مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۱-۳۸، شماره‌ی ۱، ص. ۱۵-۲۴، (پژوهشی)

Original Article

ارائه مدل ریاضی برخط بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها در سیستم اورژانس با درنظرگرفتن شعاع پوششی چندگانه، هزینه‌های بازمکان‌یابی و محدودیت حجم کاری

مهدی حاجی‌علی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
ابراهیم تیموری * (دانشیار)
محمدرضا رسولی (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

در هنگام بروز اختلال و تغییر الگوی تقاضا در سیستم اورژانس، جابه‌جایی آمبولانس‌های بیکار در بین پایگاه‌ها به منظور پوشش مناسب‌تر تقاضاهای آینده ضرورت می‌یابد. در این مقاله یک رویکرد جدید به منظور تصمیم‌گیری درمورد جابه‌جایی آمبولانس‌ها در قالب مدل ریاضی ارائه می‌شود. مدل ارائه شده پوشش مناطق توسط پایگاه‌ها را در سه شعاع زمانی در نظرگرفته و هدف اصلی آن پوشش درکوتاه‌ترین شعاع است. همچنین مدل حجم کاری اضافه شده به آمبولانس‌ها ناشی از تصمیم بازمکان‌یابی را در نظر می‌گیرد. مدل با رویکرد برخط ارائه شده و برخی پارامترها متناسب با تغییرات زمانی به‌روزرسانی می‌شوند. بنابر ماهیت پویای مسئله، توابع هدف ابتدا نرمال‌سازی شده و با روش مجموع وزن‌دار به صورت تک‌هدفه درآمده‌اند. مطالعه‌ی موردی در منطقه شرق تهران صورت گرفته است. نتایج محاسباتی نشان از بهبود ایجاد شده در پوشش نقاط تقاضا توسط آمبولانس‌های در دسترس دارد.

واژگان کلیدی: سیستم اورژانس، بازمکان‌یابی آمبولانس، زمان پاسخ‌دهی، حجم کاری آمبولانس‌ها.

mehdihajialy@gmail.com
Teimoury@iust.ac.ir
rasouli@iust.ac.ir

۱. مقدمه

سیستم‌های مدیریت اورژانس یکی از حیاتی‌ترین سیستم‌ها در تأمین سلامت جامعه‌اند. این سیستم‌ها هنگام ارائه خدمات باید در مدت زمانی کوتاه تصمیمات مختلفی را اتخاذ و اجراکنند. 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 شود. فرایند خدمت‌رسانی در این سیستم مشتمل است بر: ۱. ورود تماس؛ ۲. تخصیص آمبولانس؛ ۳. جابه‌جایی 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، مأموریت 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 تأمین سطح معینی از معیارهای عملکردی، تحت فشار تعهدات قراردادی و اهداف مدیریتی هستند. برای مثال براساس برخی استانداردهای سیستم اورژانس، بیشینه زمان پاسخ به تماس‌ها در مناطق شهری ۱۰ دقیقه و در مناطق روستایی ۳۰ دقیقه است.[۱] تصمیم‌گیری در سیستم اورژانس را می‌توان به سه سطح راهبردی، تاکتیکی و عملیاتی تقسیم کرد. در مطالعات اخیر، بیشتر پژوهش‌ها بر مسائل راهبردی و تاکتیکی متمرکز بودند. تصمیمات راهبردی، به مکان‌یابی پایگاه‌ها و تعیین اندازه‌ی ناوگان آمبولانس‌ها می‌پردازد. در واقع در سطح راهبردی، پایگاه آمبولانس‌ها یک بار با اهداف مختلفی از جمله ایجاد بیشترین پوشش تقاضا تعیین شده و آمبولانس‌ها بعد از هر مأموریت به پایگاه خانگی خود بازمی‌گردند. این سیاست در ادبیات به معنای «سیاست ثابت[۱]» است. تصمیمات در سطح تاکتیکی شامل برنامه‌ریزی خدمه و تعیین سیاست‌های ناوگان است.[۲] 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 پویاست.[۳ و ۴] عوامل مختلفی از جمله تغییر الگوی تقاضا، بروز اتفاقات پیش‌بینی نشده و تغییر تعداد آمبولانس‌های در دسترس باعث تغییر حالت سیستم می‌شود. با تغییر حالت سیستم، دغدغه‌ی اصلی سیستم اورژانس پوشش تقاضای مناطق و زمان پاسخ به تقاضاهای آینده است. جابه‌جایی آمبولانس‌های بیکار بین پایگاه‌های اورژانس هنگام تغییر الگوی تقاضا و بروز رویدادهای پیش‌بینی

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۴/۱، اصلاحیه ۱۴۰۰/۴/۴، پذیرش ۱۴۰۰/۵/۱۱.
DOI:10.24200/J65.2021.55873.2116

جدول ۱. جایگاه بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها در سطوح تصمیم‌گیری.

سطوح تصمیم‌گیری			
راهبردی	مکان‌یابی پایگاه‌های اورژانس	اندازه‌ی ناوگان	استخدام کارکنان
تاکتیکی	مکان‌یابی پایگاه‌های آماده به کار	زمان‌بندی و برنامه‌ریزی خدمه	مدیریت ناوگان
عملیاتی	بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها با رویکرد برخط	اعزام آمبولانس به محل	

نشده باعث بهبود در پوشش تقاضاهای آینده می‌شود.[۵] در واقع هنگامی که تعداد آمبولانس‌های در دسترس کاهش می‌یابد، به دنبال آن قدرت پاسخگویی سیستم کاهش می‌یابد. آمبولانس‌های در دسترس ممکن است که برای برخی نقاط تقاضا در برخی شعاع‌های زمانی پوششی ایجاد نکنند. یعنی اگر تماسی از طرف یک منطقه‌ی 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. جابه‌جایی آمبولانس‌های بیکار بین پایگاه‌ها با هدف بیشینه‌سازی پوشش می‌تواند این مشکل را برطرف کند. در جدول ۱ جایگاه مسائل بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها در سیستم اورژانس با رویکرد برنامه‌ریزی در زمان واقعی (برخط) را مشاهده می‌کنید.[۶]

در این نوشتار ما به منظور حل مسئله‌ی بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها، یک مدل ریاضی با رویکرد برخط توسعه داده‌ایم. این رویکرد بر اساس تغییرات زمانی و تغییرات حالت سیستم به روزرسانی شده و تصمیم‌گیری درباره‌ی مکان جدید آمبولانس‌های بیکار را با در نظرگرفتن حجم کاری اضافه شده، تغییر الگوی تقاضای مناطق و تغییر تعداد پوشش مناطق انجام می‌دهد. مدل ریاضی یک مدل سه‌هدفه است که علاوه بر بیشینه‌سازی پوشش تقاضا و کمینه‌سازی زمان سفر ناشی از تصمیم بازمکان‌یابی به دنبال کمینه‌سازی پوشش نقاط تقاضا با شعاع زمانی بالاتر به منظور اولویت دادن به تقاضاهای فوق اورژانسی است.

در قسمت دوم از این نوشتار پژوهش‌های صورت گرفته توسط محققین و شکاف موجود در آنها ارائه می‌شود. در قسمت سوم مسئله‌ی بازمکان‌یابی را تعریف کرده و مدل ریاضی آن را در قسمت چهارم تشریح می‌کنیم. در قسمت پنجم نتایج محاسباتی حاصل از حل مدل ارائه شده و با در نظرگرفتن پارامترهای مختلف و مهم مسئله، آن را ارزیابی و تحلیل می‌کنیم. در نهایت در قسمت ششم به ارائه جمع‌بندی و پیشنهادات تحقیقات آتی می‌پردازیم.

۲. مرور ادبیات

جندرو و همکاران[۷] اولین پژوهشگرانی هستند که به ماهیت پویای مسئله‌ی بازمکان‌یابی توجه کرده‌اند. آنها به دنبال پوشش تقاضا توسط کمینه دو وسیله‌ی نقلیه بوده و همزمان سعی در کمینه‌سازی هزینه‌ی جابه‌جایی دارند. در تابع هدف این مدل یک عبارت جریمه به منظور جابه‌جایی وسیله‌ی نقلیه از مکان فعلی به مکان دیگر برای جلوگیری از جابه‌جایی‌ها با مسافت زیاد و همچنین جابه‌جایی‌های مداوم یک وسیله‌ی نقلیه در نظرگرفته شده است. آنها برای کاهش زمان حل از الگوریتم جستجوی ممنوعه استفاده کردند. معینی و همکاران[۸] مدل قبلی را توسعه داده و تنها مناطقی را در نظرگرفتند که نیاز به پوشش دوباره با توجه به تصمیمات جابه‌جایی آمبولانس‌ها دارند. مدل معینی و همکاران وزن تقاضای مناطق را با توجه به نیاز دقیق مناطق به کمینه‌ی یک و سپس دو آمبولانس تفکیک کرده است. مکان مطالعه‌ی آنها منطقه‌یی در فرانسه با درخواست خدمات اورژانسی بسیار پایین است. اندرسون و همکاران[۹] یک مدل بازمکان‌یابی در لحظه را ارائه دادند که نسبت به مدل پایه‌ی ارائه شده در سال ۲۰۰۱، برای ارزیابی عملکرد معیار متفاوتی را در نظر می‌گیرد. آنها به جای در نظرگرفتن معیار پوشش تقاضا، میزان آمادگی سیستم (ظرفیت سیستم) به منظور پاسخ به تقاضای آینده را در نظر می‌گیرند. این مدل به دنبال کمینه‌سازی بیشترین زمان سفر آمبولانس‌هایی است که باید جابه‌جا شوند. مدل آنها زمان انتظار بیماران برای آمبولانس‌ها را کاهش داد. نوم و همکاران[۱۰] با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌یی که هزینه‌ی مربوط به جابه‌جایی و هزینه‌های عدم برآورد تقاضا به دلیل تأخیر را کمینه می‌کند، مدل‌سازی را انجام دادند. آنها به دنبال کمینه‌سازی تعداد بازمکان‌یابی صورت گرفته بودند. در این مدل ابتدا اطلاعی از محل دقیق تماس‌های آینده وجود ندارد و با استفاده از داده‌های تاریخی و تعریف سناریوهای مختلف، برای تعیین مکان آمبولانس‌ها با هدف کمینه‌سازی تعداد جابه‌جایی‌ها تصمیم‌گیری می‌شود. در مرحله‌ی دوم مدل اقدام به تخصیص وسایل نقلیه به تماس‌های اضطراری می‌کند. ماسون[۱۱] یک مدل برخط بازمکان‌یابی پوششی به منظور بر طرف کردن مسئله‌ی بازمکان‌یابی پویا ارائه داد. مدل وی در یک نرم‌افزار مدیریت اورژانس به نام اپتیما لایو[۲] با هدف ارائه‌ی توصیه‌های فوری تغییر پایگاه آمبولانس‌ها به مدیران اورژانس اجرا شد. او به جای بیشینه‌سازی پوشش دوگانه‌ی نقاط تقاضا، بر اساس یک تابع خطی ـ تکه‌یی مقعر سعی در بیشینه‌سازی تعداد پوشش نقاط تقاضا دارد. در مدل آنها برای بهبود عملکرد، چندین وسیله‌ی نقلیه منظور می‌شود. جاگتنبرگ و همکاران[۱۲] نمونه پویای مدل MEXCLP [۳] را با هدف کمینه‌سازی تعداد تقاضاهایی که از بیشینه زمان پاسخ‌دهی فراتر رفته‌اند با رویکرد جابه‌جایی برخط ارائه دادند. آنها جابه‌جایی وسایل نقلیه را تنها بعد از پایان مأموریت‌شان در نظرگرفته بودند. نتایج به دست آمده در منطقه‌ی اوترخت (Utrecht) در هلند نشان داد که سیاست بازمکان‌یابی ارائه شده منجر به کاهش قابل توجهی در نسبت تأخیرات به وجود آمده شده است. ون برنولد و همکاران[۱۳] مسئله‌ی جابه‌جایی پویا را با تمرکز در نقاط روستایی و در نظرگرفتن تعداد محدودی وسایل نقلیه با توجه به حجم پایین تقاضا، در نظرگرفتند. آنها به دنبال بیشینه‌سازی پوشش تقاضا بودند. مدل ارائه شده در منطقه‌ی روستایی فلولاند هلند که به طور متوسط ۲۴ تماس در روز دریافت می‌کند، باعث بهبود ۲ دقیقه‌یی در زمان پاسخ‌دهی شد. عنایتی و همکاران[۱۴] به منظور بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها در زمان واقعی، با در نظرگرفتن بارکاری کارکنان مدلی دومرحله‌یی ارائه دادند که در آن، در مرحله‌ی اول بیشینه‌سازی پوشش تقاضاهای آینده با تعیین مکان جدید آمبولانس‌ها مد نظر است و در مرحله‌ی دوم زمان سفر کمینه می‌شود. آنها همچنین با درنظرگرفتن بارکاری کارکنان با هر بار تصمیم درباره‌ی جابه‌جایی آمبولانس‌ها این مقدار را به‌روزرسانی می‌کنند. همچنین در مطالعه‌یی دیگر، عنایتی و همکاران[۱۵] مسئله‌ی قبل را با برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو مدل‌سازی کردند، که در مرحله‌ی اول آمبولانس‌ها به مکان‌های جدید تخصیص داده شده و در مرحله‌ی دوم به منظور تعیین سیاست‌های اعزام به یک تقاضا در سناریوهای مختلف پاسخ می‌دهند. کاروالیو و همکاران[۱۶] با استفاده از یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تصمیمات بازمکان‌یابی و اعزام آمبولانس‌ها را به صورت یکپارچه در نظر می‌گیرند. هدف آنها بیشینه‌سازی پوشش نقاط تقاضاست.

رویکرد آنها از یک معیار آمادگی زمانی برای ارزیابی توانایی سیستم به منظور مدیریت کردن شرایط اضطراری به وجود آمده استفاده می‌کنند. آنها از یک روش ابتکاری برای اجرای فرایند اعزام و بازمکان‌یابی استفاده می‌کنند. به منظور تفکیک ادبیات بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها و تعیین دقیق شکاف‌های موجود و ارائه نوآوری‌های موجود جدول ۲ ارائه می‌شود. در این جدول پژوهش‌های صورت گرفته بر اساس توابع هدف، محدودیت‌های پوشش، محدودیت‌های پایگاه‌ها، محدودیت‌های بازمکان‌یابی و معیارهای تغییر حالت سیستم دسته‌بندی می‌شوند.

۱.۲. مشخصات مدل ارائه شده

مدل حاضر برخی از ابعاد جدول ۲ را به صورت جداگانه پوشش داده و برخی دیگر را به صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد. بیشینه‌سازی پوشش مناطق تقاضا هدفی است که تقریباً بیشتر مدل‌ها به دنبال آن هستند. درکنار این هدف، برخی محققان به دنبال کاهش هزینه‌های ناشی از بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها هستند. برای مثال جندرو

جدول ۲. دسته‌بندی ادبیات بر اساس توابع هدف و محدودیت‌ها.

نویسنده	جندرو و همکاران (2001)	اندرسون و همکاران (2007)	توم و همکاران (2013)	معینی و همکاران (2015)	ماسون (2015)	جاگتنبرگ و همکاران (2015)	وینرتولد و همکاران (2017)	عنایتی و همکاران(1) (2018)	عنایتی و همکاران(2 (2018	کاروالیو وهمکاران (2020)	مدل حاضر
اهداف											
حداکثر سازی پوشش وزنی تقاضا								√			√
حداکثر 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 r1 یا r2	√			√							
α درصد از نقاط تقاضا در شعاع r1 پوشش داده شوند	√		√	√							
حداقل یک پوشش نقاط تقاضا در شعاع r1 یا r2 یا r3 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 5 بازمکانیابی								√			
مدت زمان بازمکانیابی								√		√	√
دستیابی به یک سطح خدمت مشخص		√								√	√
معیار تغییر حالت سیستم											
نرخ ورود تقاضا با تماس				√	√			√		√	√
تعداد آمبولانس در دسترس(نرخ اختلال)	√	√	√								√
هزینه بازمکانیابی	√										
زمان سفر			√					√			

و همکاران ضریبی به عنوان هزینه‌ی بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها در تابع هدف خود در نظر گرفته‌اند. به گونه‌یی که این ضریب در هر مرحله‌یی که حل مدل مد نظر باشد، به ازای هر آمبولانس محاسبه می‌شود. آمبولانس‌هایی که تعداد جابه‌جایی‌های قبلی‌شان زیاد بوده است ضریب بزرگ‌تری دریافت می‌کنند. عنایتی و همکاران[۱۴] هزینه‌ی بازمکان‌یابی را به صورت یک تابع هدف جداگانه در مسئله‌ی خود در نظر گرفتند. آنها برای جلوگیری از جابه‌جایی‌های 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 جابه‌جایی آمبولانس‌ها دارند. مدل جندرو و همکاران به دنبال پوشش بیشینه‌ی تمام نقاط تقاضا توسط دست کم دو آمبولانس با توجه به وزن تقاضای مناطق است. در حالی که مدل معینی و همکاران وزن تقاضای مناطق را با توجه به نیاز دقیق مناطق به دست کم یک و سپس دو آمبولانس تفکیک کرده است. مدلی که ما ارائه داده‌ایم، به صورت یک‌پارچه علاوه بر در نظرگرفتن پوشش نقاط تقاضا به صورت تفکیک نیاز مناطق به دست کم یک و سپس دو آمبولانس درکم‌ترین شعاع پوششی، به دنبال کمینه‌سازی زمان سفر ناشی از بازمکان‌یابی آمبولانس‌هاست. علاوه بر آن برای اولین بار تابع هدف کمینه‌سازی 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 مقدارگیری متغیر متناظر با آنها توسط مدل ارائه شده، صورت می‌گیرد. در واقع مدل مجبور به بیشینه‌سازی تقاضاهای فوق اورژانسی شده و اگر با کمبود منابع رو به رو شود، سعی می‌کند به مناطق تقاضایی که نیازشان در اولویت پایین‌تری قرار دارد، آمبولانس‌هایی با شعاع‌های طولانی‌تر تخصیص دهد. جنبه‌ی دیگر مسئله، محدودیت حجم کاری کارکنان و بارکاری اضافیِ اعمال شده بر آنهاست. هنگامی‌که مدل تصمیم به بازمکان‌یابی 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 مسئله، در طی روز برخی پارامترهای مسئله که ماهیت پویا دارند تغییر می‌کنند. یکی از این پارامترها حجم کاری آمبولانس‌ها تا لحظه‌ی تصمیم‌گیری است. در مدل حاضر، برای هر آمبولانس حجم کاری متحمل شده تا لحظه‌ی تصمیم‌گیری در نظرگرفته شده و مجموع این حجم کاری و بارکاری که به دلیل بازمکان‌یابی قرار است به آن اضافه شود، نباید از یک حد مشخصی بزرگ‌تر باشد. تنها در یک مدل[۱۴] مسئله‌ی حجم کاری اضافه شده مد نظر قرار گرفته است. بنابراین مدل‌های بیشتری در آینده می‌توانند روی این موضوع تمرکز کنند. مدل ما نیز با الگو گرفتن از محدودیت حجم کاری در مدل‌عنایتی و همکاران[۱۴] به این مسئله پرداخته و از بازمکان‌یابی آمبولانس‌هایی که محدودیت حجم کاری آنها نقض می‌شوند جلوگیری به عمل می‌آورد. مسئله‌ی 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، روزکاری 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 به‌روزرسانی می‌شود. همچنین محدودیت‌های پوششی در مدل ما بر اساس تعداد پوشش در لحظه‌ی تصمیم‌گیری، مدل‌سازی 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 به‌روزرسانی می‌شود.

۳. تعریف مسئله

ناحیه‌ی شرق، یکی از نواحی پر تقاضای تهران است. این ناحیه دارای جمعیت تقریبی ۳ میلیون نفر با مساحت ۱۷۰ کیلومتر مربع است. 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. مهم‌ترین مشکل سیستم اورژانس در ناحیه‌ی شرق، عدم پوشش تمامی تقاضاها در شعاع زمانی مورد نیازشان است. رویکردی که سیستم اورژانس در این ناحیه به‌کارگرفته است یک رویکرد ثابت است. به همین منظور ما سیاست بازمکان‌یابی با رویکرد آنلاین را برای برطرف کردن این مشکل در قالب یک مدل ریاضی ارائه می‌کنیم. در این چارچوب، برخی رویدادها موجب تغییر حالت سیستم می‌شوند. در ادامه، شرح رویدادهای ارائه شده در مدل ما به منظور بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها ذکر می‌شود.

۱.۳. 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 درخواست‌های زیاد در یک بازه زمانی کوتاه می‌شود.
- به اتمام رسیدن مأموریت یک آمبولانس مشغول به خدمت.
- بازمکان‌یابی آمبولانس‌های بیکار و جابه‌جایی آنها به منظور استقرار در پایگاه جدید.

۲.۳. به‌روزرسانی سیستم متناسب با هرکدام از رویدادها

در صورت ورود تماس به سیستم، ابتدا تماس از جهت شعاع زمانی مورد نیاز و درجه‌ی اورژانسی بودن بررسی شده و در یکی از گروه‌های تقاضا قرار می‌گیرد. سپس بر اساس نزدیک‌ترین آمبولانس موجود در شعاع زمانی مورد نیاز، آمبولانس به محل اعزام می‌شود. در صورت نبود آمبولانس در شعاع زمانی مورد نیاز، نزدیک‌ترین آمبولانس در شعاع بعدی مد نظر است. همچنین هنگام تصمیم‌گیری درباره‌ی اعزام، تمام آمبولانس‌های ثابت در پایگاه‌ها و آمبولانس‌هایی که مأموریت‌شان به اتمام رسیده و در حال بازگشت به پایگاه هستند، مد نظر قرار می‌گیرند. پس از اعزام و کاهش تعداد آمبولانس‌های در دسترس، پارامترهای پویای مسئله مانند تعداد پوشش نقاط تقاضا در شعاع‌های زمانی مختلف که به عنوان معیار انجام بازمکان‌یابی در سیستم هستند، به‌روزرسانی می‌شوند.

- هنگام اتمام مأموریت یک آمبولانس، اگر بر اساس معیارهای انجام ریلوکیشن، سیستم نیاز به بازمکان‌یابی داشته باشد، ابتدا آمبولانس به نزدیک‌ترین پایگاه به عنوان یک آمبولانس بیکار تخصیص داده شده و سپس اقدام به بازمکان‌یابی خواهد شد.
- در صورت بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها و تعیین پایگاه جدید، ابتدا آمبولانس‌ها در پایگاه جدیدشان مستقر شده و سپس پارامترهای پویای مسئله به‌روزرسانی خواهند شد.

۳.۳. تصمیم به بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها از طریق مدل ریاضی

اطلاعات و پارامترهای مورد نیاز وارد مدل ریاضی شده و مدل درباره بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها و مکان جدید آنها تصمیم می‌گیرد.

۴.۳. اجرای تصمیم بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها و به‌روزرسانی سیستم

۴. مدل‌سازی ریاضی

ما یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی برای مسئله‌ی بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها با رویکرد برخط توسعه داده‌ایم. این مدل سه‌هدفه است که علاوه بر بیشینه‌سازی پوشش تقاضا و کمینه‌سازی زمان سفر ناشی از تصمیم بازمکان‌یابی به دنبال کمینه‌سازی پوشش نقاط تقاضا با شعاع زمانی بالاتر به منظور اولویت دادن به تقاضاهای فوق اورژانسی است. همچنین این مدل از جابه‌جایی آمبولانس‌هایی که محدودیت حجم کاری‌شان نقض می‌شود، جلوگیری می‌کند.

۱.۴. مفروضات

- اولویت مدیریت سیستم اورژانس، پوشش بیشینه‌ی نقاط تقاضا در شعاع r_1 دقیقه‌یی است.
- منطقه‌ی تقاضای مسئله بر اساس مساحت، به نقاط با مساحت‌های تقریباً برابر تقسیم شده است.
- مبنای پوشش نقاط تقاضا توسط پایگاه‌های اورژانس در شعاع‌های مد نظر، سریع‌ترین مسیر ممکن از پایگاه به منطقه‌ی تقاضاست. منظور از پوشش، بیشترین زمان پاسخ به یک تماس از یک پایگاه اورژانس است.
- در هر منطقه‌ی تقاضا ممکن است دو نوع تماس برقرار شود: تماس اورژانسی که به یک آمبولانس نیاز دارد و تقاضای اورژانسی که به دو آمبولانس احتیاج دارد. گاهی اوقات به دلیل بروز برخی حوادث، اعزام بیش از یک آمبولانس ضرورت می‌یابد. در این نوع تماس‌ها فرض می‌کنیم که دو آمبولانس باید اعزام شود.
- 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

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

$i\{1, 2, ..., n\}$ نقاط تقاضا؛

$j, f\{1, 2, ...m\}$ پایگاه‌های اورژانس؛

$k\{1, 2, ..., k\}$ آمبولانس‌های در دسترس

پارامترهای ثابت

P_j بیشینه تعداد آمبولانس مجاز در هر پایگاه؛

r_3, r_2, r_1 شعاع‌های زمانی برای پوشش تقاضای مناطق ($r_3 > r_2 > r_1$)؛

λ بیشینه بارکاری که هر امبولانس در هر شیفت کاری می‌تواند فعال باشد؛

H_{ij} ماتریس صفر و یک پوشش منطقه تقاضای i توسط پایگاه j در زمان r_1 دقیقه؛

S_{ij} ماتریس صفر و یک پوشش منطقه تقاضای i توسط پایگاه j در زمان r_2 دقیقه؛

M_{ij} ماتریس صفر و یک پوشش منطقه تقاضای i توسط پایگاه j در زمان r_3 دقیقه؛

B_{fj} مدت زمان سفر بین پایگاه‌های اورژانس در کوتاه‌ترین مسیر؛
C_{fj} ماتریس صفر و یک جابه‌جایی 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؛
Q_i تعداد آمبولانس‌هایی که منطقه i را در شعاع r_3 پوشش می‌دهند؛
L_{kf} اگر آمبولانس k در پایگاه f قرار داشته باشد ۱ می‌شود.
U_t بیشینه‌ی زمان تجمیع شده باقی مانده برای آمبولانس‌ها بعد از گرفتن تصمیم بازمکان‌یابی در زمان t؛
β_{kt} زمان تجمعی فعالیت آمبولانس k تا زمان t؛

متغیرهای تصمیم

Y_{fj}^k اگر آمبولانس k از f به j منتقل شود یک می‌شود؛
X_i^1 اگر منطقه تقاضای i دست‌کم توسط یک آمبولانس در شعاع r_1 تحت پوشش قرار گیرد؛
X_i^2 اگر منطقه تقاضای i دست‌کم توسط دو آمبولانس در شعاع r_1 تحت پوشش قرار گیرد؛
Z_i اگر منطقه i دست‌کم توسط یک آمبولانس در شعاع r_2 تحت پوشش قرار گیرد؛
W_i اگر منطقه i دست‌کم توسط یک آمبولانس در شعاع r_3 تحت پوشش قرار گیرد؛
η_{fj}^k یک می‌شود اگر حاصل ضرب Y_{fj}^k و Y_{jf}^k یک شود و صفر می‌شود اگر کمینه‌ی یکی از آنها صفر باشد.

۳.۴. توابع هدف و محدودیت ها

به منظور پوشش نقاط تقاضا توسط پایگاه‌های اورژانس، سه شعاع پوششی ۷-۱۵ و ۲۵ دقیقه‌یی در نظر گرفته شده است. هر پایگاه اورژانس چندین نقطه تقاضا را در شعاع‌های مختلف پوشش می‌دهد. هنگام بروز اختلال در سیستم، بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها به گونه‌یی صورت می‌گیرد که پوشش نقاط تقاضا توسط پایگاه‌ها بیشینه شود. بنابراین تابع هدف اول به دنبال پوشش بیشینه ایجاد شده توسط پایگاه‌هاست. از آن‌جا که تقاضاهای فوق اورژانسی نیاز به رسیدن آمبولانس در مدت زمان بسیار کوتاه (کم‌تر از ۷ دقیقه) دارند، مدل به گونه‌یی عمل می‌کند که به مناطق پرتقاضا حداقل ۲ آمبولانس با زمان پاسخ‌دهی بیشینه‌ی ۷ دقیقه اختصاص دهد. با این کار علاوه بر این که نیاز مناطق پر تقاضا از نظر پوشش با کم‌ترین زمان براورد 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 بیشینه‌سازی پوشش تقاضای مناطق در شعاع پوششی بیشینه‌ی r_1 دقیقه‌یی است. پوشش بیشینه و بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها همراه با هزینه است. یکی از هزینه‌هایی که در این تصمیم نهفته، بارکاری اضافه‌یی که است که به آمبولانس‌های بیکار وارد می‌شود. تابع هدف شماره ۲ به دنبال جابه‌جایی آمبولانس‌های بیکار در کوتاه‌ترین زمان ممکن است. به طوری که کم‌ترین بارکاری به آنها وارد شده و زمان سفر حداقلی را طی کنند. علاوه بر آن تابع هدف دوم از جابه‌جایی‌های غیر معمول آمبولانس‌ها جلوگیری می‌کند. یعنی آمبولانس‌ها نمی‌توانند مسافت‌های طولانی را برای جابه‌جایی انتخاب کنند. تابع هدف شماره ۳ به دنبال تخصیص کمینه‌ی آمبولانس‌ها به مناطق تقاضا در شعاع‌های پوششی r_2 و r_3 دقیقه‌یی است. به طوری که اولویت مدل تخصیص آمبولانس‌ها به پایگاه‌هایی است که مناطق تقاضا را در شعاع r_1 دقیقه‌یی پوشش می‌دهند. محدودیت شماره ۴ تعداد آمبولانس‌هایی که برای پوشش مناطق تقاضا در شعاع زمانی r_1 دقیقه قرار می‌گیرند را وابسته به مقدارگیری متغیرهای X_i^1 و X_i^2 می‌کند. برای مثال اگر X_i^1 مقدار ۱ بگیرد، حداقل یک آمبولانس باید در شعاع r_1 دقیقه‌یی منطقه تقاضای مورد نظر قرار بگیرد. این مقدارگیری بر اساس وضعیت فعلی نقاط تقاضا از نظر پوشش توسط آمبولانس‌ها صورت می‌گیرد.

$$max \sum_i (d^1{}_i X^1{}_i + d_i^2 X_i^2) \quad (1)$$

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

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

$$s.t \quad (3)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

محدودیت‌های شماره ۵ و ۶ نیز همانند محدودیت شماره ۴ برای شعاع‌های زمانی r_2 و r_3 دقیقه‌یی عمل می‌کنند. آنها وابسته به مقدارگیری متغیرهای W و Z هستند. به طوری که اگر این متغیرها مقدار ۱ بگیرند تعداد آمبولانس‌هایی که به مناطق تقاضای آنها تعلق میگیرد دست کم باید ۱ باشد. محدودیت شماره ۷ به این نکته اشاره دارد که زمانی به یک نقطه‌ی تقاضا دست کم ۲ آمبولانس تخصیص داده می‌شود که حداقل یک آمبولانس به آن اختصاص یافته باشد. محدودیت شماره ۸ نشانگر محدودیت ظرفیت پایگاه‌های اورژانس است 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

جابه‌جایی انجام شده تا دوره t توسط هر آمبولانس ناشی از تصمیم بازمکان‌یابی دارد. مقدار U_t هر زمانی که گرفتن خروجی از مدل مد نظر باشد، باید بر اساس رابطه‌ی ۱۵ به‌روزرسانی شود.

$$U_t = \frac{\gamma * t}{T} \qquad (۱۵)$$

مقدار T شیفت کاری در طول روز (۱۲ ساعت) را نشان می‌دهد. مقدار γ به بیشینه حجم کاری در طول روز (۱۰ ساعت برای شیفت ۱۲ ساعته) که هر آمبولانس تمایل به کارکردن دارد، اشاره می‌کند.

t نشانگر دوره‌ی زمانی است که در آن قرار داریم و در هر بار تصمیم‌گیری باید به‌روزرسانی شود. در واقع این محدودیت از تصمیمات جابه‌جایی آمبولانس‌هایی که زمان سفرشان به نقض بیشینه‌ی حجم کاری مطلوب می‌انجامد، جلوگیری می‌کند. محدودیت شماره ۱۰ از جابه‌جایی رفت و برگشت بین دو پایگاه جلوگیری می‌کند. این محدودیت غیر خطی بوده و به منظور خطی‌سازی آن، سه محدودیت ۱۶ تا ۱۸ را به مدل اضافه کردیم.

$$\eta^k_{fj} \le Y^k_{fj} \qquad \forall k, f \neq j \qquad (۱۶)$$

$$\eta^k_{fj} \le Y^k_{jf} \qquad \forall k, f \neq j \qquad (۱۷)$$

$$\eta^k_{fj} \ge Y^k_{fj} + Y^k_{jf} - ۱ \qquad \forall k, f \neq j \qquad (۱۸)$$

در این محدودیت‌ها رابطه‌ی ۱۹ برقرار است:

$$\eta^k_{fj} = Y^k_{fj} Y^k_{jf} \qquad \forall k, f \neq j \qquad (۱۹)$$

محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷ تضمین می‌کند که اگر بیشینه‌ی یکی از متغیرهای Y^k_{fj} و Y^k_{jf} صفر شوند، متغیر η^k_{fj} صفر خواهد شد. محدودیت ۱۸ نیز تضمین می‌کند، در صورت ۱ شدن هر دو متغیر Y^k_{fj} و Y^k_{jf}، متغیر η^k_{fj} ۱ می‌شود.

محدودیت ۱۱ جابه‌جایی 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 می‌کند. اگر مدل به یک نقطه‌ی تقاضا به شعاع $r_۱$ دقیقه‌یی آمبولانسی تخصیص ندهد، محدودیت شماره ۱۲ مدل را وادار به تخصیص کمینه یک آمبولانس در شعاع‌های $r_۲$ و $r_۳$ دقیقه‌یی می‌کند. گاهی اوقات ممکن است مدل برای آمبولانسی که در یک پایگاه قرار گرفته، چندین جابه‌جایی 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

مطالعه‌ی موردی انجام شده در این مقاله مربوط به ناحیه‌ی شرق تهران است. جمعیت این ناحیه حدود ۳ میلیون نفر و مساحت آن ۱۷۰ کیلومتر مربع است و به ۴۸ ناحیه تقسیم شده است. در این مدل ما فرض می‌کنیم که هریک از تماس‌های فوق اورژانسی باید در کمتر از ۷ دقیقه پوشش داده شود. ۳۰ آمبولانس در ۳۰ پایگاه اورژانس در ناحیه شرق تهران آماده خدمت‌رسانی خواهد بود. در شکل ۱، ۳۰ پایگاه به همراه ۴۸ ناحیه‌ی تقاضا در ناحیه‌ی شرق تهران نمایش داده شده است. مدل برنامه‌ریزی خطی در نرم‌افزار 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 Win 8 در مدت زمان ۲۸ ثانیه حل شده است. در جدول ۳ برخی از اطلاعات مدل نشان داده شده است.

جدول ۳. برخی از اطلاعات مسئله.

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 دقیقه‌یی (آمبولانس)	۲
متوسط تعداد پوشش نقاط تقاضا در شعاع ۱۵ دقیقه‌یی (آمبولانس)	۵
متوسط تعداد نقاط تقاضا در شعاع ۲۵ دقیقه‌یی (آمبولانس)	۹

۱.۵. روش حل مسئله‌ی چندهدفه

با توجه به سه‌هدفه بودن مدل و همجنس نبودن توابع هدف ابتدا باید توابع را همجنس کرده و سپس مسئله را به صورت تک‌هدفه حل کنیم. برای حل این موضوع از روش مجموع وزنی استفاده شده است.

ابتدا با توجه به بیشینه‌سازی یا کمینه‌سازی توابع، بهترین مقدار و بدترین مقدار هر تابع را به دست می‌آوریم. سپس برای هر تابع رابطه‌ی ۲۰ را تشکیل می‌دهیم.

$$\frac{\max - Z}{\max - \min} \qquad (۲۰)$$

$$\frac{Z - \min}{\max - \min} \qquad (۲۱)$$

اگر تابع هدف از نوع بیشینه‌سازی باشد، از رابطه‌ی ۲۰ و اگر تابع از نوع کمینه‌سازی باشد از رابطه‌ی ۲۱ استفاده می‌کنیم. منظور از پارامتر Z در روابط ۲۰ و ۲۱، توابع هدف فعلی مسئله است. 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 کمینه‌سازی بوده و با توجه به وزن و اهمیت هرتابع هدف، ابتدا آنها را همجنس کرده و سپس به دنبال کمینه‌سازی فاصله‌ی 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[۱۷] وزن توابع را محاسبه می‌کند. تابع هدف نهایی مسئله چنین خواهد شد:

$$min \; ۰.۶\left(\frac{max_۱ - \left(\sum_i (d^۱{}_i X^۱{}_i + d^۲_i X^۲_i)\right)}{max_۱ - min_۱}\right) + ۰/۲\left(\frac{\left(\sum_k \sum_f \sum_{j \neq f} Y^k_{fj} B_{fj} C_{fj}\right) - min_۲}{max_۲ - min_۲}\right) + ۰/۲\left(\frac{\left(\sum_i (Z_i + W_i)\right) - min_۳}{max_۳ - min_۳}\right) \qquad (۲۲)$$

۲.۵. 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 مأموریت، آمبولانس‌ها به پایگاه اولیه‌ی خود بازمی‌گردند. اما در سیاست ما، پس از اتمام مأموریت، ممکن است آمبولانس‌ها به پایگاه جدیدی تخصیص داده شوند. همچنین

جدول ۴. خلاصه‌یی 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

در سیاست ما جابه‌جایی آمبولانس‌های بیکار به منظور پوشش بهتر تقاضای آینده اجرا می‌شود. داده‌های مسئله شامل ۱۴۰۰۰ تماس از یک بازه زمانی یک‌ماهه هستند. خلاصه آماری داده‌های جمع آوری شده در جدول ۴ نشان داده شده است.

ما داده‌های واقعی را به منظور مقایسه‌ی سیاست خودمان با سیاست ثابت موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه، در یک محیط شبیه‌سازی شده، پیاده‌سازی و اجرا می‌کنیم. شبیه‌سازی داده‌ها برای یک بازه زمانی یک هفته‌یی 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.

۱.۲.۵. مقایسه‌ی معیارهای عملکردی (زمان پاسخ‌دهی، نرخ پوشش و تعداد آمبولانس‌های در دسترس)

فرایند اجرای مدل بر اساس چهار مرحله‌ی بیان شده در قسمت سوم است. برخی از داده‌ها همانند زمان ورود تماس، نوع تماس و منطقه تقاضای تماس در رویکرد ما و رویکرد ثابت، یکسان است. 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 Ni-Oi و Qi 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 گرفته می‌شود. ما مجموع زمان فعالیت آمبولانس‌ها را از لحظه‌ی اعزام تا اتمام عملیات در صحنه یا بیمارستان در نظر می‌گیریم. بنابراین با توجه به این که 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 و عامل تمایز مجموع مدت زمان فعالیت آمبولانس‌ها نسبت به سیاست ثابت است. ما شبیه‌سازی را در تمام شیفت‌های کاری (مجموعاً ۱۴ شیفت کاری) انجام داده‌ایم. معیارهای عملکردی در تمام شیفت‌ها محاسبه شده‌اند. نتایج حاصله نشانگر متوسط معیارهای عملکردی محاسبه شده در تمام شیفت‌هاست. اولین معیار عملکردی، متوسط تعداد آمبولانس‌های در دسترس است. ما با استفاده از پارامترهای Ni-Oi و Qi در هر بار ورود تماس، تعداد آمبولانس‌های در دسترس را محاسبه کرده‌ایم. جدول ۵ نتایج را به ازای نوع تماس‌ها و همچنین تمامی تماس‌ها نشان می‌دهد.

معیار عملکردی بعدی نرخ پوشش است. اگر پاسخ به یک تماس در شعاع زمانی مورد نیاز آن صورت گیرد، به معنای پوشش آن تماس است. در جدول ۵ ما نرخ پوشش را بر اساس انواع تقاضاها دسته‌بندی 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 است. چنان که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، سیاست ما منجر به استفاده‌ی بهینه از منابع شده است. نرخ دسترس‌پذیری آمبولانس‌ها در هر کدام از تماس‌ها نیز نسبت به سیاست ثابت بهبود یافته است. علاوه بر آن ٪۸۹ تماس‌ها در شعاع مورد نیازشان پاسخ داده شده‌اند. و ٪۱۱ از تماس‌ها در شعاع‌های زمانی بعدی توسط نزدیک‌ترین آمبولانس‌ها پوشش داده شده‌اند. این در حالی است که نرخ پوشش تماس‌ها در سیاست ثابت ٪۷۳ است.

در جدول ۶ 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[۱۸] کاهش در زمان پاسخ‌دهی منجر به افزایش نرخ ترخیص از بیمارستان خواهد شد. آنها نشان دادند که 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 دقیقه‌یی در زمان پاسخ، ۳/۴۲ درصد نرخ ترخیص از بیمارستان را افزایش خواهیم داد.

۲.۲.۵. روند تغییر تابع هدف با توجه به تغییر ظرفیت هنگام بروز اختلال کم، متوسط و زیاد در سیستم

پارامتر اختلال یکی دیگر از پارامترهای اثرگذار در سیستم است. اختلال را می‌توان در سه سطح کم، متوسط و زیاد در مسئله‌ی بازمکان‌یابی در نظر گرفت. اختلال کم بدین معناست که بعد از اختلال به وجود آمده، تعداد آمبولانس‌های در دسترس، یا بیکار مانده به نسبت کل آمبولانس‌ها زیاد است. علاوه بر اختلال، پارامتر دیگر میزان ظرفیت پایگاه‌هاست. ظرفیت به معنای بیشترین تعداد آمبولانسی است که در پایگاه می‌تواند قرار بگیرد. در این قسمت اثرات تغییر ظرفیت بر مقدار تابع هدف به ترتیب هنگام بروز اختلال کم، متوسط و زیاد را در شکل‌های ۲ الی ۴ نشان می‌دهیم.

با توجه به تابع هدف نهایی ادغام شده که از نوع کمینه‌سازی 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. چنان که در نمودارها مشاهده می‌شود، در اختلال کم و متوسط با افزایش ظرفیت پایگاه‌ها مقدار تابع هدف روندی نزولی داشته و به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر 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 باعث بهبود در نتایج شده ولی در اختلال زیاد تغییر ظرفیت پایگاه به دلیل تعداد پایین آمبولانس‌های در دسترس تأثیری در نتایج ندارد.

۳.۲.۵. بررسی تأثیر تعداد بازمکان‌یابی آمبولانس‌ها بر روی میزان بهبود در پوشش تقاضاهای فوق اورژانسی

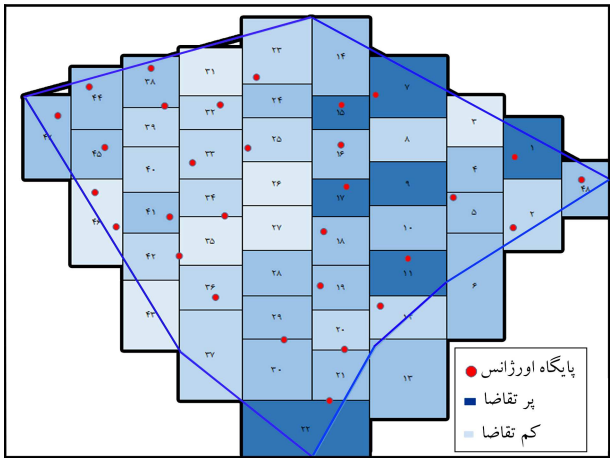
جابه‌جایی آمبولانس‌های بیکار بین پایگاه‌ها در تمامی حالت‌های مختلف مسئله باعث بهبود در پوشش تقاضاهای فوق اورژانسی شده است. اما باید تعداد جابه‌جایی آمبولانس‌ها بین پایگاه‌ها نیز مورد بررسی قرار بگیرد. ما رابطه‌ی بین تعداد بازمکان‌یابی و میزان بهبود در پوشش تقاضا را به صورت شکل ۵ نشان می‌دهیم. در ۲۷ مسئله‌ی بررسی شده، پارامترهای مختلفی از جمله ظرفیت پایگاه، شعاع‌های پوشش نقاط تقاضا توسط پایگاه‌ها و سطح اختلال در سیستم لحاظ شده است. ما تمامی مسائل حل شده را از نظر تعداد بازمکان‌یابی آنها مرتب کرده و تأثیر آن بر میزان بهبود در پوشش تقاضا را نشان داده‌ایم. مدل ارائه شده تعداد بازمکان‌یابی‌ها را به گونه‌یی تنظیم می‌کند که میزان بهبود در سیستم افزایش یابد (شکل ۵).

جدول ۵. مقایسه نتایج حاصل از سیاست‌ها در متوسط تعداد آمبولانس‌های در دسترس و متوسط نرخ پوشش.

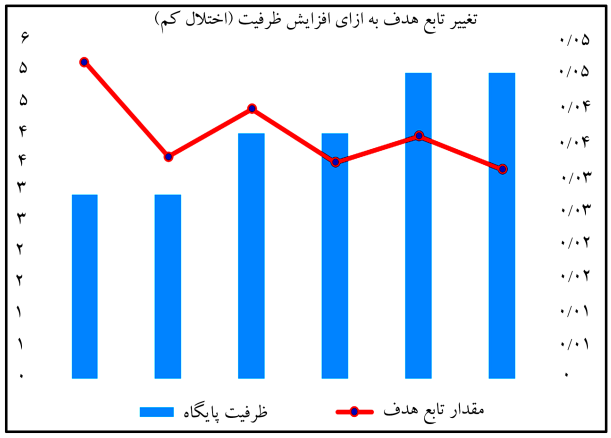
نوع تماس	متوسط نرخ پوشش			متوسط تعداد آمبولانس‌های در دسترس		
	سیاست ما	سیاست ثابت	درصد بهبود	سیاست ما	سیاست ثابت	درصد بهبود
d_i^1	٪۸۸	٪۶۱	٪۴۴	۱/۳۲	۰/۸۴	٪۵۷
d_i^2	٪۸۲	٪۵۵	٪۴۹	۲	۱/۵۳	٪۳۱
کل تماس‌ها	٪۸۹	٪۷۳	٪۲۲	۱/۶	۱/۱۲	٪۵۴

جدول ۶. مقایسه‌ی متوسط زمان پاسخ در هر دو سیاست (دقیقه).

نوع تماس	متوسط زمان پاسخ		
	سیاست ما	سیاست ثابت	درصد بهبود
d_i^1	۶/۵	۹/۲	٪۲۹
d_i^2	۶/۵	۸/۸	٪۲۶
کل تماس‌ها	۸/۲	۱۲/۶	٪۳۵



شکل ۱. تقسیم‌بندی نواحی تقاضا در منطقه شرق به همراه پایگاه‌های اورژانس.

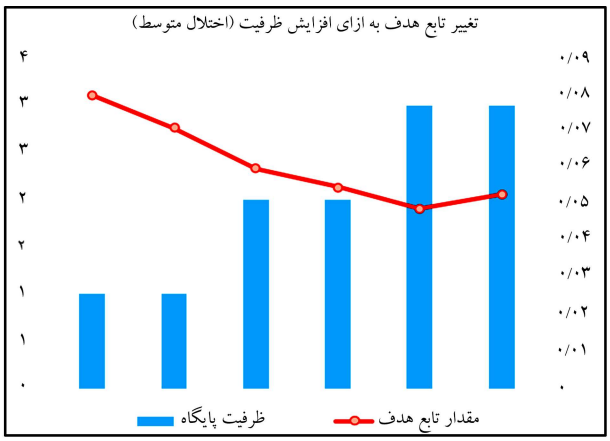


شکل ۲. تغییر تابع هدف به ازای افزایش ظرفیت در اختلال ضعیف.

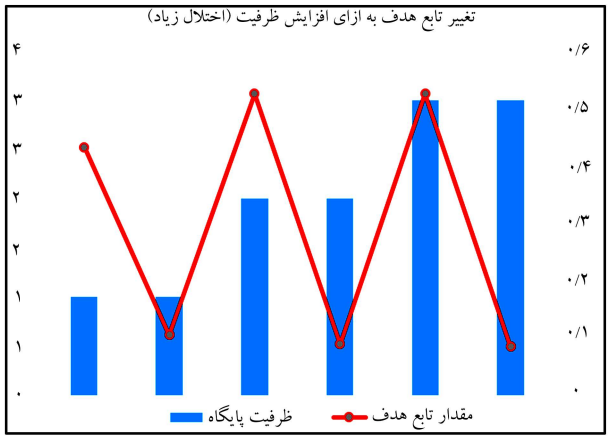
۳.۵. حل و بررسی یک نمونه از مسئله‌ی بازمکان‌یابی

در این قسمت برای نشان دادن بهبود در پوشش نقاط تقاضا به وسیله‌ی بازمکان یابی آمبولانس‌ها یک مسئله را در حالت اختلال متوسط در نظرگرفته و حل می‌کنیم.

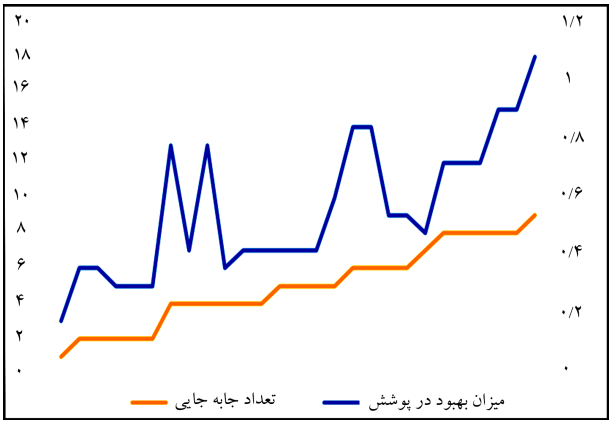
فرض می‌کنیم برای اولین بار در شیفت دوم و در ساعت ۲۰:۳۰ دقیقه سیستم با اختلال متوسط روبه‌رو شده و از ۳۰ آمبولانس در دسترس، تنها ۱۷ آمبولانس



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



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



شکل ۵. رابطه بین میزان بهبود در پوشش و تعداد بازمکان‌یابی.

جدول ۷. 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

جدول ۸. جواب ارائه شده توسط مدل.

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

جدول ۹. میزان بهبود در پوشش نقاط پر تقاضا.

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

در سیستم بیکارند. و برخی از نقاط تقاضا هیچ آمبولانسی در شعاع r_1 دقیقه‌یی در دسترس ندارند. بدین منظور اطلاعات سیستم را در مدل وارد می‌کنیم. جایگاه آمبولانس‌ها در پایگاه‌ها مطابق جدول ۷ است.

با توجه به زمانی که در شیفت کاری قرار داریم و داده‌های گذشته، وزن تقاضای مناطق فراخوانی می‌شوند. همچنین بنا به فعالیت‌های آمبولانس‌ها تا لحظه‌ی تصمیم‌گیری، حجم کاری تجمعی آنها در نظر گرفته می‌شود. پس از اجرا، مدل پیشنهاد جابه‌جایی آمبولانس‌ها به صورت جدول ۸ ارائه خواهد شد.

به منظور بررسی جواب ارائه شده توسط مدل، تعداد پوشش نقاط تقاضا در شعاع r_1 دقیقه‌یی بعد از حل را با تعداد پوشش قبل از حل مقایسه می‌کنیم. همان طور که در جدول ۹ مشاهده می‌شود، مدل جابه‌جایی آمبولانس‌ها در پایگاه‌ها به گونه‌یی است که پوشش تقاضا در شعاع r_1 دقیقه‌یی برای نقاط پر تقاضا در مجموع ۸ واحد افزایش یافته است.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل جدید برخط مکان یابی مجدد آمبولانس‌ها به منظور بهبود در پوشش تقاضاهای فوق اورژانسی با در نظر گرفتن محدودیت حجم کاری ارائه شده است. مسئله‌ی بازمکان‌یابی شامل جابه‌جایی وسایل نقلیه در دسترس در میان پایگاه‌ها برای تضمین یک سرویس مناسب برای بهبود پوشش تقاضاست. مدل ارائه شده در جنبه‌های مختلفی در ادبیات سیستم اورژانس دارای نوآوری است. مدل حاضر، به صورت یک‌پارچه علاوه بر در نظر گرفتن پوشش نقاط تقاضا به صورت تفکیک نیاز مناطق به حداقل یک و سپس دو آمبولانس در کم‌ترین شعاع پوششی، به دنبال کمینه‌سازی زمان سفر ناشی از بازمکان‌یابی آمبولانس‌هاست.

علاوه بر آن برای اولین بار تابع هدف کمینه‌سازی 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 هرکدام از شعاع‌ها، متغیر متناظر خود را در مدل خواهند داشت. بنابراین پوشش نقاط تقاضا در هر کدام از شعاع‌ها بر اساس مقدارگیری متغیر متناظر با آنها توسط مدل ارائه شده، صورت می‌گیرد. محدوده‌ی فضای این مدل ناحیه‌ی شرق تهران با حدود ۱۷۰ کیلومتر مربع مساحت و نزدیک به ۳ میلیون جمعیت است. برخی داده‌های مسئله به صورت واقعی و برخی دیگر بنابه محدودیت‌های موجود به صورت تصادفی ایجاد شدند. مسئله در حالت‌های مختلف با در نظر گرفتن پارامترهای تأثیرگذار ارزیابی شده و تحلیل حساسیت‌های موجود نشان از بهبود در پوشش تقاضاهای 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 نرم‌افزار ارائه شده تا هر زمانی که سیستم با اختلال مواجه شود کاربر با وارد کردن اطلاعات مورد نیاز در مورد جابه‌جایی آمبولانس‌ها به منظور پوشش حداکثری تصمیم‌گیری کند. همچنین می‌توان به مدل حاضر متغیرهای اعزام آمبولانس را اضافه کرد، به طوری که مسئله‌ی بازمکان یابی با مسئله‌ی اعزام به محل یک‌پارچه شود. پیشنهاد می‌شود عدم قطعیت در وزن تقاضای مناطق و چند نوع وسیله‌ی نقلیه در تحقیقات آتی در نظر گرفته شود.

پانوشت‌ها

1. static policy
2. Optima Live
3. the maximal expected covering location problem

منابع (References)

1. Ball MO, Lin FL. "Reliability model applied to emergency service vehicle location". *Oper Res.* **41**(1), pp. 18-36 (1993).
2. Reuter-Oppermann, M., van den Berg, PL., Vile, JL. "Logistics for emergency medical service systems". *Heal Syst.***6**(3), pp. 187-208 (2017).
3. Saydam, C., Rajagopalan, HK., Sharer, E. and et al. "The dynamic redeployment coverage location model". *Heal Syst.* **2**(2), pp. 103-19 (2013).
4. Lam, SSW., Ng, CBL., Nguyen, FNHL. Ng YY, Ong MEH. "Simulation-based decision support framework for dynamic ambulance redeployment in Singapore". *Int J Med Inform.* **106**(February), pp. 37-47 (2017).
5. Bélanger, V., Lanzarone, E., Soriano, P. and et al. "The ambulance relocation and dispatching problem. *Tech Rep CIRRELT-2015-59*, CIRRELT.(November) (2015).
6. Bélanger, V. and Ruiz, A. "Soriano P. Recent optimization models and trends in location, relocation, and dispatching of emergency medical vehicles". *Eur J Oper Res.* **272**(1), pp. 1-23 (2019).
7. Gendreau, M., Laporte, G. and Semet, F. "A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation". *Parallel Comput.* **27**(12), pp. 1641-53 (2011).
8. Moeini, M., Jemai, Z. and Sahin, E. "Location and relocation problems in the context of the emergency medical service systems: a case study". *Cent Eur J Oper Res.* **23**(3), 641-58 (2015).
9. Andersson, T. and Värbrand, P. "Decision support tools for ambulance dispatch and relocation". *J Oper Res Soc.* **58**(2), pp. 195-201 (2007).
10. Naoum-Sawaya, J., Elhedhli, S. "A stochastic optimization model for real-time ambulance redeployment". *Comput Oper Res.* **40**(8), pp. 1972-8 (2013).
11. Mason, AJ. "Simulation and real-time optimised relocation for improving ambulance operations". *Handb Healthc Oper Manag.* **184**, pp. 1-18 (2015).
12. Jagtenberg, CJ., Bhulai, S. and van der Mei RD. "An efficient heuristic for real-time ambulance redeployment". *Oper Res Heal Care.* **4**, pp. 27-35 (2015).
13. Van Barneveld TC, Bhulai, S. and Van der Mei RD. "A dynamic ambulance management model for rural areas". *Health Care Manag Sci.* **20**(2), pp. 165-86 (2017).
14. Enayati, S., Mayorga, ME., Rajagopalan, HK. and et al. "Real-time ambulance redeployment approach to improve service coverage with fair and restricted workload for EMS providers". *Omega (United Kingdom).* **79**, pp. 67-80 (2018).
15. Enayati, S., Özaltın, OY., Mayorga, ME. and et al. "Ambulance redeployment and dispatching under uncertainty with personnel workload limitations". *IISE Trans.* **50**(9), pp. 777-88 (2018).
16. Carvalho, AS., Captivo, ME. and Marques, I. "Integrating the ambulance dispatching and relocation problems to maximize system's preparedness". *Eur J Oper Res.* **283**(3), pp. 1064-80 (2020).
17. Chang, DY. "Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP". *Eur J Oper Res.* **95**(3), pp. 649-55 (1996).
18. Bürger, A., Wnent, J., Bohn, A. and 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.* **115**(33-34), pp. 541-8 (2018).