فصلنامه پژوهشنامه بازرگانی، شماره ۹۷، زمستان ۱۳۹۹، ۲۵۸-۲۳۳

یک مدل استوار چند دوره‌ای برای توزیع منصفانه نیروی امدادی پس از وقوع بلایای طبیعی

غزاله احمدی*

رضا توکلی مقدم** مهدی نجفی***

دریافت: ۹۷/۶/۲۵ پذیرش: ۹۸/۸/۲۰

لجستیک امداد/ بلایای طبیعی/ تخصیص منابع/ مدیریت بحران/ بهینه‌سازی استوار

چکیده

پس از وقوع بلایای طبیعی، با توجه به محدودیت منابع، کوتاه بودن زمان موثر برای نجات و نیز بزرگی تقاضا در مقابل منابع موجود، مدیریت اثربخش عملیات امداد نقش به سزایی در افزایش تعداد نجات یافتگان دارد. با توجه به اهمیت موضوع مذکور، هدف این پژوهش بهینه‌سازی تخصیص موثر نیروهای امدادی به مناطق آسیب‌دیده پس از وقوع بلایای طبیعی است. به این منظور، یک مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح چند دوره‌ای توسعه داده شده است. مدل پیشنهادی از نسبت پوشش موثر تقاضا به‌عنوان شاخص رضایت مناطق از تخصیص منصفانه منابع استفاده کرده و به بیشینه‌سازی کمترین میزان رضایت در میان همه مناطق می‌پردازد. با توجه به افت شانس نجات افراد حادثه دیده با گذر زمان، اثربخشی عملیات در دوره‌های زمانی تخصیص دیده شده است. همچنین جهت لحاظ نمودن هماهنگ‌سازی و استفاده موثر از منابع، امکان انتقال نیروها بین مناطق مختلف و نیز ترخیص نیروها در نظر گرفته شده است. تحقیق

*. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران ahmadigh@ut.ac.ir

**. استاد، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران tavakoli@ut.ac.ir

***. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران najafi.mehdi@sharif.edu

■ رضا توکلی مقدم، نویسنده مسئول.

پیش رو از رویکرد بهینه‌سازی استوار بازه‌ای برای پرداختن به عدم قطعیت تقاضا و زمان سفر میان مناطق مختلف بهره گرفته است. مدل توسعه داده شده با الهام از نتایج سناریوی شناور زلزله در منطقه شش تهران اجرا و مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج تحلیل انجامی با شناسایی آسیب‌پذیرترین نواحی مشخص می‌کند که تربیت و آموزش پیشرفته هرچه بیشتر نیروهای محلی در این نواحی و یا مناطق همسایه که می‌توانند در کمترین زمان به محل تقاضا اعزام شوند، می‌تواند در موفقیت عملیات کل منطقه نقش قابل توجهی ایفا کند. مدل پیشنهادی نه تنها برای برنامه‌ریزی در فاز پاسخ، بلکه می‌تواند در فاز پیشگیری و آمادگی بلایای طبیعی، به مدیران برای شبیه‌سازی اثربخشی سناریوهای مختلف ظرفیت نیروهای امدادگر و همچنین در صورت نیاز، اولویت‌بندی مناطق مختلف برای اجرای پروژه‌های کاهش آسیب‌پذیری یاری رساند.

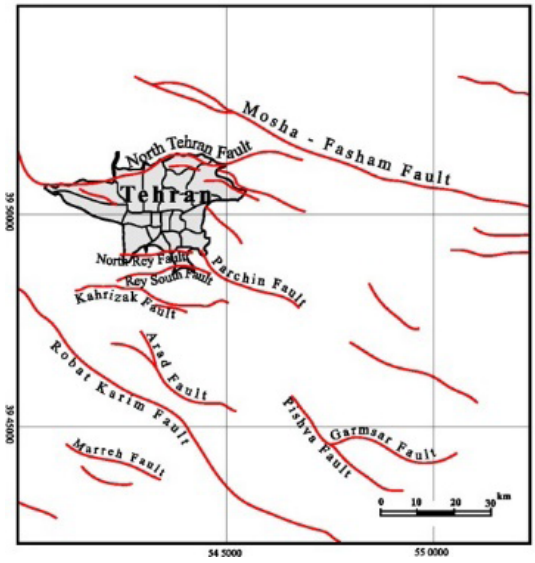
طبقه‌بندی JEL : C61, D63, D81, Q54, J22

مقدمه

در سال‌های اخیر، بلایای طبیعی خسارات مالی و جانی زیادی را در سراسر دنیا به جای گذاشته‌اند. این بلایای طبیعی هنوز یکی از تهدیدکننده‌های جدی بشر به شمار می‌رود و هرساله به طور مستقیم یا غیر مستقیم، زندگی میلیون‌ها نفر را در سرتاسر زمین تحت تاثیر قرار می‌دهد. بعد از وقوع این حوادث، اجرای موثر عملیات امداد، که در فاز پاسخ[1] چرخه مدیریت بحران[2] دسته‌بندی می‌شوند، تاثیر به سزایی در نجات جان افراد و کاهش صدمات دارد[3]. به ویژه در مناطق شهری با وجود ساختمان‌های بلند، جمعیت زیاد و خیابان‌بندی‌های متنوع، این موضوع ابعاد گسترده‌تری یافته و ضرورت استفاده بهینه از زمان و امکانات موجود در آنها، اهمیت بیشتری می‌یابد[4]. معمولاً در ساعات حیاتی اولیه که قربانیان شانس بالاتری برای نجات دارند، امکان استفاده از نیروها و منابع محدودی وجود دارد[5].حال آنکه، به تدریج نیروهای بیشتری از سازمان‌های دولتی و غیردولتی محلی، ملی و بین‌المللی از راه می‌رسند و ضرورت هماهنگ‌سازی این نیروها جهت براورده نمودن تقاضا به صورت بهینه پررنگ‌تر نیز می‌گردد. از این رو، مدیریت منابع در عملیات امداد از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. اگرچه، در مقایسه با سایر حوزه‌های عملیاتی در منابع غنی مدیریت بحران، این حوزه توجه کمتری را به خود اختصاص داده است.

در ایران با توجه به سابقه بروز زلزله‌های مخرب، این چالش کلان‌شهر تهران را بیشتر از سایر مناطق تهدید می‌کند. تهران با جمعیتی بالغ بر ۸ میلیون نفر (سرشماری جمعیت سال ۹۰)، بر روی سه گسل اصلی مشا، شمال تهران و ری قرار گرفته است[6]. این گسل‌ها در سال‌های مابین ۷۴۳ تا ۱۱۷۰ و نیز سال ۱۸۳۰ میلادی منجر به زلزله‌های مرگبار شده‌اند[7]. محصور بودن تهران در میان گسل‌ها در شکل (۱) قابل مشاهده است.

1. Response Phase.
2. Disaster Management Cycle.
3. Altay and Green (2006).
4. Statheropoulos et al. (2015).
5. Fiedrich et al. (2000).
6. Jica (2008).
7. Ambraseys Melville (1977).



شکل ۱- گسل‌های دربرگیرنده تهران (اطلس کلانشهر تهران[1])

با توجه به اهمیت مدیریت اثربخش عملیات امداد و برنامه‌ریزی بهینه استفاده از منابع محدود امدادی در فاز پاسخ، و نیز با الهام از آسیب‌پذیری بالای کلانشهر تهران نسبت به بلایای طبیعی، این پژوهش به بهینه‌سازی تخصیص نیروهای امداد در میان مناطق آسیب‌دیده پس از وقوع بلایای طبیعی می‌پردازد.

آنچه مقاله حاضر را از مطالعات پیشین متمایز می‌سازد عبارتند از:

- لحاظ نمودن شاخص رضایتمندی از توزیع اثربخش نیروهای امداد،
- در نظر گرفتن اثربخشی خدمات امداد در طول زمان عملیات،
- لحاظ نمودن عدم قطعیت فضای پس از بحران با در نظر گرفتن بهینه‌سازی استوار بازه‌ای[2]،
- لحاظ نمودن مکانیزم‌هایی برای هماهنگ‌سازی و استفاده بهینه از منابع موجود.

1. http://atlas.tehran.ir/en/LandofTehran/Faults.aspx
2. Bertsimas, Sim (2004).

قسمت بعدی به مرور ادبیات این حوزه می‌پردازد، مسئله مورد نظر و مدل پیشنهادی در قسمت سوم ارائه می‌گردد. در قسمت چهارم، همتای استوار مدل معرفی می‌گردد. قسمت پنجم به تحلیل نتایج حل در مطالعه موردی منطقه شش شهر تهران بعد از وقوع زلزله می‌پردازد. در خاتمه، قسمت آخر به جمع‌بندی می‌پردازد.

۱. پیشینه تحقیق

یکی از مراحل چهارگانه چرخه مدیریت بحران، فاز پاسخ می‌باشد که مورد توجه بسیاری از محققین نیز قرار گرفته است. در این فاز، به ویژه در صورت گستردگی مکان وقوع بحران، فشار زمانی بسیار بالایی بر روی اجرای عملیات و توزیع اقلام امدادی اورژانسی وجود دارد. با توجه به اینکه گذشت زمان در چنین شرایطی غالباً منجر به گسترده‌تر شدن خسارات در نواحی آسیب‌دیده و نیز کاهش شانس زنده ماندن مصدومان در انتظار امداد می‌گردد، زمانبندی و تخصیص بهینه منابع اهمیت بسیار بالایی پیدا می‌کند[1]. به‌همین‌دلیل، هدف اصلی فاز پاسخ کمینه‌سازی خسارات انسانی با استفاده بیشینه از قابلیت‌ها به کمک تخصیص به موقع و بهینه منابع موجود به مناطق آسیب‌دیده است[2]. پژوهش حاضر به تخصیص موثر نیروهای امدادی در عملیات امداد و نجات در فاز پاسخ می‌پردازد، که علیرغم وجود ادبیات بسیار غنی در سایر بخش‌های این فاز به مانند توزیع و حمل اقلام امدادی، با اقبال کمتری رو به رو بوده است[3].

بررسی ادبیات موجود در این زمینه نشان می‌دهد که تنها تعداد معدودی از پژوهش‌ها به تاثیر زمان بر روی موفقیت عملیات امداد پرداخته‌اند. کاویان‌پور و جولای در سال ۱۳۹۴، یک مدل قطعی برای تخصیص نیروهای داوطلب به بیمارستان‌ها پس از وقوع زلزله توسعه دادند. در این مدل، کمینه کردن زمان تکمیل خدمت داوطلبانه آخرین گروه و تقاضای برآورده نشده به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ یک مدل تخصیص دو مرحله‌ای قطعی برای به کار انداختن زیرساختارهای حیاتی مختل شده ارائه کردند. در مرحله اول، یک مدل کمینه‌سازی هزینه، قطعات آسیب دیده را برای تعمیر

1. Comfort et al. (2004).
2. Zhou et al. (2017).
3. Zhang et al. (2017).

انتخاب کرده و در مرحله دوم، یک مدل کمینه‌سازی زمان اتمام کار، زمان‌بندی تعمیرات را انجام می‌دهد[1]. سو و همکاران در سال ۲۰۱۶، همکاری سازمان‌های امدادی چندگانه (پلیس، بیمارستان‌ها و ...) را در شرایط نیاز به پاسخگویی به حوادث همزمان در منطقه آسیب دیده مدنظر قرار داده و یک مدل قطعی با تابع هدف کمینه‌سازی زمان سفر و هزینه‌های تخصیص ارائه نمودند[2].

از سوی دیگر، در عمده پژوهش‌های موجود، رضایت‌مندی از تأمین تقاضای امداد و نجات عمدتاً نادیده گرفته شده است. این در حالی است که در فضای پس از وقوع بحران با توجه به محدودیت منابع و زمان تاثیر، رویکرد جامع و متمرکز نسبت به حجم و فوریت تقاضای امداد و نجات در کلیه مناطق آسیب دیده در کنار سهولت و سرعت دسترسی، همواره یک چالش در مدیریت بحران بوده و منجر به سطوح نارضایتی بسیار متفاوتی در میان نقاط آسیب دیده می‌شود. ذکائی و همکاران در سال ۲۰۱۶، یک زنجیره سه سطحی از تأمین‌کنندگان، مراکز توزیع و نقاط آسیب دیده برای تخصیص و ارسال اقلام امدادی در نظر گرفتند و با در نظر گرفتن جریمه برای تقاضای برآورده نشده در تابع هدف هزینه، به طور تلویحی نارضایتی مناطق آسیب دیده را نیز مد نظر قرار داده است.[3] به طور مشابه، یو و همکاران در سال ۲۰۱۸، با درنظرگیری هزینه کمبود اقلام امدادی در نواحی آسیب‌دیده در افق چند دوره‌ای، به کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های تحویل و کمبود پرداخته و به طور تلویحی نارضایتی ناشی از عدم تأمین کافی تقاضا را درنظر گرفتند.[4] ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ با در نظرگیری مطلوبیت تخصیص نیروهای امدادی در هر کدام از مناطق آسیب‌دیده، به بیشینه‌سازی مجموع مطلوبیت حاصل از تخصیص پرداختند.[5] اگرچه هر کدام از این پژوهش‌ها از شاخصی جهت لحاظ نمودن رضایتمندی استفاده نموده‌اند، اما به دلیل تمرکز بر روی مجموع میزان رضایت، توزیع عادلانه منابع نادیده گرفته شده است. هو و همکاران در سال ۲۰۱۶، یک مدل برای تخصیص اقلام امدادی توسعه دادند. آنها فرض کردند هر کدام از اقلام امدادی، نزد هر کدام از مناطق آسیب دیده از درجه مطلوبیت مستقلی برخوردار است. با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف تقاضا در

1. Zhang et al. (2016).
2. Su et al. (2016).
3. Zokaee et al. (2016).
4. Yu et al. (2018).
5. Zhang et al. (2017).

بهینه‌سازی استوار، مدل پیشنهادی به بیشینه‌سازی مطلوبیت تأمین و نیز بیشینه‌سازی کمترین نسبت مطلوبیت تأمین شده در میان مناطق مختلف پرداخته است.[1] این مدل اگرچه با درنظر گرفتن مطلوبیت مختلف تأمین تقاضا در نواحی مختلف، جنبه واقع‌بینانه‌ای از تخصیص منابع پس از وقوع بلایای طبیعی را در نظر گرفته است، اما به دلیل ارائه ساختار تک دوره‌ای و ایستا، از یکی از مهمترین چالش‌های پیش روی مدیران بحران یعنی تغییرات متناوب سطح تقاضا، منابع قابل تخصیص و وضعیت دسترسی به نواحی اسیب‌دیده در طول دوره عملیات امداد چشم پوشی کرده است. به علاوه با توجه به اینکه مدل پیشنهادی ایشان به تأمین تقاضای منابع تجدید ناپذیر پرداخته است، کاربرد آن در برنامه‌ریزی تخصیص نیروی انسانی با محدودیت مواجه بوده و به دلیل عدم در نظرگیری امکان انتقال نیرو بین مناطق آسیب‌دیده و عملیات مختلف، قادر به ارائه جواب بهینه کلی نمی‌باشد.

تعداد زیادی از تحقیقات انجامی در زمینه تخصیص نیروهای امدادی فرض کرده‌اند پارامترهای ورودی به صورت قطعی در دسترس هستند. از سوی دیگر، مقالاتی که غیرقطعی بودن پارامترها را درنظر گرفته‌اند عمدتاً از رویکردهای سناریو محور و یا فازی استفاده کرده‌اند. درحالیکه به‌کارگیری این روش‌ها مشروط به قابلیت تعریف سناریوهای مناسب و احتمال وقوع آن‌ها و یا دسترسی به توابع عضویت پارامترهای فازی می‌باشند و این امکان به ویژه با شرایط و نیازهای فضای امداد و نجات پس از بحران همخوانی ندارد.

پژوهش‌های اخیر در این حوزه در جدول (۱) جمع‌بندی گردیده است. با مرور ادبیات اخیر، پژوهش حاضر شکاف‌های تحقیقاتی زیر را هدف قرار داده است:

- نگاه واقع‌بینانه به غیرقطعی بودن ورودی‌ها پس از وقوع زلزله و توسعه یک مدل استوار بازه‌ای. این رویکرد در مقایسه با سایر روش‌های عدم قطعیت نیاز به حداقل اطلاعات را داشته و نیز جواب استواری برای حفظ کیفیت جواب در شرایطی که داده‌های واقعی با مقدار اسمی پارامترها متفاوت است، ارائه می‌کند. در میان مقالات مطالعه شده، تنها یک مورد در توزیع اقلام امدادی از این رویکرد استفاده کرده است و تا به حال، در تخصیص و هماهنگ‌سازی منابع امدادی از این رویکرد استفاده نشده است.

1. Hu et al. (2016).

- لحاظ کردن شاخص رضایتمندی از تأمین تقاضای امداد با بیشینه‌سازی کمترین سطح پوشش موثر تقاضا در میان مناطق آسیب دیده،
- لحاظ نمودن افت اثربخشی اجرای عملیات با گذشت زمان با توجه به افت شانس نجات افراد حادثه دیده،
- در نظر گرفتن مکانیزم‌های هماهنگ‌سازی منابع متناسب با مقتضیات عملیات امداد به کمک:
  - لحاظ نمودن امکان تبادل منابع بین مناطق برای افزایش کارایی و کمینه‌سازی تقاضای برآورده نشده و بالتبع کمینه‌سازی تلفات جانی.
  - در نظر گرفتن امکان ترخیص نیروهای حاضر و یا انتقال آنها به عملیات با شدت سختی پایینتر برای مدیریت بهتر منابع بالاخص در دوره‌های زمانی پایانی افق تصمیم عملیات امداد و نیز جلوگیری از بروز اختلال در صورت تراکم نیروهای امدادی.

جدول ۱- مرور پژوهش‌های مربوطه

مطالعه موردی	تابع هدف	زمان سفر	اولویت‌بندی تقاضا	رضایت نواحی آسیب‌دیده	همکاری منابع	منابع غیرهمگن	افق برنامه‌ریزی	عدم قطعیت	Publication
-	بیشینه‌سازی تعداد نجات یافتگان	√	√	-	-	-	تک دوره	فازی	اشراق نیای جهرمی و دانشور کاخکی، ۱۳۸۴
-	کمینه‌سازی هزینه	√	-	-	-	√	تک دوره	قطعی	Zhang et al., 2012
√	کمینه‌سازی تقاضای براورده نشده	√	√	-	-	√	تک دوره	قطعی	کاویان‌پور و جولای، ۱۳۹۴
√	بیشینه‌سازی تعداد نجات یافتگان	√	√	-	√	-	تک دوره	تصادفی	Chu and Zhong, 2015
√	کمینه‌سازی هزینه و زمان	-	√	-	-	√	چند دوره	قطعی	Zhang et al., 2016
-	کمینه‌سازی هزینه و زمان	√	-	-	√	√	تک دوره	قطعی	Su et al., 2016
-	کمینه‌سازی نرخ مرگ و میر و زمان اشتغال سیستم	-	√	-	-	-	تک دوره	احتمالی	Xiang & Zhuang, 2016
√	کمینه‌سازی هزینه	-	-	√	-	√	تک دوره	استوار	Zokaee et al., 2016

مطالعه موردی	تابع هدف	زمان سفر	اولویت‌بندی تقاضا	رضایت نواحی آسیب‌دیده	همکاری منابع	منابع غیرهمگن	افق برنامه‌ریزی	عدم قطعیت	Publication
-	کمینه‌سازی زمان و هزینه	√	-	-	-	√	تک دوره	فازی- احتمالی	خوش سیرت و همکاران، ۱۳۹۷
√	بیشینه‌سازی مجموع مطلوبیت تأمین تقاضا و کمترین رضایت	-	√	√	-	√	تک دوره	استوار	Hu et al., 2016
√	کمینه‌سازی زمان و بیشینه‌سازی مجموع مطلوبیت تأمین تقاضا	√	√	√	-	√	تک دوره	تصادفی	Zhang et al., 2017
-	کمینه‌سازی هزینه	-	-	√	-	-	چند دوره	قطعی	Yu et al., 2018
√	بیشینه‌سازی حداقل پوشش موثر تقاضا	√	√	√	√	√	چند دوره	استوار	Our model

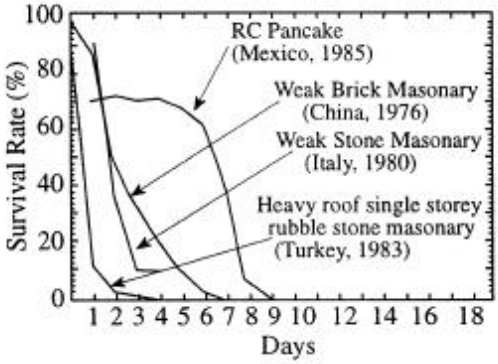
۲. تعریف مسئله

این مدل، تخصیص منابع را در یک افق چند دوره‌ای برای ناحیه‌ای متشکل از چندین منطقه آسیب دیده با هدف بیشینه‌سازی رضایتمندی از تأمین موثر تقاضا تعیین می‌کند. در هر منطقه، با توجه به زمان و شدت وقوع بلایای طبیعی، مقاومت ساختمان‌ها، تراکم جمعیت در ساختمان‌ها و نزدیکی به مراکز پر ریسک از قبیل پمپ بنزین، سه نوع تقاضای انجام عملیات وجود دارد. به همین ترتیب، نیروهای امدادی با توجه به سطح مهارت و تجهیزات در اختیار، قادر به تأمین یک یا چند نوع تقاضا در عملیات می‌باشند. مدل ارائه شده با در نظر گرفتن یک افق برنامه‌ریزی چند دوره‌ای، در هر دوره منابع مختلف موجود را با توجه به وضعیت تطبیق با نوع تقاضا به نواحی آسیب‌دیده تخصیص می‌دهد.

به علاوه با توجه به سطح تأمین شده تقاضا در هر منطقه، مدل نسبت به انتقال منابع بین مناطق و یا ترخیص آنها از عملیات امداد تصمیم‌گیری می‌کند. با توجه به مصاحبه‌های انجام گرفته، انتقال نیرو بین منطقه‌ها بر اساس ضرورت و میزان اثر مثبت آن در بهینه‌سازی خدمات قابل ارائه، منطبق بر واقعیت متصور برای مدیریت منابع پس از وقوع بحران می‌باشد.

این فرض واقع‌بینانه در مدل در نظر گرفته شده است و لذا با توجه به وضعیت پوشش تقاضا در هر منطقه و زمان سفر بین مناطق، مدل نسبت به انتقال منبع بین مناطق در هر دوره زمانی تصمیم‌گیری می‌کند. در دوره‌های انتهایی افق زمانی در نظر گرفته شده برای عملیات، به تدریج نیروهای مورد نیاز برای امداد و نجات کاهش یافته و در عوض، عملیات به جریان انداختن خطوط ارتباطی اصلی، پاکسازی معابر، رسیدگی به مصدومین، اسکان اضطراری و توزیع اقلام امدادی به منابع بیشتری احتیاج پیدا می‌کنند. به منظور در نظر گرفتن این جنبه از عملیات، علاوه بر به‌کارگیری منابع، متغیری هم برای ترخیص آنها در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر، در شرایطی که پس از ساعات اولیه، نیروهای امدادی متعددی از سازمان‌های دولتی و غیردولتی محلی، ملی و بین‌المللی از راه می‌رسند، حضور ۱۰۰ درصدی آنها در عملیات ممکن است منجر به کندی، پایین آمدن نرخ موفقیت در نجات قربانیان و بروز حادثه برای نجاتگران در اثر تداخل در کارها گردد. به علاوه، با توجه به اینکه تیم‌های حائز شرایط برای هر درجه سختی قادر به انجام ماموریت‌های آسان‌تر هم هستند، مدل امکان استفاده از تیم‌های مازاد هر نوع تقاضا در ماموریت‌های آسانتر را نیز فراهم می‌کند. به این ترتیب، وجود ساختار معرفی شده در مدل برای مدیریت و هماهنگ‌سازی صحیح برای بهره‌برداری مناسب از منابع موجود بسیار حائز اهمیت است.

آنچه که تخصیص منابع در عملیات امداد را از بسیاری دیگر از زمینه‌های کاربرد این تصمیم متمایز می‌سازد، نقش حائز اهمیت زمان در موفقیت عملیات و کاهش تدریجی شانس زنده یافتن افراد است. از این رو، پارامتری برای در نظر گرفتن اثربخشی تخصیص با گذر زمان در نظر گرفته شده است. این پارامتر، نسبت به زمان به صورت نزولی تغییر می‌کند و می‌توان آن را بر اساس منابع مربوط به تغییر نرخ زنده ماندن افراد با گذر زمان تعیین نمود (شکل ۲). به این ترتیب، تقاضایی که در هر دوره زمانی برآورده می‌شود به کمک این پارامتر، وزن‌دار می‌شود. جمع وزنی تأمین این تقاضاها طی کل افق برنامه‌ریزی، پوشش موثر تقاضا در هر منطقه را تعیین کرده و مبنای محاسبه رضایت منطقه از تخصیص منابع امداد قرار می‌گیرد.



شکل ۲- نرخ زنده ماندن افراد با گذر زمان (فیدریچ و همکاران،[1] ۲۰۰۰)

با گذر زمان پس از وقوع بلایای طبیعی، وضعیت گستردگی خسارات، تقاضای مناطق مختلف، وضعیت دسترسی بین آنها و منابع جدید در راه ممکن است نسبت به مقادیر این پارامترها در ابتدای دوره برنامه برنامه‌ریزی دستخوش تغییر شوند. مدل پیشنهادی با ساختار برنامه‌ریزی چند دوره‌ای امکان لحاظ کردن این اطلاعات جدید را در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد تا نسبت به بازنگری در تخصیص منابع در دوره‌های باقیمانده از افق برنامه‌ریزی عملیات امداد تصمیم‌گیری نمایند. پس از اجرای تصمیمات دوره اول با به روز آوری اطلاعات، می‌توان مدل را برای تطبیق تغییرات مجدداً اجرا نمود.

مفروضات دیگر مدل به شرح زیر می‌باشند:

- میزان تقاضا برای هرکدام از انواع تقاضا و زمان سفر بین مناطق به صورت بازه‌های غیرقطعی متقارن در نظر گرفته شده است.
- میزان منابع موجود در هر دوره زمانی به صورت قطعی در نظر گرفته شده است.
- منظور از دوره زمانی، بازه‌هایی متشکل از T ساعت است و T را می‌توان براساس شرایط مسئله و با توجه به نیاز، مدیریت تعیین کرد.
- در صورت انتقال منبع بین مناطق، زمان طی شده برای سفر بین دو منطقه از زمان در دسترس بودن آنها برای تأمین تقاضا می‌کاهد و در محاسبه سطح پوشش تقاضا لحاظ می‌گردد.

1. Fiedrich et al. (2000).

پس از گذشت هر دوره با به روزآوری اطلاعات ورودی و نیز دریافت اطلاعات از تحقق تصمیمات دوره‌های قبلی، مدل به منظور تطبیق تغییرات برای دوره‌های باقیمانده مجدداً اجرا می‌شود.

۲-۱. اندیس‌ها و پارمترها

s نوع تقاضا $s \in \{1,2,3\}$

$k.k'$ مناطق آسیب دیده $k.k' \in \{1,2,..,R\}$

t دوره‌های برنامه‌ریزی T ساعته $t \in \{1,2,..,Z\}$

p_t شاخص اثربخشی تخصیص در دوره t

o_{sk} میزان تخمینی تقاضای نوع s در منطقه k

c_{st} تعداد تیم‌های جدیدالورود که در پریود t جهت تقاضای نوع s وارد می‌شوند

$d_{kk'}$ زمان سفر بین مناطق k و k‘

w_s درجه اهمیت تقاضای نوع s

T مدت زمان هر دوره برنامه‌ریزی

۲-۲. متغیرهای تصمیم‌گیری

I_{sk}^t تعداد تیم‌هایی که برای تقاضای نوع s در پریود t در منطقه k مشغول به کارند $I_{sk0} = 0$

$z_{skk't}$ تعداد تیم‌هایی که برای تقاضای نوع s در پریود t از منطقه k به منطقه k‘ منتقل می‌شوند

h_{skt} تعداد تیم‌های جدیدالورود که برای تقاضای نوع s در پریود t به منطقه k تخصیص داده می‌شوند

f_{skt} تعداد تیم‌های مازاد برای تقاضای نوع s که منطقه k را در پریود t ترک می‌کنند

EC_{sk} شاخص رضایت منطقه k از پوشش موثر تقاضای نوع s

cov_s حداقل پوشش موثر تقاضای نوع s در میان همه مناطق

$\varphi_{s'st}$ تعداد تیم‌های مازاد برای تقاضای نوع s که در پریود t ترخیص می‌شوند تا برای تأمین تقاضای نوع s' تخصیص یابند

$y_{st} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ اگر تیم جدیدالورودی برای تقاضای نوع s، در پریود t به یکی از مناطق آسیب دیده تخصیص یابد.

۲-۳. مدل قطعی تخصیص

$$\text{Max} \sum_{s} w_s cov_s \qquad (۱)$$

.s.t

$$I_{sk}^{t} = h_{skt} - f_{skt} + \sum_{\substack{k' \\ k' \neq k}} z_{sk'kt} - \sum_{\substack{k' \\ k' \neq k}} z_{skk't} \qquad \forall s.k. \quad t = 1 \qquad (۲)$$

$$I_{sk}^{t} = I_{sk}^{t-1} + h_{skt} - f_{skt} + \sum_{\substack{k' \\ k' \neq k}} z_{sk'kt} - \sum_{\substack{k' \\ k' \neq k}} z_{skk't} \qquad \forall s.k. \quad t > 1 \qquad (۳)$$

$$\sum_{k} h_{skt} \leq c_{st} y_{st} + \sum_{s'>s} \varphi_{s'st} \qquad \forall t; \quad s \leq 2 \qquad (۴)$$

$$\sum_{k} h_{skt} \leq c_{st} y_{st} \qquad \forall t; \quad s = 3 \qquad (۵)$$

$$\varphi_{s'st} \leq y_{st} \sum_{t'=1}^{t} c_{st'} \qquad \forall t; \quad s \leq 2 \quad s' > 1 \quad s \neq s' \qquad (۶)$$

$$\sum_{\substack{s \\ s<s'}} \varphi_{s'st} \leq \sum_{k} f_{s'kt} \qquad \forall t; \quad s \leq 2s \leq 2 \quad s' > 1s' > 1 \qquad (۷)$$

$$\sum_{k} f_{skt} \leq (1 - y_{st}) \sum_{t'=1}^{t} c_{st'} \qquad \forall s.t \qquad (۸)$$

$$EC_{sk} \leq \frac{\sum_t (TI_{sk}^{t} - \sum_{k'} d_{k'k} z_{sk'kt}) p_t}{o_{sk}} \qquad \forall s.k \qquad (۹)$$

$$cov_s \leq EC_{sk} \qquad \forall s.k \qquad (۱۰)$$

$$I^t_{sk} \cdot z_{skk't} \cdot h_{skt} \cdot f_{skt} \cdot \varphi_{s'st} \geq 0$$
$$EC_s \geq 0 \qquad (۱۱)$$
$$y_{st} \in \{0.1\}$$

تابع هدف (۱) از طریق بیشینه‌سازی حداقل پوشش موثر تقاضای عملیات نجات را درسطح ناحیه حادثه دیده به بهینه‌سازی سطح رضایت از تأمین تقاضا و تخصیص منصفانه می‌پردازد. برای این منظور، در محدودیت (۹) برای هر کدام از انواع تقاضا در هر کدام از مناطق، شاخص رضایت به صورت نسبت منابع موثر تخصیصی بر روی کل تقاضا محاسبه می‌شود. از آنجایی که زمان صرف شده برای انتقال تیم‌ها از منطقه‌ای به منطقه دیگر برابر با از دست دادن همان زمان در اجرای عملیات امداد است، آن را از زمان در اختیار منابع تخصیص یافته کسر کرده و مجموع وزنی مقدار باقیمانده در هر دوره با توجه به شاخص اثربخشی تخصیص در آن دوره لحاظ می‌شود. محدودیت (۱۰) میزان حداقل شاخص رضایت را برای هر کدام از انواع تقاضا تعیین می‌کند. به این ترتیب، فاصله‌ی بین درصد تقاضای برآورده شده در مناطق آسیب دیده به حداقل ممکن رسیده و به عبارت دیگر، طرح تقسیم منصفانه‌ای به دست می‌آید.

محدودیت‌های (۲) و(۳)، به مانند محدودیت بالانس جریان عمل می‌کنند و تعداد منابع تخصیصی در هر منطقه را برای هر دوره محاسبه می‌کند. تعداد منابع موجود در هر منطقه و در هر دوره با توجه به تعداد منابع دوره قبل، تعداد تیم‌های انتقالی از سایر مناطق، تعداد تیم‌های ترخیص شده، تعداد تیم‌های ارسالی به مناطق دیگر و تعداد تیم‌های جدیدالورود تخصیصی تعیین می‌گردد.

بر اساس محدودیت (۴) و (۵)، سقف تعداد منابع جذب شده در هر دوره برابر با تیم‌هایی است که در آن دوره امکان اضافه شدن به عملیات را دارند. بر اساس محدودیت (۶) و (۷)، تخصیص تیم‌های مازاد برای هر نوع تقاضا به ماموریت‌های آسانتر در هر دوره، تنها تا سقف تعداد تیم آزاد شده در آن دوره صورت می‌گیرد. به علاوه در دوره‌هایی که نیازی به جذب نیروی جدید نیست، نیروهای مازاد به طور کامل از عملیات امداد ترخیص می‌شوند. محدودیت شماره (۸) اطمینان حاصل می‌کند که ترخیص نیرو تنها در دوره‌ای معنا دارد که

جذب منبع جدید در آن دوره اتفاق نمی‌افتد. نوع متغیرها در محدودیت شماره (۱۱) تعیین می‌گردد.

با توجه به ماهیت غیر قطعی فاز پاسخ، در نظر گرفتن پارامترهای ورودی قطعی دور از واقعیت بوده و مانع از استفاده مدل در دنیای واقعی می‌گردد. به همین منظور، در این مقاله از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده می‌شود. عمده مدل‌های استوار توسعه داده شده، از بهینه‌سازی استوار سناریومحور استفاده کرده‌اند. اما کاربرد این رویکرد در این زمینه با محدودیت‌های اجرایی همراه است: در مواردی که با تعداد زیادی سناریو مواجه هستیم و یا خود سناریوها یا احتمال وقوعشان در دست نیست، این رویکرد راهگشا و موثر نمی‌باشد. این در حالی است که رویکرد استوار بازه‌ای که توسط برتسیماس و سیم در سال ۲۰۰۴ توسعه داده شده است، به داده‌های کمتری احتیاج دارد، از نظر محاسباتی قابل اجرا است، ساختار مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را تغییر نمی‌دهد و به علاوه، با تغییر تعداد پارامترهای غیرقطعی که از مقدار اسمی خود فاصله می‌گیرند، قادر است سطوح متفاوتی از شدت محافظه‌کاری را در جواب مسئله ارائه دهد[1]. به‌عنوان نمونه از اجرای این روش می‌توان به مقالات ذکایی و همکاران در سال ۲۰۱۶ و نجفی و همکاران در سال ۲۰۱۳ اشاره کرد[2,3].

۳. بهینه‌سازی استوار بازه‌ای

در رویکرد ارائه شده توسط برتسیماس و سیم در سال ۲۰۰۴، فرض شده است که محدودیت i ام در مدل زیر دارای $\lfloor \Gamma_i \rfloor$ ضریب تکنولوژیک غیر قطعی است که دارای ساختار $[\bar{a}_{ij} - \hat{a}_{ij} \,.\bar{a}_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ هستند و دقیقاً یک پارامتر غیرقطعی وجود دارد که دارای $\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor$ انحراف از مقدار اسمی خود است.

$$\text{Max } z=cx$$
$$\tilde{a}x \leq b$$
$$l \leq x \leq u \leq x \leq u$$

اگر $\beta_i(x^*.\Gamma_i)$ را به‌عنوان بیشترین مقدار تغییری در نظر بگیریم که در صورت انحراف Γ_i ضریب از مقادیر اسمی ایجاد می‌شود، می‌توان مدل بالا را به صورت زیر بازنویسی کرد:

1. Bertsimas and Sim (2004).
2. Zokaee et al. (2016).
3. Najafi et al. (2013).

$$\begin{aligned} &\text{Max } z=cx \\ &\tilde{a}x+\beta_i(x^*.\Gamma_i)\le b \\ &l\le x\le u\le x\le u \end{aligned} \qquad (۱۲)$$

با توجه به تعریف $\beta_i(x^*.\Gamma_i)$، می‌توان آن را به صورت زیر به دست آورد. Γ_j یک عدد حقیقی مثبت در بازه $[0.|J_i|]$ است و J_i مجموعه‌ی ضرایب غیرقطعی در محدودیت i می‌باشد:

$$\beta_i(x^*.\Gamma_i)=\text{Max}\sum_{j\in I_i}\hat{a}_{ij}|x_j^*|z_{ij} \qquad (۱-۱۳)$$

s.t.

$$\sum_{j\in I_i}z_{ij}\le\Gamma_i \qquad \forall\, i \qquad (۲-۱۳)$$

$$0\le z_{ij}\le 1 \qquad \forall j\in J_i \qquad (۳-۱۳)$$

z_{ij} میزان انحراف ضریب a_{ij} را از مقدار اسمی برای ضرایب غیرقطعی مشخص می‌کند، عددی بین صفر و یک بوده و مجموع آن بر روی کلیه ضرایب غیرقطعی محدود به سقف عدم قطعیت انتخاب شده Γ_i می‌باشد.

از آنجاییکه جواب مدل (۱۳) در حالت بهینه با جواب مسئله دوگان آن برابر است، جهت حفظ خطی بودن مدل (۱۲) و در عین حال حفظ بهینگی و موجه بودن جواب در حضور انحراف پارامترهای غیرقطعی از مقادیر اسمی، برتسیماس و سیم (۲۰۰۴) مدل متناظر استوار زیر را با جایگزینی دوگان مسئله $\beta_i(x^*.\Gamma_i)$ در مسئله اصلی توسعه دادند.

$$\text{Max}\, z=cx \qquad (۱-۱۴)$$

s.t.

$$\sum_j\bar{a}_{ij}x_j+z_i\Gamma_i+\sum_{j\in I_i}p_{ij}\le b_i \qquad \forall\, i \qquad (۲-۱۴)$$

$$z_i+p_{ij}\ge\hat{a}_{ij}y_j \qquad \forall\, i.\ \ \forall j\in J_i \qquad (۳-۱۴)$$

$$-y_j\le x\le y_j \qquad \forall j \qquad (۴-۱۴)$$

$$l_j\le x_j\le u_j \qquad \forall j \qquad (۵-۱۴)$$

$$z_i.p_{ij}.y_j\ge 0 \qquad (۶-۱۴)$$

در این مدل، z_i، p_{ij} متغیرهای دوگان متناظر هستند و در صورتی که x_j متغیری مثبت باشد، محدودیت (۱۴-۳) و (۱۴-۴) با جایگزینی x_j به جای y_j، با هم تلفیق می‌شوند. آنها با توسعه دادن مفهوم «بودجه عدم قطعیت»، به تصمیم‌گیرنده حق انتخاب منعطفی از طیف عملکرد و استواری مدل دادند. بودجه عدم قطعیت در واقع مجموع انحرافات پارامترهای غیرقطعی از مقادیر اسمی است و نشان‌دهنده عملکرد مدل در نگهداشت موجه بودن و نزدیکی آن به بهینگی در صورت بروز سطوح مختلف عدم قطعیت می‌باشد (برتسیماس و همکاران، ۲۰۱۱)[1]. در مقاله پیش رو نیز از رویکرد پیشنهادی ایشان و مدلی که توسط برتسیماس و تیله در سال ۲۰۰۶ [2] بر همین اساس توسعه داده شده است، به ترتیب برای در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و زمان سفر استفاده شده است.

برتسیماس و تیله (۲۰۰۶) از یک رویکرد بهینه‌سازی استوار برای کنترل بهینه زنجیره‌تأمین در حضور عدم قطعیت تقاضا در زمان گسسته ارائه کردند. برای این منظور، یک بازه $[\overline{w}_k - \hat{w}_k . \overline{w}_k + \hat{w}_k]$ برای مقدار تقاضای غیرقطعی در محدودیت جریان مربوط به دوره kام در نظر گرفتند و یک بودجه کلی Γ_k در بازه ۰ تا k برای جمع نوسانات تقاضا از مقادیر اسمی در طول کل k دوره اول لحاظ نمودند. برخلاف روش قبلی که در آن، هر سطری بودجه عدم قطعیت خود را دارد، در حالاتی که محدودیت‌هایی داریم که در هر کدام، تنها با یک پارامتر غیرقطعی رو به رو هستیم، رویکرد دوم مفیدتر واقع می‌شود. در چنین حالاتی، روش برتسیماس و سیم (۲۰۰۴) چندین پارامتر بودجه عدم قطعیت در محدوده ۰ تا ۱ به مدل اضافه می‌کند که یافتن سطح مناسب استواری را دشوار می‌سازد. در حالیکه در روش برتسیماس و تیله، می‌توان با یک پارامتر بودجه عدم قطعیت، مجموع پارامترهای غیرقطعی کلیه سطرها را در نظر گرفت.

۳-۱. مدل استوار تخصیص

مشابه روش برتسیماس و سیم (۲۰۰۴)، برای برخورد با عدم قطعیت زمان سفر بین مناطق مختلف ناحیه آسیب دیده در محدودیت (۶)، Γ_k^2 به‌عنوان تعداد مناطقی در نظر گرفته

1. Bertsimas et al. (2011).
2. Bertsimas and Thiele (2006).

شده است که با توجه به بروز اختلال در راه‌ها پس از بروز بحران، زمان سفرشان از منطقه k غیرقطعی است. r_k و $v_{kk\prime}$ متغیرهای دوگان برای زمان سفر غیرقطعی هستند.

برای مدل‌سازی تقاضای غیر قطعی، مشابه مدل برتسیماس و تیله (۲۰۰۶)، یک بودجه عدم قطعیت کلی Γ_s را برای مجموع انحرافات تقاضای همه مناطق از مقادیر اسمی برای هرنوع از تقاضا در نظر می‌گیریم. چون در کل، R منطقه در نظر گرفته شده است، $\frac{\Gamma_s}{R}$ به‌عنوان سطح محافظه‌کاری تقاضا در هر منطقه در نظر گرفته می‌شود و q_{sk} و u_{sk} متغیرهای دوگان متناظر هستند.

به این ترتیب با جایگزینی محدودیت‌های (۱۵)-(۱۸) به جای محدودیت (۶)، مدل تخصیص استوار ساخته می‌شود.

$$cov_s\bar{o}_{sk} + \frac{\Gamma_s}{R}q_{sk} + u_{sk} + \sum_t\sum_{k\prime}\bar{d}_{k\prime k}z_{sk\prime kt}\,p_t - \sum_t TI^{\tau}_{sk}p_t + \Gamma_k^2 r_k + \sum_{k\prime} v_{kk\prime} \le 0 \qquad \forall s.k \qquad (۱۵)$$

$$q_{sk} + u_{sk} \ge cov_s\hat{o}_{sk} \qquad \forall s.k \qquad (۱۶)$$

$$r_k + v_{kk\prime} \ge \hat{d}_{k\prime k}\sum_t z_{sk\prime kt}\,p_t \qquad \forall s.k.k' \qquad (۱۷)$$

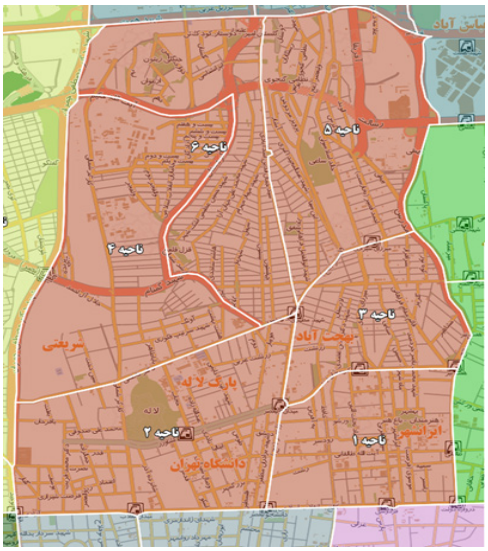
$$q_{sk}.u_{sk}.r_k.v_{kk\prime} \ge 0 \qquad (۱۸)$$

۴. مثال عددی

برای نشان دادن اثربخشی مدل پیشنهادی، این قسمت به بررسی مدل ارائه شده برای تخصیص منابع امداد و نجات بر روی منطقه ۶ شهر تهران با فرض بروز سناریوی شناور عملیاتی تهران[۱] (TFES) می‌پردازد. شکل (۳)، منطقه ۶ را با نواحی‌اش و جدول (۲)، وضعیت آنها را بعد از وقوع زلزله شناور معرفی می‌کند[۲]. برای اجرای مدل، نواحی منطقه ۶ شهر تهران به‌عنوان نواحی آسیب دیده در نظر گرفته شده‌اند.

۱. سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران با توسعه TFES اثرات وقوع شب هنگام زلزله‌ای ناشی از فعالیت گسل دارای بیشترین اثر تخریبی بر روی تهران را شبیه‌سازی کرده‌اند.

۲. به منظور حفظ محرمانگی، داده‌ها تغییر داده شده‌اند.



شکل ۳- منطقه ۶ و نواحی‌اش

جدول ۲ - منطقه ۶ پس از وقوع TFES

منطقه ۶	جمعیت	تعداد خانوار	کشته	مصدومیت شدید	مصدومیت سبک	جمعیت بی خانمان	ساختمان‌های با خسارت سبک	ساختمان‌های با خسارت متوسط	ساختمان‌های با خسارت سنگین
ناحیه ۱	۱۲۳۲۱	۳۰۸۵	۵۱	۶۲	۵۵۶	۸۷۱۴	۳۳۵	۲۷۵	۶۴
ناحیه ۲	۲۲۶۳۰	۶۷۸۴	۹۵	۱۲۱	۱۰۲۹	۱۶۰۱۱	۷۰۸	۶۴۲	۱۵۱
ناحیه ۳	۱۲۰۴۸	۴۱۴۸	۵۶	۹۰	۶۱۸	۸۹۶۹	۷۰۰	۴۹۰	۱۱۵
ناحیه ۴	۳۲۱۳۶	۷۶۷۰	۱۰۴	۲۰۴	۱۱۲۳	۲۲۱۴۹	۹۰۷	۱۰۲۱	۲۵۳
ناحیه ۵	۱۰۵۵۴	۳۷۸۳	۲۳	۷۴	۲۷۰	۵۰۶۲	۳۶۳	۴۲۱	۱۰۴
ناحیه ۶	۲۸۹۷۷	۷۱۶۶	۸۰	۲۰۰	۸۷۳	۱۹۷۴۰	۸۸۷	۱۰۱۳	۲۴۱

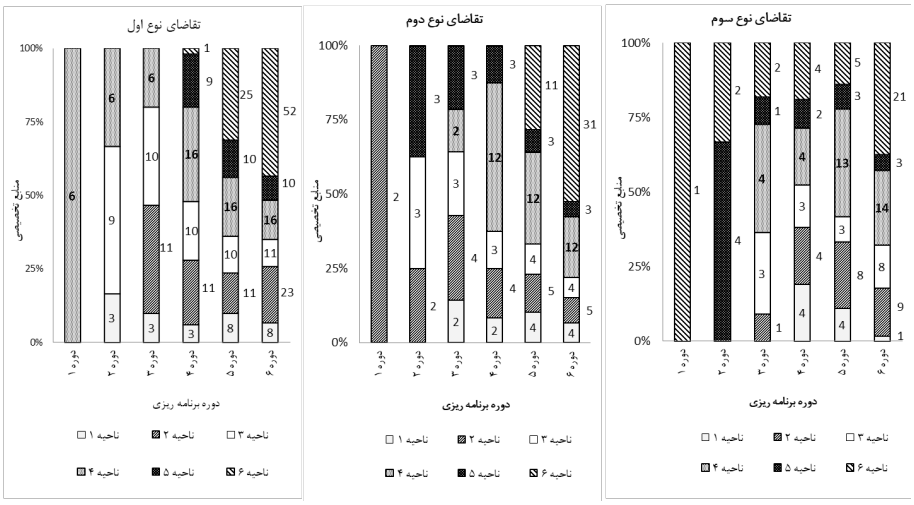
برای اجرای مدل، بودجه عدم قطعیت انواع تقاضا به صورت (۲، ۳، ۵) و بودجه عدم قطعیت زمان سفر به صورت (۳، ۴، ۳۳، ۳، ۴) در نظر گرفته شده است. این بدان معناست که ۵ تا از ۶ ناحیه واقع شده در منطقه ۶ در مقدار تقاضای اعلامی نوع اول خود، نیمی از آنها در تقاضای اعلامی نوع دوم خود و ۳۳٪ آنها در تقاضای اعلامی نوع سوم خود دارای انحراف

واقعیت از تخمین اعلامی هستند. به همین ترتیب، در مورد زمان سفر به‌عنوان مثال فرض شده است که زمان سفر اولین ناحیه با چهار ناحیه دارای انحراف از مقدار اسمی اعلامی است و ناحیه ۲ با سه ناحیه از نواحی آسیب دیده دارای زمان سفر غیرقطعی است. اهمیت وزنی انواع تقاضا و نیز شاخص اثربخشی فرضی برای هر کدام از دوره‌های تخصیص در جدول (۳) قابل مشاهده است.

جدول ۳- شاخص اثربخشی تخصیص

اهمیت وزنی تقاضا			شاخص اثربخشی تخصیص					
تقاضای نوع ۳	تقاضای نوع ۲	تقاضای نوع ۱	دوره ۱	دوره ۲	دوره ۳	دوره ۴	دوره ۵	دوره ۶
۰٫۶	۰٫۳	۰٫۱	۰٫۷۸	۰٫۷۵	۰٫۷	۰٫۶۳	۰٫۵۵	۰٫۴۷

شکل (۴)، نتیجه حل مدل و تعداد منابع تخصیص یافته به هر ناحیه را پس از اجرای مدل نشان می‌دهد. تابع هدف به دست آمده ۳۲٪ مجموع وزنی حداقل شاخص رضایت برای هر سه نوع تقاضا می‌باشد. جواب به دست آمده منجر به ۴۴٪ حداقل پوشش موثر در تقاضای نوع۱، ۹٪ در تقاضای نوع ۲ و ۴۲٪ حداقل پوشش در تقاضای نوع ۳ می‌شود. همان‌طور که قابل مشاهده است، برای بیشینه‌سازی کمترین سطح پوشش موثر تقاضا، نواحی ۴ و ۶ با سطح وسیع‌تری از خسارت، بیشترین ظرفیت خدمات را به خود اختصاص داده‌اند.

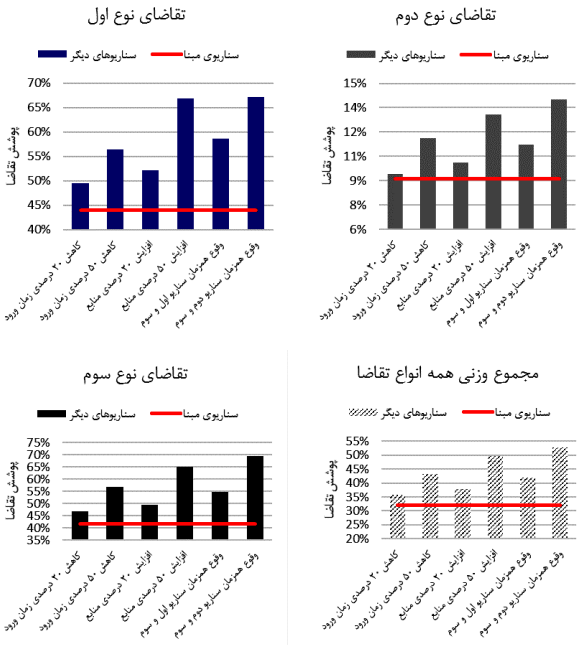


شکل ۴- منابع تخصیص به هر ناحیه

برای بررسی حساسیت نتایج به موقعیت‌های مختلف، مقادیر مختلفی از تقاضا و ظرفیت منابع مورد تحلیل قرار گرفتند. تصویر ۵، تاثیر افزایش تعداد منابع و تسریع زمان دسترس‌پذیری آنها را بر روی تأمین تقاضا و رضایت از تخصیص به تصویر کشیده است. این تحلیل می‌تواند به‌عنوان ابزار شبیه‌سازی به‌کار رفته و با ارائه دورنمای کاربردی و مدیریتی، تصمیم‌گیرندگان را در تعیین برنامه‌های عملیاتی بعدی جهت بهبود ایمنی شهروندان منطقه یاری نماید.

در ادامه، تعدادی از نتیجه‌گیری‌های کاربردی حاصل از اجرای تحلیل حساسیت بر روی منطقه ۶ با داده‌های ورودی در نظر گرفته شده آورده شده است:

- در هر ۳ درجه از شدت خسارت، نتایج به دسترس‌پذیری و زمان آمادگی منابع حساسیت بیشتری نشان می‌دهند و این موضوع تایید کننده نقش زمان در موفقیت عملیات است.
- با توجه به اهمیت بالای خسارات شدید در تابع هدف رضایت از تأمین تقاضا، و مقدار آن در وضعیت پارامترهای ورودی سناریو مبنا، هر گونه بهبودی در تعداد تیم‌های حرفه‌ای که با بالاترین سطح مهارت، قادر به برآورده‌سازی تقاضای عملیات در شدیدترین درجه خسارت هستند و یا زمان ورود آنها به منطقه می‌تواند منجر به بهبود قابل ملاحظه نتایج شود.



شکل ۵- تحلیل حساسیت خروجی مدل

افزودن تیم‌های حرفه‌ای به میزان مکفی برای برآورده‌سازی تقاضا در تک تک نواحی در مقایسه با منابع با مهارت کمتر در ساعات اولیه دشوارتر و معمولاً غیرممکن است. اما نتایج تحلیل انجامی با شناسایی آسیب‌پذیرترین نواحی مشخص می‌کند که تربیت و آموزش پیشرفته هرچه بیشتر نیروهای محلی در این نواحی و یا مناطق همسایه که می‌توانند در کمترین زمان به محل تقاضا اعزام شوند، می‌تواند در موفقیت عملیات کل منطقه نقش قابل توجهی ایفا کند. همانطور که بر روی نمودار، قایل رویت است، یک فرصت ۴۰ درصدی برای افزایش رضایت از انجام عملیات وجود دارد که می‌تواند با افزایش ۲۰ درصدی در تعداد تیم‌های حرفه‌ای و کاهش ۵۰ درصدی زمان آمادگی ایشان در مقایسه با وضعیت فعلی داده‌های ورودی، محقق گردد.

نداشتن بهبود واضح در نتایج پوشش تقاضا و رضایت از خدمات درجه متوسط شدت خسارت، نشان‌دهنده شکاف بزرگ میان تقاضا و ظرفیت این گروه از منابع است.

ظرفیت‌سازی و بهبود زمان پاسخ تیم‌هایی که قادرند تقاضای خدمات سبک امداد را برآورده سازند، آسان‌تر از تیم‌های با مهارت بیشتر است، تحلیل انجامی نشان می‌دهد وجود این تیم‌ها با تعداد و آمادگی بیشتر می‌تواند منجر به ۳۰ درصد بهبود در مقدار پوشش موثر این تقاضا در تابع هدف شود.

استفاده ترکیبی از نتایج تخصیص منابع به نواحی زلزله‌زده و تحلیل حساسیت نتایج به سناریوهای بهبود، قادر است به مدیران و تصمیم‌گیرندگان جهت بررسی دقیق‌تر گزینه‌های بهبود، کمک شایانی نماید. چنین تحلیلی می‌تواند به‌عنوان ورودی روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای رتبه‌بندی و انتخاب اولویت‌های بهبود مورد استفاده قرار گیرد. برای این هدف، با توجه به ماهیت غیرقطعی داده‌ها و نیز تنوع معیارها می‌توان به روش ترکیبی دی-اس-ویکور[1] اشاره کرد که قابلیت پردازش عدم قطعیت و نیز درنظرگیری معیارهای تصمیم‌گیری متضاد و یا با واحدهای اندازه‌گیری مختلف را دارد[2].

برای بررسی اثر محافظه‌کاری مدل در برخورد با عدم قطعیت بر روی جواب بهینه، سطوح مختلفی از بودجه عدم قطعیت مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۴). همانطور که انتظار می‌رود جواب بهینه با افزایش بودجه عدم قطعیت و محافظه‌کاری، با شیب ملایمی بدتر می‌شود و این موضوع نشان‌دهنده استواری مدل توسعه یافته است.

1. Dempster-Shafer-VICOR
2. Fei et al. (2019).

این تحلیل به کارشناسان کمک می‌کند تا رابطه بین تخصیص بهینه و بودجه عدم قطعیت پارامترهای مختلف را دریابند و به این ترتیب، نسبت به میزان صرف زمان و منابع برای تخمین و یا تنظیم پارامترهای ورودی مدل، تصمیم‌گیری نمایند.

جدول ۴- اثر تغییر بودجه عدم قطعیت بر خروجی مدل

		بودجه عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی در هر سناریو						
		سناریو قطعی	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو مبنا	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو بدبینانه
پارامترهای ورودی غیرقطعی	تقاضای نوع اول	۰	۳	۴	۵	۶	۶	۶
	تقاضای نوع دوم	۰	۲	۲	۳	۴	۴	۶
	تقاضای نوع سوم	۰	۱	۲	۲	۲	۳	۶
	زمان سفر تا ناحیه ۱	۰	۲٫۴	۳٫۲	۴	۴٫۸	۵	۵
	زمان سفر تا ناحیه ۲	۰	۱٫۸	۲٫۴	۳	۳٫۶	۴٫۲	۵
	زمان سفر تا ناحیه ۳	۰	۱٫۸	۲٫۴	۳	۳٫۶	۴٫۲	۵
	زمان سفر تا ناحیه ۴	۰	۱٫۸	۲٫۴	۳	۳٫۶	۴٫۲	۵
	زمان سفر تا ناحیه ۵	۰	۲٫۴	۳٫۲	۴	۴٫۸	۵	۵
	زمان سفر تا ناحیه ۶	۰	۱٫۸	۲٫۴	۳	۳٫۶	۴٫۲	۵
مقدار تابع هدف	درصد پوشش تقاضای نوع اول	٪۵۲	٪۴۷	٪۴۶	٪۴۴	٪۴۳	٪۴۳	٪۴۳
	درصد پوشش تقاضای نوع دوم	٪۱۰	٪۹	٪۹	٪۹	٪۸	٪۸	٪۸
	درصد پوشش تقاضای نوع سوم	٪۴۴	٪۴۳	٪۴۲	٪۴۲	٪۴۲	٪۴۰	٪۳۷

جمع‌بندی و ملاحظات

این مقاله، یک مدل استوار جدید برای تخصیص چند دوره‌ای منابع امداد در فاز پاسخ چرخه مدیریت بحران ارائه می‌کند. مدل پیشنهادی، با لحاظ نمودن شاخصی برای اثربخشی تخصیص در هر دوره، دارای قابلیت در نظرگرفتن اثر تخریبی از دست دادن زمان برای نجات افراد است. این مدل با بیشینه‌سازی حداقل پوشش موثر تقاضا در مناطق آسیب دیده به

بیشینه‌سازی شاخص رضایت از اجرای عملیات و ارائه طرح منصفانه تخصیص می‌پردازد. با توجه به محدودیت‌های دنیای واقعی برای تعیین مقادیر دقیق پارامترها پس از وقوع بلایای طبیعی، نیاز به وجود مدلی است که با انحراف مقادیر پارامترها از مقدار اسمی تخمینی آنها، جوابش دچار کمترین انحراف از بهینگی شود و همچنان موجه باقی بماند، به همین دلیل در این مقاله، نیاز به توسعه یک مدل استوار با در نظر گرفتن رویکرد استوار بازه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. مدل پیشنهادی با ایجاد بستری مناسب و سریع برای تصمیم‌سازی، مدیران را در تعیین و اولویت‌بندی برنامه‌های عملیاتی در سطح منطقه قبل و حین اجرای عملیات امداد یاری می‌کند.

همین رویکرد برای مثال عددی نتایج سناریوی شناور عملیاتی زلزله در تهران بر روی منطقه شش پیاده شده است و نتایج کاربردی حاصل از تحلیل حساسیت میزان تأمین تقاضا به تعداد و زمان آمادگی نیروهای امدادی ارائه شده است. همچنین، با توجه به غیرقطعی بودن تقاضا و زمان سفر بین مناطق، سطوح مختلف بودجه عدم قطعیت و تاثیر آن بر روی تغییر جواب بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی وابستگی بالایی به مقدار پارامترها و بازه تغییرات آنها دارد و لذا جهت استفاده به‌عنوان پشتیبان تصمیم در فاز پیشگیری و آمادگی نیازمند دسترسی به داده‌های تاریخی و یا ابزارهای شبیه‌سازی سناریو زلزله با دقت مناسب می‌باشد.

با توجه به اینکه عملیات امداد نیازمند به‌کارگیری تجهیزات مختلف شامل اقلام درمانی و تجهیزات مصرفی جستجو و نجات نیز می‌باشد، یکی از زمینه‌های قابل توجه برای توسعه مدل پیشنهادی پژوهش حاضر، توسعه مدل موجودی-تخصیص برای یکپارچه‌سازی تصمیم تخصیص نیروهای امداد و تأمین و توزیع موجودی تجهیزات و اقلام امدادی می‌باشد. تلفیق برنامه‌ریزی تخلیه جمعیت با تخصیص نیروهای امدادی، اضافه کردن ریسک ایمنی نیروهای امداد و لحاظ نمودن شاخص اهمیت استراتژیک هر منطقه جهت در نظر گرفتن شاهراه‌های حیاتی و تسهیلات استراتژیک از دیگر مواردی است که برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد.

منابع

اشراق نیای جهرمی، عبدالحمید و محمد دانشور کاخکی (۱۳۸۴)؛ "مدلی جهت تقسیم‌بندی مناطق آسیب دیده از زلزله در زمان جستجو و نجات"، کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع، دوره ۴، ۲۰ تا ۲۱ آذر.

راسخ، ابوالفضل و علیرضا وفایی نژاد (۱۳۹۳)؛ "طراحی و شبیه‌سازی مدل صف عملیات امداد و نجات زلزله به کمک سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی (GIS)"، دو فصلنامه علمی پژوهشی مدیریت بحران، دوره ۳، شماره ۲، صص ۲۵-۳۶.

خوش سیرت، مازیار؛ دباغ، رحیم و علی بزرگی امیری (۱۳۹۷)؛ "ارائه مدل خرید اقلام امدادی تحت مناقصه معکوس چند شاخصه با به‌کارگیری رویکرد ترکیبی برنامه‌ریزی فازی چندهدفه"، فصلنامه پژوهشنامه بازرگانی، شماره ۸۶، صص ۱۸۹-۲۱۸

سرشماری جمعیت سال ۹۰، مرکز آمار ایران (http://nnt.sci.org.ir)

کاویانپور اصفهانی، سارا و فریبرز جولای (۱۳۹۴)؛ "ارائه‌ی یک مدل لجستیک بشردوستانه برای فاز پاسخگویی مدیریت بحران با استفاده از تخصیص داوطلبین امداد"، کنگره بین المللی مهندسی عمران، دوره ۱۰، ۱۵ تا ۱۷ اردیبهشت.

Altay, N. and W.G. Green (2006); “OR/MS research in disaster operations management”, European Journal of Operational Research, Vol. 175, No. 1, pp. 475-493.

Ambraseys, N. N. and C.P. Melville (1977); “The seismicity of Kuhistan, Iran”, Geography Journal, Vol.143, pp. 179-199.

Bertsimas, D.; Brown, D.B. and C. Caramanis (2011); “Theory and applications of robust optimization” SIAM Review, Vol. 53, No. 3, pp. 464-501.

Bertsimas, D. and M. Sim (2004); “The price of robustness”, Operations Research, Vol. 52, No. 1, pp. 35-53.

Bertsimas, D. and A. Thiele (2006); “A robust optimization approach to inventory theory”, Operations Research, Vol. 54, No. 1, pp. 150-168.

Comfort, L.K.; Ko, K. and A. Zagorecki (2004); ”Coordination in rapidly evolving disaster response systems the role of information” American Behavioral Scientist, Vol. 48, No. 3, pp. 295-313 .

Chu, X. and Q.Y. Zhong (2015); “Post-earthquake allocation approach of medical rescue teams”, Natural Hazards, Vol. 70, No. 3, pp. 1809-1824.

Fei, L.; Deng, Y. and Y. Hu (2019); “DS-VIKOR: a new multi-criteria decision-making method for supplier selection”, International Journal of Fuzzy Systems, Vol. 21, No. 1, pp. 157-175.

Fiedrich, F.; Gehbauer, F. and U. Rickers (2000); “Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters”, Safety Science, Vol. 35, pp. 41-57.

Hu, C. L.; Liu, X. and Y.K. Hua (2016); "A bi-objective robust model for emergency resource allocation under uncertainty", International Journal of Production Research, Vol. 54, No. 24, pp. 7421-7438.

Japan International Cooperation Agency (JICA) (2000); "The study on seismic micro-zoning of the greater Tehran area in the Islamic Republic of Iran", Main Report.

Najafi, M.; Eshghi, K. and W. Dullaert (2013); "A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase", Transportation Research - Part E, Vol. 49, pp. 217-249.

Statheropoulos, M.; Agapiou, A.; Pallis, G.C.; Mikedi, K.; Karma, S.; VAmvakarri, J.; Dandoulaki, M.; Andritsos, F. and C.L. Paul Thomas (2015); "Factors that affect rescue time in urban search and rescue (USAR) operations", Natural Hazards, Vol. 75, pp. 57-69.

Su, Z.; Zhang, G.; Liu, Y.; Yue, F. and J. Jiang (2016); "Multiple emergency resource allocation for concurrent incidents in natural disasters", International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol.17, pp. 199-212.

Xiang, Y. and J. Zhuang (2016); "A medical resource allocation model for serving emergency victims with deteriorating health conditions", Annals of Operations Research, Vol. 236, pp. 177-196.

Yu, L.; Zhang, C.; Yang, H and L. Miao (2018); "Novel methods for resource allocation in humanitarian logistics considering human suffering", Computers and Industrial Engineering, Vol. 119, pp. 1-20.

Zhang, J.H.; Li, J. and Z.P. Liu (2012); "Multiple-resource and multiple-depot emergency response problem considering secondary disasters", Expert Systems with Applications, Vol. 39, pp. 11066-11071.

Zhang, C.; Liu, X.; Jiang, Y.P.; Fan, B. and X. Song (2016); "A two-stage resource allocation model for lifeline systems quick response with vulnerability analysis", European Journal of Operational Research, Vol. 250, No. 3, pp. 855-864.

Zhang, S.; Guo, H.; Zhu, K.; Yu, S. and J. Li (2017); "Multistage assignment optimization for emergency rescue teams in the disaster chain", Knowledge-Based Systems, Vol. 137, pp. 123-137.

Zhou, L.; Wu, X.; Xu, Z. and H. Fujita (2017); "Emergency decision making for natural disasters: An overview", International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 27, pp. 567-576.

Zokaee, S.; Bozorgi-Amiri, A. and S. J. Sadjadi (2016); "A robust optimization model for humanitarian relief chain design under uncertainty", Applied Mathematical Modelling, Vol. 40, pp. 7996-8016.