

# بهینه‌سازی استوار مکان‌یابی تسهیلات - طراحی شبکه پایا در شرایط عدم قطعیت و در محیط رقابتی

یحیی زارع مهرجردی<sup>۱\*</sup>، مجید حیدری میبدی<sup>۲</sup>

۱. استاد گروه مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه یزد

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۶/۲۰، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده: ۹۶/۰۱/۱۱، تاریخ تصویب: ۹۶/۰۲/۲۶)

## چکیده

در این مقاله، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو تابع هدفه برای مسئله مکان‌یابی تسهیلات - طراحی شبکه در محیط رقابتی و در شرایط عدم قطعیت ارائه می‌شود. توابع هدف در این مدل، شامل کمینه‌کردن هزینه‌ها و بیشینه‌کردن جذابیت تسهیل برای مشتریان است. به دلیل غیرقطعی بودن پارامترهای تقاضای مشتریان و هزینه حمل‌ونقل، برای حل مدل، از روش بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو استفاده شد. همچنین برای محیط رقابتی، از تابع جذابیت بهره گرفته شد. برای نشان‌دادن کاربرد مدل ریاضی ارائه‌شده، مطالعه‌ای موردی در زمینه استقرار دستگاه جدید سی‌تی‌اسکن در استان یزد انجام گرفت. مطابق نتایج، سه دستگاه سی‌تی‌اسکن باید در شهرهای میبد، یزد و صدوق واقع شوند. در ادامه، تحلیل حساسیت روی پارامترهای کلیدی مدل انجام شد. همچنین برای کمک به تصمیم‌گیرنده در تعیین وزن پارامتر مسئله، معاوضه‌ای بین استواری مدل و استواری جواب صورت گرفت.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی استوار، تسهیلات رقابتی، قابلیت اطمینان، محیط عدم قطعیت، مکان‌یابی تسهیل طراحی شبکه.

## مقدمه

طراحی سیستم‌های استوار و با قابلیت اطمینان بالا، مورد توجه بسیاری از جوامع علمی واقع شده است. یکی از حوزه‌هایی که می‌توان در این زمینه به آن اشاره کرد، مکان‌یابی تسهیلات است. از سوی دیگر، در نظر گرفتن هم‌زمان مسئله مکان‌یابی تسهیلات و مسئله طراحی شبکه (FLNDP) به رویکردی بسیار مهم و کاربردی منجر می‌شود که می‌توان از آن برای مکان‌یابی تسهیلات عمومی و خصوصی استفاده کرد.

موضوع مهم دیگری که باید مدنظر داشت، بالابردن قابلیت اطمینان تسهیلات است. امروزه به دلیل بعضی از عوامل طبیعی، فنی یا حوادث اجتماعی، این امکان وجود دارد که تسهیلات از سرویس‌دهی خارج شوند؛ بنابراین، لازم است تدابیری اندیشیده شود تا در صورت بروز این‌گونه حوادث، تا حد امکان فرایند سرویس‌دهی به مشتری، بدون مشکل اجرا شود.

در جایابی و تخصیص برای صنایع و خدمات نوظهور و همچنین برقراری ایستگاه‌های امدادی، داده‌های تاریخی موجود نیستند. در صورت وجود نیز گاهی این داده‌ها به دلیل پیروی نکردن از روند قبلی خود قابل‌استناد نیستند. با توجه به موارد ذکر شده نمی‌توان توزیع مناسبی برای پارامترهای مسئله در نظر گرفت و آن‌ها را به درستی تخمین زد. در نتیجه، استفاده از رویکردهای برخورد با عدم قطعیت مانند برنامه‌ریزی تصادفی و ریسک، توجیه‌پذیر نیست. از این رو، یکی از راهکارهای مقابله با عدم قطعیت، استفاده از روش بهینه‌سازی استوار است، زیرا این روش به جواب‌هایی می‌انجامد که حساسیت کمتری به تغییر در داده‌ها دارند.

## مروری بر ادبیات موضوع و هدف پژوهش

در نظر گرفتن هم‌زمان مکان‌یابی تسهیل و طراحی شبکه (نسبت به حالتی که این دو به صورت جداگانه در نظر گرفته شوند)، رویکردی ایجاد می‌کند که با شرایط واقعی

کردند. برای ساده‌تر شدن کار، فرض شده است که شکل خاصی از تسهیل وجود دارد که ضد شکست است. مشتریان همواره بعد از شکست تسهیل، به نزدیک‌ترین تسهیل ضد شکست دوباره تخصیص داده می‌شوند [۷]. جبارزاده و همکاران، مسئله طراحی زنجیره تأمین را مطالعه کردند که در آن، مراکز توزیع ممکن است به صورت جزئی یا کلی با اختلال روبه‌رو شوند. مسئله به صورت MINLP<sup>۲</sup> فرموله شده است که مجموع سود سیستم را هنگامی که سناریوهای مختلف اختلال در تسهیلات اتفاق می‌افتد، حداکثر می‌کند [۸]. مسئله مکان‌یابی تسهیلات - طراحی شبکه پایا، با در نظر گرفتن اختلال در تسهیلات در پژوهش‌های شیشه‌بری و جبل‌عاملی و همچنین شیشه‌بری و همکاران ارائه شد. آن‌ها یک مدل MINLP را برای مسئله ایجاد کردند [۹، ۱۰]. سلطانی صبح و همکاران، به افزایش کارایی زیرساخت‌های حمل‌ونقل بهبودپذیر مانند پل پرداختند و به ضرورت بازیابی هرچه سریع‌تر آن اشاره کردند. آن‌ها برای این کار، برای هر مجموعه پل، یک مرکز بازیابی پایا در نظر گرفتند که می‌بایست از این مرکز، به وسیله مسیر ارتباطی که بیشترین قابلیت اطمینان را دارد، به پل آسیب‌دیده برسند. برای در نظر گرفتن قابلیت اطمینان در مراکز بازیابی، از تسهیلات پشتیبان استفاده شد. همچنین قابلیت اطمینان هر زیرمسیر تعیین شد و سپس مسیری به‌عنوان مسیر ارتباطی بین پل و مرکز بازیابی انتخاب شد که بیشترین قابلیت اطمینان را داشته باشد. هدف، تعیین مکان مراکز بازیابی و مسیر ارتباطی است؛ به طوری که هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های انتظاری شکست را کمینه کنند [۱۱]. مطالعه پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه پایایی تسهیلات نشان می‌دهد برای در نظر گرفتن قابلیت اطمینان در سیستم، از روش‌های تسهیلات پشتیبان و وارد کردن احتمال خرابی تسهیلات در مدل استفاده شده است.

در قسمت سوم مرور ادبیات، به موضوع استوار می‌پردازیم. وین‌چنزو و همکاران یک مدل خطی عدد صحیح مختلط را برای مسئله استوار در مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت محدود برای فائق‌شدن بر عدم قطعیت در برنامه‌ریزی ارائه کردند. هدف آن‌ها به حداقل رساندن میانگین پشیمانی نسبی در میان سناریوها طی چندین

سازگارتر است. داسکین و همکاران (۱۹۹۳) برای اولین بار مدل اولیه مسئله مکان‌یابی تسهیل - طراحی شبکه را معرفی کردند. آن‌ها بعضی از نتایج اولیه را ارائه دادند که اثر موضوع طراحی شبکه را در مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی تسهیلات نشان می‌داد [۱]. جبل‌عاملی و مرتضایی، یک مدل ریاضی مختلط عدد صحیح دوهدفه را به گونه‌ای ارائه کردند که در آن، ظرفیت هر یک از راه‌های ارتباطی، محدود و معین باشد. هدف آن‌ها به دست آوردن حداکثر مقدار تقاضاهایی است که می‌توان به وسیله راه‌های محدود برآورده کرد [۲]. درزنر و وسیلووسکی، یک مسئله جدید طراحی شبکه را با مسیرهای بالقوه ارائه دادند که هر راه بالقوه، در صورت نیاز با یک هزینه مشخص ساخته می‌شود و هر راه ارتباطی می‌تواند یک‌طرفه یا دوطرفه باشد. آن‌ها در نهایت، مدل را به وسیله الگوریتم‌های فراابتکاری حل کردند [۳]. رحمانیانی و قادری با در نظر گرفتن هم‌زمان مکان‌یابی تسهیلات و شبکه‌های حمل‌ونقل مرتبط با آن، مدل عدد صحیح مختلط را ایجاد کردند تا هزینه‌های کل عملیاتی و حمل‌ونقل را کمینه کنند. آن‌ها فرض کردند که چندین نوع شبکه حمل‌ونقل وجود دارد که ظرفیت و هزینه‌های ایجاد آن‌ها متفاوت است [۴]. رحمانیانی و قادری، بعضی از روش‌های فراابتکاری ساده و کارآمد را بر اساس جست‌وجوی متغیر همسایگی، برای حل مسئله مکان‌یابی تسهیلات - طراحی شبکه با ظرفیت محدود (CFLNDP)<sup>۲</sup> ارائه دادند [۵]. همچنین شیشه‌بری مکان‌یابی تسهیلات - طراحی شبکه را با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان معرفی کرد. در این مقاله، برای تسهیلات اولیه، تسهیلات پشتیبان مدنظر قرار گرفت تا در صورت بروز خرابی در تسهیلات، مشتریان برای دریافت خدمت به تسهیلات پشتیبان مراجعه کنند. همچنین حداکثر هزینه مجاز شکست برای سیستم در نظر گرفته شد؛ به طوری که هزینه‌های شکست نباید از این مقدار تجاوز کند [۶]. بدین - ترتیب، در مطالعات پیشین، مکان‌یابی تسهیلات رقابتی در این زمینه بررسی نشده است.

بخش دیگر ادبیات پژوهش در مورد پایایی تسهیلات است که در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. لیم و همکاران یک روش تقریبی پیوسته پایا را برای مسائل مکان‌یابی تسهیلات با تراکم مشتری یکنواخت پیشنهاد

فرض کردند که خدمت‌دهنده‌ها ظرفیت محدودی برای خدمت‌دهی به مشتریان دارند. آن‌ها در ادامه برای حل مدل، از دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و جست‌وجوی ممنوع استفاده کردند [۱۷]. در تحقیقی دیگر، شیوود و همکاران سیاست مکان‌یابی بهینه تسهیلات را برای سه تسهیل رقابتی بررسی کردند. فرض آن‌ها بر این بود که تقاضاها همواره در بازار خطی توزیع می‌شود و تسهیلات با نظم خاصی از توالی قرار داده می‌شوند. برای مکان‌یابی تسهیلات رقابتی، از راه‌حل‌های تعادل استکلبرگ با سه نوع تسهیل استفاده شده است [۱۸]. بلانکوئر و همکاران در پژوهش دیگری یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح برای مسئله مکان‌یابی p- تسهیل براساس مدل هاف روی شبکه ارائه دادند و مدل را به وسیله الگوریتم شاخه و کران حل کردند [۱۹].

مرور ادبیات نشان می‌دهد تحقیقات جامعی در زمینه مکان‌یابی تسهیلات و مسئله مکان‌یابی تسهیل- طراحی شبکه انجام نشده است؛ درحالی‌که می‌توان با در نظر گرفتن هم‌زمان عواملی مانند اختلال در تسهیل، عدم قطعیت در پارامترها و استوارسازی جواب‌ها و مکان‌یابی در محیط رقابتی، مسئله را به سمتی هدایت کرد که به واقعیت نزدیک‌تر باشد. از جمله کاربردهای این مسئله، مکان‌یابی مراکز ارائه‌دهنده خدمات سلامت مانند بیمارستان‌ها و مکان‌یابی فروشگاه‌های زنجیره‌ای است؛ برای مثال، در فروشگاه‌های زنجیره‌ای تعداد مشتریان تصادفی است. همچنین معمولاً هر فروشگاه زنجیره‌ای یک یا چند شعبه دیگر دارد تا اگر یکی از شعب آن به مشکل برخورد، مشتریان بتوانند از دیگر شعب آن استفاده کنند. در نهایت اینکه این فروشگاه‌ها برای به‌دست‌آوردن مشتریان بیشتر، رقابت می‌کنند و به دنبال افزایش مزیت رقابتی فروشگاه‌های خود هستند.

در این پژوهش، مدل مکان‌یابی تسهیلات- طراحی شبکه با در نظر گرفتن پایایی تسهیلات و عدم قطعیت در پارامترهای تقاضای مشتریان و هزینه حمل‌ونقل گسترش داده شد و برای در نظر گرفتن محیط رقابتی، از مدل تعامل فضایی یا تابع جذابیت - که دیوید هاف در سال ۱۹۶۴ برای اولین بار به آن اشاره کرد [۲۰] - استفاده شد. همچنین برای افزایش قابلیت اطمینان تسهیل، از تسهیل

دوره بود [۱۲]. یوان و همکاران، مدل‌های استوار دومرحله‌ای را برای طراحی شبکه‌های مکان‌یابی تسهیلات p- میانه پایا که در معرض اختلال هستند، ارائه کردند. آن‌ها ویژگی‌های ساختاری مدل‌ها را تحلیل و از روش تولید ستون- محدودیت با راهبردهای بهبود سفارشی برای حل مدل‌ها استفاده کردند [۱۳]. مسئله مکان‌یابی تسهیلات تصادفی<sup>۴</sup> توسط گولپینار و همکاران ارائه شد که در آن تسهیلات چندکاره وجود دارد که به مشتریانی که یک نوع محصول را نیاز دارند، سرویس می‌دهد. در مسئله، احتمال کمبود موجودی به صورت یک محدودیت احتمالی آورده شد. آن‌ها از روش استوار نرم<sup>۵</sup> برای مکان‌یابی تسهیلات استفاده کردند تا ریسک ناشی از خطاهای برآورد در توزیع احتمالی تقاضاها در مراکز تقاضا کاهش یابد [۱۴]. در پژوهش شیشه‌بری و یوسفی، مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح برای مسئله طراحی پایا و استوار شبکه مکان‌یابی مراکز خدمات دارویی ارائه شد. آن‌ها عدم قطعیت پارامترها، اختلال تسهیلات و محدودیت بودجه سرمایه‌گذاری را به صورت هم‌زمان در مدل خود در نظر گرفتند [۱۵]. مطالعه این بخش ادبیات موضوع نشان می‌دهد که پژوهشگران برای مقاله با عدم قطعیت داده‌ها، بیشتر از روش‌های برنامه‌ریزی تصادفی و احتمالی و همچنین روش کمینه‌کردن پشیمانی مراجعه استفاده کرده‌اند و کمتر از روش‌های استوار بهره گرفته‌اند.

قسمت چهارم مرور ادبیات، به تسهیلات رقابتی اختصاص دارد. وانگ و اوپانگ، یک روش تقریبی پیوسته برای طراحی تسهیلات خدماتی رقابتی در شرایط ریسک اختلال در تسهیل ارائه دادند. آن‌ها سهم تقاضای مشتری را وابسته به عملکرد تسهیلات و حضور رقبا نزدیک در نظر گرفتند؛ به طوری که مشتریان به‌طور معمول به دنبال نزدیک‌ترین مرکز برای دریافت سرویس هستند. آن‌ها مدل رقابتی استکلبرگ رهبر- پیرو را برای به‌دست‌آوردن مکان بهینه تسهیلات معرفی کردند [۱۶]. زرین‌پور و سیف‌برقی با استفاده از مدل تعامل فضایی، یک مدل مکان‌یابی رقابتی پیشنهاد کردند که در آن، شرکت واردشونده به دنبال به‌دست‌آوردن سهم مشخصی از بازار است؛ به طوری که هزینه‌های ثابت استقرار تجهیزات، هزینه سفر و هزینه انتظار مشتریان در سیستم کمینه شود. آن‌ها در مدل خود

در ادامه میانگین مشتریانی که در گره  $i$  تمایل دارند از تسهیل  $j$  استفاده کنند، محاسبه می‌شود:

$$E_{ij} = p_{ij} C_i \quad (2)$$

که در عبارت ۲،  $E_{ij}$  نشانگر امید ریاضی تعداد مشتریانی از گره  $i$  است که تمایل دارند به تسهیلی که در مکان  $j$  قرار دارد مسافرت کنند و  $C_i$  نشان‌دهنده جمعیت در مکان  $i$  است.

در نهایت، مجموع افرادی که تمایل دارند به تسهیلی که در مکان  $j$  واقع شده است، مراجعه کنند ( $T_j$ )، از طریق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$T_j = \sum_{i=1}^n P_{ij} C_i = \sum_{i=1}^n E_{ij} \quad (3)$$

### روش بهینه‌سازی استوار بر پایه سناریو

این رویکرد را اولین بار مولوی در سال ۱۹۹۵ ارائه کرد [۲۱]. به بیان وی، برای تعریف مناسب مدل، دو مجموعه متغیر معرفی می‌شوند:

$x \in R^{n1}$  که نشان‌دهنده متغیرهای طراحی  $x$  است؛ مقدار بهینه این متغیرها وابسته به پارامترهای غیرقطعی نیست.

$y \in R^{n2}$  که بردار مربوط به متغیرهای تصمیم کنترل  $y$  است؛ مقدار بهینه این متغیرها، هم به پارامترهای غیرقطعی و هم به مقدار بهینه متغیرهای طراحی بستگی دارد. بنابراین، ساختار کلی مدل به صورت زیر است:

$$\text{Min } c^T x + d^T y \quad (4)$$

s.t.

$$Ax = b \quad (5)$$

$$Bx + Cy = e, \quad (6)$$

$$x, y \geq 0 \quad x \in R^{n1}, y \in R^{n2}, \quad (7)$$

محدودیت ۵ محدودیت‌های ساختاری<sup>۸</sup> است که ضرایب ثابت دارد و از تغییرپذیری مبرا است. محدودیت ۶ محدودیت‌های کنترل<sup>۹</sup> است که ضرایبی در معرض تغییر دارد.

اگر  $\delta_s$  را متغیر خطا در محدودیت کنترل در نظر بگیریم که میزان امکان ناپذیری جواب را تحت هر سناریو  $s$  اندازه‌گیری می‌کند، همچنین اگر  $\xi_s = c^T x + d^T y$

پشتیبان بهره گرفته شد؛ بدین ترتیب که در صورت خرابی تسهیل یا از دسترس خارج شدن آن، مشتریانی که به آن تسهیل اختصاص داده شده بودند، برای دریافت خدمت، به نزدیک‌ترین تسهیل فعال تخصیص داده شدند. در اینجا پارامترهایی که عدم قطعیت دارند، به صورت گسسته در نظر گرفته شدند و از همین رو، برای مقابله با عدم قطعیت، مدل بهینه‌سازی استوار مولوی - که مبتنی بر سناریو است - به کار رفت.

ساختار کلی مقاله در ادامه به شرح زیر است. در بخش اول به توضیح مدل تابع جاذبه پرداخته می‌شود. بخش دوم به رویکرد استوارسازی بر پایه سناریو اختصاص دارد. در بخش سوم تعریف مسئله بیان می‌شود و در بخش چهارم، به منظور بیان شفاف و درک بهتر مسئله، به مطالعه موردی و تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی پرداخته می‌شود. مقاله در بخش پنجم با نتایج و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده پایان می‌یابد.

### مدل تعامل فضایی و تابع جاذبه

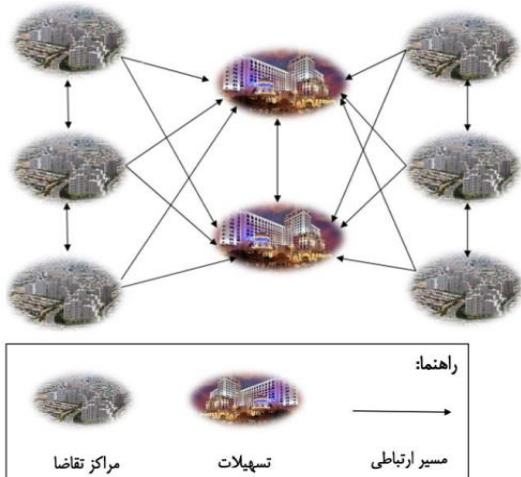
به طور معمول، برای در نظر گرفتن محیط رقابتی، از دو روش تئوری بازی‌ها و تابع جاذبه استفاده می‌شود. در این پژوهش، تابع جاذبه به کار رفته است که در ادامه توضیح داده می‌شود.

احتمال اینکه یک مشتری به سمت یک تسهیل معین جذب شود، با جذابیت تسهیل رابطه مستقیم و با فاصله مشتری با تسهیل، رابطه عکس دارد. مدل ارائه شده به صورت رابطه ۱ است.

$$p_{ij} = \frac{s_j / d_{ij}}{\sum_{j=1}^n s_j / d_{ij}} \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $p_{ij}$  نشان‌دهنده این احتمال است که مشتری در نقطه  $i$  به تسهیلی که در مکان  $j$  است، مراجعه کند.  $s_j$  معرف جذابیت تسهیلی است که در مکان  $j$  واقع شده است که این جذابیت، تحت تأثیر عوامل گوناگونی از جمله اندازه تسهیل، قیمت کالا یا خدمات، کیفیت تجهیزات سرویس‌دهی یا کالای ارائه شده، سرعت ارائه خدمت، تعداد تجهیزات و... است.  $d_{ij}$  نمایانگر مسافت بین گره‌های  $i$  و  $j$  است.

در منطقه قرار دهد؛ به طوری که بیشترین مطلوبیت انتظاری را کسب کند؛ درحالی‌که مجموع هزینه سرمایه‌گذاری (شامل ایجاد تسهیل، ساختن راه‌های جدید یا بهبود راه‌های موجود) و مجموع هزینه‌های عملیاتی (مانند هزینه حمل‌ونقل) نیز باید کمینه شود. در شکل ۱، فرم شماتیک مسئله ترسیم شده است.



شکل ۱. فرم شماتیک مسئله مکان‌یابی تسهیل - طراحی شبکه

### مفروضات

۱. همه تسهیلات، ظرفیت نامحدود دارند، اما راه‌های ارتباطی دارای ظرفیت محدود هستند؛
۲. تسهیلات فقط روی گره‌های شبکه واقع می‌شوند؛
۳. روی هر گره، حداکثر یک تسهیل واقع می‌شود؛
۴. ساختار کلی شبکه براساس سیستم مشتری به خدمت‌دهنده برنامه‌ریزی شده است؛
۵. همه تسهیلات (چه جدید و چه موجود) ناپایا هستند؛ یعنی به دلایلی ممکن است از سرویس‌دهی خارج شوند؛
۶. همه راه‌های ارتباطی شبکه، جهت‌دار و پایا هستند؛
۷. حداکثر یک تسهیل در واحد زمان خراب می‌شود؛
۸. هر تسهیل را می‌توان به‌عنوان تسهیل پشتیبان حداکثر یک تسهیل دیگر قرار داد؛
۹. بین هر جفت گره، حداکثر باید یک مسیر ارتباطی وجود داشته باشد.

در این صورت  $\xi_s = c^T x + d_s^T y_s$  متغیر تصادفی است که با احتمال  $p_s$  تحت سناریو  $s$  رخ می‌دهد؛ آن‌گاه مدل استوار به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\text{Min } \sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) + \omega p(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s) \quad (8)$$

s.t.

$$Ax = b$$

$$B_s x + C_s y_s + \delta_s = e_s, \quad \text{for all } s \in \Omega,$$

$$x \geq 0, \quad y_s \geq 0 \quad \text{for all } s \in \Omega,$$

اولین ترم از تابع هدف ۸ را می‌توان به صورت

$$\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) = \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s (\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'})^2 \quad \text{نوشت.}$$

دومین ترم از تابع هدف ۸ (یعنی  $p(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_s)$ ) تابع جریمه امکان‌پذیری را اندازه‌گیری می‌کند. در حقیقت، ترم اول مقدار استواری جواب را اندازه می‌گیرد؛ درحالی‌که اندازه‌گرفتن مقدار استواری مدل، به وسیله ترم دوم انجام می‌شود.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، عبارت اول (استواری جواب) دارای توان دوم است و در مدل‌سازی، شکل کوادراتیک دارد. از این‌رو، یو و لی (۲۰۰۰) اظهار کردند که برای سادگی محاسبات می‌توان از فرمول زیر استفاده کرد [۲۲].

$$\text{Min } \sum_{s \in \Omega} p_s \xi_s + \quad (9)$$

$$\lambda \sum_{s \in \Omega} p_s [(\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'}) + 2\theta_s]$$

s.t.

$$(\xi_s - \sum_{s' \in \Omega} p_{s'} \xi_{s'}) + \theta_s \geq 0, \quad \forall s \in \Omega$$

$$\theta_s \geq 0, \quad \forall s \in \Omega$$

### تعریف مسئله

در این بخش، ساختار کلی مسئله توضیح داده می‌شود. فرض کنید مجموعه‌ای از گره‌های تقاضا در یک منطقه جغرافیایی قرار دارد. مجموعه‌ای از راه‌های حمل‌ونقل ضروری در ساخت یک شبکه حمل‌ونقل در منطقه ذکر شده، تعریف شده است. راه‌ها شامل راه‌های موجود و راه‌های پیشنهادی است. مجموعه‌ای از تسهیلات در منطقه وجود دارد و شرکت واردشونده می‌خواهد تعدادی تسهیل

## نمادها

اندیس‌ها و پارامترها:

$E$ : مجموعه گره‌های شبکه  $\{1, 2, \dots, |N|\}$  و  $i, j \in \{1, 2, \dots, |N|\}$

مجموعه مشتریان  $\{1, 2, \dots, |N|\}$ ؛  $k \in \{1, 2, \dots, |N|\}$

$N$ : مجموعه گره‌هایی که از ابتدا در آن تسهیل وجود

دارد؛

$N' = E - N$ : مجموعه گره‌های کاندیدا برای

قرارگیری تسهیل شرکت واردشونده؛

$G$ : مجموعه راه‌های ارتباطی (چه موجود و چه

کاندید) شبکه  $(i, j) \in G$ ؛

$S$ : سناریوهای مربوط به کل مسئله (ترکیب

سناریوهای تقاضاها و سناریوهای هزینه حمل‌ونقل)،

$S \in S$

$p_s$ : احتمال رخ دادن سناریو  $S$ ؛

$C_k^s$ : تعداد مشتری در گره  $k$  تحت سناریو  $S$ ؛

$d_{ij}$ : فاصله بین گره  $i$  و گره  $j$ ،  $(i, j) \in G$ ؛

$s_j$ : جذابیت تسهیلی که در مکان  $j$  واقع شده است؛

$f_i$ : هزینه ثابت باز کردن تسهیل در نقطه  $i$ ؛

$h_{ij}$ : هزینه ایجاد/بهبود مسیر  $(i, j)$ ،  $(i, j) \in G$ ؛

$t_{ij}^s$ : هزینه مسافت روی مسیر  $(i, j)$  تحت سناریو  $S$ ؛

$V_{ij}$ : ظرفیت مسیر  $(i, j)$ ؛

$q$ : تعداد تسهیلاتی که شرکت واردشونده باز می‌کند؛

$M$ : تعداد کل تسهیلاتی که باز است؛

$\lambda$ : ضریب مربوط به واریانس هزینه‌ها؛

$\omega$ : ضریب مربوط به استواری مدل.

متغیرها:

$Z_{ik}$ : اگر تسهیل موجود در گره  $i$  تسهیل اصلی و

تسهیلی که در گره  $k$  قرار دارد تسهیل پشتیبان باشد یک،

در غیر این صورت صفر؛

$X_{ij}$ : اگر مسیر  $(i, j)$  ایجاد شود/بهبود یابد مقدار

یک، در غیر این صورت صفر؛

$R_{ik}$ : متغیر دودویی برای ایجاد راه ارتباطی بین

تسهیلات؛

$Y_{ij}^{ks}$ : کسری از تقاضای مشتری  $k$  که روی مسیر

$(i, j)$  تحت سناریو  $S$  حرکت می‌کند؛

$W_i^{ks}$ : کسری از تقاضای مشتری  $k$  که به وسیله

تسهیل  $i$  تحت سناریو  $S$  برآورده می‌شود؛

$\delta_{ij}^{+s}$ : متغیر خطا مربوط به محدودیت کنترل.

## توابع هدف و محدودیت‌ها

توابع هدف را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\max \sum_{i \in E} \sum_{j \in N'} \sum_{k \in E} \frac{s_j / d_{ij}}{\sum_{j \in N'} s_j / d_{ij}} C_i Z_{ik} \quad (10)$$

(11)

$$\min \sum_{i \in N'} \sum_{k \in E} f_i Z_{ik} + \sum_{(i,j) \in G} h_{ij} d_{ij} X_{ij} + \sum_{k \in E} \sum_{(i,j) \in G} C_k t_{ij}^{ks} Y_{ij}^k$$

تابع هدف ۱۰ میانگین تعداد افرادی را که به سمت

تسهیل/تسهیلات واردشونده مراجعه می‌کنند، حداکثر

می‌سازد (تابع جذابیت). تابع هدف ۱۱ شامل هزینه‌های

مکان‌یابی تسهیلات، ایجاد/بهبود راه‌های ارتباطی و

هزینه‌های حمل‌ونقل است.

اگر مسئله را در حالت عدم قطعیت و پارامترهای

تقاضای مشتریان و هزینه حمل‌ونقل را به صورت غیرقطعی

در نظر بگیریم، متغیر  $\xi_s^k$  را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

(12)

$$\xi_s^k = \sum_{i \in N'} \sum_{k \in E} f_i Z_{ik} + \sum_{(i,j) \in G} h_{ij} d_{ij} X_{ij} + \sum_{k \in E} \sum_{(i,j) \in G} C_k t_{ij}^{ks} Y_{ij}^k$$

بنابراین، براساس آنچه در مورد مدل بهینه‌سازی استوار

گفته شد، تابع هدف ۱۱ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی

کرد:

(13)

$$\min \sum_{s \in S} p_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in S} p_s (\xi_s - \sum_{s' \in S} p_{s'} \xi_{s'} + 2\theta_s) + \omega \sum_{s \in S} p_s \delta_{ij}^{+s}$$

که اولین و دومین عبارت در تابع هدف ۱۳ به ترتیب

نشان‌دهنده مقدار میانگین و واریانس هزینه کل، و کل دو

عبارت بیانگر استواری جواب است. سومین عبارت در تابع

هدف ۱۳، استواری مدل نسبت به ناموجه بودن محدودیت

کنترل تحت سناریو  $S$  است.

$$\xi_s - \sum_{s \in S} p_s \xi_s + \theta_s \geq 0 \quad \forall s \in S \quad (30)$$

$$\theta_s \geq 0 \quad \forall s \in S \quad (31)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in G \quad (32)$$

$$Z_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i, k \in E : i \neq k \quad (33)$$

$$R_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in G \quad (34)$$

$$Y_{ij}^{ks} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in G, \forall k \in E, s \in S \quad (35)$$

$$W_i^{ks} \geq 0 \quad \forall i, k \in E : i \neq k, s \in S \quad (36)$$

$$\sum_{i \in N'} \sum_{j \in E} Z_{ij} = q \quad (14)$$

$$\sum_{i \in E} \sum_{k \in E} Z_{ik} = M \quad (15)$$

$$\sum_{k \in E} Z_{ik} + \sum_{j \in E, j \neq i} X_{ij} \geq 1 \quad \forall i \in E \quad (16)$$

$$X_{ij} + X_{ji} \leq 1 \quad (i, j) \in G \quad (17)$$

$$\sum_{j \in E, j \neq i} Y_{ji}^{ks} = W_i^{ks} + \sum_{j \in E, j \neq i} Y_{ij}^{ks} \quad \forall i, k \in E : i \neq k, s \in S \quad (18)$$

$$\sum_{k \in E} Z_{ik} + \sum_{j \in E, j \neq i} W_j^{is} = 1 \quad \forall i \in E, s \in S \quad (19)$$

$$\sum_{k \in E} Z_{ik} + \sum_{j \in E} Y_{ij}^{is} = 1 \quad \forall i \in E, s \in S \quad (20)$$

$$W_i^{js} \leq \sum_{k \in E} Z_{ik} \quad \forall i, j \in E : i \neq j, s \in S \quad (21)$$

$$Y_{ij}^{ks} \leq X_{ij} \quad \forall i, j, k \in E, (i, j) \in G, s \in S \quad (22)$$

$$\sum_{k \in E} C_k^s Y_{ij}^{ks} - \delta_{ij}^{+s} \leq V_{ij} X_{ij} \quad \forall (i, j) \in G, s \in S \quad (23)$$

$$Z_{ik} \leq 1 - R_{ik} \quad \forall i, k \in E : i \neq k \quad (24)$$

$$-X_{ik} + 1 \leq R_{ik} \quad \forall i, k \in E : i \neq k \quad (25)$$

$$\sum_{k \in E} Z_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (26)$$

$$\sum_{k \in E} Z_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in E \quad (27)$$

$$\sum_{i \in E} Z_{ik} \leq \sum_{j \in E} Z_{kj} \quad \forall k \in E \quad (28)$$

$$Z_{ii} = 0 \quad \forall i \in E \quad (29)$$

محدودیت ۱۴ نشان‌دهنده تعداد تسهیلی است که شرکت واردشونده باز می‌کند. محدودیت ۱۵ تعداد کل تسهیلات (موجود و جدید) را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۶ تضمین می‌کند که تقاضا در گره  $i$  یا به وسیله تسهیل موجود در گره  $i$  برآورده می‌شود یا اینکه به وسیله راه‌های ارتباطی به خارج از گره  $i$  منتقل می‌شود. محدودیت ۱۷ به این نکته اشاره دارد که بین دو گره، حداکثر یک راه یک‌طرفه می‌توان ایجاد کرد. محدودیت ۱۸ بیانگر تعادل بین ورودی و خروجی گره‌هاست. محدودیت ۱۹ تأکید می‌کند که تقاضای گره  $i$  یا باید به وسیله تسهیل موجود در گره  $i$  برآورده شود یا اینکه توسط تسهیلات دیگر تأمین شود. محدودیت ۲۰ بیان می‌کند که اگر در گره  $i$  تسهیل باشد، هیچ جریانی نباید از آن خارج شود؛ وگرنه باید تقاضای آن به مناطقی دیگر حمل شود. محدودیت ۲۱ تضمین می‌کند گرهی می‌تواند تقاضاها را برطرف کند که در آن، گره تسهیل وجود داشته باشد. محدودیت ۲۲ تأکید دارد که هنگامی می‌توان از یک مسیر برای حمل و نقل استفاده کرد که آن مسیر ابتدا ایجاد شده باشد. محدودیت ۲۳ نشان‌دهنده محدودیت ظرفیت مسیرهای ارتباطی است که مجموع جریان هر مسیر نباید بیشتر از ظرفیت آن مسیر باشد. محدودیت‌های ۲۴ و ۲۵ با هم به این نکته تأکید دارند که اگر دو تسهیل به‌عنوان تسهیل اصلی و پشتیبان انتخاب شدند، باید بین آن‌ها راه ارتباطی وجود داشته باشد. محدودیت ۲۶ مکان تسهیلاتی را که از ابتدا در منطقه وجود داشته‌اند، نشان می‌دهد. محدودیت ۲۷ به این نکته اشاره می‌کند که در یک مکان، حداکثر می‌توان

به سه سطح کیفی تقسیم‌بندی می‌شوند: بالا، متوسط و پایین. در حقیقت، بسته به نوع جاده، هزینه بهبود/ ایجاد متغیر است؛ بنابراین، جاده‌هایی با کیفیت پایین و متوسط را می‌توان با کمترین هزینه ایجاد، به جاده با کیفیت بالا تبدیل کرد. شکل ۲، مراکز اقامت و شبکه مسیر حمل‌ونقل را در استان یزد نشان می‌دهد. همچنین مراکزی که در آن‌ها دستگاه‌های سی‌تی‌اسکن مستقر است، در این شکل مشاهده می‌شود.



شکل ۲. نقشه جغرافیایی استان یزد به همراه راه‌های ارتباطی موجود و بالقوه

دو دستگاهی که در این استان موجود است، در بیمارستان‌های دولتی قرار دارد ( $q = 2$ ). فرض کنید که یک شرکت خصوصی می‌خواهد یک دستگاه سی‌تی‌اسکن جدید را در استان تأسیس کند؛ بنابراین، تعداد کل تسهیلاتی که در استان وجود خواهد داشت، به سه عدد می‌رسد ( $M = 3$ ). طبق قرارداد بین بیمارستان‌ها، آن‌ها می‌توانند در صورت ایجاد اختلال در تسهیلاتشان، بیماران خود را به نزدیک‌ترین بیمارستانی که دارای آن تسهیل است، ارجاع دهند.

هزینه حمل‌ونقل برای هر مشتری، به صورت احتمالی در نظر گرفته شده است؛ بدین صورت که با احتمال  $0/9$ ،  $0/2$  واحد پولی و با احتمال  $0/1$ ،  $0/5$  واحد پولی است.

یک تسهیل قرار داد. محدودیت ۲۸ امکان انتخاب یک تسهیل را به عنوان تسهیل پشتیبان که به تازگی مستقر شده است، بررسی می‌کند. محدودیت ۲۹ تأکید می‌کند که هر تسهیل را نمی‌توان به عنوان تسهیل پشتیبان خودش انتخاب کرد. محدودیت ۳۰ مربوط به واریانس هزینه در تابع هدف است. محدودیت‌های ۳۱ تا ۳۶ نشانگر متغیرهای به کاررفته در مسئله هستند.

به دلیل اینکه مدل ما دو تابع هدفه است برای حل مسئله از روش  $L-p$  متریک استفاده است. این روش به دنبال کمینه‌سازی انحرافات توابع هدف از مقدار بهینه آن‌هاست.

$$(37) \quad \text{Minimize} \left\{ \sum_{j=1}^k \gamma_j \left[ \frac{f_j(x^*) - f_j(x)}{f_j(x^*)} \right]^p \right\}^{1/p}$$

s.t.

$$X_\alpha, X_\alpha = \{x / g(x) \leq b_h, h = 1, 2, \dots\}$$

که در آن،  $\lambda_j$  بیانگر درجه اهمیت (وزن) برای تابع هدف  $j$ ام است.  $1 \leq p \leq \infty$  پارامتر مشخص‌کننده خانواده  $L-p$  است. ارزش  $p$  مشخص‌کننده درجه تأکید بر انحرافات موجود است؛ به گونه‌ای که هر چه مقدار  $p$  بزرگ‌تر باشد، تأکید بیشتری بر بزرگ‌ترین انحراف خواهد بود [۲۳].

## مطالعه موردی

کاربرد مدل ریاضی ارائه‌شده، در قالب یک مطالعه موردی خاص بیان می‌شود. هدف در اینجا، بهبود دسترسی به دستگاه سی‌تی‌اسکن در استان یزد است.

یزد با مساحت ۱۳۱،۵۷۵ کیلومترمربع، چهارمین استان وسیع ایران است. این استان دارای ۱۰ شهرستان با جمعیت نزدیک به ۱،۰۰۴،۷۷۰ نفر است.

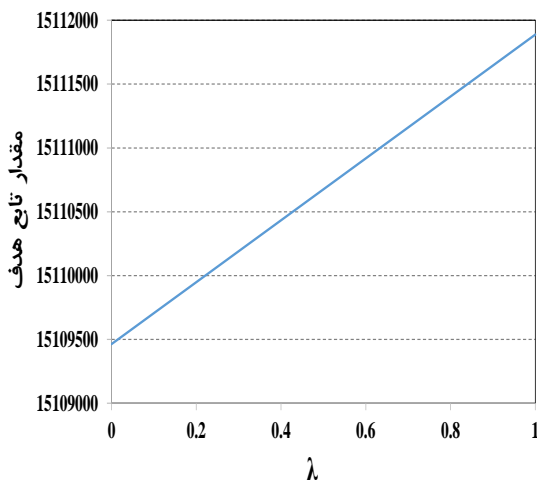
تا آنجاکه امکان داشت، داده‌های معتبر برای این مسئله جمع‌آوری شدند. دو مرکز سی‌تی‌اسکن در شهرستان‌های یزد و میبد وجود دارد. به این ترتیب، ۸ شهرستان دیگر به عنوان گره‌های بالقوه برای استقرار دستگاه سی‌تی‌اسکن جدید موجود است. براساس شرایط، جاده‌ها در استان یزد





شکل ۳. جواب بهینه مطالعه موردی

برای تحلیل حساسیت، دو پارامتر  $\lambda$  و  $\omega$  بررسی می‌شود. همچنین تبادل و معاوضه‌ای بین هزینه (استواری جواب) و میزان ناموجه بودن محدودیت کنترل (استواری مدل) به ازای  $\omega$  های مختلف صورت گرفته است. مطابق شکل ۴، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار تابع هدف هزینه، با افزایش مقدار  $\lambda$  افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، میزان تابع هدف، به پارامتر وزنی واریانس حل ( $\lambda$ ) حساس است و تغییرهای آن، بر تابع هدف تأثیر زیادی دارد؛ بنابراین، تعیین مناسب و کارآمد این پارامتر، کیفیت جواب حل را به‌اندازه قابل توجهی بهبود می‌بخشد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، افزایش تابع هدف نسبت به پارامتر  $\lambda$ ، یک افزایش خطی با شیب ثابت است.



شکل ۴. نمودار تحلیل حساسیت پارامتر  $\lambda$

هزینه ایجاد راه جدید یا بهبود راه موجود به ازای هر کیلومتر و براساس کیفیت جاده و راه، از این قرار است که برای ایجاد راه جدید ۲۵۰,۰۰۰ واحد پولی، برای بهبود راه‌ها با کیفیت کم به بالا و متوسط به بالا به ترتیب ۸۰۰۰ واحد پولی و ۴۵۰۰ واحد پولی بودجه مورد نیاز است. همچنین شایان ذکر است که برای راه‌هایی که کیفیت بالا دارند، نیازی به صرف هزینه نیست و در نتیجه هزینه آن‌ها صفر است. هزینه‌های ثابت بازکردن تسهیل، ۳۵۰,۰۰۰ واحد پولی است. هر مرکز اقامت به‌عنوان گره تقاضا در نظر گرفته می‌شود و مقدار تقاضا در سه سناریو به صورت ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جمعیت هر شهر و با احتمال یکسان برای هر سناریو در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، براساس قاعده ضرب، تعداد کل سناریوها در این مسئله ۶ است ( $2 \times 3 = 6$ ). به‌علت محدودیت مقاله، بقیه پارامترها در اینجا ذکر نشده‌اند.

مسئله به‌وسیله نرم‌افزار GAMS و حل‌کننده CPLEX حل شده و نتایج در شکل ۳ نمایش داده شده است. براساس شکل ۲، مقدار  $Z_{3,2}$ ،  $Z_{4,2}$  و  $Z_{4,3}$  یک می‌شود. این بدان معناست که مکان بهینه برای تسهیل شرکت واردشونده، گره ۳ یعنی شهرستان صدوق است. به‌علاوه تسهیل واقع شده در ۲، ۳ و ۴ به ترتیب تسهیل پشتیبان تسهیل واقع شده در گره‌های ۴، ۳ و ۲ است. بنا بر جواب به‌دست‌آمده، بیماران شهرستان ۱ به شهرستان ۲، بیماران شهرستان‌های ۵ و ۶ و ۷ به شهرستان ۴ و بیماران شهرستان‌های ۸ و ۹ و ۱۰ به شهرستان ۳ تخصیص داده می‌شوند. علاوه بر ۶ مسیری که کیفیت بالا دارند، کیفیت جاده‌های بین گره‌های ۹ و ۸، و نیز گره‌های ۶ و ۵ باید از سطح متوسط به بالا ارتقا یابد ( $X_{9,8} = 1 : X_{5,6} = 1$ ). همچنین کیفیت مسیر بین گره‌های ۲ و ۳ باید از سطح پایین به سطح بالا ارتقا پیدا کند ( $X_{3,2} = 1$ ). به‌علاوه اینکه مسیر باید گره‌های ۲ و ۴ ایجاد شود ( $X_{2,4} = 1$ ).

همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، در شرایط عادی برای همه مراکز سلامت جدید و موجود واقع شده، بیماران باید از برخی از شهرها، به‌طور مستقیم به شهرهایی که مراکز سلامت در آن مستقر شده‌اند، انتقال یابند. به‌هرحال، بیماران از شهرهای دیگر باید از طریق شهرهای میانی، به مراکز سلامت در شهرهای از پیش تعیین شده منتقل شوند.

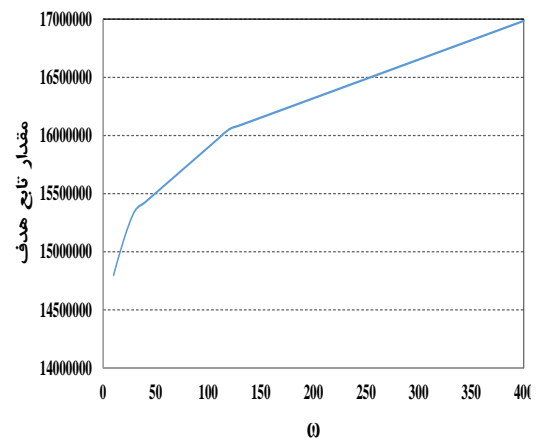
مطابق شکل ۶، بهترین مقدار  $\omega$  را می‌توان برابر ۳۰ در نظر گرفت؛ زیرا با پذیرفتن تنها ۶ درصد هزینه اضافی - نسبت به حالتی که  $\omega = 0$  است - ۸۴ درصد از میزان نقض محدودیت کنترل کاسته می‌شود.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو تابع هدفه، برای مسئله مکان‌یابی تسهیلات - طراحی شبکه در محیط رقابتی در شرایط عدم قطعیت و اختلال در تسهیل ارائه شد. توابع هدف در این مدل، شامل کمینه‌کردن هزینه‌ها و بیشینه‌کردن جذابیت تسهیل برای مشتریان است. همچنین در این مدل، تقاضای مشتریان و هزینه حمل‌ونقل، به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شد. برای مقابله با عدم قطعیت، از روش استوار مولوی - که مبتنی بر سناریو است - استفاده شد. همچنین به دلیل اینکه امکان خرابی و از دسترس خارج شدن تسهیلات وجود داشت، برای افزایش قابلیت اطمینان آن‌ها، تسهیل پشتیبان به کار گرفته شد. از سوی دیگر، به دلیل اینکه مدل به صورت دو تابع هدفه بود، تک‌هدفه کردن مدل به روش L-P متریک انجام گرفت. در نهایت برای نشان دادن کارایی مدل، مطالعه‌ای موردی در زمینه مکان‌یابی دستگاه سی‌تی‌اسکن در استان یزد مبنا قرار گرفت. به علاوه برای فراهم کردن درک روشنی از مدل، آنالیز حساسیت روی پارامترهای کلیدی مسئله انجام شد.

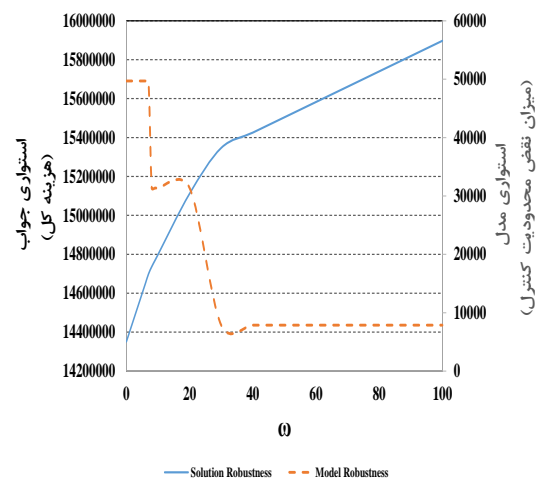
با توجه به اینکه با افزایش تعداد سناریوها، مسئله NP-hard می‌شود، از جمله موضوعاتی که می‌توان برای پژوهش‌های آینده به آن اشاره کرد، این است که برای حل مسئله، از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری مانند جست‌وجوی ممنوع (TS)، بهینه‌سازی ذرات (PSO) و ... استفاده شود. همچنین می‌توان پارامترهای مسئله را به صورت فازی یا خاکستری در نظر گرفت و مسئله را بار دیگر بررسی کرد.

شکل ۵ تغییرات رویه مقدار تابع هدف هزینه را براساس مقادیر متفاوت  $\omega$  نشان می‌دهد. مطابق شکل، هنگامی که مقدار  $\omega$  افزایش می‌یابد، مقدار تابع هدف نیز بیشتر می‌شود. شایان ذکر است با افزایش مقدار  $\omega$ ، مقدار تابع هدف، کمتر افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش  $\omega$ ، شیب افزایش تابع هدف کمتر می‌شود.



شکل ۵. نمودار تحلیل حساسیت پارامتر  $\omega$

معاوضه بین استواری جواب و استواری مدل، به ازای مقادیر مختلف  $\omega$  در شکل ۶ نشان داده شده است. این معاوضه، به تصمیم‌گیرندگان برای تعیین وزن مناسب  $\omega$  کمک می‌کند. براساس شکل ۶، با افزایش مقدار  $\omega$ ، مقدار هزینه کل که نشان‌دهنده استواری جواب است افزایش می‌یابد؛ در حالی که مقدار تقاضاهای برآورده نشده که نشان‌دهنده استواری مدل است، کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش بسیار زیاد وزن  $\omega$ ، این مقدار (مقدار تقاضاهای برآورده نشده) به صفر میل می‌کند. این یافته با نتایج مولوی و رژی‌نسکی هم‌راستا است [۲۴].



شکل ۶. معاوضه بین استواری مدل و استواری جواب

## مراجع

1. Daskin, M. S., Hurter, A. P., and VanBuer, M. G. (1993). "Toward an integrated model of facility location and transportation network design", *The Transportation Center*, Northwestern University.
2. JabalAmeli, M. S., and Mortezaei, M. (2011). "A hybrid model for multi-objective capacitated facility location network design problem", *International Journal of Industrial Engineering Computations*, Vol. 2, No. 3, PP. 509–524.
3. Drezner, Z., and Wesolowsky, G. O. (2003). "Network design: selection and design of links and facility location", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 37, No. 3, PP. 241–256.
4. Rahmaniani, R., and Ghaderi, A. (2013). "A combined facility location and network design problem with multi-type of capacitated links", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 9, PP. 6400–6414.
5. Rahmaniani, R., and Ghaderi, A. (2015). "An algorithm with different exploration mechanisms: Experimental results to capacitated facility location/network design problem", *Expert Systems with Applications*, Vol. 42, No. 7, PP. 3790–3800.
6. Shishebori, D. (2015). "Study of facility location-network design problem in presence of facility disruptions: A case study", *IJE TRANSACTIONS A: Basics*, Vol. 28, No. 1, PP. 97–108.
7. Lim, M. et al. (2009). "Facility location decisions in supply chain networks with random disruption and imperfect information", *Working paper, Department of Business Administration, University of Illinois*, Vol. 57, No. 1, PP. 58–70.
8. Jabbarzadeh, A. et al. (2012). "Designing a supply chain network under the risk of disruptions", *Mathematical Problems in Engineering*.
9. Shishebori, D., and Jabalameli, M. S. (2013). "Improving the efficiency of medical services systems: A new integrated mathematical modeling approach", *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2013.
10. Shishebori, D., Snyder, L., and Jabalameli, M. (2014). "A reliable budget-constrained FL/ND problem with unreliable facilities", *Networks and Spatial Economics*, Vol. 14, No. 3–4, PP. 549–580.
11. Soltani-Sobh, A., Heaslip, K., Scarlatos, P., and Kaiser, E. (2016). "Reliability based pre-positioning of recovery centers for resilient transportation infrastructure", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, No. 19, PP. 324–333.
12. Rosa, V. D. et al. (2014). "Robust capacitated facility location model for acquisitions under uncertainty", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 72, PP. 206–216.
13. An, Y. et al. (2014). "Reliable p-median facility location problem: Two-stage robust models and algorithms", *Transportation Research Part B*, Vol. 64, PP. 54–72.
14. Gülpınar, N., Pachamanova, D., and Çanakoglu, E. (2013). "Robust strategies for facility location under uncertainty", *European Journal of Operational Research*, Vol. 225, PP. 21–35.
15. Shishebori, D., and Yousefi Babadi, A. (2015). "Robust and reliable medical services network design under uncertain environment and system disruptions", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 77, PP. 268–288.
16. Wang, X., and Ouyang, Y. (2013). "A continuum approximation approach to competitive facility location design under facility disruption risks", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 50, PP. 90–103.
17. Zarrinpoor, N., and Seifbarghy, M. (2011). "A competitive location model to obtain a specific market share while ranking facilities by shorter travel time", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 5–8, PP. 807–816.

18. Shiode, S., Yeh, K. Y., and Hsia, H. C. (2012). "Optimal location policy for three competitive facilities", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 62, No. 3, PP. 703–707.
19. Blanquero, R. et al. (2016). "P-facility Huff location problem on networks", *European Journal of Operational Research*, Vol. 255, No. 1, PP. 34–42.
20. Huff, D. L. (1964). "Defining and estimating a trading area", *Journal of Marketing*, Vol. 28, PP. 34–38.
21. Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., and Zenios, S. A. (1995). "Robust optimization of large-scale systems", *Operations Research*, Vol. 43, No. 2, PP. 264–281.
22. Yu, C. S., and Li, H. L. (2000). "A robust optimization model for stochastic logistic problems", *International journal of Production Economics*, Vol. 64, No. 1, PP. 385–397.
23. Asgharpour, M. J. (1998). *Multiple Criteria Decision Making*, 2<sup>nd</sup> Ed., Vol. 1, Tehran University Publishing, Tehran.
24. Mulvey, J. M., and Ruszczyński, A. (1995). "A new scenario decomposition method for large-scale stochastic optimization", *Operations Research*, Vol. 43, No. 3, PP. 477–490.

## پیوست

جدول ۱. پراکندگی جمعیت در استان یزد به تفکیک شهرستان

نام شهرستان	یزد	ابركوه	اردكان	صندوق	بافق	تفت	مهریز	میبد	خاتم	بهباد
جمعیت (نفر)	۵۸۲,۶۸۲	۴۶,۶۴۶	۷۷,۷۵۸	۳۳,۱۹۲	۴۱,۸۷۶	۴۵,۱۴۵	۴۴,۱۲۶	۸۲,۸۴۰	۳۵,۱۵۸	۱۵,۳۳۱

جدول ۲. فواصل بین شهرستان‌های استان یزد

	یزد	ابركوه	اردكان	صندوق	بافق	تفت	مهریز	میبد	خاتم	بهباد
یزد	-	۱۴۰	۶۰	۲۰	۱۲۰	۲۰	۳۰	۵۰	۲۴۰	۲۰۹
ابركوه	۱۴۰	-	۲۰۰	۱۶۰	۲۶۰	۱۲۰	۱۶۰	۱۹۰	۲۷۵	۳۴۲
اردكان	۶۰	۲۰۰	-	۴۰	۱۸۰	۸۰	۹۰	۱۰	۳۰۰	۲۴۶
صندوق	۲۰	۱۶۰	۴۰	-	۱۴۰	۴۰	۵۰	۳۰	۲۶۰	۲۷۷
بافق	۱۲۰	۲۶۰	۱۸۰	۱۴۰	-	۱۴۰	۱۳۰	۱۷۰	۳۴۰	۸۶
تفت	۲۰	۱۲۰	۸۰	۴۰	۱۴۰	-	۵۰	۷۰	۲۶۰	۲۱۶
مهریز	۳۰	۱۶۰	۹۰	۵۰	۱۳۰	۵۰	-	۸۰	۲۱۰	۲۰۶
میبد	۵۰	۱۹۰	۱۰	۳۰	۱۷۰	۷۰	۸۰	-	۲۹۰	۲۵۶
خاتم	۲۴۰	۲۷۵	۳۰۰	۲۶۰	۳۴۰	۲۶۰	۲۱۰	۲۹۰	-	۱۹۵
بهباد	۲۰۹	۳۴۲	۲۴۶	۲۷۷	۸۶	۲۱۶	۲۰۶	۲۵۶	۱۹۵	-

## واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Facility Location Network Design Problem
  2. Capacitated Facility Location Network Design Problem
  3. Mix Integer Nonlinear Programing
  4. Stochastic Facility Location
  5. Tractable Robust Approach
  6. Design Variables
  7. Control Variables
  8. Structural Constraints
  9. Control Constrains
-