

ارائه مدل ریاضی آنلاین مکانیابی مجدد آمبولانس‌ها در سیستم اورژانس با در نظر گرفتن شعاع پوششی چند گانه، هزینه‌های باز مکانیابی و محدودیت حجم کاری مهدی حاجی علی^۱، ابراهیم تیموری*^۲، محمدرضا رسولی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع،

دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع،

دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع،

دانشگاه علم و صنعت ایران

mehdihajialy@gmail.com

Teimoury@iust.ac.ir

rasouli@iust.ac.ir

چکیده

در هنگام روی دادن اختلال و تغییر الگوی تقاضا در سیستم اورژانس، نیاز به جابجایی آمبولانس‌های بیکار در بین پایگاه‌ها به منظور پوشش مناسب تر تقاضاهای آینده می‌باشد. در این مقاله یک رویکرد جدید به منظور تصمیم‌گیری در مورد جابجایی آمبولانس‌ها در قالب مدل ریاضی ارائه می‌گردد. مدل ارائه شده پوشش مناطق توسط پایگاه‌ها را در سه شعاع زمانی در نظر گرفته و هدف اصلی آن پوشش در کوتاه‌ترین شعاع است. هم‌چنین مدل حجم کاری اضافه شده به آمبولانس‌ها ناشی از تصمیم باز مکانیابی را در نظر می‌گیرد. مدل با رویکرد برخط ارائه شده و برخی پارامترها متناسب با تغییرات زمانی به روز رسانی می‌شوند. بنابر ماهیت پویای مساله، توابع هدف ابتدا نرمال‌سازی شده و با روش مجموع وزن‌دار به صورت تک هدفه درآمده‌اند. مطالعه موردی در منطقه شرق تهران صورت گرفته است. نتایج محاسباتی نشان از بهبود ایجاد شده در پوشش نقاط تقاضا توسط آمبولانس‌های در دسترس دارد.

کلمات کلیدی: سیستم اورژانس، باز مکانیابی آمبولانس، زمان پاسخ دهی، حجم کاری آمبولانس‌ها

* نویسنده مخاطب

Real time ambulance relocation mathematical model for emergency system considering multiple coverage range, relocation costs, workload limitation, and prioritization of emergency calls

Mahdi Hajiali¹, Ebrahim Teimoury², Mohammad Reza Rasouli³

¹ Master student, Industrial Engineering Department,
Iran University of Science and Technology

² Associate professor, Industrial Engineering Department,
Iran University of Science and Technology

³ Assistant professor, Industrial Engineering Department,
Iran University of Science and Technology

mehdihajiali@gmail.com

Teimoury@iust.ac.ir

rasouli@iust.ac.ir

Abstract

Emergency Medical Services (EMS) managers are concerned with providing maximum possible coverage in their service area. As emergency calls arrive into the EMS system, some ambulances become unavailable. Redeployment deals with a dynamic relocation of available ambulances so as to compensate for the loss in coverage due to busy ambulances. Real-time approaches aim to select the best relocation plans, taking into account the state of the system at the moment decisions are made. Unsystematic redeployment can impose superfluous workload and result in unnecessary fatigue for EMS personnel. This paper develops a real-time approach to maximize coverage with minimum possible total travel time, considering accumulated workload restrictions for personnel in a shift. The proposed model considers the coverage of areas by base stations in three coverage range and its main purpose is to cover the shortest range. Also The model considers the workload added to the ambulances resulting from the relocation decision. At any time moving ambulances is done in such a way that workload on the ambulances does not exceed a certain limit. The model is presented with an online approach and some parameters are updated as time changes. The case study in this article is related to the eastern part of Tehran. The population of this area is about 3 million people - its area is 170 square kilometers and is divided into 48 areas. For sensitivity analysis, the relocation problem can be divided into two parts: pre-implementation and post-implementation. Prior to implementing the model, depending on the disruption to the system, the location of ambulances may not be appropriate to meet future demands. After running the model, the base of some ambulances may change. Following this change, the extent of coverage of demand points by the bases will change significantly. For this purpose, the criterion is the number of coverage points of demand by base stations within a coverage range of 1r minute.

Key-words: Dynamic redeployment, Healthcare, EMS, Response times

۱- مقدمه

سیستم‌های مدیریت اورژانس یکی از حیاتی‌ترین سیستم‌ها در تامین سلامت جامعه هستند. این سیستم‌ها هنگام ارائه خدمات باید در مدت زمان کوتاهی تصمیمات مختلفی را اتخاذ و اجرا کنند. تعیین نوع تماس ورودی و انتخاب مناسب‌ترین آمبولانس برای اعزام در شعاع زمانی مناسب از جمله تصمیماتی هستند که در مدت بسیار کوتاهی باید گرفته شوند. فرایند خدمت رسانی در این سیستم را می‌توان بدین صورت تعریف کرد. (۱) ورود تماس، (۲) تخصیص آمبولانس، (۳) جابجایی آمبولانس از محل فعلی خود به محل تقاضا، (۴) عملیات احیا و درمان (۵) اعزام بیماران به بیمارستان در صورت نیاز.

هنگامی که بیمار به بیمارستان منتقل می‌شود، ماموریت آمبولانس پایان یافته و می‌تواند به یک تماس جدید تخصیص یابد. از آنجا که پاسخ سریع در شرایط اضطراری بسیار حیاتی است، ضروری است که آمبولانس‌ها در تمامی لحظات به منظور پوشش مناسب و واکنش سریع در دسترس باشند. سیستم‌های اورژانس به منظور حفظ و تامین سطح معینی از معیارهای عملکردی، تحت فشار تعهدات قرار دادی و اهداف مدیریتی هستند. برای مثال بر اساس برخی استانداردهای سیستم اورژانس، حداکثر زمان پاسخ به تماس‌ها در مناطق شهری ۱۰ دقیقه و در مناطق روستایی ۳۰ دقیقه می‌باشد. [۲] تصمیم‌گیری در سیستم اورژانس را می‌توان به سه سطح استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی تقسیم کرد. در مطالعات اخیر، بیشتر پژوهش‌ها بر روی مسائل استراتژیک و تاکتیکی متمرکز بودند. تصمیمات استراتژیک، به مکانیابی پایگاه‌ها و تعیین اندازه ناوگان آمبولانس‌ها می‌پردازد. در واقع در سطح استراتژیک، پایگاه آمبولانس‌ها یک بار با اهداف مختلفی از جمله ایجاد حداکثر پوشش تقاضا، تعیین شده و آمبولانس‌ها بعد از هر ماموریت به پایگاه خانگی خود باز می‌گردند. این سیاست در ادبیات به معنای سیاست ثابت (Static Policy) می‌باشد. تصمیمات در سطح تاکتیکی شامل برنامه ریزی خدمه و تعیین سیاست‌های ناوگان می‌باشد. [۱۷] در سطح عملیاتی حالت سیستم همواره در حال تغییر است و تصمیمات باید متناسب با آن تغییر کنند. رویکردی که در آن پایگاه آمبولانس‌ها متناسب با تغییرات حالت سیستم، تغییر می‌کند، رویکرد پویا می‌باشد. [۱۳، ۱۸] عوامل مختلفی از جمله تغییر الگوی تقاضا، بروز اتفاقات پیش بینی نشده و تغییر تعداد آمبولانس‌های در دسترس باعث تغییر حالت سیستم می‌شوند. با تغییر حالت سیستم، دغدغه اصلی سیستم اورژانس پوشش تقاضای مناطق و زمان پاسخ به تقاضاهای آینده می‌باشد. جابجایی آمبولانس‌های بیکار بین پایگاه‌های اورژانس هنگام تغییر الگوی تقاضا و بروز رویدادهای پیش بینی

نشده باعث بهبود در پوشش تقاضاهای آینده می‌شود. [۵] در واقع هنگامی که تعداد آمبولانس‌های در دسترس کاهش پیدا می‌کند، به دنبال آن قدرت پاسخ‌گویی سیستم کاهش می‌یابد. آمبولانس‌های در دسترس ممکن است که برای برخی نقاط تقاضا در برخی شعاع‌های زمانی پوششی را ایجاد نکنند. یعنی اگر تماسی از طرف یک منطقه تقاضا وارد شود، سیستم، آمبولانسی در آن شعاع زمانی به منظور اعزام در دسترس نداشته و مجبور است از آمبولانس‌ها در شعاع‌های زمانی طولانی‌تر استفاده کند. برخی پایگاه‌ها ممکن است پوشش بیشتری نسبت به سایر پایگاه‌ها ایجاد کنند. جابجایی آمبولانس‌های بیکار در بین پایگاه‌ها با هدف حداکثر سازی پوشش می‌تواند این مشکل را برطرف کند. در جدول ۱ جایگاه مسائل مکانیابی مجدد آمبولانس‌ها در سیستم اورژانس با رویکرد برنامه ریزی در زمان واقعی (آنلاین) را مشاهده می‌کنید. [۴]

جدول ۱- جایگاه باز مکانیابی آمبولانس‌ها در سطوح تصمیم‌گیری

سطوح تصمیم‌گیری	استراتژیک	مکانیابی پایگاه‌های اورژانس	اندازه ناوگان	استخدام کارکنان
	تاکتیکی	مکانیابی پایگاه‌های آماده به کار	زمانبندی و برنامه ریزی خدمه	مدیریت ناوگان
	عملیاتی	مکانیابی مجدد آمبولانس‌ها با رویکرد آنلاین	اعزام آمبولانس به محل	

در این مقاله ما به منظور حل مساله مکانیابی مجدد آمبولانس‌ها، یک مدل ریاضی با رویکرد آنلاین توسعه داده‌ایم. این رویکرد بر اساس تغییرات زمانی و تغییرات حالت سیستم به روزرسانی شده و تصمیم‌گیری درباره مکان جدید آمبولانس‌های بیکار را با در نظر گرفتن حجم کاری اضافه شده، تغییر الگوی تقاضای مناطق و تغییر تعداد پوشش مناطق انجام می‌دهد. مدل ریاضی یک مدل سه هدفه است که علاوه بر حداکثرسازی پوشش تقاضا و حداقل‌سازی زمان سفر ناشی از تصمیم مکانیابی مجدد به دنبال حداقل‌سازی پوشش نقاط تقاضا با شعاع زمانی بالاتر به منظور اولویت دادن به تقاضاهای فوق اورژانسی می‌باشد.

در قسمت دوم از این نوشتار به ارائه پژوهش های صورت گرفته توسط محققین و شکاف موجود در آن ها می پردازیم. در قسمت سوم مساله مکانیابی مجدد را تعریف کرده و مدل ریاضی آن را در قسمت چهارم تشریح می کنیم. قسمت پنجم نتایج محاسباتی حاصل از حل مدل ارائه شده و با در نظر گرفتن پارامتر های مختلف و مهم مساله، آن را ارزیابی و تحلیل می کنیم. در نهایت در قسمت ششم به ارائه جمع بندی و پیشنهادات تحقیقات آتی می پردازیم.

۲- مرور ادبیات

چندرو و همکاران [۱۱] اولین پژوهشگرانی هستند که به ماهیت پویای مساله باز مکانیابی توجه کرده اند. آن ها به دنبال پوشش تقاضا توسط حداقل دو وسیله نقلیه بوده و همزمان سعی در حداقل کردن هزینه جابجایی دارند. در تابع هدف این مدل یک عبارت جریمه به منظور جابجایی وسیله نقلیه از مکان حال حاضرش به مکان دیگر برای جلوگیری از جابجایی ها با مسافت زیاد و هم چنین جابجایی های مداوم یک وسیله نقلیه در نظر گرفته شده است. آن ها برای کاهش زمان حل از الگوریتم جست و جوی ممنوعه استفاده کردند. معینی و همکاران [۱۵] مدل قبلی را توسعه داده و تنها مناطقی را در نظر گرفتند که نیاز به پوشش دوباره با توجه به تصمیمات جابجایی آمبولانس ها دارند. مدل معینی و همکاران وزن تقاضای مناطق را با توجه به نیاز دقیق مناطق به حداقل یک و حداقل دو آمبولانس تفکیک کرده است. مطالعه آنها منطقه ای در فرانسه با درخواست خدمات اورژانسی بسیار پایین، می باشد. اندرسون و همکاران [۱] یک مدل باز مکانیابی در لحظه را ارائه دادند که نسبت به مدل پایه ارائه شده در سال ۲۰۰۱ معیار متفاوتی را به منظور ارزیابی عملکرد در نظر می گیرد. آن ها به جای در نظر گرفتن معیار پوشش تقاضا، میزان آمادگی سیستم (ظرفیت سیستم) به منظور پاسخ به تقاضای آینده را در نظر می گیرند. این مدل به دنبال حداقل کردن حداکثر زمان سفر آمبولانس هایی است که باید جابجا شوند. مدل آن ها زمان انتظار بیماران برای آمبولانس ها را کاهش داد. نوم و همکاران [۱۶] با استفاده از برنامه ریزی تصادفی دو مرحله ای که هزینه مربوط به جابجایی و هزینه های عدم برآورد تقاضا به دلیل تاخیر را به حداقل می رساند، مدل سازی را انجام دادند. آن ها به دنبال حداقل سازی تعداد باز مکانیابی صورت گرفته بودند. در این مدل ابتدا اطلاعاتی از محل دقیق تماس های آینده وجود ندارد و با استفاده از داده های تاریخی و تعریف سناریوهای مختلف تصمیم به تعیین مکان

آمبولانس ها با هدف حداقل سازی تعداد جابجایی ها گرفته می شود. در مرحله دوم مدل اقدام به تخصیص وسایل نقلیه به تماس های اضطراری می نماید. ماسون [۱۴] یک مدل آنلاین باز مکانیابی پوششی به منظور بر طرف کردن مساله باز مکانیابی پویا ارائه داد. مدل وی در یک نرم افزار مدیریت اورژانس به نام اپتیما لایو (Optima Live) با هدف ارائه توصیه های فوری تغییر پایگاه آمبولانس ها به مدیران اورژانس اجرا شد. او به جای حداکثر سازی پوشش دو گانه نقاط تقاضا، بر اساس یک تابع خطی - تکه ای مقعر سعی در حداکثر سازی تعداد پوشش نقاط تقاضا دارد. مدل آن ها برای بهبود عملکرد، چندین وسیله نقلیه را در نظر می گیرد. جاگتنبورگ و همکاران [۱۲] نمونه پویای مدل MEXCLP^۱ را با هدف حداقل سازی تعداد تقاضاهایی که از حداکثر زمان پاسخ دهی فراتر رفته اند با رویکرد جابجایی آنلاین ارائه دادند. آنها جابجایی وسایل نقلیه را تنها بعد از پایان ماموریتشان در نظر گرفته بودند. نتایج به دست آمده در منطقه اوترخت (Utrecht) در هلند نشان داد که سیاست باز مکانیابی ارائه شده منجر به کاهش قابل توجهی در نسبت تاخیرات به وجود آمده شده است. ون برنولد و همکاران [۳] مساله جابجایی پویا را با تمرکز در نقاط روستایی و در نظر گرفتن تعداد محدودی وسایل نقلیه با توجه به حجم پایین تقاضا، در نظر گرفتند. آن ها به دنبال حداکثر کردن پوشش تقاضا بودند. مدل ارائه شده در منطقه روستایی فلولاند هلند که به طور متوسط ۲۴ تماس در روز دریافت می کند، باعث بهبود ۲ دقیقه ای در زمان پاسخ دهی گردید. عنایتی و همکاران (۱) [۹] مدلی را به منظور باز مکانیابی آمبولانس ها در زمان واقعی با در نظر گرفتن بار کاری کارکنان ارائه دادند. مدل آن ها دو مرحله ای بوده و در مرحله اول به دنبال حداکثر سازی پوشش تقاضاهای آینده با تعیین مکان جدید آمبولانس ها است. سپس در مرحله دوم زمان سفر را به حداقل می رسانند. آن ها همچنین با در نظر گرفتن بار کاری کارکنان با هر بار تصمیم درباره جابجایی آمبولانس ها این مقدار را به روزرسانی می کنند. هم چنین عنایتی و همکاران (۲) [۱۰] مساله قبل را با برنامه ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو مدل سازی کردند. که در مرحله اول آمبولانس ها به مکان های جدید تخصیص داده شده و در مرحله دوم به منظور تعیین سیاست های اعزام به یک تقاضا در سناریوهای مختلف پاسخ می دهند. کاروالیو و همکاران [۷] با استفاده از یک مدل ریاضی برنامه ریزی عدد صحیح مختلط تصمیمات مکانیابی مجدد و اعزام آمبولانس ها را به صورت یکپارچه در نظر

¹ The Maximal Expected Covering Location Problem

می‌گیرند. هدف آن‌ها حداکثرسازی پوشش نقاط تقاضا می‌باشد. رویکرد آن‌ها از یک معیار آمادگی زمانی برای ارزیابی توانایی سیستم به منظور مدیریت کردن شرایط اضطراری به وجود آمده استفاده می‌کند. آن‌ها از یک روش ابتکاری به منظور اجرای فرآیند اعزام و مکانیابی مجدد استفاده می‌کنند. به منظور تفکیک ادبیات باز مکانیابی آمبولانس‌ها و تعیین دقیق شکاف‌های موجود و ارائه نوآوری‌های موجود جدول ۲ ارائه می‌گردد. در این جدول پژوهش‌های صورت گرفته بر اساس توابع هدف، محدودیت‌های پوشش، محدودیت‌های پایگاه‌ها، محدودیت‌های باز مکانیابی و معیارهای تغییر حالت سیستم دسته بندی می‌گردند.

۲-۱ مشخصات مدل ارائه شده بر اساس (جدول ۲)

مدل حاضر برخی از ابعاد جدول بالا را به صورت جداگانه پوشش داده و برخی دیگر را به صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد. حداکثر سازی پوشش مناطق تقاضا هدفی است که تقریباً اکثر مدل‌ها به دنبال آن هستند. در کنار این هدف، برخی محققان به دنبال کاهش هزینه‌های ناشی از مکانیابی مجدد آمبولانس‌ها هستند. برای مثال جندرو و همکاران ضربی به عنوان هزینه مکانیابی مجدد آمبولانس‌ها در تابع هدف خود در نظر گرفته‌اند. به گونه ای که این ضریب در هر مرحله ای که مدل بخواهد حل شود به ازای هر آمبولانس محاسبه می‌شود. آمبولانس‌هایی که تعداد جابجایی‌های قبلی‌شان زیاد بوده است ضریب بزرگتری دریافت می‌کنند. عنایتی و همکاران (۱) هزینه مکانیابی مجدد را به صورت یک تابع هدف جداگانه در مساله خود در نظر گرفتند. آنها برای جلوگیری از جابجایی‌های غیر طبیعی این تابع هدف را ارائه کردند. معینی و همکاران مدل جندرو و همکاران را توسعه داده و تنها مناطقی را در نظر گرفتند که نیاز به پوشش دوباره با توجه به تصمیمات جابجایی آمبولانس‌ها دارند. مدل جندرو و همکاران به دنبال پوشش حداکثری تمام نقاط تقاضا توسط حداقل دو آمبولانس با توجه به وزن تقاضای مناطق می‌باشد. در حالی که مدل معینی و همکاران وزن تقاضای مناطق را با توجه به نیاز دقیق مناطق به حداقل یک و حداقل دو آمبولانس تفکیک کرده است. مدلی که ما ارائه داده ایم، به صورت یکپارچه علاوه بر در نظر گرفتن پوشش نقاط تقاضا به صورت تفکیک نیاز مناطق به حداقل یک آمبولانس و حداقل دو آمبولانس در کمترین شعاع پوششی، به دنبال حداقل کردن زمان سفر ناشی از باز مکانیابی آمبولانس‌ها می‌باشد. علاوه بر آن برای اولین بار تابع هدف حداقل سازی پوشش نقاط تقاضا با شعاع زمانی بالاتر به منظور اولویت دادن به تقاضاهای فوق اورژانسی در این مدل ارائه شده

است. هم چنین این مدل برای اولین بار سه شعاع پوششی را ارائه داده و هر کدام از شعاع‌ها، متغیر متناظر خود را در مدل خواهند داشت. بنابراین پوشش نقاط تقاضا در هر کدام از شعاع‌ها بر اساس مقدار گیری متغیر متناظر با آن‌ها توسط مدل ارائه شده، صورت می‌گیرد. در واقع مدل مجبور به حداکثر سازی تقاضاهای فوق اورژانسی شده و اگر با کمبود منابع رو به رو شود، سعی می‌کند به مناطق تقاضایی که نیازشان در اولویت پایین تری قرار دارد، آمبولانس‌هایی با شعاع‌های طولانی تر تخصیص دهد. جنبه دیگر مساله، محدودیت حجم کاری کارکنان و بار کاری اضافی که بر آن‌ها اعمال می‌شود، است. هنگامی که مدل تصمیم به مکانیابی مجدد آمبولانس‌ها می‌گیرد، بار اضافی به آنها اعمال شده و آن‌ها برای بهبود پوشش باید مسافتی را طی کرده تا در پایگاه جایگزین قرار بگیرند. با توجه به رویکرد مدل و پویا بودن مساله، در طی روز برخی پارامترهای مساله که ماهیت پویا دارند تغییر می‌کنند. یکی از این پارامترها حجم کاری آمبولانس‌ها تا لحظه تصمیم گیری است. در مدل حاضر، برای هر آمبولانس حجم کاری متحمل شده تا لحظه تصمیم گیری در نظر گرفته شده و مجموع این حجم کاری و بار کاری که به دلیل مکانیابی مجدد قرار است به آن اضافه شود، نباید از یک حد مشخصی بزرگتر باشد. تنها مدل عنایتی و همکاران (۱) مساله حجم کاری اضافه شده را در نظر گرفتند. بنابراین مدل‌های بیشتری در آینده می‌توانند روی این موضوع تمرکز کنند. مدل ما نیز با الگو گرفتن از محدودیت حجم کاری در مدل عنایتی و همکاران (۱) به این مساله پرداخته، و از باز مکانیابی آمبولانس‌هایی که محدودیت حجم کاری آن‌ها نقض می‌شوند جلوگیری به عمل می‌آورد. مساله دیگر تقاضای متغیر با زمان است. بنا به تغییر شیفت‌های کاری و بازه زمانی که در آن هستیم، الگوهای تقاضای مناطق مختلف تغییر کرده و پوشش مناطق تقاضا توسط پایگاه‌های اورژانس باید متناسب با وزن تقاضای مناطق صورت گیرد. ما بر اساس داده‌های گذشته جمع آوری شده، روز کاری را به چند قسمت مختلف تقسیم کرده و وزن تقاضایی مناطق را بر اساس این داده‌ها تفکیک می‌کنیم. بر اساس بازه زمانی که در آن قرار داریم، تقاضای مناطق به روزرسانی می‌گردد. همچنین محدودیت‌های پوششی در مدل ما بر اساس تعداد پوشش در لحظه تصمیم گیری، مدل سازی شده‌اند. بسته به تعداد آمبولانس‌های در دسترس و مکان قرارگیری آن‌ها، تعداد پوشش تقاضا تغییر خواهد کرد. تعداد پوشش تقاضا در مدل ما در هنگام اجرای مدل به روزرسانی می‌گردد.

جدول ۲- دسته بندی ادبیات بر اساس توابع هدف و محدودیت‌ها

نویسنده	جندرو و همکاران (۲۰۰۱)	اندرسون و همکاران (۲۰۰۷)	نوم و همکاران (۲۰۱۳)	معینی و همکاران (۲۰۱۵)	ماسون (۲۰۱۵)	جاگتنبرگ و همکاران (۲۰۱۵)	وینرولد و همکاران (۲۰۱۷)	عنایتی و همکاران (۱) (۲۰۱۸)	عنایتی و همکاران (۲) (۲۰۱۸)	کاروالیو و همکاران (۲۰۲۰)	مدل حاضر
اهداف											
حد اکثر سازی پوشش وزنی تقاضا								√			√
حد اکثر سازی پوشش تقاضای دو آمبولانسه	√			√	√						√
حداقل سازی تعداد بازمکانیابی			√								
حداقل سازی هزینه بازمکانیابی	√			√	√						√
حداقل سازی زمان سفر		√						√			√
حداقل سازی زمان پاسخ										√	
حداقل سازی تعداد تماس‌های پاسخ داده نشده			√			√			√	√	
حداقل سازی جریمه مورد انتظار							√			√	
حداقل سازی پوشش با شعاع زمانی طولانی تر											√
محدودیت‌های پوشش											
حداقل یک پوشش نقاط تقاضا در شعاع ۲۱ یا ۲۲	√			√							
α درصد از نقاط تقاضا در شعاع ۲۱ پوشش داده شوند	√		√	√							
حداقل یک پوشش نقاط تقاضا در شعاع ۲۱ یا ۲۲ یا ۲۳ در صورت انتخاب متغیر پوشش توسط مدل								√			√
محدودیت‌های پایگاه											
حداکثر یک آمبولانس در هر پایگاه							√				
حداکثر pJ آمبولانس در هر پایگاه	√		√	√	√				√		√
محدودیت‌های بازمکانیابی											
حداکثر یک بازمکانیابی						√					
حداکثر S بازمکانیابی								√			
مدت زمان بازمکانیابی								√		√	√
دستیابی به یک سطح خدمت مشخص		√								√	√
معیار تغییر حالت سیستم											
نرخ ورود تقاضا یا تماس				√	√			√		√	√
تعداد آمبولانس در دسترس (نرخ اختلال)	√	√	√								√
هزینه بازمکانیابی	√										
زمان سفر			√					√			

۳- تعریف مساله

عنوان معیار انجام ریلوکیشن در سیستم هستند، به روز رسانی می‌شوند.

• هنگام اتمام ماموریت یک آمبولانس، اگر بر اساس معیار های انجام ریلوکیشن، سیستم نیاز به مکانیابی مجدد داشته باشد، ابتدا آمبولانس به نزدیک ترین پایگاه به عنوان یک آمبولانس بیکار تخصیص داده شده و سپس اقدام به مکانیابی مجدد خواهد شد.

• در صورت مکانیابی مجدد آمبولانس ها و تعیین پایگاه جدید، ابتدا آمبولانس ها در پایگاه جدیدشان مستقر شده و سپس پارامتر های پویای مساله به روز رسانی خواهند شد.

۳-۳- تصمیم به باز مکانیابی آمبولانس ها از طریق مدل

ریاضی

اطلاعات و پارامترهای مورد نیاز وارد مدل ریاضی شده و مدل درباره باز مکانیابی آمبولانس ها و مکان جدید آن ها تصمیم می‌گیرد.

۳-۴- اجرای تصمیم باز مکانیابی آمبولانس ها و به روز

رسانی سیستم

۴- مدل سازی ریاضی

ما یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح خطی برای مساله مکانیابی مجدد آمبولانس ها با رویکرد آنالین توسعه داده ایم. این مدل سه هدفه می‌باشد که علاوه بر حداکثر سازی پوشش تقاضا و حداقل سازی زمان سفر ناشی از تصمیم مکانیابی مجدد به دنبال حداقل سازی پوشش نقاط تقاضا با شعاع زمانی بالاتر به منظور اولویت دادن به تقاضاهای فوق اورژانسی می‌باشد. هم چنین این مدل از جایجایی آمبولانس هایی که محدودیت حجم کاری شان نقض می‌شود، جلوگیری می‌کند.

۴-۱ مفروضات

- اولویت مدیریت سیستم اورژانس، پوشش حداکثری نقاط تقاضا در شعاع r_1 دقیقه ای است.
- منطقه تقاضای مساله بر اساس مساحت، به نقاط با مساحت های تقریباً برابر تقسیم شده است.

ناحیه شرقی، یکی از نواحی پر تقاضا در تهران است. این ناحیه دارای جمعیت تقریبی ۳ میلیون نفر با مساحت ۱۷۰ کیلومتر مربع می‌باشد. به طور متوسط در هر ساعت ۱۹ تماس به این ناحیه وارد می‌شود که با در دست داشتن ۳۰ آمبولانس در ۳۰ پایگاه باید جوابگوی تمامی تقاضاها باشد. مهم ترین مشکل سیستم اورژانس در ناحیه شرقی، عدم پوشش تمامی تقاضاها در شعاع زمانی مورد نیازشان می‌باشد. رویکردی که سیستم اورژانس در این ناحیه به کار گرفته است یک رویکرد ثابت (Static Policy) می‌باشد. به همین منظور ما سیاست مکانیابی مجدد با رویکرد آنالین را برای برطرف کردن این مشکل در قالب یک مدل ریاضی ارائه می‌کنیم. در این چارچوب، برخی رویدادها موجب تغییر حالت سیستم می‌شوند. شرح رویدادهای ارائه شده در مدل ما به منظور مکانیابی مجدد آمبولانس ها به صورت زیر است:

۳-۱- تغییر حالت سیستم

حالت سیستم می‌تواند در اثر یکی از رویدادهای زیر تغییر کند:

- ورود تماس (call) یا بروز اختلال در سیستم که منجر به ورود درخواست های زیاد در یک بازه زمانی کوتاه می‌شود.
- به اتمام رسیدن ماموریت یک آمبولانس مشغول به خدمت
- مکانیابی مجدد آمبولانس های بیکار و جایجایی آنها به منظور استقرار در پایگاه جدید

۳-۲- به روز رسانی سیستم متناسب با هر کدام از رویدادها

- در صورت ورود تماس به سیستم، ابتدا تماس از جهت شعاع زمانی مورد نیاز و درجه اورژانسی بودن بررسی شده و در یکی از گروه های تقاضا قرار می‌گیرد. سپس بر اساس نزدیک ترین آمبولانس موجود در شعاع زمانی مورد نیاز، آمبولانس به محل اعزام می‌شود. در صورت نبود آمبولانس در شعاع زمانی مورد نیاز، نزدیک ترین آمبولانس در شعاع بعدی مد نظر می‌باشد. همچنین هنگام تصمیم گیری درباره اعزام، تمام آمبولانس های ثابت در پایگاه ها و آمبولانس هایی که ماموریتشان به اتمام رسیده و در حال بازگشت به پایگاه هستند، مد نظر می‌باشند. پس از اعزام و کاهش تعداد آمبولانس های در دسترس، پارامتر های پویای مساله مانند تعداد پوشش نقاط تقاضا در شعاع های زمانی مختلف که به

$\Gamma_3, \Gamma_2, \Gamma_1$	شعاع‌های زمانی برای پوشش تقاضای مناطق ($\Gamma_3 > \Gamma_2 > \Gamma_1$)
γ	حداکثر بار کاری که هر آمبولانس در هر شیفت کاری می‌تواند فعال باشد
H_{ij}	ماتریس صفر و یک پوشش منطقه تقاضای i توسط پایگاه j در زمان Γ_1 دقیقه
S_{ij}	ماتریس صفر و یک پوشش منطقه تقاضای i توسط پایگاه j در زمان Γ_2 دقیقه
M_{ij}	ماتریس صفر و یک پوشش منطقه تقاضای i توسط پایگاه j در زمان Γ_3 دقیقه
B_{ij}	مدت زمان سفر بین پایگاه‌های اورژانس در کوتاه‌ترین مسیر
C_{ij}	ماتریس صفر و یک جابجایی بین پایگاه‌های اورژانس
پارامترهای پویا	
d_i^1	تقاضای منطقه i برای یک آمبولانس
d_i^2	تقاضای منطقه i برای دو آمبولانس
V_j	تعداد آمبولانس‌های حاضر در پایگاه j
O_i	تعداد آمبولانس‌هایی که منطقه i را در شعاع r_1 پوشش می‌دهند
N_i	تعداد آمبولانس‌هایی که منطقه i را در شعاع r_2 پوشش می‌دهند

- مبنای پوشش نقاط تقاضا توسط پایگاه‌های اورژانس در شعاع‌های مد نظر، سریع‌ترین مسیر ممکن از پایگاه به منطقه تقاضا می‌باشد. منظور از پوشش، حداکثر زمان پاسخ به یک تماس از یک پایگاه اورژانس می‌باشد.
- هر منطقه تقاضا می‌تواند دو نوع تماس ایجاد کند. تماس اورژانسی که به یک آمبولانس نیاز داشته و تقاضای اورژانسی که به دو آمبولانس احتیاج دارد. گاهی اوقات به دلیل بروز برخی حوادث، نیاز به اعزام بیش از یک آمبولانس می‌باشد. در این نوع تماس‌ها ما فرض می‌کنیم، دو آمبولانس باید اعزام گردد.
- تقاضای مناطق در مدل بر اساس داده‌های تاریخی نقاط و به صورت وزن در نظر گرفته می‌شود.
- تقاضای مناطق متناسب با دوره‌های زمانی که سیستم در آن قرار دارد، به صورت پویا تغییر می‌کند.
- ساعات کاری سیستم اورژانس به دو شیفت ۱۲ ساعته تقسیم شده است. شیفت اول از ساعت ۶ صبح تا ۱۸ و شیفت دوم از ساعت ۱۸ تا ۶ صبح روز بعد در نظر گرفته می‌شود.

۲-۴ اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها

جدول ۳- مشخصات مدل ریاضی

مجموعه‌ها و اندیس‌ها	
$i \{1, 2, \dots, n\}$	نقاط تقاضا
$j, f \{1, 2, \dots, m\}$	پایگاه‌های اورژانس
$k \{1, 2, \dots, k\}$	آمبولانس‌های در دسترس
پارامترهای ثابت	
P_j	حداکثر تعداد آمبولانس مجاز در هر پایگاه

۳-۴ توابع هدف و محدودیت ها

به منظور پوشش نقاط تقاضا توسط پایگاه‌های اورژانس، سه شعاع پوششی ۷- ۱۵ و ۲۵ دقیقه ای در نظر گرفته شده است. هر پایگاه اورژانس چندین نقطه تقاضا را در شعاع‌های مختلف پوشش می‌دهد. هنگام روی دادن اختلال در سیستم، مکانیابی مجدد آمبولانس‌ها به گونه ای صورت می‌گیرد که پوشش نقاط تقاضا توسط پایگاه‌ها حداکثر شود. بنابراین تابع هدف اول به دنبال پوشش حداکثری ایجاد شده توسط پایگاه‌ها می‌باشد. از آن جایی که تقاضاهای فوق اورژانسی نیاز به رسیدن آمبولانس در مدت زمان بسیار کوتاهی (کمتر از ۷ دقیقه) دارند، مدل به گونه‌ای عمل می‌کند که به مناطق پر تقاضا حداقل ۲ آمبولانس با زمان پاسخ‌دهی حداکثر ۷ دقیقه اختصاص دهد. با این کار علاوه بر اینکه نیاز مناطق پر تقاضا از نظر پوشش با کمترین زمان برآورد می‌شود، مناطقی که نیاز به حداقل دو آمبولانس دارند نیز با توجه به منابع موجود، توسط دو آمبولانس تحت پوشش قرار خواهند گرفت.

تابع هدف شماره (۱) به دنبال حداکثر سازی پوشش تقاضای مناطق در شعاع پوششی حداکثر I_1 دقیقه ای می‌باشد. پوشش حداکثری و مکانیابی مجدد آمبولانس‌ها همراه با هزینه می‌باشد. یکی از هزینه‌هایی که در این تصمیم نهفته، بار کاری اضافه ای که است که به آمبولانس‌های بیکار وارد می‌شود. تابع هدف شماره (۲) به دنبال جابجایی آمبولانس‌های بیکار در کوتاه‌ترین زمان ممکن می‌باشد. به طوری که کمترین بار کاری به آن‌ها وارد شده و زمان سفر حداقلی را طی کنند. علاوه بر آن تابع هدف دوم از جابجایی‌های غیر معمول آمبولانس‌ها جلوگیری می‌نماید. یعنی آمبولانس‌ها نمی‌توانند مسافت‌های طولانی را برای جابجایی انتخاب کنند. تابع هدف شماره (۳) به دنبال تخصیص حداقل آمبولانس‌ها به مناطق تقاضا در شعاع‌های پوششی I_2 و I_3 دقیقه ای می‌باشد. به طوریکه اولویت مدل تخصیص آمبولانس‌ها به پایگاه‌هایی است که مناطق تقاضا را در شعاع I_1 دقیقه ای پوشش می‌دهند. محدودیت شماره (۴) تعداد آمبولانس‌هایی که برای پوشش مناطق تقاضا در شعاع زمانی I_1 دقیقه قرار می‌گیرند را وابسته به مقدار گیری متغیرهای X_i^1 و X_i^2 می‌کند. برای مثال اگر X_i^1 مقدار یک بگیرد، حداقل یک آمبولانس باید در شعاع I_1 دقیقه ای منطقه تقاضای مورد نظر قرار بگیرد. این مقدار گیری بر اساس وضعیت فعلی نقاط تقاضا از نظر پوشش توسط آمبولانس‌ها صورت می‌گیرد.

Q_i	تعداد آمبولانس‌هایی که منطقه i را در شعاع I_3 پوشش می‌دهند
L_{kf}	اگر آمبولانس k در پایگاه f قرار داشته باشد ۱ می‌شود.
U_t	حداکثر زمان تجمیع شده باقی مانده برای آمبولانس‌ها بعد از گرفتن تصمیم باز مکانیابی در زمان t
β_k^t	زمان تجمعی فعالیت آمبولانس k تا زمان t
متغیرهای تصمیم	
Y_{fj}^k	اگر آمبولانس k از آبه j منتقل شود یک می‌شود
X_i^1	اگر منطقه تقاضای i حداقل توسط یک آمبولانس در شعاع I_1 تحت پوشش قرار گیرد
X_i^2	اگر منطقه تقاضای i حداقل توسط دو آمبولانس در شعاع I_1 تحت پوشش قرار گیرد
Z_i	اگر منطقه i حداقل توسط یک آمبولانس در شعاع I_2 تحت پوشش قرار گیرد
W_i	اگر منطقه i حداقل توسط یک آمبولانس در شعاع I_3 تحت پوشش قرار گیرد
η_{fj}^k	یک می‌شود اگر حاصل ضرب Y_{jf}^k و Y_{fj}^k یک شود، و صفر می‌شود اگر حداقل یکی از آن‌ها صفر باشد

محدودیت‌های شماره (۵) و (۶) نیز همانند محدودیت شماره (۴) برای شعاع‌های زمانی T_2 و T_3 دقیقه ای عمل می‌کنند. آن‌ها وابسته به مقدار گیری متغیرهای Z, W هستند. به طوریکه اگر این متغیرها مقدار ۱ بگیرند تعداد آمبولانس‌هایی که به مناطق تقاضای آنها تعلق می‌گیرد حداقل باید ۱ باشد. محدودیت شماره (۷) به این نکته اشاره دارد که زمانی به یک نقطه تقاضا حداقل ۲ آمبولانس تخصیص داده می‌شود که حداقل یک آمبولانس به آن اختصاص یافته باشد. محدودیت شماره (۸) محدودیت ظرفیت پایگاه‌های اورژانس را نشان داده و اجازه نمی‌دهد که بیش از یک تعداد مشخصی آمبولانس به پایگاه‌ها تخصیص داده شود. محدودیت شماره (۹) اشاره به محدودیت حجم کاری آمبولانس‌ها در شیفت کاری دارد. پارامتر β اشاره به حجم جابجایی انجام شده تا دوره t توسط هر آمبولانس ناشی از تصمیم بازمکانیابی دارد. مقدار (U_t) هر زمانی که از مدل بخواهد خروجی گرفته شود، باید بر اساس فرمول زیر به روزرسانی گردد.

$$U_t = \frac{\gamma * t}{T} \quad (15)$$

مقدار T شیفت کاری در طول روز را نشان می‌دهد (۱۲ ساعت). مقدار γ به حداکثر حجم کاری در طول روز که هر آمبولانس تمایل به کار کردن دارد، اشاره می‌کند. (۱۰ ساعت برای شیفت ۱۲ ساعته) مقدار t دوره زمانی که در آن قرار داریم نشان داده که در هر بار تصمیم گیری باید به روز رسانی شود. در واقع این محدودیت از تصمیمات جابجایی آمبولانس‌هایی که زمان سفرشان باعث نقض شدن حداکثر حجم کاری که آنها تمایل دارند کار کنند می‌شود، جلوگیری می‌کند. محدودیت شماره (۱۰) از جابجایی رفت و برگشت بین دو پایگاه جلوگیری می‌کند. این محدودیت غیر خطی بوده و به منظور خطی سازی آن، سه محدودیت زیر را به مدل اضافه کردیم.

$$\eta_{fj}^k \leq Y_{fj}^k \quad \forall k, f \neq j \quad (16)$$

$$\eta_{fj}^k \leq Y_{jf}^k \quad \forall k, f \neq j \quad (17)$$

$$\eta_{fj}^k \geq Y_{fj}^k + Y_{jf}^k - 1 \quad \forall k, f \neq j \quad (18)$$

در این محدودیت‌ها رابطه (۱۹) برقرار است.

$$\eta_{fj}^k = Y_{fj}^k Y_{jf}^k \quad \forall k, f \neq j \quad (19)$$

$$\max \sum_i (d_i^1 X_i^1 + d_i^2 X_i^2) \quad (1)$$

$$\min \sum_k \sum_f \sum_{j \neq f} Y_{fj}^k B_{fj} C_{fj}^k \quad (2)$$

$$\min \sum_i (z_i + w_i) \quad (3)$$

s.t

$$O_i + \sum_k \sum_f \sum_{j \neq f} Y_{fj}^k L_{kf} C_{fj}^k H_{ij} - \sum_k \sum_f \sum_{j \neq f} Y_{fj}^k L_{kf} C_{fj}^k H_{if} \geq X_i^1 + X_i^2 \quad \forall i \quad (4)$$

$$N_i + \sum_k \sum_f \sum_{j \neq f} Y_{fj}^k L_{kf} C_{fj}^k S_{ij} - \sum_k \sum_f \sum_{j \neq f} Y_{fj}^k L_{kf} C_{fj}^k S_{if} \geq Z_i \quad \forall i \quad (5)$$

$$Q_i + \sum_k \sum_f \sum_{j \neq f} Y_{fj}^k L_{kf} C_{fj}^k M_{ij} - \sum_k \sum_f \sum_{j \neq f} Y_{fj}^k L_{kf} C_{fj}^k M_{if} \geq W_i \quad \forall i \quad (6)$$

$$X_i^1 \geq X_i^2 \quad \forall i \quad (7)$$

$$V_j + \sum_f \sum_k Y_{fj}^k C_{fj}^k - \sum_f \sum_k Y_{jf}^k C_{fj}^k \leq P_j \quad \forall j \quad (8)$$

$$\beta_k + \sum_f \sum_{j \neq f} Y_{fj}^k B_{fj} C_{fj}^k L_{kf} \leq U_t \quad \forall k \quad (9)$$

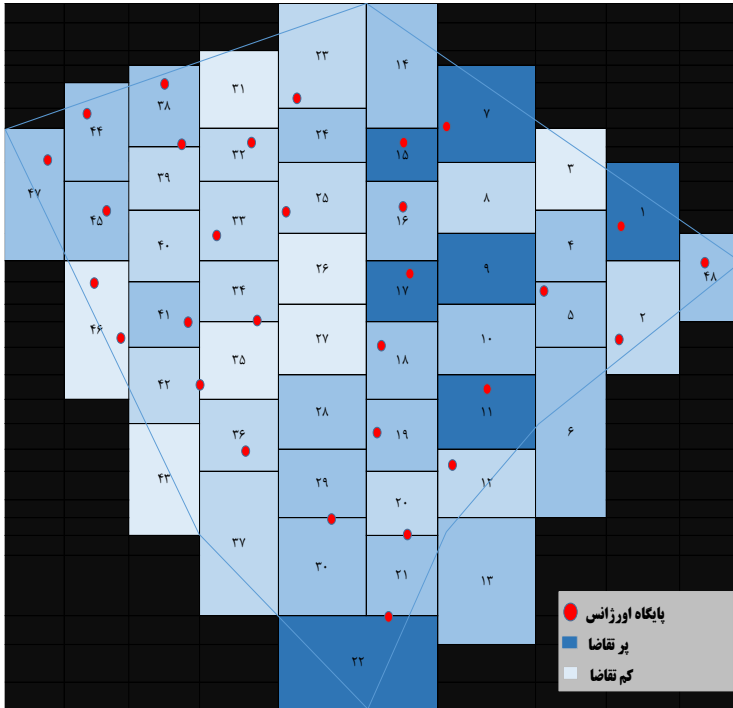
$$\left(\sum_k Y_{fj}^k C_{fj}^k L_{kf} \right) \left(\sum_k Y_{jf}^k C_{jf}^k L_{kj} \right) = 0 \quad \forall f, j \neq f \quad (10)$$

$$L_{kf} \geq Y_{fj}^k C_{fj}^k \quad \forall k, f, j \quad (11)$$

$$Z_i + W_i \geq 1 - X_i^1 \quad \forall i \quad (12)$$

$$\sum_j L_{kf} Y_{fj}^k \leq 1 \quad \forall k, f \quad (13)$$

$$X_i^1, X_i^2, Y_{fj}^k, Z_i, W_i, \eta_{fj}^k \in \{0, 1\} \quad (14)$$



شکل ۱ - تقسیم بندی نواحی تقاضا در منطقه شرق به همراه پایگاه‌های اورژانس

جدول ۴ - برخی از اطلاعات مساله

تعداد پایگاه	۳۰
تعداد آمبولانس	۳۰
تعداد نقاط تقاضا	۴۸
ظرفیت هر پایگاه	۳
شعاع‌های پوشش (دقیقه)	۷-۱۵-۲۵
متوسط تعداد پوشش نقاط تقاضا در شعاع ۷ دقیقه ای (آمبولانس)	۲
متوسط تعداد پوشش نقاط تقاضا در شعاع ۱۵ دقیقه ای (آمبولانس)	۵
متوسط تعداد پوشش نقاط تقاضا در شعاع ۲۵ دقیقه ای (آمبولانس)	۹

ابتدا با توجه به حداکثر سازی یا حداقل سازی توابع، بهترین مقدار و بدترین مقدار هر تابع را بدست می‌آوریم. سپس برای هر تابع رابطه زیر را تشکیل می‌دهیم.

محدودیت‌های (۱۶) و (۱۷) تضمین می‌کنند که اگر حداقل یکی از متغیرهای Y_{jt}^k و Y_{jt}^k صفر شوند، متغیر η_{jt}^k صفر خواهد شد. محدودیت (۱۸) نیز تضمین می‌کند، در صورت یک شدن هر دو متغیر Y_{jt}^k و Y_{jt}^k متغیر η_{jt}^k یک می‌شود.

محدودیت (۱۱) جابجایی آمبولانس‌ها از یک پایگاه به پایگاه دیگر را در صورتی انجام می‌دهد که آمبولانس در پایگاه اول قرار داشته باشد. همچنین این محدودیت از تخصیص یک آمبولانس به چندین پایگاه جلوگیری می‌نماید. اگر مدل به یک نقطه تقاضا آمبولانسی به شعاع I_1 دقیقه ای تخصیص ندهد، محدودیت شماره (۱۲) مدل را وادار به تخصیص حداقل یک آمبولانس در شعاع‌های I_2 و I_3 دقیقه ای می‌کند. گاهی اوقات ممکن است مدل برای یک آمبولانسی که در یک پایگاه قرار گرفته، چندین جابجایی را پیشنهاد دهد. محدودیت (۱۳) از این حالت جلوگیری می‌کند. محدودیت (۱۴) نیز نوع متغیرهای تصمیم مدل ارائه شده را نشان می‌دهد.

۵- اجرای مدل و نتایج محاسباتی

مطالعه موردی انجام شده در این مقاله مربوط به ناحیه شرق تهران می‌باشد. جمعیت این ناحیه حدود ۳ میلیون نفر - مساحت آن ۱۷۰ کیلومتر مربع و به ۴۸ ناحیه تقسیم شده‌است. در این مدل ما فرض می‌کنیم که هر یک از تماس‌های فوق اورژانسی باید در کم‌تر از ۷ دقیقه پوشش داده شوند. ۳۰ آمبولانس در ۳۰ پایگاه اورژانس در ناحیه شرق تهران آماده خدمت رسانی خواهند بود. در شکل زیر ۳۰ پایگاه به همراه ۴۸ ناحیه تقاضا در ناحیه شرق تهران نمایش داده شده است. مدل برنامه ریزی خطی در نرم افزار گمز ۲۳/۶ کد شده و سپس توسط حل کننده CPLEX روی لپتاپ با مشخصات Core i5 و حافظه داخلی ۴ گیگابایت و سیستم عامل Win8 در مدت زمان ۲۸ ثانیه حل شده است.

در (جدول ۴) برخی از اطلاعات مدل نشان داده شده است.

۵-۱ روش حل مساله چند هدفه

با توجه به سه هدفه بودن مدل و هم جنس نبودن توابع هدف ابتدا باید توابع را هم جنس کرده و سپس مساله را به صورت تک هدفه حل کنیم. برای حل این موضوع از روش مجموع وزنی استفاده شده است.

آمبولانس‌ها به پایگاه جدیدی تخصیص داده شوند. همچنین در سیاست ما جایابی آمبولانس‌های بیکار به منظور پوشش بهتر تقاضای آینده اجرا می‌شود. داده‌های مساله شامل ۱۴۰۰۰ تماس از یک بازه زمانی یک ماهه هستند. خلاصه آماری داده‌های جمع‌آوری شده در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- خلاصه‌ای از داده‌های آماری موجود سیستم اورژانس در شرق تهران

متوسط تعداد تماس در هر شیفت	۲۳۶
متوسط نرخ تماس در هر ساعت	۱۹
اعزام به بیمارستان	٪۸۱

ما داده‌های واقعی را به منظور مقایسه سیاست خودمان با سیاست ثابت موجود در منطقه مورد مطالعه، در یک محیط شبیه‌سازی شده، پیاده‌سازی و اجرا می‌کنیم. شبیه‌سازی داده‌ها برای یک بازه زمانی یک هفته‌ای انجام شده است. خروجی‌های مدل ما و سیاست ثابت در سه معیار عملکردی مقایسه خواهد شد. این معیارها عبارت‌اند از متوسط تعداد آمبولانس‌های موجود برای پوشش تماس‌ها - متوسط نرخ پوشش تقاضا و متوسط زمان پاسخ‌دهی.

۵-۲-۱ مقایسه معیارهای عملکردی (زمان پاسخ‌دهی - نرخ

پوشش و تعداد آمبولانس‌های در دسترس)

فرآیند اجرای مدل بر اساس چهار مرحله بیان شده در قسمت سه می‌باشد. برخی از داده‌ها همانند زمان ورود تماس، نوع تماس و منطقه تقاضای تماس در رویکرد ما و رویکرد ثابت، یکسان می‌باشد. تماس‌ها در زمان‌های مشخصی و از مناطق تقاضای مشخصی وارد سیستم می‌شوند. پس از ورود تماس تعداد آمبولانس‌های موجود در شعاع زمانی مورد نیاز آن توسط پارامترهای $N_i - O_i$ و Q_i تعیین می‌شود. اگر تعداد آمبولانس‌های موجود، تعداد آمبولانس‌های مورد نیاز تماس را پوشش دهند، بدین معنی است که تماس در شعاع مورد نیاز پاسخ داده خواهد شد. در غیر این صورت، نزدیک‌ترین آمبولانس‌ها در شعاع‌های زمانی بعدی به تماس پاسخ خواهند داد. پس از اعزام، آمبولانس مدت زمانی را در صحنه مشغول به فعالیت است. این زمان بر اساس داده‌های واقعی تماس‌ها در نظر گرفته می‌شود. ممکن است بعد از آن آمبولانس‌ها بیماران را به بیمارستان منتقل کنند. بر اساس داده‌ها ٪۸۱ تماس‌ها اعزام به بیمارستان داشته‌اند. همچنین مدت زمان اعزام از صحنه تا بیمارستان نیز بر اساس داده‌های واقعی تماس در نظر

$$\max - Z \quad (20)$$

$$\max - \min$$

$$\frac{Z - \min}{\max - \min} \quad (21)$$

اگر تابع هدف از نوع حداکثر سازی باشد، از رابطه (۲۰) و اگر تابع از نوع حداقل سازی باشد از رابطه (۲۱) استفاده می‌کنیم. منظور از پارامتر (Z) در روابط بالا توابع هدف فعلی مساله می‌باشد. همچنین مقادیر (\max) و (\min) با توجه به نوع توابع، بهترین و بدترین مقدار توابع را نشان می‌دهند. پس از تشکیل روابط بالا برای تمامی توابع هدف، تابع نهایی را تشکیل می‌دهیم. این تابع از نوع حداقل سازی بوده و با توجه به وزن و اهمیت هر تابع هدف، ابتدا آنها را هم‌جنس کرده و سپس به دنبال حداقل کردن فاصله توابع از حالت ایده‌آل است. ما با استفاده از روش AHP فازی وزن توابع هدف را محاسبه کردیم. این رویکرد بر اساس روش آنالیز توسعه چانگ [۸] وزن توابع را محاسبه می‌کند. تابع هدف نهایی مساله به صورت زیر خواهد شد.

$$\min \quad 0.6 \left(\frac{\max_1 - (\sum_i (d^1_i X^1_i + d^2_i X^2_i))}{\max_1 - \min_1} \right) +$$

$$0.2 \left(\frac{(\sum_k \sum_f \sum_{j \neq f} Y^k_{fj} B_{fj} C_{fj}) - \min_2}{\max_2 - \min_2} \right) + \quad (22)$$

$$0.2 \left(\frac{(\sum_i (Z_i + W_i)) - \min_3}{\max_3 - \min_3} \right)$$

۵-۲ تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل

به منظور توصیف داده‌ها و ارزیابی مدل، ما سیاست توسعه داده شده توسط خودمان را با سیاست ثابت موجود مقایسه می‌کنیم. در سیاست ثابت پس از اتمام ماموریت، آمبولانس‌ها به پایگاه اولیه خود باز می‌گردند. اما در سیاست ما، پس از اتمام ماموریت، ممکن است

شده‌اند. و ۱۱٪ از تماس‌ها در شعاع‌های زمانی بعدی توسط نزدیک‌ترین آمبولانس‌ها پوشش داده شده‌اند. این درحالی است که نرخ پوشش تماس‌ها در سیاست ثابت ۷۳٪ می‌باشد.

در جدول ۷ متوسط زمان پاسخ به تماس‌ها در هر دو سیاست به تفکیک نوع تماس قرار داده شده است. سیاست ما به طور متوسط ۴.۴ دقیقه در زمان پاسخ‌دهی کاهش ایجاد کرده است. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط آندرس برگر و همکاران [۶] کاهش در زمان پاسخ‌دهی منجر به افزایش نرخ ترخیص از بیمارستان خواهد شد. آن‌ها نشان دادند، ۸.۳۷ دقیقه کاهش در زمان پاسخ به تماس منجر به افزایش ۶.۵ درصدی نرخ ترخیص از بیمارستان می‌شود. بر اساس نتایج این تحقیق، ما می‌توانیم ادعا کنیم با کاهش ۴.۴ دقیقه‌ای در زمان پاسخ، ۳.۴۲ درصد نرخ ترخیص از بیمارستان را افزایش خواهیم داد.

جدول ۷- مقایسه متوسط زمان پاسخ در هر دو سیاست (دقیقه)

متوسط زمان پاسخ			
نوع تماس	سیاست ما	سیاست ثابت	درصد بهبود
۱ d_i	۶.۵	۹.۲	۲۹٪
۲ d_i	۶.۵	۸.۸	۲۶٪
کل تماس‌ها	۸.۲	۱۲.۶	۳۵٪

۲-۲-۵ روند تغییر تابع هدف با توجه به تغییر ظرفیت هنگام رخ دادن اختلال کم، متوسط و زیاد در سیستم

پارامتر اختلال یکی دیگر از پارامترهای اثر گذار در سیستم است. اختلال را می‌توان در سه سطح کم، متوسط و زیاد در مساله باز مکانیابی در نظر گرفت. اختلال کم بدین معنی است که تعداد آمبولانس‌های در دسترس یا بیکار باقی مانده بعد از اختلال به وجود آمده به نسبت کل آمبولانس‌ها زیاد می‌باشد. علاوه بر اختلال، پارامتر دیگر میزان ظرفیت پایگاه‌ها است. ظرفیت به معنای حداکثر تعداد آمبولانسی که در پایگاه می‌تواند قرار بگیرد است. در این قسمت اثرات تغییر ظرفیت بر مقدار تابع هدف به ترتیب هنگام رخ دادن اختلال کم، متوسط و زیاد را نشان می‌دهیم.

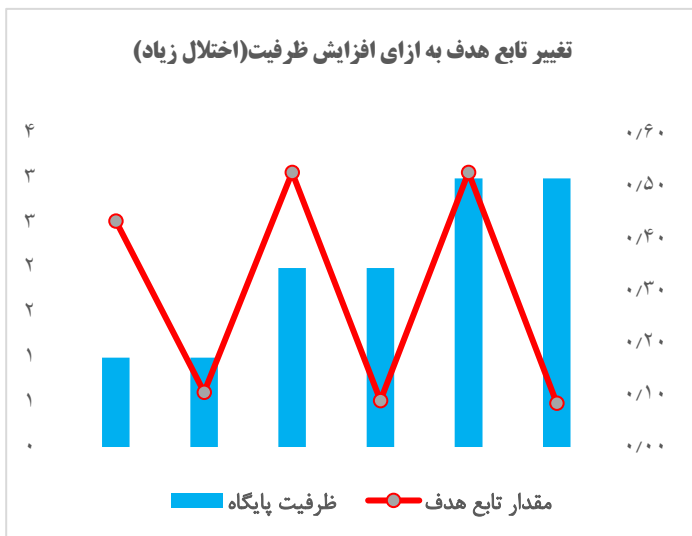
گرفته می‌شود. ما مجموع زمان فعالیت آمبولانس‌ها را از لحظه اعزام تا اتمام عملیات در صحنه و یا بیمارستان در نظر می‌گیریم. بنابراین با توجه به اینکه مدت زمان ماندن در صحنه و مدت زمان اعزام از صحنه تا بیمارستان برای هر تماس در هر دو سیاست یکسان است، مدت زمان پاسخ به تماس که در رویکرد ما نسبت به سیاست ثابت متفاوت است، عامل تمایز مجموع مدت زمان فعالیت آمبولانس‌ها نسبت به سیاست ثابت می‌باشد. ما شبیه‌سازی را در تمام شیفت‌های کاری (مجموعاً ۱۴ شیفت کاری) انجام داده‌ایم. معیارهای عملکردی را در تمام شیفت‌ها محاسبه شده‌اند. نتایج نشان داده شده، متوسط معیارهای عملکردی محاسبه شده در تمام شیفت‌ها می‌باشند. اولین معیار عملکردی، متوسط تعداد آمبولانس‌های در دسترس می‌باشد. ما با استفاده از پارامترهای Q_i و $Ni-O_i$ در هر بار ورود تماس تعداد آمبولانس‌های در دسترس را محاسبه کرده‌ایم. جدول ۶ نتایج را به ازای نوع تماس‌ها و همچنین تمامی تماس‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۶- مقایسه نتایج حاصل از سیاست‌ها در متوسط تعداد آمبولانس‌های در دسترس و متوسط نرخ پوشش

نوع تماس	سیاست ما		سیاست ثابت		درصد بهبود	
	متوسط نرخ پوشش	متوسط تعداد آمبولانس‌های در دسترس	متوسط نرخ پوشش	متوسط تعداد آمبولانس‌های در دسترس	درصد بهبود	سیاست ثابت
۱ d_i	۸۸٪	۶۱٪	۴۴٪	۱۳۲	۰.۸۴	۵۷٪
۲ d_i	۸۲٪	۵۵٪	۴۹٪	۲	۱.۵۳	۳۱٪
کل تماس‌ها	۸۹٪	۷۳٪	۲۲٪	۱.۶	۱.۱۲	۵۴٪

معیار عملکردی بعدی نرخ پوشش می‌باشد. اگر پاسخ به یک تماس در شعاع زمانی مورد نیاز آن صورت گیرد، به معنای پوشش آن تماس است. در جدول ۶ ما نرخ پوشش را بر اساس انواع تقاضاها دسته بندی کرده و آن را با سیاست ثابت مقایسه می‌کنیم. در سیاست ثابت نرخ پوشش بر اساس زمان پاسخ‌دهی تماس محاسبه شده است. اگر زمان پاسخ‌دهی در شعاع مورد نیاز تماس قرار داشته باشد، به معنی پوشش تماس می‌باشد. همانطور که جدول ۶ نشان می‌دهد، سیاست ما منجر به استفاده بهینه از منابع شده است. و نرخ دسترس پذیری آمبولانس‌ها در هر کدام از تماس‌ها نسبت به سیاست ثابت بهبود پیدا کرده است. علاوه بر آن ۸۹٪ تماس‌ها در شعاع مورد نیازشان پاسخ داده

باعث بهبود در نتایج شده ولی در اختلال زیاد تغییر ظرفیت پایگاه به دلیل تعداد پایین آمبولانس‌های در دسترس تاثیری در نتایج ندارد.



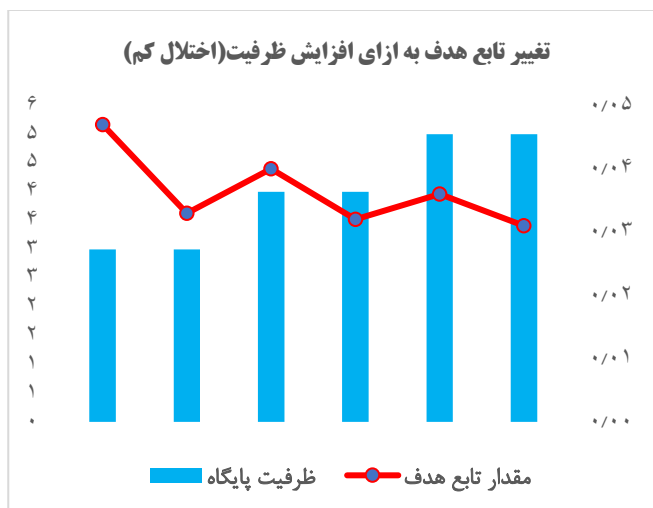
شکل ۴- تغییر تابع هدف به ازای افزایش ظرفیت در اختلال زیاد

۳-۲-۵ بررسی تاثیر تعداد بازمکانیابی آمبولانس‌ها بر روی میزان بهبود در پوشش تقاضاهای فوق اورژانسی

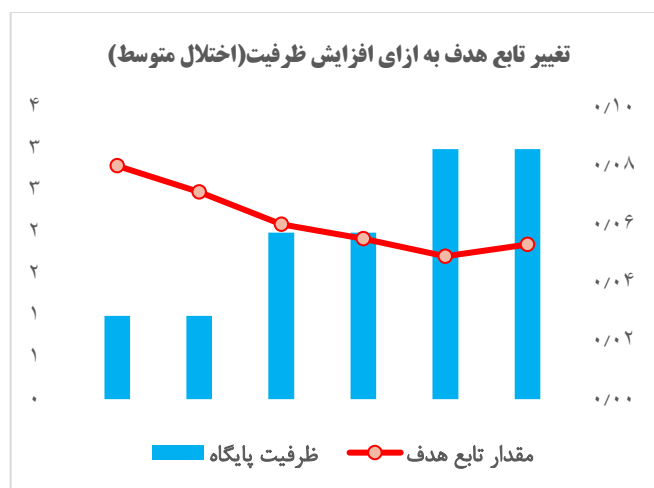
جابجایی آمبولانس‌های بیکار بین پایگاه‌ها در تمامی حالت‌های مختلف مساله باعث بهبود در پوشش تقاضاهای فوق اورژانسی شده است. اما باید تعداد جابجایی آمبولانس‌ها بین پایگاه‌ها نیز مورد بررسی قرار بگیرد. ما رابطه بین تعداد بازمکانیابی و میزان بهبود در پوشش تقاضا را به صورت نمودار زیر نشان می‌دهیم. در ۲۷ مساله بررسی شده، پارامترهای مختلفی از جمله ظرفیت پایگاه، شعاع‌های پوشش نقاط تقاضا توسط پایگاه‌ها و سطح اختلال در سیستم لحاظ شده اند. ما تمامی مسائل حل شده را از نظر تعداد بازمکانیابی آن‌ها مرتب کرده و تاثیر آن بر روی میزان بهبود در پوشش تقاضا را نشان داده ایم. شکل ۵ نشان می‌دهد مدل ارائه شده تعداد باز مکانیابی‌ها را به گونه ای تنظیم می‌کند که میزان بهبود در سیستم افزایش یابد.

۳-۵ حل و بررسی یک نمونه از مساله باز مکانیابی

در این قسمت برای نشان دادن بهبود در پوشش نقاط تقاضا به وسیله باز مکانیابی آمبولانس‌ها یک مساله را در حالت اختلال متوسط در نظر گرفته و حل می‌کنیم.



شکل ۲- تغییر تابع هدف به ازای افزایش ظرفیت در اختلال ضعیف



شکل ۳- تغییر تابع هدف به ازای افزایش ظرفیت در اختلال متوسط

با توجه به تابع هدف نهایی ادغام شده که از نوع حداقل سازی است، ما اثرات تغییر ظرفیت پایگاه‌ها را بر روی مقدار تابع هدف در سطوح مختلف اختلال در سیستم بررسی کردیم. در اختلال زیاد و متوسط ظرفیت پایگاه از ۱ تا ۳ آمبولانس تغییر می‌کند. با توجه به بیشتر بودن تعداد آمبولانس‌ها در اختلال کم، ظرفیت پایگاه بین ۳ تا ۵ آمبولانس تغییر می‌کند. همانطور که در نمودارها مشاهده می‌شود، در اختلال کم و متوسط با افزایش ظرفیت پایگاه‌ها مقدار تابع هدف روندی نزولی داشته و به حالت ایده آل نزدیک تر می‌شود. این روند در حالت اختلال زیاد به صورت تقریباً ثابت و تناوبی تکرار می‌شود. بنابراین میتوان گفت در اختلال کم و متوسط افزایش ظرفیت پایگاه

با توجه به زمانی که در شیفت کاری قرار داریم و داده‌های گذشته، وزن تقاضای مناطق فراخوانی می‌گردند. همچنین بنا به فعالیت‌های آمبولانس‌ها تا لحظه تصمیم‌گیری، حجم کاری تجمعی آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. پس از اجرا، مدل پیشنهاد جابجایی آمبولانس‌ها را به صورت زیر ارائه می‌دهد.

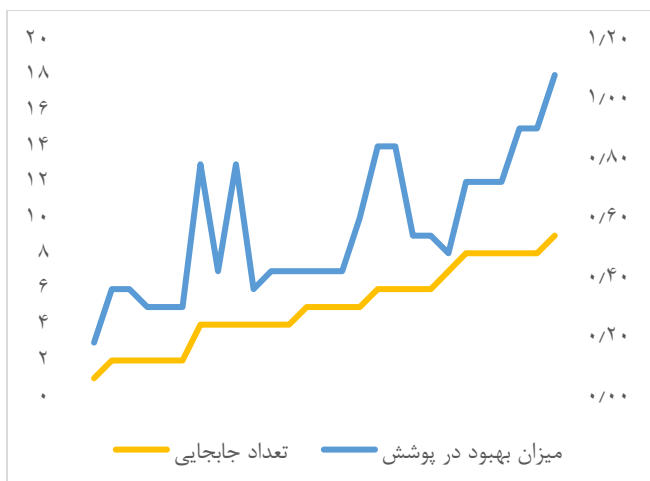
جدول ۹- جواب ارائه شده توسط مدل

به پایگاه	از پایگاه	آمبولانس
۱	۴	۱
۱۰	۱۱	۶
۲۰	۱۹	۷
۵	۸	۱۰
۱۸	۱۶	۱۸
۲۳	۲۱	۲۱
۲۶	۸	۹

به منظور بررسی جواب ارائه شده توسط مدل، تعداد پوشش نقاط تقاضا در شعاع ۲۱ دقیقه‌ای بعد از حل را با تعداد پوشش قبل از حل مقایسه می‌کنیم. همان‌طور که (جدول ۱۰) نشان می‌دهد، مدل جابجایی آمبولانس‌ها در پایگاه‌ها را به گونه‌ای انجام داده است که پوشش تقاضا در شعاع ۲۱ دقیقه‌ای برای نقاط پر تقاضا در مجموع ۸ واحد افزایش یافته است.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله یک مدل جدید آنلاین مکان‌یابی مجدد آمبولانس‌ها به منظور بهبود در پوشش تقاضاهای فوق‌اورژانسی با در نظر گرفتن محدودیت حجم کاری ارائه شده است. مساله بازماندگی شامل جابجایی وسایل نقلیه در دسترس در میان پایگاه‌ها برای تضمین یک سرویس مناسب برای بهبود پوشش تقاضا می‌باشد. مدل ارائه شده در جنبه‌های مختلفی در ادبیات سیستم اورژانس دارای نوآوری می‌باشد. مدل حاضر، به صورت یکپارچه علاوه بر در نظر گرفتن پوشش نقاط تقاضا به صورت تفکیک نیاز مناطق به حداقل یک آمبولانس و حداقل



شکل ۵- رابطه بین میزان بهبود در پوشش و تعداد بازماندگی

فرض می‌کنیم برای اولین بار در شیفت دوم و در ساعت ۲۰:۳۰ دقیقه سیستم با اختلال متوسط رو به رو شده و از ۳۰ آمبولانس در دسترس، تنها ۱۷ آمبولانس در سیستم بیکار هستند. و برخی از نقاط تقاضا هیچ آمبولانسی در شعاع ۲۱ دقیقه‌ای در دسترس ندارند. بدین منظور اطلاعات سیستم را در مدل وارد می‌کنیم. جایگاه آمبولانس‌ها در پایگاه‌ها به شرح زیر است.

جدول ۸- جایگاه آمبولانس‌ها در پایگاه‌ها

پایگاه	آمبولانس
۴	۱
۲۲	۲
۷	۴
۱۱	۶
۱۹	۷
۱۷	۸
۸	۹
۸	۱۰
۶	۱۲
۱۲	۱۳
۱۶	۱۶
۲۷	۱۷
۱۶	۱۸
۱۵	۱۹
۲۱	۲۱
۱۲	۲۸
۱۴	۲۹

دو آمبولانس در کمترین شعاع پوششی، به دنبال حداقل کردن زمان سفر ناشی از بازماندگی آمبولانس‌ها می‌باشد.

مناطق بر اثر حل مدل ارائه شده در تمامی موارد دارد. به عنوان پیشنهادات آینده می‌توان سیستم پشتیبانی تصمیم مبتنی بر مدل ارائه شده را با هدف تصمیم‌گیری هوشمند در سیستم اورژانس ارائه کرد. سیستمی که در قالب نرم افزار ارائه شده تا هر زمانی که سیستم با اختلال مواجه شود کاربر با وارد کردن اطلاعات مورد نیاز در مورد جابجایی آمبولانس‌ها به منظور پوشش حداکثری تصمیم‌گیری نماید. هم‌چنین می‌توان به مدل حاضر متغیرهای اعزام آمبولانس را اضافه کرد. به طوری که مساله بازماندگی یابی با مساله اعزام به محل یکپارچه شود. در نظر گرفتن عدم قطعیت در وزن تقاضای مناطق و چند نوع وسیله نقلیه می‌تواند در تحقیقات آتی به کار گرفته شود.

منابع (References)

- [1] Andersson T, Värbrand P. Decision support tools for ambulance dispatch and relocation. *J Oper Res Soc.* 2007;58(2):195–201.
- [2] Ball MO, Lin FL. Reliability model applied to emergency service vehicle location. *Oper Res.* 1993;41(1):18–36.
- [3] van Barneveld TC, Bhulai S, van der Mei RD. A dynamic ambulance management model for rural areas. *Health Care Manag Sci.* 2017;20(2):165–86.
- [4] Bélanger V, Ruiz A, Soriano P. Recent optimization models and trends in location, relocation, and dispatching of emergency medical vehicles. *Eur J Oper Res.* 2019;272(1):1–23.
- [5] Bélanger V, Lanzarone E, Soriano P, Lanzarone E, Ruiz A, Soriano P. The Ambulance Relocation and Dispatching Problem. *Tech Rep CIRRELT-2015-59, CIRRELT.* 2015;(November).
- [6] Bürger A, Wnent J, Bohn A, Jantzen T, Brenner S, Lefering R, et al. The effect of ambulance response time on survival following out-of-hospital cardiac arrest-an analysis from the German resuscitation registry. *Dtsch Arztebl Int.* 2018;115(33–34):541–8.
- [7] Carvalho AS, Captivo ME, Marques I. Integrating the ambulance dispatching and relocation problems to maximize system's preparedness. *Eur J Oper Res.* 2020;283(3):1064–80.
- [8] Chang DY. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *Eur J Oper Res.* 1996;95(3):649–55.
- [9] Enayati S, Mayorga ME, Rajagopalan HK, Saydam

جدول ۱۰- میزان بهبود در پوشش نقاط پر تقاضا

نقاط پر تقاضا	تعداد پوشش قبل از حل	تعداد پوشش بعد از حل
۴	۰	۱
۸	۰	۱
۱۰	۱	۱
۱۱	۰	۰
۱۳	۱	۲
۱۴	۱	۱
۱۶	۱	۱
۲۰	۱	۱
۲۱	۰	۱
۲۲	۰	۱
۲۵	۱	۱
۲۸	۱	۱
۳۰	۰	۱
۳۲	۲	۱
۳۴	۲	۲
۳۸	۳	۳
۴۱	۱	۲
۴۲	۱	۲
۴۳	۰	۱
۴۵	۴	۳
۴۸	۰	۱
مجموع پوشش	۲۰	۲۸

علاوه بر آن برای اولین بار تابع هدف حداقل سازی پوشش نقاط تقاضا با شعاع زمانی بالاتر به منظور اولویت دادن به تقاضاهای فوق اورژانسی در این مدل ارائه شده است. هم‌چنین این مدل برای اولین بار سه شعاع پوششی را ارائه داده و هر کدام از شعاع‌ها، متغیر متناظر خود را در مدل خواهند داشت. بنابراین پوشش نقاط تقاضا در هر کدام از شعاع‌ها بر اساس مقدار گیری متغیر متناظر با آن‌ها توسط مدل ارائه شده، صورت می‌گیرد. محدوده فضای این مدل ناحیه شرق تهران با حدود ۱۷۰ کیلومتر مربع مساحت و نزدیک به ۳ میلیون جمعیت می‌باشد. برخی داده‌های مساله به صورت واقعی و برخی دیگر بنابه محدودیت‌های موجود به صورت تصادفی ایجاد شدند. مساله در حالت‌های مختلف با در نظر گرفتن پارامترهای تاثیر گذار ارزیابی شده و تحلیل حساسیت‌های موجود نشان از بهبود در پوشش تقاضاهای

- C. Real-time ambulance redeployment approach to improve service coverage with fair and restricted workload for EMS providers. *Omega (United Kingdom)*. 2018;79:67–80.
- Enayati S, Özaltın OY, Mayorga ME, Saydam C. [10]
Ambulance redeployment and dispatching under uncertainty with personnel workload limitations. *IIESE Trans*. 2018;50(9):777–88.
- Gendreau M, Laporte G, Semet F. [11]
A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation. *Parallel Comput*. 2001;27(12):1641–53.
- Jagtenberg CJ, Bhulai S, van der Mei RD. [12]
An efficient heuristic for real-time ambulance redeployment. *Oper Res Heal Care*. 2015;4:27–35.
- Lam SSW, Ng CBL, Nguyen FNHL, Ng YY, Ong MEH. [13]
Simulation-based decision support framework for dynamic ambulance redeployment in Singapore. *Int J Med Inform*. 2017;106(February):37–47.
- Mason AJ. [14]
Simulation and Real-Time Optimised Relocation for Improving Ambulance Operations. *Handb Healthc Oper Manag*. 2015;184:1–18.
- Moeini M, Jemai Z, Sahin E. [15]
Location and relocation problems in the context of the emergency medical service systems: a case study. *Cent Eur J Oper Res*. 2015;23(3):641–58.
- Naoum-Sawaya J, Elhedhli S. [16]
A stochastic optimization model for real-time ambulance redeployment. *Comput Oper Res*. 2013;40(8):1972–8.
- Reuter-Oppermann M, van den Berg PL, Vile JL. [17]
Logistics for Emergency Medical Service systems. *Heal Syst*. 2017;6(3):187–208.
- Saydam C, Rajagopalan HK, Sharer E, Lawrimore-Belanger K. [18]
The dynamic redeployment coverage location model. *Heal Syst*. 2013;2(2):103–19.