار گرفتند. اطلاعات سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) به‌دست‌آمده از کاوشگرهای مستقر در هر آمبولانس با سوابق خدمات فوریت‌های پزشکی (EMS^3) برای شناسایی فاصله، شتاب، زمان فعالیت EMT و مکان صحنه بررسی شد [۹]. علی‌دوست و همکاران (۱۳۹۹)، یک مدل ریاضی چندهدفه برای زنجیره تأمین دارو در حوادث غیرمترقبه ارائه دادند تا به تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در زمان وقوع حوادث غیرمترقبه همچون سیل و زلزله کمک کند. آن‌ها سه هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها، کمینه‌سازی درصد کمبود دارو و بیشینه‌سازی پراکنش مراکز توزیع با رویکرد امدادرسانی بهتر در زمان وقوع حادثه را در نظر گرفتند. مسئله با استفاده از روش ترابی ـ حسینی (۲۰۱۲) حل و رابطه توابع هدف با یکدیگر، با توجه به اولویت و اهمیت آن‌ها، مقایسه شد. آن‌ها به‌منظور بررسی عملکرد مدل و نحوه ارتباط سطوح مختلف زنجیره تأمین و فعالیت‌ها با یکدیگر از داده‌های مرتبط با بحران وقوع زلزله در شهر تهران در سناریوهای مختلف استفاده کردند. درنهایت مشخص شد که افزایش مطلوبیت توابع هدف کمینه‌سازی درصد کمبود دارو و بیشینه‌سازی پراکنش مراکز توزیع

1. Daniel
2. Fomihito
3. Emergency medical services

به‌ترتیب هزینه بیشتری را به سیستم تحمیل خواهد کرد [۱]. استفان[1] و همکاران (۲۰۲۱)، زمان حمل‌ونقل قبل از بیمارستان خدمات فوریت‌های پزشکی برای بیماران ترومایی در طول COVID-19 را بررسی کردند. با توجه به اینکه مدت‌زمان طولانی‌تر پیش‌بیمارستانی با افزایش احتمال زنده‌ماندن در بیماران ترومایی همراه بود، در این پژوهش، چگونگی تأثیر همه‌گیر COVID-19بر خدمات فوریت‌های پزشکی زمان‌های پیش بیمارستانی برای بیماران تروما تعیین شد؛ همچنین بیماران ترومایی که از طریق EMS به شش مرکز تروما منتقل شده بودند، مقایسه شدند. نتایج شامل کل زمان پیش بیمارستانی EMS (اعزام به بیمارستان)، زمان جراحت برای زمان اعزام، زمان پاسخ (اعزام به صحنه)، زمان حضور در صحنه و زمان حمل‌ونقل حرکت صحنه به بیمارستان از آزمون‌های دقیق فیشر، مجذور کای، یا کروسکال والیس بودند که آلفا برابر ۰/۵۵ بود [۱۷]. چن فنگ[2] و همکاران (۲۰۲۱)، در پژوهشی با عنوان «ادغام داده‌های حمل‌ونقل با سوابق خدمات فوریت‌های پزشکی برای بهبود تصمیم تریاژ در بیماران مبتلا به تروما در معرض خطر» راه‌های ممکن برای بهبود EMS و روند تصمیم‌گیری تریاژ ضربه را بررسی کردند. اول از همه، منابع داده‌های مربوط به حمل‌ونقل، مانند حجم ترافیک و سرعت وسایل نقلیه، با EMS و سوابق بیمارستان ادغام شده‌اند و اطلاعاتی را درباره خطرات تصادف ارائه می‌دهند. اطلاعات مهم حمل‌ونقل معمولاً در فرآیند تریاژ درست وجود ندارد؛ اما برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری به‌راحتی در زمان واقعی دردسترس قرار می‌گیرد؛ سپس داده‌های یکپارچه برای ساخت مدل‌های یادگیری ماشین با پیش‌بینی‌های جدید استفاده شد. پیش‌بینی‌های حمل‌ونقل EMS و تریاژ به مراکز ضربه به شوک با استفاده از یک مجموعه داده مریلند با سوابق بیش از ۵۵۰۰۰ بیمار مسن بررسی و تحلیل شد. در مقایسه با مدل‌های معیار بدون اطلاعات حمل‌ونقل به‌عنوان پیش‌بینی، مدل‌های آموزش‌داده‌شده با داده‌های یکپارچه دقت پیش‌بینی برتر را نشان می‌دهند [۶]. کوچکی و همکاران (۱۴۰۰)، زنجیره تأمین خون را به‌صورت مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط شامل مراحل جمع‌آوری، فرآوری و توزیع خون و محصولات خونی با درنظرگرفتن طول عمر و سن تقاضا طراحی کردند که به دنبال کاهش هزینه‌های متحمل بر زنجیره تأمین و نیز کاهش کمبود محصولات خونی بود. ازآنجاکه همواره احتمال تغییرات ذاتی در بسیاری از پارامترهای مسئله ازجمله عرضه و تقاضا وجود دارد، از روش بهینه‌سازی استوار به‌منظور مقابله با این عدم‌اطمینان در زنجیره تأمین استفاده شد. مدل طراحی‌شده با مثال عددی و در اندازه‌های کوچک به‌صورت حل دقیق و در اندازه بزرگ توسط الگوریتم‌های فراابتکاری وال و رقابت استعماری حل شد [۱۱].

1. Stephanie
2. Chenfeng

با مقایسه مسئله موردنظر پژوهش حاضر با مطالعات صورت‌گرفته در مسئله برداشت و تحویل می‌توان نوآوری‌های مسئله‌ی موردنظر را به شرح زیر بیان کرد:

ـ با توجه به بررسی‌های انجام شده، تاکنون در مبانی نظری موضوع به مسئله مسیریابی شبکه پیوند اعضا پرداخته نشده است؛

ـ گره‌ها مانند مدل‌های متداول مسائل برداشت و تحویل از قبل به مجموعه‌های برداشت‌ها، تحویل‌ها تقسیم نشده‌اند؛

ـ زمان بین گره‌ها تابعی از بازه‌ی زمانی شروع حرکت آمبولانس است که در آن تأثیر ترافیک به‌صورت یک تابع چندضابطه‌ای در نظر گرفته شده است؛

ـ پنجره‌های زمانی و زمان اسکمی سرد تابعی از اعضای حمل شده هستند؛

ـ مدل، حمل بیمار و عضو را توأمان در نظر می‌گیرد؛

ـ ناوگان حمل ناهمگون است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

تعریف مسئله و مدل‌سازی ریاضی. در این پژوهش ارائه راه‌کاری برای بهبود زمان‌بندی برداشت و تحویل اعضای پیوندی در یک شهر شلوغ با بار ترافیکی متراکم بررسی می‌شود. روزانه اعضای پیوندی و نیز بیماران پیوندی، چه اهداکننده و چه گیرنده، باید بین بیمارستان‌های اهداکننده و بیمارستان پیوند جابه‌جا شوند. با توجه به اهمیت موضوع یک ناوگان جداگانه به این امر تخصیص می‌یابد که با آمبولانس‌های ویژه در این امر به جابه‌جایی اعضای پیوندی و بیماران پیوندی مبادرت می‌ورزند؛ بنابراین تخصیص مناسب اعضای پیوندی و بیماران به آمبولانس‌ها، تعیین بهینه زمان‌بندی و توالی برداشت و تحویل‌ها و مدنظر قراردادن واقعیت‌های ترافیکی نظیر بار ترافیکی شهر، پنجره‌های زمانی وابسته به بیمار و عضو پیوندی و نیز مدت‌زمان اسکمی سرد ازجمله مواردی است که در مدل ریاضی پیشنهادی گنجانده شده است. محدودبودن ناوگان حمل و ناهمگون‌بودن آن، امکان حمل بیش از یک عضو در یک آمبولانس و محاسبه دقیق اثر ترافیک در زمان جابه‌جایی بین بیمارستان‌ها ازجمله مواردی است که کاربردپذیری مدل پیشنهادی را تقویت می‌کند. در مدل پیشنهادی زمان به‌صورت پیوسته لحاظ شده و از تقسیم‌بندی زمان به دوره‌های زمانی که در برخی مدل‌های کلاسیک رایج است، پرهیز شده است که این امر ناشی از ضرورت پرداختن به ثانیه‌ها به‌عنوان یک اصل مهم در جابه‌جایی اعضای پیوندی است. افق زمانی برای برنامه زمان‌بندی برداشت و تحویل روزانه است و داده‌های ترافیکی می‌تواند از سیستم‌های آنلاین مدیریت ترافیک شهری استخراج شود. مدل پیشنهادی در فرم اولیه غیرخطی است که با استفاده از روش‌های دقیق به فرم خطی تبدیل

می‌شود که در زمان حل مدل تأثیر زیادی خواهد داشت. در ادامه مفروضات مسئله، نمادهای به‌کاررفته و مدل ریاضی به‌تفصیل تشریح خواهد شد.

مفروضات مسئله

ـ تمامی مسیرها از پارکینگ شروع شده و به آن ختم می‌شود؛
ـ تمامی سفارش‌ها باید تکمیل شود؛
ـ سفارش‌ها از پیش مشخص هستند؛
ـ ناوگان حمل ناهمگن است؛
ـ زمان طی مسیر بین دو بیمارستان به بار ترافیکی در زمان ترک بیمارستان مبدأ وابسته است؛
ـ پنجره‌های زمانی به عضو پیوندی و بیمار وابسته هستند و زمان اسکمی سرد نیز به‌عنوان حد مجاز زمان حمل مدنظر قرار گرفته است؛
ـ زمان برداشت و حمل وابسته به اعضای پیوندی و بیمار در نظر گرفته شده است.

نمادهای مدل

مجموعه‌ها

K: مجموعه آمبولانس‌ها
O: مجموعه سفارش‌ها
V : مجموعه تمام گره‌ها $V = \{0,1,\dots,n+1\}$
L: مجموعه بازه‌های زمانی

اندیس‌ها

i, j: اندیس گره شامل بیمارستان‌ها و پارکینگ (گره‌های صفر و n+1)
m: اندیس سفارش‌ها
k: اندیس آمبولانس‌ها
l: اندیس بازه‌های زمانی در روز

پارامترها

c_k: ظرفیت آمبولانس k
t_{ij}: مدت‌زمان سفر بین بیمارستان i و j
fc_k : هزینه ثابت حمل‌ونقل برای وسیله k

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

vc_k: هزینه متغیر زمان حمل‌ونقل وسیله k از گره i به گره j

SP_{m}: زمان موردنیاز برای برداشت سفارش m با آمبولانس k

SD_{m}: زمان موردنیاز برای تحویل سفارش m از آمبولانس k

Dp_m: جریمه یک واحد زمان تأخیر در تحویل سفارش m

Ep_m: جریمه یک واحد زمان زودتر تحویل دادن سفارش m

$[a_m, b_m]$: پنجره زمانی سفارش m

t_l: ابتدای بازه زمانی lام برای اعمال بار ترافیک شهری

M: یک مقدار بزرگ

ω_m: ضریب حجمی سفارش m از نوع t

AT_m: زمان قابل‌قبول حمل سفارش m

θ_l: درصد افزایش زمان سفر بین دو بیمارستان با توجه به بازه‌ی زمانی l

متغیرهای تصمیم

x_{ijk}: متغیر باینری اگر بیمارستان j دقیقاً بعد از بیمارستان i توسط آمبولانس k ملاقات شود، ۱؛ در غیر این‌صورت صفر

Q_{ijmk}: متغیر باینری اگر آمبولانس k که از بیمارستان i به j در حال حرکت است؛ سفارش m را حمل کند، ۱؛ در غیر این‌صورت صفر

P_{mk}: متغیر باینری اگر آمبولانس k سفارش m را بردارد، ۱؛ در غیر این‌صورت صفر

D_{mk}: متغیر باینری اگر آمبولانس k سفارش m را تحویل دهد، ۱ در غیر این‌صورت صفر

z_{ik}: متغیر باینری اگر بیمارستان i توسط آمبولانس k ملاقات شود، ۱؛ در غیر این‌صورت صفر

T_{ik}: زمان ورود آمبولانس k به بیمارستان i

TP_m: زمان برداشت سفارش m

TD_m: زمان تحویل سفارش m

LT_{ik}: زمان ترک بیمارستان i توسط آمبولانس k

متغیرهای کمکی

y_{ikl}: متغیر باینری اگر زمان ترک آمبولانس k از بیمارستان i در بازه‌ی lام باشد، ۱؛ در غیر این‌صورت صفر

g_{ijkl}: متغیر باینری برابر با حاصل‌ضرب دو متغیر x_{ijk}, y_{ikl}

U_{mik}: متغیر پیوسته برابر با حاصل‌ضرب دو متغیر P_{mk}, T_{ik}

R_{mik}: متغیر پیوسته برابر با حاصل‌ضرب دو متغیر D_{mk}, T_{ik}

مدل ریاضی

$$Min\ Z = \sum_{i,k} fc_k\, x_{0ik} + \sum_{i,j,k} vc_{ij} \times \left(1 + \theta(LT_{ik})\right) \times t_{ij}\, x_{ijk} + \sum_{m} max(0, TD_m - b_m) \times Dp_m + \sum_{m} max(0, a_m - TD_m) \times Ep_m \quad (۱)$$

$$\sum_{k} P_{mk} = 1 \qquad \forall m \in O \quad (۲)$$

$$D_{mk} = P_{mk} \qquad \forall m \in O,\ k \in K \quad (۳)$$

$$P_{mk} \le z_{ik} \qquad \forall m \in O,\ i \in V | i = org(m),\ k \in K \quad (۴)$$

$$D_{mk} \le z_{ik} \qquad \forall m \in O,\ i \in V | i = des(m),\ k \in K \quad (۵)$$

$$\sum_{j} x_{jik} = \sum_{j} x_{ijk} = z_{ik} \qquad \forall i \in V,\ k \in K \quad (۶)$$

$$z_{ik} \le z_{0k} \qquad \forall i \in V,\ k \in K \quad (۷)$$

$$z_{ik} \le z_{(n+1)k} \qquad \forall i \in V,\ k \in K \quad (۸)$$

$$LT_{0k} \le LT_{ik} \qquad \forall i \in V,\ k \in K \quad (۹)$$

$$0 \le TD_m - TP_m \le AT_m \qquad \forall m \in O \quad (۱۰)$$

$$TP_m = \sum_{k} P_{mk} . T_{ik} \qquad \forall m \in O,\ i \in V | i = org(m) \quad (۱۱)$$

$$TD_m = \sum_{k} D_{mk} . T_{ik} \qquad \forall m \in O,\ i \in V | i = des(m) \quad (۱۲)$$

$$\sum_{j} Q_{jimk} = \sum_{j} Q_{ijmk} \qquad \forall m \in O,\ i \in V | i \ne org(m),\ i \ne des(m), k \in K \quad (۱۳)$$

$$\sum_j Q_{jimk}x_{jik} + P_{mk} = \sum_j Q_{ijmk}x_{ijk} \quad \forall m \in O,\ i \in V | i = org(m), k \in K \qquad (۱۴)$$

$$\sum_j Q_{jimk}x_{jik} - D_{mk} = \sum_j Q_{ijmk}x_{ijk} \quad \forall m \in O,\ i \in V | i = des(m), k \in K \qquad (۱۵)$$

$$\sum_m Q_{ijmk}\omega_m \le c_k \quad \forall (i,j) \in V, k \in K \qquad (۱۶)$$

$$LT_{ik} = T_{ik} + \sum_{m|org(m)=i} P_{mk}SP_m + \sum_{m|des(m)=i} D_{mk}SD_m \quad \forall i \in V, k \in K \qquad (۱۷)$$

$$LT_{ik} + (1 + \theta(LT_{ik})) \times t_{ij} \le T_{jk} + M(1 - x_{ijk}) \quad \forall (i,j) \in V, k \in K \qquad (۱۸)$$

$$\theta(LT_{ik}) = \theta_l, if\ \ t_l \le LT_{ik} \le t_{l+1} \quad \forall i \in V, k \in K, l \in L \qquad (۱۹)$$

$$t_1 \le T_{ik} \le t_L \quad \forall i \in V, \forall k \in K \qquad (۲۰)$$

$$Q_{ijmk}, P_{mk}, D_{mk}, x_{jik}, z_{ik} \in \{0,1\}$$
$$T_{ik}, LT_{ik}, TP_m, TP_m \ge 0 \qquad (۲۱)$$

معادله ۱، تابع هدف مسئله است و مجموع هزینه ثابت و متغیر حمل‌ونقل اعضای پیوندی و بیماران و هزینه جریمه زمانی دیرکرد و یا زودکرد در برداشت و تحویل آن‌ها را کمینه می‌کند. دقت شود جریمه دیرکرد و زودکرد به‌صورت جداگانه تعریف شده و می‌توان فرض کرد جریمه زودکرد نداریم یا خیلی کمتر از جریمه دیرکرد است. محدودیت ۲، مشخص می‌کند برداشت هر سفارش منحصربه‌فرد، توسط آمبولانس یک‌بار اتفاق می‌افتد. محدودیت ۳، تضمین می‌کند در صورت برداشت یک سفارش توسط آمبولانس باید حتماً آن را تحویل دهد. محدودیت‌های ۴ و ۵، مشخص می‌کنند زمانی که آمبولانس بیمارستانی را ملاقات کند حتماً باید عضو/ بیماری را برداشته یا تحویل دهد. محدودیت ۶، بالانس جریان ورودی و خروجی در گره‌های میانی را تضمین می‌کند. محدودیت‌های ۷، ۸ و ۹، مجموعاً تضمین می‌کنند که هر سفر از پارکینگ شروع شده و به آن ختم شود.

محدودیت ۱۰، تعیین می‌کند مدت‌زمان حمل سفارش m (زمان تحویل منهای زمان برداشت) باید از حداکثر زمان قابل‌قبول برای نگهداری آن سفارش (اسکمی سرد) کمتر باشد. محدودیت ۱۱، زمان برداشت سفارش (عضو پیوندی) m را محاسبه می‌کند که برابر با زمان رسیدن آمبولانس به مبدأ سفارش است. محدودیت ۱۲، زمان تحویل سفارش m را محاسبه می‌کند که برابر با زمان رسیدن آمبولانس حاوی سفارش به مقصد آن است. محدودیت‌های ۱۳،

۱۴ و ۱۵، محدودیت‌های مربوط به بالانس موجودی آمبولانس k هستند. درواقع هنگام رسیدن آمبولانس k به هر بیمارستان با سه حالت وجود دارد. محدودیت ۱۳، مقدار موجودی آمبولانس زمانی که بیمارستان i مبدأ یا مقصد هیچ‌یک از سفارش‌های مربوط به آمبولانس k نباشد را محاسبه می‌کند. محدودیت ۱۴، مقدار موجودی آمبولانس زمانی که بیمارستان i مبدأ سفارشی مربوط به آمبولانس k باشد را محاسبه می‌کند که برابر است با موجودی قبلی به‌علاوه آنچه در بیمارستان i برمی‌دارد. محدودیت ۱۵، مقدار موجودی آمبولانس زمانی که بیمارستان i مقصد سفارشی مربوط به آمبولانس k باشد را محاسبه می‌کند که برابر است با موجودی قبلی منهای آنچه در بیمارستان i تحویل می‌دهد. محدودیت ۱۶، تضمین می‌کند مجموع حجم محموله آمبولانس از ظرفیت آن تجاوز نکند.

محدودیت ۱۷، زمان ترک آمبولانس k از بیمارستان را محاسبه می‌کند که برابر است با زمان رسیدن به آن بیمارستان بعلاوه مدت‌زمانی که برای تحویل و یا برداشت عضو پیوندی صرف می‌کند. محدودیت ۱۸، زمان ورود آمبولانس به بیمارستان j را محاسبه می‌کند که به زمان ترک بیمارستان قبلی و زمان سفر بین بیمارستان i و j وابسته است که زمان سفر خود تابعی از میزان ترافیک هنگام ترک بیمارستان i است. در این رابطه θ درصد افزایش زمان سفر بین دو بیمارستان بر حسب ساعت پیک ترافیک در لحظه ترک بیمارستان مبدأ است. برای مثال، اواخر شب این زمان به علت ترافیک سبک‌تر کمتر و هنگام غروب بیشتر می‌شود. محدودیت ۱۹، تابع چندضابطه‌ای بار ترافیکی است که درصد افزایش زمان سفر را بر حسب ساعات (یا بازه‌های) مختلف روز مشخص می‌کند. محدودیت ۲۰، برنامه‌ریزی سفرها را به افق زمانی یک روز محدود کرده و درنهایت محدودیت ۲۱، نوع متغیرهای تصمیم را مشخص می‌کند.

خطی سازی مدل. غیر از عبارت اول تابع هدف، بقیه عبارات آن غیرخطی است؛ همچنین محدودیت‌های ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۸ و ۱۹، حالات مختلفی از توابع غیرخطی هستند. به‌منظور حل کاراتر مدل در گام نخست، مدل با استفاده از تکنیک‌های دقیق خطی‌سازی می‌شود [۱۳].

در تابع هدف، عبارت $\sum_{i,j,k} vc_k \times (1+\theta(LT_{ik})) \times t_{ij}\, x_{ijk}$ به‌دلیل حضور تابع چندضابطه‌ای θ و نیز ضرب آن در متغیر x_{ijk}، غیرخطی است.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، θ درواقع تابع بار ترافیکی است و بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده از نرم‌افزارهای پیشرفته ترافیکی برازش می‌شود. در این پژوهش θ به‌صورت یک تابع کلی چندضابطه‌ای تعریف شده است و ورودی آن (α) لحظه ورود به یک یال است و درصد افزایش زمان استاندارد طی‌شدن آن یال را بر اساس حجم ترافیک در آن ساعت از روز برمی‌گرداند. زمان استاندارد نیز زمان طی‌شدن آن یال در وضعیت روان ترافیک فرض می‌شود. به‌این‌ترتیب فرم بازشده تابع زمانی چندضابطه‌ای θ به‌صورت زیر است:

$$\theta(\alpha)=\begin{cases}\theta_1, & t_1 \le \alpha < t_2\\ \theta_2, & t_2 \le \alpha < t_3\\ & \vdots\\ \theta_l, & t_l \le \alpha < t_{l+1}\\ & \vdots\\ \theta_L, & t_L \le \alpha < t_{L+1}\end{cases} \qquad (۲۲)$$

به‌منظور خطی‌سازی تابع $\theta(\alpha)$ که هم در تابع هدف و هم در محدودیت‌های ۱۸ و ۱۹، ظاهر می‌شود، با معرفی متغیر کمکی صفر و یک جدید y_l به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\theta(\alpha)=\sum_l \theta_l \times y_l \qquad (۲۳)$$

سپس، α به تعداد ضابطه‌ها تکثیر می‌شود (اندیس می‌گیرد) و L ضابطه مربوطه با استفاده از متغیر کمکی y_l به‌صورت محدودیت زیر به مسئله اضافه می‌شود:

$$t_l y_l \le \alpha_l < (t_{l+1}-\frac{1}{M}) y_l \quad \forall\, l \in L \qquad (۲۴)$$

که در آن $\frac{1}{M}$ یک عدد بسیار کوچک دلخواه است و برای مدل‌سازی علامت کوچک‌تر (<) استفاده شده است. توجه شود در این حالت داریم:

$$\alpha=\sum_l \alpha_l \qquad (۲۵)$$

درنهایت برای تضمین اینکه فقط یکی از ضابطه‌ها رخ دهد، محدودیت ۲۶، نیز افزوده می‌شود:

$$\sum_l y_l = 1 \qquad (۲۶)$$

با استفاده از این روش، عبارت غیرخطی $\theta(LT_{ik})$ در تابع هدف به‌صورت رابطه ۲۷، بازنویسی می‌شود:

$$\sum_{i,j,k} vc_k \times \left(1+\sum_l \theta_l y_{ikl}\right) \times t_{ij}\, x_{ijk} \rightarrow \sum_{i,j,k} vc_k t_{ij}\, x_{ijk} + \sum_{i,j,k,l} vc_k \theta_l t_{ij} y_{ikl}\, x_{ijk} \qquad (۲۷)$$

همان‌طور که مشخص است، عبارت $y_{ikl}\ x_{ijk}$ در معادله ۲۷، ظاهر می‌شود که حاصل‌ضرب دو متغیر صفر و یک و درنتیجه غیرخطی است. ازآنجاکه حاصل‌ضرب دو متغیر صفر و یک معادل مینیمم آن دو است؛ بنابراین برای خطی‌سازی حاصل‌ضرب آن‌ها می‌توان از خطی‌سازی تابع مینیمم بهره گرفت.

فرض کنید متغیرهای x و z در عبارت $x.z$ دو متغیر صفر و یک هستند. با تعریف متغیر صفر و یک جدید y به‌عنوان مینیمم این دو متغیر و جایگزین‌کردن با عبارت بالا خواهیم داشت:

$$x.z \equiv \min(x,z) \rightarrow y \qquad (۲۸)$$

خطی‌سازی عبارت مینیمم با اضافه‌کردن محدودیت‌های زیر به مسئله تکمیل می‌شود:

$$y \leq x \qquad (۲۹)$$

$$y \leq z \qquad (۳۰)$$

$$y \geq x + y - 1 \qquad (۳۱)$$

بنابراین با استفاده از این تکنیک و تعریف متغیر صفر و یک جدید g_{ijkl} و محدودیت‌های ۳۲ تا ۳۴، خطی‌سازی تکمیل می‌شود.

$$g_{ijkl} \leq x_{ijk} \qquad \forall i, j \in V, k \in K, l \in L \qquad (۳۲)$$

$$g_{ijkl} \leq y_{ikl} \qquad \forall i, j \in V, k \in K, l \in L \qquad (۳۳)$$

$$g_{ijkl} \geq x_{ijk} + y_{ikl} - 1 \qquad \forall i, j \in V, k \in K, l \in L \qquad (۳۴)$$

از همین تکنیک برای خطی سازی حاصل‌ضرب $x_{jik}Q_{jimk}$ در محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵، نیز استفاده می‌شود.

عبارت $\max(0, TD_m - b_m)$ در تابع هدف نیز غیرخطی است. این عبارت با توجه به مینیمم‌بودن تابع هدف، با استفاده از یک متغیر نامنفی جدید $\tau_m \geq 0$ و جایگذاری محدودیت ۳۵، در مدل خطی می‌شود.

$$\tau_m \geq TD_m - b_m \qquad \forall m \in O \qquad (۳۵)$$

در محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲، با ضرب متغیر پیوسته (T_{ik}) در متغیرهای باینری P_{mk} و D_{mk} مواجه هستیم که عبارتی غیرخطی است. که برای خطی‌سازی آن‌ها می‌توان از روش زیر استفاده کرد:

به‌منظور خطی‌سازی محدودیت ۱۱، ابتدا متغیر کمکی نامنفی و پیوسته $U_{mik} \leftarrow P_{mk}.T_{ik}$ تعریف می‌شود؛ سپس با اضافه‌کردن دو محدودیت ۳۶ و ۳۷ به مدل، خطی‌سازی تکمیل می‌شود. M در این محدودیت‌ها یک عدد بزرگ دلخواه است.

$$T_{ik} - (1 - P_{mk}) \times M \leq U_{mik} \leq T_{ik} \qquad \forall m \in O,\ i \in V | i = org(m),\ k \in K \qquad (۳۶)$$

$$0 \leq U_{mik} \leq M \times P_{mk} \qquad \forall m \in O,\ i \in V | i = org(m),\ k \in K \qquad (۳۷)$$

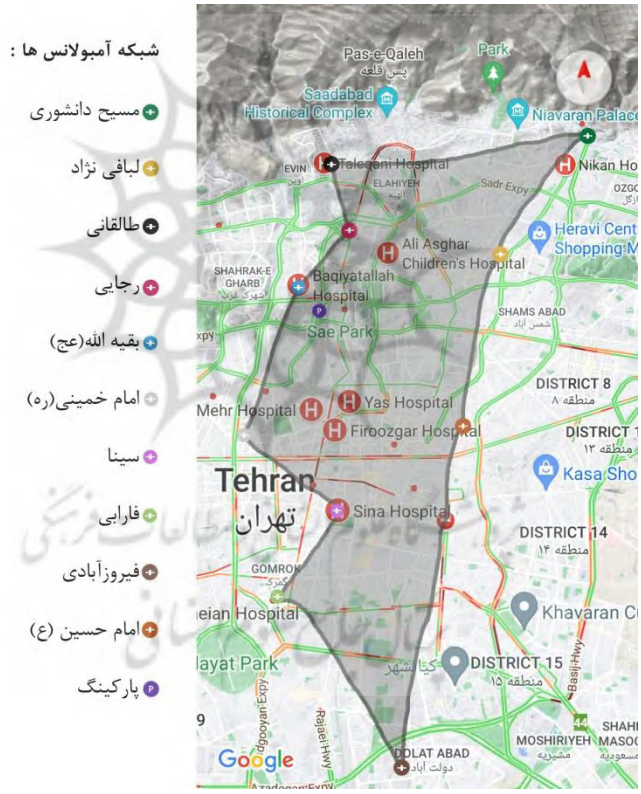
مورد مطالعاتی. فرض می‌شود شبکه‌ای متشکل از ۱۰ بیمارستان دولتی وجود دارد. این بیمارستان‌ها به دو گروه مراکز پیوند و تأمین‌کنندگان عضو تقسیم می‌شوند. مراکز پیوند علاوه بر انجام اعمال جراحی برای خارج‌کردن عضو از بدن اهداکنندگان، توانایی پیوند برخی اعضا را نیز دارند. سایر بیمارستان‌ها که در گروه تأمین‌کنندگان قرار می‌گیرند، صرفاً امکان خارجکردن عضو پیوندی و انتقال آن به مراکز پیوند را دارند. موقعیت مکانی بیمارستان‌ها روی نقشه در شکل ۱، نشان داده شده است. نام بیمارستان‌ها و زمینه‌ی کاری آن‌ها نیز در جدول ۱، ارائه شده است.

جدول ۱. نام و زمینه‌ی کاری بیمارستان‌ها

نام بیمارستان	نوع	زمینه کاری
لبافی‌نژاد	مرکز پیوند/ تأمین‌کننده	کلیه، کبد، پانکراس
طالقانی	مرکز پیوند/ تأمین‌کننده	کبد و کلیه
شهید رجایی	مرکز پیوند/ تأمین‌کننده	قلب
مسیح دانشوری	مرکز پیوند/ تأمین‌کننده	ریه، قلب
امام خمینی	مرکز پیوند/ تأمین‌کننده	کبد، قلب، کلیه
بقیه‌الله	مرکز پیوند/ تأمین‌کننده	کلیه
سینا	مرکز پیوند/ تأمین‌کننده	کلیه
فارابی	تأمین‌کننده	–
فیروزآبادی	تأمین‌کننده	–
امام حسین	تأمین‌کننده	–

به‌محض تأیید یک مورد مرگ مغزی در هر یک از بیمارستان‌ها، هماهنگی صورت می‌گیرد تا عضو/ اعضا در اتاق عمل برداشته شود و عضوهایی که قرار است در همان بیمارستان پیوند شوند (درصورتی‌که بیمارستان امکان پیوند عضو مربوطه را داشته باشد) با توجه به اقدامات و

هماهنگی‌هایی که از قبل توسط وزارت بهداشت صورت می‌گیرد، آن عضو به بیمار هدف پیوند زده می‌شود. سایر اعضا نیز به بیمارستان‌های مرتبط حمل می‌شوند. باید توجه داشت که مسئولیت تخصیص اعضا به افرادی که درون فهرست انتظار قرار دارند با «وزارت بهداشت» است و کلیه هماهنگی‌ها از جانب آن وزارتخانه صورت می‌گیرد. طبق تعریف مسئله فرض می‌شود که یک شرکت حمل‌ونقل تخصصی وجود دارد که دو نوع آمبولانس (تیپ ۱ و ۲) را در اختیار دارد. آمبولانس تیپ ۱ مجهزتر است و امکان جابجایی بیمار علاوه بر جابجایی عضو پیوندی را دارد؛ درحالی‌که آمبولانس تیپ ۲ تنها قادر به جابه‌جایی عضو پیوندی است. بر مبنای قراردادی که بین این شرکت حمل‌ونقل و بیمارستان‌های یادشده بسته شده است، مسئولیت جابه‌جایی بیماران و اعضای پیوندی به این شرکت محول شده است. حال کوشیده می‌شود به‌وسیله حل مدل پیشنهادی، مسیریابی، زمان‌بندی و توالی بهینه برای پاسخ‌دهی به سفارش‌های برداشت و تحویل اعضای پیوندی و بیماران، به‌نحوی‌که هزینه‌های حمل‌ونقل و نیز جریمه دیرکرد و زودکرد حداقل شود، پیدا شود.



شکل ۱. موقعیت مکانی بیمارستان‌ها

جمع‌آوری داده‌ها. مدل پیشنهادی درواقع با الهام از یک مسئله دنیای واقعی توسعه یافته است. اطلاعات جمع‌آوری‌شده در مورد بیمارستان‌های فعال در زمینه پیوند و سازوکار حاکم بر فرآیند پیوند اعضا، از طریق مصاحبه حضوری با مسئولان واحد فراهم آوری اعضای پیوندی بیمارستان مسیح دانشوری تهران به‌دست آمده است. در این مسئله، شبکه‌ای متشکل از ۱۰ بیمارستان دولتی در شهر تهران مفروض است که درمجموع ۱۲ سفارش برداشت و تحویل در یک روز را دارند. شرکت حمل‌ونقل دارای ۳ آمبولانس (یک دستگاه آمبولانس تیپ ۱ و دو دستگاه آمبولانس تیپ ۲) است. سایر داده‌های جمع‌آوری شده نیز در جدول ۲، مشاهده می‌شود.

جدول ۲. مشخصات مسئله موردنظر

شماره سفارش	مبدأ سفارش	مقصد سفارش	عضو پیوندی/ بیمار	A	b	Dp	Ep	AT
۱	طالقانی	لبافی نژاد	پانکراس	۶	۹	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۷
۲	بقیه‌الله	مسیح دانشوری	ریه	۶	۸	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۳
۳	لبافی نژاد	مسیح دانشوری	قلب	۷	۸	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۲
۴	رجایی	بقیه‌الله	کلیه	۶	۱۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۹
۵	مسیح دانشوری	امام خمینی	بیمار	۶	۹	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۳
۶	فارابی	امام خمینی	کبد	۷	۱۰	۴۰۰۰	۴۰۰۰	۵
۷	فیروزآبادی	سینا	کلیه	۶	۱۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۹
۸	رجایی	سینا	کلیه	۱۰	۱۴	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۹
۹	امام حسین	رجایی	قلب	۹	۱۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۲
۱۰	سینا	طالقانی	بیمار	۱۲	۱۵	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۵
۱۱	امام خمینی	مسیح دانشوری	ریه	۱۴	۱۶	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۳
۱۲	مسیح دانشوری	لبافی‌نژاد	پانکراس	۸	۱۱	۴۰۰۰	۴۰۰۰	۵

برای حل مسئله به کوتاه‌ترین زمان پیمایش مسیر بین هر دو بیمارستان در حالت روان ترافیک نیاز است. به‌منظور به‌دست‌آوردن این اعداد، از وب‌سایت گوگل مپز[1] در ساعاتی که تمامی مسیرها بدون ترافیک بوده (ساعات اولیه بامداد) استفاده شده و اعداد جدول ۳، استخراج شده است.

پرتال جامع علوم انسانی

1. Google maps

جدول ۳. مدت‌زمان پیمایش مسیر بین بیمارستان‌ها در حالت ترافیک روان

	مسیح دانشوری	لبافی نژاد	طالقانی	شهید رجایی	بقیه‌الله	امام خمینی	سینا	فارابی	فیروز آبادی	امام حسین
مسیح دانشوری		۱۵	۲۴	۲۰	۲۱	۲۷	۲۶	۳۴	۳۸	۲۱
لبافی نژاد	۱۸		۲۰	۱۴	۱۱	۱۷	۱۷	۲۳	۲۳	۱۳
طالقانی	۲۴	۱۹		۱۵	۱۱	۱۶	۲۴	۲۴	۳۴	۲۴
شهید رجایی	۲۴	۱۵	۱۴		۷	۱۳	۲۰	۱۹	۲۹	۱۹
بقیه‌الله	۲۲	۱۳	۱۶	۸		۱۰	۱۸	۱۷	۲۷	۱۸
امام خمینی	۲۹	۱۹	۲۲	۱۵	۱۰		۱۵	۱۴	۲۶	۲۰
سینا	۳۰	۲۴	۲۸	۲۲	۱۷	۱۳		۷	۲۴	۱۷
فارابی	۳۲	۲۳	۲۶	۱۷	۱۴	۱۲	۹		۲۰	۲۱
فیروز آبادی	۳۴	۳۰	۴۰	۳۲	۲۹	۲۶	۲۳	۲۱		۲۱
امام حسین	۲۲	۱۸	۲۸	۲۱	۲۱	۱۸	۱۴	۱۸	۲۵	

در این مدل اثر ترافیک بر مدت‌زمان طی مسیر در نظر گرفته شده است. بدین منظور، پارامتر θ که برابر با درصد افزایش زمان سفر بین دو بیمارستان است، بسته به بازه زمانی حرکت محاسبه شده است. برنامه‌ی روزانه به ۹ بازه دوساعته تقسیم شده که شروع آن ساعت ۶ صبح و پایان آن ساعت ۲۴ است. به هر یک از این ۹ بازه یک θ تخصیص یافته که مقدار آن بر طبق میانگین مدت‌زمان سفر در آن بازه‌ی زمانی با استفاده از داده‌های سایت گوگل‌مپز به‌دست آمده است. مقادیر θ در جدول ۴، نشان داده شده است.

جدول ۴. مقادیر θ برای بازه‌های زمانی مختلف

بازه زمانی	۶-۸	۸-۱۰	۱۰-۱۲	۱۲-۱۴	۱۴-۱۶	۱۶-۱۸	۱۸-۲۰	۲۰-۲۲	۲۲-۲۴
θ	۰	۰/۵۲	۰/۶۴	۰/۶۰	۰/۷۱	۱/۲۵	۱/۲۳	۰/۵۵	۰/۱۷

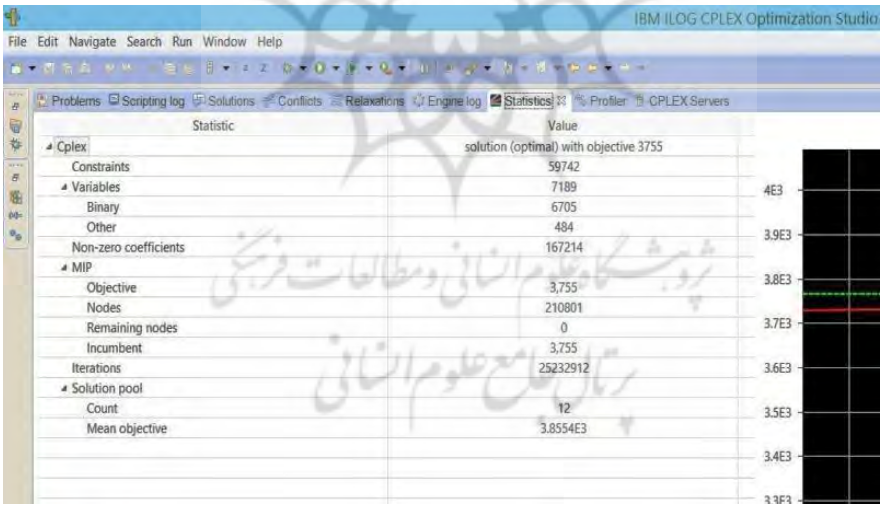
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

بنابراین تابع چندضابطه‌ای $\theta(\alpha)$ به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\theta(\alpha)=\begin{cases}0.0, & 6\le \alpha<8\\ 0.52, & 8\le \alpha<10\\ 0.64, & 10\le \alpha<12\\ 0.60, & 12\le \alpha<14\\ 0.71, & 14\le \alpha<16\\ 1.25, & 16\le \alpha<18\\ 1.23, & 18\le \alpha<20\\ 0.55, & 20\le \alpha<22\\ 0.17, & 22\le \alpha<24\end{cases} \qquad (۳۸)$$

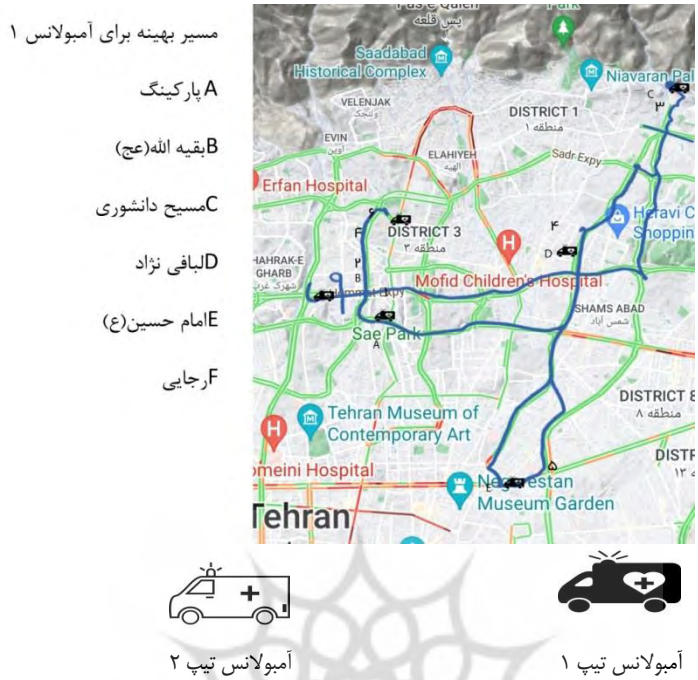
۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

همان‌طور که در بخش قبل به آن اشاره شد، مدل پیشنهادی یک برنامه ریاضی غیرخطی عدد صحیح مختلط است که با روش‌های دقیق تحقیق در عملیات به یک برنامه ریاضی خطی معادل تبدیل شده است. مدل خطی به‌دست‌آمده امکان حل دقیق و کارای آن را با استفاده از نرم‌افزار CPLEX فراهم می‌آورد. برای حل دقیق مسئله از زبان OPL در نرم‌افزار CPLEX 12.8.0 بر روی سیستم‌عامل ۶۴ بیتی Intel (R) Core(TM) i7 2.5 GHz و حافظه‌ی 8 GB استفاده شد. با توجه به خطی‌بودن برنامه‌ریزی به‌دست‌آمده، مسئله موردنظر در مدت‌زمان ۲۳۰۰.۴۷ ثانیه (۳۸ دقیقه و ۲۲ ثانیه و ۲۴ صدم ثانیه) و با مقدار تابع هدف ۳۷۵۵ حل شد. در شکل ۲، تب statistics نرم‌افزار نشان داده شده است.



شکل ۲. خروجی تب statistics حاصل از حل مسئله توسط نرم‌افزار CPLEX

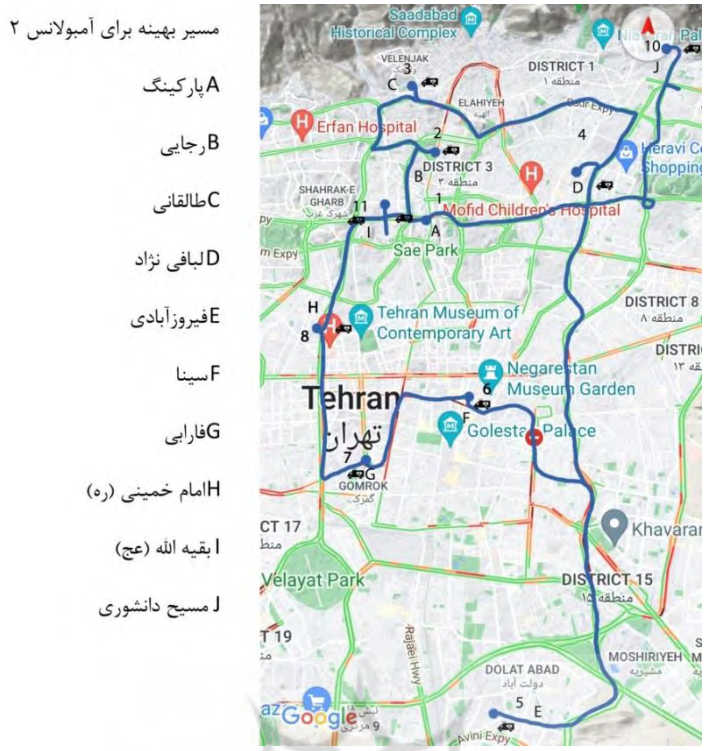
توالی‌های بهینه برداشت و تحویل. توالی بهینه برداشت و تحویل سفارش‌ها در شکل‌های ۳ تا ۵، مشاهده می‌شود. در این شکل‌ها آمبولانس تیپ ۱ سفیدرنگ بوده و تیپ ۲ مشکی است.



شکل ۳. توالی بهینه برای آمبولانس ۱

با توجه به شکل ۳، آمبولانس۱ که تیپ۲ است، ابتدا از پارکینگ خارج شده و برای برداشت سفارش۲ (ریه) به سمت «بیمارستان بقیه‌الله» می‌رود. پس‌ازآن «بیمارستان بقیه‌الله» را به مقصد «بیمارستان مسیح دانشوری» برای برداشت سفارش۱۲ (کبد) و همچنین تحویل سفارش۲ ترک می‌کند؛ سپس سفارش ۱۲ را در «بیمارستان لبافی‌نژاد» تحویل داده و برای برداشت سفارش ۹ (قلب) به سمت «بیمارستان امام حسین» حرکت می‌کند. پس از برداشت سفارش ۹ در «بیمارستان امام حسین» آن را در «بیمارستان رجایی» تحویل می‌دهد و به سمت پارکینگ بازمی‌گردد.

پرتال جامع علوم انسانی



شکل ۴. توالی بهینه برای آمبولانس ۲

طبق شکل ۴، آمبولانس ۲ که تیپ ۲ است ابتدا برای برداشت سفارش ۴ و سفارش ۸ (هر دو کلیه) پارکینگ را به مقصد بیمارستان رجایی ترک می‌کند. پس‌ازآن در بیمارستان طالقانی سفارش ۱ (پانکراس) را برمی‌دارد و آن را در «بیمارستان لبافی‌نژاد» تحویل می‌دهد (باید توجه داشت که کماکان سفارش‌های ۴ و ۸ در آمبولانس قرار دارند). پس از ترک «بیمارستان لبافی‌نژاد»، آمبولانس به «بیمارستان فیروزآبادی» می‌رود و سفارش ۷ (کلیه) را تحویل می‌گیرد؛ سپس به «بیمارستان سینا» می‌رود و در آنجا سفارش‌های ۷ و ۸ را تحویل می‌دهد. مقصد بعدی «بیمارستان فارابی» است که در آن سفارش ۶ (کبد) برداشته می‌شود و پس‌ازآن آمبولانس به «بیمارستان امام خمینی »رفته و سفارش ۶ را تحویل می‌دهد و همچنین در آن بیمارستان سفارش ۱۱ (ریه) را برمی‌دارد. پس از ترک «بیمارستان امام خمینی»، آمبولانس به «بیمارستان بقیه‌الله» می‌رود و در آنجا سفارش ۴ (کلیه) را تحویل می‌دهد. آخرین مقصد آمبولانس «بیمارستان مسیح دانشوری» است که در آن سفارش ۱۱ را تحویل می‌دهد و درنهایت به پارکینگ بازمی‌گردد.

شکل ۵. توالی بهینه برای آمبولانس ۳

در شکل ۵، مسیر آمبولانس ۳ که تیپ ۱ است به تصویر کشیده شده است. این آمبولانس ابتدا پارکینگ را به مقصد «بیمارستان لبافی‌نژاد» به‌منظور برداشت سفارش ۳ (قلب) ترک می‌کند. پس‌ازآن به بیمارستان مسیح دانشوری می‌رود، سفارش ۳ را تحویل می‌دهد و سفارش ۵ (بیمار) را برمی‌دارد؛ سپس به «بیمارستان امام خمینی» می‌رود و در آنجا سفارش ۵ را تحویل می‌دهد. بعد از ترک «بیمارستان امام خمینی» به «بیمارستان سینا» می‌رود و سفارش۱۰ (بیمار) را برداشته و آن را در بیمارستان طالقانی تحویل می‌دهد. درنهایت از «بیمارستان طالقانی» به پارکینگ بازمی‌گردد.

تحلیل حساسیت. در این بخش با اعمال تغییرات روی پارامترهای مسئله، عملکرد مدل ارزیابی می‌شود. برای این کار تعدادی مسئله با ابعاد کوچک‌تر تولید شده و در هر یک از آن‌ها به تغییر پارامتری خاص و بررسی اثر آن روی جواب مسئله پرداخته می‌شود.

هزینه ثابت. ابتدا نحوه اثرگذاری هزینه ثابت بر مدل بررسی می‌شود. بدین صورت که هزینه ثابت مربوط به دو تیپ آمبولانسی تغییر داده شده و سایر پارامترها ثابت نگه داشته می‌شود. مقدار این تغییرات و مشخصات این مسائل در جدول ۵، آورده شده است. جزئیات سفارش‌ها نیز در جدول ۶، قابل‌مشاهده است. درنهایت نتایج حاصل از حل این ۵ مسئله با نرم‌افزار CPLEX در جدول ۷، نشان داده شده است.

جدول ۵. مشخصات مسائل تولیدشده برای تحلیل حساسیت مدل نسبت به هزینه ثابت

پارامتر	مسئله ۱	مسئله ۲	مسئله ۳	مسئله ۴	مسئله ۵
تعداد بیمارستان‌ها	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
تعداد سفارش‌ها	۵	۵	۵	۵	۵
تعداد نوع سفارش‌ها	۶	۶	۶	۶	۶
تعداد آمبولانس تیپ ۱	۱	۱	۱	۱	۱
تعداد آمبولانس تیپ ۲	۲	۲	۲	۲	۲
هزینه ثابت آمبولانس تیپ ۱	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰
هزینه ثابت آمبولانس تیپ ۲	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۵۰۰	۵۰۰۰
مجموع هزینه ثابت	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰

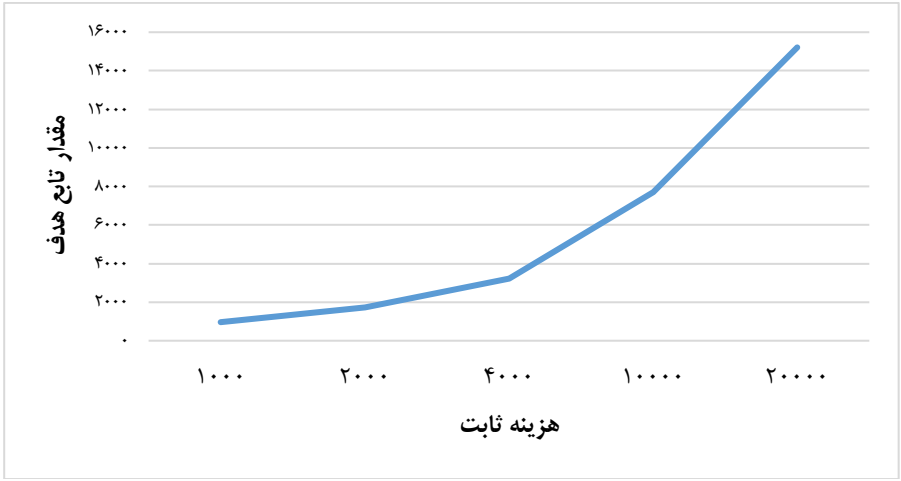
جدول ۶. جزئیات سفارش‌ها

سفارش	مبدأ	مقصد	نوع عضو / بیمار	a	b	Dp	Ep	AT
۱	طالقانی	لبافی نژاد	پانکراس	۶	۹	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۷
۲	بقیه‌الله	مسیح دانشوری	ریه	۶	۸	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۳
۳	لبافی‌نژاد	مسیح دانشوری	قلب	۷	۸	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۲
۴	رجایی	بقیه‌الله	کلیه	۶	۱۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۹
۵	مسیح دانشوری	امام خمینی	بیمار	۶	۹	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۳

جدول ۷. نتایج به‌دست‌آمده از تغییر هزینه ثابت

شماره مسئله	تابع هدف
۱	۹۶۲/۶
۲	۱۷۱۲/۶
۳	۳۲۱۲/۶
۴	۷۷۱۲/۶
۵	۱۵۲۱۲/۶

با توجه به جدول ۷، مقدار تابع هدف با هزینه ثابت نسبت مستقیم دارد و با افزایش آن، افزایش یافته و با کاهش آن نیز کاهش پیدا می‌کند. از طرفی به‌دلیل آنکه سفارش شماره ۵، درخواست جابه‌جایی بیمار است و تنها آمبولانس‌های تیپ ۱ قادر به انجام آن هستند، در تمامی جواب‌ها با درنظرگرفتن هزینه بیشتر این نوع آمبولانس، مدل ناگزیر به استفاده از آن شده است؛ بنابراین برای کاهش هزینه‌های ثابت می‌توان تنها از یک نوع ناوگان متشکل از آمبولانس‌های تیپ ۲ استفاده کرد و تنها به حمل‌ونقل اعضا پرداخت. رابطه هزینه ثابت با مقدار تابع هدف در شکل ۶، نشان داده شده است.



شکل ۶. رابطه هزینه ثابت با مقدار تابع هدف

چنانچه در مسئله آمبولانس تیپ ۱ شود، همان‌گونه که انتظار می‌رود در همان ابتدای اجرای مدل جواب نشدنی به‌دست می‌آید که صحت عملکرد مدل را در حالات غائی نشان می‌دهد.

مقادیر پارامتر θ. در این بخش اثر تغییر مقادیر θ روی مقدار تابع هدف بررسی می‌شود. همان‌طور که توضیح داده شد، θ نشان‌دهنده درصد افزایش زمان سفر بین دو بیمارستان است و با میزان ترافیک نسبت مستقیم دارد. در اینجا با درنظرگرفتن مشخصات ذکرشده در جدول ۶، سفارش‌ها با پنجره‌های زمانی متفاوت و درنتیجه θهای متفاوت، در نظر گرفته می‌شود و پنجره زمانی سفارش‌ها از [۶–۹] که ترافیک کمتری دارد به [۱۶–۲۰] که زمان اوج ترافیک است، تغییر پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که تابع هدف به مقدار ۱۰۴۰/۱۳ تغییر می‌کند که نسبت به حالت قبل، ۸ درصد افزایش را نشان می‌دهد. به‌عبارت بهتر درنظرگرفتن واقعیات ترافیک شهری می‌تواند تا حدود ۱۰ درصد در یک مسئله با ابعاد کوچک باعث تحمیل هزینه‌های اضافی شود که اهمیت مدل پیشنهادی را تصدیق می‌کند (جدول ۸)؛ بنابراین نتیجه مستقیم این تحلیل آن است که برنامه‌ریزی زمان‌های جراحی و پیوند که در بیمارستان‌ها صورت می‌گیرد نه‌تنها باید بر اساس محدودیت‌های درون بیمارستانی نظیر ساعات خالی اتاق عمل، بخش جراحی و مراقبت‌های ویژه، دردسترس‌بودن پزشک جراح و موجودبودن امکانات و غیره صورت پذیرد، بلکه باید هم‌زمان به محدودیت‌های خارج از محیط بیمارستان و به‌ویژه بار ترافیک شهری و اثر مستقیم آن در کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و نیز کاهش مؤثر تأخیرها توجه ویژه کرد. حتی پیش از آن، در هنگام مکان‌یابی برای احداث بیمارستان‌ها توجه به کوریدورهای شهری و دسترسی محلی به بیمارستان‌ها و نیم‌نگاهی به نقشه توسعه شهری توصیه می‌شود.

جدول ۸. مقایسه حالت اوج ترافیک با ترافیک معمولی

شماره مسئله	تابع هدف
در حالت ترافیک معمولی	۹۶۲/۶
در حالت پیک ترافیک	۱۰۴۰/۱۳

مقادیر SP و SD. در این قسمت مقادیر پارامترهای SP_m (مدت‌زمان موردنیاز برای برداشت سفارش mام) و SD_m (مدت‌زمان موردنیاز برای تحویل سفارش mام) تغییر داده می‌شود و اثر آن بر مدل موردارزیابی قرار می‌گیرد. برای این کار با استفاده از داده‌های جدول ۹، اثر افزایش این پارامترها بر مقدار تابع هدف و با فرض ثابت‌ماندن سایر پارامترها محاسبه می‌شود.

جدول ۹. تحلیل حساسیت مربوط به تغییر پارامترهای SP و SD

	SP_1	SD_1	SP_2	SD_2	SP_3	SD_3	SP_4	SD_4	SP_5	SD_5	Z
مسئله پایه	۲/۰	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۳	۹۶۲/۶۰
بعد از افزایش	۴/۰	۰/۲	۰.۴	۰/۲	۰.۴	۰/۲	۰.۴	۰/۲	۰/۲	۰/۶	۱۰۰۴/۲۴

با توجه به جدول ۹، با دوبرابرشدن مدت‌زمان موردنیاز برای برداشت و تحویل سفارش‌ها، هزینه و درنتیجه مقدار تابع هدف حدود ۴ درصد افزایش پیدا می‌کند؛ درنتیجه با کاهش زمان سرویس تا حدی که به کیفیت خدمت‌رسانی لطمه‌ای وارد نشود می‌توان هزینه‌های حمل‌ونقل و نیز تأخیرها را کاهش داد که این امر از طریق ایجاد سازوکارهایی که مانع بروز ازدحام در محوطه بیمارستان می‌شود تا حدودی امکان‌پذیر است.

با توجه به نتایج، مسئله با ۱۰ بیمارستان در حدود نیم ساعت حل شده است. حتی با افزایش دوبرابری تعداد بیمارستان‌ها و نیز تعداد آمبولانس‌ها، حل مسئله در زمان منطقی و حدود یک ساعت صورت می‌پذیرد. در ابعاد بزرگ‌تر نیز می‌توان با متوقف‌کردن نرم‌افزار با درصد بهینگی ۵ تا درصد، جواب‌های نزدیک به بهینه را در زمان منطقی به‌دست آورد. با توجه به اینکه مدل غیرخطی پیشنهادی اولیه با استفاده از روش‌های دقیق به فرم خطی تبدیل شد و ازآنجاکه مبحث پیوند اعضا در حالت‌های کاربردی حتی در شهرهای بزرگ، تعداد معدودی از بیمارستان‌ها و آمبولانس‌ها را درگیر می‌کند، ابعاد مسئله در مسائل دنیای واقعی نیز به حدی است که با نرم‌افزارهای استاندارد بهینه‌سازی در زمان منطقی قابل‌حل است؛ ازاین‌رو ضرورت توسعه روش‌های حل فراابتکاری در این مسئله به‌خصوص احراز نشد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، مدلی برای مسیریابی یک زنجیره تأمین پیوند اعضا در شهر تهران ارائه شد. مدل ارائه‌شده به دنبال یافتن زمان‌بندی و توالی بهینه برداشت و تحویل اعضا و بیماران با یک ناوگان ناهمگون از آمبولانس‌های ویژه است؛ به‌طوری‌که هزینه‌های حمل‌ونقل و جریمه‌های زودکرد و دیرکرد حداقل شود؛ ضمن اینکه زمان ایسکمی سرد به‌عنوان بیشترین زمانی که آن عضو را می‌توان خارج از بدن نگهداری کرد و سایر محدودیت‌های عملیاتی رعایت شوند. در مدل پیشنهادی ضمن اینکه زمان به‌صورت پیوسته در نظر گرفته شده است، ترتیب برداشت و تحویل‌ها می‌تواند به‌صورت کاملاً مختلط توسط مدل تعیین شود به این معنا که لزوماً این‌طور نیست که همه برداشت‌ها ابتدا و سپس تحویل‌ها برنامه‌ریزی شود. از طرفی در مدل پیشنهادی اثر بار ترافیکی با استفاده از یک تابع کلی چندضابطه‌ای مدل‌سازی شده است و قابلیت آن را دارد که با استفاده از خروجی‌های سیستم‌های کنترل ترافیک شهری حتی تا دقت دقیقه وارد مدل‌سازی شود. ازآنجاکه مدل پیشنهادی در فرم اولیه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط غیرخطی است با استفاده از تکنیک‌های دقیق، به فرم خطی تبدیل شده است که حل آن را در زمان منطقی و با استفاده از نرم‌افزارهای استاندارد بهینه‌سازی میسر می‌سازد؛ درضمن باید به این نکته توجه کرد که به‌دلیل ماهیت خاص این مسئله، در مثال‌های دنیای واقعی نیز تعداد بیمارستان‌ها و ناوگان مربوطه محدود است و نیاز به استفاده از روش‌های فراابتکاری چندان ضرورت ندارد.

نتایج تحلیل حساسیت، اثر کاهش زمان‌های سرویس (برداشت و تحویل) در کاهش معنادار هزینه‌ها و تأخیرها را آشکار کرد. از طرفی اثر منفی بار ترافیکی در برنامه‌ریزی جراحی پیوند اعضا مهم ارزیابی شد و اهمیت مدل پیشنهادی را تأیید کرد. برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود که مسائل مربوط به زمان‌بندی جراحی‌های اعضای پیوندی که با عنوان «زمان‌بندی اتاق عمل» در مبانی نظری موضوع شناخته می‌شود، با مسئله برداشت و تحویل اعضا ادغام شود؛ چراکه برنامه‌ریزی مستقل جراحی‌ها که به‌صورت بازه‌های پنجره‌های زمانی در مدل پیشنهادی منعکس شده است، بدون لحاظ‌کردن برنامه‌ریزی برداشت و تحویل و بار ترافیکی به تأخیرات ناخواسته و گاهی کاهش احتمال موفقیت پیوند اعضا منجر می‌شود.

پرتال جامع علوم انسانی

منابع

1. Alidoost, F., Bahrami, F., & Safari, H. (2020) Multi-Objective Pharmaceutical Supply Chain Modeling in Disaster (Case Study: Earthquake Crisis in Tehran). *Journal of Industrial Management Perspective*, *10(3)*, 99-123. (In Persian)
2. Nikoo, N., Babaei, M., & Mohaymany, A. S. (2018). Emergency transportation network design problem: Identification and evaluation of disaster response routes. *International journal of disaster risk reduction*, *27*, 7-20.
3. Baldacci, R., E. Bartolini, & Mingozzi, A. (2011). An exact algorithm for the pickup and delivery problem with time windows. *Operations research*, *59(2)*, 414-426.
4. Beaudry, A., Laporte, G., Melo, T., & Nickel, S. (2010). Dynamic transportation of patients in hospitals. *OR spectrum*, *32*(1), 77-107.
5. Doodman, M., & Bozorgi Amiri, A. (2020). Integrate Blood Supply Chain Network Design with Considering Lateral Transshipment under Uncertainty. *Journal of Industrial Management Perspective*, *9(4)*, *9*-40. (In Persian)
6. Xiong, C., Yang, M., Kozar, R., & Zhang, L. (2021). Integrating transportation data with emergency medical service records to improve triage decision of high-risk trauma patients. *Journal of Transport & Health*, *22*, 101106.
7. de Oliveira Mota, D., Monteleone, J. P., Pessoa, J. L. E., & Pimentel, C. F. M. G. (2020, June). São Paulo State Liver Transplantation Supply Chain Study. In *Transplantation Proceedings* (Vol. 52, No. 5, pp. 1247-1250). Elsevier.
8. Detti, P., F. Papalini, & de Lara, G.Z.M. (2017). A multi-depot dial-a-ride problem with heterogeneous vehicles and compatibility constraints in healthcare. *Omega*, *70*, 1-14.
9. Fukushima, F., & Moriya, T. (2021). Objective evaluation study on the shortest time interval from fire department departure to hospital arrival in emergency medical services using a global positioning system—potential for time savings during ambulance running. *IATSS research*, *45*(2), 182-189.
10. Furtado, M.G.S., P. Munari, & Morabito, R. (2017). Pickup and delivery problem with time windows: a new compact two-index formulation. *Operations Research Letters*, *45(4)*, 334-341 .
11. Kouchaki Tajani, T., Mohtashami, A., Amiri, M., & Ehtesham Rasi, R. (2021). Presenting a Robust Optimization Model to Design a Comprehensive Blood Supply Chain under Supply and Demand Uncertainties. *Journal of Industrial Management Perspective*, *11(1)*, 81-116. (In Persian)
12. Liu, M., Luo, Z., & Lim, A. (2015). A branch-and-cut algorithm for a realistic dial-a-ride problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, *81*, 267-288.
13. Mohamadi, S., & Mirzapour Al-e-Hashem. S.M.J. (2020). An integrated production scheduling and delivery route planning with multi-purpose machines: a case study from a furniture manufacturing company. *international journal of production economics*, *219*, 347-359.

14. Parragh, S. N., Cordeau, J. F., Doerner, K. F., & Hartl, R. F. (2012). Models and algorithms for the heterogeneous dial-a-ride problem with driver-related constraints. *OR spectrum*, *34(3)*, 593-633.
15. Ropke, S. &. Cordeau, J.-F (2009). Branch and cut and price for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science*, *43(3)*, 267-286.
16. Yoon, S., & Albert, L. A. (2020). A dynamic ambulance routing model with multiple response. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *133*, 101807.
17. Jarvis, S., Salottolo, K., Berg, G. M., Carrick, M., Caiafa, R., Hamilton, D., ... & Bar-Or, D. (2021). Examining emergency medical services' prehospital transport times for trauma patients during COVID-19. *The American Journal of Emergency Medicine*, *44*, 33-37.
18. Zhang, Z., Liu, M., & Lim, A. (2015). A memetic algorithm for the patient transportation problem. *Omega*, *54*, 60-71.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی