



## Designing a Redeployment Model for Located Ambulances

M.M. Sepehri<sup>\*</sup>, M. Maleki & N. Majlesi Nasab

Mohammad Mehdi Sepehri, [mehdi.sepehri@modares.ac.ir](mailto:mehdi.sepehri@modares.ac.ir)  
Mohammad Maleki,  
Nahid Majlesi Nasab,

### Keywords

Health Care,  
Emergency Medical Services,  
Location,  
Redeployment

### ABSTRACT

Nowadays in all countries, public resources of health care may be inadequate to meet health care demands. Hence, the policy makers and providers of health care should provide citizens with most effective methods when available resources are limited. During the past decades, a large number of research efforts in the issue of health care and its applicable mathematical models have been considered by researchers and practitioners. In this regard, location and redeployment of ambulances is one of the main issues considered in which an attempt is made to maximally cover desired regions and service patients in emergency situations. This paper presents the issue of locating available ambulances with regards to demand pattern and redeploying the located ambulances. Toward this end, after locating the ambulances, a new mathematical model is developed with the aim of minimizing the expected value of total traveled distance by the ambulances. In addition, to shed light on the merit of proposed model, a set of numerical experiments is presented. By the end of the paper, the corresponding conclusions are presented.

© 2013 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 24, No. 2, All Rights Reserved

<sup>\*</sup> **Corresponding author.** Mohammad Mehdi Sepehri  
Email: [mehdi.sepehri@modares.ac.ir](mailto:mehdi.sepehri@modares.ac.ir)

## طراحی مدل استقرار مجدد آمبولانس‌های مکان یافته

محمد مهدی سپهری\*، محمد ملکی و ناهیدسادات مجلسی نسب

### کلمات کلیدی

بهداشت و درمان،  
خدمات فوریت‌های پزشکی،  
مکان یابی،  
استقرار مجدد

### چکیده:

امروزه در تمامی کشورها، منابع عمومی برای بخش بهداشت و درمان جهت برآورده کردن تقاضا ناکافی هستند. بنابراین سیاست‌گذاران و تأمین‌کنندگان بهداشت و درمان، باید بتوانند مؤثرترین روش‌ها را در پاسخ به نیازهای شهروندان با منابع محدودی که در دسترس‌اند، به کار گیرند. تاکنون مسایل متعددی در زمینه خدمت‌دهی در بخش بهداشت و درمان و نقش مدل‌های تحقیق در عملیات در این مسایل، مورد توجه و بررسی محققین و متخصصین حوزه بهداشت و درمان قرار گرفته است. یکی از مهمترین مسایلی که در این حوزه مطرح می‌شود، مکان‌یابی و نحوه استقرار مجدد آمبولانس‌ها به منظور پوشش حداکثری مناطق و خدمت‌دهی مطلوب به بیماران در شرایط اضطراری است. هدف از این مقاله، مکان-یابی آمبولانس‌های در دسترس، و سپس استقرار مجدد آمبولانس‌های مکان یافته با توجه به الگوی تقاضا است. بدین منظور بعد از مکان‌یابی آمبولانس‌ها، مدلی با هدف کمینه‌سازی امیدریاضی مسافت-های طی شده به وسیله آمبولانس‌ها در حالت استقرار مجدد، طراحی و ارائه می‌گردد. ویژگی این مدل، تعیین نحوه تخصیص مجدد آمبولانس‌های در دسترس به پایگاه‌هایی است که در حالت جدید به منظور پوشش بالقوه تماس‌های آتی لازم است آمبولانس در آنها قرار گیرد. مدل طراحی شده برای داده‌های واقعی برگرفته از چهار منطقه از میان چهارده منطقه یک کلان‌شهر، متشکل از ۲۵۵ حوزه شهری، چهار بیمارستان و ۸ پایگاه آمبولانس مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه نتایج بدست‌آمده از حل مدل پیشنهادی و سیستم فعلی مرکز مدیریت حوادث و فوریت‌های پزشکی این کلان‌شهر، کارایی این مدل در دنیای واقعی را نشان می‌دهد.

### ۱. مقدمه

یکی از مهمترین مسایلی که در حوزه بهداشت و درمان مطرح می‌شود، مکان‌یابی و نحوه استقرار مجدد آمبولانس‌ها به منظور پوشش حداکثری مناطق و خدمت‌دهی مطلوب به بیماران در شرایط اضطراری است. هدف از خدمات فوریت‌های پزشکی<sup>۲</sup>

تاریخ وصول: ۹۰/۳/۶

تاریخ تصویب: ۹۰/۱۰/۲۷

\*نویسنده مسئول مقاله: دکتر محمد مهدی سپهری؛ دانشیار بخش مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، [mehdi.sepehri@modares.ac.ir](mailto:mehdi.sepehri@modares.ac.ir)  
محمد ملکی دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، بخش مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، [m-maleki@modares.ac.ir](mailto:m-maleki@modares.ac.ir)  
ناهیدسادات مجلسی نسب، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده صنایع و برنامه‌ریزی سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان، [n.majlesinasab@in.iut.ac.ir](mailto:n.majlesinasab@in.iut.ac.ir)  
<sup>2</sup> EMS

کاهش مرگ و میر و صدمات جسمی افراد حادثه دیده یا بیماران و به دنبال آن، افزایش سطح سلامت جامعه است. تصمیم‌گیران سیستم‌های خدمات فوریت‌های پزشکی همواره با این مسئله پیچیده روبرو هستند که به منظور پاسخ‌دهی سریع و بهینه به تماس‌های درخواست خدمات فوریت‌های پزشکی، آمبولانس‌ها باید در چه موقعیتی مستقر شوند. این مسئله، با افزایش نرخ تماس‌های اضطراری، بدتر شدن شرایط ترافیکی، و افزایش هزینه‌های عملیاتی، پیچیده‌تر خواهد شد. راهبردهای مرتبط با مکان‌یابی و استقرار مجدد آمبولانس، یکی از رویکردهایی است که می‌تواند به طور چشمگیری از این فشارها کاسته و سطح معیارهای عملکرد را بهبود دهد [۱].

مسئله مکان‌یابی و استقرار مجدد آمبولانس به راهبردهایی اشاره دارد که تحت آنها، آمبولانس‌های در دسترس، ضمن تضمین حداقل آمادگی برای مناطق مختلف، پوشش مورد نیاز را برای

می‌کرد [۷]. Hogan و ReVelle در سال ۱۹۸۶ دو مدل جدید به نام‌های BACOP1 و BACOP2 طراحی کردند که از دو نوع متغیر صفر و یک به منظور یکبار پوشش و پوشش دوگانه استفاده می‌کرد [۸]. در سال ۱۹۹۷، مدلی تحت عنوان DSM به وسیله Gendreau و دیگران ارائه شد که از دو استاندارد پوششی  $T_1$  و  $T_2$  واحد زمانی به طوری که  $T_1 < T_2$  استفاده می‌کرد. در این مدل، آمبولانس‌ها به گونه‌ای مکان‌یابی می‌شدند که در آن تمامی نقاط تقاضا در  $T_2$  واحد زمانی و  $\alpha$  درصد از آنها در  $T_1$  واحد زمانی، پوشیده می‌شد. این مدل تقاضاهایی را که در یک بازه زمانی  $T_1$  دوبار پوشیده می‌شد، بیشینه می‌کرد [۹].

## ۲-۱. مدل‌های استاتیک و احتمالی

از آنجا که در مدل‌های مکان‌یابی ایستا و قطعی احتمال مشغول بودن آمبولانس‌ها در زمان رسیدن تقاضا، در نظر گرفته نمی‌شد، در نتیجه بعد از حل این مدل‌ها، یا تعداد آمبولانس‌های مورد نیاز کمتر از مقدار واقعی و یا میزان پوشش بدست آمده بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌شدند. برای جبران این ضعف، مدل‌های احتمالی طراحی و توسعه داده شدند [۱۰]. در مدل‌های احتمالی، هر آمبولانس ممکن است در زمان رسیدن تقاضا مشغول باشد. چنین عدم قطعیتی می‌تواند با استفاده از یک چهارچوب صف، مدل شود [۱].

یکی از اولین مدل‌های احتمالی، مسئله مکان‌یابی حداکثر پوشش مورد انتظار (MEXCLP) بود که در سال ۱۹۸۳ به وسیله Daskin طراحی شد. هدف از این مدل، بیشینه‌سازی میزان تقاضای پوشیده شده مورد بود. در این مدل فرض شده بود که تمام آمبولانس‌ها یک احتمال یکسان  $q$  به نام کسر اشتغال دارند که برابر با احتمال آزاد نبودن آمبولانس در هنگام ورود تماس است. استقلال آمبولانس‌ها، از دیگر فرضیات این مدل بود [۱۱].

در سال ۱۹۸۹، Hogan و ReVelle مدلی به نام PLSCP را که توسعه‌ای از مدل LSCP بود طراحی کردند. در این مدل، تعداد آمبولانس مورد نیاز با تضمین رسیدن به حداقل پوشش لازم با استفاده از یک قابلیت اطمینان معین، کمینه می‌شد [۱]. در سال ۱۹۸۹، دو مدل احتمالی دیگر به نام‌های MALP I و MALP II به وسیله Hogan و ReVelle با هدف بیشینه‌سازی تقاضای پوشیده شده با احتمال معین  $\alpha$ ، طراحی شد. فرض ساده‌سازی مشترک در هر یک از این دو مدل، استقلال آمبولانس‌ها از یکدیگر بود. همچنین در MALP I، فرض شده بود که کسر اشتغال  $q$  برای تمام پایگاه‌های بالقوه یکسان است [۱۲].

مناطق که به دلیل اعزام یک یا چند آمبولانس، حداقل آمادگی خود را از دست داده اند، تامین می‌کند. از آنجا که تقاضا برای آمبولانس، بسته به روزهای هفته و همچنین ساعات روز، متغیر است، بنابراین می‌توان سطح عملکرد سیستم را در پاسخ‌دهی به درخواست‌های فوریت‌های پزشکی، با بکارگیری مکان‌یابی و استقرار مجدد آمبولانس‌ها، بهبود داد [۲]. در یک طبقه‌بندی، مدل‌های مکان‌یابی آمبولانس به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

- ۱) مدل‌های استاتیک و قطعی،
- ۲) مدل‌های استاتیک و احتمالی، و
- ۳) مدل‌های پویا

## ۱-۱. مدل‌های استاتیک و قطعی

مدل‌های اولیه پیشنهادی به صورت مدل‌های عدد صحیح خطی ساده بودند. این مدل‌ها از آنجا که احتمال مشغول بودن یک آمبولانس را در یک زمان معین نادیده می‌گرفتند، کاملاً قطعی بودند. همچنین، به دلیل اینکه امکان جایجایی آمبولانس‌ها بین پایگاه‌ها نبود، این مدل‌ها در رده مدل‌های استاتیک قرار می‌گرفتند [۳].

شروع مدل‌های مکان‌یابی آمبولانس‌ها با مدل LSCM<sup>۱</sup> بود که در سال ۱۹۷۱ به وسیله Toregas و دیگران ارائه شد. هدف از این مدل کمینه‌سازی تعداد آمبولانس‌های مورد نیاز به منظور پوشش تمامی نقاط تقاضا با در نظر گرفتن هزینه‌های یکسان در تابع هدف بود [۴]. مهمترین اشکال این مدل این بود که به اشتباه فرض می‌کرد همواره تمام آمبولانس‌ها در دسترس است [۳]. در سال ۱۹۷۴، Church and ReVelle مدلی تحت عنوان MCLP<sup>۲</sup> ارائه کردند. این مدل فرض می‌کرد به تعداد محدود  $p$  آمبولانس در دسترس است. هدف از این مدل بیشینه کردن میزان تقاضای پوشیده شده به وسیله آمبولانس‌ها در یک محدوده زمانی معین بود [۵].

Daskin و Stern در سال ۱۹۸۱ از یک مدل با تابع هدف سلسله مراتبی به نام HOSC استفاده کردند که همزمان با بیشینه‌سازی تعداد نقاط تقاضایی که بیش از یکبار پوشیده می‌شد، تعداد آمبولانس‌های مورد نیاز را کمینه می‌کرد [۶]. در سال ۱۹۸۶، Eaton و دیگران، به منظور مکان‌یابی پایگاه‌های آمبولانس در سانتو دومینگو واقع در جمهوری دومینیک، مدل دوهدفه DADP را که توسعه‌ای از مدل‌های LSCM و MCLP بود، طراحی کردند. این مدل، میزان تقاضایی را که در بازه زمانی معینی چند بار پوشیده می‌شد، با کمینه کردن تعداد آمبولانس‌ها، بیشینه

<sup>۱</sup> Location Set Covering Model

<sup>۲</sup> Maximal Covering Location Problem

<sup>۳</sup> Maximum Expected Covering Location Problem

مورد بررسی قرار گرفت [۱۸]. در سال ۱۹۹۴، Repede و Bernardo با توسعه مدل MEXCLP موفق به طراحی مدلی به نام TIMEXCLP شدند. هدف از این مدل، بیشینه کردن پوشش مورد انتظار در زمان‌های مختلف در طول شبانه روز بود. یکی از مزیت‌های این مدل این بود که تغییرات در سرعت آمبولانس‌ها مطابق با ساعات مختلف شبانه‌روز، در نظر گرفته می‌شد. همچنین در این مدل آمبولانس‌ها می‌توانستند در بین پایگاه‌ها جابجا شوند [۱۹]. Gendreau و دیگران در سال ۲۰۰۱ با توسعه مدل DSM، مدلی را تحت عنوان <sup>۲</sup>DDSM طراحی کردند.

این مسئله در هر زمان  $t$  و در هنگامی که یک تقاضا رخ می‌داد، حل می‌شد. تابع هدف، تفاضل مجموع جریمه‌های وابسته به جابجایی‌های آمبولانس‌ها در زمان  $t$  را از تقاضایی که در یک محدوده زمانی معین دوبار پوشیده شده بود، بیشینه می‌کرد [۲۰]. در سال ۲۰۰۶، Gendreau و دیگران، با توسعه مدل MCLP، و با در نظر گرفتن احتمال مشغول بودن آمبولانس در هنگام رسیدن تقاضا، مدل احتمالی پویایی را تحت عنوان <sup>۳</sup>MECRP طراحی کردند که هدف از آن، تعیین یک راهبرد استقرار مجدد پویا برای پایگاه‌های آمبولانس به طریقی بود که تقاضای پوشیده شده مورد انتظار بیشینه و تعداد جابجایی آمبولانس‌ها در بین پایگاه‌ها کنترل شود [۲۱].

در سال ۲۰۰۴، Andersson و دیگران، یک شاخص آمادگی به منظور تعیین آمادگی هر منطقه ارائه دادند. شاخص هر منطقه تحت تاثیر عواملی از جمله تعداد آمبولانس پوشش دهنده آن منطقه، زمان سفر هر کدام از این آمبولانس‌ها تا منطقه مورد نظر و سهم مشارکت هر آمبولانس در پوشش آن منطقه، محاسبه می‌شد [۲]. در سال ۲۰۰۷، Andersson و Varbrand، با استفاده از شاخص آمادگی محاسبه شده در سال ۲۰۰۴، یک مدل تحقیق در عملیات به منظور تعیین الگوی بهینه استقرار مجدد آمبولانس‌ها طراحی کردند [۲۲]. در سال ۲۰۰۸، Rajagopalan و دیگران مدلی به نام DACL را با هدف تعیین حداقل تعداد آمبولانس‌ها و الگوی استقرار آنها در زمان‌هایی که تغییرات قابل توجهی در الگوی تقاضا رخ می‌داد، طراحی کردند که با یک قابلیت اطمینان از پیش تعیین شده، پوشش مورد نظر را تامین می‌کرد [۱]. در سال ۲۰۱۰، Schmid و Doerner، با توسعه مدل <sup>۴</sup>DDSM و با در نظر گرفتن فواصل پوشش وابسته به زمان، مدلی به نام mDSM را به گونه‌ای طراحی کردند که در آن آمبولانس‌ها به منظور پوشش بیشتر نقاط تقاضا می‌توانستند در بین پایگاه‌ها جابجا شوند [۲۳].

Betta و دیگران در سال ۱۹۸۹، مدلی به نام AMEXCLP توسعه دادند که در آن به دلیل اینکه آمبولانس‌ها در شرایط واقعی نمی‌توانند به صورت مستقل عمل کنند، تابع هدف در یک عامل تصحیح ضرب می‌شد. کسر اشتغال در این مدل از طریق مدل هایپرکیوب<sup>۱</sup> که در سال ۱۹۷۴ به وسیله Larson ارائه شده بود، محاسبه می‌شد [۱۳].

Lin و Ball در سال ۱۹۹۳، مدلی به نام Rel-P را که توسعه‌ای از مدل LSCM بود، طراحی کردند. این مدل، از یک محدودیت خطی بر روی تعداد آمبولانس مورد نیاز به منظور دستیابی به یک سطح اطمینان معین از پوشش، استفاده نمود [۱۴]. Marianov و ReVelle در سال ۱۹۹۴ با توسعه مدل PLSCP، مدلی را به نام QPLSCP طراحی کردند که در آن برای هر پایگاه یک کسر اشتغال جداگانه محاسبه شد. در این مدل، حداقل تعداد آمبولانس‌های لازم برای پوشش یک نقطه تقاضا به گونه‌ای تعیین می‌شد که احتمال اینکه تمام این آمبولانس‌ها همزمان مشغول باشند از یک حد معین تجاوز نکند [۱۵]. آنها همچنین در سال ۱۹۹۶، مدلی را تحت عنوان Q-MALP طراحی کردند که تفاوت اصلی آن با مدل MALP، نحوه محاسبه حداقل تعداد آمبولانس‌های لازم به منظور خدمت‌دهی به هر نقطه تقاضا بود [۱۶].

Galvao و دیگران در سال ۲۰۰۵، با آزادسازی فرضیات استقلال آمبولانس‌ها و کسر اشتغال یکسان در نظر گرفته شده در مدل‌های MEXCLP و MALP I، دو مدل به نام‌های EMEXCLP و EMALP طراحی کردند. در این مدل‌ها، کسر اشتغال مربوط به هر آمبولانس از طریق مدل هایپرکیوب که در سال ۱۹۷۴ به وسیله Larson ارائه شده بود، محاسبه می‌شد [۱۷]. در سال ۲۰۰۹، Saydam و Rajagopalan، دو مدل به نام‌های  $MERLP_1$  و  $MERLP_2$  طراحی کردند. در هر دو مدل، تعداد ثابتی از آمبولانس‌ها به نحوی مکان‌یابی می‌شدند که زمان پاسخ-دهی مورد انتظار با برآورده کردن محدودیت‌های پوششی، کمینه می‌شد. در مدل  $MERLP_1$  محدودیت‌های پوشش همان محدودیت‌های پوششی مدل MEXCLP بودند در حالی که در مدل  $MERLP_2$ ، این محدودیت‌ها با استفاده از مفهوم پوشش به کار گرفته شده در مدل Q-MALP، طراحی شدند [۱۰].

### ۳-۱. مدل‌های پویا

در این مدل‌ها آمبولانس‌ها به منظور پوشش بهتر، در طول شبانه‌روز می‌توانند بین پایگاه‌ها جابجا شوند. این مسئله اولین بار به وسیله Kolesar و Walker در سال ۱۹۷۴ به منظور طراحی یک سیستم استقرار مجدد خودروهای سازمان‌های آتش‌نشانی،

<sup>2</sup> Dynamic Double Standard Model

<sup>3</sup> Maximal Expected Coverage Relocation Problem

<sup>4</sup> Hypercube Model

راس  $i \in V$  به وسیله  $j \in W$  پوشیده می‌شود، هرگاه زمان سفر از  $j$  به  $i$  از شعاع پوشش از پیش تعیین شده  $\tau$  کمتر باشد.  $W_i$  زیرمجموعه‌ای از پایگاه‌های عضو  $W$  است که نقطه تقاضای  $i \in V$  را پوشش می‌دهند. تعداد کل آمبولانس‌های موجود در سیستم (اعم از آزاد یا مشغول) برابر با  $n$  است.  $k$  برابر با تعداد آمبولانس‌های آزاد در سیستم (حالت سیستم) است. اگر نرخ ورود تقاضا  $\lambda$  و نرخ میانگین خدمت‌دهی  $\mu$  باشد، احتمال آزاد بودن یک آمبولانس برابر با  $p = 1 - \lambda / (n\mu)$  است که  $\lambda / (n\mu)$  برابر با کسر اشتغالی است که در مدل MEXCLP و مدل‌های مشابه، استفاده شده است. مقدار  $q_k$  با استفاده از یک توزیع دوجمله‌ای از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$q_k = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k (1-p)^{n-k} \quad (k = 0, 1, \dots, n) \quad (1)$$

ظرفیت هر پایگاه ثابت و برابر با یک آمبولانس است. در هر حالت به منظور پاسخ‌دهی به هر درخواست فوریت‌های پزشکی، حداکثر یک آمبولانس اعزام می‌شود. وقتی سیستم از حالت  $k$  به حالت  $k+1$  حرکت می‌کند (اگر  $k \geq n-1$ )، حداکثر  $\alpha_k$  از پایگاه‌هایی که در حالت  $k$  در آنها آمبولانس بوده است می‌تواند تغییر کند (خالی شود). هزینه استقرار مجدد در گذر از حالتی به حالت دیگر در نظر گرفته نمی‌شود، اما حدود بالایی بر روی تعداد جابجایی‌های آمبولانس‌ها در بین پایگاه‌ها در گذر از هر حالت به حالت دیگر، در نظر گرفته می‌شود. متغیرهای مسئله مکان‌یابی حداکثر پوشش مورد انتظار عبارتند از:

$x_{jk}$ : متغیر صفر و یک عدم قرارگیری یا قرارگیری یک آمبولانس در پایگاه  $j \in W$  در حالت  $k$   
 $y_{ij}$ : متغیر صفر و یک عدم پوشش یا پوشش نقطه تقاضا  $i \in V$  به وسیله حداقل یک آمبولانس در حالت  $k$   
 $u_{jk}$ : متغیر صفر و یک، صفر است اگر در حالت  $k$  و حالت  $k+1$  آمبولانس در آن قرار بگیرد یا در حالت  $k$  خالی و در حالت  $k+1$  نیز خالی باشد و یک است اگر در حالت  $k$ ،  $k+1$  آمبولانس در آن قرار گرفته باشد و در حالت  $k+1$  آمبولانس به پایگاه دیگری نقل مکان کند.

۲-۲. مدل ریاضی مسئله مکان‌یابی حداکثر پوشش مورد انتظار  
 در این مدل تابع هدف (۲) امید ریاضی میزان تقاضای پوشیده شده را بیشینه می‌سازد. محدودیت‌های (۳) به این معنی است که نقطه تقاضای  $i \in V$  تنها در صورتی پوشش داده می‌شود که حداقل یک آمبولانس در  $W_i$  قرار گیرد، و محدودیت (۴) تعداد کل آمبولانس‌ها را کنترل می‌کند. محدودیت‌های (۵)، (۶) و (۹)

با توجه به بررسی‌های انجام گرفته، علی‌رغم وجود ادبیات موضوعی بر روی مسائل مکان‌یابی و استقرار مجدد آمبولانس‌ها، در نظر گرفتن فرض امکان اعزام و اتمام ماموریت چندین آمبولانس به طور همزمان و به دنبال آن ارائه مدلی به منظور تعیین نحوه جابجایی آمبولانس از بیمارستان به پایگاه و همچنین از پایگاه به پایگاه، از جمله خلاءهای تحقیقاتی کنونی مسایل مکان‌یابی آمبولانس‌ها و بنابراین جنبه‌های اصلی نوآوری این مقاله هستند. در این مقاله، در بخش ۲، در ابتدا از یک مدل موجود در ادبیات موضوع به منظور مکان‌یابی آمبولانس‌ها به صورت پویا استفاده می‌شود. در ادامه این بخش، یک مدل ریاضی استقرار مجدد برای آمبولانس‌های مکان یافته ارائه می‌شود. در بخش ۳، کارایی مدل ارائه شده با استفاده از نتایج حاصل از اجرای آن بر روی اطلاعات واقعی جمع‌آوری شده از شهر اصفهان، نشان داده می‌شود. سرانجام در بخش ۵، به نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

## ۲. مدل سازی ریاضی

در این مقاله ابتدا به منظور مکان‌یابی آمبولانس‌ها، مدلی که به وسیله Gendreau و دیگران در سال ۲۰۰۶ ارائه شد تشریح می‌گردد. ویژگی این مدل، امکان جابجایی آمبولانس‌ها بین پایگاه‌های بالقوه در گذر از حالتی به حالت دیگر است. خروجی مدل MECPR تنها تعیین کننده این است که در حالت جدید کدام پایگاه‌ها خالی و کدام پر شوند ولی نحوه جابجایی و تخصیص آمبولانس‌ها بین این پایگاه‌ها و از بیمارستان‌ها به پایگاه‌ها، در مدل در نظر گرفته نشده است. بنابراین، نحوه تخصیص مجدد آمبولانس‌های در دسترس به پایگاه‌هایی که در حالت جدید به منظور پوشش بالقوه تماس‌های آتی لازم است آمبولانس در آنها قرار گیرد، مدل می‌شود. هدف از این مدل، کمینه سازی میزان مسافت جابجایی آمبولانس‌ها در گذر از حالتی به حالت دیگر، به منظور تسریع عملیات استقرار آنها در مکان‌های تعیین شده در سطح اول با هدف دستیابی به بهترین پوشش در طول شبانه روز خواهد بود.

### ۲-۱. مسئله مکان‌یابی مجدد حداکثر پوشش مورد انتظار

این مسئله بر روی گراف جهت‌دار  $G = (V \cup W, A)$  تعریف می‌شود.  $V$  مجموعه نقاط تقاضا،  $W$  مجموعه پایگاه‌های بالقوه آمبولانس و  $A$  مجموعه کمان‌های تعریف شده بر روی  $(V \cup W)^2$  از پایگاه‌ها به نقاط تقاضا است. به هر کمان  $(i, j) \in A$  یک زمان سفر نسبت داده می‌شود. همانند اکثر مسائل مکان‌یابی، در این مسئله نیز نقاط تقاضا به صورت گسسته بوده و جمعیت هر حوزه به نقطه تقاضا متناظر با آن حوزه داده می‌شود که نشان‌دهنده میزان تقاضا در آن نقطه است و با  $d_i, i \in V$  نشان داده می‌شود.

سهم هر بیمارستان از  $l-k$  آمبولانس آزاد شده، از یک توزیع احتمالی چندجمله‌ای پیروی می‌کند. متغیرهای مسئله استقرار مجدد آمبولانس‌های مکان یافته عبارتند از:

جابجایی  $X_{(h_1, \dots, h_m, j, j', k, l)}$ : متغیر صفر و یک عدم جابجایی یا جابجایی آمبولانس از پایگاه  $z \in A_{kl}$  به پایگاه  $j' \in B_{kl}$  در گذر از حالت  $k$  به  $l$  ( $h_1 + \dots + h_m = l - k$ )

جابجایی  $X_{i(h_1, \dots, h_m, j, j', k, l)}$ : متغیر صفر و یک عدم جابجایی یا جابجایی آمبولانس از بیمارستان  $i \in H_{kl}$  به پایگاه  $j' \in B_{kl}$  در گذر از حالت  $k$  به  $l$  ( $h_1 + \dots + h_m = l - k$ )

۲-۴. مدل ریاضی استقرار مجدد آمبولانس‌های مکان یافته

$$\text{Minimize } Z = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n \frac{(n-k)!}{(n-l)!(l-k)!} p^l (1-p)^{n-l} \times$$

$$\left[ \sum_{h_1=0}^{l-k} \sum_{h_2=0}^{l-k-h_1} \dots \sum_{h_m=0}^{l-k-h_1-h_2-\dots-h_{m-2}} f(h_1, h_2, \dots, l-k-h_1-\dots-h_{m-1}, p_1, \dots, p_m, m) \times \right.$$

$$\left. \left( \sum_{j' \in B_{kl}} X_{1(j',k,l)} d_{h_{11}j'} + \dots + X_{m(j',k,l)} d_{h_{mm}j'} \right) + \sum_{j \in A_{kl}} \sum_{j' \in B_{kl}} X_{(j,j',k,l)} d_{jj'} \right] \quad (10)$$

Subject to:

$$\sum_{j' \in B_{kl}} X_{(j',k,l)} = h_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, h_1, \dots, h_m, k, l \quad (11)$$

$$\sum_{j' \in B_{kl}} X_{(j',k,l)} = 1, \quad \forall h_1, \dots, h_m, j, k, l, A_{kl} \neq \emptyset \quad (12)$$

$$\sum_{j \in A_{kl}} X_{(j,j',k,l)} + X_{1(j',k,l)} + \dots + X_{m(j',k,l)} = 1, \quad \forall h_1, \dots, h_m, j', k, l, \quad (13)$$

$$X_{i(j',k,l)} = 0, \quad \forall i, j', k, l, (h_i = 0) \quad (14)$$

$$X_{(j,j',k,l)}, X_{1(j',k,l)}, \dots, X_{m(j',k,l)} \in \{0, 1\} \quad (15)$$

در این مدل، تابع هدف ۱۰، امید ریاضی مسافت‌های پیموده شده به وسیله آمبولانس‌ها در حالت استقرار مجدد را کمینه می‌سازد. هریک از سری محدودیت‌های ۱۱ بیان کننده این موضوع است که در گذر از حالت  $k$  به حالت  $l$ ، از هر بیمارستان به تعداد آمبولانس‌های آزاد شده در آن، آمبولانس به پایگاه‌ها جابجا می‌شود.

سری محدودیت‌های ۱۲ نشان دهنده این واقعیت است که در گذر از حالت  $k$  به حالت  $l$ ، از هر پایگاهی که در حالت  $k$  پر و در حالت  $l$  خالی شده است، به تمام پایگاه‌هایی که در حالت  $k$  خالی و در

تعداد تغییرات آمبولانس‌ها را در بین پایگاه‌ها کنترل می‌کند. اگر مقدار بدست آمده برای تابع هدف بر مجموع تقاضا یعنی  $\sum_{i=1}^n d_i$  تقسیم شود، میزان درصد پوشش مورد انتظار بدست خواهد آمد. به منظور استفاده از مدل MECRP به صورت پویا، کافی است که این مسئله تنها یک‌بار حل شود و تصمیمات مکان‌یابی ارائه شده به وسیله مقدار متغیرهای  $x_{jk}$ ، برای هر حالت  $k=1, \dots, n$  گرفته شود.

$$(MECRP) \text{ Maximize } Z = \sum_{k=1}^n \sum_{i \in V} d_i q_k y_{ik} \quad (2)$$

$$\text{Subject to : } \sum_{j \in W_i} x_{jk} \geq y_{ik} \quad (i \in V, k = 0, 1, \dots, n) \quad (3)$$

$$\sum_{j \in W} x_{jk} = k \quad (k = 0, 1, \dots, n) \quad (4)$$

$$x_{jk} - x_{j,k+1} \leq u_{jk} \quad (j \in W, k = 1, \dots, n-1) \quad (5)$$

$$\sum_{j \in W} u_{jk} \leq \alpha_k \quad (k = 1, \dots, n-1) \quad (6)$$

$$x_{jk} \in \{0, 1\} \quad (j \in W, k = 0, 1, \dots, n) \quad (7)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad \{i \in V, k = 0, 1, \dots, n\} \quad (8)$$

$$u_{jk} \in \{0, 1\} \quad \{j \in W, k = 1, \dots, n-1\} \quad (9)$$

۲-۳. مسئله استقرار مجدد آمبولانس‌های مکان یافته

این مسئله بر روی گراف‌های  $G=(A_{kl}, B_{kl})$  و  $G'=(H_{kl}, B_{kl})$  تعریف می‌شود. مجموعه پایگاه‌های انتخاب شده در حالت  $k$  که در حالت  $l$  خالی می‌شوند،  $B_{kl}$  مجموعه پایگاه‌ها انتخاب شده در حالت  $l$  که در حالت  $k$  خالی بوده‌اند و  $H_{kl}$  مجموعه بیمارستان‌هایی است که در گذر از حالت  $k$  به حالت  $l$ ، تعداد  $l-k$  آمبولانس در آنها آزاد می‌شود.  $d_{ij}$ ، فاصله زمانی بین پایگاه  $j \in A_{kl}$  تا پایگاه  $j' \in B_{kl}$ ،  $d_{hi,j'}$ ، فاصله زمانی بین بیمارستان  $i$  تا پایگاه  $j' \in B_{kl}$ ،  $p_i$ ، احتمال اینکه آمبولانس به بیمارستان  $i$  رود و ماموریتش در این بیمارستان به اتمام رسد و  $m$  تعداد کل بیمارستان‌هاست.

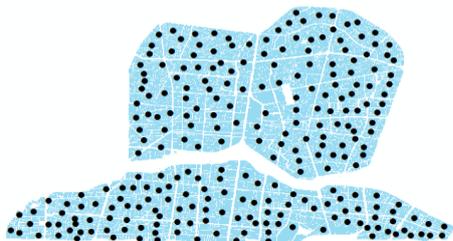
ناوگان آمبولانس‌ها یکسان است. ظرفیت هر پایگاه برابر با یک آمبولانس است. تعداد کل آمبولانس‌های موجود در سیستم، اعم از آزاد یا مشغول، برابر با  $n$  است. حالت سیستم می‌تواند از  $k$  به  $l$  تغییر کند که حدود تغییرات  $l$  به صورت  $k+1 \leq l \leq n$  است. احتمال گذر از حالت  $k$  به حالت  $l$  برابر با

$$\binom{n-k}{l-k} p^l (1-p)^{n-l}$$

است. در گذر از حالت  $k$  به حالت  $l$ ،  $l-k$  آمبولانس در بیمارستان‌ها و به صورت همزمان، آزاد می‌شوند و

در این چهار منطقه، ۲۵۵ حوزه شهری، چهار بیمارستان (شریعی، کاشانی، الزهرا و امین) و ۸ پایگاه آمبولانس وجود دارد که در هر کدام از این پایگاه‌ها یک آمبولانس مستقر است. جمعیت هریک از ۲۵۵ حوزه شهری موجود در چهار منطقه یک، سه، پنج و شش ( $d_1$  تا  $d_{255}$ ) با استفاده از "نقشه جمعیتی شهر اصفهان به تفکیک حوزه‌ها" به دست آمد. برای تجمیع نقاط تقاضا، با استفاده از نرم‌افزار GIS، مختصات مراکز ثقل هریک از این ۲۵۵ حوزه شهری به دست آمد که هرکدام از این مراکز ثقل به عنوان یک نقطه تقاضا با جمعیتی معادل جمعیت حوزه مربوط مشخص شد (شکل ۳).

با استفاده از نقشه توزیع تقاضای فوریت‌های پزشکی دو ماه شهرستان اصفهان (شکل ۴) و همچنین نقشه توزیع جمعیتی به دست آمده، علاوه بر ۸ پایگاه اورژانس اصفهان موجود (پایگاه‌های ۵، ۷، ۱۰، ۱۸، ۱۹، ۲۴، ۲۹ و ۳۲ که با مثلث‌های زرد رنگ نشان داده شده‌اند)، ۴۴ پایگاه بالقوه دیگر (مثلث‌های قرمز رنگ) به گونه‌ای مکان‌یابی شد که این پایگاه‌ها به مکان‌های پرجمعیت بدست آمده از نقشه توزیع جمعیتی، مکان‌های حادثه خیز به دست آمده از نقشه توزیع تقاضا و همچنین خیابان‌های اصلی نزدیک باشد (شکل ۵).



شکل ۳. نقشه توزیع جمعیتی مناطق انتخابی شهر اصفهان



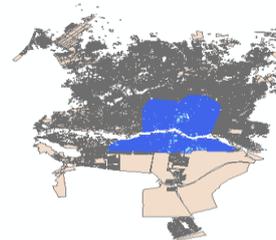
شکل ۴. نقشه توزیع تقاضای دو ماهه فوریت‌های پزشکی مناطق انتخابی شهر اصفهان

حالت ۱ پر شده‌اند، تنها یک آمبولانس جایجا می‌شود. سری محدودیت‌های ۱۳، باعث می‌شود که در گذر از حالت  $k$  به حالت  $l$ ، از کلیه بیمارستان‌هایی که آمبولانس در آنها آزاد می‌شود و همچنین از کلیه پایگاه‌هایی که در حالت  $k$  پر و در حالت  $l$  خالی شده‌اند، در مجموع یک آمبولانس به هر پایگاهی که در حالت  $l$  باید پر شود، جایجا شود. محدودیت‌های ۱۴، نشان‌دهنده این است که در گذر از حالت  $k$  به حالت  $l$ ، اگر در یکی از بیمارستان‌ها هیچ آمبولانسی آزاد نشود، هیچ جایجایی از این بیمارستان به پایگاه‌هایی که در حالت  $l$  باید پر شوند، صورت نمی‌گیرد. سرانجام، سری محدودیت‌های ۱۵، صفر و یک بودن متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

## ۲. نتایج محاسباتی

به منظور آزمایش و اعتبارسنجی مدل‌های پیشنهادی، ابتدا مدل MECRP با استفاده از اطلاعات یک مسئله واقعی حل شده و سپس مدل استقرار مجدد آمبولانس‌های مکان‌یافته بر روی نتایج بدست آمده از حل مدل MECRP، اجرا می‌گردد. به دلیل اینکه چهار منطقه یک، سه، پنج و شش شهر اصفهان جزو مناطق پرجمعیت این شهر محسوب می‌شوند (این مناطق دارای ۳۵۰۰۰۰ نفر جمعیت است) و ۴۱ درصد از تماس‌های درخواست فوریت‌های پزشکی در شهر اصفهان، از این مناطق صورت می‌پذیرد، لذا پوشش مناسب این مناطق از اهمیت بالایی برخوردار است.

بنابراین این مناطق به عنوان محدوده مسئله نمونه انتخاب شد (شکل‌های ۱ و ۲).



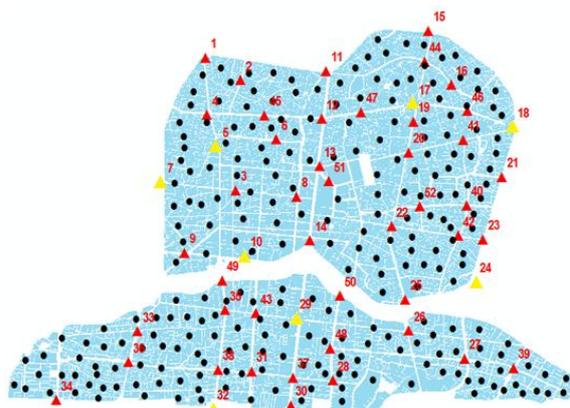
شکل ۱. محدوده انتخابی شهر اصفهان



شکل ۲. چهار منطقه انتخاب شده

جدول ۱. نتایج محاسباتی مربوط به حل مدل MECRP

n	k	a <sub>k</sub> = k
۸	۱	۴۷
	۲	۳۸ ۴۷
	۳	۲۷ ۳۸ ۴۷
	۴	۱۰ ۱۷ ۲۷ ۳۶
	۵	۲۰ ۲۷ ۳۶ ۴۵ ۴۹
	۶	۳ ۲۵ ۲۷ ۳۵ ۳۶ ۴۷
	۷	۲ ۹ ۱۹ ۲۷ ۳۶ ۳۷ ۴۲
	۸	۹ ۱۵ ۲۰ ۲۷ ۳۴ ۳۵ ۳۸
مقدار تابع هدف		۰,۹۹۷۱۷۳
زمان محاسباتی(ثانیه)		۷,۴



شکل ۵. نقشه توزیع جمعیتی و پراکندگی پایگاه‌های بالقوه در مناطق انتخابی شهر اصفهان

با استفاده از Google Map، فواصل زمانی و مسافت‌های بین پایگاه‌های A<sub>kl</sub> تا پایگاه‌های B<sub>kl</sub> و همچنین بیمارستان‌های شریعتی، کاشانی، الزهرا و امین تا پایگاه‌های B<sub>kl</sub>، برای تمامی حالت‌ها به دست آمد. همچنین با استفاده از اطلاعات ۹ ماهه اعزام‌ها در مناطق چهارگانه اصفهان، احتمال اتمام ماموریت در هریک از بیمارستان‌های شریعتی، کاشانی، الزهرا و امین محاسبه شد.

پس از جمع‌آوری اطلاعات لازم، مدل استقرار مجدد آمبولانس‌های مکان یافته با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شد. مقدار تابع هدف و زمان محاسباتی به ترتیب برابر با ۳۴۱,۸۶ و ۲۹,۰۱ به دست آمد.

### ۳-۱. اعتبار سنجی

پس از اجرای مدل MECRP بر روی داده‌های جمع‌آوری شده از مناطق چهارگانه شهر اصفهان و مقایسه نتایج به دست آمده با وضعیت سیستم موجود در مرکز مدیریت حوادث و فوریت‌های پزشکی شهر اصفهان، به نتایج قابل توجهی دست یافتیم (جدول ۲). همانطور که در جدول ۲ آمده است، در شرایط واقعی که تعداد ۸ آمبولانس در چهار منطقه یک، سه، پنج و شش به درخواست‌های فوریت‌های پزشکی پاسخ‌دهی می‌کنند، ۵۴,۵ درصد از درخواست‌ها

در فاصله زمانی ۸ دقیقه پاسخ‌دهی می‌شوند، در حالیکه با استفاده از مدل MECRP می‌توان به ۹۹,۷۲ درصد از درخواست‌ها در این بازه زمانی و با تعداد ۸ آمبولانس پاسخ داد. این مقادیر از تقسیم مقدار تابع هدف مسئله MECRP یعنی تقاضای پوشیده شده مورد انتظار در هر حالت بر کل مجموع تقاضای ۲۵۵ نقطه تقاضا ( $\sum_{i=1}^{255} d_i$ ) به دست آمد.

با استفاده از Google Map، یک ماتریس با ابعاد ۲۵۵\*۵۲ از زمان و مسافت واقعی بین هر کدام از پایگاه‌ها تا ۲۵۵ نقطه تقاضا بدست آمد. از آنجا که در این مسئله، درخواست‌های فوریت‌های پزشکی (نقاط تقاضا)، به صورت گسسته و متمرکز در ۲۵۵ نقطه فرض شده است، در نتیجه فاصله هر پایگاه تا تمام بلوک‌های موجود در هر حوزه برابر با فاصله آن پایگاه تا مرکز ثقل حوزه مورد نظر، گرفته شده است.

این معادلسازی باعث بی‌دقتی در تابع هدف و در نتیجه در جواب بهینه حاصل از حل مدل MECRP می‌شود. Drezner و Drezner (۱۹۹۷) برای کمینه‌سازی خطای مذکور پیشنهاد داده‌اند که فاصله تا نقطه تقاضا، d، را با عبارت  $\sqrt{d^2 + \lambda A}$  جایگزین کنند که در آن A مساحت ناحیه مورد نظر و  $\lambda$  ثابت تصحیح مسافت است که ثابت شده بین ۰/۱ تا ۰/۲۴ جواب‌های قابل قبولی تولید می‌کند [۲۴].

بنابراین تمامی مسافت‌ها و زمان‌های به دست آمده، به وسیله رابطه بالا اصلاح شد. از آنجا که زمان مطلوب برای مرکز مدیریت حوادث و فوریت‌های پزشکی شهر اصفهان حداکثر ۸ دقیقه است، ماتریس زمان‌های بدست آمده، تبدیل به یک ماتریس صفر و یک شد (ماتریس ضرایب پوشش) که در آن به ازای زمان‌های بالای ۸ دقیقه صفر و به ازای زمان‌های ۸ دقیقه و کمتر، یک قرار می‌گرفت. برای محاسبه احتمال مشغول بودن آمبولانس در لحظه ورود تقاضا، نرخ ورود تقاضا و نرخ میانگین خدمت‌دهی در مناطق چهارگانه با استفاده از اطلاعات مربوط به اعزام‌های مربوط به ۹ ماه این مناطق، محاسبه شد. سپس با استفاده از فرمول  $\lambda / (n\mu)$ ، این احتمال محاسبه شد که برابر با ۰/۱۷ بود. پس از جمع‌آوری اطلاعات، مدل MECRP با استفاده از نرم‌افزار GAMS، برای  $\alpha_k = k$  حل شد که نتایج محاسباتی حاصل در جدول ۱ آمده است.

جدول ۲. مقایسه نتایج حاصل از حل مدل MEICRP با وضعیت فعلی مرکز مدیریت حوادث و فوریت‌های پزشکی شهر اصفهان

مدل MEICRP	حداکثر زمان از لحظه تماس تا رسیدن بر بالین بیمار (دقیقه)						
	تعداد آمبولانس						
	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
	پوشش مناطق چهارگانه (%)						
۱	۶,۹۹	۱۱,۴۹	۱۶,۱۰	۲۳,۶۷	۳۰,۴۲	۳۷,۶۳	۴۷,۵۲
۲	۱۳,۶۸	۲۰,۹۳	۳۰,۰۹	۴۱,۸۸	۵۴,۶۹	۶۶,۷۲	۷۸,۶۷
۳	۱۹,۳۸	۲۹,۵۷	۴۲,۵۵	۵۸,۱۲	۷۳,۳۳	۸۵,۰۱	۹۲,۹۶
۴	۲۴,۴۳	۳۷,۶۴	۵۴,۲۳	۷۰,۱۲	۸۶,۳۰	۹۴,۲۸	۹۷,۹۶
۵	۲۹,۰۱	۴۵,۲۷	۶۴,۹۲	۷۶,۶۰	۹۳,۸۳	۹۸,۲۱	۹۹,۴۶
۶	۳۳,۲۷	۵۲,۵۰	۷۴,۴۸	۸۸,۱۰	۹۷,۵۳	۹۹,۴۶	۹۹,۸۷
۷	۳۷,۲۸	۵۹,۰۹	۸۲,۷۱	۹۴,۷۸	۹۹,۱۱	۹۹,۸۶	۹۹,۹۷
واقعیت	۴۱,۰۶	۶۵,۰۷	۸۹,۰۲	۹۷,۸۴	۹۹,۷۲	۹۹,۹۷	۹۹,۹۹

متعلق به پایگاه ۷ است به پایگاهش بازگشته و پوشش نهایی به ۵۸,۳ درصد می‌رسد. همانطور که دیده می‌شود، در سیستم فعلی اجازه هیچگونه جابجایی بین پایگاه‌ها داده نشده است. با بکارگیری مدل پیشنهادی، پس از گذشت ۲ دقیقه از اتمام ماموریت سه آمبولانس، دو آمبولانس به طور همزمان در پایگاه‌های ۴۵ و ۴۹ قرار می‌گیرند و پوشش مناطق با احتساب دو آمبولانس موجود، به ۵۳,۲ درصد می‌رسد. بعد از گذشت ۹ دقیقه، یک آمبولانس در پایگاه ۳۶ قرار می‌گیرد و پوشش مناطق به ۶۲,۷ درصد می‌رسد. بعد از گذشت ۱۴ دقیقه، یک آمبولانس در پایگاه ۲۷ قرار می‌گیرد و پوشش مناطق به ۸۲,۷ درصد می‌رسد. در نهایت، پس از گذشت ۱۵ دقیقه از زمان اتمام ماموریت ۳ آمبولانس، یک آمبولانس در پایگاه ۲۰ قرار می‌گیرد و پوشش مناطق به ۹۹,۳ درصد می‌رسد. به دلیل اینکه، با استفاده از مدل پیشنهادی جابجایی بین پایگاه‌ها نیز اجازه داده شده است، لذا در گذر از حالتی به حالت دیگر، بیش از تعداد آمبولانس‌های آزاد شده، مکان‌یابی صورت می‌گیرد. زمانی که یک یا چند آمبولانس به صورت همزمان اعلام اتمام ماموریت می‌کنند، بسیار مهم است که در حداقل زمان ممکن این آمبولانس‌ها در بهترین موقعیت مکانی به صورت آماده باش حاضر باشند. بنابراین با توجه به اطلاعات به دست آمده از سیستم فعلی و جواب حاصل از مدل پیشنهادی، واضح است که آمبولانس‌ها با استفاده از الگوی مدل پیشنهادی در زمان کمتری نسبت به سیستم فعلی در موقعیت‌های مکانی‌ای قرار می‌گیرند که پوشش مناطق را در مقایسه با سیستم فعلی به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. بنابراین، مقایسه نتایج به دست آمده از اجرای مدل MCLP بر روی اطلاعات به دست آمده از وضعیت فعلی و نتایج حاصل از حل مدل استقرار مجدد آمبولانس‌های مکان یافته، کارایی مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد (پیوست. جدول ۳).

به منظور اعتبارسنجی مدل استقرار مجدد آمبولانس‌های مکان یافته، داده‌های مربوط به ۷۳ بار اعزام آمبولانس برای مدت سه روز، از قبیل زمان دریافت تماس، زمان شروع ماموریت، کد پایگاهی که آمبولانس از آن اعزام شده است، نام بیمارستانی که ماموریت در آن خاتمه می‌یابد و زمان رسیدن آمبولانس به پایگاه جمع‌آوری شد.

بعد از پالایش این داده‌ها، اطلاعات مربوط به زمان خاتمه ماموریت آمبولانس‌ها به دست آمد. با استفاده از این اطلاعات، ابتدا برای حالت فعلی سیستم اورژانس اصفهان که هر آمبولانس بعد از اتمام ماموریت خود در هریک از بیمارستان‌ها، باید به پایگاهی که ماموریت را از آن شروع کرده بود می‌رفت، پوشش جمعی حاصل بعد از رسیدن هر آمبولانس به پایگاهش، از طریق مدل MCLP محاسبه شد.

سپس مدل استقرار مجدد آمبولانس‌های مکان یافته بر روی اطلاعات مذکور اجرا شده و مجدداً با استفاده از مدل MCLP، پوشش جمعی حاصل بعد از رسیدن هر آمبولانس به پایگاهی که با حل مدل استقرار مجدد آمبولانس‌های مکان یافته، تعیین شده است، به دست آمد. مطابق شکل ۳، به عنوان مثال در گذر از حالت ۲ به حالت ۵ (سطر اول)، دو آمبولانس آزاد است و سه آمبولانس به آنها اضافه می‌شود

در سیستم فعلی، از آنجا که هر آمبولانس پس از اتمام ماموریتش باید به پایگاهی که ماموریتش را از آن آغاز کرده بازگردد، پس از گذشت ۴ دقیقه از لحظه اتمام ماموریت ۳ آمبولانس، آمبولانس پایگاه ۳۲ به این پایگاه بازگشته و پوشش مناطق با احتساب دو آمبولانس موجود، و با ثابت کردن ۳ آمبولانس در مدل MCLP، به ۵۰,۱ درصد می‌رسد. پس از گذشت ۸ دقیقه، آمبولانس پایگاه ۱۰ به این پایگاه بازمی‌گردد و پوشش مناطق به ۵۷,۹ درصد می‌رسد. در نهایت پس از گذشت ۱۶ دقیقه آخرین آمبولانس که

جدول ۳. مقایسه نتایج بدست آمده از حل مدل MCLP با استفاده از اطلاعات به دست آمده از وضعیت فعلی و مدل پیشنهادی

k	L	سیستم فعلی			استفاده از مدل‌های پیشنهادی						
		(پوشش حاصل، پایگاه‌های انتخاب شده، زمان جابجایی)			(پوشش حاصل، پایگاه‌های انتخاب شده، زمان جابجایی)						
۲	۵	(۴,۳۲,۵۰,۱)	(۸,۱۰,۵۷,۹)	(۱۶,۷,۵۸,۳)	(۲,۴۵,۴۹,۵۳,۲)	(۹,۳۶,۶۲,۷)	(۱۴,۲۷,۸۲,۷)	(۱۵,۲۰,۹۹,۳)			
۳	۴	(۴,۲۹,۴۷,۵)			(۱,۱۷,۵۷,۵)	(۵,۱۰,۸۰,۷)	(۹,۳۶,۹۵,۵)				
۴	۵	(۱۳,۲۴,۵۶,۵)			(۲,۲۰,۴۹,۸۶,۹)	(۴,۴۵,۹۹,۳)					
۴	۶	(۹,۱۸,۴۹,۴)	(۱۶,۲۴,۵۰,۱)		(۲,۲۰,۴۹,۸۶,۹)	(۱۲,۴۵,۹۹,۳)	(۲,۲۰,۴۹,۸۶,۹)	(۱۲,۴۵,۹۹,۳)			
۴	۸	(۴,۳۲,۵۰,۱)	(۵,۱۹,۶۱,۷)	(۸,۱۰,۶۸)	(۱۲,۷,۶۸,۴)	(۲,۱۵,۴۱,۳)	(۳,۹,۳۴,۶۹,۷)	(۵,۲,۷۲,۵)	(۹,۳,۵۸,۵,۸)	(۱۰,۳,۸۵,۵,۸)	(۱۵,۲۰,۱۰۰)
		(۴,۲۹,۴۷,۵)	(۵,۱۹,۶۰,۵)	(۱۲,۱۸,۶۶,۷)	(۱۶,۲۴,۶۸,۴)	(۲,۱۵,۴۱,۳)	(۳,۲,۳۴,۹,۷۲,۵)	(۵,۳,۵۸,۵,۸)	(۶,۲,۱۰,۰)	(۱۱,۳,۸۱,۰)	
		(۹,۱۸,۴۹,۴)					(۲,۴۷,۸۹,۹)	(۵,۲۵,۹۶,۱)	(۹,۳,۱۰,۰)		
۵	۶	(۵,۳۲,۶۴,۴)			(۰,۶۲,۳۵,۵۴)	(۲,۴۷,۸۹,۹)	(۵,۲۵,۹۶,۱)	(۸,۳,۱۰,۰)			
		(۴,۳۲,۶۲)			(۰,۶۲,۳۵,۵۴)	(۲,۴۷,۸۹,۹)	(۵,۲۵,۹۶,۱)	(۱۲,۳,۱۰,۰)			
		(۷,۷,۶۰)			(۰,۶۲,۳۵,۵۴)	(۲,۴۷,۸۹,۹)	(۵,۳,۲۵,۱۰,۰)				
۵	۷	(۸,۱۰,۵۵,۹)	(۱۲,۱۸,۵۷,۱)		(۱,۱۹,۷۲,۷)	(۲,۲,۸۱,۵)	(۴,۹,۹۱,۲)	(۹,۴,۲,۹۴,۴)	(۱۲,۳,۷,۱۰,۰)		
		(۷,۷,۵۰,۱)	(۹,۱۸,۶۶,۶)		(۱,۱۹,۷۲,۷)	(۲,۲,۸۱,۵)	(۴,۹,۹۱,۲)	(۹,۴,۲,۹۴,۴)	(۱۲,۳,۷,۱۰,۰)		
۵	۸		(۷,۱۰,۶۸,۴)		(۰,۶۲,۳۵,۵۴)	(۲,۲,۸۱,۵)	۳,۳۴,۳۸,۹۴,۹	(۸,۹,۹۹,۲۲)	(۱۴,۱۵,۱۰,۰)		
		(۱۰,۱۰,۶۴,۴)	(۱۲,۲۹,۶۶,۶)	(۲۰,۱۹,۶۸,۴)	(۰,۶۲,۳۵,۵۴)	(۲,۲,۸۱,۵)	(۳,۳۴,۹۴,۹)	(۵,۳,۸۹,۴,۹)	(۱۰,۹,۹۹,۲)	(۱۵,۱۵,۱۰,۰)	
		(۷,۱۰,۶۷,۲)			(۲,۱۹,۷۲,۷)	(۳,۴۲,۷۵,۸)	(۵,۹,۳۷,۹۵,۴)	(۱۲,۲,۱۰,۰)			
		(۱۲,۲۴,۵۷,۱)			(۲,۱۹,۷۲,۷)	(۳,۴۲,۷۵,۸)	(۵,۲,۳۷,۹۱,۳)	(۱۰,۹,۱۰,۰)			
		(۴,۳۲,۶۶,۷)			(۲,۱۹,۷۲,۷)	(۳,۴۲,۷۵,۸)	(۵,۹,۳۷,۹۵,۴)	(۱۲,۲,۱۰,۰)			
		(۷,۱۰,۶۶,۷)			(۲,۱۹,۷۲,۷)	(۳,۴۲,۷۵,۸)	(۵,۹,۳۷,۹۵,۴)	(۱۲,۲,۱۰,۰)			
		(۴,۲۹,۶۳,۷)			(۲,۱۹,۷۲,۷)	(۳,۴۲,۷۵,۸)	(۵,۹,۳۷,۹۵,۴)	(۱۲,۲,۱۰,۰)			
۶	۷	(۸,۱۰,۶۷,۲)			(۲,۱۹,۷۲,۷)	(۳,۴۲,۷۵,۸)	(۵,۲,۹,۹۴,۴)	(۱۲,۳,۷,۱۰,۰)			
		(۱۲,۲۴,۵۷,۱)			(۲,۱۹,۷۲,۷)	(۳,۴۲,۷۵,۸)	(۵,۹,۳۷,۹۵,۴)	(۱۲,۲,۱۰,۰)			
		(۴,۳۲,۶۶,۷)			(۲,۱۹,۷۲,۷)	(۳,۴۲,۷۵,۸)	(۵,۲,۳۷,۹۱,۳)	(۱۰,۹,۱۰,۰)			
		(۵,۳۲,۶۶,۷)			(۲,۱۹,۷۲,۷)	(۳,۴۲,۷۵,۸)	(۵,۹,۳۷,۹۵,۴)	(۱۲,۲,۱۰,۰)			
		(۴,۳۲,۶۶,۳)			(۲,۱۹,۷۲,۷)	(۳,۴۲,۷۵,۸)	(۵,۲,۳۷,۹۱,۳)	(۱۰,۹,۱۰,۰)			
		(۸,۱۰,۶۶,۷)	(۱۲,۲۴,۶۸,۴)		۳,۱۵,۳۴,۳۸,۷۳,۴	(۴,۲۰,۸۷,۶)	(۵,۲,۹,۱۰,۰)				
		(۴,۳۲,۶۶,۳)	(۱۲,۲۹,۶۸,۴)		(۳,۱۵,۳۴,۷۳,۴)	(۴,۲۰,۸۷,۶)	(۵,۲,۳۸,۹۵,۶)	(۱۰,۹,۱۰,۰)			
		(۱۰,۱۰,۶۷,۲)	(۱۸,۲۴,۶۸,۴)		(۳,۱۵,۳۴,۷۳,۴)	(۴,۲۰,۸۷,۶)	(۵,۲,۳۸,۹۵,۶)	(۱۰,۹,۱۰,۰)			
۶	۸	(۷,۱۰,۷۶,۸,۴)			۳,۱۵,۳۴,۳۸,۷۳,۴	(۴,۲۰,۸۷,۶)	(۵,۲,۹,۵,۶)	(۷,۹,۱۰,۰)			
		(۵,۱۹,۶۶,۷)	(۱۲,۲۴,۶۸,۴)		۳,۱۵,۳۴,۳۸,۷۳,۴	(۴,۲۰,۸۷,۶)	(۵,۲,۹,۱۰,۰)				
		(۴,۳۲,۶۶,۶)	(۵,۱۹,۶۸,۴)		(۳,۱۵,۳۴,۷۳,۴)	(۴,۲۰,۸۷,۶)	(۵,۲,۹,۵,۶)	(۱۰,۹,۱۰,۰)			
		(۸,۱۰,۶۶,۳)	(۱۲,۲۹,۶۸,۴)		(۳,۱۵,۳۴,۷۳,۴)	(۴,۲۰,۸۷,۶)	(۵,۹,۹۷,۲)	(۱۱,۳,۸,۹۷,۲)	(۱۴,۲,۱۰,۰)		
		(۵,۳۲,۶۶,۷)	(۱۲,۲۴,۶۸,۴)		۳,۱۵,۳۴,۳۸,۷۳,۴	(۴,۲۰,۸۷,۶)	(۵,۲,۹,۵,۶)	(۹,۹,۱۰,۰)			
		(۷,۱۰,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۵,۳۵,۱۰,۰)			
		(۴,۳۲,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۷,۳۵,۱۰,۰)			
		(۱۷,۱۸,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۵,۳۵,۱۰,۰)			
		(۷,۱۰,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۵,۳۵,۱۰,۰)			
		(۵,۳۲,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۵,۳۵,۱۰,۰)			
		(۱۲,۲۴,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۵,۳۵,۱۰,۰)			
		(۵,۱۹,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۹,۳۵,۱۰,۰)			
		(۱۲,۲۹,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۷,۳۵,۱۰,۰)			
		(۱۸,۲۴,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۷,۳۵,۱۰,۰)			
۷	۸	(۶,۱۸,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۹,۳۵,۱۰,۰)			
		(۱۲,۲۴,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۵,۳۵,۱۰,۰)			
		(۶,۱۸,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۹,۳۵,۱۰,۰)			
		(۱۲,۲۴,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۵,۳۵,۱۰,۰)			
		(۶,۱۸,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۹,۳۵,۱۰,۰)			
		(۱۲,۲۴,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۵,۳۵,۱۰,۰)			
		(۵,۱۹,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۹,۳۵,۱۰,۰)			
		(۹,۱۸,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۹,۳۵,۱۰,۰)			
		(۵,۱۹,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۹,۳۵,۱۰,۰)			
		(۴,۲۹,۶۸,۴)			(۲,۱۵,۶۰,۸)	(۳,۳۴,۳۸,۸۵,۴)	(۴,۲۰,۹۹,۶)	(۵,۳۵,۱۰,۰)			

## ۴. نتیجه‌گیری

به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مدل MECRP، با استفاده از نرم‌افزار GAMS بر روی اطلاعات بدست آمده از چهار منطقه شهر اصفهان اجرا شد.

سپس، مدل پیشنهادی با استفاده از اطلاعات موجود و همچنین نتایج حاصل از حل مدل MECRP، اجرا شد. با مقایسه نتایج بدست‌آمده از حل مدل پیشنهادی با سیستم فعلی مرکز مدیریت حوادث و فوریت‌های پزشکی شهر اصفهان، کارایی این مدل در دنیای واقعی نشان داده شد.

در این مقاله پس از تشریح مدل MECRP موجود در ادبیات موضوع یک مدل استقرار مجدد آمبولانس‌های مکان‌یافته با هدف کمینه کردن امید ریاضی مسافت‌های پیموده شده به وسیله آمبولانس‌ها در حالت استقرار مجدد، ارائه شد. ویژگی این مدل، تعیین نحوه تخصیص مجدد آمبولانس‌های در دسترس به پایگاه‌هایی است که در حالت جدید به منظور پوشش بالقوه تماس‌های آتی لازم است آمبولانس در آنها قرار گیرد. این مدل می‌تواند به عنوان مکملی برای مدل‌های مکان‌یابی پویا به کار رود.

## ۵. زمینه‌های پژوهشی آتی

در این مقاله، تنها حالتی که یک یا چند آمبولانس به آمبولانس-های آزاد اضافه شود، مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین، یکی از زمینه‌هایی که می‌تواند در تکمیل این تحقیق مورد بررسی قرار گیرد، نحوه جابجایی آمبولانس‌های آزاد، در هنگامی که یک یا چند آمبولانس به منظور پاسخ‌دهی به درخواست‌های فوریت‌های پزشکی اعزام شده و در نتیجه از تعداد آمبولانس‌های آزاد کاسته می‌شود، خواهد بود.

یکی از فرضیاتی که در این پژوهش در نظر گرفته شد، اتمام ماموریت آمبولانس‌ها در بیمارستان‌ها بود. در صورتی که در واقعیت، در بعضی از درخواست‌های فوریت‌های پزشکی، نیازی به انتقال بیمار به بیمارستان نیست و در نتیجه ماموریت در محل تقاضای فوریت پزشکی (بالین بیمار) به اتمام می‌رسد. در نظر گرفتن این فرض و ارائه یک مدل ریاضی که در آن نقاط تقاضا به عنوان نقاط بالقوه‌ای هستند که می‌توانند محل اتمام ماموریت یک یا چند آمبولانس باشند، به واقعی‌تر کردن این مسئله کمک خواهد کرد.

## منابع و مآخذ

- [10] Rajagopalan, H., Saydam, C., "A Minimum Expected Response Model: Formulation, Heuristic Solution, and Application," Socio-Economic Planning Sciences, Vol. 43, 2009, pp. 253-262.
- [11] Daskin, M., "A Maximum Expected Covering Location Model: Formulation, Properties and Heuristic Solution," Transportation Science, Vol. 17, 1983, p. 48.
- [12] ReVelle, C., Hogan, K., "The Maximum Availability Location Problem," Transportation Science, Vol. 23, 1989, p. 192.
- [13] Batta, R., et al., "The Maximal Expected Covering Location Problem: Revisited," Transportation Science, Vol. 23, 1989, p. 277.
- [14] Ball, M., Lin, F., "A Reliability Model Applied to Emergency Service Vehicle Location," Operations Research, 1993, pp. 18-36.
- [15] Marianov, V., ReVelle, C., "The Queuing Probabilistic Location Set Covering Problem and Some Extensions," Socio-Economic Planning Sciences, Vol. 28, 1994, pp. 167-178.
- [16] Marianov, V., ReVelle, C., "The Queuing Maximal Availability Location Problem: a Model for the Siting of Emergency Vehicles," European Journal of Operational Research, Vol. 93, 1996, pp. 110-120.
- [17] Galvão, R., et al., "Towards Unified Formulations and Extensions of Two Classical Probabilistic Location Models," Computers & Operations Research, Vol. 32, 2005, pp. 15-33.
- [18] Kolesar, P., Walker, W., "An Algorithm for the Dynamic Relocation of Fire Companies," Operations Research, Vol. 22, 1974, pp. 249-274.
- [19] Repede, J.F., Bernardo, J.J., "Developing and Validating a Decision Support System for Locating Emergency Medical Vehicles in Louisville, Kentucky," European Journal of Operational Research, Vol. 75, 1994, pp. 567-581.
- [20] Gendreau, M., et al., "A Dynamic Model and Parallel Tabu Search Heuristic for Real-Time Ambulance Relocation," Parallel Computing, Vol. 27, 2001, pp. 1641-1653.
- [21] Gendreau, M., et al., "The Maximal Expected Coverage Relocation Problem for Emergency Vehicles," Journal of the Operational Research Society, Vol. 57, 2006, pp. 22-28.
- [22] Andersson, T., Värbrand, P., "Decision Support Tools for Ambulance Dispatch and Relocation," Journal of the Operational Research Society, Vol. 58, 2007, pp. 195-201.
- [23] Schmid, V., Doerner, K., "Ambulance Location and Relocation Problems with Time-Dependent Travel
- [1] Rajagopalan, H., et al., "A Multiperiod Set Covering Location Model for Dynamic Redeployment of Ambulances," Computers & Operations Research, Vol. 35, 2008, pp. 814-826.
- [2] Andersson, T., et al., "Calculating the Preparedness for an Efficient Ambulance Health Care," 2004, pp. 785-790.
- [3] Brotcorne, L., et al., "Ambulance Location and Relocation Models," European Journal of Operational Research, Vol. 147, 2003, pp. 451-463.
- [4] Toregas, C., et al., "The Location of Emergency service Facilities," Operations Research, Vol. 19, 1971, pp. 1363-1373.
- [5] Church, R., ReVelle, C., "The Maximal Covering Location Problem," Papers in regional science, Vol. 32, 1974, pp. 101-118.
- [6] Daskin, M., Stern, E., "A Hierarchical Objective Set Covering Model for Emergency Medical Service Vehicle Deployment," Transportation Science, Vol. 15, 1981, p. 137.
- [7] Eaton, D., Morgan, J., "Determining Ambulance Deployment in Santo Domingo, Dominican Republic," Journal of the Operational Research Society, Vol. 37, 1986, pp. 113-126.
- [8] Hogan, K., ReVelle, C., "Concepts and Applications of Backup Coverage," Management Science, Vol. 32, 1986, pp. 1434-1444.
- [9] Gendreau, S., et al., "Solving an Ambulance Location Model by Tabu Search," Location Science, Vol. 5, 1997, pp. 75-88.

*Times*," European Journal of Operational Research, 2010.

- [24] Drezner, T., Drezner, Z., "Replacing Continuous Demand with Discrete Demand in a Competitive Location Model," Naval Research Logistics, Vol. 44, 1997, pp. 81-95.