

# مسئله‌ی مکان‌یابی هاب تک‌تخصیصه با در نظر گرفتن امکان اختلال در هاب‌ها: مدل‌سازی و ارائه‌ی الگوریتم حل

فرید ممیزی (دکتری)

سید کمال چهار سو فی \* (استاد)

محمد مهدی سپهری (استاد)

علی حسین زاده کاشان (استادیار)

دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس

مسئله‌ی مکان‌یابی هاب، از مسائل مهم و پرکاربرد در طراحی شبکه به شمار می‌آید. هاب‌های مستقر شده در طول زمان به دلایل مختلفی از جمله بلایای طبیعی یا اختلالات عمدی می‌توانند از کار بیفتند که در این صورت هزینه‌های گزافی به شرکت‌های بهره‌بردار تحمیل می‌شود. بنابراین لازم است برنامه‌ریزی مناسب برای کاهش اثرات مخرب اختلال صورت گیرد. در این تحقیق مسئله‌ی مکان‌یابی هاب تک‌تخصیصه‌ی بدون ظرفیت تحت شرایط اختلال هاب‌ها در نظر گرفته شده است. هر هاب بعد از احداث ممکن است دچار اختلال شود؛ بنابراین باید متقاضیانی که به هاب خراب شده در شبکه متصل شده‌اند به هاب‌های سالم شبکه تخصیص یابند که در صورت بالا بودن هزینه، جریمه‌ی به عنوان هزینه‌ی عدم خدمت رسانی تقاضاها پرداخت شود. مسئله به صورت مدل ریاضی تصادفی دو مرحله‌ی فرمول‌بندی شده و روش فراابتکاری ترکیبی جستجوی همسایگی بزرگ تطبیق‌یافته با شبیه‌سازی تبرید ارائه شده است. محاسبات انجام شده بر روی دو مجموعه داده نشان دهنده‌ی کارایی و عملکرد بالای الگوریتم پیشنهادی است.

واژگان کلیدی: مکان‌یابی هاب، اختلال، جستجوی همسایگی تطبیق‌یافته،

شبیه‌سازی تبرید.

farid.momayezi@modares.ac.ir  
 skch@modares.ac.ir  
 mehdi.sepehri@gmail.com  
 a.kashan@modares.ac.ir

## ۱. مقدمه

هاب‌ها تسهیلات ویژه‌ی هستند که کار خدمت رسانی را در شبکه‌های حمل‌ونقل و مخابراتی از طریق ایجاد ارتباط بین مبدأها و مقصدها انجام می‌دهند؛ این نوع تسهیلات که نقش واسطه در شبکه را دارند اغلب به عنوان نقاط تعویض و انتقال و طبقه‌بندی، که عمل تجمیع و توزیع در شبکه را بر عهده دارند، شناخته می‌شوند. در شبکه‌های هاب به جای خدمت رسانی مستقیم بین هر جفت مبدأ - مقصد، مجموعه‌ی کوچکی از ارتباطات بین مبدأها، مقصدها، و هاب‌ها برای خدمت رسانی به وجود می‌آید. چنین شبکه‌ی اجازه می‌دهد تا مجموعه‌ی بزرگی از مبادی و مقاصد با ارتباطات نسبتاً کمتر به یکدیگر مرتبط باشند. استفاده از ارتباطات کمتر اجازه می‌دهد تا جریان متمرکزتر شود و صرفه‌جویی اقتصادی قابل ملاحظه‌ی در شبکه به وجود آید.<sup>[۱]</sup>

مسئله‌ی مکان‌یابی هاب کاربرد گسترده‌ی در صنعت از جمله حمل‌ونقل (هوایی،

زمینی، ریلی و دریایی)، ارتباطات مخابراتی و طراحی شبکه‌های رایانه‌ی دارد؛ بنابراین در طراحی شبکه‌ی هاب، مکان‌یابی گره‌های هاب در شبکه و نحوه‌ی تخصیص سایر گره‌های شبکه (غیرهاب‌ها) به هاب‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. انجام تحقیقات در مورد مسئله‌ی مکان‌یابی هاب ریشه در علوم مکان‌یابی و تجزیه و تحلیل شبکه<sup>[۲-۴]</sup> دارد ولی انتشار دو تحقیق توسط اوکلی<sup>[۵]</sup> باعث ظهور سایر تحقیقات در مورد مسئله مکان‌یابی هاب به عنوان یک شاخه‌ی مهم و اصلی از علم مکان‌یابی تسهیلات شده است. اوکلی در سال ۱۹۸۶ در تحقیق خود مسئله‌ی مکان‌یابی هاب تک‌تخصیص میانه را با استفاده از برنامه‌ریزی درجه دوم فرمول‌بندی کرد و آن را با استفاده از مجموعه داده‌ی مسافرت هوایی ۲۵ شهر ایالات متحده (CAB) مورد تجزیه و تحلیل کمی قرار داد.<sup>[۱]</sup> شرط تک‌تخصیصه در مسئله‌ی مکان‌یابی هاب به این معنی است که فرض می‌شود همه‌ی جریان‌های یک مبدأ فقط از طریق یکی از هاب‌های شبکه منتقل شوند و همچنین همه‌ی جریان‌های ورودی به هر مقصد نیز باید فقط از طریق همان هاب منتقل شوند. در واقع هر گره غیرهاب شبکه فقط می‌تواند به یک گره‌هاب در شبکه متصل شود. بعدها کمپبل

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۴/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۶/۸/۶، پذیرش ۱۳۹۶/۸/۲۹

DOI:10.24200/J65.2019.7201.1746

مکان‌یابی هاب است، به عنوان مثال در سال ۱۹۹۶ ارنست و کریشناموتی<sup>[۱۰]</sup> یک شبکه‌ی هاب را با استفاده از مجموعه داده‌ی پست استرالیا (AP) طراحی کردند. در این تحقیق آنها یک فرمول ریاضی جدیدتری برای مسئله‌ی P-هاب میانه ارائه کردند که در مدل پیشنهادی آنها از متغیرها و محدودیت‌های کمتری نسبت به مدل‌های قبلی استفاده شده است.

برخی دیگر از مطالعات شبکه‌ی هاب به بررسی محدودیت‌های موجود در دنیای واقعی که در استفاده از شبکه‌ی هاب پرداخته‌اند و تلاش کرده‌اند که محدودیت‌های دنیای واقعی را در مدل‌های خود اعمال کنند که می‌توان به مدل محدودیت ظرفیت و حداقل آستانه‌ی جریان در ارتباط بین هاب‌ها<sup>[۱۱]</sup>، مدل محدودیت توقف در یک هاب<sup>[۱۲]</sup> و مدل محدودیت ظرفیت گره‌های هاب در مسئله‌ی مکان‌یابی هاب چندتخصیصه توسط ابری و همکاران در سال ۲۰۰۰، اشاره کرد. در سال ۲۰۰۵ بحث ازدحام<sup>۲</sup> در هاب نخستین بار در نظر گرفته شد<sup>[۱۳]</sup> و در تحقیق مربوطه یک تابع هزینه‌ی محذب غیرخطی برای تابع هدف مدل تخصیص تک‌P-هاب میانه ارائه شد. در سال ۲۰۰۹ کترارس و همکاران<sup>[۱۴]</sup> در مطالعه‌ی خود محدودیت ارتباط کامل بین هاب‌ها را در نظر گرفتند و مسئله‌ی مکان‌یابی هاب را به صورت ارتباط درختی هاب‌ها با یکدیگر فرمول‌بندی کردند. کاربردهای عملی از این حالت در سیستم‌های مخابراتی و حمل‌ونقل ظاهر می‌شود، زمانی که هزینه‌های برقراری ارتباط بین هاب‌ها بسیار زیاد باشد یا ایجاد شبکه‌ی کامل بین هاب‌ها به دلیل شرایط محیطی امکان‌پذیر نباشد.

چندین مقاله‌ی مروری در خصوص مسائل مکان‌یابی هاب وجود دارد که می‌توان به مطالعات آومور و کارا<sup>[۱۵]</sup> در سال ۲۰۰۸، به مطالعات اوکلی و کمپبل<sup>[۱۶]</sup> در سال ۲۰۱۲، و مطالعات زنجیرانی و همکاران<sup>[۱۷]</sup> در سال ۲۰۱۳ اشاره کرد. همچنین اوکلی در سال ۲۰۱۵ یک مقاله‌ی مروری در خصوص مطالعات ممکن برای مقاوم‌سازی شبکه‌ی هاب ارائه کرده است<sup>[۱۸]</sup>، که در این مطالعه به صورت توصیفی امکان به وجود آمدن اختلال در هر یک از اجزای شبکه‌ی هاب به صورت مختصر مورد اشاره قرار گرفته است.

## ۲.۲. اختلالات در مسائل مکان‌یابی تسهیلات

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد همواره در یک زیرساخت تحت شبکه، اجزای شبکه همواره در معرض اختلال قرار دارند؛ بنابراین در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه‌ی اختلالات مکان‌یابی صورت گرفته است. در مطالعه‌ی توسط اسنایدر و داسکین<sup>[۱۹]</sup> در سال ۲۰۰۵ مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات را به گونه‌ی در نظر می‌گیرند که در آن برخی از تسهیلات با یک احتمال معلوم، غیر قابل استفاده می‌شوند و فرض می‌کنند که مشتریان توسط نزدیک‌ترین تسهیلی که دچار اختلال نشده است، خدمت‌دهی می‌شوند. با الهام از این مدل، برمن و همکاران<sup>[۲۰]</sup> در سال ۲۰۰۹ و شن و همکاران<sup>[۲۱]</sup> در سال ۲۰۱۱ مدل‌های جدید مکان‌یابی تسهیلات را با در نظر گرفتن اختلال توسعه داده و تحلیل کردند. برمن و همکاران در تحقیق خود فرض کردند که تسهیلات کاملاً قابل اطمینان نیستند و مشتریان هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد این‌که یک تسهیل داده شده سالم و فعال است یا نه، از قبل ندارند و فرض می‌شود که هر تسهیل با یک احتمال معلوم غیرعملیاتی است. در نتیجه ممکن است که چندین تسهیل را قبل از یافتن یک تسهیل فعال و سالم ملاقات کنند. شن و همکاران قابلیت اطمینان را در این حوزه مطرح کردند که در آن برخی از تسهیلات گاه‌گاه در معرض خرابی قرار می‌گیرند. اگر یک تسهیل خراب شود، مشتریانی که قبلاً به آن تخصیص یافته‌اند باید به یک تسهیل عملیاتی دیگر تخصیص یابند. در

مفهوم مدل مکان‌یابی هاب را با در نظر گرفتن شرط چندتخصیصه ارائه کرد. به این صورت که بخشی از تقاضا در گره غیرهاب از طریق هاب‌های متفاوت، بسته به مقصدشان، منتقل می‌شود.<sup>[۲]</sup> در مطالعه‌ی اسکورین کاپوف و همکاران<sup>[۸]</sup> نشان داده‌اند که مسئله‌ی مکان‌یابی هاب تک‌تخصیصه یک حالت خاص از مسئله‌ی مکان‌یابی هاب چندتخصیصه است که به آن محدودیت فرض تک‌تخصیصه اضافه شده است.

در اکثر مطالعات صورت گرفته مسئله‌ی مکان‌یابی هاب، اجزای شبکه‌ی هاب همواره سالم در نظر گرفته شده‌اند در حالی‌که برای هر زیرساخت تحت شبکه آسیب دیدگی و خرابی اجزای شبکه در طول مدت زمان استفاده از شبکه و همچنین در اثر حوادث و بلایای طبیعی نظیر زلزله، طوفان، سیل و خرابی عمدی نظیر اعتصاب و حملات تروریستی وجود دارد و اجتناب‌ناپذیر است.<sup>[۹]</sup> گره‌های هاب در شبکه به دلیل عملکردهای ویژه‌ی که دارند نقاط حساس و راهبردی شبکه هستند؛ بنابراین بعد از ایجاد اختلال در هر یک از هاب‌های شبکه نیاز به بازسازی سریع شبکه در طول مدت زمان تعمیر هاب برای کاهش هزینه‌های اختلالات مرتبط با خدمت‌رسانی است. بنابراین تصمیم‌گیری در مورد تخصیص مجدد گره‌های غیرهاب متصل به هاب مختل شده، به سایر هاب‌های شبکه یا عدم تخصیص آنها در شبکه در طول مدت زمان تعمیر هاب بعد از ایجاد اختلال از جمله اقدامات لازم در شبکه‌ی هاب است. در این تحقیق ما مسئله‌ی مکان‌یابی هاب تک‌تخصیصه قابل اطمینان را بررسی می‌کنیم که در آن هاب‌های شبکه بعد از مکان‌یابی و در طول عمر خدمت در معرض خرابی‌های تصادفی قرار دارند. فرض بر این است که بعد از خرابی یک هاب، گره‌های تخصیص یافته به آن باید مجدداً به هاب‌های فعال موجود تخصیص داده شوند که در این صورت جریان‌های ارسالی از مبادی به مقاصد یا باید از طریق هاب‌های تازه تخصیص یافته عبور داده شوند یا اینکه اگر هزینه‌ی چنین ارسال‌هایی بالا باشد، با پرداخت جریمه به ازای واحدهای جریان ارسال نشده، از خدمت‌دهی به آنها در طول مدت زمان کوتاه تعمیر هاب و برگشت به حالت عادی شبکه صرف نظر می‌شود. مسئله به صورت یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ی فرمول‌بندی و سپس با در نظرگیری مجموعه‌ی از سناریوهای تصادفی برای خرابی هاب‌ها، مدل معادل قطعی آن استخراج می‌شود. با توجه به اندازه‌ی بزرگ مسئله و سختی ذاتی مسائل مکان‌یابی هاب، برای حل مسائل در ابعاد واقعی یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی بر اساس الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ تطبیق یافته (ALNS)<sup>[۱]</sup> و شبیه‌سازی تبردید توسعه داده شده است.

ساختار نگارش مقاله‌ی حاضر به صورت زیر است. در بخش بعد مروری بر پژوهش‌های پیشین در زمینه‌ی مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با تأکید بر جنبه‌های اختلال و قابلیت اطمینان صورت می‌گیرد. در بخش ۳ به مدل‌سازی مسئله پرداخته می‌شود. روش حل فراابتکاری ارائه شده در بخش ۴ به تفصیل تشریح می‌شود. نتایج عددی حاصل از حل مسئله بر اساس دو مجموعه داده‌ی استاندارد موجود در پیشینه‌ی مکان‌یابی هاب در بخش ۵ ارائه می‌شود و در نهایت بخش ۶ به جمع‌بندی مقاله و ارائه‌ی پیشنهادهایی برای تحقیقاتی می‌پردازد.

## ۲. مرور پژوهش‌های پیشین

### ۲.۱. مسئله‌ی مکان‌یابی هاب

تاکنون مطالعات بسیار زیادی بر روی مسئله‌ی مکان‌یابی هاب صورت گرفته است که برخی از این مطالعات در راستای ارائه‌ی مدل‌های متنوع از حالات مختلف مسئله‌ی

پروژه و همکاران<sup>[۲۷]</sup> در سال ۲۰۱۳ در مطالعه‌ی خود امکان خرابی عمده‌ی هاب را مورد بررسی قرار دادند. آنها مسئله‌ی خود را به صورت یک بازی استکبرگ که شامل یک بازیگر رهبر و یک بازیگر پیرو است، در قالب یک مدل برنامه‌ریزی دو سطحی با در نظر گرفتن دو تابع هدف برای رهبر مدل‌سازی کردند. تابع هدف اول آنها در راستای کمینه‌کردن متوسط هزینه‌ی حمل‌ونقل است و تابع هدف دوم آنها در راستای کمینه‌کردن بیشینه‌ی هزینه‌ی اختلال وارده به شبکه است. در سال ۲۰۱۴ پروژه و همکاران<sup>[۲۸]</sup> مدلی را که در سال ۲۰۱۳ ارائه کرده بودند، توسعه دادند و مدل را در دو سطح با ۳ تابع هدف با افزایش یک متغیر تصمیم و دو محدودیت دیگر ارائه کردند و روش حل را نیز بهبود دادند.

در تحقیق جدیدتر<sup>[۲۹]</sup> در سال ۲۰۱۶، عزیزی و همکاران فرمول‌بندی جدیدی با در نظر گرفتن فرضیات متفاوت ارائه کردند. در این تحقیق یک هاب پشتیبان از هاب‌های موجود در شبکه برای هاب اختلال یافته انتخاب می‌شود و تمام جریان‌های تخصیص یافته به هاب اختلال یافته به هاب پشتیبان تخصیص می‌یابند.

همچنین در سال ۲۰۱۶ محمدی و همکاران<sup>[۳۰]</sup> در حوزه‌ی اختلال هاب‌ها در شبکه‌ی هاب با در نظر گرفتن فرضیاتی متفاوت مدل متفاوتی را ارائه کردند. آنها در تحقیق خود اختلال هاب را بر دو نوع تقسیم‌بندی کردند: ۱- اختلال کامل<sup>۳</sup> هاب (بحث دسترسی هاب) ۲- اختلال جزئی<sup>۴</sup> هاب (بحث ظرفیت هاب) و یک مدل در حالت اختلال جزئی هاب ارائه کردند که در مدل پیشنهادی ارتباط بین هاب‌ها را به صورت غیرکامل (درختی) در نظر گرفته بودند. زیرا در حالت ارتباط درختی هاب‌ها در شبکه یک اختلال جزئی در یکی از هاب‌های شبکه اثرات مخرب و هزینه‌های بسیار زیادی در شبکه به وجود می‌آورد.

در اکثر مطالعات اختلال هاب‌ها امکان اختلال فقط در یکی از هاب‌های شبکه وجود دارد. همچنین یکی از هاب‌های سالم شبکه به عنوان هاب پشتیبان انتخاب می‌شود. در این شرایط تمام تخصیص مجدد گره‌های غیرهاب مربوط به هاب اختلال یافته به هاب پشتیبان شبکه متصل می‌شوند؛ در نتیجه این امر باعث ایجاد ازدحام و تراکم در هاب پشتیبان می‌شود. در حالی که در مدل ریاضی پیشنهادی، امکان اختلال به طور هم‌زمان در بیش از یکی از هاب‌های شبکه با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف وجود دارد. علاوه بر این، امکان اتصال به تمام هاب‌های سالم شبکه به طور هم‌زمان بعد از اختلال وجود دارد. در واقع برای تمام هاب‌های شبکه امکان پشتیبانی هم‌زمان وجود دارد.

در تمام مطالعات بدون توجه به افزایش هزینه برقراری تمام ارتباطات شبکه در مدت زمان تعمیر هاب خراب مد نظر است. در صورتی که در تحقیق پیش رو جریمه‌ی برای گره‌هایی که فاصله‌ی بین آنها افزایش یافته است و ارسال جریان به صرفه نیست، در نظر گرفته شده است تا هزینه‌ی اختلال به وجود آمده کمینه شود. ایده‌ی استفاده از سناریوها برای نشان دادن اختلال در مسائل مکان‌یابی تسهیلات نخستین بار توسط شن و همکاران<sup>[۳۱]</sup> در سال ۲۰۱۱ ارائه شد. در تحقیق پیش رو نیز از سناریوها برای نشان دادن اختلال در هاب‌های شبکه استفاده شده است. با توجه به این‌که مسئله‌ی مکان‌یابی هاب همواره از نوع مسئله با پیچیدگی بالا (NP hard) می‌باشد، برای حل مدل پیشنهادی در تعداد اندازه‌ی نمونه‌ی بزرگ‌تر با توجه به سختی ذاتی، روش فراابتکاری ترکیب جستجوی همسایگی بزرگ تطبیق یافته (ALNS) ارائه شده و با روش شبیه‌سازی تبرید (SA) ترکیب شده است. نتایج به دست آمده نشان از کارایی الگوریتم پیشنهادی دارد. همچنین در بخش ۴ نیز نشان داده شده است که بر اساس مطالعات صورت گرفته روش جستجوی همسایگی بزرگ تطبیق یافته از توانمندی و کارایی زیادی برای حل مسائل مختلف با اندازه‌های بزرگ در مدت زمان کوتاه دارد.

تحقیق دیگر لیم و همکاران<sup>[۳۲]</sup> در سال ۲۰۱۰، مکان‌یابی تسهیلات و تصمیمات مربوط به تقاضا را در حضور اختلال مطالعه کردند. ایشان برای مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات، دو نوع تسهیل در نظر گرفتند: تسهیلات عادی که به آنها تسهیلات غیرقابل اطمینان اطلاق می‌شود و در معرض اختلالات تصادفی هستند و تسهیلات قابل اطمینان که در معرض اختلال قرار ندارند، اما نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی هستند.

ونگ و اواینگ<sup>[۳۳]</sup> در سال ۲۰۱۳ یک رویکرد تقریبی پیوسته، به منظور تعیین محل تسهیلات به صورت رقابتی در شرایط ریسک اختلال تسهیلات ارائه دادند. آنها از مدل‌های مربوط به نظریه‌ی بازی‌ها به منظور بهینه‌سازی تعیین محل تسهیلات خدمت رسان در شرایط رقابت مکانی و ریسک اختلال در تسهیلات استفاده کردند. سهم تقاضای مشتری در یک بازار به عملکرد تسهیلات خدمت رسان و حضور رقبا در مکان نزدیک به آن بستگی دارد؛ زیرا مشتریان معمولاً به دنبال نزدیک‌ترین تسهیل می‌گردند. مدل‌های نویسندگان که بر پایه‌ی نظریه‌ی بازی‌هاست، این عوامل پیچیده را در قالب یک چارچوب یکپارچه ادغام کرده است. آنان برای اعتبارسنجی مدل‌های پیشنهادی خود از داده‌های تجربی و فرضیه‌ی استفاده کرده‌اند و از این طریق تأثیر رقابت، ریسک‌های اختلال در تسهیلات، و هزینه‌های حمل‌ونقل را بر روی طراحی بهینه نشان داده‌اند.

مدال و همکاران در سال ۲۰۱۴ یک مدل چندهدفه برای استقرار تسهیلات با تحلیل توازن در شرایط قبل و بعد از اختلال ارائه دادند. آنها از دو روش برای کاهش ریسک اختلال یاد می‌کنند: ۱) تعیین محل تسهیلات به نحو راهبردی، به منظور تقلیل اثر ریسک، ۲) استفاده از تسهیلات محکم. نویسندگان این دو زمینه را تلفیق کرده‌اند. مدل پیشنهادی بیشترین فاصله از نقاط تقاضا تا نزدیکترین تسهیل موجود را پس از اختلال در تسهیلات کمینه می‌کند. در این مسئله فرض شده است که تصمیم‌گیرنده ریسک‌گریز است و مایل به کاهش اختلال در تسهیلات با بیشترین پیامدهاست و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه، بدین منظور پیشنهاد شده است.<sup>[۳۴]</sup>

### ۳.۲. اختلالات در مسائل مکان‌یابی هاب

با توجه به این‌که مسئله‌ی اختلال و اثرات آن در بحث‌های شبکه یک موضوع جدید در حوزه‌ی زنجیره‌ی تأمین است، مطالعات اندکی بر روی شبکه‌ی هاب انجام شده است. در مطالعه‌ی توسط تقی‌پوریان و همکاران<sup>[۳۵]</sup> مسئله‌ی مکان‌یابی هاب و خدمت رسانی هاب‌ها به گره‌های غیرهاب را در شرایط اختلال بررسی کرده‌اند. در این تحقیق برخی از گره‌های غیرهاب به عنوان هاب مجازی در نظر گرفته شده‌اند تا در شرایط قابل پیش‌بینی بودن نامساعدی آب و هوا و سایر اختلال‌ها هاب‌های اصلی بسته و هاب‌های مجازی باز شوند و شروع به خدمت رسانی به سایر گره‌ها نمایند و از مفاهیم فازی برای حالت غیرقابل پیش‌بینی اختلال‌ها استفاده کردند؛ آنها یک برنامه‌ریزی خطی صحیح فازی برای کمینه‌کردن هزینه ارائه کردند.

در مطالعه‌ی دیگر لی در سال ۲۰۱۳ مسئله‌ی جدیدی را در حوزه‌ی اختلال مکان‌یابی هاب مطرح کرد که با استفاده از مدل ارائه شده مجموعه‌ی از تسهیلات در شبکه‌ی هاب شناسایی می‌شوند که از دست رفتن آنها باعث ایجاد بیشینه‌ی اختلال در خدمت رسانی سیستم می‌شود. او یک مدل ریاضی عدد صحیح با استفاده از محدودیت‌های خاصی ارائه کرد که هزینه‌ی جریان‌های مبادی و مقاصد را از طریق ایجاد ارتباط با سایر هاب‌های سالم شبکه کمینه می‌کند.<sup>[۳۶]</sup>

$$V_{ij}(\xi) = \begin{cases} 1 & \text{جریان بین دو گره } i \text{ و } j \text{ به دلیل هزینه‌ی بالا منتقل نمی‌شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

بر اساس متغیرها و پارامترهای بالا، مدل ریاضی برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ی مسئله به صورت زیر خواهد بود:

### ۴.۳. مدل ریاضی

$$\min \sum_k f_k Z_k + E[Q(Z, \xi)]$$

$$\text{subject to :} \quad (1)$$

$$Z_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \quad (2)$$

که در آن

$$Q(Z, \xi) = \min \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m w_{ij} c_{ijkm} X_{ijkm}(\xi) \quad (3)$$

$$+ \sum_i \sum_j \theta w_{ij} V_{ij}(\xi) \quad (3)$$

$$\sum_k Y_{ik}(\xi) = 1 \quad \forall i \quad (4)$$

$$Y_{ik}(\xi) \leq Z_k \quad \forall i, k \quad (5)$$

$$Y_{ik}(\xi) \leq I_k(\xi) \quad \forall i, k \quad (6)$$

$$\sum_m X_{ijkm}(\xi) \leq Y_{ik}(\xi) \quad \forall i, j, k \quad (7)$$

$$\sum_k X_{ijkm}(\xi) \leq Y_{jm}(\xi) \quad \forall i, j, m \quad (8)$$

$$\sum_k \sum_m X_{ijkm}(\xi) + V_{ij}(\xi) = 1 \quad \forall i, j \quad (9)$$

$$X_{ijkm}(\xi) \geq 0 \quad \forall i, j, k, m \quad (10)$$

$$Y_{ik}(\xi) \geq 0 \quad \forall i, k \quad (11)$$

$$V_{ij}(\xi) \geq 0 \quad \forall i, j \quad (12)$$

در مدل ریاضی  $E\xi$  امید ریاضی کمیت‌های تصادفی با توجه به پیشامد  $\xi$  است و  $\Xi$  دامنه یا مجموعه‌ی پشتیبان  $\xi$  را نشان می‌دهد. تابع هدف شماره ۱ مجموع هزینه‌ی ایجاد هاب‌ها در مرحله‌ی اول و امید ریاضی هزینه‌ی حمل‌ونقل در مرحله‌ی دوم را کمیته می‌کند. تابع هدف شماره ۳ مقدار میانگین هزینه‌های مرحله دوم را محاسبه می‌کند. رابطه‌ی شماره ۴ بیان می‌کند که هر گره غیرهاب  $i$  دقیقاً باید به یک گره هاب تخصیص یابد. نامعادله‌ی شماره ۵ اطمینان می‌دهد که هر گره غیر هاب  $i$  به گره‌ی که در آن هاب ایجاد نشده باشد، تخصیص نیابد. نامعادله‌ی شماره ۶ اطمینان می‌دهد هر گره غیرهاب  $i$  به هاب اختلال یافته در شبکه تخصیص نیابد. نامعادلات ۷ و ۸ اطمینان می‌دهند که در صورتی که جریانی از مبدأ  $i$  به مقصد  $j$  ارسال شود، از طریق هاب‌های  $k$  و  $m$  در شبکه ارسال شوند. رابطه‌ی شماره ۹ اطمینان می‌دهد که جریان یا از طریق هاب‌های شبکه برقرار می‌شود یا جریان در شبکه به دلیل هزینه‌ی بیشتر از مقدار جریمه برقرار نمی‌شود و جریمه پرداخت می‌شود. نامعادله‌های شماره ۲، ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ نشان دهنده‌ی دامنه‌ی متغیرهای مدل ریاضی مسئله هستند.

### ۳. مدل‌سازی ریاضی

فرض کنید  $G = (N, E)$  نشان دهنده‌ی گراف شبکه‌ی مورد نظر باشد. در این گراف  $N$  نشان دهنده‌ی گره‌های شبکه و  $E \subset (N \times N)$  نشان دهنده‌ی یال‌های شبکه است. در شبکه‌ی هاب تعداد  $J$  گره از  $N$  گره شبکه به عنوان هاب انتخاب می‌شوند و  $N - J$  گره باقی‌مانده به عنوان گره‌های غیرهاب شبکه شناخته می‌شوند که به گره‌های هاب شبکه تخصیص می‌یابند.

### ۱.۳. اندیس‌های مدل

$i, j$ : گره‌های شبکه  $i \in N$  و  $j \in N$

$k$ : گره‌هاب اول در مسیر  $i$  به  $j$  در شبکه  $k \in N$

$m$ : گره‌هاب دوم در مسیر  $i$  به  $j$  در شبکه  $m \in N$

### ۲.۳. پارامترهای مدل

$f_k$ : هزینه‌ی تأسیس هاب در گره  $k$  ( $k \in N$ )

$I_k(\xi)$ : پارامترهای صفر و یک هستند که نشان دهنده‌ی وضعیت هاب‌های مسئله‌ی تحت پیشامد تصادفی  $\xi$  هستند؛ اگر مساوی با صفر باشد یعنی اینکه هاب  $k$  سالم و فعال است و در غیر این صورت اختلال در هاب صورت گرفته است.

$W_{ij}$ : مقدار جریان ارسالی از گره مبدأ  $i \in N$  به گره مقصد  $j \in N$

$C_{ij}$ : هزینه‌ی جریان ارسالی از گره مبدأ  $i \in N$  به گره مقصد  $j \in N$

$\alpha$ : ضریب تخفیف هزینه‌ی جریان بین دو هاب  $k \in N$  و  $m \in N$  شبکه که مقدار آن بین صفر و یک است. ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

$C_{ijkm}$ : هزینه‌ی ارسال جریان از گره مبدأ  $i \in N$  به گره مقصد  $j \in N$  که از طریق هاب‌های  $k \in N$  و  $m \in N$  شبکه صورت می‌پذیرد. که این هزینه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{ijkm} = C_{ik} + \alpha C_{km} + C_{mj}$$

$\theta$ : هزینه‌ی جریمه برای جریان‌هایی از مبدأ  $i$  به مقصد  $j$  که پس از تخصیص

مجدد به هاب‌های سالم ارسال آنها به صرفه نیست.

### ۳.۳. متغیرهای مدل

$$Z_k = \begin{cases} 1 & \text{در صورتی که هاب در مکان } k \text{ باز شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$Y_{ik}(\xi) = \begin{cases} 1 & \text{در صورتی که گره } i \text{ به هاب باز شده در مکان } k \text{ تخصیص یابد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$Y_{jm}(\xi) = \begin{cases} 1 & \text{در صورتی که گره } j \text{ به هاب باز شده در مکان } m \text{ تخصیص یابد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$X_{ijkm}(\xi) = \begin{cases} 1 & \text{جریان } i \text{ به } j \text{ از طریق هاب‌های } k \text{ و } m \text{ منتقل شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

محاسباتی<sup>۵</sup> بالاست، حل دقیق آن برای مسائل با اندازه‌ی بزرگ و واقعی به شدت زمان بر و برخی مواقع غیرممکن است. در حالت کلی حل مسئله‌ی مکان‌یابی هاب تک‌تخصیصه در مقایسه با حالت چندتخصیصه سخت‌تر است. با وجود این مسائل مکان‌یابی هاب در هر دو حالت تک‌تخصیصه و چندتخصیصه NP hard هستند<sup>[۱]</sup>، زمانی که تعداد هاب‌ها در مسئله‌ی مکان‌یابی p- هاب میانه بیشتر از دو عدد باشد ( $P > 2$ ) مسئله NP hard می‌شود، حتی اگر مکان هاب‌ها ثابت در نظر گرفته شده باشند.<sup>[۳۱]</sup>

برای حل مدل ارائه شده روش جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی یافته (ALNS) با روش شبیه‌سازی تبرید<sup>۶</sup> ترکیب شده و این روش توسعه داده شده است. با استفاده از روش جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی یافته مکان هاب‌ها در شبکه مشخص می‌شود و با استفاده از روش شبیه‌سازی تبرید گره‌های غیرهاب شبکه به گره‌های هاب شبکه تخصیص داده شده‌اند. روش ALNS در اصل توسعه یافته‌ی روش جستجوی همسایگی بزرگ (LNS)<sup>۷</sup> است که نخستین بار توسط شاول<sup>[۳۲]</sup> ارائه شده است. روش ALNS که نخستین بار برای حل مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه مورد استفاده قرار گرفت.<sup>[۳۳]</sup> در ادامه در انواع مسائل مسیریابی، از جمله مسیریابی تولید<sup>[۳۴]</sup>، مسیریابی موجودی<sup>[۳۵، ۳۶]</sup> مسیریابی تصادفی کمان‌ها<sup>[۳۷]</sup>، مسیریابی تجمعی وسایل نقلیه<sup>[۳۸]</sup> استفاده شده است؛ اخیراً در سال ۲۰۱۶ گرانگبر و همکاران<sup>[۳۹]</sup> از این روش برای حل مسئله‌ی مسیریابی دوسطحی چندسفره استفاده کرده‌اند.

در تحقیقی در سال ۲۰۱۲ هملمایرو همکاران<sup>[۴۰]</sup> برای حل مسئله‌ی دوسطحی مسیریابی وسایل نقلیه و حل مسئله‌ی مسیریابی مکان‌یابی (LRP)<sup>۸</sup> استفاده کردند. آنها در تحقیق خود نشان دادند که جواب‌های به دست آمده از این روش بهتر از روش‌های دیگر در مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه دوسطحی است و نتایج عالی در خصوص LRP به دست آمده است. در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۱۲ دمیر و همکاران<sup>[۴۱]</sup> از این الگوریتم برای حل مسئله‌ی مسیریابی - آلودگی (PRP)<sup>۹</sup> استفاده کردند و نتایج به دست آمده حاکی از مؤثر بودن الگوریتم استفاده شده است. علاوه بر مسائل مسیریابی در مسائل دیگری نیز استفاده‌ی گسترده‌ی الگوریتم جستجوی همسایگی تطبیقی یافته شده است. می‌توان به تحقیق سال ۲۰۱۶ ماوری و همکاران<sup>[۴۲]</sup> اشاره کرد که از این الگوریتم برای حل مسئله‌ی تخصیص اسکله استفاده کردند. نتایج به دست آمده در این مسئله نیز نشان از بهبود جواب در اکثر موارد نسبت به الگوریتم‌های استفاده شده برای حل این مسئله دارد. در سال ۲۰۱۵ باکهاوگ و همکاران<sup>[۴۳]</sup> برای حل مسئله‌ی استقرار ناوگان با الزامات جدایی سفر از الگوریتم ذکر شده استفاده کردند و در اندازه‌های کوچک با جواب‌های به دست آمده از روش‌های دقیق مقایسه کردند و نتایج نشان از عملکرد بالای الگوریتم در زمان کمتر داشت. همچنین در سال ۲۰۱۶ کانکا و همکاران<sup>[۴۴]</sup> برای حل مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی یکپارچه‌ی حمل‌ونقل سریع راه‌آهن و مسئله‌ی برنامه‌ریزی خط راه‌آهن از روش ALNS استفاده کردند. در سال ۲۰۱۶ لوسبی و همکاران<sup>[۴۵]</sup> برای مسئله‌ی زمان‌بندی پذیرش بیمار به صورت پویا استفاده کردند آنها روش پیشنهادی را در اندازه‌ی نمونه‌ی ۴۵ تایی قابل دسترس در عموم بررسی کردند و با بهترین روش قبلی حل شده مقایسه کردند که در کیفیت جواب‌های روش قبلی در حدود ۱٪ متفاوت بود و زمان به دست آمده از این روش بسیار پایین‌تر از روش‌های قبلی است. همچنین نویسندگان در مسائل با اندازه‌ی ۱۰۰۰-۴۰۰۰ روش مذکور را مورد استفاده قرار دادند که کیفیت جواب‌ها به صورت میانگین ۳ الی ۱۴ درصد بهتر بود و زمان حل به میزان قابل ملاحظه‌ی در این اندازه‌های بزرگ کاهش یافته بود.

فرض کنید در این مدل ریاضی عدم قطعیت در وضعیت فعال و غیرفعال بودن هاب‌ها توسط مجموعه‌ی از سناریوها ( $s \in S$ ) تعریف و احتمال وقوع هر یک از این سناریوها  $p_s$  در نظر گرفته شود. پارامترهای سناریوی  $I_{k,s}(\xi)$  نیز به صورت  $I_{k,s}$  تعریف شوند. در این صورت حالت توسعه یافته‌ی قطعی معادل با مدل ریاضی برنامه‌ریزی دو مرحله‌ی تصادفی ارائه شده به صورت زیر خواهد بود:

$$\min \sum_k f_k Z_k + \sum_s p_s \left( \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m W_{ij} C_{ijkm} X_{ijkm}^s + \sum_i \sum_j \theta W_{ij} V_{ij}^s \right) \quad (13)$$

Subject to :

$$\sum_k Y_{ik}^s = 1 \quad \forall i, s \quad (14)$$

$$Y_{ik}^s \leq I_{ks} Z_k \quad \forall i, k, s \quad (15)$$

$$\sum_m X_{ijkm}^s \leq Y_{ik}^s \quad \forall i, j, k, s \quad (16)$$

$$\sum_k X_{ijkm}^s \leq Y_{jm}^s \quad \forall i, j, m, s \quad (17)$$

$$\sum_k \sum_m X_{ijkm}^s + V_{ij}^s = 1 \quad \forall i, j, s \quad (18)$$

$$Y_{ik}^s, Z_k \in \{0, 1\} \quad \forall i, k, s \quad (19)$$

$$X_{ijkm}^s \geq 0 \quad \forall j, k, m, s \quad (20)$$

$$V_{ij}^s \geq 0 \quad \forall i, j \quad (21)$$

در این مدل معادله‌ی شماره ۱۴ همانند معادله‌ی شماره ۴ عمل می‌کند. نامعادله‌ی شماره ۱۵ ترکیب دو نامعادله‌ی شماره ۵ و ۶ است که تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب‌های سالم شبکه را تضمین می‌کند؛ در این محدودیت متغیر  $Z_k$  نشان دهنده‌ی هاب‌های شبکه است و مقدار این متغیر از طریق مدل محاسبه می‌شود. ولی  $I_{k,s}$  که به صورت پارامترهای صفر و یک است نشان دهنده‌ی وضعیت سالم یا خراب بودن هاب‌های  $k$  انتخاب شده در مدل است و از طریق جدول شماره ۶ در بخش ۵ قابل مشاهده است. نامعادله‌ی شماره ۱۶ و شماره ۱۷ به ترتیب همانند نامعادلات شماره‌های ۷ و ۸ هستند و معادله‌ی شماره ۲۰ اطمینان می‌دهد که جریان از طریق هاب‌های سالم در شبکه ارسال می‌شود یا جریان‌ها در شبکه ارسال نمی‌شود.

متغیرهای مسئله از نوع صفر و یک هستند و با توجه به اینکه مدل از نوع کمینه سازی است ذاتاً مدل به دنبال انتخاب متغیرها با مقدار صفر است که در محدودیت‌های مدل معادله‌ی شماره ۱۴ باعث می‌شود که هر گره غیرهاب شبکه به یک گره هاب در شبکه تخصیص یابد که برخی از متغیرهای  $Y_{ik}^s$  مقدار یک را اختیار می‌کنند. معادله‌ی شماره ۱۸ نیز اطمینان می‌دهد از بین متغیرهای ارسال جریان از مبدأ  $i$  به مقصد  $j$  از طریق هاب‌های سالم شبکه  $(X_{ijkm}^s)$  و متغیرهای عدم ارسال جریان از مبدأ  $i$  به مقصد  $(V_{ij}^s)$  حتماً یکی از متغیرها مقدار یک اختیار کند. بنابراین، بسیاری از متغیرها مقدار یک را اختیار خواهند کرد و مقدار تابع هدف برابر صفر نخواهد شد.

#### ۴. روش حل فراابتکاری

با توجه به این‌که مسئله‌ی مکان‌یابی هاب جزو مسائل سخت بهینه‌سازی با پیچیدگی

در این روش  $S_1, S_2, S_3$  و پارامترهایی هستند که مقادیر آنها به صورت  $S_1 \geq S_2 \geq S_3$  است مقدار بالای  $\psi$  مطابق با اپراتور (الگوریتم ابتکاری) موفق است. اگر  $d_i$  و  $r_i$  به ترتیب نشان دهنده‌ی اپراتور تخریب و اپراتور تعمیر مورد استفاده در آخرین تکرار از الگوریتم باشد، اجزای مربوط به روش خرابی و روش تعمیر انتخاب شده در احتمال  $P(d_i)$  و  $P(r_i)$  با استفاده از معادلات زیر روزآمد می‌شوند:

$$P(d_{i+1}) = \lambda P(d_i) + (\lambda - 1)\psi$$

$$P(r_{i+1}) = \lambda P(r_i) + (\lambda - 1)\psi$$

در این معادلات  $\lambda$  یک عدد بین صفر و یک است که حساسیت وزن‌های اپراتورها را نسبت به عملکرد آنها در الگوریتم کنترل می‌کند. وزن‌هایی که در تکرار فعلی استفاده نمی‌شوند بدون تغییر باقی می‌مانند. هدف تنظیم وزن تطبیق یافته انتخاب وزن‌هایی هست که برای حل مسئله مورد نظر بهتر عمل می‌کنند. روش فراابتکاری ALNS معمولاً تمایل بیشتری از روش‌های ابتکاری پیچیده‌تر برای اپراتور تعمیر نسبت به روش ساده‌تر به دلیل پیدا کردن جواب با کیفیت بالا دارد، ولی این حالت زمانی بهتر است که هر دو به یک مقدار زمان صرف کنند؛ اگر برخی از روش‌ها به میزان قابل توجهی آهسته‌تر از سایر روش‌ها باشند، می‌توان امتیاز  $\psi$  توسط یک روش را در مقایسه با زمان مصرفی آن نرمال‌سازی کرد. این حالت تضمین می‌کند که موازنه‌ی مناسبی بین زمان مصرف و کیفیت جواب اپراتور به وجود آید.

برای حل مسئله‌ی مکان‌یابی هاب با استفاده از الگوریتم ALNS از چهار الگوریتم ابتکاری تخریب و از سه الگوریتم ابتکاری تعمیر استفاده شده است. الگوریتم ابتکاری پیشنهادی اپراتورهای تخریب شماره یک، شماره دو و شماره سه قابلیت ترکیب با اپراتورهای تعمیر شماره یک و شماره دو را دارند. اپراتور تخریب شماره چهار در ترکیب با اپراتور تعمیر شماره سه استفاده می‌شود. یعنی در صورتی که الگوریتم اپراتور تخریب شماره چهار را برای خراب کردن قسمتی از جواب انتخاب کند، قطعاً اپراتوری که برای تعمیر استفاده می‌شود اپراتور تعمیر شماره سه خواهد بود.

#### ۲.۴. اپراتور تخریب شماره یک

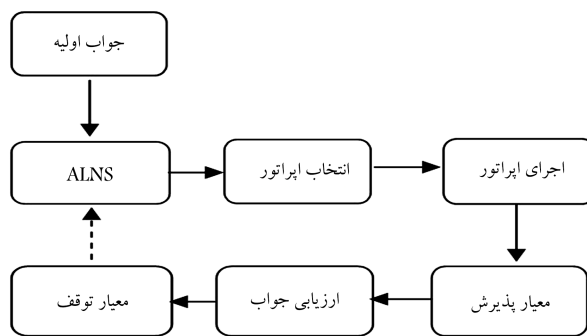
در روش ابتکاری تخریب شماره یک، گره‌های هاب جواب داده شده در نظر گرفته می‌شوند و تعداد ۴۰٪ گره‌های هاب به حالت غیرهاب تبدیل می‌شوند در واقع هدف این اپراتور خراب کردن بخشی از هاب‌های مسئله است.

#### ۳.۴. اپراتور تخریب شماره دو

در روش ابتکاری تخریب شماره دو، گره‌های غیر هاب جواب داده شده در نظر گرفته می‌شوند و تعداد ۴۰٪ گره‌های غیرهاب به حالت هاب تبدیل می‌شوند. در واقع هدف این اپراتور خراب کردن بخشی از گره‌های غیرهاب مسئله است.

#### ۴.۴. اپراتور تخریب شماره سه

در روش ابتکاری تخریب شماره سه، کل گره‌های شبکه در نظر گرفته می‌شوند و تعداد ۶۰٪ از گره‌های مسئله انتخاب و یک جواب جدیدی به جای آنها تولید می‌شود. در این جواب جدید گره‌های هاب به غیرهاب و گره‌های غیرهاب‌ها به هاب تبدیل می‌شوند.



شکل ۱. ترتیب مراحل الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ تطبیق یافته.

#### ۱.۴. الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ تطبیق یافته (ALNS):

عملکرد الگوریتم‌های LNS و ALNS به این صورت است که بخشی از جواب اولیه‌ی به دست آمده با استفاده از الگوریتم ابتکاری تخریب، خراب می‌شود و به امید پیدا کردن جواب بهتر با استفاده از الگوریتم ابتکاری تعمیر، جواب حاصل از الگوریتم ابتکاری تخریب اصلاح می‌شود و بهبود می‌یابد. مراحل اجرای الگوریتم ALNS در حالت کلی مطابق شکل ۱ است.

تفاوت بین روش LNS و ALNS به این صورت است که در روش LNS فقط از یک اپراتور تخریب و یک اپراتور تعمیر استفاده می‌شود، ولی در روش ALNS امکان استفاده از چندین اپراتور تخریب و چندین اپراتور تعمیر مهیا می‌شود (هر اپراتور نشان دهنده‌ی یک الگوریتم ابتکاری تخریب و تعمیر است). بنابراین برای استفاده‌ی بهتر از این اپراتورها روش ALNS برای هر اپراتور یک وزنی را اختصاص می‌دهد که منعکس‌کننده‌ی موفقیت اپراتور مربوطه است. در طول مدت زمان اجرای الگوریتم این وزن‌ها توسط یک تابع به طور متناوب تنظیم می‌شوند. انتخاب اپراتورها در هر تکرار احتمالی و براساس وزن‌ها خواهد بود. فرض کنید  $D = \{d_i | i = 1, \dots, k\}$  مجموعه‌ی  $k$  اپراتور تخریب باشد و  $R = \{r_i | i = 1, \dots, l\}$  مجموعه‌ی  $l$  اپراتور تعمیر باشد. وزن‌های اولیه‌ی اپراتور  $w(d_i)$  و  $w(r_i)$  هستند که معمولاً نخستین بار مقدار همه‌ی آنها برابر با یک قرار داده می‌شود. بنابراین احتمال انتخاب اپراتور به صورت زیر است:

$$P(d_i) = \frac{W(d_i)}{\sum_{j=1}^k W(d_j)} \quad \text{و} \quad P(r_i) = \frac{W(r_i)}{\sum_{j=1}^l W(r_j)}$$

تنظیم وزن اپراتورها برای افزایش احتمال استفاده از اپراتورهای موفق نسبت به استفاده از اپراتورهای با موفقیت کمتر بسیار مهم است. موفقیت اپراتورها در مسائل مختلف متفاوت است و بر اساس تعداد نمونه در یک مسئله و حتی در مسئله‌های مشابه تغییر می‌کند. بنابراین لازم است که توسط یک تابع، احتمال انتخاب هر یک از اپراتورها تنظیم شوند.

عملکرد هر یک از روش‌های تعمیر و تخریب تنظیم می‌شود؛ زمانی که یک تکرار از الگوریتم ALNS به اتمام برسد، امتیازی برای روش خرابی و روش تعمیر مورد استفاده در آن تکرار با استفاده از فرمول زیر داده می‌شود:

$$\max = \psi \begin{cases} S_1 & \text{اگر جواب جدید بهترین جواب جدید کلی باشد.} \\ S_2 & \text{اگر جواب جدید از جواب فعلی بهتر باشد.} \\ S_3 & \text{اگر جواب جدید قابل قبول باشد.} \\ S_4 & \text{اگر جواب جدید غیر قابل قبول باشد.} \end{cases} \quad (22)$$

بود، تغییر پذیرفته می شود و در غیر این صورت رد می شود. در دمای بالا، احتمال پذیرش جواب های بد افزایش می یابد. اگر  $T = \infty$ ، آنگاه تمام حرکت ها پذیرفته می شوند. در واقع در این حالت الگوریتم به یک الگوریتم جستجوی تصادفی در فضای جواب تبدیل می شود در دمای پایین، احتمال پذیرش جواب های بد کاهش می یابد. اگر  $T = 0$ ، آنگاه هیچ جواب بدی پذیرفته نمی شود. در این حالت الگوریتم تبدیل به یک الگوریتم جستجوی محلی تبدیل می شود. اگر دمای اولیه بسیار بالا باشد، جستجو کم و بسیار تصادفی می شود. همچنین هنگامی که دما بسیار کم باشد، جستجو به یک جستجوی محلی تبدیل می شود. بنابراین باید تعادلی بین این دو حالت ایجاد شود.

بنابراین دمای اولیه برابر با عدد  $(T_0 = 10)$  در نظر گرفته شده است و دما نیز با استفاده از فرمول  $T = \alpha \cdot T_0$  که مقدار  $\alpha$  برابر  $0.9$  است، کاهش می یابد. معیار توقف برای رسیدن به حالت تعادل در صورتی که تعداد هاب های مسئله کمتر از  $6$  عدد باشد، تعداد دفعات کاهش دما  $20$  بار در نظر گرفته شده است و در صورتی که تعداد هاب ها از  $6$  عدد بیشتر باشد به دلیل این که تعداد حالات تخصیص های گره های غیرهاب به هاب های شبکه نسبت به حالت تعداد هاب کمتر از  $6$  بیشتر است، تعداد دفعات کاهش دما  $30$  بار در نظر گرفته شده است. بنابراین معیار توقف الگوریتم رسیدن به تعداد دفعات تکرار تعیین شده است.

## ۵. نتایج عددی

برای اطمینان از کارایی روش حل پیشنهادی و همچنین مدل ریاضی پیشنهاد شده تعدادی آزمایش محاسباتی با استفاده از دو سری مجموعه داده ی پرکاربرد در پیشینه ی مسئله ی مکان یابی هاب انجام شده است که نتایج آن در این بخش ارائه شده است. اولین مجموعه داده یی که برای محاسبات استفاده شده است، مجموعه داده ی CAB است که بر اساس اطلاعات مسافرت هوایی بین  $25$  شهر ایالات متحده آمریکا است. از آن جایی که مجموعه داده CAB شامل هزینه ی ثابت برای ایجاد هاب نیست، پنج مقدار برای پارامتر هزینه ی ثابت که عبارت اند از:  $50$ ،  $100$ ،  $150$  و  $200$  در نظر گرفته شده است. دومین مجموعه داده یی که برای آزمایش محاسباتی استفاده شده است مجموعه داده ی TR است اطلاعات این مجموعه داده بر اساس جریان حمل محموله بین  $81$  شهر ترکیه است. هزینه های ثابت ایجاد هاب با استفاده از چهار ضریب مختلف  $0.1$ ،  $0.2$ ،  $0.3$  و  $0.4$  مقیاس گذاری شده است.

پارامتر ضریب تخفیف  $\alpha$  برای هر دو مجموعه داده در پنج سطح  $0.2$ ،  $0.4$ ،  $0.6$ ،  $0.8$  و  $1$  مطابق با مقادیر پرکاربرد در پیشینه ی موضوع استفاده شده است. مدل ریاضی با استفاده از نرم افزار بهینه سازی ILOG CPLEX 12.6 و همچنین با استفاده از روش حل پیشنهادی جستجوی همسایگی بزرگ تطبیق یافته ی ترکیب شده با شبیه سازی تریید که در نرم افزار متلب کد نویسی شده، حل شده است. تمام محاسبات در رایانه یی با مشخصات پردازنده ی مرکزی سه هسته  $(Core i3)$  با سرعت  $3.3$  گیگاهرتز و حافظه ی جانبی  $4$  گیگابایت تحت سیستم عامل ویندوز  $7$  انجام شده است.

نتایج به دست آمده از حل مسئله با استفاده از نرم افزار بهینه سازی CPLEX و روش جستجوی همسایگی بزرگ تطبیق یافته ی (ALNS) ترکیب شده با روش شبیه سازی تریید (SA) در مجموعه ی داده CAB با ضریب جریمه با مقادیر  $1500$ ،  $2000$  و  $2500$  به ترتیب در جدول شماره  $1$ ، جدول شماره  $2$  و جدول شماره  $3$

## ۵.۴. اپراتور تعمیر شماره یک

در روش ابتکاری تعمیر شماره یک، ابتدا میانگین سناریوهای ورودی مسئله در نظر گرفته می شود و تعداد  $10\%$  از گره های هاب جواب به دست آمده از روش ابتکاری تخریب، انتخاب می شوند. در صورتی که احتمال خرابی هاب انتخاب شده در میانگین سناریوهای مسئله کم باشد، گره به صورت هاب باقی می ماند و در صورتی که احتمال خرابی هاب در میانگین سناریوها بیشتر باشد الگوریتم گره را از حالت هاب بودن خارج می کند و در ادامه نزدیک ترین گره به آن را انتخاب و در صورتی که احتمال خرابی گره کمتر باشد، آن را به گره هاب تبدیل می کند.

## ۶.۴. اپراتور تعمیر شماره دو

در روش ابتکاری تعمیر شماره دو، گره ها در شبکه بر اساس مجموع فواصل از سایر گره ها به صورت غیر نزولی مرتب می شوند. سپس  $10\%$  از هاب ها (جواب به دست آمده از اپراتور خرابی) که دارای بیشترین مجموع فواصل هستند به گره غیرهاب تبدیل می شوند. در مقابل گره یی که دارای کمترین مجموع فواصل از سایر گره هاست به حالت هاب تبدیل می شود.

## ۷.۴. اپراتور تخریب شماره چهار و اپراتور تعمیر شماره سه

روش تخریب شماره چهار و روش تعمیر شماره  $3$  به صورت متوالی و توأم انجام می گیرند. به عبارت دیگر، روش تعمیر شماره سه فقط برای تعمیر جواب های تخریب شده توسط اپراتور تخریب شماره چهار مورد استفاده قرار می گیرد. در روش ابتکاری تخریب شماره چهار تعداد  $20\%$  گره های هاب به صورت تصادفی انتخاب می شوند و برای هر یک از هاب های انتخاب شده روش ابتکاری تعمیر شماره سه، هزینه ی شبکه به دو صورت محاسبه می شود: الف) با فرض این که گره هاب انتخاب شده به صورت هاب باقی بماند ب) با فرض این که گره هاب انتخاب شده به گره غیرهاب تبدیل شود. اگر هزینه ی به دست آمده از روش الف کمتر از روش ب باشد گره به صورت هاب باقی می ماند در غیر این صورت به گره غیرهاب تبدیل می شود.

نتایج نشان می دهد که استفاده از اپراتور تخریب شماره چهار با اپراتور تعمیر شماره سه موجب می شود جواب ها با کیفیت بهتر و موفقیت بالاتری در مقایسه با استفاده از ترکیب سایر اپراتورهای تعمیر و خراب به دست آیند اما زمان بیشتری برای حل نسبت به ترکیب سایر اپراتورها نیاز دارد.

## ۸.۴. الگوریتم شبیه سازی تریید

در حل مسئله برای تخصیص گره های غیرهاب به هاب از روش شبیه سازی تریید استفاده شده است، الگوریتم تریید شبیه سازی شده اولین بار توسط کریکاتریک و همکاران<sup>[۴۶]</sup> و کرنی و همکاران<sup>[۴۷]</sup> برای حل مسائل بهینه سازی سخت ارائه شده است. ایده ی اصلی این روش از عملیات حرارتی برای تغییر در کیفیت فیزیکی و سختی سطحی فلزات گرفته شده است. در روش ارائه شده در این مقاله با تخصیص گره های غیرهاب به هاب مقدار تابع هدف مسئله محاسبه می شود. با تغییر همسایگی در صورتی که جواب به دست آمده از جواب فعلی بهتر باشد جواب جدید انتخاب می شود. در صورتی که جواب به دست آمده از جواب فعلی بدتر باشد، با احتمال  $e^{-\Delta z/T}$  برای خارج شدن از بهینه ی محلی پذیرفته می شود. در واقع فرایند پذیرش جواب بدتر به این صورت انجام می شود که یک عدد به صورت تصادفی از بازه  $0$  تا  $1$  انتخاب می شود؛ آنگاه اگر عدد تصادفی کمتر یا مساوی مقدار  $e^{-\Delta z/T}$

جدول ۱. نتایج مجموعه داده‌ی CAB با  $\theta = 150^\circ$ .

%GAP	ALNS - SA			CPLEX			F	$\alpha$
	CPU(s)	Hubs	Opt	CPU(s)	Hubs	Opt		
۰/۰۰	۴۱,۶۷	۴,۶,۹,۱۱,۱۲,۱۴,۱۶,۱۷,۱۸,۲۲,۲۴	۷۴۱,۳۰	۳۱,۸۷	۴,۶,۹,۱۱,۱۲,۱۴,۱۶,۱۷,۱۸,۲۲,۲۴	۷۴۱,۳۰	۲۰	
۰/۰۰	۴۱,۳۱	۴,۶,۱۲,۱۶,۱۷,۱۸,۲۲,۲۴	۹۹۵,۹۷	۵۷,۳۷	۴,۶,۱۲,۱۶,۱۷,۱۸,۲۲,۲۴	۹۹۵,۹۷	۵۰	
۰/۰۰	۴۵,۷۱	۵,۱۸	۱۲۴۴,۷۴	۳۳۶,۵۸	۵,۱۸	۱۲۴۴,۷۴	۱۰۰	۰,۲
۰/۰۰	۴۱,۶۳	۲۵	۱۳۲۵,۶۳	۱۰۰,۲۰	۲۵	۱۳۲۵,۶۳	۱۵۰	
۰/۰۰	۴۱,۸۹	۲۵	۱۳۷۵,۶۳	۳۹,۸۰	۲۵	۱۳۷۵,۶۳	۲۰۰	
۰/۰۰	۴۴,۰۵	۴,۶,۱۱,۱۲,۱۴,۱۶,۱۷,۱۸,۲۲,۲۴	۹۰۰,۵۷	۵۶,۲۱	۴,۶,۱۱,۱۲,۱۴,۱۶,۱۷,۱۸,۲۲,۲۴	۹۰۰,۵۷	۲۰	
۰/۰۰	۴۷,۰۶	۴,۶,۱۲,۱۷,۱۸,۲۴	۱۱۲۷,۵۳	۱۱۰,۶۱	۴,۶,۱۲,۱۷,۱۸,۲۴	۱۱۲۷,۵۳	۵۰	
۰/۰۰	۴۱,۵۷	۵,۱۸	۱۲۵۸,۴۵	۲۹۳,۰۶	۵,۱۸	۱۲۵۸,۴۵	۱۰۰	۰,۴
۰/۰۰	۴۵,۸۰	۲۵	۱۳۲۵,۶۳	۷۰,۱۵	۲۵	۱۳۲۵,۶۳	۱۵۰	
۰/۰۰	۴۹,۲۴	۲۵	۱۳۷۵,۶۳	۳۶,۱۷	۲۵	۱۳۷۵,۶۳	۲۰۰	
۰/۰۰	۴۸,۹۷	۴,۶,۱۲,۱۶,۱۷,۱۸,۲۲,۲۴	۱۰۱۵,۰۲	۸۲,۸۷	۴,۶,۱۲,۱۶,۱۷,۱۸,۲۲,۲۴	۱۰۱۵,۰۲	۲۰	
۰/۰۰	۴۸,۲۶	۴,۱۷,۲۵	۱۱۶۳,۲۷	۳۳۷,۳۹	۴,۱۷,۲۵	۱۱۶۳,۲۷	۵۰	
۰/۰۰	۴۱,۹۰	۵,۱۸	۱۲۷۰,۰۴	۲۸۸,۴۵	۵,۱۸	۱۲۷۰,۰۴	۱۰۰	۰,۶
۰/۰۰	۴۵,۴۳	۲۵	۱۳۲۵,۶۳	۵۶,۱۹	۲۵	۱۳۲۵,۶۳	۱۵۰	
۰/۰۰	۴۳,۹۶	۲۵	۱۳۷۵,۶۳	۳۴,۰۴	۲۵	۱۳۷۵,۶۳	۲۰۰	
۰/۰۰	۴۵,۹۱	۴,۶,۱۲,۱۶,۱۸,۲۴,۲۵	۱۰۷۵,۷۷	۱۰۴,۹۴	۴,۶,۱۲,۱۶,۱۸,۲۴,۲۵	۱۰۷۵,۷۷	۲۰	
۰/۰۰	۴۵,۴۰	۶,۲۵	۱۱۷۷,۴۴	۵۰۹,۸۳	۶,۲۵	۱۱۷۷,۴۴	۵۰	
۰/۰۰	۴۳,۰۰	۲۵	۱۲۷۵,۶۳	۱۱۸,۳۹	۲۵	۱۲۷۵,۶۳	۱۰۰	۰,۸
۰/۰۰	۴۵,۳۹	۲۵	۱۳۲۵,۶۳	۵۹,۶۵	۲۵	۱۳۲۵,۶۳	۱۵۰	
۰/۰۰	۴۶,۵۶	۲۵	۱۳۷۵,۶۳	۳۳,۷۸	۲۵	۱۳۷۵,۶۳	۲۰۰	
۰/۰۰	۴۴,۶۴	۴,۶,۱۲,۱۸,۲۵	۱۱۰۴,۸۰	۱۲۴,۹۸	۴,۶,۱۲,۱۸,۲۵	۱۱۰۴,۸۰	۲۰	
۰/۰۰	۴۷,۴۴	۶,۲۵	۱۱۸۳,۳۹	۲۱۸,۸۷	۶,۲۵	۱۱۸۳,۳۹	۵۰	
۰/۰۰	۴۲,۶۶	۲۵	۱۲۷۵,۶۳	۷۶,۴۵	۲۵	۱۲۷۵,۶۳	۱۰۰	۱
۰/۰۰	۴۳,۸۸	۲۵	۱۳۲۵,۶۳	۴۲,۰۴	۲۵	۱۳۲۵,۶۳	۱۵۰	
۰/۰۰	۴۴,۸۴	۲۵	۱۳۷۵,۶۳	۳۳,۹۱	۲۵	۱۳۷۵,۶۳	۲۰۰	

دهنده‌ی توانایی روش پیشنهادی برای دست آوردن جواب بهینه‌ی مسئله است. همچنین از دیدگاه زمان نیز زمان حل روش پیشنهادی در تمام مقادیر مختلف پارامترهای مسئله، کمتر از  $4^\circ$  ثانیه است. در حالی که با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی CPLEX در بسیاری از حالات زمان حل بین  $400^\circ$  تا  $1100^\circ$  ثانیه است. این امر نیز نشان دهنده‌ی کارایی بالای روش حل پیشنهادی است. همچنین در جدول ۴ نیز روش الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی با روش الگوریتم جستجوی ممنوع در حالت جریمه با مقدار  $2000^\circ$  مقایسه شده است که در تمام حالات زمان مورد نیاز برای حل مسئله با استفاده از روش جستجوی ممنوع  $1/5$  تا  $2/5$  برابر مدت زمان مورد نیاز برای حل مسئله به روش پیشنهادی است که این امر نیز نشان دهنده‌ی توانایی روش حل پیشنهادی در زمان‌های به مراتب کمتر از روش فراابتکاری الگوریتم جستجوی ممنوع دارد. همچنین با استفاده از بررسی نتایج مشخص می‌شود که با افزایش هزینه‌ی ثابت ایجاد هاب، تعداد هاب‌های کمتری در جواب بهینه‌ی مسئله باز می‌شود. همچنین هم‌زمان با افزایش مقدار ضریب تخفیف نیز تعداد هاب‌های

نشان داده شده است. در هر یک از جدول‌ها از سمت چپ به ترتیب ستون اول، ضریب تخفیف‌های استفاده شده برای هزینه‌ی حمل بین هاب‌ها را نشان می‌دهد، ستون دوم جدول‌ها نشان دهنده‌ی هزینه‌های ثابت ایجاد هاب در شبکه است. سه ستون بعدی به ترتیب نشان دهنده‌ی مقادیر بهینه‌ی تابع هدف، هاب‌های باز شده در جواب بهینه و زمان حل (به صورت ثانیه) به دست آمده از نرم‌افزار بهینه‌سازی CPLEX است، و سه ستون بعدی نیز همانند ترتیب سه ستون قبلی نشان دهنده‌ی جواب حاصل از روش جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی یافته‌ی ترکیب شده با روش شبیه‌سازی تبرید است. ستون آخر جدول نیز نشان دهنده‌ی اختلاف بین مقدار تابع هدف نظیر به نظیر حاصل از نرم‌افزار CPLEX با روش پیشنهادی است. در جدول ۴ نیز روش پیشنهادی با روش الگوریتم جستجوی ممنوع  $1^\circ$  مقایسه شده است. مطابق نتایج به دست آمده در جدول‌های ۱ تا ۳ مشاهده می‌شود اختلاف مقدار بین تابع هدف‌های به دست آمده از هر دو حالت برابر صفر است که این امر نشان



جدول ۲. نتایج مجموعه داده‌ی CAB با  $\theta = 2000$ .

%GAP	ALNS - SA			CPLEX			F	$\alpha$
	CPU(s)	Hubs	Opt	CPU(s)	Hubs	Opt		
۰٫۰۰	۴۹٫۳۵	۴٫۶٫۸٫۹٫۱۰٫۱۲٫۱۴٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۷۴۳٫۶۰	۴۹٫۱۴	۴٫۶٫۸٫۹٫۱۰٫۱۲٫۱۴٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۷۴۳٫۶۰	۲۰	
۰٫۰۰	۴۲٫۷۹	۴٫۶٫۱۲٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۴	۱۰۰٫۱٫۴۶	۵۶٫۳۰	۴٫۶٫۱۲٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۱۰۰٫۱٫۴۶	۵۰	
۰٫۰۰	۴۹٫۲۸	۴٫۱۲٫۱۶٫۱۸٫۲۲	۱۳۳۳٫۵۰	۵۲۲٫۰۰	۴٫۱۲٫۱۶٫۱۸٫۲۲	۱۳۳۳٫۵۰	۱۰۰	۰٫۲
۰٫۰۰	۴۳٫۳۷	۵٫۱۲٫۲۵	۱۵۰۳٫۱۰	۷۴۱٫۰۴	۵٫۱۲٫۲۵	۱۵۰۳٫۱۰	۱۵۰	
۰٫۰۰	۴۸٫۳۶	۵٫۱۸	۱۶۰۵٫۷۶	۲۲۹٫۸۹	۵٫۱۸	۱۶۰۵٫۷۶	۲۰۰	
۰٫۰۰	۳۸٫۹۹	۴٫۶٫۸٫۹٫۱۲٫۱۳٫۱۴٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۹۱۲٫۲۴	۶۲٫۰۴	۴٫۶٫۸٫۹٫۱۲٫۱۳٫۱۴٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۹۱۲٫۲۴	۲۰	
۰٫۰۰	۴۳٫۱۸	۴٫۶٫۱۲٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۱۱۶۶٫۴۵	۱۱۰٫۰۲	۴٫۶٫۱۲٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۱۱۶۶٫۴۵	۵۰	
۰٫۰۰	۴۲٫۵۵	۵٫۱۲٫۲۵	۱۴۱۶٫۲۷	۴۷۱٫۸۷	۵٫۱۲٫۲۵	۱۴۱۶٫۲۷	۱۰۰	۰٫۴
۰٫۰۰	۴۸٫۹۳	۵٫۲۵	۱۵۱۷٫۵۴	۳۳۹٫۱۵	۵٫۲۵	۱۵۱۷٫۵۴	۱۵۰	
۰٫۰۰	۴۶٫۲۱	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۲۴۱٫۲۸	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۲۰۰	
۰٫۰۰	۴۸٫۸۱	۴٫۶٫۸٫۱۲٫۱۳٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۱۰۷۲٫۰۸	۱۲۹٫۳۴	۴٫۶٫۸٫۱۲٫۱۳٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۱۰۷۲٫۰۸	۲۰	
۰٫۰۰	۴۴٫۱۶	۴٫۶٫۱۲٫۲۵	۱۲۹۸٫۲۱	۷۲۶٫۹۶	۴٫۶٫۱۲٫۲۵	۱۲۹۸٫۲۱	۵۰	
۰٫۰۰	۴۲٫۴۹	۵٫۲۵	۱۴۲۷٫۸۷	۳۹۵٫۳۶	۵٫۲۵	۱۴۲۷٫۸۷	۱۰۰	۰٫۶
۰٫۰۰	۴۶٫۹۱	۵٫۲۵	۱۵۲۷٫۸۷	۲۹۰٫۹۶	۵٫۲۵	۱۵۲۷٫۸۷	۱۵۰	
۰٫۰۰	۴۱٫۳۲	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۲۴۳٫۳۹	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۲۰۰	
۰٫۰۰	۴۵٫۶۱	۴٫۶٫۱۲٫۱۶٫۱۸٫۲۲٫۲۴٫۲۵	۱۱۸۴٫۲۳	۱۱۶٫۲۳	۴٫۶٫۱۲٫۱۶٫۱۸٫۲۲٫۲۴٫۲۵	۱۱۸۴٫۲۳	۲۰	
۰٫۰۰	۴۶٫۶۴	۵٫۲۵	۱۳۳۸٫۰۳	۴۶۹٫۲۲	۵٫۲۵	۱۳۳۸٫۰۳	۵۰	
۰٫۰۰	۴۴٫۱۲	۵٫۲۵	۱۴۳۸٫۰۳	۵۸۵٫۰۵	۵٫۲۵	۱۴۳۸٫۰۳	۱۰۰	۰٫۸
۰٫۰۰	۴۸٫۲۷	۵٫۲۵	۱۵۳۸٫۰۳	۷۱۰٫۵۷	۵٫۲۵	۱۵۳۸٫۰۳	۱۵۰	
۰٫۰۰	۴۹٫۰۰	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۴۴۷٫۶۲	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۲۰۰	
۰٫۰۰	۴۶٫۵۸	۱٫۴٫۶٫۱۲٫۱۸٫۲۲٫۲۵	۱۲۴۳٫۵۶	۲۵۰٫۹۱	۱٫۴٫۶٫۱۲٫۱۸٫۲۲٫۲۵	۱۲۴۳٫۵۶	۲۰	
۰٫۰۰	۴۷٫۵۰	۵٫۲۵	۱۳۴۸٫۰۰	۱۴۸٫۲۹	۵٫۲۵	۱۳۴۸٫۰۰	۵۰	
۰٫۰۰	۴۲٫۲۱	۵٫۲۵	۱۴۴۸٫۰۰	۶۰٫۱٫۲۰	۵٫۲۵	۱۴۴۸٫۰۰	۱۰۰	۱
۰٫۰۰	۴۹٫۵۹	۵٫۲۵	۱۵۴۸٫۰۰	۳۴۹٫۰۵	۵٫۲۵	۱۵۴۸٫۰۰	۱۵۰	
۰٫۰۰	۴۰٫۰۲	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۲۰۵٫۵۶	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۲۰۰	

وجود ندارد. بنابراین تنها نتایج حاصل از الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی ارائه شده است.

همان طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود، الگوریتم پیشنهادی توانسته تمام مسائل نمونه‌ی مربوط به مجموعه داده‌های TR را در زمان قابل قبول و خیلی کوتاه (کمتر از ۳ دقیقه) حل کند که نشان از کارایی بالای الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی دارد. همچنین رفتار مسئله به ازای پارامترهای مختلف ورودی نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ضریب تخفیف ( $\alpha$ ) و مقدار هزینه‌ی ایجاد هاب ( $f_k$ ) تعداد هاب کمتری احداث می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش مقدار جریمه‌ی عدم خدمت دهی به تقاضاها، تعداد هاب‌های باز شده بیشتر می‌شود. علت این امر را می‌توان بدین صورت بیان کرد که هنگامی که مقدار جریمه کم است، مدل ترجیح می‌دهد برای بیشتر تقاضاهای مربوط به هاب‌های اختلال یافته جریمه پرداخت کند. بنابراین برای خدمت رسانی به این نوع تقاضاها نیاز به احداث هاب‌های بیشتری در ابتدای امر است که هزینه‌ی اولیه‌ی شبکه را به شدت افزایش می‌دهد. با توجه به

جواب بهینه کاهش می‌یابد و در صورتی که تعداد هاب‌ها و مکان‌هاب‌ها با افزایش مقدار ضریب تخفیف ثابت باقی مانده باشد مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد. همان طور که قبلاً اشاره شد با توجه به این که روش پیشنهادی در زمان بسیار کمتری نسبت به نرم‌افزار CPLEX در اندازه‌ی نمونه ۲۵ تایی توانسته است مدل پیشنهادی را حل کند و جواب بهینه را به دست آورد و همچنین با توجه به این که نرم‌افزارهای بهینه‌سازی در صورت پیچیده بودن مسئله قادر به حل مدل پیشنهادی در اندازه‌ی نمونه‌ی بزرگ‌تر نیستند، مدل پیشنهادی با استفاده از روش جستجوی همسایگی تطبیق یافته‌ی ترکیب شده با روش شبیه‌سازی تریپل در مجموعه داده‌ی حمل محموله ۸۱ شهر ترکیه (TR)، با ضرایب جریمه ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ حل شده و نتایج مربوط به آن در جدول شماره ۵ قابل مشاهده است. با توجه به این که تعداد گره‌ها در مجموعه داده‌های ترکیه ۸۱ است که به طور قابل توجهی از تعداد گره‌ها در مجموعه داده‌های CAB بیشتر است، امکان حل این مسئله با نرم‌افزار CPLEX با توجه به محدودیت حافظه‌ی رایانه و همچنین زمان حل بسیار طولانی

جدول ۳. نتایج مجموعه داده‌ی CAB با  $\theta = 2500$ .

%GAP	ALNS - SA			CPLEX			F	$\alpha$
	CPU(s)	Hubs	Opt	CPU(s)	Hubs	Opt		
0/00	39/28	4.6.8.9.10.12.14.16.17.18.22.24	743/61	50/25	4.6.8.9.10.12.14.16.17.18.22.24	743/61	20	
0/00	41/23	4.6.12.16.17.18.22.24	1001/50	52/81	4.6.12.16.17.18.22.24	1001/50	50	
0/00	40/19	4.12.16.18.22	1334/28	487/73	4.12.16.18.22	1334/28	100	0/2
0/00	47/21	4.12.25	1541/05	646/35	4.12.25	1541/05	150	
0/00	41/41	4.12.25	1691/05	703/21	4.12.25	1691/05	200	
0/00	41/66	4.6.8.9.12.13.14.16.17.18.22.24	913/29	55/64	4.6.8.9.12.13.14.16.17.18.22.24	913/29	20	
0/00	43/78	4.6.12.16.17.18.22.24	1169/10	83/61	4.6.12.16.17.18.22.24	1169/10	50	
0/00	40/21	5.12.22.25	1462/47	1053/88	5.12.22.25	1462/47	100	0/4
0/00	41/25	4.12.25	1616/41	433/22	4.12.25	1616/41	150	
0/00	42/06	4.25	1727/27	287/84	4.25	1727/27	200	
0/00	43/10	4.6.8.9.12.13.14.16.17.18.22.24	1080/65	103/53	4.6.8.9.12.13.14.16.17.18.22.24	1080/65	20	
0/00	38/39	4.6.12.22.25	1331/21	600/28	4.6.12.22.25	1331/21	50	
0/00	45/29	5.12.25	1532/43	272/79	5.12.25	1532/43	100	0/6
0/00	37/62	5.25	1644/06	154/20	5.25	1644/06	150	
0/00	38/25	5.25	1744/06	192/25	5.25	1744/06	200	
0/00	41/15	1.4.6.8.12.13.18.22.24.25	1231/80	152/90	1.4.6.8.12.13.18.22.24.25	1231/80	20	
0/00	40/22	4.6.12.25	1421/57	227/59	4.6.12.25	1421/57	50	
0/00	38/47	5.25	1556/38	203/31	5.25	1556/38	100	0/8
0/00	41/84	5.25	1656/38	113/24	5.25	1656/38	150	
0/00	40/01	5.25	1756/38	126/06	5.25	1756/48	200	
0/00	40/76	1.4.6.12.18.22.25	1341/48	215/10	1.4.6.12.18.22.25	1341/48	20	
0/00	37/68	5.12.25	1466/59	160/94	5.12.25	1466/59	50	
0/00	39/79	5.25	1568/36	135/87	5.25	1568/36	100	1
0/00	38/41	5.25	1668/36	102/50	5.25	1668/36	150	
0/00	40/72	5.25	1768/36	134/33	5.25	1768/36	200	

همان طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود در سناریوی شماره ۲ (ستون شماره سوم جدول شماره ۵) هر سه گره ۵، ۱۲ و ۲۵ سالم هستند (مقدار آنها در سناریو شماره ۲ برابر یک است)، بنابراین تخصیص سایر گره‌ها به صورت شکل ۲ خواهد بود.

همان طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود در سناریوی شماره ۵ (ستون ششم جدول)، مقدار گره شماره ۱۲ که به عنوان هاب مسئله انتخاب شده است، برابر با صفر است که نشان دهنده‌ی اختلال در این هاب است. بنابراین تخصیص مجدد گره‌های متصل به گره شماره ۱۲ (گره‌های شماره ۱۹، ۲۲ و ۲۳) در شبکه به صورت شکل ۳ تغییر خواهد یافت.

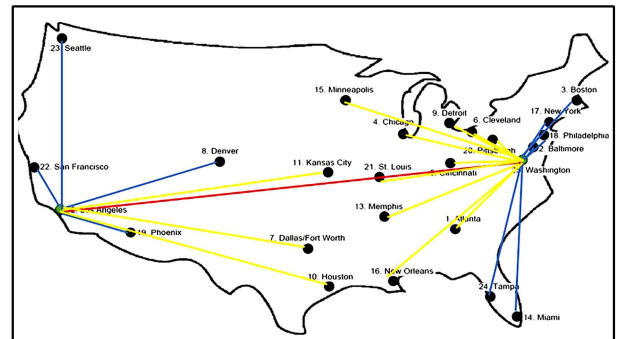
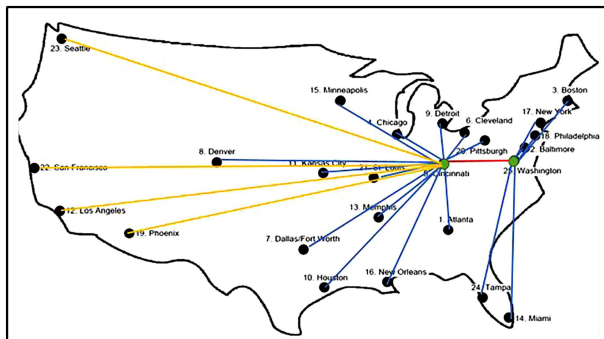
همان طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، تمام اتصالات مربوط به هاب شماره ۱۲ بعد از اختلال در این هاب به هاب سالم شماره ۵ تخصیص می‌یابند. ولی برخی از جریان‌های بین گره‌های شبکه به دلیل افزایش فاصله که باعث افزایش هزینه‌ی ارسال جریان می‌شود، بهتر است ارسال نشوند و به ازای هر کدام جریمه‌ی بی‌مقدار

این‌که تابع هدف از نوع کمینه‌سازی است، با افزایش مقدار جریمه، مدل هاب‌های بیشتری ایجاد می‌کند؛ زیرا سعی در کم کردن فواصل بین گره‌ها برای برقراری جریان برای جلوگیری از افزایش هزینه به دلیل پرداخت جریمه در شبکه و خدمت رسانی به تمام گره‌ها دارد. با این حال، هنگامی که هزینه‌ی جریمه‌ی عدم خدمت دهی بالا باشد، احداث هاب‌های بیشتر در ابتدای دوره برنامه‌ریزی و خدمت رسانی به همه‌ی تقاضاها مقرون به صرفه‌تر است.

تمام نتایج به دست آمده در جداول ۱ الی ۳ در مجموعه داده‌ی CAB با استفاده از جدول ۶ است که شامل پنج سناریوی تصادفی برای ۲۵ گره است (اعداد صفر و یک جدول به ترتیب نشان دهنده‌ی وضعیت سالم یا اختلال گره‌هاست در صورتی که به عنوان هاب انتخاب شوند) محاسبه شده‌اند. برای تحلیل بیشتر نتایج شکل ۲ و شکل ۳ برای حالت  $\alpha = 0/6$ ،  $\theta = 2500$  و  $f_k = 100$  رسم شده‌اند. بر اساس نتایج جدول ۳، گره‌های ۵، ۱۲ و ۲۵ به عنوان هاب‌های شبکه برای حالت  $\alpha = 0/6$ ،  $\theta = 2500$  و  $f_k = 100$  انتخاب شده‌اند.

جدول ۴. مقایسه نتایج به دست آمده از مقایسه روش ترکیبی پیشنهادی با روش جستجوی ممنوعه در مجموعه داده CAB با  $\theta = 2000$ .

%GAP	ALNS - SA			TabooSearch			F	$\alpha$
	CPU(s)	Hubs	Opt	CPU(s)	Hubs	Opt		
۰٫۰۰	۹۳٫۳۴	۴٫۶٫۸٫۹٫۱۰٫۱۲٫۱۴٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۷۴۳٫۶۰	۴۹٫۳۵	۴٫۶٫۸٫۹٫۱۰٫۱۲٫۱۴٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۷۴۳٫۶۰	۲۰	
۰٫۰۰	۸۷٫۶۲	۴٫۶٫۱۲٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۱۰۰٫۱٫۴۶	۴۲٫۷۹	۴٫۶٫۱۲٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۱۰۰٫۱٫۴۶	۵۰	
۰٫۰۰	۹۵٫۴۲	۴٫۱۲٫۱۶٫۱۸٫۲۲	۱۳۳۳٫۵۰	۴۹٫۲۸	۴٫۱۲٫۱۶٫۱۸٫۲۲	۱۳۳۳٫۵۰	۱۰۰	۰٫۲
۰٫۰۰	۹۳٫۲۶	۵٫۱۲٫۲۵	۱۵۰۳٫۱۰	۴۳٫۳۷	۵٫۱۲٫۲۵	۱۵۰۳٫۱۰	۱۵۰	
۰٫۰۰	۸۰٫۴۲	۵٫۱۸	۱۶۰۵٫۷۶	۴۸٫۳۶	۵٫۱۸	۱۶۰۵٫۷۶	۲۰۰	
۰٫۰۰	۸۸٫۱۴	۴٫۶٫۸٫۹٫۱۲٫۱۳٫۱۴٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۹۱۲٫۲۴	۳۸٫۹۹	۴٫۶٫۸٫۹٫۱۲٫۱۳٫۱۴٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۹۱۲٫۲۴	۲۰	
۰٫۰۰	۹۴٫۱۲	۴٫۶٫۱۲٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۱۱۶۶٫۴۵	۴۳٫۱۸	۴٫۶٫۱۲٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۱۱۶۶٫۴۵	۵۰	
۰٫۰۰	۹۳٫۱۴	۵٫۱۲٫۲۵	۱۴۱۶٫۲۷	۴۲٫۵۵	۵٫۱۲٫۲۵	۱۴۱۶٫۲۷	۱۰۰	۰٫۴
۰٫۰۰	۹۱٫۶۳	۵٫۲۵	۱۵۱۷٫۵۴	۴۸٫۹۳	۵٫۲۵	۱۵۱۷٫۵۴	۱۵۰	
۰٫۰۰	۹۸٫۴۸	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۴۶٫۲۱	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۲۰۰	
۰٫۰۰	۸۷٫۹۹	۴٫۶٫۸٫۱۲٫۱۳٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۱۰۷۲٫۰۸	۴۸٫۸۱	۴٫۶٫۸٫۱۲٫۱۳٫۱۶٫۱۷٫۱۸٫۲۲٫۲۴	۱۰۷۲٫۰۸	۲۰	
۰٫۰۰	۹۶٫۵۲	۴٫۶٫۱۲٫۲۵	۱۲۹۸٫۲۱	۴۴٫۱۶	۴٫۶٫۱۲٫۲۵	۱۲۹۸٫۲۱	۵۰	
۰٫۰۰	۸۵٫۸۱	۵٫۲۵	۱۴۲۷٫۸۷	۴۲٫۴۹	۵٫۲۵	۱۴۲۷٫۸۷	۱۰۰	۰٫۶
۰٫۰۰	۸۰٫۸۶	۵٫۲۵	۱۵۲۷٫۸۷	۴۶٫۹۱	۵٫۲۵	۱۵۲۷٫۸۷	۱۵۰	
۰٫۰۰	۹۷٫۹۲	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۴۱٫۳۲	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۲۰۰	
۰٫۰۰	۹۱٫۸۲	۴٫۶٫۱۲٫۱۶٫۱۸٫۲۲٫۲۴٫۲۵	۱۱۸۴٫۲۳	۴۵٫۶۱	۴٫۶٫۱۲٫۱۶٫۱۸٫۲۲٫۲۴٫۲۵	۱۱۸۴٫۲۳	۲۰	
۰٫۰۰	۱۰۰٫۵۱	۵٫۲۵	۱۳۳۸٫۰۳	۴۶٫۶۴	۵٫۲۵	۱۳۳۸٫۰۳	۵۰	
۰٫۰۰	۹۶٫۲۷	۵٫۲۵	۱۴۳۸٫۰۳	۴۴٫۱۲	۵٫۲۵	۱۴۳۸٫۰۳	۱۰۰	۰٫۸
۰٫۰۰	۱۰۲٫۶۵	۵٫۲۵	۱۵۳۸٫۰۳	۴۸٫۲۷	۵٫۲۵	۱۵۳۸٫۰۳	۱۵۰	
۰٫۰۰	۱۰۲٫۱۲	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۴۹٫۰۰	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۲۰۰	
۰٫۰۰	۱۰۰٫۲۸	۱٫۴٫۶٫۱۲٫۱۸٫۲۲٫۲۵	۱۲۴۳٫۵۶	۴۶٫۵۸	۱٫۴٫۶٫۱۲٫۱۸٫۲۲٫۲۵	۱۲۴۳٫۵۶	۲۰	
۰٫۰۰	۱۰۴٫۶۱	۵٫۲۵	۱۳۴۸٫۰۰	۴۷٫۵۰	۵٫۲۵	۱۳۴۸٫۰۰	۵۰	
۰٫۰۰	۹۵٫۳۲	۵٫۲۵	۱۴۴۸٫۰۰	۴۲٫۲۱	۵٫۲۵	۱۴۴۸٫۰۰	۱۰۰	۱
۰٫۰۰	۹۷٫۷۹	۵٫۲۵	۱۵۴۸٫۰۰	۴۹٫۵۰	۵٫۲۵	۱۵۴۸٫۰۰	۱۵۰	
۰٫۰۰	۸۹٫۶۸	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۴۰٫۰۲	۲۵	۱۶۱۳٫۵۲	۲۰۰	



شکل ۳. تخصیص مجدد گره های ۱۹، ۲۲ و ۲۳ بعد از ایجاد اختلال در هاب شماره ۱۲.

شکل ۲. تخصیص گره های شبکه به هاب های انتخاب شده در شرایطی که تمام هاب ها سالم هستند.

جدول ۵. نتایج مجموعه داده‌ی TR با  $1500$  و  $1000$   $\theta$ .

$\theta = 1500$			$\theta = 1000$			CF	$\alpha$
CPU(s)	Hubs	Opt	CPU(s)	Hubs	Opt		
212,37	6,25,33,34,35	760,66	195,34	6,25,33,34,35	754,74	0,1	0,2
171,99	6,33,34,35,44	951,66	148,10	6,34,35	894,18	0,2	
136,56	34,35,38	1070,62	142,20	6,34	968,56	0,3	
140,91	34,35,38	1158,67	146,98	35	1031,78	0,4	
217,49	6,25,33,35,41	888,85	137,11	6,35,38,41	856,40	0,1	0,4
158,61	6,33,34,35	1037,00	164,02	6,34,35	930,27	0,2	
156,25	6,34	1137,48	140,65	6,34	985,42	0,3	
157,38	6,34	1190,67	147,85	35	1031,78	0,4	
157,10	6,33,35,41,58	995,46	142,86	6,34,35	882,95	0,1	0,6
158,90	6,34,35,38	1137,61	131,89	6,34	946,00	0,2	
153,93	6,34	1159,08	144,05	35	1007,05	0,3	
154,98	6,34	1161,42	149,68	10	1053,23	0,4	
179,03	3,6,34	1070,80	159,80	6,34	904,42	0,1	0,8
132,28	6,36	1124,17	150,36	41	959,29	0,2	
149,93	6,34	1179,36	160,84	35	1007,05	0,3	
140,87	6,34	1187,31	140,53	10	1053,23	0,4	
158,73	6,26	1071,93	159,55	6,34	914,67	0,1	1
167,15	6,26	1140,83	148,43	41	959,29	0,2	
149,46	6,26	1209,72	143,46	35	1007,05	0,3	
156,43	10	1337,84	148,70	10	1053,23	0,4	

در شبکه بهتر است برقرار شوند و مقدار جریمه در این حالت بی‌نهایت در نظر گرفته  
جریمه‌ی واحد به دلیل عدم خدمت‌رسانی پرداخت شود. این جریان‌ها عبارت‌اند از: ۲۵۰۰  
جریان از گره شماره ۱۲ به گره‌های شماره ۳، ۷، ۸، ۱۰، ۱۴، ۱۶، ۱۹ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و برعکس

### ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در این مقاله مسئله‌ی مکان‌یابی هاب تک‌تخصیصه بدون ظرفیت تحت شرایط  
اختلال بررسی شد. در این مسئله فرض شده است که هر تسهیل هاب بعد از تأسیس،  
در طول زمان استفاده و همچنین در اثر حوادث طبیعی و حوادث عمدی در آن  
اختلال ایجاد و از دسترس خارج می‌شود. در این شرایط گره‌های متقاضی متصل  
شده به هاب اختلال یافته باید مجدداً به هاب‌های سالم دیگر شبکه تخصیص یابند؛  
یا به دلیل هزینه‌ی بسیار بالای ارسال جریان از طریق سایر هاب‌های سالم شبکه  
به مقصد مورد نظر، جریان ارسال نشود و به دلیل عدم ارسال جریان، جریمه‌ی

جریان از گره ۱۹ به گره‌های شماره ۸، ۱۲، ۱۴، ۲۲ و ۲۳ و برعکس  
جریان از گره ۲۲ به گره‌های شماره ۳، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵ و ۱۶،  
۱۹، ۲۳ و ۲۴ و برعکس  
جریان از گره ۲۳ به گره‌های شماره ۳، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶،  
۱۹ و ۲۴ و برعکس  
جریان از گره ۲۴ به گره‌های شماره ۲۲ و ۲۳ و برعکس  
البته پرداخت جریمه برای این جریان‌ها برای مدت زمان بسیار کوتاه مثلاً یک  
الی دو روز تا زمان تعمیر هاب شماره ۱۲ و برگشت شبکه به حالت اولیه منطقی  
است. در صورتی که مدت زمان تعمیر هاب شماره ۱۲ طولانی شود، تمام جریان‌ها

برای عدم خدمت رسانی پرداخت می‌شود. در حقیقت می‌توان این مقدار جریمه را به عنوان هزینه ناشی از اختلال در نظر گرفت. مسئله به صورت مدل ریاضی تصادفی دو مرحله‌ی فرمول بندی شده و در ادامه با استفاده از مجموعه‌ی بی از سناریوهای احتمالی تصادفی به مدل قطعی معادل آن تبدیل شده است. از آنجایی که مدل ریاضی پیشنهادی برای مسئله‌ی مورد نظر NP hard است، یک روش فراابتکاری ترکیبی برای حل مسئله پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در تمام اندازه‌های نمونه مجموعه داده‌ی CAB جواب بهینه‌ی یکسان در زمان بسیار کمتر در مقایسه با جواب حاصل از نرم‌افزار بهینه‌سازی CPLEX و روش فراابتکاری جستجوی ممنوع به دست آورده است که نشان از کارایی و عملکرد بالای روش حل پیشنهادی دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در شرایط غیرقطعی بودن وضعیت هاب‌ها تعداد هاب‌های بیشتری در شبکه نسبت به حالتی که وضعیت هاب‌ها پایدار باشد و هاب‌ها همواره سالم باشند، ایجاد می‌شود. علاوه بر این با افزایش مقدار هزینه ثابت ایجاد هاب و افزایش مقدار ضریب تخفیف جریان بین هاب‌ها در شبکه، تعداد هاب‌های شبکه کاهش می‌یابد. به عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آتی، مطالعه‌ی صورت پذیرفته در این مقاله را می‌توان به صورت زیر توسعه داد:

۱. انجام تحقیق مشابه در زمینه‌ی مسائل مکان یابی هاب مرکز با در نظر گرفتن محدودیت در مقدار ورودی جریان به گره‌های هاب شبکه برای جلوگیری از ازدحام در سایر هاب‌های سالم شبکه
۲. مطالعه‌ی مشابه در مکان یابی هاب پوشش که بعد از ایجاد اختلال در یک هاب، گره‌های متصل شده به هاب اختلال یافته به سایر هاب‌های فعال و سالم شبکه با در نظر گرفتن شعاع پوشش متفاوت تخصیص داده شود و جریمه‌های متفاوت بر اساس شعاع متفاوت در نظر گرفته شود.
۳. مطالعه‌ی بازسازی شبکه‌ی هاب بعد از ایجاد اختلال در هاب که لازم است تخصیص مجدد گره‌های غیر هاب به هاب‌های سالم و تعمیر هاب‌های خراب شده در طول چند دوره‌ی زمانی متفاوت انجام پذیرد.

جدول ۶. سناریوهای مجموعه داده‌ی CAB برای ۲۵ گره  $(I_{k,s})$ .

	۵	۴	۳	۲	۱	
۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱
۲	۰	۰	۱	۰	۱	۲
۳	۱	۱	۰	۰	۱	۳
۴	۱	۰	۰	۱	۱	۴
۵	۱	۰	۰	۱	۱	۵
۶	۰	۱	۱	۰	۱	۶
۷	۰	۰	۱	۱	۰	۷
۸	۱	۱	۱	۰	۰	۸
۹	۱	۱	۰	۱	۰	۹
۱۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱۰
۱۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱۱
۱۲	۰	۱	۱	۱	۰	۱۲
۱۳	۱	۰	۱	۰	۱	۱۳
۱۴	۰	۱	۱	۱	۰	۱۴
۱۵	۰	۱	۰	۰	۱	۱۵
۱۶	۰	۱	۱	۱	۱	۱۶
۱۷	۱	۰	۰	۱	۱	۱۷
۱۸	۱	۱	۱	۰	۱	۱۸
۱۹	۰	۱	۰	۱	۰	۱۹
۲۰	۰	۱	۰	۱	۰	۲۰
۲۱	۱	۰	۱	۰	۰	۲۱
۲۲	۱	۰	۰	۱	۱	۲۲
۲۳	۱	۰	۱	۰	۰	۲۳
۲۴	۱	۱	۰	۱	۱	۲۴
۲۵	۱	۱	۱	۱	۰	۲۵

## منابع (References)

1. Alumur, S. and Kara, B.Y. "Network hub location problems: the state of the art", *European Journal of Operational Research*, **190**(1), pp.1-21 (2008).
2. Goldman, A.J. "Optimal locations for centers in a network." *Transportation Science*, **3**(4), pp. 352-360 (1969).
3. Marks, D. "An optimal algorithm for a capacitated warehouse transshipment problem", PhD diss., Ph. D. Thesis, Johns Hopkins University (1969).
4. Hakimi, S.L. and Maheshwari, S.N. "Optimum locations of centers in networks", *Operations Research*, **20**(5), pp. 967-973 (1972).

## پانوشته‌ها

1. adaptive large neighborhood search (ALNS)
2. congestion
3. complete disruption
4. partial disruption
5. NP hard
6. simulated annealing (SA)
7. large neighborhood search (LNS)
8. location routing problem (LRP)
9. pollution routing problem (PRP)
10. taboo search(TS)

5. O'Kelly, M.E. "Activity levels at hub facilities in interacting networks", *Geographical Analysis*, **18**(4), pp. 343-356 (1986a).
6. O'Kelly, M.E. "The location of interacting hub facilities", *Transportation Science*, **20**(2), pp. 92-106 (1986b).
7. Campbell, J.F. "Integer programming formulations of discrete hub location problems", *European Journal of Operational Research*, **72**(2), pp. 387-405 (1994).
8. Skorin-Kapov, D., Skorin-Kapov, J. and O'Kelly, M. "Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problems", *European Journal of Operational Research*, **94**(3), pp. 582-593 (1996).
9. Matisziw, T.C. , Murray, A.T. and Grubestic, T.H. "Strategic network restoration", *Networks and Spatial Economics*, **10**(3), pp. 345-361(2010).
10. Ernst, A.T. and Krishnamoorthy, M. "Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem", *Location Science*, **4**(3), pp. 139-154 (1996).
11. Bryan, D. "Extensions to the hub location problem: formulations and numerical examples", *Geographical Analysis*, **30**(4), pp. 315-330 (1998).
12. Sasaki, M., Suzuki, A. and Drezner, Z. "On the selection of hub airports for an airline hub-and-spoke system" *Computers & Operations Research*, **26**(14), pp. 1411-1422 (1999).
13. Ebery, J., Krishnamoorthy, M., Ernst, A. and et al. "The capacitated multiple allocation hub location problem: formulations and algorithms", *European Journal of Operational Research*, **120**(3), pp. 614-631(2000).
14. Elhedhli, S. and Hu, F.X. "Hub-and-spoke network design with congestion", *Computers & Operations Research*, **32**(6), pp. 1615-1632 (2005).
15. Conteras, I., Fernandez, E. and Marin, A. "The tree of hubs location problem", *European Journal of Operational Research*, **202**(2), pp. 390-400 (2009).
16. Campbell, J.F. and O'Kelly, M.E. "Twenty-five years of hub location research", *Transportation Science*, **46**(2), pp. 153-169 (2012).
17. Zanjirani F. R., Hekmatfar M. and Bolori Arabani A. "Hub location problems: a review of models, classification, solution techniques, and applications", *Computers & Industrial Engineering*, **64**(4), pp. 1096-1109 (2013).
18. O'Kelly, Morton E. "Network hub structure and resilience", *Networks and Spatial Economics*, **15**(2), pp. 235-251 (2015).
19. Snyder, L.V. and Daskin, M.S. "Reliability models for facility location: the expected failure cost case." *Transportation Science*, **39**, pp. 400-416 (2005).
20. Berman, O., Krass, D. and Menezes, M.B.C. "Locating facilities in the presence of disruptions and incomplete information", *Decision Sciences*, **40**, pp. 845-868 (2009).
21. Shen, Z.J.M., Zhan, R.L. and Zhang, J. "The reliable facility location problem: formulations, heuristics, and approximation algorithms", *INFORMS Journal on Computing*, **23**(3), pp. 470-482 (2011).
22. Lim, M., Daskin, M.S., Bassamboo, A. and et al. "A facility reliability problem: formulation, properties, and algorithm", *Naval Research Logistics*, **57**, pp. 58-70 (2010).
23. Wang, X. and Ouyang, Y. "A continuum approximation approach to competitive facility location design under facility disruption risks", *Transportation Research Part B*, **50**, pp. 90-103 (2013).
24. Medal, H. R., Pohl, E. A. and Rossetti, M. D. "A multi-objective integrated facility location-hardening model: analyzing the pre- and post-disruption tradeoff", *European Journal of Operational Research*, **237** (1), pp. 257-270 (2014).
25. Taghipourian, F., Mahdavi, I., Mahdavi-Amiri, N. and et al. "A fuzzy programming approach for dynamic virtual hub location problem", *Applied Mathematical Modelling*, **36**(7), pp. 3257-3270 (2012).
26. Lei, T.L., "Identifying critical facilities in hub-and-spoke networks: a hub interdiction median problem", *Geographical Analysis*, **45**(2), pp. 105-122 (2013).
27. Parvaresh, F., Golpayegany, S.H., Husseini, S.M. and et al. "Solving the p-hub median problem under intentional disruptions using simulated annealing", *Networks and Spatial Economics*, **13**(4), pp. 445-470 (2013).
28. Parvaresh, F., Husseini, S. M., Golpayegany, S. H. and et al. "Hub network design problem in the presence of disruptions", *Journal of Intelligent Manufacturing*, **25**(4), pp. 755-774 (2014).
29. Azizi, N., Chauhan, S., Salhi, S., and et al. "The impact of hub failure in hub-and-spoke networks: mathematical formulations and solution techniques", *Computers & Operations Research*, **65**, pp. 174-188 (2016).
30. Mohammadi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Siadat, A. and et al. "Design of a reliable logistics network with hub disruption under uncertainty", *Applied Mathematical Modelling*, **40**(9), pp. 5621-5642 (2016).
31. Sohn, J. and Park, S. "The single allocation problem in the interacting three-hub network", *Networks*, **35**(1), pp. 17-25 (2000).
32. Shaw, Paul. "Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems" *In International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, pp. 417-431. Springer Berlin Heidelberg (1998).
33. Ropke, S. and Pisinger, D. "An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows", *Transportation Science*, **40**(4), pp. 455-472 (2006).
34. Adulyasak, Y., Cordeau, J.F. and Jans, R. "Optimization-based adaptive large neighborhood search for the production routing problem", *Transportation Science*, **48**(1), pp. 20-45 (2012).
35. Coelho, L.C., Cordeau, J.F. and Laporte, G. "Consistency in multi-vehicle inventory-routing", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **24**, pp. 270-287 (2012a).
36. Coelho, L.C., Cordeau, J.F. and Laporte, G. "The inventory-routing problem with transshipment", *Computers & Operations Research*, **39**(11), pp. 2537-2548 (2012b)

37. Laporte, G., Musmanno, R. and Vocaturo, F. "An adaptive large neighbourhood search heuristic for the capacitated arc-routing problem with stochastic demands", *Transportation Science*, **44**(1) pp. 125-135 (2010).
38. Ribeiro, G.M. and Laporte, G. "An adaptive large neighborhood search heuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem", *Computers & Operations Research*, **39**(3), pp. 728-735, (2012).
39. Grangier, P., Gendreau, M. and Lehuédé, F. "An adaptive large neighborhood search for the two-echelon multiple-trip vehicle routing problem with satellite synchronization", *European Journal of Operational Research*, **254**(1), pp. 80-91 (2016).
40. Hemmelmayr, V.C., Cordeau, J.F. and Crainic, T.G. "An adaptive large neighborhood search heuristic for two-echelon vehicle routing problems arising in city logistics", *Computers & Operations Research*, **39**(12), pp. 3215-3228 (2012).
41. Demir, E., Bektas, T. and Laporte, G. "An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem", *European Journal of Operational Research*, **223**(2), pp. 346-359 (2012).
42. Mauri, G.R., Ribeiro, G.M., Lorena, L.A.N. and et al. "An adaptive large neighborhood search for the discrete and continuous berth allocation problem", *Computers & Operations Research*, **70**, pp. 140-154 (2016).
43. Bakkehaug, R., Rakke, J.G., Fagerholt, K. and et al. "An adaptive large neighborhood search heuristic for fleet deployment problems with voyage separation requirements", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* (2015).
44. Canca, D., De-Los-Santos, A., Laporte, G. and et al. "An adaptive neighborhood search metaheuristic for the integrated railway rapid transit network design and line planning problem", *Computers & Operations Research*, **78**, pp. 1-14 (2016).
45. Lusby, R., Martin S., Troels Martin R. and et al. "An adaptive large neighbourhood search procedure applied to the dynamic patient admission scheduling problem", *Discussion Papers on Business and Economics, University of Southern Denmark 1*, **74**, pp. 21-31(2016).
46. Kirkpatrick, S.C., Gelatt D. and Vecchi, M.P. "Optimization by simulated annealing", *science*, **220**(4598), pp. 671-680 (1983).
47. Černý, Vladmir. "Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm", *Journal of Optimization Theory and Applications* **45**(1), pp. 41-51 (1985).