

## مدل بهینه مکان‌یابی قطب در شبکه‌های حمل و نقل با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

مقاله علمی - پژوهشی

شهریار افندی زاده\*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
حسام شعبانی صمغ آبادی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران  
حمید بیگدلی راد، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zargari@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۹ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

صفحه ۸۴-۶۳

### چکیده

در این پژوهش یک مدل ریاضی دو هدفه شامل حداقل کردن هزینه‌ها و حداقل کردن زمان حمل و نقل بین هر جفت گره ارائه گردید و با استفاده از دو الگوریتم چند هدفه ژنتیک و جستجوی هارمونی مورد ارزیابی قرار گرفت. از طرفی با توجه به این که هدف اعمال شرایط غیر قطعی می‌باشد، پارامترهای تقاضا، هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های ایجاد ظرفیت اضافی نیز به صورت غیر قطعی در نظر گرفته شدند که پارامترهای غیر قطعی به صورت اعداد فازی دوزنقه‌ای در نظر گرفته شدند. نتایج نشان دهنده عملکرد بالای الگوریتم ژنتیک نسبت به جستجوی هارمونی بوده است. به منظور مقایسه، مشخص شد که در مدل با ابعاد کوچک، الگوریتم چند هدفه ژنتیک به میزان ۸,۷ درصد در کل هزینه‌های موجود در سیستم بهبودی ایجاد کرده و توانسته به میزان ۹ درصد سریعتر از الگوریتم جستجوی هارمونی به پاسخ برسد. همچنین، با توجه به حل مدل در ابعاد متوسط، الگوریتم چند هدفه ژنتیک به میزان ۶ درصد نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی در راستای تعیین هزینه کل شبکه بهبودی ایجاد نموده است. در زمان سرویس‌دهی نیز الگوریتم ژنتیک به میزان ۱,۵ درصد سریعتر از الگوریتم جستجوی هارمونی بوده است. در نهایت، با بررسی مدل در ابعاد بزرگ مشخص شد که الگوریتم چند هدفه ژنتیک با بهبودی ۲ درصد نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی سبب کاهش هزینه‌های بیشتر شبکه حمل و نقل شده و به میزان ۲ درصد زمان کمتر، مدل را نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی به نتیجه رسانده است.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی قطب، شبکه‌های حمل و نقل، الگوریتم‌های فرا ابتکاری، جستجوی هارمونی

### ۱- مقدمه

ارتباط میان آنها می‌باشد. به علت پیچیده بودن رابطه میان نقاط عرضه و تقاضا در بسیاری از سیستم‌های توزیع، بهره‌مندی از شبکه‌ها می‌تواند ارائه دهنده‌ی راه حل بهینه باشد (Afandi, Zargari et al., 2019). از انواع شبکه‌های پرکاربرد در سیستم‌های توزیع و حمل و نقل، شبکه‌های قطب (هاب) هستند. مکان‌یابی قطب مجموعه‌ای از مسائل بهینه‌سازی شبکه‌ای محسوب شده و به جهت کاربردهای وسیع از اهمیت بسیاری برخوردار است. از کاربردهای این مسئله می‌توان

امروزه سیاست سرمایه‌گذاری حاکم از طرف مدیران و متولیان امر حمل و نقل و ترافیک، بیش از راهکارهای مبتنی بر توسعه و ساخت شبکه‌های حمل و نقل، به سمت راهکارهای مدیریت ترافیک مانند کاهش تقاضا و توأم با آن کنترل ترافیک و نگهداشتن نگرش سامانه‌ای بر این موضوع، معطوف گشته است (Afandizadeh and Bigdeli Rad, 2021). یکی از تصمیمات استراتژیک در ایجاد سیستم‌های انتقال و توزیع کالا، تصمیم‌گیری در خصوص مکان‌یابی تسهیلات و نوع

ارائه شده یک مسئله بهینه سازی ترکیبی را تدوین کرده. در این پژوهش با بهره‌برداری از خصوصیات ساختاری مسئله یک برنامه‌ریزی خطی ترکیبی از عدد صحیح قابل جمع شدن معرفی شده و یک روش تولید محدودیت برای سرعت بخشیدن به روش حل ارائه شده است (Shen et al., 2019). ییلدیز و همکاران در سال ۲۰۱۹، در پژوهشی به بررسی مکان‌یابی قطب (هاب) و ابعاد مسیر: طراحی شبکه حمل و نقل بین راهبردی استراتژیک و تاکتیکی پرداختند. مدل ارائه شده در این پژوهش به جای اتصال گره‌های غیر هاب به طور مستقیم به گره‌های هاب، مسیرهایی را با توقف در نظر گرفته، به جای اتصال مستقیم جفت هاب‌ها، مسیرهایی طراحی شده توانسته از چندین گره هاب بازدید کند. در این پژوهش یک الگوریتم کارآمد و موثر برای حل نمونه‌های مشکل اندازه واقعی در شبکه هاب و ارائه بینش‌های مدیریتی ایجاد شده است (Yildiz et al., 2019). نعمتیان و همکاران در سال ۲۰۱۷، در پژوهشی به بررسی مشکلات مکان‌یابی قطب (هاب) در شبکه‌های حمل و نقل پرداختند. در این پژوهش، اولین مدل مشارکت برای یک مسئله مکان‌یابی هاب بین دو شرکت ارائه دهنده خدمات لجستیک ارائه شده که شرکت مادر صاحب زیرساخت‌ها است. در این پژوهش یک رویکرد ریاضی با ترکیب یک الگوریتم جستجوی محلی و یک رویکرد لاگرانژی پیشنهاد شده است.

در الگوریتم ریاضی، راه حل‌های مسئله با استفاده از یک رویکرد مبتنی بر لاگرانژ ارزیابی شدند (Neamatian Monemi et al., 2017). موسوی و همکاران در سال ۲۰۱۷، در پژوهشی به بررسی یک برنامه زمانبندی چند منظوره مکان‌یابی قطب (هاب) برای زنجیره تأمین مواد غذایی فاسدشدنی پرداختند. آنها در این پژوهش به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی مکان‌یابی هاب پرداختند که این گره‌ها در مکان‌یابی هاب برای مشتریانی که تعداد محدودی هستند خدمات ارائه می‌دهد. در این پژوهش یک الگوریتم مرتب‌سازی (NSGA-II) برای حل مشکلات نمونه ارائه شده است. آزمایش‌های عددی بر روی مجموعه داده‌های CAB و AP انجام شده است. با توجه به نتایج به دست آمده آزمون‌های عددی نشان داده که روش پیشنهادی قادر است با در نظر گرفتن کلیه اهداف برای تصمیم‌گیری، راه حل‌های مناسب ارائه دهد (Musavi et al., 2017).

به مسافرت‌های هوایی (خطوط هوایی و فرودگاه‌ها)، خدمات پستی، توزیع و ارسال سفارشی، جایابی کارخانه‌های تولیدی، انبارهای زنجیره تأمین و شبکه‌های کامپیوتری اشاره نمود. قطب‌ها تسهیلات ویژه‌ای هستند که به عنوان نقاط تعویض، انتقال و طبقه‌بندی در بسیاری از سیستم‌های توزیع به کار گرفته می‌شوند. کارکردهای قطب در عمل به سه مورد کلی، تغییر جهت و مسیر، انتقال و مرتب‌سازی تقسیم می‌شود. شبکه قطب به جای خدمت‌رسانی به جفت مبدأ-مقصد (O/D)، جریان‌ها را به منظور استفاده از صرفه جویی‌های اقتصادی ناشی از آن متمرکز می‌نمایند (Abdi et al., 2020). از هاب می‌توان به عنوان تسهیلات ویژه‌ای نام برد که نقش ایستگاه‌های واسطه‌ای را در سیستم‌های توزیع ایفا می‌کنند، بطوریکه با تعیین مسیر و سازماندهی ترافیک بین ایستگاه‌های مبدأ مقصد (بسته به نوع مسأله) سبب کاهش زمان، هزینه و یا بهبود عوامل دیگر می‌گردند. این نوع سیستم‌ها تحت عنوان مسائل مکان‌یابی‌ها با واسطه مورد بررسی قرار می‌گیرند. در حوزه مهم کاربرد مسئله مکان‌یابی هاب، حمل و نقل و ارتباطات راه دور هستند که تاکنون تحقیقات بسیاری بر روی آنها صورت گرفته است (Ameri et al., 2021). در ارتباطات راه دور، جریانی که باید ارسال شود، داده‌های دیجیتال هستند که باید از مبدأ به مقصد برسند. مثل ویدئو کنفرانس‌ها، شبکه تلفن و غیره. گره‌های هاب در نقش سوئیچ‌ها و گذرگاه‌ها هستند (Hajisoleimani et al., 2021). هزینه جریان هزینه فعال نگه داشتن ارتباط در فاصله زمانی معین است. در حمل و نقل تقاضا شامل جریان فیزیکی مانند بار و مسافر است. هاب‌ها شامل فرودگاه‌ها، ایستگاه‌های راه‌آهن، ایستگاه اتوبوس و غیره هستند. کمان‌های محوری با استفاده از وسایل حمل و نقل ویژه مثل هواپیمای بزرگ‌تر یا قطارها و اتوبوس‌های خاص قادر به انتقال جمعیت و یا بار بیشتری در مسافت‌های طولانی‌تری هستند. در سیستم پست، هاب‌ها مراکز پست هستند که بسته‌ها با مقاصد گوناگون را جمع‌آوری می‌کنند، در گروه‌هایی مرتب‌نموده و به سوی مقاصد توزیع می‌کنند (Afandizadeh et al., 2023). شن و همکاران در سال ۲۰۱۹، در پژوهشی به بررسی مکان‌یابی قطب (هاب) قابل اعتماد در شبکه‌های حمل و نقل هوایی تحت اختلال تصادفی پرداختند. در این پژوهش یک مدل مکان‌یابی هاب قابل اعتماد RC مبتنی بر مسیر ارائه شده. مدل مبتنی بر مسیر

تعریف شده توسط هاب‌ها (۴) سطوح ظرفیت هاب‌ها (انتخاب هر سطح هزینه متفاوتی را به مسئله تحمیل می‌کرد) به صورت بهینه (Zheng et al., 2022). آتای و همکاران در سال ۲۰۰۹، در پژوهشی بر مکان‌یابی هاب پوششی با تخصیص تکی تمرکز کردند. شبکه هاب را ناکامل در نظر گرفتند و مدل عدد صحیح جدیدی معرفی کردند، سپس برای حل آن یک الگوریتم مبتنی بر جستجوی ممنوع ارائه دادند. هدف این مدل یافتن مکان هاب‌ها، تعیین مکان کمان‌های محوری و تخصیص گره‌ها به هاب‌ها است. سپس با آزمون مدل و روش حل بر روی مجموعه داده‌های CAB و خطوط هوایی ترکیه به این نتیجه رسیدند که این الگوریتم در زمان کوتاه‌تری قادر به یافتن جواب است (Atay et al., 2023). پکر و کارا در سال ۲۰۱۵، در پژوهشی بر مسئله مکان‌یابی حداکثر پوشش تمرکز کردند و برای اولین بار مفهوم پوشش جزئی را معرفی نمودند. آنان مسئله حداکثر پوشش را به دو بخش پوشش باینری و پوشش جزئی تقسیم کردند. در پوشش باینری نقاطی که خارج از شعاع پوشش باشند، تحت پوشش سرویس قرار نمی‌گیرند که در نتیجه آن تقاضای این نقاط از دست می‌رود. اما در پوشش جزئی برای سرویس‌دهی به نقاط تقاضای پوشش نیافته، سرویسی با مدت زمان طولانی‌تر و متناسب با فاصله در نظر گرفته می‌شود. استفاده از پوشش جزئی بجای پوشش باینری می‌تواند به سودآوری بیشتر و سطح سرویس‌دهی بهتر منجر شود (Maleki et al., 2023). در تمامی تحقیقات بررسی شده، طراحی شبکه هاب در بسیاری از مسائل حمل و نقل و ارتباطات صورت گرفته که در اکثر تحقیقات کارایی و هزینه اقتصادی اهمیت داشته که با روش‌های مختلفی انجام گرفته. در این پژوهش به مدل بهینه مکانیابی قطب در شبکه‌های حمل و نقل با استفاده از الگوریتم چند هدفه ژنتیک (NSGA-II) در زمینه مینیمم‌سازی مکانیابی هاب میانه پرداخته می‌شود که ظرفیت و نوع خودروها به صورت محدود و ناهمگن در نظر گرفته می‌شود.

خالقی و همکاران در سال ۲۰۲۲، در پژوهشی به بررسی مشکلات مکان‌یابی قطب (هاب) چند دوره‌ای در حمل و نقل پرداختند. در این پژوهش یک مدل ریاضی برای حل یک مشکل موقعیت مکانی هاب چندگانه غیرقابل تحقق چند ساله با محدودیت بودجه پیشنهاد شده. مدل ارائه شده شامل چندین ویژگی عملی، به ویژه در مورد حمل و نقل دریایی و زمینی است. همچنین یک الگوریتم فرا اکتشافی پیشنهاد شده که در مدت زمان معقول، راه‌حل‌های با کیفیت بالا تولید می‌کند. آزمایش‌های گسترده محاسباتی، کارایی روش‌های پیشنهادی را تأیید می‌کند و همچنین محدودیت‌های آن را نشان می‌دهد (Khaleghi et al., 2022). فهمی و همکاران در سال ۲۰۲۳، در پژوهشی به بررسی موقعیت مکانی مناسب برای عمده‌فروشی در زنجیره تأمین و حمل و نقل میوه و تره یک روش اکتشافی LP-MIP پرداختند. آن‌ها در این پژوهش برای تأمین تقاضای میوه‌ها و سبزیجات مختلف از مناطق عرضه از شبکه‌های هاب استفاده کردند که می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش هزینه‌های حمل و نقل داشته باشد. فرم ریاضی مسئله یک برنامه‌ریزی خطی عدد آمیخته می‌باشد که هزینه‌های کل شبکه هزینه حمل و نقل کالا و هزینه مکان‌یابی تسهیلات هاب) را مینیمم می‌کند. برای بررسی حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترها (فاصله سفر، ظرفیت هاب، هزینه حمل و نقل، و ...)، از یک مطالعه موردی استفاده کردند و یک برنامه کاربردی برای صنعت میوه‌ها و سبزیجات ایالات متحده به وجود آوردند و چگونگی تأثیر تغییرات پارامترها را بر مکان‌های بهینه و تعداد هاب‌ها بررسی کردند (Fahmy et al., 2023). ژنگ و همکاران در سال ۲۰۲۲، در پژوهشی به بررسی مشکلات مکان‌یابی قطب (هاب) با محدودیت ظرفیت پرداختند. آن‌ها در این پژوهش به توسعه مدل مکان‌یابی هاب تخصیص تکی با محدودیت ظرفیت پرداختند که در آن، علاوه بر تعداد و مکان هاب، ظرفیت هاب هم خود بخشی از فرآیند تصمیم‌گیری بود. به این ترتیب تصمیماتی که با حل مدل باید گرفته می‌شد عبارت بود از (۱) انتخاب مدل و تعداد هاب‌ها (۲) تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب‌ها (۳) توزیع جریان در زیر شبکه‌های

## ۲- روش تحقیق

در این بخش، روش انجام پژوهش در قالب نمودار شکل ۱ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، بر اساس مطالعات انجام شده در مطالعات پیشین و با بررسی مدل‌های ارائه شده در آن‌ها، ابتدا یک مدل ریاضی گره شامل پارامترها، ناغیرها، مجموعه‌ها، توابع هدف و محدودیت (قید)‌های مربوط به توابع هدف می‌باشد آماده می‌شود. در مرحله بعد باید مدل در شرایط عدم قطعیت مورد بررسی قرار گیرد که از روش ارائه شده توسط مالوی و همکاران استفاده نموده تا مدل استوار تحت شرایط عدم قطعیت ارائه گردد. سپس با جمع‌آوری داده‌های اولیه مربوط به حل مساله استفاده نموده تا جواب‌های بهینه حل مساله ارائه گردد.



شکل ۱. فلوچارت حل مساله

## ۲-۱- مدل ریاضی

در این پژوهش فرض می‌شود جریان‌هایی که وارد یک قطب می‌شوند مجموعه‌ای از عملیات مانند بارگیری، مرتب سازی و

تخلیه را انجام می‌دهند. به دلیل محدودیت منابع در قطب (ها)، همه جریان‌ها به طور همزمان پردازش نمی‌شوند و باید منتظر بمانند تا نوبت پردازش آن‌ها برسد. بنابراین، کل زمان سفر بین هر جفت گره O-D، مجموع زمان حمل و نقل روی پیوندها (لینک‌های بین O و D) و زمان صرف شده در قطب (ها) است. محدودیت منابع در قطب باعث می‌شود تا در صورت نزدیک شدن میانگین نرخ رسیدن به نرخ خدمات در این عملیات، سبب بروز تأخیرهای چشمگیری شود. از این رو هرچه جریان‌های ورودی به قطب، بیشتر و بیشتر، تأخیرهای احتمالی نیز بیشتر می‌شوند. از آنجا که این تأخیرها به میزان قابل توجهی بر زمان تحویل تأثیر می‌گذارند، زمان صرف شده در مراکز قطب باید محاسبه و در نظر گرفته شود. از آنجا که جریان بین هر جفت گره O-D به عنوان یک پارامتر نامشخص در نظر گرفته شده است (بحث عدم قطعیت)، صف بندی یک روش کارآمد برای تجزیه و تحلیل زمان انتظار در قطب‌ها است. به این ترتیب، تعیین میزان نامشخص جریان و محاسبه زمان انتظار از طریق نظریه صف، مدل پیشنهادی را در عمل جذاب تر می‌کند. در مدل پیشنهادی این پژوهش، قطب‌های P را در شبکه قرار داده و نودها به مراکز P اختصاص داده می‌شود. هر نود به هاب‌هایی با  $R \geq 1$  ( $R \leq P$ ) اختصاص داده می‌شوند و تنها در این شرایط و در قطب‌هایی که در آن نودها توسط هاب بعدی پشتیبانی می‌شوند سرویس دهی می‌کنند. ظرفیت قطب می‌تواند تأثیر تعیین‌کننده‌ای در تصمیمات مربوط به قطب و نود داشته باشد، بنابراین در کل هزینه حمل و نقل تأثیر می‌گذارد. بنابراین، انتخاب ظرفیت باید به عنوان یک معیار ایده آل و به عنوان بخشی از فرآیند تصمیم‌گیری در نظر گرفته شود. در نتیجه، برای توسعه یک شبکه قطب واقعی و انعطاف‌پذیرتر، سطح ظرفیت چند قطبی در نظر گرفته می‌شود که در هر مرکز یک و فقط یک سطح ظرفیت مجاز باشد (Alumur et al., 2021). هرچه سطح ظرفیت در هاب‌ها بالاتر باشد، میزان جریان پردازش آنها نیز بیشتر می‌شود. جنبه مهم دیگر در طراحی شبکه‌های هاب که به طور سنتی مورد توجه قرار گرفته است، انتخاب حالت حمل و نقل است. اغلب فرض بر این است که در بیشتر مدل‌های مکان قطب که در پیشینه‌های تحقیق ارائه شده است، تنها یک نوع حالت حمل و نقل وجود دارد. با این حال، معمولاً بین حالت‌های حمل و نقل هوایی، جاده‌ای و ریلی گزینه‌های جایگزین وجود دارد.

از آنجا که حالت‌های حمل و نقل مختلف با احتمالات مختلف دچار اختلال‌های مختلفی می‌شوند، طراحی شبکه چند وجهی قطب و نود به شرکت‌ها این امکان را می‌دهد تا حالت‌های حمل و نقل ویژه‌ای را با احتمال اختلال کمتر را برای انتقال جریان‌ها انتخاب کنند. در ادامه، مدل مساله ارائه می‌گردد.

#### -مجموعه‌ها

$N$ : مجموعه تمام نودها در شبکه

$H$ ;  $H \in N$ : مجموعه قطب‌ها

$M$ : مجموعه‌های حالت‌های انتقال (جابجایی)

$S$ : مجموعه سطوح ظرفیت قطب

$R$ : مجموعه سطوح تخصیص

#### -شاخصه‌ها

$i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$ : شاخص نودها بطوری که

$k, l \in H, H \in N$ : شاخص قطب‌ها بطوری که

$m \in \{1, 2, \dots, M\}$ : شاخص حالت جابجایی (انتقال) بطوری که

$s \in \{1, 2, \dots, S\}$ : شاخص سطوح ظرفیت‌های قطب به طوری که

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$ : شاخص سطوح تخصیص به طوری که

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$q_k$ : احتمال اختلال کامل در قطب  $k$

$P$ : تعداد قطب‌هایی که باید مکانیابی شوند ( $P \leq |H|$ )

$O_i = \sum_j w_{ij}$ : جریان‌هایی که از نود  $i$  نشات گرفته‌اند

$D_i = \sum_j w_{ij}$ : جریان‌هایی که مقصدشان نود  $i$  می‌باشد

$\mu_k^{ms}$ : سرعت خدمات قطب  $k$  با سطح ظرفیت  $S$  با استفاده

حالت جابجایی  $m$

$v_k^{ms}$ : سرعت اختلال قطب  $k$  با سطح ظرفیت  $S$  با استفاده

حالت جابجایی  $m$

$k_m^{ms}$ : نرخ زمانی بازیابی در قطب  $k$  با سطح ظرفیت  $S$  با

استفاده حالت جابجایی  $m$

$\eta_{jk}^{ms}$ : احتمال اختلال در قطب  $k$  با سطح ظرفیت  $S$  با استفاده

حالت جابجایی  $m$

$\theta_k^{ms}$ : ضریب تخریب ظرفیت در قطب  $k$  با سطح ظرفیت  $S$

با استفاده حالت جابجایی  $m$

$\vartheta_{kl}^m$ : احتمال اختلال در لینک بین قطب‌های  $k$  و  $l$  با استفاده

حالت جابجایی  $m$

$\delta_{kl}^m$ : ضریب تخریب ظرفیت در لینک بین قطب‌های  $k$  و  $l$  با

استفاده حالت جابجایی  $m$

$t_{ij}^m$ : زمان سفر جریان آزاد بین نودهای  $i$  و  $j$  با استفاده حالت

جابجایی  $m$  ( $t_{ij}^m$  یک پارامتر قطعی است)

$t_{ij}^m$  یک پارامتر قطعی است)

#### -متغیرها

$x_{ik}^r$ : برابر با ۱ در صورتی که نود  $i$  به قطب  $k$  در سطح  $r$

باشد؛ در غیر اینصورت صفر

$z_k^{ms}$ : برابر با ۱ در صورتی که یک قطب در نود  $k$  با سطح

ظرفیت  $S$  با استفاده حالت جابجایی  $m$  تاسیس شده باشد؛

در غیر اینصورت صفر

$y_{iklj}^m$ : برابر با ۱ در صورتی که جریان از نود  $i$  به سمت مقصد

$j$  با استفاده از لینک قطب  $\{k, l\}$  از قطب  $k$  به قطب  $l$  با حالت

جابجایی  $m$  برقرار باشد؛ در غیر اینصورت صفر

$h_{kl}^m$ : برابر با ۱ در صورتی که یک لینک بین قطب‌های  $k$  و  $l$  با

استفاده حالت جابجایی  $m$  برقرار شده باشد؛ در غیر اینصورت

صفر

$u_k$ : برابر با ۱ در صورتی که یک قطب در نود  $k$  ایجاد شده

باشد.

$p_{ik}^r$ : احتمالی که قطب  $k$  در نود  $i$  در سطح  $r$  خدمات ارائه

کند.

$\bar{x}_{ik}^r$ : فرم خطی  $x_{ik}^r \times p_{ik}^r$

از آنجا که حالت‌های حمل و نقل مختلف با احتمالات مختلف دچار اختلال‌های مختلفی می‌شوند، طراحی شبکه چند وجهی قطب و نود به شرکت‌ها این امکان را می‌دهد تا حالت‌های حمل و نقل ویژه‌ای را با احتمال اختلال کمتر را برای انتقال جریان‌ها انتخاب کنند. در ادامه، مدل مساله ارائه می‌گردد.

#### -مجموعه‌ها

$N$ : مجموعه تمام نودها در شبکه

$H$ ;  $H \in N$ : مجموعه قطب‌ها

$M$ : مجموعه‌های حالت‌های انتقال (جابجایی)

$S$ : مجموعه سطوح ظرفیت قطب

$R$ : مجموعه سطوح تخصیص

#### -شاخصه‌ها

$i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$ : شاخص نودها بطوری که

$k, l \in H, H \in N$ : شاخص قطب‌ها بطوری که

$m \in \{1, 2, \dots, M\}$ : شاخص حالت جابجایی (انتقال) بطوری که

$s \in \{1, 2, \dots, S\}$ : شاخص سطوح ظرفیت‌های قطب به طوری که

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$ : شاخص سطوح تخصیص به طوری که

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$r, v \in \{1, 2, \dots, R\}$

$W_k^{ms}$ : زمان عملیات (زمان انتظار+زمان پردازش) در قطب  $k$

در سطح ظرفیت  $S$  برای حالت جابجایی  $m$

$E(T_{ij}^m)$ : میانگین مقدار مورد انتظار زمان سفر تصادفی بین

نودهای  $i$  و  $j$  با استفاده از حالت جابجایی  $m$

$V(T_{ij}^m)$ : مقدار واریانس زمان سفر تصادفی بین نودهای  $i$  و  $j$

با استفاده از حالت جابجایی  $m$

$T_{ij}^m$ : زمان جابجایی بین نودهای  $i$  و  $j$  با استفاده از حالت

جابجایی  $m$

$\Psi$ : ماکزیمم زمان جابجایی بین هر جفت نود  $O - D$

-توابع هدف

(۱)

$\min Z_1$

$$= \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^L \sum_{k=1}^{N+1} \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^{N+1} \sum_{s=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{j \neq i} W_{ij} \left[ \sum_{k=1}^{N+1} \sum_{r=1}^R C_{ik}^l \bar{x}_{ik}^r + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{N+1} \sum_{l=1}^{N+1} \sum_{r=1}^R \sum_{l \neq k} (o_k^{ms} + \alpha c_{ki}^m c_{kl}^m + o_l^{ms}) P_{ik}^r P_{jl}^r Y_{ijkl}^m + \sum_{k=1}^{N+1} \sum_{r=1}^R C_{kj}^l \bar{x}_{jk}^r \right] + f_k^{ms} z_k^{ms} + f_{kl}^m h_{kl}^m$$

مدت حمل و نقل بین هر جفت گره  $O-D$  از پنج عبارت تشکیل شده است، که زمان حمل و نقل را از گره مبدا تا اولین قطب، زمان انتظار در قطب، زمان حمل و نقل بین قطب‌های بعدی، زمان انتظار در قطب‌های بعدی و زمان حمل و نقل از آخرین قطب تا گره مقصد را محاسبه می‌کند.

-محدودیت‌ها

$$\sum_{k=1}^H x_{ik}^r + \sum_{v=1}^r x_{i(H+1)}^v + u_i = \forall i, r \quad (۳)$$

1

محدودیت (۳) تضمین می‌کند که برای هر نود  $i$  و هر سطح  $r$ ،

یا اینکه  $i$  به یک قطب خاص در سطح  $r$  یا اینکه به یک

قطب غیرقابل دسترس  $H + 1$  در سطح خاص  $r$  اختصاص می‌یابد.

$$\sum_{r=1}^R x_{i(H+1)}^r + x_i = 1 \quad \forall i \quad (۴)$$

محدودیت (۴) تضمین می‌کند که هر یک از نودها در سطح

مشخصی به قطب غیرمستقیم اختصاص یابد.

$\bar{y}_{ilkj}^m$ : فرم خطی  $P_{jk}^r \times y_{ilkj}^m$

به قطب  $k$  با استفاده از حالت جابجایی  $m$ :  $f_k^m = \lambda_k^m = \sum_i \sum_{j \neq i} j \sum_{l \neq k} l w_{ij} y_{ilkj}^m$  : جریان ورودی

به قطب  $k$  با استفاده از حالت جابجایی  $m$

قطب‌های  $k$  به  $l$  با استفاده از حالت جابجایی  $m$ :  $f_{kl}^m = \sum_i \sum_j w_{ij} y_{ilkj}^m$  : جریان گذری از لینک بین

قطب‌های  $k$  به  $l$  با استفاده از حالت جابجایی  $m$

$E(W_k^{ms})$ : میانگین مقدار مورد انتظار زمان عملیاتی تصادفی

(زمان انتظار+زمان پردازش) در قطب  $k$  در سطح ظرفیت

$S$  برای حالت جابجایی  $m$

$V(W_k^{ms})$ : مقدار واریانس تصادفی زمان پردازش تصادفی

(زمان انتظار+زمان پردازش) در قطب  $k$  در سطح ظرفیت

$S$  برای حالت جابجایی  $m$

تابع هدف (۱) کل هزینه حمل و نقل و بهره برداری مورد انتظار در شبکه قطب را به حداقل می‌رساند. این تابع هدف از دو بخش عمده "هزینه حمل و نقل ثابت" و "هزینه حمل و نقل متغیر مورد انتظار" تشکیل شده است. دو عبارت اول تابع هدف (۱) متعلق به "هزینه حمل و نقل ثابت" است. اولین عبارت، کل هزینه ثابت تعیین مکان‌های قطب در شبکه است. عبارت دوم، کل هزینه ایجاد لینک‌های حمل و نقل در شبکه است. عبارت سوم متعلق به بخش "هزینه حمل و نقل متغیر مورد انتظار" است، که هزینه حمل و نقل متغیر مورد انتظار را در صورت بروز اختلال در شبکه محاسبه می‌کند.

$$\min Z_2 = \Psi \quad (۲)$$

در معادله (۲)، تابع هدف دوم، که مربوط به کاهش زمان انتقال

می‌باشد ارائه شده است. این تابع هدف، حداکثر زمان حمل و

نقل بین هر جفت گره  $O-D$  که با  $\Psi$  مشخص می‌شود را

به حداقل می‌رساند.

$$x_{ik}^r \leq x_k \quad \forall i, k \quad (5)$$

$$P\{(T_{ik}^l + W_k^{ms} + \alpha t_{kl}^m T_{kl}^m + W_l^{ms} + T_{lj}^l)y_{iklj}^m \leq \Psi\} \geq \gamma \quad \forall i, j, k, l, m, s: i \neq j \quad (15)$$

محدودیت (۵) تضمین می‌کند که یک نود باید به یک قطب معتبر منتقل شود.

محدودیت شانس (۱۵) برای محاسبه حداکثر زمان حمل و نقل بین هر جفت گره O-D ارائه شده است.

$$z_k^{ms} \leq u_k \quad \forall k, m \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_l \sum_j \sum_r w_{ij} \bar{y}_{ilkj}^{mr} \leq \sum_s \bar{r}_k^{ms} [\theta_k^{sm} + (1 - \eta_k^{ms})(1 - \theta_k^{sm})] z_k^{ms} \quad (16)$$

$$\sum_s z_k^{ms} = 1 \quad \forall k, m \quad (7)$$

محدودیت‌های (۶) و (۷) تضمین می‌کنند که فقط یک سطح ظرفیت برای هر قطب مستقر مجاز می‌باشد.

$$\sum_i \sum_j \sum_r \sum_v w_{ij} y_{iklj}^m p_{ik}^r p_{jl}^v \leq \bar{\xi}_{kl}^m [\delta_{kl}^m + (1 - \vartheta_{kl}^m)(1 - \delta_{kl}^m)] h_{kl}^m \quad (17)$$

$$\sum_k u_k = P \quad (8)$$

محدودیت‌های (۱۶) و (۱۷) به ترتیب محدودیت‌های قطب و ظرفیت لینک هستند.

محدودیت (۸) تضمین می‌کند که تعداد قطب‌ها برابر با یک مقدار از پیش تعریف شده است و باید برابر با مقدار P باشد.

$$p_{ik}^l = 1 - q_k \quad \forall i, k \in \{1, \dots, H + 1\} \quad (18)$$

$$h_{kl}^m \leq \sum_s z_k^{ms} \quad \forall k, l: k < l, m \in M\{1\} \quad (9)$$

$$p_{il}^r = (1 - q_l) \sum_{k=1}^H \frac{q_k}{1 - q_k} \bar{x}_{ik}^{r-1} \quad \forall i, l \in \{1, \dots, H + 1\}, r \in \{2, \dots, R\} \quad (19)$$

$$h_{kl}^m \leq \sum_s z_l^{ms} \quad \forall k, l: k < l, m \in M\{1\} \quad (10)$$

محدودیت‌های (۱۸) و (۱۹) معادلات "احتمال انتقال" را بیان می‌کنند.

محدودیت‌های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهد که در صورتی که بین قطب‌های k و l با حالت انتقال m ارتباط برقرار باشد، باید سطح ظرفیت خاصی در این دو قطب برقرار شود.

$$\bar{x}_{ik}^r \leq p_{ik}^r \quad \forall i; k \in \{1, \dots, H + 1\} \quad (20)$$

$$h_{kl}^l \leq \sum_m \sum_s z_k^{ms} \quad \forall k, l: k < l \quad (11)$$

$$\bar{x}_{ik}^r \leq x_{ik}^r \quad \forall i; k \in \{1, \dots, H + 1\} \quad (21)$$

$$h_{kl}^l \leq \sum_m \sum_s z_l^{ms} \quad \forall k, l: k < l \quad (12)$$

$$x_{ik}^r + p_{ik}^r - \bar{x}_{ik}^r \leq 1 \quad \forall i; k \in \{1, \dots, H + 1\} \quad (22)$$

محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) توضیح می‌دهند که هر قطب ساخته شده برای حالت انتقال  $m \geq 2$  می‌تواند برای حالت m برابر با ۱ باشد. در این مدل، حالت انتقال برابر با ۱ به عنوان حمل و نقل جاده‌ای در نظر گرفته می‌شود.

$$\bar{y}_{ilkj}^{mr} \leq p_{jk}^r \quad \forall i, j, k, l, m, r \quad (23)$$

$$\bar{y}_{ilkj}^{mr} \leq y_{ilkj}^m \quad \forall i, j, k, l, m, r \quad (24)$$

$$y_{ilkj}^m + p_{jk}^r - \bar{y}_{ilkj}^{mr} \leq 1 \quad \forall i, j, k, l, m, r \quad (25)$$

$$\sum_m y_{ilkj}^m \geq x_{ik}^r + x_{jl}^v - 1 \quad \forall i, j, k, l: i \neq j; k \neq l; r, v \quad (13)$$

محدودیت‌های (۲۰) تا (۲۲) و (۲۳) تا (۲۵) نیز عبارات خطی  $y_{ilkj}^m \times p_{jk}^r$  و  $x_{ik}^r \times p_{ik}^r$  را ایجاد می‌کنند.

$$y_{ilkj}^m + y_{ilkj}^m \leq h_{kl}^m \quad \forall i, j, k, l, i \in N: i \neq j \quad (14)$$

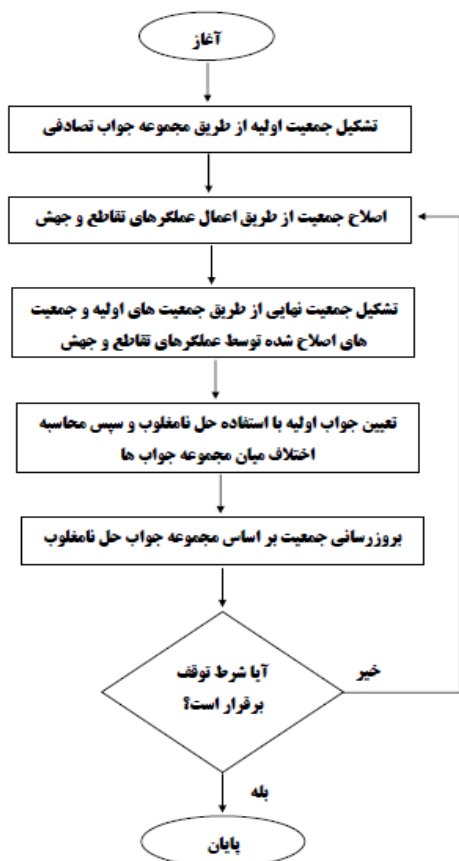
$$x_{ik}^r, z_k^{ms}, h_{kl}^m, u_k, y_{ilkj}^m \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k, l, m, s, r \quad (26)$$

محدودیت‌های (۱۳) و (۱۴) بین هر جفت گره O-D مسیر معتبر ایجاد می‌کنند.

عملگری که یک معیار برتری (رتبه) بر اساس مرتب‌سازی نامغلوب و جبهه‌بندی به اعضای جمعیت اختصاص می‌دهد.

عملگری که تنوع جواب و پراکندگی آن‌ها را در میان جواب‌های با رتبه برابر حفظ می‌کند.

در شکل ۲ فلوچارت الگوریتم ژنتیک چند هدفه مبتنی بر مرتب‌سازی نامغلوب به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۲. فلوچارت الگوریتم ژنتیک چند هدفه

بر اساس شکل ۳، در ابتدای کار، جمعیت‌ها در رتبه‌های پایین‌تر انتخاب می‌شوند، به عبارتی مجموعه جمعیت اولیه‌ای بر اساس حل تصادفی ایجاد می‌شود. سپس با فرض اینکه  $p$  و  $q$  دو عضو از یک رتبه باشند، عضوی انتخاب می‌شود که فاصله ازدحامی بیشتری دارد. لازم به ذکر است که اولویت انتخاب ابتدا با رتبه و سپس بر اساس فاصله ازدحامی است. این کار از طریق انجام تقاطع و جهش برای تولید فرزندان جدید با استفاده از روش انتخاب دودویی صورت می‌گیرد. در مرحله بعد، تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت به دست آمده از تقاطع و جهش و جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین

$$\bar{x}_{ik}^F, W_k^{ms}, T_{kl}^m, \Psi \geq \quad (27)$$

$$0 \quad \forall i, j, k, l, m, s, r$$

نهایتاً، محدودیت‌های (۲۶) و (۲۷) بیانگر محدودیت‌های دامنه متغیرها هستند.

## ۲-۲- الگوریتم پیشنهادی

### ۲-۲-۱- الگوریتم چند هدفه ژنتیک مبتنی بر مرتب‌سازی نامغلوب

الگوریتم ژنتیک، یکی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مشهور و کاراست و کاربرد گسترده‌ای در حل مسائل مرتبط با مکانیابی هاب دارد. این الگوریتم قدرت بالایی در یافتن جواب مسائل از خود نشان داده است، به خصوص مسائلی همانند مسئله موردنظر که شامل فضای حالت بسیار بزرگی بوده و بررسی تمامی حالت‌های آن در ابعاد بالا توسط بشر عملاً غیرممکن است. به عبارت دیگر، سرعت این الگوریتم در حرکت به سوی جواب مسئله از ویژگی‌های بارز و نقاط مثبت این الگوریتم می‌باشد. از دیگر نقاط مثبت این الگوریتم این است که برخلاف برخی الگوریتم‌های دیگر که فضای جواب مسئله را فقط در یک جهت جستجو می‌کنند، به طور هم‌زمان در چندین جهت به جستجوی جواب می‌پردازد (Al-Zuheri et al., 2023). عدم نیاز الگوریتم ژنتیک به پیوستگی و تحدب تابع هدف را نیز می‌توان از دیگر ویژگی‌های مثبت این الگوریتم قلمداد نمود. تاکنون الگوریتم‌های تکاملی بسیاری در زمینه بهینه‌سازی چندهدفه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اولین الگوریتم کاربردی در این زمینه با عنوان VEGA توسط شافر در سال ۱۹۸۴ ارائه شد. ایرادی که به این الگوریتم وارد می‌شد، تمایل آن به سمت بهینه کردن یک هدف خاص بود، لذا برای غلبه بر این مشکل، در سال ۱۹۹۴ الگوریتم NSGA را معرفی کرده است. که تفاوت آن با GA ساده فقط در نحوه عملکرد اپراتور انتخاب می‌باشد. بدلیل پیچیدگی محاسباتی این الگوریتم، در سال ۲۰۰۲ الگوریتم کاملتر NSGA-II را پیشنهاد کرد (Lambora et al., 2019). این الگوریتم با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه معمولی، به یک الگوریتم چندهدفه تبدیل شده‌است که به جای یافتن بهترین جواب تک بعدی، دسته‌ای از بهترین جواب‌ها را می‌دهد که با نام جبهه پارتو شناخته می‌شوند. این دو عملگر عبارتند از (Kreutzberger et al., 2016).

### ۳- مطالعه موردی

بررسی موردی مکان یابی هاب در این پژوهش مربوط به قسمتی از داده‌های شرکت هواپیمایی ملی ایران (با در نظر گرفتن ۲۰ گره) را با استفاده از مدل ارائه شده حل و نتایج حاصل تحلیل می‌شوند تا نوع عملکرد و کارایی مدل مورد بررسی قرار گیرد. داده‌های موجود در منابع میزان تقاضا برای سفر از هر استان به استان دیگر است. همچنین مسافت بین مراکز هر استان موجود است. با لحاظ ضریب ۰.۰۷ به عنوان ضریب تخفیف برای انتقالات بین هاب هزینه نقل و انتقالات مابین مبدا تا مقصد به عنوان تابعی از فواصل بین مبادی و مقاصد در نظر گرفته شده است. جریان تقاضا مسافت و هزینه احداث در داده‌های شرکت هواپیمایی ایران موجود است و داده‌هایی که در دسترس نیستند به صورتی که در زیر مشاهده می‌شود در بازه‌های یکنواخت و هر کدام در سه سطح تولید شده است.

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده در مسئله

مقدار	نوع داده
۱	جریان تقاضا
۱	جریان تقاضا
۵۶۰	هزینه احداث
۵۸	هزینه ایجاد ظرفیت
۱۰۰۰۰۰	ماکزیم ظرفیت
۱۵۰۰	مینیم ظرفیت
۶۰	هزینه عملیاتی

### ۴- مدل‌سازی

در این بخش از تحقیق به ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های حل ارائه شده در راستای تعیین مکان بهینه هاب پرداخته می‌شود. بدین منظور ابتدا کارایی این الگوریتم‌ها در حل مسائل نمونه با ابعاد کوچک مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس به مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی در حل مسائل نمونه با ابعاد متوسط و بزرگ پرداخته می‌شود. لازم به توضیح است که حل مساله در ابعاد متوسط و بزرگ به عنوان مسائل NP-hard در نظر گرفته می‌شود که قطعاً باید به کمک الگوریتم‌های

اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل انجام می‌شود. در مرحله اول، اعضای رتبه‌های پایین تر جایگزین والد‌های قبلی می‌شوند و سپس بر اساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. جمعیت اولیه و جمعیت ناشی از تقاطع و جهش، ابتدا برحسب رتبه دسته بندی می‌شوند و قسمتی از آنها که دارای رتبه پایین تری هستند، حذف می‌گردند. در مرحله بعد، جمعیت باقیمانده بر اساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. در اینجا مرتب سازی داخلی یک جبهه انجام می‌شود. تمامی مراحل تا نسل (و یا شرایط بهینگی (شرط توقف)) مورد نظر تکرار می‌شوند (Rad et al., 2019).

حفظ تنوع جواب‌ها (فاصله ازدحامی): برای بدست آوردن تخمینی از چگالی جواب‌های موجود در کنار یک جواب خاص، میانگین فاصله‌ای از دو جواب واقع در طرفین آن جواب برای هر تابع هدف جداگانه محاسبه می‌شود. مقدار عددی که از محاسبه فضای مربعی (در مسائل دودیفه) اطراف جواب  $J$  با بکار بردن نزدیکترین همسایه‌های آن بدست می‌آید، فاصله ازدحامی نامیده می‌شود که از رابطه ۲۸ حساب می‌شود.

$$d_j = \sum_{i=1}^n \frac{f_i(j-1) - f_i(j+1)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \quad (28)$$

به طور کلی فاصله ازدحامی جواب‌ها در فضای جواب مسائل چند هدفه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

گام اول: در هر جبهه، جواب‌ها بر اساس یکی از توابع هدف دلخواه به صورت نزولی مرتب می‌شوند، فرض می‌شود که تعداد توابع هدف مساله و تعداد جواب‌ها در هر جبهه برابر باشد.

گام دوم: فاصله ازدحامی نقاط اول و آخر لیست برابر بی‌نهایت می‌شود (دلیل این امر آن است که در کنار این نقاط، نقاط دیگری وجود ندارد که آن را پوشش دهد).

گام سوم: برای نقاط ۲ تا فاصله ازدحامی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$CD_i = d_i^1 + d_i^2 + \dots + d_i^m \quad (29)$$

$$d_i^1 = \frac{f_m^{i+1} - f_m^{i-1}}{f_m^{max} - f_m^{min}}$$

در رابطه ۲۹ منظور از فاصله ازدحامی در تابع هدف  $m$  می‌باشد و به منظور محاسبه فاصله ازدحامی کل، باید برای تمامی توابع هدف محاسبه و سپس جمع شود. در این بخش با پیاده سازی مدل با استفاده الگوریتم ژنتیک، نتایج حاصل با الگوریتم کرم شب تاب مقایسه می‌شود. لازم به توضیح است که برای صحت مدل، ابتدا مدل پژوهش در نرم افزار GAMS v.24 پیاده شده و سپس بهینه سازی با استفاده از الگوریتم‌های مورد نظر در نرم افزار متلب ورژن 2018b انجام گرفت.

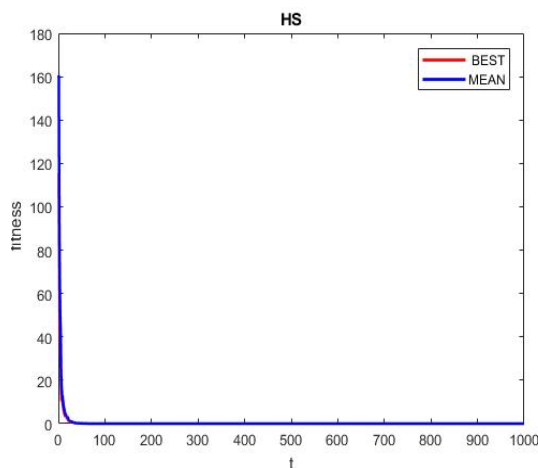
جدول ۲. نتایج حل مدل در گمز

پارامتر	هزینه نهایی (میلیون دلار)	زمان جابجایی وسایل نقلیه (ساعت)
مقدار	۱۷۹۹۵	۲۴

همانطور که در جدول فوق مشاهده می گردد، حل مساله در ابعاد کوچک که صرفاً بابت اعتبارسنجی مدل و تایید درستی آن انجام شده، دارای جواب بوده که گویای درستی مدل ریاضی در نظر گرفته شده برای مساله است. الگوریتم استفاده شده ابتدا از یک جواب اولیه شروع به کار می کند و پس از آن در یک حلقه تکرار به جواب های موجود در همسایگی حرکت می کند. با استفاده از دستورات شرطی اگر پاسخ همسایگی بهتر از حالت قبل بود آن مقدار را در خور ذخیره می کند و در غیر این صورت همان مقدار قبلی خود را حفظ کرده و به گام بعدی و بررسی شرط بعدی خواهد رفت.

#### ۴-۱- نتایج حاصل از شبیه سازی

در این بخش نتایج حاصل از خروجی ارائه می شود. شکل ۳ نتیجه حاصل از اجرای الگوریتم جستجوی هارمونی می باشد.



شکل ۳. نتیجه همگرایی الگوریتم جستجوی هارمونی

فراابتکاری تحلیل شود. به علت عدم وجود داده های استاندارد، به منظور بررسی کارایی الگوریتم های ارائه شده چندین مسأله ی نمونه به صورت تصادفی تولید می شوند. ابعاد هر مسأله ی نمونه به وسیله ی تعداد مراکز هاب و تعداد مقاصد مورد نظر مشخص می شود.

در تولید مسائل نمونه باید ویژگی های مسأله مدنظر قرار گیرد. به عبارت دیگر مسائل نمونه باید به گونه ای تولید شوند که قابل حل نشدنی باشند. در این تحقیق برای تولید مسائل نمونه، ویژگی های ذیل مدنظر قرار می گیرند.

-تقاضای نیاز به حمل و نقل ناوگان باید به گونه ای تعیین شود که از ظرفیت وسایل نقلیه هاب ها کمتر باشد.

-پنجره ی زمانی مرتبط با هر تقاضا باید در بازه ی زمانی دوره های نیاز تعیین گردد.

-مکان مقصد و مکان های هاب باید به گونه ای تعیین شوند که فاصله ی زمانی مسیر رفت و برگشت هر وسیله با حداقل یکی از مراکز هاب در بازه ی زمانی دوره های نیاز قرار گیرد.

-هزینه ی سفر بین هر دو نقطه متناسب با فاصله مستقیم میان آن دو نقطه می باشد.

در این بخش به نحوه کد نویسی و مدلسازی نرم افزاری الگوریتم های معرفی شده در این راستا پرداخته می شود. ابتدا لازم به ذکر است که در کنار این برنامه، داده های متفاوت تولید شده ای جهت بررسی در نظر گرفته شده اند. به عنوان مثال تعداد وسیله نقلیه و تقاضا را در ابعاد متفاوت در نظر گرفته شده است. در ابعاد کوچک تعداد تقاضای وسایل نقلیه را بین ۱ تا ۳۰، در ابعاد متوسط بین ۳۰ الی ۸۰ و در ابعاد گسترده بین ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده اند. با انجام روند تعداد تکرارها و بررسی پاسخ های تابع هدف در همسایگی های متفاوت بهترین جواب در هر یک از حالات بدست آمده که نتایج در بخش های بعد ارائه خواهند شد. بر اساس آنچه که در مفاهیم پیاده سازی مدل در نرم افزار متلب مشخص شده است، ابتدا باید داده های مورد بررسی که در واقع تولید داده می باشد را ارائه دهیم تا بر اساس آن ها، نتایج حاصل بدست آیند. پس از اجرای برنامه گمز نتایج بدست آمده برای هزینه و مدت زمان جابجایی وسایل نقلیه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج زمان و هزینه کلی در ابعاد کوچک

(الگوریتم ژنتیک)

نمونه	سطوح تخصیص	تعداد هاب	زمان (ساعت)	هزینه کلی زنجیره (دلار)
۱	۲	۱	۲,۳۵	۱۰۰۲۵۴
۲	۲	۵	۴,۶۵	۱۳۵۶۶۲
۳	۲	۷	۶,۹۹۸	۱۴۶۸۸۲
۴	۳	۱۰	۷,۸۱۵	۱۷۹۳۰۲
۵	۳	۱۲	۹,۵۵۱	۱۸۱۳۳۲
۶	۴	۱۷	۱۳,۷۴	۲۳۱۰۲۱
۷	۴	۲۰	۱۶,۴۷۵	۲۴۹۷۰۴
۸	۴	۲۳	۱۹,۷۷۰	۲۶۵۹۹۵
۹	۵	۲۷	۲۳,۵۴۲	۲۹۷۳۰۲
۱۰	۵	۳۰	۲۸,۱۰۲	۳۰۲۶۶۵

در جدول ۳، به حل مدل در ابعاد کوچک پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش تعداد هاب، هزینه های کلی زنجیره و زمان حمل و نقل بین هاب ها نیز افزایش یافته است.

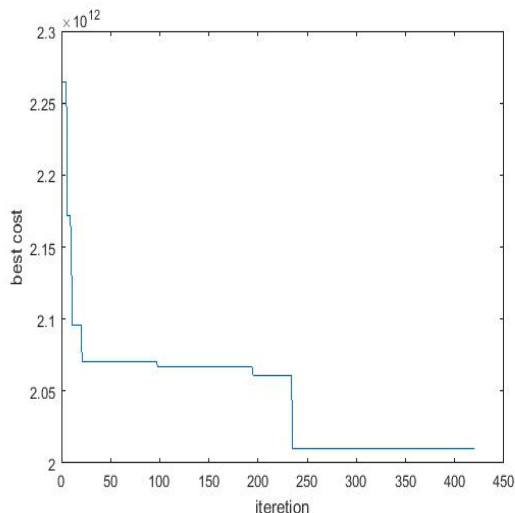
جدول ۴. نتایج زمان و هزینه کلی در ابعاد کوچک

(الگوریتم جستجوی هارمونی)

نمونه	تعداد محصول	تعداد سفارش	زمان (ساعت)	هزینه کلی زنجیره (دلار)
۱	۲	۱	۳,۴۰	۱۰۸۶۲۳
۲	۲	۵	۵,۳۲	۱۴۲۳۸۷
۳	۲	۷	۷,۱۰۵	۱۵۹۹۰۲
۴	۳	۱۰	۸,۹۹۸	۱۹۰۰۲۱
۵	۳	۱۲	۱۰,۴۲۱	۲۵۵۵۷۰
۶	۴	۱۷	۱۵,۶۳۶	۲۷۶۳۵۲
۷	۴	۲۰	۱۸,۴۶۲	۲۹۶۶۵۳
۸	۴	۲۳	۲۱,۳۳۲	۳۱۰۲۲۴
۹	۵	۲۷	۲۵,۹۴۸	۳۳۷۴۷۰
۱۰	۵	۳۰	۳۰,۲۲۹	۳۵۸۷۲۱

در جدول ۴ به بررسی عملکرد الگوریتم جستجوی هارمونی در راستای تعیین توابع هدف در ابعاد کوچک (تعداد محصول و سفارش کم) پرداخته شده است. در جداول بالا به بررسی و حل مسئله در ابعاد کوچک پرداخته شده است. همانطور که در جدول فوق نشان داده شده است، الگوریتم پیشنهادی ما نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی عملکرد بهتر و قابل توجه تری داشته است. این موضوع در هر دو قالب زمان و

در شکل ۴ نتیجه همگرایی الگوریتم جستجوی هارمونی ارائه شده که نشان دهنده این است که این الگوریتم خیلی سریع به همگرایی (ثابت ماندن خطای برازندگی) رسیده است. نتیجه حاصل از الگوریتم ژنتیک نیز در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴. نتیجه حاصل از الگوریتم ژنتیک

شکل ۴ که نشان دهنده همگرایی الگوریتم ژنتیک است بیان کننده همگرایی این الگوریتم پس از حدود ۲۴۰ تکرار است (که نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی بسیار زیاد است) که در آن تغییرات تابع هدف، ثابت مانده است. با توجه به کد نویسی انجام شده و الگوریتم استفاده شده بهترین زمان و بهترین هزینه ما بین هاب ها و مقاصد شناخته می شود که این روند را ما برای بررسی برابر با ۴۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. همانطور که در برنامه متلب و در محیط command window مشاهده می شود با

تکرار روند پردازش هزینه روند کاهش را طی می کند تا اینکه در تکرار ۴۰۰ ام کمترین مقدار را در خروجی قرار می دهد. برای بررسی دقیق تر کار، مختصات بخشی از نقاط را با اختلاف بسیار زیاد نسبت به نقاط منتخب پیش تر افزایش داده که این عمل موجب افزایش در زمان سرویس رسانی و همچنین افزایش هزینه گردید. برای بهبود این حالت افزایش تعداد وسایل نقلیه پیشنهاد می شود که این عمل موجب کاهش یافتن هزینه و زمان سرویس دهی شد.

در جداول ۳ و ۴ به بررسی ۱۰ مدل در حالت ابعاد کوچک با استفاده از هر دو الگوریتم جستجوی هارمونی و ژنتیک پرداخته شده است.

با استفاده از هر دو الگوریتم جستجوی هارمونی و ژنتیک پرداخته شده است.

جدول ۵. نتایج زمان و هزینه کلی در ابعاد متوسط

(الگوریتم ژنتیک)

نمونه	سطوح تخصیص	تعداد هاب	زمان (ساعت)	هزینه کلی زنجیره (دلار)
۱	۶	۳۱	۸,۶۶۵۲	۳۷۵۹۹۵
۲	۶	۳۵	۱۱,۴۷۲	۳۷۹۵۵۱
۳	۷	۴۰	۱۵,۹۸۵	۴۰۴۱۲۴
۴	۷	۴۵	۱۸,۶۶۳	۴۲۳۵۵۴
۵	۸	۵۷	۲۹,۸۷۴	۴۶۸۵۹۶
۶	۸	۶۱	۳۲,۴۱۲	۴۹۶۵۵۴
۷	۹	۶۵	۳۹,۹۹۴	۵۲۱۴۴۷
۸	۱۲	۷۰	۴۲,۴۱۲	۵۴۷۷۵۸
۹	۱۴	۷۵	۴۸,۹۹۰	۵۹۸۶۶۴
۱۰	۱۶	۸۰	۵۱,۰۶۲	۶۳۵۹۷۵

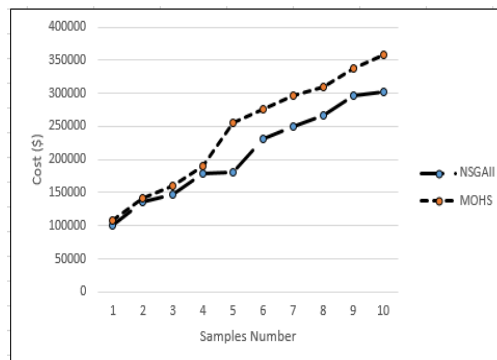
در جدول ۵، ابعاد مساله متوسط یعنی تعداد محصول و تعداد هاب بیشتر از مدل کوچک را در نظر گرفته و عملکرد الگوریتم ژنتیک را در راستای دستیابی به اهداف مدل ارزیابی شده است.

جدول ۶. نتایج زمان و هزینه کلی در ابعاد متوسط

(الگوریتم جستجوی هارمونی)

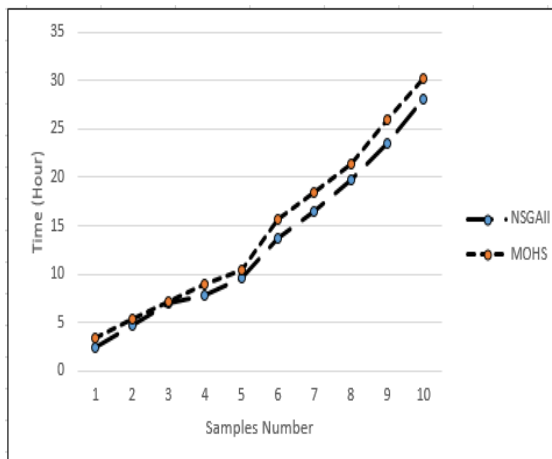
نمونه	سطوح تخصیص	تعداد هاب	زمان (ساعت)	هزینه کلی زنجیره (دلار)
۱	۶	۳۱	۱۰,۲۲۱	۳۷۹۸۸۷
۲	۶	۳۵	۱۲,۰۳۲	۳۸۸۶۵۴
۳	۷	۴۰	۱۷,۰۸۷	۴۱۰۲۱۴
۴	۷	۴۵	۱۹,۲۲۱	۴۳۳۶۲۵
۵	۸	۵۷	۲۰,۱۴۵	۴۷۸۸۵۰
۶	۸	۶۱	۳۴,۷۷۵	۵۰۲۳۲۷
۷	۹	۶۵	۴۲,۷۴۵	۵۳۶۲۷۰

هزینه کل شبکه حمل و نقل می‌باشد. به منظور مقایسه دقیق‌تر، نمودار مقایسه‌ای هزینه و زمان هر دو الگوریتم برای مدل در ابعاد کوچک در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



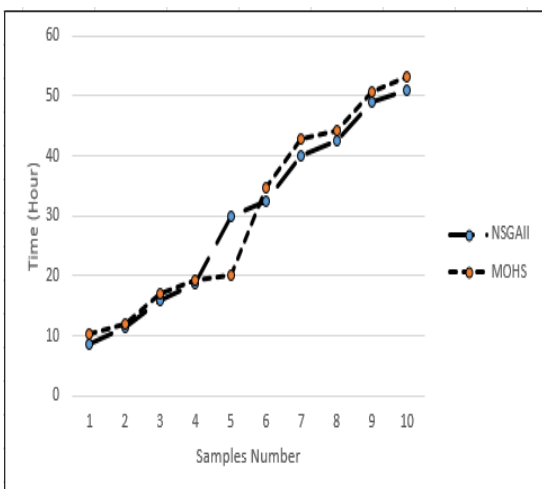
شکل ۵. مقایسه هزینه کلی شبکه با استفاده از دو الگوریتم

همانطور که از شکل ۵ که مربوط به مقایسه هر دو الگوریتم از نظر هزینه کل سیستم حمل و نقل بین هاب‌ها، برای مدل در ابعاد کوچک مشخص است که الگوریتم چند هدفه ژنتیک به میزان ۸,۷ درصد در کل هزینه‌های موجود در سیستم بهبودی ایجاد کرده و توانسته عملکرد بهتری را نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی داشته باشد.



شکل ۶. مقایسه زمان سرویس دهی در شبکه با استفاده از دو الگوریتم

بر اساس شکل ۶ مشخص می‌شود که الگوریتم چند هدفه ژنتیک به میزان ۹ درصد سریعتر از الگوریتم جستجوی هارمونی توانسته جایجایی را در شبکه برقرار کند. در مرحله بعد در جداول ۵ و ۶ به بررسی ۱۰ مدل در حالت ابعاد متوسط



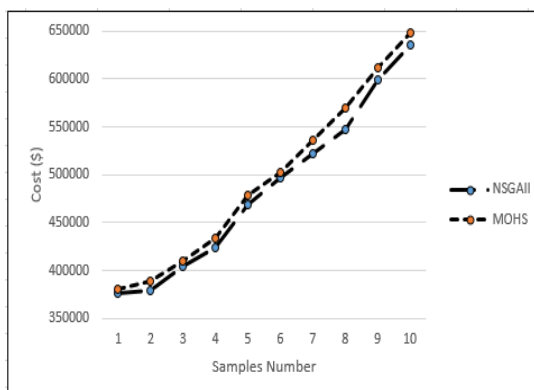
شکل ۸. مقایسه زمان سرویس دهی در شبکه با استفاده از دو الگوریتم

۵۶۹۹۸۵	۴۴,۲۴۷	۷۰	۱۲	۸
۶۱۲۳۵۲	۵۰,۶۶۴	۷۵	۱۴	۹
۶۴۷۸۰۵	۵۳,۲۱۲	۸۰	۱۶	۱۰

همچون جدول ۵، در جدول ۶ به ارزیابی الگوریتم جستجوی هارمونی در حل مدل با ابعاد متوسط پرداخته شده است. بر اساس نتایج بدست آمده برای ابعاد متوسط، مشخص شد که الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری نسبت به جستجوی هارمونی داشته است. شکل های ۷ و ۸ مقایسه نموداری نتایج حاصل از هر دو الگوریتم را در ابعاد متوسط از نقطه نظرات هزینه و زمان نشان می دهد.

جدول ۷. نتایج زمان و هزینه کلی شبکه با استفاده از دو الگوریتم (الگوریتم ژنتیک)

نمونه	سطوح تخصیص	تعداد هاب	زمان (ساعت)	هزینه کلی (زنجیره دلار)
۱	۲۰	۲۵۰	۶۸,۵۴۲	۱۰۱۲۵۴
۲	۲۰	۳۰۰	۷۲,۳۳۲	۱۱۲۳۵۲
۳	۲۵	۴۰۰	۸۱,۴۰۲	۱۶۳۲۵۱
۴	۳۰	۵۱۰	۸۸,۴۸۴	۱۷۵۸۹۵
۵	۳۲	۶۰۰	۹۰,۴۴۱	۱۸۸۵۴۷
۶	۳۸	۶۵۰	۹۳,۲۲۱	۱۹۲۳۳۲
۷	۴۱	۷۳۰	۹۵,۳۳۲۵	۲۰۲۱۱۴
۸	۴۵	۸۰۰	۹۹,۷۱۸	۲۱۸۷۷۴
۹	۵۰	۹۰۰	۱۰۲,۳۳۲	۲۲۹۶۶۳
۱۰	۶۰	۱۰۰۰	۱۱۰,۴۷۵	۲۳۶۵۶۲

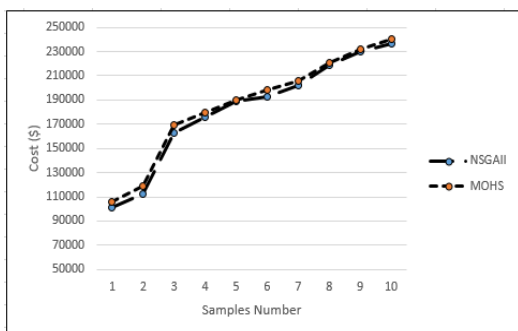


شکل ۷. مقایسه هزینه کلی شبکه با استفاده از دو الگوریتم

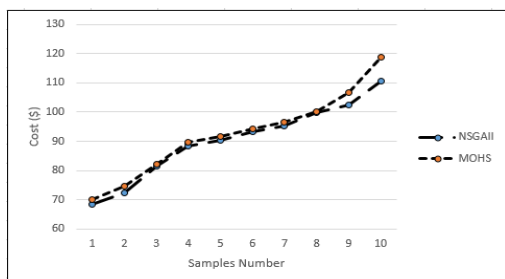
بر اساس بررسی انجام شده در شکل ۷، که به حل مدل در ابعاد متوسط اختصاص یافته است، الگوریتم چند هدفه ژنتیک به میزان ۶ درصد نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی در راستای تعیین هزینه کل شبکه بهبودی ایجاد نموده است. با توجه به مقایسه انجام شده از نظر زمان سرویس دهی در شکل ۸، در ابعاد متوسط، در زمان سرویس دهی در شبکه نیز الگوریتم ژنتیک به میزان ۱,۵ درصد سریعتر از الگوریتم جستجوی هارمونی بوده است. در نهایت به حل مدل در ابعاد بزرگ پرداخته می شود که تعداد هابها بین ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ مورد بوده است. نتایج حاصل از اجرای هر الگوریتم بصورت جداگانه در جداول ۷ و ۸ ارائه شده است. لازم به ذکر است که برای حل در ابعاد بزرگ نیز ۱۰ مدل تعیین شده است.

شکل ۹. مقایسه هزینه کلی زنجیره با استفاده از دو الگوریتم حمل و نقل شده است.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در زمان سرویس دهی شبکه، الگوریتم ژنتیک با متوسط زمان ۹۰،۲۲۷ ساعت نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی به میزان ۲ درصد با زمان کمتری مدل را به نتیجه رسانده است.



شکل ۹. مقایسه هزینه کلی زنجیره با استفاده از دو الگوریتم



شکل ۱۰. مقایسه زمان اجرای کلی زنجیره با استفاده از دو الگوریتم

#### ۴-۲- تحلیل حساسیت

با توجه به اینکه رد یا پذیرش پروژه‌ها، مهمترین جزء سرمایه گذاری است، باید پارامترهای اصلی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند تا بتوان میزان تغییرات قابل قبول آنها را بدست آورد. در این میان، با توجه به مسائل اقتصاد مهندسی، باید ارزش زمانی پول را نیز در نظر گرفت. بنابراین، باید تحلیل حساسیت نیز با همراهی روش‌های اقتصاد مهندسی انجام گیرد که مهمترین آنها، در نظر گرفتن ارزش حال سرمایه گذاری و نرخ بازگشت سرمایه است. بمنظور تحلیل حساسیت، مدل را برای ابعاد مختلف، کوچک، متوسط، و بزرگ بررسی می‌کنیم. نتایج بدست آمده از حل دقیق در گمز، الگوریتم جستجوی هارمونی و الگوریتم چند هدفه ژنتیک را برای حالت‌های مختلف زمان و هزینه بررسی می‌کنیم.

در جدول ۸ نتایج مربوط به توابع هدف یعنی زمان حمل و نقل و هزینه کل زنجیره برای مدل در ابعاد بزرگ که در آن سطوح تخصیص و تعداد هاب بسیار زیاد می‌باشد با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته شده است.

جدول ۸. نتایج زمان و هزینه کلی در ابعاد بزرگ (الگوریتم جستجوی هارمونی)

نمونه	سطوح تخصیص	تعداد هاب	زمان (ساعت)	هزینه کلی (دلار)
۱	۲۰	۲۵۰	۷۰,۲۲۱	۱۰۵۳۹۶
۲	۲۰	۳۰۰	۷۴,۵۴۷	۱۱۸۶۳۶
۳	۲۵	۴۰۰	۸۲,۰۰۲	۱۶۸۹۵۶
۴	۳۰	۵۱۰	۸۹,۶۶۳۲	۱۷۹۶۶۵
۵	۳۲	۶۰۰	۹۱,۵۵۴	۱۹۰۳۰۵
۶	۳۸	۶۵۰	۹۴,۲۰۱	۱۹۸۳۳۲
۷	۴۱	۷۳۰	۹۶,۳۸۷	۲۰۵۶۵۸
۸	۴۵	۸۰۰	۱۰۰,۳۰۲	۲۲۰۳۳۲
۹	۵۰	۹۰۰	۱۰۶,۵۵۴	۲۳۲۰۸۲
۱۰	۶۰	۱۰۰۰	۱۱۸,۸۶۹	۲۴۰۳۲۵

همچون جدول ۷ که به حل مدل در ابعاد بزرگ با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته است، در جدول ۸ همان مدل با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی حل شده است. شکل‌های ۹ و ۱۰ مقایسه نموداری نتایج حاصل از هر دو الگوریتم را در ابعاد بزرگ نشان می‌دهد.

بر اساس شکل ۱۰، و با توجه به مقایسه صورت گرفته شده هر دو الگوریتم برای مدل در ابعاد بزرگ مشخص شد که الگوریتم چند هدفه ژنتیک با بهبودی ۲ درصد نسبت به الگوریتم جستجوی هارمونی سبب کاهش هزینه‌های بیشتر

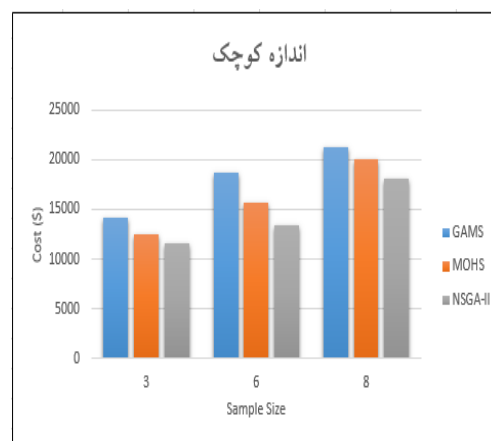
جدول ۹. نتایج زمان و هزینه

NSGA-II		MOHS		GAMS		مدل	
هزینه (دلار)	زمان (ساعت)	هزینه (دلار)	زمان (ساعت)	هزینه (دلار)	زمان (ساعت)	تعداد هاب	
۱۱۵۵۰	۳,۸۵۴	۱۲۵۲۴	۴,۳۶	۱۴۲۱۲	۵,۲۴	۳	کوچک
۱۳۴۵۴	۵,۱۰۲	۱۵۶۳۶	۶,۳۲۳	۱۸۶۶۳	۷,۸۵۴	۶	
۱۸۰۴۷	۷,۹۶۸	۱۹۹۸۵	۸,۶۶۲	۲۱۲۴۵	۹,۲۳۲	۸	
۲۳۶۶۵	۱۱,۰۲۱	۲۳۶۵۶	۱۲,۳۲۸	-	-	۱۲	متوسط
۲۴۱۴۱	۱۵,۰۰۱	۲۶۸۵۹	۱۶,۸۷۴	-	-	۱۶	
۲۷۸۹۸	۱۷,۲۳۲	۲۹۹۸۷	۱۹,۸۸۵	-	-	۱۸	
۳۰۶۵۲	۲۰,۳۸۴	۳۳۶۶۳	۲۳,۳۳۲	-	-	۲۰	بزرگ
۳۴۸۷۵	۲۶,۳۶۳	۳۶۸۷۴	۲۸,۹۶۸	-	-	۲۴	
۳۷۷۴۵	۲۹,۸۸۵	۴۰۹۸۵	۳۱,۲۰۴	-	-	۲۸	

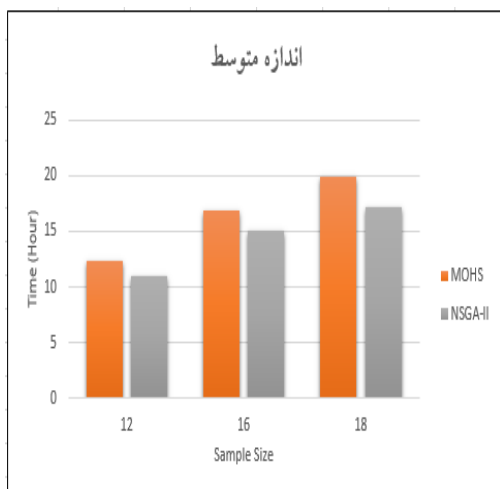
حال به منظور مقایسه می توان نتایج را بصورت نمودار میله‌ای ارائه داد.



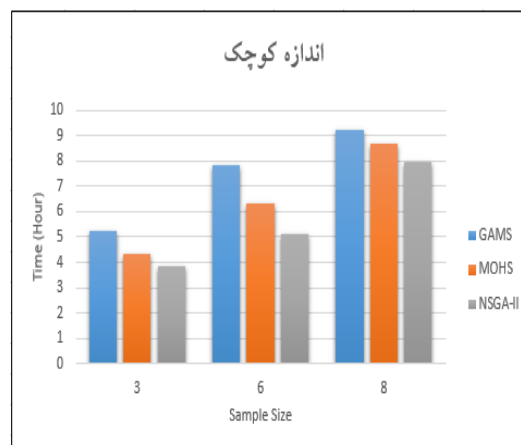
شکل ۱۳. مقایسه نتایج هزینه (ابعاد متوسط)



شکل ۱۱. مقایسه نتایج هزینه (ابعاد کوچک)



شکل ۱۴. مقایسه نتایج زمان (ابعاد متوسط)

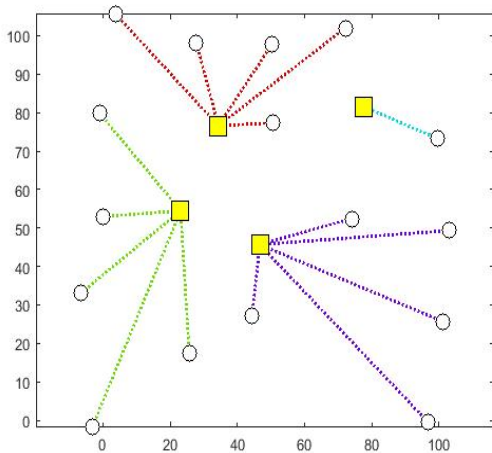


شکل ۱۲. مقایسه نتایج زمان (ابعاد کوچک)

نتایج بدست آمده حاکی از کارایی بالای الگوریتم ژنتیک در هر دو حوزه زمان و هزینه بوده است. از طرف دیگر نتایج نشان می دهد که به دلیل پیچیده بودن مساله، نرم افزار گمز قادر به انجام حل مساله در مقادیر بزرگ و متوسط نخواهد بود. همچنین نتایج نشان داد که مساله در تمام شرایط حساسیت پایدار بوده و الگوریتم ژنتیک نتایج بهینه تری را ارائه نموده که این نشان از قابلیت بالا و حافظه زیاد این الگوریتم در حل مسائل پیچیده می باشد و در آخر مساله مکانیابی هاب را با الگوریتم ژنتیک در ابعاد ۲۰، ۳۰ و ۴۰ گره مورد بررسی قرار می دهیم که تنها مقدار هزینه ها را در مقایسه با مقدار دقیق بدست آمده از نرم افزار گمز مقایسه می نماییم.

#### حل مساله در ابعاد ۲۰ گره

در این حالت ۲۰ گره برای شبکه در نظر گرفته شده است که در این بین ۴ گره به عنوان گره های اصلی انتخاب شده اند. الگوریتم ژنتیک بر اساس تکرارهای در نظر گرفته شده، به مقدار بهینه و کمینه هزینه ها همگرا شده است. نتایج این مساله در شکل های ۱۸ و ۱۹ ارائه شده است.



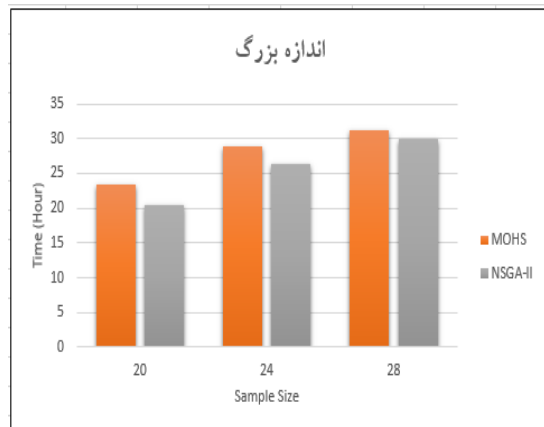
شکل ۱۸. نتیجه مکانیابی هاب (قطب) برای مساله ۲۰ گره



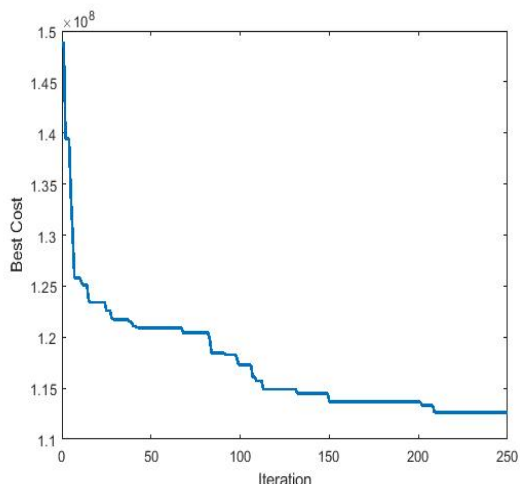
شکل ۱۵. مقایسه نتایج هزینه (ابعاد متوسط)



شکل ۱۶. مقایسه نتایج هزینه (ابعاد بزرگ)



شکل ۱۷. مقایسه نتایج زمان (ابعاد بزرگ)

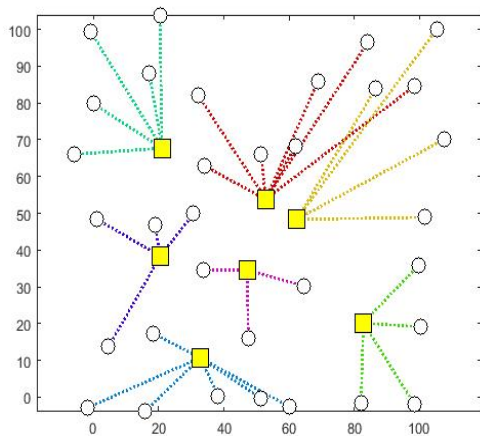


شکل ۲۱. همگرایی هزینه‌های شبکه برای مساله ۳۰ گره

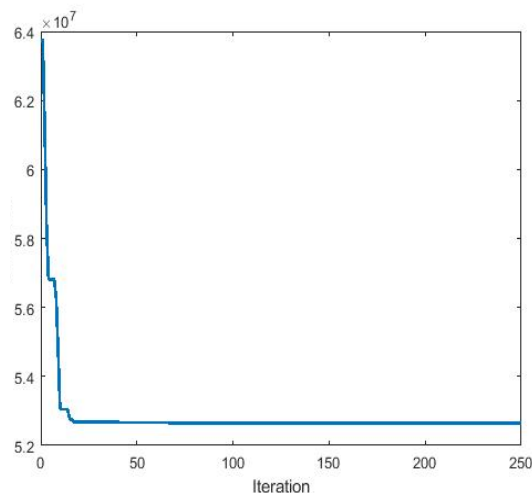
بر اساس نمودار شکل فوق مشاهده می‌گردد که مقدار هزینه‌های شبکه حمل و نقل با ۳۰ گره برابر با  $1.1249 \times 10^8$  بوده است.

#### حل مساله در ابعاد ۴۰ گره

در این مساله، از ۴۰ گره در شبکه استفاده شد که ۷ گره به عنوان گره اصلی در نظر گرفته شده‌اند که ارتباط بین دیگر مراکز را برقرار کنند تا در کمترین فاصله، وسایل نقلیه‌ها جابجا شده و خدمات ارائه شود. این امر منجر به کاهش هزینه‌های شبکه به منظور خدمات رسانی می‌گردد. نتایج این حالت در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ ارائه شده است.



شکل ۲۲. نتیجه مکان‌یابی هاب برای مساله ۴۰ گره

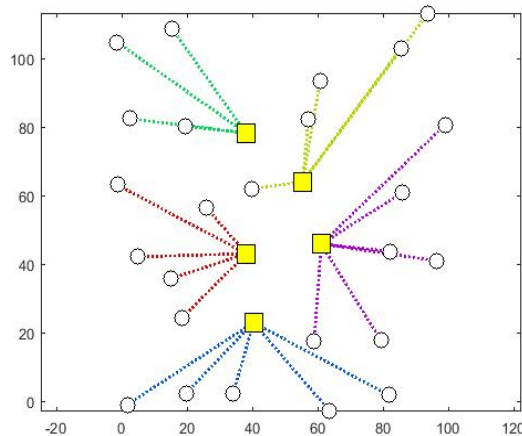


شکل ۱۹. همگرایی هزینه‌های شبکه حمل و نقل برای مساله ۲۰ گره

بر اساس نمودار شکل فوق مشاهده می‌گردد که مقدار هزینه‌های شبکه  $5.264 \times 10^7$  بوده است.

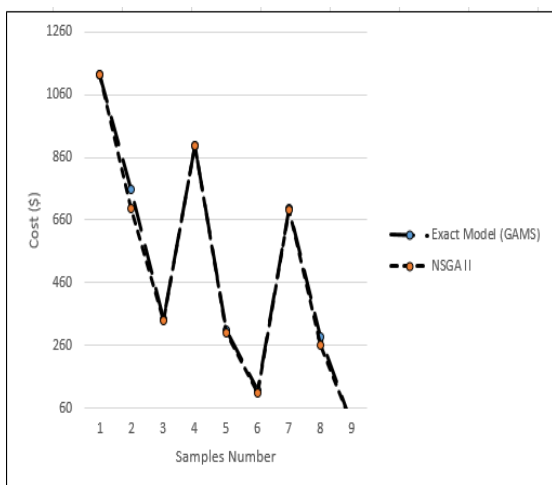
#### حل مساله در ابعاد ۳۰ گره

در این مساله، از ۳۰ گره مورد نظر، ۵ گره به عنوان گره اصلی در نظر گرفته شده‌اند که ارتباط بین دیگر مراکز را برقرار کنند تا در کمترین فاصله، وسایل نقلیه‌ها جابجا شوند و خدمات ارائه شود. این امر منجر به کاهش هزینه‌های شبکه به منظور خدمات رسانی می‌گردد. نتایج این حالت در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ ارائه شده است.



شکل ۲۰. نتیجه مکان‌یابی هاب برای مساله ۳۰ گره

نمودار مقایسه‌ای جدول ۱۰ را می‌توان در شکل ۲۴ نشان داد.



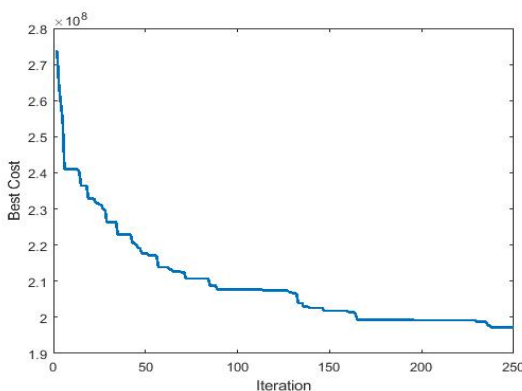
شکل ۲۴. مقایسه هزینه‌های دقیق و بهینه شبکه برای مساله ۲۰ گره

جدول ۱۱. مقایسه نتایج حل دقیق و بهینه مسئله با ابعاد ۳۰ گره

ردیف	جواب دقیق	حل بهینه	درصد بهینه‌گی
۱	۳۹۵۹,۲۳	۳۵۶۶,۸۵	۹,۹۱۱
۲	۲۶۳۵,۵۲	۲۴۲۴,۲۶	۸,۰۱۶
۳	۱۵۴۶,۳۶	۱۳۲۶,۴۸	۱۴,۲۱۹
۴	۲۴۴۷,۷۴	۲۱۲۷,۷۸	۱۳,۰۷۲
۵	۱۰۲۴,۲۲	۹۲۴,۳۶	۹,۷۵۰
۶	۶۴۸,۷۹	۵۶۵,۴۷	۱۲,۸۴۲
۷	۲۰۳۳,۲۶	۱۹۷۹,۵۸	۲,۶۴۰
۸	۸۴۵,۴۴	۷۳۳,۲۶	۱۳,۲۶۹
۹	۲۰۷,۳۹	۱۸۹,۶۹	۸,۵۳۵

نمودار مقایسه‌ای جدول فوق را می‌توان در شکل ۲۵ نشان داد.

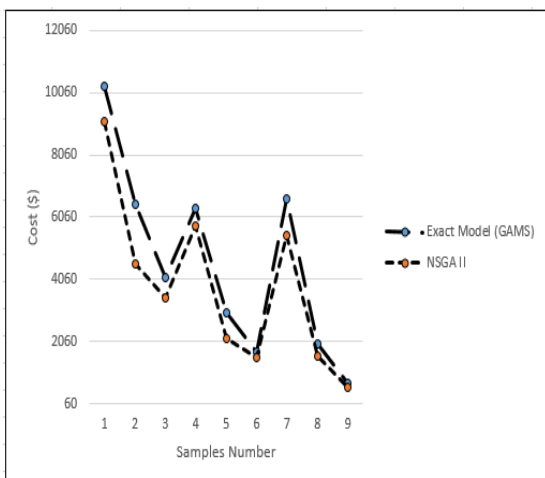
بر اساس نمودار شکل فوق مشاهده می‌گردد که مقدار هزینه‌های شبکه برای این مساله  $1.9837 \times 10^8$  بوده است. همانطور که در تحلیل این سه مدل مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد گره هزینه‌ها نیز با رشد همراه بوده که بهینه‌سازی و ارتباط بین این گره‌ها توانسته هزینه‌های شبکه حمل و نقل را تا حد قابل قبولی کنترل نماید. در مرحله بعد برای هر سه مساله نمونه، مقادیر بهینه حاصل از هر مساله و مقدار حل دقیق آن که حاصل از کنویسی در نرم افزار گمز می‌باشد را ارائه داده‌ایم. بر این اساس نتایج حاصل از حل مساله در ابعاد ۲۰ گره در جدول ۱۰، ابعاد ۳۰ گره در جدول ۱۱ و مساله با ابعاد ۴۰ گره در جدول ۱۲ ارائه شده است.



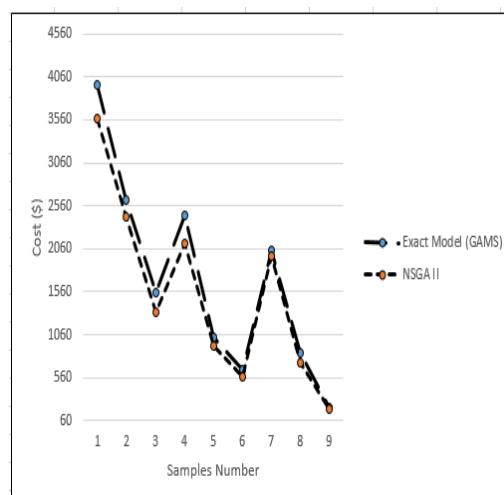
شکل ۲۳. همگرایی هزینه‌های شبکه برای مساله ۴۰ گره

جدول ۱۰. مقایسه نتایج حل دقیق و بهینه مسئله با ابعاد ۲۰ گره

ردیف	جواب دقیق	حل بهینه	درصد بهینه‌گی
۱	۱۱۲۵,۳۶	۱۱۲۴,۸۵	۰,۰۴۵
۲	۷۵۶,۸۹	۶۹۷,۷۹	۷,۸۰۸
۳	۳۴۵,۲۳۲	۳۴۰,۴۴	۱,۳۸۸
۴	۸۹۷,۳۸	۸۹۵,۶۵	۰,۱۹۳
۵	۳۱۰,۰۷	۲۹۹,۸۶	۳,۲۹۳
۶	۱۱۶,۳۴	۱۱۰,۲۲	۵,۲۶۰
۷	۶۹۷,۸۸	۶۹۰,۸۷	۱,۰۰۴
۸	۲۸۸,۷۱	۲۶۳,۵۲	۸,۷۲۵
۹	۱۰,۸۸	۸,۹۸	۱۷,۴۶۳



شکل ۲۶. مقایسه هزینه‌های دقیق و بهینه زنجیره برای مساله ۴۰ گره



شکل ۲۵. مقایسه هزینه‌های دقیق و بهینه زنجیره برای مساله ۳۰ گره

جدول ۱۲. مقایسه نتایج حل دقیق و بهینه مسله با ابعاد ۴۰ گره

ردیف	جواب دقیق	حل بهینه	درصد بهینه‌گی
۱	۱۰۲۵۶,۵۸	۹۱۲۳,۵۸	۱۱,۰۴۷
۲	۶۴۵۸,۲	۴۵۶۲,۰۱	۲۹,۳۶۱
۳	۴۱۲۳,۵۲	۳۴۷۵,۲۵	۱۵,۷۲۱
۴	۶۳۳۵,۱۲	۵۷۸۴,۳۳	۸,۶۹۴
۵	۲۹۷۸,۷۷	۲۱۴۷,۷۸	۲۷,۸۹۷
۶	۱۷۱۵,۴۲	۱۵۴۱,۲۳	۱۰,۱۵۴
۷	۶۶۳۲,۱۵	۵۴۷۶,۵۳	۱۷,۴۲۵
۸	۱۹۷۸,۴۵	۱۶۰۲,۳۱	۱۹,۰۱۲
۹	۷۲۱,۲۲	۵۹۴,۶۶	۱۷,۵۴۸

نمودار مقایسه ای جدول ۱۲ را می توان در شکل زیر نشان داد.

بر اساس مقایسه‌های انجام شده در زمینه حل دقیق و حل بهینه، ملاحظه می گردد که هرچه ابعاد مساله بیشتر شود، مقدار بهینگی حاصل شده بیشتر خواهد بود. زیرا الگوریتم ژنتیک از دسته الگوریتم‌های فراابتکاری است که در حل مسائل **Np-Hard** کاربرد مطلوبی دارد. از این رو هرچه مساله پیچیده‌تر شود، کارایی الگوریتم هم بالاتر رفته و بیشتر خود را نشان می‌دهد.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی مساله مکان یابی هاب در یک زنجیره تامین حمل و نقل پرداخته شد. از این رو از یک مدل ریاضی جهت تعیین سطح مختلف زنجیره استفاده گردید. همچنین از دو الگوریتم جستجوی هارمونی و ژنتیک جهت حل مساله استفاده شد که هر کدام از این الگوریتم ها قادر به حل مساله در ابعاد مختلف می‌باشند. منظور از ابعاد مختلف، به معنای در نظرگیری تعداد هاب و سطح تخصیص متفاوت می باشد که می‌تواند مساله را در حالت های بسیار کوچک و بسیار بزرگ حل نماید. نتایج نشان می دهد که مدل بهینه مکان یابی قطب در شبکه‌های حمل و نقل قادر به کاهش هزینه‌های کل زنجیره و زمان جابجایی و حمل و نقل خواهد شد. دلیل استنباط از صحت مدل این است که مدل پیشنهادی در ابعاد بسیار کوچک توسط نرم افزار گمز حل گردید تا علاوه بر صحت‌گذاری مدل، از نتایج حاصل اطمینان حاصل شود. از آنجا که مدل پیشنهادی قادر به حل زنجیره در سطوح مختلف می باشد، می تواند از آن در صنایع بزرگ و کوچک استفاده نمود که این امر کاربردی

الگوریتم‌ها به منظور حل مسائل کوچک از کارایی لازم برخوردار می‌باشند زیرا در زمانی بسیار کم، نتایجی یکسان با نرم افزار GAMS را به دست آورده‌اند. در ادامه عملکرد الگوریتم های پیشنهادی در حل مسائل متوسط و بزرگ مورد مقایسه قرار گرفت. لازم به ذکر است که دو معیار هزینه و زمان جابجایی بین گره‌ها در هر سه روش ارزیابی شد و نتایج نشان داد که الگوریتم‌های ارائه شده در نرم افزار متلب کارایی بهتری رانسبت به مدل حل شده در نرم افزار گمز داشته‌اند از طرف دیگر نتایج حاکی از عملکرد بالای الگوریتم ژنتیک نسبت به جستجوی هارمونی بوده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل بهینه مکانیابی قطب در شبکه‌های حمل و نقل قادر به کاهش هزینه‌های کل زنجیره و زمان جابجایی و حمل و نقل خواهد شد. دلیل استنباط از صحت مدل این است که مدل پیشنهادی در ابعاد بسیار کوچک توسط نرم افزار گمز حل گردید تا علاوه بر صحت گزاری مدل، از نتایج حاصل اطمینان حاصل شود. از آنجا که مدل پیشنهادی قادر به حل زنجیره در سطوح مختلف می باشد، می‌تواند از آن در صنایع بزرگ و کوچک استفاده نمود که این امر کاربردی بودن پژوهش را نشان می‌دهد.

## ۶- مراجع

- Abdi, A., Mosadeq, Z., & Bigdeli Rad, H. (2020). Prioritizing Factors Affecting Road Safety Using Fuzzy Hierarchical Analysis. *Journal of Transportation Research*, 17(3), 33-44.
- Afandizadeh Zargari, S., Bigdeli Rad, H., & Shaker, H. (2019). Using optimization and metaheuristic method to reduce the bus headway (Case study: Qazvin Bus Routes). *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 10(4), 833-849.
- Afandizadeh, S., & Bigdeli Rad, H. (2021). Developing a model to determine the number of vehicles lane changing on freeways by Brownian motion method. *Nonlinear Engineering*, 10(1), 450-460.
- Afandizadeh, S., Aziz Jalali, D., & Bigdeli Rad, H. (2023). Optimal routing for shared autonomous vehicles feeder services in urban networks. *Journal of Transportation Research*.
- Alumur, S. A., Campbell, J. F., Contreras, I., Kara, B. Y., Marianov, V., & O'Kelly, M. E. (2021). Perspectives on modeling hub location problems. *European Journal of Operational Research*, 291(1), 1-17.
- Al-Zuheri, A., & Vlachos, I. (2023). A genetic algorithm-based optimisation model for designing an efficient, sustainable supply chain network under disruption risks. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 37(1), 1-23.

بودن پژوهش را نشان می‌دهد. پس از مطالعه ی منابع و مراجع مرتبط با طراحی سیستم‌های توزیع یکپارچه، مسأله ی مورد بررسی با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و مفروضات تعیین شده به صورت برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح آمیخته (MINLP) مدل سازی گردید. سپس به منظور دستیابی به راه حل بهینه ی سراسری، با استفاده از تکنیک‌های خطی سازی، مدل ریاضی مسأله به برنامه ریزی خطی عدد صحیح آمیخته (MILP) تبدیل گردید. اعتبار مدل MILP ارائه شده به کمک حل یک مسأله با ابعاد کوچک توسط نرم افزار بهینه سازی GAMS ارزیابی شد. در این پژوهش یک مدل ریاضی دو هدفه شامل حداقل کردن هزینه‌ها و حداقل کردن زمان حمل و نقل بین هر جفت گره ارائه گردید و با استفاده از دو الگوریتم چند هدفه ژنتیک و جستجوی هارمونی مورد ارزیابی قرار گرفت. از طرفی با توجه به این که هدف اعمال شرایط غیر قطعی می‌باشد، پارامترهای تقاضا، هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های ایجاد ظرفیت اضافی نیز به صورت غیر قطعی در نظر گرفته شدند که پارامترهای غیر قطعی به صورت اعداد فازی دوزنقه‌ای در نظر گرفته شدند. مدل ارائه شده توسط نرم افزار متلب حل شده و نقاط هاب و گره‌های تخصیص یافته به آن نقاط مشخص شدند. نتایج نشان داد که با تغییر دادن تعداد نقاط گره، هزینه‌ها افزایش یافته و تعداد و نوع نقاط هاب هم تغییر پیدا می‌کنند. این اتفاق در دنیای واقعی هم ملموس است چرا که با سخت گیرانه شدن تصمیم‌ها متحمل هزینه‌های بیشتر می‌شویم و هر چقدر عدم قطعیت بیشتر گردد میزان هزینه ها افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان از این مدل برای مسائل مکانیابی هاب در شرایط عدم قطعیت و با مدنظر قرار دادن نظر نخبگان در تعیین بازه ی پارامترهای غیر قطعی، استفاده نمود که با این امکان تصمیم‌گیرنده قادر خواهد بود برخی محدودیت‌های دارای پارامتر غیر قطعی را در حداقل سطح اطمینان ارضا نماید. تحلیل حساسیت بر روی سه شرایط مدل کوچک متوسط و بزرگ با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک و جستجوی هارمونی در نرم افزار متلب و نیز نرم افزار گمز مورد بررسی قرار گرفت لازم به ذکر است از آن جا که مساله از نوع NP-Hard می‌باشد ابعاد متوسط و بزرگ در نرم افزار گمز قابلیت پیاده سازی را نداشته و تنها مدل کوچک برای این مساله حل گردید. با افزایش ابعاد مسأله، زمان حل دقیق مدل ریاضی ارائه شده به شدت افزایش می‌یابد. بنابراین به منظور حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ، دو الگوریتم فراابتکاری جستجوی هارمونی و ژنتیک توسعه داده شدند. نتایج به دست آمده از حل مسائل با ابعاد کوچک توسط الگوریتم‌های پیشنهادی نشان دادند که هر یک از این

- Maleki, M., Majlesinasab, N., & Sinha, A. K. (2023). An efficient model for the multiple allocation hub maximal covering problem. *Optimization Methods and Software*, 1-22.
- Musavi, M., & Bozorgi-Amiri, A. (2017). A multi-objective sustainable hub location-scheduling problem for perishable food supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 766-778.
- Neamatian Monemi, R., Gelareh, S., Hanafi, S., & Maculan, N. (2017). A co-opetitive framework for the hub location problems in transportation networks. *Optimization*, 66(12), 2089-2106.
- Rad, V. B., Najafpour, H., Shieh, E., & Rad, H. B. (2019). Questionnaire design: relation of physical activity and safety. *Int. J. Architect. Eng. Urban Plan*, 29(1), 113-123.
- Shen, H., Liang, Y., & Shen, Z. J. M. (2019). Reliable Hub Location Model for Air Transportation Networks under Random Disruptions. *Manufacturing & Service Operations Management*, Forthcoming.
- Yildiz, B., Yaman Paternotte, H., & Karasan, O. E. (2019). Hub location and route dimensioning: strategic and tactical intermodal transportation hub network design (No. 639284). KU Leuven, Faculty of Economics and Business (FEB), Department of Decision Sciences and Information Management, Leuven.
- Zheng, Y., Ji, Y., Shen, Y., Liu, B., & Du, Y. (2022). Hub location problem considering spoke links with incentive-dependent capacities. *Computers & Operations Research*, 148, 105959.
- Ameri, A., Bigdeli Rad, H., Shaker, H., & Ameri, M. (2021). Cellular Transmission and Optimization Model Development to Determine the Distances between Variable Message Signs. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 7(1), 1-16.
- Atay, M., Eroglu, Y., & Seckiner, S. U. (2023). Domestic flight network hub location problem under traffic disruption with sustainability provision. *Case Studies on Transport Policy*, 12, 101011.
- Fahmy, S. A., Zaki, A. M., & Gaber, Y. H. (2023). Optimal locations and flow allocations for aggregation hubs in supply chain networks of perishable products. *Socio-Economic Planning Sciences*, 86, 101500.
- Hajisoleimani, M. M., Abdi, A., & Bigdeli Rad, H. (2021). Intermodal Non-Motorized Transportation Mode Choice; Case Study: Qazvin City. *Space Ontology International Journal*, 10(3), 31-46.
- Khaleghi, A., & Eydi, A. (2022). Hybrid solution methods for a continuous-time multi-period hub location problem with time-dependent demand and sustainability considerations. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1-41.
- Kreutzberger, E., & Konings, R. (2016). The challenge of appropriate hub terminal and hub-and-spoke network development for seaports and intermodal rail transport in Europe. *Research In Transportation Business & Management*, 19, 83-96.
- Lambora, A., Gupta, K., & Chopra, K. (2019). Genetic algorithm-A literature review. In 2019 international conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon), *IEEE*, 380-384.

# Optimal Pole Location Model in Transportation Networks Using Meta-Heuristic Algorithms

*Shahriar Afandizadeh, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Hesam Shabani Samgh Abadi, M.Sc., Student, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran.*

*Hamid Bigdeli Rad, Ph.D., Candidate, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*E-mail: zargari@iust.ac.ir*

Received: May 2025- Accepted: August 2025

## **ABSTRACT**

In this study, a two-objective mathematical model including minimizing costs and minimizing the transport time between each pair of nodes was presented and evaluated using two multi-objective genetic algorithms and harmonic search. On the other hand, due to the fact that the purpose is to apply uncertain conditions, the demand parameters, operating costs and additional capacity building costs were also considered as uncertain, and the uncertain parameters were considered as trapezoidal fuzzy numbers. The results obtained from solving problems with different dimensions based on two criteria of cost and time of movement between nodes showed the high performance of the genetic algorithm compared to the search for harmony. In order to compare the numerical results, it was found that in the small-scale model, the multi-objective genetic algorithm improved by 8.7 percent of the total costs in the system and was able to respond 9% faster than the harmonic search algorithm. Also, due to the solution of the model in medium dimensions, the multi-objective genetic algorithm has improved by 6% compared to the harmonic search algorithm in order to determine the cost of the entire network. At the time of network service, the genetic algorithm was 1.5% faster than the harmonic search algorithm. Finally, by examining the large-scale model, it was found that the multi-objective genetic algorithm with 2 percent improvement over the harmonic search algorithm reduced the transportation network costs more and by 2 percent less time.

**Keywords:** Pole Location, Transportation Networks, Meta-Heuristic Algorithms, Harmony Search