پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره 4، شماره 1، بهار 1398

مدل ریاضی دوهدفه برای تخلیه اضطراری با در نظر گرفتن ناوگان ناهمگن وسایل

فاطمه صبوحی[1]، علی بزرگی امیری[2*]

1- دانشجوی دکترای مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
2- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

دریافت: 1397/6/7 پذیرش: 1397/9/20

چکیده

برنامه‌ریزی برای تخلیه افراد یکی از مسائل چالش‌برانگیز در زمان وقوع بحران است. ازآنجایی‌که وسایل امدادی جز یکی از منابع محدود در زمان بحران به‌حساب می‌آیند، استفاده‌ی مؤثر از آن‌ها، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله، یک مدل دوهدفه مسیریابی و زمان‌بندی هم‌زمان وسایل امدادی جهت تخلیه افراد از مناطق آسیب‌دیده به پناهگاه‌ها پیشنهاد شده است. دو هدف در نظر گرفته شده در مدل شامل حداقل‌کردن کل زمان حمل‌ونقل و حداکثرکردن قابلیت اطمینان مسیرها است. برای حل مدل پیشنهادی از روش محدودیت اپسیلون توسعه‌یافته استفاده شده است. در مدل ارائه‌شده، امکان خدمت‌دهی به هر منطقه آسیب‌دیده توسط چندین وسیله، ناوگان ناهمگن از وسایل امدادی و محدودیت ظرفیت برای پناهگاه‌ها در نظر گرفته شده است. برای نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی، مدل بر روی یک مثال تصادفی اجرا و نتایج محاسباتی ارائه شده است.

واژگان کلیدی: ناوگان ناهمگن وسایل؛ بهینه‌سازی دوهدفه؛ مسیریابی و زمان‌بندی؛ تخلیه اضطراری؛ تحویل جزئی.

---

* نویسنده مسئول مقاله: E-mail: Alibozorgi@ut.ac.ir

1- مقدمه

مسئله مدیریت بحران، یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در سال‌های اخیر در تمامی کشورها به آن پرداخته شده است. در واقع، مدیریت بحران به مجموعه‌ای از فرآیندها گفته می‌شود که برای جلوگیری یا کاهش اثرات بحران قبل، حین و پس از وقوع بحران انجام می‌گیرند [1، صص 1611-1637]. مدیریت بحران شامل چهار فاز اصلی «پیشگیری»، «آمادگی»، «پاسخ» و «بازیابی و بهبود» است [2، صص 113-129]. فاز پاسخ، مجموعه عملیات امدادرسانی در زمان وقوع بحران برای کاهش آسیب‌ها و خسارات را شامل می‌شود. ازجمله‌ی عملیات امدادی در فاز پاسخ به بحران، تخلیه افراد از مناطق آسیب‌دیده به مکان‌های امن است. مسیریابی و زمان‌بندی کارآمد وسایل حمل‌ونقل، سبب کاهش تلفات انسانی می‌شود. در سال‌های اخیر، مطالعات فراوانی در زمینه عملیات امدادرسانی در فاز پاسخ به بحران انجام شده است اما مسیریابی و زمان‌بندی هم‌زمان وسایل امدادی برای تخلیه‌ی افراد از مناطق حادثه‌دیده، به‌عنوان حوزه جدیدی در تحقیقات شناخته شده است. در ادامه مطالعات صورت گرفته در دو بخش توزیع اقلام امدادی و تخلیه افراد در فاز پاسخ به بحران بیان می‌شوند.

نولز و همکاران یک مدل چندهدفه مسیریابی برای توزیع اقلام امدادی به مناطق حادثه‌دیده معرفی کردند. اهداف در نظر گرفته شده شامل حداقل‌کردن حداکثر ریسک، حداقل‌کردن کل زمان حمل‌ونقل و حداقل‌کردن فاصله بین مراکز جمعیت تا تسهیلات برای گرفتن خدمت با درنظر گرفتن شعاع پوشش است [3، صص543-569]. حامدی و همکاران یک مدل چندهدفه مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبارهای اقلام امدادی به پناهگاه‌ها با در نظر گرفتن پنجره زمانی ارائه دادند و مسئله را به شکل چندانباره و با امکان برآورد تقاضای هر پناهگاه توسط چندین وسیله، در نظر گرفته‌اند. اهداف در نظر گرفته شده شامل حداقل‌کردن کل زمان خدمت‌دهی و هزینه عدم قابلیت اطمینان است [4، صص1205-1219]. وهلگمیوس و همکاران یک مدل مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از انبار اقلام امدادی به نقاط حادثه‌دیده با در نظر گرفتن پنجره زمانی ارائه دادند [5، صص261-271]. راس و گیوتجهر مدلی چندهدفه و چندانباره مسیریابی و مکان‌یابی برای توزیع اقلام امدادی از مراکز امدادرسانی به نقاط حادثه‌دیده ارائه دادند. اهداف در نظر گرفته شده شامل حداقل‌کردن هزینه راه‌اندازی

تسهیلات، حداقل‌کردن هزینه‌های حمل‌ونقل و انبارداری، و حداکثر کردن ارضای تقاضا است [6، صص25-39]. وانگ یک مدل چندهدفه مسیریابی و مکان‌یابی برای توزیع اقلام از مراکز توزیع به مناطق حادثه‌دیده ارائه دادند. مسئله را به شکل چندمحصولی، چندانباره و با امکان ارائه خدمت به هر نقطه حادثه‌دیده توسط چندین وسیله معرفی کردند. اهداف در نظر گرفته شده شامل حداقل‌کردن کل هزینه مکان‌یابی و سفر وسایل، حداکثر کردن حداقل قابلیت اطمینان مسیر و حداقل‌کردن حداکثر زمان سفر وسایل است [7، صص160-179]. وکس و همکاران یک مدل مسیریابی برای عملیات جستجو و نجات در نقاط حادثه‌دیده با در نظر گرفتن ناوگانی ناهمگن از وسایل امدادی مطرح کردند [8، صص697-708]. گان و همکاران یک مدل مسیریابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام امدادی از یک مرکز امدادرسانی به نقاط حادثه‌دیده با در نظر گرفتن تابع مطلوبیت و محدودیت پنجره‌ی زمانی، ارائه دادند [9، صص 1-7]. احمدی و همکاران یک مدل غیرقطعی مسیریابی و مکان‌یابی برای توزیع اقلام از مراکز توزیع به مناطق حادثه‌دیده معرفی کردند. مسئله را به شکل چندمحصولی و چندانباره در نظر گرفتند [10، صص145-163]. مشرف جوادی و لی یک مدل مسیریابی، مکان‌یابی و زمان‌بندی برای توزیع اقلام از مراکز توزیع به مناطق حادثه‌دیده ارائه دادند. مسئله را به شکل چندانباره و با ناوگان ناهمگن از وسایل در نظر گرفتند [11، صص 604-619].

در ادامه کارهایی که در زمینه‌ی تخلیه افراد از مناطق حادثه‌دیده در فاز پاسخ انجام شده است اشاره می‌شود.

بیش یک مدل مسیریابی برای تخلیه افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها ارائه داد و مسئله را به شکل چنددوره‌ای، چندانباره و با امکان برآورد تقاضای هر نقطه حادثه‌دیده توسط چندین وسیله در نظر گرفت [12، صص629-654]. آبدلگاواد و آبدلهای در سال 2011 یک مدل مسیریابی و زمان‌بندی برای عملیات تخلیه افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها معرفی کردند و مسئله را به شکل چندانباره، با ناوگان ناهمگن از وسایل و امکان برآورد تقاضای هر نقطه حادثه‌دیده توسط چندین وسیله، در نظر گرفته‌اند. همچنین از محدودیت پنجره زمانی، برای برقراری عدالت در توزیع خدمات استفاده کرده‌اند [13، صص1215-1232]. ژئرژیک و همکاران در سال 2014 یک مدل مسیریابی و مکان‌یابی برای انتقال افراد از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها ارائه دادند که مسئله را به شکل چند دوره‌ای، چندانباره، با در نظر گرفتن

چندین مد حمل و نقل و امکان خدمت‌دهی به هر منطقه‌ی آسیب‌دیده توسط چندین وسیله در نظر گرفته‌اند [14، صص82-97]. تالاریکو و همکاران در سال 2015 یک مدل مسیریابی و زمان‌بندی برای انتقال مصدومان از مناطق حادثه‌دیده به بیمارستان‌ها ارائه دادند و مسئله را به شکل چندانباره و با در نظر گرفتن محدودیت پنجره زمانی در نظر گرفتند [15، صص120-133]. در همین سال، پوررحمانی و همکاران یک مدل غیرقطعی مسیریابی برای انتقال افراد از پناهگاه‌های محلی به پناهگاه‌های منطقه‌ای معرفی کردند که مسئله را به شکل چند دوره‌ای، چندانباره و با امکان خدمت‌دهی به هر پناهگاه محلی توسط چندین وسیله در نظر گرفته‌اند [16].

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

- اکثر مقالات، کمتر تصمیمات مسیریابی و زمان‌بندی هم‌زمان را در فاز پاسخ به بحران و مخصوصاً در حوزه تخلیه اضطراری افراد از محل حادثه، بررسی کرده‌اند. همچنین اکثر مقالات مسیریابی و زمان‌بندی در فاز پاسخ به بحران، دوسطحی در نظر گرفته شده‌اند.
- در مقالات مسیریابی، به ویژگی‌هایی از قبیل امکان ارائه خدمت به هر گره توسط چندین وسیله حمل‌ونقل (تحویل جزئی) و ناوگان ناهمگن وسایل کمتر توجه شده است.
- اکثر مقالات تک‌هدفه بوده و قابلیت اطمینان مسیرها را در نظر نگرفته‌اند.
- شبکه‌های امداد در نظر گرفته شده بیشتر مربوط به بحث توزیع اقلام امدادی در فاز پاسخ به بحران است و شبکه‌ی تخلیه اضطراری کمتر بررسی شده است.

در این مقاله، یک مدل جدید دوهدفه مسیریابی و زمان‌بندی هم‌زمان برای تخلیه افراد سالم از مناطق حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها معرفی شده است. اهداف مدل پیشنهادی حداقل‌کردن کل زمان حمل‌ونقل و حداکثرکردن قابلیت اطمینان مسیرها است. از روش محدودیت اپسیلون توسعه‌یافته برای حل مدل استفاده شده است. در فرآیند تخلیه، امکان خدمت‌دهی به هر منطقه حادثه‌دیده توسط چندین وسیله در نظر گرفته شده و محدودیت ظرفیت برای ناوگان ناهمگن وسایل امدادی و پناهگاه‌ها ارائه شده است.

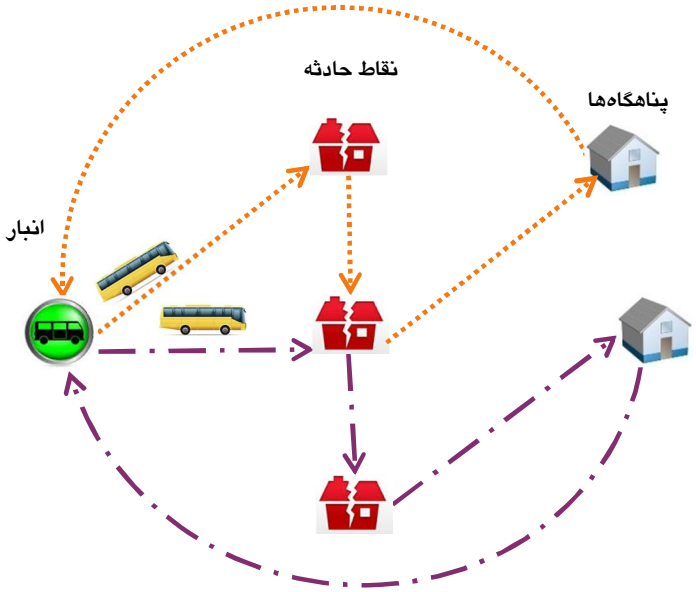
در ادامه، ساختار مقاله به‌صورت زیر تنظیم شده است: ابتدا شبکه‌ی در نظر گرفته شده، تشریح و سپس به مدل‌سازی ریاضی مسئله پرداخته می‌شود. بعد از توضیح روش حل مورداستفاده، نتایج حل مدل و تحلیل حساسیت‌های مختلف بر روی یک مثال عددی گزارش می‌شود. در انتها، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی مطرح می‌شوند.

2- تعریف مسئله

در این مقاله، انتقال افراد سالم از مناطق آسیب‌دیده به پناهگاه‌ها مطابق با شکل (1) در نظر گرفته شده است. بدین‌صورت که هر وسیله امدادی مانند مینی‌بوس، اتوبوس و... در صورت اعزام، حرکت خود را از انبار آغاز کرده و سپس با در نظر گرفتن ظرفیت وسیله، ظرفیت پناهگاه و میزان قابلیت اطمینان مسیرها به سوار کردن افراد از نقاط حادثه‌دیده مختلف پرداخته و بهترین مسیر را برای انتقال افراد به پناهگاه‌ها انتخاب می‌کند و سپس بعد از اتمام عملیات، وسیله دوباره به مکان شروع حرکتش باز می‌گردد.

با توجه به شبکه معرفی‌شده، مکان انبار وسایل، مناطق حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها شناخته شده است. وسایلی که برای امدادرسانی در نظر گرفته شده‌اند، ناهمگن و با ظرفیت محدود هستند. پناهگاه‌ها برای اسکان افراد دارای ظرفیت محدود بوده و هر وسیله تنها می‌تواند افراد را در یک پناهگاه پیاده نماید. در فرآیند تخلیه افراد، برای این‌که عملیات به بهترین شکل ممکن انجام شود، امکان ارائه خدمت به هر منطقه حادثه‌دیده توسط چندین وسیله امدادی در نظر گرفته شده است. زمان‌های حمل‌ونقل بین تمام نقاط شبکه به‌صورت سیمتریک بوده و از رابطه نامساوی مثلثی پیروی می‌کند. قابلیت اطمینان هر مسیر به شکل عددی در بازه صفر تا یک در نظر گرفته شده است که هر چه این عدد به یک نزدیک‌تر باشد، قابلیت اطمینان مسیر بیشتر است.

در این مقاله با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوهدفه به تعیین هم‌زمان مسیر و زمان حرکت وسایل امدادی پرداخته می‌شود که اهداف شامل کاهش کل زمان حمل‌ونقل و حداکثرکردن قابلیت اطمینان مسیرها است.



شکل 1عملیات تخلیه اضطراری

3- مدل‌سازی مسئله

در این بخش مسئله تشریح شده در قسمت قبل را به‌صورت ریاضی مدل‌سازی می‌کنیم.

مجموعه‌ها و زیروندها (اندیس‌ها)

E	مجموعه نقاط حادثه‌دیده
S	مجموعه پناهگاه‌ها
V	مجموعه وسایل که مشخص می‌شود با $\forall v \in V$
D	انبار وسایل
N	مجموعه کل نقاط (اجتماع سه مجموعه D، E و S) که مشخص می‌شود با $i,j \in N$

پارامترها

c_{ij}	زمان حمل‌ونقل از گره $i \in N$ به گره $j \in N$

r_{ij} قابلیت اطمینان مسیر بین گره $i \in N$ و گره $j \in N$

d_i مقدار تقاضای نقطه حادثه‌دیده $i \in N$

Cap_i ظرفیت پناهگاه $i \in S$

Cap_v ظرفیت وسیله $\forall v \in V$

Dt_i زمان ارائه خدمت در گره $i \in S \cup E$

M_{big} مقدار خیلی بزرگ

متغیرهای تصمیم

X_{vij} برابر یک است، اگر وسیله $\forall v \in V$ 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 $\forall v \in V$ به گره $i \in S \cup E$ تخصیص داده شود؛ در غیر این صورت، برابر صفر است.

Z_v برابر یک است، اگر وسیله $\forall v \in V$ اعزام شود؛ در غیر این صورت، برابر صفر است.

Q_{vi} تعداد افرادی که در نقطه حادثه‌دیده $i \in E$ سوار وسیله $\forall v \in V$ می‌شوند یا تعداد افرادی که از وسیله $\forall v \in V$ در پناهگاه $i \in S$ پیاده می‌شوند.

T_{vi} زمان رسیدن وسیله $\forall v \in V$ به گره $i \in N$.

توابع هدف و محدودیت‌ها

$$Min \sum_{v \in V} \sum_{i \in D \cup E} \sum_{j \in S \cup E} c_{ij} \; X_{vij} \qquad (1)$$

$$Max \sum_{v \in V} \sum_{i \in D \cup E} \sum_{j \in S \cup E} r_{ij} \; X_{vij} \qquad (2)$$

$$\sum_{i\in D}\sum_{j\in E} X_{vij} = Z_v \qquad \forall v \in V \qquad (3)$$

$$\sum_{i\in S}\sum_{j\in D} X_{vij} = Z_v \qquad \forall v \in V \qquad (4)$$

$$\sum_{i\in D\cup E} X_{vij} = \sum_{i\in S\cup E} X_{vji} \qquad \forall j \in E, \forall v \in V \qquad (5)$$

$$\sum_{i\in E} X_{vij} = \sum_{i\in D} X_{vji} \qquad \forall j \in S, \forall v \in V \qquad (6)$$

$$\sum_{v\in V} Q_{vi} = d_i \qquad \forall i \in E \qquad (7)$$

$$Cap_v Y_{vi} \geq Q_{vi} \qquad \forall i \in S \cup E, \forall v \in V \qquad (8)$$

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

$$\sum_{j\in E} X_{vji} = Y_{vi} \qquad \forall i \in S, \forall v \in V \qquad (10)$$

$$X_{vii} = 0 \qquad \forall i \in N, \forall v \in V \qquad (11)$$

$$\sum_{v\in V} Q_{vi} \leq Cap_i \qquad \forall i \in S \qquad (12)$$

$$\sum_{i\in E} Q_{vi} \le Cap_v\, Z_v \qquad \forall v \in V \qquad (13)$$

$$\sum_{i\in S} Q_{vi} = \sum_{i\in E} Q_{vi} \qquad \forall v \in V \qquad (14)$$

$$\sum_{v\in V} Z_v \le |V| \qquad (15)$$

$$T_{vi} = 0 \qquad \forall i \in D, \forall v \in V \qquad (16)$$

$$(T_{vi} + Dt_i + c_{ij}) - M_{big}(1 - X_{vij}) \le T_{vj} \qquad \forall j \in E, \forall v \in V, \forall i \in D \cup E \qquad (17)$$

$$(T_{vi} + Dt_i + c_{ij}) - M_{big}(1 - X_{vij}) \le T_{vj} \qquad \forall j \in S, \forall v \in V, \forall i \in E \qquad (18)$$

$$X_{vii} \in \{0,1\} \qquad \forall j \in N, \forall v \in V, \forall j \in N \qquad (19)$$

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

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

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

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

تابع هدف (1) کل زمان حمل‌ونقل را حداقل می‌کند. تابع هدف (2) قابلیت اطمینان مسیرها را حداکثر می‌کند. محدودیت (3) بیانگر این است که در صورت اعزام وسیله، آن وسیله از انبار به سمت یکی از نقاط حادثه‌دیده شروع به حرکت می‌کند. محدودیت (4) بیانگر این است که در صورت اعزام وسیله امدادی، آن وسیله بعد از عملیات تخلیه افراد در پناهگاه مربوطه، مجدداً به انبار برمی‌گردد. محدودیت (5) نشان‌دهنده محدودیت حفاظت جریان در هر نقطه حادثه‌دیده است. محدودیت (6) نشان‌دهنده محدودیت حفاظت جریان در هر پناهگاه است. محدودیت (7) بیان‌گر تخلیه تمام افراد هر منطقه‌ی آسیب‌دیده از محل حادثه است. محدودیت (8) نشان‌دهنده رابطه بین دو متغیر Q_{vi} و Y_{vi} در هر منطقه آسیب‌دیده و هر پناهگاه است. محدودیت (9) بیان‌کننده این است که اگر وسیله‌ای به یک منطقه حادثه‌دیده اختصاص یابد، قبل از آن منطقه فقط انبار یا یک منطقه حادثه‌دیده دیگری وجود دارد. محدودیت (10) بیانگر این است که اگر وسیله‌ای به یک پناهگاه اختصاص یابد، قبل از آن پناهگاه فقط یک منطقه حادثه‌دیده قرار گرفته است. محدودیت (11) از ایجاد حلقه در هر گره از شبکه جلوگیری می‌کند. محدودیت (12) نشان‌دهنده حداکثر ظرفیت هر پناهگاه برای اسکان افراد سالم است. محدودیت (13) بیان کننده حداکثر ظرفیت هر وسیله است. محدودیت (14) بیانگر این است که تعداد افرادی که از مناطق حادثه‌دیده مختلف به هر وسیله اختصاص می‌یابند، تنها به یک پناهگاه منتقل می‌شوند. محدودیت (15) نشان‌دهنده حداکثر تعداد وسایل در دسترس است. محدودیت (16) بیانگر این است که زمان شروع حرکت هر وسیله از انبار محل استقرارش، صفر در نظر گرفته می‌شود. محدودیت‌های (17) و (18) به ترتیب زمان رسیدن هر وسیله به هر منطقه حادثه‌دیده و هر پناهگاه را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (19) تا (23) نشان‌دهنده نوع متغیرها است.

4- رویکرد حل محدودیت اپسیلون توسعه‌یافته

تکنیک‌های مختلفی برای حل مسائل چندهدفه وجود دارد که یکی از آن‌ها، روش محدودیت اپسیلون توسعه‌یافته است.

مراحل روش محدودیت اپسیلون توسعه‌یافته عبارت‌اند از:

1. یکی از توابع هدف به‌عنوان تابع هدف اصلی انتخاب می‌شود؛
2. هر بار با در نظر گرفتن یکی از توابع هدف، مسئله حل‌شده و بهترین مقدار آن به دست می‌آید؛
3. با استفاده از روش لکسیکوگرافی، بدترین مقدار هر تابع هدف حساب می‌شود. بدین‌صورت که بهینه‌سازی توابع هدف فرعی با در نظر گرفتن محدودیتی که تابع هدف اصلی در بهترین مقدار خود باقی بماند، انجام شده و بدترین مقدار هر تابع هدف تعیین می‌شود و بازه بهترین و بدترین هر تابع هدف فرعی مشخص می‌شود؛

$$[f_i^{max}, f_i^{min}] \tag{24}$$

$$r_i = f_i^{max} - f_i^{min} \tag{25}$$

4. بازه بین دو مقدار بهینه توابع فرعی، به تعداد از قبل مشخص‌شده‌ای (q_i) تقسیم شده و بر اساس رابطه (26)، مقادیر مختلف برای پارامتر اپسیلون به دست می‌آید؛

$$\varepsilon_i^k = f_i^{max} - \frac{r_i}{q_i} * k \quad k = 0,1,\dots,q_i \tag{26}$$

5. هر بار با در نظر گرفتن هریک از مقادیر پارامتر اپسیلون، مسئله با تابع هدف اصلی حل می‌شود؛ بدین‌صورت که محدودیت‌های مربوط به توابع هدف فرعی با استفاده از متغیرهای کمبود یا اضافی به‌صورت محدودیت‌های مساوی تبدیل شده و با در نظر گرفتن ضریب دلتا بین 10^{-3} تا 10^{-6} برای این متغیرهای مازاد یا کمبود، مسئله حل شده و جواب‌های کارا تولید می‌شود. رابطه (27) روش محدودیت اپسیلون توسعه‌یافته را نشان می‌دهد.

$$\min\{f_1(x) - \delta^*(s_1 + s_2 + \cdots + s_p)\}$$
$$f_2(x) = \varepsilon_2 + s_2$$
$$f_2(x) = \varepsilon_3 + s_3$$
$$\cdot \quad (27)$$
$$\cdot$$
$$\cdot$$
$$f_p(x) = \varepsilon_p + s_p$$
$$x \in X,\ s_i \in R^+$$

5- شرح مثال عددی

در این بخش، یک مثال برای شبکه تخلیه اضطراری پیشنهاد شده معرفی می‌شود تا بتوان نتایج حل و کارایی مدل را بر روی آن نشان داد. شبکه در نظر گرفته شده شامل نه گره است که گره‌های 1و 2 پناهگاه‌ها، گره‌های 3، 4، 5، 6، 7 و 8 به‌عنوان مناطق حادثه‌دیده و گره 9 به‌عنوان انبار وسایل معرفی شده است. برای تخلیه افراد سالم حداکثر شش وسیله در دسترس است. در جداول 1 و 2 اطلاعات موردنیاز برای مثال معرفی‌شده، بیان شده است.

جدول 1 اطلاعات مربوط به گره‌های شبکه

گره‌ها	مقدار تقاضا (نفر)	ظرفیت (نفر)	زمان ارائه خدمت (دقیقه)
1	-	70	10
2	-	70	10
3	20	-	10
4	20	-	10
5	30	-	10
6	30	-	10
7	15	-	10
8	15	-	10

جدول 2 اطلاعات مربوط به گره‌های شبکه

شماره وسایل امدادی	ظرفیت هر وسیله امدادی (نفر)
1،2، 3 و 4	20
5 و 6	30

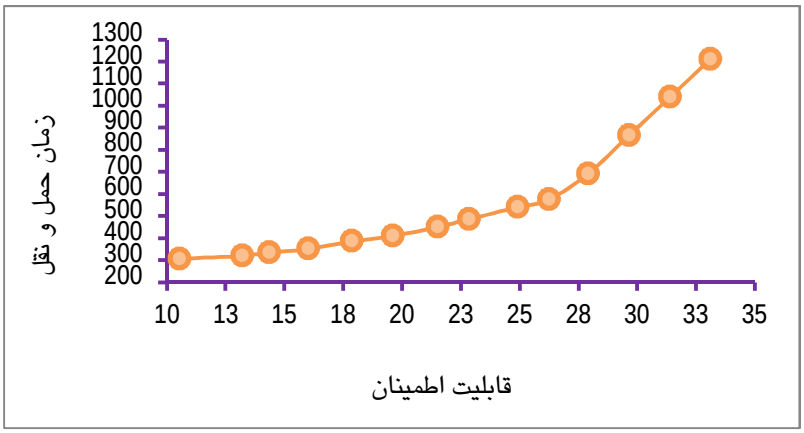
5-1- نتایج حل

در این بخش، مدل ریاضی ارائه‌شده با استفاده از روش محدودیت اپسیلون توسعه‌یافته بر روی داده‌های مثال عددی معرفی‌شده، اجرا و حل شده است. این کار به‌وسیله‌ی نرم‌افزار GAMS 23.0.2، سالور CPLEX بر روی رایانه‌ای با مشخصات Intel Core i7 4702MQ 2.20GHz up to 3.20 GHz and 6GB RAMDDR3 under Win Seven انجام گرفت. برای حل این مسئله با روش محدودیت اپسیلون توسعه‌یافته، تابع هدف زمان حمل‌ونقل به‌عنوان اولویت اول و تابع هدف قابلیت اطمینان به‌عنوان اولویت دوم در نظر گرفته شده است. جدول (3)، جدول بده-بستان است که بهترین و بدترین مقدار توابع هدف را نشان می‌دهد. فاصله میان بدترین و بهترین مقدار تابع هدف دوم به چهارده قسمت تقسیم شده است.

جدول 3 جدول بده-بستان میان توابع هدف

	تابع هدف زمان حمل‌ونقل	تابع هدف قابلیت اطمینان
تابع هدف زمان حمل‌ونقل	305	10,55
تابع هدف قابلیت اطمینان	1210	33,1

شکل (2)، تعارض میان دو تابع هدف زمان حمل‌ونقل و قابلیت اطمینان را نمایش می‌دهد.



شکل 2 تعارض میان توابع هدف

همان‌طور که در شکل (2) مشاهده می‌شود، ازآنجایی‌که تابع هدف زمان حمل‌ونقل از نوع کمینه‌سازی و تابع هدف قابلیت اطمینان از نوع بیشینه‌سازی است، شیب مثبت نمودار حاکی از وجود تعارض و فضای پارتویی قوی میان این دو تابع هدف است.

نتایج حاصل از حل مسئله، به ازای اپسیلون 7 در جدول (4) نمایش داده شده است.

جدول 4 نتایج حاصل از حل مدل

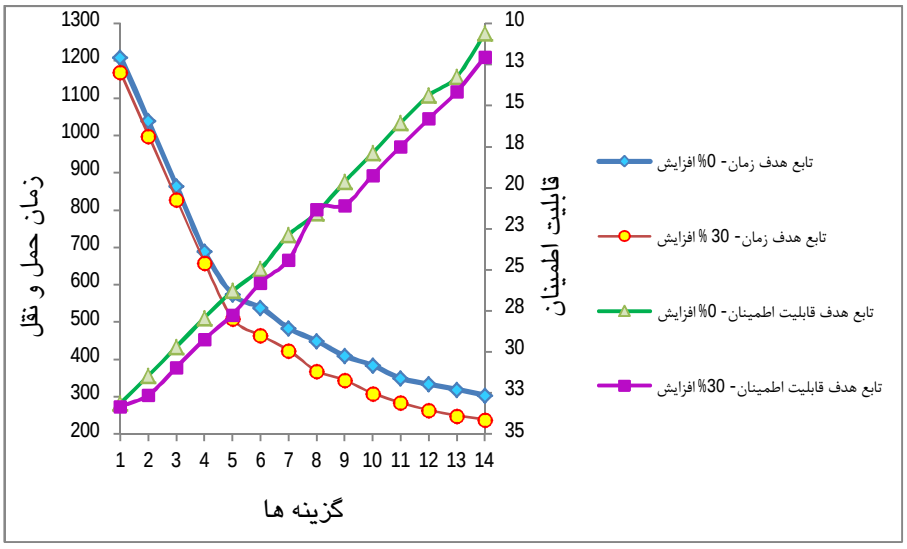
وسیله	مسیر	تعداد افرادی که در هر مسیر سوار یا پیاده می‌شوند (نفر)	زمان رسیدن به هر گره (دقیقه)
1	-5-8-3-4-7-6-1-9 9	0-1-1-1-1-1-15-20-0	0-20-50-70 -90-110-135-155-175
2	9-5-7-4-3-1-9	0-9-1-1-9-20-0	0-20-40-60-80-100-120
3	9-5-7-4-3-1-9	0-17-1-1-1-20-0	0-20-40-60-80-100-120
4	9-5-7-4-3-1-9	0-1-1-1-7-10-0	0-20-40-60-80-100-120
5	-5-8-3-4-7-6-2-9 9	0-1-1-1-3-10-14-30-0	0-20-50-70 -90-110-135-165-175
6	-5-7-4-3-8-6-2-9 9	0-1-1-13-1-13-1-30-0	0-20-40-60 -80-100-135-165-175

5-2- تحلیل حساسیت

ازجمله مهم‌ترین مزایای روش محدودیت اپسیلون توسعه‌یافته این است که به تصمیم‌گیران حوزه مدیریت بحران اجازه می‌دهد تا براساس شرایط حاکم بر سیستم، از میان جواب‌های خروجی روش مذکور، بهترین گزینه‌ای که مدنظرشان هست، انتخاب نمایند تا بهترین عملکرد در مرحله امدادرسانی در فاز پاسخ به بحران صورت گیرد. در این قسمت، از میان پارامترهای مدل، بر روی ظرفیت پناهگاه‌ها و ظرفیت وسایل امدادی تحلیل حساسیت انجام گرفته است. در این تحلیل نشان داده می‌شود با

درصد تغییر ظرفیت این تسهیلات، رفتار هر یک از توابع هدف نسبت به حالت بدون تغییر چگونه خواهد بود.

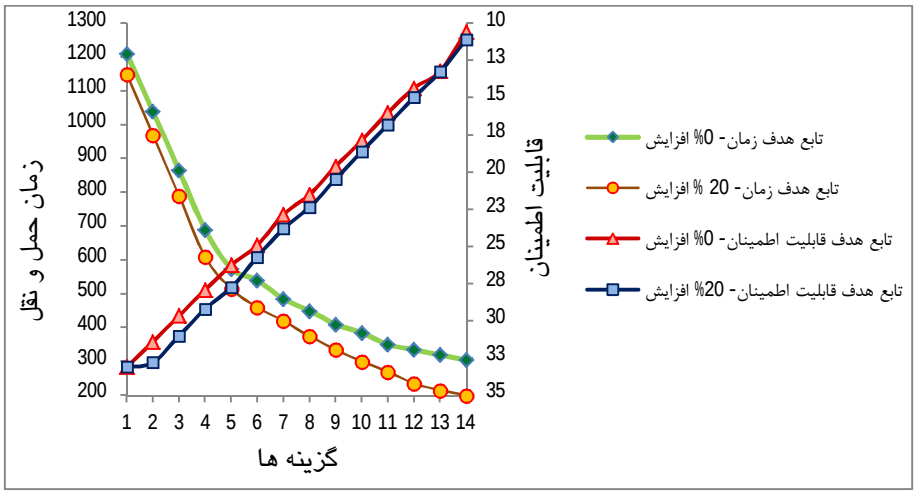
همان‌طور که در شکل (3) مشاهده می‌شود، در اکثر گزینه‌ها (مقادیر اپسیلون‌ها) تابع هدف زمان حمل‌ونقل با افزایش 30% ظرفیت پناهگاه‌ها نسبت به حالت بدون تغییر کاهش یافته است. همچنین در اکثر گزینه‌ها، تابع هدف قابلیت اطمینان مسیرها با افزایش 30 % ظرفیت پناهگاه‌ها نسبت به حالت بدون تغییر، افزایش یافته است؛ زیرا با افزایش ظرفیت پناهگاه‌ها، برای انتقال افراد به پناهگاه‌ها سعی می‌شود از مسیرهایی با قابلیت اطمینان بیشتر و نزدیک‌تر به پناهگاه‌ها استفاده شود.



شکل 3 تحلیل حساسیت توابع هدف به ازای تغییر در ظرفیت پناهگاه‌ها

در شکل (4) با افزایش 20% ظرفیت وسایل امدادی، زمان خدمت‌رسانی نسبت به حالت پایه (بدون تغییر ظرفیت) کاهش یافته است؛ چون این افزایش ظرفیت سبب می‌شود که وسایل تعداد افراد بیشتری را در زمان کمتری از محل حادثه‌دیده به پناهگاه‌ها انتقال دهند. همچنین با افزایش 20% ظرفیت وسایل، تابع هدف قابلیت اطمینان مسیرها نسبت به حالت بدون تغییر افزایش یافته است.

شکل‌های (3) و (4) به تصمیم‌گیران اجازه می‌دهد که بهترین تصمیم را برای تعیین میزان ظرفیت پناهگاه‌ها و وسایل امدادی و سطح مورد انتظارشان جهت ارضای اهداف، براساس امکانات موجود و معیارهای مورد نظرشان بگیرند.



شکل 4 تحلیل حساسیت توابع هدف به ازای تغییر در ظرفیت وسایل امدادی

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل دوهدفه برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله مسیریابی و زمان‌بندی هم‌زمان وسایل امدادی جهت تخلیه اضطراری افراد سالم از مناطق آسیب‌دیده به پناهگاه‌ها در فاز پاسخ به بحران ارائه شد. اهداف مدل پیشنهادی کمینه‌سازی کل زمان حمل‌ونقل و حداکثر کردن قابلیت اطمینان مسیرها است. برای حل مدل ارائه‌شده از روش محدودیت اپسیلون توسعه‌یافته استفاده شد. نوآوری این مقاله نسبت به مطالعات پیشین، در نظر گرفتن یک شبکه سه سطحی شامل انبار شروع حرکت وسایل امدادی، مناطق حادثه‌دیده و پناهگاه‌ها است. در عملیات تخلیه، امکان خدمت‌دهی به هر منطقه آسیب‌دیده توسط چندین وسیله امدادی و محدودیت ظرفیت برای ناوگان ناهمگن وسایل و پناهگاه‌ها لحاظ شده تا بتوان بحران را بهتر مدیریت کرد. در ادامه به‌منظور نمایش کاربردپذیری و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مدل بر روی یک مثال

تصادفی اجرا و نتایج حاصل از حل آن و تحلیل حساسیت بر روی ظرفیت پناهگاه‌ها و وسایل امدادی گزارش شد.

می‌توان موارد زیر را به‌عنوان موضوعات پیشنهادی جهت تحقیقات آینده مطرح نمود:

• در فاز پاسخ به بحران اختلال‌های مختلفی در تسهیلات و مسیرهای امدادرسانی اتفاق می‌افتد که بر کارایی و سرعت امدادرسانی به مناطق حادثه‌دیده تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین، طراحی شبکه لجستیک امداد با در نظر گرفتن انواع اختلال‌ها و ارائه راه‌حل‌های مناسب برای مقابله با آن، حائز اهمیت است.

• ارائه خدمات امدادی به بازماندگان حادثه با رعایت عدالت، همواره به‌عنوان یک موضوع مهم و اساسی مطرح بوده است که می‌توان با پیشنهاد اهداف یا تصمیماتی به این هدف دست یافت.

• استفاده از روش‌های فراابتکاری برای حل مدل ارائه‌شده در ابعاد بزرگ و بر روی یک مطالعه موردی پیشنهاد می‌شود تا بتوان از نتایج آن بهترین تصمیمات را اتخاذ کرد.

7- منابع

[1] S. Gupta, M. Starr, R. Zanjirani Farahani, and N. Matinrad, "Disaster management from a POM perspective: mapping a new domain," *Production and Operations Management,* vol. 25, pp. 1611-1637, 2016.

[2] Q. Duan and T. W. Liao, "Optimization of blood supply chain with shortened shelf lives and ABO compatibility," *International Journal of Production Economics,* vol. 153, pp. 113-129, 2014.

[3] P. C. Nolz, F. Semet, and K. F. Doerner, "Risk approaches for delivering disaster relief supplies," *OR spectrum,* vol. 33, pp. 543-569, 2011.

[4] M. Hamedi, A. Haghani, and S. Yang, "Reliable transportation of humanitarian supplies in disaster response: model and heuristic," *Procedia-Social and Behavioral Sciences,* vol. 54, pp. 1205-1219, 2012.

[5] S. Wohlgemuth, R. Oloruntoba, and U. Clausen, "Dynamic vehicle routing with anticipation in disaster relief," *Socio-Economic Planning Sciences,* vol. 46, pp. 261-271, 2012.

[6] S. Rath and W. J. Gutjahr, "A math-heuristic for the warehouse location–routing problem in disaster relief," *Computers & Operations Research,* vol. 42, pp. 25-39, 2014.

[7] H. Wang, L. Du, and S. Ma, "Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* vol. 69, pp. 160-179, 2014.

[8] F. Wex, G. Schryen, S. Feuerriegel, and D. Neumann, "Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units," *European Journal of Operational Research,* vol. 235, pp. 697-708, 2014.

[9] X. Gan, Y. Wang, J. Kuang, Y. Yu, and B. Niu, "Emergency Vehicle Scheduling Problem with Time Utility in Disasters," *Mathematical Problems in Engineering,* vol. 2015, pp. 1-7, 2015.

[10] M. Ahmadi, A. Seifi, and B. Tootooni, "A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* vol. 75, pp. 145-163, 2015.

[11] M. Moshref-Javadi and S. Lee, "The Latency Location-Routing Problem," *European Journal of Operational Research,* vol. 255, pp. 604-619,2016.

[12] D. R. Bish, "Planning for a bus-based evacuation," *OR spectrum,* vol. 33, pp. 629-654, 2011.

[13] H. Abdelgawad and B. Abdulhai, "Large-scale evacuation using subway and bus transit: approach and application in city of Toronto," *Journal of Transportation Engineering,* vol. 138, pp. 1215-1232, 2011.

[14] M. Goerigk, K. Deghdak, and P. Heßler, "A comprehensive evacuation planning model and genetic solution algorithm," *Transportation research part E: logistics and transportation review,* vol. 71, pp. 82-97, 2014.

[15] L. Talarico, F. Meisel, and K. Sörensen, "Ambulance routing for disaster response with patient groups," *Computers & Operations Research,* vol. 56, pp. 120-133, 2015.

[16] E. Pourrahmani, M. R. Delavar, P. Pahlavani, and M. A. Mostafavi, "Dynamic evacuation routing plan after an earthquake," *Natural Hazards Review,* vol. 16, pp. 1-8, 2015.