



## **A Routing and Scheduling Model for Emergency Evacuation with Considering Relationship Between Shelters**

**Fatemeh Sabouhi, Mehdi heydari & Ali Bozorgi-Amiri\***

*Fatemeh Sabouhi, Department of Industrial Engineering, Iran University of Science & Technology.*

*Mehdi heydari, Department of Industrial Engineering, Iran University of Science & Technology.*

*Ali Bozorgi-Amiri, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran.*

### **Keywords**

**Emergency evacuation,  
Response phase,  
Scheduling,  
Multiple depots,  
Routing of relief vehicles.**

### **ABSTRACT**

*In the past two decades, natural disasters cause considerable human and financial losses. Since such disasters occur unexpectedly, presenting quick and proper plans, is essential. Transporting evacuees from the affected areas to shelters is among the vital measures in the response phase to the disaster. In this paper, a novel mathematical programming model has been proposed for simultaneous routing and scheduling of relief vehicles with considering relationship between shelters. In evacuation operations, multiple depots for heterogeneous fleet of relief vehicles, split delivery and time window constraints have been considered. To show the efficiency of the proposed model, we select a random example, run the model on it and do different sensitivity analysis on the important parameters. These results show that relationship between facilities and capacity of relief vehicles and shelters affect total time of servicing.*

© 2017 IUST Publication, IJIEPM Vol. 28, No. 1, All Rights Reserved



## ارائه‌ی مدل مسیریابی و زمان‌بندی جهت تخلیه‌ی اضطراری با در نظر گرفتن امکان تراکنش بین پناهگاه‌ها

فاطمه صبوچی، مهدی حیدری و علی بزرگی امیری\*

### چکیده:

در طی دو دهه‌ی اخیر، وقوع بلایای طبیعی سبب مرگ بسیاری از انسان‌ها و ایجاد خسارت‌های قابل توجه گردیده است که با توجه به ماهیت غیر مترقبه بودن اغلب فجایع، لزوم اتخاذ تصمیمات سریع و مناسب امری ضروری است. یکی از مهم‌ترین عملیات امدادی در فاز پاسخ به فاجعه، تخلیه‌ی افراد سالم از مناطق آسیب دیده به پناهگاه‌ها است.

هدف از این مقاله ارائه‌ی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی جدید برای تعیین همزمان مسیر و زمان حرکت وسایل امدادی با در نظر گرفتن امکان تراکنش بین پناهگاه‌ها است. در عملیات تخلیه، انبارهای چندگانه برای ناوگان ناهمگن وسایل امدادی، تحویل جزئی و محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی در نظر گرفته شده است. برای نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی، مدل بر روی یک مثال تصادفی اجرا و تحلیل حساسیت-های مختلف بر روی پارامترهای مهم انجام گردیده است. نتایج نشان می‌دهند که تراکنش بین تسهیلات و ظرفیت پناهگاه‌ها و وسایل امدادی روی مقدار کل تابع هدف تأثیر گذار است.

### کلمات کلیدی

تخلیه‌ی اضطراری،  
فاز پاسخ،  
زمان‌بندی،  
انبارهای چندگانه،  
مسیریابی وسایل امدادی.

### ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر شمار تلفات ناشی از حوادث ساختمانی دست بشر یا بلایای طبیعی از قبیل سیل، زلزله، طوفان، خشکسالی و ... افزایش چشمگیری یافته است. بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰، براساس بلایای طبیعی در سراسر جهان ۳۱۳ میلیون نفر جان خود را از دست دادند، در واقع هر ساله، حدود ۷۰۰۰۰ نفر می‌میرند و بیش از ۲۰۰ میلیون نفر تحت تاثیر بلایا قرار می‌گیرند [۱]. وقوع این حوادث طبیعی اغلب با صدمات مالی و جانی بسیار زیادی همراه است. ابعاد وسیع خسارات و تلفات ناشی از این بلایا سبب شده است که طی سال‌های اخیر امداد رسانی به مناطق

تاریخ وصول: ۹۳/۰۸/۰۳

تاریخ تصویب: ۹۴/۰۲/۰۹

فاطمه صبوچی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران.

s\_fateme3359@yahoo.com

مهدی حیدری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران.

Mheydari@iust.ac.ir

\*نویسنده مسئول مقاله: دکتر علی بزرگی امیری، دانشکده مهندسی صنایع،

پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران. Alibozorgi@ut.ac.ir

آسیب دیده و کاهش اثرات بلایا مورد توجه قرار بگیرد [۲]. مطالعات در زمینه‌ی مدیریت فاجعه نشان می‌دهد که از جمله مهم‌ترین فعالیت‌های امدادی در فاز پاسخ، تخلیه‌ی افراد از مناطق حادثه‌دیده به مکان‌های امن و انجام اقدامات لجستیکی نظیر تأمین غذا، دارو و ... جهت برآورده کردن نیاز افراد آسیب دیده است [۳].

براساس ماهیت تصادفی و غیر قابل پیش بینی بودن اغلب فجایع و با توجه به تخریب و آسیب‌های وارده به بناها و زیر ساخت‌های شهری، موجب می‌شود که بازماندگان برای یافتن مکان امن برای اسکان، با مشکلات اساسی مواجه شوند و در صورت کم توجهی به این موضوع، ممکن است خسارات جبران ناپذیری ایجاد گردد. لازمه‌ی کاهش این خسارات، مدیریت صحیح در زمان وقوع فاجعه است که سبب برنامه‌ریزی، سازماندهی، هدایت و کنترل فعالیت-های ضروری می‌شود. امروزه ارائه‌ی طرح‌های پیشگیرانه و جامع مورد توجه محققان قرار گرفته است [۴].

در این مقاله یک مدل ریاضی جدید برای مسیریابی و زمان‌بندی جهت تخلیه اضطراری افراد از مناطق آسیب دیده به پناهگاهها ارائه شده است که نوآوری‌های مقاله عبارتند از:

- امکان حرکت وسایل امدادی بین پناهگاهها
- امکان ارائه خدمات به هر منطقه‌ی حادثه دیده توسط چندین وسیله<sup>i</sup>
- در نظر گرفتن انبارهای چندگانه<sup>ii</sup> برای شروع حرکت وسایل امدادی
- در نظر گرفتن وسایل ناهمگن<sup>iii</sup> با ظرفیت محدود و محدودیت ظرفیت برای پناهگاهها
- در نظر گرفتن محدودیت پنجره‌های زمانی<sup>iv</sup> برای زمان رسیدن وسایل امدادی به مناطق آسیب دیده و پناهگاهها جهت برقراری عدالت در ارائه خدمات

در ادامه ساختار مقاله به صورت زیر تنظیم شده است:

در بخش دوم مرور ادبیات، در بخش سوم تشریح مسأله، مدل‌سازی ریاضی مسأله در بخش چهارم، معرفی مثال عددی و نتایج حل مدل در بخش پنجم، تحلیل حساسیت در بخش ششم و نتیجه‌گیری و پیشنهادها آتی در بخش هفتم ارائه شده است.

## ۲. مرور ادبیات

مسائل مسیریابی و زمان‌بندی در فاز پاسخ به فاجعه به عنوان موضوع تحقیقاتی جدیدی شناخته می‌شود که در ادبیات هم کمتر به بررسی همزمان این دو تصمیم عملیاتی پرداخته شده است. در ادامه به بیان مطالعات انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود.

انگیوایو و همکاران در سال ۲۰۱۰، به بررسی مسأله‌ی توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده پرداختند و یک مدل تک سطحی مسیریابی و زمان‌بندی با امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله ارائه دادند و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [۵]. بیش در سال ۲۰۱۱، به بررسی مسأله‌ی تخلیه افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاهها پرداخت و یک مدل دو سطحی مسیریابی و تخصیص با امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله ارائه داد و مسأله را به شکل تک هدفه، چند دوره‌ای، قطعی و در مسیر باز معرفی کرده است [۶].

آبدلگاواد و آبدل‌های در سال ۲۰۱۱، به بررسی عملیات تخلیه‌ی افراد سالم از مناطق حادثه دیده به پناهگاهها پرداختند و یک مدل دو سطحی مسیریابی، زمان‌بندی و تخصیص با امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه دیده توسط چندین وسیله‌ی حمل و نقل ارائه دادند و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره-

ای، قطعی و در مسیر باز معرفی کرده‌اند [۷]. حامدی و همکاران در سال ۲۰۱۲، به بررسی مسأله‌ی توزیع اقلام امدادی از انبارهای اقلام امدادی به پناهگاهها پرداختند و یک مدل دو سطحی مسیریابی و زمان‌بندی با امکان خدمت‌دهی به هر پناهگاه توسط چندین وسیله‌ی حمل و نقل ارائه دادند و مسأله را به شکل چند هدفه، تک دوره‌ای، قطعی و در مسیر باز معرفی کرده‌اند [۸]. ریبریو و لاپورتا در سال ۲۰۱۲، به بررسی مسأله‌ی توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده پرداختند و یک مدل تک سطحی مسیریابی و زمان‌بندی با امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله ارائه دادند و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [۹]. وهلگمیوس و همکاران در سال ۲۰۱۲، به بررسی مسأله‌ی توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده پرداختند و یک مدل تک سطحی مسیریابی و زمان‌بندی با امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله ارائه دادند و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، فازی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [۱۱]. گان و همکاران در سال ۲۰۱۳، به بررسی مسأله‌ی توزیع اقلام امدادی از مراکز امداد رسانی به نقاط حادثه‌دیده با در نظر گرفتن تابع مطلوبیت پرداختند و یک مدل تک سطحی مسیریابی و زمان‌بندی با امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله ارائه دادند و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، فازی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [۱۲].

کی و فنگ در سال ۲۰۱۳، به بررسی مسأله‌ی توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده پرداختند و یک مدل تک سطحی مسیریابی و زمان‌بندی با امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله ارائه دادند و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [۱۳]. ازسویدان و سیپاهیگلو در سال ۲۰۱۳، به بررسی مسأله‌ی توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده پرداختند و یک مدل تک سطحی مسیریابی و زمان‌بندی با امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله ارائه دادند و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره-ای، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [۱۴]. لی و همکاران در سال ۲۰۱۳، به بررسی مسأله‌ی توزیع تجهیزات پزشکی به

بیمارستان‌ها با بیان مفهوم نقاط انتقال و تقسیم منابع به دو دسته‌ی تجدیدپذیر و تجدید ناپذیر، پرداختند و یک مدل سه سطحی زمان‌بندی با امکان خدمت‌دهی به هر بیمارستان فقط توسط یک نقطه‌ی انتقال ارائه دادند و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی، با ظرفیت نامحدود نقاط انتقال معرفی کرده‌اند [۱۵].

لی و همکاران در سال ۲۰۱۳، به بررسی مسأله‌ی توزیع تجهیزات پزشکی به بیمارستان‌ها با بیان مفهوم نقاط انتقال پرداختند و یک مدل سه سطحی زمان‌بندی با امکان خدمت‌دهی به هر بیمارستان فقط توسط یک نقطه‌ی انتقال ارائه دادند و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی، با ظرفیت محدود نقاط انتقال معرفی کرده‌اند [۱۶].

پرامیودیتا و همکاران در سال ۲۰۱۴، به بررسی مسأله‌ی عملیات آواربرداری از نقاط حادثه‌دیده به دپوهای جمع‌آوری آوار پرداختند و یک مدل دو سطحی مسیریابی، مکان‌یابی و تخصیص با امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله ارائه دادند و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، پویا و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [۱۷].

ازدومار و همکاران در سال ۲۰۱۴، به بررسی مسأله‌ی عملیات آواربرداری از نقاط حادثه‌دیده پرداختند و یک مدل تک سطحی مسیریابی و زمان‌بندی با امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله ارائه دادند و مسأله را به شکل چند هدفه، چند دوره‌ای، پویا و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [۱۸].

گان و همکاران در سال ۲۰۱۴، به بررسی مسأله‌ی توزیع اقلام امدادی از مراکز امداد رسانی به نقاط حادثه‌دیده با در نظر گرفتن تابع مطلوبیت، پرداختند و یک مدل تک سطحی مسیریابی و زمان‌بندی با امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک وسیله ارائه دادند و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [۱۹].

وکس و همکاران در سال ۲۰۱۴، به بررسی مسأله‌ی عملیات جست و جو و نجات در نقاط حادثه‌دیده پرداختند و یک مدل تک سطحی مسیریابی با امکان خدمت‌دهی به هر نقطه‌ی حادثه‌دیده فقط توسط یک واحد امداد و نجات ارائه دادند و مسأله را به شکل تک هدفه، تک دوره‌ای، قطعی و در مسیر بسته معرفی کرده‌اند [۲۰].

### ۳. تشریح مسأله

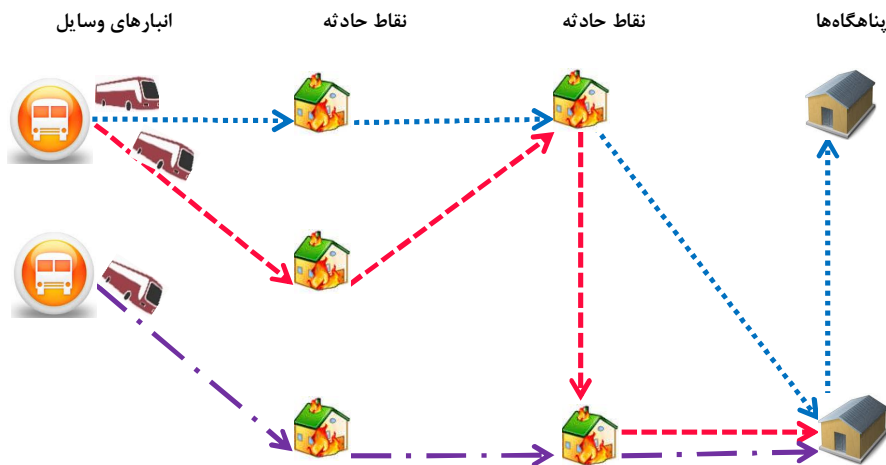
سوانح و بلاای طبیعی مانند سیل، زلزله، طوفان و ... تهدید جدی برای سلامت و ایمنی انسان‌ها به شمار می‌آیند و سبب

بروز مشکلات بسیاری برای ساکنین مناطق آسیب دیده می‌شوند بنابراین تخلیه‌ی افراد سالم از مناطق آسیب‌دیده به پناهگاه‌ها از جمله مهم‌ترین اقدامات حیاتی در فاز پاسخ به فاجعه است که این عملیات باید در کمترین زمان و از طریق مسیرهای کارا انجام شود [۲۱].

تخلیه‌ی افراد سالم از مناطق آسیب دیده به پناهگاه‌ها مطابق با شکل ۱ بدین صورت است که هر وسیله‌ی امدادی در صورت اعزام، از انباری که در آن مستقر است حرکت خود را آغاز نموده و با توجه به ظرفیت وسیله، ظرفیت پناهگاه‌ها و پنجره‌های زمانی، بهترین مسیر را برای انتقال افراد سالم از مناطق آسیب دیده به پناهگاه‌ها انتخاب می‌کند. برای هر وسیله این امکان وجود دارد که برای استفاده‌ی حداکثری از ظرفیت پناهگاه‌های نزدیک‌تر، پس از پیاده‌سازی تعدادی از افراد در این پناهگاه‌ها، برای تخلیه‌ی بقیه‌ی افراد به سمت پناهگاه‌های دیگر حرکت نماید. همچنین امکان ارائه‌ی خدمات به هر منطقه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله‌ی امدادی امکان پذیر است.

با توجه به شبکه‌ی معرفی شده، عمده فرضیات مسأله عبارتند از:

۱. چندین نقطه‌ی حادثه‌دیده، چندین پناهگاه و انبار چندگانه، برای شروع حرکت وسایل امدادی در نظر گرفته شده است.
۲. تعداد و مکان انبارهای وسایل و نقاط حادثه‌دیده شناخته شده است.
۳. وسایل امدادی ناهمگن و با ظرفیت محدود در نظر گرفته شده‌اند.
۴. هر وسیله‌ی امدادی در صورت اعزام، از انبار محل استقرارش حرکت را آغاز کرده و پایان حرکت آن نامشخص و به سمت پناهگاه‌ها در نظر گرفته شده است.
۵. امکان حرکت وسایل امدادی بین پناهگاه‌ها در نظر گرفته شده است.
۶. زمان‌های حمل و نقل بین تمام نقاط شبکه شناخته شده و به صورت سیمتریک بوده است و از رابطه‌ی نامساوی مثلثی پیروی می‌کند.
۷. مقدار تقاضای هر نقطه‌ی حادثه‌دیده شناخته شده است.
۸. پنجره‌ی زمانی برای زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها در نظر گرفته شده است.
۹. امکان ارائه‌ی خدمت به هر منطقه‌ی آسیب دیده توسط چندین وسیله‌ی امدادی، در نظر گرفته شده است.



۴. مدل سازی ریاضی

در این بخش مسأله تشریح شده در قسمت قبل را به صورت ریاضی مدل سازی می‌کنیم

۴-۱. مجموعه‌ها

- $E$  مجموعه‌ی نقاط حادثه دیده
- $S$  مجموعه‌ی پناهگاه‌ها
- $V$  مجموعه‌ی وسایل
- $D$  مجموعه‌ی انبارهای وسایل
- $D(v)$  محل استقرار مجموعه‌ی وسایل
- $N$  مجموعه‌ی کل نقاط در فرآیند تخلیه‌ی افراد سالم ( اجتماع سه مجموعه‌ی  $D(v)$ ،  $E$  و  $S$  )

۴-۲. اندیس‌ها

- $i, j$  مجموعه‌ی اندیس گره‌ها
- $v$  مجموعه‌ی اندیس وسایل

۴-۳. پارامترها

- $c_{ij}$  زمان حمل و نقل از گره‌ی  $i \in N$  به گره‌ی  $j \in N$
- $d_i$  مقدار تقاضای نقطه‌ی حادثه دیده‌ی  $i \in N$
- $Cap_i$  ظرفیت پناهگاه  $i \in S$  برای تخلیه‌ی افراد سالم
- $b_i$  حداکثر زمان رسیدن وسایل به گره‌ی  $i \in E \cup S$
- $Cap_v$  ظرفیت وسیله‌ی  $v \in V$
- $Dt_i$  زمان ارائه‌ی خدمت در گره‌ی  $i \in E \cup S$
- $M_{big}$  مقدار خیلی بزرگ

۴-۴. متغیرها

$X_{vij}$	برابر یک است اگر وسیله‌ی $v \in V$ از گره‌ی $i \in N$ به گره‌ی $j \in N$ حرکت کند، در غیر این صورت برابر صفر است.
$Y_{vi}$	برابر یک است اگر وسیله‌ی $v \in V$ به گره‌ی $i \in E \cup S$ تخصیص داده شود، در غیر این صورت برابر صفر است.
$Z_v$	برابر یک است اگر وسیله‌ی $v \in V$ اعزام شود، در غیر این صورت برابر صفر است.
$Q_{vi}$	تعداد افرادی که در نقطه‌ی حادثه دیده‌ی $i \in E$ سوار وسیله‌ی $v \in V$ می‌شوند یا تعداد افرادی که از وسیله‌ی $v \in V$ در پناهگاه $i \in S$ پیاده می‌گردند.
$T_{vi}$	زمان رسیدن وسیله‌ی $v \in V$ به گره‌ی $i \in N$

۴-۵. تابع هدف و محدودیت‌ها

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

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

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

$$\sum_{j \in E \cup D(v)} X_{vji} = Y_{vi} \quad \forall i \in E, \forall v \in V \quad (4)$$

$$\sum_{v \in V} Q_{vi} = d_i \quad \forall i \in E \quad (5)$$

$$\text{Cap}_v Y_{vi} \geq Q_{vi} \quad \forall i \in E \cup S, \forall v \in V \quad (6)$$

$$Y_{vi} \leq Q_{vi} \quad \forall i \in E \cup S, \forall v \in V \quad (7)$$

$$\sum_{i \in E} Q_{vi} \leq \text{Cap}_v Z_v \quad \forall v \in V \quad (8)$$

$$\sum_{j \in E \cup S} X_{vji} = Y_{vi} \quad \forall i \in S, \forall v \in V \quad (9)$$

$$\sum_{v \in V} Q_{vi} \leq \text{Cap}_i \quad \forall i \in S \quad (10)$$

$$\sum_{i \in E \cup S} X_{vij} \geq \sum_{i \in S} X_{vji} \quad \forall j \in S, \forall v \in V \quad (11)$$

$$\sum_{i \in S} Q_{vi} = \sum_{i \in E} Q_{vi} \quad \forall v \in V \quad (12)$$

$$\sum_{v \in V} Z_v \leq V \quad (13)$$

$$T_{vi} = 0 \quad \forall i \in D(v), \forall v \in V \quad (14)$$

$$(T_{vi} + Dt_i + c_{ij}) - M_{big} (1 - X_{vij}) \leq T_{vj} \quad \forall j \in E, \forall v \in V, \forall i \in D(v) \cup E \quad (15)$$

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

$$T_{vi} \leq b_i \quad \forall i \in E \cup S, \forall v \in V \quad (17)$$

$$X_{vii} = 0 \quad \forall i \in N, \forall v \in V \quad (18)$$

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

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

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

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

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

زمانی که  $Q_{vi}$  مقدار بزرگتر از صفر می‌گیرد سبب می‌شود که  $Y_{vi}$  مقدار یک را اختیار کند و در محدودیت (۷) زمانی که  $Q_{vi}$  مقدار صفر را اختیار می‌کند باعث می‌شود  $Y_{vi}$  مقدار صفر را انتخاب کند. محدودیت (۸) بیان‌کننده‌ی حداکثر ظرفیت هر وسیله‌ی امدادی است. محدودیت (۹) بیانگر این است که اگر وسیله‌ای به یک پناهگاه اختصاص یابد قبل از آن پناهگاه فقط یک منطقه‌ی حادثه دیده یا یک پناهگاه دیگری قرار گرفته است. محدودیت (۱۰) حداکثر ظرفیت هر پناهگاه برای اسکان افراد سالم نشان می‌دهد. محدودیت (۱۱) بیان‌کننده‌ی امکان حرکت وسایل امدادی بین پناهگاه‌ها است. محدودیت (۱۲) بیانگر این است که تعداد افرادی که از مناطق حادثه دیده‌ی مختلف به هر وسیله‌ی

تابع هدف (۱) کل زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه دیده و پناهگاه‌ها را نشان می‌دهد. محدودیت (۲) بیان‌کننده‌ی 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 (۳) محدودیت تعادل جریان در نقاط حادثه دیده را نشان می‌دهد. محدودیت (۴) بیان‌کننده‌ی این است که اگر وسیله‌ای به یک منطقه‌ی حادثه دیده اختصاص یابد قبل از آن منطقه، فقط انبار محل استقرار وسیله یا یک منطقه‌ی حادثه دیده-ی دیگری وجود دارد. محدودیت (۵) تخلیه‌ی تمام افراد هر منطقه‌ی آسیب‌دیده از محل حادثه را نشان می‌دهد. محدودیت-های (۶) و (۷) بیانگر رابطه‌ی بین دو متغیر  $Y_{vi}$  و  $Q_{vi}$  در هر منطقه‌ی آسیب‌دیده و هر پناهگاه است که در محدودیت (۶)

## ۵. مثال عددی

### ۵-۱. شرح مثال

شبکه‌ای که در این مثال در نظر گرفته شده، شامل ۱۰ گره است که گره‌های ۱ و ۲ به عنوان پناهگاه‌ها، گره‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ به عنوان مناطق حادثه‌دیده و گره‌های ۷ و ۸ به عنوان انبارهای وسایل در نظر گرفته شده‌اند. حداکثر سه وسیله برای عملیات تخلیه‌ی افراد سالم در دسترس است. در جداول ۱، ۲ و ۳ اطلاعات مورد نیاز برای مثال معرفی شده، بیان گردیده است.

امدادی اختصاص می‌یابد تنها به یک پناهگاه منتقل می‌شوند. محدودیت (۱۳) حداکثر تعداد وسایل امدادی در دسترس را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۴) بیانگر این است که زمان شروع حرکت هر وسیله از انبار محل استقرارش، صفر در نظر گرفته می‌شود. محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) زمان رسیدن هر وسیله‌ی امدادی به هر منطقه‌ی حادثه دیده و هر پناهگاه را به ترتیب نشان می‌دهد. محدودیت (۱۷) بیان‌کننده‌ی پنجره‌ی زمانی برای زمان رسیدن وسایل امدادی به نقاط حادثه دیده و پناهگاه‌ها است. محدودیت (۱۸) از ایجاد حلقه در هر گره از شبکه جلوگیری می‌کند. محدودیت‌های (۱۹)، (۲۰)، (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) نشان دهنده‌ی نوع متغیرها است.

### جدول ۱. زمان‌های حمل و نقل بین تمام گره‌های شبکه (دقیقه)

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

### جدول ۲. اطلاعات مربوط به گره‌های شبکه

گره‌ها	مقدار تقاضا (نفر)	ظرفیت (نفر)	پنجره زمانی (دقیقه)	زمان ارائه‌ی خدمت (دقیقه)
۱	-	۳۰	۱۵۰	۱۰
۲	-	۳۰	۱۵۰	۱۰
۳	۲۴	-	۱۰۰	۱۰
۴	۱۶	-	۱۰۰	۱۰
۵	۱۰	-	۱۰۰	۱۰
۶	۱۰	-	۱۰۰	۱۰

### جدول ۳. نحوه‌ی استقرار وسایل امدادی

وسایل	محل استقرار وسایل در انبارها	ظرفیت وسایل
۱	۷	۲۰
۲	۷	۲۲
۳	۸	۲۰



۵-۲. نتایج حل

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

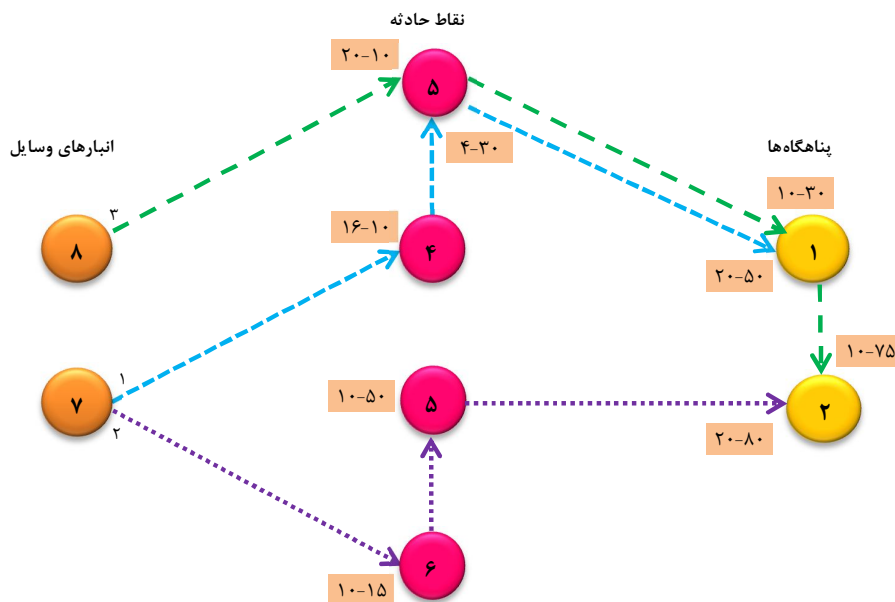
Win Seven اجرا شد. زمان حل آن با نرم افزار GAMS ۲,۳۷ ثانیه بوده و مقدار کل تابع هدف، ۳۵۰ دقیقه به دست آمده است. نتایج حاصل از حل مسأله، در جدول ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۴. نتایج حاصل از حل مدل

وسيله	مسير	تعداد افرادی که در هر مسیر سوار یا پیاده می‌شوند (نفر)	زمان رسیدن به هر گره (دقیقه)
۱	۷-۴-۳-۱	۰-۱۶-۴-۲۰	۰-۱۰-۳۰-۵۰
۲	۷-۶-۵-۲	۰-۱۰-۱۰-۲۰	۰-۱۵-۵۰-۸۰
۳	۸-۳-۱-۲	۰-۲۰-۱۰-۱۰	۰-۱۰-۳۰-۷۵

شکل ۲ نتایج حل مدل را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. اعداد روی کمان‌ها در انبارهای وسایل، بیانگر شماره‌ی وسیله‌ی امدادی است، که از محل استقرارش حرکت خود را آغاز نموده است، اعداد روی کمان‌ها در نقاط حادثه‌دیده، تعداد افرادی را که در آن مناطق آسیب‌دیده سوار وسیله‌ی مربوطه شده و همچنین زمان رسیدن وسیله به آن منطقه را نشان می‌دهد و اعداد روی کمان‌ها در پناهگاه‌ها، تعداد افرادی را که در آن پناهگاه از وسیله‌ی مربوطه پیاده شده و زمان رسیدن وسیله به آن منطقه را بیان می‌کند.

در جدول ۴ مسیر حرکت هر وسیله‌ی امدادی، تعداد افرادی که در هر منطقه‌ی حادثه‌دیده سوار وسیله و در پناهگاه مربوطه پیاده می‌شوند و زمان رسیدن وسیله‌ی امدادی به هر یک از مناطق آسیب‌دیده و پناهگاهی که ملاقات می‌کند، نشان داده شده است. به عنوان نمونه وسیله‌ی امدادی ۳ از انبار ۸ حرکت خود را آغاز کرده و سپس در منطقه‌ی حادثه‌دیده‌ی ۳، ۲۰ نفر را پس از گذشت ۱۰ دقیقه از لحظه‌ی شروع حرکت، سوار کرده و به پناهگاه ۱ رفته و در آن‌جا ۱۰ نفر را پس از گذشت ۳۰ دقیقه پیاده کرده و در نهایت پس از گذشت ۷۵ دقیقه به پناهگاه ۲ می‌رسد و ۱۰ نفر را در این پناهگاه پیاده می‌کند.



شکل ۲. نتایج حل مدل به صورت گرافیکی

وسایل امدادی و ... به عنوان نوآوری در نظر گرفته شدند که این عوامل بر روی زمان ارائه‌ی خدمات در فاز پاسخ به فاجعه اثر می‌گذارد. بنابراین در ادامه سه تحلیل حساسیت بر روی امکان

۶. آنالیز حساسیت

همان‌طور که در قسمت‌های قبل بیان گردید فرضیاتی مانند امکان تراکنش بین پناهگاه‌ها، محدودیت پنجره‌ی زمانی، ظرفیت محدود

۶-۲. اثر ظرفیت وسایل امدادی بر روی کل زمان ارائه- خدمات

یکی از تصمیمات کلیدی قبل از وقوع فاجعه، انتخاب وسایل با ظرفیت مناسب برای امداد رسانی بازماندگان در فاز پاسخ است که ظرفیت وسایل امدادی روی زمان تخلیه‌ی افراد به پناهگاه‌ها تأثیر گذار است. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود کل زمان رسیدن وسایل امدادی به مناطق حادثه دیده و پناهگاه‌ها با افزایش ظرفیت وسایل، کاهش می‌یابد به گونه‌ای که با افزایش ظرفیت وسایل از ۲۰ نفر به ۲۴ نفر، کل زمان ارائه‌ی خدمات ۴۰ دقیقه کاهش می‌یابد ولی اگر از وسایلی با ظرفیت ۲۸ نفر استفاده گردد کل زمان رسیدن وسایل امدادی به مناطق آسیب دیده و پناهگاه‌ها ۶۰ دقیقه کاهش یافته و با صرف هزینه و بهره‌گیری از وسایلی با ظرفیت بیشتر یا مساوی ۳۰ نفر مانند اتوبوس و ... کل زمان ارائه‌ی خدمات ۱۷۰ دقیقه کاهش می‌یابد. بنابراین با انتخاب مجموعه‌ای از وسایل تخلیه‌ی ناهمگن با ظرفیت بیشتر یا مساوی ۳۰ نفر حداقل زمان برای خدمت‌دهی به دست می‌آید. همچنین مدل برای ظرفیت‌های کمتر از مقدار ۲۰ نفر، جواب موجه ندارد.

حرکت وسایل امدادی بین پناهگاه‌ها، ظرفیت وسایل تخلیه و ظرفیت پناهگاه‌ها انجام می‌گیرد.

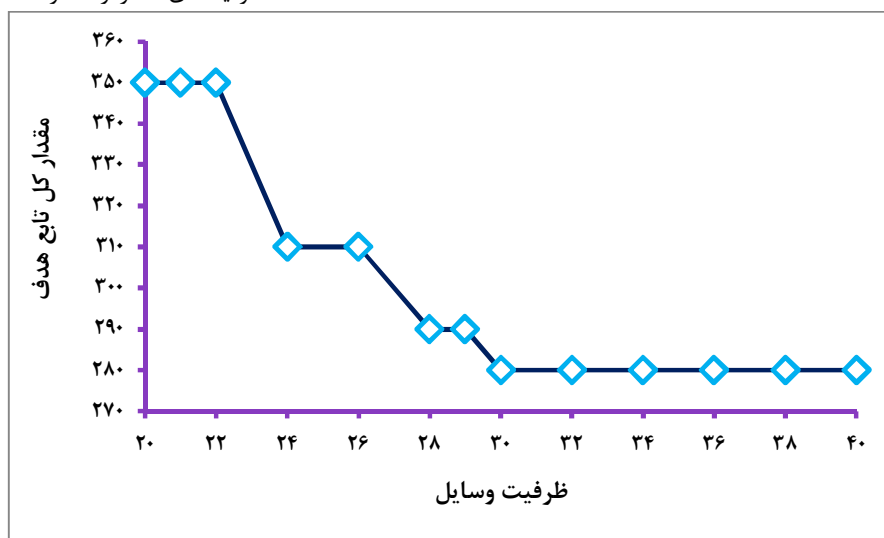
۶-۱. اثر تراکنش بین پناهگاه‌ها بر روی شدنی بودن مسأله مسأله‌ی مطرح شده در قسمت ۵ در دو حالت حل می‌شود که این حالات عبارتند از:

۱. عدم امکان حرکت وسایل امدادی بین پناهگاه‌ها

۲. امکان حرکت وسایل بین پناهگاه‌ها

در حالت اول مسأله جواب شدنی ندارد چون به علت محدودیت تعداد و ظرفیت وسایل و ظرفیت پناهگاه‌ها در حالتی که جریان بین پناهگاه‌ها وجود نداشته باشد امکان تخلیه‌ی تمام افراد از مناطق حادثه دیده‌ی مختلف وجود ندارد ولی در حالت دوم امکان حرکت وسایل بین پناهگاه‌ها

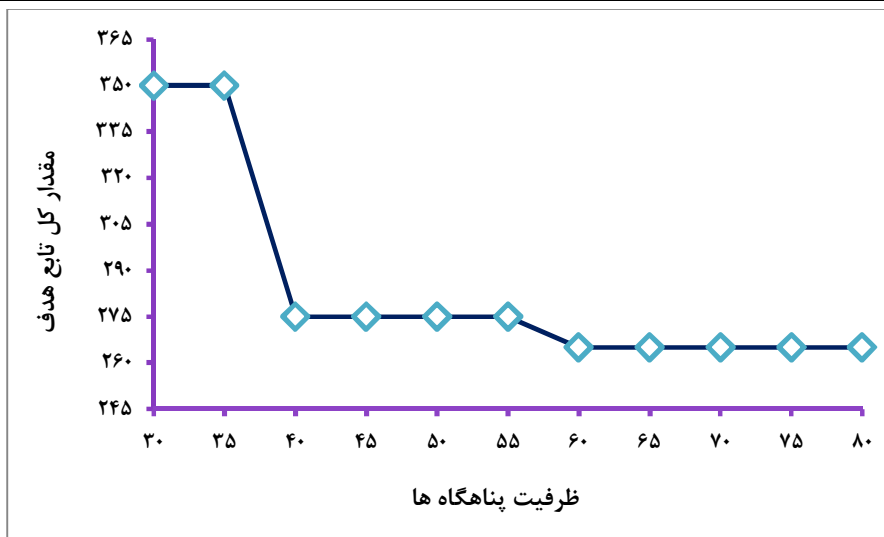
سبب می‌شود که مسأله جواب شدنی داشته باشد و همه‌ی افراد از مناطق آسیب دیده تخلیه شوند و جواب‌های حاصل از آن در قسمت ۲-۵ بیان شدند.



شکل ۳. نمودار آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییر ظرفیت وسایل امدادی

مناطق آسیب‌دیده و پناهگاه‌ها ۳۵۰ دقیقه است ولی اگر ظرفیت پناهگاه‌ها از ۳۰ نفر به ۴۰ نفر، افزایش یابد کل زمان ارائه‌ی خدمات ۷۵ دقیقه کاهش یافته و با صرف هزینه و بهره‌گیری از پناهگاه‌هایی با ظرفیت بیشتر یا مساوی ۶۰ نفر، از کل زمان سرویس‌دهی ۹۰ دقیقه کاسته می‌شود. همچنین مدل برای ظرفیت‌های کمتر از مقدار ۳۰ نفر، جواب موجه ندارد.

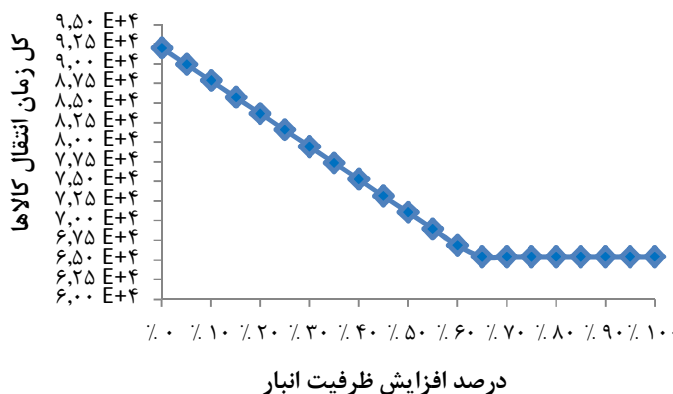
۶-۳. اثر ظرفیت پناهگاه‌ها بر روی کل زمان ارائه‌ی خدمات ظرفیت پناهگاه‌ها روی تصمیم‌گیری‌های مدیریت فاجعه تأثیر گذار است. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود کل زمان ارائه‌ی خدمات به بازماندگان در فاز پاسخ به ازای تغییر ظرفیت پناهگاه‌ها تغییر می‌کند. اگر ظرفیت پناهگاه‌ها به گونه‌ای انتخاب شوند که ظرفیت هر کدام از آن‌ها ۳۰ نفر باشد کل زمان رسیدن وسایل به



شکل ۴. نمودار آنالیز حساسیت مدل نسبت به تغییر ظرفیت پناهگاه‌ها

مثال تعداد ۱۶۵۳۵ نفر از افراد مجروح توسط آمبولانس از نقطه‌ی تقاضای خیابان ۱۹۲ شرقی به نقطه‌ی انتقال شرکت واحد منتقل می‌شوند که با توجه به این‌که حجم جریانی از نقطه‌ی انتقال شرکت واحد به بیمارستان‌ها وجود ندارد، در همان مکان نگهداری می‌گردند.

در جدول ۳ حجم جریان افراد مجروح از نقاط تقاضا به بیمارستان‌ها که به وسیله‌ی آمبولانس و به طور مستقیم اعزام می‌شوند، نشان داده شده است. به عنوان نمونه تعداد ۱۷۰۰۰ نفر از افراد مجروح از نقطه‌ی تقاضای خیابان ۱۹۲ شرقی به وسیله‌ی آمبولانس و به طور مستقیم به بیمارستان تهران پارس منتقل می‌شوند. در جدول ۴ حجم جریان افراد مجروح از نقاط تقاضا به نقاط انتقال که توسط آمبولانس منتقل می‌شوند، آورده شده است. به عنوان



شکل ۵. نمودار آنالیز حساسیت مدل نسبت به ظرفیت انبارها

خطی عدد صحیح مختلط برای مسیریابی و زمان‌بندی همزمان حرکت وسایل امدادی برای تخلیه‌ی افراد سالم از مناطق آسیب دیده به پناهگاه‌ها با در نظر گرفتن جریان بین پناهگاه‌ها ارائه گردیده تا تصمیم‌گیران حوزه‌ی مدیریت فاجعه را در جهت یک برنامه‌ی منسجم یاری داده و بهره‌وری تصمیمات اتخاذ شده در فاز پاسخ را افزایش دهد.

### ۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

یکی از استراتژی‌های مهم و اساسی در امداد رسانی به منظور بهبود عملکرد و کاهش زمان تأخیر، تلاش در بخش تخلیه‌ی افراد سالم از مناطق حادثه دیده به پناهگاه‌ها است. با انتقال به موقع افراد سالم به پناهگاه‌ها می‌توان به میزان قابل توجهی از شدت آسیب‌های احتمالی کاست که اغلب به این فعالیت امدادی توجه خاصی نمی‌شود. بنابراین در این مقاله یک مدل جدید برنامه‌ریزی ریاضی

- [3] Eshghi K, Najafi M. "A Logistics Planning Model to Improve the Response Phase of Earthquake", *IJIEPM*, (2013), Vol. 23, No.4, pp. 401-416.
- [4] Jabalameli M.S., Bozorgi Amiri A., & Heidari M., "A multi-objective stochastic programming for emergency logistics problem", *IJIEPM*, (2011), Vol. 22, pp. 66-76.
- [5] Ngueveu S.U., Prins C., & Calvo R. W., "An effective memetic algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, (2010), Vol. 37, pp. 1877-1885.
- [6] Bish D.R., "Planning for a bus-based evacuation" *OR spectrum*, (2011), Vol. 33, pp. 629-654.
- [7] Abdelgawad H., & Abdulhai B., "Large-scale evacuation using subway and bus transit: approach and application in city of Toronto", *Journal of Transportation Engineering*, (2011), Vol. 138, pp. 1215-1232.
- [8] Hamed M., Haghani A., & Yang S., "Reliable transportation of humanitarian supplies in disaster response: model and heuristic", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, (2012), Vol. 54, pp. 1205-1219.
- [9] Ribeiro G.M., & Laporte G., "An adaptive large neighborhood search heuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, (2012), Vol. 39, pp. 728-735.
- [10] Wohlgemuth S., Oloruntoba R., & Clausen U., "Dynamic vehicle routing with anticipation in disaster relief", *Socio-Economic Planning Sciences*, (2012), Vol. 46, pp. 261-271.
- [11] Wex F., Schryen G. & Neumann D., "Operational emergency response under informational uncertainty: a fuzzy optimization model for scheduling and allocating rescue units", (2012).
- مجموعه‌ای از ویژگی‌های مسائل مسیریابی مانند امکان خدمت‌دهی به افراد سالم در هر منطقه‌ی حادثه‌دیده توسط چندین وسیله‌ی امدادی و انبارهای چندگانه برای شروع حرکت وسایل در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است که این محدودیت‌ها سبب می‌شود شرایط مسأله تا حد امکان منطبق بر شرایط دنیای واقعی گردد. از طرفی یکی از مسائل مهم از دیدگاه تصمیم‌گیران حوزه‌ی مدیریت فاجعه، تخلیه‌ی افراد سالم مستقر در مناطق آسیب‌دیده در زودترین زمان ممکن و از طریق انتخاب مسیرهای کارا با رعایت عدالت است. که برای رسیدن به این هدف، در مدل از محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی استفاده شده است. برای این که مسأله به مسأله‌ی دنیای واقعی نزدیک‌تر شود، ناوگان ناهمگن برای وسایل امدادی، محدودیت ظرفیت برای پناهگاه‌ها و محدودیت ظرفیت برای وسایل امدادی در نظر گرفته شده تا بتوان فجایع را بهتر مدیریت کرد.
- به منظور اعتبار سنجی مدل پیشنهادی، مدل بر روی یک مثال تصادفی اجرا و حل گردید و برای کمک به تصمیم‌گیران برای کاهش کل زمان خدمت‌دهی و بهره‌گیری بیشتر از امکانات موجود، در این مقاله با تحلیل حساسیت بر روی اثر تراکنش بین پناهگاه‌ها، ظرفیت وسایل امدادی و ظرفیت پناهگاه‌ها، بهترین مقدار برای این پارامترها تعیین شده‌اند تا با توجه به شرایط، مدیران بهترین تصمیمات را اتخاذ کنند.
- برای تحقیقات آتی می‌توان موارد زیر را پیشنهاد نمود: ۱- در نظر گرفتن مدهای حمل و نقل زمینی و هوایی برای امداد رسانی در فاز پاسخ به فاجعه جهت تخلیه‌ی اضطراری افراد از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها در سریع‌ترین زمان ممکن ۲- استفاده از روش‌های فرابابتکاری برای حل مدل در ابعاد بزرگ ۳- اجرای مدل پیشنهادی بر روی مسائل و شبکه‌های دنیای واقعی.

#### پی‌نوشت

1. Split delivery
2. Multi-depot
3. Heterogeneous vehicles
4. Time window

#### مراجع

- [1] Rezaei-Malek M., & Tavakkoli-Moghaddam R., "Robust humanitarian relief logistics network planning", *Uncertain Supply Chain Management*, (2014), Vol. 2, pp. 73-96.
- [2] Caunhye A. M., Nie X., & Pokharel S., "Optimization models in emergency logistics: A literature review", *Socio-Economic Planning Sciences*, (2012), Vol. 46, pp. 4-13.

- natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units”, *European Journal of Operational Research*, (2014), Vol. 235, pp. 697-708.
- [21] Bozorgi Amiri A., Sabouhi F., Tavakoli Z.S., & Moradhaseli N., “A location-allocation model for evacuation and relief distribution in response phase”, *IJIEPM*, Accepted.
- [12] Gan X., Wang Y., Yu Y., & Niu B., “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*, (2013), pp. 614-623.
- [13] Ke L., & Feng Z., “A two-phase metaheuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem”, *Computers & Operations Research*, (2013), Vol. 40, pp. 633-638.
- [14] Ozsoydan F.B., & Sipahioglu A., “Heuristic solution approaches for the cumulative capacitated vehicle routing problem”, *Optimization*, (2013), Vol. 62, pp. 1321-1340.
- [15] Lee K., Lei L., Pinedo M., & Wang S., “Operations scheduling with multiple resources and transportation considerations”, *International Journal of Production Research*, (2013), Vol. 51, pp. 7071-7090.
- [16] Lee K., Lei L., & Dong, H., “A Solvable Case of Emergency Supply Chain Scheduling Problem with Multi-stage Lead Times”, *Journal of Supply Chain and Operations Management*, (2013), Vol. 11, No. 2, pp. 30.
- [17] Pramudita A., Taniguchi E., & Qureshi A.G., “Location and Routing Problems of Debris Collection Operation after Disasters with Realistic Case Study”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, (2014), Vol. 125, pp. 445-458.
- [18] Özdamar L., Aksu D.T., & Ergüneş B., “Coordinating debris cleanup operations in post disaster road networks”, *Socio-Economic Planning Sciences*, (2014), Vol. 48, pp. 249-262.
- [19] Gan X., Wang Y., Kuang J., Yu Y., & Niu B., “Emergency Vehicle Scheduling Problem with Time Utility in Disasters”, *Mathematical Problems in Engineering*, (2014).
- [20] Wex F., Schryen G., Feuerriegel S., & Neumann D., “Emergency response in