

ارائه‌ی مدل ریاضی برای مکان‌یابی پایگاه‌های اورژانس با هدف کاهش میانگین و انحراف معیار زمان خدمت‌دهی (مطالعه‌ی موردی اورژانس تهران)

حمیدرضا گل‌مکانی* (دانشیار)

مهتاب اسکندر (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه تفرشمهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۸ (۱۳۹۸)
دوری ۱-۳۵، شماره ۲/۲، ص. ۱۷-۲۷

اورژانس پیش‌بیمارستانی یکی از مهم‌ترین ارکان نظام سلامت و درمان یک کشور به شمار می‌آید. آگاهی از وقوع حادثه، اعزام گروه‌های نجات به محل، انجام اقدامات پزشکی اولیه و انتقال حادثه‌دیدگان به مراکز درمانی در کوتاه‌ترین زمان و در سطح کیفی مطلوب از اهم وظایف و اهداف اورژانس پیش‌بیمارستانی است. تحقق این اهداف مستلزم برآورد صحیح از میزان و نوع حوادث، استقرار مناسب پایگاه‌های اورژانس، وجود تجهیزات کافی و افراد متخصص در پایگاه‌ها، مدیریت جامع و متمرکز بخشی و منطقه‌یی و ارتباط اطلاعاتی به‌روز با مراکز درمانی است. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی، برای مکان‌یابی پایگاه‌های اورژانس با هدف کمینه‌سازی میانگین و انحراف معیار زمان خدمت‌دهی اورژانس، در یک منطقه‌ی مشخص و با لحاظ محدودیت‌های مربوط ارائه شده است. برای اعتبارسنجی و نحوه‌ی استفاده از مدل پیشنهادی، مدل مذکور برای بخشی از شهر تهران استفاده و نتایج آن شامل تعیین مکان پایگاه‌های اورژانس آورده شده است.

واژگان کلیدی: اورژانس پیش‌بیمارستانی، برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی، مکان‌یابی پایگاه‌ها، میانگین زمان خدمت‌دهی، انحراف معیار زمان خدمت‌دهی.

golmakni@mie.utoronto.ca
mahtab.eskandar@gmail.com

۱. مقدمه

در شکل ۱ فاصله‌ی زمانی مشخص شده با عدد ۱ معرف بازه‌ی زمان خدمت‌دهی، از لحظه‌ی عزیمت وسیله‌ی نقلیه‌ی امدادی از پایگاه آغاز می‌شود و با خروج وسیله‌ی نقلیه از بیمارستان پایان می‌یابد.^[۴] با این حال، در برخی از موارد، شرایط بیمار آن‌قدر بد نیست که نیازمند انتقال به بیمارستان باشد یا این‌که خانواده‌ی شخص بیمار، خود انتقال بیمار به بیمارستان را عهده‌دار می‌شوند. در این‌گونه موارد، عدد ۲ در شکل نشان می‌دهد که خدمت‌دهی، با خروج وسیله‌ی نقلیه از محل حادثه پایان می‌یابد. در اغلب پژوهش‌های قبلی و این پژوهش، زمانی که در محل حادثه یا در بیمارستان سپری می‌شود، در محاسبات مربوط به زمان خدمت‌دهی لحاظ نمی‌شود. به عبارت دیگر صرفاً زمان سپری شده از لحظه‌ی اعزام وسیله‌ی نقلیه از پایگاه تا رسیدن به محل حادثه (فاصله‌ی زمانی نشان داده شده با عدد ۳ در شکل) و زمان ترک محل حادثه تا رسیدن به بیمارستان (فاصله‌ی زمانی نشان داده شده با عدد ۴ در شکل) در محاسبات زمان خدمت‌دهی منظور خواهد شد. عدالت در سامانه‌های خدماتی به معنای رفع نیازهای مردم به صورت یکسان و همگن، با توجه به منابع محدود است. توجه به عدالت در مسائل مکان‌یابی از دهه‌ی هفتاد میلادی آغاز و از آن زمان تا کنون، در پژوهش‌ها، از رویکردهای متفاوتی برای دست‌یابی به تساوی یا عدالت، استفاده شده است.^[۵]

یکی از اولین رویکردها در حوزه‌ی مکان‌یابی پایگاه‌ها، استفاده از تابع هدفی

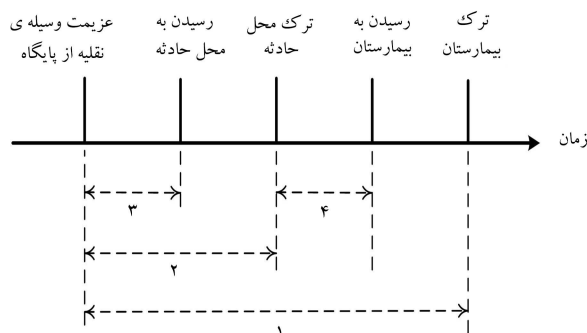
در چهاردهم آذرماه سال ۱۳۵۲، سقف سالن انتظار فرودگاه مهرآباد تهران فروریخت. این حادثه که به دلیل ارتعاشات ناشی از سر و صدای موتورجت‌های غول پیکر رخ داده بود، ۱۶ تن کشته و ۱۱ تن مجروح به همراه داشت. انعکاس شدید این واقعه‌ی تلخ در رسانه‌های داخلی و خارجی، انگیزه‌ی برای تأسیس سامانه‌ی فوریت‌های پزشکی شد و پس از این حادثه، اورژانس پزشکی برای اولین بار در کشور تأسیس شد.^[۱]

اهمیت اورژانس پزشکی بر هیچ کس پوشیده نیست؛ به همین دلیل، کارکرد بهینه و صحیح آن همواره مشغله‌ی ذهنی مدیران و متخصصان مربوط بوده است. یکی از عوامل به شدت تأثیرگذار در کارکرد صحیح اورژانس، محل استقرار پایگاه‌های آن است. چرا که مکان پایگاه‌ها با عواملی مهم، چون زمان خدمت‌دهی، هزینه‌های مصرفی و میزان پوشش‌دهی رابطه‌ی درهم تنیده دارد.^[۱] در بین این عوامل مهم، زمان، نقشی کلیدی در موفقیت یک مأموریت اورژانس بازی می‌کند. به همین دلیل، تمرکز اغلب پژوهش‌ها در این حوزه، بر روی زمان خدمت‌دهی است. به طور کلی زمان خدمت‌دهی را با توجه به مراحل مختلف در ارائه‌ی یک خدمت اورژانس می‌توان به صورت شکل ۱ نمایش داد.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۴/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱۰/۱۷، پذیرش ۱۳۹۷/۱۱/۱۸

DOI:10.24200/J65.2019.51159.1893



شکل ۱. نمایش بازه‌ی زمان خدمت‌دهی با توجه به مورد اورژانسی بر روی نمودار زمان.

بر مبنای روش رولسین، نویسنده‌ی کتاب نظریه‌ی عدالت است. این تابع هدف تعداد دریافت‌کنندگان بدترین خدمات را کمیته می‌کند.^[۶] یکی دیگر از رایج‌ترین رویکردها، کمیته‌سازی مقدار انحراف از یک عدد میانگین است. مثلاً برمن و کاپلان (۱۹۹۰) میزان بهره‌مندی مشتریان از تسهیلات را بیشینه‌سازی کردند که در آن یکی از محدودیت‌های مسئله تساوی این بهره‌مندی برای تمام مشتریان در نظر گرفته شده بود، این محققان در مدلی دیگر، انحراف مطلق میانگین را برای مسافت میان مشتریان و خدمت‌دهندگان کمیته‌سازی کردند.^[۷]

یانگ و همکارانش (۲۰۱۳)، نیز کمیته‌سازی دامنه‌ی زمان انتظار برای دریافت خدمت را بین هر جفت گره، مورد توجه قرار دادند. علی‌رغم این کمیته‌سازی، ایشان کمیته‌سازی زمان انتظار را در مدل خویش لحاظ نکردند.^[۸]

گاهی عدالت بیش از این که یک معیار باشد، یک احساس است. مثلاً ممکن است پیش بیاید که یک بیمار به خدماتی بالاتر از حد استاندارد دسترسی پیدا کند، ولی با این حال هنوز هم احساس نارضایتی کند و تصور کند که دیگران بهتر از او خدمت‌دهی می‌شوند.^[۶] بر این اساس، اسپجو و همکارانش (۲۰۰۹) مفهوم حسادت را معرفی کردند و از آن برای تعریف مسئله‌ی مکان‌یابی بهره بردند. حائز توجه است که مدل آنها عاری از هر نوع محدودیت هزینه‌ی و ظرفیتی است.^[۹]

پس از آن، چنتا و همکاران (۲۰۱۱) مفهوم حسادت را با چگونگی خدمت‌دهی آمبولانس‌ها تطبیق دادند. مسئله‌ی آنها بر اساس فاصله‌ی نقطه‌ی تقاضا تا نزدیک‌ترین ایستگاه اورژانس و فاصله‌ی نقطه‌ی تقاضا تا ایستگاه پشتیبان تعریف شد. در مدل ایشان استفاده از سایر وسایل نقلیه‌ی کارآمد، از جمله بالگرد آمبولانس در نظر گرفته نشده است.^[۱۰]

همچنین چنتا و همکاران (۲۰۱۴) مدل یک هدف در راستای ایجاد عدالت و اثربخشی پیشنهاد کرده‌اند. در این مدل، تابع هدف اول، به بیشینه‌سازی پوشش‌دهی تقاضاها می‌پردازد. تابع هدف دوم، فاصله‌ی بین نقاط تقاضاهای پوشش داده نشده با نزدیک‌ترین پایگاه را کمیته‌سازی می‌کند. تابع هدف سوم و چهارم، بر کمیته‌سازی تعداد نقاط تقاضای پوشش داده نشده روستایی و غیرروستایی تمرکز دارد. با وجود این، این مدل، بیش از عدالت بر اثربخشی تمرکز دارد و دقت کافی را در اجرای عدالت ندارد.^[۱۱]

در پژوهش پیش رو، سعی شده است که کاستی‌های اشاره شده در لحاظ محدودیت‌های جغرافیایی و ترافیکی و همچنین لحاظ انواع وسایل نقلیه‌ی امدادی رایج رفع شود و مدلی کامل‌تر و کارا تر ارائه شود. به طور کلی هدف این مقاله، مکان‌یابی پایگاه‌ها برای استقرار وسایل نقلیه‌ی اورژانسی در یک منطقه‌ی مشخص است و با توجه به پژوهش‌های پیشین مهم‌ترین نوآوری‌های آن به شرح زیر است:

۱. این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی دو هدفه را ارائه می‌کند که تابع هدف اول آن، میانگین زمان خدمت‌دهی و تابع هدف دوم آن انحراف معیار زمان خدمت‌دهی است. بدین ترتیب کمیته‌سازی هم‌زمان این دو تابع هدف منجر به خدمت‌دهی سریع و نسبتاً عادلانه به بیماران خواهد بود.

۲. در این مسئله، به تمام وسایل نقلیه‌ی امدادی رایج (از جمله آمبولانس، موتورلانس، اتوبوس آمبولانس و امثال آن) توجه شده است.

۳. مواردی چون عدم انتقال بیمار به بیمارستان و امکان انتقال بیمار به بیمارستان‌های متفاوت در مدل لحاظ شده است.

۴. مدل ریاضی پیشنهادی شامل محدودیت‌های جغرافیایی و ترافیکی است که بیان‌گر وضعیت واقعی‌تری از منطقه مورد مطالعه در پاسخ‌دهی به مأموریت‌های اورژانس خواهد بود.

ادامه‌ی مطالب به صورت زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش ۲ تشریح مسئله و مفروضات آن به تفصیل آورده شده است. در بخش ۳ مدل ریاضی مربوط با جزئیات کامل ارائه خواهد شد. در بخش ۴ چگونگی استفاده از مدل برای منطقه‌ی استان تهران مطرح و نتایج حاصل از حل مدل بررسی می‌شود. در انتهای مطالب نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای مطالعات آتی ارائه شده است.

۲. تشریح مسئله

در این مقاله، ابتدا منطقه‌ی مورد بررسی تعیین می‌شود؛ سپس این منطقه به واحدهای کوچک‌تری افزایش می‌شود. فرض می‌شود که در هیچ یک از این واحدها، پایگاهی برای استقرار وسایل نقلیه‌ی اورژانس احداث نشده است. در حالی که مکان مراکز درمانی، که بیماران هر واحد بدان‌جا منتقل می‌شوند، از قبل مشخص شده است. در چنین وضعیتی، با فرض نقاط تقاضا به صورت احتمالی و مراکز درمانی به صورت قطعی پایگاه‌ها مکان‌یابی می‌شوند. مکان‌یابی بدین شکل است که بر اساس زمان خدمت‌دهی، بهترین مکان برای هر پایگاه، از میان گزینه‌های از پیش تعیین شده انتخاب می‌شود.

منطقه‌ی مورد بررسی می‌تواند یک روستا، بخشی از یک شهر، یک شهر یا حتی یک کشور باشد. روشن است که با افزایش وسعت منطقه‌ی مورد نظر، ابعاد مسئله نیز افزایش می‌یابد. منطقه‌ی مورد نظر به واحدهایی مربعی شکل افزایش می‌شود. طول ضلع این مربع‌ها باید به نحوی تعیین شود که تضمین کند، فاصله‌ی بین هر دو دورترین نقطه از این مربع، بر اساس میانگین سرعت وسایل نقلیه‌ی امدادی، حداکثر طی ۸ دقیقه پیموده شود. یا به عبارت دیگر، با واقع شدن پایگاه‌ها در هر نقطه از این مربع، زمان سفر مأموریت‌ها (علامت شماره‌ی ۳ در شکل ۱)، به طور متوسط، حداکثر برابر با مقدار استاندارد، یعنی ۸ دقیقه باشد.^[۱۲] طول ضلع مربع می‌تواند از سه فرمول ساده‌ی میانگین وزنی، رابطه‌ی سرعت، مسافت و قضیه‌ی فیثاغورث حاصل شود. ابتدا بر اساس سرعت هر وسیله‌ی نقلیه‌ی امدادی و احتمال استفاده از هر یک در منطقه، میانگین وزنی سرعت محاسبه می‌شود. سپس با داشتن میانگین وزنی سرعت و زمان ۸ دقیقه، دورترین فاصله در داخل یک مربع، قطر مربع، به دست می‌آید و با استفاده از قضیه‌ی فیثاغورث اندازه‌ی ضلع مربع تعیین می‌شود. با توجه به این که یکی از پارامترهای مهم در این محاسبات سرعت است و سرعت وسایل نقلیه در هر منطقه، رابطه‌ی مستقیم با بافت جغرافیایی و ترافیکی آن منطقه دارد، اندازه‌ی اضلاع این مربع‌ها برای هر بافت جغرافیایی متفاوت خواهد بود. مثلاً

جدول ۱. حالات ممکن برای به انجام رساندن یک مأموریت.

حالات	پایگاه		
	آمیولانس	موتورلانس	اتوبوس آمیولانس
۱	۱ - A		
۲	۱ - A		
۳			۱ - B
۴			۱ - B
۵			۱ - H
۶			۱ - H
۷	۳ - A	۱ - M	
۸		۱ - M	۳ - B
۹		۱ - M	۳ - H
۱۰		۱ - M	
۱۱	۱ - A		۳ - A
۱۲			۳ - B
۱۳	۳ - H		۱ - H
۱۴			۳ - H

مثلاً در حالت ۷، مرحله‌ی اول از $1 - M$ در ستون پایگاه موتورلانس، خروج موتورلانس از پایگاه، آغاز می‌شود. سپس $2 - M$ در ستون محل حادثه معرف مرحله‌ی دوم، یعنی حضور موتورلانس در محل حادثه است. با شروع عملیات امداد ممکن است فرد امدادگر تشخیص دهد که نیاز به انتقال بیمار توسط آمیولانس وجود دارد. بدین ترتیب با درخواست آمیولانس، مرحله سوم، $3 - A$ در ستون پایگاه آمیولانس نشان‌دهنده خروج آمیولانس از پایگاه خواهد بود. مرحله چهارم، رسیدن آمیولانس به محل حادثه، $4 - A$ و پس از آن مراحل بازگشت موتورلانس به پایگاه و انتقال حادثه دیده به بیمارستان، $5 - A$ ، در ستون بیمارستان خواهد بود.

باید توجه داشت که زمان خدمت‌دهی نه تنها برای هر حالت، بلکه به حسب این‌که کدام مرکز درمانی مقصد نهایی حادثه دیده برای درمان باشد، فاصله‌ی محل حادثه تا مرکز درمانی چقدر باشد، و چه وسیله‌ی برای انتقال بیمار مورد استفاده قرارگیرد، متفاوت خواهد بود. با لحاظ مراکز درمانی در هر مربع، انواع وسایل نقلیه و محل‌های کاندید برای پایگاه‌ها می‌توان میانگین زمان خدمت‌دهی را برای کلیه حالات و نهایتاً هر مربع محاسبه کرد. دقت کنید که کل منطقه‌ی مورد بررسی، مجموعه‌ی از واحدهای مربعی شکل است. بنابراین تابع هدف، میانگینی از زمان‌های خدمت‌دهی در مربع‌ها خواهد بود و کمینه‌سازی این میانگین، به معنای حصول کمترین متوسط زمان خدمت‌دهی در کل منطقه‌ی مورد نظر خواهد بود. تابع هدف دوم، انحراف معیار زمان‌های خدمت‌دهی در مربع‌ها خواهد بود. کمینه‌سازی انحراف معیار، به معنای حصول کمترین اختلاف میان زمان‌های خدمت‌دهی در مربع‌هاست. به عبارت دیگر، زمان خدمت‌دهی تمام مربع‌ها نزدیک به یک عدد ثابت (میانگین) می‌شود و بدین ترتیب عدالت نسبی برای همه‌ی مربع‌ها (تمام افراد جامعه) رعایت خواهد

اگر منطقه‌ی مورد نظر، یک کشور باشد، نحوه‌ی تقسیم‌بندی مناطق بیابانی با مناطق شهری آن کاملاً متفاوت است.

نکته‌ی دیگری که وجود دارد، احتمالی فرض کردن نقاط تقاضاست. از آنجایی که در عالم واقعیت نیز محل حادثه، از قبل مشخص نیست، این فرض برای نزدیکی مدل به واقعیت لحاظ می‌شود.^[۱۲]

با تعیین منطقه‌ی مورد نظر و مربع‌های آن لازم است تا بر اساس بافت جغرافیایی منطقه، امکان عبور و مرور هر یک از وسایل نقلیه‌ی اورژانسی بررسی شود. مثلاً ممکن است با توجه به محدودیت‌ها در یک مربع خاص امکان استفاده از بالگرد آمیولانس وجود نداشته باشد. با انجام این بررسی می‌توان کلیه حالات ممکن برای به انجام رساندن یک مأموریت در منطقه را مشخص کرد و سپس با محاسبه‌ی فواصل مربوط به هر یک از این حالات و قرار دادن آنها در فرمول سرعت، زمان خدمت‌دهی در هر حالت را محاسبه کرد.^[۱۲-۱۴] در صورتی که در منطقه‌ی مورد بررسی امکان عبور و مرور هر چهار نوع وسیله‌ی نقلیه‌ی امدادی رایج، یعنی آمیولانس، اتوبوس آمیولانس، موتورلانس و بالگرد آمیولانس وجود داشته باشد، تمام حالات ممکن برای به انجام رساندن یک مأموریت به شرح جدول ۱ خواهد بود. در این جدول، ۷ ستون وجود دارد. ستون اول این جدول، شماره‌ی حالات و ۶ ستون دیگر، معرف مکان‌هایی است که می‌توانند مبدأ یا مقصد وسایل نقلیه‌ی امدادی باشند. خانه‌های جدول بر اساس یک عدد و یک حرف انگلیسی پر شده‌اند؛ به گونه‌ی که اعداد، ترتیب مراحل اجرای یک مأموریت را نشان می‌دهند و حروف انگلیسی نیز، نوع وسیله‌ی نقلیه را مشخص می‌کنند. در این جدول حروف A ، M ، B و H به ترتیب، معرف آمیولانس، موتورلانس، اتوبوس آمیولانس، و بالگرد آمیولانس هستند.

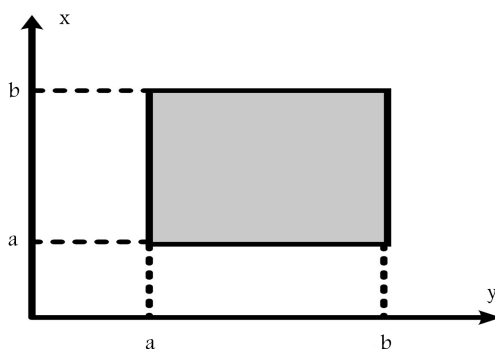
شد. گفتنی است که کاهش مقدار میانگین لزوماً سبب کاهش مقدار انحراف معیار نیست؛ پس لحاظ هم‌زمان این دو تابع هدف ضروری است.

نکته‌ی حائز اهمیت در حصول عدالت، لحاظ اهمیت و اولویت هر یک از واحدهای مربعی است. باید توجه داشت که سابقه‌ی وقوع حوادث، جمعیت و موقعیت ابنیه و تأسیسات زیربنایی نقش مهمی در اولویت هر یک از واحدهای مربعی دارد. مثلاً اگر در یک واحد مربعی جمعیت بیشتری وجود داشته باشد یا این‌که سابقه‌ی وقوع حوادث در آن منطقه بیشتر باشد، تبعاً تأسیس پایگاه‌ها در آن مربع از اولویت بیشتری برخوردار است. همچنین در صورت وجود ابنیه و تأسیسات زیربنایی یا ساختمان‌های دولتی و خدماتی که نقش مهمی در منطقه ایفا می‌کنند، باید تمهیدات بیشتری فراهم شود. مثلاً می‌توان به حادثه‌ی تروریستی در محل مجلس شورای اسلامی اشاره کرد. ممکن است در این منطقه سابقه‌ی وقوع حوادث کم باشد یا به لحاظ جمعیتی از جمعیت کمی برخوردار باشد، ولی وجود مجلس در این منطقه نیاز به لحاظ اولویت بیشتر به مربعی که در آن مجلس واقع شده است، خواهد داشت. مثالی دیگر وجود نیروگاه‌ها، تأسیسات آب، تجهیزات انتقال و توزیع برق و نظایر آن در بعضی از واحدهای مربعی است. بدیهی است که در این گونه موارد، در نظر گرفتن اولویت متناسب برای این واحدهای مربعی الزامی است.

اهمیت و اولویت واحدهای مربعی به صورت ضرایبی در توابع هدف اعمال می‌شوند. با توجه به محدودیت مالی در تأسیس پایگاه‌ها، بودجه‌ی از پیش تعیین شده صرف هزینه‌های خرید زمین و ساخت پایگاه می‌شود؛ این اولویت‌بندی منضم این مطلب خواهد بود که بهبود توابع هدف و زمان خدمت‌دهی برای مربع‌های با اولویت بیشتر از اهمیت بیشتری برخوردار است و صرف هزینه برای این‌گونه از واحدهای مربعی قابل توجیه است.

۳. مدل ریاضی

قبل از بیان مدل ریاضی، ذکر چند نکته ضروری است. نکته‌ی اول درباره‌ی نقاط تقاضاست. در این مسئله، احتمال رخداد یک حادثه در درون هر مربع، ثابت فرض می‌شود. به عبارت دیگر یک حادثه، با احتمالی برابر می‌تواند در هر نقطه از یک مربع رخ دهد. اگر یک نقطه‌ی تقاضا، محل حادثه، با مختصات $P(\alpha, \beta)$ نشان داده شود، آن‌گاه α و β دو متغیر تصادفی مستقل خواهند بود که از توزیع یکنواخت، در بازه‌ی به طول ضلع مربع، پیروی می‌کنند. شکل ۲ این نقاط را در مربعی به طول $b - a$ نشان می‌دهد.^[۱۲]



شکل ۲. مربعی با ضلعی به طول $b - a$ که احتمال رخداد یک حادثه در سر تا سر آن ثابت است.

نکته‌ی دوم در خصوص فواصل است. از آنجایی که وسایل نقلیه‌ی چون آمبولانس، اتوبوس آمبولانس و موتورلانس در خیابان‌ها و کوچه‌ها به صورت خطوط شکسته حرکت می‌کنند، فواصل طی شده توسط آنها را به صورت مختصاتی محاسبه می‌کنیم و از آنجایی که بالگرد آمبولانس در آسمان، به صورت خط مستقیم حرکت می‌کند، فواصل طی شده توسط آن را، به صورت اقلیدسی محاسبه می‌کنیم.^[۱۲، ۱۳] مختصات پایگاه‌ها را به صورت $P(i_x, i_y)$ که در آن $i = AA, BB, MM, HH$ است، به ترتیب برای پایگاه آمبولانس‌ها، اتوبوس آمبولانس‌ها، موتورلانس‌ها و بالگرد آمبولانس‌ها تعریف می‌کنیم. همچنین مختصات مرکز درمانی را به صورت $P(HOS_x, HOS_y)$ در نظر می‌گیریم.

با این نام‌گذاری‌ها، فواصل برای حالات ذکر شده در جدول ۱ به شرح زیر خواهد بود.

$$d = |\alpha - i_x| + |\beta - i_y| \quad i = AA, BB, MM$$

۱. فاصله از پایگاه، به ترتیب، آمبولانس‌ها / اتوبوس آمبولانس‌ها / موتورلانس‌ها تا محل حادثه، هنگامی که توسط آمبولانس / اتوبوس آمبولانس / یا موتورلانس طی می‌شود.

$$d = \left((\alpha - HH_x)^2 + (\beta - HH_y)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

۲. فاصله از پایگاه بالگرد آمبولانس‌ها تا محل حادثه، هنگامی که توسط بالگرد آمبولانس طی می‌شود.

$$d = |HOS_x - \alpha| + |HOS_y - \beta|$$

۳. فاصله از محل حادثه تا پایگاه بالگرد آمبولانس‌ها هنگامی که توسط آمبولانس یا اتوبوس آمبولانس طی می‌شود.

$$d = |HH_x - \alpha| + |HH_y - \beta|$$

۴. فاصله از محل حادثه تا به ترتیب، مرکز درمانی / پایگاه آمبولانس‌ها / پایگاه اتوبوس آمبولانس‌ها هنگامی که توسط بالگرد آمبولانس طی می‌شود.

$$d = \left((i_x - \alpha)^2 + (i_y - \beta)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad i = HOS, AA, BB$$

۵. فاصله از پایگاه بالگرد آمبولانس‌ها تا مرکز درمانی هنگامی که توسط بالگرد آمبولانس طی می‌شود.

$$d = \left((HOS_x - HH_x)^2 + (HOS_y - HH_y)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

۶. فاصله از پایگاه آمبولانس‌ها یا اتوبوس آمبولانس‌ها تا مرکز درمانی هنگامی که توسط آمبولانس طی می‌شود.

$$d = |HOS_x - i_x| + |HOS_y - i_y| \quad i = AA, BB$$

در برخی از این فواصل، دو متغیر α و β حضور دارند و باید امید ریاضی این

QA_i : اگر امکان عبور و مرور آمبولانس در مربع i وجود داشته باشد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ را به خود می‌گیرد؛

QB_i : اگر امکان عبور و مرور اتوبوس آمبولانس در مربع i وجود داشته باشد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ را به خود می‌گیرد؛

QM_i : اگر امکان عبور و مرور موتورلانس در مربع i وجود داشته باشد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ را به خود می‌گیرد؛

QH_i : اگر امکان عبور و مرور بالگرد آمبولانس در مربع i وجود داشته باشد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ را به خود می‌گیرد؛

Li,ho : اگر امکان عبور و مرور بالگرد آمبولانس در بیمارستان ho در مربع i وجود داشته باشد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ را به خود می‌گیرد؛

$COAi,am$: هزینه ساخت پایگاه آمبولانس‌ها در کاندیدا am در مربع i ؛

$COBi,bu$: هزینه ساخت پایگاه اتوبوس آمبولانس‌ها در کاندیدا bu در مربع i ؛

$COMi,mo$: هزینه ساخت پایگاه موتورلانس‌ها در کاندیدا mo در مربع i ؛

$COHi,he$: هزینه ساخت پایگاه بالگرد آمبولانس‌ها در کاندیدا he در مربع i ؛

$AAXi,am$: مختصات x برای کاندیدا am برای پایگاه آمبولانس‌ها در مربع i ؛

$AAYi,am$: مختصات y برای کاندیدا am برای پایگاه آمبولانس‌ها در مربع i ؛

$BBXi,bu$: مختصات x برای کاندیدا bu برای پایگاه اتوبوس آمبولانس‌ها در مربع i ؛

$BBYi,bu$: مختصات y برای کاندیدا bu برای پایگاه اتوبوس آمبولانس‌ها در مربع i ؛

$MMXi,mo$: مختصات x برای کاندیدا mo برای پایگاه موتورلانس‌ها در مربع i ؛

$MMYi,mo$: مختصات y برای کاندیدا mo برای پایگاه موتورلانس‌ها در مربع i ؛

$HHXi,he$: مختصات x برای کاندیدا he برای پایگاه بالگرد آمبولانس‌ها در مربع i ؛

$HHYi,he$: مختصات y برای کاندیدا he برای پایگاه بالگرد آمبولانس‌ها در مربع i ؛

$HOSXi,ho$: مختصات x برای بیمارستان ho در مربع i ؛

$HOSYi,ho$: مختصات y برای بیمارستان ho در مربع i ؛

a_i : نقطه‌ی a در مربع i ؛

b_i : نقطه‌ی b در مربع i ؛

$velA$: سرعت آمبولانس؛

$velB$: سرعت اتوبوس آمبولانس؛

$velM$: سرعت موتورلانس؛

$velH$: سرعت بالگرد آمبولانس؛

$NUHO$: تعداد بیمارستان‌ها برای هر مربع؛

$NUAR$: تعداد واحدهای مربعی شکل که منطقه‌ی مورد بررسی را تشکیل می‌دهند؛

bud : بودجه‌ی دولت برای ایجاد پایگاه‌ها؛

POA : احتمال شروع یک مأموریت با آمبولانس در منطقه‌ی مورد بررسی؛

POB : احتمال شروع یک مأموریت با اتوبوس آمبولانس در منطقه‌ی مورد بررسی؛

POM : احتمال شروع یک مأموریت با موتورلانس در منطقه‌ی مورد بررسی؛

POH : احتمال شروع یک مأموریت با بالگرد آمبولانس در منطقه‌ی مورد بررسی.

متغیرهای تصمیم‌گیری:

ACi,am : اگر پایگاه آمبولانس‌ها برای مربع i در کاندیدا am ساخته شود، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ را به خود می‌گیرد؛

BCi,bu : اگر پایگاه اتوبوس آمبولانس‌ها برای مربع i در کاندیدا bu ساخته شود، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ را به خود می‌گیرد؛

MCi,mo : اگر پایگاه موتورلانس‌ها برای مربع i در کاندیدا mo ساخته شود، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ را به خود می‌گیرد؛

فواصل محاسبه شود. به حسب این که فواصل مختصاتی یا اقلیدسی باشد، امید ریاضی آنها نیز به دو صورت زیر محاسبه خواهد شد.^[۱۵]

الف) امید ریاضی برای فواصل مختصاتی (مثلاً مورد اول از موارد ذکر شده مربوط به آمبولانس):

$$E(d) = E(|\alpha - AA_x| + |\beta - AA_y|) =$$

$$E(|\alpha - AA_x|) + E(|\beta - AA_y|)$$

$$E(|\alpha - AA_x|) = \int_{-\infty}^{+\infty} |\alpha - AA_x| f_\alpha(\alpha) d\alpha =$$

$$\int_a^b |\alpha - AA_x| \frac{1}{b-a} d\alpha =$$

$$\frac{(AA_x - a)^2 + (AA_x - b)^2}{2(b-a)}$$

ب) امید ریاضی برای فواصل اقلیدسی (مثلاً مورد دوم از موارد ذکر شده):

$$E(d) = E\left(\sqrt{(\alpha - HH_x)^2 + (\beta - HH_y)^2}\right) =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{(\alpha - HH_x)^2 + (\beta - HH_y)^2} f_d(d) dd =$$

$$\frac{\int \sqrt{(b - HH_x)^2 + (b - HH_y)^2} \frac{2\pi d^2}{(b-a)^2} dd =$$

$$\frac{\int \sqrt{(a - HH_x)^2 + (a - HH_y)^2} \frac{2\pi \left(\sqrt{(b - HH_x)^2 + (b - HH_y)^2}\right)^2}{3(b-a)^2} dd =$$

$$\frac{2\pi \left(\sqrt{(a - HH_x)^2 + (a - HH_y)^2}\right)^2}{3(b-a)^2} \Big|$$

شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم‌گیری استفاده شده در مدل به شرح زیر است.

شاخص‌ها:

I : مجموعه‌ی واحدهای مربعی که در آن i شمارنده‌ی واحدهاست؛

AM : مجموعه‌ی کاندیداها برای پایگاه آمبولانس‌ها که در am آن شمارنده‌ی کاندیداهاست؛

BU : مجموعه‌ی کاندیداها برای پایگاه اتوبوس آمبولانس‌ها که در آن شمارنده‌ی کاندیداها است؛

MO : مجموعه‌ی کاندیداها برای پایگاه موتورلانس‌ها که در آن شمارنده‌ی کاندیداهاست؛

HE : مجموعه‌ی کاندیداها برای پایگاه بالگرد آمبولانس‌ها که در آن شمارنده‌ی کاندیداها است؛

HO : مجموعه بیمارستان‌ها که در آن شمارنده‌ی بیمارستان‌هاست.

پارامترها:

P_i : جمعیت مربع i ؛

d_i : سوابق میزان تقاضای مربع i ؛

r_i : نرخ بحرانی بودن مربع i ؛

$HC_{i,he}$: اگر پایگاه بالگرد آمبولانس‌ها برای مربع i در کاندیدا he ساخته شود، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ را به خود می‌گیرد. تابع هدف و محدودیت‌های مسئله به شرح زیر است:

$$g_{\lambda\tau,i,am} = \frac{\sqrt{\pi} \left(\sqrt{(AA X_{i,am} - a_i)^\tau + (AA Y_{i,am} - a_i)^\tau} \right)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)^\tau} - \frac{\sqrt{\pi} \left(\sqrt{(AA X_{i,am} - b_i)^\tau + (AA Y_{i,am} - b_i)^\tau} \right)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)^\tau} \quad (16)$$

$$g_{\lambda\delta,i,am,ho} = |HOSX_{i,ho} - AA X_{i,am}| + |HOSY_{i,ho} - AA Y_{i,am}| \quad (17)$$

$$g_{\lambda\epsilon,i,bu} = \frac{\sqrt{\pi} \left(\sqrt{(BB X_{i,bu} - a_i)^\tau + (BB Y_{i,bu} - a_i)^\tau} \right)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)^\tau} - \frac{\sqrt{\pi} \left(\sqrt{(BB X_{i,bu} - b_i)^\tau + (BB Y_{i,bu} - b_i)^\tau} \right)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)^\tau} \quad (18)$$

$$g_{\lambda\gamma,i,bu,ho} = |HOSX_{i,ho} - BB X_{i,bu}| + |HOSY_{i,ho} - BB Y_{i,bu}| \quad (19)$$

$$W_i = \sum_{ho} L_{i,ho} \quad (20)$$

$$NA_i = 1 + NUHO + W_i \quad (21)$$

$$NB_i = 1 + NUHO + W_i \quad (22)$$

$$NM_i = 1 + (\sqrt{\pi} \times NUHO) + W_i \quad (23)$$

$$NH_i = 1 + (\sqrt{\pi} \times NUHO) + W_i \quad (24)$$

$$T_i =$$

$$\begin{aligned} & \left(\left(\sum_{am} \frac{(g_{\lambda,i,am} + g_{\tau,i,am})}{velA} \times AC_{i,am} \right) + \right. \\ & \left. \left(\sum_{am} \sum_{ho} \frac{(g_{\lambda,i,am} + g_{\tau,i,am} + g_{\delta,i,ho} + g_{\epsilon,i,ho})}{velA} \times AC_{i,am} \right) \right) \\ & + \left(\sum_{ho} \left(\sum_{am} \sum_{he} \frac{(g_{\lambda,i,am} + g_{\tau,i,am} + g_{\delta,i,he} + g_{\epsilon,i,he})}{velA} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{g_{\gamma,i,he,ho}}{velH} \right) \times AC_{i,am} \times HC_{i,he} \times L_{i,ho} \right) / NA_i \times POA + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(\left(\sum_{bu} \frac{(g_{\lambda,i,bu} + g_{\gamma,i,bu})}{velB} \times BC_{i,bu} \right) + \right. \\ & \left(\sum_{bu} \sum_{ho} \frac{(g_{\lambda,i,bu} + g_{\gamma,i,bu} + g_{\tau,i,ho} + g_{\epsilon,i,ho})}{velB} \times BC_{i,bu} \right) \\ & + \left(\sum_{ho} \left(\sum_{bu} \sum_{he} \frac{(g_{\lambda,i,bu} + g_{\gamma,i,bu} + g_{\delta,i,he} + g_{\epsilon,i,he})}{velB} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{g_{\gamma,i,he,ho}}{velH} \right) \times BC_{i,bu} \times HC_{i,he} \times L_{i,ho} \right) / NB_i \times POB + \\ & \left(\left(\sum_{mo} \frac{(g_{\lambda,i,mo} + g_{\gamma,i,mo})}{velM} \times MC_{i,mo} + \right. \right. \\ & \left. \left. \sum_{mo} \left(\sum_{am} \sum_{ho} \frac{(g_{\lambda,i,mo} + g_{\gamma,i,mo})}{velM} + \right. \right. \end{aligned}$$

$$z_1 = \frac{\sum_i (p(i) \times d(i) \times r(i) \times T(i))}{\sum_i (p(i) \times d(i) \times r(i))} \quad (1)$$

$$z_2 = \sqrt{\frac{\sum_i (p(i) \times d(i) \times r(i) \times (T(i) - z_1)^\tau)}{\sum_i (p(i) \times d(i) \times r(i))}} \quad (2)$$

$$s.t. \quad (2)$$

$$g_{\lambda,i,am} = \frac{(AA X_{i,am} - b_i)^\tau + (AA X_{i,am} - a_i)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)} \quad (3)$$

$$g_{\tau,i,am} = \frac{(AA Y_{i,am} - b_i)^\tau + (AA Y_{i,am} - a_i)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)} \quad (4)$$

$$g_{\delta,i,ho} = \frac{(HOSX_{i,ho} - b_i)^\tau + (HOSX_{i,ho} - a_i)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)} \quad (5)$$

$$g_{\epsilon,i,ho} = \frac{(HOSY_{i,ho} - b_i)^\tau + (HOSY_{i,ho} - a_i)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)} \quad (6)$$

$$g_{\delta,i,he} = \frac{(HHX_{i,he} - b_i)^\tau + (HHX_{i,he} - a_i)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)} \quad (7)$$

$$g_{\epsilon,i,he} = \frac{(HHY_{i,he} - b_i)^\tau + (HHY_{i,he} - a_i)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)} \quad (8)$$

$$g_{\gamma,i,he,ho} = \left((HOSX_{i,ho} - HHX_{i,he})^\tau + (HOSY_{i,ho} - HHY_{i,he})^\tau \right)^{\frac{1}{\tau}} \quad (9)$$

$$g_{\lambda,i,bu} = \frac{(BBX_{i,bu} - b_i)^\tau + (BBX_{i,bu} - a_i)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)} \quad (10)$$

$$g_{\gamma,i,bu} = \frac{(BBY_{i,bu} - b_i)^\tau + (BBY_{i,bu} - a_i)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)} \quad (11)$$

$$g_{\lambda^o,i,mo} = \frac{(MMX_{i,mo} - b_i)^\tau + (MMX_{i,mo} - a_i)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)} \quad (12)$$

$$g_{\gamma^o,i,mo} = \frac{(MMY_{i,mo} - b_i)^\tau + (MMY_{i,mo} - a_i)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)} \quad (13)$$

$$g_{\lambda\tau,i,he} = \frac{\sqrt{\pi} \left(\sqrt{(b_i - HHX_{i,he})^\tau + (b_i - HHY_{i,he})^\tau} \right)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)^\tau}$$

$$\frac{\sqrt{\pi} \left(\sqrt{(a_i - HHX_{i,he})^\tau + (a_i - HHY_{i,he})^\tau} \right)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)^\tau} \quad (14)$$

$$g_{\lambda\tau,i,ho} = \frac{\sqrt{\pi} \left(\sqrt{(HOSX_{i,ho} - a_i)^\tau + (HOSY_{i,ho} - a_i)^\tau} \right)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)^\tau}$$

$$\frac{\sqrt{\pi} \left(\sqrt{(HOSX_{i,ho} - b_i)^\tau + (HOSY_{i,ho} - b_i)^\tau} \right)^\tau}{\sqrt{\pi} (b_i - a_i)^\tau} \quad (15)$$

محدودیت ۱۴ معرف فاصله ی اقلیدسی بین کانیدنا he برای پایگاه بالگرد آمبولانس و نقطه ی تقاضاست. محدودیت ۱۵ معرف فاصله ی اقلیدسی بین نقطه ی تقاضا و بیمارستان ho است. محدودیت ۱۶ فاصله ی اقلیدسی بین نقطه ی تقاضا و کانیدنا am برای پایگاه آمبولانس را نشان می دهد. محدودیت ۱۷ نشان دهنده ی فاصله ی مختصاتی بین کانیدنا am برای پایگاه آمبولانس و بیمارستان ho است. محدودیت ۱۸ نیز فاصله ی اقلیدسی بین نقطه ی تقاضا و کانیدنا bu برای پایگاه اتوبوس آمبولانس است. محدودیت ۱۹ معرف فاصله ی مختصاتی بین کانیدنا bu برای پایگاه اتوبوس آمبولانس و بیمارستان ho است. محدودیت ۲۰ بیان گر تعداد بیمارستان هایی در مربع i است که امکان عبور و مرور بالگرد آمبولانس در آنها وجود دارد. محدودیت ۲۱ تعداد حالات ممکن برای به انجام رساندن یک مأموریت را، که با آمبولانس آغاز می شود، نشان می دهد. محدودیت ۲۲ برای محاسبه ی تعداد حالات ممکن برای به انجام رساندن یک مأموریت، که با اتوبوس آمبولانس آغاز می شود، به کار می رود. محدودیت ۲۳ تعداد حالات ممکن برای به انجام رساندن یک مأموریت را که با موتور لانس آغاز می شود، نشان می دهد. محدودیت ۲۴ معرف تعداد حالات ممکن برای به انجام رساندن یک مأموریت، که با بالگرد آمبولانس آغاز می شود، است.

محدودیت ۲۵ میانگین زمان خدمت دهی را برای هر واحد مربعی شکل i محاسبه می کند و شامل جمع چهار بخش اصلی، با ساختاری تقریباً یکسان، برای به ترتیب شروع عملیات اورژانسی با آمبولانس، اتوبوس آمبولانس، موتور آمبولانس و بالگرد آمبولانس است. برای وضوح بیشتر و روشن تر شدن چگونگی شکل گیری این رابطه، بخش نخست این رابطه یعنی خطوط محصور شده بین دو خط چین را، که مربوط به شروع عملیات اورژانسی با آمبولانس است، در نظر بگیرید. با توجه به جدول ۱، در سه حالت ۱، ۲ و ۱۱ عملیات اورژانسی با آمبولانس آغاز می شود. در حالت اول آمبولانس از پایگاه اعزام و پس از رسیدن به محل حادثه، درمان سرپایی انجام می شود و فرد حادثه دیده به بیمارستان برده نمی شود و مأموریت پایان می یابد. عبارت ریاضی برای محاسبه ی زمان خدمت دهی در این حالت به صورت زیر نویس با شماره ۱ در رابطه ی ذکر شده نشان داده شده است. $g_{1,i,am} + g_{2,i,am}$ فاصله ی طی شده توسط آمبولانس اعزامی از پایگاه am است که با تقسیم آن به سرعت آمبولانس، $velA$ ، زمان متناظر محاسبه می شود. با لحاظ ضرب متغیر صفر و یک $AC_{i,am}$ در این زمان و جمع آن بر روی کلیه ی پایگاه های کانیدنا در am متوسط زمان خدمت دهی در این حالت محاسبه می شود. به طور مشابه در حالت ۲ از جدول ۱، که عبارت ریاضی برای محاسبه ی زمان خدمت دهی در این حالت به صورت زیر نویس با شماره ۲ در رابطه ی ذکر شده نشان داده شده است، پس از اعزام و رسیدن آمبولانس به محل حادثه، فرد حادثه دیده به بیمارستان منتقل می شود. در این حالت مسافت طی شده توسط آمبولانس معادل $g_{1,i,am} + g_{2,i,am} + g_{3,i,ho} + g_{4,i,ho}$ است و به طور مشابه با تقسیم آن به سرعت آمبولانس، $velA$ ، زمان متناظر محاسبه و سپس با لحاظ ضرب متغیر صفر و یک $AC_{i,am}$ در این زمان و جمع آن بر روی همه ی پایگاه های کانیدنا در am و همه ی بیمارستان های موجود در واحد مربعی مربوط، متوسط زمان خدمت دهی در این حالت محاسبه می شود. عبارت ریاضی بعد از قسمت زیر نویس شده با عدد ۲، تا خط چین مربوط به حالت ۱۱ از جدول ۱ و لحاظ احتمال شروع عملیات با آمبولانس است، که به منظور اختصار از شرح آن صرف نظر می کنیم. همچنان که اشاره شد، سه بخش اصلی دیگر محدودیت ۲۵ مربوط به شروع عملیات با دیگر وسایل نقلیه ی امدادی است و چگونگی نگارش عبارت ریاضی متناظر در آنها برای

$$\begin{aligned} & \left(\frac{g_{1,i,am} + g_{2,i,am} + g_{3,i,ho} + g_{4,i,ho}}{velA} \right) \times MC_{i,mo} \times \\ & AC_{i,am} + \\ & \sum_{mo} \left(\sum_{bu} \sum_{ho} \left(\frac{g_{10,i,mo} + g_{11,i,mo}}{velM} \right) + \right. \\ & \left. \frac{(g_{8,i,bu} + g_{9,i,bu} + g_{12,i,ho} + g_{13,i,ho})}{velB} \times MC_{i,mo} \right. \\ & \left. \times BC_{i,bu} \right) + \left(\sum_{ho} \left(\sum_{mo} \sum_{he} \left(\frac{g_{10,i,mo} + g_{11,i,mo}}{velM} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{(g_{12,i,he} + g_{13,i,ho})}{velH} \right) \times MC_{i,mo} \times HC_{i,he} \right) \times L_{i,ho} \Big) \\ & / (NM_i) \times POM \\ & \left(\left(\sum_{he} \frac{g_{12,i,he}}{velH} \times HC_{i,he} \right) + \right. \\ & \left. \sum_{ho} \left(\sum_{he} \frac{(g_{12,i,he} + g_{13,i,ho})}{velH} \times HC_{i,he} \right) \times L_{i,ho} \right) + \\ & \left(\sum_{he} \sum_{am} \sum_{ho} \left(\frac{g_{12,i,he} + g_{13,i,am}}{velH} \right) + \frac{g_{15,i,am,ho}}{velA} \right) \times \\ & HC_{i,he} \times AC_{i,am} \Big) \\ & \left(\sum_{he} \sum_{bu} \sum_{ho} \left(\frac{g_{12,i,he} + g_{16,i,bu}}{velH} \right) + \frac{g_{17,i,bu,ho}}{velB} \right) \times \\ & HC_{i,he} \times BC_{i,bu} \Big) / (NH_i) \times POH \end{aligned} \quad (25)$$

$$\sum_{am} AC_{i,am} = QA_i \quad (26)$$

$$\sum_{bu} BC_{i,bu} = QB_i \quad (27)$$

$$\sum_{mo} MC_{i,mo} = QM_i \quad (28)$$

$$\sum_{he} HC_{i,he} = QH_i \quad (29)$$

$$\begin{aligned} & \sum_i \left(\sum_{am} (COA_{i,am} \times AC_{i,am}) + \right. \\ & \left. \sum_{bu} (COB_{i,bu} \times BC_{i,bu}) + \right. \\ & \left. \sum_{mo} (COM_{i,mo} \times MC_{i,mo}) + \right. \\ & \left. \sum_{he} (COH_{i,he} \times HC_{i,he}) \right) \leq bud \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} & AC_{i,am} \in \{0, 1\}, BC_{i,bu} \in \{0, 1\} \\ & MC_{i,mo} \in \{0, 1\}, HC_{i,he} \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (31)$$

تابع هدف ۱ میانگین وزنی زمان خدمت دهی در منطقه ی مورد بررسی را کمینه سازی می کند. تابع هدف ۲ نیز معرف کمینه سازی انحراف معیار وزنی زمان خدمت دهی در منطقه ی مورد بررسی است. محدودیت های ۳ و ۴ فاصله ی مختصاتی بین کانیدنا am برای پایگاه آمبولانس و نقطه ی تقاضا را در راستای محورهای x و y نشان می دهند. محدودیت های ۵ و ۶ نیز معرف فاصله ی مختصاتی بین نقطه ی تقاضا و بیمارستان ho را در راستای محورهای x و y هستند. محدودیت های ۷ و ۸ بیان گر فاصله ی مختصاتی بین نقطه ی تقاضا و کانیدنا he برای پایگاه بالگرد آمبولانس، در راستای محورهای x و y هستند. محدودیت ۹ برای محاسبه ی فاصله ی اقلیدسی بین کانیدنا he برای پایگاه بالگرد آمبولانس و بیمارستان ho به کار می رود. محدودیت های ۱۰ و ۱۱ فاصله ی مختصاتی بین کانیدنا bu برای پایگاه اتوبوس آمبولانس و نقطه ی تقاضا را در راستای محورهای x و y نشان می دهند. محدودیت های ۱۲ و ۱۳ نیز فاصله ی مختصاتی بین کانیدنا mo برای پایگاه موتور لانس و نقطه ی تقاضا را در راستای محورهای x و y تعیین می کنند.



شکل ۳. سه مربع از کلان شهر تهران که برای بررسی در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۳. اطلاعات مربوط به جمعیت، سابقه‌ی میزان تقاضا و نرخ بحرانی بودن ۳ مربع مورد نظر.

شماره مربع‌ها	جمعیت	سابقه‌ی میزان تقاضا	نوع بحرانی بودن
۱	۶۷۴۱۴۹	۷۵	۰/۴
۲	۳۵۲۴۹۹	۷۵	۰/۶
۳	۷۱۷۳۲۱	۱۲۰	۰/۵

جدول ۴. اطلاعات مربوط به امکان عبور و مرور وسایل نقلیه‌ی امدادی در ۳ مربع مورد نظر.

شماره مربع‌ها	امکان عبور و مرور		
	اتوبوس آمبولانس	موتورلانس	بالگرد آمبولانس
۱	هست	نیست	هست
۲	هست	نیست	هست
۳	هست	نیست	نیست

وضعیت سیاسی، جغرافیایی، یا اجتماعی هر مربع است. مثلاً مربع شماره‌ی ۳، به عنوان واحدی که دارای بافتی قدیمی، جمعیت مهاجر روزانه و معابری ترافیکی است، از نظر قابلیت حادثه‌آفرینی متوسط محسوب می‌شود و مقدار ۰/۵ را به خود گرفته است. مربع شماره‌ی ۱، که دارای بافتی نسبتاً نوسازتر، جمعیت مهاجر روزانه و معابر ترافیکی کم‌تری است، بیست درصد نسبت به مربع شماره‌ی ۳، درجه بحرانی بودن کمتری دارد و مقدار ۰/۴ به آن داده شده است. مربع شماره‌ی ۲ اگر چه دارای بافتی قدیمی، جمعیت مهاجر روزانه و معابر ترافیکی مشابهی نسبت به مربع شماره‌ی ۱ است، ولی به سبب وجود مجلس شورای اسلامی، بخشی از نیروی هوایی و سازمان برنامه و بودجه و ... دارای موقعیت سیاسی مهمی است و بیست درصد نسبت به مربع شماره‌ی ۱ دارای درجه‌ی بحرانی بودن بیشتری است و مقدار ۰/۶ به آن داده شده است.

در جدول ۴، امکان عبور و مرور هر یک از وسایل نقلیه‌ی امدادی در مربع آورده شده است. ترافیک، معابر کم‌عرض، بافت قدیمی و جمعیت زیاد از جمله‌ی مواردی است که مانع از عبور و مرور اتوبوس آمبولانس و یا بالگرد آمبولانس در برخی از مربع‌ها می‌شود.

در جداول ۵، ۶ و ۷ به ترتیب، نام، مختصات x و y و هزینه‌ی ساخت، برای هر یک از کاندیداهای پایگاه‌ها، در هر مربع آورده شده است. در این جداول، مختصات

جدول ۲. اطلاعات مربوط به احتمال استفاده و سرعت هر یک از وسایل نقلیه‌ی امدادی در شهر تهران.

وسایله‌ی نقلیه	آمبولانس	اتوبوس آمبولانس	موتورلانس	بالگرد آمبولانس
سرعت	۴۰	۲۵	۵۰	۲۰۰
احتمال استفاده	٪۴۷	٪۰	٪۴۶	٪۷

محاسبه‌ی متوسط زمان خدمت‌دهی، با حالات مختلف مندرج در جدول ۱ مطابق است.

محدودیت‌های ۲۶ تا ۲۹ بدین منظور اعمال شده‌اند که در صورت وجود امکان عبور و مرور به ترتیب آمبولانس، اتوبوس آمبولانس، موتورلانس و بالگرد آمبولانس در مربع i ، امکان تأسیس پایگاه متناظر وجود داشته باشد. محدودیت ۳۰ بدین معناست که هزینه‌ی مصرف شده برای ایجاد پایگاه‌ها در کل منطقه‌ی مورد بررسی، حداکثر باید برابر با بودجه‌ی مالی موجود باشد. محدودیت ۳۱ نیز معرف دودویی بودن متغیرهای تصمیم‌گیری است.

۴. مطالعه‌ی موردی: بخشی از کلان شهر تهران

در این قسمت به چگونگی استفاده از مدل ریاضی پیشنهادی برای بخشی از کلان شهر تهران می‌پردازیم. اطلاعات استفاده شده در این قسمت از طریق منابع غیررسمی اورژانس تهران و دیگر سازمان‌ها جمع‌آوری شده است و در صورت عدم وجود اطلاعات واقعی خاص، حتی‌الامکان سعی شده تا اطلاعات در نظر گرفته شده به واقعیت نزدیک باشد.

همان گونه که پیش از این گفته شد، در قدم نخست منطقه‌ی مورد بررسی، باید به واحدهایی مربعی شکل تقسیم‌بندی شود. سرعت هر یک از وسایل نقلیه‌ی امدادی رایج و همچنین احتمال استفاده از هر یک از آنها در یک مأموریت اورژانس، به صورت میانگین، در شهر تهران، با لحاظ عواملی نظیر ترافیک، وضعیت آب و هوایی و ساختار معابر به شرح جدول ۲ است.

با توجه به اطلاعات مندرج در جدول ۲ طول ضلع مربع به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{v} = (0/07 \times 200) + (0/46 \times 50) + (0 \times 25) +$$

$$(0/47 \times 40) = 55/8$$

$$\bar{v} = \frac{d}{t} \rightarrow d = \bar{v} \times t \rightarrow d = 55/8 \times 8 \times \frac{1}{60} = 7/44$$

$$x^2 + x^2 = (7/44)^2 \rightarrow 2x^2 = 55/3536 \rightarrow x = 5/26$$

بدین ترتیب، تهران باید به مربع‌هایی به طول ضلع ۵/۲۶ کیلومتر تقسیم شود. پس از تقسیم‌بندی نقشه‌ی تهران به کمک نرم‌افزار Auto CAD، ۲۹ مربع حاصل می‌شود. از این ۲۹ واحد مربعی شکل، به منظور کاهش حجم متغیرهای مدل و امکان حل آن با استفاده از نرم‌افزارهای موجود، ۳ مربع شماره‌گذاری شده در شکل ۳، به عنوان نمونه در نظر گرفته شده است.

در جدول ۳، برای هر مربع مقادیر جمعیت، سابقه‌ی میزان تقاضا و نرخ بحرانی بودن آورده شده است. سابقه‌ی میزان تقاضا، معرف تعداد مأموریت‌ها در هر مربع در طی یک شبانه‌روز بر مبنای سوابق اورژانس است. نرخ بحرانی بودن نشان‌دهنده‌ی پتانسیل هر مربع برای بروز حوادث است. این نرخ با عددی بین ۰ و ۱، تحت تأثیر

جدول ۷. اطلاعات مربوط به نام، مختصات x و y و هزینه‌ی ساخت برای هر یک از کاندیداهای پایگاه‌ها برای مربع شماره ۳.

نام پایگاه	پارک	میدان		پارک
		قیام	بعثت	
x	۹,۵۴۵۹	۶,۹۴۵۱	۶,۱۳۶۶	پارک
y	۷,۵۱۵۶	۸,۸۶۱۴	۶,۵۸۶۸	میدان
هزینه پایگاه	۱۵۰	۸۰۰	۱۵۰	پارک
نام پایگاه	ترمینال جنوب	قیام	محلای خراسان	میدان
x	۵,۴۸۴۰	۶,۹۴۵۱	۹,۵۷۵۱	۷,۷۹۲۵
y	۶,۹۱۸۵	۸,۸۶۱۴	۹,۰۶۰۴	۸,۳۹۷۰
هزینه پایگاه	۳	۳	۳	۳
	میلیون	میلیون	میلیون	میلیون

جدول ۸. اطلاعات مربوط به مختصات x و y و امکان عبور و مرور بالگرد آمبولانس برای هر بیمارستان در مربع شماره ۱.

مربع ۱	x	y	امکان عبور و مرور بالگرد آمبولانس
بیمارستان بعثت	۱۲,۳۷۱	۱۰,۱۸۸	هست
بیمارستان امام خمینی	۱,۷۵۳	۱۳,۱۷۴	هست
بیمارستان امام حسین	۸,۴۷۴	۱۳,۱۰۷	نیست

جدول ۹. اطلاعات مربوط به مختصات x و y و امکان عبور و مرور بالگرد آمبولانس برای هر بیمارستان در مربع شماره ۲.

مربع ۲	x	y	امکان عبور و مرور بالگرد آمبولانس
بیمارستان فیروزگر	۴,۴۱۲	۸,۱۱۳	نیست
بیمارستان امام خمینی	۱,۷۵۳	۷,۸۹۵	هست
بیمارستان امام حسین	۸,۴۷۴	۷,۸۶۶	نیست

جدول ۱۰. اطلاعات مربوط به مختصات x و y و امکان عبور و مرور بالگرد آمبولانس برای هر بیمارستان در مربع شماره ۳.

مربع ۳	x	y	امکان عبور و مرور بالگرد آمبولانس
بیمارستان سینا	۴,۷۰۵	۱۰,۸۵۲	نیست
بیمارستان هفتم تیر	۵,۴۱۶	۲,۴۶۴	هست
بیمارستان بهارلو	۳,۰۲۰	۷,۸۶۶	نیست

جغرافیایی بر اساس کیلومتر و هزینه‌ها بر اساس میلیون تومان است. مثلاً، در جدول شماره ۵، کاندیدا اول برای پایگاه آمبولانس پارک پیروزی است که مختصات x آن ۱۲,۵۲۶، مختصات y آن ۱۲,۰۹۳ است. همچنین هزینه‌ی ساخت پایگاه در این کاندیدا برابر با ۱۵۰ میلیون تومان خواهد بود.

در سه جدول ۸، ۹ و ۱۰ اطلاعات مراکز درمانی شامل مختصات x و y هر یک و همچنین امکان عبور و مرور بالگرد آمبولانس در هر یک از آنها در هر مربع آورده شده است. مثلاً در جدول ۸، بیمارستان اول برای مربع شماره ۱، بیمارستان

جدول ۵. اطلاعات مربوط به نام، مختصات x و y و هزینه‌ی ساخت برای هر یک از کاندیداهای پایگاه‌ها برای مربع شماره ۱.

نام پایگاه	پیروزی	پارک	
		فدک	شمایق
x	۱۲,۵۲۶	۱۰,۸۱۲	۱۲,۷۱۲
y	۱۲,۰۹۳	۱۵,۶۰۰	۱۴,۵۴۸
هزینه پایگاه	۱۵۰	۱۵۰	۱,۱
نام پایگاه	پارک	میدان	میدان
x	۱۲,۵۲۶	۱۱,۷۳۷	۱۲,۴۲۹
y	۱۲,۰۹۳	۱۳,۸۶۵	۱۴,۵۶۲
هزینه پایگاه	۳	۳	۳
نام پایگاه	نیروی هوایی	دوشان تپه	
x	۱۰,۹۵۸	۱۳,۰۵۲	
y	۱۳,۱۷۴	۱۱,۸۷۵	
هزینه پایگاه	۰	۵۰	
	میلیون	میلیون	میلیون

جدول ۶. اطلاعات مربوط به نام، مختصات x و y و هزینه‌ی ساخت برای هر یک از کاندیداهای پایگاه‌ها برای مربع شماره ۲.

نام پایگاه	تهران	میدان	
		شهدا	بیمارستان
x	۵,۴۵۵	۷,۸۹۰	۷,۳۰۵
y	۸,۱۷۹	۵,۹۳۳	۸,۳۴۰
هزینه پایگاه	۱۵۰	۶۵۰	۱۵۰
نام پایگاه	نامجو	سیاه	میدان
x	۸,۶۰۱	۷,۲۰۸	۶,۴۵۸
y	۹,۰۰۴	۷,۸۶۶	۶,۰۲۸
هزینه پایگاه	۳	۳	۳
نام پایگاه	نیروی هوایی	خانواده	بیمارستان
x	۹,۷۴۱	۷,۳۰۵	۷,۸۹۰
y	۷,۲۰۳	۸,۳۴۰	۵,۹۳۳
هزینه پایگاه	۰	۵۰	
	میلیون	میلیون	میلیون

جدول ۱۱. مقادیر a_i و b_i برای ۳ مربع نمونه.

* مربع	مربع ۱	مربع ۲	مربع ۳
a_i	۱۰/۵۲	۵/۲۶	۵/۲۶
b_i	۱۵/۷۸	۱۰/۵۲	۱۰/۵۲

جدول ۱۲. پایگاه‌های منتخب توسط پاسخ بهینه‌ی محلی اول.

بهبینه محلی اول	آمبولانس	موتورلانس	بالگرد آمبولانس
مربع ۱	پارک پیروزی	میدان لوزی	دوشان تپه
مربع ۲	بیمارستان خانواده	میدان شهدا	بیمارستان خانواده
مربع ۳	میدان قیام	میدان خراسان	-

جدول ۱۳. پایگاه‌های منتخب توسط پاسخ بهینه‌ی محلی دوم.

بهبینه محلی دوم	آمبولانس	موتورلانس	بالگرد آمبولانس
مربع ۱	پارک پیروزی	میدان لوزی	دوشان تپه
مربع ۲	باغ تهران	میدان شهدا	بیمارستان خانواده
مربع ۳	پارک بعثت	ترمینال جنوب	-

آمده است. در این پاسخ، مقدار تابع هدف اول، یعنی میانگین زمان خدمت‌دهی معادل با ۱۱/۲۲ دقیقه و مقدار تابع هدف دوم، یعنی انحراف معیار زمان خدمت‌دهی معادل با ۲/۸۸ دقیقه به دست آمد.

همچنان‌که دیده می‌شود، این دو پاسخ، هر یک مکان‌های متفاوتی را برای پایگاه‌های اورژانس انتخاب کرده‌اند. تابع هدف اول، یعنی میانگین زمان خدمت‌دهی، در پاسخ بهینه‌ی محلی اول، مقدار کم‌تری (بهتری) به خود گرفته است و تابع هدف دوم، یعنی انحراف معیار زمان خدمت‌دهی، در پاسخ بهینه‌ی محلی دوم کم‌تر شد. از آنجایی که نرم‌افزار مورد استفاده در یافتن هر یک از دو پاسخ، یکی از توابع هدف را کمینه‌سازی کرده و دیگری را در سطحی ممکن نگه داشته است، نمی‌توان گفت کدام پاسخ ارجحیت دارد؛ پس انتخاب نهایی وابسته به نظر تصمیم‌گیر خواهد بود.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عددصحيح غيرخطی برای مکان‌یابی پایگاه‌های اورژانس پیشنهاد شد. این مدل با لحاظ حالات مختلف در مأموریت‌های اورژانس و با فرض احتمالی بودن نیاز به این خدمات‌ها در نقاط مختلف به دنبال کمینه‌سازی میانگین زمان‌های خدمت‌دهی و کمینه‌سازی انحراف معیار زمان‌های خدمت‌دهی است. با کاهش این دو شاخص نه تنها زمان خدمت‌دهی مأموریت‌ها کاهش می‌یابد، بلکه زمان خدمت‌دهی در خدمات اورژانسی حتی‌الامکان برای افراد مختلف یکسان خواهد بود.

باید توجه داشت که مکان‌یابی بهینه‌ی پایگاه‌ها که در این مقاله بدان پرداخته شد سهم اندکی در زمان خدمت‌دهی کل، یعنی از زمان اطلاع از حادثه تا بستری شدن فرد حادثه دیده در مراکز درمانی دارد. به عبارت دیگر، وجود تجهیزات کافی و افراد متخصص در پایگاه‌ها، مدیریت جامع و متمرکز بخشی و منطقه‌ی و ارتباط اطلاعاتی به‌روز با مراکز درمانی هر یک سهم به‌سزایی در حصول رضایت و رعایت عدالت در این حوزه خواهند داشت.

مدل پیشنهادی برای بخشی از کلان‌شهر تهران بررسی شد و به کمک نرم‌افزار GAMS دو پاسخ بهینه‌ی محلی ارائه و بررسی شد. باید توجه داشت که در صورت افزایش منطقه‌ی مورد بررسی و در نتیجه افزایش تعداد متغیرها و محدودیت‌های مسئله، پیدا کردن جواب با استفاده از نرم‌افزار میسر نخواهد بود و استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در این خصوص توصیه می‌شود.

برای تحقیقات آتی و به منظور تطبیق هر چه بیشتر مدل با واقعیات و عملیات روزمره‌ی اورژانس، می‌توان به لحاظ موارد زیر در مدل اشاره کرد. به عنوان مثال، در مدل مورد مطالعه در این مقاله، تقاضا برای خدمات اورژانسی در طول زمان ثابت و با نرخی یکسان در نظر گرفته شده است، در حالی‌که در عمل، این تقاضا در طول روز متغیر است. همچنین سرعت وسایل نقلیه‌ی اورژانسی نیز در زمان‌های مختلف در یک روز کاری متفاوت است.

منابع (References)

1. <http://www.EMSNEWS.ir>.
2. Marianov, V. "Location models for emergency service

بعثت است که مختصات x آن ۱۲/۳۷۱، مختصات y آن ۱۰/۱۸۸ است. همچنین امکان عبور و مرور بالگرد آمبولانس نیز در آن وجود دارد.

در آخر نیز مقادیر a_i و b_i برای ۳ مربع نمونه، در جدول ۱۱ نوشته شده است. برای نمونه برای مربع شماره ۱، مختصات a_i برابر با ۱۰/۵۲ و مختصات b_i برابر با ۱۵/۷۸ است.

فرض شده است که بودجه‌ی کل دولت نیز برای ایجاد پایگاه‌ها در ۳ مربع برابر ۱ میلیارد و ۷۰۰ میلیون تومان باشد. این مدل با استفاده از نرم‌افزار GAMS بر روی رایانه‌ی با مشخصات $2\text{GHz} - \text{IntelCorei5} - 4\text{GB Ram}$ اجرا شد و دو پاسخ بهینه‌ی محلی به شرح زیر به دست آمد.

پاسخ بهینه‌ی محلی اول به شرح جدول ۱۲ است. در این پاسخ، برای ۳ مربع، به ترتیب پایگاه آمبولانس در مکان‌های پارک پیروزی، بیمارستان خانواده و میدان قیام، همچنین پایگاه موتورلانس در مکان‌های میدان لوزی، میدان شهدا و میدان خراسان و پایگاه بالگرد آمبولانس در مکان‌های دوشان تپه و بیمارستان خانواده به دست آمده است. مقدار تابع هدف اول، یعنی میانگین زمان خدمت‌دهی معادل با ۱۰/۵۶ دقیقه و مقدار تابع هدف دوم، یعنی انحراف معیار زمان خدمت‌دهی معادل با ۳/۲۴ دقیقه به دست آمده است.

پاسخ بهینه‌ی محلی دوم نیز به شرح جدول ۱۳ است. در این پاسخ، برای ۳ مربع، به ترتیب پایگاه آمبولانس در مکان‌های پارک پیروزی، باغ تهران و پارک بعثت، همچنین پایگاه موتورلانس در مکان‌های میدان لوزی، میدان شهدا و ترمینال جنوب و پایگاه بالگرد آمبولانس در مکان‌های دوشان تپه و بیمارستان خانواده به دست

applications", *InLeading Developments from INFORMS Communities*, INFORMS, doi://doi.org/10.1287/edvc.2017.0172.

3. Reuter-Oppermann, M., van den Berg, P.L. and Vile, J.L. "Logistics for emergency medical service systems",

- Health Systems*, **6**(3), pp. 187-208 (2017).
4. Alanis, R., Ingolfsson, A. and Kolfal, B. "A markov chain model for an EMS system with repositioning", *Production and Operations Management*, **22**(1), pp. 216-231 (2013).
 5. Marsh, M.T. and Schilling, D.A. "Equity measurement in facility location analysis :a review and framework", *European Journal of Operational Research*, **74**(1), pp. 1-7 (1994).
 6. Bélanger, V., Ruiz, A. and Soriano, P. Resent optimization models and trends in location, relocation, and dispatching of emergency medical vehicles", *European Journal of Operational Research*, **272**(1), pp.1-23 (2018).
 7. Berman, O. and Kaplan, E.H. "Equity maximizing facility location schemes", *Transportation Science*, **24**(2), pp. 137-144 (1990).
 8. Yang, M., Allen, T.T., Fry, M.J. and et al. "The call for equity: simulation optimization models to minimize the range of waiting times", *IIE Transactions*, **45**(7), pp. 781-795 (2013).
 9. Espejo, I., Marin, A., Puerto, J. and et al. "A comparison of formulations and solution methods for the minimum-envy location problem", *Computers & Operations Research*, **36**(6), pp. 1966-1981 (2009).
 10. Chanta, S., Mayorga, M.E., Kurz, M.E. and et al. "The minimum p-envy location problem: a new model for equitable distribution of emergency resources", *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, **1**(2), pp. 101-115 (2011).
 11. Chanta, S., Mayorga, M.E. and McLay, L.A. "Improving emergency service in rural areas: a bi-objective covering location model for EMS systems", *Annals of Operations Research*, **221**(1), pp. 133-159 (2014).
 12. Bozorgi-Amiri, A., Tavakoli, S., Mirzaeipour, H. and et al. "Integrated locating helicopter stations and helipads for the wounded transfer under demand location uncertainty", *The American Journal of Emergency Medicine*, **35**(3), pp. 410-417 (2017).
 13. Shahriari, M., Bozorgi-Amiri, A., Tavakoli, S. and et al. "Bi-objective approach for placing ground and air ambulance base and helipad locations in order to optimize EMS response", *The American Journal of Emergency Medicine*, **35**(12), pp. 1873-1881 (2017).
 14. Karatas, M., Razi, N. and Gunal, M.M. "An ILP and simulation model to optimize search and rescue helicopter operations", *Journal of the Operational Research Society*, **68**(11), pp. 1335-1351 (2017).
 15. Hosseinijou, S.A. and Bashiri, M. "Stochastic models for transfer point location problem", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **58**(1-4), pp. 211-225 (2012).