

A Meta-Heuristic Approach for Hub Location-Routing Problem with Capacity and Balancing Decisions

Maryam Sadat Ghiasi^{*}, Behnam Vahdani^{}**

Abstract

Hub location-routing problem is a practical subject in the last decades. This study considers a many-to-many hub location-routing problem where the best locations of hubs and tours for each hub are determined with simultaneous pickup and delivery. First, an optimization model is proposed to minimize the total sum of fixed costs of locating hubs, the costs of handling, traveling, assigning, and transportation costs. To find practical solutions, the hubs have constrained capacity, in which single allocations can service every node to the hubs. What is more, the balancing requisites are imposed on the network by allocating the appropriate number of demand nodes to the hubs. Then the problem is solved using GAMS software for small-size instances of the problem. Due to the NP-hard nature of the problem, the proposed optimization model is solved by the Genetic Algorithm (GA) and Imperialist Competitive Algorithm (ICA). For the problem instances, the comparative results indicate that GA has a better performance compared to ICA, and incorporating capacity and balancing considerations can influence the reduction of costs of the investigated network.

Keywords: Location-Routing; Hub; Capacity Levels; Balancing Requirements; Meta-Heuristic Algorithm.

Received: May. 21, 2020; Accepted: Apr. 24, 2021.

^{*} MSc, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

^{**} Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran (Corresponding author).
Email: b.vahdani@gmail.com

یک روش فراابتکاری برای مسئله مکان‌یابی مسیریابی هاب با تصمیمات ظرفیت و بالانس

مریم‌سادات قیاسی*، بهنام وحدانی**

چکیده

مسئله مکان‌یابی مسیریابی هاب یکی از مسائل کاربردی در دهه‌های اخیر است. پژوهش حاضر به یک مسئله مکان‌یابی مسیریابی هاب چندگانه می‌پردازد که در آن بهترین مکان‌ها برای هاب‌ها و تورها برای هر هاب با دریافت و تحویل هم‌زمان تعیین می‌شوند. ابتدا یک مدل بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن مجموع هزینه‌های ثابت مکان‌یابی مراکز، هزینه‌های جابه‌جایی، سفر، تخصیص و هزینه‌های حمل‌ونقل پیشنهاد شده است. به منظور دست‌یافتن به حل‌های کاربردی و عملی، هاب‌ها ظرفیت محدودی دارند و هر گره می‌تواند توسط تخصیص تکی به هاب‌ها اتصال یابد؛ همچنین ملاحظات بالانس با تخصیص تعداد مناسب گره‌های تقاضا به هاب‌ها به شبکه تحمیل می‌شود. سپس مسئله با استفاده از نرم‌افزار GAMS برای نمونه‌هایی با اندازه کوچک حل می‌شود. با توجه به ماهیت NP-Hard مسئله، مدل بهینه‌سازی پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک و الگوریتم رقابت استعماری حل خواهد شد. نتایج مقایسه‌ای حاصل از نمونه‌های مسئله نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری در مقایسه با الگوریتم رقابت استعماری دارد و در نظر گرفتن ملاحظات ظرفیت و بالانس می‌تواند در کاهش هزینه‌های شبکه موردبررسی مؤثر باشد.

کلیدواژه‌ها: مکان‌یابی-مسیریابی؛ هاب؛ سطوح ظرفیت؛ نیازمندی‌های بالانس؛
الگوریتم فراابتکاری.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۴.

* دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، گروه مهندس

صنایع، قزوین، ایران

** دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، گروه مهندس صنایع، قزوین، ایران

(نویسنده مسئول).

Email: b.vahdani@gmail.com

۱. مقدمه

طراحی بهینه شبکه زنجیره تأمین، نقش حیاتی در کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و بهبود عملکرد سیستم دارد [۴۱]. حمل‌ونقل کالا در زنجیره تأمین فعالیت مهمی است که با ارسال و تحویل به‌موقع مواد خام و محصولات نهایی، تأثیر زیادی بر عملکرد کلی شرکت‌های تولیدی و نیز هزینه نهایی محصولات می‌گذارد. به این دلیل، شرکت‌ها به‌طور مداوم برای کاهش هزینه‌ها و همچنین افزایش سطوح خدمات خود تحت فشار هستند. به‌منظور غلبه بر این فشارها، آن‌ها باید به‌طور منظم شبکه خدمت‌رسانی خود را طراحی مجدد کنند و فرآیندهای لجستیک را با هماهنگی بهتر تصمیمات در سطوح استراتژیک و عملیاتی بهبود بخشند [۹]. مسائل مکان‌یابی هاب در دهه‌های اخیر به دلیل بالابودن کاربردهایشان در سیستم‌های مدرن حمل‌ونقل و ارتباطات، به میزان زیادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵، ۲۲]. هاب‌ها در شبکه‌های حمل‌ونقل کالا و مسافر و غیره مکان‌هایی هستند که جریان را از مبدأهای متفاوت دریافت کرده و آن را به گره‌های مقصد یا دیگر هاب‌ها هدایت می‌کنند [۱۴]؛ بنابراین هدف مسائل مکان‌یابی مسیریابی هاب برآورده‌ساختن تقاضاها با حرکت افراد، کال جداول اها و اطلاعات از طریق تسهیلات ویژه‌ای به نام «هاب» است که به‌عنوان واسطه‌های توزیع بین گره‌های مبدأ و گره‌های مقصد شناخته می‌شوند [۱۰]. در یک شبکه هاب و پره^۱، به‌دلیل حجم زیاد کالاهایی که از طریق مبدأ به مقصد منتقل می‌شوند، طراحی مؤثر یک شبکه می‌تواند خدمات با کیفیت بالا را تضمین کند [۴۵]. در این شبکه هاب‌ها با کاهش تعداد لینک‌ها در گره‌های مبدأ و مقصد، از هر گونه اتصال مستقیم تمام گره‌ها جلوگیری می‌کنند که به‌نوبه خود به کاهش هزینه‌ها در مقایسه با شبکه‌های دارای اتصالات گراف کامل منجر می‌شود [۴۲]؛ همچنین استفاده از عامل تخفیف ($0 < \alpha < 1$) برای ارتباطات بین هاب‌ها نیز کاهش زیادی در هزینه کل شبکه به دنبال دارد [۱۴]. طی دهه‌های گذشته، شبکه‌های HS به‌دلیل زمینه‌های کاربردی مختلف در شبکه‌های ارتباط از راه دور، حمل‌ونقل هوایی، حمل‌ونقل کالا، خدمات پستی، حمل‌ونقل عمومی و شهری، حمل‌ونقل ریلی و خدمات اضطراری توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. از آنجاکه با افزایش جمعیت، تقاضا برای حمل بار افزایش می‌یابد، اهمیت طراحی مناسب شبکه‌های حمل‌ونقل آشکار می‌شود [۲۳]. استفاده از هاب‌ها در شبکه‌های حمل‌ونقل نه تنها هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های آماده‌سازی ساختار شبکه و زمان تحویل را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد، بلکه سبب خدمات بهتر به مشتریان و رضایت آن‌ها می‌شود [۹].

بنابراین مفهوم اصلی شبکه‌های HS در طراحی یک شبکه حمل‌ونقل است؛ به‌گونه‌ای که باید تعدادی از تصمیمات، از جمله مکان‌یابی تسهیلات هاب و گره‌های غیرهاب، تخصیص تمام

۱. hub-and-spoke (HS)

گره‌های مبدأ و مقصد (غیرهاب) به‌طور مستقیم به هاب و مسیریابی جریان مشخص شود؛ به‌طوری‌که هزینه‌های شبکه شامل هزینه‌های جمع‌آوری، توزیع و سایر هزینه‌های مرتبط، حداقل شود. هماهنگی تمام این تصمیمات به‌عنوان مسئله مکان‌یابی مسیریابی هاب چندگانه^۱ (MMHLRP) شناخته می‌شود [۹]. علاوه بر این، نظر به اینکه محدودیتی برای جابه‌جایی مقدار محصولات از طریق شبکه حمل‌ونقل وجود داشته باشد و یا هیچ‌گونه محدودیتی وجود نداشته باشد، مسائل مکان‌یابی هاب به دو زیرمسئله با ظرفیت محدود و ظرفیت نامحدود طبقه‌بندی می‌شوند. محدودیت‌های ظرفیت ممکن است مربوط به لینک‌های شبکه و یا گره‌های هاب باشند [۱۱]؛ بنابراین وقتی هاب‌ها ظرفیت محدودی دارند، عملیاتی در مسئله وجود دارد که ظرفیت مناسب را برای هر هاب تعیین می‌کند [۱۵]؛ همچنین نوع دیگری از محدودیت ظرفیت وجود دارد که مربوط به تعداد گره‌های غیرهابی است که می‌توانند به یک هاب مشخص اختصاص یابند؛ بنابراین تصمیم‌گیرندگان می‌توانند در طول برنامه‌ریزی خود این ملاحظات را لحاظ کنند [۱۶].

این مطالعه با توجه به ضرورت تصمیم‌گیری در مورد مکان تسهیلات هاب و تصمیم‌گیری در مورد مسیریابی وسیله نقلیه با هدف به‌حداقل رساندن هزینه کل و همچنین در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت و تصمیمات تعادل‌سازی در MMHLRP انجام شده است. با توجه به Np -hard بودن این مسئله، دو الگوریتم فراابتکاری، از جمله ژنتیک^۲ و رقابت استعماری^۳ برای حل مدل پیشنهادی استفاده شده است [۴، ۷، ۱۶، ۲۵، ۴۳].

در ادامه ساختار مقاله شامل بخش‌های زیر است: در بخش دوم به بررسی پیشینه مسئله مکان‌یابی هاب پرداخته می‌شود. ارائه مدل پیشنهادی در بخش سوم صورت می‌گیرد. رویکرد حل و الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی و نتایج محاسباتی حاصل از حل مدل در بخش چهارم ارائه خواهد شد. در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

از آنجاکه مطالعات زیادی در مورد مسئله مکان‌یابی مسیریابی هاب وجود دارد، هدف از این بخش تمرکز بیشتر بر مسائل MMHLRP است تا بتوان شکاف پژوهش و سهم این مطالعه را نشان داد. نگی و سلهی^۴ (۱۹۹۸)، نخستین فرمول را برای MMHLRP ارائه دادند که در آن بارگیری و تحویل، ظرفیت هاب‌ها و ملاحظات حداکثر مسافت در نظر گرفته می‌شود. آن‌ها همچنین یک

۱. Many to Many Hub Location Routing (MMHLRP)

۲. Genetic Algorithm (GA)

۳. Imperialist Competitive Algorithm (ICA)

۴. Nagy and Salhi

الگوریتم ابتکاری برای حل مدل پیشنهادی در زمان معقول ارائه دادند [۲۶]. واسنر و زافل^۱ (۲۰۰۴)، یک مدل بهینه‌سازی را برای طراحی مجدد خدمات پستی اتریش در مسئله MMHLRP ارائه دادند. آن‌ها تعدادی از مشخصات از جمله بارگیری و تحویل، امکان اتصال مستقیم بین گره‌های غیرهاب و تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده را در مدل خود در نظر گرفتند. مدل پیشنهادی آن‌ها برای حل و استفاده از حل‌کننده‌های تجاری غیرخطی و پیچیده بود؛ در نتیجه برای حل در ابعاد بزرگ از الگوریتم ابتکاری استفاده کردند [۴۰]. ستینر و همکاران^۲ (۲۰۱۰)، یک روش ابتکاری دومرحله‌ای را برای حل MMHLRP پیشنهاد کردند که در آن مکان‌هاب‌ها، تورهای بارگیری و تحویل هم‌زمان وسایل نقلیه مشخص می‌شد. ویژگی‌های اصلی این پژوهش در مقایسه با نتایج مطالعات قبلی این بود که امکان تخصیص‌های چندگانه و محدودیت حداکثر زمان هر تور مطرح شد؛ ولی آن‌ها هیچ محدودیتی برای ظرفیت هاب در نظر نگرفتند [۱۲]. دکامارگو و همکاران^۳ (۲۰۱۳)، فرمولاسیون جدیدی را برای MMHLRP ارائه دادند که پیچیدگی آن نسبت به مطالعات قبلی کمتر بود؛ ولی در مدل آن‌ها هاب‌ها هیچ‌گونه ظرفیتی نداشتند. آن‌ها همچنین الگوریتم تجزیه بندرز را برای حل مدل ارائه‌شده پیشنهاد کردند [۹]. چراغی و همکاران (۲۰۱۵)، یک مدل مکان‌یابی هاب میانه تک‌تخصیص چندمحصوله ارائه دادند و برای نخستین بار در ایران از سه روش مالی برای تأمین هزینه‌های تأسیس هاب استفاده کردند؛ ضمن اینکه محدودیت تأمین منابع مالی را نیز در نظر گرفتند. نتایج ارائه‌شده نشان داد که با تغییر سقف بودجه علاوه بر تغییر هاب‌ها، تخصیص گروه کالاها به هاب‌ها نیز تغییر می‌کند [۱۳]. نیک‌بخش و ذگردی (۲۰۱۴)، مسئله مکان‌یابی یال هاب پوششی با تخصیص چندگانه را تحت شرایط اختلال یال هاب بررسی کردند. آن‌ها یک مدل ریاضی ارائه کردند و از رویکرد برنامه‌ریزی شانس-محدود بهره گرفتند. نتایج محاسباتی حل مسئله‌های نمونه بر اساس داده‌های حمل‌ونقل هوایی ایران و پست استرالیا و شبیه‌سازی مونت‌کارلو حاکی از اهمیت در نظرگیری اختلال بر عملکرد شبکه هاب بود [۲۸]. ریک و همکاران^۴ (۲۰۱۴)، مسئله MMHLRP را در صنعت چوب با فرض چند محصول بررسی کردند. آن‌ها در مدل خود فرض کردند که ارتباط مستقیمی می‌تواند بین نقاط عرضه و تقاضا وجود داشته باشد. آن‌ها یک مدل عدد صحیح مختلط و چندین نوع از نامعادلات معتبر را به کار بردند. با توجه به پارامترهای هزینه حمل‌ونقل بین هاب‌ها در این مدل، تصمیمات مسیریابی به‌طور بهینه از طریق تکنیک ثابت کردن یک متغیر صورت گرفت؛ همچنین الگوریتم ژنتیک و روشی چندمرحله‌ای برای حل در

۱. Wasner & Zäpfel

۲. Çetiner, et al.

۳. de Camargo, et al.

۴. Rieck, et al.

ابعاد بزرگ به کار رفت [۳۰]. مختاری و عباسی (۲۰۱۵)، برای حل MMHLRP کلاسیک، الگوریتم فراابتکاری یکپارچه‌ای را پیشنهاد کردند که در آن از دو الگوریتم فراابتکاری، از جمله جست‌وجوی همسایگی متغیر و بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. یادآوری این نکته لازم است که آن‌ها مدل ریاضی جدیدی ارائه نکردند و فرض کردند که هاب‌ها دارای ظرفیت نامحدود هستند که بسیار فراتر از وضعیت واقعی موجود در مسائل مکان‌یابی مسیریابی هاب است. روش فراابتکاری ترکیبی آن‌ها می‌تواند مثال‌های بزرگ MMHLRP را تا ۳۰۰ گره با زمان حل و شکاف بهینگی قابل قبول حل کند [۲۵]. لویز و همکاران^۱ (۲۰۱۶)، مدل MMHLRP با شبکه غیرکامل برای هاب‌ها را در سیستم‌های حمل‌ونقل در بخش‌های عمومی و شهری بررسی کردند. آن‌ها سه الگوریتم ابتکاری برای حل مدل ارائه دادند. نخستین الگوریتم ابتکاری، الگوریتم ژنتیک با جست‌وجوی محلی بود؛ درحالی‌که سایر الگوریتم‌های ابتکاری ترکیبی از یک طرح با چند شروع و الگوریتم همسایگی متغیر بود [۲۱]. خسروی و جوکار (۲۰۱۸)، یک مدل بهینه‌سازی برای MMHLRP را بر اساس قانون جاذبه با هدف حداقل‌سازی هزینه ثابت و بدون در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت و زمان ارائه کردند که مکان هاب‌ها و گره‌های غیرهاب و مسیریابی وسایل نقلیه‌ای که به هاب‌ها اختصاص می‌یابند را تعیین می‌کند. آن‌ها همچنین یک الگوریتم ابتکاری را برای حل مدل پیشنهادی ارائه دادند [۲۰]. عباسی و همکاران (۲۰۱۹)، مدل MMHLRP را بررسی کردند که توسط دکامارگو و همکاران^۲ (۲۰۱۳) مطرح شده است. در این پژوهش در زمینه مدل‌سازی ملاحظات جدیدی در نظر گرفته نشده است و فقط مسئله را با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی همسایگی در ابعاد بزرگ حل کردند [۲]. راتلی و همکاران^۳ (۲۰۲۰)، یک مدل جدید برای مسئله مکان‌یابی مسیریابی هاب را بررسی کردند که این مسئله شباهت‌هایی به مسئله تخصیص تکی بدون ظرفیت P-هاب میانه دارد. آن‌ها یک روش ابتکاری مبتنی بر جست‌وجوی همسایگی متغیر برای حل مسئله پیشنهاد کردند که این روش ابتکاری بهتر از روش‌های مدرن عمل می‌کرد و زمان حل آن کمتر از الگوریتم‌های دیگر بود [۲۹]. بوتون و همکاران^۴ (۲۰۲۱)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارائه کردند که در آن هزینه‌های تراکم غیرخطی در هاب‌ها از طریق یک تابع قطعه‌قطعه خطی تقریب زده می‌شود و این مدل برای محاسبه حد پایین تابع هدف به کار می‌رود. آن‌ها همچنین یک الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه را توسعه دادند و نتایج نشان داد که این الگوریتم در یک زمان مناسب به راه‌حل‌های با کیفیت بالا دست می‌یابد [۸]. شانگ و همکاران^۵ (۲۰۲۱)، یک مسئله مکان‌یابی

۱. Lopes

۲. de Camargo, et al.

۳. Ratli, et al.

۴. Büttin, et al.

۵. Shang, et al.

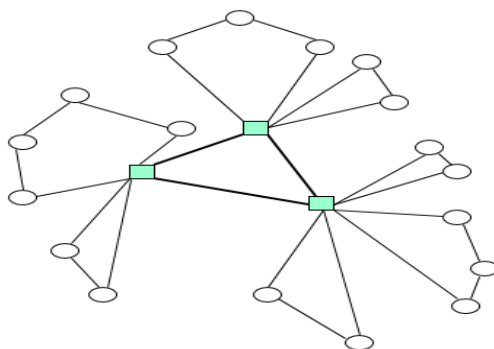
هاب چندبعدی سلسله‌مراتبی دوهدفه برای سیستم‌های تحویل کالا معرفی کردند؛ سپس یک برنامه خطی عدد صحیح مختلط برای مدل کردن این مسئله پیشنهاد دادند. آن‌ها دو الگوریتم ابتکاری مبتنی بر جست‌وجوی همسایگی متغیر و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرغالب توسعه دادند. نتایج آماری، کارایی الگوریتم‌های ابتکاری را نشان داد [۳۲].

همان‌طور که مرور شد، پژوهش‌ها در مورد MMHLRP بسیار محدود است و پژوهش حاضر یک مدل MMHLRP را با تخصیص متعادل گره‌های غیرهاب به هاب توسعه می‌دهد که تاکنون در یک مدل MMHLRP مطرح نشده است. در این پژوهش، یک فرمولاسیون ریاضی برای مسئله مکان‌یابی مسیریابی هاب چندگانه ظرفیت‌دار با محدودیت تعادل و بالانس در تعداد گره‌های تخصیصی به هاب‌ها توسعه داده شده است. تابع هدف، هزینه کل از جمله هزینه بازگشایی هاب و هزینه‌های حمل‌ونقل را حداقل می‌کند. این پژوهش نخستین پژوهشی است که مفهوم ظرفیت هاب‌ها و تعادل تعداد گره‌های غیرهاب تخصیص‌یافته به هر هاب را به‌طور هم‌زمان در مسائل MMHLRP معرفی می‌کند؛ سپس الگوریتم‌های فراابتکاری برای یافتن بهترین مکان هاب، تصمیمات تخصیص و مسیریابی برای حل مسئله موردبررسی ارائه می‌شود.

۳. روش‌شناسی پژوهش

مدل MMHLRP مطرح‌شده در پژوهش حاضر می‌تواند مکان‌های بهینه برای نصب هاب را تعیین کند؛ همچنین تضمین می‌کند که گره‌های غیرهاب می‌توانند تنها به یک هاب تخصیص یابند. تابع هدف هزینه کل شامل هزینه بازگشایی هاب، هزینه تقاضاهای حمل‌ونقل، هزینه اجرای تورهای محلی، هزینه تخصیص وسایل نقلیه به هاب‌ها و هزینه‌های حمل‌ونقل بین هاب‌ها را به حداقل می‌رساند. این مدل می‌تواند بهترین تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب را انجام دهد؛ به‌طوری‌که بالانس و تعادل در تخصیص تعداد مناسب گره‌های غیرهاب به هاب‌ها لحاظ شود؛ همچنین این مدل محدودیت ظرفیت برای میزان جریان عبوری از هاب‌ها را در نظر می‌گیرد که ظرفیت مناسب از میان چند سطح ظرفیت متفاوت، برای هر هاب انتخاب می‌شود. به‌کارگیری موارد مطرح‌شده، به‌دلیل محدودیت‌های موجود، می‌تواند سبب نزدیک‌شدن مدل پیشنهادی به مسائل دنیای واقعی شود؛ همچنین به افزایش کارایی و مقرون‌به‌صرفه‌بودن شبکه منجر شود.

شکل ۱، نمونه‌ای از شبکه موردبررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمونه‌ای از شبکه مسئله MMHLRP

فرضیه‌های مسئله. مسئله ارائه شده دارای فرضیه‌های زیر است:

- تبادل جریان بین جفت‌های مشتریان و ارتباط بین هاب‌ها دو ویژگی اساسی این مدل است؛
 - تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب‌ها از نوع تخصیص تکی است و این تخصیص هزینه ثابتی را به مسئله تحمیل می‌کند؛
 - محدودیت ظرفیت برای هاب‌ها در نظر گرفته می‌شود؛
 - بارگیری و تحویل به‌طور هم‌زمان و توسط وسیله نقلیه مشابه انجام می‌گیرد؛ به عبارتی هر مشتری فقط یک بار مشاهده می‌شود؛
 - اتصالات بین هاب‌ها کامل است؛
 - برای هر هاب سطوح ظرفیت متفاوتی در نظر گرفته می‌شود که در نهایت مدل یکی از این سطوح ظرفیت را به‌عنوان سطح ظرفیت بهینه انتخاب می‌کند.
- در این بخش ابتدا مجموعه‌ها و اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله معرفی شده و سپس مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌شود.

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

N : مجموعه مکان‌های گره‌های مشتری

K : مجموعه گره‌های کاندید برای هاب‌ها ($K \subseteq N$)

$Q_k = \{1, 2, \dots, S_k\}$: مجموعه سطوح ظرفیت متفاوت در دسترس برای یک هاب

V : مجموعه وسایل نقلیه در دسترس ($l \in V$)

A_l : مجموعه کمان‌های ممکن (u, v)

k, m : اندیس گره‌های هاب

i, j, u, v, t : اندیس گره‌های مشتری

پارامترهای مسئله

W_{ij} : جریان تقاضا از مشتری i به مشتری j ($W_{ij} \neq W_{ji}$)

$O_i = \sum_{j \in N} W_{ij}$: مجموع جریان‌های خروجی از گره i

$D_i = \sum_{j \in N} W_{ji}$: مجموع جریان‌های ورودی به گره i

λ_{uv} : زمان سفر طی کمان $(u, v) \in A1$

T : حداکثر زمان مجاز برای هر سفر (تور)

M : عددی بزرگ

θ : نیازمندی‌های تعادل (حداکثر مقدار مجاز برای تفاوت بین حداکثر و حداقل تعداد گره‌های spoke که به هاب‌ها اتصال می‌یابند)

Γ_k^q : ظرفیت هاب نصب‌شده در گره k با سطح ظرفیت q ($q \in Q_k$)

α_k^q : هزینه ثابت نصب یک هاب با ظرفیت q در گره k

\hat{c}_{ik} : هزینه رسیدگی تقاضای ورودی و خروجی مشتری $i \in N$ به وسیله‌ی هاب $k \in N$ (این هزینه متناسب است با O_i و D_i)

\hat{c}_{uv} : هزینه کمان (u, v) متعلق به $A1$ توسط یک وسیله‌ی نقلیه

\hat{c}_l : هزینه تخصیص وسیله نقلیه l به یک هاب

\hat{c}_{ij}^{km} : هزینه حمل‌ونقل تقاضاهای W_{ij} و W_{ji} برای ارتباطات بین هاب k, m

c_{km} هزینه حمل‌ونقل هر واحد ارتباط بین هاب‌های k, m

$\alpha < 1$: فاکتور تخفیف برای ارتباطات بین هاب‌ها

متغیرهای تصمیم مسئله

$x_{ij}^{km} \geq 0$: متغیرهای جریان که نشان‌دهنده بخشی از تقاضاهای W_{ij} و W_{ji} هستند که از طریق هاب‌های k و m مسیریابی می‌شوند.

$f_{uv}^{kl} \geq 0$: اگر وسیله نقلیه $l \in V$ از هاب $k \in N$ کمان $(u, v) \in A1$ را در مسیرش به منظور خدمت به گره $t \in N$ استفاده کند.

A و B : حد پایین و بالا برای تعداد حداقل و حداکثر تعداد گره‌های Spoke است که به هاب‌ها تخصیص داده می‌شود.

z_{ik}^q : اگر گره $i \in N$ به هاب $k \in N$ با سطح ظرفیت q تخصیص داده شود، 1 و در غیر این صورت صفر.

z_{kk}^q : اگر گره k هابی با سطح ظرفیت q باشد، 1 و در غیر این صورت صفر.

q_{kl} : اگر وسیله نقلیه $l \in V$ به هاب $k \in N$ اختصاص داده شود، 1 و در غیر این صورت صفر.

y_{uv}^{kl} : اگر وسیله نقلیه $l \in V$ از هاب $k \in N$ کمان $(u, v) \in A1$ را در مسیر خود استفاده کند، ۱ و در غیر این صورت صفر.
 p_v^{kl} : اگر گره $v \in N$ توسط وسیله نقلیه $l \in V$ از هاب $k \in N$ سرویس شود، ۱ و در غیر این صورت صفر.

مدل ریاضی مسئله. با توجه به آیتم‌های معرفی شده در بالا مدل‌سازی مسئله به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\min \sum_{k \in N} \sum_{q \in Q_k} a_k^q z_{kk}^q + \sum_{i \in N} \sum_{\substack{k \in N \\ k \neq i}} \sum_{q \in Q_k} \hat{c}_{ik} z_{ik}^q + \sum_{l \in V} \sum_{(u,v) \in A1} \sum_{k \in N} \check{c}_{uv} y_{uv}^{kl} + \sum_{l \in V} \sum_{k \in N} \hat{c}_l q_{kl} + \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ i < j}} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} \check{c}_{ij}^{km} x_{ij}^{km} \quad (۱) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{k \in N} \sum_{q \in Q_k} z_{ik}^q = 1 \quad \forall i \in N \quad (۲) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{q \in Q_k} z_{ik}^q \leq \sum_{q \in Q_k} z_{kk}^q \quad \forall i, k \in N: i \neq k \quad (۳) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{m \in N} x_{ij}^{km} = \sum_{q \in Q_k} z_{ik}^q \quad \forall i, j, k \in N: i < j \quad (۴) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{k \in N} x_{ij}^{km} = \sum_{q \in Q_k} z_{jm}^q \quad \forall i, j, m \in N: i < j \quad (۵) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{(u,v) \in A1} y_{uv}^{kl} = p_u^{kl} \quad \forall u, k \in N, l \in V \quad (۶) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{(u,v) \in A1} y_{uv}^{kl} = p_v^{kl} \quad \forall v, k \in N, l \in V \quad (۷) \text{ رابطه}$$

$$y_{uv}^{kl} \leq q_{kl} \quad \forall k \in N, (u, v) \in A1, l \in V \quad (۸) \text{ رابطه}$$

$$q_{kl} \leq q_{k(l-1)} \quad \forall k \in N, l \in V: l > 1 \quad (۹) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{l \in V} p_t^{kl} = \sum_{q \in Q_k} z_{tk}^q \quad \forall t, k \in N: k \neq t \quad (۱۰) \text{ رابطه}$$

$$\sum_{(u,v) \in A1} \lambda_{uv} y_{uv}^{kl} \leq T \quad \forall k \in N, l \in V \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\sum_{i \in N} o_i z_{ik}^q \leq \Gamma_k^q z_{kk}^q \quad \forall k \in N, q \in Q_K \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$A \leq \sum_{i \in N} \sum_{q \in Q_K} z_{ik}^q + M \left(1 - \sum_{q \in Q_K} z_{kk}^q \right) \quad \forall k \in N \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$B \geq \sum_{i \in N} \sum_{q \in Q_K} z_{ik}^q - M \left(1 - \sum_{q \in Q_K} z_{kk}^q \right) \quad \forall k \in N \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$B - A \leq \theta \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$f_{uv}^{klt} \leq y_{uv}^{kl} \quad \forall (u,v) \in A1, k, t \in N, l \in V: k \neq t, k \neq v, u \neq t \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\sum_{(k,v) \in A1} f_{kv}^{klt} = p_t^{kl} \quad \forall k, t \in N, l \in V: k \neq t \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\sum_{(u,t) \in A1} f_{ut}^{klt} = p_t^{kl} \quad \forall k, t \in N, l \in V: k \neq t \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$\sum_{(u,v) \in A1} f_{uv}^{klt} = \sum_{(v,u) \in A1} f_{vu}^{klt} \quad \forall v, k, t \in N, l \in V: k \neq t, v \neq k, v \neq t \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$x_{ij}^{km} \geq 0 \quad \forall i, j, k, m \in N: i < j \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$f_{uv}^{klt} \geq 0 \quad \forall (u,v) \in A1, t, k \in N, l \in V: v \neq k, u \neq t, k \neq t \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$z_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \in N \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$q_{kl} \in \{0,1\} \quad \forall k \in N, l \in V \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$p_t^{kl} \in \{0,1\} \quad \forall k, t \in N, l \in V: k \neq t \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$y_{uv}^{kl} \in \{0,1\} \quad \forall (u,v) \in A1, k \in N, l \in V \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

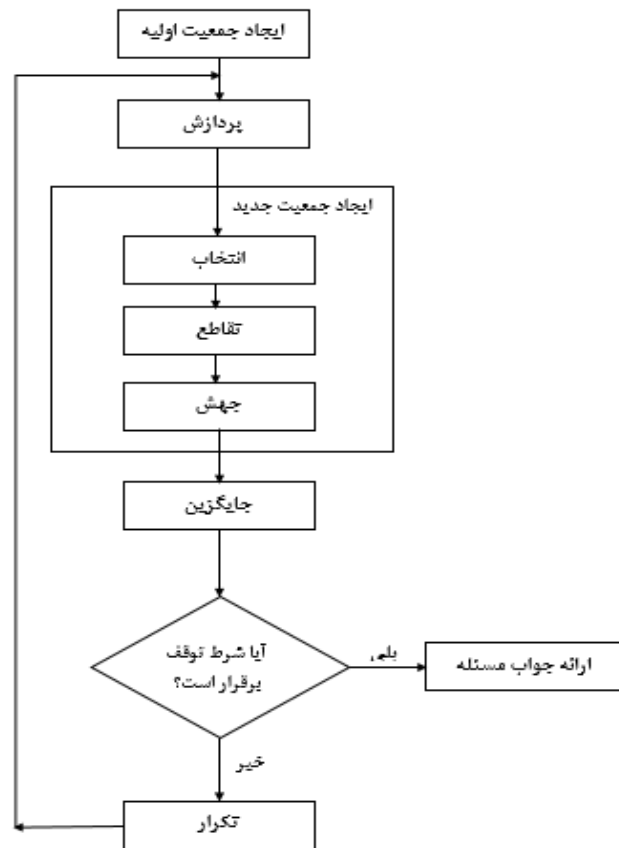
$$A, B \geq 0 \text{ and integer} \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

در مدل بالا تابع هدف ۱، مجموع هزینه طراحی شبکه هاب را محاسبه می‌کند که به ترتیب شامل هزینه‌های نصب و راه‌اندازی هاب‌ها، بررسی و اجرای تور محلی، تخصیص وسایل نقلیه به هاب‌ها و هزینه حمل‌ونقل بین هاب‌ها را کمینه می‌کند. محدودیت ۲، اطمینان می‌دهد که هر گره می‌تواند به یک هاب با سطح ظرفیت q تخصیص یابد. در واقع این محدودیت مسئله تخصیص تکی بودن این مدل را نشان می‌دهد. محدودیت ۳، نشان می‌دهد که اگر هابی در گره k ایجاد شود، آنگاه می‌توان گرهی مانند i را به آن تخصیص داد. محدودیت ۴، تضمین می‌کند اگر ابتدا گره $i \in N$ به هاب $k \in N$ تخصیص داده شود (گره i توسط هاب k خدمت داده می‌شود)، آنگاه تبادل جریان بین جفت مبدأ و مقصد i و z وجود خواهد داشت. محدودیت ۵، همانند محدودیت ۴، نشان می‌دهد که اگر گره $z \in N$ به هاب $m \in N$ تخصیص یابد (گره z توسط هاب m خدمت داده می‌شود)، آنگاه بین دو گره i و z که مبدأ و مقصد هستند، تبادل جریان ایجاد خواهد شد؛ به عبارت دیگر محدودیت‌های ۴ و ۵، اطمینان می‌دهند که ارتباطی بین هاب k و m انتخاب می‌شود؛ هنگامی که گره‌های i و z به ترتیب به هاب k و m تخصیص یابد. محدودیت‌های ۶ و ۷، تصدیق می‌کنند که یک لینک باید به ترتیب یک گره را ترک کند و سپس به آن وارد شود، اگر وسیله نقلیه‌ای از یک هاب برای خدمت‌کردن به آن گره اختصاص داده شود. محدودیت ۸، محدودیت‌های فعال‌سازی هستند که تضمین می‌کنند اگر وسیله نقلیه $I \in V$ ابتدا به هاب $K \in N$ اختصاص یابد، آنگاه این وسیله نقلیه فقط می‌تواند کمان $(u,v) \in A1$ را استفاده کند. محدودیت ۹، مرتب‌کردن فعال‌سازی وسایل نقلیه در هاب‌ها را بر عهده دارد. در واقع این محدودیت اعلام می‌دارد که ابتدا وسیله نقلیه $I-1$ به هاب k تخصیص داده می‌شود و سپس وسیله نقلیه I . محدودیت ۱۰، اطمینان می‌دهد که اگر گره $t \in N$ به هاب $k \in N$ اختصاص یابد، پس یک وسیله نقلیه $I \in V$ از هاب k باید به آن گره خدمت دهد. محدودیت ۱۱، تضمین می‌کند حداکثر زمان مجاز برای هر تور رعایت شود. محدودیت ۱۲، محدودیت ظرفیت است. محدودیت‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵، تضمین می‌کنند که بالانس باید در تعداد گره‌های تخصیصی به هاب رعایت شود؛ بدین صورت که حاصل تفاضل حداکثر و حداقل گره‌های تخصیصی به هاب‌ها باید از یک عدد ثابت از قبل تعیین شده کمتر باشد. محدودیت‌های ۱۶ تا ۱۹، تضمین می‌کنند تا وقتی وسیله نقلیه‌ای به هاب و لینک ارتباطی تخصیص پیدا نکرده باشد، امکان سرویس‌گیری مشتری از آن وجود ندارد؛ همچنین نمایانگر حفظ جریان میان هاب‌ها و لینک‌های ارتباطی نیز هستند. محدودیت‌های ۲۰ تا ۲۶، محدودیت‌های دامنه متغیرهای تصمیم می‌باشند.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

از آنجا که مسائل مکان‌یابی مسیریابی هاب جزو مسائل NP-Hard محسوب می‌شوند، برای حل این مسائل از روش‌های فراابتکاری استفاده می‌شود [۱،۳،۴،۷،۱۶،۱۹،۲۴،۲۵،۲۷،۳۱،۳۳،۳۴،۳۵،۳۶،۳۷،۳۸،۳۹،۴۳،۴۴]. از جمله پرکاربردترین این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم ژنتیک و الگوریتم رقابت استعماری اشاره کرد که در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرند.

الگوریتم ژنتیک. الگوریتم ژنتیک^۱ (GA) یکی از الگوریتم‌های کارآمد است که توسط هالند^۲ معرفی شده است [۱۸]. در اینجا مراحل اصلی الگوریتم ژنتیک در فلوچارت شکل ۲، آورده شده و سپس به تفصیل مراحل آن برای حل مدل پیشنهادی شرح داده شده است.



شکل ۲. فلوچارت الگوریتم GA

۱. Genetic algorithm

۲. Holland

کروموزوم اولیه و نحوه نمایش آن. با به کارگیری الگوریتم ژنتیک می توان جواب مسئله را به صورت کروموزوم نمایش داد. نحوه تعریف کروموزوم در دو مرحله کد کردن و رمزگشایی انجام می شود. کروموزوم کدشده از یک ماتریس $6 \times N$ تشکیل شده که N ، تعداد مشتری ها یا هاب های بالقوه است. در اینجا $N=10$ فرض شده است. شکل ۳، نمونه ای از کروموزوم تولیدشده است.

$$\begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 & 9 & 2 & 4 & 6 & 10 & 8 & 3 \\ 4 & 6 & 5 & 1 & 8 & 9 & 10 & 3 & 7 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

شکل ۳. نمونه ای از کروموزوم کدشده

سطر اول جایگشتی تصادفی از تمامی مشتریان و یا گره های غیرهاب و سطر دوم جایگشتی تصادفی از هاب های بالقوه است. سطر سوم برداری از اعداد صفر و یک است که صفر نقطه شکست برای گروه بندی کردن مشتریان است. سطر چهارم برداری است که در هر سلول آن یک عدد تصادفی بر اساس سطوح ظرفیت تعیین شده برای هاب ها قرار دارد، برای مثال، اگر سه سطح ظرفیت برای هاب ها در نظر گرفته شود، این بردار اعداد یک تا سه را به طور تصادفی تولید می کند. سطر پنجم برداری تصادفی است که وسایل نقلیه تخصیصی به هاب ها را نشان می دهد. برای نمونه، اگر ۴ وسیله نقلیه برای هاب ها در نظر گرفته شود، این بردار اعداد یک تا چهار را به طور تصادفی تولید می کند. سطر ششم برآوردی از تعداد تورهایی است که می تواند به هر هاب متصل شود. اگر تعداد مشتری های تخصیصی به هاب کمتر از تعداد تورهایی باشد که به یک هاب اتصال دارند، تعداد مشتری ها به عنوان تعداد تورهای متصل به هاب در نظر گرفته می شود.

کروموزوم رمزگشایی شده جواب مسئله را به طور واضح و نیز موجه شده نشان می دهد. ستون اول نمایانگر گره هایی است که به عنوان هاب تعیین می شوند. ستون دوم سطح ظرفیت تعیین شده برای هر هاب را نشان می دهد. ستون سوم نمایانگر مشتری های تخصیصی به هاب ها است. ستون چهارم ساختاری با دو ستون است که ستون اول وسیله نقلیه تخصیص یافته به هاب تعیین می کند و ستون دوم نیز توری را مشخص می کند که وسیله نقلیه طی می کند. شکل ۴، نمایانگر آن است که دو گره ۴ و ۶ هاب هستند. ستون دوم نشان می دهد هر دو هاب از ظرفیت

دوم خود استفاده می‌کنند. ستون سوم مشخص می‌کند که مشتری‌های ۱، ۵، ۷، ۹ و ۲ به هاب ۴ و مشتری‌های ۱۰، ۸ و ۳ به هاب ۶ تخصیص می‌یابند؛ همچنین از دو ستون آخر می‌توان پی برد که هاب ۴ دارای دو تور ۱، ۵، ۷ و تور ۲، ۹ است که هر دو تور را با وسیله نقلیه ۱ طی می‌کند و هاب ۶ نیز دارای یک تور ۱۰، ۸، ۳ است که این تور توسط وسیله نقلیه ۲ طی می‌شود.

$$\left[\begin{array}{cc|c} & & [1, 5, 7] \\ 4 & 2 & [1, 5, 7, 9, 2] \\ & & [1, 10, 8, 3] \\ 6 & 2 & [1, 10, 8, 3] \end{array} \right]$$

شکل ۴. نمونه‌ای از کروموزوم رمزگشایی شده

عملگر تقاطع. بعد از انتخاب والدین، به منظور ایجاد جواب جدید عمل تقاطع بین والدین صورت می‌گیرد. عملگر تقاطع مورد استفاده در این پژوهش به شرح زیر است:

تقاطع تک نقطه‌ای نوع یک: ابتدا یک عدد تصادفی (j) بین یک تا شش که تعداد سطرها است، تولید می‌شود و سپس تمام ژن‌های سطر j تا $j+1$ از والد اول و ژن‌های سطر $j+1$ تا شش (end) از والد دوم به فرزند اول منتقل می‌شود. در مورد فرزند دوم نیز ژن‌های سطر j تا $j+1$ از والد دوم و ژن‌های سطر $j+1$ تا شش (end) از والد اول انتخاب می‌شود. این عملگر در شکل ۵، نشان داده شده است.

والد ۱

۷	۱۰	۴	۹	۵	۱	۸	۶	۲	۳
۵	۸	۹	۶	۲	۷	۴	۱	۳	۱۰
۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۲	۲
۲	۲	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۲
۱	۱	۳	۲	۳	۲	۲	۱	۲	۳

والد ۲

۷	۱۰	۴	۵	۳	۲	۶	۹	۱	۸
۸	۶	۵	۴	۷	۳	۱۰	۱	۹	۲
۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱
۲	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۲
۲	۲	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱
۳	۳	۳	۱	۳	۱	۱	۱	۳	۱

فرزند ۱

۷	۱۰	۴	۹	۵	۱	۸	۶	۲	۳
۵	۸	۹	۶	۲	۷	۴	۱	۳	۱۰
۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱
۲	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۲
۲	۲	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱
۳	۳	۳	۱	۳	۱	۱	۱	۳	۱

فرزند ۲

۷	۱۰	۴	۵	۳	۲	۶	۹	۱	۸
۸	۶	۵	۴	۷	۳	۱۰	۱	۹	۲
۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۲	۲
۲	۲	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۲
۱	۱	۳	۲	۳	۲	۲	۱	۲	۳

شکل ۵. عملگر تقاطع تک نقطه‌ای نوع یک

تقاطع تک نقطه‌ای نوع دو: ابتدا یک عدد تصادفی (i) بین یک تا N انتخاب می‌شود که N تعداد ستون‌ها (تعداد مشتری‌ها یا هاب‌های بالقوه) است؛ سپس ژن‌های تمامی سطرها و نیز ستون‌های ۱ تا i از والد اول به فرزند اول منتقل می‌شود. ژن‌های سطرهای یک و دو و ستون‌های i+1 تا N، مانند والد اول و بر اساس توالی‌شان در والد دوم به فرزند اول منتقل می‌شود.

در نهایت نیز ژن‌های سطرهای ۳ تا ۶ و ستون‌های $i+1$ تا N از والد دوم به فرزند اول منتقل می‌شود. شکل ۶ این عملگر را نشان می‌دهد.

والد ۱

۷	۱۰	۴	۹	۵	۱	۸	۶	۲	۳
۵	۸	۹	۶	۲	۷	۴	۱	۳	۱۰
۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۲	۲
۲	۲	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۲
۱	۱	۳	۲	۳	۲	۲	۱	۲	۳

والد ۲

۷	۱۰	۴	۵	۳	۲	۶	۹	۱	۸
۸	۶	۵	۰	۷	۳	۱۰	۱	۹	۲
۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱
۲	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۲
۲	۲	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱
۳	۳	۳	۱	۳	۱	۱	۱	۳	۱

فرزند ۱

۷	۱۰	۴	۹	۵	۳	۲	۶	۱	۸
۵	۸	۹	۶	۴	۷	۳	۱۰	۱	۳
۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱
۱	۲	۲	۱	۱	۲	۲	۱	۱	۲
۲	۲	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱
۱	۱	۳	۲	۳	۱	۱	۱	۳	۱

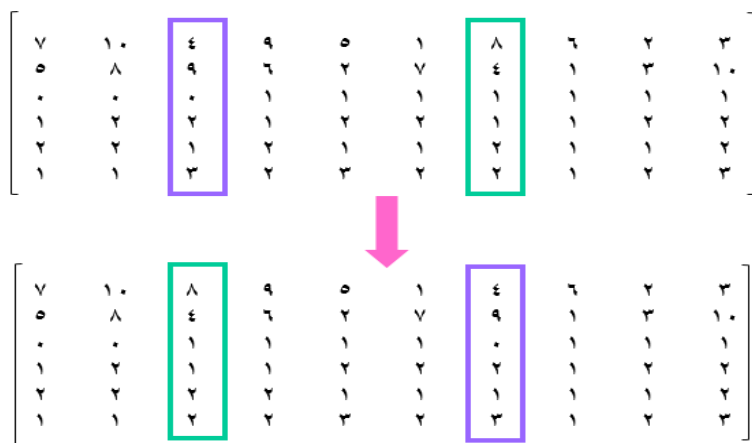
فرزند ۲

۷	۱۰	۴	۵	۹	۱	۸	۶	۳	۱۰
۸	۶	۵	۰	۹	۲	۷	۱	۳	۱۰
۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱
۲	۱	۱	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۲
۲	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۲
۳	۳	۳	۱	۳	۲	۲	۱	۲	۳

شکل ۶ عملگر تقاطع تک‌نقطه‌ای نوع دو

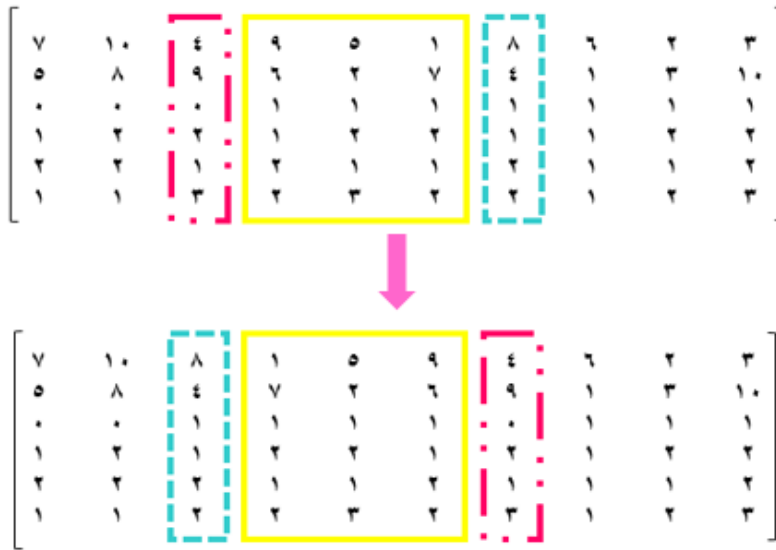
عملگر جهش. در این عملگر ژنی از کروموزوم جهش می‌یابد و این بدان معنا است که الگوریتم نواحی گسترده‌تری از فضا را جست‌وجو می‌کند. عملگر جهش مورد استفاده در این پژوهش به شرح زیر است:

جهش نوع یک: Swap یا جابجایی دوتایی است. دو ستون از کروموزوم به تصادف انتخاب و با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند. شکل ۷، این جهش را به تصویر کشیده است.



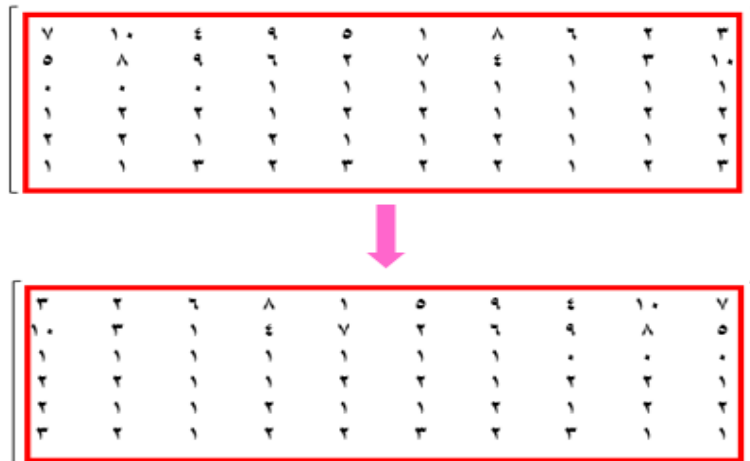
شکل ۷. جهش نوع یک Swap

جهش نوع دو: معکوس‌سازی است. دو ستون به تصادف انتخاب می‌شود و سپس این دو ستون و ستون‌های مابین آن‌ها به صورت معکوس قرار می‌گیرند. شکل ۸، نمایانگر جهش نوع دوم است.



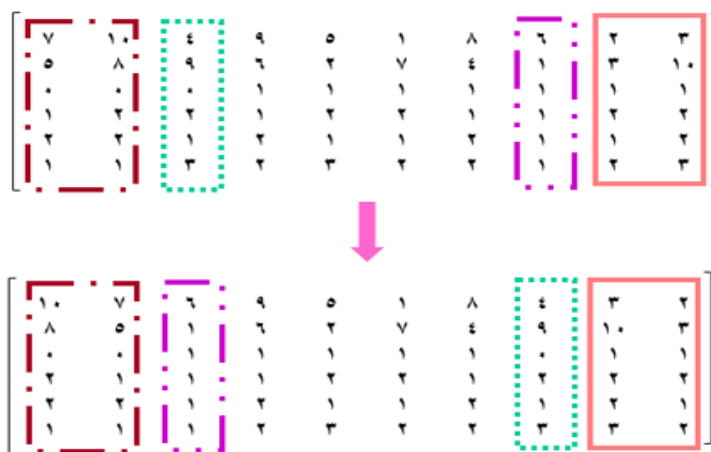
شکل ۸. جهش نوع دو

جهش نوع سوم: کل ستون‌های یک تا N معکوس می‌شوند. این جهش در شکل ۹، نشان داده شده است.



شکل ۹. جهش نوع سوم

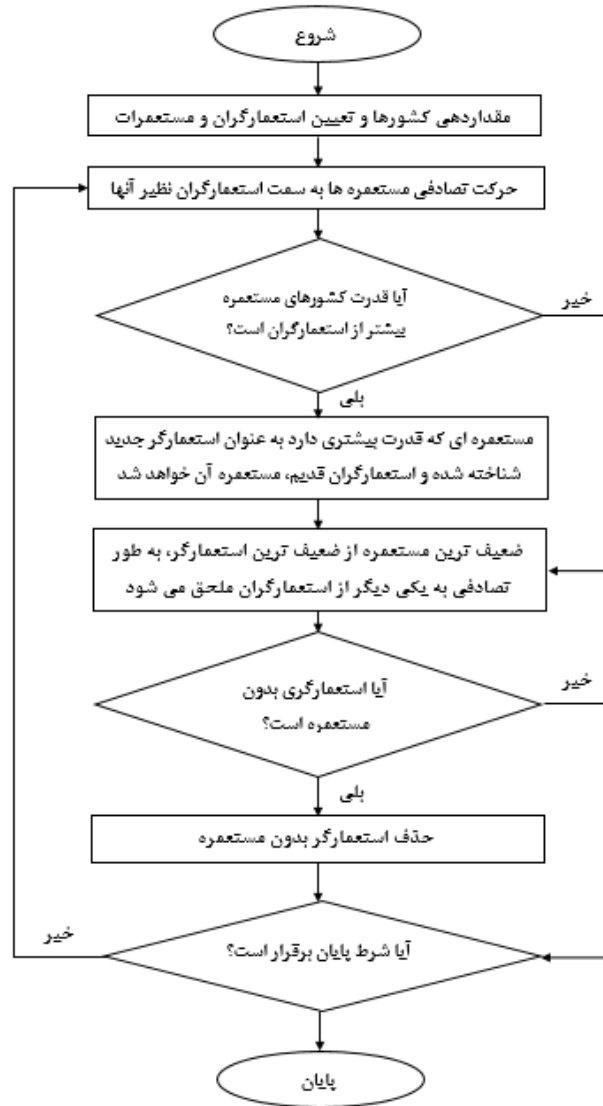
جهش نوع چهارم: دو ستون به تصادف انتخاب شده و سپس ستون‌های ماقبل از ستون انتخابی اول و ستون‌های بعد از ستون انتخابی دوم معکوس می‌شوند. خود این دو ستون نیز معکوس می‌شوند. شکل ۱۰، این جهش را به نمایش گذاشته است.



شکل ۱۰. جهش نوع چهارم

الگوریتم رقابت استعماری. الگوریتم رقابت استعماری یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است که علاوه بر توجه به تکامل زیستی انسان و سایر موجودات، به تکامل اجتماعی و تاریخی نیز به عنوان پیچیده‌ترین حالت تکامل توجه می‌کند [۱۷]. این الگوریتم نخستین بار توسط آتش پز گرگری و لوکاس^۱ (۲۰۰۷)، توسعه داده شد و پس از آن کاربرد نسبتاً زیادی در مسائل بهینه‌سازی پیدا کرد [۶]. نحوه نمایش جواب در این الگوریتم مشابه با روندی است که برای الگوریتم ژنتیک ارائه شد. مراحل اصلی این الگوریتم که برای حل مدل پیشنهادی توسعه داده شده است در فلوچارت شکل ۱۱، مشاهده می‌شود.

۱. Atashpaz-Gargari and Lucas



شکل ۱۱. فلوجارت الگوریتم ICA

تنظیم پارامتر. از آنجاکه تنظیم پارامتر می‌تواند به بهبود نسبی در کیفیت راه‌حل‌ها و همگرایی سریع‌تر الگوریتم‌ها منجر شود، در این پژوهش از روش تاگوچی برای تنظیم پارامتر استفاده شده است. جدول‌های ۱ و ۲، مقدار سطوح پارامترها را برای دو الگوریتم GA و ICA نشان می‌دهد. پارامترهای NPop و MaxIteration به صورت زوج مرتب در نظر گرفته شده‌اند و ۶ سطح برای آن‌ها در نظر گرفته شده که ضربشان عدد ثابت ۵۰۰۰ است و بررسی می‌شود که کدام ترکیب برای الگوریتم‌ها مناسب‌تر است.

جدول ۱. NPop&MaxIt و سطوح آن‌ها برای الگوریتم GA و ICA

الگوریتم	پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۵	سطح ۶
GA, ICA	NPop&MaxIt	(۱۰,۵۰۰)	(۵۰۰,۱۰)	(۲۵,۲۰۰)	(۲۰۰,۲۵)	(۱۰۰,۵۰)	(۵۰,۱۰۰)

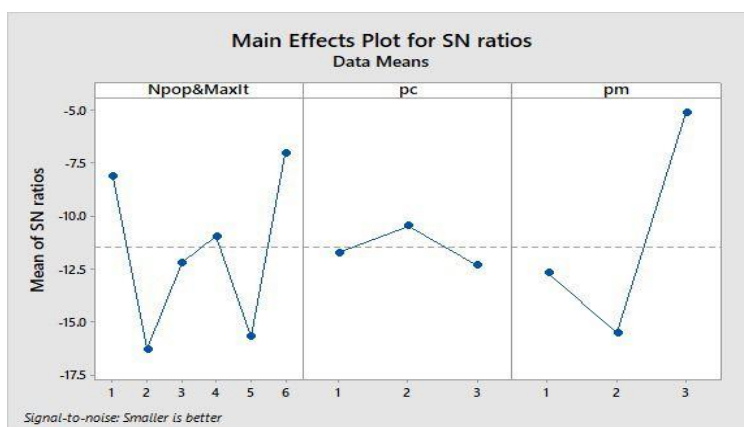
جدول ۲. عوامل قابل کنترل و سطوح آن‌ها برای الگوریتم GA و ICA

الگوریتم	پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
GA	Pc	۰/۷	۰/۸	۰/۹۸
	Pm	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲
	NImp	۵	۱۰	۱۵
ICA	Prevolve	۰/۱	۰/۲	۰/۳
	teta	۰/۲	۰/۳	۰/۴

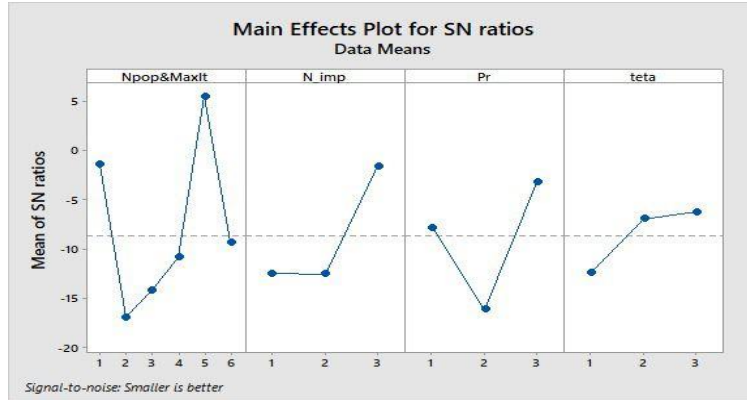
در روش تاگوچی از نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده می‌شود که در آن S متغیر پاسخ و N انحراف استاندارد است و نسبت S/N مقدار تغییر در متغیر پاسخ را نشان می‌دهد. هدف حداکثر کردن S/N است و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\eta = \left(\frac{S}{N}\right) = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n}\right) \sum_i (y_i^2) \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

در فرمول ۲۷، n و y_i به ترتیب معرف تعداد آزمایش‌ها و مقدار پاسخ موردنظر فرآیند در آزمایش‌نام هستند. شکل‌های ۱۲ و ۱۳، مقادیر شاخص S/N را در سطوح مختلف الگوریتم‌ها نشان می‌دهد که از نرم‌افزار MINITAB 17 به دست آمده است. جدول ۳، نیز مقدار سطوح بهینه پارامترهای دو الگوریتم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. چگونگی تغییر مقادیر شاخص S/N در سطوح مختلف الگوریتم GA

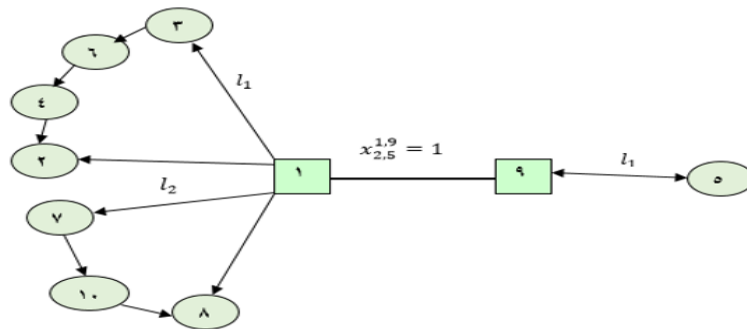


شکل ۱۳. چگونگی تغییر مقادیر شاخص S/N در سطوح مختلف الگوریتم ICA

جدول ۳. سطوح بهینه پارامترهای الگوریتم GA و ICA

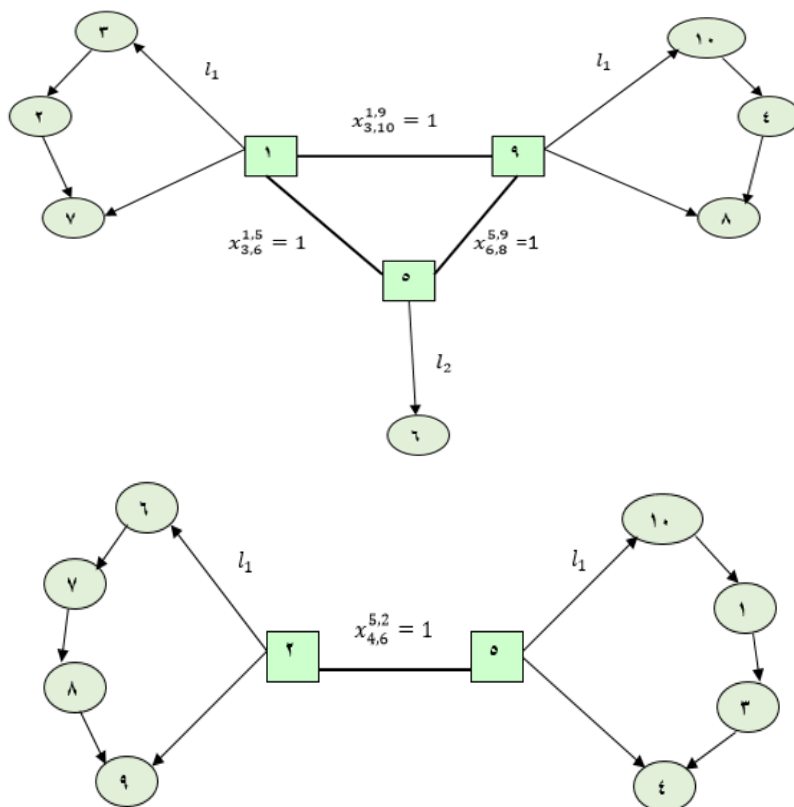
الگوریتم	پارامتر	مقدار بهینه
GA	NPop&Max It	(۱۰۰، ۵۰)
	Pc	۰/۸
	Pm	۰/۲
ICA	NPop&Max It	(۱۰۰، ۵۰)
	NImp	۱۵
	Prevolve	۰/۳
	Θ	۰/۴

بررسی صحت و درستی مدل. به منظور اطمینان از صحت مدل پیشنهادی، یک مثال در دو حالت بدون بالانس و با بالانس توسط نرم‌افزار GAMS و حل‌کننده cplex ارائه می‌شود. مدل بدون بالانس. شکل ۱۴، مدل بدون بالانس را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد که در آن تعداد کل گره‌های موجود در شبکه ۱۰ گره است و دو گره ۱ و ۹ به عنوان هاب انتخاب می‌شوند. شکل ۱۴، شبکه این مثال را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. گرافیکی از جواب GAMS برای مسئله بدون بالانس

مدل با بالانس. در این مدل، $\theta = 2$ و پارامترهای دیگر شبیه به بخش قبلی هستند. شکل ۱۵، راه‌حل‌های به‌دست‌آمده را برای سطوح مختلف ظرفیت ($q=2$ و $q=3$) نشان می‌دهد.



شکل ۱۵. گرافیکی از جواب GAMS برای مسئله با بالانس

تحلیل نتایج. به‌منظور مقایسه کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری، این الگوریتم‌ها در ابعاد مختلف بررسی و مقدار تابع هدف به‌عنوان معیار ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری در نظر گرفته شده است. الگوریتم‌های ارائه‌شده با نرم‌افزار متلب نسخه 2014a کدنویسی شده‌اند و بر روی یک رایانه با مشخصات RAM 6G و CPU Corei7 2GHz اجرا شده است. جدول ۴، مقادیر پارامترهای مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۴. مقادیر پارامترهای مسئله برای حل توسط الگوریتم‌های فراابتکاری

مقدار	پارامتر
۵, ۱۰, ۱۵, ۲۰, ۲۵, ۳۰, ۳۱, ۴۰, ۵۰, ۶۰, ۷۰, ۸۰, ۹۰, ۱۰۰, ۱۱۰, ۱۲۰, ۱۳۰, ۱۴۰, ۱۵۰, ۱۶۰, ۱۷۰, ۱۸۰, ۱۹۰, ۲۰۰	N
۰,۰۵	α
۱۰۰۰۰۰	T
uniform (۱۰, ۳۰)	w_{ij}
uniform (۵۰, ۱۵۰)	λ_{uv}
۳	L
uniform (۵۰۰, ۲۰۰۰)	Γ_k^q
uniform (۲۰۰, ۴۰۰)	\check{c}_{uv}
uniform (۵۰۰, ۴۰۰۰)	a_k^q
uniform (۵۰, ۸۰)	\hat{c}_{ik}
uniform (۲۰۰, ۶۰۰)	\hat{c}_l
uniform (۱۰۰, ۲۰۰)	c_{km}

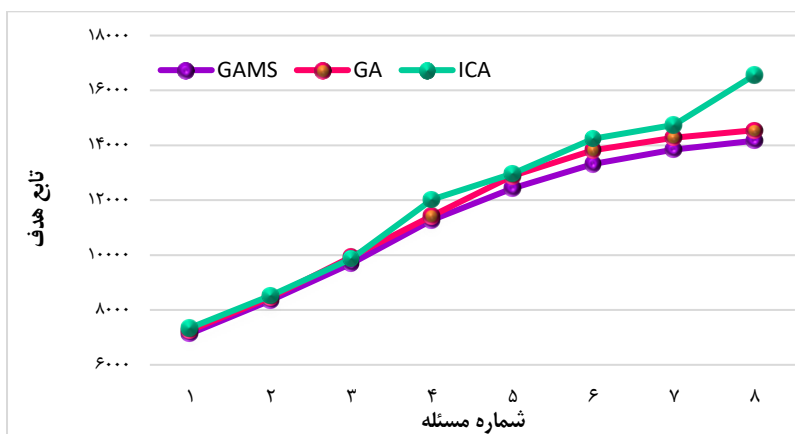
نتایج آزمایش‌ها در جدول ۵، آورده شده است. یادآوری می‌شود که به دلیل پیچیدگی مسئله، GAMS تنها قادر به حل ۸ مسئله با ابعاد کوچک است. برای حل با دو الگوریتم فراابتکاری، هر یک از مسائل نمونه پنج مرتبه اجرا شده و میانگین پنج بار اجرا در جدول آمده است؛ همچنین کمترین میزان تابع هدف در پنج بار اجرای هر مسئله با هر الگوریتم، تحت عنوان Best در جدول ۴، گزارش شده است.

جدول ۵. نتایج بهینه الگوریتم‌های فراابتکاری و GAMS

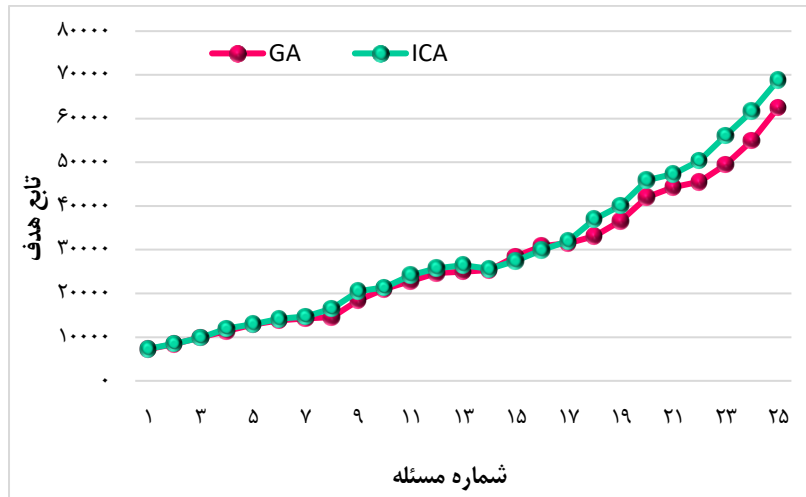
ICA		GA		GAMS	تعداد گره ها	شماره مسائل نمونه
Average	Best	Average	Best			
۷۳۴۸	۷۲۶۵	۷۲۵۶	۷۱۶۶	۷۱۳۵/۵	۵	۱
۸۵۳۱	۸۴۲۵	۸۴۵۷	۸۳۵۱	۸۳۴۶/۳	۱۰	۲
۹۸۶۲	۹۷۱۵	۹۹۳۸	۹۸۴۰	۹۶۸۷/۵	۱۵	۳
۱۲۰۲۷	۱۱۸۱۴	۱۱۴۳۲	۱۱۲۹۶	۱۱۲۷۵	۲۰	۴
۱۲۹۶۷	۱۲۴۶۹	۱۲۸۹۵	۱۲۶۲۱	۱۲۴۳۲	۲۵	۵
۱۴۲۳۹	۱۴۰۳۰	۱۳۸۲۷	۱۳۵۰۰	۱۳۳۲۷	۲۷	۶
۱۴۷۴۴	۱۴۱۵۳	۱۴۲۷۶	۱۴۰۴۰	۱۳۸۴۹	۳۰	۷
۱۶۵۶۴	۱۶۲۰۷	۱۴۵۵۱	۱۴۳۰۵	۱۴۱۶۷	۳۱	۸
۲۰۵۴۲	۲۰۰۶۷	۱۸۴۵۷	۱۸۱۷۷	-	۴۰	۹
۲۱۳۷۲	۲۰۶۰۴	۲۱۰۰۹	۲۰۶۹۸	-	۵۰	۱۰

ICA		GA		GAMS	تعداد گره ها	شماره مسائل نمونه
Average	Best	Average	Best			
۲۴۱۷۷	۲۳۶۷۰	۲۲۸۴۹	۲۲۳۳۹	-	۶۰	۱۱
۲۵۸۱۱	۲۵۰۱۸	۲۴۶۶۵	۲۴۵۳۸	-	۷۰	۱۲
۲۶۴۳۴	۲۶۱۱۲	۲۴۹۵۹	۲۴۷۰۳	-	۸۰	۱۳
۲۵۶۶۸	۲۵۱۶۰	۲۵۳۶۱	۲۵۰۶۲	-	۹۰	۱۴
۲۷۴۹۲	۲۷۳۲۶	۲۸۴۶۹	۲۷۶۸۵	-	۱۰۰	۱۵
۲۹۹۶۴	۲۹۱۰۹	۳۰۸۲۸	۲۹۷۸۶	-	۱۱۰	۱۶
۳۲۰۱۹	۳۱۸۵۶	۳۱۴۹۶	۳۱۰۰۴	-	۱۲۰	۱۷
۳۶۹۷۸	۳۶۱۸۲	۳۳۱۴۲	۳۲۶۳۷	-	۱۳۰	۱۸
۴۰۱۱۸	۳۸۹۸۴	۳۶۶۵۰	۳۵۷۶۰	-	۱۴۰	۱۹
۴۵۸۹۰	۴۵۰۴۸	۴۲۰۴۸	۴۱۰۰۲	-	۱۵۰	۲۰
۴۷۲۸۴	۴۶۰۴۹	۴۴۳۳۷	۴۳۸۷۸	-	۱۶۰	۲۱
۵۰۳۷۲	۴۹۰۴۳	۴۵۵۷۶	۴۴۳۲۳	-	۱۷۰	۲۲
۵۶۱۸۰	۵۴۶۷۳	۴۹۴۸۳	۴۹۱۸۵	-	۱۸۰	۲۳
۶۱۷۳۷	۶۰۱۲۱	۵۴۹۷۹	۵۳۴۶۰	-	۱۹۰	۲۴
۶۸۸۶۰	۶۸۲۹۶	۶۲۵۶۴	۶۰۴۰۸	-	۲۰۰	۲۵

نتایج جدول ۵، نشان می‌دهد که حل‌کننده cplex نرم‌افزار GAMS در مسائل ۱ تا ۸ به جواب دقیق دست می‌یابد. با مقایسه دو الگوریتم پیشنهادی با GAMS و همچنین مقایسه دو الگوریتم فراابتکاری با یکدیگر مشخص شد که الگوریتم GA عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ICA دارد. شکل‌های ۱۶ و ۱۷، نشان‌دهنده این مسئله هستند.



شکل ۱۶. مقایسه جواب بهینه GAMS، GA و ICA



شکل ۱۷. مقادیر تابع هدف دو الگوریتم GA و ICA

شرط توقف الگوریتم‌ها، حداکثر زمان محاسباتی است که برای مسائل کوچک ۱ دقیقه برای مسائل متوسط ۴ و برای مسائل با ابعاد بزرگ ۹ دقیقه در نظر گرفته شده است. ارزیابی آماری الگوریتم‌ها. برای تعیین وجود تفاوت معنادار بین عملکرد الگوریتم‌ها از تحلیل ANOVA استفاده می‌شود. بدین منظور معیار درصد انحراف نسبی (RPD) با استفاده از رابطه ۲۸، برای دو الگوریتم محاسبه می‌شود. مقدار RPD نشان می‌دهد که جواب‌ها در هر الگوریتم تا چه اندازه از بهترین جواب به دست آمده فاصله دارند.

$$RPD = \frac{(method\ sol - best\ sol)}{best\ sol} * 100 \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

در رابطه ۳۱، Method sol جواب حاصل از اجرای الگوریتم فراابتکاری در هر آزمایش و Best sol بهترین جواب (کمترین جواب) به دست آمده در هر آزمایش است. در هشت مثال اول که GAMS جواب بهینه را ارائه می‌کند، جواب الگوریتم‌های فراابتکاری با جواب بهینه حاصل از GAMS مقایسه می‌شود و در بقیه مثال‌های ارائه شده جواب‌های دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه می‌شوند. جدول ۶ مقدار \overline{RPD} تابع هدف الگوریتم‌ها را به‌ازای ابعاد مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۷ مقدار \overline{RPD} مربوط به معیار تابع هدف

ICA	GA	شماره مسائل نمونه
۲/۹۸	۱/۶۹	۱
۲/۲۱	۱/۳۲	۲
۱/۸۱	۲/۵۹	۳
۶/۶۶	۱/۳۹	۴
۴/۳۱	۳/۷۲	۵
۶/۸۵	۳/۷۶	۶
۶/۴۶	۳/۰۸	۷
۱۶/۹۱	۲/۷۱	۸
۱۳/۰۱	۱/۵۴	۹
۳/۷۳	۱/۹۷	۱۰
۸/۲۳	۲/۲۹	۱۱
۵/۱۹	۰/۵۲	۱۲
۷/۰۱	۱/۰۳	۱۳
۲/۴۲	۱/۱۹	۱۴
۰/۶۱	۴/۱۸	۱۵
۲/۹۴	۵/۹	۱۶
۳/۲۷	۱/۵۹	۱۷
۱۳/۳	۱/۵۵	۱۸
۱۲/۱۹	۲/۴۹	۱۹
۱۱/۹۲	۲/۵۵	۲۰
۷/۷۶	۱/۰۵	۲۱
۱۳/۶۵	۲/۸۳	۲۲
۱۴/۲۲	۰/۶۱	۲۳
۱۵/۴۸	۲/۸۴	۲۴
۱۳/۹۹	۳/۵۷	۲۵

جدول‌های ۷ و ۸، نتایج تحلیل واریانس را برای تابع هدف الگوریتم‌ها نشان می‌دهد که از \overline{RPD} در محاسبه آن‌ها استفاده شده است. مقدار کمتر از $۰/۰۵$ برای P-Value نشان‌دهنده تفاوت معنادار بین پاسخ‌های دو الگوریتم است. جدول ۷، نتایج تحلیل واریانس تابع هدف الگوریتم‌ها را در ابعاد کوچک نشان می‌دهد.

جدول ۷. تحلیل واریانس تابع هدف الگوریتم‌ها در ابعاد کوچک

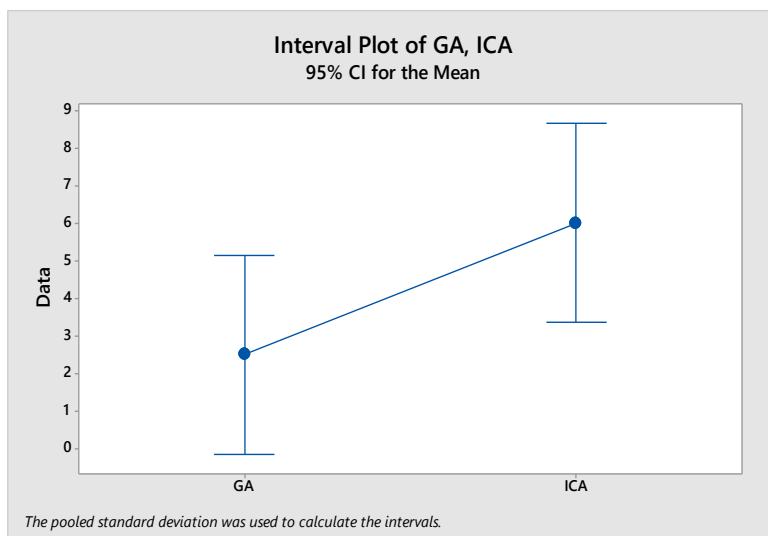
Source	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
Factor	۱	۴۸/۷۷	۴۸/۷۷	۳/۹۹	۰/۰۶۶
Error	۱۴	۱۷۱/۱۴	۱۲/۲۲		
Total	۱۵	۲۱۹/۹۱			

مقدار $P\text{-Value} = 0.066$ ، عدم تفاوت معنادار بین الگوریتم‌ها را در ابعاد کوچک نشان می‌دهد. نتایج تحلیل واریانس تابع هدف الگوریتم‌ها در ابعاد بزرگ در جدول ۸، نشان داده شده است. مقدار $P\text{-Value} = 0.00$ برای تابع هدف در ابعاد بزرگ وجود تفاوت بین الگوریتم‌ها را در این ابعاد نمایش می‌دهد.

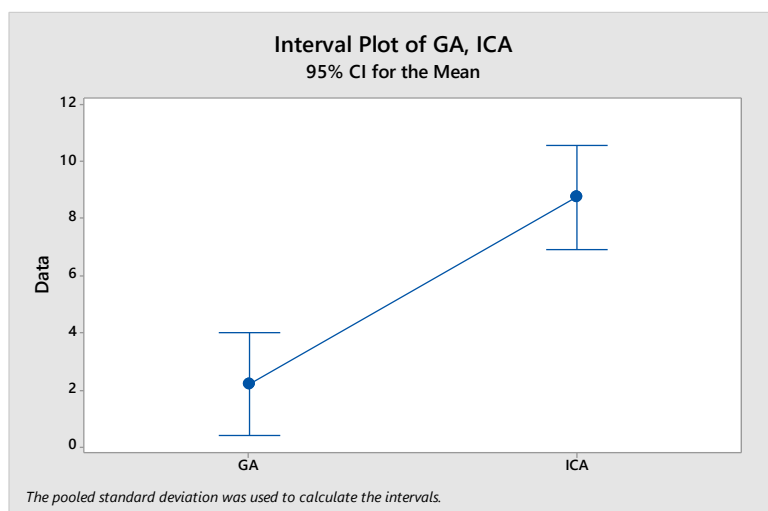
جدول ۸. تحلیل واریانس تابع هدف الگوریتم‌ها در ابعاد بزرگ

Source	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
Factor	۱	۳۶۳/۹	۳۶۳/۸۸	۲۷/۰۳	.
Error	۳۲	۴۳۰/۷	۱۳/۴۶		
Total	۳۳	۷۹۴/۶			

به منظور درک بهتر کارایی الگوریتم‌ها فواصل اطمینان ۹۵ درصد هم‌زمان برای آن‌ها رسم می‌شود. شکل ۱۸، نمودار فواصل اطمینان را برای ابعاد کوچک و شکل ۱۹، برای ابعاد بزرگ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، الگوریتم GA میانگین کمتری نسبت به الگوریتم ICA دارد و در تمامی ابعاد عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد.

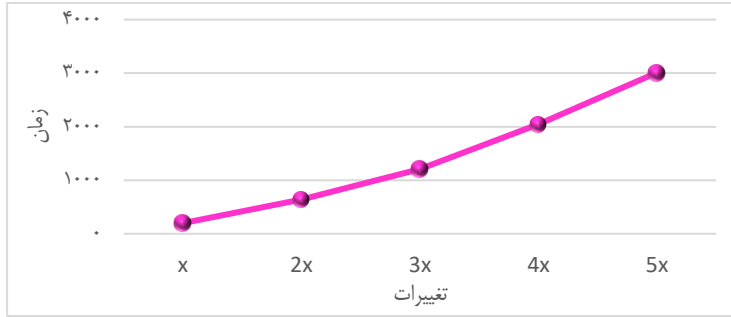


شکل ۱۸. نمودار فواصل اطمینان ۹۵ درصد الگوریتمها در ابعاد کوچک



شکل ۱۹. نمودار فواصل اطمینان ۹۵ درصد الگوریتمها در ابعاد بزرگ

تحلیل پارامترهای مؤثر بر پیچیدگی. با افزایش تعداد گرهها در مدل پیشنهادی، زمان حل به صورت نمایی در حال افزایش است و این یکی از نشانههای پیچیدگی مدل می باشد. شکل ۲۰، این مطلب را نشان می دهد.

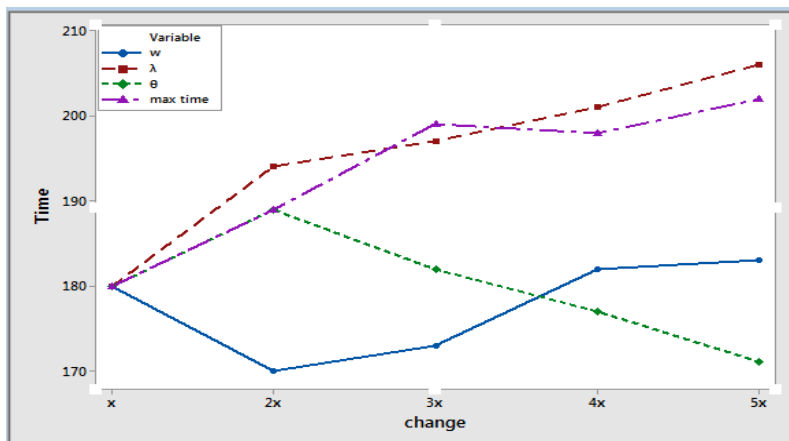


شکل ۲۰. نمودار زمان نسبت به افزایش تعداد گره‌ها

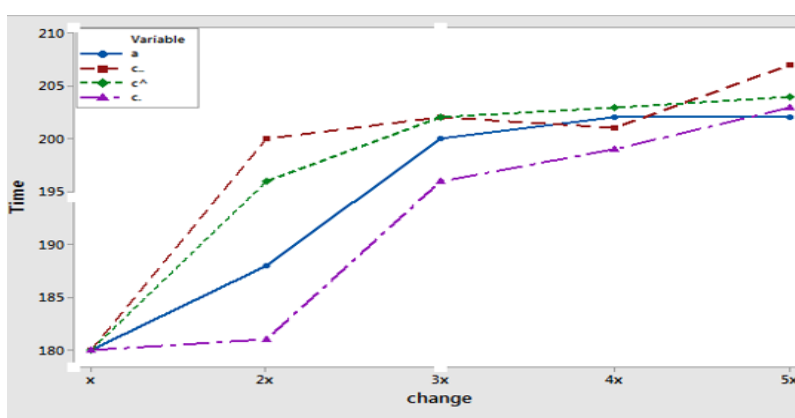
برای تحلیل کامل پارامترهای مؤثر بر پیچیدگی، جدول ۹، مقادیر پارامترها را نشان می‌دهد که هر مقدار، دو، سه، چهار و پنج برابر شده و زمان اجرای آن به‌دست آمده است. شکل‌های ۲۱ و ۲۲، افزایش زمان را نسبت به تغییرات پارامترها نشان می‌دهد.

جدول ۹. مقادیر پارامترها

پارامتر	توضیح	مقدار
A	هزینه بازگشایی هاب	۵۰۰۰
\hat{c}	هزینه کمان (u,v)	۲۰۰
\hat{c}	هزینه رسیدگی تقاضا	۱۰۰
\hat{c}_l	هزینه تخصیص وسیله‌ی نقلیه	۳۰۰
W	جریان تقاضا	۷۰
Λ	زمان سفر	۲۰۰
Θ	نیازمندی‌های تعادل	۳
T	ماکزیمم زمان مجاز برای هر تور	۱۰۰۰۰۰

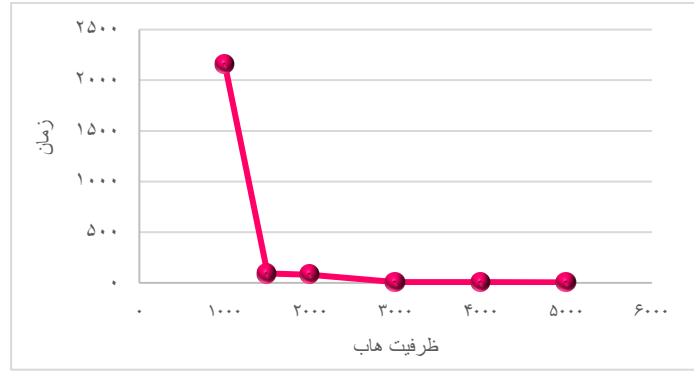


شکل ۲۱. نمودار زمان نسبت به افزایش پارامترها



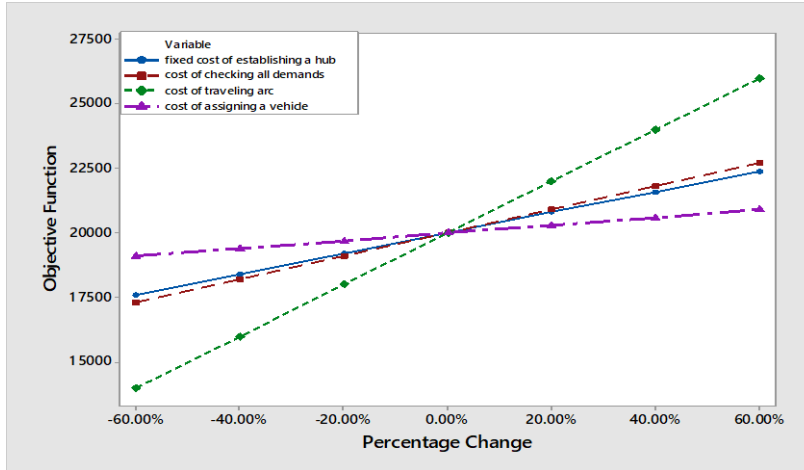
شکل ۲۲. نمودار زمان نسبت به افزایش پارامترهای هزینه

با توجه به شکل‌های ۲۱ و ۲۲، افزایش تعداد گره‌ها در شبکه از تأثیرگذارترین عوامل در افزایش زمان حل است؛ همچنین پارامتر ظرفیت هاب از عوامل مؤثر دیگر در پیچیدگی زمانی است که شکل ۲۳، نشان می‌دهد کاهش ظرفیت هاب‌ها سبب افزایش زمان اجرا می‌شود.

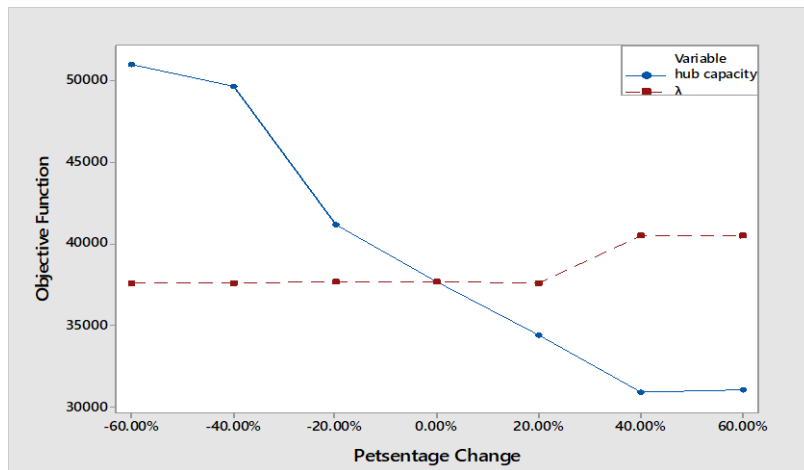


شکل ۲۳. نمودار زمان نسبت به افزایش پارامتر ظرفیت هاب

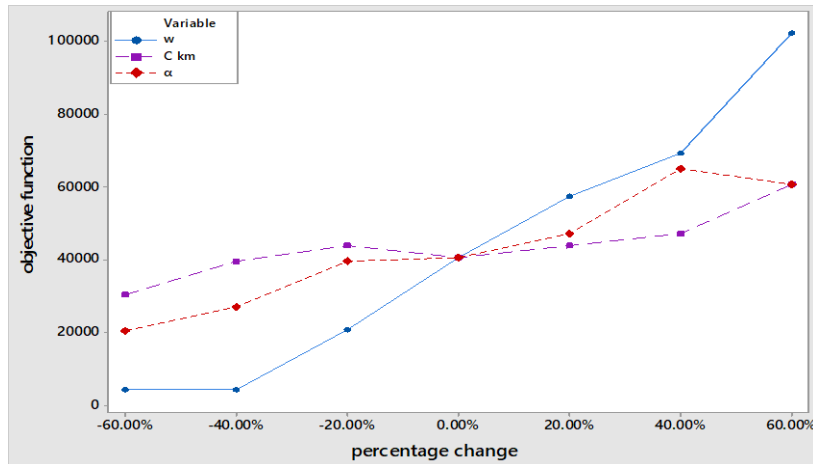
تحلیل حساسیت. در این بخش به منظور بررسی رفتار تابع هدف نسبت به تغییرات پارامترهای مدل پیشنهادی، تحلیل حساسیت انجام می‌شود. در شکل ۲۴، اثر تغییرات مقادیر پارامترهای C_i و a_k^q , \hat{c}_{ik} , \hat{c}_{uv} بر تابع هدف ارائه شده است؛ به گونه‌ای که این تغییرات بین -60 تا $+60$ درصد با گام 20 درصد انجام می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار هر یک از هزینه‌ها، مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد. واضح است که تابع هدف نسبت به هزینه‌های سفر حساس‌تر از سایر پارامترها است؛ همچنین این تابع نسبت به هزینه‌های تخصیص وسیله نقلیه حساسیت کمتری دارد. علاوه بر این، تأثیر تغییرات مقادیر پارامترهای λ_{uv} و Γ_k^q در شکل ۲۵، نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش زمان سفر، مقدار تابع هدف به‌کندی افزایش می‌یابد؛ از سوی دیگر، افزایش ظرفیت هاب‌ها به کاهش زیادی در میزان تابع هدف منجر می‌شود. شکل ۲۶، اثر تغییرات مقادیر پارامترهای w_{ij} , α و c_{km} بر تابع هدف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، میزان تغییرات جریان تقاضا از مشتری i به مشتری j (w_{ij}) تأثیر بیشتری را نسبت به دو پارامتر دیگر بر تابع هدف به نمایش می‌گذارد؛ بنابراین هزینه‌های سفر، ظرفیت هاب‌ها و میزان تقاضا از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در مدیریت هزینه‌های کل یک شبکه مکان‌یابی مسیریابی هاب چندگانه (MMHLRP) هستند.



شکل ۲۴. اثر تغییرات \hat{c}_l , \hat{c}_{uv} , \hat{c}_{ik} , a_k^q بر تابع هدف



شکل ۲۵. اثر تغییرات Γ_k^q , λ_{uv} بر تابع هدف



شکل ۲۶. اثر تغییرات C_{km} , α , W_{ij} بر تابع هدف

دیدگاه‌های مدیریتی. اهمیت طراحی مناسب شبکه‌های حمل‌ونقل و مدیریت مؤثر جریان کالا بین مبدأها و مقصدهای مختلف نیازمند شبکه‌های هاب بهینه است که اجازه می‌دهد لینک‌های کاملاً متصل با لینک‌هایی که غیرمستقیم با یکدیگر مرتبط هستند، جایگزین شوند. هدف اصلی ارائه یک برنامه مقرون‌به‌صرفه برای طراحی شبکه هاب (HS) و برنامه مسیریابی برای وسایل نقلیه است. در شبکه‌های HS عدم‌تعادل در اتصال گره‌های غیرهاب یک مسئله مهم است و ممکن است حجم بالای تقاضا در برخی نقاط غیرهاب و تعداد بیشتر اتصالات این گره‌ها به هاب به شدت بر کیفیت خدمات تأثیرگذار باشد؛ در نتیجه بالانس کردن اتصالات تعداد گره‌های غیرهاب به هاب و تعیین ظرفیت مناسب برای هر هاب، علاوه بر افزایش کارایی شبکه، می‌تواند سبب افزایش سطح خدمات به نقاط تقاضا شود. بی‌توجهی به موارد ذکر شده می‌تواند به خدمات کمتر از سطح برنامه‌ریزی شده منجر شود و در نتیجه عملکرد کل سیستم را تحت تأثیر قرار دهد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مطابق با پژوهش‌های صورت‌گرفته، مسئله مکان‌یابی مسیریابی هاب طی دهه‌های اخیر جایگاه مهمی را در زمینه مکان‌یابی و مسیریابی به خود اختصاص داده است؛ همچنین با توجه به کاربردهای فراوان مسئله مکان‌یابی مسیریابی هاب در مواردی نظیر خدمات پستی، حمل بار، سیستم‌های مخابراتی، خطوط هوایی و نیز صرفه‌جویی اقتصادی حاصل از آن، این مسئله موضوع مهمی است که در این پژوهش به آن پرداخته شد. در همین راستا، ابتدا یک مدل ریاضی جدید برای مسئله MMHLRP با عملیات بارگیری و تحویل هم‌زمان پیشنهاد شده است. از مسائل مهم مطرح‌شده می‌توان در نظر گرفتن ظرفیت‌های گوناگون و ملاحظات تعادل‌سازی را در تخصیص گره‌ها به هاب بیان کرد. علاوه بر این به منظور حل مدل پیشنهادی دو الگوریتم

تکاملی کارآمد، از جمله GA و ICA با نمایشی از راه‌حل‌های مناسب استفاده شده است. سرانجام، گستره وسیعی از مسائل برای نشان دادن اعتبار مدل پیشنهادی و رویکردهای حل، بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها و نیز مقایسه‌های آماری نشان داد که الگوریتم GA نسبت به الگوریتم ICA دارای عملکرد بهتری از نظر تابع هدف است. از طرف دیگر، نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که هزینه‌های سفر، ظرفیت هاب‌ها و میزان تقاضا از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر مدیریت کل هزینه‌های مسئله بررسی شده هستند. پژوهش‌های آتی می‌توانند بر موضوع‌هایی همچون موارد زیر تمرکز کنند: ۱. چندهدفه‌کردن مدل، به‌عنوان نمونه می‌توان هدف کاهش بیشینه زمان حمل‌ونقل در شبکه هاب و یا هدف افزایش کمینه قابلیت اطمینان خدمات در شبکه را به‌عنوان هدف دوم در نظر گرفت؛ ۲. توسعه مدل‌سازی ریاضی با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت برای کمان‌های موجود در شبکه هاب؛ ۳. در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت برای وسایل نقلیه تخصیصی به هاب‌ها؛ ۴. ارائه مدلی با در نظر گرفتن تخصیص چندگانه برای اتصال گره‌های غیرهاب به هاب‌ها؛ ۵. روش حل مرتبط با عدم قطعیت زمان سفر یا جریان تقاضا بین مبدأها و مقصدهای مختلف.

منابع

1. Abad, H.K.E., Vahdani, B., Sharifi, M. & Etebari, F. (2018). A bi-objective model for pickup and delivery pollution-routing problem with integration and consolidation shipments in cross-docking system. *Journal of Cleaner Production*, 193, 784-801.
2. Abbasi, M., Mokhtari, N., Shahvar, H., & Mahmoudi, A. (2019). Application of variable neighborhood search for solving large-scale many to many hub location routing problems. *Journal of Advances in Management Research*. Vol. 16 No. 5, pp. 683-697.
3. Ahmadzadeh, E. & Vahdani, B. (2017). A location-inventory-pricing model in a closed loop supply chain network with correlated demands and shortages under a periodic review system. *Computers & Chemical Engineering*, 101, 148-166.
4. Alumur S.A, Kara B.Y. (2008). Network hub location problems: the state of the art. *European Journal of Operational Research*, 190(1), 1–21.
5. Amin-Naseri, M. R., Yazdekhasti, A., & Salmasnia, A. (2018). Robust bi-objective optimization of uncapacitated single allocation p-hub median problem using a hybrid heuristic algorithm. *Neural Computing and Applications*, 29(9), 511-532.
6. Atashpaz-Gargari E. Lucas C. (2007). Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, singapore, 4661-4667.
7. Bashiri, M., Rezanezhad, M., Tavakkoli-Moghaddam, R. & Hasanzadeh, H., (2018). Mathematical modeling for a p-mobile hub location problem in a dynamic environment by a genetic algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 54, 151-169.
8. Büttün, C., Petrovic, S., & Muyltermans, L. (2021). The capacitated directed cycle hub location and routing problem under congestion. *European Journal of Operational Research*, 292(2), 714-734.
9. de Camargo R.S., de Miranda G. and Løkketangen A., 2013. A new formulation and an exact approach for the many-to-many hub location-routing problem. *Applied Mathematical Modelling*, 37(12-13), 7465-7480.
10. Campbell, J. F. (1994). Integer programming formulations of discrete hub location problems. *European Journal of Operational Research*, 72(2), 387-405.
11. Campbell, J. F., Ernst, A.T., Krishnamoorthy, M., Drezner, Z., & Hamacher, H.W. (2002). Hub Location Problems. *Facility Location: Applications and Theory*. Berlin, Springer. chapter.12, 373-407.
12. Çetiner, S., Sepil, C., & Süral, H. (2010). Hubbing and postal routing in postal delivery systems. *Ann. Oper. Res.* 181, 109–124.
13. Cheraghi, I., Heydari, J., & Razmi, J. (2015). The modeling of the multi-product hub location problem with considering financing methods. *The Journal of Industrial Management Perspective*, 4(4), 55-74. (In Persian)
14. Correia, I., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2010a). Single-assignment hub location problems with multiple capacity levels. *Transportation Research Part B*, 44(8-9), 1047-1066.
15. Correia, I., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2010b). The capacitated single-allocation hub location problem revisited: A note on a classical formulation. *European Journal of Operational Research*, 207(1), 92-96.
16. Correia, I., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2011). Hub and spoke network

- design with single-assignment, capacity decisions and balancing requirements. *Applied Mathematical Modelling*, 35(10), 4841-4851.
17. Gholami, H.R., Mehdizadeh, I., & Naderi, B. (2018). Mathematical modeling and Imperialist Competitive Algorithm for the jobshop flow assembly line problem. *The Journal of Industrial Management Perspective*, 8(1), 93-111. (In Persian)
 18. Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. University of Michigan Press.
 19. Khezerlou, H.S., Vahdani, B. & Yazdani, M. (2021). Designing a resilient and reliable biomass-to-biofuel supply chain under risk pooling and congestion effects and fleet management. *Journal of Cleaner Production*, 281, 125101.
 20. Khosravi, S., & Jokar, M. (2018). Many to many hub and spoke location routing problem based on the gravity rule. *Uncertain Supply Chain Management*, 6(4), pp.393-406.
 21. Lopes, M.C., de Andrade, C.E., de Queiroz, T.A., Resende, M.G. & Miyazawa, F.K. (2016). Heuristics for a hub location-routing problem. *Networks*, 68(1), 54-90.
 22. Meier, J.F. (2017). An improved mixed integer program for single allocation hub location problems with stepwise cost function. *International Transactions in Operational Research*, 24(5), 983-991.
 23. Memarpour, M., Hassannayebi, E., Miab, N.F. & Farjad, A. (2019). Dynamic allocation of promotional budgets based on maximizing customer equity. *Operational Research*, 1-25.
 24. Mohammadi, M., Dehbari, S., & Vahdani, B. (2014). Design of a bi-objective reliable healthcare network with finite capacity queue under service covering uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 72, 15-41.
 25. Mokhtari, N., & Abbasi, M. (2015). Applying VNPSO algorithm to solve the many-to-many hub location-routing problem in a large scale. *European Online Journal of Natural and Social Sciences: Proceedings*, 3(4 (s)), 647-656.
 26. Nagy G, Salhi, S., (1998). The many-to-many location-routing problem, *TOP* 6, 261-275.
 27. Niakan, F., Vahdani, B. & Mohammadi, M. (2015). A multi-objective optimization model for hub network design under uncertainty: An inexact rough-interval fuzzy approach. *Engineering Optimization*, 47(12), 1670-1688.
 28. Nikbakhsh, E., & Zgordi, S. H. (2014). The covering hub edge location problem under disturbance conditions. *The Journal of Industrial Management Perspective*, 4(1), 9-29. (In Persian)
 29. Ratli, M., Urošević, D., El Cadi, A.A., Brimberg, J., Mladenović, N. & Todosijević, R. (2020). An efficient heuristic for a hub location routing problem. *Optimization Letters*, 1-20.
 30. Rieck, J., Ehrenberg, C., & Zimmermann, J. (2014). Many-to-many location-routing with inter-hub transport and multi-commodity pickup-and-delivery. *European Journal of Operational Research*, 236(3), 863-878.
 31. Salimi, F. & Vahdani, B. (2018). Designing a bio-fuel network considering links reliability and risk-pooling effect in bio-refineries. *Reliability Engineering & System Safety*, 174, 96-107.

32. Shang, X., Yang, K., Jia, B., Gao, Z. & Ji, H. (2021). Heuristic algorithms for the bi-objective hierarchical multimodal hub location problem in cargo delivery systems. *Applied Mathematical Modelling*, 91, 412-437.
33. Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zandieh, M. & Razmi, J. (2012). Vehicle routing scheduling using an enhanced hybrid optimization approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(3), 759-774.
34. Vahdani, B., Niaki, S.T.A. & Aslazzade, S. (2017a). Production-inventory-routing coordination with capacity and time window constraints for perishable products: Heuristic and meta-heuristic algorithms. *Journal of cleaner production*, 161, 598-618.
35. Vahdani, B., Soltani, M., Yazdani, M. & Mousavi, S.M. (2017b). A three level joint location-inventory problem with correlated demand, shortages and periodic review system: Robust meta-heuristics. *Computers & Industrial Engineering*, 109, 113-129.
36. Vahdani, B. & Ahmadzadeh, E. (2019a). Designing a realistic ICT closed loop supply chain network with integrated decisions under uncertain demand and lead time. *Knowledge-Based Systems*, 179, 34-54.
37. Vahdani, B. & Shahramfard, S. (2019b). A truck scheduling problem at a cross-docking facility with mixed service mode dock doors. *Engineering Computations*.
38. Vahdani, B. (2019c). Assignment and scheduling trucks in cross-docking system with energy consumption consideration and trucks queuing. *Journal of Cleaner Production*, 213, 21-41.
39. Vahdani, B., Mansour, F., Soltani, M. & Veysmoradi, D. (2019d). Bi-objective optimization for integrating quay crane and internal truck assignment with challenges of trucks sharing. *Knowledge-Based Systems*, 163, 675-692.
40. Wasner M. Zäpfel G. 2004. An integrated multi-depot hublocation vehicle routing model for network planning of parcel service. *Int. J. Prod. Econ*, 90, 403-419.
41. Winsper, M., & Chli, M. (2013). Decentralized supply chain formation using max-sum loopy belief propagation. *Computational Intelligence*, 29(2), 281-309.
42. Xu, X., Zheng, Y., & Yu, L. (2018). A bi-level optimization model of LRP in collaborative logistics network considered backhaul no-load cost. *Soft Computing*, 22(16), 5385-5393.
43. Yang, X., Bostel, N. & Dejax, P. (2019). A MILP model and memetic algorithm for the hub location and routing problem with distinct collection and delivery tours. *Computers & Industrial Engineering*, 135, 105-119.
44. Zandieh, M., Amiri, M., Vahdani, B. & Soltani, R. (2009). A robust parameter design for multi-response problems. *Journal of computational and applied mathematics*, 230(2), 463-476.
45. Zhalechian M., Tavakkoli-Moghaddam R., Rahimi Y., & Jolai F. (2016). An interactive possibilistic programming approach for a multi-objective hub location problem: Economic and environmental design. *Applied Soft Computing*, 52, 699-713.