مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۱، صص. ۴۹-۶۱، (پژوهشی)

Original Article

# ارائه مدل سناریو ـ محور چندهدفه برای مکان‌یابی ـ تخصیص تسهیلات پشتیبان مبتنی بر راهبردهای حمایتی در بحران سیل (مطالعه‌ی موردی: شهر قم)

**امیرحسین صفاری‌نیا (دانشجوی کارشناسی ارشد)**
**فرناز برزین‌پور* (دانشیار)**
**احمد ماکوئی (استاد)**
**دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران**

با تغییرات اکولوژیکی، تقاضا برای خدمات اضطراری و اقلام امدادی در شرایط بحران، افزایش یافته است. در این مقاله، مدل یک‌پارچه‌یی از مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات پشتیبان در دو بخش اسکان و تأمین و در دو فاز آمادگی و پاسخ به منظور افزایش قابلیت اطمینان زنجیره‌ی بحران ارائه شده است. مدل ریاضی ارائه شده، مدلی چندهدفه و سناریومحور است که پس از مقایسه‌ی نتایج روش‌های حل چندهدفه، به روش نرمال‌سازی و تجمیع توابع هدف، حل می‌شود. نتایج تحقیق نشان می‌دهد استفاده‌ی ترکیبی از راهبردهای حمایتی اعم از تسهیلات پشتیبان در بحران سیل امری حیاتی است. همچنین با معرفی بحران سیل در شهر قم به عنوان مطالعه‌ی موردی، راهکارهایی پیشنهاد شده است که ضمن حل مشکل کمبود فضای احداث در مناطق متراکم مرکزی، با صرف کم‌ترین هزینه، میزان خسارات در بلندمدت را تا سطح قابل توجهی کاهش می‌دهد.

**واژگان کلیدی:** مدل مکان‌یابی ـ تخصیص، تسهیلات پشتیبان، مدیریت بحران، مدل سناریومحور.

saffarinia14@gmail.com
barzinpour@iust.ac.ir
amakui@iust.ac.ir

## ۱. مقدمه

سوانح طبیعی و انسان‌ساز همواره در طول تاریخ از عوامل بروز خسارات مادی و تلفات جانی به شمار آمده‌اند. ایران کشوری پرخطر از نظر وقوع بلایای طبیعی بوده که تجارب تلخ گذشته و وقوع زمین‌لرزه‌های متعدد در شهرهای مختلف کشور مؤید این موضوع است. برنامه‌ریزی در جهت پیش‌بینی، پیشگیری و عکس‌العمل سریع در مقابل چنین حوادثی می‌تواند تأثیر به‌سزایی در کاهش تلفات و خسارات مالی و روانی داشته باشد که در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌یی در این زمینه صورت گرفته است. در این میان بحران سیل جزء حوادثی است که دارای ویژگی‌های خاص زمانی و مکانی است که در تحقیقات گذشته کم‌تر به آن توجه شده است و با توجه به بارندگی‌ها و حوادث سال‌های اخیر با برنامه‌ریزی مناسب و اصولی می‌توان از افزایش شدت خسارات و میزان تلفات تا حد زیادی جلوگیری کرد. فازهای پیشگیری و آمادگی بحران از مهم‌ترین فازها در مدیریت بحران هستند که باعث افزایش کارایی در فاز پاسخگویی هنگام بحران می‌شود. مکان‌یابی تسهیلات اضطراری و زنجیره‌ی تأمین بحران از مباحثی هستند که در این فاز مطرح می‌شود. زنجیره‌ی بحران عبارت است از تمامی فرایندهای برآورد، تأمین، حمل و نقل، نگهداری و توزیع کالاها، تجهیزات و خدمات به آسیب‌دیدگان و تیم‌های امدادگر. تسهیلات پشتیبان تسهیلاتی هستند که در هنگام بروز اختلال در زنجیره‌ی تأمین، تقاضای مازاد بر ظرفیت تسهیل اولیه را پوشش می‌دهند.[۱] اختلال در زنجیره‌ی بحران به مراتب جبران ناپذیرتر از سایر زنجیره‌ها خواهد بود و تسهیلات پشتیبان در این زنجیره اهمیت بیشتری خواهد داشت. این نوع تسهیلات قابلیت اطمینان بالایی دارند و مکان‌یابی و تخصیص مناسب آنها می‌تواند خطرهای بلندمدت را کاهش دهد.[۲] مفهوم پشتیبانی اولین بار در سال ۱۹۸۱ توسط داسکین[۱] جهت پوشش چندگانه‌ی خدمات اضطراری ارائه شد.[۳] این مفهوم توسط هوگان[۲] و همکاران در سال ۱۹۸۶ مدل پوشش پشتیبان (BACOP) [۳] در جهت بیشینه‌سازی پوشش پشتیبان[۴] و سپس در سال ۱۹۸۹ توسط پیرکول[۴] و همکاران تحت عنوان مدل ظرفیت‌دار شده (CMCLP) [۵] مطرح شد.[۵] سپس در سال ۲۰۰۵ اسنایدر و همکاران[۶] ضمن تعریف اختلال هم‌زمان

* نویسنده مسئول
*تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۶/۲۹، اصلاحیه ۱۴۰۱/۲/۱۷، پذیرش ۱۴۰۱/۳/۳.*
*DOI:10.24200/J65.2022.58493.2238*

استناد به این مقاله:
صفاری‌نیا، امیرحسین، برزین‌پور، فرناز، و ماکوئی، احمد، ۱۴۰۲. ارائه مدل سناریو ـ محور چندهدفه برای مکان‌یابی ـ تخصیص تسهیلات پشتیبان مبتنی بر راهبردهای حمایتی در بحران سیل (مطالعه‌ی موردی: شهر قم). مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۳۹(۱)، صص. ۴۹-۶۱.

در چند تسهیل مدل p- میانه[7] را با این رویکرد توسعه دادند.[6] در سال ۲۰۰۷ چانگ[8] و همکاران با فرض احتمالی بودن نقاط تقاضا به پشتیبانی مراکز امداد پرداختند.[7] در سال ۲۰۰۸ راتیک[9] و همکاران برای اولین بار از تسهیلات اولیه به عنوان تسهیلات پشتیبان در مدل خود استفاده کردند.[2] در سال ۲۰۰۹ آکیلی[10] و همکاران مفهوم p- هاب[11] را با ارائه‌ی مفهوم مسیرهای پشتیبان تا مقصد مطرح کردند.[8] در سال ۲۰۱۲ فراهانی[12] و همکاران، تسهیل پشتیبان را تسهیلی معرفی کردند که علاوه بر سرویس دادن به نزدیک‌ترین نقطه‌ی تقاضا (اولیه) به بقیه‌ی نقاط هم در صورت نیاز خدمت‌رسانی کند.[9] لی[13] و همکاران در سال ۲۰۱۴ مدلی برای تقویت شبکه‌ی توزیع با در نظرگرفتن احتمال اختلالات ناهمگن، یک سطح از تأمین‌کننده‌ی پشتیبان و تقویت تسهیلات با بودجه محدود ارائه داده‌اند.[10] آن[14] و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی ترکیبی احتمالی سناریومحور عدد صحیح (MINLP)[15] ارائه کردند که خطرات خرابی تسهیلات، تراکم ترافیک مسیر و تأخیر در صف را برای یک مشکل مکان‌یابی یک‌پارچه با در نظرگرفتن تسهیل پشتیبان بررسی می‌کرد.[11] سلمان[16] و همکاران در سال ۲۰۱۵ می‌نویسد برای مکان‌یابی تسهیل پشتیبان بایستی به آسیب‌پذیری منطقه نگاه ویژه‌یی شود.[12] عزیزی[17] و همکاران در سال ۲۰۱۶ ضمن توسعه مدل هاب پشتیبان[18] از روش فراابتکاری به ارزیابی عملکرد پرداختند.[13] کاراتاس[19] و همکاران در سال ۲۰۱۶ در این مقاله ضمن تعریف منبع پشتیبان و ضرورت در نظرگرفتن آن، عملکرد حاصل از دو مدل کلاسیک مدل p- میانه و بیشینه پوشش را در نظرگرفته با توجه به پنج معیار تصمیم‌گیری و سطح پوشش Q توسط الگوریتم شبیه‌سازی بررسی می‌کنند.[14] چن[20] و همکاران در سال ۲۰۱۶ مدل p- میانه تصادفی را برای افزایش قابلیت اطمینان در این زمینه ارائه می‌دهند.[15] در سال ۲۰۱۷ محمدی[21] و همکاران مدل احتمالی دوهدفه برای سرویس پشتیبان در مراکز توزیع دارویی و پزشکی در نظر می‌گیرند.[16] در سال ۲۰۱۸ نامدار[22] و همکاران ضمن تعریف تأمین‌کننده‌ی پشتیبان(ظرفیت مازاد تولید) به عنوان یکی از راهبردهای منبع‌یابی، از روش‌های ارزش در معرض خطر (VAR)[23] و ارزش در معرض خطر شرطی (CVAR)[24] برای اجرای مدیریت خطر زنجیره‌ی تأمین مرکزی، استفاده می‌کنند.[17] در سال ۲۰۱۸ مدنی[25] و همکاران مسیریابی مدل هاب پشتیبان را انجام می‌دهند.[18] اسدی و همکاران در سال ۲۰۱۸ مدلی پویا و غیرقطعی برای انبارها در حالت بحران و با در نظرگرفتن تسهیل پشتیبان ارائه دادند.[19] رحمانی[26] و همکاران در سال ۲۰۱۸ ضمن به‌کارگیری منابع پشتیبان در مدل خود، یک ساختار دوسطحی (محلی و مرکزی) برای مراکز امداد و نجات طراحی کردند که میزان دسترسی جمعیت را ارتقا می‌دهد.[20] در همین سال ترکستانی[27] و همکاران با ارائه‌ی الگوریتم اکتشافی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو به اختلال ناشی از نوسان تقاضا پاسخ می‌دهند.[21] در سال ۲۰۱۸ جبارزاده[28] و همکاران ابتدا روش خوشه‌بندی c-means فازی برای ارزیابی عملکرد کلی پایداری هر تأمین‌کننده و سپس مدل بهینه‌سازی دوهدفه‌ی تصادفی (در شرایط اختلالات تصادفی) و با در نظرگرفتن تأمین‌کننده‌ی پشتیبان ارائه دادند.[22] در سال ۲۰۱۹ کاراتاس و همکاران ابتدا با در نظرگرفتن فاصله‌ی تسهیلات پشتیبان مدل p- میانه را اصلاح کرده و سپس با یک فرایند شبیه‌سازی رویداد گسسته و با استفاده از نظریه‌ی صف به ارزیابی طرح‌ها و سناریوهای به دست آمده از مدل بهینه‌سازی قطعی می‌پردازد[23] و سرانجام قاسمی[29] و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک مدل چندهدفه، چندکالایی، چند وسیله‌ی نقلیه‌یی، مکان‌یابی ـ تخصیص غیر قطعی ارائه داده‌اند. مدل ارائه شده با استفاده از محدودیت‌های اپسیلون، الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II)[30] و روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MMOSOP)[31] حل شد. در نهایت عملکرد رویکردهای حل با استفاده از چندین نمونه آزمون تصادفی با اندازه‌های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.[24] در سال ۲۰۱۹ ساویک[32] یک مدل احتمالی مبتنی بر رویکرد پورتفولیو ارائه می‌دهد که تسهیلات اولیه و پشتیبان را در چند سطح اختلال انتخاب می‌کند.[1] یو[33] و همکاران نیز در سال ۲۰۲۰ تسهیلات پشتیبان را با رویکرد احتمال تخریب لینک براساس بدترین حالت اختلال تعریف می‌کنند. در مدل بهینه‌سازی دوهدفه آنها از تسهیلات اولیه برای کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره و از تسهیلات پشتیبان برای بیشینه‌سازی تضمین دسترسی استفاده می‌شود.[25] یه[34] و همکاران نیز در سال ۲۰۲۰ با رویکرد ترکیبی مدل‌سازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)[35] به مکان‌یابی در بحران سیل پرداخته‌اند.[26] اسدپور[36] و همکاران در مقاله‌ی خود یک شبکه‌ی سبز زنجیره‌ی تأمین خون با در نظرگرفتن گروه‌های خونی، تاریخ انقضا و تسهیلات پشتیبان طراحی کرده‌اند. این مدل هزینه‌های زنجیره و میزان پسماند را کمینه می‌کند. آنها برای حل مدل چندهدفه از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی استفاده کرده‌اند.[27] نوآوری‌های اصلی این تحقیق عبارت‌اند از:

- تقسیم نقاط تقاضا به دو دسته‌ی نیازمند تأمین و نیازمند اسکان؛ برنامه‌ریزی شبکه‌ی تأمین و اسکان به صورت هم‌زمان و تقسیم‌بندی تسهیلات به اسکان اولیه و پشتیبان و انبار اولیه (توزیع) و انبار پشتیبان.
- تعریف راهبردهای حمایتی برای افزایش قابلیت اطمینان زنجیره‌ی بحران و بررسی پارامترهای مرتبط در فازهای پیشگیری و بازیابی علاوه بر فازهای آمادگی و پاسخ در مدیریت بحران.
- تغییرات مدل برمبنای بحران سیل در شهر قم، از جمله اضافه کردن توابع هدف کمینه عدم پوشش به علت تخریب و تکمیل ظرفیت، اضافه کردن ذخیره‌ی اطمینان و هزینه‌های نگهداری به تابع هدف هزینه، اضافه کردن تابع هدف کمینه زمان دسترسی و جایگزین کردن پارامترهای زمانی به جای مکانی برای تخلیه‌ی اضطراری، همچنین اضافه کردن تعداد مسیر و خطر خرابی آنها و بررسی سناریوهای سیل در هر دوره‌ی زمانی.

نوشتار حاضر در هشت بخش تنظیم شده است: در بخش دوم بیان مسئله و در بخش سوم مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌شود. در بخش چهارم روش حل مدل و در بخش پنجم مطالعه‌ی موردی و نتایج حاصل بیان می‌شود. در بخش ششم تحلیل حساسیت پارامترها، به ویژه پارامترهای مربوط به راهبردهای حمایتی ارائه شده است. در بخش هفتم سایر تحلیل‌ها از جمله تعارض اهداف بررسی شده و در نهایت در بخش هشتم نتیجه‌گیری، راهکارها و پیشنهادهای آتی مطرح می‌شود.

## ۲. بیان مسئله

یکی از حوادث طبیعی که اخیراً شاهد افزایش وقوع آن در کشورمان بوده‌ایم، سیلاب‌ها و سیل‌ها بوده‌اند. سیل ممکن است خسارتی به شدت یک زلزله به بار بیاورد حال آن که زلزله در یک منطقه ممکن است پس از ۱۰ سال به دلیل تمرکز انرژی زمین دوباره تکرار شود؛ اما سیل‌ها همواره مناطق مستعد را تهدید می‌کنند. سیل از جمله حوادثی است که علاوه بر فجایع اولیه‌ی انسانی می‌تواند زمینه‌ساز فجایع و وقایع بعدی نیز باشد. سیل‌ها هنگام ورود به شهر، خانه‌ها و مناطق کم ارتفاع را در بر می‌گیرند و تا فرونشینی آب تا مدت‌ها، زندگی روزمره‌ی اهالی را مختل می‌کنند. اگر شدت سیلاب زیاد باشد، زیرساخت‌هایی مانند دکل‌های مخابراتی، جاده‌ها و راه‌های دسترسی و انبارهای آذوقه را نابود می‌کند. همچنین نفوذ آب ممکن است تا

مدت‌ها خطر برق‌گرفتگی، اتصالی و جرقه زدن در انبارها، ریزش کوه و رانش زمین و تخریب زیرساخت‌ها را افزایش دهد. همچنین سیلاب برخلاف زلزله اغلب مسیر مشخص و محتملی دارد و زمان مهلت اندکی وجود دارد که بایستی افراد در مسیل به سرعت تخلیه شوند. لذا در مدل ارائه شده ضمن ادغام مفروضات مدل‌های گذشته در زمینه‌ی اسکان و تأمین، پارامترهایی مرتبط با تخلیه‌ی اضطراری، سطح دسترسی و مسیر مراکز و پارامترهای زمانی مرتبط با سیل اضافه شده است که این موارد در انتهای بخش ۱ تحت عنوان نوآوری‌های اصلی آورده شده‌اند. همچنین لازم به ذکر است، پارامترهای احتمال وقوع رویدادهای سیل و خرابی تسهیلات اسکان در نظر گرفته شده[۲۴] که با توجه به حالت‌بندی رویدادهای حادثه و گسسته بودن احتمالات از رویکرد سناریومحور در مواجهه با عدم قطعیت استفاده شده است. مطالعه‌ی موردی سیل باعث تعریف خطرهای متنوع‌تر و جدیدتری خواهد شد. در این پژوهش از مجموعه سناریوها و احتمال رخداد هر سناریو در هر دوره استفاده شده است تا موارد مذکور تحت پوشش قرار گیرد.

در حقیقت مزیت و کاربرد اصلی مدل ارائه شده زمانی مشخص می‌شود که تفاوت اساسی بحران سیل با سایر بحران‌ها مد نظر قرار گیرد. بدین منظور دو تفاوت عمده‌ی بررسی شده عبارت‌اند از:

۱. تنوع حوادث پس از سیلاب و طولانی بودن مدت زمان درگیری بحران؛

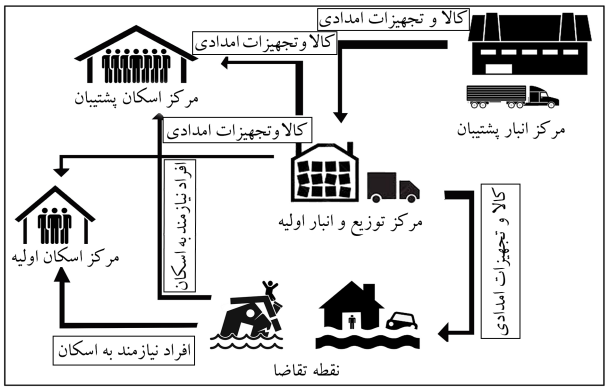
۲. حوادثی با شدت زیاد و احتمال وقوع کم که کم‌تر توسط تیم مدیریت بحران مورد توجه قرار می‌گیرد.

بنابراین در چنین شرایطی است که کاربرد مدل سناریومحور ارائه شده ضمن تعریف مفهوم جدیدی تحت عنوان «راهبردهای حمایتی» در دنیای واقعی، می‌تواند طیف وسیعی از پاسخ‌های حمایتی را براساس خطرپذیری مدیران به آنها ارائه بدهد. در حقیقت تعدد و تنوع حوادث، طولانی بودن بحران، حوادث پیاپی بعدی و قدرت تخریب بالا از علل اصلی استفاده از رویکرد سناریومحور در مواجهه با عدم قطعیت هم‌زمان با تعریف راهبردهای حمایتی (متناسب با وقوع ترکیبی از سناریوها) است که کاربرد آن را توجیه می‌کند. تسهیلات پشتیبان از جمله راهبردهای حمایتی است که قابلیت اطمینان زنجیره را افزایش داده و اولویت‌بندی آنها در بلندمدت می‌تواند شدت اثرات ناشی از سیل‌ها را کاهش دهد.

بنابراین هدف این پژوهش آن است که ضمن افزایش قابلیت اطمینان زنجیره‌ی بحران و کاهش زمان پاسخ، به اولویت‌بندی تسهیلات پشتیبان بپردازد و مفاهیم، نوآوری‌ها و سناریوهای جدیدی را در این زمینه به زنجیره‌ی تأمین و لجستیک بحران بیفزاید.

## ۳. مدل ریاضی پیشنهادی

در مدل ریاضی جدید ارائه شده در این مقاله، تغییرات اساسی نسبت به زنجیره‌ی بحران در مقاله‌ی پایه[۲۴] داده شده است. علاوه بر نقطه‌ی تقاضا، مرکز اسکان و مرکز توزیع، هر کدام در دو دسته‌ی اولیه و پشتیبان اضافه شده‌اند. جریانات بین تسهیلات کامل‌تر شده و موارد مربوط به تسهیلات کاندید آسیب‌پذیر در مدل حذف و در بخش‌های دیگر ادغام شده است. علاوه بر این‌ها اندیس مربوط به مسیر ارتباط بین تسهیلات اضافه شده که در مبحث انتقال کالا و افراد ضروری به نظر می‌رسید. در مدل ارائه شده علاوه بر پارامترهای هزینه‌یی مربوط به انتقال کالا و افراد، کمبود و تأخیر ناشی از انتقال نیز کمینه می‌شود. مدل مذکور مدلی سناریومحور، احتمالی و چنددوره‌یی است بدین معنا که براساس وقوع سناریوها در هر دوره زمانی، احتمال




**شکل ۱. ساختار مفهومی تسهیلات پشتیبان در زنجیره‌ی بحران در مدل پیشنهادی.**

تخصیص تسهیل و شیوه‌ی تخصیص متفاوت خواهد بود. این مدل به تخلیه‌ی افراد حادثه دیده می‌پردازد و آنها را به دو دسته تقسیم می‌کند: افرادی که نیاز به امدادرسانی بدون جابه‌جایی دارند و افرادی که نیاز به جابه‌جایی و سپس امدادرسانی دارند. لذا هر دو فاز آمادگی و پاسخ قابلیت را مد نظر دارد. مدل‌های موجود در مقالات پایه شامل تأمین‌کنندگان پشتیبان و سرویس‌دهندگان پشتیبان با یکدیگر ادغام شده و به صورت یکپارچه ارائه می‌شود. همچنین لینک‌های دسترسی به تسهیلات با توجه به مطالعه‌ی موردی، احتمال خرابی دارند که خطر آنها با خطر خرابی و غیر فعال شدن تسهیل مقصد برآورد می‌شود. اسکان حادثه‌دیدگان در دو بخش اولیه و پشتیبان و انبار و تأمین آنها نیز در دو بخش اولیه و پشتیبان انجام می‌شود. در این مدل مرکز توزیع و انبار اولیه برای سهولت در یک نقطه در نظرگرفته شده است. همچنین این مرکز وظیفه تأمین اقلام ضروری در سوله‌های اسکان یا در محل حادثه را بر عهده دارد. شکل ۱ شبکه‌ی ساختار مفهومی تسهیلات پشتیبان در زنجیره‌ی بحران شامل اجزا و جریانات فی‌مابین را نشان می‌دهد.

### ۱.۳. مفروضات

مفروضات در نظرگرفته شده برای مدل ریاضی به شرح ذیل است:

- مراکز با سطح تجهیز (اندیس r) متفاوت دارای ظرفیت و شعاع پوشش متفاوتی خواهند بود. (هرچه سطح تجهیز بیشتر باشد، ظرفیت و شعاع پوشش بیشتر است.) ظرفیت وسایل حمل و نقل، جاده‌ها و انبارها محدود است و در طول دوره محاسبه می‌شود؛
- انتقال کالا صرفاً بین انبارها و مراکز توزیع، انبارها و مراکز اسکان، انبارها و نقاط حادثه دیده خواهد بود؛
- فرض بر این است که همواره در مراکز توزیع مقداری کالا و تجهیزات برای اطمینان، انباشته می‌شود که می‌توان آن را انبار اولیه در نظرگرفت؛
- برای تسهیلات پشتیبان، سطح تجهیز محاسبه نمی‌شود؛ زیرا بالاترین مقدار برای آنها مد نظر است. همچنین احتمال تخریب تسهیل برای این تسهیلات یا محاسبه نمی‌شود یا مقادیر نزدیک به صفر در نظرگرفته می‌شود. علاوه بر این برای این تسهیلات تعدد مسیرها نیز در نظرگرفته نمی‌شود چون فرض برایمنی این مسیرها به دلیل فاصله‌ی کافی از نقطه‌ی بحرانی است؛
- زمان احتمالی دسترسی بین تسهیلات از هریک از مسیرها با در نظرگرفتن احتمالات خرابی مسیر، ترافیک، تصادفات جاده‌یی و ... با نظر خبره به دست می‌آید؛

- اهمیت تأخیر و زمان، بیشتر برای انتقال بیماران و تخلیه‌ی محل مطرح است و برای انتقال کالا مطرح نیست. اگر تأمین کالا بیش از زمان فرآوری شود، با کمبود روبه‌رو هستیم. همچنین تأمین کالا در بلندمدت تکرار و اهمیت بیشتری دارد؛
- برای انتقال کالا بین انبارها و مراکز توزیع نوع مسیر مطرح نیست زیرا اغلب خطر تخریب یا خرابی مسیر در این فاصله کم است. لذا در این حالت برای کاهش کمبود، وسیله‌ی نقلیه قابل تغییر است (بالگرد، هواپیما، تریلر و ... ) به همین دلیل احتمال خرابی تسهیلات نیز برای این تسهیلات در نظرگرفته نمی‌شود؛
- در این تحقیق، بیشینه سطح تخصیص و سطح تجهیز یک فرض شده است؛
- فرض بر این است که سناریوهای ما کاملاً مستقل‌اند؛
- عدم پوشش تقاضا به دو دلیل خرابی تسهیل یا تکمیل ظرفیت تسهیل در نظر گرفته شده که در دو تابع هدف آورده شده است؛
- فرض بر این است که سوله‌های مدیریت بحران صرفاً برای توزیع، انبار کالا و سامان‌دهی امداد و نجات هستند و برای اسکان تعریف نشده‌اند.

## ۲.۳. مجموعه‌ها

$\{i = ۱, ۲, \ldots, I\}$ نقاط حادثه دیده؛
$\{k = ۱, ۲, \ldots, K\}$ مراکز اسکان اولیه؛
$\{l = ۱, ۲, \ldots, L\}$ انبارها، منابع و مراکز توزیع اولیه؛
$\{m = ۱, ۲, \ldots, M\}$ مراکز اسکان پشتیبان؛
$\{n = ۱, ۲, \ldots, N\}$ انبارها، منابع و مراکز توزیع پشتیبان؛
$\{v = ۱, ۲, \ldots, V\}$ ماشین‌آلات و وسایل نقلیه؛
$\{c = ۱, ۲, \ldots, C\}$ کالاهای امدادی؛
$\{s = ۱, ۲, \ldots, S\}$ سناریوهای محتمل؛
$\{t = ۱, ۲, \ldots, T\}$ دوره‌های زمانی؛
$\{r = ۱, ۲, \ldots, R\}$ سطح تجهیز تسهیل؛
$\{w = ۱, ۲, \ldots, W\}$ مسیرهای تخلیه.

## ۳.۳. پارامترها

- **پارامترهای هزینه**

$A۱_{kr}$ هزینه‌ی احداث سوله‌های اسکان در نقطه‌ی k و در سطح تجهیز r؛
$A۲_{m}$ هزینه‌ی احداث سوله‌های اسکان پشتیبان در نقطه‌ی m؛
$A۳_{lr}$ هزینه‌ی احداث انبارها و مراکز توزیع اولیه در نقطه‌ی l و در سطح تجهیز r؛
$A۴_{n}$ هزینه‌ی احداث انبارهای پشتیبان در نقطه‌ی n؛
$AV_{v}$ هزینه‌ی استفاده از وسیله‌ی نقلیه‌ی v در هر واحد فاصله.

- **پارامترهای تقاضا**

$B۱_{ist}$ تعداد مصدومان نقطه‌ی تقاضای i که به تخلیه‌ی سریع توسط نیروهای امدادی در دوره t تحت سناریوی s نیاز دارند؛
$D۱_{cits}$ میزان تقاضای کالای امدادی و تجهیزات c درنقطه‌ی تقاضای i در دوره زمانی t تحت سناریو s؛
$D۲_{cts}$ میزان تقاضای کالای امدادی c در کل مراکز اسکان در دوره زمانی t تحت سناریو s.

- **پارامترهای ظرفیت**

$M۱_{v}$ ظرفیت وسیله‌ی نقلیه نوع v برای انتقال حادثه‌دیدگان به نقاط اسکان؛
$M۲_{vc}$ ظرفیت وسیله‌ی نقلیه نوع v برای حمل کالاهای امدادی نوع c؛
$N۱_{kr}$ ظرفیت مرکز اسکان k در سطح تجهیز r؛
$N۲_{m}$ ظرفیت مرکز اسکان پشتیبان m؛
$N۳_{lctr}$ ظرفیت انبار l ازکالا یا تجهیز c در دوره زمانی t در سطح تجهیز r؛
$N۴_{nct}$ ظرفیت آزاد از تأمین‌کننده پشتیبان n ازکالا یا تجهیز c در دوره زمانی t.

- **پارامترهای زمان**

$T۱_{ikws}$ فاصله‌ی زمانی محتمل بین نقطه‌ی تقاضای i و مرکز اسکان k از مسیر w تحت سناریو s؛
$T۲_{ims}$ فاصله‌ی زمانی محتمل بین نقطه‌ی تقاضای i و مرکز اسکان پشتیبان m سناریو s؛
$Q۱_{kr}$ فاصله‌ی پوششی مرکز اسکان k در سطح تجهیز r برحسب زمان؛
$Q۲_{m}$ فاصله‌ی پوششی مرکز اسکان پشتیبان m برحسب زمان.

- **پارامترهای فاصله**

$O۱_{li}$ فاصله‌ی بین نقطه‌ی تقاضای i و انبار l؛
$O۲_{lk}$ فاصله‌ی بین مرکز اسکان k و انبار l؛
$O۳_{lm}$ فاصله‌ی بین نقطه‌ی تأمین‌کننده اولیه m و انبار l؛
$O۴_{ln}$ فاصله‌ی بین نقطه‌ی تأمین‌کننده پشتیبان n و انبار l.

- **سایر پارامترها**

$PA_{kwis}$ احتمال خرابی لینک مرکز اسکان k و نقطه‌ی تقاضای i از مسیر w تحت سناریو s؛
$PE_{mis}$ احتمال خرابی لینک مرکز اسکان m و نقطه‌ی تقاضای i تحت سناریو s؛
M مقداری مثبت و بسیار بزرگ؛
$P_{st}$ احتمال رویداد سناریو s در دوره زمانی t؛
$\tau_{rlcst}$ سطح ذخیره‌ی مرکز توزیع l ازکالای c تحت سناریو s در دوره‌ی t در سطح تجهیز r(درصد ذخیره‌ی اطمینان × ظرفیت انبار l)؛
$\lambda_{c}$ ضریب هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات کالا یا تجهیز c؛
$\Psi_{c}$ اولویت تخصیص کالای امدادی c به تقاضا؛
RQ سطح تخصیص تسهیلات.

## ۴.۳. متغیرها

- **متغیرهای مکان‌یابی**

$X۱_{krs}$ برابر یک است اگر مرکز اسکان تحت سناریو s و سطح تجهیز r در نقطه‌ی k واقع شود. در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود؛
$X۲_{lrs}$ برابر یک است اگر مرکز توزیع تحت سناریو s وسطح تجهیز r در نقطه‌ی l واقع شود. در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود؛
$X۳_{ms}$ برابر یک است اگر اسکان پشتیبان تحت سناریو s ودر نقطه‌ی m واقع شود. در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود؛
$X۴_{ns}$ برابر یک است اگر انبار پشتیبان تحت سناریو s و در نقطه‌ی n واقع شود. در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.

- **متغیرهای تخصیص**

$Y۱_{ilrst}$ برابر یک است اگر تحت سناریو s و سطح تجهیز r در دوره t نقطه‌ی

تقاضای i به انبار واقع در l تخصیص داده شود. در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود؛

$Y2_{klrst}$ برابر یک است اگر تحت سناریو s و سطح تجهیز r در دوره t مرکز اسکان k به انبار واقع در l تخصیص داده شود. در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود؛

$Y3_{mlst}$ برابر یک است اگر تحت سناریو s و در دوره t تأمین‌کننده اولیه m به انبار واقع در l تخصیص داده شود. در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود؛

$Y4_{nlst}$ برابر یک است اگر تحت سناریو s و در دوره t تأمین‌کننده پشتیبان n به انبار واقع در l تخصیص داده شود. در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود؛

$Z1_{ikrstw}$ برابر یک است اگر تحت سناریو s و سطح تجهیز r در دوره t نقطه‌ی تقاضای i به مرکز اسکان واقع در k و طی مسیر w تخصیص داده شود. در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود؛

$Z2_{imst}$ برابر یک است اگر تحت سناریو s و در دوره t نقطه‌ی تقاضای i به اسکان پشتیبان واقع در m تخصیص داده شود. در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.

- **متغیر تعداد وسایل نقلیه**

$U1^{v}_{iks}$ تعداد وسایل نقلیه‌ی نوع v که از نقطه‌ی تقاضای i به مرکز اسکان k تحت سناریو s سفر می‌کنند؛

$U2^{v}_{ims}$ تعداد وسایل نقلیه‌ی نوع v که از نقطه‌ی تقاضای i به مرکز اسکان پشتیبان m تحت سناریو s سفر می‌کنند؛

$U3^{v}_{ilts}$ تعداد وسایل نقلیه‌ی نوع v که از انبار l به نقطه‌ی تقاضای i در دوره زمانی t تحت سناریو s سفر می‌کنند؛

$U4^{v}_{klts}$ تعداد وسایل نقلیه‌ی نوع v که از انبار l به مرکز اسکان k در دوره زمانی t تحت سناریو s سفر می‌کنند؛

$U5^{v}_{mlts}$ تعداد وسایل نقلیه‌ی نوع v که از مرکز اسکان پشتیبان m به انبار l در دوره زمانی t تحت سناریو s سفر می‌کنند؛

$U6^{v}_{nlts}$ تعداد وسایل نقلیه‌ی نوع v که انبار پشتیبان nبه انبار l در دوره زمانی t تحت سناریو s سفر می‌کنند.

- **متغیرهای جریان تسهیلات**

$L1_{ikst}$ تعداد حادثه‌دیدگان که از نقطه‌ی تقاضای i به مرکز اسکان اولیه k تحت سناریو s در دوره t منتقل شده‌اند؛

$L2_{imst}$ تعداد مصدومان جدی که از نقطه‌ی تقاضای i به مرکز اسکان پشتیبان m تحت سناریو s در دوره t منتقل شده‌اند؛

$G1_{ilcst}$ تعداد کالای امدادی و تجهیز نوع c که از انبار اولیه l مستقیماً به نقطه‌ی تقاضای i تحت سناریو s در دوره tمنتقل شده‌اند؛

$G2_{klcst}$ تعداد کالای امدادی نوع c که از انبار l به مرکز اسکان k تحت سناریو s در دوره t منتقل شده‌اند؛

$G3_{mlcst}$ تعداد کالای امدادی نوع c که از انبار l مستقیما به اسکان پشتیبان m تحت سناریو s در دوره t منتقل شده‌اند؛

$G4_{nlcst}$ تعداد کالای امدادی نوع c که از انبار l به انبار پشتیبان n تحت سناریو s در دوره t منتقل شده‌اند.

- **سایر متغیرها**

$W^{r}_{clts}$ مقدار کمبود کالای c در مرکز توزیع l دارای سطح تخصیص r در دوره زمانی t و تحت سناریو s؛

$SQ_{ist}$ میزان عدم پوشش در نقطه‌ی تقاضای i دردوره t تحت سناریو s.

## ۵.۳. توابع هدف

هزینه‌ی احداث و تجهیز

$$\min f1 = \sum_{s}\sum_{t} P_{st}\Big(\sum_{k}\sum_{r} A1_{kr}X1_{krs} + \sum_{l}\sum_{r} A3_{lr}X2_{lrs} + \sum_{m} A2_{m}X3_{ms} + \sum_{n} A4_{n}X4_{ns}\Big)$$

هزینه‌ی حمل و نقل

$$+\sum_{t}\sum_{s}\sum_{v} P_{st}AV_{v}\Big(\sum_{i}\sum_{l} O1_{il}U3^{v}_{ilts} + \sum_{k}\sum_{l} O2_{kl}U4^{v}_{klst} + \sum_{l}\sum_{m} O3_{ml}U5^{v}_{mlst} + \sum_{l}\sum_{n} O4_{nl}U6^{v}_{nlst}\Big)$$

هزینه‌ی ناشی از نگهداری کالا و تعمیر تجهیزات

$$+\sum_{r}\sum_{l}\sum_{t}\sum_{s}\sum_{c} P_{st}.\tau_{rlcst}.X2_{lrs}.\lambda_{c} \qquad (1)$$

میزان کمبود خدمات و عدم پوشش افراد به علت تخریب تسهیل

$$\min f2 = \sum_{k}\sum_{i}\sum_{r}\sum_{w}\sum_{s}\sum_{t} P_{st}N1_{kr}PA_{ikws}Z1_{ikrstw} + \sum_{m}\sum_{i}\sum_{s}\sum_{t} P_{st}N2_{m}PE_{ims}Z2_{mist} \qquad (2)$$

میزان عدم پوشش افراد به علت تکمیل ظرفیت مراکز اسکان

$$\min f3 = \sum_{i}\sum_{s}\sum_{t} P_{st}\,SQ_{ist} \qquad (3)$$

میزان کمبود کالا

$$\min f4 = \sum_{r}\sum_{l}\sum_{t}\sum_{s}\sum_{c} P_{st}\psi_{c}w^{r}_{clts} \qquad (4)$$

میزان تأخیر در انتقال افراد

$$\min f5 = \sum_{s}\sum_{t} P_{st}\left(\sum_{i}\sum_{k}\sum_{r}\sum_{w} T1_{ikws}.Z1_{ikswrt} + \sum_{i}\sum_{\mathrm{m}} T2_{ims}.Z2_{imst}\right) \qquad (5)$$

## ۶.۳. محدودیت‌ها

جریان‌های ورودی و خروجی به مراکز توزیع

$$\sum_{i}\sum_{m}\sum_{k}(G1_{ilstc} + G2_{klstc} + G3_{mlstc}) \le \sum_{n} G4_{nlstc} + W_{rlstc} + (\tau_{\mathrm{rlcst}}X2_{lrs}) \qquad (6)$$

$\forall l, c, s.t$

محدودیت ارضای تقاضای کل کالا

$$\sum_i D1_{cist} + \sum_i D2_{cst} - \sum_i \sum_m \sum_l \sum_k (G1_{ilstc} + G2_{klstc} + G3_{mlstc}) = \sum_l \sum_r w^r_{clst} \qquad \forall l, c, s, t \qquad (7)$$

محدودیت‌های ظرفیت

$$\sum_i L2_{imst} \le N2_m \qquad \forall m, r, s \qquad (8)$$

$$\sum_i L1_{ikst} \le N1_{kr} \qquad \forall k, t, r, s \qquad (9)$$

$$\sum_l G4_{nlcst} \le N4_{nct} \qquad \forall n, c, t, s \qquad (10)$$

محدودیت‌های حمل و نقل

$$L1_{ikst} \le \sum_v U1^v_{iks}.M1_v \qquad \forall t, i, k, s \qquad (11)$$

$$L2_{imst} \le \sum_v U2^v_{ims}.M1_v \qquad \forall t, i, m, s \qquad (12)$$

$$\sum_c G1_{ilcst} \le \sum_c \sum_v U3^v_{ilts}.M2_{vc} \qquad \forall l, i, s, t \qquad (13)$$

$$\sum_c G2_{klcst} \le \sum_c \sum_v U4^v_{klts}.M2_{vc} \qquad \forall l, k, s, t \qquad (14)$$

$$\sum_c G3_{mlcst} \le \sum_c \sum_v U5^v_{mlts}.M2_{vc} \qquad \forall l, m, s, t \qquad (15)$$

$$\sum_c G4_{nlcst} \le \sum_c \sum_v U6^v_{nlts}.M2_{vc} \qquad \forall l, n, s, t \qquad (16)$$

محدودیت شعاع پوشش تسهیلات

$$Z1_{ikrswt}.T1_{ikws} \le Q1_{kr} \qquad \forall t, w, i, k, r, s \qquad (17)$$

$$Z2_{imst}.T2_{ims} \le Q2_m \qquad \forall t, m, i, s \qquad (18)$$

محدودیت سطح تجهیز

$$\sum_r X1_{krs} \le 1 \qquad \forall k, s \qquad (19)$$

$$\sum_r X2_{lrs} \le 1 \qquad \forall l, s \qquad (20)$$

محدودیت سطح تخصیص

$$\sum_r \sum_k Z1_{ikrswt} \le RQ \qquad \forall i, r \qquad (21)$$

$$\sum_m Z2_{imst} \le RQ \qquad \forall i, r \qquad (22)$$

$$\sum_r \sum_l Y1_{ilrst} \le RQ \qquad \forall i, r \qquad (23)$$

$$\sum_r \sum_l Y2_{klrst} \le RQ \qquad \forall i, r \qquad (24)$$

$$\sum_r \sum_l Y3_{mlst} \le RQ \qquad \forall i, r \qquad (25)$$

محدودیت‌های انتقال به شرط تخصیص فی‌مابین

$$L1_{ikst} \le \sum_r M.Z1_{ikrswt} \qquad \forall i, k, t, s \qquad (26)$$

$$L2_{imst} \le M.Z2_{imst} \qquad \forall i, m, s, t \qquad (27)$$

$$G1_{ilcts} \le M.Y1_{lirst} \qquad \forall l, i, c, t, r, s \qquad (28)$$

$$G2_{klcts} \le M.Y2_{lkrst} \qquad \forall l, k, c, t, r, s \qquad (29)$$

$$G3_{mlcts} \le M.Y3_{mlst} \qquad \forall l, m, c, t, s \qquad (30)$$

$$G4_{nlcts} \le M.Y4_{nlst} \qquad \forall l, n, c, t, s \qquad (31)$$

محدودیت تخصیص به شرط احداث

$$Z1_{ikrstw} \le X1_{krs} \qquad \forall t, w, i, k, r, s \qquad (32)$$

$$Z2_{imst} \le X3_{ms} \qquad \forall t, i, m, s \qquad (33)$$

$$Y4_{nlst} \le X4_{ns} \qquad \forall t, l, n, s \qquad (34)$$

$$Y3_{mlst} \le X3_{ms} \qquad \forall t, l, m, s \qquad (35)$$

$$\sum_r Y2_{lrstk} \le \sum_r X1_{krs} \qquad \forall l, k, s, t \qquad (36)$$

$$\sum_i Y1_{ilrst} + \sum_k Y2_{klrst} + \sum_m Y3_{mlst} \le M.X2_{lrs} \qquad \forall l, t, s, r \qquad (37)$$

محدودیت مسیر انتخابی

$$\sum_w Z1_{ikrstw} \le 1 \qquad \forall i, k, r, s, t \qquad (38)$$

محدودیت عدم پوشش افراد به علت تکمیل ظرفیت تسهیل اسکان (تقاضای اسکان برآورده نشده)

$$B1_{ist} - \sum_k \sum_m L1_{ikst} + L2_{imst} = SQ_{ist} \qquad \forall i, s, t \qquad (39)$$

$$X, Z, Y \in \{0, 1\} \qquad \forall \mathrm{i, j, k, l, r, s, t, w, m, n}$$

$$\mathrm{L, G, U} \ge 0, \mathrm{integer} \qquad \forall \mathrm{i, k, l, v, c, t, r, s, m, n}$$

$$\tau_{\mathrm{lcts}}, \mathrm{w^r_{clts}} \ge 0$$

در مدل ریاضی ارائه شده سعی بر آن است که هزینه‌های زنجیره‌ی تأمین کمینه شود. بنابراین تابع هدف ۱ کمینه‌سازی تمامی هزینه‌های احداث، هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های ناشی از ذخیره‌سازی و تعمیرات و نگهداری است که می‌توان هر کدام را جداگانه در چند تابع هدف آورد. تابع هدف ۲ کمینه‌سازی میزان کمبود خدمات و عدم پوشش افراد به علت تخریب تسهیل یا مسیر دسترسی به آن، تابع هدف ۳ میزان عدم پوشش افراد در تسهیل به دلیل تکمیل ظرفیت آن، تابع هدف ۴ میزان کمبود کالا در مراکز توزیع و انبار و تابع هدف ۵ میزان تأخیر در انتقال افراد به مراکز ایمن اسکان است. محدودیت ۶، محدودیت پوشش تقاضا کالا و تجهیزات امدادی است. همچنین طبق محدودیت ۷ رابطه‌ی جریانات ورودی و خروجی به مرکز توزیع باید متوازن باشد تا متغیر میزان کمبود و میزان ذخیره (ذخیره اطمینان) مقدار بهینه گیرد. سپس محدودیت ۸ تا ۱۰ ظرفیت مرکز اسکان، تأمین کنندگان اولیه

و پشتیبان و همچنین ظرفیت حمل و نقل کالا به مراکز اسکان و نقاط تقاضا آورده شده است. در ادامه محدودیت‌های ۱۱ تا ۱۶ مربوط به ظرفیت حمل و نقل کالا بین تسهیلات آورده شده است. محدودیت‌های ۱۷ و ۱۸ مربوط به محدودیت شعاع پوششی اسکان است. طبق این محدودیت مناطق حادثه دیده تخصیص‌یافته لزوماً باید در شعاع پوشش مراکز مذکور باشند. محدودیت‌های ۱۹ و ۲۰ بیان می‌کند هر تسهیل فقط در یک سطح r می‌تواند خدمت‌رسانی کند. محدودیت‌های ۲۱ تا ۲۵ بیان می‌کنند هر نقطه‌ی تقاضا بیشینه از یک تسهیل اولیه و از یک تسهیل پشتیبان می‌تواند خدمات بگیرد. محدودیت‌های ۲۶ تا ۳۰ به ترتیب به انتقال حادثه‌دیدگان و انتقال کالا به مراکز به شرط تخصیص به آنها می‌پردازند. در محدودیت‌های ۳۱ تا ۳۷، تخصیص به یک مرکز مشروط به احداث و وجود تسهیل در آن نقطه می‌شود. در محدودیت ۳۸ نیز مشخص می‌شود که در نهایت بین دو نقطه بیشینه یک مسیر باید انتخاب شود. محدودیت ۳۹ میزان عدم پوشش تقاضا به دلیل تکمیل ظرفیت نقاط اسکان (مازاد تقاضا) را نشان می‌دهد که در تابع هدف باید کمینه شود.

## ۴. روش حل

مدل ارائه شده یک مدل ریاضی سناریومحور چندهدفه است که به روش دقیق در نرم‌افزار GAMS حل می‌شود. توابع هدف با هم در تضادند و برای تجمیع توابع هدف از روش وزن‌دهی استفاده شده است. از آن‌جا که توابع هدف ارائه شده هم‌جنس و هم‌واحد نیستند، از سه روش برای بی‌مقیاس‌سازی توابع هدف استفاده شده است: در نظرگرفتن ضرایب تصحیح در توابع هدف، نرمال‌سازی توابع هدف و انحراف توابع هدف از مقادیر آرمانی.

### ۱.۴. وزن‌دهی بر مبنای تجمیع توابع تصحیح شده

در روش وزن‌دهی بر مبنای ضرایب تصحیح، به منظور بی‌مقیاس‌سازی توابع هدف از ضرایب تصحیح $AT_3$، $\delta_s$ و $AP_s$ [۲۴] و به عنوان پارامتر استفاده شده که چنین تعریف می‌شوند:

$AT_s$: هزینه‌ی جریمه‌ی تأخیر در هر واحد زمان تحت سناریو s؛

$AP_s$: هزینه‌ی جریمه‌ی هر واحد کمبود کالا تحت سناریو s؛

$\delta_s$: هزینه‌ی جریمه‌ی عدم پوشش حادثه‌دیدگان درزمان اختلال در مرکز اسکان تحت سناریو s.

سپس پارامترهای $AT_s$، $AP_s$ و $\delta_s$ به ترتیب در توابع هدف شماره ۵، ۴، ۲ و ۳ ضرب شده و این توابع هدف را به مانند تابع هدف شماره ۱، تبدیل به هزینه می‌کنند. این پارامترها با نظر کارشناسان مربوطه در مطالعه‌ی موردی تعیین شده است. در چنین شرایطی توابع هدف همگی از جنس هزینه شده و تابع هدف نهایی نیز حاصل تجمیع آنها و کمینه کردن کل هزینه خواهد بود.

### ۲.۴. وزن‌دهی بر مبنای تجمیع توابع نرمال شده

در این روش ابتدا توابع هدف بی‌مقیاس‌سازی می‌شوند سپس با استفاده از ضریب اهمیت با هم جمع می‌شوند و در نهایت تابع هدف نهایی کمینه خواهد شد.

$$F_i = \frac{(f_i^* - f_i^{\min})}{(f_i^{\max} - f_i^{\min})} \qquad (۴۰)$$

در دو روش فوق پس از جمع‌پذیر شدن توابع هدف، تابع هدف نهایی از فرمول ۴۱ محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است $W_i$ وزن هر تابع هدف و نشان‌دهنده‌ی اهمیت نسبی آن است.

$$\text{Total Objective} = \sum_i W_i F_i \qquad (۴۱)$$

### ۳.۴. وزن‌دهی بر مبنای تجمیع انحرافات (برنامه‌ریزی آرمانی)

مسائل چندهدفه مسائلی هستند که بیش از یک تابع هدف واحد دارند. این اهداف معمولاً با هم سازگار نیستند. در واقع، بهینه‌سازی یکی از اهداف می‌تواند به راه حلی غیر بهینه برای دیگران منجر شود. در چنین شرایطی، برخی از روش‌ها، بین حل‌های همه‌ی اهداف، مبادله ایجاد کرده[۲۷] و یک حل میانه را انتخاب می‌کند. در این پژوهش نیز تفاوت جنس اهداف باعث می‌شود نوسان و دامنه برخی توابع هدف به قدری متفاوت باشد که برای در نظرگرفتن همه اهداف به صورت هم‌زمان عملا برخی از آنها تأثیر خود را از دست می‌دهند و محدود می‌شوند. لذا یکی از پیشنهادهای اولیه در نظر گرفتن انحراف از آرمان است. آرمان ممکن است غیر موجه باشد ولی از نظر راهبرد سازمانی (مانند بودجه احداث که کمینه انحراف از آن مد نظر باشد) مد نظر قرار گیرد. در این روش میزان انحراف هر تابع هدف از آرمان خود کمینه می‌شود. $dp_i$ میزان انحراف و $f_i^{max}$ میزان آرمان برای هر تابع هدف است.

$$\text{Total Objective} = \sum_i W_i dp_i \qquad (۴۲)$$

$$f_i - dp_i = f_i^{\max}$$

$$dp_i \leq ۰ \qquad (۴۳)$$

## ۵. نتایج مدل برای مطالعه‌ی موردی

اخبار منتشر شده نشان می‌دهد که سیل سال ۱۳۸۸ در قم علاوه بر کشته شدن تعدادی از مردم، باعث ایجاد ده‌ها میلیارد تومان خسارت به تأسیسات شهری و مناطق کشاورزی شده است. همچنین هزاران رأس دام در مناطق مختلف استان تلف و صدها رشته قنات تخریب شده‌اند. در سال ۱۳۹۸ بخش وسیعی از کشور درگیر سیلاب و سیل شدند که باز هم شهر قم از این قائله مستثنی نشد. در این سیلاب به علت اقدام به موقع در تخلیه‌ی رودخانه، خسارات جانی کمتری نسبت به سال ۱۳۸۸ گزارش شد. اما در برخی نقاط رودخانه، به خصوص در نزدیکی حرم مطهر به دلیل عرض کم، ارتفاع آب تا حدود ۱/۵ متر می‌رسید. در سال ۱۳۹۹ مطابق سایت هواشناسی استان قم، میزان بارندگی سال آبی جدید ۴ درصد رشد نسبت به سال مشابه آبی گذشته و ۶۲/۲ درصد رشد نسبت به متوسط سالانه داشته است. مطابق نمودارهای ارائه شده مشخصاً تا سال ۱۳۹۲ شهر قم دچار کاهش سالانه بارندگی است که این روند به آرامی در حال تغییر است و به نظر می‌رسد وارد دوره‌ی ترسالی شده‌ایم.[۲۸] چنانچه در سال‌های اخیر شاهد روزهای پرباران بیشتری بوده‌ایم و به نظر می‌رسد دوره‌ی ده ساله‌ی سیلاب در قم در حال کاهش است. همچنین تقارن و هم‌زمانی و هم‌مکانی بارش‌های رگباری بهاری و حضور مسافران در منطقه‌ی رودخانه‌ی قم باعث تدوین یک سناریو بحران شد. در چنین شرایطی سوله‌های مدیریت بحران مد نظر به علت کسری بودجه و یا مشکلات تملک در مرکز

جدول ۱. نقاط بحرانی.

| شماره (i) | نام منطقه |
|---|---|
| ۱ | محدوده‌ی پل راه‌آهن تا پل آهنچی (به سمت جنوب حرم) |
| ۲ | محدوده‌ی پل آهنچی تا پل علیخانی (به سمت شمال حرم) |
| ۳ | خیابان‌های ساحلی اطراف رودخانه در محدوده‌ی مذکور |
| ۴ | منطقه‌ی پردیسان |

جدول ۲. تسهیلات کاندید.

| شماره‌ی نقاط کاندید | اسکان اولیه (k) | توزیع اولیه (l) | اسکان پشتیبان (m) | توزیع پشتیبان (n) |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ورزشگاه شهید حیدریان | بوستان نجمه | بوستان فدک | معین تهران |
| ۲ | نمایشگاه بین‌المللی قم | نمایشگاه بین‌المللی قم | مسجد جمکران | معین گرمسار |
| ۳ | بوستان علوی | بوستان غدیر | - | معین کاشان |
| ۴ | - | - | - | معین اراک |

جدول ۳. مقایسه‌ی روش‌های حل چندهدفه با نرم‌افزار.

| نرمال‌سازی<br>۲ اسکان و ۶ تأمین<br>زیاد | ضریب تصحیح<br>۲ اسکان و ۴ تأمین<br>متوسط | برنامه‌ریزی آرمانی<br>۱ اسکان و۳ تأمین<br>کم | روش حل<br>تعداد نقاط فعال شده<br>میزان پوشش سناریوها |
|---|---|---|---|
| ۵۴۹۱ | ۵۲۱۶ | ۳۷۳۳ | هدف اول |
| ۰/۳۸۰ | ۰/۳ | ۰/۱ | هدف دوم |
| ۹۱۷ | ۹۲۵ | ۹۳۱ | هدف سوم |
| ۱۳۴ | ۲۳۴ | ۵۷۲ | هدف چهارم |
| ۱۵ | ۱۱/۳ | ۱۲/۲ | هدف پنجم |

شهر در نظرگرفته نشده‌اند یا ساختشان به کندی در جریان است. با توجه به شبکه‌ی بحران در ایران تسهیلات شامل اسکان و انبارهای تأمین و توزیع مواد امدادی، چنین تقسیم‌بندی می‌شوند:

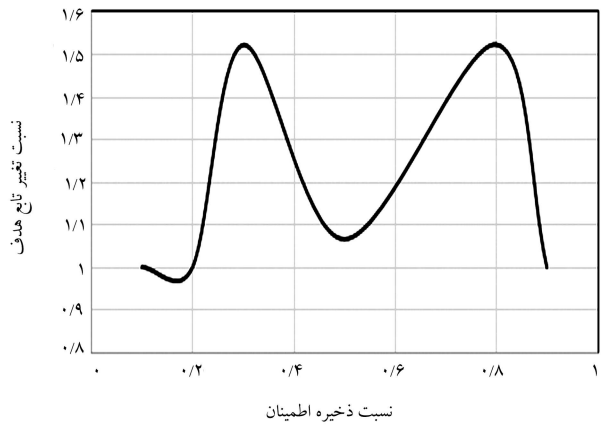
۱. برای اسکان اولیه‌ی مدارس، ورزشگاه‌ها و . . . به صورت چندمنظوره و نزدیک به نقطه‌ی بحران و برای انبار اولیه (و مرکز توزیع) مراکز ویژه‌ی مدیریت بحران و مراکز چندمنظوره برای انبار و توزیع کالا در نظرگرفته شده‌اند.

۲. برای اسکان پشتیبان مراکز ویژه با ظرفیت و امنیت بالاتر نسبت به مراکز اولیه و برای تأمین پشتیبان مراکز معین استانی واقع در شهرستان‌های همسایه برای انبار کالا مد نظر هستند که در شرایط عادی غیرفعال هستند و صرفاً برای شرایط بحرانی که تسهیلات اولیه از دسترس خارج یا اشباع می‌شوند، احداث و در نظرگرفته می‌شود. فرض بر این است که این تسهیلات دارای بیشترین معیارهای ایمنی، امنیت، ظرفیت و امکانات پیش‌بینی شده برای سناریوهای بحرانی‌تر هستند.

برای موضوع سیل در شهر قم دو دوره‌ی پرباران و پرمسافر و پرباران و کم مسافر و ۸ سناریوی بروز سیل مستقلاً در نظرگرفته شده است. مطابق جدول ۱ در این مدل، ۴ منطقه‌ی بحرانی و مطابق جداول ۲ و ۳ نقطه‌ی کاندید تسهیلات اسکان اولیه، ۳ نقطه‌ی کاندید تسهیلات تأمین اولیه، ۲ نقطه‌ی کاندید تسهیلات اسکان پشتیبان و ۴ نقطه‌ی کاندید تسهیلات تأمین پشتیبان در نظرگرفته شده است. در نتیجه با توجه به جدول ۳ به نظر می‌رسد توابع هدف سوم و چهارم، یعنی میزان بهینه‌ی عدم پوشش اسکان و کمبود به دلیل اختلاف مقیاس، در سایر روش‌ها بیشتر و در روش به هنجار کردن کمتر می‌شوند. لذا از روش به هنجارکردن استفاده و نتایج را تحلیل می‌کنیم. در این روش تسهیلات اولیه اسکان در نقاط ۱ و ۲ فعال می‌شوند و تسهیلات اولیه تأمین در نقطه‌ی ۲ و ۳ فعال می‌شود. همچنین تسهیلات پشتیبان اسکان غیرفعال و تسهیلات پشتیبان تأمین در نقاط ۱، ۲، ۳ و ۴ فعال می‌شوند.

## ۶. تحلیل حساسیت

در این بخش پارامترهای تأثیرگذار بر مدل که در دنیای واقعی نماینده یک سیاست برای آمادگی و پاسخ به بحران هستند به همراه پارامترهای مربوط به راهبردهای حمایتی که جزء نوآوری‌های مهم تحقیق هستند، آورده شده است. تحلیل این پارامترها در واقع پاسخی به سؤالات مسئله‌ی تحقیق هستند. با توجه به انتخاب سناریوها و این که در حادثه‌ی سیل ممکن است هر رویداد غیر منتظره‌یی در ادامه رخ دهد، پاسخ مسئله بر مبنای مدل پایه‌ی سناریومحور اولیه ممکن است هزینه‌های زیادی را پیش‌بینی کند. لذا با در نظرگرفتن پارامترها و متغیرهای کنترلی مختلف و سناریوهای حمایتی متفاوت و متنوع قصد حمایت از زنجیره‌ی بحران در شرایط با عدم اطمینان بسیار زیاد را داریم. بنابراین هرکدام از ابزارهای ارائه شده مانند ذخیره‌ی اطمینان، ارتقاء سطح و ظرفیت تسهیلات، افزایش تعداد تسهیلات، اضافه کردن تسهیلات پشتیبان، افزایش تخصیص‌ها و . . . سیاستی در جهت کنترل چنین شرایطی هستند که با توجه به ترکیب متفاوت از سناریوها می‌توانند به کارگرفته شوند یا خیر و یا براساس




شکل ۲. تغییر تابع هدف برحسب تغییر نسبت ذخیره‌ی اطمینان.

پارامترهایی که برای آنها تعریف می‌کنیم میزان استفاده از این سیاست‌ها بهینه شود.

میزان انبار کالا و تجهیزات می‌تواند تعیین‌کننده میزان کمبود در هر منطقه باشد. از سوی دیگر ایجاد و ذخیره‌سازی اقلام در بلندمدت ممکن است هزینه‌های نگهداری، تعمیرات و دور ریز به دلیل انقضا کالا را برای ما در پی داشته باشد. در شکل ۲ با افزایش این نسبت، تسهیلات کمتر و ترکیب متفاوت‌تری از سناریوها در نظر گرفته می‌شود. (در محاسبات این تحقیق به طور پیش فرض ۰/۹ در نظر گرفته شده است.)

همچنین با افزایش سقف بودجه میزان تابع هدف بهتر خواهد شد تا نقطه‌ی اکسترمم که بهترین جواب را می‌دهد. پس از این نقطه با افزایش بودجه تابع هدف تغییری نخواهد کرد یا بدتر خواهد شد.

## ۱.۶. راهبردهای حمایتی و تحلیل پارامترهای مرتبط

تصمیم‌ها و اهداف مدل همان‌طور که گفته شد چهار نوع تصمیم در راستای افزایش قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری زنجیره‌ی تأمین در قبال حوادث متوالی پیش‌بینی نشده، پیشنهاد شده است. این تدابیر در زنجیره‌های تأمین به خصوص زنجیره‌ی بحران باعث کاهش کمبود کالا یا تأخیر در ارائه کالا و خدمات می‌شود:

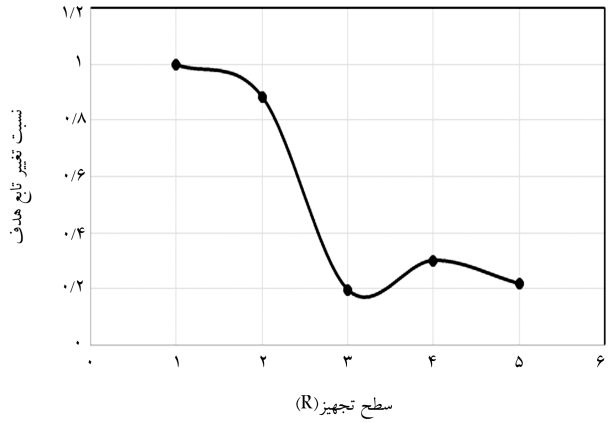
الف) اضافه کردن تسهیلات جدید (نماد L و K)؛

ب) تجهیز تسهیل موجود (نماد R)؛

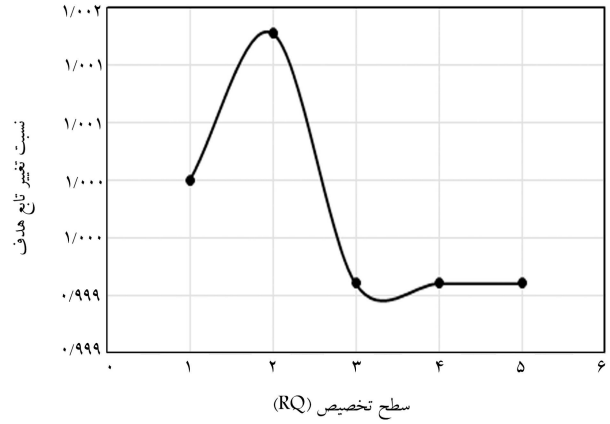
ج) استفاده از تخصیص مضاعف (نماد RQ)؛

د) استفاده از تسهیلات پشتیبان (نماد M و N)

اضافه کردن تسهیلات جدید در مناطقی که کمبود تسهیلات وجود دارد اولین راه حل است. تجهیز تسهیلات موجود در شرایطی که امکان تجهیز و ارتقا وجود داشته باشد، روش کاربردی در مناطقی است که شرایط ایجاد تسهیلات جدید سخت باشد. در روش تخصیص مضاعف میزان تخصیص در هر سناریو می‌تواند بیشتر از ۱ باشد یعنی هر نقطه‌ی تقاضا می‌تواند در یک سناریو و یک دوره از چند تسهیل تغذیه کند. البته اگر سطح تجهیز افزایش یابد امکان تخصیص مضاعف نیز فراهم می‌شود. در روش تسهیلات پشتیبان، ایجاد تسهیلات ایمن‌تر و مجهزتر که از کمبود و عدم پوشش بکاهد مد نظر است و به صورت جداگانه مکان‌یابی می‌شوند. هر کدام از این راهبردها هزینه‌هایی در پی خواهد داشت یا برخی توابع هدف را افزایش می‌دهد و در شرایط و سناریوهایی خاص ممکن است پیشنهاد شود. هر چه سطح تجهیز بیشتر شود، فاصله‌ی پوششی افزایش خواهد یافت و این عمل به وسیله‌ی




شکل ۳. تغییر تابع هدف برحسب تغییر سطح تجهیز.




شکل ۴. تغییر تابع هدف برحسب تغییر سطح تخصیص.

تجهیز تسهیل سطح پایین و ارتقاء آن یا افزایش ظرفیت آن صورت می‌پذیرد. این کار هزینه‌هایی دارد، اما با این روش ضمن کاهش احتمال کمبود، سطح انعطاف‌پذیری مورد نیاز برای هر تسهیل نیز مشخص خواهد شد. لازم به ذکر است هرچه سطح R بیشتر و PA کمتر باشد، قابلیت پشتیبانی تسهیل بیشتر است.

اندیس‌های L و N نشان‌دهنده‌ی بیشترین تعداد کاندید مجاز تسهیلات توزیع و انبار به ترتیب اولیه و پشتیبان و K و M نشان‌دهنده‌ی بیشترین تعداد نقاط کاندید مجاز تسهیلات اسکان به ترتیب اولیه و پشتیبان هستند. این میزان مطابق نظر خبره قابل تعیین است. در شکل ۳ و ۴ به ترتیب تغییر تابع هدف برحسب تغییر سطح تجهیز و سطح تخصیص نشان داده شده است. با توجه به نتایج می‌توان گفت برای تسهیلات با کاربری انبار یا مرکز توزیع و همچنین مراکز اسکان، به ترتیب راهبردهای تجهیز، اضافه کردن تسهیل اولیه و سپس تسهیل پشتیبان و در نهایت تخصیص مضاعف بیشترین تأثیر را در بهبود تابع هدف دارند. جدول ۴ راهبردهای مذکور را برای مطالعه‌ی موردی بررسی می‌کند.

هرچه احتمال سناریوهای بحرانی‌تر، احتمال تخریب تسهیلات، هزینه‌های احداث و مدت زمان محتمل دسترسی کمتر باشد، تابع هدف بهتری خواهیم داشت. همچنین هرچه شعاع پوشش و بودجه در دسترس نیز بیشتر باشد، مقدار تابع هدف بهتر خواهد شد. لازم به ذکر است A، Q، T و PA به ترتیب از چپ به راست بیشترین اثر را بر تابع هدف خواهند داشت. در جدول ۵ راهبردها و سیاست‌های مورد استفاده در مدل تعریف و تأثیر هرکدام بر تابع هدف بررسی شده است. به طور مثال افزایش یک واحد تعداد تسهیلات اولیه اسکان و تأمین، به طور متوسط می‌تواند تا ۲۹ درصد

جدول ۴. تحلیل راهبردهای حمایتی برای مطالعه‌ی موردی.

| استراتژی حمایتی برای تسهیلات اسکان | درصد بدتر شدن تابع هدف از نقطه‌ی بهینه |
|---|---|
| اضافه کردن تسهیل اولیه‌ی شماره‌ی ۳ در سطح ۱ | ۷۶ |
| اضافه کردن تسهیل اولیه‌ی شماره‌ی ۳ در سطح ۲ | ۳۸ |
| تجهیز تسهیل موجود ۲ شماره تا سطح ۲ | ۵۱ |
| اضافه کردن هر یک از تسهیلات پشتیبان | ۸۹ |

جدول ۵. مقایسه‌ی راهبردهای حمایتی و سایر سیاست‌ها.

| ردیف | راهبردها و سیاست‌ها | پارامتر یا متغیر مربوطه | متوسط تأثیر مثبت روی تابع هدف (درصد) |
|---|---|---|---|
| ۱ | افزایش یک واحد تعداد تسهیلات اولیه‌ی اسکان و تأمین | K,L | ۲۹ |
| ۲ | افزایش یک واحد تعداد تسهیلات پشتیبان اسکان و تأمین | M,N | ۱۶ |
| ۳ | افزایش یک واحد سطح تجهیز | R | ۵۶ |
| ۴ | افزایش یک واحد سطح تخصیص | RQ | ۳ |
| ۵ | افزایش ۱۰ درصد ذخیره‌ی اطمینان | $\tau$ | ۲۳ |
| ۶ | کاهش ۱۰ درصد احتمال تخریب | PA,PE | ۲۰ |
| ۷ | کاهش ۱۰ درصد احتمال سناریو | P | ۱۰ |
| ۸ | کاهش یک دقیقه زمان دسترسی | T۱,T۲ | ۱۷ |
| ۹ | کاهش ۳ میلیارد ریال هزینه‌ی ساخت تسهیل | A۱,A۲ A۳,A۴ | ۱ |
| ۱۰ | افزایش یک کیلومتر شعاع پوشش | Q۱,Q۲ | ۵ |

تابع هدف را بهبود بخشد اما با توجه به تعداد تسهیلات کنونی و پارامترهای دیگری مانند میزان تقاضا این احتمال وجود دارد که تا ۴۵ درصد نیز تابع هدف بدتر شود. در صورتی که تقاضای تأمین و اسکان برآورده شده باشد (نقطه‌ی بهینه)، افزایش تسهیل در این زمینه مشمول هزینه خواهد شد.

جدول ۶. اولویت‌بندی تسهیلات فعال و غیرفعال.

| شماره تسهیل | $X1_{(k,r,s)}$ | $X2_{(l,r,s)}$ | $X3_{(m,s)}$ | $X4_{(n,s)}$ |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | دوم ☑ | سوم ☒ | پنجم ☒ | چهارم ☑ |
| ۲ | اول ☑ | اول ☑ | چهارم ☒ | ششم ☑ |
| ۳ | سوم ☒ | دوم ☑ | - | پنجم ☑ |
| ۴ | - | - | - | هفتم ☑ |

## ۷. سایر تحلیل‌ها

### ۱.۷. اولویت‌بندی تسهیلات

با توجه به مدل سناریومحور می‌توان گفت مقادیر متغیرهایی که در فاز آمادگی هستند مانند متغیر احداث تسهیلات، باید به صورت تصمیم غیر راهبردی در نظر گرفته شوند. بدین معنا که تسهیلات احداث شده‌اند و صرفاً در حالت پاسخ به بحران می‌توانند تحت سناریوهای مختلف فعال شوند. می‌توان از اولویت‌بندی تسهیلات برای ساخت، در فاز آمادگی استفاده کرد. اولویت‌بندی تسهیلات با در نظر گرفتن حالت انتظاری و با تعریف مفهوم اولویت ساخت، برنامه‌ریزی ما را از فاز پاسخ به فاز آمادگی انتقال می‌دهد. در حقیقت در این حالت ما اقدامات در فاز آمادگی و پاسخ را به صورت یک طیف پیوسته بررسی می‌کنیم. می‌توان حتی براساس احتمال سناریو متغیرها را به دو دسته مراکز موقت و دائم تقسیم کرد.

با توجه به جدول ۶ براساس تحلیل قیمت‌های سایه‌یی در شرایط بحرانی‌تر تسهیل پشتیبان اسکان شماره ۲ نسبت به تسهیل اولیه اسکان شماره ۳ اولویت کمتری برای اضافه شدن به شبکه دارد. پس از بررسی محدودیت‌های کمبود و عدم پوشش مشخص شد به ترتیب نقاط تقاضای ۱، ۲ و ۴ بیشترین خطر را دارند. همچنین مراکز توزیع ۱ و ۳ و ۲ به ترتیب دارای بیشترین خطر برای تأمین هستند.

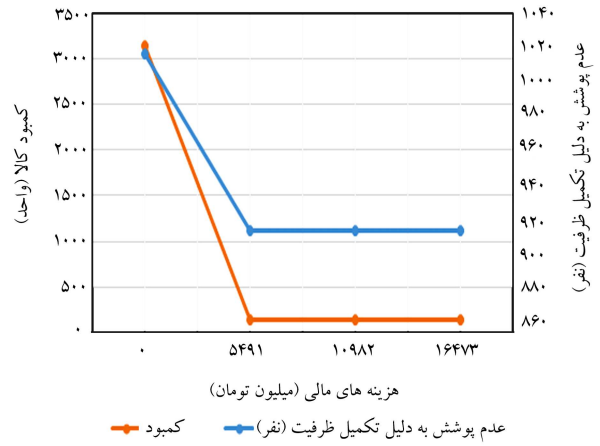
### ۲.۷. تعارض اهداف

الف) کمینه‌سازی میزان کمبود کالا (هدف چهارم) و کمینه‌سازی میزان عدم پوشش به علت تکمیل ظرفیت تسهیلات (هدف سوم) با کمینه‌سازی هزینه‌های احداث، حمل و نقل و نگهداری (هدف اول)

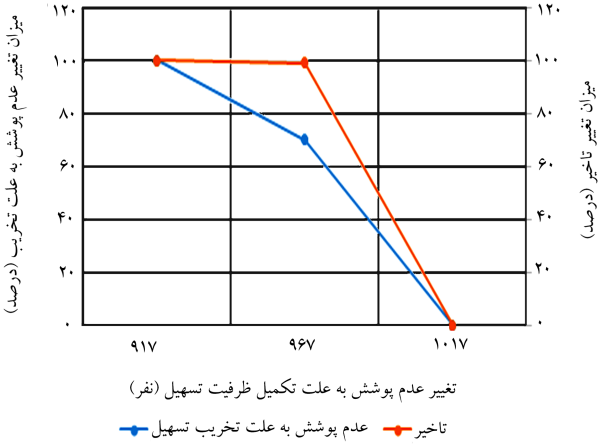
در صورت کاهش هزینه‌های مالی از جمله هزینه‌ی احداث، تعداد مراکز اولیه و پشتیبان اسکان و تأمین کمتر خواهد شد و به طبع میزان عدم پوشش تقاضا و کمبود کالا در مراکز نیز افزایش خواهد یافت (شکل ۵).

ب) کمینه‌سازی عدم پوشش به دلیل تخریب تسهیل (هدف دوم) و کمینه‌سازی تأخیر و زمان دسترسی به تسهیل (هدف پنجم) با کمینه‌سازی میزان عدم پوشش به علت تکمیل ظرفیت تسهیلات (هدف سوم).

این تعارض نشان می‌دهد که هرچه میزان عدم پوشش به دلیل تکمیل ظرفیت تسهیلات کمتر شود (یعنی پوشش نقاط بیشتر شود)، اگر این کار به وسیله‌ی




شکل ۵. تعارض اهداف سوم و چهارم با هدف اول.




شکل ۶. تعارض اهداف دوم و پنجم با هدف سوم.

افزایش تعداد تسهیلات صورت گیرد باعث در نظرگرفتن برخی تسهیلات در نقاط نزدیک‌تر و پرخطرتر شده و عملاً عدم پوشش به علت تخریب افزایش می‌یابد. اما اگر این کار به وسیله‌ی افزایش ظرفیت تسهیلات و یا ساختن تسهیلات پشتیبان با ظرفیت بالا انجام شود، (که در نقاط کم خطر و دور از حادثه برای پشتیبانی از مازاد تقاضا و حوادث متعاقب پیش‌بینی شده‌اند) می‌تواند زمان دسترسی به آنها را تا حد زیادی افزایش دهد و تابع هدف مربوطه را بدتر نماید (شکل ۶).

ج) کمینه‌سازی تأخیر و زمان دسترسی به تسهیل (هدف پنجم) با کمینه‌سازی هزینه‌های احداث، حمل و نقل و نگهداری (هدف اول).

تعارض این دو تابع هدف بیشتر به دلیل افزایش تعداد تسهیلات است. این امر باعث کاهش متوسط زمان دسترسی یا تأخیر می‌شود اما هزینه‌های احداث را افزایش می‌دهد.

### ۳.۷. تحلیل مدل

رفتار مدل با توجه به تحلیل حساسیت و تغییر متغیرها و با توجه به نظر خبرگان مورد بررسی قرارگرفته است. به طور مثال افزایش تعداد تسهیلات پشتیبان و افزایش ظرفیت تسهیلات موجود (افزایش سطح تجهیز) در این مدل باعث کاهش میزان کمبود و عدم پوشش شده است و تابع هدف نهایی را کاهش می‌دهد. مطابق نتایج ارائه شده در بخش ۵ و همین طور در جدول ۳، این مدل چندهدفه با روش بی‌مقیاس‌سازی اهداف هم‌سو با گفته‌های مسئولین مدیریت بحران استان، بر لزوم افزایش تعداد تسهیلات فراتر از سطح بوستان‌ها و استراحتگاه‌ها تأکید می‌کند که البته با توجه بحران سیل و فاصله از محل اصلی بحران (رودخانه‌ی قم) معقول به نظر می‌رسد. در نتایج این مدل می‌توان حذف برخی سناریوها با احتمال بسیار کم برای کاهش هزینه‌ها را مشاهده کرد. همچنین از تأثیر بالای عوامل پیشگیری‌کننده مانند کاهش احتمال سناریو حکایت دارد که با پیشنهادات کارشناسانه در این زمینه مانند ایمن‌سازی بستر رودخانه مطابقت دارد. پیچیدگی مدل، براساس زمان حل است که رابطه‌ی مستقیم با حاصل‌ضرب $i \times k \times l \times m \times n$ دارد. تعداد نقاط تقاضا بیشترین اثر را بر پیچیدگی مدل خواهد داشت. به عبارتی اضافه کردن هر نقطه‌ی تقاضا ۸۵ درصد زمان حل را افزایش می‌دهد. مدل ارائه شده برای تخلیه‌ی اضطراری هنگام سیل می‌تواند تا ۴۸ درصد مقدار بهینه تابع هدف را نسبت به مدل اولیه کمتر سازد. همچنین اضافه کردن راهبردهای حمایتی هرچند می‌تواند هزینه‌ها را تا ۳۶ درصد افزایش دهد اما در حوادث با سناریوهای متنوع و مختلف می‌تواند تا ۵۹ درصد اهداف کمبود و عدم پوشش را کاهش دهد. لذا اساساً تسهیلات پشتیبان و راهبردهای مذکور اغلب برای کاهش این ۲ تابع هدف ارائه می‌شود. همچنین مطابق جدول ۳ روش بی‌مقیاس‌سازی در این مدل می‌تواند تا ۳ درصد تابع هدف را بهبود بخشد و از طرف دیگر تا حد زیادی زمان حل و پیچیدگی مدل را کاهش دهد.

## ۸. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل چندهدفه و احتمالی به منظور کاهش میزان زمان دسترسی به تسهیلات اسکان و میزان عدم پوشش کالا و افراد برای اسکان و تأمین و در دو فاز آمادگی و پاسخ به بحران در قالب مدل ریاضی عدد صحیح مختلط ارائه شده است. این مدل به مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات مبتنی بر راهبردهای حمایتی می‌پردازد. خروجی مدل علاوه بر مکان و تخصیص بهینه تسهیلات، شامل سطح تجهیز و تخصیص بهینه، تعداد وسایل نقلیه‌ی بهینه، جریان بهینه‌ی کالا و افراد، سطح بهینه‌ی ذخیره‌ی اطمینان و کمبود است. این مدل دو تسهیل اولیه برای توزیع و انبار مواد و کالاهای ضروری و دو سوله اسکان اولیه برای اسکان زائران و افراد حادثه دیده مطابق سناریوها و در هر دوره و صرفاً برای بحران سیل تعیین می‌کند. مدل مذکور با توجه به احتمال و میزان تقاضای اسکان هنگام سیلاب در مناطق مختلف شهر قم، هرچند احداث تسهیلات پشتیبان اسکان را در نقاط کاندید، ضروری نمی‌داند اما برای تأمین پشتیبان کالاهای امدادی و تجهیزات تمامی انبارهای استان‌های معین را تحت سناریوهای مختلف فعال در نظر گرفته است.

در تحلیل حساسیت مشخص شد پارامترهای $P_{st}$ و $PA_{KWIS}$ یعنی کاهش احتمالات حادثه و تخریب، در فاز پیشگیری می‌توانند بیشترین تأثیرات را بر تابع هدف داشته باشد. در فاز آمادگی و پاسخ به بحران به ترتیب راهکارهایی مانند احداث تسهیلات اولیه، تجهیز و تخصیص مضاعف احداث تسهیلات پشتیبان، پیش‌بینی ذخیره‌ی اطمینان، کاهش هزینه‌های ساخت یا افزایش بودجه و مدیریت راه‌ها و ترافیک مد نظر است. استفاده از راهبردهای حمایتی اعم از تسهیلات پشتیبان می‌تواند ضمن کاهش تابع هدف تجمیع شده، ترکیب بهینه از سناریوها را نیز تغییر دهد. در حقیقت می‌توان گفت با پشتیبانی بهتر از نقاط تقاضا می‌توان خطرهای بلندمدت و در نهایت دوره بهبود در فاز بازیابی را هم کاهش داد. مشخصا برای مشکل سیل در رودخانه مرکزی شهر قم می‌توان در ابتدا با راهکارهای پیشگیرانه

مانند تعریض و عقب‌نشینی پهنای رودخانه، تعبیه‌ی سیستم فاضلاب و خروج آب، تعبیه‌ی پارکینگ‌ها و خیابان‌های جایگزین برای خروج خودروها از بستر رودخانه به کاهش احتمال سناریو و تخریب در این مناطق پرداخت. علاوه بر آن، در فاز آمادگی خرید، تملک و تجمیع تسهیلات اولیه نزدیک به رودخانه پیشنهاد می‌شود و در فاز بلندمدت نیز استفاده از تخصیص مضاعف یا تسهیلات پشتیبان مد نظر است. پیشنهادهای آتی عبارت‌اند از:

۱. اضافه کردن سایر تسهیلات مرتبط در حوزه سلامت مانند بیمارستان و مراکز درمانی؛

۲. مسیریابی برای تخلیه و تعریف مسیرهای پشتیبان؛

۳. مکان‌یابی تسهیلات پشتیبان در سطح استانی یا سطح کشوری؛

۴. ارائه‌ی یک مدل سلسله‌مراتبی بر مبنای سیستم اطلاعات جغرافیایی در جهت بهینه‌سازی زمان تخلیه‌ی اضطراری.

## پانوشت‌ها

1. Daskin
2. Hogan
3. Backup Coverage Problem (BACOP)
4. Pirkul
5. Competitive Maximal Coverage Location Problem (CMCLP)
6. Snyder
7. P-median
8. Chang
9. Ratick
10. Okelly
11. P-hub
12. Farahani
13. Lia
14. An
15. Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)
16. Salman
17. Azizi
18. Backup Hub
19. Karatas
20. Chen
21. Mohamadi
22. Namdar
23. Value at Risk (VAR)
24. Conditional Value at Risk (CVAR)
25. Madani
26. Rahmani
27. Torkestani
28. Jabbarzadeh
29. Ghasemi
30. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)
31. Multi Objective Particle Swarm Optimization (MMOPSO)
32. Sawik
33. Yu
34. Yeh
35. Geographic Information System (GIS)
36. Asadpour

## منابع (References)


1. Sawik, T. "Disruption mitigation and recovery in supply chains using portfolio approach", *Omega*, **84**, pp. 232-248 (2019).
2. Ratick, S., Meacham, B., and Aoyama, Y. "Locating backup facilities to enhance supply chain disaster resilience", *Growth and Change*, **39**(4), pp. 642-666 (2008).
3. Daskin, M.S. "A maximum expected covering location model: Formulation, properties and heuristic solution", *Transportation science*, **17**(1), pp. 48-70 (1983).
4. Hogan, K. and ReVelle, CH. "Concepts and applications of backup coverage", *Management Science*, **32**(11), pp. 1434-1444 (1986).
5. Pirkul, H. and Schilling, D.A. "The siting of emergency service facilities with workload capacities and backup service", *Management Science*, **34**(7), pp. 896-908 (1988).
6. Snyder, L.V. and Daskin, M.S. "Reliability models for facility location: The expected failure cost case", *Transportation Science*, **39**(3), pp. 400-416 (2005).
7. Chang, M.S., Tseng, Y.L. and Chen, J.W. "A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **43**(6), pp. 737-754 (2007).
8. Kim, H. and O'Kelly, M.E. "Reliable p-hub location problems in telecommunication networks", *Geographical Analysis*, **41**(3), pp. 283-306 (2009).
9. Farahani, R.Z., Asgari, N., Heidari, N. and et al. "Covering problems in facility location: A review", *Computers & Industrial Engineering*, **62**(1), pp. 368-407 (2012).
10. Lia, Q. and Savachkina, A. "Reliable distribution networks design with nonlinear fortification function", *International Journal of Systems Science.*, **47**, pp. 805-813 (2014).
11. An, S., Cui, N., Bai, Y. and et al. "Reliable emergency service facility location under facility disruption, en-route congestion and in-facility queuing", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **82**, pp. 199-216 (2015).
12. Salman, F.S. and Yücel, E. "Emergency facility location under random network damage: Insights from the Istanbul case", *Computers & Operations Research*, **62**, pp. 266-281 (2015).
13. Azizi, N., Chauhan, S., Salhi, S. and et al. "The impact of hub failure in hub-and-spoke networks: Mathematical formulations and solution techniques", *Computers & Operations Research*, **65**, pp. 174-188 (2016).
14. Karatas, M., Razi, N. and Tozan, H. "A comparison of p-median and maximal coverage location models with Q-coverage requirement", *Procedia Engineering*, **149**, pp. 169-176 (2016).

15. Chen, A.Y. and Yu, T.Y. "Network based temporary facility location for the emergency medical services considering the disaster induced demand and the transportation infrastructure in disaster response", *Transportation Research Part B: Methodological*, **91**, pp. 408-423 (2016).

16. Mohamadi, A. and Yaghoubi, S. "A bi-objective stochastic model for emergency medical services network design with backup services for disasters under disruptions: An earthquake case study", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **23**, pp. 204-217 (2017).

17. Namdar, J., Li, X., Sawhney, R. and et al. "Supply chain resilience for single and multiple sourcing in the presence of disruption risks", *International Journal of Production Research*, **56**(6), pp. 2339-2360 (2018).

18. Madani, S.R., Nookabadi, A.S. and Hejazi, S.R. "A bi-objective, reliable single allocation p-hub maximal covering location problem: Mathematical formulation and solution approach", *Journal of Air Transport Management*, **68**, pp. 118-136 (2018).

19. Asadi, M., Shafia, M.A. and Yaghoubi, S. "A disaster facilities location-allocation model considering reliability under uncertainty and dynamic demand (Case study: Earthquake disaster in Tehran)", *Modern Research in Decision Making*, **3**(1), pp. 1-28 (In Persian) (1396/2018).

20. Rahmani, D., Zandi, A., Peyghaleh, E. and et al. "A robust model for a humanitarian relief network with backup covering under disruptions: A real world application", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **28**, pp. 56-68 (2018).

21. Torkestani, S.S., Seyedhosseini, S.M., Makui, A. and et al. "The reliable design of a hierarchical multi-modes transportation hub location problems (HMMTHLP) under dynamic network disruption (DND)", *Computers & Industrial Engineering*, **122**, pp. 39-86 (2018).

22. Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B. and Sabouhi, F. "Resilient and sustainable supply chain design: Sustainability analysis under disruption risks", *International Journal of Production Research*, **56**(17), pp. 5945-5968 (2018).

23. Karatas, M. and Yakıcı, E. "An analysis of p-median location problem: Effects of backup service level and demand assignment policy", *European Journal of Operational Research*, **272**(1), pp. 207-218 (2019).

24. Ghasemi, P., Khalili-Damghani, K., Hafezalkotob, A. and et al. "Uncertain multi-objective multi-commodity multi-period multi-vehicle location-allocation model for earthquake evacuation planning", *Applied Mathematics and Computation*, **350**, pp. 105-132 (2019).

25. Yu, W. and Liu, J. "Optimization Model Based on Reachability Guarantee for Emergency Facility Location and Link Reinforcement", *Journal of Advanced Transportation*, pp. 1–12 (2020). DOI:10.1155/2020/4648908.

26. Yeh, C.H. and Chen, Y.R. "Location model analysis of flood relief facilities: A case study of the Fazih River floodplain, Taiwan", *Natural Hazards*, **103**, pp. 317-327 (2020).

27. Asadpour, M., Boyer, O. and Tavakkoli-Moghaddam, R. "A blood supply chain network with backup facilities considering blood groups and expiration date: A real-world application", *International Journal of Engineering*, **34**(2), pp. 470-479 (2021).

28. http://www.ghommet.ir/