

## مدل سازی هم زمان مسئله مکان یابی، مسیریابی و زمان بندی برای تخلیه افراد با در نظر گرفتن پنجره زمانی و انبار چندگانه

فاطمه صبحی<sup>۱</sup>، علی بزرگی امیری<sup>۲\*</sup>، مهدی حیدری<sup>۳</sup>

۱. کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. استادیار دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

۳. دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۲۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۹۵/۱۰/۰۴، تاریخ تصویب: ۹۶/۰۲/۰۶)

### چکیده

پس از وقوع بلایای طبیعی و حوادث غیر مترقبه، یکی از مهم ترین عملیات امدادی، تخلیه افراد سالم از مناطق حادثه دیده به مکان های امن است. در این پژوهش، شبکه ای دوسطحی متشکل از انبارهای وسایل، مناطق حادثه دیده و پناهگاهها در نظر گرفته شده و با ارائه یک مدل جدید، به مکان یابی پناهگاهها و مسیریابی و زمان بندی حرکت وسایل امدادی پرداخته شده است. در فرایند تخلیه افراد سالم، امکان برآورد تقاضا در هر منطقه حادثه دیده با چندین وسیله، انبارهای چندگانه و محدودیت پنجره های زمانی در نظر گرفته می شود. برای حل مدل پیشنهادی و نشان دادن کارایی آن، یک مثال عددی با روش دقیق حل شد و تحلیل حساسیت های مختلف بر پارامترهای تأثیرگذار مسئله انجام گرفت. نتایج نشان می دهد تعداد مکان ها برای اسکان بازماندگان و ظرفیت وسایل امدادی، بر کل زمان رسیدن وسایل به مناطق آسیب دیده و پناهگاهها تأثیرگذار است.

**واژه های کلیدی:** زمان بندی، مدیریت فاجعه، مسیریابی، مکان یابی پناهگاهها.

### مقدمه

وقوع بلایای طبیعی مانند سیل، زلزله، طوفان و... و نیز حوادث ساخته دست بشر، سبب ایجاد خسارت های سنگین اقتصادی و اجتماعی، بی خانمان شدن هزاران نفر و همچنین مرگ افراد می شود. در ادبیات این حوزه، کمتر به بررسی مسائل مسیریابی، زمان بندی و مکان یابی در حوزه تخلیه افراد در فاز پاسخ به فاجعه<sup>۱</sup> پرداخته شده است. بررسی هم زمان این تصمیمها، حوزه جدیدی از پژوهش به شمار می رود. در ادامه، مطالعات انجام شده در این زمینه معرفی می شوند.

مسائل مسیریابی و زمان بندی در فاز پاسخ به فاجعه، در چهار حوزه عملیات جست و جو و نجات، آواربرداری اولیه، تخلیه افراد و توزیع اقلام امدادی مطرح می شوند. در این زمینه، انگیواویو و همکاران (۲۰۱۰) یک مدل مسیریابی و زمان بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه دیده ارائه دادند و مدل خود را با الگوریتم

فراابتکاری ممتیک حل کردند [۱]. ریبریو و لاپورته (۲۰۱۲) یک مدل مسیریابی و زمان بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه دیده معرفی کردند و از الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله خود بهره گرفتند [۲]. کی و فنگ (۲۰۱۳) یک مدل مسیریابی و زمان بندی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امداد رسانی به نقاط حادثه دیده ارائه دادند و الگوریتم فراابتکاری را برای حل مدل خود به کار بردند [۳]. ازسودان و سپیاهیگلو (۲۰۱۳) یک مدل مسیریابی و زمان بندی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امداد رسانی به نقاط حادثه دیده معرفی کردند و از الگوریتم های فراابتکاری تبوسرچ، ژنتیک و بهینه سازی ازدحام ذرات بهره گرفتند [۴]. ازدومار و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل چندهدفه و پویای مسیریابی و زمان بندی برای عملیات آواربرداری از نقاط حادثه دیده طراحی کردند و برای حل مدل خود الگوریتم ابتکاری را برگزیدند [۵]. یکی از ویژگی های مهم مسائل زمان بندی،

زمان‌بندی، در نظر گرفتن انبارهای چندگانه و تحویل جزئی است و در این زمینه، بیش (۲۰۱۱) با در نظر گرفتن انبار چندگانه، یک مدل مسیریابی و تخصیص برای تخلیه افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها ارائه داد که امکان برآورد تقاضای هر نقطه حادثه‌دیده با چندین وسیله، در آن در نظر گرفته شده بود. وی از الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله استفاده کرد [۱۲]. آبدلگاواد و آبدلهای (۲۰۱۱) با در نظر گرفتن پنجره زمانی، یک مدل چندانباره مسیریابی، زمان‌بندی و تخصیص برای عملیات تخلیه افراد از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها معرفی کردند که در آن امکان برآورد تقاضای هر نقطه حادثه‌دیده با چندین وسیله در نظر گرفته شد. آن‌ها برای تخلیه افراد، از ناوگان ناهمگن وسایل امدادی استفاده کردند [۱۳]. حامدی و همکاران (۲۰۱۲) با در نظر گرفتن پنجره زمانی، یک مدل چنددهفه و چندانباره مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبارهای اقلام امدادی به پناهگاه‌ها طراحی کردند که امکان برآورد تقاضای هر پناهگاه با چندین وسیله در نظر گرفته شد. آن‌ها در این پژوهش، برای حل مدل خود الگوریتم ژنتیک را برگزیدند [۱۴]. راس و گیوتچهر (۲۰۱۴)، یک مدل چنددهفه و چندانباره مسیریابی و مکان‌یابی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امدادسانی به نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند و الگوریتم‌های ابتکاری، فراابتکاری و دقیق را برای حل مدل خود انتخاب کردند [۱۵]. مقالاتی که مطرح شدند، همه حالت قطعی بودند و تعداد مقالات غیرقطعی در این حوزه ارائه شد. از جمله گان و همکاران (۲۰۱۳) با در نظر گرفتن تابع مطلوبیت، یک مدل فازی مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امدادسانی به نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند. همچنین پنجره زمانی را برای ارائه خدمات در نظر گرفتند و از الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات، برای حل مدل خود بهره بردند [۱۶]. وکس و همکاران (۲۰۱۲) یک مدل فازی مسیریابی برای عملیات جست‌وجو و نجات در نقاط حادثه‌دیده طراحی کردند و در آن، از ناوگان ناهمگن وسایل امدادی بهره گرفتند. همچنین برای حل مدل خود از چندین الگوریتم ابتکاری استفاده کردند [۱۷]. تالاریکو و همکاران (۲۰۱۵) با در نظر گرفتن انبارهای چندگانه، یک مدل غیرقطعی و چندمحصولی مسیریابی و زمان‌بندی برای

در نظر گرفتن پنجره زمانی برای برقراری عدالت در ارائه خدمات است. در این زمینه، وهلگمیوس و همکاران (۲۰۱۲) یک مدل مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند. آن‌ها در این پژوهش، برای ارائه خدمات، پنجره زمانی در نظر گرفتند و مدل خود را با روش دقیق حل کردند [۶]. لی و همکاران (۲۰۱۳)، با بیان مفهوم نقاط انتقال و تقسیم منابع به دو دسته تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، یک مدل زمان‌بندی برای انجام دادن عملیات درمانی در بیمارستان‌ها ارائه دادند که در آن، امکان خدمت‌دهی به هر بیمارستان، فقط به وسیله یک نقطه انتقال در نظر گرفته شد. همچنین آنان ظرفیت نقاط انتقال را نامحدود در نظر گرفتند، برای حل مدل خود الگوریتم ابتکاری را برگزیدند و برای ارائه خدمات، پنجره زمانی تعیین کردند [۷]. لی و همکاران (۲۰۱۳) با بیان مفهوم نقاط انتقال، یک مدل زمان‌بندی برای توزیع تجهیزات پزشکی به بیمارستان‌ها ارائه دادند که در آن، امکان خدمت‌دهی به هر بیمارستان فقط به وسیله یک نقطه انتقال در نظر گرفته شد. همچنین در آن، ظرفیت نقاط انتقال محدود بود و برای ارائه خدمات، پنجره زمانی در نظر گرفته شد [۸]. گان و همکاران (۲۰۱۴) با در نظر گرفتن تابع مطلوبیت، یک مدل مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امدادسانی به نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند. همچنین برای توزیع اقلام امدادی، پنجره زمانی در نظر گرفتند و از الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل مدل خود بهره بردند [۹]. یکی از ویژگی‌های مسائل مسیریابی، در نظر گرفتن ناوگان ناهمگن از وسایل امدادی است. در این زمینه، پرامیودیتسا و همکاران (۲۰۱۴) با در نظر گرفتن ناوگان ناهمگن وسایل، یک مدل پویای مسیریابی، مکان‌یابی و تخصیص برای عملیات آواربرداری از نقاط حادثه‌دیده به دپوهای جمع‌آوری آوار طراحی کردند و برای حل مدل خود، الگوریتم فراابتکاری تبوسرچ را به کار گرفتند [۱۰]. وکس و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل مسیریابی برای عملیات جست‌وجو و نجات در نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند که در آن، از وسایل ناهمگن استفاده شده بود. آن‌ها برای حل مدل خود از چندین الگوریتم ابتکاری و فراابتکاری بهره بردند [۱۱]. از دیگر ویژگی‌های مسائل مسیریابی و



همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، هر وسیله امدادی مانند اتوبوس، مینی‌بوس و... از انباری که در آن مستقر است، حرکت خود را آغاز می‌کند. سپس با توجه به ظرفیت وسیله، ظرفیت پناهگاه‌ها و پنجره‌های زمانی مربوط به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها، بهترین مسیر برای خروج افراد از مناطق آسیب‌دیده به یکی از پناهگاه‌ها انتخاب می‌شود.

در شبکه معرفی شده، چندین نقطه حادثه‌دیده، چندین پناهگاه و انبارهای چندگانه برای شروع حرکت وسایل در نظر گرفته می‌شوند و تعداد و مکان‌های پیشنهادی برای بازگشایی پناهگاه‌ها، تعداد و مکان انبارهای وسایل و نقاط حادثه‌دیده شناخته شده است. وسایلی که برای امداد رسانی در نظر گرفته شده‌اند، ناهمگن و با ظرفیت محدود هستند، اما مشخص شده است که هر وسیله در کدام انبار مستقر است. در صورت اعزام وسیله، پایان حرکت آن نامشخص و فقط به یکی از پناهگاه‌هاست.

در فرایند تخلیه افراد سالم، برای اینکه عملیات به بهترین شکل انجام گیرد، امکان ارائه خدمت به هر نقطه حادثه‌دیده با استفاده از چندین وسیله امدادی وجود دارد.

زمان‌های حمل‌ونقل بین تمام نقاط شبکه، سیمتریک است و از رابطه نامساوی مثلثی پیروی می‌کند. به‌منظور برقراری عدالت در ارائه خدمات به بازماندگان، پنجره‌های زمانی، برای زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها در نظر گرفته شده‌اند.

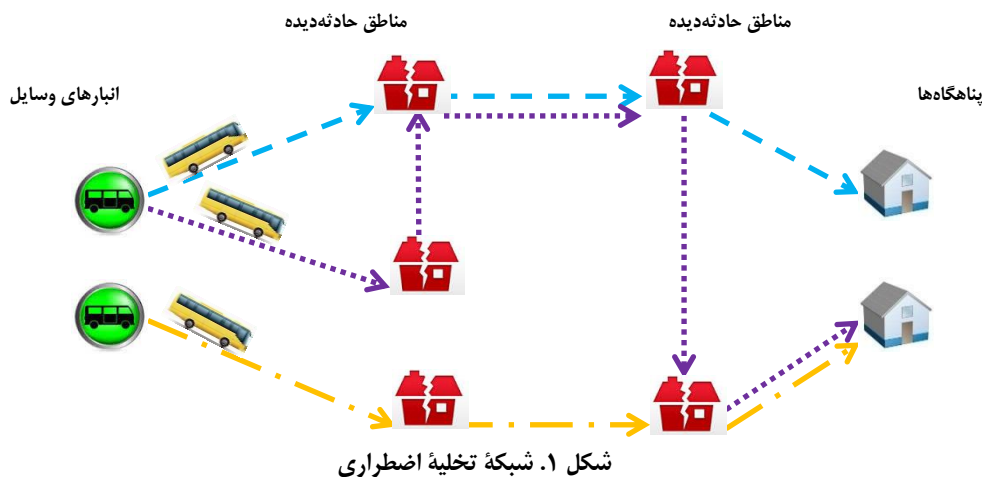
با ارائه یک مدل ریاضی جدید، به مکان‌یابی پناهگاه‌ها و تعیین هم‌زمان مسیر و زمان حرکت وسایل امدادی پرداخته می‌شود که هدف آن، کاهش کل زمان رسیدن وسایل امدادی به مناطق حادثه‌دیده و پناهگاه‌هاست.

نوآوری‌های این مقاله عبارت‌اند از:

- ارائه یک مدل ریاضی جدید برای انتخاب مکان پناهگاه‌ها از میان مجموعه‌ای از مکان‌های بالقوه و مسیریابی و زمان‌بندی حرکت وسایل امدادی برای عملیات تخلیه افراد سالم از مناطق آسیب‌دیده به پناهگاه‌ها؛
- امکان ارائه خدمت به هر منطقه حادثه‌دیده با چندین وسیله امدادی<sup>۲</sup>؛
- در نظر گرفتن انبارهای چندگانه<sup>۳</sup> برای شروع حرکت وسایل امدادی؛
- در نظر گرفتن وسایل ناهمگن<sup>۴</sup> با ظرفیت محدود و محدودیت ظرفیت برای پناهگاه‌ها؛
- در نظر گرفتن محدودیت پنجره‌های زمانی<sup>۵</sup> برای زمان رسیدن وسایل به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها به‌منظور برقراری عدالت در ارائه خدمات. در ادامه مقاله، ابتدا شبکه در نظر گرفته شده تشریح و سپس مدل‌سازی ریاضی مسئله توضیح داده می‌شود. بعد از آن، نتایج حل و تحلیل حساسیت مدل روی یک مثال عددی گزارش می‌شود و در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی مطرح می‌شوند.

### تشریح مسئله

وجود خطرهای احتمالی پس از وقوع فاجعه، مانند پس‌لرزه‌ها و انفجار لوله‌های گاز شهری و... ایجاب می‌کند که تخلیه افراد در سریع‌ترین زمان ممکن انجام گیرد. تخلیه این افراد از مناطق آسیب‌دیده به پناهگاه‌ها، از مهم‌ترین اقدامات حیاتی در فاز پاسخگویی به فاجعه است.



## مدل‌سازی ریاضی

در این بخش، مسئله قسمت قبل را به صورت ریاضی مدل‌سازی می‌کنیم. مدل‌سازی ریاضی مسئله، براساس مرجع [۱۳] انجام شده است.

### مجموعه‌ها

$E$	مجموعه نقاط حادثه‌دیده؛
$S$	مجموعه پناهگاه‌ها؛
$V$	مجموعه وسایل؛
$D$	مجموعه انبارهای وسایل؛
$D(v)$	محل استقرار مجموعه وسایل؛
$N$	مجموعه کل نقاط (اجتماع سه مجموعه $(E, D(v), S)$ ).

### اندیس‌ها

$i, j$	مجموعه اندیس گره‌ها؛
$v$	مجموعه اندیس وسایل.

### پارامترها

$c_{ij}$	زمان حمل‌ونقل از گره $i \in N$ به گره $j \in N$ ؛
$d_i$	مقدار تقاضای نقطه حادثه‌دیده $i \in N$ ؛
$Cap_i$	ظرفیت پناهگاه $i \in S$ ؛
$b_i$	حداکثر زمان رسیدن به گره $i \in E \cup S$ ؛
$Cap_v$	ظرفیت وسیله $v \in V$ ؛
$Dt_i$	زمان ارائه خدمت در گره $i \in E \cup S$ ؛
$Mbig$	مقدار خیلی بزرگ؛
$r$	حداکثر تعداد پناهگاه‌هایی که باید انتخاب شوند.

### متغیرها

$X_{vij}$	برابر یک است اگر وسیله $v \in V$ از گره $i \in N$ به گره $j \in N$ حرکت کند. در غیر این صورت برابر صفر است.
$Y_{vi}$	برابر یک است اگر وسیله $v \in V$ به گره $i \in E \cup S$ تخصیص داده شود. در غیر این صورت برابر صفر است.
$Z_v$	برابر یک است اگر وسیله $v \in V$ اعزام شود. در غیر این صورت برابر صفر است.
$Q_{vi}$	تعداد افرادی که در نقطه حادثه‌دیده $i \in E$ سوار وسیله $v \in V$ می‌شوند یا تعداد افرادی که از وسیله $v \in V$ در پناهگاه $i \in S$ پیاده می‌شوند.
$F_i$	برابر یک است اگر گره $i \in S$ به‌عنوان پناهگاه انتخاب شود. در غیر این صورت صفر است.
$T_{vi}$	زمان رسیدن وسیله $v \in V$ به گره $i \in N$ ؛

### تابع هدف و محدودیت‌ها

تابع هدف

$$\text{Min} \sum_{v \in V} \sum_{i \in E \cup S} T_{vi} \tag{1}$$

محدودیت‌های مربوط به مسیریابی وسایل امدادی و تعادل جریان در گره‌های شبکه

$$\sum_{j \in E} \sum_{i \in D(v)} X_{vij} = Z_v \quad \forall v \in V \tag{2}$$

$$\sum_{i \in D(v) \cup E} X_{vij} = \sum_{i \in E \cup S} X_{vji} \quad \forall j \in E, \forall v \in V \tag{3}$$

$$\sum_{v \in V} Q_{vi} = d_i \quad \forall i \in E \tag{4}$$

$$Cap_v Y_{vi} \geq Q_{vi} \quad \forall i \in E \cup S, \forall v \in V \tag{5}$$

$$Y_{vi} \leq Q_{vi} \quad \forall i \in E \cup S, \forall v \in V \tag{6}$$

$$\sum_{j \in E \cup D(v)} X_{vji} = Y_{vi} \quad \forall i \in E, \forall v \in V \tag{7}$$

$$\sum_{j \in E} X_{vji} = Y_{vi} \quad \forall i \in S, \forall v \in V \tag{8}$$

$$X_{vii} = 0 \quad \forall i \in N, \forall v \in V \tag{9}$$

محدودیت‌های مربوط به مکان‌یابی پناهگاه‌ها

$$\sum_{v \in V} Q_{vi} \leq Cap_i F_i \quad \forall i \in S \tag{10}$$

$$\sum_{i \in S} F_i \leq r \tag{11}$$

محدودیت‌های مربوط به تعداد و ظرفیت وسایل امدادی و ظرفیت پناهگاه‌ها

$$\sum_{i \in E} Q_{vi} \leq Cap_v Z_v \quad \forall v \in V \tag{12}$$

$$\sum_{i \in S} Q_{vi} = \sum_{i \in E} Q_{vi} \quad \forall v \in V \tag{13}$$

$$\sum_{v \in V} Z_v \leq |V| \tag{14}$$

محدودیت‌های مربوط به زمان‌بندی حرکت وسایل امدادی و رعایت پنجره‌های زمانی

$$T_{vi} = 0 \quad \forall i \in D(v), \forall v \in V \tag{15}$$

$$(T_{vi} + Dt_i + c_{ij}) - M_{big} (1 - X_{vij}) \leq T_{vj} \quad \forall j \in E, \forall v \in V, \forall i \in E \cup D(v) \tag{16}$$

$$(T_{vi} + Dt_i + c_{ij}) - M_{big} (1 - X_{vij}) \leq T_{vj} \quad \forall j \in S, \forall v \in V, \forall i \in E \tag{17}$$

$$T_{vi} \leq b_i \quad \forall v \in V, \forall i \in E \cup S \quad (18)$$

محدودیت‌های مربوط به مشخص کردن نوع متغیرها

$$X_{vij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall v \in V \quad (19)$$

$$Y_{vi} \in \{0,1\} \quad \forall i \in E \cup S, \forall v \in V \quad (20)$$

$$Z_v \in \{0,1\} \quad \forall v \in V \quad (21)$$

$$Q_{vi} \geq 0 \quad \forall i \in E \cup S, \forall v \in V \quad (22)$$

$$T_{vi} \geq 0 \quad \forall i \in N, \forall v \in V \quad (23)$$

حداکثر  $r$  پناهگاه انتخاب شود. محدودیت ۱۲ بیان‌کننده حداکثر ظرفیت هر وسیله است. محدودیت ۱۳ بیانگر این است که تعداد افرادی که از مناطق حادثه‌دیده مختلف به هر وسیله اختصاص می‌یابند، تنها به یک پناهگاه منتقل می‌شوند. محدودیت ۱۴ نشانگر حداکثر تعداد وسایل در دسترس است. محدودیت ۱۵ بیانگر آن است که زمان شروع حرکت هر وسیله از انبار محل استقرارش، صفر در نظر گرفته می‌شود. محدودیت‌های ۱۶ و ۱۷ زمان رسیدن هر وسیله به هر منطقه حادثه‌دیده و هر پناهگاه را به ترتیب نشان می‌دهند. محدودیت ۱۸ بیانگر پنجره زمانی رسیدن وسایل به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌هاست. محدودیت‌های ۱۹ تا ۲۳ نوع متغیرها را نشان می‌دهند.

### شرح مثال عددی

شبکه در نظر گرفته شده شامل یازده گره است که گره‌های ۱ تا ۵ به عنوان مکان‌های پیشنهادی برای انتخاب پناهگاه‌ها، گره‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ به عنوان مناطق حادثه‌دیده و گره‌های ۱۰ و ۱۱ به عنوان انبارهای وسایل معرفی شده‌اند. برای تخلیه افراد سالم، حداکثر شش وسیله در دسترس است که ظرفیت هر یک ۲۰ نفر است. در جداول ۲، ۳ و ۴ اطلاعات مورد نیاز برای مثال معرفی شده، بیان شده است.

تابع هدف ۱ بیانگر کل زمان رسیدن وسایل به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌هاست. محدودیت ۲ بیانگر آن است که در صورت اعزام وسیله، آن وسیله از انباری که در آن مستقر شده است، به سمت یکی از نقاط حادثه‌دیده شروع به حرکت می‌کند. محدودیت ۳ نشان‌دهنده محدودیت حفاظت جریان در نقاط حادثه‌دیده است. محدودیت ۴ بیانگر تخلیه تمام افراد هر منطقه آسیب‌دیده از محل حادثه است. محدودیت‌های ۵ و ۶ نشانگر رابطه بین دو متغیر  $Y_{vi}$  و  $Q_{vi}$  در هر منطقه آسیب‌دیده و هر پناهگاه هستند. در محدودیت ۵، زمانی که  $Q_{vi}$  مقدار بزرگ‌تر از صفر می‌گیرد،  $Y_{vi}$  مقدار یک را اختیار می‌کند و در محدودیت ۶، هنگامی که  $Q_{vi}$  مقدار صفر را اختیار می‌کند،  $Y_{vi}$  مقدار صفر را انتخاب می‌کند. محدودیت ۷ بیان‌کننده آن است که اگر وسیله‌ای به یک منطقه حادثه‌دیده اختصاص یابد، پیش از آن منطقه، فقط انبار محل استقرار وسیله یا یک منطقه حادثه‌دیده دیگری وجود دارد. محدودیت ۸ بیانگر آن است که اگر وسیله‌ای به یک پناهگاه اختصاص یابد، پیش از آن پناهگاه، فقط یک منطقه حادثه‌دیده قرار گرفته است. محدودیت ۹ از ایجاد حلقه در هر گره از شبکه جلوگیری می‌کند. محدودیت ۱۰ نشان‌دهنده حداکثر ظرفیت هر پناهگاه برای اسکان افراد سالم است و نیز بیانگر آن است که زمانی وسایل امدادی می‌توانند به سمت پناهگاهی حرکت کنند که آن پناهگاه از پیش فعال شده باشد. محدودیت ۱۱ نشان می‌دهد که باید

جدول ۲. زمان‌های حمل‌ونقل بین تمامی گره‌های شبکه (واحد زمانی)

گره‌ها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
۱	-	۳۵	۱۰	۲۰	۲۰	۱۰	۳۰	۳۵	۲۰	۲۰	۲۰
۲	۳۵	-	۴۰	۳۵	۲۰	۲۰	۲۰	۳۵	۱۰	۳۵	۲۰
۳	۱۰	۴۰	-	۱۰	۲۵	۲۰	۲۰	۱۰	۴۰	۱۰	۲۵
۴	۲۰	۳۵	۱۰	-	۱۵	۲۵	۱۰	۲۰	۳۵	۱۰	۱۵
۵	۲۰	۲۰	۲۵	۱۵	-	۲۵	۱۰	۲۰	۲۰	۲۵	۱۵
۶	۱۰	۲۰	۲۰	۲۵	۲۵	-	۱۵	۲۵	۴۰	۲۰	۲۵
۷	۳۰	۲۰	۲۰	۱۰	۱۰	۱۵	-	۳۰	۴۰	۲۰	۱۰
۸	۳۵	۳۵	۱۰	۲۰	۲۰	۲۵	۳۰	-	۳۵	۳۵	۱۰
۹	۲۰	۱۰	۴۰	۳۵	۲۰	۴۰	۴۰	۳۵	-	۱۰	۴۰
۱۰	۲۰	۳۵	۱۰	۱۰	۲۵	۲۰	۲۰	۳۵	۱۰	-	۲۰
۱۱	۲۰	۲۰	۲۵	۱۵	۱۵	۲۵	۱۰	۱۰	۴۰	۲۰	-

جدول ۳. نحوه استقرار وسایل امدادی

وسایل تخلیه	محل استقرار وسایل در انبارهای وسایل
۱	۱۰
۲	۱۰
۳	۱۰
۴	۱۱
۵	۱۱
۶	۱۱

جدول ۴. اطلاعات مربوط به گره‌های شبکه

گره‌ها	تعداد تقاضا (نفر)	ظرفیت (نفر)	پنجره زمانی (واحد زمانی)	زمان ارائه خدمت (واحد زمانی)
۱	-	۵۰	۱۰۰	۱۰
۲	-	۵۰	۱۰۰	۱۰
۳	-	۵۰	۱۰۰	۱۰
۴	-	۵۰	۱۰۰	۱۰
۵	-	۵۰	۱۰۰	۱۰
۶	۳۰	-	۱۰۰	۱۰
۷	۲۴	-	۱۰۰	۱۰
۸	۱۶	-	۱۰۰	۱۰
۹	۳۰	-	۱۰۰	۱۰

### نتایج حل مثال

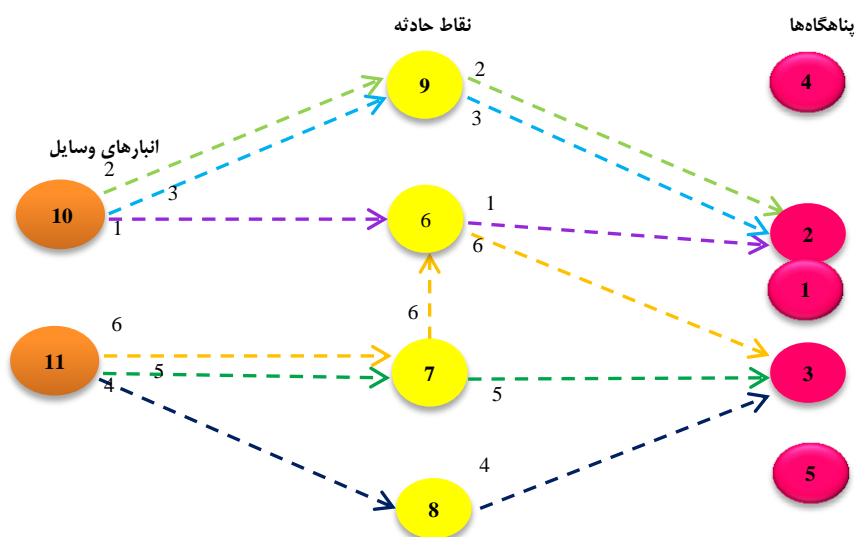
Win Seven اجرا شد. زمان حل این مثال با نرم‌افزار GAMS، ۱۵/۴۸ ثانیه بود و مقدار کل تابع هدف، ۳۵۰ واحد زمانی به دست آمد. نتایج حل مسئله، در جدول ۵ و شکل ۲ به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

مسئله انتخابی با استفاده از نرم‌افزار GAMS 23.0.2 و سالور CPLEX روی رایانه‌ای با مشخصات Intel Core i7 4702MQ 2.20GHz up to 3.20 GHz and 6GB RAMDDR3 under



جدول ۵. نتایج حل مدل

وسیله	مسیر	تعداد افرادی که در هر مسیر سوار یا پیاده می‌شوند (نفر)	زمان رسیدن به هر گره (واحد زمانی)
۱	۱۰-۶-۲	۰-۲۰-۲۰	۰-۲۰-۵۰
۲	۱۰-۹-۲	۰-۱۰-۱۰	۰-۱۰-۳۰
۳	۱۰-۹-۲	۰-۲۰-۲۰	۰-۱۰-۳۰
۴	۱۱-۸-۳	۰-۱۶-۱۶	۰-۱۰-۳۰
۵	۱۱-۷-۳	۰-۲۰-۲۰	۰-۱۰-۴۰
۶	۱۱-۷-۶-۳	۰-۴-۱۰-۱۴	۰-۱۰-۳۵-۶۵



شکل ۲. نتایج حل مدل به صورت گرافیکی

### تحلیل حساسیت

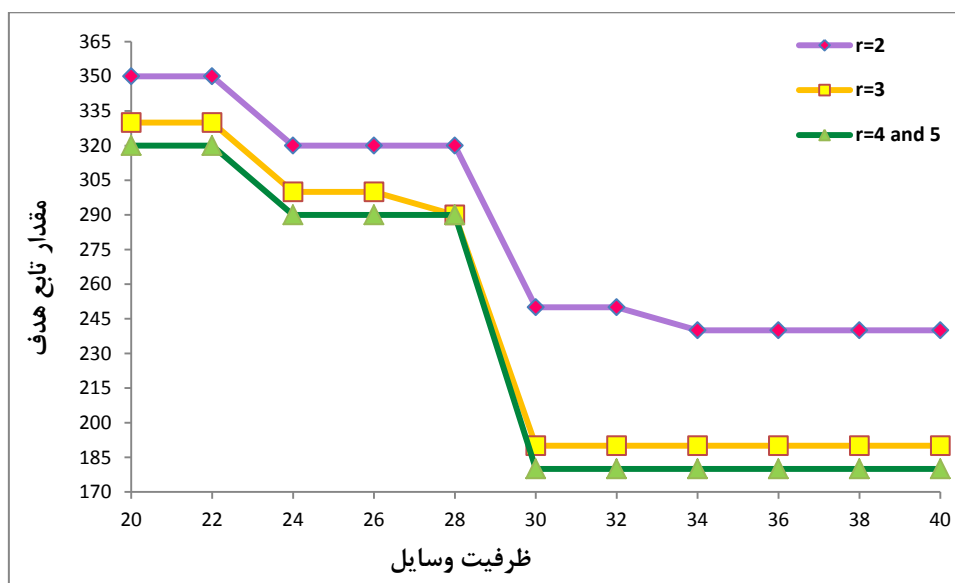
کاهش زمان ارائه خدمات در فاز پاسخ به فاجعه، در حداقل کردن آسیب‌ها نقش بسزایی دارد. تلاش تصمیم‌گیران در حوزه مدیریت فاجعه، بهره‌گیری بهتر از امکانات برای کاهش زمان پاسخگویی به نیازهای افراد است. یکی از عوامل تأثیرگذار بر زمان ارائه خدمات، حداکثر تعداد پناهگاه‌هایی است که می‌توان بازگشایی کرد. همچنین وسایل امدادی برای تخلیه افراد، از جمله امکاناتی است که نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش زمان دارد.

بنابراین، در این بخش تأثیر تغییرات دو پارامتر تعداد پناهگاه‌ها و ظرفیت وسایل امدادی بر کل زمان ارائه خدمات امدادی بررسی شده و در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش ظرفیت وسایل امدادی، کل زمان رسیدن وسایل به مناطق

در جدول ۵ و شکل ۲، مسیر حرکت هر وسیله، تعداد افرادی که در هر منطقه حادثه‌دیده سوار وسیله و در پناهگاه مربوط پیاده می‌شوند و زمان رسیدن وسیله به هر یک از مناطق آسیب‌دیده و پناهگاهی که ملاقات می‌کند، نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از میان پنج پناهگاه پیشنهادی برای بازگشایی، پناهگاه‌های ۲ و ۳ انتخاب شده‌اند؛ برای مثال، وسیله ۶ حرکت خود را از انبار ۱۱ آغاز کرده است. سپس در منطقه حادثه‌دیده ۷، ۴ نفر را پس از گذشت ۱۰ واحد زمانی از لحظه شروع حرکت سوار کرده است. بعد از آن به نقطه حادثه‌دیده ۶ رفته و در آنجا ۱۰ نفر را پس از گذشت ۳۵ واحد زمانی سوار کرده است. در نهایت، پس از گذشت ۶۵ واحد زمانی، به پناهگاه ۳ رسیده و ۱۴ نفر را در این پناهگاه پیاده کرده است.

داد. همچنین با صرف هزینه و با افزایش ظرفیت وسایل امدادی تا ۳۰ نفر، زمان ارائه خدمت ۱۰۰ دقیقه کاهش می یابد و در نهایت، با استفاده از وسایلی مانند اتوبوس و... با ظرفیت های بیشتر از ۳۴ نفر می توان کل زمان پاسخگویی را به ۱۱۰ دقیقه کاهش داد. علاوه بر این، با در نظر گرفتن حداکثر ۳ پناهگاه انتخابی به جای ۲ پناهگاه و تغییر ندادن ظرفیت وسایل، کل زمان پاسخگویی ۳۰ دقیقه کاهش می یابد.

حادثه دیده و پناهگاه ها کاهش می یابد. علاوه بر این، با افزایش حداکثر تعداد پناهگاه هایی که می توان بازگشایی کرد، کل زمان ارائه خدمات کاهش می یابد. با توجه به شکل ۳، در هر ظرفیتی از وسایل تخلیه افراد می توان اثر افزایش حداکثر تعداد پناهگاه های انتخابی را بر مقدار کل تابع هدف مشاهده کرد. برای نمونه، زمانی که حداکثر بتوان ۲ پناهگاه را بازگشایی کرد، می توان با افزایش ظرفیت وسایل امدادی از ۲۰ نفر به ۲۴ نفر، کل زمان رسیدن وسایل به مناطق حادثه دیده و پناهگاه ها را به میزان ۳۰ دقیقه کاهش



شکل ۳. نمودار آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییر تعداد پناهگاه ها و ظرفیت وسایل امدادی

در نظر گرفتن یک شبکه دوسطحی شامل انبارهای وسایل، مناطق آسیب دیده و پناهگاه ها است که امکان خدمت دهی به هر نقطه حادثه دیده، با چندین وسیله و انبارهای چندگانه، برای شروع حرکت وسایل امدادی در نظر گرفته شده است. برای اینکه مسئله به مسئله دنیای واقعی نزدیک تر شود، محدودیت تعداد و ظرفیت وسایل امدادی، محدودیت ظرفیت پناهگاه ها و محدودیت پنجره های زمانی برای زمان رسیدن وسایل به نقاط حادثه دیده و پناهگاه ها لحاظ شده است تا بتوان فجایع را بهتر مدیریت کرد. هدف مدل پیشنهادی، کمینه سازی کل زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه دیده و پناهگاه ها است. در ادامه، به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مدل روی یک مثال تصادفی اجرا، حل و تحلیل حساسیت شد. تحلیل

## نتیجه گیری و پیشنهادهای آتی

به طور معمول، در هنگام وقوع فاجعه و به ویژه در فاز پاسخ، اقداماتی بدون برنامه ریزی مناسب انجام می گیرد که مشکلات زیادی را به دنبال دارد. این در حالی است که می توان با استفاده از رویکردهای بهینه سازی از جمله روش های مطرح شده تحقیق در عملیات (OR)، برنامه ریزی ها و تصمیم ها را بهینه کرد و آسیب های ناشی از سوءمدیریت را به میزان زیادی کاهش داد. به همین دلیل، در این مقاله یک مدل جدید برنامه ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط برای مکان یابی پناهگاه ها و تعیین هم زمان مسیر و زمان حرکت وسایل امدادی، برای عملیات تخلیه افراد سالم در فاز پاسخ ارائه شده است. نوآوری این مقاله نسبت به مطالعات پیشین،

دهند و انتقال افراد تسریع می‌شود. همچنین با استفاده از نمودار می‌توان تأثیر تغییر تعداد پناهگاه‌هایی را که می‌توان بازگشایی کرد، بر کل زمان ارائه خدمات امدادی، برای انتخاب هر ظرفیتی از وسایل امدادی مشاهده کرد.

برای پژوهش‌های آتی می‌توان موارد زیر را پیشنهاد کرد: ۱. در نظر گرفتن محدودیت‌های ترافیکی و اختلال در شبکه برای مسیرهای حمل‌ونقل؛ ۲. توسعه مدل حاضر در حالت چنددوره‌ای و با اهداف چندگانه برای تخلیه افراد از مناطق حادثه‌دیده در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت؛ ۳. حل مدل در ابعاد بزرگ با استفاده از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری.

حساسیت‌ها شامل بررسی هم‌زمان تأثیر تغییر در ظرفیت وسایل امدادی و حداکثر تعداد پناهگاه‌هایی که می‌توان انتخاب کرد، بر کل زمان ارائه خدمات بود. همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه شد، با افزایش حداکثر تعداد پناهگاه‌هایی که می‌توان انتخاب کرد، کل تابع هدف کاهش یافته است؛ چراکه هر قدر تعداد پناهگاه‌های انتخابی بیشتر باشد، افراد بیشتری از مناطق مختلف حادثه‌دیده به پناهگاه‌های نزدیک انتقال می‌یابند و از زمان ارائه خدمت کاسته می‌شود. همچنین در همان نمودار، افزایش ظرفیت وسایل تخلیه افراد سبب کاهش زمان خدمت‌دهی می‌شود، زیرا وسایل با ظرفیت بیشتر، افراد بیشتری را می‌توانند از مناطق حادثه‌دیده مختلف سوار کنند و به پناهگاه‌ها انتقال

## مراجع

1. Ngueveu, S.U., Prins, C. and Calvo, R. W. (2010). "An effective memetic algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem", *Computers & Operations Research.*, Vol. 37, No. 11, PP. 1877–1885.
2. Ribeiro, G. M. and Laporte, G. (2012). "An adaptive large neighborhood search heuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem." *Computers and Operations Research.*, Vol. 39, No. 3, PP. 728–735.
3. Ke, L. and Feng, Z. (2013). "A two-phase metaheuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem", *Computers and Operations Research.*, Vol. 40, No. 2, PP. 633–638.
4. Ozsoydan, F. B. and Sipahioglu, A. (2013). "Heuristic solution approaches for the cumulative capacitated vehicle routing problem", *Optimization.*, Vol. 62, No. 10, PP. 1321–1340.
5. Özdamar, L., Aksu, D.T. and Ergüneş, B. (2014). "Coordinating debris cleanup operations in post disaster road networks", *Socio-Economic Planning Sciences.*, Vol. 48, No. 4, PP. 249–262.
6. Wohlgemuth, S., Oloruntoba, R. and Clausen, U. (2012). "Dynamic vehicle routing with anticipation in disaster relief", *Socio-Economic Planning Sciences.*, Vol. 46, No. 4, PP. 261–271.
7. Lee, K., Lei, L., Pinedo, M. and Wang, S. (2013a). "Operations scheduling with multiple resources and transportation considerations", *International Journal of Production Research.*, Vol. 51, No. 23-24, PP. 7071-7090.
8. Lee, K., Lei, L. and Dong, H. (2013b). "A Solvable Case of Emergency Supply Chain Scheduling Problem with Multi-stage Lead Times", *Journal of Supply Chain and Operations Management.*, Vol. 11, No. 2, PP. 30–45.
9. Gan, X., Wang, Y., Kuang, J., Yu, Y. and Niu, B. (2014). "Emergency Vehicle Scheduling Problem with Time Utility in Disasters", *Mathematical Problems in Engineering.*, Vol. 2015, PP. 1-7.
10. Pramudita, A., Taniguchi, E. and Qureshi, A.G. (2014). "Location and Routing Problems of Debris Collection Operation after Disasters with Realistic Case Study", *Procedia-Social and Behavioral Sciences.*, Vol. 125, PP. 445–458.
11. Wex, F., Schryen, G., Feuerriegel, S. and Neumann, D. (2014). "Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units." *European Journal of Operational Research.*, Vol. 235, No. 3, PP. 697–708.
12. Bish, D. R. (2011). "Planning for a bus-based evacuation", *OR Spectrum.*, Vol. 33, No. 3, PP. 629–654.

13. Abdelgawad, H. and Abdulhai, B. (2011). "Large-scale evacuation using subway and bus transit: approach and application in city of Toronto", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 138, No. 10, PP. 1215–1232.
14. Hamed, M., Haghani, A. and Yang, S. (2012). "Reliable transportation of humanitarian supplies in disaster response: model and heuristic", *Procedia-Social and Behavioral Sciences.*, Vol. 54, PP. 1205–1219.
15. Rath, S. and Gutjahr, W. J. (2014). "A math-heuristic for the warehouse location–routing problem in disaster relief", *Computers and Operations Research.*, Vol. 42, PP. 25–39.
16. Gan, X., Wang, Y., Yu, Y. and Niu, B. (2013). "An emergency vehicle scheduling problem with time utility based on particle swarm optimization", In *Proceedings of the 9th international conference on Intelligent Computing Theories and Technology*, PP. 614–623.
17. Wex, F., Schryen, G. and Neumann, D. (2012). "Operational emergency response under informational uncertainty: a fuzzy optimization model for scheduling and allocating rescue units", In *Proceedings of the 9th International ISCRAM Conference*, PP. 1-10.
18. Talarico, L., Meisel, F. and Sorensen, K. (2015) "Ambulance routing for disaster response with patient groups", *Computers and Operations Research*, Vol. 56, PP. 120–133.
19. Caunhye, A. M., Zhang, Y., Li, M. and Nie, X. (2016). "A location-routing model for prepositioning and distributing emergency supplies", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 90, PP. 161–176.

## واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Response Phase of Disaster
  2. Split Delivery
  3. Multiple Depots
  4. Heterogeneous Vehicles
  5. Time Window
-