

# مدل بهینه‌سازی امکانی استوار برای شبکه‌ی توزیع اقلام امدادی تحت عدم قطعیت

فاطمه صبوحی: دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.  
آرمین جبارزاده\*: استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، arminj@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۲۵

## چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائل در فاز پاسخ به بحران، تأمین تقاضای اقلام امدادی مورد نیاز مناطق آسیب‌دیده است که به علت نامشخص بودن میزان تقاضا، مشکلات بسیاری در این زمینه ایجاد می‌کند.

در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار برای مسئله‌ی مسیریابی و زمان‌بندی برای شبکه‌ی توزیع اقلام امدادی تحت عدم قطعیت تقاضا، ارائه می‌شود. در فرایند توزیع اقلام امدادی، امکان خدمت‌دهی به هر منطقه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله‌ی امدادی و محدودیت پنجره‌ی زمانی در نظر گرفته شده است. هدف مدل پیشنهادی، کمینه‌سازی کل زمان رسیدن وسایل امدادی به مناطق حادثه دیده بیان شده است.

برای نمایش کاربردپذیری مدل ارائه شده، منطقه‌ی چهار شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته و مدل بر روی آن اجرا گردیده است. سرانجام برای بررسی پایداری جواب‌های مدل بهینه‌سازی استوار، نتایج حاصل از حل این مدل با مدل قطعی شبیه‌سازی شده تحت نمونه مسائل مختلف مقایسه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار، اقلام امدادی، پنجره‌ی زمانی، مسیریابی، زمان‌بندی

۴۵

شماره پانزدهم

بهار و تابستان  
۱۳۹۸

دوفصلنامه  
علمی و پژوهشی



مدل بهینه‌سازی امکانی استوار برای شبکه‌ی توزیع اقلام امدادی تحت عدم قطعیت

## A robust possibilistic optimization model to relief commodities distribution network under uncertainty

Fatemeh Sabouhi<sup>1</sup>, Armin Jabbarzadeh<sup>2\*</sup>

### Abstract

One of the most important issues in disaster response phase is to supply the relief items which is needed by affected areas. The uncertainty of this demand causes many problems.

This paper presents a novel robust possibilistic programming model for a routing and scheduling problem in a relief commodities distribution network under demand uncertainty. In relief commodities distribution operations, the possibility of servicing each affected area by multiple vehicles and time window constraint have been considered. The objective of the proposed model is to reduce the total time required by the relief vehicles to reach the affected areas.

The fourth region of Tehran city as a case study is provided to illustrate the performance and applicability of the proposed model. Finally, to assess the robustness of the solutions obtained by the novel robust optimization model, they are compared to those generated by the deterministic mixed-integer linear programming model in a number of realizations under different test problems.

**Keywords:** Robust possibilistic programming model, Relief Commodities, Time window, Routing, scheduling

1-Phd student, Dept. of Industrial Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

2-Assistant Professor, School of Industrial Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran. Email: arminj@iust.ac.ir

## مقدمه

یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های تصمیم‌گیران حوزه‌ی مدیریت بحران، پاسخ سریع به نیازهای امدادی در مناطق آسیب‌دیده‌ی مختلف است، که برای این امر باید امداد رسانی از طریق مسیرهای کارا و در کوتاه‌ترین زمان ممکن انجام گیرد. یکی از راهکارهای مناسب در این زمینه، ارائه‌ی مدل ریاضی جامع و کاربردی و نزدیک به شرایط دنیای واقعی است که در صورت تغییر برخی پارامترها نیز بتواند عملکرد مناسبی داشته باشد.

تصمیمات مسیریابی و زمان‌بندی<sup>۱</sup> همزمان در عملیات توزیع اقلام امدادی<sup>۲</sup> در فاز پاسخ<sup>۳</sup> به بحران به منزله‌ی حوزه‌ی جدیدی در تحقیقات شناخته شده است و مطالعه‌ی پیشینه‌ی پژوهش نشان می‌دهد که کمتر به بررسی همزمان این تصمیمات با در نظر گرفتن عدم قطعیت<sup>۴</sup> پرداخته شده است. در ادامه مطالعات انجام شده در این زمینه بیان شده‌اند.

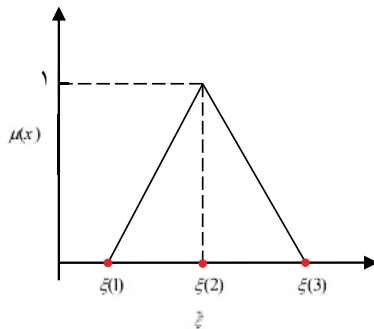
نولز و همکاران یک مدل چند هدفه‌ی مسیریابی برای توزیع اقلام امدادی به مناطق حادثه‌دیده معرفی کردند [۱]. آبدل‌گاواد و آبدلهای یک مدل مسیریابی و زمان‌بندی برای انتقال افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها ارائه دادند و مسئله را با در نظر گرفتن محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی<sup>۵</sup> و با امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله<sup>۶</sup> در نظر گرفته‌اند [۲]. بیش یک مدل مسیریابی برای انتقال افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها ارائه داد و در مسئله‌ی خود امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله را در نظر گرفت [۳]. حامدی و همکاران یک مدل مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امداد رسانی به پناهگاه‌ها ارائه دادند و مسئله را به شکل چند هدفه، با در نظر گرفتن محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی و با امکان خدمت‌دهی به هر پناهگاه توسط چندین وسیله در نظر گرفته‌اند [۴]. وهلگمیوس و همکاران یک مدل مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امداد رسانی به نقاط حادثه‌دیده با در نظر گرفتن محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی ارائه دادند [۵]. لی و همکاران یک مدل زمان‌بندی برای ارائه‌ی خدمات درمانی در بیمارستان‌ها با بیان مفهوم مراکز توزیع و تقسیم منابع به دو دسته‌ی تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر، ارائه دادند [۶]. لی و همکاران یک مدل زمان‌بندی برای توزیع اقلام پزشکی به بیمارستان‌ها با بیان مفهوم مراکز توزیع ارائه دادند و محدودیت ظرفیت را برای مراکز توزیع در نظر گرفتند [۷]. پیرامیودیتا و همکاران یک مدل مسیریابی و مکان‌یابی برای عملیات آواربرداری از نقاط حادثه‌دیده به انبارها ارائه دادند و مسئله را به شکل پویا معرفی کردند [۸]. از دومار و همکاران یک مدل مسیریابی و زمان‌بندی برای عملیات آواربرداری از نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند و مسئله را به شکل چند هدفه، چند دوره‌ای و پویا معرفی کردند [۹]. راس و گیوتجر از مراکز امداد رسانی و مکان‌یابی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امداد رسانی به نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند [۱۰]. یک مدل مسیریابی و مکان‌یابی برای توزیع اقلام از مراکز توزیع به مناطق حادثه‌دیده توسط وانگ و همکاران معرفی شد. آن‌ها مسئله

را با در نظر گرفتن امکان ارائه‌ی خدمت به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله ارائه دادند [۱۱]. مشرف جوادی و لی (۲۰۱۶)، یک مدل مسیریابی، مکان‌یابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام از مراکز توزیع به مناطق حادثه‌دیده ارائه دادند [۱۲]. تمام مقالات قبلی مدلشان را به صورت قطعی در نظر گرفته بودند اما در این حوزه تعداد مقالات کمی وجود دارد که عدم قطعیت را لحاظ کرده باشند که در ادامه آورده شده‌اند. وکس و همکاران یک مدل مسیریابی برای عملیات امداد و نجات در نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند و مسئله را به شکل غیرقطعی معرفی و برای مقابله با آن از رویکرد فازی استفاده کرده‌اند. همچنین ناواگان ناهمگن از وسایل امدادی در نظر گرفته‌اند [۱۳]. گان و همکاران یک مدل مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امداد رسانی به نقاط حادثه‌دیده با در نظر گرفتن تابع مطلوبیت و محدودیت پنجره‌ی زمانی، ارائه دادند و مسئله را به شکل غیر قطعی معرفی و برای مقابله با آن از رویکرد فازی استفاده کرده‌اند [۱۴]. کنهی و همکاران یک مدل تصادفی دو مرحله‌ای مسیریابی و مکان‌یابی برای توزیع اقلام امدادی از انبارها به نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند [۱۵]. رونمو و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل تصادفی سه مرحله‌ای مسیریابی و مکان‌یابی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امداد رسانی به نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند [۱۶].

با بررسی مطالعات گذشته، شکاف‌های موجود در ادبیات مربوط به مسائل مسیریابی و زمان‌بندی در فاز پاسخ به بحران را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- برای پاسخ سریع به نیازهای افراد در مناطق حادثه‌دیده‌ی مختلف، امداد رسانی باید از طریق مسیرهای کارا و در حداقل زمان ممکن انجام گیرد. تعداد کمی از مقالات به بررسی تصمیمات مسیریابی و زمان‌بندی به طور همزمان پرداخته‌اند.
- در زمان وقوع بحران، محدودیت تعداد و ظرفیت منابع امداد رسانی از جمله وسایل امدادی برای توزیع اقلام سبب تأخیر در امر امداد رسانی می‌شود. یکی از راهکارهای حل این مشکل، در نظر گرفتن امکان ارائه‌ی خدمت به هر منطقه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله است که اکثر مقالات این حوزه این ویژگی مهم را در نظر نگرفته‌اند.
- توزیع اقلام امدادی میان مناطق حادثه‌دیده‌ی مختلف با رعایت عدالت از اهمیت بالایی برخوردار است و از جمله دغدغه‌های مهم تصمیم‌گیران حوزه‌ی مدیریت بحران است. یکی از راهکارها برای رسیدن به این هدف، در نظر گرفتن محدودیت پنجره‌ی زمانی است که کمتر در مقالات به این ویژگی پرداخته‌اند.
- شدت وقوع بحران یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در شرایط تصمیم‌گیری توسط برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران این حوزه است. میزان تقاضای اقلام امدادی در مناطق حادثه‌دیده‌ی مختلف متفاوت است. این پارامتر بر روی تصمیم‌گیری برنامه‌ریزان حوزه‌ی مدیریت بحران برای سیستم توزیع کارایی اقلام امدادی تأثیرگذار است. بنابراین غیرقطعی فرض نمودن

شوند. رابطه‌ی ۲، مدل برنامه‌ریزی محدودیت شانس امکانی را نشان می‌دهد.



تصویر ۱: توزیع امکانی پارامترهای عدم قطعیت (ξ)

$$\text{Min } E[Z_1] = E[\tilde{C}]x + E[\tilde{F}]y,$$

s.t

$$By \leq Ay,$$

$$Sy \geq 1,$$

$$Ry \leq 1,$$

$$Kx = 0,$$

$$\text{Nec} \{Hx \leq \tilde{P}y\} \geq \alpha,$$

$$\text{Nec} \{Tx \geq d\} \geq \beta,$$

$$Uy = 0,$$

$$y \in \{0,1\}, x \geq 0.$$

رابطه‌ی ۲:

بر اساس [۱۹-۲۲]، مدل قطعی معادل رابطه‌ی ۲ در زیر نشان

داده شده است:

$$\text{Min } Z_1 = \left( \frac{C(1) + 2 * C(2) + C(3)}{4} \right) x$$

$$+ \left( \frac{F(1) + 2 * F(2) + F(3)}{4} \right) y,$$

s.t

$$By \leq Ay,$$

$$Sy \geq 1,$$

$$Ry \leq 1,$$

$$Kx = 0,$$

$$Hx \leq \left( (1-\alpha)P(2) + \alpha P(1) \right) y,$$

$$Tx \geq (1-\beta)d(3) + \beta d(4),$$

$$Uy = 0,$$

$$y \in \{0,1\}, x \geq 0.$$

رابطه‌ی ۳:

این پارامتر ضروری است. اما اکثر مقالات این حوزه مدلشان را به صورت قطعی فرض نموده‌اند.

هدف اصلی این مقاله، ارائه‌ی یک مدل بهینه‌سازی استوار برای شبکه‌ی توزیع اقلام امدادی است که شامل مسیریابی و زمان بندی وسایل امدادی برای توزیع کالاهای ضروری از قبیل پتو، آب، غذا و ... از مرکز توزیع اقلام امدادی به مناطق حادثه دیده‌ی مختلف است. در این مدل پیشنهادی، امکان خدمت دهی به هر منطقه‌ی آسیب دیده توسط چندین وسیله و محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی در نظر گرفته شده است. در این مقاله از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار<sup>۲</sup> برای مقابله با عدم قطعیت مربوط به تقاضای مناطق حادثه دیده‌ی مختلف برای کالاهای امدادی، استفاده شده است.

در ادامه، مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: ابتدا به بیان رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار پرداخته و سپس مسئله‌ی مورد بررسی تشریح می‌شود. در بخش بعدی، به مدل سازی ریاضی شبکه‌ی پیشنهادی می‌پردازیم و انتخاب منطقه‌ی چهار تهران شرح داده می‌شود و سپس نتایج حل گزارش می‌گردد و در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی مطرح می‌گردند.

## رویکرد بهینه‌سازی استوار

در این مقاله برای مقابله با عدم قطعیت از رویکرد ارائه شده توسط پیشوایی و همکاران [۱۷] که برنامه‌ریزی امکانی استوار نام دارد، استفاده شده است.

برای آشنایی بیشتر با رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار، ابتدا مدلی ساده همانند رابطه‌ی ۱ معرفی می‌شود.

$$\text{Min } Z = Cx + Fy,$$

s.t

$$By \leq Ay,$$

$$Sy \geq 1,$$

$$Ry \leq 1,$$

$$Kx = 0,$$

$$Hx \leq Py,$$

$$Tx \geq d,$$

$$Uy = 0,$$

$$y \in \{0,1\}, x \geq 0.$$

رابطه‌ی ۱:

حال فرض کنید بردارهای  $C, F, d$  و پارامترهای غیر قطعی مسئله باشند. همچنین بردارهای  $x, y$  به ترتیب بیانگر متغیرهای باینری و پیوسته است. برای تشکیل مدل برنامه‌ریزی محدودیت شانس امکانی، از عملگر مقدار مورد انتظار برای مدل کردن تابع هدف و معیار الزام برای برخورد با محدودیت‌های شانس که شامل پارامترهای غیر قطعی هستند، استفاده می‌شود [۱۷, ۱۸]. با توجه به تصویر ۱، پارامترهای غیر قطعی دارای توزیع‌های امکانی مثلثی هستند و محدودیت‌های شامل پارامترهای غیر قطعی، حداقل با درجه ارضای  $\alpha$  و  $\beta$  باید برقرار

برای حل رابطه‌ی ۳، حداقل درجه‌ی ارضای محدودیت‌ها  $(\alpha, \beta > 0.5)$  باید توسط تصمیم‌گیرنده تعیین گردد. با افزایش تعداد محدودیت‌های شانس، تعداد آزمایشات مورد نیاز برای تعیین مقدار مناسب سطوح اطمینان محدودیت‌ها افزایش می‌یابد [۱۷]. بنابراین برای حل مشکل مذکور، استفاده از روش برنامه‌ریزی امکانی استوار مناسب است. در نهایت، رابطه‌ی ۴، مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار را نشان می‌دهد.

$$\text{Min } E[Z_1] + \theta(Z_{\max} - E[Z_1]) + \delta \left( (1-\alpha)P_{(2)} + \alpha P_{(1)} - P_{(1)} \right) y + \theta \left( d_{(4)} - (1-\beta)d_{(3)} - \beta d_{(4)} \right)$$

s.t

$$By \leq Ay,$$

$$Sy \geq 1,$$

$$Ry \leq 1,$$

$$Kx = 0,$$

$$Hx \leq \left( (1-\alpha)P_{(2)} + \alpha P_{(1)} \right) y, \quad \text{رابطه‌ی ۴:}$$

$$Tx \geq (1-\beta)d_{(3)} + \beta d_{(4)},$$

$$Uy = 0,$$

$$y \in \{0,1\}, x \geq 0, \quad 0.5 < \alpha, \beta \leq 1.$$

در رابطه‌ی ۴،  $Z_{\max}$  به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Z_{\max} = C_{(4)}x + F_{(4)}y,$$

در رابطه‌ی ۴،  $\alpha$  و  $\beta$  متغیرهای تصمیم هستند. قسمت اول این رابطه، به حداقل سازی مقدار انتظاری تابع هدف می‌پردازد. قسمت دوم یعنی  $\theta(Z_{\max} - E[Z])$ ، به حداقل سازی اختلاف میان بدترین حالت تابع هدف و حالت انتظاری آن پرداخته می‌شود. وزن (اهمیت) این عبارت را در مقابل دیگر عبارات تابع هدف نشان می‌دهد. قسمت سوم، اختلاف بین بدبینانه‌ترین مقدار پارامتر غیر دقیق و مقدار استفاده شده در محدودیت است. که در آن واحد جریمه برای تخطی احتمالی از هر محدودیت شانس شامل پارامترهای غیر دقیق است.

### تشریح مسئله

بهینه‌سازی نحوه‌ی توزیع و تخصیص کالاها از امدادی بین مناطق حادثه‌دیده‌ی مختلف، یکی از اقدامات بسیار مهم در فاز پاسخ به بحران است. در این مقاله، انتقال اقلام امدادی از مرکز توزیع اقلام به مناطق حادثه‌دیده، مطابق با تصویر ۲ در نظر گرفته شده است. بدین صورت که هر وسیله‌ی امدادی مانند کامیون،

تریلی و ... در صورت اعزام، از مرکز توزیع اقلام حرکت خود را آغاز کرده و سپس با در نظر گرفتن ظرفیت وسیله و میزان احتیاجات نقاط حادثه‌دیده‌ی مختلف، بهترین مسیر را برای انتقال این کالاها به مناطق آسیب‌دیده انتخاب می‌کند و سپس بعد از اتمام عملیات، وسیله دوباره به مکان شروع حرکتش باز می‌گردد.

با توجه به شبکه‌ی معرفی شده، مکان مرکز توزیع اقلام امدادی و مناطق حادثه‌دیده شناخته شده است. تعداد و ظرفیت وسایلی که برای امداد رسانی در نظر گرفته شده‌اند، محدود هستند. در فرایند توزیع اقلام امدادی، برای این که عملیات به بهترین شکل ممکن انجام گیرد، امکان ارائه‌ی خدمت به هر منطقه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله‌ی امدادی در نظر گرفته شده است. همچنین عدم قطعیت، یکی از مهم‌ترین مسائل تصمیم‌گیران حوزه‌ی مدیریت بحران است. در شرایط دنیای واقعی به علت عدم قطعیتی که در پارامترهایی از قبیل تقاضا، عرضه، هزینه‌ها و ... وجود دارد، بررسی مسئله‌ی مسیریابی و زمان‌بندی وسایل امدادی تحت شرایط عدم قطعیت از اهمیت بالایی برخوردار است. در بسیاری از بحران‌ها، تعیین مقدار دقیق اقلام امدادی مورد نیاز مناطق حادثه‌دیده‌ی مختلف بسیار دشوار است. بنابراین در این مقاله تقاضای هر منطقه‌ی حادثه‌دیده به صورت غیر قطعی در نظر گرفته شده است. برای مقابله با این نوع عدم قطعیت، روش برنامه‌ریزی امکانی استوار به کار گرفته شده است.

برای برآورد سریع نیازهای اولیه‌ی مناطق حادثه‌دیده و برای برقراری عدالت در توزیع خدمات، حداقل کردن کل زمان رسیدن وسایل امدادی به این مناطق با رعایت محدودیت پنجره‌ی زمانی به‌منزله‌ی تابع هدف در نظر گرفته شده است.

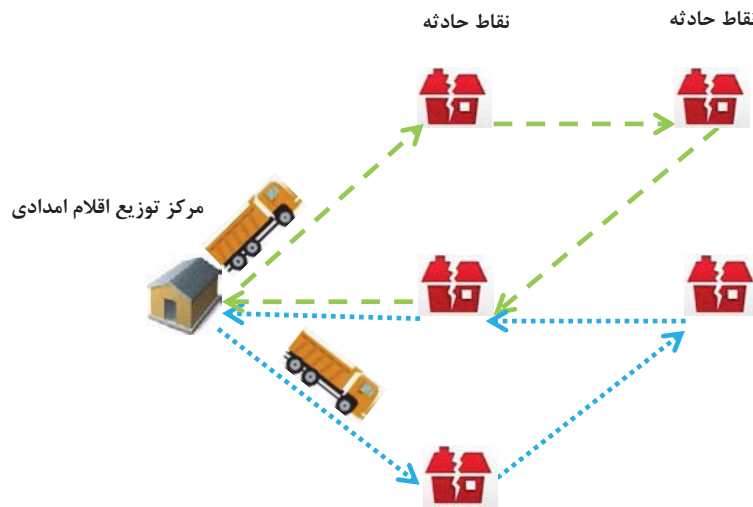
### مدل بهینه‌سازی استوار پیشنهادی

#### مجموعه‌ها و اندیس‌ها

$D$	مرکز توزیع اقلام امدادی
$E$	مجموعه‌ی نقاط حادثه‌دیده
$V$	مجموعه‌ی وسایل امدادی که مشخص می‌شود با $v \in V$
$N$	مجموعه‌ی کل نقاط در فرایند توزیع اقلام (اجتماع دو مجموعه‌ی $D$ و $E$ ) که مشخص می‌شود با $i, j \in N$

#### پارامترها و متغیرهای تصمیم

$c_{ij}$	زمان حمل و نقل از گره‌ی $i \in N$ به گره‌ی $j \in N$
$\tilde{d}_i$	تقاضای منطقه‌ی حادثه‌دیده‌ی $i \in E$ برای اقلام امدادی
$b_i$	حداکثر زمان رسیدن وسایل امدادی به گره‌ی $i \in E$
$Cap$	ظرفیت وسیله‌ی امدادی



تصویر ۲: عملیات توزیع اقلام امدادی

$\sum_{i \in E} \sum_{j \in D} X_{vij} = Z_v \quad v \in V$	رابطه‌ی ۷:	$Dt_i$	زمان ارائه‌ی خدمت در گره‌ی $i \in E$
$\sum_{i \in D \cup E, i \neq j} X_{vij} = \sum_{i \in E \cup D, i \neq j} X_{vji}$	رابطه‌ی ۸:	$Mbig$	مقدار خیلی بزرگ
$\forall j \in E, \forall v \in V$		$w$	جریمه‌ی نقض محدودیت
$\sum_{j \in E \cup D, i \neq j} X_{vji} = Y_{vi} \quad \forall i \in E, \forall v \in V$	رابطه‌ی ۹:		برابر یک است اگر وسیله‌ی $v \in V$ از گره‌ی $i \in N$ به
$Cap Y_{vi} \geq Q_{vi} \quad \forall i \in E, \forall v \in V$	رابطه‌ی ۱۰:	$X_{vij}$	گره‌ی $j \in N$ حرکت کند، در غیر این صورت برابر صفر است.
$\sum_{v \in V} Q_{vi} \geq \alpha d_{3i} + (1-\alpha)d_{2i} \quad \forall i \in E$	رابطه‌ی ۱۱:	$Y_{vi}$	برابر یک است اگر وسیله‌ی $v \in V$ به گره‌ی $i \in E$ تخصیص داده شود، در غیر این صورت برابر صفر است.
$\sum_{i \in E} Q_{vi} \leq Cap Z_v \quad v \in V$	رابطه‌ی ۱۲:	$Z_v$	برابر یک است اگر وسیله‌ی $v \in V$ اعزام شود، در غیر این صورت برابر صفر است.
$\sum_{v \in V} Z_v \leq V$	رابطه‌ی ۱۳:	$Q_{vi}$	تعداد اقلامی که توسط وسیله‌ی حمل و نقل $v \in V$ در نقطه‌ی حادثه‌دیده‌ی $i \in E$ تخلیه می‌شوند.
$T_{vi} = 0 \quad \forall i \in D, \forall v \in V$	رابطه‌ی ۱۴:	$T_{vi}$	زمان رسیدن وسیله‌ی $v \in V$ به گره‌ی $i \in N$
$(T_{vi} + Dt_i + c_{ij}) - Mbig(1 - X_{vij}) \leq T_{vj}$	رابطه‌ی ۱۵:	$\alpha$	درجه‌ی ارضای محدودیت
$\forall j \in E, \forall v \in V, \forall i \in D \cup E, i \neq j$			
$T_{vi} \leq b_i \quad \forall i \in E, \forall v \in V$	رابطه‌ی ۱۶:		
$X_{vij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall v \in V$	رابطه‌ی ۱۷:		
$Y_{vi} \in \{0,1\} \quad \forall i \in E, \forall v \in V$	رابطه‌ی ۱۸:		
$Z_v \in \{0,1\} \quad v \in V$	رابطه‌ی ۱۹:		

### تابع هدف و محدودیت‌ها

در این مقاله تقاضای هر منطقه‌ی آسیب‌دیده به صورت عددی فازی، با تابع عضویت مثلثی به شکل  $d_i = (d_{1i}, d_{2i}, d_{3i})$  تعریف شده و مدل بهینه‌سازی استوار در ادامه نشان داده شده است. رابطه‌ی ۵:

$$\text{Min} \sum_{v \in V} \sum_{i \in E} T_{vi} + w * (d_{3i} - (\alpha d_{3i} + (1-\alpha)d_{2i}))$$

$$\sum_{i \in D} \sum_{j \in E} X_{vij} = Z_v \quad v \in V \quad \text{رابطه‌ی ۶:}$$





تصویر ۳: نقشه‌ی منطقه‌ی چهار شهر تهران

است. منطقه‌ی چهار برحسب تقسیمات شهرداری تهران شامل ۹ ناحیه است که در تصویر ۳ نشان داده شده است.

بحران‌های مختلفی از قبیل سیل، زلزله و ... در ایران اتفاق می‌افتد و خسارت‌ها و آسیب‌های مختلفی را هر ساله به وجود می‌آورد. مخصوصاً تهران در معرض خطر زلزله است به دلیل این که چندین گسل اصلی از آن می‌گذرد. تعدادی از این گسل‌ها از منطقه‌ی ۴ تهران عبور می‌کند. زمانی که یک گسل فعال می‌شود، درصدی از جمعیت افراد آن منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به همین منظور برای اجرای مدل پیشنهادی روی کیس واقعی، در این مقاله، نواحی ۱، ۶ و ۷ منطقه‌ی چهار تهران مورد مطالعه قرار می‌گیرد و به‌منزله‌ی مناطق آسیب‌دیده در نظر گرفته می‌شوند. همچنین، پهنای گسل‌های منطقه‌ی ۴ تهران در تصویر ۴ نشان داده شده است.

با نظرسنجی از خبرگان مدیریت بحران منطقه‌ی چهار، در صورت وقوع بحران، جمعیت سالم و نیازمند کمک‌های امدادی، در جدول ۱ مشخص شده است.

در این مقاله سوله‌ی بحران حکمی به‌منزله‌ی مرکز توزیع اقلام معرفی گردیده است و حداکثر ۵ وسیله‌ی امدادی که ظرفیت هر کدام ۵۰۰ کالا است، در دسترس بوده و زمان ارائه‌ی خدمت ۲۰ دقیقه و پنجره‌ی زمانی ۴۰ دقیقه در نظر گرفته شده است.

### نتایج حل و اعتبار سنجی مدل

مسئله‌ی مطرح شده با استفاده از نرم‌افزار GAMS 23.0.2 و حل‌کننده‌ی CPLEX بر روی رایانه‌ای با مشخصات Intel Core i7 4702MQ 2.20GHz up to 3.20 GHz and 6GB RAM-DR3 under Win Seven اجرا شد.

در جدول ۲ مسیر حرکت هر وسیله‌ی امدادی، تعداد کالاهایی که در هر نقطه‌ی حادثه دیده تخلیه می‌شوند و زمان رسیدن هر وسیله‌ی امدادی به هر یک از مناطق حادثه که ملاقات می‌کند، نشان داده شده است.

$$Q_{vi} \geq 0 \quad \forall i \in E, \forall v \in V \quad \text{رابطه‌ی ۲۰}$$

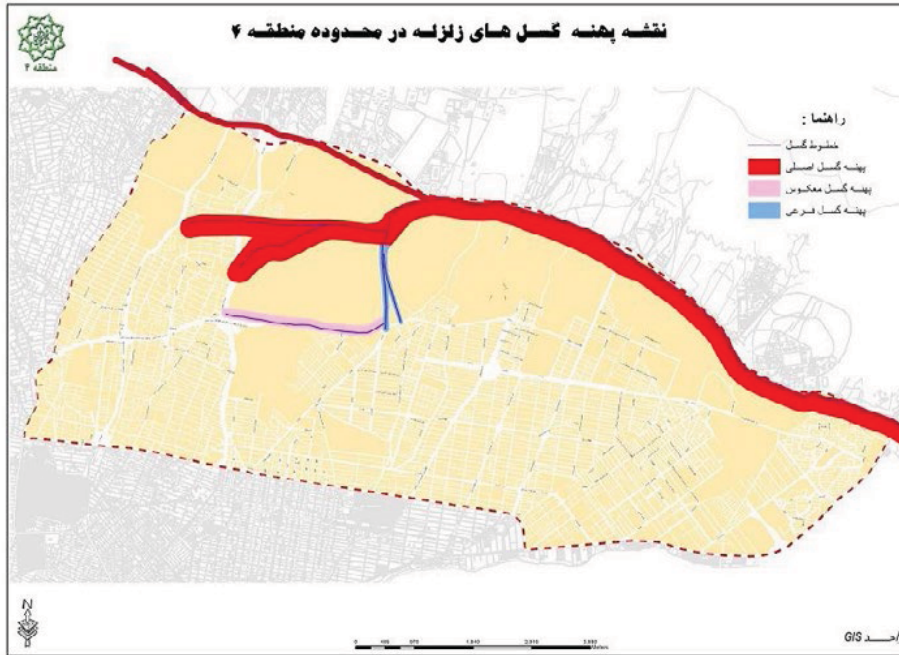
$$T_{vi} \geq 0 \quad \forall i \in N, \forall v \in V \quad \text{رابطه‌ی ۲۱}$$

$$0.5 < \alpha \leq 1. \quad \text{رابطه‌ی ۲۲}$$

تابع هدف ۵ کل زمان رسیدن وسایل امدادی به مناطق آسیب‌دیده را نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۶ بیان‌کننده‌ی این است که در صورت اعزام وسیله‌ی امدادی، آن وسیله از مرکز توزیع اقلامی که در آن مستقر شده به سمت یکی از مناطق حادثه‌دیده شروع به حرکت می‌کند. رابطه‌ی ۷ بیانگر این است که در صورت اعزام وسیله‌ی امدادی، آن وسیله بعد از عملیات توزیع اقلام، مجدداً به مرکز توزیع بر می‌گردد. رابطه‌ی ۸ محدودیت تعادل جریان برای مناطق آسیب‌دیده را نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۹ بیان‌کننده‌ی این است که اگر وسیله‌ای به یک منطقه‌ی حادثه‌دیده اختصاص یابد قبل از آن، فقط مرکز توزیعی که وسیله در آن مستقر شده است یا یک منطقه‌ی حادثه‌دیده‌ی دیگری وجود دارد. رابطه‌ی ۱۰ رابطه‌ی بین دو متغیر  $Q_{vi}$  و  $Y_{vi}$  را برای هر منطقه‌ی آسیب‌دیده نشان می‌دهند. رابطه‌ی ۱۱ میزان تقاضای هر منطقه‌ی حادثه‌دیده را برای اقلام امدادی نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۱۲ بیان‌کننده‌ی حداکثر ظرفیت هر وسیله‌ی امدادی است. رابطه‌ی ۱۳ حداکثر تعداد وسایل امدادی در دسترس را نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۱۴ بیانگر این است که زمان شروع حرکت هر وسیله‌ی امدادی از مرکز توزیع، صفر در نظر گرفته می‌شود. رابطه‌ی ۱۵ زمان رسیدن هر وسیله‌ی امدادی را به هر منطقه‌ی آسیب‌دیده نشان می‌دهد. رابطه‌ی ۱۶ بیان‌کننده‌ی رعایت محدودیت پنجره‌ی زمانی برای توزیع عادلانه‌ی اقلام امدادی میان مناطق حادثه‌دیده‌ی مختلف است. روابط ۱۷ تا ۲۲ نشان‌دهنده‌ی نوع متغیرها است.

### مطالعه‌ی موردی

شهر تهران، پایتخت ایران شامل ۲۲ منطقه است که منطقه‌ی چهار شهر تهران، یکی از پرجمعیت‌ترین و وسیع‌ترین مناطق تهران



تصویر ۴: نقشه‌ی پهنه گسل‌های منطقه‌ی چهار تهران

جدول ۱: مرکز و جمعیت نیازمند کمک‌های امدادی در نواحی منطقه‌ی چهار شهر تهران

ناحیه	مرکز تقاضا	جمعیت نیازمند کمک‌های امدادی ( $\bar{d}_i$ ) ( $d_{1i}, d_{2i}, d_{3i}$ )
۱	خیابان سیف	(۵۵۰ و ۵۷۵ و ۶۰۰)
۶	خیابان ۱۹۲ شرقی	(۶۰۰ و ۶۳۴ و ۶۵۰)
۷	خیابان هنگام	(۷۰۰ و ۷۳۰ و ۱۲۶۰)

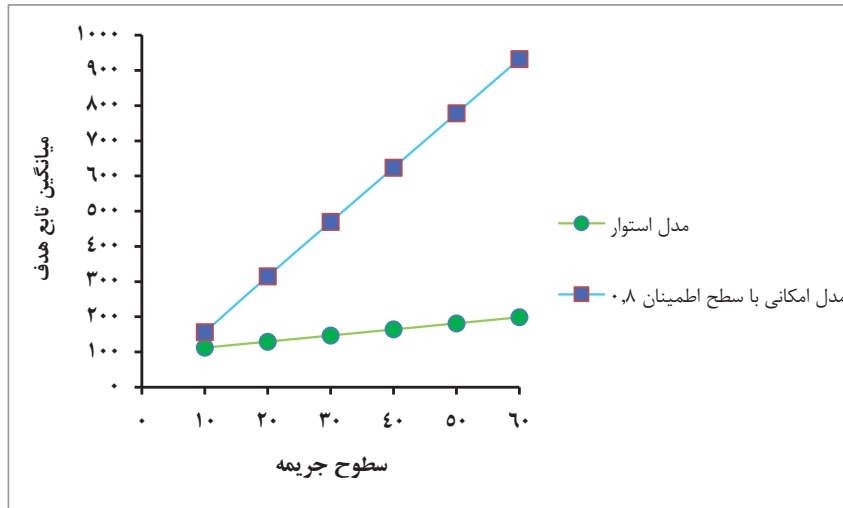
جدول ۵: نتایج حاصل از حل مدل

وسيله	مسیر حرکت هر وسیله	تعداد اقلامی که در هر مسیر تخلیه می‌شوند (کالا)	زمان رسیدن به هر گره (دقیقه)
۱	سوله‌ی بحران حکیمیه - خیابان ۱۹۲ شرقی - خیابان سیف - سوله‌ی بحران حکیمیه	۰-۴۰۰-۱۰۰-۰	۰-۳,۹-۳۲-۴۳,۷
۲	سوله‌ی بحران حکیمیه - خیابان سیف - سوله‌ی بحران حکیمیه	۰-۵۰۰-۰	۰-۱۱,۷-۲۳,۲۴
۳	سوله‌ی بحران حکیمیه - خیابان هنگام - سوله‌ی بحران حکیمیه	۰-۵۰۰-۰	۰-۷,۶-۱۵,۲
۴	سوله‌ی بحران حکیمیه - خیابان هنگام - سوله‌ی بحران حکیمیه	۰-۵۰۰-۰	۰-۷,۶-۱۵,۲
۵	سوله‌ی بحران حکیمیه - خیابان ۱۹۲ شرقی - خیابان هنگام - سوله‌ی بحران حکیمیه	۰-۲۵۰-۲۵۰-۰	۰-۳,۹-۲۷,۷-۳۵,۳

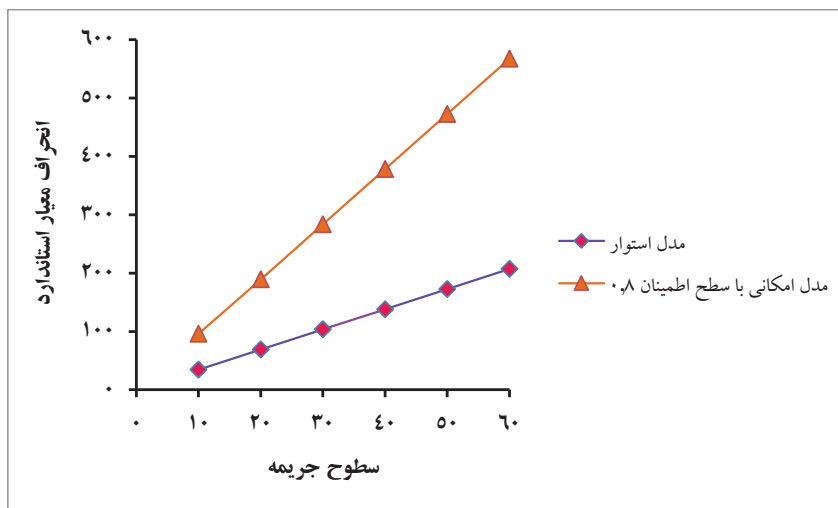
شده تحت هر شبیه‌سازی و مقدار بهینه‌های متغیرها که توسط مدل‌های برنامه‌ریزی امکانی و برنامه‌ریزی امکانی استوار تحت داده‌های اسمی مشخص گردیده‌اند، در مدل شبیه‌سازی قرار داده می‌شوند [۱۸].

در این مقاله، میانگین و انحراف معیار استاندارد مدل برنامه‌ریزی امکانی و مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار تحت ده

به منظور تحلیل عملکرد مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی امکانی استوار، ده شبیه‌سازی به طور تصادفی بر روی پارامتر غیر قطعی (تقاضای هر منطقه‌ی آسیب‌دیده)، تحت شش جریمه‌ی مختلف انجام شده است. برای ایجاد هر شبیه‌سازی، برای تقاضای هر منطقه‌ی حادثه‌دیده که دارای تابع امکانی مثلثی به صورت  $d_i = (d_{1i}, d_{2i}, d_{3i})$  است، یک عدد تصادفی بین بازه‌ی  $d_{real} = [d_{1i}, d_{3i}]$  انتخاب می‌شود. سپس پارامترهای تولید



تصویر ۵: میانگین تابع هدف به ازای جریمه‌های مختلف



تصویر ۶: انحراف معیار استاندارد تابع هدف به ازای جریمه‌های مختلف

### نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله‌ی مسیریابی و زمان‌بندی همزمان وسایل امدادی برای توزیع کالاهای مورد نیاز مناطق حادثه‌دیده در فاز پاسخ به بحران ارائه گردید. در این مقاله تقاضای مناطق آسیب‌دیده به صورت عدد فازی مثلثی در نظر گرفته شد و برای مقابله با شرایط عدم قطعیت، از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار استفاده گردید. از نوآوری‌های دیگر این مقاله نسبت به مطالعات پیشین، در نظر گرفتن امکان تأمین تقاضای هر منطقه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله‌ی امدادی، محدودیت تعداد، ظرفیت برای ناوگان وسایل و محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی است. در ادامه به منظور نمایش کاربردپذیری مدل پیشنهادی، مدل بر روی سه ناحیه از منطقه‌ی چهار شهر تهران اجرا گردید و نتایج حاصل از حل آن گزارش شد و عملکرد مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار نسبت به مدل برنامه‌ریزی امکانی در شبیه‌سازی‌های مختلف سنجیده گردید.

شبیه‌سازی محاسبه شده و در تصاویر ۵ و ۶ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

همان‌طور که در تصویر ۶ دیده می‌شود، انحراف معیار استاندارد مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار همواره از مدل برنامه‌ریزی امکانی تحت جریمه‌های مختلف بهتر است و با افزایش جریمه‌ها انحراف استاندارد زیاد شده است. ولی همواره برتری و چیرگی مدل استوار حفظ گردیده است.

علاوه بر انحراف استاندارد، همان‌طور که در تصویر ۵ ملاحظه می‌شود، میانگین تابع هدف مدل استوار در این مطالعه‌ی موردی هم همواره از مدل امکانی بهتر است. بنابراین در حالت کلی می‌توان گفت هر چه قدر ریسک‌گریزی تصمیم‌گیرنده بیشتر می‌شود (مقدار جریمه‌ها زیاد می‌گردد)، استفاده از مدل برنامه‌ریزی امکانی استوار معقول‌تر است به دلیل این که خروجی‌های این مدل با ریسک و تجاوزات کمتری نسبت به مدل برنامه‌ریزی امکانی، تحت جریمه‌های زیاد مواجه می‌شود.



the warehouse location-routing problem in disaster relief. *Computers & Operations Research*, 42, 25-39.

11. Wang, H., Du, L., & Ma, S. (2014). Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 69, 160-179.
12. Moshref-Javadi, M., & Lee, S. (2016). The Latency Location-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*.
13. Wex, F., Schryen, G., & Neumann, D. (2012). Operational emergency response under informational uncertainty: a fuzzy optimization model for scheduling and allocating rescue units.
14. Gan, X., Wang, Y., Yu, Y., & Niu, B. (2013). An emergency vehicle scheduling problem with time utility based on particle swarm optimization. *Intelligent Computing Theories and Technology* (pp. 614-623): Springer.
15. Caunhye, A. M., Zhang, Y., Li, M., & Nie, X. (2015). A location-routing model for prepositioning and distributing emergency supplies. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*.
16. Rennemo, S. J., Rø, K. F., Hvattum, L. M., & Tirado, G. (2014). A three-stage stochastic facility routing model for disaster response planning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 62, 116-135.
17. Pishvaei, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 206, 1-20.
18. Zahiri, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Pishvaei, M. S. (2014). A robust possibilistic programming approach to multi-period location-allocation of organ transplant centers under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 74, 139-148.
19. Inuiguchi, M., & Ramik, J. (2000). Possibilistic linear programming: a brief review of fuzzy mathematical programming and a comparison with stochastic programming in portfolio selection problem. *Fuzzy Sets and Systems*, 111(1), 3-28.
20. Liu, B., & Iwamura, K. (1998). Chance constrained programming with fuzzy parameters. *Fuzzy Sets and Systems*, 94(2), 227-237.
21. Dubois, D., & Prade, H. (1987). The mean value of a fuzzy number. *Fuzzy Sets and Systems*, 24(3), 279-300.
22. Heilpern, S. (1992). The expected value of a fuzzy number. *Fuzzy Sets and Systems*, 47(1), 81-86.

برای پیشنهادات آتی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱. حل مدل در ابعاد بزرگ با استفاده از روش‌های ابتکاری یا فراابتکاری. ۲. در نظر گرفتن اختلال در تسهیلات و مسیرهای حمل و نقل. ۳. در نظر گرفتن مسئله به شکل چند محصولی و چند دوره‌ای.

### پی‌نوشت

1. Routing and scheduling
2. Distribution of relief items
3. Response phase
4. Uncertainty
5. Time window
6. Split delivery
7. Robust possibilistic optimization

### منابع

1. Nolz, P. C., Semet, F., & Doerner, K. F. (2011). Risk approaches for delivering disaster relief supplies. *OR spectrum*, 33(3), 543-569.
2. Abdelgawad, H., & Abdulhai, B. (2011). Large-scale evacuation using subway and bus transit: approach and application in city of Toronto. *Journal of Transportation Engineering*, 138(10), 1215-1232.
3. Bish, D. R. (2011). Planning for a bus-based evacuation. *OR spectrum*, 33(3), 629-654.
4. Hamedi, M., Haghani, A., & Yang, S. (2012). Reliable transportation of humanitarian supplies in disaster response: model and heuristic. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 1205-1219.
5. Wohlgemuth, S., Oloruntoba, R., & Clausen, U. (2012). Dynamic vehicle routing with anticipation in disaster relief. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(4), 261-271.
6. Lee, K., Lei, L., Pinedo, M., & Wang, S. (2013). Operations scheduling with multiple resources and transportation considerations. *International Journal of Production Research*, 51(23-24), 7071-7090.
7. Lee, K., Lei, L., & Dong, H. (2013). A Solvable Case of Emergency Supply Chain Scheduling Problem with Multi-stage Lead Times. *Journal of Supply Chain and Operations Management*, 11(2), 30.
8. Pramudita, A., Taniguchi, E., & Qureshi, A. G. (2014). Location and Routing Problems of Debris Collection Operation after Disasters with Realistic Case Study. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 125, 445-458.
9. Özdamar, L., Aksu, D. T., & Ergüneş, B. (2014). Coordinating debris cleanup operations in post disaster road networks. *Socio-Economic Planning Sciences*, 48(4), 249-262.
10. Rath, S., & Gutjahr, W. J. (2014). A math-heuristic for