

الگوریتم ممتیک برای طراحی شبکه هاب ظرفیت محدود با شرایط نبود قطعیت تقاضا و اختلال

احسان نیک‌بخش^۱ و سید حسام‌الدین ذگردی^{۲*}

دانشجوی دکتری مهندسی صنایع - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

دانشیار مهندسی صنایع - بخش مهندسی صنایع - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۹۲/۷/۲۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۹۲/۱۰/۲۱، تاریخ تصویب ۹۲/۱۲/۲۴)

چکیده

مسائل مکان‌یابی هاب، یکی از توسعه‌های مسایل مکان‌یابی سنتی بوده که کاربردهای متعددی در طراحی شبکه‌های حمل و نقل، پستی، و مخابراتی دارند. با وجود توجه مشهود محققان به این مسایل در طی سالیان اخیر، تحقیق‌های اندکی در زمینه طراحی شبکه‌های هاب با شرایط نبود قطعیت و اختلال انجام شده است. در این تحقیق، مسئله مکان‌یابی هاب با ظرفیت محدود و تخصیص یگانه با شرایط نبود قطعیت تقاضای جریان و اختلال در ظرفیت تسهیلات، بررسی شده و ضمن پیشنهاد یک مدل ریاضی بر پایه مفهوم بودجه نبود قطعیت، یک روش حل ترکیبی بر پایه الگوریتم ممتیک و جستجوی همسایگی متغیر ارائه شده است. نتایج محاسباتی، حاکی از دقت بالای روش حل پیشنهادی در حل مسایل نمونه است. همچنین، نتایج به دست آمده از آزمایش‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای بررسی اثر نبود قطعیت بر عملکرد پیکربندی‌های مختلف شبکه هاب، نشان‌دهنده اهمیت در نظرگیری شرایط نبود قطعیت و اختلال در هنگام طراحی شبکه‌های هاب هستند.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی هاب، نبود قطعیت، اختلال، بهینه‌سازی استوار، الگوریتم ممتیک، جستجوی همسایگی

متغیر

مقدمه

هوایی-دریایی-زمینی، امکان وقوع اختلال^۱ در عملکرد آنها به دلایل مختلفی از قبیل خرابی تجهیزات در شبکه‌های کامپیوتری-مخابراتی و نیز نبود دسترسی به یک یال انتقال یا تسهیل هاب در شبکه‌های حمل و نقل هوایی-دریایی به دلیل شرایط بد و اختلال‌های آب و هوایی، وقوع سوانح طبیعی یا سوانح تروریستی است. همچنین، این شبکه‌ها همانند انواع دیگر سیستم‌های حمل و نقل در معرض نبود قطعیت^۲ پارامترهای تعیین‌کننده خود مانند هزینه‌های ثابت، هزینه‌های حمل و نقل و تقاضا هستند. از این رو، در نظرگیری اختلال و نبود قطعیت در بهبود و حفظ سطح شبکه‌های هاب اهمیت زیادی دارد.

در ادامه مروری بر مفاهیم نبود قطعیت و اختلال و پیشینه تحقیق مرتبط در زمینه مسایل مکان‌یابی هاب می‌شود. برای آشنایی با آخرین تحقیقات در زمینه مدل‌های مکان‌یابی هاب به [۴، ۵] رجوع شود.

یکی از خصیصه‌های شبکه‌های هاب، امکان رخ دادن اختلال در عملکرد آنها است. اختلال‌ها گروهی از انواع

تسهیل هاب، نوع خاصی از تسهیلات است که به عنوان نقطه انتقال، سوئیچ و مرتب‌سازی در سیستم‌های توزیع چند به چند انجام وظیفه می‌کند. بر خلاف تسهیلات متداول در مکان‌یابی که هر تسهیل به طور مستقیم به نقاط مبداء-مقصد خدمت‌رسانی می‌کند، تسهیلات هاب با متمرکز کردن جریان بین مبادی و مقاصد از صرفه‌های اقتصادی حمل و نقل انبوه بهره می‌جویند. مسئله مکان‌یابی هاب که برای اولین بار در دهه ۱۹۸۰ [۱] مطرح شده است را می‌توان مکان‌یابی هاب و تخصیص تقاضای نقاط شبکه به این تسهیلات هاب به نحوی دانست که ترافیک بین نقاط مبداء-مقصد با توجه به یک معیار عملکرد به صورت بهینه هدایت شود [۲]. از جمله کاربردهای شبکه‌های هاب، می‌توان به طراحی شبکه‌های حمل و نقل (مسافری/باری در شبکه‌های هوایی-دریایی-زمینی)، پست [۳] و مخابراتی/کامپیوتری اشاره کرد [۴].

یکی از خصوصیات مهم شبکه‌های مبتنی بر تسهیلات هاب مانند شبکه‌های مخابراتی و حمل و نقل

ریسک هستند که به صورت غیر قابل پیش‌بینی جریان فعالیت را در شبکه‌ها مانند شبکه‌های مخابراتی و زنجیره تأمین مختل می‌کنند. اختلال‌ها در شبکه‌های مخابراتی و زنجیره‌های تأمین، دلایل مختلفی دارند که از جمله می‌توان به اشکالات فنی، بحران‌های اقتصادی، بلایای طبیعی، جنگ و حملات تروریستی و اعتصاب‌های کارگری اشاره کرد [۶]. پس از وقوع اختلال در یک شبکه، منابع و زمان بسیار کمی برای بازسازی و ترمیم زیرساخت‌های استراتژیک شبکه وجود دارد. با این حال بررسی‌ها نشان داده است که سرمایه‌گذاری اضافی هنگام طراحی اولیه یک شبکه می‌تواند منجر به عملکرد مطلوب زنجیره تأمین هنگام وقوع اختلال شود [۷].

طراحی شبکه‌های کامپیوتری هاب p -تسهیلاتی با هدف بهینه‌سازی پایایی کل شبکه و در نظرگیری تخصیص‌های یگانه و چندگانه برای اولین بار توسط کیم و اوکلی [۸] بررسی شده است. در این تحقیق، پایایی هر مسیر در شبکه به صورت حاصلضرب ضریب پایایی یال‌های موجود روی مسیر در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی این مسئله، دو مدل حداکثر پایایی p -تسهیلاتی و پراکندگی اجباری p -تسهیلاتی ارائه شده است. در پایان، محققان، با استفاده از نرم‌افزار CPLEX مدل‌های پیشنهادی را حل کرده‌اند. در تحقیقی دیگر، کیم [۹] این مسئله را در حالتی که امکان نصب q تجهیزات تقویتی وجود داشته باشد، بررسی و عملکرد چندین توسعه مدل پیشنهادی خود را با شرایط مختلف بررسی کرده‌اند. فاضل زرنندی و همکاران [۱۰] نیز مسئله مکان‌یابی هاب پوششی را با شرایط قطعی با در نظرگیری تسهیلات پشتیبان و پراکندگی آنها بررسی کرده و مسایل نمونه را با سناریوهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار CPLEX حل کرده‌اند. سرانجام، پرورش و همکاران [۱۱] مسئله مکان‌یابی هاب p -تسهیلاتی با اختلال‌های عمدی را به وسیله برنامه‌ریزی دو سطحی مدل کرده و مدل حاصل را با استفاده از تبرید شبیه‌سازی شده حل کرده‌اند. خصیصه مهم دیگر شبکه‌های هاب، نبود قطعیت در پارامترهای طراحی این شبکه‌ها است. به دلیل تغییرات ذاتی و گاهی شدید سیستم‌های عملیاتی، بسیاری از پارامترهای این شبکه‌ها خصوصیات تصادفی و غیرقطعی دارند. با این حال بسیاری از مدل‌های توسعه‌یافته برای شبکه‌های هاب خصوصیات قطعی دارند، از این رو توسعه

مدل‌های بهینه‌سازی با شرایط نبود قطعیت برای در نظرگیری شرایط تصادفی و غیرقطعی اهمیت بسیار زیادی دارد. با وجود توجه زیاد محققان به بهینه‌سازی مسایل مکان‌یابی هاب با شرایط ریسک با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی [۱۲-۱۵] و ابهام با استفاده از بهینه‌سازی فازی [۱۶-۲۰]، توجه کمی به مدل‌های بهینه‌سازی استوار برای بهینه‌سازی بدترین حالت ممکن و همیشه موجه شده است. در یکی از این تحقیقات، مسئله چند هدفه مکان‌یابی هاب استوار با شرایط نبود قطعیت تقاضا و هزینه حمل و نقل، بررسی شده و یک روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارائه شده است [۲۱]. توابع هدف در نظر گرفته شده به کمینه‌سازی هزینه سیستم در هر یک از سناریوهای ممکن اختصاص دارند. در تحقیقی دیگر [۲۲]، مدل کمینه‌سازی، بدترین حالت ممکن برای مسئله مکان‌یابی هاب با هزینه‌های گشایش غیرقطعی در نظر گرفته شده و تعدادی مسایل نمونه با استفاده از نرم‌افزار CPLEX حل شده‌اند. سرانجام، ماکویی و همکاران [۲۳] مسئله سه هدفه مکان‌یابی هاب p -تسهیلاتی با ظرفیت محدود را با شرایط نبود قطعیت تقاضا و زمان پردازش کالا با رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریو-محور حل کرده‌اند. تابع هدف پیشنهادی به کمینه‌سازی مجموع هزینه گشایش تسهیلات و حمل و نقل، حداکثر فاصله طی شده توسط جریان‌های تقاضا و مجموع زمان پردازش کالاها در تسهیلات هاب می‌پردازند. در این تحقیق، مسئله مکان‌یابی هاب با ظرفیت محدود با شرایط نبود قطعیت تقاضا و اختلال جزئی ظرفیت تسهیلات هاب مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرض می‌شود مقادیر تقاضای جریان بین گره‌های مبدا و مقصد و نیز مقدار ظرفیت تسهیلات هاب پارامترهای غیرقطعی بازه‌ای باشند. مقصود از پارامتر غیرقطعی، پارامتری است که قطعی نبوده و هیچ توزیع احتمال یا تابع عضویت فازی برای نمایش آن وجود نداشته باشد. همچنین منظور از پارامتر غیرقطعی بازه‌ای، پارامتری غیرقطعی است که نبود قطعیت آن به وسیله یک بازه^۳ (به بیان دیگر، یک حداقل و یک حداکثر برای مقدار پارامتر) نمایش داده می‌شود. کاربرد این مسئله در طراحی شبکه‌های مخابراتی است که میزان تقاضای جریان اطلاعات و نیز پایایی عملکرد تسهیلات هاب، پارامترهایی غیرقطعی هنگام طراحی محسوب می‌شوند. در این سیستم‌ها، منبع نبود قطعیت

مقصد مد نظر، در هاب دوم تجمیع شده و به آن مقصد ارسال می‌شوند.

در این تحقیق، فرض می‌شود فضای جواب، گسسته و محدود بوده و می‌توان آن را به وسیله یک گراف کامل شامل گره‌های مبداء و مقصد و یال‌های متصل‌کننده گره‌ها به یکدیگر نمایش داد. در گراف فضای جواب، همه تسهیلات هاب به یکدیگر متصل بوده و هر نقطه مبداء (مقصد) به طور دقیق به یک تسهیل هاب متصل است (تخصیص یگانه). همچنین، در گراف فضای جواب هیچ دو گره غیر هابی به طور مستقیم به یکدیگر وصل نیستند (یعنی حمل و نقل بین دو نقطه غیر هاب فقط از طریق گذر از یک یا دو تسهیل هاب امکان‌پذیر است).

ظرفیت هر تسهیل هاب مقداری معین و محدود است و تحت تأثیر رخ دادن پیشامد اختلال است. فرض می‌شود اثر اختلال روی عملکرد تسهیلات، ماهیت اختلال کامل و قطعی نداشته و فقط درصدی از ظرفیت هر تسهیل را از کار می‌اندازد. به این ترتیب، اثر رخ دادن اختلال بر ظرفیت تسهیل هاب مستقر در مکان بالقوه تسهیل هاب k ام، \bar{a}_k ، به صورت پارامتری غیرقطعی بازه‌ای بین صفر و حد بالای اثر اختلال، \hat{a}_k ، در تسهیل هاب k ام در خواهد آمد. مقدار \bar{a}_k نشان‌دهنده درصد ظرفیت از دست رفته تسهیل هاب k ام است. همچنین، مقدار تقاضای حمل و نقل بین هر دو نقطه مبداء و مقصد، مقداری غیرقطعی مانند \tilde{h}_{ij} و متعلق به بازه $[h_{ij} - \hat{h}_{ij}, h_{ij} + \hat{h}_{ij}]$ باشد. سرانجام، حداکثر تعداد پارامترهای غیرقطعی متعلق به تابع هدف و محدودیت‌ها که نوسان می‌کنند (بودجه نبود قطعیت) مقادیری مشخص و از پیش تعیین شده توسط تصمیم‌گیرنده هستند. هدف سیستم کمینه‌سازی مجموع هزینه گشایش تسهیلات و هزینه‌های حمل و نقل با شرایط ذکر شده است.

مدل‌سازی ریاضی

در این بخش، مدل ریاضی مسئله مکان‌یابی هاب با ظرفیت محدود با شرایط نبود قطعیت تقاضا و اختلال ارائه می‌شود. بنابراین در این بخش به ترتیب، نمادهای مورد نیاز برای ایجاد مدل ریاضی، مدل ریاضی مسئله در حالت نبود قطعیت و اختلال و شیوه ایجاد هم‌تای استوار مدل پیشنهادی ارائه می‌شوند.

تقاضا نوسانات ناشی از تغییرات تقاضای کاربران و منبع اختلال جزئی در عملکرد تسهیلات از کار افتادن تعدادی نامعین از تجهیزات مستقر در هر تسهیل هاب است. طبق مرور پیشینه تحقیق، تا کنون این مسئله در پیشینه تحقیق مسایل مکان‌یابی هاب مورد بررسی قرار نگرفته است. برای مواجهه با این مسئله، یک مدل ریاضی بهینه‌سازی استوار بازه‌ای مبتنی بر بودجه نبود قطعیت و یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر الگوریتم ممتیک^۴ و جستجوی همسایگی متغیر^۵ ارائه می‌شود. نتایج محاسباتی حاکی از اهمیت و لزوم در نظرگیری اثر نبود قطعیت و اختلال هنگام طراحی شبکه‌های هاب و نیز کارآمدی روش حل پیشنهادی است.

ساختار ادامه این مقاله به شرح زیر خواهد بود. ابتدا تعریف مسئله تحقیق و مفروضات اصلی آن ارائه می‌شوند. آنگاه، ابتدا مدل ریاضی کلی مسئله در حالت نبود قطعیت بدون در نظرگیری شیوه نمایش نبود قطعیت و سپس شیوه عمومی ساخت مدل هم‌تای استوار برای مسایل بهینه‌سازی با پارامترهای غیرقطعی بازه‌ای با شرایط محدود بودن تعداد پارامترهای غیرقطعی نوسان‌کننده تشریح می‌شوند. در ادامه، شیوه حل مسئله تحقیق با استفاده از یک روش حل مبتنی بر الگوریتم ممتیک و جستجوی همسایگی متغیر ارائه می‌شود. در بخش نتایج محاسباتی، تأثیر نبود قطعیت و اختلال بر عملکرد شبکه‌های هاب و کارایی روش حل پیشنهادی، بررسی می‌شود. سرانجام، در بخش پایانی از تحقیق نتیجه‌گیری لازم به عمل آمده و زمینه‌های تحقیقاتی بعدی ذکر می‌شوند.

تعریف مسئله

در این تحقیق، مسئله طراحی یک شبکه هاب با ظرفیت محدود با شرایط نبود قطعیت تقاضا و اختلال ظرفیت تسهیلات هاب بررسی می‌شود. در این شبکه، کالای مرتبط با تقاضای حمل و نقل بین هر جفت مبداء و مقصد، ابتدا از مبداء جمع‌آوری شده و به هاب اول فرستاده می‌شود. پس از انجام عملیات‌های مرتبط مانند مرتب‌سازی و تجمیع در تسهیل هاب اول، کالاهای تجمیع شده از مبدای مختلف برای مقاصد مختلف به تسهیل هاب دوم فرستاده می‌شوند. سرانجام، همه کالاهای ارسالی به

نمادگذاری

$$\text{Minimize } \sum_{k \in K} f_k Z_{kk} +$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} \sum_{m \in K} \tilde{h}_{ij} (\chi C_{ik} + \alpha C_{km} + \sigma C_{mj}) Y_{ij}^{km} \quad (1)$$

مقید به محدودیت‌های:

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in K} Y_{ij}^{km} = 1 \quad \forall i, j \in I \quad (2)$$

$$Z_{ik} \leq Z_{kk} \quad \forall i \in I \& \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{m \in K} Y_{ij}^{km} = Z_{ik} \quad \forall i, j \in I \& \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} Y_{ij}^{km} = Z_{jm} \quad \forall i, j \in I \& \forall m \in K \quad (5)$$

$$\sum_{m \in K} \sum_{i, j \in I} \tilde{h}_{ij} Y_{ij}^{km} \leq (1 - \tilde{a}_k) \theta_k W_k \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$Z_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \& \forall k \in K \quad (7)$$

$$Y_{ij}^{km} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in I \& \forall k, m \in K \quad (8)$$

در این مدل، تابع هدف (۱) سعی در کمینه‌سازی مجموع هزینه گشایش تسهیلات و هزینه حمل و نقل دارد. محدودیت (۲) باعث تخصیص جریان تقاضای بین یک جفت مبدا و مقصد به طور دقیق به یک یا دو تسهیل هاب می‌شود. محدودیت (۳) تضمین می‌کند تقاضای یک گره غیره هاب فقط در صورتی می‌تواند به یک گره هاب تخصیص یابد که آن گره هاب انتخاب شده باشد (دقت کنید تخصیص تقاضای یک گره به خودش معادل است با انتخاب آن گره به عنوان هاب). محدودیت‌های (۴) و (۵) باعث می‌شوند مقدار متغیر جریان تقاضای بین یک جفت مبدا و مقصد گذرنده از دو تسهیل هاب مستقر در دو مکان بالقوه وابسته به تخصیص گره‌های مبدا و مقصد به تسهیلهای هاب متناظر با مسیر باشد. محدودیت (۶) ضمن کنترل سقف میزان جریان ورودی به یک تسهیل هاب، اثر اختلال بر میزان ظرفیت آن تسهیل را اعمال می‌کند. سرانجام، محدودیت‌های (۷) و (۸) نوع متغیرهای تصمیم را بیان می‌کنند. این مدل دارای $|K| \left(1 + |I|^2 |K| \right)$ متغیر تصمیم و نیز $|I|^2 + |K| + |I|^2 |K|$ محدودیت کارکردی است. لازم به ذکر است برای به دست آوردن مدل همتای استوار این مدل، می‌توان به سادگی از مدل‌های مختلف موجود در پیشینه تحقیق بهینه‌سازی استوار همچون مدل نبود قطعیت بدترین حالت ممکن [۲۴]، نبود قطعیت بیضوی

نمادهای مورد استفاده برای نمایش پارامترها و متغیرها تصمیم مدل ریاضی پیشنهادی عبارتند از:

I : مجموعه نقاط مبدا و مقصد

K : مجموعه مکان بالقوه تسهیلات هاب (زیر مجموعه‌ای از مجموعه نقاط مبدا و مقصد، I)

f_k : هزینه گشایش تسهیل هاب در مکان بالقوه k ، $k \in K$

θ_k : ظرفیت تسهیل هاب مستقر در مکان بالقوه k ، $k \in K$

\tilde{a}_k : پارامتر غیرقطعی بازه‌ای میزان درصد کاهش ظرفیت تسهیل هاب مستقر در مکان بالقوه k در صورت رخ دادن اختلال در آن تسهیل، $k \in K$

\tilde{h}_{ij} : پارامتر غیرقطعی بازه‌ای تقاضای جریان بین مبدا i و مقصد j ، $i, j \in I$

d_{ik} : مسافت بین گره i و گره k ، $i, k \in I$

C_{ik} : هزینه حمل و نقل بین گره i و گره k ، $i, k \in I$

χ : ضریب صرفه اقتصادی حمل و نقل از یک گره مبدا به یک تسهیل هاب

α : ضریب صرفه اقتصادی حمل و نقل بین دو هاب

δ : ضریب صرفه اقتصادی حمل و نقل از یک تسهیل هاب به یک گره مبدا

Z_{ik} : متغیر صفر و یک نبود تخصیص یا تخصیص تقاضای جریان آغاز شده گره i به تسهیل هاب مستقر در مکان بالقوه k ، $i \in I \& k \in K$

Y_{ij}^{km} : متغیر صفر و یک انتقال یا عدم انتقال جریان بین مبدا i و مقصد j از طریق هاب‌های مستقر در مکان‌های k و m ، $i, j \in I \& k, m \in K$

مدل ریاضی

با توجه به توضیحات ارائه‌شده در بخش تعریف مسئله، مدل ریاضی ۴-اندیسی مسئله مکان‌یابی هاب با ظرفیت محدود و تخصیص یگانه با شرایط نبود قطعیت تقاضا و اختلال به صورت زیر خواهد بود:

قطعیته آن است که احتمال انحراف یافتن بیش از Γ پارامتر قطعی از مقدار اسمی متناظر آن، مقدار بسیار کم و در حد صفر محسوب می‌شود. مقدار بودجه نبود قطعیته که توسط تصمیم‌گیرنده و صاحب مسئله تعیین می‌شود، به میزان محافظه‌کار بودن آنها بستگی دارد و هر چه مقدار آن بزرگ‌تر باشد، مدل قطعی همتای استوار حاصل به رویکرد اول نزدیک‌تر می‌شود. با در نظرگیری توضیحات ذکر شده، در نظرگیری Γ_i به عنوان پارامتری عدد صحیح، و سرانجام تعریف J_i به عنوان مجموعه پارامترهای غیرقطعی سطر i ام ماتریس فناوری، مدل قطعی همتای استوار مسئله (۹-۱۱) به صورت زیر قابل ایجاد خواهد بود [۲۶]:

$$\min c^T x \quad (12)$$

مقید به محدودیت‌های:

$$\sum_j a_{ij} x_j + \max_{\{S_i | S_i \subseteq J_i, |S_i| = \Gamma_i\}} \left\{ \sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij} y_j \right\} \leq \tilde{b}_i \quad \forall i \quad (13)$$

$$x_j \leq y_j \quad \forall j \quad (14)$$

$$x_j, y_j \in \mathbf{R}_+^n \quad \forall j \quad (15)$$

هر چند محدودیت (۱۳) غیر خطی است، ولی می‌توان آن را به سادگی با استفاده از گزاره پیشنهادی در [۲۶] خطی کرد. بنابراین، این مسئله می‌تواند به سادگی با استفاده از روش سیمپلکس حل شود. همچنین، این مدل همتای استوار می‌تواند درون مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح و مختلط گنجانیده شود. در نهایت، شایان ذکر است همراه با میل کردن Γ به سمت صفر، محافظه‌کاری مدل کمتر می‌شود و مدل بهینه‌سازی شبیه به مدل قطعی اسمی می‌شود. از سوی دیگر، همراه با میل کردن Γ به سمت حداکثر تعداد پارامترهای غیرقطعی، مدل همتای استوار شبیه به مدل محافظه‌کارانه بدترین حالت ممکن می‌شود.

روش حل پیشنهادی

در این بخش، یک روش حل ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ممیتیک و جستجوی همسایگی متغیر به عنوان روش جستجوی محلی الگوریتم ممیتیک برای حل مسئله تحقیق ارائه می‌شود. در ادامه توضیحاتی در مورد روش حل پیشنهادی ارائه می‌شود.

[۲۵]، و نبود قطعیته بودجه‌ای [۲۶] استفاده کرد. در بخش بعدی، شیوه به دست آوردن همتای استوار مدل ریاضی (۶-۱) بر پایه مفهوم بودجه نبود قطعیته پیشنهادی برتسیماس و سیم [۲۶] تشریح می‌شود.

شیوه ایجاد مدل همتای استوار

در این بخش شیوه ایجاد مدل همتای استوار بر مبنای یک مدل بهینه‌سازی استوار ارائه می‌شود. بهینه‌سازی استوار روشی در تحقیق در عملیات برای برخورد با شرایطی است که اطلاعات تاریخی کافی برای برآزش توزیع احتمال پارامترهای غیرقطعی مسئله وجود ندارد. در چنین شرایطی، اغلب فقط یک حد پایین و بالا برای توصیف همه حالت‌های ممکن تحقق پارامترهای غیرقطعی وجود دارد. هدف از مدل‌های بهینه‌سازی استوار در مواجهه با ضرایب تابع هدف غیرقطعی، تلاش برای پیدا کردن بهترین راه حلی است که حساس به تغییرات پارامترهای غیرقطعی در تابع هدف نباشد. از طرف دیگر، در صورت وجود ضرایب غیرقطعی در ماتریس فناوری و بردار ضرایب سمت راست، مدل بهینه‌سازی استوار سعی در به دست آوردن راه حلی همیشه موجه برای همه حالت‌های تحقق ممکن برای پارامترهای غیرقطعی دارد. حال مسئله برنامه‌ریزی خطی زیر را با پارامترهای غیرقطعی در تابع هدف، ماتریس فناوری و بردار سمت راست در نظر بگیرید:

$$\min c^T x \quad (9)$$

مقید به محدودیت‌های:

$$\tilde{A}x \leq b \quad (10)$$

$$x \in \mathbf{R}_+^n \quad (11)$$

به دنبال شیوه نمادگذاری برتسیماس و سیم [۲۶]، اگر یک پارامتر غیرقطعی ماتریس فناوری، \tilde{a}_{ij} ، با یک مقدار اسمی، a_{ij} ، و یک مقدار انتقال، \hat{a}_{ij} ، مرتبط باشد، آنگاه پارامتر غیرقطعی \tilde{a}_{ij} را می‌توان به وسیله بازه $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ نمایش داد.

رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر بودجه نبود قطعیته که توسط برتسیماس و سیم [۲۶] پیشنهاد شده است، سعی می‌کند حداکثر تعداد پارامترهای غیرقطعی را که می‌توانند از مقدار اسمی خود انحراف یابند، به مقداری مانند Γ محدود کند. به بیانی ساده، مفهوم بودجه نبود

مرحله اصلی لرزش^۷، جستجوی محلی^۸، و حرکت^۹ دارد (شکل ۲). در مرحله لرزش، بر اساس همسایگی فعلی یک جواب جدید از جواب در دست ایجاد می‌شود. در مرحله جستجوی محلی، سعی می‌شود جواب به دست آمده از مرحله لرزش، تا حد ممکن بهبود داده شود. اگر مقدار تابع هدف جواب نهایی مرحله جستجوی محلی از مقدار تابع هدف جواب در دست (اولیه) بهتر بود، روش به همسایگی اول بازگشته و این فرایند را از ابتدا آغاز می‌کند. چنانچه بهبود در مقدار تابع هدف رخ ندهد، روش همسایگی بعدی را انتخاب کرده و فرایند را تکرار می‌کند. در الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر مورد استفاده در این تحقیق، از روش 3-opt به عنوان روش جستجوی محلی و از دو روش تعویض مجاور و 2-opt به عنوان ساختارهای همسایگی استفاده شده است. نمای کلی فرایند استفاده شده در این تحقیق، بر مبنای این الگوریتم در شکل ۲ آمده است.

جزئیات بقیه اجزای روش حل پیشنهادی بدین ترتیب است:

نمایش جواب: مطابق [۳۰]، هر کروموزوم (جواب) از دو آرایه هاب و آرایه تخصیص، هر یک با اندازه تعداد گره‌های شبکه تشکیل شده است. آرایه صفر و یک هاب، بیانگر انتخاب یا انتخاب نکردن هر یک از گره‌های شبکه به عنوان تسهیل هاب است. همچنین آرایه عدد صحیح تخصیص، نشان‌دهنده چگونگی تخصیص گره‌های غیرهاب به تسهیلات هاب است. برای مثال اگر گره غیر هاب i به گره هاب k تخصیص یابد (مقدار گره‌های i و k در آرایه هاب به ترتیب برابر صفر و یک است)، درایه متناظر در آرایه تخصیص، مقدار k را اختیار می‌کند.

تشکیل جمعیت اولیه: در این تحقیق، تعداد تسهیلات هاب برای $\frac{1}{3}$ اعضای جمعیت اولیه به طور تصادفی مقداری در بازه $[1, \dots, \frac{n}{6}]$ انتخاب می‌شوند. برای $\frac{1}{3}$ بعدی اعضای جمعیت اولیه، تعداد تسهیلات هاب به طور تصادفی از بازه $[\frac{n}{6}, \dots, \frac{n}{4}]$ انتخاب می‌شوند. سرانجام برای باقیمانده اعضای جمعیت اولیه، تعداد تسهیلات هاب از بازه $[\frac{n}{4}, \dots, \frac{n}{2}]$ به طور تصادفی انتخاب می‌شود.

الگوریتم ممتیک، یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت است که برای مسایل بهینه‌سازی پیچیده و بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. ایده اصلی این الگوریتم، به کارگیری یک روش جستجوی محلی در درون ساختار الگوریتم ژنتیک برای بهبود کارایی فرایند تشدید هنگام جستجو است [۲۷]. جستجوی محلی به کارگرفته شده در الگوریتم ممتیک، می‌تواند ضعف روش‌های تکاملی همچون الگوریتم ژنتیک را در تشدید فرایند جستجو رفع کند [۲۸]. الگوریتم ممتیک در ابتدا مجموعه‌ای از جواب‌های اولیه را رمزگذاری می‌کند. آنگاه این الگوریتم میزان مطلوبیت هر یک از جواب‌ها را بر اساس یک تابع برازندگی محاسبه کرده و با استفاده از عملگرهایی چون تقاطع و جهش، جواب‌های جدیدی را تولید می‌کند. در پایان، هر نسل روی مجموعه‌ای از جواب‌های آن نسل، یک جستجوی محلی با هدف تشدید فرایند جستجو انجام می‌شود تا کیفیت جواب‌های بهینه محلی افزایش یابد. سپس زیر مجموعه‌ای از نسل فعلی (مجموعه جواب‌های فعلی، والدین و جواب‌های جدید، فرزندان) بر اساس مفهوم تنازع برای بقا به نسل بعد منتقل می‌شوند. فرایند تولید نسل‌های جدید تا زمان برقرار شدن شرایط توقف ادامه می‌یابد. نمای کلی الگوریتم ممتیک پیشنهادی در شکل ۱ آمده است.

با توجه به ساختار سلسله‌مراتبی تصمیم‌های مسئله و وابستگی سطح دوم (تخصیص) به سطح اول (مکان‌یابی)، اعمال فقط علمگر تقاطع روی آرایه‌های تخصیص نمی‌تواند کافی باشد. دلیل این موضوع آن است که با توجه به نیاز به تعمیر آرایه تخصیص پس از اعمال عملگر تقاطع، احتمال همگرایی آرایه تخصیص به حالت بهینه پایین خواهد بود. بنابراین، اضافه کردن یک روش جستجوی محلی که بتواند آرایه تخصیص را بهبود بدهد، می‌تواند کارایی الگوریتم پیشنهادی را افزایش دهد. در این تحقیق، برای انجام جستجوی محلی در الگوریتم ممتیک پیشنهادی از روش جستجوی همسایگی متغیر [۲۹] استفاده می‌شود.

این روش که بر مبنای تغییر سیستماتیک همسایگی‌ها هنگام جستجو بنا شده است، سعی می‌کند هنگام برخورد با جواب‌های بهینه محلی با استفاده از تغییر همسایگی، امکان فرار از جواب بهینه محلی را به وجود آورد. هر الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر سه

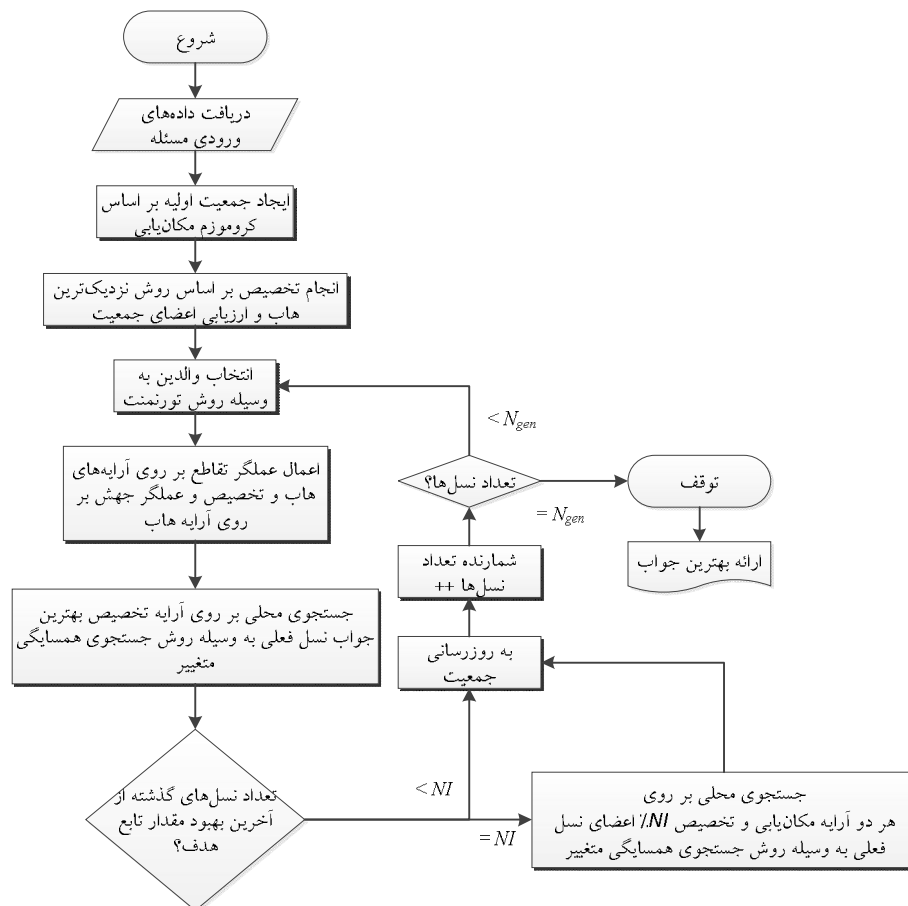
ممکن است تعدادی از جواب‌ها نتوانند شرط محدودیت ظرفیت را برآورده کنند (غیر موجه باشند)، جواب‌های غیر موجه با مقداری بزرگ، مانند BP ، جریمه می‌شوند. در اینجا، BP چهار برابر مقدار تابع هدف مسئله در حالت قطعی قرار داده شده است. لازم به ذکر است با توجه به در نظر گرفتن نبود قطعیت پارامتر تقاضا و اختلال در قالب یک مدل بهینه‌سازی استوار، ارزیابی تابع هدف برای هر جواب یافت شده (شامل آرایه‌های هاب و تخصیص) توسط نرم‌افزار GAMS/CPLEX انجام می‌شود.

جستجوی محلی: در روش پیشنهادی، در پایان هر نسل، روی آرایه تخصیص بهترین جواب جمعیت فعلی، الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر اعمال می‌شود. همچنین چنانچه برای NI نسل متوالی، بهترین مقدار تابع هدف بهبود نیابد، NI اعضای نسل فعلی به طور تصادفی انتخاب شده و الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر روی هر دو آرایه هاب و تخصیص انجام می‌شود.

انتخاب والدین: برای تولید فرزندان جدید از جمعیت فعلی، والدین توسط روش تورنمنت انتخاب می‌شوند. **عملگر تقاطع:** در روش پیشنهادی از عملگر تقاطع دو نقطه‌ای برای هر دو آرایه هاب و تخصیص استفاده می‌شود. عملگر تقاطع بر هر کروموزم با احتمال p_c اجرا می‌شود. پس از اجرای عملگر تقاطع، چنانچه آرایه تخصیص با آرایه هاب منطبق نباشد (تخصیص گره غیر هاب به گره غیر هاب)، موارد نبود انطباق بر اساس تخصیص گره‌های غیر هاب به نزدیک‌ترین هاب رفع می‌شوند.

عملگر جهش: در روش پیشنهادی، هر یک از ژن‌های مربوط به آرایه هاب با احتمال $1 - p_c$ انتخاب شده و به طور تصادفی یکی از ژن‌ها دچار جهش (تبدیل صفر به یک و تبدیل یک به صفر) می‌شود.

تابع ارزیابی: تابع ارزیابی در روش پیشنهادی، همان مقدار تابع هدف مسئله است. با این حال، از آنجا که



شکل ۱: نمای کلی الگوریتم ممتیک پیشنهادی

جستجوی همسایگی متغیر:
 انتخاب یک جواب اولیه مانند x
 تکرار کنید }
 $i \leftarrow 1$
 تکرار کنید }
 یک جواب از همسایگی نام جواب فعلی، مانند x' ، را انتخاب کنید.
 $\Delta <$ لرزش
 یک روش جستجوی محلی را روی x' به کار گرفته و جواب به دست آمده را x'' بنامید. $\Delta <$ جستجوی محلی
 تفاوت مقدار تابع هدف جواب فعلی و جواب جدید را محاسبه کنید
 (ΔF)
 اگر $\Delta F \geq 0$
 جواب جدید را بپذیرید. $\Delta <$ حرکت
 $i \leftarrow i + 1$ بازگشت به همسایگی اول }
 در غیر این صورت $\{ i \leftarrow i + 1 \}$ رد جواب به دست آمده و رفتن به همسایگی بعدی }
 { تا هنگامیکه $(i \leq I)$
 { تا هنگامیکه شرط توقف برآورده شود }

شکل ۲: نمای کلی الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

است. برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی، از نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS/CPLEX نسخه ۱۲/۵ روی یک کامپیوتر تحت لینوکس با یک هسته ۳/۲ گیگاهرتزی و ۲۴ گیگابایت حافظه استفاده شده است. به نرم‌افزار برای حل هر یک از مدل‌ها، حداکثر ۲۴ ساعت وقت داده شده است.

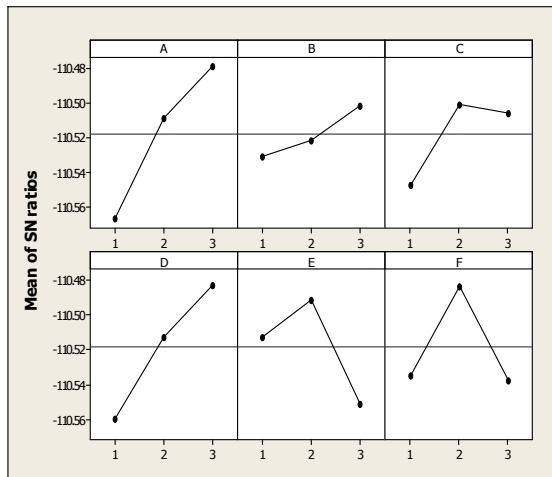
تنظیم پارامترهای روش حل پیشنهادی

از عوامل مهم و تأثیرگذار بر عملکرد روش‌های فراابتکاری، می‌توان به تنظیم دقیق پارامترهای این روش‌ها اشاره کرد. در این تحقیق، برای افزایش کارایی روش حل پیشنهادی، از روش آماری تاگوچی [۳۱] استفاده می‌شود. در این روش، از معیار سیگنال به نویز S/N برای اندازه‌گیری میزان تغییرات متغیر پاسخ استفاده می‌شود. با توجه به جهت کمینه‌سازی تابع هدف در این تحقیق، از رابطه (۱۷) مبتنی بر اصل نسبت کوچک‌تر نسبت بهتر استفاده می‌شود.

$$S/N = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (16)$$

نتایج محاسباتی

در این بخش، نتایج مجموعه‌ای از آزمایش‌های محاسباتی برای سنجش کارایی روش حل پیشنهادی و به دست آوردن درک عمیق‌تری از اثر نبود قطعیت پارامتر تقاضا و اختلال بر عملکرد شبکه هاب ارائه می‌شود. به این منظور مسایل نمونه استاندارد AP در ابعاد ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۴۰، ۵۰ و ۱۰۰ گره انتخاب شده‌اند. مقدار انتقال پارامترهای غیرقطعی تقاضا و اختلال در ظرفیت به طور تصادفی یکنواخت در سه بازه (۰-۲۰٪)، (۲۰-۳۰٪)، و (۳۰-۵۰٪) تولید شده‌اند. همچنین مقدار بودجه نبود قطعیت برابر مقادیر ۰، ۱٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ تعداد کل پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفته شده است. پارامترهای روش حل پیشنهادی توسط روش تاگوچی تنظیم شده‌اند. همچنین این روش در زبان برنامه‌نویسی C# پیاده‌سازی شده و روی یک کامپیوتر با پردازنده ۲ گیگاهرتزی و یک گیگابایت حافظه اجرا شده است. الگوریتم پیشنهادی برای هر مسئله ۱۰ بار تکرار شده و بهترین مقدار به دست آمده در جدول (۱) گزارش شده



شکل ۴: اثرات اصلی برای نسبت‌های سیگنال به نویز

سنجش اثر نبود قطعیت و اختلال بر پیکربندی و عملکرد شبکه هاب

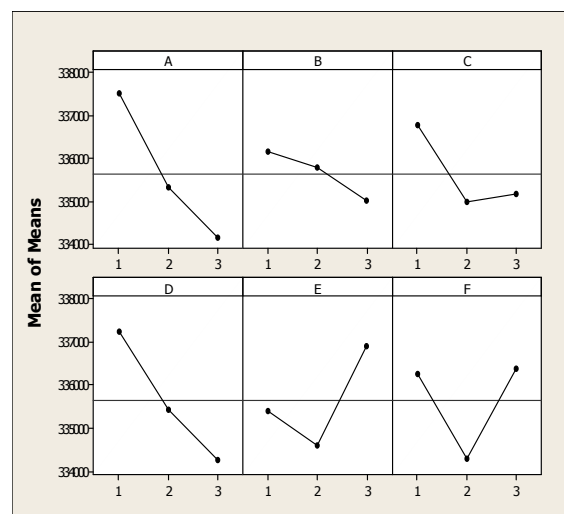
برای سنجش اثر نبود قطعیت و اختلال بر عملکرد شبکه‌های هاب، ابتدا مسایل نمونه با ابعاد ۱۰ و ۲۰ گره انتخاب شده و توسط مدل‌های ریاضی مربوط به آنها توسط نرم‌افزار GAMS/CPLEX به طور دقیق حل شده‌اند که نتایج آن در جدول (۲) آمده است. مطابق با جدول (۲) برای مسئله نمونه AP10، اثر نبود قطعیت و اختلال بر طراحی شبکه هاب (مجموعه هاب‌های بهینه) فقط به ازای مقدار بودجه ۱۰۰٪ و بازه نبود قطعیت (۳۰-۲۰٪) و همه مقادیر بودجه برای بازه نبود قطعیت (۵۰-۳۰٪) مشاهده می‌شود. همچنین برای مسئله نمونه AP20، مشاهده مشابهی برای بودجه‌های نبود قطعیت ۱۰ و بیشتر با بازه نبود قطعیت (۳۰-۲۰٪) و نیز همه مقادیر بودجه ممکن بازه نبود قطعیت (۳۰-۵۰٪) انجام می‌شود. همچنین افزایش مقدار بهینه تابع هدف، همراه با افزایش مقدار بودجه در نتایج مشاهده می‌شود که در تطابق با ماهیت مفهوم بودجه نبود قطعیت است (شکل‌های ۵ و ۶). سرانجام ضمن تأیید اثر نبود قطعیت و اختلال بر طراحی شبکه هاب، می‌توان مشاهده کرد که میزان شدت چنین اثری با ابعاد مسئله، طول بازه نبود قطعیت و نیز مقدار بودجه نبود قطعیت، رابطه مستقیم دارد. به عبارت دیگر، همراه با افزایش عوامل ذکر شده، جواب بهینه مدل ریاضی، گشایش تسهیلات هاب بیشتری را برای مواجهه با اثر نبود قطعیت پارامتر تقاضا و اختلال جزئی در ظرفیت تسهیلات توصیه می‌کند.

مطابق با روش حل پیشنهادی، اسامی و سطوح پارامترهایی که برای تنظیم کردن در نظر گرفته شده‌اند، در جدول (۱) آمده‌اند. با توجه به تعداد پارامترها و تعداد سطوح آنها، آرایه متعامد L_{27} برای انجام آزمایش‌های لازم انتخاب می‌شود.

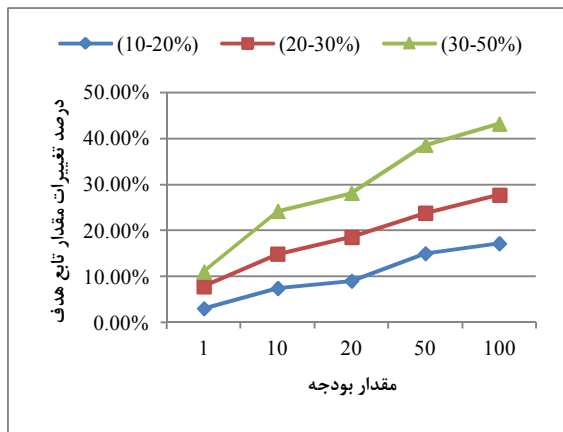
جدول ۱: سطوح پارامترهای روش حل پیشنهادی

پارامتر	سطح		
	پایین	متوسط	بالا
تعداد نسل‌ها (A)	50	100	150
اندازه جمعیت (B)	50	75	100
p_c (C)	0.8	0.85	0.9
NI (D)	10	15	20
تعداد تکرار جستجوی محلی (E) VNS	20	35	50
تعداد کل تکرارهای VNS (F)	50	75	100

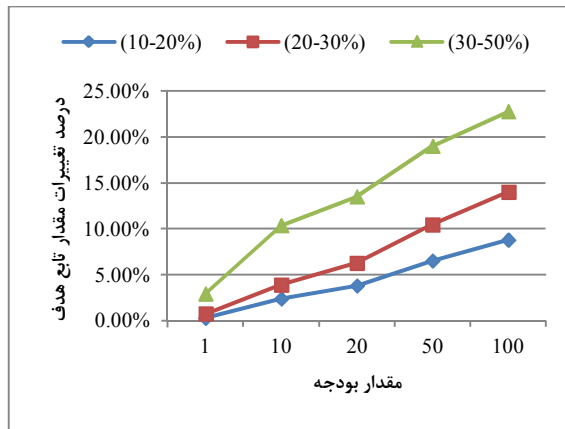
طبق نتایج محاسباتی به دست آمده از حل مسئله برای ۵ تکرار، شکل‌های اثرات اصلی برای میانگین‌ها و نسبت‌های سیگنال به نویز در شکل‌های ۳ و ۴ رسم شده است. طبق نتایج این شکل‌ها، برای پارامترهای تعداد نسل، اندازه جمعیت و NI سطح بالا و برای پارامترهای p_c و تعداد تکرار جستجوی محلی و تعداد کل تکرارهای VNS سطح متوسط به عنوان سطح بهینه انتخاب می‌شوند (مقادیر بهینه در جدول (۱) با پس‌زمینه خاکستری نمایش داده شده‌اند).



شکل ۳: اثرات اصلی برای میانگین‌ها



شکل ۶: درصد تغییرات در مقدار تابع هدف به ازای مقادیر مختلف بودجه برای مسئله نمونه AP20



شکل ۵: درصد تغییرات در مقدار تابع هدف به ازای مقادیر مختلف بودجه برای مسئله نمونه AP10

جدول ۲: نتایج حل مسایل نمونه برای بازه‌ها و مقادیر مختلف بودجه نبود قطعیت

مسئله نمونه	بازه عدم قطعیت	مقدار بودجه (درصد)	بهترین جواب	زمان حل (ثانیه)	هاب‌های انتخاب شده
AP10	قطعی	-	224250.05	0.06	3,4,7
		10-20%	224954.61	0.11	3,4,7
		10	229589.54	0.11	3,4,7
		20	232805.09	0.11	3,4,7
		50	238890.39	0.13	3,4,7
	20-30%	100	243945.74	0.12	3,4,7
		1	225909.93	0.12	3,4,7
		10	233015.35	0.28	3,4,7
		20	238342.60	0.28	3,4,7
		50	247683.48	0.31	3,4,7
	30-50%	100	255643.12	0.12	1,4,5,7
		1	230846.34	2.58	1,4,5,7
		10	247447.07	1.44	1,4,7,8
20		254493.65	2.85	1,4,7,8	
50		266768.11	1.55	1,4,5,7,8	
AP20	قطعی	-	234690.96	5.07	7,14
		10-20%	241823.44	66.33	7,14
		10	252111.67	184.39	6,11,14
		20	255902.99	74.38	6,11,14
		50	269963.27	216.87	6,11,14
	20-30%	100	275033.09	130.62	7,9,14
		1	253161.12	38.65	7,19
		10	269674.11	85.61	6,14,15
		20	278308.31	300.82	6,14,15
		50	290552.05	363.66	6,14,15
	30-50%	100	299765.75	198.27	6,14,15
		1	260609.954	152.2	7,14,15
		10	291483.53	638.66	6,8,14,15
20		300640.335	206.19	7,9,14,15	
50		325178.389	865.93	6,8,9,14,15	
100	336103.286	491.86	6,8,9,14,15		

سنجش کارایی روش حل پیشنهادی

در این بخش، نحوه سنجش کارایی روش حل پیشنهادی و نتایج آن ارائه می‌شود. برای این منظور تعدادی از مسایل نمونه انتخاب شده و توسط روش حل پیشنهادی و نرم‌افزار GAMS/CPLEX حل می‌شوند. نتایج این آزمایش‌ها در جدول (۴) آمده است. طبق نتایج این جدول، نرم‌افزار GAMS/CPLEX فقط قادر به حل مسایل نمونه با حداکثر ۵۰ گره است و مسایل ۱۰۰ گره‌ای به دلیل کمبود حافظه قابل حل نیستند. این کمبود حافظه به دلیل تعداد متغیرهای تصمیم صفر و یک بسیار زیاد (از مرتبه تعداد n^4) مرتبط با تصمیم تخصیص است.

طبق نتایج، روش حل پیشنهادی قادر به حل بهینه همه مسایل نمونه تا ابعاد ۲۵ گره برای تمام مقادیر بودجه است. همچنین، این روش مسایل نمونه ۴۰ گره‌ای و ۵۰ گره‌ای را با دقت مناسب (شکاف‌های به ترتیب ۰/۲۱۲٪ و ۰/۱۱۸٪) حل می‌کند. روش پیشنهادی بر خلاف نرم‌افزار قادر به حل مسایل ۱۰۰ گره‌ای نیز هست که برای حالت قطعی در مقایسه با جواب بهینه موجود در پیشینه تحقیق، شکاف قابل قبول ۱/۱۴۴٪ دارد. از دیدگاه زمان حل نیز روش پیشنهادی، برتری ملموسی بر نرم‌افزار داشته و به جز مسایل نمونه ۱۰ گره‌ای و مسایل قطعی، برای همه مسایل نمونه با بودجه نبود قطعیت مثبت، زمان حل کمتری نسبت به نرم‌افزار دارد (به طور متوسط ۲۰۴۰/۲۳ ثانیه).

نتیجه‌گیری

با وجود توجه گسترده محققان، نظریه مکان‌یابی و تحقیق در عملیات به مسایل مکان‌یابی هاب، همچنان تحقیقات اندکی در زمینه طراحی شبکه‌های هاب با شرایط نبود قطعیت و اختلال وجود دارد. اهمیت این دو مبحث را می‌توان در شرایط احاطه‌کننده شبکه‌های مخابراتی و حمل و نقل هوایی-دریایی-زمینی دانست که عوامل زیادی بر نبود قطعیت پارامترها و اختلال عملکرد تأثیرگذار هستند.

از این رو در این تحقیق، مسئله مکان‌یابی هاب با ظرفیت محدود با شرایط نبود قطعیت بازه‌ای تقاضا و رخ دادن اختلال جزئی، در ظرفیت تسهیل‌های هاب، مورد بررسی

در گام بعدی، اثر نبود قطعیت تقاضا و اختلال جزئی در ظرفیت تسهیلات بر عملکرد شبکه هاب بررسی می‌شود. به عبارت دیگر، سعی می‌شود به این سؤال پاسخ داده شود که اگر به جای استفاده از جواب بهینه مدل پیشنهادی، از جواب مدل قطعی بدون در نظر گرفتن نبود قطعیت و اختلال استفاده شود، میزان ضرر یا منفعت مورد انتظار چقدر خواهد بود. به این منظور یک مدل شبیه‌سازی مونت‌کارلو مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن برای ۵۰۰۰ سناریوی مختلف طبق بازه‌های نبود قطعیت در نظر گرفته شده، عملکرد پیکربندی‌های پیشنهادی مدل در جدول (۳) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به جز پیکربندی مربوط به مدل قطعی که برای هر سه بازه نبود قطعیت عملکرد آن بررسی می‌شود، جواب مدل‌های غیرقطعی فقط برای بازه نبود قطعیت مربوط به خودشان بررسی می‌شوند. این موضوع به این دلیل است که جواب حاصل از مدل‌های بهینه‌سازی استوار، تضمین استواری جواب را فقط برای بازه نبود قطعیت در نظر گرفته شده در آنها ارائه می‌کنند. سرانجام با توجه به تاکتیکی بودن تصمیم تخصیص در مقابل تصمیم استراتژیک مکان‌یابی، فرض می‌شود که تصمیم‌گیرنده، امکان بهینه‌سازی دوباره تصمیم تخصیص را در مواجهه با نبود قطعیت داشته باشد. با وجود اینکه با در نظرگیری هزینه کل سیستم، عملکرد این پیکربندی‌ها در همه موارد بهتر از پیکربندی‌های استوار است، هزینه ناموجه بودن پیکربندی‌های قطعی به ازای تعدادی از سناریوها، هزینه‌ای بسیار مهم است که نباید نادیده گرفته شود. از طرف دیگر، با توجه به کمتر بودن همه معیارهای هزینه حمل و نقل پیکربندی‌های استوار (و به صورت خاص انحراف استاندارد)، این پیکربندی‌ها عملکردی یکنواخت و استوار نسبت به پیکربندی‌های قطعی دارند. با این حال باید توجه کرد که این عملکرد مناسب به ازای هزینه گشایش تعدادی بیشتر تسهیل هاب، قابل دستیابی است. همچنین، پیکربندی‌های استوار به دست آمده از مقادیر بودجه مختلف، همیشه قادر به ارائه جواب‌های موجه نیستند. بنابراین تعیین صحیح مقدار بودجه خود نیز، هنگام طراحی شبکه‌های هاب بسیار پر اهمیت است. روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو پیشنهادی می‌تواند به تصمیم‌گیران در انتخاب مقدار بودجه کمک کند.

در پایان، به تعدادی از زمینه‌های تحقیقاتی بعدی این تحقیق اشاره می‌شود. اولین زمینه تحقیقاتی، در نظرگیری نبود قطعیت دیگر پارامترهای طراحی شبکه‌های هاب مانند هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های ثابت گشایش تسهیلات هاب است. علاوه بر این، در نظرگیری انواع دیگر نبود قطعیت مانند نبود قطعیت بیضوی [۲۵] و داده‌های غیرقطعی همبسته [۲۶]، می‌توانند از جمله زمینه‌های تحقیقاتی قابل توجه باشد. با توجه به تطابق بیشتر الگوی تخصیص چندگانه با شرایط دنیای واقعی، زمینه تحقیقاتی بعدی دیگر این تحقیق می‌تواند توسعه مدل ریاضی و روش حل پیشنهادی برای در نظرگیری الگوی تخصیص چندگانه به جای الگوی تخصیص یگانه باشد. سرانجام، نتایج محاسباتی این تحقیق، حاکی از نداشتن توانایی روش‌های دقیق در حل مسایل نمونه بزرگ‌تر از ۵۰ بود. توسعه روش‌های حل دقیق مبتنی بر تجزیه مانند تجزیه بندرز و آزادسازی لاگرانژی، می‌تواند یکی دیگر از زمینه‌های بالقوه این تحقیق باشد.

قرار گرفت. ابتدا یک مدل ریاضی جدید برای مسئله، بر پایه مفهوم بودجه نبود قطعیت در بهینه‌سازی استوار ارائه شد. آنگاه یک روش حل مبتنی بر الگوریتم ممتیک که در آن روش جستجوی همسایگی متغیر به عنوان مکانیزم جستجوی محلی به کار رفته است، تشریح شد. نتایج آزمایش‌های محاسباتی اجرای روش پیشنهادی، روی مسایل نمونه، حاکی از کارایی و دقت بالای روش حل پیشنهادی در حل مسایل نمونه با ابعادی تا ۱۰۰ گره در مقایسه با نرم‌افزار تجاری CPLEX است. علاوه بر این، تعدادی آزمایش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای مقایسه عملکرد پیکربندی‌های مختلف شبکه‌های هاب با شرایط نبود قطعیت تقاضا و اختلال جزئی در ظرفیت تسهیلات هاب انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها نشانگر کارایی جواب حاصل از مدل بهینه‌سازی استوار در مواجهه با نبود قطعیت و اختلال و نبود کارایی جواب‌های حاصل از مدل‌های قطعی در برخورد با این شرایط است. روش شبیه‌سازی مونت‌کارلوی پیشنهادی می‌تواند در تعیین بهترین پیکربندی شبکه هاب به تصمیم‌گیران کمک شایان توجهی کند.

جدول ۳: نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای بررسی اثر نبود قطعیت تقاضا و اختلال بر عملکرد پیکربندی‌های مختلف شبکه هاب

تعداد جواب‌های ناموجه	انحراف استاندارد هزینه	هزینه حمل و نقل			بازه عدم قطعیت	هزینه ثابت	تسهیلات گشایش یافته	مسئله نمونه
		متوسط هزینه	بیشترین هزینه	کمترین هزینه				
0	1413.499	135902.1	140037.2	129705.6	10-20%	88241.93	3, 4, 7	AP10
16	2320.072	135854.5	142510.8	126919.6	20-30%			
365	3941.496	136042.3	156814.3	120372.2	30-50%			
0	1888.17	115926.4	121837.7	106909.3	20-30%	113087.9	1, 4, 5, 7	
110	3154.243	116011.2	127177.5	100695.1	30-50%			
78	3185.491	114638.1	123658.7	100915.3	30-50%	121093.6	1, 4, 7, 8	
0	2556.297	92225.28	99238.25	80837.8	30-50%	146947.1	1, 4, 5, 7, 8	
164	1656.733	176261.8	183402.3	172251.4	10-20%	59052.76	7, 14	AP20
281	10463.11	184372.8	214936.2	171629.1	20-30%			
423	12350.63	186283.1	224768.7	169772.2	30-50%			
93	953.7595	152706.2	156461.3	149736.4	10-20%	86792.36	6, 11, 14	
0	956.4914	161738.1	164534.3	158642.7	10-20%	88239.3	7, 9, 14	
114	1884.47	193587.2	199457.9	187373	20-30%	56676.16	7, 19	
0	1431.554	157348.9	161701.6	153244.1	20-30%	99005.73	6, 14, 15	
239	2439.069	164120.8	171407.8	157143.1	30-50%	92741.92	7, 14, 15	
138	2168.45	141917.6	148499.4	135825	30-50%	122727.5	6, 8, 14, 15	
76	2298.637	150324.2	157277.8	144230.4	30-50%	121928.5	7, 9, 14, 15	
0	2047.244	131030.1	137549.6	125378	30-50%	151914.1	6, 8, 9, 14, 15	

جدول ۴: نتایج محاسباتی حل مسایل نمونه توسط روش پیشنهادی

روش پیشنهادی		GAMS/CPLEX				مقدار	بازه عدم	ابعاد
شکاف با	زمان حل	بهترین	زمان حل	شکاف با	بهترین	بودجه	قطعییت	مسئله
بهبود	(ثانیه)	جواب	(ثانیه)	کران پایین	جواب	(درصد)		
نرم افزار (%)				نرم افزار (%)				
0.000	32.38	224250.05	0.06	0.000	224250.05	0	-	10
0.000	47.27	224954.61	0.11	0.000	224954.61	1	10-20%	
0.000	51.00	238342.60	0.28	0.000	238342.60	20	20-30%	
0.000	39.11	266768.11	1.55	0.000	266768.11	50	30-50%	
0.000	41.12	275295.51	0.25	0.000	275295.51	100	30-50%	
0.000	141.39	234690.96	5.07	0.000	234690.96	0	-	20
0.000	138.42	252111.67	184.39	0.000	252111.67	10	10-20%	
0.000	134.62	278308.31	300.82	0.000	278308.31	20	20-30%	
0.000	173.94	325178.39	865.93	0.000	325178.39	50	30-50%	
0.000	163.19	336103.29	491.86	0.000	336103.29	100	30-50%	
0.000	380.42	238977.95	37.98	0.000	238977.95	0	-	25
0.000	478.81	261664.66	2831.81	0.000	261664.66	20	10-20%	
0.000	511.36	289925.18	5295.17	0.000	289925.18	50	20-30%	
0.000	413.05	418197.71	35173.82	0.000	418197.71	50	30-50%	
0.000	587.72	406299.22	24906.9	0.000	406299.22	100	30-50%	
0.391	849.93	242901.76	511.32	0.000	241955.71	0	-	40
0.732	1165.06	257130.73	16232.14	0.000	255262.22	1	10-20%	
0.065	1288.72	284414.57	48256.53	0.000	284229.82	100	10-20%	
-0.934	1118.31	276972.46	86400	6.307	279583.77	10	20-30%	
1.162	922.59	332493.47	61273.35	0.000	328674.28	50	30-50%	
1.597	2083.08	242329.76	86400	1.639	238520.59	0	-	50
1.316	2783.50	279988.57	25273.94	0.000	276351.78	100	10-20%	
-1.291	2387.22	272523.50	86400	1.470	276087.80	10	20-30%	
1.822	2571.99	341926.04	86400	3.178	335807.62	20	30-50%	
2.148	2590.16	363793.72	86400	2.065	356143.75	50	30-50%	
1.144	5456.62	249536.38	-	-	246713.97*	0	-	100
-	5529.95	253763.29	-	-	-	1	10-20%	
-	6134.00	282957.34	-	-	-	10	20-30%	
-	6081.74	312656.98	-	-	-	20	30-50%	
-	6919.85	371422.48	-	-	-	100	30-50%	

* جواب بهینه موجود در پیشینه تحقیق [۳۲]

مراجع

- 1 - O'Kelly, M.E. (1986). "The location of interacting hub facilities". *Transportation Science*, Vol. 20, PP. 92-105.
- 2 - Daskin, M.S. (1995) *Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications*. Wiley, New York.
- 3 - Silva, M.R. and Cunha, C.B. (2009). "New simple and efficient heuristics for the uncapacitated single allocation hub location problem". *Computers & Operations Research*, Vol. 36, PP. 3152-3165.
- 4 - Alumur, S. and Kara, B.Y. (2008). "Network hub location problems: The state of the art". *European Journal of Operational Research*, Vol. 190, PP. 1-21.
- 5 - Farahani, R.Z., Hekmatfar, M., Boloori Arabani, A. and Nikbakhsh, E. (2013) "Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications". *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 64, PP. 1096-1109.
- 6 - Snyder, L.V., Scaparra, P.M., Daskin, M.S. and Church, R.L. (2006) "Planning for disruptions in supply chain networks", in *Tutorials in Operations Research - Models, Methods, and Applications for Innovative Decision Making*, M.P. Johnson, B. Norman and N. Secomandis ed., INFORMS, Hanover, PP. 234-257.
- 7 - Leonard, D. (2005) "The only lifeline was the Wal-Mart". *Fortune*, Vol. 152, PP. 74-80.

-
- 8 - Kim, H. and O'Kelly, M.E. (2009) "Reliable p -hub location problems in telecommunication networks". *Geographical Analysis*, Vol. 41, PP. 283-306.
 - 9 - Kim, H. (2012) " P -hub protection models for survivable hub network design". *Journal of Geographical Systems*, Vol. 14, PP. 437-461.
 - 10 -Fazel Zarandi, M.H., Davari, S. and Haddad Sisakht, S.A. (2012) "The Q-coverage multiple allocation hub covering problem with mandatory dispersion". *Scientia Iranica*, Vol. 19, PP. 902-911.
 - 11 -Parvaresh, F., Hashemi Golpayegany, S.A., Moattar Husseini, S.M. and Karimi, B. (2013) "Solving the p -hub median problem under intentional disruptions using simulated annealing". *Networks and Spatial Economics*, Vol. 13, PP. 445-470
 - 12 -Sim, T., Lowe, T.J. and Thomas, B.W. (2009) "The stochastic p -hub center problem with service-level constraints ". *Computers & Operations Research*, Vol. 36, PP. 3166-3177.
 - 13 -Yang, T.-H. (2009) "Stochastic air freight hub location and flight routes planning". *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 33, PP. 4424-4430.
 - 14 -Contreras, I., Cordeau, J.-F. and Laporte, G. (2011) "Stochastic uncapacitated hub location". *European Journal of Operational Research*, Vol. 212, PP. 518-528.
 - 15 -Zhai, H., Liu, Y. and Chen, W. (2012) "Applying minimum-risk criterion to stochastic hub location problems". *Procedia Engineering*, Vol. 29, PP. 2313-2321.
 - 16 -Davari, S. and Fazel Zarandi, M.H. (2012) "The single-allocation hierarchical hub median location problem with fuzzy demands". *African Journal of Business Management*, Vol. 6, PP. 347-360.
 - 17 -Taghipourian, F., Mahdavi, I., Mahdavi-Amiri, N. and Makui, A. (2012) "A fuzzy programming approach for dynamic virtual hub location problem". *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 36, PP. 3257-3270.
 - 18 -Bashiri, M., Mirzaei, M. and Randall, M. (2013) "Modeling fuzzy capacitated p -hub center problem and a genetic algorithm solution". *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, PP. 3513-3525.
 - 19 -Davari, S. and Fazel Zarandi, M.H. (2013) "The single-allocation hierarchical hub-median problem with fuzzy flows", in *Soft Computing Applications*, Valentina Emilia Balas, János Fodor, Annamária R. Várkonyi-Kóczy, Jozsef Dombi and L.C. Jains ed., Springer, Berlin, PP. 165-181.
 - 20 -Davari, S., Fazel Zarandi, M.H. and Turksen, I.B. (2013) "The incomplete hub-covering location problem considering imprecise location of demands". *Scientia Iranica*, Vol. 20, PP. 983-991.
 - 21 -Jia, H. and Qingyun, W. (2009) "Robust optimization of hub-and-spoke airline network design based on multi-objective genetic algorithm". *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Vol. 9, PP. 86-92.
 - 22 -Alumur, S.A., Nickel, S. and Saldanha-da-Gama, F. (2012) "Hub location under uncertainty". *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 46, PP. 529-543.
 - 23 -Makui, A., Rostami, M., Jahani, E. and Nikui, A. (2012) "A multi-objective robust optimization model for the capacitated P -hub location problem under uncertainty". *Management Science Letters*, Vol. 2, PP. 525-534.
 - 24 -Soyster, A.L. (1973) "Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming". *Operations Research*, Vol. 21, PP. 1154-1157.
 - 25 -Ben-Tal, A. and Nemirovski, A. (2000) "Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data". *Mathematical Programming*, Vol. 88, PP. 411-424.
-

-
- 26 -Bertsimas, D. and Sim, M. (2004) "The price of robustness". *Operations Research*, Vol. 52, PP. 35-53.
- 27 -Moscato, P. and Norman, M.G. (1992) "A Memetic Approach for the Traveling Salesman Problem Implementation of a Computational Ecology for Combinatorial Optimization on Message-Passing Systems", in *Parallel Computing and Transputer Applications*, M. Valero, E. Onate, M. Jane, J.L. Larriba and B. Suarezs ed., IOS Press, Amsterdam, PP. 177-186.
- 28 -Pishvae, M.S., Farahani, R.Z. and Dullaert, W. (2010) "A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design". *Computers & Operations Research*, Vol. 37, PP. 1100-1112.
- 29 -Mladenović, M. and Hansen, P. (1997) "Variable neighborhood search". *Computers & Operations Research*, Vol. 24, PP. 1097-1100.
- 30 -Topcuoglu, H., Corut, F., Ermis, M. and Yilmaz, G. (2005) "Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms". *Computers & Operations Research*, Vol. 32, PP. 967-984.
- 31 -Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments* 2012, New York, NY: Wiley.
- 32 -Contreras, I., Díaz, J.A. and Fernández, E. (2009) "Lagrangean relaxation for the capacitated hub location problem with single assignment". *OR Spectrum*, Vol. 31, PP. 483-505.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Disruption
 - 2- Uncertainty
 - 3- Interval
 - 4- Memetic Algorithm
 - 5- Variable Neighborhood Search
 - 6- Intensification
 - 7- Shaking
 - 8- Local Search
 - 9- Move
 - 10- Signal to Noise
-