

بهینه‌سازی یک مسئله چندهدفه برای واکنش اورژانسی مدیریت بحران در بلایای طبیعی با تأکید بر کاهش تأخیر در رسیدن نیروهای امدادی

غلامحسین سلیمانی^۱، سید محمدعلی خاتمی فیروزآبادی^۲، محسن مرادیان^۳

چکیده

زمینه و هدف: بحران‌های ناشی از سوانح غیر مترقبه آثار قابل ملاحظه‌ای بر جامعه دارند. شیوه‌های صحیح مدیریت بحران از طریق نوآوری در مدیریت بلایای طبیعی می‌تواند در راه جلوگیری از وقوع حوادث و پیامدهای بعد از وقوع بحران بسیار مؤثر واقع شود. بر این اساس، در پژوهش حاضر به بهینه‌سازی یک مسئله چندهدفه برای واکنش اورژانسی مدیریت بحران در بلایای طبیعی با تأکید بر کاهش تأخیر در رسیدن نیروهای امدادی پرداخته می‌شود.

روش‌شناسی: پژوهش کاربردی حاضر با استفاده از روش ساخت مدل ریاضی که دارای جواب کمی است، انجام گرفت؛ در این پژوهش سناریوهای متفاوت برای بروز بحران در نظر گرفته شد و برای هر سناریو مدل ریاضی کمی، با توجه به ویژگی‌های هر سناریو و شرایط بروز آن ساخته شد. برای شناخت وضعیت‌های متفاوت برای سناریوها از تحقیقات پیشین و نظر صاحب‌نظران استفاده گردید.

یافته‌ها: مدل‌های چندهدفه ساخته شده در نرم‌افزار حل مسائل بهینه‌سازی گمز (GAMS) کدنویسی شدند. برای بررسی عملکرد مدل‌های ریاضی ساخته شده، دو مثال با اندازه کوچک و با اعداد تصادفی و نزدیک به دنیای واقعی به ازای هر سناریو شبیه‌سازی شد. این مثال‌ها در نرم‌افزار گمز حل شد و نتایج آن مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. **نتیجه‌گیری:** بر اساس نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان شرایط بهینه تخصیص نیروهای امدادی جهت کمک‌رسانی به بلایای طبیعی در نقاط مختلف را ارائه نمود.

کلیدواژه‌ها: مدیریت سوانح، پاسخ اورژانسی، زمان بندی، اعزام و کنترل نیرو، مدل‌سازی ریاضی چندهدفه

۱. دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

۲. استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

۳. استادیار، دانشگاه عالی دفاع ملی، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۹۸/۰۴/۰۹

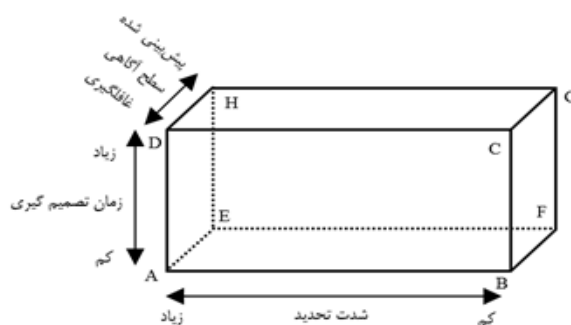
نویسنده مسئول مقاله: محمدعلی خاتمی فیروزآبادی

E-mail: m.khatami@atu.ac.ir

مقدمه

سوانح طبیعی همچون زمین لرزه، سونامی، سیل، طوفان و فوران آتشفشان در گذشته آسیب فراوانی وارد کرده‌اند و تهدید زیرساخت‌ها و زندگی میلیون‌ها نفر هر ساله ادامه دارد. آنچه برای کاهش خسارات و تلفات اقتصادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، پاسخ در مدیریت سوانح طبیعی است که در طی آن تعداد زیادی از رویدادهای پراکنده همچون آتش‌سوزی‌ها و فروپاشی ساختمان‌ها به پردازش فوری توسط واحدهای نجات نیاز دارند؛ بنابراین، یکی از بحرانی‌ترین وظایف پاسخ اورژانس، زمان‌بندی و تخصیص مؤثر واحدهای نجات است.

بلايای طبیعی در این دست پژوهش‌ها معمولاً به‌عنوان یک بحران^۱ در نظر گرفته می‌شود. بحران‌ها در شرایط مختلف متفاوتی رخ می‌دهند. بر اساس مقاله هرمن^۲ (۱۹۷۲)، بحران‌ها در شرایط شدت تهدید متفاوت، زمان تصمیم‌گیری متفاوت و سطح آگاهی متفاوت طبق شکل یک رخ می‌دهند.



شکل ۱. نمایش شدت تهدید، زمان تصمیم‌گیری و سطح آگاهی در هنگام وقوع بحران (هرمن، ۱۹۷۲)

در شکل ۱ مکعب طراحی شده توسط هرمن و هر یک از شرایط A, B, C, D, E, F, G,

H قابل مشاهده است. تفسیر این شرایط به‌صورت زیر است (هرمن، ۱۹۷۲):

۱. A: در این وضعیت تهدید شدید، زمان کوتاه و غافلگیری وجود دارد.
۲. B: در این وضعیت تهدید ضعیف، زمان کوتاه و غافلگیری وجود دارد.

1. Crisis

2. Hermann

۳. C: در این وضعیت تهدید ضعیف، زمان زیاد و غافلگیری وجود دارد.
۴. D: در این وضعیت تهدید شدید، زمان بلند و غافلگیری وجود دارد.
۵. E: در این وضعیت تهدید شدید، زمان کوتاه و پیش بینی شده است.
۶. F: در این وضعیت تهدید ضعیف، زمان کوتاه و پیش بینی شده است.
۷. G: در این وضعیت تهدید ضعیف، زمان بلند و پیش بینی شده است.
۸. H: در این وضعیت تهدید شدید، زمان بلند و پیش بینی شده است.

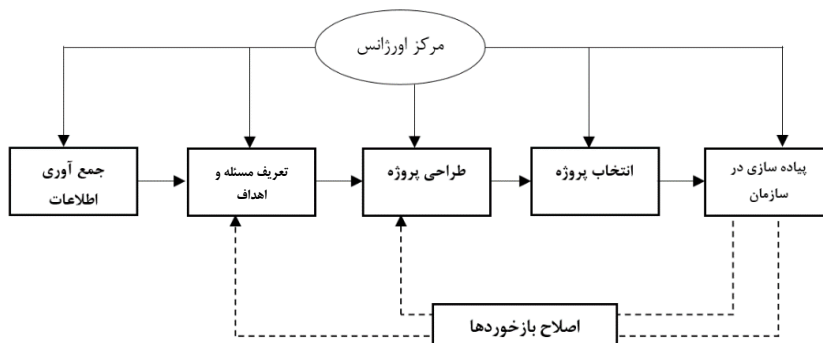
بر اساس تعاریف بحران، حادثه با توجه به شدت تهدید، زمان مورد نیاز برای رسیدگی به آن و سطح آگاهی نسبت به آن در شرایط متفاوتی رخ می دهد. مسئله اصلی این گونه بحران های طبیعی که طی سالیان مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است، آن است که چگونه دستگاه های ذیربط، نیروهای امدادی در شرایط مختلف بروز بحران، خود را برای بر طرف کردن آن آماده نگاه دارند و از نزدیکترین پایگاه، در کمترین زمان به تعداد مناسب و در بهترین مسیر خود را به محل حادثه برسانند. از سوی دیگر این آمادگی باید در شرایط مختلف بروز حادثه از نظر میزان بزرگی حادثه، زمان مورد نیاز برای رسیدن به حادثه و پیش بینی کردن یا غافل گیر شدن توسط بحران همواره حفظ شود. این موضوعی مسئله اصلی پژوهش حاضر است.

در این پژوهش با توجه به شناخت مسئله، با استفاده از علم تحقیق در عملیات و مدلسازی ریاضی الگویی برای تخصیص پایگاه ها و نیروهای امدادی در بهترین مسیر با کمترین زمان، تحت شرایط متفاوت بروز بحران برای برطرف ساختن آن ارائه شده است. با کمک این پژوهش مسئولان و تصمیم سازان می توانند با اخذ تصمیم های اثربخش تأخیر در رسیدن و هزینه های امداد رسانی را کمینه نمایند. در همین راستا دو وضعیت رخداد حادثه (وضعیت A و E)، تحت عنوان دو سناریو تعریف شدند که برای هر یک از سناریوها مدل ریاضی منحصر به فردی ساخته شده و هر یک را در نرم افزار حل مسائل بهینه سازی، کدنویسی شده و با دو مثال آنها را حل می شوند. بعد از حل مدل، به ازای هر سناریو یک الگو با توجه به مثال ها برای سناریوهای مورد نظر ارائه می شود. این الگوها، زمان حرکت نیروها، تخصیص نیروها به مناطق بحرانی، تعداد نیروی مورد نیاز برای رفع بحران و مسیر دسترسی به بحران را برای دو وضعیت بررسی خواهد نمود.

مروری بر مبانی نظری

در سالیان اخیر وقوع پی در پی و مخرب بلایای طبیعی موجب خسارات جدی بر ساختار جوامع و اقتصاد ملل مختلفی شد که تحت تأثیر بلایای طبیعی بوده‌اند. حوادثی از قبیل سونامی سال ۲۰۰۴ میلادی اندونزی، زلزله وینچوان در سال ۲۰۰۸ میلادی، زلزله وسیع سال ۲۰۱۱ میلادی ژاپن، سیل در هند در سال ۲۰۱۳ میلادی، سیل ایران در سال ۱۳۹۸ و دیگر حوادث طبیعی که در نقاط مختلف دنیا به وجود آمده است. وقوع این گونه بلایا در آینده هم اجتناب ناپذیر است (ژو و همکاران^۱، ۲۰۱۷).

یکی از مهم‌ترین تعاریف در این دست از مسائل، مفهوم تصمیم‌گیری اورژانس^۲ است که به معنی انتخاب رویه‌ای برای رسیدن به اهداف اصلی سازمان‌هاست. تصمیم‌گیری مسائل اورژانس را می‌توان به ۶ عنوان تقسیم کرد. تعریف مسئله، مشخص کردن اهداف، طراحی پروژه، انتخاب پروژه، پیاده‌سازی در سازمان، مشاهده و اصلاح بازخوردها که در شکل زیر قابل مشاهده است.



شکل ۲. فرآیند عمومی مدیریت تصمیم‌گیری اورژانس (ژو و همکاران، ۲۰۱۷)

به‌کارگیری علم تحقیق در عملیات برای حوادث و بلایای طبیعی یکی از مهم‌ترین نکات مورد توجه در دهه‌های اخیر بوده است. این روزها مدیریت زنجیره تأمین و لجستیک (آمد و پشتیبانی) نیز به‌عنوان یک ابزار کاربردی و نوعی تکنیک جهت ارائه روشی کارا و مؤثر برای

1. Zhou et al.

2. Emergency Decision Making (EDM)

نجات افراد متاثر از بلایای طبیعی استفاده می شود (لئو و یان^۱، ۲۰۱۱). هدف واکنش ها به بلایای طبیعی در زنجیره کمک رسانی بشر دوستانه^۲ ارائه کمک رسانی سریع به منطقه مورد تأثیر حادثه به منظور کمینه کردن میزان مرگ و میر افراد ساکن در آن منطقه است (لئو و یان، ۲۰۱۱).

مدیریت اورژانس برای بلایای طبیعی را می توان به ۴ فاز تقسیم کرد؛ کاهش شدت بحران^۳، آمادگی^۴، واکنش^۵ و ترمیم یا بهبود^۶ (آلتای^۷ و همکاران، ۲۰۰۶). بر طبق این چهار دسته و با توجه به شرایط مختلف پیش آمده هنگام حادثه، مقالات متعددی در سال های اخیر با استفاده از روش های تحقیق در عملیات و دانش مدیریت ارائه شده است و تلاش های زیادی برای افزایش کارایی و اثربخشی کمک ها در مواقع بروز بحران و بلایای طبیعی انجام شده است. مقالات آلتای و همکاران (۲۰۰۶) و گالیندو و باتا^۸ (۲۰۱۳) به بررسی و مرور مقالاتی پرداختند که با توجه به گروه بندی ۴ گانه مذکور از علم تحقیق در عملیات برای مدیریت بحران استفاده کرده اند. برای فاز کاهش شدت بحران روش هایی نظیر مدل صف برای مطالعه روی تأثیرات بلایای طبیعی به کار رفته است (آتنسیا و مرنو^۹، ۲۰۰۴؛ شین^{۱۰}، ۲۰۰۴). برای فاز آمادگی که مقاله حاضر تا حدودی با آن مرتبط است، مدل های موجود بیشتر بر پایه زنجیره تأمین طراحی و نوشته شده اند (مانند مکان یابی تسهیلات امداد رسانی (راولز و ترنکوئیست^{۱۱}، ۲۰۱۰ و جیا^{۱۲} و همکاران، ۲۰۰۷). فاز واکنش که بیشترین ارتباط را با مسئله مورد مطالعه پژوهش حاضر دارد، به منظور مدیریت ۴ فاز مورد بحث در مدیریت بلایای طبیعی که پیش تر ذکر شده بود، علم تحقیق در عملیات توجه ویژه ای را از طرف پژوهشگران به خود اختصاص داده است (سونگ^{۱۳} و همکاران ۲۰۱۸). توره و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی نیز مروری بر کمک های امدادی برای بحران ها و بلایای طبیعی بر پایه

1. Liu and Yan

2. Humanitarian relief chain

3. Mitigation

4. preparedness

5. response

6. recovery

7. Altay

8. Galindo and Batta

9. Atencia and Moreno

10. Shin

11. Rawls and Turnquist

12. Jia

13. Song

مدل‌های مسیریابی و توزیع داشت (توره^۱ و همکاران ۲۰۱۲). اوزدامار در سال ۲۰۱۵ میلادی میلادی نیز مروری بر مدل‌های متفاوت دیگر و روش‌های حل در لجستیک (آمداد و پشتیبانی) بشردوستانه داشت (اوزدامار^۲ و ارتم^۳ ۲۰۱۵). اخیراً برای فاز بهبود و ترمیم مطالعه‌ای تحت عنوان یک مسئله چندهدفه با روش برنامه‌ریزی آرمانی ارائه شد که توانایی حل مسائل توزیع نیروهای امدادی و ترمیم شبکه^۴ را دارد (رانسیکاربوم^۵ ۲۰۱۶ و رانسیکاربوم ۲۰۱۶b). برای بررسی و مطالعه بیشتر به منظور دریافت جزئیات و دیدن مدل‌ها و روش‌های حل دیگر به مقالات زیر رجوع کنید (آلتای و همکاران ۲۰۰۶، گالیندو و باتا ۲۰۱۳، آتسیا و مرنو ۲۰۰۴، شین ۲۰۰۴، راولز و ترنکوئیست ۲۰۱۰، جیا و همکاران ۲۰۰۷، سونگ و همکاران ۲۰۱۸، توره و همکاران ۲۰۱۲، اوزدامار و ارتم ۲۰۱۵، رانسیکاربوم ۲۰۱۶ و رانسیکاربوم ۲۰۱۶a). تحقیقاتی که در زمینه واکنش‌های اورژانسی یا کمک‌رسانی برای بلایای طبیعی که با روش‌های تصمیم‌گیری مسائل چندهدفه در سال‌های اخیر ارائه شده را می‌توان از مقالات (صبوحی و همکاران ۲۰۱۸، چاو^۶ و همکاران ۲۰۱۷، ماهارجان و هاناوکا^۷ هاناوکا^۷ ۲۰۱۸، وحدانی و همکاران ۲۰۱۷، برزین‌پور و اسماعیلی ۲۰۱۳، بزرگی و همکاران ۲۰۱۳، وحدانی و همکاران ۲۰۱۶، بوداگی و همکاران ۲۰۱۶ و رودریگز^۸ و همکاران ۲۰۱۷) مطالعه کرد.

در این مطالعه با استفاده از تحقیق در عملیات و مدل‌سازی ریاضی به فازهای واکنش و آماده‌سازی نیروهای امدادی برای کمک‌رسانی در حوادث و بلایای طبیعی می‌پردازد.

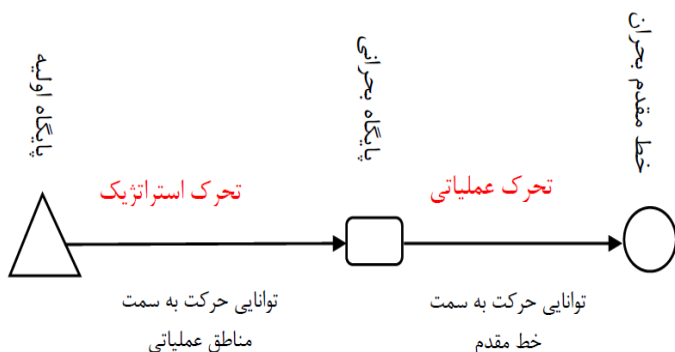
روش‌شناسی پژوهشی

تحقیق حاضر از نظر هدف، توصیفی و از نظر نوع استفاده، پژوهشی کاربردی است. با توجه به تعاریف مختلف درباره شرایط متفاوت بروز بحران، دو مورد A و E (در بخش مقدمه) به‌عنوان دو سناریو در نظر گرفته شدند و به ازای هر یک از سناریوها مدلی ریاضی و مثالی ارائه می‌شود.

-
1. Torre
 2. Özdamar
 3. Ertem
 4. Network restoration
 5. Ransikarbum
 6. Cao
 7. Maharjan and Hanaoka
 8. Rodríguez

سناریوی اول

در سناریوی اول بحران به شکلی رخ خواهد داد که در آن تهدیدات شدید، زمان‌ها کوتاه و حوادث قابل پیش‌بینی هستند، در این وضعیت هنوز حادثه‌ای رخ نداده است، در چنین حالتی تصمیم‌گیران باید از قبل، خودشان را برای مواجهه با چنین بحرانی آماده کرده باشند تا بتوانند در زمان کوتاه تصمیم‌های لازم را بگیرند. در این سناریو، تعدادی پایگاه اولیه به‌عنوان محل نگهداری نیروهای امدادی و تجهیزات در سرتاسر منطقه مدنظر هستند تا در مواقع بحرانی، نیروهای مورد نیاز را برای برطرف کردن بحران از پایگاه اولیه به سمت نقاط بحرانی ارسال می‌کند. نیروها، تجهیزات و کمک‌های امدادی پس از ارسال از پایگاه‌های اولیه و قبل از رسیدگی به بحران، باید در یک سری نقاط در نزدیکی بحران مستقر شوند که به این نقاط پایگاه‌های بحرانی گفته می‌شود. بعد از استقرار، حرکت نیروها به سمت خط مقدم بحران برای مقابله اصلی با رویداد آغاز می‌شود. در طول این فرآیند زمان‌های بارگیری، پیمایش مسیرها و استقرار نیروها و تجهیزات به عنوان هدف اصلی و هزینه‌های این تخصیص و اعزام به‌عنوان هدف جانبی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل ۳ شمای کلی از مسئله برای سناریوی اول به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۳. شبکه جریان تحرکات بین پایگاه‌ها و خط مقدم سناریوی اول

شدت بحران در سناریوی اول

در این پژوهش مفهومی به اسم شدت بحران برای نقاط بحرانی تعریف شده است. در

سناریوی اول شدت بحران مد نظر به عواملی چون احتمال بروز حادثه یا بلایای طبیعی در نقاط مورد بررسی، جمعیت ساکن در محل‌هایی که احتمال وقوع بلایای طبیعی در آن منطقه وجود دارد و تعداد تسهیلات زیرساختی مهم موجود در محل مورد تأثیر بحران بستگی دارد. برای محاسبه این معیار رابطه زیر در نظر گرفته شده است. در فرمول زیر که نمایانگر میزان شدت بحران در سناریوی اول مسئله است، war_r احتمال بروز بلای طبیعی یا بحران در نقطه r ، pop_r میزان جمعیت ساکن در منطقه بحرانی و fac_r زیرساخت‌های مهم منطقه بحرانی r است. حاصل ضرب احتمال بروز بحران در مجموع موزون جمعیت موجود و تسهیلات زیرساختی موجود در محل مورد تأثیر بحران احتمالی را شدت بحران می‌نامیم. برای وزن‌دهی هر یک از پارامترهای جمعیت و زیرساخت از نظرات خبره با توزیع پرسش‌نامه‌هایی میان آن‌ها استفاده شده است. با افزایش جمعیت ساکن در منطقه بحرانی، زیرساخت‌های مهم آن منطقه و احتمال بروز حادثه در این منطقه شدت بحران در آن منطقه نیز افزایش خواهد یافت.

$$\delta_r = war_r(\alpha pop_r + \beta fac_r) \quad (1)$$

مدل ریاضی سناریوی اول:

مجموعه‌های مورد نیاز و همچنین اندیس‌های مورد استفاده برای مدل ریاضی سناریوی اول در این قسمت تعریف شده است.

$s \in \{1, \dots, S\} =$ مجموعه گره‌های پایگاه‌های اولیه

$n \in \{1, \dots, N\} =$ مجموعه پایگاه‌های بحرانی

$r \in \{1, \dots, R\} =$ مجموعه نقاط خط مقدم بحران

$p \in \{1, \dots, P\} =$ مجموعه نیروهای امدادی

$t \in \{1, \dots, T\} =$ مجموعه دوره‌های زمانی

$w =$ مجموعه تمامی گره‌ها

$s, n, r, i, j, k \in w$

پارامترهای مورد استفاده در مدل ریاضی سناریوی اول به همراه تعریف هر پارامتر در جلوی آن در این قسمت، قبل از ارائه مدل ریاضی به نمایش گذاشته شده است.

$cap_s^{pt} =$ تعداد نیروهای امدادی نوع p موجود در پایگاه اولیه s در دوره t

cam_n^{pt}	=	ظرفیت نگهداری نیروی امدادی نوع p در پایگاه بحرانی n در دوره t
d_r^{pt}	=	میزان تقاضای خط مقدم بحران r از نیروی امدادی نوع p در دوره t
TU_i^{pt}	=	زمان بارگیری نیروی امدادی نوع p در گره i در دوره t
TR_{ij}^{pt}	=	زمان سفر نیروی امدادی نوع p از گره i به گره j در دوره t
TD_j^{pt}	=	زمان تخلیه و استقرار نیروی امدادی نوع p در گره j در دوره t
UT_j^{pt}	=	بیشترین زمان رسیدن نیروی امدادی نوع p به گره j در دوره t که بعد از آن تأخیر رخ می دهد
OT_j^{pt}	=	حد بالای مجاز برای رسیدن نیروی امدادی نوع p به گره j در دوره t
CM_j^{pt}	=	هزینه نگهداری نیروی امدادی نوع p در گره j و در دوره t
CR_j^{pt}	=	هزینه ثابت جابه جایی و سفر نیروی امدادی نوع p به گره i در دوره t
CT_{ij}^{pt}	=	هزینه جابجایی و استقرار نیروی امدادی نوع p بین گره های i و j و در دوره t
α, β	=	اوزان جمعیت موجود در منطقه بحرانی و زیرساخت های اساسی محل بحرانی
pop_j	=	میزان جمعیت در معرض خطر بلایای طبیعی در نقطه j
fac_j	=	میزان تسهیلات و زیرساخت های اساسی در معرض خطر بلایای طبیعی در نقطه j
war_j	=	احتمال بروز بلایای طبیعی در نقطه j
M	=	یک عدد بزرگ

متغیرهای تصمیم

x_{ij}^{pt}	=	تعداد نیروی امدادی نوع p که از گره i به گره j در دوره t انتقال می یابد
y_{ij}^{pt}	=	$\begin{cases} 1 & \text{اگر نیروی امدادی نوع p که به گره j در دوره t تخصیص می یابد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$
IN_i^{pt}	=	تعداد نیروی امدادی نوع p که در دوره t در گره i باقی می ماند و نگهداری می شوند.

در ادامه مدل ریاضی عدد صحیح خطی ساخته شده بر پایه مدل های کلاسیک زنجیره تأمین برای سناریوی دوم به نمایش در آمده، سپس تعاریف توابع هدف و محدودیت ها بعد از مدل ریاضی ارائه شده است.

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 = \sum_{i=1}^w \sum_{j=1|i \neq j}^w \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Y_{ij}^{pt} \left[\left(\text{war}_j (\alpha \text{pop}_j + \beta \text{fac}_j) \right) \times (TU_i^{pt} + TR_{ij}^{pt} + TD_j^{pt} - UT_j^{pt}) \right] \\ Z_2 = \sum_{i=1|i \neq j}^w \sum_{j=1|i \neq j}^w \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Y_{ij}^{pt} (TU_i^{pt} + TR_{ij}^{pt} + TD_j^{pt}) \\ Z_3 = \sum_{i=1}^w \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (IN_i^{pt} \times CM_i^{pt}) + \sum_{i=1|i \neq j}^w \sum_{j=1|i \neq j}^w \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (X_{ij}^{pt} \times CT_{ij}^{pt}) \\ \quad + \sum_{i=1|i \neq j}^w \sum_{j=1|i \neq j}^w \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (Y_{ij}^{pt} \times CR_j^{pt}) \end{array} \right. \quad (2)$$

$$Z = \min Z_1 + \min Z_2 + \min Z_3 \quad (3)$$

s.t.

$$IN_j^{pt} = IN_j^{p(t-1)} + \sum_{i=1}^w X_{ij}^{pt} - \sum_{k=1}^F X_{jk}^{pt} ; \quad \forall j \in n, p, t \quad (4)$$

$$IN_j^{pt} \leq \text{cam}_j^{pt} ; \quad \forall j \in n, p, t \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^w X_{ij}^{pt} \leq \text{cap}_i^{pt} ; \quad \forall i \in s, p, t \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^w X_{ij}^{pt} = d_j^{pt} \quad \forall j \in r, p, t \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^w Y_{ij}^{pt} (TU_i^{pt} + TR_{ij}^{pt} + TD_j^{pt}) \leq OT_j^{pt} ; \quad \forall j \in r, p, t \quad (8)$$

$$X_{ij}^{pt} \leq M \times Y_{ij}^{pt} ; \quad \forall i \in w, j \in w, p, t \quad (9)$$

$$\sum_{i=1|i \neq j}^w \sum_{i=1|i \neq j}^w (TU_i^{pt} + TR_{ij}^{pt} + TD_j^{pt}) \geq \sum_{j=1}^w UT_j^{pt} ; \quad \forall i \in w, j \in w, p, t \quad (10)$$

$$X_{ij}^{pt}, IN_j^{pt} \geq 0 \quad \forall i \in w, j \in w, p, t \quad (11)$$

$$Y_{ij}^{pt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in w, j \in w, p, t \quad (12)$$

در مدل ارائه شده در این پژوهش، در رابطه شماره ۲ تابع هدف اول تأثیر تأخیر روی شدت بحران را کمینه می‌کند. تابع هدف دوم زمان کل رسیدن را کمینه می‌کند.

تابع هدف سوم هزینه کل جابه جایی و استقرار نیروهای امدادی را کمینه می کند. در محدودیت ها نیز محدودیت شماره ۴ میزان نیروهای امدادی نگهداری شده در یک دوره در پایگاه بحرانی را نمایش می دهد. محدودیت شماره ۵ تضمین می کند که میزان نیروهای نگهداری شده در پایگاه های بحرانی نباید از مقدار ظرفیت آن پایگاه ها بیشتر باشد. محدودیت شماره ۶ خاطر نشان می کند میزان ظرفیت ارسال نیرو از طرف پایگاه اولیه به سمت نقاط بحرانی نباید بیشتر از ظرفیت آن پایگاه باشد. در محدودیت شماره ۷ میزان تقاضای نیرو توسط پایگاه بحرانی از پایگاه اولیه مشخص شده است. محدودیت شماره ۸ میزان حد بالا یا پنجره زمانی برای رسیدن نیروها به نقاط خط مقدم بحران را مشخص می کند. محدودیت شماره ۹ نیز محدودیت تخصیص نیروها است و بیان می کند زمانی که نیرو به مناطق بحرانی تخصیص یافت نیروها به تعداد مورد نیاز به آن نقطه ارسال گردد. محدودیت ۱۰ بیانگر این نکته است که بهترین حالت برای بهینه شدن مدل این است که میزان زمان رسیدن با میزان بیشترین زمان قبل از بروز تأخیر برابر باشد و در غیر این صورت تأخیر صورت گیرد. محدودیت های ۱۱ و ۱۲ نیز محدودیت های علامت مدل ارائه شده هستند.

ویژگی ها و فرضیات مدل سناریوی اول

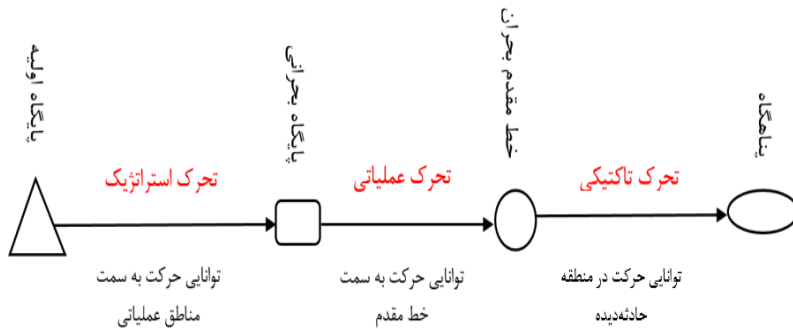
۱. مدل پیشنهادی یک مدل عدد صحیح خطی^۱ است.
۲. پایگاه های اولیه محل استقرار اولیه نیروهای امدادی در نقاط غیر بحرانی است.
۳. پایگاه های بحرانی، پایگاه ها یا نقاط نزدیک حادثه یا بلای طبیعی رخ داده است و محل حضور و استقرار نیروها قبل از حضور و کمک به مردم بحران زده در خط مقدم بحران هستند.
۴. محل شروع سفر در این سناریو پایگاه های اولیه و محل پایان یافتن سفرها نقاط خط مقدم بحران است.
۵. هر پایگاه امدادی با توجه به ظرفیت خود می تواند به چندین پایگاه بحرانی و خط مقدم بحران نیرو ارسال کند.

۶. در مسئله مورد مطالعه امکان ارسال چند نوع نیروی امدادی از یک پایگاه با اندازه‌های مختلف و سرعت‌های متفاوت در رسیدن به مقاصد متفاوت با توجه به ظرفیت موجودش وجود دارد.
۷. امکان نگهداری نیرو و تجهیزات امدادی در پایگاه‌ها به منظور پشتیبانی و آمادگی بهتر برای دوره بعد وجود دارد.
۸. حد بالایی برای زمان رسیدن به پایگاه و خط مقدم بحران وجود دارد بدین منظور که نیروها تا حدی چابکی خود را افزایش دهند که از زمان جابه جایی آن‌ها از حدی فراتر نرود.
۹. در دوره زمانی صفر در پایگاه‌های بحرانی نیرویی وجود ندارد.
۱۰. حرکت نیروها همواره به ترتیب از پایگاه اولیه به پایگاه بحرانی به خط مقدم بحران است و حرکت مستقیم از پایگاه اولیه به خط مقدم یا بازگشت نیرو و به‌طور کلی تحرک غیر از سیستم ارائه شده در مدل مجاز نیست.
۱۱. در این سناریو نیروها اگر بعد از زمان مشخصی به محل بحرانی برسند، تأخیر در رسیدن صورت گرفته است.
۱۲. در این مطالعه با افزایش تأخیر در رسیدن به خط مقدم بحران شدت بحران نیز افزایش پیدا می‌کند که به آن تأثیر تأخیر در شدت بحران گفته می‌شود و به‌عنوان یک هدف در مسئله به کار رفته است.
۱۳. در این پژوهش مراحل ارسال نیرو به ترتیب: بارگیری، سفر بین گره‌ها و استقرار در گره‌ها است.

سناریوی دوم

وضعیت کاملاً بحرانی به عنوان سناریوی دوم مورد ارزیابی قرار گرفت که در آن وضعیت، حادثه طبیعی مورد انتظار، شدید، زمان کوتاه و غافلگیری وجود دارد، مدیریت در چنین حالتی بیش از هر چیز به تجربه، مهارت، سرعت، هوشمندی، خلاقیت و موقعیت‌سنجی نیاز دارد. در این وضعیت دیگر وقوع بحران را پیش‌بینی نمی‌شود چرا که در این حالت بحران رخ داده است و غافلگیری اتفاق افتاده است. شکل مسئله و فرضیه‌های آن تا جایی شبیه به سناریوی اول است ولی تفاوت‌های عمده‌ای هم در آن وجود دارد. اولین اتفاق شدت بحران است که با دانستن محل‌های بحرانی و شدت بروز

حادثه‌ها که وارد شده‌اند، دیگر از روش احتمال بروز بحران استفاده نمی‌شود. یک سطح دیگر در این سناریو به نام پناهگاه‌ها به مدل اضافه شده است. نیروهای امدادی تمامی فعالیت‌ها را طبق روش سناریوی اول پیموده و به منطقه خط مقدم بحران می‌رسند. وظیفه بعدی نیروها در خط مقدم، مقابله با بحران با نجات مردم و رساندن آن‌ها به پناهگاه‌ها است که در طی این پیشروی در مناطق بحرانی نیروها و تجهیزات امدادی ارسالی به منطقه، با نرخ مشخصی در حال کاهش هستند. شمای کلی تحرکات در بین سطوح سناریوی دوم در شکل ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۴. شبکه جریان تحرکات بین پایگاه‌ها و خط مقدم در سناریوی دوم

شدت بحران در سناریوی دوم

در این سناریو به دلیل اینکه از مرحله پیش‌بینی وقوع حادثه گذر شده است و حادثه رخ داده است، پس روش سناریوی اول برای محاسبه شدت بحران در این سناریو کارساز نیست. در این وضعیت که بحران رخ داده است و از میزان شدت حادثه رخ داده و نقاطی که در آن بحران بروز کرده است آگاهی وجود دارد؛ بنابراین مهم‌ترین عاملی که شدت بحران به آن بستگی دارد میزان شدت حادثه است که با EN_r نمایش داده می‌شود. از عوامل دیگر همچون سناریوی اول میزان جمعیت ساکن در محل منطقه بحرانی و زیرساخت‌های اساسی در این نقاط می‌تواند عوامل مهم مؤثر در میزان شدت بحران در نظر گرفته شود. جمع موزون این پارامترها به عنوان شدت بحران سناریو دوم در نظر گرفته شده است.

$$\delta'_f = (\alpha pop_r + \beta fac_r + \gamma EN_r) \quad (1)$$

مدل ریاضی سناریوی دوم

مجموعه‌های مورد نیاز و همچنین اندیس‌های مورد استفاده برای مدل ریاضی سناریوی دوم در این قسمت تعریف شده است:

$s \in \{1, \dots, S\} =$ مجموعه گره‌های پایگاه‌های اولیه

$n \in \{1, \dots, N\} =$ مجموعه پایگاه‌های بحرانی

$r \in \{1, \dots, R\} =$ مجموعه نقاط خط مقدم بحران

$b \in \{1, \dots, B\} =$ مجموعه پناهگاه‌ها

$p \in \{1, \dots, P\} =$ مجموعه نیروهای امدادی

$t \in \{1, \dots, T\} =$ مجموعه دوره‌های زمانی

$W =$ مجموعه تمامی گره‌ها

$s, n, r, b, i, j, k \in W$

پارامترهای مورد استفاده در مدل ریاضی سناریوی دوم به همراه تعریف هر پارامتر در جلوی آن در این قسمت، قبل از ارائه مدل ریاضی به نمایش گذاشته شده است.

cap_s^{pt}	=	تعداد نیروهای امدادی نوع p موجود در پایگاه اولیه s در دوره t
cam_n^{pt}	=	ظرفیت نگهداری نیروی امدادی نوع p در پایگاه بحرانی n در دوره t
d_r^{pt}	=	میزان تقاضای خط مقدم بحران r از نیروی امدادی نوع p در دوره t
TU_i^{pt}	=	زمان بارگیری نیروی امدادی نوع p در گره i در دوره t
TR_{ij}^{pt}	=	زمان سفر نیروی امدادی نوع p از گره i به گره j در دوره t
TD_j^{pt}	=	زمان تخلیه و استقرار نیروی امدادی نوع p در گره j در دوره t
UT_j^{pt}	=	بیشترین زمان رسیدن نیروی امدادی نوع p به گره j در دوره t که بعد از آن تأخیر رخ می‌دهد
OT_j^{pt}	=	حد بالای مجاز برای رسیدن نیروی امدادی نوع p به گره j در دوره t
CM_j^{pt}	=	هزینه نگهداری نیروی امدادی نوع p در گره j و در دوره t
CR_j^{pt}	=	هزینه ثابت جابجایی و سفر نیروی امدادی نوع p به گره i در دوره t
CT_{ij}^{pt}	=	هزینه جابجایی استقرار نیروی امدادی نوع p بین گره‌های i و j و در دوره t

pop_j	=	میزان جمعیت در معرض خطر بلایای طبیعی در نقطه j
fac_j	=	میزان تسهیلات و زیرساخت‌های اساسی در معرض خطر بلایای طبیعی در نقطه j
EN_j	=	میزان خسارت وارد شده یا شدت حادثه در نقطه j
α, β, γ	=	اوزان جمعیت موجود در منطقه بحرانی، زیرساخت‌های اساسی محل بحرانی و میزان خسارت وارد شده
a_j^{pt}	=	درصد نیروها و تجهیزات امدادی نوع p که بعد از رفع بحران و نجات مردم در نقطه j و دوره زمانی t باقی می‌ماند
M	=	یک عدد بزرگ

متغیرهای تصمیم

X_{ij}^{pt}	=	تعداد نیروی نوع p که از گره i به گره j در دوره t انتقال می‌یابد
Y_{ij}^{pt}	=	$\begin{cases} 1 & \text{اگر نیروی امدادی نوع } p \text{ که به گره } j \text{ در دوره } t \text{ تخصیص می‌یابد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$
IN_i^{pt}	=	تعداد نیروی نوع p که در دوره t در گره i باقی می‌مانند و نگهداری می‌شوند
g_j^{pt}	=	میزان نیروی p باقی مانده پس از رفع بحران در گره j و در دوره t

در این ادامه مدل ریاضی عدد صحیح خطی ساخته شده بر پایه مدل‌های کلاسیک زنجیره تأمین برای سناریوی دوم به نمایش در آمده، سپس تعاریف توابع هدف و محدودیت‌ها بعد از مدل ریاضی ارائه شده است.

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 = \sum_{i=1|i \neq j}^w \sum_{j=1|i \neq j}^w \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Y_{ij}^{pt} [(\gamma EN_j + \alpha pop_j + \beta fac_j) \\ \quad \times (TU_i^{pt} + TR_{ij}^{pt} + TD_j^{pt} - UT_j^{pt})] \\ Z_2 = \sum_{i=1|i \neq j}^w \sum_{j=1|i \neq j}^w \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T Y_{ij}^{pt} (TU_i^{pt} + TR_{ij}^{pt} + TD_j^{pt}) \\ Z_3 = \sum_{i=1}^w \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (IN_i^{pt} \times CM_i^{pt}) + \sum_{i=1|i \neq j}^w \sum_{j=1|i \neq j}^w \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (X_{ij}^{pt} \times CT_{ij}^{pt}) \\ \quad + \sum_{i=1|i \neq j}^w \sum_{j=1|i \neq j}^w \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (Y_{ij}^{pt} \times CR_j^{pt}) \end{array} \right. \quad (2)$$

$$Z = \min Z_1 + \min Z_2 + \min Z_3 \quad (3)$$

s.t.

$$IN_j^{pt} = IN_j^{p(t-1)} + \sum_{i=1}^w X_{ij}^{pt} - \sum_{k=1}^F X_{jk}^{pt} ; \quad \forall j \in n, p, t \quad (4)$$

$$IN_j^{pt} \leq cam_j^{pt} ; \quad \forall j \in n, p, t \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^w X_{ij}^{pt} \leq cap_i^{pt} ; \quad \forall i \in s, p, t \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^w X_{ij}^{pt} = d_j^{pt} \quad \forall j \in r, p, t \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^w Y_{ij}^{pt} (TU_i^{pt} + TR_{ij}^{pt} + TD_j^{pt}) \leq OT_j^{pt} ; \quad \forall j \in r, p, t \quad (8)$$

$$X_{ij}^{pt} \leq M \times Y_{ij}^{pt} ; \quad \forall i \in w, j \in w, p, t \quad (9)$$

$$\sum_{i=1| i \neq j}^w \sum_{i=1| i \neq j}^w (TU_i^{pt} + TR_{ij}^{pt} + TD_j^{pt}) \geq \sum_{j=1}^w UT_j^{pt} ; \quad \forall i \in w, j \in w, p, t \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^{B \in w} Y_{ij}^{pt} = 1 ; \quad \forall j \in r, p, t \quad (11)$$

$$g_j^{pt} = \sum_{i=1}^w Y_{ij}^{pt} \times d_i^{pt} \times a_j^{pt} \quad \forall j \in b, p, t \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^w X_{ij}^{pt} = g_j^{pt} \quad \forall j \in b, p, t \quad (13)$$

$$X_{ij}^{pt}, IN_j^{pt}, g_j^{pt} \geq 0 \quad \forall i \in w, j \in w, p, t \quad (14)$$

$$Y_{ij}^{pt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in w, j \in w, p, t \quad (15)$$

در مدل ارائه شده برای سناریوی دوم، در رابطه شماره ۲ تابع هدف اول تأثیر تأخیر روی شدت بحران را کمینه می‌کند با این تفاوت که شدت بحران در این سناریو با توجه به رخ دادن حادثه یا بلای طبیعی از حالت پیش‌بینی بروز حادثه خارج شده و طبق تعریف جدید ارائه شده برای شدت بحران در سناریوی دوم محاسبه می‌شود. تابع هدف دوم زمان کل رسیدن را کمینه می‌کند. تابع هدف سوم هزینه کل جابجایی و استقرار نیروهای امدادی را کمینه می‌کند. محدودیت‌های ۴ تا ۱۰ همانند مدل سناریوی اول عمل می‌کنند. محدودیت ۱۱ رسیدن نیروها

به گره‌های پایانی یعنی پناهگاه‌ها را تضمین می‌کند. محدودیت ۱۲ و ۱۳ نشانگر میزان نیروی باقی‌مانده پس از مقابله با بحران در گره پناهگاه‌ها است. محدودیت ۱۴ و ۱۵ نیز محدودیت‌های علامت مدل در سناریوی دوم هستند.

ویژگی‌ها و فرضیات مدل سناریوی دوم

۱. ویژگی‌های ۱ تا ۱۳ سناریوی اول برای سناریوی دوم نیز صدق می‌کند.
۲. هنگام رسیدن نیروهای امدادی به خط مقدم بحران، نیروها به مقابله با بحران می‌پردازند و مردم را به پناهگاه‌ها برسانند.
۳. در حین مقابله با بحران مقداری از نیروها و تجهیزات و کمک‌های امدادی با نرخ مشخصی در حال کم شدن هستند.
۴. حرکت نیروها همواره به ترتیب از پایگاه اولیه به پایگاه بحرانی به خط مقدم و در نهایت به پناهگاه‌ها است و حرکت مستقیم از پایگاه اولیه به خط مقدم یا بازگشت نیرو و به‌طور کلی تحرک غیر از سیستم ارائه شده در مدل مجاز نیست.
۵. حرکت همه گروه‌ها و تجهیزات امدادی از یک پایگاه اولیه یا پایگاه بحرانی شروع شده و به یک پناهگاه ختم می‌شود.

یافته‌های پژوهش

مثال اول

برای اثبات درستی عملکرد مدل ریاضی پیشنهادی در سناریوی اول یک مثال با داده‌های تصادفی با بازه‌های مشخص در نظر گرفته شده است. مدل ریاضی ارائه شده در نرم‌افزار گمز^۱ کدنویسی شده است و مثال‌هایی برای بررسی درستی مدل در این نرم‌افزار آزمون شد که نتایج یکی از این مثال‌ها بدین شرح است: در مثالی با ۳ پایگاه اولیه، ۳ پایگاه بحرانی، وقوع ۲ مورد بحران در نقاطی با عنوان خط مقدم بحران پیش‌بینی شد. تعداد نیروهای مورد استفاده در این مثال ۳ نوع نیروی امدادی و کمک‌رسان متفاوت فرض شده و تعداد دوره‌های زمانی دو دوره در نظر گرفته شده است. پس از حل مدل با روش سی‌پلکس^۲ در نرم‌افزار گمز نتایج حاصله در

1. GAMS 24.1

2. CPLEX

جداول ۱ تا ۳ آورده شده است. جدول ۱ نیروهای تخصیص یافته به هر نقطه بحرانی و همچنین تعداد نیروهای ارسالی از هر نوع را در دوره زمانی اول بیان می‌کند. جدول شماره ۲ تخصیص و میزان نیروهای ارسالی به نقاط بحرانی را برای دوره دوم تشریح می‌کند. جدول شماره ۳ نیز تعداد نیروهای نگهداری شده برای پشتیبانی و یا استفاده در دوره‌های بعدی که در پایگاه بحرانی نگهداری می‌شود را نشان می‌دهد. توابع هدف مثال مورد نظر نیز پس از حل جواب‌های ۴۱۶۹۶، ۱۵۲ ساعت و ۳۱۱۰۷ دلار برای توابع هدف به ترتیب، میزان تأثیر تأخیر در شدت بحران، زمان کل استقرار و هزینه‌های کل حمل و نقل و استقرار به دست آمده است. این مثال عددی در مدت زمان ۱ دقیقه و ۴۷ ثانیه در سیستم با پردازنده کُر آی پنج^۱ شرکت اینتل^۲ حل شده است. با افزایش تعداد گره‌ها در مثال برای سناریوی اول، نرم افزار قادر به حل مسئله در مدت زمان معقول نیست؛ ازین‌رو مسئله دارای پیچیدگی است و به اصطلاح به آنان پی سخت^۳ نیز می‌گویند.

جدول ۱. مقدار نیروی امدادی تخصیص یافته از گره i به هر گره j در دوره زمانی اول سناریوی اول

X_{ij}^{pt}, Y_{ij}^{pt}	$t = 1$																	
	$i = s1$			$i = s2$			$i = s3$			$i = n1$			$i = n2$			$i = n3$		
$j = n1$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
					24				38									
$j = n2$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
					39													
$j = n3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
		36						23										
$j = r1$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
												15				23	29	
$j = r2$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
											24	23	25					

1. Core i5

2. Intel

3. NP-Hard

جدول ۲. مقدار نیروی امدادی تخصیص یافته از گره i به هر گره j در دوره زمانی اول سناریوی اول

X_{ij}^{pt}, Y_{ij}^{pt}	$t = 2$																	
	$i = s1$			$i = s2$			$i = s3$			$i = n1$			$i = n2$			$i = n3$		
$j = n1$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
$j = n2$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
				30		18												
$j = n3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
								33	21									
$j = r1$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
													23				24	21
$j = r2$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
													21		18		16	

جدول ۳. نیروهای امدادی نگهداری شده در پایگاه‌های بحرانی در هر دوره سناریوی اول

IN_i^{pt}	$t = 1$			$t = 2$		
$i = n1$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
$i = n2$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
	14					
$i = n3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
		7				

مثال دوم

برای اثبات درستی عملکرد مدل ریاضی پیشنهادی در سناریوی دوم مثال دیگری با داده‌های تصادفی با بازه‌های مشخص در نظر گرفته شد. مدل ریاضی ارائه شده در سناریوی دوم نیز در نرم‌افزار گمز کدنویسی شد و مثال‌هایی برای بررسی درستی مدل در این نرم‌افزار آزمون شد که نتایج یکی از این مثال‌ها بدین شرح است: در مثالی با ۳ پایگاه اولیه، ۳ پایگاه بحرانی، وقوع ۲ مورد بحران در نقاطی با عنوان خط مقدم بحران به صورت قطعی به وجود آمده است. تعداد نیروهای مورد استفاده در این مثال ۳ نوع نیروی امدادی متفاوت فرض شده و تعداد دوره‌های زمانی دو دوره در نظر گرفته شده است. به دلیل عدد صحیح و خطی بودن مدل ریاضی با روش سی‌پلکس مدل حل شد و نتایج به دست آمده در جداول ۴ تا ۷ آورده شده است. جدول ۴ نیروهای تخصیص یافته به هر نقطه بحرانی و پناهگاه‌ها و همچنین تعداد نیروهای ارسالی از هر نوع را در دوره زمانی اول بیان می‌کند. جدول شماره ۵، تخصیص و میزان نیروهای ارسالی به نقاط بحرانی و پناهگاه‌ها را برای دوره دوم تشریح می‌کند. جدول شماره ۶ نیز تعداد نیروهای نگهداری شده برای پشتیبانی و یا استفاده در دوره‌های بعدی که در پایگاه بحرانی نگهداری می‌شود را نشان می‌دهد. جدول شماره ۷ که در این سناریو جزو متغیرهای تصمیم اضافه شده به مدل ریاضی است میزان نیروهایی را نشان می‌دهد که پس از مقابله با حادثه طبیعی و برطرف کردن آن، مردم را به سمت پناهگاه‌ها هدایت می‌کنند که در این مسیر مقداری از تجهیزات و نیروها از بین می‌روند. این تجهیزات و نیروها با نرخ کاهش فرضی ۵۰ درصدی باقی می‌مانند. توابع هدف مثال مورد نظر نیز پس از حل، جواب‌های ۱۱۵۲۷۶، ۲۵۲ ساعت و ۲۵۷۹۰ دلار برای توابع هدف به ترتیب، میزان تأثیر تأخیر در شدت بحران، زمان کل استقرار هزینه‌های کل حمل و نقل و استقرار به دست آمده است. مثال عددی سناریوی دوم در مدت زمان ۴ دقیقه و ۱۹ ثانیه در سیستم با پردازنده گُر آی پنج شرکت اینتل حل شده است. با افزایش تعداد گره‌ها در مثال برای سناریوی دوم نیز، نرم‌افزار قادر به حل مسئله در مدت زمان منطقی نبوده و ازین‌رو مسئله دارای پیچیدگی است و این مسئله نیز در زمره مسائل این پی سخت است.

جدول ۴. مقدار نیروی امدادی تخصیص یافته به هر گره z که از گره i به سمت آن گره در دوره زمانی اول سناریوی دوم حرکت کرده است.

[illegible]

جدول ۵. مقدار نیروی امدادی تخصیص یافته به هر گره z که از گره i به سمت آن گره در دوره زمانی دوم سناریوی دوم حرکت کرده است.

X_{ij}^m, Y_{ij}^m		t = 2																									
		i = s1			i = s2			i = s3			i = n1			i = n2			i = n3			i = r1			i = r2				
j = n1	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3
j = n2	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3
						10	19																				
j = n3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3
		13	9		11																						
j = r1	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3
													20				15	12									
j = r2	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3
										12				10		11											
j = s1	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3
																						8				5	
j = s2	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3	p1	p2	p3
																								6	16	3	

جدول ۶. نیروهای امدادی نگهداری شده در پایگاه‌های بحرانی در هر دوره سناریوی دوم

IN_i^{pt}	$t = 1$			$t = 2$		
$i = n1$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
	12			-	-	-
$i = n2$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
	1			-	-	-
$i = n3$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
		2	3	-	-	-

جدول ۷. مقدار نیروهای باقی مانده پس از حادثه طبیعی در پناهگاه در هر دوره زمانی سناریوی دوم

g_i^{pt}	$t = 1$			$t = 2$		
$i = b1$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
	12	9		8		5
$i = b2$	$p1$	$p2$	$p3$	$p1$	$p2$	$p3$
		8	15	16	5	6

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش بعد از مطالعه تحقیقات پیشین و یافتن شکاف تحقیقاتی، موضوع پژوهش مشخص و به تحقیق حول محور موضوع پرداخته شد. سپس دو حالت از شرایط مختلف به وجود آمدن بحران یا همان بلایای طبیعی به عنوان دو سناریو مورد بررسی قرار گرفته و برای آن دو سناریو با توجه به ویژگی‌ها و شرایط وقوع آن، یک مدل ریاضی عدد صحیح خطی بر پایه مفاهیم زنجیره تأمین به صورت مجزا ساخته شد. در ادامه دو مدل ریاضی حل شد و مثال‌هایی برای اثبات درستی عملکرد مدل‌ها در ارائه شد و نتایج پس از حل مثال‌ها به نمایش گذاشته شد.

با مشاهده نتایج به دست آمده از حل مثال‌های هر دو سناریو، درستی عملکرد مدل در شرایط مختلف بررسی شد. در هر دو مثال جواب‌های منطقی در حالت بهینه برای مدل حاصل شده است. با تکیه بر این جواب‌های به دست آمده این نتیجه به دست می‌آید که مدل‌های ارائه شده برای استفاده آزمایشی در تخصیص نیروهای امدادی به بلایای طبیعی می‌تواند کاربرد عملی داشته و مورد استفاده دستگاه‌های ذی ربط قرار بگیرد.

بر اساس نتایج پژوهش حاضر مسئولان در سازمان های امدادی و مدیریت بحران می-توانند در شرایط بحرانی با وارد کردن اطلاعات اولیه به مدل پژوهش، نوعی الگوی تخصیص بهینه نیروهای امدادی و بهترین مسیر برای رسیدن و برطرف کردن بحران را دریافت کنند. از سوی دیگر مسئولان قادر خواهند بود قبل از بروز بحران، وضعیت را پیش بینی کرده و خود را قبل از بروز هر گونه حادثه آماده نگاه دارند. با توجه به پیش بینی قبل از حادثه، اگر در تعداد نیروها، تعداد پایگاه ها، ظرفیت پایگاه ها، سرعت حرکت نیروهای امدادی و ... کاستی یا نقصی وجود داشت از قبل خود را تجهیز کرده تا برای حادثه های اجتناب ناپذیر پیش روی آماده باشند. در مواقع بروز بحران ممکن است راه برخی از شهرها به دلیل بالا بودن عمق حادثه مسدود شود که در این صورت برای رسیدن به شهر بحران زده ابتدا باید بحران شهرهای موجود بر سر راه را برطرف کرده و یکی یکی شهرها را طی کرده تا به شهر مربوطه برسیم. این کار را می توان همانند یک مسئله مسیریابی وسائل نقلیه و همچنین مسئله زمان بندی حرکت نیروهای امدادی بین شهرها در نظر گرفت. این شرایط می تواند به عنوان یک پیشنهاد تحقیق برای پژوهشگران در مطالعات آتی باشد. با توجه به پیچیدگی مدل و ناتوانی در حل دقیق مثال هایی با ابعاد بزرگ در زمان معقول، ارائه و حل مدل با استفاده از روش های فرا ابتکاری^۱ می تواند پیشنهاد دیگری برای تحقیقات آتی باشد؛ زیرا این الگوریتم ها در زمان بسیار کمتری به جواب یا مجموعه جواب هایی نزدیک به جواب دقیق می رسند. عدم وجود آمار دقیق داده های اولیه پروژه و عدم ارائه آن در صورت وجود از طریق سازمان های مربوطه از مهمترین محدودیت های پژوهش حاضر بودند.

منابع

- Altay, N., & Green III, W. G. (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European journal of operational research*, 175(1), 475-493.
- Atencia, I., & Moreno, P. (2004). The discrete-time Geo/Geo/1 queue with negative customers and disasters. *Computers & Operations Research*, 31(9), 1537-1548.
- Barzinpour, F., & Esmaeili, V. (2014). A multi-objective relief chain location distribution model for urban disaster management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5-8), 1291-1302.

- Bodaghi, B., Palaneeswaran, E., and Abbasi, B., (2018) Biobjective multi-resource scheduling problem for emergency relief operations, *Production Planning & Control*, 29:14, 1191-1206.
- Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, S. M., Mirzapour Al-e-Hashem, S. M. J., (2013), A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty., *Operation research spectrum.*, 35:905–933.
- Cao, C., Li, C., Yang, Q., Liu, Y., & Qu, T. (2018). A novel multi-objective programming model of relief distribution for sustainable disaster supply chain in large-scale natural disasters. *Journal of cleaner production*, 174, 1422-1435.
- Galindo, G., and R. Batta. (2013). Review of Recent Developments in OR/MS Research in Disaster Operations Management. *European Journal of Operational Research* 230 (2): 201–211.
- Hermann, CH., F., (1972). Indicators of international political crises: Some initial steps toward prediction. *The political System in Crisis*. pp:233-243.
- Jia, H., F. Ordóñez, and M. M. Dessouky. (2007). Solution Approaches for Facility Location of Medical Supplies for Large-scale Emergencies. *Computers & Industrial Engineering* 52 (2): 257–276.
- Liu, X., and Yan, X., (2011)., Generation mechanism of emergency decision-making : links, elements and serial processing, *J. Shanghai Adm. Inst.* 12 (4) 37–43.
- Maharjan, R., Hanaoka, Sh., (2018) A multi-actor multi-objective optimization approach for locating temporary logistics hubs during disaster response, *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, Vol. 8 Issue: 1, pp.2-21.
- Özdamar, L., and M. A. Ertem. (2015). Models, Solutions and Enabling Technologies in Humanitarian Logistics. *European Journal of Operational Research* 244 (1): 55–65.
- Ransikarbum, K., and S. J. Mason. (2016a). Goal Programming-based Post-disaster Decision Making for Integrated Relief Distribution and Early-stage Network Restoration. *International Journal of Production Economics* 182: 324–341.
- Ransikarbum, K., and S. J. Mason. (2016b). Multiple-objective Analysis of Integrated Relief Supply and Network Restoration in Humanitarian Logistics Operations. *International Journal of Production Research* 54 (1): 49–68.
- Rawls, C. G., and M. A. Turnquist. (2010). Pre-positioning of Emergency Supplies for Disaster Response. *Transportation Research Part B: Methodological* 44 (4): 521–534.
- Rodríguez-Espíndola, O., Albores, P., & Brewster, C. (2018). Disaster preparedness in humanitarian logistics: A collaborative approach for resource management in floods. *European Journal of Operational Research*, 264(3), 978-993.

- Sabouhi, F., Tavakoli, Z. S., Bozorgi-Amiri, A., & Sheu, J. B. (2019). A robust possibilistic programming multi-objective model for locating transfer points and shelters in disaster relief. *Transportmetrica A: transport science*, 15(2), 326-353.
- Shin, Y.W. (2004). BMAP/G/1 Queue with Correlated Arrivals of Customers and Disasters. *Operations Research Letters* 32 (4): 364–373.
- Song, J., M., W. Chen., and L. Lei., (2018). Supply chain flexibility and operations optimisation under demand uncertainty: a case in disaster relief. *International Journal of Production Research*. 56:10, 3699-3713.
- Torre, L. E., Dolinskaya, I. S., and Smilowitz, K. R., (2012). Disaster Relief Routing: Integrating Research and Practice. *Socio-Economic Planning Sciences* 46 (1): 88–97.
- Vahdani, B., Veysmoradi, D., Shekari, N., & Mousavi, S. M. (2018). Multi-objective, multi-period location-routing model to distribute relief after earthquake by considering emergency roadway repair. *Neural Computing and Applications*, 30(3), 835-854.
- Vahdani, B., Veysmoradi, D., Noori, F., & Mansour, F. (2018). Two-stage multi-objective location-routing-inventory model for humanitarian logistics network design under uncertainty. *International journal of disaster risk reduction*, 27, 290-306.
- Zhou, L., Wu, X., Xu, Z., & Fujita, H. (2018). Emergency decision making for natural disasters: An overview. *International journal of disaster risk reduction*, 27, 567-576.

