

# مکان‌یابی یکپارچه‌ی پایگاه‌های امداد هوایی و پدهای بالگرد برای حمل‌ونقل مجروحین تحت شرایط عدم قطعیت مکان تقاضا

علی بزرگی‌امیری\* (استادیار)

شایان نوکلی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، تابستان ۱۳۹۷ (دانشکده فنی)  
دوری ۱، شماره ۱/۱، ص. ۱۳۹-۱۴۶، (پاداشت فنی)

خدمات امداد هوایی با فراهم‌کردن امکانات و اقدامات درمانی پیشرفته در کوتاه‌ترین زمان برای مصدومان و کاهش زمان انتقال آنها به مراکز درمانی، نقش مهمی در کاهش تلفات ایفا می‌کند. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیر خطی برای مکان‌یابی یکپارچه‌ی پایگاه‌های امداد هوایی و پدهای بالگرد تحت شرایط عدم قطعیت در محل وقوع حادثه ارائه شده است. هدف مدل پیشنهادی کمینه‌کردن زمان انتقال از مناطق تقاضا به بیمارستان در حالت‌های مختلف انتقال است. در ادامه اعتبارسنجی و کاربردپذیری مدل پیشنهادی در استان لرستان ارائه و مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: خدمات امداد هوایی، خدمات پزشکی اورژانسی، مسئله‌ی مکان‌یابی نقطه‌ی انتقال، عدم قطعیت.

## ۱. مقدمه

خدمات امداد هوایی (HEMS)<sup>۱</sup> اولین بار در سال ۱۹۴۴ به‌کار گرفته شد که در آن بالگرد گارد ساحلی، پلاسمای خون را از نیویورک به بازماندگان انفجاری بزرگ در نیوجرسی انتقال داد. ۲۰ سال بعد از آن در جنگ کره حدود بیست هزار مجروح، با بالگرد به بیمارستان‌ها منتقل شدند.<sup>[۱]</sup> اولین استفاده از بالگرد امداد در ایران در حوالی سال ۱۳۶۰ برای انتقال بیماران ترومایی در جریان جنگ ایران و عراق بود.<sup>[۲]</sup> صدمه و آسیب موجب تغییرات ناگهانی در عملکرد ارگان‌های بدن می‌شود. اغلب این آسیب‌ها بدون مداخله رو به وخامت می‌گذارد ولی با اقدام سریع و به موقع برطرف می‌شود. متخصصان اورژانس در این باره عبارت «زمان طلایی» متعاقب سانحه را توصیف کرده‌اند که عبارت است از زمانی که در طی آن نیمی از مرگ‌ها اتفاق می‌افتد.

استقرار پایگاه‌های امداد هوایی، انتقال بیماران اورژانسی به مراکز درمانی در مناطقی که پوشش امداد زمینی وجود ندارد، تسهیل و امکان‌پذیر خواهد کرد. بالگرد اورژانس می‌تواند مسافت بین دونقطه را به طور مستقیم طی کند، منطقه‌ی وسیع‌تری را پوشش می‌دهد و هم‌چنین سرعت بیشتری را نسبت به آمبولانس‌های زمینی دارد. بنابراین، می‌تواند سرویس بهتری را به مصدومان نیازمند خدمات فوری یا مصدومانی با دسترسی محدود به بیمارستان‌ها ارائه دهد. برخی از نقاط از لحاظ جغرافیایی کوهستانی هستند یا تراکم جمعیتی بالایی را دارند که فرایند فرود بالگرد را با مشکل

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۴/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱/۳۰، پذیرش ۱۳۹۵/۴/۲۶

DOI: 10.24200/J65.2018.5552

روبه‌رو می‌سازد. بنابراین، احداث پد بالگرد برای پیاده‌سازی موفقیت‌آمیز HEMS ضروری به نظر می‌رسد.

HEMS اغلب به صورت زیر عمل می‌کند؛ ابتدا، نیروهای امدادی با آمبولانس‌های زمینی به محل حادثه می‌روند، پس از ارزیابی حال مصدوم و تشخیص بحرانی بودن وضعیت وی و اطلاع از این‌که در صورت انتقال با بالگرد مصدوم سریع‌تر به بیمارستان می‌رسد؛ نیروهای امدادی درخواست اعزام بالگرد را می‌کنند. سپس مصدوم را به پد بالگرد، که در آن امکان نشست و برخاست بالگرد وجود دارد، منتقل می‌کنند. در همان زمان، از پایگاه امداد هوایی، یک بالگرد به پد بالگرد اعزام می‌شود و مصدوم را به بیمارستان منتقل می‌کند. به‌طور کلی سه حالت انتقال زیر مفروض است:

۱. انتقال مجروحان به صورت مستقیم توسط آمبولانس به بیمارستان؛

۲. انتقال مجروحان به ایستگاه امداد هوایی با آمبولانس، و از آنجا با بالگرد به بیمارستان؛

۳. انتقال مجروحان تا پد بالگرد با آمبولانس، و از آنجا با بالگرد تا بیمارستان.

به‌علت همین ساختار پیچیده، طراحی یک سیستم HEMS کارا، نیازمند تصمیمات پیچیده‌تری نسبت به سیستم حمل توسط آمبولانس‌های زمینی است.<sup>[۳]</sup> هدف از این مقاله پیداکردن مکان پایگاه‌های امداد هوایی و پدهای بالگرد در شرایط عدم قطعیت مکان تقاضا در راستای کمینه‌کردن زمان انتقال از مناطق تقاضا به بیمارستان در حالت‌های مختلف انتقال است. با توجه به بررسی مطالعات پیشین

در حوزه‌ی مکان‌یابی خدمات امداد هوایی، نوآوری‌های و نکات متمایز این مقاله نسبت به کارهای قبلی در موارد زیر خلاصه می‌شوند:

۱. در نظر گرفتن محل وقوع تقاضا به صورت غیر قطعی و احتمالی؛ برای نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی، در این مقاله فرض می‌شود که تقاضا در یک منطقه‌ی تقاضای مربعی و با پیروی کردن طول و عرض آن از توزیع یکنواخت رخ می‌دهد. ضرورت در نظر گرفتن تقاضا به صورت منطقه‌ی، به جای نقطه‌ی ثابت، کاهش خطاهای به وجود آمده به هنگام محاسبه‌ی مسافت بین تسهیلات است. این مقاله اولین مقاله‌ی است که محل وقوع تقاضا را به صورت منطقه‌ی در نظر گرفته است؛
۲. در نظر گرفتن حرکت آمبولانس به صورت پلکانی و حرکت بالگرد به صورت فاصله‌ی اقلیدسی به صورت توأم؛
۳. در نظر گرفتن محدودیت بودجه برای احداث پدهای بالگرد و پایگاه امداد هوایی به صورت یکپارچه.

بخش‌های این مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده‌اند: در بخش دوم به مرور آثار پیشین در باره‌ی مسئله‌ی نقطه‌ی انتقال و سیستم امداد هوایی پرداخته می‌شود. سپس مسئله‌ی بیان شده و حالت‌های ممکن و مفروضات مسئله تشریح و مدل‌سازی مسئله ارائه می‌شود. در ادامه مثال عددی مدل مربوطه بیان می‌شود و تحلیل حساسیت روی پارامتر میزان بودجه‌ی اختصاص داده‌شده صورت می‌پذیرد. در بخش بعدی مطالعه‌ی موردی مدل در استان لرستان ارائه می‌شود. در انتها نیز به نتیجه‌گیری و پیشنهاد‌های آتی پرداخته می‌شود.

## ۲. مروری بر آثار پیشین

مطالعه در مورد مسئله‌ی مکان‌یابی ایستگاه‌های خدمات پزشکی اورژانسی (EMS)<sup>[۲]</sup> به طور گسترده از دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی آغاز شد. این مطالعات به خصوص از دهه‌ی ۱۹۹۰ مورد توجه و رشد بیشتری قرار گرفت.<sup>[۳]</sup> با توجه به مقالات مشاهده می‌شود که تمرکز بیشتر محققان بر روی استقرار ایستگاه‌های خدمات درمانی اورژانسی (EMS) و به خصوص مکان‌یابی آمبولانس معطوف شده است.<sup>[۴]</sup> مدل‌های مکان‌یابی سیستم امداد هوایی در مقایسه با مدل‌های مکان‌یابی آمبولانس کمتر مورد توجه قرار گرفته و توسعه‌ی کمتری یافته است.<sup>[۳]</sup> مدل‌های تویی و پره بیشترین ارتباط را به مسئله‌ی نقطه‌ی انتقال دارند که در واقع می‌توان گفت اساس و پایه‌ی مدل‌های TPLP<sup>۳</sup> هستند. هدف مسئله‌ی مکان‌یابی محور، استقرار تسهیلات محور و تخصیص گره‌های تقاضا به محورها به منظور مسیر یابی رفت و آمد بین مرکز مبدأ و مقصد است.<sup>[۷]</sup> گلدمن، اولین مقاله را در زمینه‌ی مکان‌یابی محور در شبکه ارائه داد که به ویژگی‌های بهینگی گره‌های محور در مسئله‌ی حکیمی می‌پرداخت.<sup>[۸]</sup> اکلی اولین مدل ریاضی شناخته‌شده در مسئله‌ی مکان‌یابی محور را با مطالعه‌ی خطوط هوایی مسافربری فرمول‌بندی کرد.<sup>[۹]</sup> برای یک مرور جامع و کامل در زمینه‌ی مکان‌یابی محور، پژوهش صورت‌گرفته توسط آلومور و کارا را مشاهده کنید.<sup>[۱۰]</sup>

برمن و همکاران مسئله‌ی نقطه‌ی انتقال را به صورت زیر تعریف کردند: «مسئله‌ی انتخاب یک مکان برای تسهیلات جدید که  $N$  نقطه‌ی تقاضا را به عنوان یک مرکز محور پوشش دهد»<sup>[۱۱]</sup> اگرچه مسئله‌ی مکان‌یابی نقطه‌ی انتقال در خانواده‌ی مسائل مکان‌یابی محور است ولی مسئله‌ی مکان‌یابی نقطه‌ی انتقال دو فرق اساسی با مکان‌یابی محور دارد: اول اینکه مسئله‌ی مکان‌یابی محور اغلب بر روی شبکه بررسی می‌شود، ولی مسئله‌ی مکان‌یابی نقطه‌ی انتقال محدود به این توپولوژی نیست. دوم اینکه در مسئله‌ی مکان‌یابی محور تقاضا بین هر جفت گره وجود دارد و تسهیلات

پشتیبانی وجود ندارد ولی در مسئله‌ی نقطه‌ی انتقال، این تسهیلات نقش اساسی را در مدل ایفا می‌کنند.<sup>[۱۲]</sup> اولین بار برمن و همکاران مسئله‌ی مکان‌یابی نقطه‌ی انتقال (TPLP) را مطرح کردند که هدف از آن تعیین مکان نقطه‌ی انتقال در شرایطی است که مکان تسهیلات مشخص و نقاط تقاضا می‌توانند توسط نقطه‌ی انتقال از تسهیلات خدمت بگیرند.<sup>[۱۳]</sup> برمن و همکاران در اقدامی دیگر مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات و نقاط انتقال (FTPLP)<sup>۴</sup> را که هدف از آن تعیین مکان نقاط انتقال و تسهیلات است، در شرایطی که مکان تسهیلات و نقاط انتقال نامشخص است و هر نقطه‌ی تقاضا می‌تواند توسط یک نقطه‌ی انتقال از تسهیلات خدمت بگیرد، بررسی و یک رویکرد ابتکاری برای آن ارائه کردند.<sup>[۱۳]</sup> برمن و همکاران هم‌چنین مسئله‌ی مکان‌یابی چندگانه‌ی نقطه‌ی انتقال (MLTP)<sup>۵</sup> را که هدف از آن تعیین مکان نقاط انتقال در شرایطی که مکان تسهیلات مشخص است و هر نقطه‌ی تقاضا می‌تواند توسط یک نقطه‌ی انتقال از تسهیلات خدمت بگیرد، بررسی کردند.<sup>[۱۴]</sup> ساساکی و همکاران مسئله‌ی MLTP را به گونه‌ی دیگر مشابه مسئله‌ی پی‌میانه مدل‌سازی کردند که توسط حل‌کننده‌های ریاضی به جواب بهینه می‌رسید. آن‌ها همچنین مدل‌سازی جدیدی را برای مسئله‌ی FTLP ارائه دادند و یک رویکرد شمارشی برای حل مسائل تک‌تسهیلاتی ارائه کردند.<sup>[۱۵]</sup>

در بحث مکان‌یابی سیستم HEMS نیز مهم‌ترین کارهای صورت پذیرفته به شرح زیر هستند. شورمن و همکاران رویکردی را برای تخصیص یک پایگاه امداد هوایی اضافی، با هدف بیشینه‌کردن پوشش تقاضای مناطق بی‌بهره از خدمات بالگرد امداد توسعه دادند. آن‌ها مدل خود را روی یک مدل واقعی با دو بیمارستان مجهز به بالگرد پیاده کردند. داده‌های آن‌ها حاصل پنج سال جمع‌آوری داده‌های حیاتی نظیر زمان و جمعیت از مرکز ترومایی بریتیش کلمبیا بود.<sup>[۱۶]</sup>

برناس و همکاران مدلی را ارائه کردند که به طور هم‌زمان مکان‌های بهینه‌ی مراکز ترومایی و ایستگاه‌های امداد هوایی را مشخص می‌کرد.<sup>[۱۷]</sup> آن‌ها همچنین یک الگوریتم ابتکاری برای حل مدل خود نیز پیشنهاد و مدل خود را در بسیاری از مناطق آمریکا پیاده‌سازی کردند.<sup>[۱۸]</sup> فولتن و همکاران یک مدل بهینه‌سازی غیر قطعی را برای تصمیم‌گیری راجع به بازطراحی و جایابی مجدد تجهیزات خدمات امدادی از جمله مکان بالگردها و آمبولانس‌های زمینی با فرض ثبات نظامی، ارائه کردند. مدل آن‌ها به دنبال مکان بهینه‌ی پایگاه‌های امداد هوایی، بیمارستان‌ها و مسیرهای حرکت بالگردها با هدف کمینه‌کردن امید ریاضی زمان تحت همه‌ی سناریوهای ممکن است.<sup>[۱۹]</sup> اردمیر و همکاران یک سیستم امداد هوایی را با مطالعه‌ی موردی در نیومکزیکو مطرح کردند که در آن تقاضاها لزوماً در گره‌ها اتفاق نمی‌افتد، بلکه امکان وقوع آن در مسیرها نیز وجود دارد.<sup>[۲۰]</sup> اردمیر و همکاران یک مدل برای تسهیلات خدمت‌دهی با تقاضای توأم (هم گره‌ها و هم بر روی مسیرها) برای یافتن مکان بهینه‌ی ایستگاه‌های بالگرد با هدف بیشینه‌کردن تقاضای تحت پوشش ارائه کردند.<sup>[۲۱]</sup> اردمیر و همکاران دو مدل پوششی را برای مکان‌یابی آمبولانس‌ها، بالگردها، و نقاط انتقال پیشنهاد کردند. یکی از مدل‌های آن‌ها به دنبال کمینه‌کردن مجموع هزینه‌ی استقرار این سه نوع تسهیلات در شرایط پوشش کامل تقاضاها بود. مدل دیگر به دنبال بیشینه‌کردن پوشش تقاضاها تحت مجموع هزینه اختصاص داده شده بود.<sup>[۲۲]</sup> فروتا و تاناکا یک مدل پی‌میانه و پی‌مرکز توسعه‌یافته را برای مکان‌یابی توأم ایستگاه‌های بالگرد و نقاط انتقال تحت شرایط قطعی بودن نقاط تقاضا ارائه کردند. در مدل پیشنهادی آن‌ها تمام فواصل به صورت اقلیدسی محاسبه می‌شد.<sup>[۲۳]</sup> فروتا و تاناکا در اقدامی دیگر یک سیستم دکتر-بالگرد را معرفی کردند که در آن دکتر به همراه بالگرد به بالای سر مریض می‌رفت. تابع هدف به کار رفته در مدل آن‌ها بیشینه‌کردن پوشش تقاضا بود.<sup>[۲۳]</sup> مفهوم دیگری که در مسائل عملی وجود دارد و به محققان در ارائه‌ی مدل‌های

در نظر می‌گیریم؛ زیرا بالگرد می‌تواند مسافت بین دو نقطه را به صورت مستقیم و بدون روبه‌رو شدن با مانعی بپیماید.

در این مسئله  $(h_x, h_y)$  مختصات بیمارستان،  $(r_x, r_y)$  مختصات پد بالگرد،  $(s_x, s_y)$  مختصات مربوط به پایگاه امداد هوایی است. مسافت بین پایگاه امداد هوایی و بیمارستان  $D_1$  و مسافت بین پد بالگرد و بیمارستان  $D_2$  و همچنین مسافت بین ایستگاه امداد هوایی و پد بالگرد  $D_3$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$D_1 = \sqrt{(h_x - s_x)^2 + (h_y - s_y)^2} \quad (2)$$

$$D_2 = \sqrt{(h_x - r_x)^2 + (h_y - r_y)^2} \quad (3)$$

$$D_3 = \sqrt{(s_x - r_x)^2 + (s_y - r_y)^2} \quad (4)$$

در این مسئله فرض می‌شود که هر منطقه‌ی تقاضا دارای مختصات  $(U_i, V_i)$  است که در آن  $U_i$  و  $V_i$  متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع یکنواخت در بازه  $[a, b]$  هستند. به عبارت دیگر تقاضا در یک منطقه‌ی مربعی شکل  $[a, b] \times [a, b]$  به وقوع می‌پیوندد.

$$U, V \approx \text{uniform}[a, b] \quad (5)$$

$$f_U(u) = \frac{1}{b-a}, \quad f_V(v) = \frac{1}{b-a} \quad (6)$$

$$P = (U, V) \in [a, b] \times [a, b] \quad (7)$$

در واقع بر اساس فرضیات بالا می‌توان این‌گونه بیان کرد که شهرها به صورت مربعی هستند که احتمال رخداد حادثه در هر نقطه از شهر ثابت است. برای محاسبه‌ی فاصله‌ی منطقه‌ی تقاضا تا بیمارستان  $d_i(h_x, h_y)$ ، منطقه‌ی تقاضا تا پایگاه امداد هوایی  $d_i(s_x, s_y)$  و منطقه‌ی تقاضا تا پد بالگرد  $d_i(r_x, r_y)$ :

$$d_i(h_x, h_y) = |U - h_x| + |V - h_y| \quad (8)$$

$$d_i(s_x, s_y) = |U - s_x| + |V - s_y| \quad (9)$$

$$d_i(r_x, r_y) = |U - r_x| + |V - r_y| \quad (10)$$

حال، امید ریاضی فاصله‌ی منطقه‌ی تقاضا تا بیمارستان را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E(D) = E[|U - h_x| + |V - h_y|] = E[|U - h_x|] + E[|V - h_y|] \quad (11)$$

علاوه بر این داریم:

$$f(h_x) = E[|U - h_x|] = \int_{-\infty}^{+\infty} |u - h_x| f_A(a) da$$

$$= \frac{1}{b-a} \int_a^b |u - h_x| dx \quad (12)$$

$$f(h_x) = \begin{cases} -h_x + \frac{a+b}{2} & h_x \leq a \\ \frac{(h_x - a)^2 + (h_x - b)^2}{2(b-a)} & a \leq h_x \leq b \\ h_x - \frac{a+b}{2} & h_x \geq b \end{cases} \quad (13)$$

واقعی‌تر یاری می‌رساند، مفهوم عدم قطعیت است. در مسائل عملی یک یا چند پارامتر از مسئله غیر قطعی‌اند و تصمیم‌گیری در مورد مسئله، از این پارامترها می‌تواند تأثیر بپذیرد. در برخی از مقالات میزان تقاضا و هزینه‌های نقل و انتقالات غیر قطعی هستند. برمن و درزرز مسئله‌ی پی‌میانه را با شرط عدم قطعیت در مورد تعداد خدمت‌دهندگان بررسی کردند.<sup>[۲۴]</sup> حسینی‌جو و بشیری مدل TPLP برمن و همکاران را با فرض غیر قطعی بودن نقطه‌ی تقاضا و پیروی آن از توزیع یکنواخت مدل‌سازی و حل کردند.<sup>[۷]</sup> کلاتتری و همکاران مدل TPLP برمن و همکاران را با فرض غیر قطعی بودن و فازی بودن نقاط تقاضا مدل‌سازی و با استفاده از یک روش ابتکاری حل کردند.<sup>[۲۵]</sup>

### ۳. تشریح مسئله و مدل ریاضی

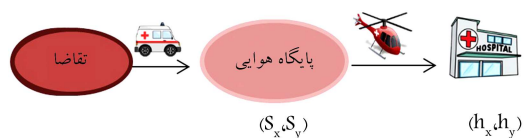
قبل از ارائه‌ی مدل ریاضی به بسط حالت‌های ممکن جابه‌جایی مصدومان به بیمارستان، که در این مقاله مد نظر است، می‌پردازیم. در حالت اول مصدوم مستقیماً توسط آمبولانس از نقطه‌ی تقاضا به بیمارستان منتقل می‌شود. این حالت در شکل ۱ نشان داده شده است. در حالت دوم، مصدوم توسط آمبولانس به پایگاه امداد هوایی منتقل می‌شود و از آنجا با بالگرد به بیمارستان منتقل می‌شود. این حالت در شکل ۲ نشان داده شده است. در حالت سوم، مصدوم توسط آمبولانس تا پد بالگرد حمل می‌شود. هم‌زمان با حرکت آمبولانس، بالگردی نیز به پد بالگرد اعزام می‌شود و پس از ملاقات بالگرد و آمبولانس، مصدوم توسط بالگرد به بیمارستان انتقال می‌یابد. این حالت در شکل ۳ نشان داده شده است. ملاک تصمیم‌گیری برای انتخاب هر یک از این حالت‌ها، زمان انتقال به بیمارستان است که بر اساس کوتاه‌ترین زمان هر یک از حالات اول تا سوم ( $T_D$ ) روش انتقال به بیمارستان تعیین می‌شود.  $DOJ'DIS$

$$T_D = \min(T_1, T_2, T_3) \quad (1)$$

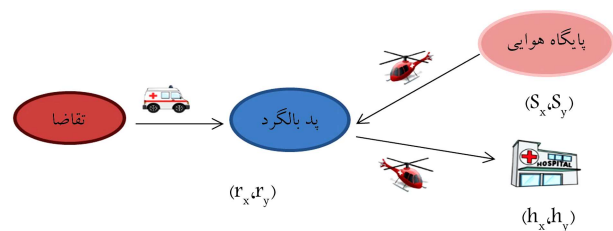
در این مدل، مسافت پیموده‌شده توسط آمبولانس را به صورت پلکانی در نظر می‌گیریم. از سوی دیگر مسافت پیموده‌شده توسط بالگرد را به صورت فاصله‌ی اقلیدسی



شکل ۱. حالت اول انتقال مصدوم به بیمارستان.



شکل ۲. حالت دوم انتقال مصدوم به بیمارستان.



شکل ۳. حالت سوم انتقال مصدوم به بیمارستان.

$$\begin{aligned}
 & s.t \\
 & l_{ik} \leq y_k \quad i \in I, \quad k \in K \quad (15) \\
 & \omega_{ijk} \leq x_j \quad i \in I, \quad k \in K, \quad j \in J \quad (16) \\
 & \omega_{ijk} \leq y_k \quad i \in I, \quad k \in K, \quad j \in J \quad (17) \\
 & u_i + \sum_{k \in K} l_{ik} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \omega_{ijk} = 1 \quad i \in I \quad (18) \\
 & \sum_{j \in J} C_t x_j + \sum_{k \in K} C_s y_k \leq B \quad (19) \\
 & T_{ijk} \geq \frac{f(r_{x(j)}) + f(r_{y(j)})}{w} \quad i \in I, \quad k \in K, \quad j \in J \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & T_{ijk} \geq \frac{\sqrt{(r_{x(j)} - s_{x(k)})^2 + (r_{y(j)} - s_{y(k)})^2}}{v} \quad (21) \\
 & x_j \in \{0, 1\} \quad y_k \in \{0, 1\} \\
 & u_i \in \{0, 1\} \quad l_{ik} \in \{0, 1\} \\
 & \omega_{ijk} \in \{0, 1\} \quad i \in I, \quad k \in K, \quad j \in J \quad (22)
 \end{aligned}$$

تابع هدف ۱۴ بیان‌گر کمینه‌کردن مجموع تقاضای وزن‌دار زمان انتقال در حالت‌های مختلف است. محدودیت ۱۵ بیان‌گر این است که زمانی تقاضا نام می‌تواند به حالت دوم تخصیص یابد که در گره  $k$  ام پایگاه امداد هوایی احداث شده باشد. محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷ با هم، این مفهوم را می‌رسانند که زمانی تقاضای نام می‌تواند به حالت سوم تخصیص یابد که در گره  $j$  ام یک پد بالگرد و در گره  $k$  ام یک پایگاه امداد هوایی احداث شده باشد. محدودیت ۱۸ به این معنی است که تقاضا فقط توسط یک حالت از سه حالت باید پوشش داده شود. محدودیت ۱۹ بیان‌گر محدودیت بودجه‌ی است که برای ساخت پدهای بالگرد و پایگاه‌های امداد هوایی وجود دارد. محدودیت ۲۰ و محدودیت ۲۱ برای خطی‌سازی تابع هدف به‌کار رفته‌اند که بیان می‌کنند در حالت سوم زمان ملاقات آمبولانس و بالگرد در نقطه‌ی انتقال برابر بیشینه‌ی زمان رسیدن هر یک از این تجهیزات به نقطه‌ی انتقال است. محدودیت‌های ۲۲ نیز نشان‌دهنده‌ی صفر و یکی بودن متغیرهای تصمیم است.

#### ۴. مثال عددی

برای نشان‌دادن نحوه‌ی عملکرد مدل پیشنهادی، ابتدا یک مثال ساده بیان می‌شود و سپس کاربرد این مدل در یک مطالعه موردی نشان داده خواهد شد. در شکل ۴ مربع‌های سبز رنگ، بیان‌گر مناطق تقاضا هستند که در ابعاد  $2 \times 2$  در صفحه‌ی دکارتی پخش شده‌اند. دایره‌های آبی نقاط کاندید برای احداث پد بالگرد، و مثلث‌های نارنجی نقاط کاندید برای احداث پایگاه امداد هوایی هستند. بیمارستان در مرکز مبدأ مختصات در نظر گرفته شده است. تعداد نقاط پیشنهادی برای پدهای بالگرد ۲۴ نقطه و تعداد نقاط کاندید برای پایگاه‌های امداد هوایی ۱۲ نقطه است. با فرض مقدار بودجه‌ی برابر دو میلیارد و سیصد میلیون تومان، هزینه‌ی احداث هر نقطه‌ی انتقال دویست میلیون تومان و هزینه‌ی احداث هر پایگاه امداد هوایی برابر یک میلیارد تومان، سرعت بالگرد برابر  $v = 200$  کیلومتر بر ساعت، و سرعت آمبولانس برابر  $w = 40$  کیلومتر بر ساعت با استفاده از نرم‌افزار گمز مقدار بیشینه‌ی تابع هدف ۰٫۵۳۷ تعیین شد و همچنین نقاط زیر در شکل ۵ فعال شدند. در جدول ۱ مقایسه‌ی بین زمان انتقال در حالت بدون پیاده‌کردن سیستم

$f(h_y)$  و  $f(r_x)$  و  $f(r_y)$  و  $f(s_x)$  و  $f(s_y)$  نیز مانند تابع ۱۳ محاسبه می‌شوند. همان‌گونه که توضیح داده شد، زمان حمل مصدوم از مناطق تقاضا به بیمارستان تحت تأثیر مکان پدهای بالگرد و مکان پایگاه‌های امداد هوایی است. در این قسمت یک مدل‌سازی ریاضی عدد صحیح برای حل این مسئله ارائه می‌شود. با توجه به اینکه مکان مناطق تقاضا و بیمارستان‌ها معلوم است، مکان بیشینه‌ی پایگاه‌های امداد هوایی و پدهای بالگرد طوری تعیین می‌شوند که زمان انتقال از مناطق تقاضا به بیمارستان در حالت‌های مختلف انتقال کمینه شود. برای مدل‌سازی مسئله، پارامترها و متغیرهای تصمیم زیر را تعریف می‌کنیم.

#### ۱.۳. اندیس‌ها و پارامترها

$I$ : مجموعه‌ی مناطق تقاضا، مشخص شده با اندیس  $i$ ؛  
 $J$ : مجموعه‌ی نقاط کاندید پد بالگرد مشخص شده با اندیس  $j$ ؛  
 $K$ : مجموعه‌ی نقاط کاندید پایگاه امداد هوایی، مشخص شده با اندیس  $k$ ؛  
 $C_t$ : هزینه‌ی احداث هر پد بالگرد؛  
 $C_s$ : هزینه‌ی احداث هر پایگاه امداد هوایی و تجهیز آن؛  
 $B$ : کل بودجه تخصیص‌یافته برای طرح؛  
 $h_i$ : تقاضای منطقه‌ی تقاضای نام؛  
 $v$ : سرعت بالگرد؛  
 $w$ : سرعت آمبولانس.

#### ۲.۳. متغیرهای تصمیم

$x_j$ : متغیر تصمیم صفر و یک، که اگر پد بالگرد در گره  $j$  احداث شود، مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر می‌شود؛  
 $y_k$ : متغیر تصمیم صفر و یک، که اگر پایگاه امداد هوایی در گره  $k$  احداث شود، مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر می‌شود؛  
 $u_i$ : متغیر تصمیم صفر و یک، که اگر تقاضای  $i$  توسط آمبولانس تأمین شود (حالت اول)، مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر می‌شود؛  
 $l_{ik}$ : متغیر تصمیم صفر و یک، که اگر تقاضای  $i$  توسط ایستگاه  $k$  تأمین شود (حالت دوم)، مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر می‌شود؛  
 $\omega_{ijk}$ : متغیر تصمیم صفر و یک، که اگر تقاضای  $i$  توسط ترکیبی از نقطه‌ی انتقال  $j$  و ایستگاه  $k$  تأمین شود (حالت سوم)، مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر می‌شود؛  
 $T_{ijk}$ : بیشینه‌ی زمان حرکت آمبولانس تا پد بالگرد و زمان حرکت بالگرد از ایستگاه تا نقطه‌ی انتقال  $j$ .

#### ۳.۳. مدل ریاضی

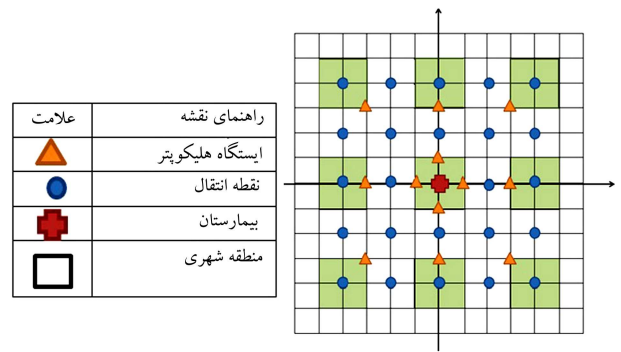
$$\begin{aligned}
 \min \sum_{i \in I} h_i \left\{ \left[ \frac{f(h_{x(i)}) + f(h_{y(i)})}{w} \right] u_i + \left[ \frac{f(s_{x(i)}) + f(s_{y(i)})}{w} \right. \right. \\
 \left. \left. + \frac{\sqrt{(h_{x(i)} - s_{x(k)})^2 + (h_{y(i)} - s_{y(k)})^2}}{v} \right] l_{ik} \right. \\
 \left. + \left[ T_{ijk} + \frac{\sqrt{(h_{x(i)} - r_{x(j)})^2 + (h_{y(i)} - r_{y(j)})^2}}{v} \right] \omega_{ijk} \right\} \quad (14)
 \end{aligned}$$

جدول ۲. شهرهای مهم استان لرستان و نسبت وزنی.

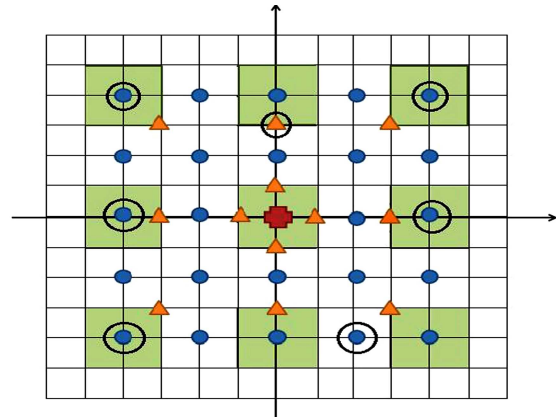
ردیف	نام شهر	جمعیت شهری	وزن جمعیت
۱	خرم آباد	۳۵۴۸۵۵	۰٫۳۳۱
۲	بروجرد	۲۴۵۷۳۷	۰٫۲۲۹
۳	دورود	۱۰۰۹۷۷	۰٫۰۹۴
۴	کوه دشت	۱۱۱۷۳۶	۰٫۱۰۴
۵	الیگودرز	۸۹۵۲۰	۰٫۰۸۳
۶	نورآباد	۶۲۱۹۰	۰٫۰۵۳
۷	ازنا	۴۱۷۰۶	۰٫۰۳۹
۸	الشتر	۳۳۱۳۳	۰٫۰۳۱
۹	پلدختر	۳۲۵۹۴	۰٫۰۳۰
	مجموع جمعیت:	۱۰۷۲۴۴۸	۱

سیلاب پذیر بودن منطقه‌ی جنوبی استان به خصوص شهرستان پلدختر، این استان یکی از ۱۰ استان حادثه‌خیز کشور است. همین امر لزوم استفاده از سیستم درمانی و امداد رسانی مناسب در این استان را ایجاب می‌کند. در جدول ۲ مهم‌ترین شهرهای استان لرستان بر اساس جمعیت آن‌ها و نسبت وزن آن‌ها آمده است. بیمارستان فوق تخصصی شهدای عشایر در شهر خرم‌آباد واقع است که توانایی پذیرش بیماران ترومایی را دارد. جامعه‌ی هدف مورد مطالعه در این بررسی، بیمارانی هستند که بر اثر تصادفات باید هرچه سریع‌تر به بیمارستان شهدای عشایر خرم‌آباد منتقل شوند. هرکدام از ۹ شهر جدول ۲ با توجه به مساحت‌شان در یک مربع محاط شده‌اند (شکل ۶). وزن هرکدام از شهرها از نسبت تقسیم جمعیت هریک از شهرها به مجموع جمعیت شهری به‌دست آمده است. با توجه به بررسی‌های صورت‌پذیرفته و پرسش از خبرگان، هشت نقطه‌ی زیر به‌عنوان نقاط کاندید پایگاه امداد هوایی در نظر گرفته شده است: ازنا، الیگودرز، دورود، بروجرد، الشتر، نورآباد، کوه‌دشت و پلدختر. هم‌چنین ۱۸ نقطه‌ی زیر به‌عنوان نقاط پیشنهادی پد بالگرد در نظر گرفته شده است: بیروند جنوبی، رازان، زرگران اولیا، دورود، ازنا، الیگودرز، بروجرد، اشترایان، وارینه، الشتر، فیروزآباد، فرهادآباد، نورآباد، سراب دوره، کوه‌دشت، آفرینه، رومشگان و پلدختر. علاوه بر این مختصات تمام نقاط در نظر گرفته‌شده، با نرم‌افزار گوگل ارث ۶ محاسبه شده است. مقدار کل بودجه‌ی مورد نظر برای این طرح سیزده میلیارد تومان در نظر گرفته‌شد که احداث هر نقطه‌ی انتقال دویست میلیون تومان و احداث هر پایگاه امداد هوایی با بالگرد آن شش میلیارد تومان برآورد شده است.

این مسئله با استفاده از نرم‌افزار GAMS بر روی رایانه‌ی بی با مشخصات Intel Core i5 - 2.4GHz و 4GB RAM اجرا شد. در مدل ریاضی مقدار تابع هدف ۳۲٫۴ دقیقه می‌شود. شهرهای الیگودرز، بروجرد، الشتر، فرهادآباد، و پلدختر برای احداث پد بالگرد انتخاب شدند. هم‌چنین دو پایگاه امداد هوایی در شهرهای دورود و کوه‌دشت فعال شدند. تخصیص هر کدام از مناطق تقاضا به یکی از سه حالت ذکر شده در مقاله در جدول ۳ آمده است. برای مثال تقاضای شهر خرم‌آباد باید از طریق حالت اول انتقال و از طریق آمبولانس تأمین شود. برای منطقه‌ی تقاضای دورود، باید از حالت دوم انتقال و از طریق ایستگاه بالگرد فعال‌شده در شهر دورود اقدام کرد. هم‌چنین برای انتقال بیماران از شهر ازنا بهتر است از حالت سوم انتقال و توسط ایستگاه بالگرد دورود و نقطه‌ی انتقال (پد بالگرد) واقع در شهر الیگودرز اقدام شود. شکل ۷ نحوه‌ی انتقال مصدومان از هریک از مناطق تقاضای این استان را با توجه به جدول ۳ نشان می‌دهد.



شکل ۴. نقاط کاندید پایگاه امداد هوایی و پد بالگرد.



شکل ۵. نقاط فعال برای پایگاه امداد هوایی و پد بالگرد.

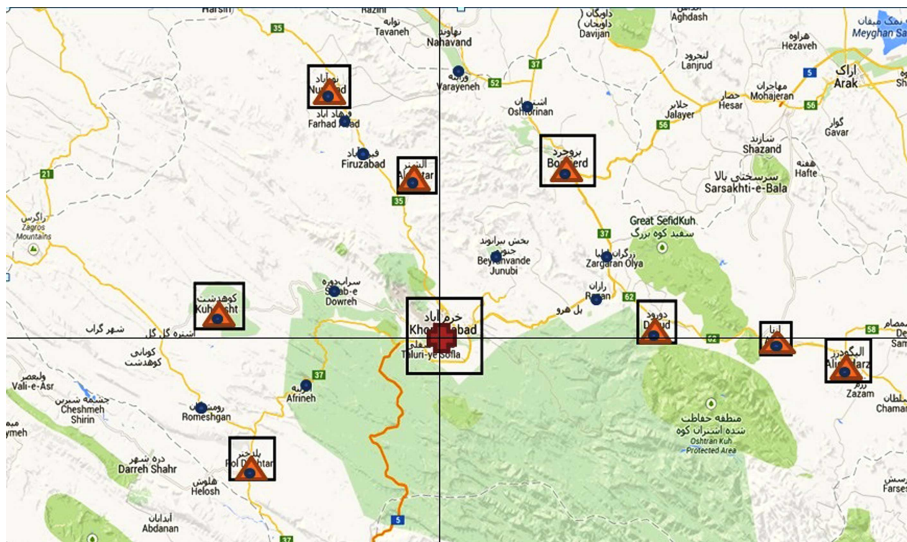
جدول ۱. تحلیل حساسیت میزان بودجه تخصیص یافته.

وضعیت	بودجه اختصاص داده شده (میلیارد تومان)	زمان تابع هدف	تعداد نقطه پد بالگرد	تعداد ایستگاه امداد هوایی
بدون اجرای HEMS	-	۲٫۶۲۵	-	-
با اجرای HEMS	۱٫۳	۱٫۵۷۷	۱	۱
	۱٫۸	۰٫۷۱۵	۴	۱
با اجرای HEMS	۲٫۳	۰٫۵۳۷	۶	۱
	۲٫۸	۰٫۴۳۲	۸	۱
	۳٫۳	۰٫۴۳۲	۸	۱

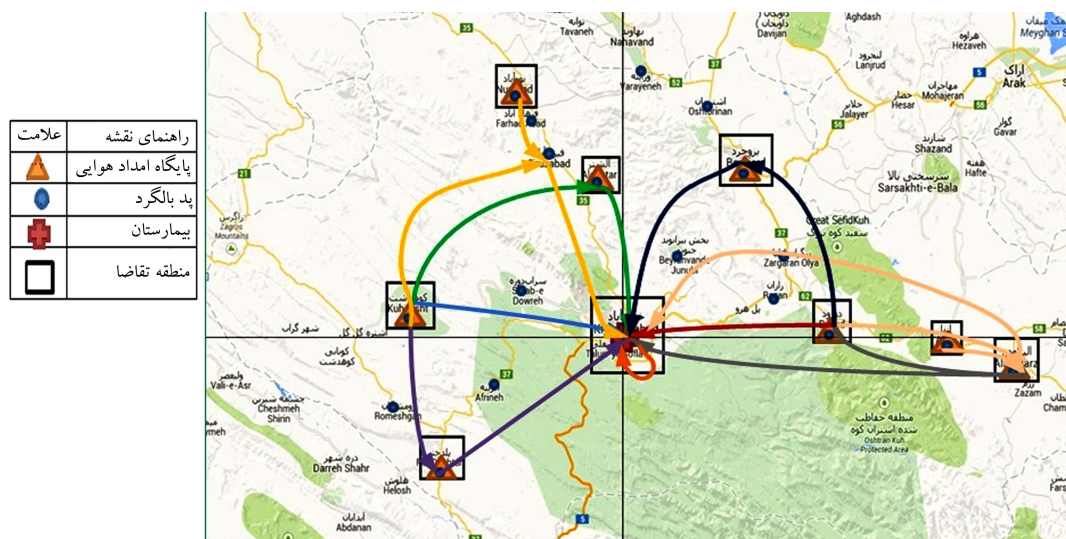
HEMS و با در نظر گرفتن HEMS بیان شده است. با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که زمان انتقال به بیمارستان با اجرای HEMS و هم‌چنین افزایش بودجه، کاهش چشم‌گیری دارد. ولی روند کاهش زمان در بودجه‌های بالا کند می‌شود.

## ۵. مطالعه موردی: استان لرستان

استان لرستان یکی از استان‌های غربی ایران است. این استان ۲۸٫۲۹۴ کیلومتر مربع مساحت و بیش از یک میلیون و هفت صد هزار نفر جمعیت دارد. با توجه به گستردگی حوادث ترافیکی خاص و هم‌چنین مسیر ترانزیتی تهران - جنوب و کوهستانی بودن منطقه حوادث زیادی در جاده‌های این استان رخ می‌دهد و با توجه به کوهستانی بودن منطقه و هم‌چنین وجود گسل‌های جوان و فعال در زاگرس، و



شکل ۶. نقاط کاندید ایستگاه‌های امداد هوایی و پدهای بالگرد استان لرستان.



شکل ۷. نحوه انتقال از مناطق تقاضا به بیمارستان.

جدول ۳. نحوه انتقال از هرکدام از شهرهای استان لرستان.

ردیف	مناطق تقاضا	حالت انتقال به بیمارستان	ایستگاه بالگرد	نقطه‌ی انتقال
۱	خرم‌آباد	اول	فعال	فعال
۲	دورود	دوم	دورود	-
۳	ازنا	سوم	دورود	الیگودرز
۴	الیگودرز	سوم	دورود	الیگودرز
۵	بروجرد	سوم	دورود	بروجرد
۶	الشتر	سوم	کوه‌دشت	الشتر
۷	نورآباد	سوم	کوه‌دشت	فرهادآباد
۸	کوه‌دشت	دوم	کوه‌دشت	-
۹	پل دختر	سوم	کوه‌دشت	پل دختر

## ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله یک مدل مکان‌یابی توأم پایگاه‌های امداد هوایی و پدهای بالگرد در شرایط عدم قطعیت توسعه داده شد. با توجه به اینکه محل وقوع حادثه به‌صورت دقیق معلوم نیست، برای واقعی‌تر شدن مدل این‌گونه فرض شد که حادثه در منطقه‌های مربعی شکل به جای یک نقطه رخ می‌دهد. برخی از نقاط از لحاظ جغرافیایی، کوهستانی هستند یا تراکم جمعیتی بالایی دارند که فرایند فرود HEMS ضروری به نظر می‌رسد. سه حالت برای انتقال مصدومان به بیمارستان شناسایی شد؛ حالت اول انتقال مستقیم به بیمارستان با آمبولانس، حالت دوم انتقال مصدوم به پایگاه امداد هوایی و سپس از طریق بالگرد به بیمارستان، و حالت سوم انتقال مصدوم به پد بالگرد و از آنجا با بالگرد به بیمارستان بود. در این مقاله فرض شد که منطقه‌ی تقاضا، از توزیع یکنواخت پیروی می‌کند. تابع

نحوه‌ی تخصیص هریک از تسهیلات به مناطق تقاضا معین شد. مواردی که می‌توان برای تحقیقات بعدی مطرح کرد عبارت‌اند از: ۱. در نظر گرفتن ظرفیت هریک از وسایل امدادی؛ ۲. پیاده‌سازی سیستم HEMS تحت اختلال در شبکه؛ ۳. بررسی مطالعات موردی در ابعاد کلان‌تر و در نقاط مختلف و در حالت‌های متفاوت و شرایط واقعی‌تر.

هدف مدل به دنبال کمینه‌کردن مجموع زمان انتقال از مناطق تقاضا به بیمارستان بود. برای ارزیابی مدل، یک مثال عددی کوچک مطرح شد و نتایج حاصل از آن، نشان‌دهنده‌ی مزایای پیاده‌سازی سیستم HEMS نسبت به سیستم سنتی بود. همچنین بر اساس یک مطالعه‌ی موردی که در استان لرستان صورت پذیرفت، مکان‌های بهینه‌ی احداث پدهای بالگرد و ایستگاه‌های امداد هوایی تعیین شد و

## پانوشته‌ها

1. helicopter emergency medical service
2. emergency medical service
3. location problem transfer point
4. facility and transfer point location problem
5. multiple location of transfer point

## منابع (References)

1. Dehart, D.J., *Fundamentals of Aerospace Medicine*, ed. r. Edition, Philadelphia (2002).
2. Akhtari, A.S., Jafari, N.S., Karimian, H., Amini, A., Monsef, V., Noorizadeh, M. and Gholizadeh, N. "The coast and benefits of helicopter emergency medical services instead of the ground unit in traumatic patients: A cost-effectiveness analysis", *Health*, **5**(5), pp. 903-907 (2013).
3. Furuta, T. and Tanaka, K.I. "Minimum and minimax location models for helicopter emergency medical service systems", *Journal of the Operations Research Society of Japan*, **56**(3), pp. 221-242 (2013).
4. Başar, A., Çatay, B. and Ünlüyurt, T. "A taxonomy for emergency service station location problem", *Optimization Letters*, **6**(6), pp. 1147-1160 (2012).
5. Goldberg, J.B. "Operations research models for the deployment of emergency services vehicles", *EMS Management Journal*, **1**(1), pp. 20-39 (2004).
6. Brotcorne, L., Laporte, G. and Semet, F. "Ambulance location and relocation models", *European Journal of Operational Research*, **147**(3), pp. 451-463 (2003).
7. Hosseinijou, S.A. and Bashiri, M. "Stochastic models for transfer point location problem", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **58**(1-4), pp. 211-225 (2012).
8. Goldman, A. "Optimal locations for centers in a network", *Transportation Science*, **3**(4), pp. 352-360 (1969).
9. O'Kelly, M.E., "The location of interacting hub facilities", *Transportation Science*, **20**(2), pp. 92-106 (1986).
10. Alumur, S. and Kara, B.Y. "Network hub location problems: The state of the art", *European Journal of Operational Research*, **190**(1), pp. 1-21 (2008).
11. Berman, O., Drezner, Z. and Wesolowsky, G.O. "The transfer point location problem", *European Journal of Operational Research*, **179**(3), pp. 978-989 (2007).
12. Berman, O., Drezner, Z. and Wesolowsky, G. "The hub location problem", Working paper (2004).
13. Berman, O., Drezner, Z. and Wesolowsky, G.O. "The facility and transfer points location problem", *International Transactions in Operational Research*, **12**(4), pp. 387-402 (2005).
14. Berman, O., Drezner, Z. and Wesolowsky, G. "The multiple location of transfer points", *Journal of the Operational Research Society*, **59**(6), pp. 805-811 (2008).
15. Sasaki, M., Furuta, T. and Suzuki, A. "Exact optimal solutions of the minisum facility and transfer points location problems on a network", *International Transactions in Operational Research*, **15**(3), pp. 295-306 (2008).
16. Schuurman, N., Bell, N.J., L'Heureux, R. and Hamid, S.M. "Modelling optimal location for pre-hospital helicopter emergency medical services", *BMC Emergency Medicine*, **9**(1), 6 p. (2009).
17. Branas, C.C., MacKenzie, E.J. and ReVelle, C.S. "A trauma resource allocation model for ambulances and hospitals", *Health Services Research*, **35**(2), p. 489-507 (2000).
18. Branas, C.C. and ReVelle, C.S. "An iterative switching heuristic to locate hospitals and helicopters", *Socio-Economic Planning Sciences*, **35**(1), pp. 11-30 (2001).
19. Fulton, L.V., Lasdon, L.S., McDaniel, R.R. and Copolla, M.N. "Two-stage stochastic optimization for the allocation of medical assets in steady state combat operations", *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, **7**(2), pp. 89-102 (2010).
20. Erdemir, E.T., Batta, R.S., Spielman, S., Ragerson, P.A., Blatt, A. and Flanigan, M. "Optimization of aeromedical base locations in New Mexico using a model that considers crash nodes and paths", *Accident Analysis & Prevention*, **40**(3), pp. 1105-1114 (2008).
21. Erdemir, E.T., Batta, R., Spielman, S., Ragerson, P.A., Blatt, A. and Flanigan, M. "Location coverage models with demand originating from nodes and paths: Application to cellular network design", *European Journal of Operational Research*, **190**(3), pp. 610-632 (2008).
22. Erdemir, E.T., Batta, R., Spielman, S., Ragerson, P.A., Blatt, A. and Flanigan, M. "Joint ground and air emergency medical services coverage models: A greedy heuristic solution approach", *European Journal of Operational Research*, **207**(2), pp. 736-749 (2010).

23. Furuta, T. and Tanaka, K.-I. "Maximal covering location model for doctor-helicopter systems with two types of coverage criteria", *Urban and Regional Planning Review*, **1**, pp. 39-58 (2014).
24. Berman, O. and Drezner, Z. "The  $p$ -median problem under uncertainty", *European Journal of Operational Research*, **189**(1), pp. 19-30 (2008).
25. Kalantari, H., Yousefi, A., Ghazanfari, M. and Shahanaghi, K. "Fuzzy transfer point location problem: A possibilistic unconstrained nonlinear programming approach", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **70**(5-8), pp. 1043-1051 (2014).