

## طراحی شبکه زنجیره امداد چندهدفه برای پاسخگویی به زلزله تحت عدم اطمینان

علی بزرگی امیری\*، سهیل منصوری\*\*، میرسامان پیشوایی\*\*\*

### چکیده

امروزه به دلیل رشد جمعیت، خسارت‌های مالی و جانی جبران‌ناپذیری ناشی از بروز بحران‌های طبیعی و غیرطبیعی در سراسر جهان گریبان‌گیر بشر شده است. لجستیک امداد بشردوستانه به عنوان یک فعالیت مهم مدیریت بحران، می‌تواند در نجات جان افراد، انتقال آسیب دیده‌گان به مراکز اورژانسی، تخلیه بی‌خانمان‌ها از ناحیه حادثه‌دیده و برآورده کردن نیاز افراد در شرایط بحران، نقش کلیدی ایفا کند. در این پژوهش یک مدل ریاضی چندهدفه برای مسئله طراحی زنجیره امداد تحت شرایط عدم قطعیت برای پاسخ به نیاز زلزله پیشنهاد داده شده است که در آن اهداف حداقل کردن مجموع تعداد افراد مجروحی که به بیمارستان‌ها منتقل نشده‌اند و مجموع تعداد افراد بی‌خانمانی که از ناحیه حادثه‌دیده تخلیه نشده‌اند و به حداقل رساندن مجموع تقاضاهای برآورده نشده کالاهای امدادی است. در این مدل، پارامترهای تقاضا و زمان سفر غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند و برای مدلسازی عدم قطعیت از بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه عدم قطعیت جعبه‌ای و چندوجهی استفاده شده است. نتایج حل مدل‌های استوار و قطعی نشان می‌دهند که در تمامی سطوح محافظه‌کاری جواب‌های پارتویی قوی تولید شده است؛ همچنین مدل استوار در تمامی سطوح محافظه‌کاری از مدل قطعی در حل با داده‌های اسمی بدتر شده است.

**کلیدواژه‌ها:** مدیریت فجایع؛ فاز پاسخگویی؛ طراحی شبکه زنجیره امداد بشردوستانه؛ بهینه‌سازی استوار.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۱۷، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۱۷.

\* استادیار، دانشگاه تهران

E-mail: alibozorgi@ut.ac.ir

\*\* کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

\*\*\* استادیار، دانشگاه علم و صنعت ایران.

## ۱. مقدمه

سالانه خسارت‌های مالی و جانی فراوانی ناشی از بلایای طبیعی و غیرطبیعی، همچون زلزله، حمله‌های تروریستی، سیل و سونامی در سراسر جهان گریبان‌گیر بشر می‌شود [۱]. در سال‌های اخیر توجه زیادی به بحران شده است [۲۵]؛ اما با توجه به پیشرفت علم و فناوری، بشر هنوز قادر به پیش‌بینی و جلوگیری از این حوادث نیست [۳]. زمانی که یک بحران رخ می‌دهد، توزیع سریع منابع برای حداقل کردن خسارت و تلفات ضروری است. با توجه به زمان و منابع محدود، لجستیک امداد در مورد تخصیص زمان، بودجه و دیگر منابع تصمیم‌گیری می‌کند [۲۴]. هدف اصلی لجستیک امداد فراهم کردن پناه‌گاه، کمک به قربانیان و حادثه‌دیدگان بحران در زودترین زمان ممکن است [۱۷]. پناه‌گاه‌ها و بیمارستان‌ها بعد از وقوع بحران بهترین مکان‌ها برای مراقبت از مصدومان و افراد بی‌خانمان حادثه‌دیده برای محفوظ ماندن از ویروس، سرما و غیره است؛ از این رو انتقال هدفمند افراد حادثه‌دیده به این مکان‌ها می‌تواند خسارت‌های جانی را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. به دلیل عدم قطعیت و غیرقابل پیش‌بینی بودن بحران‌های طبیعی، قابلیت انعطاف‌پذیری در فعالیت‌های لجستیکی اهمیت بسیار زیادی یافته است. هنگام بحران در نظر-گرفتن جنبه‌های از قبیل عدم قطعیت در تقاضا، ظرفیت تسهیلات استفاده‌شده در فرآیند توزیع، ظرفیت حمل‌ونقل و مقدار منابع در دسترس برای تصمیم‌گیرنده مهم است [۱۹]. می‌توان گفت که همیشه بحران با عدم قطعیت همراه بوده است. در مواقع بحران اطلاعات کافی در مورد شدت حادثه و خسارت واردشده، قبل از وقوع بحران در دست نیست. در این شرایط بهینه‌سازی استوار، به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی عدم قطعیت، عملکرد مناسبی از خود نشان داده است. با توجه به توضیحات بالا در این مقاله، یک مدل امداد و نجات دوهدفه، چنددوره‌ای و چندکالایی ارائه شده است. این مدل به دنبال تخلیه افراد از ناحیه حادثه‌دیده به پناهگاه، انتقال افراد مجروح به بیمارستان و توزیع کالاهای امدادی در ناحیه حادثه‌دیده، بیمارستان و پناهگاه است.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مطالعات انجام‌شده در زمینه زنجیره تأمین امداد را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: دسته نخست از پژوهش‌ها به موضوع تخلیه افراد پرداخته‌اند و دسته دوم به مسئله لجستیک کالاهای امدادی توجه کرده‌اند؛ بنابراین تفاوت اصلی این دو دسته، انسان و کالاهای امدادی است.

**عملیات تخلیه.** آن و همکاران (۲۰۱۳)، مقاله‌ای باعنوان «مکانیابی تسهیلات حمل‌ونقل تخلیه تحت شرایط خرابی تسهیلات»، به‌منظور برنامه‌ریزی تخلیه حجم انبوهی از افراد که در نقاط حادثه‌خیز ساکن هستند، ارائه کردند. هدف حداقل کردن هزینه احداث تسهیلات، هزینه انتقال و هزینه استفاده از تسهیلات حمل است. گان (۲۰۱۴)، مدلی برای مکانیابی تسهیلات اضطراری برای نجات افراد در ناحیه حادثه‌خیز ارائه داد. هدف اصلی مدل، حداقل کردن میانگین هزینه‌های احداث و هزینه سفر است. زمان سفر بین مراکز توزیع و نقاط تقاضا غیرقطعی در نظر گرفته شده است. کول شرس‌تها و همکاران (۲۰۱۴)، مدلی برای مکانیابی تسهیلات تخلیه و تخصیص اتوبوس برای تخلیه تحت عدم قطعیت تقاضا پیشنهاد دادند. هدف حداقل کردن کل زمان حمل بود و تقاضا غیرقطعی فرض شد. گاما و همکاران (۲۰۱۵)، یک مدل چنددوره‌ای مکانیابی تخصیص پناه‌گاه‌ها، برای تخلیه افراد در هنگام سیل و طوفان پیشنهاد دادند. هدف حداقل کردن کل مصافت حمل برای تخلیه افراد است و برای حل مدل از روش ابتکاری بهره گرفتند.

**توزیع و تحویل کالاهای امدادی.** دوین و همکاران (۲۰۱۲)، یک مدل تصادفی دوسطحی برای مکانیابی تسهیلات لجستیک بشردوستانه توسعه دادند. هدف حداقل کردن هزینه‌ها است. هزینه ثابت احداث، هزینه حمل، ظرفیت انبارهای ناحیه‌ای، تقاضا و زمان حمل غیرقطعی در نظر گرفته شده است. بزرگی و همکاران (۲۰۱۳)، یک مدل چندهدفه استوار برای برنامه‌ریزی لجستیک امداد تحت شرایط عدم قطعیت ارائه کردند که در آن، هدف نخست به دنبال حداقل کردن هزینه‌های کل و هدف دوم به دنبال برقراری عدالت در توزیع کالاهای امدادی است. پارامترهایی همچون تقاضا، هزینه‌های انتقال و هزینه‌های تأمین غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند. جونیور و همکاران (۲۰۱۳)، مدلی باعنوان «استفاده از بهینه‌سازی احتمالی برای تصمیمات آماده‌سازی قبل حادثه در برزیل» توسعه دادند. هدف حداقل کردن هزینه‌ها بود. هزینه‌های حمل، تقاضا و حداقل تقاضایی که باید پاسخ داده شود، غیرقطعی شده است. گنسانس و همکاران (۲۰۱۳)، مدلی باعنوان «بهینه‌سازی احتمالی برای زنجیره تأمین بشردوستانه و برنامه‌ریزی توزیع تحت حوادث طوفان جهانی» ارائه دادند که هدف، حداقل کردن هزینه‌های حمل‌ونقل و خرید کالا بود. رضائی ملک و توکلی مقدم (۲۰۱۴)، به توسعه یک مدل بهینه‌سازی استوار برای برنامه‌ریزی لجستیک امداد با دو هدف حداقل کردن زمان خدمت و حداقل کردن هزینه‌ها پرداختند. زمان حمل کالا از انبارها به نقاط تقاضا، تقاضا و مقدار ظرفیت باقی‌مانده انبارها غیرقطعی فرض شد. گواردیو و همکاران (۲۰۱۵)، مدلی برای برنامه‌ریزی اضطراری طوفان و سیل با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی توسعه دادند. هدف حداقل کردن هزینه‌های حمل و موجودی

بود. تقاضا غیرقطعی در نظر گرفته شده است. ذکائی و همکاران (۲۰۱۶)، یک مدل بهینه‌سازی استوار برای طراحی زنجیره بشردوستانه ارائه دادند. این زنجیره شامل سه سطح تأمین‌کنندگان، مراکز توزیع و ناحیه‌حادثه‌دیده است و هدف حداقل‌سازی هزینه کل می‌باشد.

مطالعاتی که در چند سال اخیر در زنجیره امداد و نجات انجام شده‌اند، به‌ندرت به تخلیه مجروحان و افراد سالم و نیز توزیع کالاهای امدادی به این دوگروه به‌طور همزمان توجه کرده‌اند. زمانی که زلزله‌ای رخ دهد، ممکن است بخشی عمده‌ای از افراد آسیب دیده باشند. این افراد نیاز به کالاهای امدادی دارند و یا اینکه برای مداوای بیشتر باید به مراکز درمانی و اورژانس فرستاده شوند؛ همچنین ممکن است بخشی از افراد در موج اول زلزله سالم مانده باشند که برای درمان‌نگه‌داشتن این افراد از موج‌های بعدی زلزله بهتر است این افراد به پناه‌گاه‌ها فرستاده شوند؛ بنابراین نیاز به برنامه‌ریزی که به‌طور توأم به انتقال افراد و توزیع کالاهای امدادی بپردازد، بیشتر احساس می‌شود.

در بیشتر مطالعات انجام‌شده در حوزه مدل‌سازی، عدم‌قطعیت در بلایا و حوادث، برای مقابله با عدم‌قطعیت از برنامه‌ریزی سناریومحور استفاده شده است؛ در صورتی که در دنیای واقعی داده‌های تاریخی مناسبی در دست نیست که سناریوها بر اساس آن تعریف شود و همچنین تابع توزیع پارامتر تصادفی نامعلوم هستند [۴]. علاوه بر آن در رویکرد سناریومحور، عدم‌قطعیت پارامترها به‌صورت گسسته در نظر گرفته می‌شود؛ اما در واقعیت عدم‌قطعیت داده‌ها به‌صورت پیوسته هستند. از دیگر نقاط ضعف رویکرد سناریومحور می‌توان به چالش تعریف و تولید سناریوها اشاره کرد [۶]؛ از طرفی جواب به‌دست آمده تحت این شرایط ممکن است برای سایر مشاهدات و سناریوهای دیگر نشدنی شود [۴]. با فرض تولید سناریوهای مختلف، مشکل بعدی بحث حل چنین مسائلی است که با بزرگ‌شدن تعداد سناریوها و اندازه مسئله، زمان حل با چالش جدی مواجه خواهد بود [۷]. بنابراین دلیل انتخاب رویکرد استوار، توسعه یک مدل ریاضی جدید مبتنی بر فرضیه‌ها و شرایط دنیای واقعی است. برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت، سناریوها بر اساس یک نمونه مشاهده شده مدل‌سازی می‌شوند.

آنچه این پژوهش را از سایر پژوهش‌های مشابه متمایز می‌سازد، توجه به توزیع کالاهای امدادی و انتقال افراد مجروح به بیمارستان‌ها و تخلیه افراد بی‌خانمان به پناه‌گاه‌ها به‌صورت یکپارچه است؛ همچنین برنامه‌ریزی به‌صورت چنددوره‌ای است و برنامه‌ریزی وسیله‌های حمل نیز در نظر گرفته شده است؛ به‌علاوه برای نزدیکی هرچه بیشتر به دنیای واقعی، برای مواجهه با عدم‌قطعیت از بهینه‌سازی استوار بهره گرفته شده است.

### ۳. روش شناسی پژوهش

در این بخش ابتدا مدل سازی پایه‌ای بهینه‌سازی استوار و در ادامه مدل استوار پیشنهادی ارائه خواهد شد.

**بهینه‌سازی استوار.** مدل بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه عدم قطعیت جعبه‌ای و چندوجهی نخستین بار توسط برتسیماس و سیم (۲۰۰۰)، معرفی شد. در این مدل فرض می‌شود بخشی از داده‌های تصادفی تحت تأثیر عدم قطعیت هستند. مدل غیرقطعی زیر را در نظر بگیرید:

$$RO: \min z = \sum_j c_j x_j$$

St.

$$\sum_j \tilde{a}_{ij} x_j \leq b_i$$

که در آن پارامتر تصادفی  $(\tilde{a}_{ij})$ ، در بازه  $[\hat{a}_{ij} - \bar{a}_{ij}, \hat{a}_{ij} + \bar{a}_{ij}]$  مقدار می‌گیرند.  $(\bar{a}_{ij})$  مقدار اسمی پارامتر تصادفی و  $(\hat{a}_{ij})$  حداکثر انحراف از داده‌های اسمی است. همتای استوار مدل بالا به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\min z = \sum_j c_j x_j$$

s.t

$$\sum_j \bar{a}_{ij} x_j + \max_{\{s_i \cup \{t_i\} | s_i \subseteq J_i, |s_i| = [\Gamma_i], t_i \in J_i \setminus s_i\}} \{ \sum_{j \in s_i} \hat{a}_{ij} |x_j| + (\Gamma_i - [ \Gamma_i ] ) \hat{a}_{it_i} |x_{it_i}| \} \leq b_i$$

در محدودیت بالا  $J_i$ ، برابر با تعداد کل پارامتر غیرقطعی در محدودیت  $\Gamma_i$ ، بودجه استواری عدم قطعیت است.

برای تبدیل مسئله بالا به بهینه‌سازی منفرد، تابع محافظت  $\beta(x, \Gamma_i)$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta(x, \Gamma_i) = \max_{\{s_i \cup \{t_i\} | s_i \subseteq J_i, |s_i| = [\Gamma_i], t_i \in J_i \setminus s_i\}} \{ \sum_{j \in s_i} \hat{a}_{ij} |x_j| + (\Gamma_i - [ \Gamma_i ] ) \hat{a}_{it_i} |x_{it_i}| \}$$

معادل مسئله بهینه‌سازی تابع محافظت را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\text{Max } \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} z_{ij} |x_j|$$

St.

$$\sum_j z_{ij} \leq \Gamma_i$$

$$0 \leq z_{ij} \leq 1$$

دوگان مسئله بالا به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \Gamma_i p_i + \sum_{j \in J_i} q_{ij} \\ \text{St. } & \\ & p_i + q_{ij} \geq \hat{a}_{ij} |x_j| \quad \forall i \in I, j \in J_i \\ & p_i, q_{ij} \geq 0 \end{aligned}$$

$p_i$  و  $q_{ij}$  متغیرهای دوگان هستند. نهایت هم‌تای استوار مسئله به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{min } z = & \sum_j c_j x_j \\ \text{St. } & \\ & \sum_j a_{ij} x_j + \Gamma_i p_i + \sum_{j \in J_i} q_{ij} \leq b_i \\ & p_i + q_{ij} \geq \hat{a}_{ij} u_j \\ & -u_j \leq x_j \leq u_j \\ & p_i, q_{ij}, u_j \geq 0 \end{aligned}$$

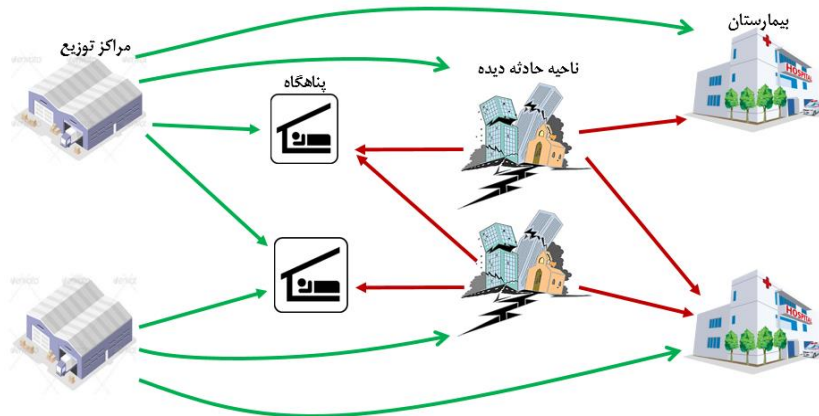
حداکثر احتمال نقض محدودیت غیرقطعی مدل (RO) به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\Pr(\sum_j \tilde{a}_{ij} x_j^* \geq b_i) \leq 1 - \Phi\left(\frac{\Gamma_i - 1}{\sqrt{J_i}}\right)$$

که  $\Phi\left(\frac{\Gamma_i - 1}{\sqrt{J_i}}\right)$  مقدار احتمال تجمعی تابع توزیع نرمال است.

**شرح مسئله.** زمانی که موج نخست زلزله رخ می‌دهد، ممکن است موج‌های بعدی زلزله پی‌درپی نیز رخ دهند. اگر به بناها و ساختمان‌ها در موج نخست زلزله آسیب چندانی وارد نشوند، ممکن است در موج‌های بعدی زلزله به طور کامل تخریب شوند؛ بنابراین پس از وقوع زلزله، تخلیه افراد از این مکان اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. در این میان ممکن است افرادی آسیب دیده باشند. این افراد باید برای احیا و مداوا به مجموعه بیمارستان‌ها و مراکز اورژانس انتقال پیدا کنند. مجموعه پناه‌گاه‌ها برای تخلیه افراد در نظر گرفته شده است تا افراد سالم به پناه‌گاه‌ها منتقل شوند. زمانی که حادثه رخ دهد، افرادی که در حوادث سالم مانده‌اند و همچنین افرادی که به بیمارستان و پناه‌گاه انتقال یافته‌اند به کالاهای امدادی نیاز دارند (شئو و همکاران ۲۰۱۵). مجموعه مراکز توزیع با ظرفیت متفاوتی وجود دارند که به منظور ارسال کالاهای امدادی به ناحیه حادثه‌دیده، بیمارستان‌ها و پناه‌گاه‌ها، مکانیابی می‌شوند؛ بنابراین زنجیره امداد بشردوستانه شامل

چهار سطح است: ۱. مجموعه نقاط حادثه‌دیده؛ ۲. مجموعه بیمارستان‌ها و مراکز اورژانسی؛ ۳. مجموعه پناه‌گاه‌ها و ۴. مجموعه مراکز توزیع کالاهای امدادی (شکل ۱).



شکل ۱. ساختار شبکه امداد و نجات

در این شبکه، مجموعه نقاط حادثه‌خیز با مجموعه (i)، نشان داده می‌شوند. در این نقاط ممکن است میزان جراحت و صدمات متفاوت باشد. مجموعه (h) نشان‌دهنده نوع آسیب و جراحت است. چندین نوع کالاهای امدادی توزیع می‌شود که جریان توزیع کالا و انتقال افراد در شکل ۱، نشان داده شده است. نوع کالاهای امدادی با مجموعه (k)، نشان داده می‌شوند. مجموعه بیمارستان‌ها و پناه‌گاه‌ها نیز به ترتیب (s) و (p)، نامیده می‌شوند. مجموعه مراکز توزیع با نماد (j) و مجموعه ظرفیت مراکز توزیع با نماد (l)، نشان داده می‌شوند. دیگر مفروضات اصلی مسئله به شرح زیر هستند:

- افق برنامه‌ریزی چنددوره‌ای است؛

- ظرفیت مراکز توزیع، بیمارستان‌ها و پناه‌گاه‌ها محدود است؛

- مراکز توزیع را می‌توان در یکی از سه سطح بزرگ، متوسط و کوچک راه‌اندازی کرد؛

- سه نوع کالاهای امدادی (آب آشامیدنی، مواد غذایی و دارویی) توزیع می‌شود؛

- بودجه برنامه‌ریزی برای راه‌اندازی مراکز توزیع و پناه‌گاه‌ها محدود است؛

- تعداد افراد مجروح نقاط حادثه‌دیده، تعداد افراد بی‌خانمان نقاط حادثه‌دیده، تقاضای کالاهای امدادی، زمان حمل وسیله نقلیه از مراکز توزیع به نقاط حادثه‌دیده، بیمارستان‌ها و پناه‌گاه‌ها و زمان حمل وسیله نقلیه از نقاط حادثه‌دیده به بیمارستان‌ها و پناه‌گاه‌ها غیرقطعی در نظر گرفته شده است.

- به دلیل غیرمحمتمل بودن رخداد بدترین حالت ممکن در مواجهه با عدم قطعیت از مدل‌های استوار مبتنی بر مجموعه‌های عدم قطعیت جعبه‌ای و چندوجهی بهره گرفته شده است؛  
 - زمان خدمت نباید از یک مقدار مشخصی بیشتر شود؛  
 - چندین نوع وسیله حمل موجود است که تعداد وسیله‌های حمل و همچنین ظرفیت هر یک از وسیله‌ها محدود است؛  
 - تمامی وسیله‌های حمل قادر به حمل افراد مجروح، افراد بی‌خانمان و کالاهای امدادی هستند؛  
 - هر وسیله حمل در هر بار سفر می‌تواند یکی از موارد افراد مجروح، افراد بی‌خانمان و یا کالاهای امدادی را حمل کند؛  
 - برنامه‌ریزی دوهدفه است. هدف نخست به دنبال حداقل کردن مجموع تعداد افراد مجروح و بی‌خانمان منتقل نشده به بیمارستان‌ها و پناه‌گاه‌ها است و هدف دوم به دنبال حداقل کردن مجموع مقدار کمبود کالاهای امدادی در مراکز مورد نیاز است.

### مدل استوار پیشنهادی

#### اندیس‌ها و مجموعه‌ها

$t=\{1,2,3,\dots,T\}$	$t$ : مجموعه افق برنامه‌ریزی
$i=\{1,2,3,\dots,I\}$	$i$ : مجموعه نقاط حادثه‌دیده
$j=\{1,2,3,\dots,J\}$	$j$ : مجموعه مکان‌های کاندید برای راه‌اندازی مراکز توزیع
$p=\{1,2,3,\dots,P\}$	$p$ : مجموعه مکان‌های کاندید برای راه‌اندازی پناه‌گاه‌ها
$k=\{1,2,3,\dots,K\}$	$k$ : مجموعه کالاهای امدادی
$l=\{1,2,3,\dots,L\}$	$l$ : مجموعه ظرفیت مراکز توزیع
$v=\{1,2,3,\dots,V\}$	$v$ : مجموعه وسیله‌های حمل
$h=\{1,2,3,\dots,H\}$	$h$ : مجموعه نوع صدمات و جراحت

#### پارامترها

$f_p$	: هزینه ثابت راه‌اندازی پناه‌گاه در نقطه $p$
$f_{jl}$	: هزینه ثابت راه‌اندازی مراکز توزیع با ظرفیت $l$ در مکان $j$
$d_{hi}$	: تعداد افراد مجروح نوع $h$ در ناحیه حادثه‌دیده $i$
$dh_i$	: تعداد افراد موجود در ناحیه $i$ که باید تخلیه شوند.
$dk_{kit}$	: مقدار تقاضا برای کالای امدادی نوع $k$ در ناحیه حادثه‌دیده $i$ در دوره $t$
$ds_{kst}$	: تقاضا برای کالای امدادی نوع $k$ در بیمارستان $s$ در دوره $t$



- $Ci_s$ : ظرفیت بیمارستان  $s$  برای افراد مجروح  
 $CW_v$ : ظرفیت وزنی وسیله حمل نوع  $v$   
 $Cv_v$ : ظرفیت حجمی وسیله حمل نوع  $v$   
 $Civ_v$ : ظرفیت وسیله حمل نوع  $v$  برای حمل مجروح  
 $Ch_v$ : ظرفیت وسیله حمل نوع  $v$  برای تخلیه افراد بی‌خانمان  
 $Cap_l$ : ظرفیت مرکز توزیع با سطح  $l$   
 $Cps_p$ : ظرفیت پناه‌گاه  $p$   
 $dt_{vis}$ : زمان سفر وسیله  $v$  بین ناحیه حادثه‌دیده  $i$  و بیمارستان  $s$   
 $dt_{vip}$ : زمان سفر وسیله  $v$  بین ناحیه حادثه‌دیده  $i$  و پناه‌گاه  $p$   
 $dt_{vjs}$ : زمان سفر وسیله  $v$  بین مرکز توزیع  $j$  و بیمارستان  $s$   
 $dt_{vjp}$ : زمان سفر وسیله  $v$  بین مرکز توزیع  $j$  و پناه‌گاه  $p$   
 $dt_{vji}$ : زمان سفر وسیله  $v$  بین مرکز توزیع  $j$  و ناحیه حادثه‌دیده  $i$   
 $Wt_k$ : وزن یک واحد کالای نوع  $k$   
 $Vl_k$ : حجم یک واحد کالای نوع  $k$   
 $nk_k$ : مقدار کالای مورد نیاز نوع  $k$  به ازای هر نفر که به پناه‌گاه منتقل می‌شود.  
 $A_{jv}$ : تعداد وسیله حمل نوع  $v$  که در مرکز توزیع  $j$  موجود است.  
 $B_{iv}$ : تعداد وسیله حمل نوع  $v$  که در ابتدای افق برنامه‌ریزی در ناحیه حادثه‌دیده  $i$  موجود است.  
 $B_0$ : حداکثر بودجه در دسترس  
 $tc$ : زمان پوشش  
 $M_{big}$ : یک عدد مثبت خیلی بزرگ

### متغیرهای تصمیم

- $y_p$ : متغیر صفر-یک برای راه‌اندازی پناه‌گاه در مکان  $p$   
 $y_{li}$ : متغیر صفر-یک برای راه‌اندازی مراکز توزیع با ظرفیت  $l$  در مکان  $j$   
 $x_{kfst}$ : تعداد کالای امدادی نوع  $k$  از مرکز توزیع  $j$  به بیمارستان  $s$  در دوره  $t$  ارسال می‌شود.  
 $x_{kjpt}$ : تعداد کالای امدادی نوع  $k$  از مرکز توزیع  $j$  به پناه‌گاه  $p$  در دوره  $t$  ارسال می‌شود.  
 $x_{kjit}$ : تعداد کالای امدادی نوع  $k$  از مرکز توزیع  $j$  به ناحیه حادثه‌دیده  $i$  در دوره  $t$  ارسال می‌شود.  
 $Ni_{hist}$ : تعداد افراد مجروح نوع  $h$  که از ناحیه حادثه‌دیده  $i$  در دوره  $t$  به بیمارستان  $s$  ارسال می‌شود.

$Nh_{ipt}$ : تعداد افرادی که از ناحیه حادثه‌دیده  $i$  در دوره  $t$  به پناه‌گاه  $p$  ارسال می‌شود.  
 $Nvh_{ipvt}$ : تعداد وسیله حمل نوع  $v$  که از ناحیه حادثه‌دیده  $i$  به پناه‌گاه  $p$  در دوره  $t$  ارسال می‌شود.

$Nvi_{isvt}$ : تعداد وسیله حمل نوع  $v$  که از ناحیه حادثه‌دیده  $i$  به بیمارستان  $s$  در دوره  $t$  ارسال می‌شود.

$Nvk_{jpv}$ : تعداد وسیله حمل نوع  $v$  که از مرکز توزیع  $j$  به پناه‌گاه  $p$  در دوره  $t$  ارسال می‌شود.  
 $Nvj_{jivt}$ : تعداد وسیله حمل نوع  $v$  که از مرکز توزیع  $j$  به ناحیه حادثه‌دیده  $i$  در دوره  $t$  ارسال می‌شود.

$Nvjs_{jst}$ : تعداد وسیله حمل نوع  $v$  که از مرکز توزیع  $j$  به بیمارستان  $s$  در دوره  $t$  ارسال می‌شود.

$dv_{kpt}$ : تقاضا برای کالای امدادی نوع  $k$  در دوره  $t$  در پناه‌گاه  $p$   
 $av_{ivt}$ : تعداد وسیله حمل نوع  $v$  در دوره  $t$  در ناحیه حادثه‌دیده  $i$  موجود است.

### تابع هدف و محدودیت‌ها

$$\text{Min } z1 = \sum_h \sum_i (\bar{d}_{t_{hi}} - \sum_s \sum_t Ni_{hist}) + \sum_{h \in H_0} \sum_{i \in I_0} q_{hi}^{di} + p_o^{di} \Gamma_o^{di} + \sum_s (\bar{d}h_i - \sum_p \sum_t Nh_{ipt}) + \sum_{i \in I_0} q_i^{dh} + p_o^{dh} \Gamma_o^{dh} \quad (1)$$

$$\text{Min } z2 = \sum_k \sum_i \sum_t (\bar{d}k_{kit} - \sum_j x_{kjit}) + \sum_{k \in K_0} \sum_{i \in I_0} \sum_{t \in T_t} q_{kit}^{dk} + p_o^{dk} \Gamma_o^{dk} + \sum_k \sum_s \sum_t (\bar{d}s_{kst} - \sum_j x_{kjst}) + \sum_{k \in K_0} \sum_{s \in S_0} \sum_{t \in T_0} q_{kst}^{ds} + p_o^{ds} \Gamma_o^{ds} + \sum_k \sum_p \sum_t (dv_{kpt} - \sum_j x_{kjpt}) \quad (2)$$

S.t.

$$\sum_p f_p y_p + \sum_j \sum_l f_{jl} y_{jl} \leq B_0 \quad (3)$$

$$\sum_l y_{lj} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_t Nh_{ipt} \leq Cps_p \cdot y_p \quad \forall p \in P \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_t \sum_h Ni_{hist} \leq Ci_s \quad \forall s \in S \quad (6)$$

$$\sum_i N h_{ipt} n k_k = d v_{kpt} \quad \forall k \in K, p \in P, t \in T \quad (۷)$$

$$\sum_k \sum_p \sum_t x_{kjpt} + \sum_k \sum_s \sum_t x_{kfst} + \sum_k \sum_i \sum_t x_{kjit} \leq \sum_l Cap_l \cdot y_{jl} \quad \forall j \in J \quad (۸)$$

$$\sum_P \sum_t N h_{ipt} \leq \bar{d} h_i - \Gamma_i^{dh} \widehat{d} h_i \quad \forall i \in I \quad (۹)$$

$$\sum_S \sum_t N i_{hist} \leq \bar{d} i_{hi} - \Gamma_{hi}^{dh} \widehat{d} i_{hi} \quad \forall h \in H, i \in I \quad (۱۰)$$

$$\sum_j x_{kjit} \leq \bar{d} k_{kit} - \Gamma_{kit}^{dk} \widehat{d} k_{kit} \quad \forall k \in K, i \in I, t \in T \quad (۱۱)$$

$$\sum_j x_{kfst} \leq \bar{d} s_{kst} + \Gamma_{kst}^{ds} \widehat{d} s_{kst} \quad \forall k \in K, s \in S, t \in T \quad (۱۲)$$

$$\sum_j x_{kjpt} \leq d v_{kpt} \quad \forall k \in K, p \in P, t \in T \quad (۱۳)$$

$$\sum_k w t_k x_{kjpt} \leq \sum_v C w_v \cdot N v k_{jpv} \quad \forall j \in J, p \in P, t \in T \quad (۱۴)$$

$$\sum_k V l_k x_{kjpt} \leq \sum_v C v_v \cdot N v k_{jpv} \quad \forall j \in J, p \in P, t \in T \quad (۱۵)$$

$$\sum_k w t_k x_{kfst} \leq \sum_v C w_v \cdot N v j s_{jst} \quad \forall j \in J, s \in S, t \in T \quad (۱۶)$$

$$\sum_k V l_k \cdot x_{kfst} \leq \sum_v C v_v \cdot N v j s_{jst} \quad \forall j \in J, s \in S, t \in T \quad (۱۷)$$

$$\sum_k w t_k x_{kjit} \leq \sum_v C w_v \cdot N v j i_{jiv} \quad \forall j \in J, i \in I, t \in T \quad (۱۸)$$

$$\sum_k V l_k x_{kjit} \leq \sum_v C v_v \cdot N v j i_{jiv} \quad \forall j \in J, i \in I, t \in T \quad (۱۹)$$

$$\sum_h N i_{hist} \leq \sum_v C i v_v \cdot N v i_{isv} \quad \forall i \in I, s \in S, t \in T \quad (۲۰)$$

$$N h_{ipt} \leq \sum_v C h v_v \cdot N v h_{ipv} \quad \forall i \in I, p \in P, t \in T \quad (۲۱)$$

$$N v k_{jpv} \leq M_{big} y_p \quad \forall j \in J, p \in P, v \in V, t \in T \quad (۲۲)$$

$$Nvk_{jpvt} \leq \sum_l M_{big} y_{jl} \quad \forall j \in J, p \in P, v \in V, t \in T \quad (23)$$

$$Nvji_{jivt} \leq \sum_l M_{big} y_{jl} \quad \forall j \in J, i \in I, v \in V, t \in T \quad (24)$$

$$Nvjs_{jsvt} \leq \sum_l M_{big} y_{jl} \quad \forall j \in J, p \in P, v \in V, t \in T \quad (25)$$

$$\frac{\overline{dt}_{vis}}{T} Nvi_{isvt} + q_{vis}^{tvis} + P_{vis}^{tvis} \Gamma_{vis}^{tvis} \leq tc \quad \forall i \in I, s \in S, v \in V, t \in T \quad (26)$$

$$\frac{\overline{dt}_{vip}}{T} Nvh_{ipvt} + q_{vip}^{tvip} + P_{vip}^{tvip} \Gamma_{vip}^{tvip} \leq tc \quad \forall i \in I, s \in S, v \in V, t \in T \quad (27)$$

$$\frac{\overline{dt}_{vjp}}{T} Nvk_{jpvt} + q_{vjp}^{tvjp} + P_{vjp}^{tvjp} \Gamma_{vjp}^{tvjp} \leq tc \quad \forall j \in J, s \in S, v \in V, t \in T \quad (28)$$

$$\frac{\overline{dt}_{vjp}}{T} Nvk_{jpvt} + q_{vjp}^{tvjp} + P_{vjp}^{tvjp} \Gamma_{vjp}^{tvjp} \leq tc \quad \forall j \in J, p \in P, v \in V, t \in T \quad (29)$$

$$\frac{\overline{dt}_{vji}}{T} Nvji_{jivt} + q_{vji}^{tvji} + P_{vji}^{tvji} \Gamma_{vji}^{tvji} \leq tc \quad \forall j \in J, i \in I, v \in V, t \in T \quad (30)$$

$$\sum_p \sum_t Nvk_{jpvt} + \sum_i \sum_t Nvji_{jivt} + \sum_s \sum_t Nvjs_{jsvt} \leq A_{jv} \quad \forall j \in J, v \in V \quad (31)$$

$$av_{ivt} = av_{ivt-1} + \sum_j Nvji_{jivt} - \sum_p Nvh_{ipvt} - \sum_s Nvi_{jsvt} \quad \forall i \in I, v \in V, t \in T \quad (32)$$

$$av_{iv0} = B_{iv} \quad \forall i \in I, v \in V \quad (33)$$

$$q_{hi}^{di} + P_o^{di} \geq \widehat{d}_{hi} \quad \forall h \in H, i \in I \quad (34)$$

$$q_i^{dh} + P_o^{dh} \geq \widehat{d}_{hi} \quad \forall i \in I \quad (35)$$

$$q_{kit}^{dk} + P_o^{dk} \geq \widehat{d}_{kit} \quad \forall k \in K, i \in I, t \in T \quad (36)$$

$$q_{kst}^{ds} + P_o^{ds} \geq \widehat{d}_{kst} \quad \forall k \in K, s \in S, t \in T \quad (37)$$

$$q_{vis}^{tvis} + P_{vis}^{tvis} \geq \widehat{dt}_{vis} Nvi_{isvt} \quad \forall v \in V, i \in I, s \in S, t \in T \quad (38)$$

$$q_{vip}^{tvip} + P_{vip}^{tvip} \geq \widehat{dt}_{vip} Nvh_{ipvt} \quad \forall i \in I, p \in P, v \in V, t \in T \quad (39)$$

$$q_{vjs}^{tvjs} + P_{vjs}^{tvjs} \geq \widehat{dt}_{vjs} Nvjs_{jsvt} \quad \forall j \in J, s \in S, v \in V, t \in T \quad (40)$$

$$q_{vjp}^{tvjp} + P_{vjp}^{tvjp} \geq \widehat{dt}_{vjp} Nvk_{jpvt} \quad \forall j \in J, p \in P, v \in V, t \in T \quad (41)$$

$$q_{vji}^{tvji} + P_{vji}^{tvji} \geq \widehat{dt}_{vji} Nvji_{jivt} \quad \forall j \in J, i \in I, v \in V, t \in T \quad (42)$$

$$y_p, y_{lj} \in \{0,1\}$$

$$x_{kjpt}, x_{kjst}, x_{kjit}, Ni_{nist}, Nh_{ipt}, Nvh_{ipvt}, Nvi_{isvt}, Nvk_{jpvt}, Nvji_{jivt}, Nvjs_{jsvt}, dv_{kpt}, av_{ivt} \geq 0 \text{ and int} \quad (43)$$

$$q_{hi}^{di}, P_o^{di}, q_i^{dh}, P_o^{dh}, q_{kit}^{dk}, P_o^{dk}, q_{kst}^{ds}, P_o^{ds}, q_{vjs}^{ds}, P_o^{ds}, q_{vis}^{tvis}, P_{vis}^{tvis}, q_{vip}^{tvip}, P_{vip}^{tvip}, q_{vjs}^{tvjs}, P_{vjs}^{tvjs}, q_{vjp}^{tvjp}, P_{vjp}^{tvjp}, q_{vji}^{tvji}, P_{vji}^{tvji} \geq 0 \quad (44)$$

در مدل بالا تابع هدف ۱، به دنبال حداقل کردن مجموع تعداد افرادی است که به بیمارستان‌ها و پناه‌گاه‌ها فرستاده نشده‌اند. تابع هدف نخست شامل دو جزء است: جزء اول تعداد افراد مجروحی است که به بیمارستان‌ها فرستاده نشده‌اند و جزء دوم تعداد افراد سالمی که به پناه‌گاه‌ها ارسال نشده‌اند. تابع هدف ۲، به دنبال حداقل کردن مجموع کمبود کالاهای امدادی در ناحیه حادثه‌دیده، بیمارستان‌ها و پناه‌گاه‌ها است. این تابع هدف شامل سه جزء است: جزء اول مجموع کمبود کالاهای امدادی در ناحیه؛ جزء دوم مجموع کمبود کالاهای امدادی بیمارستان‌ها و جزء سوم کمبود کالاهای امدادی در پناه‌گاه‌ها. محدودیت ۳، تضمین می‌کند که هزینه‌های ثابت راه‌اندازی نباید از بودجه در دسترس بیشتر باشد. محدودیت ۴، نشان می‌دهد که هر مرکز توزیع باید در یک ظرفیت راه‌اندازی شود. محدودیت ۵، نشان می‌دهد، تعداد افرادی که به پناه‌گاه فرستاده می‌شود باید کمتر از ظرفیت پناه‌گاه باشد. محدودیت ۶، ظرفیت بیمارستان برای افراد مجروح را مشخص می‌کند. محدودیت ۷، تقاضای کالای امدادی پناه‌گاه‌ها را مشخص می‌کند. محدودیت ۸، تضمین می‌کند که مجموع کالاهای امدادی که از مرکز توزیع به سایر گره‌ها ارسال می‌شود از ظرفیت آن کمتر باشد. محدودیت‌های ۹ و ۱۰، نشان می‌دهند، تعداد افرادی که به بیمارستان‌ها و به پناه‌گاه‌ها فرستاده می‌شود باید کمتر از تعداد افراد موجود در آن ناحیه

حادثه‌دیده باشد. محدودیت‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳، تضمین می‌کنند که تعداد کالاهای امدادی که از مراکز توزیع به سایر گره‌ها ارسال می‌شوند باید کمتر از تقاضای کالاهای امدادی آن نقاط باشند. محدودیت‌های ۱۴ تا ۱۹، محدودیت‌های وزنی و حجمی وسیله حمل را نشان می‌دهند. محدودیت‌های ۲۰ تا ۲۱، به ظرفیت انسانی وسیله نقلیه اشاره دارند. محدودیت ۲۲، نشان می‌دهد در صورتی می‌توان کالا به پناهگاه ارسال کرد که آن پناه‌گاه قبلاً راه‌اندازی شده باشد. محدودیت‌های ۲۳ تا ۲۵، تضمین می‌کنند جریان کالاهای امدادی از مرکز توزیع به سایر گره‌ها زمانی می‌تواند برقرار باشد که از قبل راه‌اندازی شده باشد. محدودیت‌های ۲۶ تا ۳۰ نشان می‌دهند که زمان هر بار خدمت نباید از حداکثر زمان پوشش بیشتر باشد. محدودیت ۳۱، تضمین می‌کند که تعداد وسیله حملی که از مراکز توزیع به ناحیه حادثه‌دیده، بیمارستان‌ها و مراکز توزیع ارسال می‌شود، کمتر از تعداد وسیله‌های حمل موجود باشد. محدودیت‌های ۳۲ تا ۳۳، بالانس وسیله‌های حمل در ناحیه حادثه‌دیده را نشان می‌دهند. محدودیت‌های ۳۴ تا ۴۲، محدودیت‌های مربوط به مدل‌سازی استوار هستند. محدودیت ۴۳، علامت متغیرهای مدل‌سازی و محدودیت ۴۴، علامت متغیرهای کمکی مدل‌سازی استوار را بیان می‌کنند.

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

تکنیک‌های چندهدفه در بسیاری از پژوهش به کار رفته است [۲۱، ۱۴، ۱۸]. تکنیک ارضای جامع وزنی چپیشفی، یکی از تکنیک‌های کارای چندهدفه است. در پژوهش حاضر از این تکنیک بهره گرفته شده است و به تفصیل شرح داده می‌شود:

یک مدل چندهدفه عمومی با  $q$  متغیر تصمیم‌گیری و  $p$  تابع هدف را به صورت زیر در نظر

بگیرید [۱۶]:

$$MOP: \text{Min } F(x) = \{f_1(x), f_2(x), f_3(x) \dots f_p(x)\}$$

S.t.

$$X \in X_f$$

که در آن  $x$  جواب مسئله است.  $X_f \subseteq X$ ، مجموعه جواب‌های شدنی مسئله بالا هستند. در مسئله بهینه‌سازی  $F(x)$ ، مجموعه متغیرهای تصمیم‌گیری  $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_q)$  در فضای تصمیم‌گیری  $X$  هستند. و بردار تابع هدف  $z = (z_1, z_2, z_3, \dots, z_p)$  در فضای جواب  $Z$  می‌باشند. نخست، مقدار بهینه هر عضو از مجموعه بردار تابع هدف  $z = (z_1, z_2, z_3, \dots, z_p)$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_i^* = \min \{f_i(x) / x \in X_f\} - \varepsilon_i$$

که در آن  $\epsilon_t$  یک مقدار مثبت و کوچک است. مساله چند هدفه ( $MOP^1$ ) به صورت زیر به برنامه ریزی تک هدفه تعدیل می شود:

$SOP: Min \alpha$

$S.t.$

$$\alpha \geq \lambda_t (f_t(x) - Z_t^*)$$

$$\sum_{t=1}^p \lambda_t = 1 \quad 0 \leq \lambda_t \leq 1, x \in X_f$$

در عبارت بالا،  $\lambda_t$  اهمیت هر تابع هدف است. مسئله  $SOP^2$ ، ممکن است جواب بهینه پارتویی ضعیف تولید کند؛ بنابراین برخی از جواب های به دست آمده ممکن است بر جواب های پارتویی ضعیف غلبه داشته باشند. برای حذف کردن جواب های ضعیف پارتویی از مسئله  $SSOP^3$  بهره گرفته می شود.

$x_w$  جواب بهینه پارتویی مسئله (SOP) است؛ بنابراین:

$$SSOP: Min \sum_{t=1}^p (f_t(x) - z_t^*)$$

$S.t.$

$$X \in X_w$$

این کار باعث می شود جواب های پارتویی ضعیف از برنامه ریزی حذف شوند.

**مثال عددی.** در مثال عددی فرض می شود پنج نقطه حادثه خیز، شش بیمارستان، پنج نقاط کاندید برای راه اندازی پناهگاه، پنج نقطه کاندید برای راه اندازی مراکز توزیع، سه نوع وسیله حمل، دو نوع مجروح وجود دارند و همچنین سه دوره برنامه ریزی (۷۲ ساعت) امداد و نجات در نظر گرفته شده است. اگر زمان امداد و نجات افزایش پیدا کند، شدت صدمات به صورت قابل توجهی افزایش می یابد. در این بخش هدف مقایسه بین مدل های قطعی و استوار است؛ بدین منظور برای انجام تحلیل حساسیت و آزمون دو مدل استوار و قطعی، پنج سطح حداکثر احتمال نقض محدودیت<sup>۴</sup> با مقادیر ۰/۳، ۰/۲۵، ۰/۲، ۰/۱۵، ۰/۱ و همچنین سه سطح درصد انحراف<sup>۵</sup> داده های تصادفی از داده های اسمی<sup>۶</sup> (۱۵ درصد، ۱۰ درصد و ۵ درصد) در نظر گرفته شده است. به دلیل حیاتی بودن نجات افراد در اثر وقوع زلزله، بودجه های استواری بر مبنای سطح محافظه کاری بالا و با گام «۰/۰۵» انتخاب شده اند. به فرض نمونه اگر حداکثر احتمال نقض

1. Multi-Objective Problem (MOP)
2. Single-Objective Problem (SOP)
3. Strong Single-Objective Problem (SSOP)
4. Maximum Probability of Constrain Violation
5. Perturbation
6. Nominal Value

محدودیت برابر ۰/۱ در نظر گرفته شود، مدل ریاضی تحت عدم قطعیت با احتمال حداقل ۹۰ درصد شدنی خواهد ماند؛ بنابراین با سطح محافظه کاری بالا و احتمال حداقلی، این اطمینان را به تصمیم‌گیرنده می‌دهد که تصمیمات با احتمال بسیار زیاد، شدنی خواهند ماند.

مدل‌های قطعی و استوار با داده‌های اسمی و با نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS ۲۴,۰,۱ و با سالور قدرتمند (CPLEX)، حل شده و همچنین برای تابع هدفها، پنج مجموعه وزنی متفاوت  $(\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7)$ ،  $(\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6)$ ،  $(\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5)$ ،  $(\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4)$ ،  $(\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7)$  در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. ظرفیت و هزینه ثابت احداث مراکز توزیع

ظرفیت (واحد ۱۰۰۰) $Cap_l$	هزینه احداث (۱۰۰۰\$) $ff_{jl}$	سطح L
۱۰	۵۰	کوچک
۱۶	۸۰	متوسط
۲۴	۱۲۰	بزرگ

جدول ۲. ظرفیت بیمارستان

ظرفیت (واحد) $CI_s$	شماره بیمارستان
۳۰۰	۱
۱۲۰	۲
۳۰۰	۳
۶۱۴	۴
۱۴۵	۵
۳۰۰	۶

جدول ۳. ظرفیت و هزینه ثابت احداث پناه‌گاهها

ظرفیت (نفر ۱۰۰۰) $Cps_p$	هزینه احداث (۱۰۰۰\$) $fp_p$	شماره پناه‌گاه
۶۰	۱۲۰۰	۱
۷۰	۱۳۵۰	۲
۷۴	۱۶۰۰	۳
۷۳	۱۵۰۰	۴
۷۲	۱۴۰۰	۵



جدول ۴. بازه عدم اطمینان پارامتر تصادفی پیرامون داده‌های اسمی

پارامتر	بازه عدم اطمینان، تابع توزیع یکنواخت
$dh_i$	Uniform (۱۷۰۰۰, ۱۷۶۰۰)
$di_{hi}$	Uniform (۵۵۰۰, ۶۰۰۰)
$dk_{kit}$	Uniform (۷۰۰۰, ۸۰۰۰)
$ds_{kst}$	Uniform (۸۰۰, ۹۰۰)
$dt_{vis}$	Uniform (۱۶, ۲۰)
$dt_{vijp}$	Uniform (۱۶, ۲۰)
$dt_{vjs}$	Uniform (۱۶, ۲۰)
$dt_{vijp}$	Uniform (۱۶, ۲۰)
$dt_{vji}$	Uniform (۱۶, ۲۰)

نتایج حل مدل‌های قطعی و استوار در جدول‌های ۵ تا ۱۱ آورده شده است. در این جدول‌ها حداکثر احتمال نقض محدودیت با علائم اختصاری (MPCV)<sup>۱</sup> و میزان انحراف از داده‌های اسمی (DFNV)<sup>۲</sup> نشان داده شده است. با توجه به جدول‌های ۵ تا ۱۱، با ثابت در نظر گرفتن میزان انحراف از داده اسمی و با کاهش سطح حداکثر احتمال نقض محدودیت (افزایش سطح محافظه‌کاری)، مقدار تابع هدف در هر گام بدتر شده است. با کاهش سطح حداکثر احتمال نقض محدودیت‌ها، میزان محافظه‌کاری بیشتر می‌شود.

جدول ۵. خلاصه نتایج حل مدل قطعی با داده‌های اسمی

$Z_1^*$ = ۳۳۸۶	$\alpha$	$Z_2^-$ = ۴۹۶۵۸۸	وزن
۲۷۴۵۹	۷۳۲۱	۲۶۹۹۸۰	$\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7$
۲۵۳۱۰	۸۷۶۹	۲۷۴۲۸۰	$\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6$
۲۲۸۷۳	۹۷۴۴	۲۷۹۱۵۲	$\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5$
۲۰۰۸۹	۱۰۰۲۲	۲۸۴۷۲۰	$\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4$
۱۶۸۷۷	۹۴۴۴	۲۹۱۱۴۴	$\lambda_1=0/7, \lambda_2=0/3$
$Z_1^-$ = ۳۵۴۷۶		$Z_2^*$ = ۳۹۶۶۴	

1. Maximum Probability Constrain Violation (MPCV)
2. Deviation From Nominal Value (DFNV)

جدول ۶. خلاصه نتایج مدل استوار در احتمال نقض ۰/۱

	$Z_1^* = 6313$	$\alpha$	$Z_T^* = 508039$	وزن
	۲۸۱۳۶	۶۷۵۶	۲۷۱۶۰۰	$\lambda_1 = 0/3, \lambda_T = 0/7$
MPCV = 0/1	۲۶۸۲۴	۸۲۰۴	۲۷۵۶۲۲	$\lambda_1 = 0/4, \lambda_T = 0/6$
DFNV = ۵%	۲۴۵۴۵	۹۱۱۶	۲۸۰۱۸۰	$\lambda_1 = 0/5, \lambda_T = 0/5$
	۲۱۹۴۱	۹۳۷۶	۲۸۵۳۹۰	$\lambda_1 = 0/6, \lambda_T = 0/4$
	۱۸۹۳۵	۸۱۳۵	۲۹۱۴۰۰	$\lambda_1 = 0/7, \lambda_T = 0/3$
	$Z_1^- = 36535$		$Z_T^* = 261941$	
	$Z_1^* = 9237$	$\alpha$	$Z_T^- = 519502$	
	۳۰۲۱۱	۶۲۹۲	۲۷۳۲۲۰	$\lambda_1 = 0/3, \lambda_T = 0/7$
MPCV = 0/1	۲۸۳۳۸	۷۶۴۰	۲۷۶۹۶۶	$\lambda_1 = 0/4, \lambda_T = 0/6$
DFNV = ۱۰%	۲۶۲۱۶	۸۴۸۹	۲۸۱۲۱۱	$\lambda_1 = 0/5, \lambda_T = 0/5$
	۲۳۷۱۹	۸۷۳۲	۲۸۶۰۶۲	$\lambda_1 = 0/6, \lambda_T = 0/4$
	۲۰۹۹۲	۸۲۲۸	۲۹۱۶۶۰	$\lambda_1 = 0/7, \lambda_T = 0/3$
	$Z_1^- = 37594$		$Z_T^* = 264232$	
	$Z_1^* = 1214$	$\alpha$	$Z_T^- = 530957$	
	۳۱۵۸۸	۵۸۲۷	۲۷۴۸۴۰	$\lambda_1 = 0/3, \lambda_T = 0/7$
MPCV = 0/1	۲۹۸۵۵	۷۰۷۶	۲۷۸۳۱۰	$\lambda_1 = 0/4, \lambda_T = 0/6$
DFNV = ۱۵%	۲۷۸۸۸	۷۸۶۲	۲۸۲۲۴۰	$\lambda_1 = 0/5, \lambda_T = 0/5$
	۲۵۶۴۳	۸۰۸۷	۲۸۶۷۳۴	$\lambda_1 = 0/6, \lambda_T = 0/4$
	۲۳۰۵۰	۷۶۲۰	۲۹۱۹۱۶	$\lambda_1 = 0/7, \lambda_T = 0/3$
	$Z_1^- = 38653$		$Z_T^* = 26651$	

جدول ۷. خلاصه نتایج مدل استوار در احتمال نقض 0/15

	$Z_1^* = 5906$	$\alpha$	$Z_T^- = 509095$	وزن
	۲۸۶۴۷	۶۸۲۲	۲۷۱۳۵۰	$\lambda_1 = 0/3, \lambda_T = 0/7$
MPCV = 0/15	۲۶۶۱۵	۸۲۸۳	۲۷۵۴۱۰	$\lambda_1 = 0/4, \lambda_T = 0/6$
DFNV = ۵%	۲۴۳۱۴	۹۲۰۴	۲۸۰۰۱۲	$\lambda_1 = 0/5, \lambda_T = 0/5$
	۲۱۶۸۵	۹۴۶۷	۲۸۵۲۷۲	$\lambda_1 = 0/6, \lambda_T = 0/4$
	۱۸۶۵۰	۸۹۲۰	۲۹۱۳۴۰	$\lambda_1 = 0/7, \lambda_T = 0/3$
	$Z_1^- = 36386$		$Z_T^* = 261604$	
	$Z_1^* = 1424$	$\alpha$	$Z_T^- = 521610$	
	۲۹۸۳۲	۶۴۲۲	۲۷۲۷۲۰	$\lambda_1 = 0/3, \lambda_T = 0/7$
MPCV = 0/15	۲۷۹۲۱	۷۷۹۸	۲۷۶۵۴۳	$\lambda_1 = 0/4, \lambda_T = 0/6$
DFNV = ۱۰%	۲۵۷۵۴	۸۶۶۵	۲۸۰۸۷۵	$\lambda_1 = 0/5, \lambda_T = 0/5$
	۲۳۲۷۹	۸۹۱۲	۲۸۵۸۲۷	$\lambda_1 = 0/6, \lambda_T = 0/4$

	۲۰۴۲۲	۸۳۳۹	۲۹۱۵۴۰	$\lambda_1=0/7, \lambda_2=0/3$
	$Z_1^- = ۳۸۱۵۱$	$\alpha$	$Z_2^* = ۲۶۳۲۳۱$	
	$Z_1^* = ۱۰۹۴۴$	$\alpha$	$Z_2^- = ۵۳۴۱۲۱$	
	۳۱۰۲۰	۶۰۲۲	۲۷۴۰۸۹	$\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7$
MPCV=0/15	۲۹۲۲۷	۷۳۱۳	۲۷۷۶۷۴	$\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6$
DFNV = 15%	۲۷۱۹۶	۸۱۲۶	۲۸۱۷۳۷	$\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5$
	۲۴۸۷۴	۸۳۵۸	۲۸۶۳۸۰	$\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4$
	۲۲۱۹۵	۷۸۷۵	۲۹۱۷۳۸	$\lambda_1=0/7, \lambda_2=0/3$
	$Z_1^- = ۲۸۲۰۷$		$Z_2^* = ۲۶۵۴۸۵$	

جدول ۸ خلاصه نتایج از مدل استوار در احتمال نقض 0/2

	$Z_1^* = ۵۵۶۷$	$\alpha$	$Z_2^- = ۵۰۹۹۷۱$	وزن
	۲۸۴۸۷	۶۸۷۶	۲۷۱۱۳۹	$\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7$
MPCV=0/2	۲۶۴۴۱	۸۳۴۹	۲۷۵۲۳۲	$\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6$
DFNV 5%	۲۴۱۲۱	۹۲۷۷	۲۷۹۸۷۰	$\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5$
	۲۱۴۷۱	۹۵۴۲	۲۸۵۱۷۲	$\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4$
	۱۸۴۱۲	۸۹۹۱	۲۹۱۲۸۸	$\lambda_1=0/7, \lambda_2=0/3$
	$Z_1^- = ۳۶۲۶۲$		$Z_2^* = ۲۶۱۳۱۶$	
	$Z_1^* = ۷۷۴۶$	$\alpha$	$Z_2^- = ۵۲۲۳۶۲$	
	۲۹۵۱۶	۶۵۳۱	۲۷۲۲۹۹	$\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7$
MPCV=0/2	۲۷۵۷۱	۷۹۳۰	۲۷۶۱۸۶	$\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6$
DFNV = 10%	۲۵۳۶۸	۸۸۱۱	۲۸۰۵۹۱	$\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5$
	۲۲۸۵۱	۹۰۶۳	۲۸۵۶۲۷	$\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4$
	۱۹۹۴۷	۸۵۴۰	۲۹۱۴۳۶	$\lambda_1=0/7, \lambda_2=0/3$
	$Z_1^- = ۳۷۰۴۸$		$Z_2^* = ۲۶۲۹۶۹$	
	$Z_1^* = ۹۹۲۶$	$\alpha$	$Z_2^- = ۵۳۶۷۵۳$	
	۳۰۵۴۳	۶۱۸۵	۲۷۳۴۵۸	$\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7$
MPCV=0/2	۲۸۷۰۳	۷۵۱۰	۲۷۷۱۴۰	$\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6$
DFNV = 15%	۲۶۶۱۶	۸۳۴۵	۲۸۱۳۱۲	$\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5$
	۲۴۲۳۲	۸۵۸۳	۲۸۶۰۸۱	$\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4$
	۲۱۴۸۱	۸۰۸۸	۲۹۱۵۸۴	$\lambda_1=0/7, \lambda_2=0/3$
	$Z_1^- = ۳۷۸۳۴$		$Z_2^* = ۲۶۴۶۲۲$	

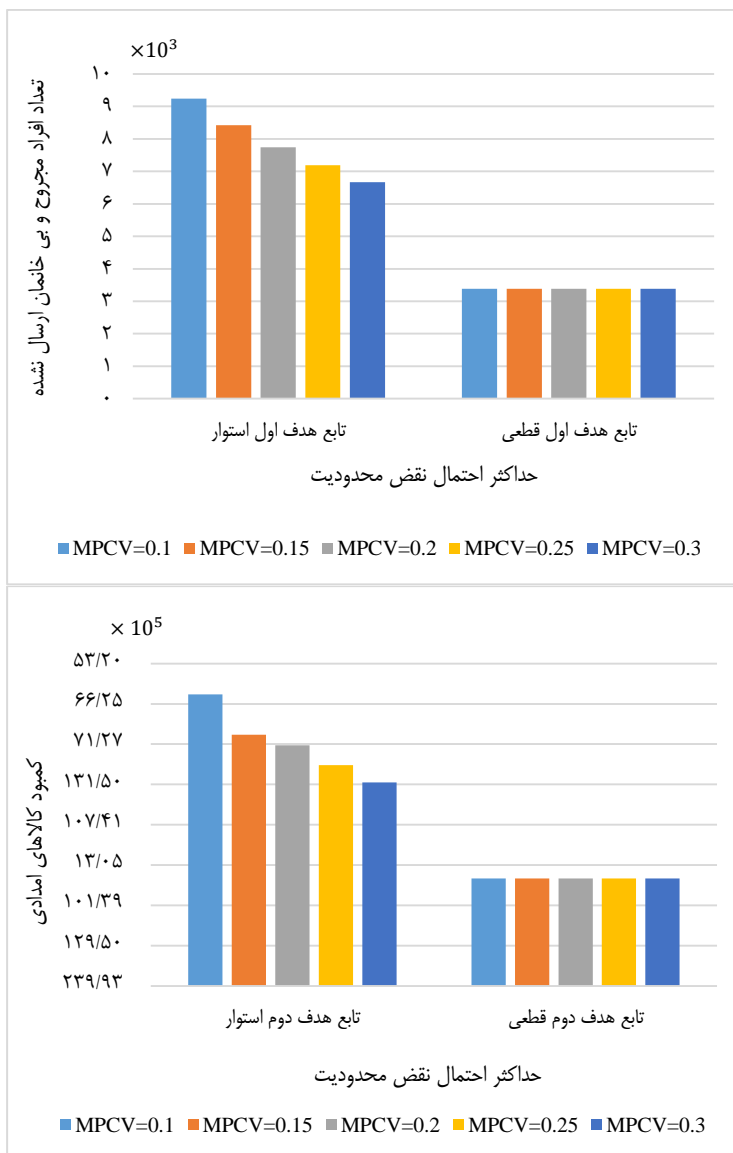
جدول ۹. خلاصه نتایج مدل استوار در احتمال نقض ۰/۲۵

	$Z_1^* = 5288$	$\alpha$	$Z_T^- = 510791$	وزن
	۲۸۳۵۶	۶۹۲۰	۲۷۰۹۵۹	$\lambda_1 = 0/3, \lambda_T = 0/7$
MPCV = 0/۲۵	۲۶۲۹۷	۸۴۰۳	۲۷۵۰۷۹	$\lambda_1 = 0/4, \lambda_T = 0/6$
DFNV = ۵%	۲۳۹۶۲	۹۳۳۷	۲۷۹۷۴۷	$\lambda_1 = 0/5, \lambda_T = 0/5$
	۲۱۲۹۵	۹۶۰۴	۲۸۵۰۸۳	$\lambda_1 = 0/6, \lambda_T = 0/4$
	۱۸۲۱۶	۹۰۴۹	۲۹۱۲۳۹	$\lambda_1 = 0/7, \lambda_T = 0/3$
	$Z_1^- = 36159$		$Z_T^* = 261073$	
	$Z_1^* = 7188$	$\alpha$	$Z_T^- = 524802$	
	۲۹۲۵۳	۶۶۱۹	۲۷۱۹۳۸	$\lambda_1 = 0/3, \lambda_T = 0/7$
MPCV = 0/۲۵	۲۷۲۸۳	۸۰۳۸	۲۷۵۸۷۹	$\lambda_1 = 0/4, \lambda_T = 0/6$
DFNV = ۱۰%	۲۵۰۵۰	۸۹۳۱	۲۸۰۳۴۴	$\lambda_1 = 0/5, \lambda_T = 0/5$
	۲۲۴۹۹	۹۱۸۶	۲۸۵۴۴۸	$\lambda_1 = 0/6, \lambda_T = 0/4$
	۱۹۵۵۴	۸۶۵۶	۲۹۱۳۳۶	$\lambda_1 = 0/7, \lambda_T = 0/3$
	$Z_1^- = 36843$		$Z_T^* = 262482$	
	$Z_1^* = 9089$	$\alpha$	$Z_T^- = 538913$	
	۳۰۱۵۱	۶۳۱۸	۲۷۲۹۱۸	$\lambda_1 = 0/3, \lambda_T = 0/7$
MPCV = 0/۲۵	۲۸۲۷۱	۷۶۲۷	۲۷۶۶۷۹	$\lambda_1 = 0/4, \lambda_T = 0/6$
DFNV = ۱۵%	۲۶۱۳۹	۸۵۲۵	۲۸۰۹۴۱	$\lambda_1 = 0/5, \lambda_T = 0/5$
	۲۳۷۰۴	۸۷۶۸	۲۸۵۸۱۳	$\lambda_1 = 0/6, \lambda_T = 0/4$
	۲۰۸۹۳	۸۲۶۲	۲۹۱۴۳۴	$\lambda_1 = 0/7, \lambda_T = 0/3$
	$Z_1^- = 37527$		$Z_T^* = 263891$	

جدول ۱۰. خلاصه نتایج مدل استوار در احتمال نقض ۰/۳

	$Z_1^* = 50.29$	$\alpha$	$Z_T^- = 511355$	وزن
	۲۸۲۳۴	۶۹۶۱	۲۷۰۸۰۰	$\lambda_1 = 0.3, \lambda_T = 0.7$
MPCV = 0.3	۲۶۱۶۲	۸۴۵۳	۲۷۴۹۴۴	$\lambda_1 = 0.4, \lambda_T = 0.6$
DFNV = 5%	۲۳۸۱۴	۹۳۹۲	۲۷۹۶۴۰	$\lambda_1 = 0.5, \lambda_T = 0.5$
	۲۱۱۳۱	۹۶۶۰	۲۸۵۰۰۷	$\lambda_1 = 0.6, \lambda_T = 0.4$
	۱۸۰۳۴	۹۱۰۳	۲۹۱۲۰۰	$\lambda_1 = 0.7, \lambda_T = 0.3$
	$Z_1^- = 50.29$		$Z_T^* = 511355$	
	$Z_1^* = 6671$	$\alpha$	$Z_T^- = 36656$	
	۲۹۰۱۱	۶۷۰۱	۲۷۱۶۲۰	$\lambda_1 = 0.3, \lambda_T = 0.7$
MPCV = 0.3	۲۷۰۱۵	۸۱۳۷	۲۷۵۶۰۹	$\lambda_1 = 0.4, \lambda_T = 0.6$
DFNV = 10%	۲۴۷۵۵	۹۰۴۲	۲۸۰۱۳۰	$\lambda_1 = 0.5, \lambda_T = 0.5$
	۲۲۱۷۱	۹۳۰۰	۲۸۵۲۹۶	$\lambda_1 = 0.6, \lambda_T = 0.4$
	۱۹۱۹۱	۸۷۶۳	۲۹۱۲۵۸	$\lambda_1 = 0.7, \lambda_T = 0.3$
	$Z_1^- = 526130$		$Z_T^* = 262046$	
	$Z_1^* = 8315$	$\alpha$	$Z_T^- = 540897$	
	۲۹۷۸۶	۶۴۴۱	۲۷۲۴۴۰	$\lambda_1 = 0.3, \lambda_T = 0.7$
MPCV = 0.3	۲۷۸۶۹	۷۸۲۱	۲۷۶۲۷۴	$\lambda_1 = 0.4, \lambda_T = 0.6$
DFNV = 15%	۲۵۶۹۶	۸۶۹۰	۲۸۰۶۱۹	$\lambda_1 = 0.5, \lambda_T = 0.5$
	۲۳۲۱۳	۸۹۳۸	۲۸۵۵۸۵	$\lambda_1 = 0.6, \lambda_T = 0.4$
	۲۰۳۴۸	۸۴۲۳	۲۹۱۳۱۵	$\lambda_1 = 0.7, \lambda_T = 0.3$
	$Z_1^- = 37246$		$Z_T^* = 262238$	

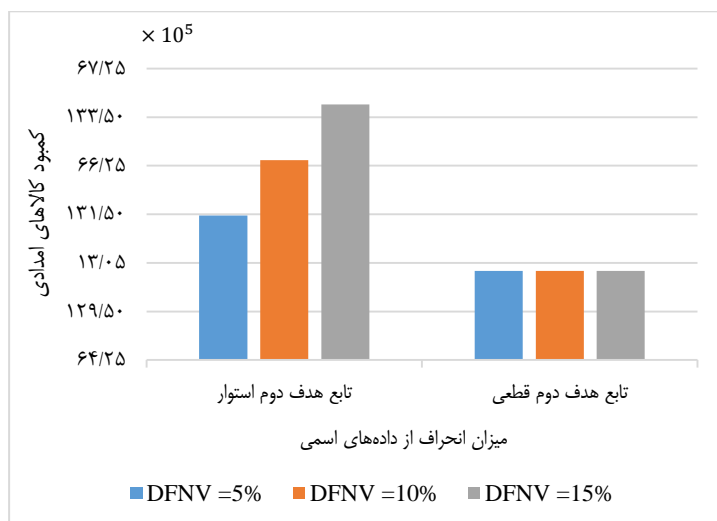
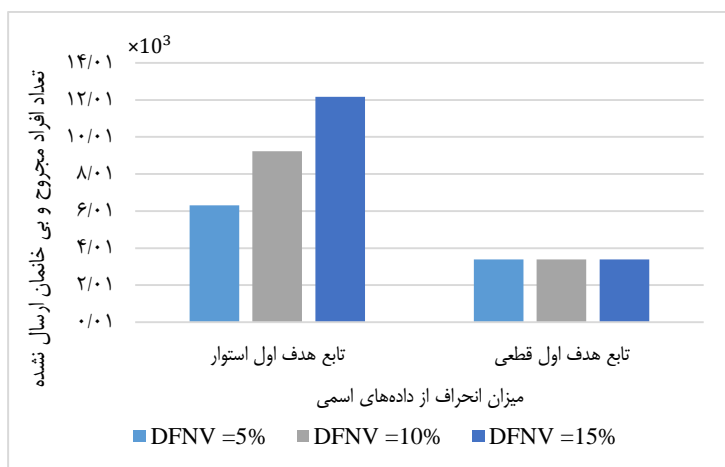
برای نمونه، نمودار ۱، نشان‌دهنده تأثیر کاهش حداکثر احتمال نقض محدودیت (افزایش بودجه استواری) است. مقدار تابع هدف‌های نخست ( $Z_1$ ) و دوم ( $Z_2$ ) با در نظر گرفتن میزان انحراف ۱۰ درصد از داده‌های اسمی و نسبت به چهار سطح احتمال نقض ۰/۳ و ۰/۲۵ و ۰/۲، ۰/۱۵ و ۰/۱ محدودیت رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با کاهش احتمال نقض محدودیت، مقدار بهینه هر دو تابع هدف مدل استوار در هر گام بدتر شده است. با افزایش سطح محافظه‌کاری (کاهش حداکثر احتمال نقض محدودیت) انتظار می‌رود که مقدار بهینه تابع هدف‌های مدل استوار بدتر شوند. بدترین حالت ممکن برای مدل استوار در سطح حداکثر احتمال نقض محدودیت ۰/۱ و میزان انحراف ۱۵ درصد از داده‌های اسمی رخ داده است که بیشترین سطح محافظه‌کاری را در بین سطوح معرفی شده دارد. از جدول‌های ۵ تا ۱۰ ملاحظه می‌شود که مقدار بهینه تابع هدف‌های مدل استوار در تمامی سطوح محافظه‌کاری از مقدار بهینه تابع هدف‌های مدل قطعی بدتر شده است.



نمودار ۱. تابع هدف‌های مدل‌های استوار و قطعی با میزان انحراف ۱۰ درصد از داده‌های اسمی

با افزایش میزان انحراف از داده‌های اسمی، مقدار بهینه تابع هدف‌های مدل استوار در هر گام بدتر شده‌اند. برای نمونه، نمودار ۲، نشان‌دهنده تأثیر افزایش میزان انحراف از داده اسمی است. مقدار بهینه تابع هدف‌های نخست (Z<sub>1</sub>) و دوم (Z<sub>2</sub>) مدل‌های قطعی و استوار با در نظر گرفتن حداکثر احتمال نقض محدودیت ۰/۱ با میزان انحراف (۱۵ درصد و ۱۰ درصد، ۵ درصد) از داده‌های اسمی رسم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش میزان انحراف از داده

اسمی مقدار بهینه تابع هدف‌های استوار در هر گام بدتر شده‌اند. اگر بازه عدم اطمینان افزایش یابد، انتظار می‌رود مقدار بهینه تابع هدف‌های استوار در هر گام بدتر شود.



نمودار ۲. تابع هدف‌های مدل استوار و قطعی در حداکثر احتمال نقض محدودیت ۰/۱

در جدول ۱۱، نتایج حل مدل قطعی و مدل استوار در سطح حداکثر احتمال نقض محدودیت ۰/۲۵ و انحراف ۱۰ درصد، داده‌های اسمی گزارش شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تمامی مجموعه‌های وزنی  $(\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7)$ ،  $(\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6)$ ،  $(\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5)$ ،  $(\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4)$ ،  $(\lambda_1=0/7, \lambda_2=0/3)$  مجموع تعداد افراد مجروح ارسال شده از ناحیه حادثه- دیده به بیمارستان‌ها در مدل‌های قطعی و استوار به یک اندازه هستند؛ اما تعداد افراد بی‌خانمان

ارسال شده از ناحیه حادثه‌دیده به پناه‌گاه‌ها در مدل قطعی در تمامی مجموعه وزنی بیشتر از مدل استوار شده است. از طرفی مجموعه تعداد کالاهای امدادی تحویل داده‌شده از مراکز توزیع به ناحیه حادثه‌دیده، بیمارستان‌ها و پناه‌گاه‌ها بیشتر از مدل استوار شده است. ملاحظه می‌شود که مدل استوار در حمل مجروحین، بی‌خانمان‌ها و تحویل کالاهای امدادی عملکرد بدتری نسبت به مدل قطعی داشته است. مدل استوار با توجه به میزان سطح محافظه‌کاری تصمیم‌گیری کرده است. تصمیماتی که از مدل قطعی استخراج شده است ممکن است تحت عدم قطعیت نشدنی شوند و برنامه‌ریزی به‌طور کلی کارایی خود را از دست دهد. اگرچه مدل استوار تصمیماتی به‌تبع بدتری نسبت به مدل قطعی ارائه داده است؛ اما انتظار می‌رود با احتمال حداقل ۷۵ درصد شدنی بماند. این قابلیت به تصمیم‌گیرنده داده می‌شود که با اطمینان بیشتری تصمیم‌گیری کند.

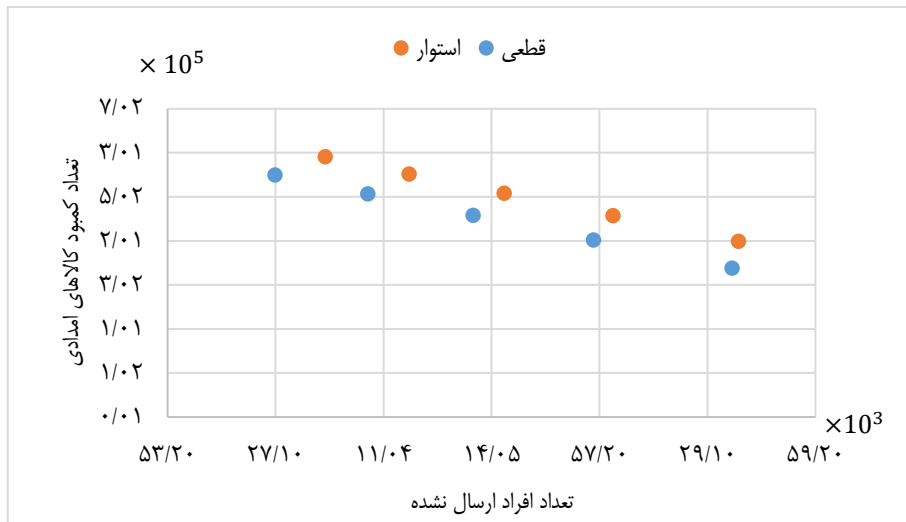
جدول ۱۱. تعداد افراد مجروح و بی‌خانمان حمل شده و تعداد کالاهای امدادی تحویل داده‌شده در احتمال نقض (۰/۲۵) و انحراف (۱۰ درصد) از داده اسمی

وزن	مدل استوار		مدل قطعی		تعداد بی‌خانمان حمل شده	تعداد افراد مجروح حمل شده
	تعداد کالاهای امدادی تحویل داده‌شده	تعداد بی‌خانمان حمل شده	تعداد کالاهای امدادی تحویل داده‌شده	تعداد افراد مجروح حمل شده		
$\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7$	۱۳۰۳۱۶	۴۱۲۶	۱۰۴۲۵۲	۲۸۵۹	۵۱۵۸	۲۸۵۹
$\lambda_1=0/4, \lambda_2=0/6$	۱۳۴۶۱۲	۵۸۴۶	۱۰۷۶۹۲	۲۸۵۹	۷۳۰۷	۲۸۵۹
$\lambda_1=0/5, \lambda_2=0/5$	۱۳۹۴۸۸	۷۷۵۹	۱۱۱۵۹۰	۲۸۵۹	۹۷۴۴	۲۸۵۹
$\lambda_1=0/6, \lambda_2=0/4$	۱۴۵۰۵۶	۱۰۰۲۲	۱۱۶۰۴۴	۲۸۵۹	۱۲۵۲۸	۲۸۵۹
$\lambda_1=0/3, \lambda_2=0/7$	۱۵۱۴۸۰	۱۲۵۹۲	۱۲۱۱۸۴	۲۸۵۹	۱۵۷۴۰	۲۸۵۹

در تمامی سطوح حداکثر احتمال نقض محدودیت و میزان درصد انحراف از داده‌های اسمی، جواب‌های پارتویی قوی تولید شده است. در جواب‌های پارتویی قوی، یک مجموعه جواب نباید بر مجموعه دیگر غلبه داشته باشد. برای نمونه نمودار پارتویی ۳ برای مدل‌های قطعی و استوار در سطح حداکثر احتمال نقض ۰/۲ و میزان انحراف ۱۰ درصد از داده‌های اسمی رسم شده‌اند. محور افقی نمودارهای پارتویی، مقدار تابع هدف اول ( $Z_1$ )، مجموع تعداد افراد مجروحی که به بیمارستان‌ها و تعداد افراد بی‌خانمانی که به پناه‌گاه‌ها ارسال نشده‌اند و محور عمودی مقدار تابع هدف دوم ( $Z_2$ )، مجموع کمبود تعداد کالاهای امدادی است. با کاهش تابع هدف نخست ( $Z_1$ )، تابع هدف دوم ( $Z_2$ ) در هر گام افزایش یافته است؛ همچنین با کاهش تابع هدف دوم، تابع هدف نخست در هر گام افزایش یافته است. زمانی که به یک تابع هدف نسبت به دیگری اهمیت



بیشتری داده شد، مقدار آن تابع هدف در هر گام بهتر شده و به تبع مقدار تابع هدف دیگری بدتر شد. یکنوا بودن شیب نمودار پارتویی ۳، نشان دهنده جواب‌های پارتویی قوی است.



نمودار ۳. نمودار پارتویی مدل‌های قطع‌ی و استوار در حداکثر احتمال نقض ۰/۲ و انحراف ۱۰ درصد از داده‌های اسمی

##### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به اهمیت توزیع کالاها و انتقال افراد مجروح و بی‌خانمان در مواقع زلزله، یک شبکه امداد و نجات در چهار سطح (مراکز توزیع، پناه‌گاه‌ها، ناحیه حادثه‌دیده و بیمارستان‌ها) توسعه داده شد. یک مدل ریاضی دوهدفه برای مسئله امداد و نجات در شرایط عدم اطمینان ارائه شد. برای مدل‌سازی عدم قطعیت، بهینه‌سازی استوار با مجموعه عدم قطعیت جعبه‌ای و چندوجهی به کار رفت. نتایج حل عددی مدل‌های قطع‌ی و استوار نشان می‌دهد که مدل استوار در هر مرحله نسبت به مدل قطع‌ی بدتر شده است. اگر تخمین بازه عدم اطمینان پارامتر تصادفی با دقت بیشتری صورت گیرد و فاصله بازه عدم اطمینان کاهش پیدا کند، به تبع عملکرد مدل استوار بهبود پیدا خواهد کرد؛ علاوه بر آن در تمامی سطوح احتمال نقض محدودیت‌ها و میزان انحراف از داده‌های اسمی جواب‌های پارتویی قوی تولید شد. برای عملکرد بهتر می‌توان به فعالیت‌های فاز پیش‌گیری مدیریت بحران به‌منظور کاهش اثرات زلزله پرداخت. اگر ساختمان‌ها و بناها منطبق بر استانداردهای جهانی ساخته شوند به مراتب در مقابل زلزله مقاوم‌تر خواهند بود؛ همچنین تجهیزسازی ساختمان‌ها به سیستم‌های هوشمند تا در طی زلزله گاز، برق و آب ساختمان قطع شود. پیشنهادهای زیر برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود:

۱. برای حل مسئله در ابعاد بزرگ می‌توان از روش‌های حل دقیق، مانند الگوریتم تجربه بندرز و لاگرانژ<sup>۱</sup> و روش‌های فراابتکاری استفاده کرد؛ ۲. علاوه بر بحث‌های تخلیه و توزیع، به مسئله مسیریابی، زمانبندی و غیره نیز توجه کرد؛ ۳. می‌توان ظرفیت وسیله حمل را به صورت پارامتر فازی در نظر گرفت و از منطق فازی<sup>۲</sup> برای مدل‌سازی آن بهره گرفت. در شرایط بحران و در صورت کمبود وسیله‌های حمل، می‌توان کمی بیشتر از ظرفیت وسیله‌های حمل، افراد و کالاهای امدادی بارگیری کرد.

---

1. Benders Decomposition Algorithm and lagrangian relaxation  
2. Fuzzy Logic

## منابع

1. Abounacer, R., Rekik, M., & Renaud, J. (2014). An exact solution approach for multi-objective location-transportation problem for disaster response. *Computers & Operations Research*, 41, 83-93.
2. An, S., Cui, N., Li, X., & Ouyang, Y. (2013). Location planning for transit-based evacuation under the risk of service disruptions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 54, 1-16.
3. 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.
4. Ben-Tal, A., & Nemirovski, A. (2008). Selected topics in robust convex optimization. *Mathematical Programming*, 112(1), 125-158.
5. Bertsimas, D., & Sim, M. (2004). The price of robustness. *Operations research*, 52(1), 35-53.
6. Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M. S., & Al-e-Hashem, S. M. (2013). A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty. *OR spectrum*, 35(4), 905-933.
7. Caunhye, A. M., Nie, X., & Pokharel, S. (2012). Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-economic planning sciences*, 46(1), 4-13.
8. Das, R., & HANAOKA, S. (2013). Robust network design with supply and demand uncertainties in humanitarian logistics. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 10(0), 954-969.
9. De Brito Junior, I., Leiras, A., & Yoshizaki, H. T. Y. (2013). Stochastic optimization applied to the prepositioning of disaster relief supply decisions in Brazil.
10. Döyen, A., Aras, N., & Barbarosoğlu, G. (2012). A two-echelon stochastic facility location model for humanitarian relief logistics. *Optimization Letters*, 6(6), 1123-1145.
11. Gama, M., Santos, B. F., & Scaparra, M. P. (2015). A multi-period shelter location-allocation model with evacuation orders for flood disasters. *EURO Journal on Computational Optimization*, 1-25.
12. Gonçalves, P., Leiras, A., & Chawaguta, B. Stochastic Optimization for Humanitarian Aid Supply and Distribution of World Food Programme (WFP) in Ethiopia
13. Guan, J. (2014). Emergency Rescue Location Model with Uncertain Rescue Time. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
14. Kalantari, M., Pishvae, MS., & Yaghoubi, S., (2015)., A Multi Objective Model Integrating Financial and Material Flow in Supply Chain Master Planning, *Journal of Industrial Management Perspective*, 19, 9-31 (In Persian)
15. Kulshrestha, A., Lou, Y., & Yin, Y. (2014). Pick-up locations and bus allocation for transit-based evacuation planning with demand uncertainty. *Journal of Advanced Transportation*, 48(7), 721-733.
16. Liu, C. H., & Tsai, W. N. (2015). Multi-objective parallel machine scheduling problems by considering controllable processing times. *Journal of the Operational Research Society*, 67(4), 654-663.

17. Rawls, C. G., & Turnquist, M. A. (2010). Pre-positioning of emergency supplies for disaster response. *Transportation research part B: Methodological*, 44(4), 521-534.
18. Rahimi, H., Azar, A., & Rezaei Pandari, A., (2015)., Designing a Multi Objective Job Shop Scheduling Model and Solving it by Simulated Annealing, *Journal of Industrial Management Perspective*, 1, 57-77 (In Persian)
19. Rennemo, S. J., Rø, K. F., Hvattum, L. M., & Tirado, G. (2014). A three-stage stochastic facility routing model for disaster response planning. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 62, 116-135.
20. Rezaei-Malek, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014). Robust humanitarian relief logistics network plnning. *Uncertain Supply Chain Management*, 2(2), 73-96.
21. Shahbandarzadeh, H., & Paykam, A., (2015)., Employment of a Weighted Fuzzy Multi-Objective Programming Model to Determine the Amount of Optimum Purchasing from Suppliers, *Journal of Industrial Management Perspective*, 18, 129-152 (In Persian).
22. Sheu, J. B., & Pan, C. (2015). Relief supply collaboration for emergency logistics responses to large-scale disasters. *Transportmetrica A: Transport Science*, 11(3), 210-242.
23. Zokaee, S., Bozorgi-Amiri, A., & Sadjadi, S. J. (2016). A Robust Optimization Model for Humanitarian Relief Chain Design under Uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*.
24. Wang, H., Du, L., & Ma, S. (2014). Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 69, 160-179.
25. Özdamar, L., & Ertem, M. A. (2015). Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics. *European Journal of Operational Research*, 244(1), 55-6.