آینده‌پژوهی دفاعی، سال چهارم، شماره ۱۳، تابستان ۱۳۹۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۲

از صفحه ۸۹ تا صفحه ۱۱۰

# مدل‌سازی ریاضی مسئله مکان‌یابی- مسیریابی در شرایط بحرانی با در نظر گرفتن امنیت مسیر

سکینه بیگی [*۱]

الهام حسین زاده[۲]

**چکیده**

وقوع بلایای طبیعی و غیرطبیعی سالانه جان و مال انسان‌های زیادی را در سراسر جهان تهدید می‌کند. یکی از اقدام‌های اولیه در فاز پاسخ به چنین وقایعی، انتقال افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به اردوگاه‌ها است. هدف از این تحقیق، ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط برای تعیین بهترین مکان اردوگاه‌ها و مسیر حرکت وسایل امدادی بین نقاط آسیب‌دیده و محل‌های اسکان افراد است. در عملیات انتقال افراد، عدم قطعیت فازی در زمان‌های حمل‌ونقل، مقدار تقاضای نقاط حادثه‌دیده، زمان خدمت‌رسانی و پنجره زمانی در نظرگرفته شده است. در این تحقیق، ابتدا مقدار بهینه مجموع زمان‌های رسیدن وسایل نقلیه به اردوگاه‌ها در شرایط بدبینانه محاسبه شده است. سپس این مقدار به عنوان کران بالای محدودیت زمان در مدلی با هدف کمینه‌سازی هزینه موردانتظار آسیب وارد شده به افراد و وسایل نقلیه در نظر گرفته شده است. هزینه ذکرشده با توجه به امنیت هر یک از مسیرها در حرکت از انبار به نقاط حادثه‌دیده و از نقاط حادثه‌دیده به اردوگاه‌ها محاسبه شده است. برای نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی، مدل بر روی یک مثال تصادفی اجرا شده است. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به‌عنوان الگویی برای برنامه‌ریزی پاسخ به وقوع بحران‌های احتمالی پدافند عامل مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:**

***لجستیک اضطراری، مسیریابی و مکان‌یابی، اردوگاه‌های غیر نظامیان، عدم قطعیت، امنیت مسیر.***

[۱]. مربی گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کوثر بجنورد، بجنورد، ایران

[۲]. استادیار گروه ریاضیات و کاربردها، دانشگاه کوثر بجنورد، بجنورد، ایران

[*] نویسنده مسئول: Email: sakinebeigi@yahoo.com

**مقدمه**

بلایای طبیعی و غیرطبیعی مانند زلزله، سیل، جنگ و حمله‌های تروریستی همواره بر زندگی، جان و مال انسان‌ها تاثیرهای مخرب زیادی داشته‌اند. در بلایای غیرطبیعی مانند جنگ، پدافند غیرعامل همواره به عنوان یک ابزار غیرمسلحانه برای کاهش آسیب‌پذیری نیروی انسانی، ساختمان‌ها، تاسیسات و تجهیزات مطرح بوده است (اخباری و احمدی، ۱۳۹۳). آینده‌پژوهی یکی از زمینه‌های قابل‌توجه در پدافند غیرعامل است که کمک می‌کند تا شرایط و تهدیدهای آینده دشمن شناخته شود و در مورد آن‌ها تدبیر و برنامه‌ریزی شود. یکی از روش‌های آینده-پژوهی مدل‌سازی است (طیبی و همکاران، ۱۳۹۶). پیدایش مدل‌سازی ریاضی به عنوان یکی از ابزارهای تحقیق در عملیات به جنگ جهانی اول و دوم بازمی‌گردد (مرادیان، ۲۰۰۸). در این تحقیق نیز از ابزار مدل‌سازی ریاضی برای مسئله مکان‌یابی و مسیریابی در شرایط بحرانی استفاده شده است.

موضوع مکان‌یابی در مسائل استراتژیک مانند جنگ‌های آینده در حوزه‌های مختلف قابل بررسی و حائز اهمیت است (شهلائی و همکاران، ۱۳۹۵). مکان‌یابی صحیح مراکز توزیع کالاها و خدمات، مراکز اسکان و مراکز درمانی در شرایط بحرانی علاوه بر آن که منجر به نجات جان انسان‌های زیادی می‌شود، هزینه‌های امداد را نیز کاهش می‌دهد. یکی از جنبه‌های مجهول موجود در بیشتر سازمان‌ها به‌ویژه سازمان‌های دفاعی و نظامی، استفاده از رویکردهای بهینه-سازی برای کسب آمادگی بیشتر و تحلیل نتایج در هنگام وقوع شرایط بحرانی مانند جنگ است (طیبی و همکاران، ۱۳۹۶). نتایج حاصل از ابزارهای بهینه‌سازی می‌توانند به عنوان یک کمک تصمیم، به افراد تصمیم‌گیر یاری رسانند.

مکان‌یابی تسهیلات در حوزه نظامی را می‌توان در دو دسته مکان‌یابی تسهیلات مطلوب و نامطلوب قرار داد. در مکان‌یابی تسهیلات مطلوب مانند مراکز اورژانس، مراکز پشتیبانی و مراکز اسکان اضطراری سعی می‌شود تا مکان این مراکز تا حد امکان نزدیک به متقاضیان استفاده از این تسهیلات در نظر گرفته شود (نصیری، ۱۳۸۷). در مکان‌یابی تعداد دیگری از تسهیلات مانند راکتورهای هسته‌ای، تاسیسات نظامی و کارخانجات تولیدکننده محصولات نظامی که به علت تولید آلودگی و نیز در معرض خطر قراردادن ساکنین اطراف، تسهیلات نامطلوب نامیده می‌شوند؛ سعی می‌شود تا حد امکان مکان این تسهیلات دور از ساکنین نقاط شهری و غیرشهری در نظر گرفته شود (نصیری، ۱۳۸۷).

یک نمونه از تسهیلات نامطلوب، مراکز تولید تجهیزات نظامی است که به عنوان مهم‌ترین تسهیلات حساس محسوب می‌شوند. این ویژگی موجب می‌شود تا این مراکز به اهداف دشمنان در حملات احتمالی تبدیل شوند. بنابراین مکان‌یابی صحیح آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. به دلیل اینکه اینگونه مراکز دارای طبقه‌بندی اطلاعاتی و امنیتی‌اند؛ مطالعات انجام شده در خصوص آن‌ها نیز از این قاعده مستثنی نیست و مطالعات منتشر شده در این زمینه بسیار محدود است. در ادامه به برخی از تحقیق‌هایی که به مکان‌یابی مراکز نظامی پرداخته‌اند، اشاره می‌شود.

در تحقیق زنجیرانی فراهانی و اصغری هدف کمینه‌سازی تعداد مراکز توزیع محصولات نظامی و بیشینه‌سازی کیفیت مکان این مراکز مورد توجه قرار گرفته است. ارزش هر یک از مکان‌های کاندید با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تعیین شده است ( Zanjirani Farahani & Asgari, 2007). در تحقیق دیگری، روستایی و همکارانش به تحلیل ژئومورفولوژیکی مکان‌یابی مراکز نظامی در دامنه‌های غربی کوهستان سهند پرداخته‌اند و نقشه مکان‌های مناسب برای استقرار یگان‌های نظامی را تعیین کردند (روستایی و همکاران، ۱۳۹۲). سعیدی و همکارانش در تحقیق خود به مکان‌یابی پادگان نظامی با رویکرد پدافند غیرعامل پرداخته‌اند. در این تحقیق با استفاده از تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی[1]، روش‌های تصمیم-گیری چندمعیاره و روش ترکیب خطی وزنی سه نقطه به عنوان بهترین نقاط برای جانمایی پادگان در شهرستان تربت‌جام تعیین شده است (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۲).

حنفی و موسوی در پژوهشی به مکان‌یابی مراکز حساس نظامی در مناطق مرزی ایران و ترکیه با رویکرد پدافند غیرعامل پرداخته‌اند. در این تحقیق مناطق مساعد برای ایجاد تاسیسات نظامی در منطقه شناسایی شده است (حنفی و موسوی، ۱۳۹۲). کریمی و خلیلی در تحقیق خود مکان‌یابی مراکز نظامی در جنوب استان ایلام را مورد مطالعه قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیدند که بیشتر مراکز نظامی موجود در منطقه مورد مطالعه در پهنه سرزمینی مناسبی قرار دارند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۳).

منشادی در تحقیق خود الگوی مناسب پراکنش آمادگاه‌های نزاجا را با توجه به جنگ ناهمتراز و با تاکید بر اصول پدافند غیرعامل ارائه کرده است (منشادی، ۱۳۹۰). رستمیان و همکارانش در پژوهشی باعنوان آمایش و مکان‌یابی مراکز و استقرارگاه‌های نظامی با رویکرد امنیتی-دفاعی به پهنه‌بندی ناحیه رویش هیرکانی از دیدگاه نظامی پرداخته‌اند (رستمیان و همکاران، ۱۳۹۳). آقاطاهر و همکارانش در تحقیق خود به ارائه نقشه پهنه‌بندی مراکز مستعد

[1]. Geographic Information System (GIS)

دفاعی در بخشی از جنگل‌های استان گلستان با کمک تکنیک‌های تحلیل سلسه‌مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی پرداخته‌اند ( آقاطاهر و همکاران، ۱۳۹۴).

کیانگ و همکاران در تحقیق خود به بررسی انتخاب پناهگاه‌های اضطراری در مناطق کوهستانی ونچون پرداختند (Qiang et al., 2011). نصیری ضمن شناسایی عوامل موثر در مکان‌یابی مراکز حساس نظامی با تاکید بر پدافند غیرعامل، مدلی برای مکان‌یابی این مراکز در تهران بزرگ ارائه داده است (نصیری، ۱۳۸۸).

صبوحی، حیدری و بزرگی امیری در تحقیق خود به معرفی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای تعیین مسیر و زمان حرکت وسایل امدادی با در نظر گرفتن امکان تراکنش بین پناهگاه‌ها پرداخته‌اند (صبوحی و همکاران، ۱۳۹۶). طیبی و همکاران نیز در تحقیقی از رویکرد برنامه-ریزی ریاضی برای مکان‌یابی مراکز ارائه خدمت به مصدومان جنگی و تقسیم‌بندی مناطق متقاضی دریافت این خدمات استفاده کرده‌اند (طیبی و همکاران، ۱۳۹۶).

با توجه به ماهیت غیرقطعی بسیاری از پارامترها و متغیرها در شرایط بحرانی، ارائه مدلی ریاضی با در نظرگرفتن عدم قطعیت در مساله، می‌تواند برای تصمیم‌گیران مفید باشد. از جمله روش‌های برخورد با عدم قطعیت می‌توان به برنامه‌ریزی تصادفی، برنامه‌ریزی فازی، برنامه‌ریزی پویا و بهینه‌سازی استوار اشاره کرد (خداوردی و همکاران، ۱۳۹۵). از جمله تحقیق‌هایی که با در نظر گرفتن عدم قطعیت به بررسی مساله لجستیک امداد پرداخته‌اند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

صفاریان، برزین پور و اقبالی در تحقیق خود یک مدل چندهدفه غیر قطعی برای فاز پاسخ مدیریت بحران ارائه داده‌اند (Saffarian et al., 2015). در این تحقیق زمان سفر و مقدار تقاضا در نقاط آسیب به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت در این تحقیق به صورت سناریو در نظر گرفته شده است. در تحقیق برونی و همکاران، برای مسیریابی مسائل لجستیک امداد عدم قطعیت در زمان سفر بین گره‌ها با استفاده از میانگین و واریانس زمان سفر در نظر گرفته شده است (Bruni et al., 2018). در تحقیق صفایی و همکاران یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی استوار مبتنی بر سناریو برای تعیین جریان کالای بین نقاط در لجستیک امداد ارائه شده است. تابع هدف سطح اول کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تامین و تابع هدف سطح دوم کمینه‌سازی ریسک تامین کالا از عرضه‌کنندگان است (Safaei et al., 2018).

باربارosوگلو و آردا در تحقیق خود (Barbarosoglu & Arda, 2004) یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای را ارائه داده‌اند. در مرحله اول در مورد انتقال کالاهای امدادی بین انبارهای

موجود برای تامین موجودی تصمیم‌گیری می‌شود و در مرحله دوم با در نظرگرفتن عدم قطعیت عرضه و تقاضا، کالاهای امدادی برای حادثه‌دیدگان ارسال می‌شود. در تحقیق (Loree and Aros-Vera, 2018) یک مدل ریاضی با تابع هدف و محدودیت‌های غیرخطی برای تعیین تعداد و مکان بهینه نقاط توزیع کالا به مناطق آسیب‌دیده ارائه شده است. در این تحقیق، علاوه بر هزینه راه‌اندازی نقاط توزیع و هزینه سفر بین نقاط، هزینه کمبود کالا نیز در تابع هدف گنجانده شده است. باتوجه به غیرخطی بودن مدل ارائه‌شده یک الگوریتم ابتکاری برای حل مدل در ابعاد بزرگ ارائه شده است.

در تحقیق پاپی و همکاران مدل‌سازی و حل مسئله لجستیک امداد با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی سناریومحور استوار دوهدفه انجام شده است که در آن هدف بشردوستانه کمینه‌سازی بیشینه کمبود و هدف اقتصادی کمینه‌سازی متوسط هزینه امدادرسانی، تحت سناریوهای محتمل مورد توجه قرار گرفته است (پاپی و همکاران، ۱۳۹۷). در تحقیق‌های (بزرگی امیری و همکاران، ۱۳۹۴)، (اسدی و همکاران، ۱۳۹۶)، (خداکرمی و همکاران، ۱۳۹۵) و (Gendreau et al., 1997) نیز مساله لجستیک امداد به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است. مطالعه‌های زیادی در زمینه مکان‌یابی و مسیریابی وسایل‌نقلیه انجام شده است. در بیشتر این تحقیق‌ها هدف‌های اقتصادی و گاهی هدف‌های بشردوستانه مورد توجه قرار گرفته است. هیچ یک از تحقیق‌های مطالعه‌شده به کاربرد مسیریابی در مسائل نظامی با در نظر گرفتن امنیت راه‌ها نپرداخته‌اند.

در تحقیق حاضر به معرفی مدلی برای تعیین مکان بهینه اردوگاه‌های اسکان اضطراری افراد غیرنظامی پرداخته شده است. اولین گام برای تامین سرپناه در زمان بحران، ایجاد سرپناه‌های اضطراری است تا شرایط اولیه زندگی و امنیت لازم فراهم شود (دانایی‌نیا و زاغیان، ۱۳۹۸). مکان‌های کاندید برای این سرپناه‌ها بایستی دور از تسهیلات حساس شهری و نظامی باشند تا احتمال آسیب به آن‌ها کم باشد. در این تحقیق زمان‌های انتقال بین گره‌ها، زمان‌های خدمت-رسانی، تقاضای نقاط حادثه‌دیده و پنجره زمانی برای رسیدن وسایل‌نقلیه به نقاط به صورت غیرقطعی و فازی در نظر گرفته شده است. ابتدا با در نظر گرفتن بدترین شرایط محتمل پارامترها، مقدار بهینه مجموع زمان‌های رسیدن وسایل نقلیه به اردوگاه‌ها تعیین شده است. سپس این زمان به عنوان کران بالای محدودیت زمان به محدودیت‌های مدلی دیگر که دارای تابع هدف کمینه‌سازی هزینه آسیب مورد انتظار است، اضافه شده است.

از جمله نوآوری‌های مدل ارائه شده که آن را با دیگر مقاله‌های موجود در این حوزه متمایز می‌سازد، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱. در تحقیق حاضر، رویکرد توسعه یافته‌ای برای حل یک مساله دوهدفه با کاربرد نظامی ارائه شده است. به این ترتیب که ابتدا مقدار تابع هدف دوم در شرایط بدبینانه محاسبه شده، سپس این مقدار به عنوان کران بالای یک محدودیت در مساله برنامه-ریزی فازی با تابع هدف اول در نظر گرفته شده است.
۲. مدل بهینه‌سازی چندهدفه فازی پیشنهادی می‌تواند ضمن اعمال محدودیت‌های مختلف، تعداد و مکان بهینه اردوگاه‌های غیرنظامیان را تعیین نماید.
۳. در مدل پیشنهادی، با در نظر گرفتن امنیت هر یک از مسیرها و گره‌ها بهترین مسیر برای حرکت وسایل امدادی در زمان بحران شناسایی و تعداد افرادی که بایستی در هر گره به وسیله نقلیه سوار یا از آن پیاده شوند تعیین می‌شود.
۴. در مدل پیشنهادی عدم قطعیت پارامترها به صورت فازی در نظر گرفته شده است و استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی فازی به برنامه‌ریزی تصادفی ترجیح داده شده است. زیرا در بسیاری از مسائل واقعی داده‌های تاریخی کافی برای پارامترهای دارای عدم قطعیت وجود ندارد و لذا به ندرت می‌توان توزیع درستی از پارامترهای نامعین به دست آورد.
۵. در این تحقیق بیشینه‌سازی امنیت مسیر انتخابی با استفاده از کمینه‌سازی هزینه آسیب واردشده به افراد و وسایل نقلیه در مسیر حرکت از نقاط تقاضا به اردوگاه‌ها در نظر گرفته شده است.

در ادامه، در بخش دوم از تحقیق حاضر به بیان مبانی نظری، در بخش سوم مدل‌سازی مساله، در بخش چهارم حل یک مثال فرضی و در بخش پنجم به بیان نتایج تحقیق پرداخته می‌شود.

## مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در این بخش برخی از تعاریف و مفاهیم اولیه‌ی نظریه مجموعه‌های فازی که مورد نیاز بخش‌های بعد است، از مرجع (Sakawa, 1993) یادآوری می‌شود.

هر $\alpha$ - برش عدد فازی $\tilde{A}$ یک بازه بسته به صورت $[a_\alpha^L, a_\alpha^R]$ است که در آن

$$a_\alpha^R = \sup\{x \in X |\ \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}, \quad a_\alpha^L = \inf\{x \in X |\ \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}$$

تابع عضویت عدد فازی مثلثی $\tilde{A} = (a, b, c)$، به صورت زیر تعریف می‌شود که در آن $b$ نقطه میانی، $a$ و $c$ به ترتیب نقاط انتهایی چپ و راست $Supp(\tilde{A})$ هستند.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \dfrac{x-a}{b-a} & a \le x \le b \\ \dfrac{c-x}{c-b} & b \le x \le c \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

لازم به ذکر است که در سراسر این مقاله $\tilde{0} = (0,0,0)$ به عنوان عدد فازی مثلثی صفر در نظر گرفته شده است و عدد فازی مثلثی $\tilde{A} = (a, b, c)$ را نامنفی گوییم هرگاه $a \ge 0$.

تعریف۱. فرض کنید $\tilde{A}$ یک عدد فازی و برای هر $\alpha \in (0,1]$، بازه‌ی $[a_\alpha^L, a_\alpha^R]$، $\alpha$- برش آن باشد. بازه‌ی $C(\tilde{A}) = [c^L, c^R]$ را تقریب نزدیک‌ترین بازه‌ی $\tilde{A}$یا بازه مورانتظار $\tilde{A}$ گوییم که در آن

$$c^L = \int_0^1 a_\alpha^L d\alpha \quad , \quad c^R = \int_0^1 a_\alpha^R d\alpha .$$

یکی از روش‌های متداول برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی فازی، مبتنی بر مقایسه اعداد فازی و خصوصا استفاده از تابع رتبه‌بندی است. یک روش مناسب برای رتبه‌بندی اعداد فازی استفاده از تابع رتبه‌بندی $\mathcal{R}: \mathrm{F}(R) \to R$ است. این تابع به هر عدد فازی یک عدد حقیقی را نسبت می‌دهد. R را تابع یا شاخص مرتب‌کننده نامیم و می‌گوییم:

$$\tilde{A} \le \tilde{B} \iff \mathcal{R}(\tilde{A}) \le \mathcal{R}(\tilde{B}).$$

کومار و همکاران (Kumar et al., 2011) برای عدد فازی مثلثی $\tilde{A} = (a, b, c)$ شاخص رتبه‌بندی را به صورت $\mathcal{R}(\tilde{A}) = \frac{a+2b+c}{4}$ معرفی کردند. ناصری و همکاران با استفاده از این تابع رتبه‌بندی، روش زیر را برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی فازی پیشنهاد دادند (Nasseri et al., 2013).

مسئله برنامه‌ریزی ریاضی زیر با متغیرهای فازی را در نظر بگیرید:

$$\text{(P1):} \quad Max\ (or\ Min) \quad \sum_{j=1}^{n} C_j \tilde{x}_j$$

$$s.t. \quad \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \tilde{x}_j \le \tilde{b}_i, \quad \forall\, i = 1, \dots, m$$

$$\tilde{x}_j \ge \tilde{0}$$

اگر متغیر $\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{j}}$ و پارامتر $\tilde{\boldsymbol{b}}_{\boldsymbol{i}}$ را به ترتیب با اعداد فازی مثلثی $(x_j, y_j, z_j)$ و $(b_j, g_j, h_j)$ نمایش دهیم، با فرض اینکه $a_{ij}\tilde{x}_j = (m_{ij}, n_{ij}, o_{ij})$ و با استفاده از تابع رتبه‌بندی ذکر شده، مسئله برنامه‌ریزی فازی فوق تبدیل به مسئله برنامه‌ریزی خطی زیر می‌شود:

$$\text{(P2):} \quad Max\ (or\ Min) \quad \mathcal{R}\left(\sum_{j=1}^{n} C_j(x_j, y_j, z_j)\right)$$

$$s.t. \quad \sum_{j=1}^{n} m_{ij} \le b_j, \quad \forall\, i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^{n} n_{ij} \le g_j, \quad \forall\, i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^{n} o_{ij} \le h_j, \quad \forall\, i = 1, \dots, m$$

$$y_j - x_j \ge 0, \qquad z_j - y_j \ge 0.$$

بعد از حل مسئله برنامه‌ریزی خطی فوق مقادیر بهینه $x_j$، $y_j$ و $z_j$ به دست می‌آید. با جایگذاری مقدار $\tilde{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{j}} = (x_j, y_j, z_j)$ در تابع هدف مقدار بهینه فازی حاصل می‌شود.

محققان زیادی در زمینه‌ی رتبه‌بندی اعداد فازی تحقیق‌های وسیعی انجام داده‌اند و روش‌های متفاوتی را پیشنهاد داده‌اند. به عنوان مثال چنگ (Cheng, 1998) روشی به نام "فاصله مرکز ثقل" را برای رتبه‌بندی اعداد فازی نرمال و غیرنرمال پیشنهاد داد. پس از مدتی مشخص شد که روش او دارای نقص است و قادر به رتبه‌بندی همه اعداد فازی از جمله آن دسته از اعدادی که دارای مرکز ثقل یکسان هستند، نیست. روش مطرح شده توسط دهقان و همکاران (Dehghan, et al., 2006) برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی فازی در صورتی کاربرد دارد که عناصر ماتریس ضرایب اعداد فازی غیرمنفی باشند. روش لطفی و همکاران (Lotfi, et al., 2011) نیز تنها زمانی کاربرد دارد که عناصر ماتریس ضرایب اعداد فازی متقارن باشند.

مزیت استفاده از روش کومار و همکاران این است که هیچ محدودیتی در مورد انواع ضرایب متغیرها در تابع هدف و محدودیت‌ها از اعداد قطعی تا اعداد فازی از نوع متقارن، نامتقارن و همچنین مثبت یا منفی ندارد و نتایج به‌دست آمده از آن به طور واقعی همه محدودیت‌ها را برآورده می‌کند. لذا مهمترین مزیت آن در مقایسه با دیگر روش‌های مطرح شده، سادگی محاسباتی بوده و اینکه به آسانی در موقعیت‌های مختلف برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی فازی قابل کاربرد است.

## روش‌شناسی پژوهش (مدل‌سازی مسئله)

تخلیه افرادسالم از مناطق آسیب دیده به اردوگاه‌ها بدین صورت است که هر وسیله امدادی در صورت اعزام، از انباری که در آن مستقر است حرکت خود را آغاز و با توجه به ظرفیت وسیله، ظرفیت اردوگاه‌ها و پنجره‌های زمانی، بهترین مسیر را برای انتقال افراد سالم از مناطق آسیب-دیده به اردوگاه‌ها انتخاب می‌کند. برای هر وسیله این امکان وجود دارد که برای استفاده حداکثری از ظرفیت اردوگاه‌های نزدیکتر، پس از پیاده‌سازی تعدادی از افراد در این اردوگاه‌ها، برای تخلیه بقیه افراد به سمت اردوگاه‌های دیگر حرکت نماید. همچنین امکان ارائه خدمات به هر منطقه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله امدادی امکان پذیر است.

عمده مفروضات مساله عبارتند از:

- چندین نقطه حادثه دیده، چندین اردوگاه و انبار چندگانه، برای شروع حرکت وسایل امدادی در نظر گرفته شده است.
- تعداد و مکان انبارهای وسایل و نقاط حادثه‌دیده شناخته شده است.
- وسایل امدادی متفاوت و با ظرفیت محدود در نظر گرفته شده‌اند.
- هر وسیله‌ی امدادی در صورت اعزام، از انبار محل استقرارش حرکت را آغاز می‌کند.
- امکان حرکت وسایل امدادی بین اردوگاه‌ها در نظر گرفته شده است.
- زمان‌های حمل‌ونقل بین تمام نقاط شبکه، زمان خدمت‌رسانی در هر گره، پنجره‌ی زمانی برای زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه‌دیده و همچنین مقدار تقاضای نقاط حادثه‌دیده به صورت یک عدد فازی مثلثی نامتقارن در نظر گرفته شده است.
- امکان ارائه خدمت به هر منطقه آسیب‌دیده توسط چندین وسیله امدادی، در نظر گرفته شده است.
- هزینه احداث اردوگاه در نقاط کاندید مختلف تقریبا یکسان در نظر گرفته شده است.

### مجموعه‌ها

E مجموعه‌ی نقاط حادثه‌دیده

S مجموعه نقاط کاندید اردوگاه‌ها

V مجموعه‌ی وسایل

D مجموعه‌ی انبارهای وسایل

D (v) محل استقرار مجموعه‌ی وسایل

N مجموعه‌ی کل نقاط در فرآیند تخلیه افراد سالم (اجتماع سه مجموعه (v) D، E، S).

**اندیس‌ها**

i, j مجموعه‌ی اندیس گره‌ها

V مجموعه‌ی اندیس وسایل

**پارامترها**

تمام پارامترهایی که با علامت ~ نشان داده شده‌اند، پارامترهای فازی مثلثی هستند.

$\tilde{c}_{ij}$ زمان حمل‌ونقل از گره‌ی i∈N به گره j∈N

$\tilde{d}_i$ مقدار تقاضای نقطه حادثه‌دیده‌ی i∈N

$Cap_i$ ظرفیت اردوگاه‌ها i∈S برای تخلیه‌ی افراد سالم

$\tilde{b}_i$ حداکثر زمان رسیدن وسایل به گره‌ی $i \in E \cup S$ (پنجره زمانی در گره i)

$Capi_v$ ظرفیت وسیله‌ی v∈V

$\widetilde{Dt_i}$ زمان ارائه خدمت در گره‌ی $i \in E \cup S$

M مقدار خیلی بزرگ

$w^*$ حداکثر تعداد اردوگاه‌هایی که می‌تواند تاسیس شود.

$p'_{ij}$ احتمال آسیب به وسایل نقلیه حمل افراد غیرنظامی در مسیر گره $i$ به گره $j$

$p_i$ احتمال آسیب به وسایل نقلیه حمل افراد غیرنظامی در گره $i$

c هزینه آسیب به هر فرد غیرنظامی

$c'_v$ هزینه آسیب به هر وسیله نقلیه v∈V

**متغیرها**

$X_{vij}$ برابر یک است اگر وسیله‌ی v∈V از گره‌ی i∈N به گره‌ی j∈N حرکت کند، در غیر این صورت برابر صفر است.

$Y_{vi}$ برابر یک است اگر وسیله‌ی v∈V به گره‌ی $i \in E \cup S$ تخصیص داده شود، در غیر این صورت برابر صفر است.

$Z_v$ برابر یک است اگر وسیله‌ی v∈V اعزام شود، در غیر این صورت برابر صفر است.

$Q_{vi}$ تعداد افرادی که در نقطه حادثه دیده‌ی i∈E سوار وسیله‌ی v∈V می‌شوند.

$Q'_{vi}$ تعداد افرادی که از وسیله‌ی v∈V در اردوگاه i∈S پیاده می‌گردند.

$Q_{vij}$ تعداد افرادی که از گره $i \in E \cup S$ به گره $j \in E \cup S$ منتقل می‌شوند.

$\tilde{T}_{vi}$ زمان رسیدن وسیله‌ی $v \in V$ به گره‌ی $i \in N$

wi برابر یک است اگر اردوگاه در گره کاندید $i \in S$ تاسیس شود.

**تابع هدف و محدودیت‌ها**

$$Min \sum_{v\in V}\sum_{i\in E} p_i Q_{vi} c + \sum_{v\in V}\sum_{i\in S} p_i Q'_{vi} c + \sum_{v\in V}\sum_{i\in E\cup S}\sum_{j\in E\cup S} p_{ij} Q_{vij} c + \sum_{v\in V}\sum_{i\in D}\sum_{j\in E} p_{ij} c'_v x_{vij} + \sum_{v\in V}\sum_{i\in E}\sum_{j\in E\cup S} p_{ij} c'_v x_{vij} \quad (۱)$$

$$Min \sum_{v\in V}\sum_{i\in E\cup S} \tilde{T}_{vi} \quad (۲)$$

$$\sum_{j\in E}\sum_{i\in D(v)} X_{vij} = Z_v \qquad \forall v \in V \quad (۳)$$

$$\sum_{i\in D(v)\cup E} X_{vij} = \sum_{i\in E\cup S} X_{vji} \qquad \forall j \in E. v \in V \quad (۴)$$

$$\sum_{j\in E\cup D(v)} X_{vji} = Y_{vi} \qquad \forall i \in E. v \in V \quad (۵)$$

$$\sum_{v\in V} Q_{vi} = \tilde{d}_i \qquad \forall i \in E \quad (۶)$$

$$Capi_v Y_{vi} \geq Q_{vi} \qquad \forall i \in E. v \in V \quad (۷)$$

$$Y_{vi} \leq Q_{vi} \qquad \forall i \in E. v \in V \quad (۸)$$

$$\sum_{i\in E} Q_{vi} \leq Capi_v Z_v \qquad \forall v \in V \quad (۹)$$

$$\sum_{j\in E\cup S} X_{vji} = Y_{vi} \qquad \forall i \in S. v \in V \quad (۱۰)$$

$$\sum_{v\in V} Q'_{vi} \leq Cap_i \qquad \forall i \in S \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i\in E\cup S} X_{vij} \geq \sum_{i\in S} X_{vji} \qquad \forall j \in S, v \in V \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{i\in S} Q'_{vi} = \sum_{i\in E} Q_{vi} \qquad \forall v \in V \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{v\in V} Z_v \leq V \qquad (۱۴)$$

$$\tilde{T}_{vi} = \tilde{0} \qquad \forall i \in D(v), v \in V \qquad (۱۵)$$

$$\left(\tilde{T}_{vi} + \widetilde{Dt}_{\boldsymbol{i}} + \tilde{c}_{ij}\right) - M_{big}(1 - X_{vij}) \leq \tilde{T}_{vj} \quad \forall j \in E, v \in V, i \in D(v) \cup E \qquad (۱۶)$$

$$\left(\tilde{T}_{vi} + \widetilde{Dt}_{\boldsymbol{i}} + \tilde{c}_{ij}\right) - M_{big}(1 - X_{vij}) \leq \tilde{T}_{vj} \qquad \forall j \in S, v \in V, i \in E \cup S \qquad (۱۷)$$

$$\tilde{T}_{vi} \leq \tilde{b}_i \qquad \forall i \in E \cup S, v \in V \qquad (۱۸)$$

$$X_{vii} = 0 \qquad \forall i \in N, v \in V \qquad (۱۹)$$

$$\tilde{T}^a_{vi} + \widetilde{Dt}^a_i + \tilde{c}^a_{ij} - M_{big}\left(1 - X_{vij}\right) \leq \tilde{T}^a_{vj} \quad \forall j \in E, v \in V, i \in D(v) \cup E \qquad (۲۰)$$

$$\tilde{T}^a_{vi} + \widetilde{Dt}^a_i + \tilde{c}^a_{ij} - M_{big}\left(1 - X_{vij}\right) \leq \tilde{T}^a_{vj} \qquad \forall j \in S, v \in V, i \in E \cup S \qquad (۲۱)$$

$$\tilde{T}^a_{vi} \leq \tilde{T}^b_{vi} \qquad \forall v \in V, i \in E \cup S \qquad (۲۲)$$

$$\tilde{T}^b_{vi} \leq \tilde{T}^c_{vi} \qquad \forall v \in V, i \in E \cup S \qquad (۲۳)$$

$$Q_{vij} \leq M X_{vij} \qquad \forall v \in V, i \in E \cup S, j \in E \cup S \qquad (۲۴)$$

$$Q'_{vs} \leq M w_s \qquad \forall v \in V \qquad (۲۵)$$

$$\sum_{j'\in E, j'\neq j} Q_{vj'i} + Q_{vi} = Q_{vij} \qquad \forall i \in E, j \in E \cup S \qquad (۲۶)$$

$$\sum_{j'\in E, j'\neq j} Q_{vj'i} + Q'_{vi} = Q_{vij} \qquad \forall i \in S, j \in S \qquad (۲۷)$$

$$\sum_{i\in S} w_i \leq w^* \qquad (۲۸)$$

$$\sum_{i\in S}\sum_{j\in E} x(v,i,j) = 0 \qquad \forall v \in V \qquad (۲۹)$$

$$\sum_{i\in D}\sum_{j\in E} x(v,i,j) = 1 \qquad \forall v \in V \qquad (۳۰)$$

$$Y_{vi} \leq Q'_{vi} \qquad \forall i \in S. v \in V \qquad (۳۱)$$

$$\sum_{j\in S} Q_{vj} = 0 \qquad \forall v \in V \qquad (۳۲)$$

$$X_{vij} \in \{0.1\} \qquad \forall i \in N, j \in N, v \in V \qquad (۳۳)$$

$$Y_{vi} \in \{0.1\} \qquad \forall i \in E \cup S, v \in V \qquad (۳۴)$$

$$Z_v \in \{0.1\} \qquad \forall v \in V \qquad (۳۵)$$

$$Q_{vi} \geq 0 \qquad \forall i \in E \cup S, v \in V \qquad (۳۶)$$

$$\tilde{T}_{vi} \geq \tilde{0} \qquad \forall i \in N, v \in V \qquad (۳۷)$$

در محدودیت‌ها و تابع هدف مساله، تابع هدف (۱) کمینه‌سازی امیدریاضی هزینه آسیب وارد شده به افراد و وسایل نقلیه را نشان می‌دهد. این هزینه شامل هزینه آسیب واردشده به افراد هنگام سوار شدن به وسایل نقلیه در نقاط و پیاده‌شدن در اردوگاه‌ها، هزینه آسیب به افراد در مسیر حرکت بین نقاط تقاضا و از نقاط تقاضا به اردوگاه‌ها و هزینه آسیب به وسایل نقلیه در حرکت از انبار به نقاط تقاضا و سپس حرکت به سمت اردوگاه‌هاست. تابع هدف (۲) مجموع زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه‌دیده و اردوگاه‌ها را نشان می‌دهد. محدودیت (۳) بیان کننده‌ی این است که در صورت اعزام وسیله، آن وسیله از انباری که در آن مستقر شده به سمت یکی از نقاط حادثه دیده شروع به حرکت می‌کند. محدودیت (۴) محدودیت تعادل جریان در نقاط حادثه‌دیده را نشان می‌دهد. محدودیت (۵) بیان کننده‌ی این است که اگر وسیله‌ای به یک منطقه حادثه‌دیده اختصاص یابد قبل از آن منطقه، فقط انبار محل استقرار وسیله یا یک منطقه‌ی حادثه‌دیده‌ی دیگر وجود دارد. محدودیت (۶) تخلیه‌ی تمام افراد هر منطقه‌ی آسیب‌دیده از محل حادثه را نشان می‌دهد.

محدودیت‌های (۷) و (۸) بیانگر رابطه‌ی بین دو متغیر $Q_{vi}$ و $Y_{vi}$در هر منطقه‌ی آسیب‌دیده و هر اردوگاه است. در محدودیت (۷) زمانی که $Q_{vi}$ مقدار بزرگتر از صفر می‌گیرد سبب می‌شود که $Y_{vi}$ مقدار یک را اختیار کند و در محدودیت (۸) زمانی که $Q_{vi}$ مقدار صفر را اختیار می‌کند باعث می‌شود $Y_{vi}$ مقدار صفر را انتخاب کند. محدودیت (۹) بیان کننده‌ی حداکثر ظرفیت هر وسیله‌ی امدادی است. محدودیت (۱۰) بیانگر این است که اگر وسیله‌ای به یک اردوگاه اختصاص یابد قبل از آن اردوگاه فقط یک منطقه‌ی حادثه دیده یا یک اردوگاه دیگری قرار گرفته است.

محدودیت (۱۱) حداکثر ظرفیت هر اردوگاه برای اسکان افراد سالم را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۲) بیان‌کننده‌ی امکان حرکت وسایل امدادی بین اردوگاه‌ها است. محدودیت (۱۳) بیانگر این است که تعداد افرادی که از مناطق حادثه‌دیده‌ی مختلف به هر وسیله‌ی

امدادی اختصاص می‌یابند به اردوگاه‌ها منتقل می‌شوند. محدودیت (۱۴) حداکثر تعداد وسایل امدادی در دسترس را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۵) بیانگر این است که زمان شروع حرکت هر وسیله از انبار محل استقرارش، صفر در نظر گرفته می‌شود.

محدودیت‌های (۱۶) و (۱۷) به ترتیب زمان رسیدن هر وسیله‌ی امدادی به هر منطقه‌ی حادثه دیده و هر اردوگاه را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۸) بیان کننده‌ی پنجره‌ی زمانی برای زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه دیده و اردوگاه ها است. محدودیت (۱۹) از ایجاد حلقه در هر گره از شبکه جلوگیری می‌کند. محدودیت‌های (۲۰) و (۲۱) بیان می‌کنند که کمترین زمان رسیدن یک وسیله نقلیه به گره j بزرگتر مساوی مجموع کمترین زمان رسیدن به گره i، کمترین زمان خدمت‌دهی در گره i و کمترین فاصله زمانی بین گره i و j است. محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) بیان می‌کنند که در تعریف متغیر فازی $\tilde{T}_{vi} = (\tilde{T}_{vi}^{a}, \tilde{T}_{vi}^{b}, \tilde{T}_{vi}^{c})$ زمان خوش‌بینانه کمتر از زمان نرمال و زمان نرمال نیز کمتر از زمان بدبینانه است.

محدودیت (۲۴) بیان می‌کند که زمانی افرادی با یک وسیله در یک مسیر جابه‌جا می‌شوند که وسیله به آن مسیر تخصیص داده شده باشد. محدودیت (۲۵) بیان می‌کند که زمانی افرادی از یک وسیله در اردوگاه پیاده می‌شوند که آن اردوگاه تاسیس شده باشد. در محدودیت (۲۶) بیان شده است که تعداد افرادی که با یک وسیله در یک مسیر جابه‌جا می‌شوند برابر است با مجموع افرادی که از سایر گره‌ها به ابتدای مسیر می‌آیند و کسانی که در ابتدای مسیر به وسیله سوار می‌شوند. محدودیت (۲۷) رابطه تعداد افرادی که بین اردوگاه‌ها جابه‌جا می‌شوند را نشان می‌دهد. به صوری که تمام افرادی که از نقاط تقاضا به یک اردوگاه می‌آیند یا در آن اردوگاه پیاده می‌شوند و یا به اردوگاه بعدی می‌روند. رابطه (۲۸) حداکثر تعداد اردوگاه‌هایی که می‌تواند احداث شود را نشان می‌دهد. محدودیت (۲۹) بیانگر آن است که وسایل نقلیه از اردوگاه‌ها به نقاط تقاضا حرکت نمی‌کنند. در محددیت (۳۰) تعداد وسایل نقلیه از نوع $v$ نشان داده شده است. در محدودیت (۳۱) زمانی که $Q'_{vj}$ مقدار صفر را اختیار می‌کند باعث می‌شود $y'_{vj}$ مقدار صفر را انتخاب کند. محدودیت‌های (۳۲) تا (۳۷) نشان دهنده‌ی نوع متغیرها است.

**مثال عددی**

برای نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی، مدل بر روی یک شبکه تصادفی که شامل ۹ گره است، اجرا شده است. در این شبکه گره‌های ۱، ۲ و ۳ به عنوان اردوگاه‌ها، گره‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ به عنوان نقاط تقاضا و گره‌های ۸ و ۹ به عنوان انبارهای وسایل در نظر گرفته شده‌اند. حداکثر

پنج نوع وسیله برای عملیات انتقال افراد در دسترس است. حداکثر تعداد اردوگاه‌هایی که می‌توان تاسیس کرد، دو اردوگاه در نظر گرفته شده است. در جدول‌های (۱)، (۲)، (۳) و (۴) سایر اطلاعات مورد نیاز برای مثال معرفی شده، بیان شده است.

**جدول (۱) زمان‌های حمل‌ونقل بین تمام گره‌های شبکه (بر حسب دقیقه)**

| گره‌ها | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | - | (۳۲,۳۵,۳۷) | (۳۴,۳۷,۳۹) | (۶,۱۰,۱۳) | (۱۶,۲۰,۲۳) | (۱۷,۲۰,۲۴) | (۳۳,۲۵,۲۷) | (۲۷,۳۰,۳۱) | (۳۲,۳۵,۳۸) |
| ۲ | (۳۲,۳۵,۳۸) | _ | (۳۵,۳۸,۴۱) | (۳۸,۴۰,۴۳) | (۳۳,۳۵,۳۶) | (۱۸,۲۰,۲۲) | (۳۶,۴۰,۴۲) | (۲۸,۳۰,۳۲) | (۳۳,۳۵,۳ ۷) |
| ۳ | (۳۴,۳۷,۳۹) | (۳۵,۳۸,۴۱) | - | (۲۰,۲۵,۳۲) | (۲۸,۳۰,۳۳) | (۲۰,۲۳,۲۷) | (۳۰,۳۳,۴۰) | (۳۰,۳۵,۴۲) | (۲۸,۳۰,۳۵) |
| ۴ | (۷,۱۰,۱۲) | (۳۶,۴۰,۴۲) | ۲۰,۲۵,۳۲ | - | (۸,۱۰,۱۴) | (۲۲,۲۵,۲۷) | (۱۶,۲۰,۲۳) | (۱۸,۲۰,۲۲) | (۷,۱۰,۱۳) |
| ۵ | (۱۷,۲۰,۲۴) | (۳۳,۳۵,۳۶) | ۲۸,۳۰,۳۳ | (۸,۱۰,۱۴) | - | (۱۲,۱۵,۱۹) | (۲۳,۲۵,۲۷) | (۸,۱۰,۱۳) | (۱۷,۲۰,۲۴) |
| ۶ | (۱۶,۲۰,۲۳) | (۱۷,۲۰,۲۴) | ۲۰,۲۳,۲۷ | (۲۳,۲۵,۲۷) | (۱۲,۱۵,۱۹) | - | (۲۲,۲۵,۲۷) | (۷,۱۰,۱۲) | (۱۸,۲۰,۲۲) |
| ۷ | (۲۳,۲۵,۲۶) | (۳۸,۴۰,۴۳) | ۳۰,۳۳,۴۰ | (۱۶,۲۰,۲۳) | (۲۲,۲۵,۲۷) | (۲۳,۲۵,۲۷) | - | (۱۲,۱۵,۱۷) | (۲۳,۲۵,۲۸) |
| ۸ | (۲۸,۳۰,۳۲) | (۲۷,۳۰,۳۱) | ۳۰,۳۵,۴۲ | (۱۷,۲۰,۲۴) | (۷,۱۰,۱۲) | (۸,۱۰,۱۴) | (۱۲,۱۵,۱۹) | - | (۲۸,۳۰,۳۲) |
| ۹ | (۳۳,۳۵,۳۶) | (۳۲,۳۵,۳۸) | ۲۸,۳۰,۳۵ | (۱۷,۲۰,۲۲) | (۱۷,۲۰,۲۴) | (۱۶,۲۰,۲۳) | (۲۲,۲۵,۲۷) | (۲۸,۳۰,۳۲) | - |

**جدول (۲) اطلاعات مربوط به گره‌های شبکه**

| گره‌ها | مقدار تقاضا (نفر) | ظرفیت (نفر) | پنجره زمانی (دقیقه) | زمان ارائه خدمت (دقیقه) |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | _ | ۳۰ | (۱۲۰,۱۵۰,۱۶۰) | (۸,۱۰,۱۳) |
| ۲ | _ | ۳۵ | (۱۳۰,۱۵۰,۱۶۵) | (۷,۱۰,۱۴) |
| ۳ | - | ۲۵ | (۹۰,۱۰۰,۱۲۰) | (۹,۱۰,۱۲) |
| ۴ | (۲۲,۲۴,۲۸) | - | (۸۰,۱۰۰,۱۱۵) | (۶,۱۰,۱۱) |
| ۵ | (۱۴,۱۶,۲۰) | | (۹۰,۱۰۰,۱۱۰) | (۷,۱۰,۱۳) |
| ۶ | (۹,۱۰,۱۳) | - | (۸۵,۱۰۰,۱۲۰) | (۷,۱۰,۱۱) |
| ۷ | (۹,۱۰,۱۴) | - | (۸۶,۱۱۰,۱۳۰) | (۵,۷,۱۰) |

**جدول (۳) نحوه‌ی‌استقرار وسایل امدادی**

| وسیله | گره محل استقرار وسیله | ظرفیت وسیله |
|---|---|---|
| ۱ | ۸ | ۱۲ |
| ۲ | ۸ | ۲۰ |
| ۳ | ۹ | ۱۰ |
| ۴ | ۹ | ۱۵ |
| ۵ | ۹ | ۱۲ |

**جدول (۴) احتمال وجود امنیت در مسیر گره i به گره j**

| گره | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | - | ۰,۹ | ۰,۸۵ | ۰,۷۰ | ۰,۶۵ | ۰,۷۵ | ۰,۸۰ | | |
| ۲ | ۰,۹ | - | ۰,۹۵ | ۰,۸۰ | ۰,۹۳ | ۰,۸۰ | ۰,۷۵ | | |
| ۳ | ۰,۸۵ | ۰,۹۵ | - | ۰,۷۵ | ۰,۸۰ | ۰,۷۵ | ۰,۷۰ | | |
| ۴ | ۰,۷۰ | ۰,۸۰ | ۰,۷۵ | - | ۰,۸۵ | ۰,۷۰ | ۰,۹۵ | ۰,۸۰ | ۰,۸۵ |
| ۵ | ۰,۶۵ | ۰,۸۲ | ۰,۸۰ | ۰,۸۵ | - | ۰,۸۵ | ۰,۹۰ | ۰,۷۵ | ۰,۷۵ |
| ۶ | ۰,۷۵ | ۰,۸۵ | ۰,۷۵ | ۰,۹ | ۰,۸۵ | - | ۰,۸۵ | ۰,۷۰ | ۰,۷ |
| ۷ | ۰,۸۰ | ۰,۷۵ | ۰,۷۰ | ۰,۹۵ | ۰,۹ | ۰,۸۵ | - | ۰,۷۵ | ۰,۷ |
| ۸ | | | | ۰,۸ | ۰,۶ | ۰,۷ | ۰,۶۵ | - | |
| ۹ | | | | ۰,۶۵ | ۰,۶۵ | ۰,۶ | ۰,۷ | | - |

هزینه آسیب به وسایل نقلیه نوع ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب ۱۰ ، ۲۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ در نظر گرفته شده است. هزینه فرضی آسیب به هر فرد غیرنظامی نیز ۴۰ در نظر گرفته شده است.

برای حل مدل پیشنهادی، در گام نخست با در نظر گرفتن بازه مورد انتظار برای هر یک از پارامترهای فازی مساله با استفاده از تعریف.۱ شرایط بدبینانه برای مساله در نظر گرفته شده است. به طوری که زمان‌های حمل‌ونقل بین گره‌ها (در رابطه‌های (۱۶) و (۱۷))، مقدار تقاضای هر گره (در رابطه (۶)) و زمان خدمت‌دهی در هر گره (در رابطه‌های (۱۶) و (۱۷)) بیشترین مقدار بازه موردانتظار و پنجره زمانی برای رسیدن وسیله‌ها به هر گره (در رابطه (۱۸)) کمترین مقدار بازه موردانتظار را اختیار کند. بنابراین، زمان رسیدن هر وسیله به هر گره به صورت یک عدد قطعی به دست خواهد آمد و رابطه‌های (۲۰)، (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) در نظر گرفته نخواهند شد. با در نظر گرفتن شرایط بدبینانه، مقدار بهینه مجموع زمان‌های رسیدن وسایل نقلیه به اردوگاه‌ها (رابطه (۲)) محاسبه شده می‌شود. سپس این مقدار بهینه به عنوان کران بالا برای

مجموع زمان‌های رسیدن وسایل به اردوگاه‌ها در نظر گرفته شده است و مسیر حرکت وسایل بین گره‌ها در مساله دوم به طوری تعیین شده است که کمترین مقدار هزینه مورد انتظار آسیب به افراد غیرنظامی و وسایل نقلیه (رابطه (۱)) را داشته باشیم. در مساله دوم، زمان رسیدن هر وسیله به هر گره یک عدد فازی مثلثی است و تمامی محدودیت‌های ذکر شده در مساله لحاظ خواهند شد.

## یافته‌های پژوهش

مساله‌ی انتخابی با استفاده از نرم‌افزار گمز 24.1.2 و سالور CPLEX بر روی رایانه‌ای با پردازنده Intel(r) Core(TM) i7-7500U cpu@2.70GHz 2.90GHz اجرا شد. در گام اول، بهترین مقدار تابع هدف دوم (مجموع زمان رسیدن وسایل‌نقلیه به اردوگاه‌ها) در شرایطی که پارامترهای غیرقطعی مدل در مقدار بدبینانه بازه مورد انتظار خود قرار گرفته‌اند محاسبه شده است. سپس این زمان به عنوان کران بالای محدودیت زمان به مدل اضافه شده است و مقدار بهینه رابطه (۱) (امیدریاضی آسیب وارده شده به وسایل نقلیه و افراد) تعیین شده است. زمان حل مساله اول با نرم افزار گمز یک دقیقه و ۱۰ ثانیه بوده و مقدارکل تابع هدف، ۲۶۸ دقیقه به دست آمده است. نتایج حاصل از حل مسئله، در جدول (۵) نمایش داده شده است.

در جدول (۵) مسیر حرکت هر وسیله‌ی امدادی، تعداد افرادی که در هر منطقه حادثه‌دیده سوار وسیله و در اردوگاه مربوطه پیاده می‌شوند و زمان رسیدن وسیله‌ی امدادی به هر یک از مناطق آسیب‌دیده و اردوگاه‌ها نشان داده شده است. به عنوان نمونه وسیله امدادی ۲ از انبار ۸ حرکت خود را آغاز می‌کند، در منطقه حادثه دیده ۵، ۱۸ نفر و در منطقه حادثه‌دیده ۶، ۲ نفر را را سوار می‌کند. سپس به اردوگاه ۲ رفته و ۲۰ نفر را پیاده می‌کند.

**جدول (۵) نتایج حاصل از حل مساله اول (تابع هدف کمینه‌سازی زمان رسیدن وسایل نقلیه به اردوگاه‌ها)**

| وسیله | مسیر | تعداد افرادی که در هر گره سوار یا پیاده می‌شوند (نفر) | بدترین زمان رسیدن به هر گره (دقیقه) |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۱-۷-۸ | ۱۲-۱۲-۰ | ۵۱-۱۷-۰ |
| ۲ | ۲-۶-۵-۸ | ۲۰-۲-۱۸-۰ | ۷۲-۳۹,۵-۱۱-۰ |
| ۳ | ۱-۴-۹ | ۱۰-۱۰-۰ | ۳۲,۵-۱۱-۰ |
| ۴ | ۲-۶-۴-۹ | ۱۵-۱۰-۵-۰ | ۸۰-۴۷,۵-۱۱-۰ |
| ۵ | ۱-۴-۹ | ۱۱-۱۱-۰ | ۳۲,۵-۱۱-۰ |

در گام بعدی محدودیت مجموع متوسط زمان رسیدن هر وسیله نقلیه به اردوگاه‌ها با سقف ۲۶۸ دقیقه به مساله با تابع هدف کمینه‌سازی هزینه موردانتظار آسیب به وسایل نقلیه و افراد اضافه شده است. متوسط متغیر فازی زمان رسیدن وسایل به اردوگاه‌ها و همچنین مقدار تقاضا در محدودیت (۶) با استفاده از تابع رتبه‌بندی کومار و همکاران (Kumar et al., 2011) محاسبه شده است. با توجه به اینکه احتمال دارد میانگین تقاضا مقداری اعشاری باشد سقف میانگین در محدودیت (۶) جایگزین تقاضا شده است. هر یک از محدودیت‌های (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) با توجه به توضیح مساله P1 و P2 به سه محدودیت تبدیل شده‌اند. مسیرهای بهینه در جدول (۶) نشان داده شده‌اند.

**جدول (۶) نتایج حاصل از حل مساله دوم (تابع هدف کمینه‌سازی هزینه مورد انتظار با در نظر گرفتن محدودیت زمان)**

| وسیله | مسیر | تعداد افرادی که در هر گره سوار یا پیاده می‌شوند (نفر) | زمان رسیدن به هر گره (دقیقه) |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۸-۵-۲ | ۰-۹-۹ | (۰,۰,۰).(۷,۱۰,۱۲). (۴۷,۵۵,۶۱) |
| ۲ | ۸-۵-۷-۱ | ۰-۸-۱۱-۱۹ | (۰,۰,۰).(۷,۱۰,۱۲).(۳۷,۴۵,۵۲).(۶۵,۷۷,۸۸) |
| ۳ | ۹-۴-۱ | ۰-۱۰-۱۰ | (۰,۰,۰).(۷,۱۰,۱۲).(۲۰,۳۰,۳۵) |
| ۴ | ۹-۴-۲ | ۰-۱۵-۱۵ | (۰,۰,۰).(۷,۱۰,۱۲).(۴۹,۵۰,۶۵) |
| ۵ | ۹-۶-۲ | ۰-۱۱-۱۱ | (۰,۰,۰).(۱۶,۲۰,۲۳). (۴۰,۵۰,۵۸) |

زمان اجرای مدل دوم با نرم‌افزار گمز ۳,۳۸ ثانیه است و مقدار هزینه مورد انتظار ۹۲۱,۸۵ واحدپولی محاسبه شده است. مقدار بهینه هزینه مورد انتظار بدون در نظر گرفتن محدودیت زمانی ذکر شده، ۸۷۶,۷ واحدپولی محاسبه شده است. مجموع متوسط زمان رسیدن وسایل نقلیه به اردوگاه‌ها در این حالت ۲۶۳ دقیقه به دست آمده است.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یکی از راه‌حل‌های اساسی برای بهبود عملکرد و کاهش آسیب‌های احتمالی در شرایط بحرانی مانند جنگ، انتقال سریع و مطمئن افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به اردوگاه است. با انتقال افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به اردوگاه‌ها می‌توان سبب سرعت بخشیدن به سایر فعالیت‌های امدادی و کمک‌رسانی بهتر و سریع‌تر به سایر افراد مصدوم در حادثه نیز شد. در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط برای مسیریابی و زمان‌بندی همزمان حرکت وسایل امدادی برای انتقال افراد سالم از مناطق آسیب‌دیده به اردوگاه‌ها ارائه

شد. در این تحقیق، پارامترهایی مانند تقاضای نقاط آسیب‌دیده، زمان حمل‌ونقل بین نقاط و زمان خدمت‌دهی در هر نقطه به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شد. سپس با در نظر گرفتن امنیت هر یک از نقاط و امنیت مسیرها، مکان اردوگاه‌ها و مسیر حرکت وسایل نقلیه از نقاط آسیب‌دیده به اردوگاه‌ها به گونه‌ای تعیین شده است که آسیب موردانتظار به افراد و وسایل نقلیه کمینه باشد.

با استفاده از مدل ارائه‌شده می‌توان پیش از وقوع شرایط اضطراری پیش‌بینی‌های لازم را برای احداث اردوگاه‌های اسکان افراد در نظر گرفت تا بهره‌وری تصمیم‌های اتخاذ شده در فاز پاسخ به بحران افزایش یابد. همچنین از نتایج این تحقیق می‌توان برای توسعه مطالعه‌های بعدی و ایجاد بستری مناسب برای تحلیل نتایج نهایی برای مدیران استفاده نمود. رویکرد پیشنهادی این تحقیق می‌تواند در سایر تصمیم‌های حساس نظامی نیز راهگشا بوده و در تصمیم‌سازی برای مکان‌یابی مراکز حساس مانند مراکز کنترل و فرماندهی، بیمارستان‌های نظامی و شبکه‌های ارتباطی نتایج قابل قبولی ارائه نماید.

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، انتظار می‌رود تا مسائل در اندازه متوسط نیز در زمانی بسیار کم حل شوند. از انجا که مسائل مکان‌یابی و مسیریابی در دسته مسائل NP-Complete قرار دارند، جستجو برای یافتن الگوریتم‌های ابتکاری یا فرابتکاری که بتوانند مدل پیشنهادی را در زمانی اندک حل نمایند، برای تحقیق‌های آینده پیشنهاد می‌شود.

## منابع


- اخباری، محمد. و احمدی‌مقدم، محمدعلی. (۱۳۹۳). بررسی پدافند غیرعامل در مدیریت شهری، *فصلنامه ژئوپلیتیک*، ۱۰ (۲): ۳۶-۶۹.
- اسدی، مونا. شفیعا، محمد علی. و یعقوبی، سعید. (۱۳۹۶). ارائه یک مدل یکپارچه لجستیک امداد با در نظر گرفتن تسهیلات پشتیبان (مطالعه موردی زلزله در شهر تهران)، *نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید*، ۲۸ (۱): ۱۷۵-۱۹۰.
- بزرگی امیری ، علی. جبل عاملی، محمد سعید. و عمرانی، هاشم. (۱۳۹۴). یک مدل برنامه ریزی تصادفی دو هدفه برای طراحی زنجیره امداد با تقاضا، تامین و پارامترهای هزینه‌ای تصادفی، *نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید*، ۲۶ (۳): ۲۹۹-۳۱۰.
- پاپی، علی. پیشوایی، میرسامان. و جبارزاده، آرمین. (۱۳۹۷). برنامه‌ریزی بهینه استوار لجستیک امداد بحران با استفاده از یک مدل سناریومحور استوار دوهدفه و بکارگیری روش اپسیلون

محدودیت تکامل یافته، *فصلنامه علمی-ترویجی دانش پیشگیری و مدیریت بحران*، ۸ (۴): ۳۴۹-۳۶۴.

- حنفی، علی. و موسوی، میرنجف. (۱۳۹۲). مکان‌یابی مراکز حساس و مهم نظامی در مناطق مرزی ایران و ترکیه با توجه به شاخص‌های هیدروژئومورفوکلیمایی با رویکرد پدافند غیرعامل. *فصلنامه مدیریت نظامی*، ۱۳ (۵۱): ۴۵-۷۲.
- خدا کرمی، محمد صابر. و امیری، مقصود. (۱۳۹۵). مکان‌یابی تسهیلات اضطراری در شرایط عدم قطعیت با رویکرد چند هدفه ، *پنجمین کنفرانس بین المللی مدیریت، اقتصاد و علوم انسانی*، استانبول.
- خداوردی، مریم. و آقایی، عبدالله. (۱۳۹۵). توسعه‌ی مدل استوار چند بازه‌یی برای مواجهه با عدم قطعیت هیستوگرامی (مطالعه موردی: مکان‌یابی تسهیلات)، *نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت*، ۳۲ (۲): ۱۱۱-۱۱۷.
- دانایی‌نیا، احمد. و زاغیان، محمدعلی. (۱۳۹۸). مکان‌گزینی آسیب‌دیدگان ناشی از زلزله در بافت‌های تاریخی با تأکید بر مرحله‌ی اسکان موقت؛ (چرایی و ضرورت‌ها)، *فصلنامه علمی-ترویجی دانش پیشگیری و مدیریت بحران*، ۹ (۱): ۹-۲۱.
- روستایی، شهرام. فخری، سیروس. و فتحی، محمدحسین. (۱۳۹۲). تحلیل ژئومورفولوژیکی مکان‌گزینی مراکز نظامی (مطالعه موردی: دامنه‌های غربی کوهستان سهند)، *پژوهش‌های جغرافیای انسانی*، ۴۵ (۳): ۲۰۹-۲۲۸.
- سعیدی، علی. باقری، حسین. و شمس، میثم. (۱۳۹۲). مکان‌گزینی پادگان نظامی با رویکرد پردافند غیرعامل با استفاده از تلفیق GIS و MCDA (مطالعه موردی: شهرستان تربت جام)، *سیاست دفاعی*، ۲۲ (۸۴): ۱۹۳-۲۱۶.
- شهلائی، ناصر. مرادیان، محسن. لطفی، احمد. و هادی نژاد، فرهاد. (۱۳۹۵). طراحی مدل ریاضی برای پیش‌بینی مکان بهینه مراکز آمادی در شرایط جنگ‌های آینده، *فصلنامه علمی آینده‌پژوهی دفاعی*، ۱ (۱): ۴۵-۶۴.
- صبوحی، فاطمه. حیدری، مهدی. و بزرگی امیری، علی. (۱۳۹۶). ارائه مدل مسیریابی و زمان بندی جهت تخلیه اضطراری با در نظر گرفتن امکان تراکنش بین پناهگاه‌ها، *نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید*، ۲۸ (۱): ۵۵-۶۷.
- طیبی، جواد. کاظمی، محمدرضا. و هداوندی، اسماعیل. (۱۳۹۶). آینده‌پژوهی در سیستم‌های دفاعی با استفاده از رویکردی مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی به‌منظور مکان‌یابی تسهیلات درمانی و تقسیم بندی مناطق، *فصلنامه علمی آینده‌پژوهی دفاعی*، ۲ (۷): ۷-۳۰.
- کریمی کردآبادی، مرتضی. و خلیلی، یاسر. (۱۳۹۳). تحلیل ملاحظات ژئومورفولوژیکی در مکان‌یابی مراکز نظامی (مطالعه موردی: جنوب استان ایلام)، *آمایش سرزمین*، ۶ (۱): ۱۱۳-۱۲۸.

- مرادیان، محسن. (۱۳۸۷). آشنایی با تحقیق در عملیات، *علوم و فنون نظامی*، ۵ (۱۱): ۴۷-۶۷.
- منشادی، محمدعلی. (۱۳۹۰). ارائه الگوی مناسب پراکنش آمادگاه‌های نزاجا در جنگ ناهمتراز با رعایت اصول پدافند غیرعامل، *فصلنامه مدیریت نظامی*، ۱۱ (۴۳): ۱۶۴-۱۳۵.
- نصیری، محمدرضا. (۱۳۸۸). *ارائه مدل مکان‌یابی مراکز حساس و حیاتی با توجه به اصول پدافند غیر عامل*، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد رشته مهندسی صنایع، گرایش سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مهندسی صنایع.

- Barbarosoglu, G. & Arda, Y. (2004). A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response, *Journal of the Operational Research Society*, 55 (1): 43-53.
- Bruni, M. E., Beraldi, P. & Khodaparasti, S. (2018). A fast heuristic for routing in post-disaster humanitarian relief logistics. *Transportation Research Procedia*, 30: 304-313.
- Cheng, C.H. (1998). A new approach for ranking fuzzy numbers by distance method. *Fuzzy sets and systems*, 95 (3): 307-317.
- Dehghan, M., Hashemi, B. & Ghatee, M. (2006). Computational methods for solving fully fuzzy linear systems, *Applied mathematics and Computation*, 179 (1): 328-43.
- Gendreau, M., Laporte, G. & Semet, F. (1997). Solving an ambulance location model by tabu search, *Location Science*, 5 (2): 75-88.
- Kumar, A., Kuar, J. & Singh, P. (2011). A new method for solving fully fuzzy linear programming problems, *Applied Mathematical Modelling*, 35: 817-823.
- Loree, N. & Aros-vera, F. (2018). Points of distribution location and inventory management model for Post-Disaster Humanitarian Logistics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 116: 1-24.
- Lotfi, F.H., Allahviranloo, T., Jondabeh, M.A. & Alizadeh, L. (2009). Solving a full fuzzy linear programming using lexicography method and fuzzy approximate solution, *Applied Mathematical Modelling*, 33 (7): 3151-3156.
- Nasseri, S.H., Behmanesh, E., Taleshian, F., Abdolalipoor, M. & TaghiNezhad, N.A. (2013). Fully fuzzy linear programming with inequality constraints. *International Journal of Industrial Mathematics*, 5 (4): 309-316.
- Qiang, L., Xuejing, R. & Pilong, S. (2011). Selection of emergency shelter sites for seismic disasters in mountainous regions: Lesson from the 2008 Wenchuan Ms 8.0 Earthquake, China, *Journal of Asian Earth Sciences*, 40 (4): 926-934.
- Safaei, A. S., Farsad, S. & Paydar, M. M. (2018). Robust bi-level optimization of relief logistics operations. *Applied Mathematical Modelling*, 56: 359-380.
- Saffarian, M., Barzinpour, F. & Eghbali, M.A. (2015). A Robust Programming Approach to Bi-objective Optimization Model in the Disaster Relief Logistics

Response Phase, *International Journal of Supply Operations Management*, 2 (1): 595-616.

- Sakawa, M. (1993). *Fuzzy sets and interactive multiobjective optimization*, Plenum press, New York and london.
- Zanjirani Farahani, R. & Asgari, N. (2007). Combination of MCDM and Covering Techniques in a Hierarchical Model for Facility Location: A Case Study, *European Journal of Operational Research*, 176: 1839-1858.