



توسعه مدل مکان‌یابی هاب بر مبنای صرفه‌جویی اقتصادی جریان‌ها با استفاده از وسایل حمل و نقل ظرفیت‌دار و محدودیت جریان ورودی به هاب

سیدکمال چهارسوقی^{۱*}، فرید ممیزی^۲، امین یزدخواستی^۳

۱. دانشیار بخش مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران

۲. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران

۳. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد

خلاصه

هاب‌ها تسهیلات ویژه هستند که به عنوان ایستگاه‌های واسطه، در سیستم‌های توزیع به تعیین مسیر و سازماندهی جریان بین نقاط مبدأ/مقصد می‌پردازند. بیشتر مدل‌های مکان‌یابی هاب بدون توجه به میزان جریان بین غیرهاب و هاب پارامترهای جریمه λ و δ را، که در تابع هدف به عنوان ضریب هستند، بزرگتر از یک فرض کرده‌اند. این امر می‌تواند بطور جدی تعداد و مکان هاب‌ها را تحت تاثیر قرار دهد. همچنین در مدل‌های کلاسیک مکان‌یابی هاب میزان جریان ورودی به هاب نامحدود است که این مساله ممکن است منجر به ساختار تخصیصی گردد که یک هاب درصد بالایی از انتقال جریان شبکه را بر عهده داشته باشد. در این حالت، در صورت بروز اختلال نظیر شرایط نامساعد جوی، حملات تروریستی و یا ترافیک بسیار بالا می‌تواند هاب مورد نظر را از دسترس خارج کند. در واقع مدل‌های هاب کلاسیک هزینه نقل و انتقال جریان را به طور صحیح مدل‌سازی نمی‌کنند. بر این اساس مقاله پیش‌رو سعی در مدل‌سازی و حل مسأله مکان‌یابی هاب با استفاده از وسایل حمل و نقل ظرفیت‌دار به جای پارامترهای جریمه بین گره‌های غیرهاب با هاب و همچنین محدودیت جریان ورودی به هاب دارد. برای این منظور هزینه انتقال جریان بین گره‌ها متناسب با تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز محاسبه می‌شود. با توجه به پیچیدگی مدل پیشنهادی رویکردی فرابتکاری بر مبنای دو الگوریتم ژنتیک و جست و جو همسایگی سلسله مراتبی توسعه داده شده است. نتایج نشان از عملکرد بالای الگوریتم فرابتکاری ترکیبی پیشنهادی دارد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۲/۸/۲۶

پذیرش ۱۳۹۳/۸/۱۹

کلمات کلیدی:

مکان‌یابی هاب

پارامتر جریمه

ظرفیت وسایل حمل و نقل

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم جست و جو

همسایگی سلسله مراتبی

۱- مقدمه

هاب‌ها تسهیلات ویژه‌ای هستند که به عنوان نقاط تعویض، انتقال و طبقه‌بندی در بسیاری از سیستم‌های توزیع به کار گرفته می‌شوند. تسهیلات هاب به جای خدمت‌رسانی مستقیم بین هر جفت مبدأ-مقصد، جریان‌ها را به منظور استفاده از صرفه‌جویی‌های اقتصادی ناشی از آن، متمرکز می‌نمایند. جریان‌ها از مبدأ یکسان با مقصدهای مختلف روی مسیرشان به یک هاب ترکیب شده و با جریان‌هایی که

مبدأهای متفاوتی دارند اما مقصد آنها یکسان است ترکیب می‌شوند. یکسان‌سازی بر روی مسیر مبدأ تا هاب، از هاب تا مقصد و نیز بین هاب‌ها صورت می‌گیرد. در مسائل مکان‌یابی هاب جریان‌های بین مقصدها و مبدأها بیانگر تقاضا هستند و تسهیلات هاب به عنوان نقاط ارتباط یا یکپارچه‌سازی عمل می‌کنند [۱].

تحقیقات راجع به مکان‌یابی هاب در طول دو دهه اخیر جایگاه مهمی در زمینه مکان‌یابی به خود اختصاص داده‌است، این امر در نتیجه‌ی استفاده‌ی فراوان از شبکه‌های هاب در حمل و نقل و ارتباطات مدرن بوده است. این سیستم‌ها بجای ارتباط مستقیم بین

* نویسنده مسئول. سیدکمال چهارسوقی

تلفن: ۰۲۱-۸۲۸۸۳۳۴۵-۲۱؛ پست الکترونیکی: Skkh@modares.ac.ir

و سایر اختلال‌ها، هاب‌های اصلی بسته شده و هاب‌های مجازی باز شده و شروع به خدمت رسانی نمایند و در حالت غیرقابل پیش بینی اختلال‌ها، از مفاهیم فازی استفاده کردند. و در حالت کلی برنامه-ریزی خطی صحیح فازی برای کمینه کردن هزینه ارائه کردند.

در سال ۲۰۱۲ یمن و اللومی [۱۴] یک فرمول جدید برای مسئله مکانیابی p-هاب مرکز ستاره برای کمینه کردن طول بلندترین مسیر مبدأ-مقصد ارائه نمودند آنها همچنین فرمول مسئله p-هاب میانه ستاره را بامسیر محدود طول که در آن کل هزینه‌های مسیریابی با برخی از محدودیت‌های حد بالا در طول مسیر به حداقل رسانده شده است را توسعه دادند.

غفاری‌نسب و همکاران [۱۵] شبکه لجستیک هاب استوار را با در نظر گرفتن تقاضای تصادفی برای یک شرکت ارائه دهنده خدماتی لجستیکی طراحی و مدل‌سازی کردند. در این مقاله آنها یک شرکت توزیع کننده را در نظر گرفتند که وظیفه توزیع کالا را از چند مبدأ به چند مقصد به نیابت از مشتریان دارد، تقاضای مشتریان دارای حالت احتمالی است. در واقع شرکت توزیع کننده از شبکه هاب برای توزیع استفاده می‌نماید به شرطی که از ظرفیت هاب تخطی نکرده و هزینه توزیع نیز کمینه شود.

از ویژگی‌های شبکه هاب این است که جریان‌ها را در بین هاب‌ها تجمع کند، که انباشته کردن جریان بین هاب‌ها منجر به کاهش هزینه در طول سفر بین هاب‌ها می‌شود. لذا صرفه‌جویی‌های اقتصادی با وارد کردن یک ضریب تخفیف α برای استفاده از اتصالات بین هاب منظور می‌گردد در سال ۱۹۹۹ اوکلی و برایان [۱۶] در تحقیقی نشان داد که مدل‌های موجود تا سال ۱۹۹۹ به دلیل بی‌توجهی به انباشته کردن جریان بین هاب‌ها شبکه را بطور اقتصادی مدل نمی‌کند. این مساله نه تنها هزینه‌ها را بطور صحیحی محاسبه نمی‌کند، بلکه مکان هاب‌ها و نحوه تخصیص غیرهاب‌ها به هاب نیز به درستی تعیین نمی‌شوند. در مدلی که توسط ارنست و کریشنا موتی [۱۷] در سال ۱۹۹۶ ارائه شد، که همچنان از پرکاربردترین و معروفترین مدل شبکه هاب در ادبیات است، پارامترهای جریمه χ و δ به عنوان ضریب جریمه در تابع هدف به ترتیب برای جریانهای عبوری از یالهای هاب به غیرهاب و غیرهاب به هاب در نظر گرفته شده‌اند. از منظر جریان دو چالش عمده ادبیات مکان‌یابی هاب موجود است. به عنوان چالش اول بیشتر مدل‌های مکان‌یابی هاب پارامترهای χ و δ در شبکه هاب را بدون توجه به میزان جریان عبوری از یال‌ها، بزرگتر از یک و در برخی از سری‌های داده مانند مجموعه داده‌های پست استرالیا (AP)، χ را برابر با ۳ و δ را برابر با ۲ در نظر گرفته‌اند. در برخی دیگر از داده‌ها مانند مجموعه داده‌های هواپیمایی آمریکا (CAB) هر دو پارمتر را برابر با یک در نظر گرفته‌اند، در واقع این پارامترها دارای مقدار ثابتی نیستند و به ازای مجموعه داده‌های متفاوت، مقادیر گوناگونی دارند. در واقع پارامتر χ هزینه جمع‌آوری جریان از گره غیرهاب به هاب و پارامتر δ هزینه توزیع جریان از گره

هر مبدأ-مقصد، شبکه‌ی هاب با مجموعه‌ی کوچکی از ارتباط‌ها بین مبدأها مقصدها و هاب و بین هر جفتی از هاب‌ها خدمت را ارائه می‌دهد. چنین شبکه‌ای اجازه می‌دهد تا مجموعه‌ی بزرگی از مبادی و مقاصد با ارتباطات نسبتاً کمتر، به یکدیگر مرتبط شوند. استفاده از ارتباطات کمتر اجازه می‌دهد تا جریان متمرکزتر شده و اجازه استفاده از مقیاس بزرگ بکار گرفته شود. مسئله‌ی مکان‌یابی هاب شامل مکان‌یابی تسهیلات هاب و طراحی شبکه هاب است. ایده شبکه‌های مراکز فعالیت در سال ۱۹۶۹ توسط گلدمن [۲] مطرح شد. سپس اوکلی [۳] در سال ۱۹۸۷ اولین مطالعه شبکه‌های مرکز واسطه را در زمینه شبکه هوایی مطرح ساخت. اگرچه اوکلی [۳] اولین فرمول‌بندی ریاضی شناخته شده برای یک مساله مکان‌یابی مرکز واسطه را توسط مطالعه شبکه مسافران خطوط هواپیمایی ارائه داد. فرمول‌بندی او به مساله تخصیص تکی P-هاب میانه اشاره دارد [۴]. با این وجود، اولین مدل ریاضی عدد صحیح خطی توسط کمپبل [۵] در سال ۱۹۹۴ ارائه شد. اولین نسل از تحقیقات مکان‌یابی هاب را می‌توان نتایج کار کمپبل [۵] و اوکلی [۶] دانست که پیشرفت زیادی در تفهیم سیستم‌های واسطه‌ای و توسعه‌ی مدل‌های پایه‌ای با تمرکز عمده بر کمینه‌کردن هزینه‌ی جریان و هزینه‌ی ثابت تسهیلات ایجاد کرده‌اند [۱].

در ادبیات، مسئله مکان‌یابی هاب بر ۴ نوع عمده است که عبارتند از: ۱- مسئله مکان‌یابی هاب ۲- مکان‌یابی p-هاب میانه ۳- مکان‌یابی P-هاب مرکز ۴- مکان‌یابی هاب پوششی. که هر کدام از این ۴ نوع دارای حالت محدودیت ظرفیت و بدون محدودیت ظرفیت با تخصیص تکی و چندگانه هستند [۴] و [۷]. مطالعات اخیر مسئله مکان‌یابی هاب اغلب بر روی توسعه مدل و ترکیب بسیاری از مفاهیم پرکاربرد در دنیای امروزی با مکان‌یابی هاب است. از جمله در سال ۲۰۰۹، ارنست و همکارانش [۸] فرمول ریاضی جدیدی برای مسئله مکانیابی p-هاب مرکز ارائه نمودند و نشان دادند که مدل آنها از مدلی که توسط کارا و تانسل [۹] در سال ۲۰۰۰ ارائه شده، بهتر است [۱۰]. در سال ۲۰۱۱ شاهین گلاره و استفان نیکل [۱۱] یک مدل ۴-شاخصه برای شبکه هاب چند تخصیص بدون ظرفیت برای حمل و نقل شهری و طراحی شبکه حمل و نقل پیشنهاد کردند. همچنین آنها از روش جداسازی بندرز برای حل سریع در اندازه‌های بزرگ استفاده کردند. در سال ۲۰۱۱ مهرداد محمدی و همکارانش [۱۲] حالت ازدحام و تراکم در هاب‌ها را در نظر گرفتند که هاب‌ها در برخی موارد قادر به خدمات رسانی به تمام وسایل حمل و نقل در زمان‌های ازدحام نبودند با توجه به اینکه هاب‌ها دارای تراکم بسیار در کل شبکه هستند بنابراین هاب‌ها را با M/M/C سیستم‌های صف مدل کردند.

در سال ۲۰۱۲ تقی‌پوریان و همکارانش [۱۳] خدمت رسانی هاب‌ها به گره‌های غیرهاب را در شرایط اختلال بررسی کردند که در این تحقیق برخی از گره‌های غیرهاب را به عنوان هاب مجازی در نظر گرفتند تا در شرایط قابل پیش‌بینی بودن نامساعدی آب و هوا

۲-۱- مدل مکان‌یابی هاب با تخصیص تکی بدون ظرفیت

فرض کنید $G=(N,E)$ یک گراف باشد که در آن N نشان‌دهنده مجموعه گره‌ها و E نشان‌دهنده مجموعه کمان‌ها است. اگر W_{ij} میزان جریان از مبدا i به مقصد j باشد. در اینصورت $O_i = \sum_{j \in N} W_{ij}$ نشان‌دهنده مجموع جریان‌های خروجی از مبدا i و $D_j = \sum_{i \in N} W_{ij}$ نشان‌دهنده مجموع جریان‌های ورودی به مقصد j خواهند بود. به ازای هر گره $k \in N$ فرض کنید F_k بیانگر هزینه ایجاد هاب باشد. فاصله بین دو گره توسط d_{ij} نشان داده می‌شود، و بر اساس ادبیات موجود فاصله به جای هزینه در تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد ($d_{ij}=c_{ij}$). پارامتر α ، ضریب تخفیف برای جریان‌های هاب به هاب است، پارامتر χ ضریب جریمه برای جریان‌ها از گره غیرهاب به گره هاب و پارامتر δ ضریب جریمه برای جریان‌ها از گره هاب به گره غیرهاب هستند. Z_{ik} یک متغیر صفر و یک است زمانی که یک گره غیرهاب i به گره هاب k تخصیص یابد مقدار یک را می‌گیرد در غیراینصورت مقدار صفر را اختیار خواهد کرد. Y_{kl}^i جریان نشات گرفته از مبدا i است که از طریق هاب‌های k و l می‌گذرد. براین اساس مدل مکان‌یابی هاب با تخصیص تکی بدون ظرفیت که در سال ۱۹۹۶ ارنست و کریشناموتی [۱۷] ارائه شد بصورت زیر است،

$$\text{Minimize} \quad (1)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in N} d_{ik} Z_{ik} (\chi O_i + \delta D_i) + \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} \alpha d_{kl} Y_{kl}^i + \sum_{k \in N} F_k Z_{kk}$$

Subject to:

$$\forall i \in N \quad \sum_{k \in N} Z_{ik} = 1 \quad (2)$$

$$Z_{ik} \leq Z_{kk} \quad \forall i, k \in N \quad (3)$$

$$\forall i, k \in N \quad (4)$$

$$\forall i, k \in N \quad Z_{ik} \in \{0,1\} \quad (5)$$

$$\forall i, k, l \in N \quad Y_{kl}^i \geq 0 \quad (6)$$

تابع هدف از سه جز هزینه تشکیل شده است به طوری که جز اول هزینه مربوط به ارسال جریان خروجی از گره غیرهاب i به هاب k است، و هزینه مربوط به ارسال جریان ورودی به گره غیرهاب i از هاب k ، جز دوم مربوط به هزینه حمل جریان از هاب k به هاب l ، با توجه به اینکه در این عبارات مقدار جریان در فاصله ضرب شده است و فاصله نیز به عنوان هزینه در ادبیات در نظر گرفته شده است بنابراین این دو عبارت از جنس هزینه هستند و جز سوم هزینه ثابت استقرار هاب است که در مجموع تابع هدف از جنس هزینه است. محدودیت (۲) بیان می‌کند که هر گره می‌تواند تنها به یک هاب تخصیص یابد. محدودیت (۳) بیان می‌کند گره i زمانی می‌تواند به گره k تخصیص یابد که گره k هاب باشد. معادله (۴) بیان می‌کند که میزان جریانی از گره i که از طریق هاب‌های l و k به سمت مقصد می‌روند برابر تفاضل میزان جریان از مبدا i به مقصد j از حاصل مجموع جریان گره i است.

هاب به غیرهاب است، که به دلیل عدم استفاده از ظرفیت کامل معمولاً بزرگتر از یک در نظر گرفته شده‌اند. در نتیجه مدل‌های هاب میانه و مدل‌های مربوطه موجود در ادبیات هزینه انتقال جریان را به طور صحیح مدل‌سازی نمی‌کنند.

همچنین به عنوان چالش دوم، مدل‌های کلاسیک مکان‌یابی هاب فرض می‌کنند که میزان جریان ورودی به یک هاب می‌تواند نامحدود باشد. این امر منجر به ساختار تخصیصی می‌شود که، ممکن است یک هاب درصد بالایی از انتقال ترافیک شبکه را برعهده داشته باشد. در این حالت بروز عواملی نظیر شرایط نامساعد جوی، ترافیک بسیار بالا و یا حملات تروریستی می‌تواند هاب مورد نظر را از دسترس خارج کند و این مسئله باعث می‌شود که عملاً فعالیت بخش زیادی از شبکه هاب متوقف شود. بر این اساس طراحی شبکه هاب با در نظرگیری ظرفیت برای وسایل نقلیه و برای تسهیلات هاب می‌تواند به نتایج واقع‌بینانه‌تر، نسبت به آنچه مدل‌های کلاسیک فرض می‌کنند، منجر شود.

براساس آنچه گفته شد در این مقاله مدل مکان‌یابی هاب با در نظرگیری ظرفیت وسایل نقلیه و تسهیلات هاب و همچنین تصحیح فاکتورهای جریمه انتقال جریان توسعه داده می‌شود. به عبارت دیگر مهم‌ترین نوآوری‌های مدل ارائه شده بدین صورت است: (۱) به جای ضرب پارامتر جریمه χ در هزینه انتقال جریان از هر گره غیرهاب به گره هاب و همچنین ضرب پارامتر جریمه δ در هزینه انتقال جریان از گره هاب به گره غیرهاب، این هزینه‌ها متناسب با تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز محاسبه می‌گردد. در این حالت شبکه متناسب با واقعیت طراحی می‌شود. (۲) محدودیت ظرفیت انتقال جریان برای تسهیلات هاب و وسایل نقلیه در نظر گرفته شده است که باعث می‌گردد جریان به نحوی متعادل بین هاب‌ها تقسیم شود. (۳) با توجه به پیچیدگی ذاتی مدل پیشنهادی الگوریتم فرابتنکاری ترکیبی برمبنای الگوریتم ژنتیک و جست‌وجو همسایگی ارائه شده است. ادامه مقاله بدین صورت است. در بخش ۲ ضمن معرفی مدل پایه مساله مکان‌یابی هاب مدل پیشنهادی توسعه داده می‌شود. در بخش ۳ الگوریتم فرابتنکاری ترکیبی ارائه می‌گردد. در بخش ۴ عملکرد مدل و روش بهینه‌سازی پیشنهادی بر روی سری داده CAB ارزیابی می‌شود. در بخش ۵ برای ارزیابی بهتر مدل تجزیه و تحلیل حساسیتی بروی آن صورت می‌پذیرد. نهایتاً در بخش ۶ نتیجه‌گیری و برخی پیشنهادها آتی مطرح خواهد شد.

۲- مدل‌سازی مسئله

در این بخش ابتدا مدل پایه برنامه‌ریزی ریاضی برای مسئله مکان‌یابی هاب با تخصیص تکی بدون ظرفیت که توسط ارنست و کریشناموتی [۱۷] ارائه شده است تشریح می‌شود در ادامه این مدل با در نظر گرفتن وسایل حمل و نقل با ظرفیت مشخص و در نظر گرفتن ظرفیت هاب با حداکثر تعداد پرواز توسعه داده می‌شود.

و سه برابر کرایه یک وسیله حمل و نقل می‌شود. در این حالت هزینه‌ها به صورت واقع بینانه محاسبه نمی‌شوند، در سال ۲۰۰۱ بر اساس تحقیقی که هورنر و اوکلی [۱۸] انجام دادند در حالت داده‌های جریان حمل و نقل متعادل یک مدل ریاضی غیرخطی برای محاسبه هزینه ارائه کردند که در تمام لینک‌ها در صورت استفاده از شبکه هاب، در هزینه‌ها تخفیف داده شود و این مدل را در یک محیط مجهز به سیستم GIS با ۱۰۰ گره در هر دو ماتریس بین شهری و ماتریس تعاملی متقابل مورد بررسی قرار دادند و به نتایج بسیار مطلوبی رسیدند. در حالیکه در مدل ارنست و کریشنمورتی برای مقادیر بالای جریان هیچ مشوقی لحاظ نمی‌شود، بلکه هزینه اضافی نیز لحاظ می‌شود. و از دلایل اختلاف پارامترهای χ و δ در مجموعه داده AP و CAB این است که مجموعه داده AP متقارن نیست ولی مجموعه داده CAB متقارن است. بنابراین برای رفع مشکل فوق و همچنین یکسان‌سازی مقادیر پارامترها در داده‌های مختلف، در محاسبه هزینه (تابع هدف) میزان جریان حمل شده در مسیرهای هاب-غیرهاب و غیرهاب-هاب را به صورت مضرب صحیحی از ظرفیت وسیله مورد استفاده در این مسیرها در نظر گرفته می‌شوند.

ظرفیت وسیله حمل کننده مورد استفاده در مسیر غیر هاب-هاب و هاب-غیرهاب را برابر G ، همچنین متغیر عدد صحیح P_{ik} را بیانگر تعداد وسیله نقلیه لازم برای ارسال جریان خروجی از گره غیرهاب i به هاب k در نظر بگیرید، بنابراین مقدار P_{ik} از نامساوی زیر به دست می‌آید:

$$\forall i, k \in NO_i Z_{ik} \leq P_{ik} G \quad (7)$$

همچنین متغیر عدد صحیح Q_{ik} بیانگر تعداد وسیله نقلیه لازم برای ارسال جریان ورودی به گره غیرهاب i از هاب k در نظر بگیرید، بنابراین مقدار Q_{ik} از نامساوی زیر به دست می‌آید:

$$\forall i, k \in ND_i Z_{ik} \leq Q_{ik} G \quad (8)$$

معمولاً مقادیر جریان زیادی بین هاب‌ها انتقال می‌یابد، به همین دلیل در محاسبه هزینه‌ی حمل جریان در مسیر هاب-هاب ضریبی به عنوان فاکتور تخفیف (α) لحاظ می‌شود. تصور کنید میزان جریان انتقالی در یکی از مسیرهای هاب-هاب برابر $\frac{5}{4}$ و $\frac{7}{4}$ ظرفیت وسیله حمل کننده است. در دنیای واقعی برای انتقال جریان هر یک از دو مقدار فوق دو وسیله نقلیه لازم است بنابراین بابت کرایه حمل، هزینه دو وسیله نقلیه لازم است، در حالی که در مدل‌های رایج در ادبیات هزینه چنین حمل و نقلی از ضرب کردن α در مقادیر بالا به دست می‌آید. همین موضوع ممکن است انتخاب هاب‌ها و تخصیص گره‌های غیرهاب را تحت تاثیر قرار دهد. به منظور رفع چنین مشکلی در محاسبه هزینه (تابع هدف) میزان جریان حمل شده در مسیرهای هاب-هاب را به صورت مضرب صحیحی از ظرفیت وسیله مورد استفاده در این مسیرها در نظر گرفته شده است. ظرفیت وسیله حمل

در این مدل تقاضا و عرضه گره‌ها بر اساس متغیر تخصیص Z_{ik} تعیین می‌شود. مقدار متغیر Y_{kl}^i را می‌توان به سادگی پس از تعیین متغیرهای دیگر تعیین کرد. در حقیقت زمانی که $Z_{ik} = 1$ باشد، آنگاه $Y_{kk}^i = \sum_{j \in N} W_{ij} Z_{jk} = O_i - \sum_{l \in N, l \neq k} Y_{kl}^i$ همچنین اگر $Z_{ik} = 0$ باشد، آنگاه $Y_{kk}^i = 0$ است.

۲-۲- مدل مکان‌یابی هاب تخصیص تکی با در نظر گیری محدودیت‌های ظرفیت انتقال وسایل حمل و نقل ظرفیت تسهیلات هاب

در مدل پایه هزینه انتقال جریان ورودی و خروجی بین گره دلخواه i و هابی که به آن تخصیص یافته (k) بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sum_{k \in N} d_{ik} Z_{ik} (\chi O_i + \delta D_i)$$

عبارت اول داخل پرانتز مربوط به جریان ارسالی از گره i به سایر گره‌ها، و عبارت دوم مربوط به جریان ارسالی از سایر گره‌ها به گره i است. همانطور که مشهود است ضرایب χ و δ به ترتیب در O_i و D_i ضرب شده‌اند. یعنی بدون در نظر گرفتن اینکه O_i و D_i دارای چه مقادیری هستند هزینه حمل جریان خروجی و ورودی گره i در مقادیری بزرگتر از یک ضرب شده است. دلیل این امر، آن است که معمولاً جریان انتقالی از هاب به غیرهاب و بالعکس دارای مقدار قابل ملاحظه‌ای نیست، یا در واقع وسیله‌ای که برای حمل این جریان بکار می‌رود در اکثر مواقع از ظرفیت کامل وسیله حمل و نقل استفاده نمی‌شود. با این حال گاهی اوقات این موضوع صادق نیست یعنی ممکن است که از ظرفیت وسیله حمل و نقل بطور کامل استفاده شود ولی در عین حال ضرایب χ و δ در این حالت نیز در محاسبه هزینه نقش دارند. به عنوان مثال تصور کنید که در یک شبکه هواپیمایی که از هاب استفاده می‌شود اگر ظرفیت هواپیما ۱۰۰ نفر در نظر گرفته شود در یک سفر از گره غیرهاب به هاب در حالتی که متقاضی سفر ۲۰ نفر باشد این مقدار جریان در ضریب χ که مقدار برابر با ۳ دارد ضرب شود هزینه‌ی معادل با ۶۰ است که از ظرفیت وسیله نقلیه کمتر است و در شرایطی که متقاضی سفر در گره غیرهاب به هاب برابر با ۱۰۰ باشد و از تمام ظرفیت وسیله نقلیه استفاده شود در این حالت نیز ضریب جریمه χ مقدار برابر با ۳ دارد. که در این شرایط کل هزینه بایستی برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شود در حالیکه برابر با ۳۰۰ در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر تصور کنید میزان جریان انتقالی برابر $\frac{1}{3}$ ، $\frac{1}{2}$ و یا $\frac{3}{4}$ ظرفیت وسیله حمل کننده است. در دنیای واقعی برای هر یک از سه مقدار بالا هزینه‌ی یکسانی بابت کرایه راه بابت وسیله نقلیه پرداخت می‌شود، ولی هنگامی که ضرایب χ یا δ در مقادیر بالا ضرب می‌شوند هزینه‌های متفاوتی برای هر مورد بدست می‌آید. به عنوان مثال هنگامی که $\chi=3$ ضرب می‌شود، مقادیر هزینه به ترتیب برابر یک، دو

هزینه بین هاب به غیرهاب است) بدست می‌آید. عبارت سوم نیز مانند عبارت اول و دوم است با این تفاوت که هزینه بین دو هاب محاسبه می‌شود. عبارت چهارم هزینه ثابت استقرار هاب است، عبارت پنجم در تابع هدف هزینه ورود پروازها به هاب مستقر در شبکه را محاسبه می‌نماید. بنابراین هزینه ورود هر پرواز به هاب k معادل ζ_k در نظر گرفته شده است و بصورت $\sum_{i \in N} (P_{ik} + Q_{ik})\zeta_k$ است که همه این عبارات از جنس هزینه هستند. نکته‌ای که در مورد محدودیت (۱۱) بایستی در نظر گرفت این است که اگر $Z_{ik} = 0$ باشد، آنگاه $Y_{kk}^i = 0$ است، این اطمینان را به ما می‌دهد که اگر $Z_{ik} = 0$ باشد آنگاه Y_{kk}^i مقدار بزرگتر از صفر اختیار نمی‌کند. در سال ۲۰۱۰ این موضوع اولین بار توسط ایزابل کوریا و همکارانش [۱۹] مطرح شد و نشان دادند که مدل معروف ارنست و کریشناموتی ناقص است و به این محدودیت نیاز دارد. در مدل بالا محدودیت (۱۲) بیان می‌کند که حداکثر پرواز ورودی به هاب k نیابستی از حد مجاز f_k بیشتر باشد.

۳- رویکرد حل پیشنهادی

حل دقیق مساله مکان‌یابی هاب فرآیندی با مدت زمان زیاد است. از این رو در ادبیات رویکردهای فراابتکاری متعددی به منظور کسب جواب‌های باکیفیت و در زمان معقول گسترش یافته‌اند. در سال ۱۹۸۶ تغییر گره تیتز و بارت [۲۰]، آزادسازی لاکرانژ در سال ۱۹۷۷ ابتدا توسط کورنیوجولز و همکارانش [۲۱] سپس در سال ۱۹۸۵ توسط کریستوفیدس و بیزلی [۲۲] رویکردهای دوگان در سال ۱۹۶۱ توسط گیلومر و گوموری و در سال ۱۹۸۵ توسط هانجول و پیترز مطرح گردید [۲۳] و [۲۴].

در سال ۲۰۰۰ الگوریتم شبیه سازی تیرید توسط چپوشی و گالوائو [۲۵] در سال ۱۹۹۶ الگوریتم جستجوی ممنوع توسط بریمیرگ و ملادینوویچ [۲۶] در سال ۲۰۰۴ رویکرد شروع مجدد رزنده و ورنک [۲۷] و الگوریتم ژنتیک در سالهای ۱۹۸۶ هوسیچ و گود چایلد [۲۸] ۲۰۰۳ آلپ و همکارانش [۲۹] و ۲۰۰۵ لی و یاه [۳۰] از جمله این موارد هستند. هر چند هر رویکرد فراابتکاری ویژگی‌های خود را داراست، الگوریتم ژنتیک به عنوان یک چارچوب حل، موفقیت‌های فراوانی در ادبیات مکان‌یابی تسهیلات داشت هاست (سال ۲۰۰۶ ریزه [۳۱] و در سال ۲۰۰۷ ملادنووی و همکاران [۳۲]). بر این اساس در این قسمت رویکرد حل پیشنهادی بر مبنای این الگوریتم توسعه داده می‌شود.

۳-۱- مروری بر الگوریتم ژنتیک و جست و جو سلسله مراتبی

الگوریتم ژنتیک یک رویکرد فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است که از فرایند تکامل طبیعی الهام گرفته شده است. در GA یک جواب در قالب کروموزومی متشکل از تعدادی ژن نمایش داده می‌شود. هر کروموزوم بر اساس تابع برازندگی که معمولاً همان تابع هدف مساله

کننده مورد استفاده در مسیر هاب-هاب را برابر H ، همچنین متغیر عدد صحیح R_{kl} را بیانگر تعداد وسیله نقلیه لازم برای حمل جریان از هاب k به هاب l در نظر بگیرید، بنابراین مقدار R_{kl} از نامساوی زیر به دست می‌آید:

$$\forall i, k \in N \sum_{l \in N} Y_{kl}^i \leq R_{kl}H, \quad (9)$$

متناسب با محدودیت‌های جدید تغییرات ایجاد شده در تابع هدف تغییر بصورت زیر است: جمله اول تابع هدف را می‌توان به صورت دو جمله جداگانه معادل‌سازی کنیم، یعنی برای گره دلخواه i داریم:

$$\sum_{k \in N} d_{ik}Z_{ik}(\chi O_i + \delta D_i) = \sum_{k \in N} d_{ik}Z_{ik}(\chi O_i) + \sum_{k \in N} d_{ik}Z_{ik}(\delta D_i) \equiv \sum_{k \in N} d_{ik}P_{ik}G + \sum_{k \in N} d_{ik}Q_{ik}G$$

همچنین برای دو هاب دلخواه k و l داریم:

$$\sum_{i \in N} \alpha d_{kl}Y_{kl}^i \equiv \alpha d_{kl}R_{kl}H$$

بنابراین مدل مسئله به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} d_{ik}P_{ik}G \\ & + \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} d_{ik}Q_{ik}G \\ & + \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \alpha d_{kl}R_{kl}H \\ & + \sum_{k \in N} F_k Z_{kk} \\ & + \sum_{i \in N} (P_{ik} + Q_{ik})\zeta_k \\ & + \sum_{l \in N} R_{kl}\zeta_k \end{aligned} \quad (10)$$

Subject to:

(۴) و (۳) و (۲)

$$\forall i, k \in NO_i Z_{ik} \leq P_{ik}G \quad (7)$$

$$\forall i, k \in ND_i Z_{ik} \leq Q_{ik}G \quad (8)$$

$$\forall i, k \in N \sum_{l \in N} Y_{kl}^i \leq R_{kl}H \quad (9)$$

$$\forall i, k \in N \sum_{l \in N} Y_{kl}^i \leq O_i Z_{ik} \quad (11)$$

$$\forall k \in N \sum_{i \in N} (P_{ik} + Q_{ik}) + \sum_{l \in N} R_{kl} \leq f_k \quad (12)$$

(۵) و (۶)

$$\forall i, k \in NP_{ik}, Q_{ik}, R_{i,k}, \text{Positive Integer} \quad (13)$$

در مدل فوق تابع هدف (۱۰) از ۵ عبارت تشکیل شده است، که عبارت اول از ضرب تعداد وسیله حمل و نقل غیرهاب به هاب در ظرفیت وسیله حمل و نقل ضرب در فاصله غیرهاب به هاب (که فاصله همان هزینه در نظر گرفته می‌شود) بدست می‌آید، عبارت دوم از ضرب تعداد وسیله حمل و نقل هاب به غیرهاب در ظرفیت وسیله حمل و نقل ضرب در فاصله هاب به غیرهاب (که این فاصله نیز

۳-۲-۳ عملگر تقاطع

برای ترکیب جواب‌های والد از عملگر تقاطع تک نقطه‌ای استفاده شده است. بدین صورت که از نقطه‌ای تصادفی کروموزوم‌های والد شکسته می‌شوند و با ترکیب دو سمت چپ و راست دو جواب فرزند جدید $offspring_1$ و $offspring_2$ حاصل می‌گردد. سپس هریک از دو جواب حاصل از نظر شدنی بودن چک می‌شود. در این مرحله اگر یک گره غیر هاب در جواب فرزند جدید به هابی که در حال حاضر موجود نیست تخصیص یافته باشد، آن گره غیرهاب به نزدیک‌ترین هاب از نظر معیار فاصله تخصیص داده می‌شود. در غیر اینصورت تغییری در ساختار تخصیص حاصل نمی‌شود.

۴-۲-۳ بهبود جواب‌های حاصل با استفاده از VND

الگوریتم ژنتیک به‌منظور افزایش معیار پراکنندگی دست‌یابی به مکان‌های مختلف از فضای حل مسئله از عملگر جهش استفاده می‌کند. اگرچه این عملگر قدرت گریز از جواب‌های بهینه محلی را افزایش می‌دهد اما برای مسائل با تعداد زیاد جواب محلی کارایی چندانی ندارد. برای رفع این معضل در این مرحله از الگوریتم از رویکرد جست و جو سلسله‌مراتبی استفاده شده است. در این مرحله با استفاده از الگوریتم VND جواب‌های جدید بدست آمده از مرحله قبل بهبود می‌یابند. برای این منظور از ۵ ساختار همسایگی به نام‌های $NHS_1, NHS_2, \dots, NHS_5$ استفاده شده است.

I. در NHS_1 ساختار هاب‌ها تغییر نمی‌کند بلکه ساختار تخصیص شبکه تغییر می‌یابد. بدین صورت که به تصادف یک نقطه غیرهاب انتخاب می‌شود و به دلخواه به یکی از هاب‌های دیگر اختصاص داده می‌شود و سایر نقاط دیگر بدون تغییر باقی می‌مانند.

II. در NHS_2 مکان یک هاب در بین مجموعه مکان‌هایی که به آن تخصیص یافته‌اند تغییر می‌کند. به عبارت دیگر از بین هاب‌های موجود یکی به دلخواه انتخاب می‌شود. اگر گره i نشان‌دهنده هاب انتخابی باشد و اگر g_i بیانگر مجموعه نقاط غیرهابی باشد که به گره i تخصیص یافته‌اند. آنگاه گره i با یکی از اعضای مجموعه g_i به تصادف تعویض می‌شود و نقطه انتخابی به عنوان هاب جدید معرفی می‌گردد و سایر نقاط g_i به همراه هاب قبلی به هاب جدید اختصاص می‌یابند و سایر نقاط شبکه بدون تغییر باقی می‌مانند.

III. در NHS_3 یک هاب به تصادف انتخاب می‌گردد و با یکی از نقاط غیرهاب موجود در شبکه (مثلاً j) به دلخواه تعویض می‌شود. آنگاه گره j به عنوان هاب جدید شناخته می‌شود و گره i به همراه g_i هریک به نزدیکترین هاب تخصیص داده می‌شوند.

IV. در NHS_4 یکی از هاب‌ها بسته می‌شود و خود این هاب و گره‌های غیرهاب که به آن تخصیص یافته بودند به هاب‌های دیگر تخصیص می‌یابند.

است ارزیابی می‌شود. الگوریتم ژنتیک برای بهبود کروموزوم‌های یک نسل به نسل بعد از عملگرهای تقاطع و جهش استفاده می‌کند. براین اساس آن کروموزوم‌هایی که برازندگی بیشتری دارند از شانس بالاتری برای بقا در نسل بعد نسبت به جواب‌های بی‌کیفیت برخوردارند. اما در فرایند بهبود دست‌یابی به جواب‌هایی که از کیفیت مناسب برخوردار باشند امری چالش برانگیز است و تاثیر زیادی بر عملکرد GA دارد. به منظور حل چنین معضلی ترکیب الگوریتم‌های جست و جوی محلی نظیر الگوریتم جست‌وجوی همسایگی سلسله‌مراتبی (Variable neighborhood descend) با GA بسیار مناسب است [۳۳]. VND به عنوان ورژن قطعی از الگوریتم جست‌وجوی همسایگی (Variable neighborhood search)، الهام گرفته از این حقیقت است که استفاده از همسایگی‌های متفاوت در بررسی فضای جواب می‌تواند به ایجاد جواب‌های بهینه متفاوت منجر شود و چون جواب بهینه جهانی خود یک جواب بهینه محلی است پس امکان دست‌یابی به آن افزایش می‌یابد [۳۳]. اگر مجموعه ساختارهای همسایگی و N_1 ساختار همسایگی اولی باشد که بر اساس جواب اولیه x به دست آمده است. اگر بهبودی با استفاده از ساختار همسایگی حاضر (N_l) امکان‌پذیر نباشد از ساختار همسایگی بعدی (N_{l+1}) استفاده می‌شود. به محض آن‌که بهبودی حاصل شد الگوریتم از ساختار همسایگی اول استفاده می‌کند. به عبارت دیگر VND با بکارگیری پی در پی دسته‌های از همسایگی‌های از قبل تعریف شده (predefined neighborhood) جواب‌هایی با کیفیت بالاتر را جست‌وجوی می‌کند. لذا در این مقاله برای بهینه‌سازی مدل پیشنهادی، الگوریتم فراابتکاری ترکیبی بر مبنای الگوریتم GA و VND ارائه می‌شود که از این پس آنرا GAVNDHLP می‌نامیم.

۳-۲-۳ الگوریتم GAVNDHLP

الگوریتم GAVNDHLP از ۵ گام به شرح زیر تشکیل شده است.

۳-۲-۳-۱ ایجاد جمعیت اولیه

برای هر جواب ابتدا p مکان به‌طور تصادفی به عنوان هاب انتخاب می‌شود. سپس با تخصیص هر یک از نقاط غیرهاب به نزدیک‌ترین هاب موجود سعی می‌گردد که جواب به دست آمده از کیفیت تقریباً خوبی برخوردار باشد. این فرایند به اندازه جمعیت اولیه، که با POP نشان داده می‌شود، تکرار می‌گردد.

۳-۲-۳-۲ انتخاب والدین

به‌منظور فرار از جواب‌های محلی انتخاب والدین مناسب جهت فرآیند ترکیب، بسیار حائز اهمیت است. برای این منظور در این مرحله از الگوریتم، N بهترین جواب موجود از مجموعه pop به عنوان والد انتخاب می‌شوند.

جداول (۲) تا (۵) نتایج حاصل از بهینه‌سازی مدل مکان‌یابی هاب با در نظرگیری محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه و تسهیلات هاب را به ترتیب در اندازه‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ شهر نشان می‌دهند. برای هریک از جداول در ستون اول از سمت چپ مقادیر مختلف α آورده شده است، در ستون دوم برای هر یک از مقادیر α چهار مقدار مختلف برای F ذکر شده است. ستون‌های سوم، چهارم، پنجم و ششم نتایج حاصل از بهینه‌سازی مدل پیشنهادی با الگوریتم هیبریدی ژنتیک و VNS است که به ترتیب مقدار تابع هدف، شماره تسهیلات هاب در جواب، تعداد پروازهایی که توسط هر یک از هاب‌ها در جواب برنامه‌ریزی می‌شود و مقدار زمان صرف شده برای حل مسئله را نشان می‌دهد. ستون‌های هفتم تا دهم نتایج دقیق موارد ذکر شده در ستون‌های سوم تا ششم که حاصل از بهینه‌سازی مدل پیشنهادی (HLPR) با نرم‌افزار GAMS است، نشان می‌دهند. ستون یازدهم میزان درصد اختلاف بین جواب‌های ناشی از الگوریتم GAVNDHLP را با GAMS نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مدل کلاسیک مسئله مکان‌یابی هاب (HLP) بر اساس اطلاعات مقاله [۳۴] و برای مقایسه با نتایج این مقاله در ستون‌های دوازدهم تا چهاردهم آورده شده است. ستون پانزدهم نتایج حاصل از HLPR را با HLP مقایسه کرده و میزان درصد بهبودی در جواب‌ها را نشان می‌دهد. براساس نتایج حاصل از جداول ۲ تا ۵ می‌توان گفت:

- ۱- به غیر از سه مورد که مربوط به $n=25$ می‌باشد، و پررنگ نشان داده شده‌اند، نتایج حاصل از حل مسئله با نرم افزار GAMS با نتایج GAVNDHLP یکسان است. همچنین حداکثر میزان GAP معادل ۰.۵۸٪ است، که نشان از عملکرد مناسب GAVNDHLP در بهینه‌سازی مدل پیشنهادی دارد.
- ۲- مقایسه نتایج HLPR با HLP نشان می‌دهد که در اندازه‌های ۱۰ و ۱۵ شهر میزان بهبودی زیادی حاصل نشده است. اما در اندازه‌های ۲۰ و ۲۵ شهر میزان بهبودی تقریباً ۱۰۰٪ است. زیرا مدل کلاسیک HLP به‌نحوی متعادل جریان را در طول شبکه هاب توزیع نمی‌کند. در چنین شرایطی بخش قابل توجهی از حجم جریان بر دوش یک هاب قرار می‌گیرد. همانطور که در جدول ۵ مشهود است. در تمامی جواب‌های مربوط به HLP هابی وجود دارد که اکثر بار توزیع را برعهده دارد. لذا در زمانی که این هاب به‌خاطر حملات تروریستی، شرایط آب‌وهوایی، ترافیک یا سایر عوامل دیگر در دسترس نباشد، تقریباً عملکرد کل سیستم توزیع مختل می‌شود که امری فاجعه بار است.
- ۳- بررسی نتایج HLPR نشان می‌دهد که جریان بین هاب‌های درون شبکه به‌نحوی متعادل توزیع شده است و برخلاف مدل HLP جریان بردوش هابی خاص نیست.
- ۴- به ازای یک مقدار مشخص α هرچقدر F زیاد می‌شود تعداد هاب‌ها کاهش می‌یابد. این بخاطر افزایش هزینه‌های ناشی از تاسیس هاب‌ها است.

V. در NHS5 یکی از گره‌های غیرهاب به عنوان هاب انتخاب می‌شود و سپس تمامی گره‌های غیرهاب که در مقایسه با هاب‌های دیگر به این هاب نزدیک‌ترند به طور نزولی مرتب می‌شوند و سپس به شرط اینکه محدودیت ظرفیت نقض نشود به این هاب تخصیص می‌یابند.

الگوریتم VND پیشنهادی ابتدا از ساختار NH1 برای بهبود جواب استفاده می‌کند تا به یک جواب بهینه محلی برسد. سپس ساختار NH2 را بکار می‌گیرد. اگر این ساختار نتواند منجر به بهبود جواب شود آنگاه از NH3 استفاده می‌کند. الگوریتم VND این مسیر را تا NHS5 ادامه می‌دهد. در هر زمانی که جواب بهبود می‌یابد ساختار بررسی جواب به NH1 باز می‌گردد. اینگونه تغییر ساختار مسئله باعث می‌شود که هم معیار کیفیت و هم گوناگونی مد نظر قرار گیرند. در این مرحله VND به میزان T بار برای هر جواب به جستجو می‌پردازد.

۳-۲-۵ معیار توقف

پس از انجام max تکرار الگوریتم GAVNDHLP متوقف می‌شود. ضمیمه ۱ الگوریتم GAVNDHLP را نشان می‌دهد.

۴- مثال عددی

در این قسمت از مقاله برای ارزیابی مدل و روش حل پیشنهادی مثال عددی بر روی سری داده CAB صورت می‌پذیرد. در این سری داده که توسط اوکلی [۳] برای مطالعه نقل و انتقال مسافران خطوط هوایی بین ۲۵ شهر آمریکا در ۱۹۷۰ معرفی شد، فاصله بین شهرها از نامساوی مثلثی پیروی می‌کند. همچنین جریان بین شهرها متقارن است. در این مقاله چهار مقدار برای اندازه گره‌ها در نظر گرفته شده است، یعنی $\{25, 20, 15, 10\} \in n$. همچنین پنج مقدار در نظر گرفته شده برای فاکتور تخفیف عبارتند از $\{0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8\} \in \alpha$. برای هر یک از مقادیر مختلف فاکتور تخفیف نیز چهار مقدار مختلف برای هزینه ثابت راه اندازی هاب در نظر گرفته شده است به طوری که $\{100, 150, 200, 250\} \in F$ ، در واقع مقدار F برای تمام گره‌ها یکسان است. در نتیجه ۸۰ مسئله متفاوت برای داده‌های CAB طراحی شده است. همچنین ظرفیت هواپیمای کوچک برابر ۱۵۰ و ظرفیت هواپیمای بزرگ برابر ۳۰۰ و $f_k = 1000$ در نظر گرفته شده است. مقادیر مربوط به پارامترهای الگوریتم GAVNDHLP بر اساس آزمایشات تجربی در جدول زیر آمده است.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای الگوریتم GAVNDHLP

N	POP	T	max
10	100	10	30

جواب شروع می‌کند در حالی که الگوریتم پیشنهادی با یک جمعیت به پیش می‌رود.

۵- تجزیه و تحلیل حساسیت

به منظور ارزیابی بهتر مدل مکان‌یابی هاب با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه و تسهیلات هاب، تجزیه و تحلیل حساسیتی بر روی آن برای اندازه ۲۵ شهر و $F = 150$, $\alpha = 0.6$ صورت پذیرفته است. جدول (۸) نتایج حاصل را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱) ساختار شبکه هاب و میزان پروازی که هر هاب داشته است را برای نتایج جدول (۸) نشان می‌دهد. در قسمت (a) مقدار حد بالای پرواز ۶۰۰۰ است که معادل اولین سطر از جدول (۸) است. قسمت (b) مربوط به سطر دوم جدول (۸) است و به همین ترتیب قسمت (j) مربوط به سطر آخر جدول (۸) است.

بر اساس نتایج جدول (۸) می‌توان اظهار داشت که هر چقدر میزان f_k افزایش می‌یابد از تعداد هاب‌های درون شبکه کاسته می‌شود ولی در مقابل تعادل جریانی از دست می‌رود. این بدان خاطر است مقادیر پایین f_k تعداد پروازهای مجاز برای هر هاب را بسیار محدود می‌کند. لذا بایستی تعداد هاب افزایش یابد. در مقابل مقادیر بالای مجاز پرواز برای هر هاب عملاً تعادل جریانی درون شبکه را به هم می‌زند و بخش اکثر جریان توسط یک هاب توزیع می‌شود. این مسئله به وضوح در شکل (۱) مشخص است. به نحوی که در قسمت (a) که مقدار $f_k = 6000$ است، ۶ هاب در شبکه مستقر هستند و به طریق تقریباً یکسانی جریان را توزیع می‌کنند. اما در مقادیر بالای f_k یعنی در قسمت‌های h تا z (که $f_k \geq 20000$) تعادل جریانی برای هاب‌ها وجود ندارد به نحوی که در قسمت z گره ۲ به عنوان هاب، بیش از نیمی از جریان را توزیع می‌کند. این مسئله برای شرایط واقعی که سیستم کاملاً قابل اطمینان نیست و امکان عدم دسترس پذیری هاب ۲ وجود دارد، باعث کاهش عملکرد کلی شبکه می‌شود که نتیجه آن نارضایتی مشتریان است. در این بین مقدار $f_k = 10000$ مناسبی برای حد مجاز پرواز است. زیرا نه تنها جریان به نحو مطلوبی بین هاب‌ها توزیع شده است، بلکه تعداد هاب‌ها نیز نه زیاد و نه کم است. شکل ۱ قسمت (c) این امر را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در شبکه، ۴ هاب موجود است که هر یک تقریباً ۹۰۰۰ پرواز را توزیع می‌کنند. حال آنکه در مقادیر $f_k < 10000$ یعنی قسمت‌های (b) و (a) تعداد هاب‌ها بیش از حد زیاد هستند که هزینه‌های تاسیس را زیاد می‌کنند. همچنین مقادیر $f_k > 10000$ اگرچه به جای ۴ هاب از ۳ هاب استفاده می‌کنند اما تعادل جریانی را برهم می‌زنند و به شدت به هاب خاصی وابسته هستند. لذا مناسب‌ترین مقدار $f_k = 10000$ است. که در این مقاله به عنوان حد مجاز انتخاب گردید و محاسبات جداول (۲) تا (۸) مطابق آن انجام شدند.

۵- به ازای یک مقدار مشخص از F هر چقدر مقدار α افزایش می‌یابد تعداد تسهیلات هاب کم می‌شود. زیرا مقدار صرفه‌جویی ناشی از انتقال کالا بین تسهیلات هاب کم است لذا بین یک نقطه هاب یا یک نقطه غیر هاب تفاوت زیادی موجود نیست. در نتیجه برای کاهش هزینه‌های انتقال تعداد هاب‌ها کاهش می‌یابد.

به منظور ارزیابی بهتر الگوریتم GAVNDHLP، رویکردی فراابتکاری دیگری بر مبنای الگوریتم تبریدشبه‌سازی ارائه و نتایج آن با روش حل پیشنهادی مقایسه شده است. در الگوریتم SA از ۳ ساختار همسایگی NH1، NH4 و NH5 استفاده شده است. برای تعیین دمای اولیه و دمای نهایی، در ابتدا مسئله ۵۰ بار حل شده است، سپس بر اساس بیشترین مقدار اختلاف بین مقادیر ناشی از تابع هدف دمای اولیه و پایانی تعیین می‌گردد. از آن جاییکه احتمال پذیرش جواب‌های بد برابر $e^{-\Delta Z/T}$ می‌باشد، اگر T دارای مقدار بالایی باشد احتمال پذیرش جواب‌های بد بیشتر خواهد بود. در یک دمای معین، تکرارهای زیادی انجام می‌شود. هنگامی که حالت تعادلی حاصل شد، دما با توجه به یک برنامه‌ی تبرید، کاهش می‌یابد، که این کاهش باعث می‌شود تعداد کمتری از جواب‌های نامطلوب پذیرفته شوند. حال چنانچه در دمای خاصی در طول ۱۰۰ تکرار بهترین جواب تغییر نکند دمای فعلی را تغییر می‌دهیم تا احتمال پذیرش جواب‌های بد بالا رود تا بتوان از جواب بهینه‌ی محلی فرار کرد. در این حالت دمای فعلی را برابر $\theta_r = \max(\theta_{r-1}/2, \theta^b)$, $r = 1, 2$ قرار می‌دهیم که θ_0 دمای اولیه، θ_1 دمایی که اولین بار تغییر دما صورت می‌گیرد، و θ_2 دمایی که دومین بار تغییر دما صورت می‌گیرد. جداول (۶) و (۷) نتایج حاصل از این مقایسه را برای سری داده CAB و در دو اندازه ۲۰ و ۲۵ نشان می‌دهند. براین اساس می‌توان مشاهده نمود که در اندازه ۲۰ گره حداکثر مقدار خطا ۲.۳۹۹٪ است. که این مقدار برای اندازه ۲۵ گره معادل ۴.۲۶۵٪ است. مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم GAVNDHLP با الگوریتم SA نشان می‌دهد که:

- ۱- در حالی که حداکثر مقدار خطای الگوریتم GAVNDHLP، ۰.۵۸٪ است این مقدار برای الگوریتم SA معادل ۴.۲۶۵٪ می‌باشد. لذا کیفیت جواب‌های حاصل از الگوریتم حل پیشنهادی بهتر است.
- ۲- هر چقدر اندازه گره افزایش می‌یابد کیفیت جواب‌های ناشی از الگوریتم SA کاهش زیادی دارد در مقابل نتایج حاصل از الگوریتم GAVNDHLP همچنان مطلوب است. این بدان است که مسئله مکان‌یابی هاب دارای جواب‌های بهینه محلی زیادی است که برای این دسته از مسائل الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت نظیر GAVNDHLP کارایی بالاتری نسبت به الگوریتم‌های مبتنی بر یک جواب نظیر SA دارند.
- ۳- زمان حل الگوریتم SA نسبت به الگوریتم GAVNDHLP کمتر است. این بدان خاطر است که الگوریتم SA از یک

جدول (۲): نتایج حاصل از حل مدل مکان‌یابی هاب برای مساله CAB10

α	F	GA-VNS					HLPR					GAP	HLP					I
		Opt	Hub	Number of flight in Hubs		CPU time	Opt	Hub	Number of flight in Hubs		GAMS time		Opt	Hub	Number of flight in Hubs			
0.2	100	815.028	4 6 7	798 2514 1201	22.272	815.028	4 6 7	798 2514 1201	175.976	0	815.028	4 6 7	798 2514 1201	0				
	150	944.971	7 9	1201 4474	22.526	944.971	7 9	1201 4474	164.806	0	944.9713	7 9	1201 4474	0				
	200	1044.971	7 9	1201 4474	22.073	1044.971	7 9	1201 4474	268.571	0	1044.971	7 9	1201 4474	0				
	250	1144.971	7 9	1201 4474	22.382	1144.971	7 9	1201 4474	174.712	0	1144.971	7 9	1201 4474	0				
0.4	100	891.1281	4 6 7	798 2514 1201	22.238	891.1281	4 6 7	798 2514 1201	244.432	0	891.1281	4 6 7	798 2514 1201	0				
	150	1003.403	7 9	1201 4474	22.404	1003.403	7 9	1201 4474	126.201	0	1003.403	7 9	1201 4474	0				
	200	1103.403	7 9	1201 4474	22.451	1103.403	7 9	1201 4474	219.164	0	1103.403	7 9	1201 4474	0				
	250	1203.403	7 9	1201 4474	22.167	1203.403	7 9	1201 4474	220.098	0	1203.403	7 9	1201 4474	0				
0.6	100	961.834	7 9	1201 4474	22.562	961.834	7 9	1201 4474	241.629	0	961.834	7 9	1201 4474	0				
	150	1061.834	7 9	1201 4474	22.201	1061.834	7 9	1201 4474	140.881	0	1061.834	7 9	1201 4474	0				
	200	1161.834	7 9	1201 4474	22.439	1161.834	7 9	1201 4474	130.583	0	1165.280	4	6661	0.30				
	250	1215.280	4	6661	22.681	1215.280	4	6661	274.762	0	1215.280	4	6661	0				
0.8	100	1020.266	7 9	1201 4474	22.383	1020.266	7 9	1201 4474	252.688	0	1020.266	7 9	1201 4474	0				
	150	1115.280	4	6661	22.203	1115.280	4	6661	255.249	0	1115.280	4	6661	0				
	200	1165.280	4	6661	22.170	1165.280	4	6661	182.575	0	1165.280	4	6661	0				
	250	1215.280	4	6661	22.305	1215.280	4	6661	185.216	0	1215.280	4	6661	0				
1	100	1065.280	4	6661	22.191	1065.280	4	6661	139.254	0	1065.280	4	6661	0				
	150	1115.280	4	6661	22.155	1115.280	4	6661	124.817	0	1115.280	4	6661	0				
	200	1165.280	4	6661	22.168	1165.280	4	6661	175.772	0	1165.280	4	6661	0				
	250	1215.280	4	6661	22.322	1215.280	4	6661	202.687	0	1215.280	4	6661	0				

جدول (۳): نتایج حاصل از حل مدل مکان‌یابی هاب برای مساله CAB 15

α	F	GA-VNS						HLPR						GAP	HLP						I
		Opt	Hub	Number of flight in Hubs			CPU time	Opt	Hub	Number of flight in Hubs			GAMS time		Opt	Hub	Number of flight in Hubs				
0.2	100	989.542	4 7 12 14 17	8098 1378	3328 9929	2074	74.517	989.542	4 7 12 14 17	8098 1378	3328 9929	2074	2443.620	0	989.542	4 7 12 14 17	8098 2074	3328 1378	2074	0	
	150	1199.869	4 12 16 17	8059	2074 9929	5271	74.142	1199.869	4 12 16 17	8059	2074 9929	5271	4153.947	0	ifs	4 12 17	12993 12903	2074	100		
	200	1399.869	4 12 16 17	8059	2074 9929	5271	75.891	1399.869	4 12 16 17	8059	2074 9929	5271	3842.063	0	ifs	4 12 17	12993 12903	2074	100		
	250	1574.705	4 7 17	8097	7825	9928	74.067	1574.705	4 7 17	8097	7825	9928	3602.843	0	ifs	4 12 17	12993 12903	2074	100		
0.4	100	1149.450	1 4 12 17	5271	8059 9929	2074	74.013	1149.450	1 4 12 17	5271	8059 9929	2074	4771.145	0	1149.450	1 4 12 17	5271 2074	8059 9929	0		
	150	1349.450	1 4 12 17	5271	8059 9929	2074	74.956	1349.450	1 4 12 17	5271	8059 9929	2074	2183.401	0	ifs	4 12 17	12993 12903	2074	100		
	200	1531.308	5 7 17	9494	6899	9928	73.437	1531.308	5 7 17	9494	6899	9928	3646.259	0	ifs	4 17	17013	12903	100		
	250	1681.308	5 7 17	9494	6899	9928	74.160	1681.308	5 7 17	9494	6899	9928	2049.052	0	ifs	4 17	17013	12903	100		
0.6	100	1291.600	1 4 12 17	5271	8059 9929	2074	74.075	1291.600	1 4 12 17	5271	8059 9929	2074	3582.253	0	1291.600	1 4 12 17	5271 2074	8059 9929	0		
	150	1483.246	5 7 17	9494	6899	9928	74.278	1483.246	5 7 17	9494	6899	9928	4205.832	0	ifs	4 17	17013	12903	100		
	200	1633.246	5 7 17	9494	6899	9928	75.072	1633.246	5 7 17	9494	6899	9928	2642.012	0	ifs	4 17	17013	12903	100		
	250	1783.246	5 7 17	9494	6899	9928	73.336	1783.246	5 7 17	9494	6899	9928	2870.972	0	ifs	6	38364	100			
0.8	100	1425.605	6 11 17	9543	7804	8462	74.885	1425.605	6 11 17	9543	7804	8462	2826.107	0	ifs	4 17	17013	12903	100		
	150	1575.605	6 11 17	9543	7804	8462	74.284	1575.605	6 11 17	9543	7804	8462	3506.254	0	ifs	4 17	17013	12903	100		
	200	1725.605	6 11 17	9543	7804	8462	75.953	1725.605	6 11 17	9543	7804	8462	4872.331	0	ifs	6	38364	100			
	250	1875.605	6 11 17	9543	7804	8462	74.627	1875.605	6 11 17	9543	7804	8462	2324.994	0	ifs	6	38364	100			
1	100	1504.754	4 17 20	9732	6572	9884	74.244	1504.754	4 17 20	9732	6572	9884	3686.296	0	ifs	4 20	11848	18830	100		
	150	1654.754	4 17 20	9732	6572	9884	74.133	1654.754	4 17 20	9732	6572	9884	3284.586	0	ifs	6	38364	100			
	200	1804.754	4 17 20	9732	6572	9884	75.515	1804.754	4 17 20	9732	6572	9884	2534.494	0	ifs	6	38364	100			
	250	1954.754	4 17 20	9732	6572	9884	75.089	1954.754	4 17 20	9732	6572	9884	2993.157	0	ifs	6	38364	100			

جدول (۴): نتایج حاصل از حل مدل مکان‌یابی هاب برای مساله CAB 20

α	F	GA-VNS				HLPR				GAP	HLP				I
		Opt	Hub	Number of flight in Hubs	CPU time	Opt	Hub	Number of flight in Hubs	GAMS time		Opt	Hub	Number of flight in Hubs		
0.2	100	1052.572	3 4 7 12 14	909 5901 1985 923	36.513	1052.572	3 4 7 12 14	909 5901 1985 923	730.076	0	1052.572	3 4 7 12 14	909 5901 1985 923	0	
	150	1264.055	4 7 12 14	7666 1985 923 646	36.929	1264.055	4 7 12 14	7666 1985 923 646	551.65	0	1264.055	4 7 12 14	7666 1985 923 646	0	
	200	1426.224	4 7 12	7666 2784 922	36.186	1426.224	4 7 12	7666 2784 922	476.839	0	ifs	4 12	13006 921	100	
	250	1570.036	4 7	7665 4339	36.692	1570.036	4 7	7665 4339	610.886	0	ifs	4 12	13006 921	100	
	100	1204.510	4 7 12 14	8127 1698 922 646	36.456	1204.510	4 7 12 14	8127 1698 922 646	486.633	0	1204.510	4 7 12 14	8127 1698 922 646	0	
0.4	150	1381.867	4 7 12	9827 1698 921	36.728	1381.867	4 7 12	9827 1698 921	628.743	0	1381.867	4 7 12	9827 1698 921	0	
	200	1528.189	4 7	9826 3118	35.984	1528.189	4 7	9826 3118	518.347	0	ifs	4 12	13006 921	100	
	250	1628.189	4 7	9826 3118	36.338	1628.189	4 7	9826 3118	888.66	0	ifs	4	15767	100	
0.6	100	1334.032	1 4 7 12	1502 6847 1699 921	36.996	1334.032	1 4 7 12	1502 6847 1699 921	971.99	0	1336.775	4 7 12	9827 1698 921	0.21	
	150	1484.798	4 7	9826 3118	36.396	1484.798	4 7	9826 3118	671.375	0	ifs	4 12	13006 921	100	
	200	1584.798	4 7	9826 3118	36.785	1584.798	4 7	9826 3118	971.539	0	ifs	4	15767	100	
	250	1684.798	4 7	9826 3118	36.034	1684.798	4 7	9826 3118	703.923	0	ifs	4	15767	100	
	100	1417.968	4 11	8600 4076	36.693	1417.968	4 11	8600 4076	435.354	0	1417.968	4 11	8600 4076	0	
0.8	150	1517.968	4 11	8600 4076	36.399	1517.968	4 11	8600 4076	786.179	0	ifs	4	15767	100	
	200	1617.968	4 11	8600 4076	36.016	1617.968	4 11	8600 4076	457.389	0	ifs	4	15767	100	
	250	1717.968	4 11	8600 4076	36.567	1717.968	4 11	8600 4076	469.418	0	ifs	4	15767	100	
	100	1449.401	4 11	9063 3733	36.379	1449.401	4 11	9063 3733	561.851	0	ifs	4	15767	100	
1	150	1549.401	4 11	9063 3733	36.325	1549.401	4 11	9063 3733	724.949	0	ifs	4	15767	100	
	200	1649.401	4 11	9063 3733	36.342	1649.401	4 11	9063 3733	705.858	0	ifs	4	15767	100	
	250	1749.401	4 11	9063 3733	36.593	1749.401	4 11	9063 3733	825.053	0	ifs	4	15767	100	

جدول (۵): نتایج حاصل از حل مدل مکان‌یابی هاب برای مساله CAB 25

α	F	GA-VNS						HLPR				GAP	HLP			I				
		Opt	Hub	Number of flight in Hubs			CPU time	Opt	Hub	Number of flight in Hubs			GAMS time	Opt	Hub		Number of flight in Hubs			
0.2	100	1113.447	4 12 17 20 24	8848	5874	9248	116.694	1113.447	4 12 17 20 24	8848	5874	9248	25271.356	0	ifs	4 12 17 24	12801	5873	100	
	150	1355.400	4 12 17 25	9517	6995	9938	116.098	1355.400	4 12 17 25	9517	6995	9938	27729.897	0	ifs	4 12 17	14858	4909	100	
	200	1538.652	6 12 13 17	9586	6996	9761	117.288	1538.652	6 12 13 17	9586	6996	9761	18114.130	0	ifs	4 12 17	17526	5872	100	
	250	1746.210	1 4 12 17	9794	9677	6996	119.154	1743.293	1 4 12 17	9693	9898	6995	32746.546	0.167	ifs	12 20	18171	43196	100	
0.4	100	1271.083	1 4 12 17 25	6790	9516	5873	117.481	1271.083	1 4 12 17 25	6790	9516	5873	28637.055	0	ifs	1 4 12 17	6789	10843	5873	100
	150	1518.783	1 4 12 17 20	6789	7045	5873	118.978	1518.783	1 4 12 17 20	6789	7045	5873	17096.437	0	ifs	4 12 18	14858	5873	100	
	200	1693.844	4 12 17 20	9522	6995	9973	116.567	1693.844	4 12 17 20	9522	6995	9973	25771.623	0	ifs	12 20	16504	5873	100	
	250	1924.782	4 12 17 25	9525	6996	9973	117.715	1924.782	4 12 17 25	9525	6996	9973	33436.824	0	ifs	12 20	19215	43196	100	
0.6	100	1429.859	4 7 12 17 25	8598	3274	5697	117.580	1421.572	1 4 12 17 25	6790	9516	5874	31179.193	0.583	ifs	2 4 12	22699	13655	100	
	150	1660.659	4 8 17 25	9703	9459	7918	117.901	1660.429	4 8 17 20	8913	8294	9249	25480.042	0.014	ifs	2 4 12	5872	44844	100	
	200	1829.184	4 12 17 20	9791	6995	9938	117.258	1829.184	4 12 17 20	9791	6995	9938	34575.893	0	ifs	12 20	5872	44844	100	
	250	2029.184	4 12 17 20	9791	6995	9938	116.407	2029.184	4 12 17 20	9791	6995	9938	27002.262	0	ifs	12 20	5872	44844	100	
0.8	100	1567.658	4 8 17 20	8913	8294	9249	118.866	1567.658	4 8 17 20	8913	8294	9249	29774.070	0	ifs	2 4 12	22699	13655	100	
	150	1763.628	4 8 17 20	9791	6995	9938	117.912	1763.628	4 8 17 20	9791	6995	9938	27880.554	0	ifs	12 20	5872	44844	100	
	200	1963.628	4 8 17 20	9791	6995	9938	117.386	1963.628	4 8 17 20	9791	6995	9938	30985.284	0	ifs	5	56934	100		
	250	2163.628	4 8 17 20	9791	6995	9938	118.456	2163.628	4 8 17 20	9791	6995	9938	27412.297	0	ifs	5	56934	100		
1	100	1674.886	4 8 17 20	8913	8294	9249	117.848	1674.886	4 8 17 20	8913	8294	9249	34812.009	0	ifs	4 8 20	9791	6995	26310	100
	150	1874.886	4 8 17 20	8913	8294	9249	117.672	1874.886	4 8 17 20	8913	8294	9249	23194.624	0	ifs	5	56934	100		
	200	2074.886	4 8 17 20	8913	8294	9249	115.103	2074.886	4 8 17 20	8913	8294	9249	19098.307	0	ifs	5	56934	100		
	250	2274.886	4 8 17 20	8913	8294	9249	116.015	2274.886	4 8 17 20	8913	8294	9249	31403.432	0	ifs	5	56934	100		

جدول (۶): نتایج حاصل از بهینه‌سازی مدل با الگوریتم SA برای CAB n=20

α	F	HLPR					SA				GAP		
		Opt	Hub	Number of flight in Hubs		GAMS time	Opt	Hub	Number of flight in Hubs			CPU time	
0.2	100	989.542	4 7 12 14 17	8098 1378	3328 2074	2074 9929	2443.620	999.869	4 12 14 17	8098 5271	2074 9929	50.834	1.044
	150	1199.869	4 12 16 17	8059	2074 9929	5271	4153.947	1199.869	4 12 16 17	8059 5271	2074 9929	50.814	0
	200	1399.869	4 12 16 17	8059	2074 9929	5271	3842.063	1424.705	4 7 17	8097 9928	7825	51.034	1.774
	250	1574.705	4 7 17	8097	7825	9928	3602.843	1574.705	4 7 17	8097 9928	7825	50.865	0
0.4	100	1149.450	1 4 12 17	5271	8059 9929	2074	4771.145	1149.450	1 4 12 17	5271 2074	8059 9929	50.957	0
	150	1349.450	1 4 12 17	5271	8059 9929	2074	2183.401	1381.308	5 7 17	9494 9928	6899	50.542	2.361
	200	1531.308	5 7 17	9494	6899	9928	3646.259	1531.308	5 7 17	9494 9928	6899	50.595	0
	250	1681.308	5 7 17	9494	6899	9928	2049.052	1681.308	5 7 17	9494 9928	6899	50.624	0
0.6	100	1291.600	1 4 12 17	5271	8059 9929	2074	3582.253	1291.600	1 4 12 17	5271 2074	8059 9929	50.946	0
	150	1483.246	5 7 17	9494	6899	9928	4205.832	1483.246	5 7 17	9494 9928	6899	51.217	0
	200	1633.246	5 7 17	9494	6899	9928	2642.012	1633.246	5 7 17	9494 9928	6899	50.797	0
	250	1783.246	5 7 17	9494	6899	9928	2870.972	1783.246	5 7 17	9494 9928	6899	50.738	0
0.8	100	1425.605	6 11 17	9543	7804	8462	2826.107	1463.397	9 11 17	9864 8462	7804	51.380	2.651
	150	1575.605	6 11 17	9543	7804	8462	3506.254	1613.397	9 11 17	9864 8462	7804	50.571	2.399
	200	1725.605	6 11 17	9543	7804	8462	4872.331	1763.397	9 11 17	9864 8462	7804	51.086	2.190
	250	1875.605	6 11 17	9543	7804	8462	2324.994	1913.397	9 11 17	9864 8462	7804	51.308	2.015
1	100	1504.754	4 17 20	9732	6572	9884	3686.296	1504.754	4 17 20	9732 9884	6572	51.089	0
	150	1654.754	4 17 20	9732	6572	9884	3284.586	1654.754	4 17 20	9732 9884	6572	51.462	0
	200	1804.754	4 17 20	9732	6572	9884	2534.494	1804.754	4 17 20	9732 9884	6572	51.376	0
	250	1954.754	4 17 20	9732	6572	9884	2993.157	1954.754	4 17 20	9732 9884	6572	50.802	0

جدول (۷): نتایج حاصل از بهینه‌سازی مدل با الگوریتم SA برای CAB n=25

α	F	HLPR						SA				GAP
		Opt	Hub	Number of flight in Hubs			GAMS time	Opt	Hub	Number of flight in Hubs		
0.2	100	1113.447	4 12 17 20 24	8848 5874 9248 6250 4909	25271.356	1113.447	4 12 17 20 24	8848 5874 9248 6250 4909	85.768	0		
	150	1355.400	4 12 17 25	9517 6995 9938 9945	27729.897	1405.569	6 12 17 25	9586 6995 9938 9945	87.384	3.701		
	200	1538.652	6 12 13 17	9586 6996 9761 9938	18114.130	1538.652	6 12 13 17	9586 6996 9761 9938	86.804	0		
	250	1743.293	1 4 12 17	9693 9898 6995 9939	32746.546	1746.210	1 4 12 17	9794 9677 6996 9938	87.472	0.167		
0.4	100	1271.083	1 4 12 17 25	6790 9516 5873 9249 4082	28637.055	1271.083	1 4 12 17 25	6790 9516 5873 9249 4082	87.329	0		
	150	1518.783	1 4 12 17 20	6789 7045 5873 9248 6249	17096.437	1583.563	1 9 12 17 20	6789 8235 5873 9248 6249	86.908	4.265		
	200	1693.844	4 12 17 20	9522 6995 9973 9960	25771.623	1693.844	4 12 17 20	9522 6995 9973 9960	85.858	0		
	250	1924.782	4 12 17 25	9525 6996 9973 9546	33436.824	1924.782	4 12 17 25	9525 6996 9973 9546	85.612	0		
0.6	100	1421.572	1 4 12 17 25	6790 9516 5874 7919 5530	31179.193	1454.683	1 9 12 17 25	6790 9768 5874 7919 5530	86.358	2.329		
	150	1660.429	4 8 17 20	8913 8294 9249 9961	25480.042	1704.683	4 8 17 25	9242 9460 9249 9912	86.935	2.665		
	200	1829.184	4 12 17 20	9791 6995 9938 9960	34575.893	1829.184	4 12 17 20	9791 6995 9938 9960	86.424	0		
	250	2029.184	4 12 17 20	9791 6995 9938 9960	27002.262	2029.184	4 12 17 20	9791 6995 9938 9960	86.030	0		
0.8	100	1567.658	4 8 17 20	8913 8294 9249 9961	29774.070	1618.269	4 8 17 25	9242 9460 9249 9912	87.010	3.228		
	150	1763.628	4 8 17 20	9791 6995 9938 9960	27880.554	1818.269	4 8 17 25	9242 9460 9249 9912	86.596	3.098		
	200	1963.628	4 8 17 20	9791 6995 9938 9960	30985.284	2018.269	4 8 17 25	9242 9460 9249 9912	86.589	2.783		
	250	2163.628	4 8 17 20	9791 6995 9938 9960	27412.297	2218.269	4 8 17 25	9242 9460 9249 9912	85.798	2.525		
1	100	1674.886	4 8 17 20	8913 8294 9249 9961	34812.009	1723.782	4 8 17 25	9242 9460 9249 9912	87.406	2.919		
	150	1874.886	4 8 17 20	8913 8294 9249 9961	23194.624	1923.782	4 8 17 25	9242 9460 9249 9912	86.856	2.608		
	200	2074.886	4 8 17 20	8913 8294 9249 9961	19098.307	2123.782	4 8 17 25	9242 9460 9249 9912	87.027	2.357		
	250	2274.886	4 8 17 20	8913 8294 9249 9961	31403.432	2323.782	4 8 17 25	9242 9460 9249 9912	85.832	2.149		

۶- جمع بندی و نتیجه‌گیری

نامطمئن عمل می‌کند. (۳) نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که برای حد مجاز جریان ورودی به یک هاب مقداری موجود است که بین تعداد هاب‌های درون شبکه و توزیع جریان در کل شبکه تعادل برقرار می‌کند. (۴) مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل کلاسیک مکان‌یابی هاب نشان می‌دهد که در هیچ مسئله میزان بهبودی منفی نبوده و در اکثر موارد ۱۰۰٪ است.

به عنوان پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی، مطالعه صورت پذیرفته در این مقاله را می‌تواند به صورت زیر توسعه داده شود: (۱) انجام تحقیق مشابه در زمینه مسائل مکان‌یابی هاب مرکز و مکان‌یابی هاب پوشش (۲) متغیر در نظر گرفتن ظرفیت وسایل حمل و نقل در شرایط عدم قطعیت جریان (۳) مطالعه بر روی محدودیت ظرفیت بر روی گره‌ها توام با محدودیت ظرفیت وسائل نقلیه.

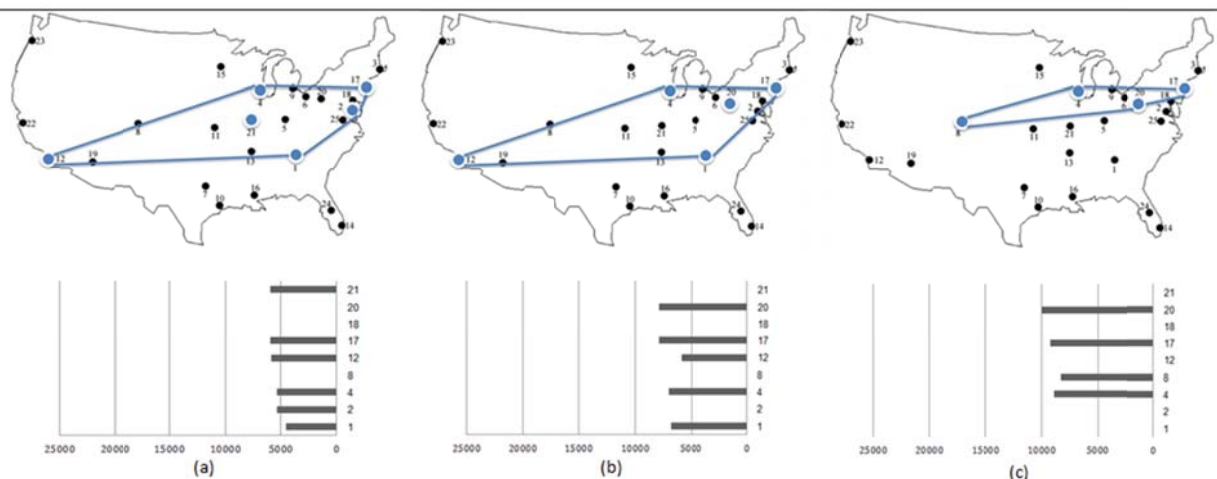
سیاس گذاری و قدردانی

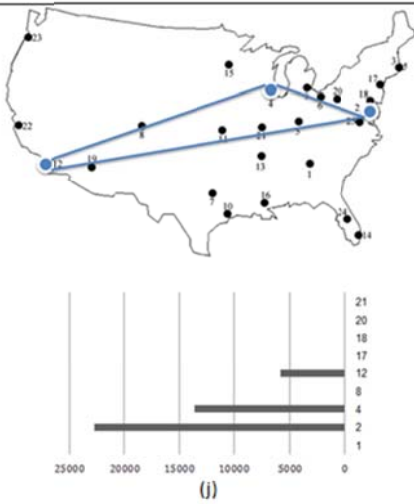
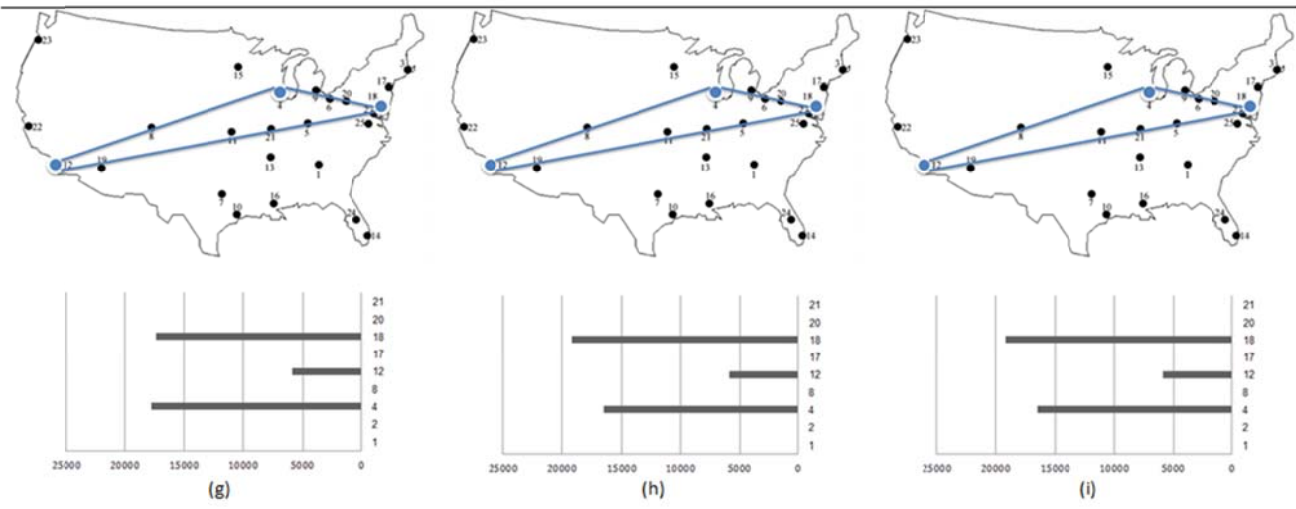
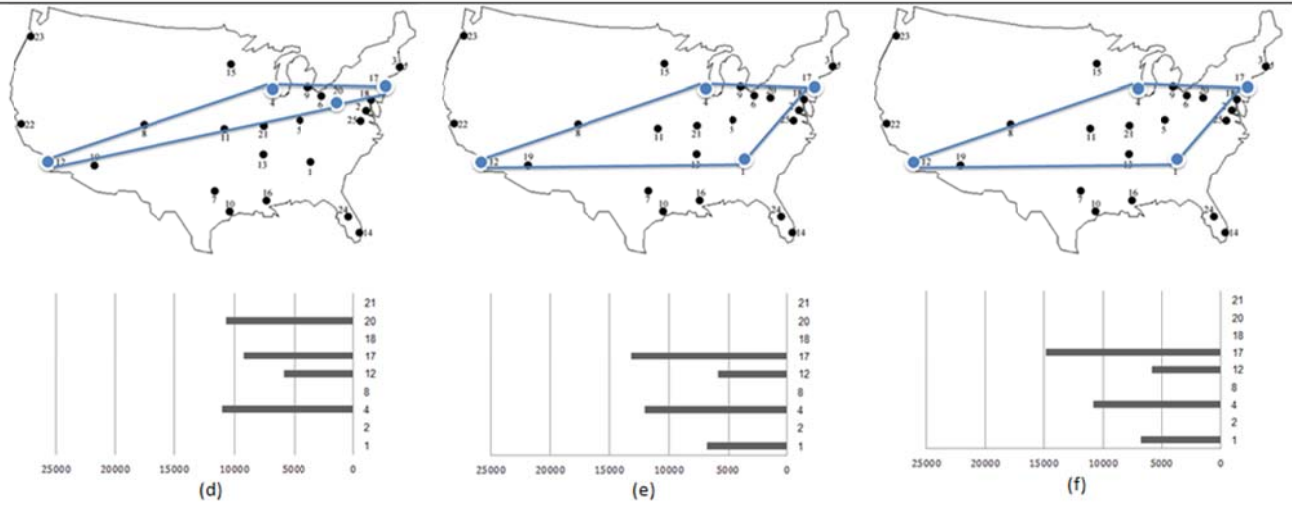
در اینجا نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از داوران محترم بخاطر نظرات ارزشمندشان که به بهبودی این مقاله کمک شایانی کرد تشکر نمایند.

در این مقاله مساله مکان‌یابی هاب با در نظر گیری وسایل حمل و نقل ظرفیت‌دار بر مبنای صرفه‌جویی اقتصادی و همچنین ظرفیت حداکثری در مورد پروازهای ورودی به هاب‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به پیچیدگی مدل پیشنهادی رویکردی فرابتنکاری بر مبنای الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جست و جو همسایگی سلسله مراتبی مطرح شد. نتایج پیاده سازی الگوریتم بر روی سری داده CAB نشان داد که: (۱) حداکثر میزان GAP الگوریتم فرابتنکاری پیشنهادی معادل ۰.۵۸٪ بود که نشان از عملکرد مناسب آن دارد. (۲) مدل کلاسیک مکان‌یابی هاب اکثر جریان درون شبکه را بر عهده هابی مشخص قرار می‌دهد. حال آنکه مدل پیشنهادی به نحوی متعادل جریان در طول شبکه هاب توزیع می‌کند. به عبارت دیگر در نظر گیری محدودیت ظرفیت برای وسایل نقلیه و تسهیلات هاب باعث می‌شود در زمانی که به دلایلی نظیر حملات تروریستی، شرایط نامساعد جوی و یا ترافیک یک یا برخی از هاب‌ها دسترس ناپذیرند، عملکرد کلی شبکه مختل نگردد. در حالی مدل کلاسیک به خاطر وابستگی شدید به هابی خاص در چنین شرایطی کاملاً

جدول (۸): تجزیه و تحلیل حساسیت مدل HLPR زمانی که $\alpha = 0.6, F = 150$

No	f_k	Opt	Hub	Number of flight in Hubs					
1	6000	1827.430	1 2 4 12 17 21	4530	5310	5542	5874	5908	5924
2	8000	1673.481	1 4 12 17 20	6790	7045	5873	7919	7871	
3	10000	1660.429	4 8 17 20	8913	8294	9249	9961		
4	12000	1600.742	4 12 17 20	11000	5873	9248	10705		
5	14000	1570.137	1 4 12 17	6789	12043	5873	13192		
6	16000	1561.994	1 4 12 17	6789	10843	5873	14858		
7	18000	1520.844	4 12 18	17803	5872	17417			
8	20000	1508.714	4 12 18	16504	5873	19215			
9	22000	1508.714	4 12 18	16504	5873	19215			
10	24000	1508.563	2 4 12	22699	13655	5872			



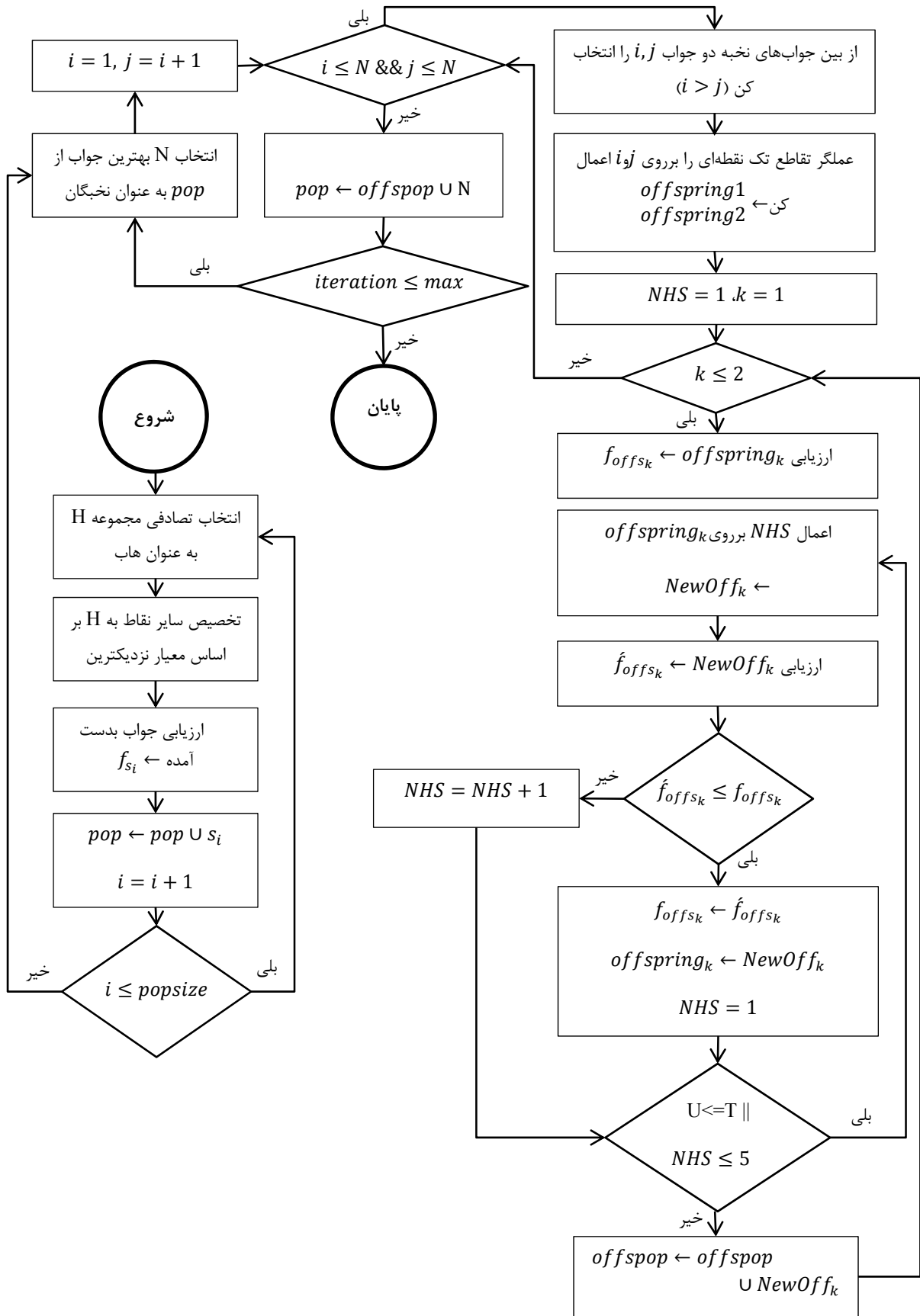


شکل (۱): ساختار شبکه‌های هاب متناظر با جدول (۶) به همراه میزان پروازی که هر هاب داشته است

مراجع

- median problem. *Location Science*, 4:139-154.
- [18] Horner, M.W., O'Kelly, M.E. (2001). Embedding economies of scale concepts for hub network design. *Journal of Transport Geography*, 9: 255-265.
- [19] Correia, I., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F. (2010). The capacitated single-allocation hub location problem revisited: A note on a classical formulation. *European Journal of Operational Research*, 207: 92-96.
- [20] Teitz, M.B., Bart, P. (1968). Heuristic methods for estimating the generalized vertex median of a weighted graph. *Operations Research*, 16:955-961.
- [21] Cornuejols, G., Fisher, M.L., Nemhauser, G.L. (1977). Location of bank accounts to optimize float: An analytic study of exact and approximate algorithms. *Manage Science*, 23:789-810.
- [22] Christofides, N., Beasley, J.E. (1981). A tree search algorithm for the p-median problem. *European Journal of Operational Research*, 10:196-204.
- [23] Gilmore, P.C., Gomory, R.E. (1961). A linear programming approach to the cutting stock problem. *Operations Research*, 9:849-859.
- [24] Hanjoul, P., Peeters, D. (1985). A comparison of two dual-based procedures for solving the p-median problem. *European Journal of Operational Research*, 20:387-396.
- [25] Chiyoshi, F., Galvão, R. (2000). A statistical analysis of simulated annealing applied to the p-median problem. *Annals of Operations Research*, 96:61-74.
- [26] Brimberg, J., Mladenovic, N. (1996). Solving the continuous location-allocation problem with tabu search. *Studies in Locational Analysis*, 8:23-32.
- [27] Resende, M.G.C., Werneck, R.E. (2004). A hybrid heuristic for p-median problem. *Journal of Heuristics*, 10:59-88.
- [28] Hosage, C.M., Goodchild, M.F. (1986). Discrete space location-allocation solutions from genetic algorithms. *Annals of Operations Research*, 6:35-46.
- [29] Alp, O., Erkut, E., Drezner, Z. (2003). An efficient genetic algorithm for the p-median problem. *Annals of Operations Research*, 121:21-42.
- [30] Li, X., Yeh, A.G. (2005). Integration of genetic algorithms and GIS for optimal location search. *International Journal of Geographical Information Science*, 19:581-601.
- [31] Reese, J. (2006). Solution methods for the p-median problem: An annotated bibliography. *Network*, 48:125-142.
- [32] Mladenovic, N., Brimberg, J., Hansen, P., Moreno-Prez, J.A. (2007). The p-median problem: A survey of metaheuristic approaches. *European Journal of Operational Research*, 179:927-939.
- [33] Talbi, E.-G., (2009). *Metaheuristics from design to implementation*, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken
- [34] Silva, M.R., Cunha, C.B. (2009). New simple and efficient heuristics for the uncapacitated single allocation hub location problem. *Computers & Operations Research*, 36:3152-3165.
- [1] Campbell, J.F., Ernst, A.T., Krishnamoorthy, M. (2002). *Hub location problems*. [book auth.] Z. DREZNER and H. W. HAMACHER. *Facility Location: Applications and Theory*. Springer,
- [2] Goldman, A. J. (1969). Optimal Locations for in a Network. *Transportation Science*, 3:352-360
- [3] O'Kelly, M. E. (1987). A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 32:393-404
- [4] Alumur, S., Kara, B.Y. (2008). Network hub location problems: the state of the art. *European Journal of Operational Research*, 190:1-21.
- [5] Campbell, J.F. (1994). A survey of network hub locations. *Studies in Locational Analysis*, 6: 31-49.
- [6] O'Kelly, M.E., Miller, H.J. (1994). The hub network design problem – a review and synthesis. *Journal of Transport Geography*, 2:31-40.
- [7] Campbell, J. F. (1994). Integer programming formulation for discrete hub location problems. *European Journal of Operational Research* 72:387-405
- [8] Ernst, A.T., Hamacher, H., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Woeginger, G. (2009). uncapacitated single and multiple allocation p-hub center problems. *Computers and Operations Research*, 36:2230-2241.
- [9] Kara, B.Y., Tansel, B.C. (2000). On the single assignment p-hub center problem. *European Journal of Operational Research*, 125(3):648-655.
- [10] Farahani, R.Z., Hekmatfar, M., Arabani, A.B., Nijkakhsh, E. (2013). *Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications*. *Computers & Industrial Engineering*, 64:1096-1109
- [11] Gelareh, S., Nickel, S. (2011). Hub location problems in transportation networks. *Transportation Research Part E*, 47:1092-1111.
- [12] Mohammadi, M., Jolai, F., Rostami, H. (2011). An M/M/c queue model for hub covering location problem, *Mathematical and Computer Modelling*, 54:2623-2638.
- [13] Taghipourian, F., Mahdavi, I., Mahdavi-Amiri, N., Makui, A. (2012). A fuzzy programming approach for dynamic virtual hub location problem. *Applied Mathematical Modelling*, 36:3257-3270.
- [14] Yaman, H., Elloumi, S. (2012). Star p-hub center problem and star p-hub median problem with bounded path lengths. *Computers and Operations Research*, 39(11): 2725-2732.
- [۱۵] غفاری‌نسب، نادر؛ غضنفری، مهدی؛ تیموری، ابراهیم. (۱۳۹۲) طراحی شبکه لجستیک هاب استوار با در نظر گرفتن تقاضای تصادفی برای شرکت‌های ارائه‌دهنده خدمات لجستیکی. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، شماره ۲ جلد ۱، ص ۹۷-۱۰۷
- [16] O'Kelly, M.E., Bryan, D.L. (1998). Hub location with flow economies of scale. *Transportation Research Part B*, 32: 605-616.
- [17] Ernst, A.T., Krishnamoorthy, M. (1996). Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub

ضمیمه ۱: الگوریتم GAVNDHLP





Developing Hub Location Problem Based on Economy Flows by Using Capacity of Vehicle and Limitation of Entrance Flow to Hub

S.K. Chaharrsooghi^{1*}, F. Momayyezi¹, A. Yazdekhasti²

1. Department of Industrial Engineering, Collage of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Department of Industrial Engineering, Collage of Engineering, Yazd University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 Nov 2013

Accepted 10 Nov 2014

Keywords:

Hub Location
Penalty parameter
Capacity of vehicle
Genetic algorithm
Variable neighborhood descent.

ABSTRACT

Hubs are special facilities acting as mediating stations in distribution systems to organize flow transmission between origins and destinations through the best possible paths. Penalty parameters such as χ and δ can seriously affect hubs number and location in a network, however in most of the existing hub location models, these parameters are set as greater than one coefficient in the objective function with no consideration for the amount of exchanged flow between hubs and spokes. Also in classic models of hub location problem, unlimited entrance flows to a hub is assumed. Since this assumption may lead to a structure in which one hub is forced to handle a large percent of flow distribution, in cases like bad weather conditions, heavy traffics or terrorist attacks, the hub become unavailable. To address the above issues, in this study, instead of penalty parameters between hubs and spokes, capacitated transportation vehicles are implemented. Hub entrance flow is also considered limited. To do so, transportation costs from hubs (spokes) to spokes (hubs) are calculated according to the number of vehicles. Due to the complexity of the proposed model, a hybrid metaheuristic approach based on genetic algorithm and variable neighborhood search descent algorithm is developed. Results show higher performance of the proposed hybrid metaheuristic.

* Corresponding author. Seyed Kamal Chaharrsooghi
Tel.: +98 21 82883345; E-mail addresses: Skch@modares.ac.ir