

مطالعه تأثیر در نظرگیری رقابت در مکان‌یابی هاب‌های لجستیکی بر سهم بازارهای بین‌المللی حمل‌ونقل با استفاده از نظریه بازی‌ها

نادر غفاری‌نسب^۱، یونس جبارزاده*^۲ و علیرضا مطلب زاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۱۹

چکیده

مسئله مکان‌یابی هاب یکی از مسائل راهبردی در لجستیک محسوب می‌شود که کاربردهای مختلفی در حمل‌ونقل مسافران و کالاهای، سرویس‌های پستی، شبکه‌های مخابراتی و غیره دارد. مقاله حاضر با فرض یک بازار دوقطبی، مسئله مکان‌یابی رقابتی هاب‌ها را در شبکه تخصیص تکی مورد بررسی قرار می‌دهد. دو شرکت (تصمیم‌گیرندگان) تصمیمات متوالی را برای پیکره‌بندی شبکه‌های هاب خود می‌گیرند تا سهم بازارشان را به حداکثر برسانند و مشتریان یکی از شرکت‌ها را بر اساس سطح خدمتی (از نظر هزینه، مسافت و غیره) که هر یک از آن‌ها ارائه داده‌اند، انتخاب می‌کنند. مدل‌های ریاضی بر اساس تعادل استکلبرگ برای مسائل شرکت اول و دوم (رهبر و پیرو) ارائه و یک الگوریتم حل بر مبنای جستجوی ممنوعه برای مسائل رهبر و پیرو پیشنهاد می‌شود. برای اعتبارسنجی روش حل و مدل‌های ریاضی از مجموعه داده‌های استاندارد موجود در ادبیات موضوع استفاده می‌شود. یافته‌های تحقیق لزوم در نظر گرفتن رقابت در مکان‌یابی هاب‌های لجستیکی برای شرکت‌های حمل‌ونقل به‌منظور جذب سهم بیشتر بازارهای بین‌المللی حمل‌ونقل را نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: بازار رقابتی، لجستیک، مکان‌یابی هاب، نظریه بازی‌ها.

طبقه‌بندی JEL: C61, M16, M31, L13

۱. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲. استادیار گروه مدیریت، دانشکده اقتصاد مدیریت و بازرگانی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (نویسنده مسئول) - Email:

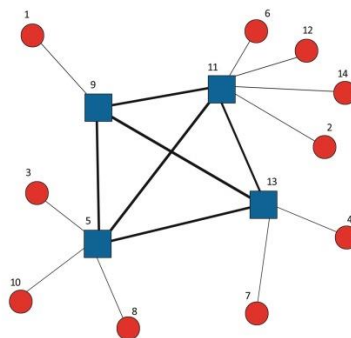
yjabarzade@tabrizu.ac.ir

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت، دانشکده اقتصاد، مدیریت و بازرگانی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

مقدمه

هاب‌ها^۱ تسهیلات ویژه‌ای هستند که به‌عنوان نقاط تعویض، انتقال و طبقه‌بندی در بسیاری از سیستم‌های توزیع به کار گرفته می‌شوند. تسهیلات هاب به جای خدمت‌رسانی مستقیم هر جفت مبدأ-مقصد^۲، جریان‌ها را به‌منظور 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 مقصدشان یکسان است ترکیب می‌شوند. مسئله مکان‌یابی هاب شامل مکان‌یابی تسهیلات هاب و اختصاص گره‌های تقاضا به هاب‌ها برای تعیین مسیر بین هر جفت مبدأ-مقصد است (آلومور و کارا^۳، ۲۰۰۸).

در مورد نحوه اختصاص گره‌های غیر هاب به گره‌های هاب دو نوع اساسی از شبکه‌های هاب موجود است: تخصیص تکی^۴ و تخصیص چندگانه^۵. در تخصیص تکی، همه‌ی ترافیک ورودی و خروجی هر مرکز تقاضا توسط یک هاب مسیریابی می‌شود. در تخصیص چندگانه، هر مرکز تقاضا می‌تواند جریان را از طریق بیش از یک هاب دریافت و ارسال نماید. شکل (۱) نمونه‌ای از شبکه تخصیص تکی متشکل از ۱۴ گره (۴ گره هاب و ۱۰ گره غیر هاب) را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۱: نمونه گرافیکی شبکه تخصیص تکی

از دیدگاه کاربردی، از هر دو شبکه تخصیص تکی و چندگانه استفاده‌های گوناگونی در دنیای واقعی به عمل می‌آید. به‌طوری که شبکه تخصیص تکی در شبکه‌های حمل‌ونقل کالا و همچنین

-
1. Hubs
 2. Origin-Destination (O/D)
 3. Alumur and Kara
 4. Single Allocation
 5. Multiple Allocation

سیستم‌های پستی و یا در شبکه‌های مخابراتی برای کاهش هزینه‌های ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در اکثر مطالعات انجام شده در ادبیات مسائل مکان‌یابی هاب، بازار به صورت انحصاری^۱ در نظر گرفته شده که در آن فقط یک شرکت بر پیکره‌بندی شبکه هاب به منظور بهینه کردن تابع هدف خود تصمیم می‌گیرد. با این وجود، در دنیای واقعی رقبای بسیاری وجود دارند که قطعاً تصمیمات هر یک از آن‌ها بر فرایند دستیابی به اهداف سایرین تأثیر بسیاری دارد. در این مقاله، ما یک بازار دوقطبی^۲ متشکل از دو شرکت حمل‌ونقل را در نظر گرفته‌ایم. شرکتی که ابتدا تصمیم می‌گیرد رهبر و شرکت دیگر پیرو نام‌گذاری شده است. ابتدا یک مورد ساده را در نظر گرفته شده است که در آن رهبر تصمیمات خود را بدون آگاهی از ورود پیرو به بازار می‌گیرد. در این مورد از دید پیرو، مسئله به صورت تک سطحی برنامه‌ریزی اعداد صحیح مختلط مدل‌سازی شده است. سپس ما بازی استکلبرگ را در نظر می‌گیریم که در آن رقبا از تصمیمات یکدیگر آگاه هستند؛ به عبارت دیگر با اتخاذ تصمیمات پی‌درپی توسط رهبر و پیرو، رهبر در صدد افزایش سهم بازار خود پس از مکان‌یابی تسهیلات توسط پیرو است. مسئله رهبر در شبکه تخصیص تکی به صورت مدل برنامه‌ریزی دوسطحی^۳ که تصمیمات در سطح بالا توسط رهبر و در سطح پایین توسط پیرو اتخاذ می‌گردد، مدل‌سازی شده است. نکته قابل توجه در این مقاله در نظر گرفتن فرض کامل بودن شبکه بین هاب‌ها و اعمال ضریب تخفیف بین حمل‌ونقل‌های بین‌هابی می‌شود. همچنین هیچ حمل‌ونقل مستقیمی از گره‌های غیر هاب میسر نیست و ظرفیتی برای گره‌ها و اتصالات آن‌ها در نظر گرفته نشده است. مسئله مکان‌یابی هاب یک طبقه سخت از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی را تشکیل می‌دهند (کنترراس و همکاران^۴، ۲۰۱۱). همچنین در مورد شبکه تخصیص تکی، قسمت نحوه تخصیصات گره‌های غیر هاب به هاب جز مسائل سخت محسوب می‌شوند (کارا، ۱۹۹۹)، به همین دلیل توسعه الگوریتم‌های مؤثر برای حل مسائل سخت در مجموعه داده‌های بزرگ ضروری است.

انگیزه مطالعه و نوآوری اصلی این مقاله در نظر گرفتن مسئله مکان‌یابی رقابتی هاب در شبکه تخصیص تکی است که در مرور ادبیات این حوزه مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین مدل‌های تک سطحی و دوسطحی برنامه‌ریزی اعداد صحیح مختلط به ترتیب از دید پیرو و رهبر ارائه می‌شوند. محاسبات عددی وسیعی برای نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی و همچنین تأثیر پارامترهای ورودی بر تعداد هاب‌های انتخاب شده و مقدار ضریب تخفیف انجام گرفته است. درنهایت، برخی توصیه‌های مدیریتی بر اساس نتایج محاسبات عددی و تحلیل‌های گرافیکی بیان شده است.

-
1. Monopoly
 2. Duopoly
 3. Bileve
 4. Contreras et al.

ساختار این مقاله به این صورت است که در بخش بعدی ادبیات موضوع مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم، مدل‌های ریاضی مسائل پیرو و رهبر ارائه شده‌اند. الگوریتم جستجوی ممنوعه برای حل مدل‌های ریاضی در بخش چهارم معرفی شده و در بخش پنجم پس از بررسی محاسبات عددی، تحلیل‌های گرافیکی صورت گرفته است. در نهایت در بخش ششم از مطالب ذکر شده در این مقاله نتیجه‌گیری شده و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی مطرح می‌گردد.

مرور ادبیات

مکان‌یابی رقابتی تسهیلات

مسئله مکان‌یابی تسهیلات^۱ به انتخاب بهترین مکان‌ها برای یک یا چند تسهیل در یک فضای مشخص به منظور ارائه خدمت به مجموعه‌ای از نقاط تقاضا می‌پردازد. اولین مطالعه رقابت در اقتصاد توسط کورنات^۲ (۱۸۳۸) به انجام رسیده است. در این تحقیق به مطالعه یک بازار متشکل از دو شرکت رقابتی پرداخته شده است که در آن که هر کدام از شرکت‌ها حجم تولید یک محصول را مشخص می‌کنند. هتلینگ^۳ (۱۹۲۹) معتقد بود که اولین کسی است که به ترکیب ایده‌ی رقابت در مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات پرداخته است.

مدل‌های رقابتی مکان‌یابی تسهیلات بر اساس نظریه بازی‌ها از دو جنبه ایستایی و پویایی طبقه‌بندی شده‌اند. در مورد اول (ایستا) رقبا به طور هم‌زمان یا پی‌درپی وارد رقابت می‌شوند، در حالی که در مورد دوم (پویا) رقبا به طور مکرر مکان‌های تسهیلات خود را بهینه‌سازی می‌کنند. ون استکلبرگ^۴ (۱۹۵۱) مقدماتی‌ترین تحقیق در زمینه تصمیم‌گیری‌های پی‌درپی در تئوری مکان‌یابی را پیشنهاد نموده است. ایشان یک بازار دوقطبی متشکل از دو بازیگر را در نظر گرفته‌اند که دومین بازیگر (پیرو) تصمیمات مکان‌یابی خود را بر اساس تصمیمات اولین بازیگر (رهبر) اتخاذ می‌کند. برای اطلاعات بیشتر و آگاهی از تحولات اخیر مکان‌یابی رقابتی تسهیلات می‌توان از تحقیقات (کرس و پسچ^۵، ایسلت و همکاران^۶، ۲۰۱۵؛ لاپورته و همکاران^۷، ۲۰۱۵) بهره جست.

-
1. Facility location problem (FLP)
 2. Cournot
 3. Hotelling
 4. Von Stackelberg
 5. Kress and Pesch
 6. Eiselt et al.
 7. Laporte et al.

مسئله مکان‌یابی هاب

تحقیق در مسئله مکان‌یابی هاب با کار اولیه اوکلی^۱ (۱۹۸۶) آغاز شد که اولین فرموله‌بندی ریاضی و روش حل برای یک مسئله مکان‌یابی هاب را ارائه و بررسی کرده است. اوکلی (۱۹۸۷) اولین فرموله‌بندی ریاضی درجه دو را برای مسئله p -هاب میانه با تخصیص تکی در نظر گرفته و کمپیل^۲ (۱۹۹۴) برای مسائل مختلفی از قبیل مکان‌یابی هاب p -هاب میانه، مکان‌یابی هاب بدون در نظر گرفتن ظرفیت، p -هاب مرکز و مکان‌یابی هاب پوششی فرموله‌بندی برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح را معرفی نموده است. برای مطالعات بیشتر می‌توان به مقالات مروری (کمپیل و اوکلی، ۲۰۱۲؛ فراهانی و همکاران^۳، ۲۰۱۳؛ آومور و کارا، ۲۰۰۸) رجوع کرد.

اگرچه روش‌های بهینه‌سازی برنامه‌ریزی اعداد صحیح برای مسائل کوچک مکان‌یابی هاب بکار گرفته می‌شوند، معمولاً برای حل نمونه‌های بزرگ مسائل مکان‌یابی هاب، روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. اوکلی (۱۹۹۲) مسئله تخصیص تکی p -هاب میانه با ظرفیت نامحدود (USApHMP)^۴ را معرفی و آن را به‌عنوان برنامه‌ریزی عدد صحیح درجه دو فرموله‌بندی نموده است. کمپیل (۱۹۹۴) اولین فرمول‌های برنامه‌ریزی خطی را برای مسئله تخصیص تکی p -هاب میانه با ظرفیت نامحدود را معرفی نموده است. اسکورین کاپو^۵ (۱۹۹۴) یک الگوریتم ابتکاری جست‌وجوی ممنوعه^۶ را برای مسئله USApHMP پیشنهاد نموده است. ارنست و کریشنامورتی^۷ (۱۹۹۶) یک الگوریتم فرا ابتکاری شبیه‌سازی تبرید را برای همین مسئله توسعه دادند و با بررسی نتایج به دست آمده بیان کردند که این الگوریتم هم از نظر کیفیت جواب‌ها و هم از نظر زمان محاسباتی قابل مقایسه با روش ابتکاری اسکورین کاپو (۱۹۹۴) است. توپجو اوغلو و همکاران^۸ (۲۰۰۵) الگوریتم ژنتیک را برای حل مسئله تخصیص تکی مکان‌یابی هاب با ظرفیت نامحدود پیشنهاد نمودند، همچنین یک الگوریتم ابتکاری دیگر نیز توسط چن^۹ (۲۰۰۷) برای این مسئله ارائه شده است که این روش، یک الگوریتم ابتکاری پیوندی متشکل از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و یک لیست ممنوعه است که برخی روش‌های بهبود نیز در آن تعبیه شده است. سیلوا و سونها^{۱۰} (۲۰۰۹) سه مدل مختلف از یک الگوریتم

-
1. O'Kelly
 2. Campbell
 3. Farahani et al.
 4. Uncapacitated single allocation p-hub median problem (USApHMP)
 5. Skorin-Kapov
 6. Tabu search (TS)
 7. Ernst and Krishnamoorthy
 8. Topcuoglu et al.
 9. Chen
 10. Silva and Cunha

ساده و کارآمد جست‌وجوی ممنوعه که به صورت چند مرحله‌ای شروع می‌شود به همراه یک الگوریتم دو مرحله‌ای یکپارچه جست‌وجوی ممنوعه برای حل مدل مسئله تخصیص تکی مکان‌یابی هاب با ظرفیت نامحدود ارائه نموده‌اند.

مکان‌یابی رقابتی هاب

ماریانو و همکاران^۱ (۱۹۹۹) برای اولین بار مسئله مکان‌یابی رقابتی هاب را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها با توجه به مجموعه نقاط موجود برای رهبر، مسئله پیرو را فرموله بندی نموده‌اند که بر این اساس پیرو به دنبال بیشینه (ماکسیمم) کردن سهم بازار خود است. واگنر^۲ (۲۰۰۸) به مطالعه همان مسئله با بهبود مدل ریاضی می‌پردازد. ساساکی و فوکوشیما^۳ (۲۰۰۱) مدل جدیدی از مکان‌یابی رقابتی هاب را پیشنهاد داده‌اند که اولین مطالعه با بهره‌گیری از تعادل استکلبرگ در این زمینه محسوب می‌شود. با استفاده از تعادل استکلبرگ، ساساکی^۴ (۲۰۰۵) مسئله مکان‌یابی رقابتی هاب را در فضای گسسته مورد مطالعه قرار داده است. ایسلت و ماریانو^۵ (۲۰۰۹) به مطالعه دیگری از مکان‌یابی رقابتی هاب پرداخته‌اند که در آن یک شرکت حمل‌ونقل هوایی وارد بازاری می‌شود که در آن شرکت‌های رقیب دیگر حضور دارند و هدف شرکت داوطلب برای ورود به بازار این است که بتواند در حد امکان مشتریان زیادی را جذب کند. لین و لی^۶ (۲۰۱۰) به مطالعه رقابت در طراحی شبکه هاب پرداخته‌اند. این تحقیق برای هر یک از حاملین بار در یک بازار انحصاری بر اساس تعادل نش یک شبکه هاب در حالت پایدار در نظر گرفته شده است. لوئر ویلاگرا و ماریانو^۷ (۲۰۱۳) به مطالعه تصمیمات مکان‌یابی و قیمت‌گذاری توسط شرکتی که با وجود سایر شرکت‌های عملیاتی به تازگی وارد بازار شده، پرداخته‌اند. تحقیق دیگر توسط ساساکی و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی مسئله مکان‌یابی رقابتی کمان‌های هاب با رویکرد استکلبرگ پرداخته است. در این مسئله به جای مکان‌یابی تسهیلات هاب، کمان‌های هاب در شبکه مکان‌یابی می‌شوند.

در تحقیقی که اخیراً انجام گرفته است، ماهموت اوغوللاری و کارا^۸ (۲۰۱۶) به بررسی مسئله مکان‌یابی هاب رقابتی با تخصیص چندگانه با بهره‌گیری از تعادل استکلبرگ در یک بازار دوقطبی پرداخته‌اند. در این تحقیق دو شرکت بر روی مکان‌های خود تصمیم می‌گیرند و سپس مشتری

-
1. Marianov et al.
 2. Wagner
 3. Sasaki and Fukushima
 4. Sasaki
 5. Eiselt and Marianov
 6. Lin and Lee
 7. Villagra and Marianov
 8. Mahmutogullari and Kara

یک شرکت را بر اساس سطوح خدمات ارائه شده انتخاب می‌کند. آن‌ها این مسئله را به صورت مدل برنامه‌ریزی اعداد صحیح مختلط فرموله بندی کرده‌اند.

مدل‌سازی مسئله تحقیق

شبکه هاب $G = (N, E)$ را در نظر بگیرید که در آن N نشان دهنده مجموعه گره‌ها و E نشان دهنده مجموعه کمان‌ها هستند و همواره رابطه $E \subseteq N \times N$ در مجموعه کمان‌ها برقرار است. فرض بگیرید که $H \subseteq N$ مجموعه گره‌هایی است که می‌توانند به عنوان گره هاب انتخاب شوند. برای تمام گره‌های مبدأ - مقصد $W_{ij}, i, j \in N$ و C_{ij} به ترتیب نشان دهنده مقدار جریان آغاز شده از گره مبدأ i به گره مقصد j و هزینه حمل‌ونقل یک واحد جریان از گره i به j هستند. یک ضریب تخفیف α که در بازه $\alpha \in [0, 1]$ قرار دارد، برای حمل‌ونقل بین هاب‌ها (درون‌هابی) در نظر گرفته شده است که منعکس کننده اقتصاد به مقیاس در ارتباطات بین هاب‌ها است. تعداد هاب‌هایی که توسط رهبر و پیرو مکان‌یابی می‌شوند را به ترتیب با p و r نمایش داده می‌شوند. فرض بر این گرفته شده است که رهبر و پیرو اطلاعات کاملی درباره بازی با یکدیگر دارند و هر یک از آن‌ها به صورت منطقی و عقلانی حرکت و بازی خواهند کرد و مشتریان نیز بر اساس سطوح خدمت ارائه شده توسط رهبر یا پیرو جذب شده‌اند. سطح خدمت بیانگر هزینه مسیریابی یک جریان واحد در مسیری که از مبدأ شروع شده و در مقصد به پایان می‌رسد، است. مشتری زمانی سطح خدمت پیرو را ترجیح می‌دهد که سطح خدمت ارائه شده توسط پیرو اکیداً از سطح خدمت رهبر بهتر باشد، در غیر این صورت تقاضا توسط رهبر جذب خواهد شد. در مواقعی که سطح خدمت‌های ارائه شده توسط رهبر و پیرو برابر هستند، این رهبر است که تقاضاهای بیشتری را جذب می‌کند. در بخش‌های پیش رو به ارائه فرمول‌های ریاضی برای مسائل پیرو و رهبر خواهیم پرداخت.

مدل‌سازی مسئله پیرو

برای مدل‌سازی مسئله پیرو، فرض می‌کنیم رهبر قبلاً مکان هاب‌های خود را تعیین نموده و نحوه تخصیص مشتریان به این هاب‌ها را مشخص نموده و مشغول خدمت‌رسانی به مشتریان است. از این‌رو می‌توان سطح خدمت ارائه شده توسط رهبر به هر یک از جریان‌های مبدأ مقصد (i, j) محاسبه نمود که آن را با β_{ij} نشان می‌دهیم. جهت مدل‌سازی مسئله متغیر صفر و یک y_{ik} را در نظر بگیرید که اگر گره i توسط پیرو به هاب k اختصاص یابد مقدار متغیر یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود. همچنین متغیر x_{ijkm} را به صورت کسری از جریانی که از مبدأ گره i به مقصد گره j از طریق هاب‌های k و m منتقل می‌شود، تعریف می‌کنیم. با استفاده از متغیرهایی که اخیراً تعریف شدند و به همراه پارامتر a_{ijkm} که یک پارامتر پوششی صفر و یک است و مقدار این پارامتر زمانی یک می‌شود

که جریان از گره i به گره j که از طریق هاب های k و m منتقل می‌شود، توسط پیرو جذب گردد، در غیر این صورت مقدار پارامتر صفر خواهد شد. به عبارتی دیگر، اگر هزینه ارسال هر واحد جریان از مسیر نامبرده از مقدار β_{ij} کمتر باشد مقدار پارامتر a_{ijkm} یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود. مدل برنامه‌ریزی اعداد صحیح مختلط برای مسئله پیرو در شبکه تخصیص تکی به شکل زیر بیان می‌شود:

$$Z^* = \max \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} a_{ijkm} W_{ij} X_{ijkm} \quad (1)$$

$$\text{s.t.:} \sum_{k \in H} y_{kk} = r \quad (2)$$

$$\sum_{k \in H} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$y_{ik} \leq y_{kk} \quad \forall i \in N, k \in H \quad (4)$$

$$\sum_{m \in H} x_{ijkm} = y_{ik} \quad \forall i, j \in N, k \in H \quad (5)$$

$$\sum_{k \in H} x_{ijkm} = y_{jm} \quad \forall i, j \in N, m \in H \quad (6)$$

$$x_{ijkm} \geq 0 \quad \forall i, j \in N, k, m \in H \quad (7)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, k \in H \quad (8)$$

تابع هدف (۱) مجموع جریان‌های جذب شده توسط پیرو را به حداکثر می‌رساند. محدودیت (۲) تعداد هاب‌هایی که باید توسط پیرو مکان‌یابی شوند را تعیین می‌نماید و محدودیت (۳) محدود بودن تخصیص گره i فقط به یک هاب را مشخص می‌کند. محدودیت (۴) بیان می‌دارد که گره‌های غیر هاب فقط می‌توانند به گره‌هایی اختصاص یابند که به‌عنوان هاب انتخاب شده‌اند. محدودیت‌های (۵) و (۶) ارتباط بین متغیرهای تخصیص و جریان را نشان می‌دهند. نهایتاً، محدودیت‌های (۷) و (۸) نوع متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

مدل‌سازی مسئله رهبر

حال با در نظر گرفتن مسئله رهبر هدف آن کمینه کردن (به حداقل رساندن) تقاضای جذب شده توسط پیرو با تصمیم‌گیری بر روی مجموعه هاب‌های خود به همراه مجموعه تخصیصات غیر هاب‌ها به هاب‌ها است. برای فرموله بندی مدل دوسطحی مسئله رهبر با تخصیص تکی، متغیر Y_{ik} را به‌عنوان تصمیمات تخصیصات رهبر (مشابه متغیر y_{ik} برای پیرو) در نظر می‌گیریم و از متغیر X_{ijkm} نیز طبق

تعریفی که قبلاً ارائه شده، استفاده می‌کنیم. مسئله رهبر با تخصیص تکی را می‌توان به صورت مدل برنامه‌ریزی دوسطحی زیر فرموله بندی نمود:

$$\min Z^* \quad (9)$$

$$\text{s.t.: } \sum_{k \in H} Y_{kk} = p \quad (10)$$

$$\sum_{k \in H} Y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (11)$$

$$Y_{ik} \leq Y_{kk} \quad \forall i \in N, k \in H \quad (12)$$

$$\sum_{m \in H} X_{ijkm} = Y_{ik} \quad \forall i, j \in N, k \in H \quad (13)$$

$$\sum_{k \in H} X_{ijkm} = Y_{jm} \quad \forall i, j \in N, m \in H \quad (14)$$

$$X_{ijkm} \geq 0 \quad \forall i, j \in N, k, m \in H \quad (15)$$

$$Y_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, k \in H \quad (16)$$

تابع هدف (۹) مقدار کل جریان جذب شده توسط پیرو را که توسط تابع هدف مسئله پیرو محاسبه گردید (تابع هدف (۱)) به حداقل می‌رساند (کمینه می‌کند). با توجه به دوقطبی بودن بازار کل تقاضای بازار توسط یکی از شرکت‌های رهبر و یا پیرو جذب می‌شود؛ بنابراین حداقل شدن مقدار جریان (تقاضا) جذب شده توسط پیرو به معنی حداکثر شدن جریان جذب شده توسط رهبر است. محدودیت‌های (۱۰) الی (۱۶) به ترتیب معانی مشابهی با محدودیت‌های (۲) الی (۸) برای مسئله پیرو دارند.

الگوریتم جستجوی ممنوعه

الگوریتم جستجوی ممنوعه یک الگوریتم فرا ابتکاری با کارایی در حل مسائل سخت بهینه‌سازی در دنیای واقعی است که در سال ۱۹۸۶ توسط گلوور^۱ معرفی شده است. این الگوریتم با تولید جواب‌های اولیه شروع شده و با بهره‌گیری از لیست ممنوعه ساختارهای همسایگی را مدیریت می‌کند، به طوری که از افتادن الگوریتم در دام‌های محلی و رسیدن به جواب‌های مشابه جلوگیری می‌کند. از جواب فعلی تمام حرکات غیر ممنوعه مورد بررسی قرار می‌گیرد تا بهترین جواب انتخاب شود. تمام حرکاتی که ممکن است به جواب بهتر یا بدتر منجر شوند، در لیست ممنوعه ثبت می‌شوند و حرکت بعدی اگر در لیست ممنوعه وجود نداشته باشد، امکان‌پذیر خواهد بود. الگوریتم برحسب شرایطی که برای اتمام آن

1. Glover

نظیر رسیدن به کمترین دمای تعیین شده، تعداد ثابت تکرار بدون تغییر در بهترین جواب و غیره در نظر گرفته شده، به اتمام می‌رسد.

نحوه نمایش جواب‌ها

برای نمایش جواب‌ها در مسائل تخصیص تکی، از دو آرایه تک‌بعدی با اندازه n مشابه تحقیق جبل عاملی و همکاران^۱ (۲۰۱۲) استفاده شده است. آرایه اول که شامل عناصر صفر و یک (دودویی) است، آرایه مکان هاب^۲ نام‌گذاری شده است. در آرایه مکان هاب، عناصر متناظر با "یک" گره‌های هاب و عناصر متناظر با "صفر" گره‌های غیر هاب را نمایش می‌دهند. همچنین آرایه دوم که نشان دهنده نحوه تخصیص هر گره غیر هاب به یک هاب است، آرایه تخصیصات^۳ نام‌گذاری شده است. در واقع این آرایه با طول n شماره هاب‌هایی که هر گره به آن تخصیص داده شده را نمایش می‌دهد.

تولید جواب‌های اولیه

جواب اولیه در عملکرد همه الگوریتم‌های فرا ابتکاری بسیار مهم است، همچنین کارایی جواب اولیه در رسیدن نهایی الگوریتم به بهترین جواب ممکن به چشم می‌خورد. در واقع، کیفیت جواب نهایی به دست آمده توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری تا حدی متکی به جواب اولیه است. بدین منظور، در این تحقیق برای تولید جواب اولیه، P گره از n گره موجود به صورت تصادفی به عنوان گره‌های هاب انتخاب شده‌اند. همچنین، در مورد شبکه تخصیص تکی، گره‌های غیر هاب باقیمانده $(n - p)$ به طور تصادفی به گره‌های هاب مشخص شده، تخصیص یافته‌اند. این روشی که برای تولید جواب اولیه بکار گرفته شده، علاوه بر یافتن سریع یک جواب اولیه، در تولید نقاط شروع متنوع نیز کارایی دارد که این نقاط شروع متنوع الگوریتم را در تولید جواب‌های باکیفیت در اجراهای متفاوت با قرار نگرفتن الگوریتم در نقاط بهینه محلی یاری می‌کنند.

ساختارهای همسایگی

برای تولید جواب‌های همسایگی دو اپراتور معرفی و استفاده شده‌اند. اپراتور اول که "مبادله"^۴ نام‌گذاری شده است برای تغییر یکی از هاب‌ها در جواب‌ها بکار گرفته می‌شود. برای این منظور، یک گره غیر هاب و یک گره هاب به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و اگر گره غیر هاب انتخاب شده در لیست

1. Jabalameli et al.
2. Hub location array
3. Allocation array
4. Swap

ممنوعه وجود نداشته باشد، گره هاب انتخاب شده تبدیل به گره غیر هاب و گره غیر هاب تبدیل به گره هاب می‌شوند. اپراتور دوم با عنوان "بروز رسانی ممنوعه"^۱ به منظور بروز رسانی لیست ممنوعه معرفی شده است. این اپراتور گره غیر هاب را با استفاده از روش اولین صادره از اولین وارده^۲ در صورتی که گره انتخاب شده در لیست ممنوعه نباشد به آن لیست اضافه می‌کند. با این حال، اگر گره غیر هاب تصادفی انتخاب شده در لیست ممنوعه وجود داشته باشد این اپراتور آن را از لیست ممنوعه حذف می‌کند و بقیه گره‌های موجود در لیست را به سمت راست حرکت می‌دهد.

پارامترهای بکار گرفته شده در الگوریتم

الگوریتم جستجوی ممنوعه معرفی شده از دو پارامتر ورودی N و T_{max} استفاده می‌کند. پارامتر N بیانگر طول لیست ممنوعه است که مقادیر مختلفی را نسبت به نمونه‌های محاسبات عددی می‌گیرد. پارامتر T_{max} بیانگر تعداد تکرارهای الگوریتم است که تغییری در بهترین جواب مسئله دیده نشود؛ به عبارت دیگر الگوریتم پیشنهادی جستجوی ممنوعه زمانی که به مقدار ورودی پارامتر T_{max} برسد، به اتمام می‌رسد.

محاسبات عددی

به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی جستجوی ممنوعه و همچنین جهت اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده، از دو مجموعه داده استاندارد و شناخته شده ادبیات مکان‌یابی هاب: حمل‌ونقل مسافران خطوط هوایی ایالات متحده آمریکا و بزرگراه‌های ترکیه استفاده شده است. مجموعه داده‌های نقل‌وانتقال مسافران خطوط هوایی ایالات متحده آمریکا توسط اوکلی (۱۹۸۶) بر اساس نقل‌وانتقال مسافران خطوط هوایی بین ۲۵ شهر ایالات متحده آمریکا که در سال ۱۹۷۰ توسط سازمان مطالعات هوایی کشوری (CAB) محاسبه شده، معرفی شده است. این مجموعه داده توسط اکثر محققین حوزه مکان‌یابی هاب به عنوان مجموعه داده کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد. مجموعه داده‌های دوم که در ارزیابی محاسبات به کار گرفته شده، مجموعه داده‌های جریان کالا از طریق بزرگراه‌های کشور ترکیه (TR) در ۸۱ شهر این کشور است که توسط تان و کارا^۳ (۲۰۰۷) معرفی شده است. باید توجه داشت که در این تحقیق فقط ۲۲ شهر ($|H| = 22$) این مجموعه داده به عنوان گره‌های نامزد برای انتخاب مکان‌های هاب‌ها مورد استفاده قرار گرفته شده و در این مقاله به عنوان مجموعه داده‌های بزرگ برای سنجش روش حل و مدل‌های ارائه شده، بکار گرفته می‌شود. پارامتر α مشابه تحقیق

1. Update Tabu
2. First In First Out (FIFO)
3. Tan and Kara

ماهوت اوغولاری و کارا (۲۰۱۶) برای مجموعه داده CAB در دو سطح: ۰٫۶ و ۰٫۸ و برای مجموعه داده TR در سه سطح: ۰٫۶، ۰٫۸ و ۰٫۹ در نظر گرفته شده است. همچنین تعداد هاب‌های انتخاب شده توسط رهبر (p) و پیرو (r) در هر دو مجموعه داده در چهار سطح: ۲، ۳، ۴ و ۵ در نظر گرفته شده‌اند. الگوریتم پیشنهاد داده شده در نرم‌افزار سی‌شارپ^۱ ۲۰۱۳ (ورژن ۵) اجرا شده و همچنین مدل ریاضی مسئله پیرو نیز به‌طور مستقل با استفاده از نرم‌افزار سیپلکس^۲ (ورژن ۱۲٫۶) محاسبه شده‌اند. همه محاسبات عددی این تحقیق حاضر در یک رایانه شخصی به مشخصات پردازشگر سه هسته‌ای با ظرفیت ۳٫۳ گیگاهرتز، حافظه جانبی ۸ گیگابایت و سیستم عامل ویندوز ۸^۳ اجرا و محاسبه شده‌اند.

نتایج مسئله پیرو

جدول (۱) نتایج به دست آمده از حل مسئله پیرو در شبکه تخصیص تکی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی جستجوی ممنوعه و همچنین حل مدل‌های ریاضی ارائه شده برای این مسئله توسط سیپلکس بر روی مجموعه داده CAB ارائه شده است. فرض بر این گرفته شده است که رهبر پیش از این هاب‌های خود را بر اساس مسئله تخصیص تکی P -هاب میانه با ظرفیت نامحدود (USApHMP) مکان‌یابی کرده است. برای کاهش اندازه مدل، محدودیت‌های (۸) - (۹) فقط برای $i < j$ اعمال شده‌اند و تابع هدف (۴) نیز در مطالعه محاسبات عددی به صورت
$$\sum_i \sum_{j|i < i} (w_{ij} + w_{ji}) z_{ij}$$
 تغییر یافته است. مقادیر مختلفی از ضرایب تخفیف (α) در ردیف اول همه‌ی جداول نشان داده شده است. ستون‌هایی که با P و r علامت‌گذاری شده‌اند به ترتیب نمایانگر تعداد هاب‌های انتخاب شده توسط رهبر و پیرو هستند. دو ستون بعدی مقدار بهینه تابع هدف (به درصد) به دست آمده از طریق سیپلکس و زمان پردازش (اجرا)، به‌تایید، مورد نیاز برای رسیدن به بهترین جواب را نشان می‌دهند. در نهایت، ستون‌هایی که زیر مجموعه الگوریتم TS علامت‌گذاری شده‌اند، بهترین مقدار تابع هدف (به درصد) به دست آمده توسط حل نمونه‌های مرتبط به‌وسیله الگوریتم جستجوی ممنوعه و متوسط زمان پردازش برای پنج بار اجرای الگوریتم جستجوی ممنوعه را نمایش می‌دهند.

1. Microsoft Visual C# 2013 (version 5.0)

2. CPLEX (version 12.6)

3. Intel(R) Core™ i3-3220 CPU of 3.30 GHz and 8 GB of RAM, using Microsoft Windows 8 operation system

جدول ۱: نتایج مسئله پیرو در مجموعه داده CAB

p	r	$\alpha = 0.6$				$\alpha = 0.8$			
		سیپلکس		الگوریتم TS		سیپلکس		الگوریتم TS	
		جذب پیرو درصد	زمان (ثانیه)	جذب پیرو درصد	زمان (ثانیه)	جذب پیرو درصد	زمان (ثانیه)	جذب پیرو درصد	زمان (ثانیه)
۲	۲		۱۱۳,۸۴	۶۲,۱۱	۰,۲۲		۱۰۱,۱۸	۶۱,۲۵	۰,۲۱
	۳	۶۲,۱۱	۱۴۱,۹۴	۷۸,۴۶	۰,۲۸	۶۱,۲۵	۲۶۳,۱۹	۶۱,۲۵	۰,۲۹
	۴	۷۸,۴۶	۴۵,۶۹	۸۸,۹۰	۰,۳۵	۷۰,۴۱	۱۷۵,۲۱	۷۰,۴۱	۰,۳۷
	۵	۸۸,۹۰	۴۵,۰۲	۹۳,۴۹	۰,۴۱	۸۰,۸۵۸۹,۳۴	۴۳,۴۰	۸۰,۸۵۸۹,۳۴	۰,۳۳
	میانگین								
۳	۲		۳۲۶,۵۷	۴۲,۵۶	۰,۲۹		۳۰۰,۹۱	۴۶,۲۷	۰,۳۲
	۳	۴۲,۵۶	۸۱,۷۸	۵۹,۰۰	۰,۳۵	۴۶,۲۷	۹۷,۰۸	۴۶,۲۷	۰,۳۷
	۴	۵۹,۰۰	۴۶,۶۵	۷۱,۳۲۸۳,۴۱	۰,۴۴	۶۰,۸۶	۴۷,۴۷	۶۰,۸۶	۰,۴۱
	۵	۷۱,۳۲۸۳,۴۱	۲۱,۸۴	۷۱,۳۲۸۳,۴۱	۰,۴۷	۷۳,۰۴۸۲,۹۹	۲۴,۴۸	۷۳,۰۴۸۲,۹۹	۰,۴۹
	میانگین								
۴	۲		۴۸۲,۶۸	۲۸,۵۳	۰,۳۷		۵۰,۵۳	۴۱,۴۲	۰,۳۵
	۳	۲۸,۵۳	۳۶۳,۲۸	۳۶,۹۸	۰,۴۲	۴۱,۴۲	۱۶۵,۴۰	۴۱,۴۲	۰,۳۹
	۴	۳۶,۹۸	۴۲۳,۹۹	۴۴,۳۹۵۱,۷۳	۰,۵۰	۴۹,۰۴	۸۹,۱۶	۴۹,۰۴	۰,۴۸
	۵	۴۴,۳۹۵۱,۷۳	۲۹۶,۵۱	۴۴,۳۹۵۱,۷۳	۰,۵۳	۵۷,۲۳۶۴,۷۰	۴۷,۰۸	۵۷,۲۳۶۴,۷۰	۰,۵۲
	میانگین								
۵	۲		۴۵۲,۳۳	۲۶,۱۶	۰,۳۹		۴۷,۴۵	۳۹,۱۲	۰,۴۰
	۳	۲۶,۱۶	۴۴۶,۹۴	۳۳,۶۲	۰,۴۲	۳۹,۱۲	۱۰۲,۵۳	۳۹,۱۲	۰,۴۳
	۴	۳۳,۶۲	۲۹۸,۵۸	۳۹,۴۳۴۵,۰۱	۰,۴۹	۴۶,۹۲	۹۱,۶۱	۴۶,۹۲	۰,۵۰
	۵	۳۹,۴۳۴۵,۰۱	۳۶۷,۰۱	۳۹,۴۳۴۵,۰۱	۰,۵۵	۵۳,۳۵۵۹,۵۲	۷۹,۵۵	۵۳,۳۵۵۹,۵۲	۰,۵۶
	میانگین								

مطابق نتایج به دست آمده از جدول (۱)، الگوریتم جستجوی ممنوعه همه نمونه‌های مشخص شده را به‌صورت بهینه در کسری از ثانیه محاسبه کرده است. این در حالی است که زمان حل مدل توسط نرم‌افزار سیپلکس به‌مراتب بیشتر از زمان الگوریتم ارائه شده است. با توجه به سختی ذاتی مسئله مکان‌یابی هاب، با افزایش اندازه مسئله قطعاً زمان حل توسط روش‌های حل دقیق بیشتر خواهد شد و بنابراین می‌توان به اهمیت استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری کارا برای حل مسئله پی برد. نتیجه دیگری که می‌توان از یافته‌های این مسئله از جدول فوق به دست آورد این است که زمانی که رهبر هاب‌های خود را بر اساس مسئله تخصیص تک‌P-هاب میانه مکان‌یابی می‌کند جریان جذب شده توسط پیرو در شبکه تخصیص تک‌به‌مراتب بیشتر از موردی است که همین مسئله بر روی شبکه تخصیص چندگانه که توسط تحقیق ماهموت اوغوللاری و کارا (۲۰۱۶) مطالعه شده است، طراحی شده است. باید توجه داشت که به علت اینکه رهبر تصمیمات مکان‌یابی هاب‌های خود را بر اساس معیار کمینه‌سازی هزینه (USApHMP) و عدم ورود به رقابت انجام داده است، به همین خاطر پیرو

توانسته است با ورود خود به بازار سهم بازار قابل توجهی را جذب کند. در صورتی که اگر رهبر نیز وارد رقابت با پیرو می‌شد قطعاً سهم بازار پیرو تحت تأثیر این بازی قرار می‌گرفت و چه بسا رهبر می‌توانست سهم بازار بیشتری را به دست آورد. برای نمونه، هنگامی که تعداد هاب‌های انتخابی پیرو و رهبر برابر هستند، $p = r$ ، پیرو می‌تواند سهم بازار بیشتری نسبت به رهبر را جذب کند، در واقع زمانی که $p = r = 2$ است، پیرو می‌تواند ۶۲،۱۱ درصد مشتریان را جذب کند. در مواردی که $p \leq r$ می‌شود، سهم بازار از دست رفته رهبر به مراتب افزایش می‌یابد، اگرچه با افزایش p (۴ یا ۵)، دیگر سهم بازار جذب شده توسط پیرو به اندازه رهبر ناست. نتایج حل مسئله مذکور بر روی مجموعه داده بزرگ TR در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به اندازه بزرگ داده‌های TR، زمان حل مسائل نمونه مربوط به این مجموعه داده با استفاده از نرم‌افزار سیپلکس بسیار طولانی بوده و گاهی حافظه کامپیوتر نیز کفاف حل آن را نمی‌دهد. لذا برای داده‌های TR مسئله را تنها با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوعه پیشنهادی حل کرده‌ایم.

جدول ۲: نتایج مسئله پیرو در مجموعه داده TR

p	r	$\alpha = 0.6$		$\alpha = 0.8$		$\alpha = 0.9$	
		الگوریتم TS		الگوریتم TS		الگوریتم TS	
		جذب پیرو درصد	زمان (ثانیه)	جذب پیرو درصد	زمان (ثانیه)	جذب پیرو درصد	زمان (ثانیه)
۲	۲	۵۱،۰۷	۴،۰۶	۵۰،۵۲	۴،۳۷	۴۹،۲۷	۴،۹۵
	۳	۶۳،۵۶	۷،۲۲	۶۲،۶۷	۷،۱۱	۶۳،۱۴	۷،۷۱
	۴	۷۳،۸۹	۱۰،۶۱	۷۵،۷۴	۱۰،۰۳	۷۳،۴۱۷۹،۹۱	۱۰،۵۲
	۵	۸۱،۲۳	۱۲،۰۰	۸۳،۴۲	۱۳،۹۵		۱۲،۶۹
	میانگین						
۳	۲	۳۹،۲۷	۵،۰۴	۵۴،۳۸	۵،۹۰	۵۹،۰۹	۵،۳۰
	۳	۴۸،۸۱	۸،۲۹	۶۲،۴۱	۸،۷۲	۶۳،۴۸	۸،۰۳
	۴	۵۸،۶۳	۱۰،۹۷	۶۸،۴۳	۱۰،۵۰	۶۸،۸۱۷۴،۰۱	۱۱،۴۹
	۵	۶۷،۵۵	۱۳،۱۱	۷۴،۷۳	۱۴،۱۹		۱۲،۰۵
	میانگین						
۴	۲	۳۱،۵۷	۵،۷۳	۳۴،۲۰	۵،۸۲	۳۵،۳۳	۶،۰۰
	۳	۳۹،۸۱	۹،۰۳	۳۸،۶۳	۸،۹۱	۴۲،۵۹	۸،۹۵
	۴	۴۶،۷۸	۱۲،۱۵	۴۶،۶۱	۱۲،۰۵	۴۹،۲۱۵۵،۱۸	۱۲،۴۸
	۵	۵۵،۷۳	۱۴،۶۹	۵۳،۸۳	۱۳،۱۲		۱۳،۷۴
	میانگین						
۵	۲	۲۵،۰۳	۶،۸۰	۲۹،۹۰	۷،۰۸	۳۲،۱۵	۶،۸۵
	۳	۳۰،۶۳	۱۰،۹۴	۳۴،۴۶	۱۰،۴۸	۳۷،۵۱	۱۰،۸۳
	۴	۳۷،۹۱	۱۳،۵۴	۳۸،۸۷	۱۳،۰۳	۴۱،۹۵۴۵،۹۹	۱۲،۷۶
	۵	۴۵،۰۴	۱۵،۳۰	۴۵،۱۴	۱۴،۸۷		۱۴،۱۰
	میانگین						
میانگین		۴۹،۷۸	۹،۹۶	۵۳،۳۷	۱۰،۰۰	۵۴،۴۴	۹،۹۰

نتایج به دست آمده از جدول (۲) کارایی الگوریتم پیشنهادی جستجوی ممنوعه را در حل نمونه‌های موجود در مجموعه داده بزرگ TR را نشان می‌دهند. از نظر زمان حل، الگوریتم جستجوی ممنوعه تمامی نمونه‌های مسئله را روی مجموعه داده TR در زمان پردازش کوتاه حل کرده است. یک نتیجه مهم دیگری که از این جدول می‌توان گرفت این است که هنگامی که تعداد هاب‌های انتخابی رهبر (p) افزایش می‌یابد، پیرو در جذب بخش بیشتری از بازار ناتوان می‌ماند حتی زمانی که $r > p$ است. دلیل این امر را می‌توان به این شکل بیان کرد که زمانی که p افزایش می‌یابد، رهبر اکثر مکان‌های بحرانی را برای هاب‌ها انتخاب می‌کند که این امر منجر به بهبود سطح خدمت رهبر می‌شود. همچنین چون مشتریان سطح خدمت رهبر را زمانی که سطوح خدمت رهبر و پیرو برابر است، انتخاب می‌کنند، سهم بازار رهبر بیشتر از سطح بازار پیرو است.

نتایج مسئله رهبر

نتایج به دست آمده از حل مسئله تخصیص تکی پیرو بر روی مجموعه داده‌های CAB و TR به ترتیب در جداول (۳) و (۴) ارائه شده‌اند. به این دلیل که سیپلکس قادر به حل مدل‌های دو سطحی ناست و همچنین به دلیل عدم مطالعه تخصیص تکی این مسئله در ادبیات مکان‌یابی هاب، نتایج به دست آمده از حل این مسئله توسط الگوریتم پیشنهادی جستجوی ممنوعه با نتایج دیگری مورد مقایسه قرار نگرفته‌اند.

جدول ۳: نتایج مسئله رهبر در مجموعه داده CAB

p	r	$\alpha = 0.6$		$\alpha = 0.8$	
		الگوریتم TS		الگوریتم TS	
		جذب پیرو درصد	زمان (ثانیه)	جذب پیرو درصد	زمان (ثانیه)
۲	۲	۵۲,۵۲	۱۲۰,۳۹	۵۰,۳۱	۱۱۸,۲۵
	۳	۶۵,۷۷	۱۷۹,۰۷	۶۳,۵۵	۱۸۰,۴۷
	۴	۷۴,۲۹	۲۱۵,۸۱	۶۹,۳۸	۲۱۱,۷۰
	۵	۸۱,۸۲	۲۸۹,۴۵	۷۶,۱۳	۲۸۵,۶۳
۳	۲	۳۸,۵۷	۱۲۵,۸۹	۴۲,۲۴	۱۲۰,۸۹
	۳	۵۰,۰۳	۱۶۵,۱۱	۵۰,۸۶	۱۶۱,۲۲
	۴	۵۷,۸۸	۲۲۳,۵۶	۵۸,۳۲	۲۱۹,۴۱
	۵	۶۴,۱۷	۲۹۱,۳۲	۶۳,۸۴	۳۰۵,۵۰
۴	۲	۲۸,۳۱	۱۳۱,۳۹	۳۶,۴۰	۱۳۴,۹۶
	۳	۳۶,۹۸	۱۸۰,۰۷	۴۳,۵۳	۱۸۲,۴۴
	۴	۴۴,۳۹	۲۰۹,۲۱	۴۹,۴۸	۲۱۰,۳۱
	۵	۵۱,۲۰	۳۰۳,۵۵	۵۴,۸۸	۳۲۱,۷۸
۵	۲	۲۰,۷۴	۱۲۵,۱۰	۳۰,۵۳	۱۳۰,۱۸
	۳	۲۹,۷۳	۱۹۴,۷۳	۳۷,۸۲	۱۹۵,۰۲
	۴	۳۷,۳۲	۲۱۳,۸۴	۴۳,۴۲	۲۱۳,۴۴
	۵	۴۴,۱۸	۳۱۵,۲۷	۴۸,۳۰	۳۲۵,۸۱
میانگین		۴۸,۶۲	۲۰۶,۰۴	۵۱,۱۹	۲۰۷,۳۰

باید توجه داشت که در مورد مجموعه داده CAB سهم بازار رهبر به شکل قابل توجهی افزایش یافته است، زیرا رهبر تصمیمات مکان‌یابی خود را به جای مسئله (USApHMP) بر اساس مسئله رهبر گرفته است. همچنین در مورد نتایجی که از روی مجموعه داده TR به دست آمده، وقتی که رهبر تصمیم به رقابت می‌گیرد درصد بیشتری از سهم بازار را از موردی که به رقابت نمی‌پردازد، جذب می‌کند.

جدول ۴: نتایج مسئله رهبر در مجموعه داده TR

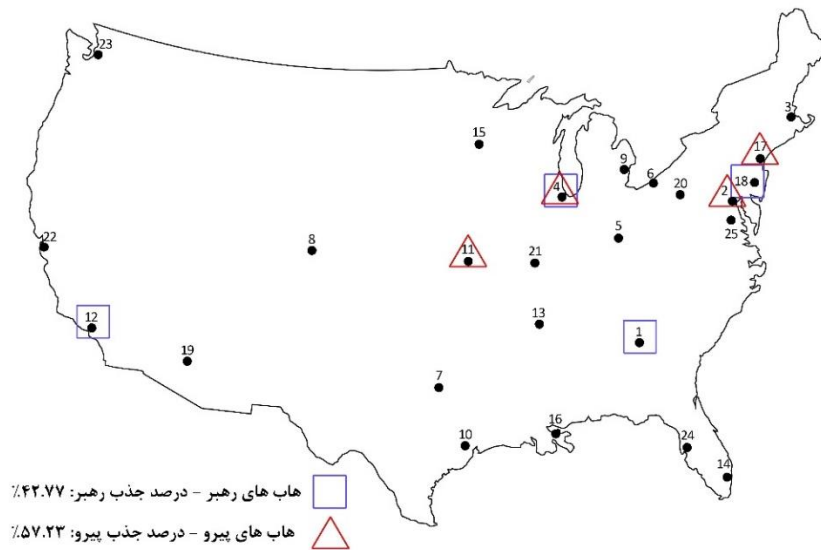
p	r	$\alpha = 0.6$		$\alpha = 0.8$		$\alpha = 0.9$	
		الگوریتم TS		الگوریتم TS		الگوریتم TS	
		جذب پیرو درصد	زمان (ثانیه)	جذب پیرو درصد	زمان (ثانیه)	جذب پیرو درصد	زمان (ثانیه)
۲	۲	۵۰,۴۴	۱۱۹۷,۰۲	۴۹,۹۵	۱۱۵۱,۰۲	۴۹,۱۴	۱۱۵۵,۷۷
	۳	۶۳,۵۶	۱۴۵۵,۶۸	۶۰,۱۲	۱۳۹۹,۶۸	۵۵,۲۰	۱۱۳۸,۰۹
	۴	۷۲,۸۰	۱۸۳۴,۰۱۱۹	۷۲,۳۷	۱۷۵۸,۷۹	۶۷,۴۰	۱۸۲۶,۱۱
	۵	۸۰,۲۶	۵۸,۶۹	۷۴,۰۹	۲۰۰۹,۵۵	۷۲,۹۲	۱۹۷۰,۸۵
۳	۲	۳۹,۳۷	۱۱۹۵,۸۳	۴۴,۵۱	۱۲۳۰,۵۷	۴۵,۲۶	۱۲۳۰,۱۰
	۳	۴۸,۸۱	۱۳۳۲,۹۰	۵۳,۳۱	۱۴۶۰,۲۱	۵۳,۲۴	۱۴۶۰,۹۸
	۴	۵۸,۶۳	۱۸۵۱,۲۲۱۹	۵۸,۱۴	۱۸۲۳,۰۵	۵۷,۰۵	۱۸۲۳,۵۲
	۵	۶۷,۵۵	۵۹,۸۰	۶۹,۵۷	۱۹۹۳,۷۱	۶۳,۸۷	۲۰۰۸,۴۰
۴	۲	۳۱,۵۷	۱۲۰۱,۰۲	۳۴,۲۰	۱۲۸۸,۱۴	۳۵,۰۵	۱۲۹۱,۶۱
	۳	۳۹,۸۱	۱۵۱۲,۶۸	۳۸,۶۳	۱۶۱۰,۳۲	۴۲,۵۹	۱۵۹۷,۲۸
	۴	۴۶,۷۸	۱۹۸۷,۳۳۲۰	۴۶,۶۱	۱۹۰۱,۷۵	۴۹,۲۱	۱۸۳۱,۹۴
	۵	۵۵,۷۳	۰۹,۷۴	۵۳,۸۳	۱۹۸۵,۰۱	۵۳,۸۸	۲۰۰۷,۸۱
۵	۲	۲۵,۰۲	۱۲۶۵,۱۷	۲۹,۹۰	۱۲۰۵,۱۱	۳۲,۱۵	۱۳۴۹,۳۱
	۳	۳۰,۶۳	۱۵۹۰,۹۲	۳۴,۴۶	۱۶۴۹,۵۷	۳۷,۰۶	۱۵۸۱,۶۳
	۴	۳۷,۹۱	۲۰۱۷,۳۵۲۱	۳۸,۸۷	۲۰۵۵,۰۰	۴۱,۹۵	۲۰۰۷,۴۲
	۵	۴۵,۰۴	۹۹,۴۶	۴۵,۱۴	۲۲۰۸,۳۹	۴۵,۹۹	۲۲۹۱,۱۱
میانگین		۴۹,۶۲	۱۶۶۰,۵۵	۵۰,۲۳	۱۶۷۰,۷۴	۵۰,۱۲	۱۶۶۰,۷۴

با توجه نتایج ارائه شده در جداول (۳) و (۴) دلیل بیشتر بودن زمان مورد نیاز برای حل مسئله رهبر بیشتر از زمان حل مسئله پیرو است زیرا مسئله رهبر یک مسئله دوسطحی است که در آن به ازای هر جواب موجه برای رهبر باید مسئله پیرو یک‌بار به صورت کامل حل شود. با این وجود می‌توان بیان کرد که زمان‌های حل توسط الگوریتم جستجوی ممنوعه برای حل مسائل برنامه‌ریزی راهبردی همانند مسائل مکان‌یابی رقابتی هاب بر روی مجموعه داده بزرگ TR معقول و منطقی است.

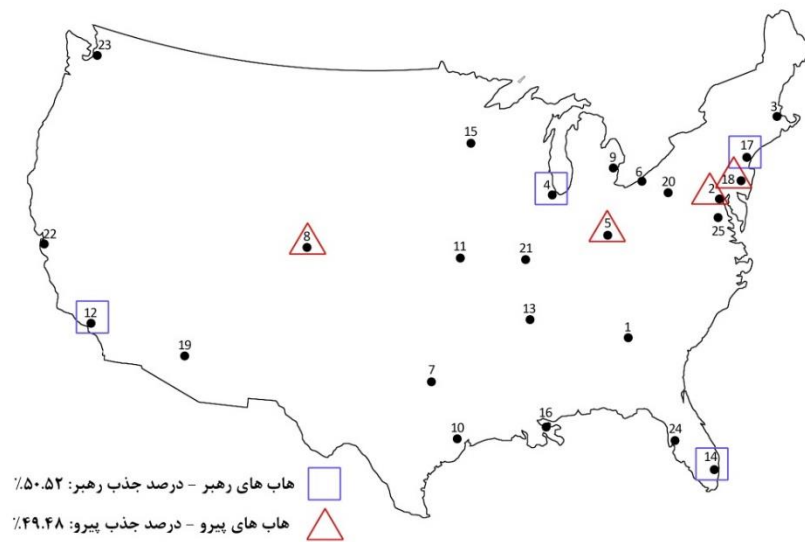
تحلیل گرافیکی

با توجه به محاسبات عددی انجام شده، با در نظر گرفتن این نکته که رهبر تصمیمات خود را با و بدون آگاهی از ورود پیرو به بازار گرفته، در این بخش سعی بر این خواهد بود تا چگونگی تصمیمات مکان‌یابی هاب‌های رهبر و پیرو را بر روی نقشه مجموعه داده CAB نمایش دهیم. شکل (۲) مکان‌های بهینه هاب‌هایی که توسط رهبر و پیرو در شبکه تخصیص چندگانه در حالت $p = 4$ ، $r = 4$ و $\alpha = 0.8$ گرفته شده را به نمایش می‌گذارد. در قسمت (الف) فرض بر این است که رهبر از رقابت با پیرو اجتناب کرده و تصمیمات مکان‌یابی هاب‌های خود را بر اساس مسئله (USAPHMP) گرفته است.

حالی که قسمت (ب)، مکان های رهبر را زمانی که او وارد بازار رقابتی شده و تصمیمات مکان یابی هاب خود را بر اساس مسئله رهبر گرفته را نمایش می دهد.



(الف) حرکت رهبر بر اساس مسئله (USApHMP)



(ب) حرکت رهبر بر اساس مسئله رقابتی رهبر

شکل ۲ مکان های بهینه هاب های رهبر و پیرو برای نمونه $p = r = 4$ و $\alpha = 0.8$ در مجموعه داده CAB

شکل (۲) تفاوت قابل‌توجهی در مکان بهینه هاب‌ها زمانی که رهبر از ورود به رقابت اجتناب می‌کند و زمانی که با پذیرش رقابت تصمیمات خود را بر اساس واکنش‌های پیرو می‌گیرد، وجود دارد. همچنین باید توجه داشت که اکثر هاب‌ها در قسمت شرقی کشور مکان‌یابی شده‌اند، به عبارت دیگر، حجم جریانات ورود/خروج در شهرهای شرقی به مراتب بیشتر از شهرهای غربی است. نتیجه دیگری که از شکل (۲) استخراج می‌شود انتخاب گره‌های شماره ۲ (بالتیمور)، ۴ (شیکاگو)، ۱۲ (لس آنجلس) و ۱۷ (نیویورک) به عنوان گره هاب در هر دو قسمت (الف) و (ب) است. به بیان دیگر، شرکت‌های حمل‌ونقل با تدوین و اجرای استراتژی نفوذ به بازارهای جهانی به منظور رقابت با شرکت‌های مادر و جذب بخش قابل‌توجهی از مشتریان آنان می‌توانند با بهره‌گیری از رقابت در مسائل مکان‌یابی هاب، تسهیلات خود را در شهرهای کلیدی (مشابه شهرهای نیویورک، لس آنجلس و غیره) بازارهای هدف مکان‌یابی نمایند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله مکان‌یابی رقابتی هاب در شبکه تخصیص تکی با در نظر گرفتن بازار دوقطبی مورد بررسی قرار گرفت. دو شرکت با اتخاذ تصمیمات پی‌درپی در صدد افزایش سهم بازار خود هستند که فرض بر این گرفته شد که مشتریان هر یک از این شرکت‌ها را بر اساس سطح خدمت ارائه شده آنان از نظر کمترین هزینه انتخاب می‌کنند. مسئله پیرو پس از تصمیمات مکان‌یابی رهبر، در صدد به حداکثر رساندن مجموع جریان‌ها است. همچنین از دید رهبر در نظر گرفتن رقابت و ورود به بازار رقابتی منجر به برنامه‌ریزی مسائل بهینه‌سازی دوسطحی می‌شود. به این منظور، مسائل پیرو به صورت برنامه‌ریزی اعداد مختلط مدل‌سازی و الگوریتم جستجوی ممنوعه برای حل مدل‌های پیشنهادی ارائه شده‌اند. به منظور تحلیل یافته‌ها و اعتبار سنجی به مدل‌های ریاضی و الگوریتم پیشنهادی، محاسبات عددی با بهره‌گیری از دو مجموعه داده استاندارد CAB و TR مورد بررسی قرار گرفته‌اند. محاسبات عددی کارایی الگوریتم جستجوی ممنوعه را در یافتن جواب‌های بهینه با زمان پردازش اندک نشان می‌دهند. تحلیل‌های گرافیکی صورت گرفته لزوم در نظر رفتن رقابت برای ورود به بازارهای بین‌المللی در حوزه حمل‌ونقل را با هدف افزایش درصد جذب مشتریان به اثبات می‌رسانند.

به منظور پیشنهاد برای تحقیقات آتی می‌توان مسئله مقاله حاضر را با در نظر گرفتن بیش از دو شرکت رقیب مطالعه و مدل‌سازی نمود. همچنین به منظور حل مدل‌های برنامه‌ریزی دوسطحی می‌توان از روش‌های دقیق بهینه‌سازی (الگوریتم شاخه و کران و یا الگوریتم شاخه و قیمت^۱) برای حل مدل‌های دوسطحی بر روی مجموعه داده بزرگ با هدف یافتن جواب‌های بهینه با زمان پردازشی اندک استفاده

کرد. در نهایت در نظر گرفتن ضریب تخفیف برای جریان‌های غیر هاب به هاب می‌تواند به واقعی‌تر بودن مدل‌های ریاضی منجر شود.

منابع

1. Alumur, S. A., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2012). Hub location under uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46 (4): 529-543.
2. Alumur, S., & Kara, B. Y. (2008). Network hub location problems: The state of the art. *European journal of operational research*, 190 (1): 1-21.
3. Campbell, J. F. (1994). Integer programming formulations of discrete hub location problems. *European Journal of Operational Research*, 72 (2): 387-405.
4. Campbell, J. F., & O'Kelly, M. E. (2012). Twenty-five years of hub location research. *Transportation Science*, 46 (2): 153-169.
5. Chen, J. F. (2007). A hybrid heuristic for the uncapacitated single allocation hub location problem. *Omega*, 35 (2): 211-220.
6. Contreras, I., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2011). Stochastic uncapacitated hub location. *European Journal of Operational Research*, 212 (3): 518-528.
7. Cournot, A. A. (1838). *Recherches sur les principes mathématiques de la théorie des richesses par Augustin Cournot*. chez L. Hachette.
8. Eiselt, H. A., & Marianov, V. (2009). A conditional p-hub location problem with attraction functions. *Computers & Operations Research*, 36 (12): 3128-3135.
9. Eiselt, H. A., Marianov, V., & Drezner, T. (2015). Competitive location models. In *Location science* (pp. 365-398). Springer International Publishing.
10. Ernst, A. T., & Krishnamoorthy, M. (1996). Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem. *Location science*, 4 (3): 139-154.
11. Farahani, R. Z., Hekmatfar, M., Arabani, A. B., & Nikbakhsh, E. (2013). Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications. *Computers & Industrial Engineering*, 64 (4): 1096-1109.
12. Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research*, 13 (5): 533-549.
13. Hotelling (1929). Stability in competition. *Economic Journal*, 39, pp. 41-57.
14. Jabalameli, M. S., Barzinpour, F., Saboury, A., & Ghaffari-Nasab, N. (2012). A simulated annealing-based heuristic for the single allocation maximal covering hub location problem. *International Journal of Metaheuristics*, 2 (1): 15-37.
15. Kara, B. Y. (1999). *Modeling and analysis of issues in hub location problem* (Doctoral dissertation, Bilkent University).
16. Kress, D., & Pesch, E. (2012). Sequential competitive location on networks. *European Journal of Operational Research*, 217 (3): 483-499.
17. Laporte, G., Nickel, S., & da Gama, F. S. (2015). *Location science* (p. 644). Berlin: Springer.
18. Lin, C. C., & Lee, S. C. (2010). The competition game on hub network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44 (4): 618-629.
19. Lüer-Villagra, A., & Marianov, V. (2013). A competitive hub location and pricing problem. *European Journal of Operational Research*, 231 (3): 734-744.

20. Mahmutogullari, A. I., & Kara, B. Y. (2016). Hub location under competition. *European Journal of Operational Research*, 250 (1): 214-225.
21. Marianov, V., Serra, D., & ReVelle, C. (1999). Location of hubs in a competitive environment. *European Journal of Operational Research*, 114 (2): 363-371.
22. O'Kelly, M. E. (1986). The location of interacting hub facilities. *Transportation science*, 20 (2): 92-106.
23. O'Kelly, M. E. (1987). A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 32 (3): 393-404.
24. O'Kelly, M. E. (1992). Hub facility location with fixed costs. *Papers in Regional Science*, 71 (3): 293-306.
25. Sasaki, M. (2005). Hub network design model in a competitive environment with flow threshold. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 48 (2): 158-171.
26. Sasaki, M., & Fukushima, M. (2001). Stackelberg hub location problem. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 44 (4): 390-402.
27. Sasaki, M., Campbell, J. F., Krishnamoorthy, M., & Ernst, A. T. (2014). A Stackelberg hub arc location model for a competitive environment. *Computers & Operations Research*, 47, 27-41.
28. Silva, M. R., & Cunha, C. B. (2009). New simple and efficient heuristics for the uncapacitated single allocation hub location problem. *Computers & Operations Research*, 36 (12): 3152-3165.
29. Skorin-Kapov, D., & Skorin-Kapov, J. (1994). On tabu search for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 73 (3): 502-509.
30. Tan, P. Z., & Kara, B. Y. (2007). A hub covering model for cargo delivery systems. *Networks*, 49 (1): 28-39.
31. Topcuoglu, H., Corut, F., Ermis, M., & Yilmaz, G. (2005). Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms. *Computers & Operations Research*, 32 (4): 967-984.
32. Von Stackelberg, H. (1951). *Grundlagen der theoretischen Volkswirtschaftslehre*. Mohr Siebeck.
33. Wagner, B. (2008). A note on "location of hubs in a competitive environment". *European Journal of Operational Research*, 184 (1): 57-62.