

ارائه یک مدل چندهدفه پودمانی جهت مسئله مکان‌یابی خدمات پزشکی اضطراری، مطالعه موردی: شهر کرمان

حسین ملک‌محمدی^۱، احمد ماکویی^{۲*}

دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹

چکیده

این مطالعه مدل بهینه‌سازی دوهدفه‌ای جهت مکان‌یابی مراکز خدمات پزشکی اضطراری ارائه می‌دهد که بین توابع هدف پوشش و دسترس پذیری تعادل برقرار می‌نماید. مدل پیشنهادی تصمیمات استراتژیک مکان‌یابی و تصمیمات تاکتیکال تخصیص را در نظر می‌گیرد. به علاوه این مقاله برخلاف اکثر مدل‌ها که ظرفیت ثابتی را برای نقاط بالقوه تسهیلات در نظر می‌گیرند که موجب اعمال محدودیت‌هایی در کاربرد این مدل‌ها می‌شود، یک مسئله برنامه‌ریزی پودمانی که قادر به در نظر گرفتن چندین ظرفیت ممکن برای تسهیلات است ارائه می‌دهد. جهت مکان‌یابی بهینه آمبولانس‌ها، مدل جدید تخصیص تقاضاهای خارج از محدوده پوشش را نیز در نظر می‌گیرد. کاربرد این مدل بر روی مطالعه موردی که داده‌های آن برگرفته از مرکز اورژانس شهر کرمان می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته شد. در نهایت نتایج عددی به دست آمده از استقرار مدل و آزمایش‌های تحلیل حساسیت به همراه نکات مدیریتی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی تسهیلات اورژانسی، مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه، مسئله مکان‌یابی حداکثر پوشش، دسترس‌پذیری، خدمات پزشکی اضطراری.

۱- مقدمه

امروزه مکان‌یابی تسهیلات یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقی و کاربردی تحقیق در عملیات شناخته می‌شود. در بین مسائل مکان‌یابی تسهیلات، مسائل اضطراری به دلیل اینکه اغلب با جان انسان‌ها در رابطه است اهمیت بسزایی پیدا می‌کند. مسائل مکان‌یابی تسهیلات اضطراری شامل مکان‌یابی آمبولانس‌ها، ایستگاه‌های آتش‌نشانی، واحدهای گشت‌زنی پلیس و... می‌باشد. محل قرارگیری و چیدمان این خدمات در سطح شهرها تأثیر بسزایی در نوع عملکرد، کیفیت خدمت‌رسانی و اثرپذیری آن‌ها از شرایط جریان ترافیکی دارد. مکان‌یابی مناسب تسهیلات اضطراری باعث

کاهش زمان پاسخ‌گویی و در نتیجه افزایش احتمال نجات جان افراد خواهد شد.

در یک مأموریت اورژانسی فرضاً برای یک مرکز پزشکی، عوامل متعددی در موفقیت مأموریت در عملیات تأثیر دارند؛ از جمله سرعت و عکس‌العمل سریع مأمورین برای آماده شدن به منظور اعزام به صحنه حادثه و میزان توانایی و مهارت مأمورین در صحنه حادثه. اما علاوه بر این موارد اگر فاصله تسهیل از مرکز حادثه دور باشد و مدت بیش‌ازحد استاندارد زمان صرف شود تا مأمورین به صحنه حادثه برسند، در این صورت فعالیت مأمورین بی‌نتیجه خواهد ماند. دسترس‌پذیری آمبولانس‌ها نیز در پاسخ‌گویی مؤثر بسیار مهم است؛ اگر به مرکز پزشکی تماس گرفته شود و تقاضای ارسال آمبولانس شود، اما تمامی آمبولانس‌های مرکز پزشکی در حال خدمت در نقاط تقاضای دیگری باشند، در این صورت موقعیت شخص بیمار شدیداً تحت خطر خواهد بود. اضافه کردن سرورها، به طور مثال آمبولانس‌ها در یک بیمارستان راه‌حل ساده‌ای است که در ابتدا به ذهن افراد می‌رسد. اما اغلب این موضوع به دلیل

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران، پست الکترونیک:

Malekmohammadi_hossein@yahoo.com

*۲- استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، نویسنده مسئول، نشانی: تهران، میدان رسالت، خیابان هنگام، دانشگاه علم و صنعت ایران، پست الکترونیک: amakui@iust.ac.ir

محدودیت‌های موجود مانند محدودیت بودجه، غیرقابل انجام است. بنابراین مکان‌یابی مناسب و دسترس‌پذیری مطلوب از جمله مواردی هستند که در مسائل مکان‌یابی تسهیلات اورژانسی مورد توجه قرار می‌گیرد. در زمینه مدل‌سازی و حل مسائل مکان‌یابی تسهیلات اضطراری اغلب به دنبال پاسخ به دو سؤال می‌باشیم: ۱- مکان بهینه تسهیلات اضطراری کجا هستند و ۲- تعداد سروورها (به عنوان مثال آمبولانس‌ها)ی موجود در تسهیلات چه تعداد باشد؟ اهمیت پاسخ به این دو سؤال به دلیل ماهیت اضطراری بودن مسئله و این‌که این قبیل مسائل با جان انسان‌ها در ارتباط هستند، به مراتب بیشتر از مسائل مکان‌یابی معمول می‌باشد.

واحدهای پلیس، ایستگاه آتش‌نشانی و سیستم‌های اضطراری درمان، همگی با بهبود سلامت و ایمنی عمومی سروکار دارند و با تقسیم وظیفه پاسخ به شهروندان به دنبال کمک‌رسانی هرچه سریع‌تر به آن‌ها و کاهش خطر مرگ-میر و آسیب‌های جانی و مالی می‌باشند. مسئله مهم و اولیه در هریک از این سیستم‌ها تصمیم‌گیری در مورد تعداد و مکان این واحدهای اضطراری و همچنین تصمیم‌گیری در مورد اینکه کدام واحد و یا واحدها برای ارائه خدمت به یک تقاضای خاص (تماس‌های برقرار شده) باید فرستاده شوند، می‌باشد.

مدل‌هایی که اغلب برای مکان‌یابی تسهیلات اورژانسی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در دسته مدل‌های پوششی ۱ قرار می‌گیرند. مدل‌های پوششی مدل‌هایی هستند که در آن‌ها یک فاصله (زمان) استاندارد دسترسی تعریف می‌شود. اگر نقطه تقاضا (محل حادثه) در فاصله یا زمانی کمتر از فاصله استاندارد دسترسی نسبت به تسهیل (مرکز پزشکی یا آتش‌نشانی و ...) قرار گیرد، به اصطلاح این نقطه تقاضا تحت پوشش قرار گرفته است.

خدمات پزشکی اضطراری (EMS) مراقبت‌های سریع و مؤثر را به منظور مقابله با تهدیدات ناگهانی جان انسان‌ها فراهم می‌آورد. تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با مکان‌یابی و تخصیص تقاضاها در زمینه خدمات پزشکی اضطراری صورت پذیرفته است. از آنجاکه می‌توان این مسائل را از جنبه‌های مختلفی بررسی نمود؛ توابع هدف متنوعی برای آن‌ها قابل اعمال می‌باشد. توابع هدف در نظر گرفته شده

شامل کمینه کردن هزینه‌ها، کمینه کردن تعداد تسهیلات استقرار یافته، بیشینه کردن پوشش تقاضاها، بیشینه کردن پوشش پشتیبان نقاط تقاضا و غیره می‌باشد. در سال‌های اخیر مسائل چندهدفه طراحی EMS توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. از طرفی مسائل طراحی چندهدفه قطعی در ادبیات این حوزه به وفور به چشم می‌خورد.

مدل مکان‌یابی پوشش کامل (LSCP) برای اولین بار توسط تورگاس و همکاران [۱] در سال ۱۹۷۱ پیشنهاد شده است. LSCP مدل پوشش اجباری است و هدف از آن یافتن حداقل تعداد تسهیلات است به گونه‌ای که تمامی نقاط تقاضا پوشش داده شوند. چند سال بعد، اولین مدل حداکثر پوشش قطعی با عنوان مسئله مکان‌یابی حداکثر پوشش (MCLP) توسط چرچ و ریوله [۲] جهت بیشینه‌سازی جمعیت تحت پوشش با محدود بودن تعداد تسهیلات در سال ۱۹۷۴ ارائه شد. از آن زمان توسعه‌های زیادی بر روی مدل MCLP صورت گرفته است. برادران کاراساکال [۳] در سال ۲۰۰۴ مدل پوشش تدریجی (پوشش جزئی) را ارائه دادند. مشکل اصلی مدل MCLP که توسط ریوله ابداع شده است این است که در این مدل نقاط تقاضایی که در فاصله استاندارد دسترسی قرار می‌گیرند تحت پوشش هستند و نقاطی که از این ناحیه بیرون باشند تحت پوشش نیستند. بنابراین در نقاط مرزی حد استاندارد دسترسی نقاط تقاضا ناگهان از تحت پوشش بودن به تحت پوشش نبودن تغییر پیدا می‌کنند. که این مشکل در مدل برادران کاراساکال حل شده است بدین صورت که در این مدل به جای یک مرز، یک لایه تعریف می‌شود که در این لایه نقاط به صورت جزئی تحت پوشش قرار می‌گیرند. یونس و وسولوسکی [۴] یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط صفر و یک را برای مدل MCLP توسعه دادند. شوندی و محلوجی [۵] یک مدل مکان‌یابی-تخصیص فازی برای سیستم‌های متراکم ارائه داده و آن را مکان‌یابی-تخصیص حداکثر پوشش فازی در چهارچوب صف نامیدند. آن‌ها از الگوریتم ژنتیک جهت حل مسئله بهره بردند. اراز و همکاران [۶] نسخه چندهدفه‌ی MCLP را ارائه دادند. توابع هدف آن‌ها بیشینه‌سازی جمعیت با پوشش پشتیبان و افزایش سطح خدمت‌رسانی از طریق کمینه‌سازی فاصله سفر کل از تسهیلات تا نقاط تقاضایی است که در فاصله‌ای

3- Location Set Covering Problem
4- Maximal Covering Location Problem

1- Covering Models
2- EMS: Emergency Medical Services

تسهیلات و کمینه‌سازی سطح پوشش تسهیلات بحرانی ازدست‌رفته توسعه دادند. آن‌ها یک الگوریتم تجزیه جهت حل مسئله پیشنهادی ارائه دادند. ین و مو [۱۳] برخلاف مدل‌های دیگر پوشش حداکثری که ظرفیت ثابتی را برای هر تسهیل در نظر می‌گرفتند مدلی را ارائه دادند که اجازه می‌داد سطوح متفاوتی از ظرفیت بین تسهیلات قادر به گزینش باشد. علاوه بر این برای جایابی بهینه وسایل نقلیه، تخصیص نقاط تقاضای خارج از محدوده استاندارد را نیز مدنظر قرار می‌دهد. در این مدل دو حالت تعداد کل تسهیلات معلوم و ثابت و نامعلوم را ارائه دادند. درنهایت به عنوان نمونه این مدل برای جایابی خدمات اورژانس پزشکی برای ۱۰ ناحیه جورجیا با استفاده از نرم‌افزار GIS به‌کاررفته است. نوازی و همکاران [۱۴] یک مسئله موجودی-مکان‌یابی-تخصیص چند دوره‌ای برای ایستگاه‌های آمبولانس و بالگردهای امدادی با رویکرد احتمالی استوار ارائه می‌دهد. در این تحقیق علاوه بر مکان‌یابی ایستگاه‌ها و تخصیص نقاط مستعد تصادف به آن‌ها، در مورد میزان موجودی شامل بانک‌های خون، دارو و غیره تصمیم‌گیری می‌شود. برای حل مسئله از رویکرد استوار استفاده شده است و مدل بر روی جاده تهران-مشهد که از استان سمنان می‌گذرد اعمال شده است. یانگ و همکاران [۱۵] یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی سه مرحله‌ای و چندهدفه برای بهبود توانایی نجات با در نظر گرفتن بلایای ثانویه در تدارکات اضطراری ارائه می‌دهد. نتایج مدل بر اساس زلزله ونچوان ۵ نشان می‌دهد که راه‌حل در این مقاله برخی از راه‌های عادی را بهبود می‌بخشد.

اکثر مطالعات انجام‌شده در این حوزه تنها بر افزایش پوشش تقاضاها تأکید داشتند و تنها تعداد محدودی از آن‌ها را می‌توان یافت که با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه، اهداف دیگری را نیز جهت بهینه‌سازی مسئله به کار گیرند. در این مطالعه سعی بر این است که معیار دسترس‌پذیری نیز به عنوان یک عامل مهم در پاسخگویی به تقاضاهای اضطراری مورد توجه قرار گیرد. منظور از دسترس‌پذیری احتمال آن است که آمبولانس‌ها هنگام نیاز مشغول نبوده و در دسترس باشند. از سوی دیگر از آنجایی که مدل ارائه شده چندهدفه می‌باشد استفاده از رویکردهای چندهدفه لازم می‌باشد که بدین منظور در این

دورتر از شعاع استاندارد از پیش تعیین شده قرار دارند می‌باشد. در این مقاله تعداد وسایل محدود در نظر گرفته‌شده است و تعدادی مثال عددی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی لکسیکوگرافیک ۱ و برنامه‌ریزی آرمانی فازی ۲ حل شده است.

اردمیر و همکاران [۷] مدل MCLP را در شرایطی در نظر گرفتند که تقاضا هم در گره‌ها و هم در مسیرها تولید می‌شد. آن‌ها یک مثال واقعی از شهر ایری در ایالت نیویورک را ارائه دادند. برمن و هوانگ [۸] مکان‌یابی تسهیلات روی شبکه را در نظر گرفتند به طوری که تقاضای پوشش یافته را حداقل می‌نمایند. این مسئله برای امکانات نامطلوب رخ می‌دهد. آن‌ها نتایج به‌دست‌آمده حاصل از جستجوی ممنوعه و رویکرد آزادسازی لاگرانژ را باهم مقایسه نموده و به این نتیجه رسیدند که جستجوی ممنوعه برای مسائل بزرگ انتخاب بهتری است. از جمله تغییرات اخیر بر روی مدل MCLP در نظر گرفتن اوزان منفی گره‌های تقاضاست که توسط برمن و همکاران [۹] ارائه گردید. آن‌ها دو فرمول‌بندی خطی و یک فرمول‌بندی غیرخطی پیشنهاد داده و آن‌ها را از طریق CPLEX و چندین رویکرد ابتکاری حل کردند. در یک مطالعه ارزشمند الکساندر و جیانیکوس [۱۰] مدل MCLP سنتی را با استفاده از قابلیت سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و ایده پوشش جزئی توسعه دادند. کورتین و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۰ یک روش جدید برای توزیع ماشین‌های گشت-زنی پلیس به‌منظور به دست آوردن بالاترین کارایی ارائه دادند. در این مقاله از مدل ریاضی حداکثر پوشش سنتی به همراه یک مدل ابتکاری پوشش پشتیبان برای اینکه بهترین تصمیم در مکان‌یابی ماشین‌های گشت‌زنی پلیس را فراهم کنند استفاده شده است. مدل تحت عنوان پوشش منطقه‌ای تحت گشت‌زنی پلیس یا PPAC^۳ ارائه شده است. این مدل در منطقه جغرافیایی پلیس شهر دالاس تحت آزمایش قرار گرفته و جواب بهینه حاصله با نوع استقرار کنونی ماشین‌های پلیس مقایسه شده است. این مقایسه بهبود قابل توجهی را در تعداد حوادث پوشش داده شده توسط نیروهای پلیس نشان می‌دهد. اهالنلی و چرچ [۱۲] یک مدل مکان‌یابی ممانعتی ۴ برای بهینه‌سازی پوشش اولیه توسط

- 1- Lexicographic linear programming
- 2- Fuzzy goal programming
- 3- Police Patrol Area Covering
- 4- Location-interdiction

5- Wenchuan

مقاله از روش ϵ -محدودیت بهره می‌بریم. از سوی دیگر برای مسئله مکان‌یابی حداکثر پوشش مدل‌های ظرفیت دار متعددی جهت در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت تسهیلات ارائه داده شده‌اند. اکثر این مدل‌ها ظرفیت ثابت و از قبل تعیین شده‌ای را برای نقاط بالقوه تسهیلات در نظر می‌گیرند که این فرض موجب اعمال محدودیت‌هایی در کاربرد این مدل‌ها شده و انعطاف‌پذیری آن را کاهش می‌دهد. به منظور مرتفع کردن این مورد، در این مقاله یک مدل بودمانی ϵ که امکان در نظر گرفتن چندین ظرفیت ممکن برای تسهیلات دارا می‌باشد ارائه گردیده است. بدین گونه که برخلاف مدل‌های قبلی که ظرفیت ثابتی برای تسهیلات در نظر می‌گرفتند این مدل قادر است در هر مکان بالقوه با توجه به نیاز، تعداد آمبولانس‌ها را مشخص گرداند. همچنین در اکثر مدل‌های موجود در ادبیات ابتدا استقرار ایستگاه‌ها مشخص می‌گردد و سپس در ایستگاه‌ها آمبولانس قرار داده می‌شود اما مدل پیش‌رو به گونه‌ای مدل‌سازی شده است که ابتدا با توجه به نیاز، آمبولانس‌ها در مکان‌های بالقوه مستقر شده و در صورت استقرار حداقل یک آمبولانس در هر مکان بالقوه در آن محل یک ایستگاه دایر می‌شود. از سوی دیگر به کارگیری مدل ارائه شده در مسئله واقعی شهر کرمان، از دیگر نکات قابل توجه در این تحقیق به شمار می‌آید.

این مقاله در ادامه بدین شکل سازماندهی شده است. در بخش دوم، به شرح مبانی مرتبط با روش بهینه‌سازی چندهدفه ϵ -محدودیت پرداخته می‌شود. بخش سوم، به تعریف و مدل‌سازی مسئله می‌پردازد. در بخش چهارم، مطالعه موردی تشریح می‌گردد و نتایج محاسباتی ارائه می‌گردد. بخش آخر، ضمن نتیجه‌گیری، به ارائه پیشنهادهای برای تحقیقات آتی می‌پردازد.

۲- مبانی روش ϵ -محدودیت

در این مقاله از رویکرد چندهدفه ϵ -محدودیت جهت مقابله با اهداف چندگانه در مسئله استفاده شده است لذا در این بخش به‌طور خلاصه با این روش آشنا می‌شویم.

فرض کنید مسئله برنامه‌ریزی چندهدفه‌ای با p تابع هدف به صورت زیر داشته باشیم:

$$\text{Max } (f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x))$$

1- -constraint

2- Modular

St ()

$$X \in S$$

جایی که X بردار متغیرهای تصمیم و S محدوده فضای شدنی را نشان می‌دهد. همچنین $f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)$ نشان‌دهنده p تابع می‌باشد.

جهت مقابله با توابع هدف چندگانه در روش ϵ -محدودیت، یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و دیگر توابع هدف به عنوان محدودیت در مدل وارد می‌شوند:

$$\text{Max } f_1(x)$$

St ()

$$f_2(x) \geq \epsilon_2,$$

$$f_3(x) \geq \epsilon_3,$$

....

$$f_p(x) \geq \epsilon_p,$$

$$X \in S$$

با تغییر پارامترهای سمت راست معادله‌های توابع هدف موجود در محدودیت‌ها، جواب‌های مسئله به دست می‌آید. برای آشنایی بیشتر به مقاله [۱۶] رجوع شود.

۳- بیان مسئله

رویه در سیستم خدمات اضطراری بهداشتی بدین صورت است که پس از برقراری تماس از نقطه تقاضا با مرکز اورژانس، نزدیک‌ترین واحد در صورت عدم اشتغال موظف به رسیدگی می‌باشد. زمان استاندارد از لحظه برقراری تماس تا رسیدن آمبولانس به محل تقاضا ۸ دقیقه است. زمان اشتغال آمبولانس از لحظه خروج تا بازگشت به ایستگاه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در این مطالعه به دنبال مکان‌یابی ایستگاه‌ها هستیم به گونه‌ای که بیشترین سطح پوشش و دسترس‌پذیری حاصل شود.

۳-۱- مفروضات مدل

فرض‌هایی که برای مدل‌سازی مسئله به کار گرفته شده است بدین صورت می‌باشد:

- تقاضاها همان تماس‌های گرفته شده با مراکز اورژانس بوده و به صورت نقطه‌ای در مرکز نواحی فرض شده‌اند.
- فواصل به صورت مستقیم در نظر گرفته شده است.

w_{ik} اگر نقطه تقاضای i به وسیله k آمبولانس پوشش داده شود یک؛ در غیر این صورت صفر.

توابع هدف و محدودیت‌ها

$$MAX \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} a_i y_{ij} - L \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} d_{ij} a_i y_{ij} \quad ()$$

$$MAX \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} a_i q_k w_{ik} \quad ()$$

$$\sum_{i \in I} a_i y_{ij} \leq \sum_{k \in K} k c x_{jk} \quad \forall j \in J \quad ()$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} z_{ij} k x_{jk} - \sum_{k=1}^p k w_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in I \quad ()$$

$$\sum_{k \in K} x_{jk} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad ()$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{jk} = r \quad ()$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} k x_{jk} = p \quad ()$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad ()$$

$$\sum_{k=1}^p w_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad ()$$

$$y_{ij} \leq \sum_{k \in K} x_{jk} \quad \forall i \in I, j \in J \quad ()$$

$$0 \leq y_{ij} \leq 1 \quad ()$$

$$x_{jk}, w_{ik} \in \{0, 1\} \quad ()$$

تابع هدف اول (۴) ذاتاً یک تابع متشکل از دو تابع است که به‌طور همزمان به دنبال حداکثر کردن پوشش تقاضاهای تخصیص داده شده..... و حداقل کردن مجموع فاصله بین تقاضاهای پوشش نیافته و تسهیلات مستقر شده است..... البته در اینجا پارامتر $L \geq 0$ می‌تواند بنا به ترجیحات تصمیم گیرنده تغییر کند. تابع هدف دوم (۵) به دنبال حداکثر سازی دسترس‌پذیری از طریق حداکثرسازی حاصل‌ضرب مجموع تقاضاهای هر گره a_i در قابلیت اطمینان پوشش برای هر گره، $q_k w_{ik}$ می‌باشد. بدیهی است هرچه نقاط تقاضا به تعداد بیشتری آمبولانس تخصیص یابند قابلیت دسترس‌پذیری افزایش می‌یابد. محدودیت شماره (۶) این اطمینان را می‌دهد که تمام تقاضاهای اختصاص داده شده به تسهیل از حداکثر ظرفیت تسهیل (ایستگاه) نمی‌تواند فزونی یابد. محدودیت (۷) تضمین می‌کند که w_{ik} تنها زمانی می‌تواند مقدار ۱ را به خود بگیرد که k وسیله در محدوده استاندارد نقطه تقاضای i وجود داشته باشند. محدودیت (۸) ما را از این امر مطمئن می‌گرداند که بیش از

■ نقاط بالقوه برای استقرار تسهیلات از قبل مشخص گردیده است.

■ وسایل نقلیه ظرفیت محدودی دارند.

■ تمامی تقاضاها (تماس‌ها) تخصیص داده شوند.

۳-۲- مدل ریاضی

مجموعه‌ها

I مجموعه نقاط تقاضا

J مجموعه نقاط بالقوه استقرار ایستگاه‌ها

K مجموعه وسایل نقلیه

پارامترها

C ظرفیت خدمت‌دهی هر آمبولانس

a_i تقاضای نقطه i

d_{ij} زمان (فاصله) بین دو نقطه i و j

bs درصد اشتغال آمبولانس‌ها که برابر است با درصدی از

زمان که آمبولانس به دلیل ارائه خدمت به تماس‌های قبلی در ایستگاه حضور نداشته و قادر به ارائه خدمت نمی‌باشد.

S استاندارد پوشش تسهیل (برحسب زمان یا فاصله)

P تعداد آمبولانس‌هایی که باید مستقر شوند.

r تعداد ایستگاه‌هایی که باید مستقر شوند.

L ضریب نرمال‌سازی

J_i مجموعه مکان‌های بالقوه J که با توجه به استاندارد

پوشش خود نقطه تقاضای i را پوشش می‌دهند.

$$\{j | d_{ij} \leq S\}$$

q_k ضریب اطمینان برای حالتی که k آمبولانس برای

خدمت‌رسانی به نقطه تقاضا تخصیص داده شده باشد.

به‌عبارت‌دیگر، این پارامتر برابر است با احتمال آنکه

هنگام نیاز یک نقطه تقاضا، حداقل k آمبولانس به‌منظور

خدمت‌رسانی به آن نقطه در دسترس باشد. هرچه تعداد

آمبولانس بیشتری به یک نقطه تقاضا تخصیص داده

شود، ضریب اطمینان بالاتر می‌رود. در واقع، رابطه بین

bs و q_k به شکل زیر خواهد بود. [17]:

$$q_k = 1 - (bs)^k \quad (3)$$

بدیهی است که هرچه تعداد آمبولانس‌هایی که نقاط

تقاضا به آن‌ها تخصیص یافته‌اند بیشتر باشد ضریب

اطمینان افزایش می‌یابد.

متغیرهای تصمیم

y_{ij} درصدی از تقاضای نقطه i که به تسهیل j تخصیص می‌یابد.

x_{jk} اگر در نقطه بالقوه J تسهیلی با k آمبولانس مستقر شود یک؛ در غیر این صورت صفر

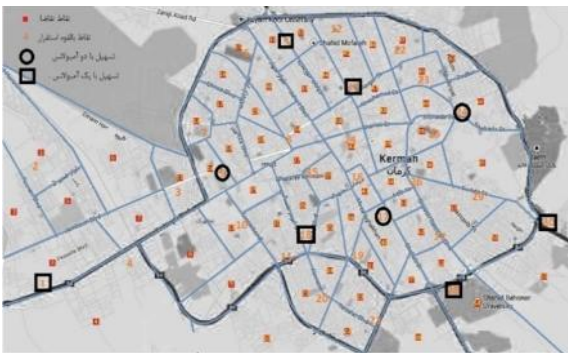
یک تسهیل در یک مکان پیشنهادی نمی‌تواند مستقر شود. محدودیت (۹) بیانگر این است که تعداد تسهیلاتی که قرار است مستقر شوند برابر ۲ است. محدودیت (۱۰) تعداد کل آمبولانس‌هایی که می‌بایست مستقر شوند را مشخص می‌کند. محدودیت (۱۱) اطمینان می‌دهد تمام نقاط تقاضا به تسهیلات مستقر شده تخصیص یابند (هرچند در شعاع پوشش تسهیل واقع نشود). محدودیت (۱۲) این اطمینان را به ما می‌دهد که همواره یک مقدار w_{ik} برای هر نقطه تقاضا برابر ۱ قرار بگیرد. معادله (۱۳) تضمین می‌کند تا زمانی که آمبولانس مستقر نشده است تقاضایی به آن تخصیص نیابد. معادلات (۱۴) و (۱۵) نوع متغیرها را مشخص می‌گرداند.

۴- مطالعه موردی

کرمان یکی از کلان شهرهای ایران و مرکز استان کرمان پهناورترین استان ایران در جنوب شرقی این کشور واقع است. جمعیت این شهر طبق سرشماری سال ۱۳۹۰ برابر با ۵۳۴،۴۴۱ نفر بوده است. جمعیت کلان شهر کرمان به دلیل عدم رسمی شدن سکونت‌گاه‌های غیررسمی از سوی دولت و استفاده حاشیه‌نشین‌ها از امکانات شهری و عدم تناسب بودجه تخصیص یافته با جمعیت واقعی تا ۷۱۲،۰۰۰ نفر هم می‌رسد. وسعت شهر کرمان حدود ۱۳۰۰۰ هکتار است و به دلیل وسعت شهری و جمعیت کرمان، این شهر جزو کلان‌شهرهای ایران طبقه‌بندی شده است. شهر کرمان، یک مرکز جمعیتی و بزرگ‌ترین شهر در منطقه جنوب شرق ایران است.

در این تحقیق شهر کرمان به ۶۵ ناحیه تقاضا تقسیم‌بندی شده و تقاضای هر منطقه با استفاده از اطلاعات دریافتی از مرکز اورژانس شهر کرمان به‌دست‌آمده است. تقاضاها همان تماس‌های برقرار شده با اپراتور اورژانس شهر کرمان می‌باشند. ۳۰ مکان بالقوه جهت استقرار تسهیلات در محل‌هایی که قابلیت استقرار تسهیل وجود داشته در نظر گرفته شده است. فواصل هر نقطه تقاضا و نقاط بالقوه استقرار تسهیلات محاسبه گردید و شعاع پوشش استاندارد با توجه به میزان ترافیک شهر کرمان برابر ۱۵۰۰ متر در نظر گرفته شد. طبق نظر خبرگان جهت رسیدگی به یک تقاضا از زمان برقراری تماس تا پایان مأموریت به‌طور میانگین یک ساعت زمان لازم است و از آنجایی که زمان استفاده هر آمبولانس به‌طور میانگین در طول شبانه‌روز ۱۵ ساعت

می‌باشد، با تقسیم آن بر میانگین زمان رسیدگی به هر تقاضا ظرفیت هر آمبولانس (C) برابر ۱۵ به‌دست‌آمده است. پارامتر درصد اشتغال (bs) نیز با حاصل تقسیم تعداد ساعات در دسترس (۱۵) به تعداد ساعات شبانه‌روز برابر با ۶۲.۵ به‌دست‌آمده است. پارامتر p نشان‌دهنده تعداد آمبولانس‌ها و ۲ بیانگر تعداد ایستگاه‌ها در مدل می‌باشد. شکل (۱) مکان ایستگاه‌ها و تعداد آمبولانس‌های موجود در هر ایستگاه را در حالت فعلی نشان می‌دهد. همچنین در این شکل نحوه تقسیم‌بندی نواحی تقاضا و نقاط بالقوه استقرار تسهیلات نیز مشخص می‌باشد.



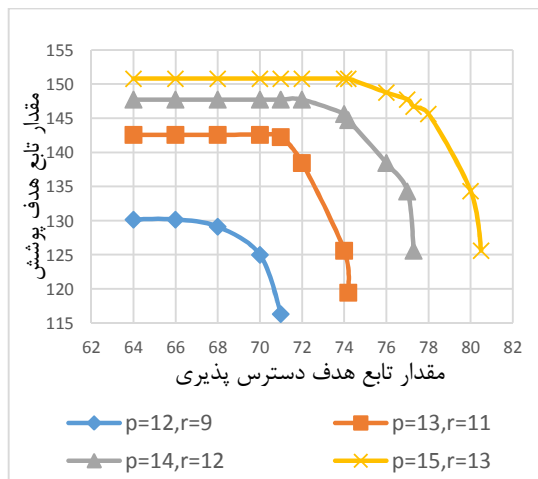
شکل (۱): تقسیم‌بندی نواحی تقاضای شهر کرمان، مکان ایستگاه‌ها و تعداد آمبولانس‌ها (مربع نشانگر ایستگاه با یک آمبولانس و دایره بیانگر ایستگاه با دو آمبولانس می‌باشد)

۴-۱- نتایج عددی

جدول (۱): مقادیر بهینه توابع هدف

مقدار بهینه	تابع هدف
۱۳۰/۱۶۷	تابع هدف اول (پوشش)
۷۱/۰۶	تابع هدف دوم (دسترس‌پذیری)

در شرایط فعلی شهر کرمان، ۱۲ آمبولانس در ۹ ایستگاه اورژانس مستقر گردیده‌اند بدین گونه که سه ایستگاه دارای ۲ آمبولانس و شش ایستگاه دارای ۱ آمبولانس می‌باشند. با در نظر گرفتن مکان ایستگاه‌های موجود، تعداد آمبولانس‌های آن‌ها و سایر شرایط فعلی در مدل ارائه شده، میزان توابع هدف پوشش و دسترس‌پذیری به‌طور جداگانه در حالت واقعی به ترتیب برابر با ۹۵/۴۷ و ۴۸/۸۲ بدست آمده است. سپس جهت اعتبار سنجی مدل، به ازای مقادیر ۹ برای تعداد ایستگاه‌ها و ۱۲ برای تعداد آمبولانس‌ها مکان‌یابی ایستگاه‌ها به وسیله مدل انجام گرفته و میزان تابع هدف پوشش و دسترس‌پذیری به‌صورت جداگانه به



نمودار (۱): میزان تابع هدف پوشش برحسب میزان دسترس پذیری به ازای سناریوهای مختلف

همان‌گونه که در نمودار (۱) قابل مشاهده می‌باشد در ابتدا با افزایش مقدار دسترس‌پذیری مقدار تابع هدف پوشش تغییری نمی‌کند. در این حالت محدودیت مربوط به تابع هدف دسترس‌پذیری در نقش یک محدودیت خنثی ظاهر می‌شود. به تدریج با افزایش مقدار دسترس‌پذیری تابع هدف پوشش تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بدین صورت که در سناریوهای ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب با افزایش مقدار دسترس‌پذیری از مقادیر ۶۶، ۷۱، ۷۲ و ۷۴ به تدریج مقدار تابع هدف پوشش کاهش می‌یابد. دلیل این روند بدین صورت قابل توجیه است که با افزایش میزان دسترس‌پذیری مدل مجبور می‌شود مکان ایستگاه‌ها را به گونه‌ای مشخص نماید که نقاط تقاضا با تعداد بیشتری ایستگاه پوشش داده شوند که میزان دسترس‌پذیری خواسته شده ارضا گردد که این موضوع باعث کاهش پراکندگی ایستگاه‌ها و در نتیجه کاهش میزان پوشش تقاضاها می‌گردد.

تحلیل حساسیت توابع هدف پوشش و دسترس‌پذیری با توجه به تعداد ایستگاه‌ها و آمبولانس‌ها در نمودارهای ۲، ۳ و ۴ آورده شده است.

در نمودار (۲) میزان تغییرات تابع هدف دسترس‌پذیری به ازای مقادیر مختلف برای تعداد ایستگاه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است، لازم به ذکر است در این حالت تعداد آمبولانس‌ها برابر حالت فعلی و موجود شهر کرمان (۱۲ عدد) در نظر گرفته شده است.

ترتیب ۱۳۰/۱۶ و ۷۱/۰۶ بدست می‌آید. این نتایج نشان می‌دهد در صورتی که مکان‌یابی و تخصیص صحیح صورت می‌گرفت با همین تعداد آمبولانس و ایستگاه موجود مقدار پوشش و دسترس‌پذیری را به ترتیب به میزان ۳۶/۳۴ و ۴۵/۵۶ درصد افزایش می‌یافت. مکان ایستگاه‌ها و تعداد آمبولانس‌های آن حاصل از حل مدل در شکل (۲) قابل مشاهده می‌باشد.

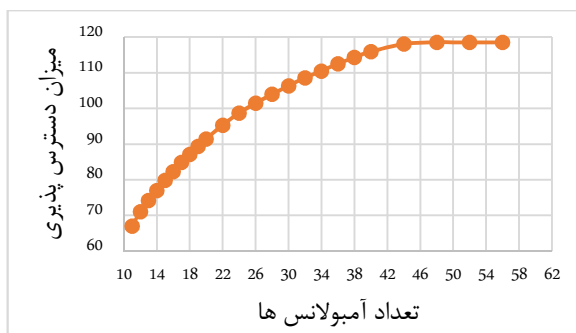


شکل (۲): مکان ایستگاه‌ها و تعداد آمبولانس‌ها حاصل از حل مدل

سپس جهت دخالت دادن هر دو تابع هدف در مسئله از روش ϵ - محدودیت بهره می‌بریم. به منظور انجام تحلیل حساسیت گسترده‌تر ابتدا چندین سناریو را با توجه به تعداد ایستگاه‌ها و آمبولانس‌ها در نظر گرفته و در هر مورد به ازای مقادیر مختلف برای دسترس‌پذیری مقدار تابع هدف پوشش را می‌یابیم. لازم به ذکر است که مقادیر سناریوی شماره ۱، یعنی تعداد ۹ ایستگاه و ۱۲ آمبولانس برابر تعداد ایستگاه‌ها و آمبولانس‌ها در حالت واقعی است.

جدول (۲): تعداد ایستگاه‌ها و آمبولانس‌ها در سناریوهای مختلف

شماره سناریو	مشخصات
۱	P=12, r=9
۲	P=13, r=11
۳	P=14, r=12
۴	P=15, r=13

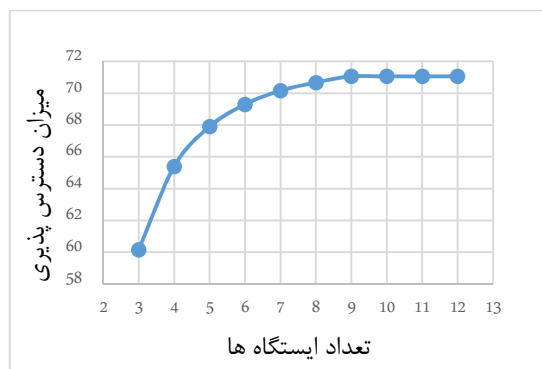


نمودار (۳): میزان تابع هدف دسترس پذیری با توجه به تعداد آمبولانس‌ها با وجود ۹ ایستگاه

همان‌گونه که در نمودار (۳) قابل مشاهده است در ابتدا با افزایش تعداد آمبولانس‌ها میزان دسترس پذیری با شیب بیشتری افزایش می‌یابد ولی به تدریج از شیب آن کاسته شده و در عدد ۴۶ شیب نمودار صفر می‌شود.

در نمودار (۴) تحلیلی جامع بر روی تابع هدف پوشش داریم. بدین گونه که در این نمودار نحوه تغییرات تابع هدف پوشش را به ازای مقادیر مختلف تعداد آمبولانس‌ها و تعداد ایستگاه‌ها مورد بررسی قرار می‌دهیم. لازم به ذکر است تحلیل صورت گرفته با غیرفعال کردن تابع هدف دوم صورت گرفته است و این تحلیل صرفاً بر روی تابع هدف اول صورت گرفته است.

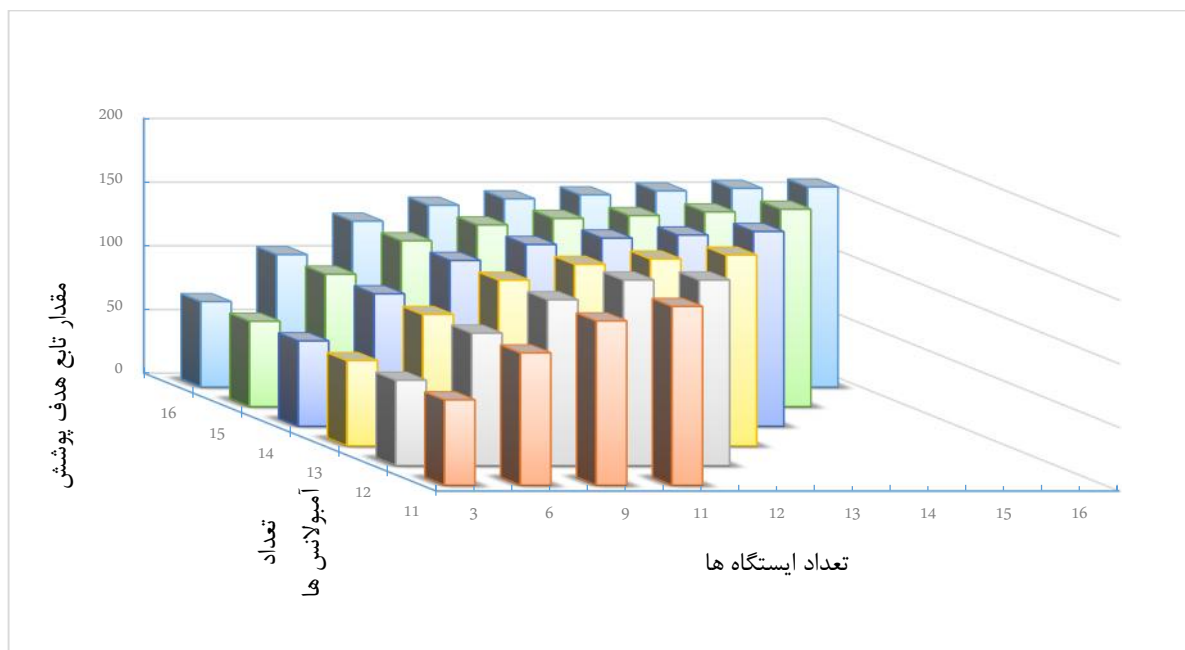
در نمودار (۴) مشخص می‌شود که با افزایش تعداد ایستگاه‌ها میزان پوشش نیز فزونی می‌یابد. البته لازم به یادآوری است که طبق مدل پودمانی ارائه شده استقرار ایستگاه منوط به استقرار حداقل یک آمبولانس در نقطه مورد نظر است. به عنوان مثال در صورت استقرار ۱۱ آمبولانس، با افزایش تعداد ایستگاه‌ها که تا ۱۱ ایستگاه امکان پذیر می‌باشد میزان تابع هدف پوشش افزایش می‌یابد. از طرفی در صورت ثابت بودن تعداد ایستگاه‌ها، با افزایش تعداد آمبولانس‌ها تغییر چشم‌گیری در تابع هدف پوشش مشاهده نمی‌شود.



نمودار (۲): میزان تابع هدف دسترس پذیری با توجه به تعداد ایستگاه‌ها با وجود ۱۲ آمبولانس

در نمودار (۲) مشاهده می‌گردد که با افزایش تعداد ایستگاه‌ها در ابتدا میزان دسترس پذیری به سرعت افزایش می‌یابد و رفته‌رفته از شیب آن کاسته می‌شود و با رسیدن به ۹ ایستگاه، به حداکثر مقدار خود رسیده و دیگر افزایشی در آن به چشم نمی‌خورد. دلیل اینکه با کاهش تعداد ایستگاه‌ها مقدار دسترس پذیری کاهش می‌یابد این است که در صورت وجود تعداد ایستگاه‌های اندک با وجود اینکه نقاط تقاضایی که در شعاع استاندارد ایستگاه‌ها واقع شده‌اند با تعداد بیشتری آمبولانس پوشش داده می‌شوند و قابلیت اطمینان بیشتری برای آن‌ها ایجاد می‌شود اما از طرف دیگر این تجمع آمبولانس‌ها در تعداد اندکی ایستگاه باعث می‌شود تعداد تقاضاهای موجود در شعاع استاندارد ایستگاه‌ها به طرز چشمگیری کاهش یافته و مجموعاً تابع هدف دسترس پذیری که حاصل ضرب مقدار محدودی را به خود بگیرد.

در نمودار (۳) میزان تغییرات تابع هدف دسترس پذیری را به ازای مقادیر مختلف برای تعداد آمبولانس‌ها مورد بررسی قرار گرفته است، لازم به ذکر است در این حالت تعداد ایستگاه‌ها برابر حالت فعلی و موجود شهر کرمان (۹ عدد) در نظر گرفته شده است.



نمودار (۴): میزان تابع هدف پوشش با توجه به تعداد ایستگاه‌ها و آمبولانس‌ها

۵- نتیجه‌گیری

ما در این مقاله مدلی دو هدفه جهت مکان‌یابی پودمانی مراکز اورژانس ارائه دادیم. مدل پیشنهادی با یافتن مکان‌های بهینه‌ی تسهیلات و تخصیص تقاضاها به دنبال بیشینه‌سازی پوشش تقاضاها و دسترس‌پذیری وسایل نقلیه می‌باشد. مدل توسعه داده شده با استفاده از نرم‌افزار

GAMS حل گردید و نیازی به استفاده از روش‌های ابتکاری احساس نمی‌شود.

negative weights", Geographical analysis, No. 41(1), pp. 30-42, 2009.

[10] Alexandris, G., Giannikos, I., "A new model for maximal coverage exploiting GIS capabilities", European Journal of Operational Research, No. 202(2), pp. 328-338, 2010.

[11] Curtin, K. M., Hayslett-McCall, K., Qiu, F., "Determining optimal police patrol areas with maximal covering and backup covering location models", Networks and Spatial Economics, No. 10(1), pp. 125-145, 2010.

[12] O'Hanley, J. R., Church, R. L., "Designing robust coverage networks to hedge against worst-case facility losses", European Journal of Operational Research, No. 209(1), pp. 23-36, 2011.

[13] Yin, P., Mu, L., "Modular capacitated maximal covering location problem for the optimal siting of emergency vehicles", Applied Geography, No. 34, pp. 247-254, 2012.

[14] Navazi, F., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Sazvar, Z. (2018). A Multi-Period Location-Allocation-Inventory Problem for Ambulance and Helicopter Ambulance Stations: Robust Possibilistic Approach. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 322-327.

[15] Zhang, J., Liu, H., Yu, G., Ruan, J., & Chan, F. T. (2019). A three-stage and multi-objective stochastic programming model to improve the sustainable rescue ability by considering secondary disasters in emergency logistics. Computers & Industrial Engineering.

[16] Mavrotas, G., "Effective implementation of the -constraint method in multi-objective mathematical programming problems", Applied Mathematics and Computation, No. 213(2), pp. 455-465, 2009.

[17] Sorensen, P., & Church, R. (2010). Integrating expected coverage and local reliability for emergency medical services location problems. Socio-Economic Planning Sciences, 44(1), 8-18

[1] Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., Bergman, L., "The location of emergency service facilities", Operations Research, No. 19(6), pp. 1363-1373, 1971.

[2] Church, R., & Velle, C. R., "The maximal covering location problem", Papers in regional science, No. 32(1), pp. 101-118, 1974.

[3] Karasakal, O., & Karasakal, E. K., "A maximal covering location model in the presence of partial coverage", Computers & Operations Research, No. 31(9), pp. 1515-1526, 2004.

[4] Younies, H., Wesolowsky, G. O., "A mixed integer formulation for maximal covering by inclined parallelograms", European Journal of Operational Research, No. 159(1), pp. 83-94, 2004.

[5] Shavandi, H., Mahlooji, H., "A fuzzy queuing location model with a genetic algorithm for congested systems", Applied Mathematics and Computation, No. 181(1), pp. 440-456, 2006.

[6] Araz, C., Selim, H., Ozkarahan, I., "A fuzzy multi-objective covering-based vehicle location model for emergency services", Computers & Operations Research, No. 34(3), pp. 705-726, 2007.

[7] Erdemir, E. T., Batta, R., Spielman, S., Rogerson, P. A., Blatt, A., Flanigan, M., "Location coverage models with demand originating from nodes and paths: application to cellular network design", European journal of operational research, No. 190(3), pp. 610-632, 2008.

[8] Berman, O., Huang, R., "The minimum weighted covering location problem with distance constraints", Computers & Operations Research, No. 35(2), pp. 356-372, 2008.

[9] Berman, O., Drezner, Z., Wesolowsky, G. O., "The maximal covering problem with some