



A ROBUST HYBRID HEURISTIC FOR SOLVING THE UNCAPACITATED HUB LOCATION PROBLEM

Hossein Akbaripour, Ali Salmasnia, Reza Baradaran-Kazemzadeh & Ellips Masehian*

Hossein Akbaripour, M.Sc Graduate, Industrial Engineering Department, Tarbiat Modares University

Ali Salmasnia, Assistant Professor, Industrial Engineering Department, University of Qom

Reza Baradaran-Kazemzadeh, Associate Professor, Industrial Engineering Department, Tarbiat Modares

Ellips Masehian, Assistant Professor, Industrial Engineering Department, Tarbiat Modares University

Keywords

Hub location,
Genetic algorithm,
Simulated annealing
algorithm,
Robust parameter design

ABSTRACT

The hub-and-spoke network design problem is widely studied in facility location theory. Hub location problems usually involve decisions on optimal number and locations of hub nodes, and allocation of non-hub nodes to the hubs. In this paper, a new and robust hybrid Genetic Algorithm (GA)-Simulated Annealing (SA) heuristic is developed for solving the uncapacitated single-allocation hub location problem. In this method, GA is used for generating a number of diversified initial solutions, and SA is applied for improving both the hub selection and node assignment. Also, regarding the significant influence of parameter tuning on the performance of heuristic methods, we devised a robust parameter tuning method based on design of experiments, which not only considers the fitness of solutions, but also aims to minimize the overall runtime. The performance of the developed method was evaluated by solving a number of benchmark problems taken from the CAB and AP datasets and compared with the best existing algorithms in the literature. Computational results showed that the GA-SA hybrid heuristic is successful in finding optimal or near-optimal solutions faster than the competing algorithms.

©2015 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 26, No. 2, All Rights Reserved



توسعه یک روش هیوریستیک ترکیبی مقاوم برای حل مساله مکان‌یابی تسهیلات هاب بدون محدودیت ظرفیت

حسین اکبری پور، علی سلماس‌نیا، رضا برادران کاظم‌زاده و الیپس مسیحی*

چکیده:

مساله مکان‌یابی و طراحی شبکه تسهیلات هاب به صورت گسترده‌ای در تئوری مکان‌یابی مورد بررسی قرار گرفته است. این مساله معمولاً با تصمیم‌گیری همزمان در مورد تعداد بهینه تسهیلات هاب، مکان آن‌ها و تخصیص گره‌های غیرهاب همراه است. در این مقاله، یک هیوریستیک جدید و مقاوم در چارچوب الگوریتم ترکیبی ژنتیک - تبرید شبیه‌سازی شده (GA-SA) به منظور حل مساله مکان‌یابی تسهیلات هاب با تخصیص یگانه و ظرفیت نامحدود توسعه داده شده است. در هیوریستیک ارائه شده، از الگوریتم ژنتیک در جهت تشکیل تعدادی از راه‌حل‌های آغازین متنوع استفاده می‌شود و در ادامه الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده به منظور بهبود هر دو بردار مکان و تخصیص مساله به کار گرفته می‌شود. از آنجایی که عملکرد الگوریتم‌های هیوریستیک به شدت تحت تاثیر مقادیر پارامترهای آنها است، یک رویکرد تنظیم پارامتر مقاوم مبتنی بر طراحی آزمایش‌ها پیشنهاد شده است که علاوه بر بهبود و یا حفظ توانایی الگوریتم در دستیابی به جواب مناسب، زمان اجرای الگوریتم را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. در راستای تبیین کارایی الگوریتم توسعه داده شده، نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم بر روی مجموعه داده‌های استاندارد AP و CAB با نتایج بهترین الگوریتم‌های موجود در ادبیات مورد مقایسه قرار گرفت. این نتایج بیان می‌دارند که الگوریتم ترکیبی ارائه شده علاوه بر سرعت محاسباتی بالاتر نسبت به سایر الگوریتم‌ها، در دستیابی به پاسخ‌های بهینه و یا نزدیک به بهینه مساله مکان‌یابی تسهیلات هاب با تخصیص یگانه و ظرفیت نامحدود موفق است.

کلمات کلیدی

مکان‌یابی تسهیلات هاب،
الگوریتم ژنتیک،
الگوریتم تبرید شبیه‌سازی
شده،
طراحی مقاوم پارامتر

۱. مقدمه

از آنجایی که در بسیاری از شبکه‌های حمل و نقل هزینه انتقال یک واحد کالا بین دو نقطه با افزایش ظرفیت سیستم ارتباطی کاهش می‌یابد، طراحی شبکه‌هایی که جریان کالا را بر روی کانال‌های ارتباطی با ظرفیت بالا متمرکز می‌کنند، مورد توجه قرار گرفته است.

تاریخ وصول: ۹۰/۱۲/۲۲

تاریخ تصویب: ۹۱/۱۰/۰۹

حسین اکبری پور، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، بخش مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، h.akbaripour@modares.ac.ir
علی سلماس‌نیا، استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، a.salmasnia@qom.ac.ir
رضا برادران کاظم‌زاده، دانشیار بخش مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، rkazem@modares.ac.ir

*نویسنده مسئول مقاله: دکتر الیپس مسیحی، استادیار بخش مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، mashian@modares.ac.ir

به همین دلیل، برخی از گره (ها) به عنوان تسهیل هاب انتخاب می‌شوند و به عنوان نقاط واصل یا میانی، ارتباط غیرمستقیم میان گره‌های غیرهاب را با بهره‌گیری از کانال‌های ارتباطی با ظرفیت بالا میسر می‌سازند. تحت چنین شرایطی می‌توان از ظرفیت وسایل نقلیه موجود به طور موثرتری بهره گرفت و یا از وسایل نقلیه بزرگ‌تر استفاده کرد. این امر هزینه انتقال هر واحد کالا و در نتیجه هزینه کل حمل و نقل شبکه را کاهش می‌دهد. از جمله کاربردهای مسئله مکان‌یابی تسهیلات هاب می‌توان به طراحی شبکه‌های حمل و نقل هوایی [۱-۳]، شبکه‌های پست [۴]، صنایع حمل و نقل [۵-۶]، شبکه‌های کامپیوتری و مخابراتی [۷] اشاره کرد.

در حالت عمومی، مساله مکان‌یابی تسهیلات هاب می‌تواند به عنوان یک مساله مکان‌یابی - تخصیص^۱ قلمداد گردد بطوریکه در آن تعداد تسهیلات هاب، مکان آن‌ها و تخصیص گره‌های غیرهاب به نحوی تعیین می‌گردد که هزینه کل شبکه (مجموع هزینه‌های ثابت و

متغیر) کمینه گردد. بر مبنای محدودیت‌های موجود، گونه‌های متفاوتی از مساله مکان‌یابی تسهیلات هاب متصور است [۸]. این محدودیت‌ها عبارتند از: (۱) محدودیت ظرفیت در حداکثر جریان قابل جمع‌آوری تسهیلات هاب، (۲) تخصیص یگانه یا چندگانه گره‌های غیر هاب به تسهیلات هاب [۹] و (۳) مشخص بودن تعداد تسهیلات هاب و یا در نظرگیری آن به عنوان یک متغیر تصمیم. هدف غایی در همه‌ی این گونه‌ها از مسائل، انتخاب گره‌هایی به عنوان تسهیلات هاب و تخصیص سایر گره‌ها به این تسهیلات است بطوریکه هزینه کل سیستم کمینه گردد.

در این مقاله، به بررسی مساله مکان‌یابی تسهیلات هاب با تخصیص یگانه و ظرفیت نامحدود^۲ (USAHLP) پرداخته می‌شود که در آن محدودیتی در ظرفیت تسهیلات هاب متصور نیست و هر گره غیر هاب فقط به یک تسهیل هاب تخصیص می‌یابد. در USAHLP تعداد تسهیلات هاب متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود و به ازای گشایش هر تسهیل هاب، هزینه ثابتی به سیستم تحمیل می‌شود. همچنین، اگر تعداد تسهیلات هاب ثابت و برابر با p در نظر گرفته شود، مسئله مکان‌یابی میانه p - تسهیلاتی با ظرفیت نامحدود و تخصیص یگانه^۳ (USApHMP)، حاصل شده است [۱۰]. اگر چه USAHLP کاربردی‌تر و جذاب‌تر از USApHMP است، اما کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

مسئله مکان‌یابی تسهیلات هاب با تخصیص یگانه و ظرفیت نامحدود، حتی اگر از پیش محل تسهیلات هاب مشخص باشد، مساله NP-hard محسوب می‌شود [۱۱]. به منظور بررسی انواع مسائل مکان‌یابی تسهیلات هاب و طبقه‌بندی آن‌ها، می‌توان به Campbell [۱۲]، O'Kelly و Campbell [۱۳]، همکاران [۱۴] مراجعه کرد.

USApHMP برای اولین بار در سال ۱۹۸۷ توسط O'Kelly به صورت یک مسئله بهینه‌سازی عدد صحیح درجه دو^۴ فرموله شده است [۸]. Abdinnour-Helm و Venkatara [۱۵]، یک الگوریتم ژنتیک^۵ (GA) و یک الگوریتم انشعاب و تحدید^۶ به منظور حل USAHLP ارائه کردند. نتایج به دست آمده حکایت از عملکرد موثرتر الگوریتم ژنتیک در حل مسائل با سایز بزرگ و محدود شدن عملکرد رویکرد انشعاب و تحدید به حل مسائل با سایز کوچکتر دارد. [۱۶] Abdinnour-Helm، یک هیوریستیک ترکیبی^۷ ژنتیک - جستجوی ممنوعه^۸ (TS) برای حل USAHLP توسعه داد. در این رویکرد، الگوریتم ژنتیک برای تعیین تعداد و مکان تسهیلات هاب و جستجوی ممنوعه برای پیدا کردن تخصیص بهینه گره‌های غیر هاب، مورد استفاده قرار گرفته است. Topcuoglu و همکاران [۱۷]، یک هیوریستیک GA به منظور تعیین تعداد و مکان تسهیلات هاب و همچنین تخصیص گره‌های غیر هاب پیشنهاد کردند که قادر است به جواب‌های با کیفیت مناسب در زمان کوتاه دست یابد. [۱۸] Chen، رویکردی برای به دست آوردن حد بالای^۹

تعداد تسهیلات هاب و یک هیوریستیک ترکیبی بر اساس تبرید شبیه‌سازی شده^{۱۰} (SA)، TS و فرآیند بهبود به منظور حل USAHLP پیشنهاد کرد. Silva و Cunha [۱۹]، دو هیوریستیک مبتنی بر TS ارائه کردند. رویکرد اول یک هیوریستیک جستجوی ممنوعه چند آغاز^{۱۱} (MSTS) است که در آن چند راه حل آغازین متفاوت ساخته می‌شود و سپس توسط TS بهبود داده می‌شوند. در رویکرد دوم، یک هیوریستیک TS دو مرحله‌ای ارائه شده است که در آن راه‌حل شدنی آغازین به وسیله TS بهبود می‌یابد. بهترین نتایج موجود در ادبیات مکان‌یابی تسهیلات هاب با ظرفیت نامحدود، توسط Topcuoglu و همکاران [۱۷]، Chen [۱۸] و Silva و Cunha [۱۹] فراهم آمده است. با این حال، نتایج ارائه شده توسط Silva و Cunha [۱۹] در برخی موارد با خطاهای قابل توجه-ای همراه است.

در این مقاله، به منظور تلفیق نقاط قوت دو الگوریتم مذکور یک هیوریستیک ترکیبی GA-SA توسعه داده شده و از آن در جهت حل USAHLP بهره گرفته شده است. از آنجایی که عملکرد الگوریتم‌های هیوریستیک به شدت تحت تاثیر مقادیر پارامترهای آنها است، یک رویکرد تنظیم پارامتر مقاوم مبتنی بر طراحی آزمایش‌ها پیشنهاد شده است که علاوه بر حفظ توانایی الگوریتم در دستیابی به جواب مناسب، زمان اجرای الگوریتم را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. به منظور تبیین کارایی الگوریتم ترکیبی، کیفیت جواب‌های حاصل از اجرای الگوریتم بر روی مجموعه داده‌های استاندارد CAB (Civil Aeronautics Board) و AP (Australian Post)، با جواب‌های بهینه‌گزارش شده توسط Silva و Cunha [۱۹] مقایسه شده است. همچنین، کارآمدی رویکرد تنظیم پارامتر مقاوم پیشنهادی با بکارگیری آن در الگوریتم ژنتیک ارائه شده توسط Topcuoglu و همکاران [۱۷] مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

ادامه‌ی این مقاله به این صورت ارائه می‌شود: در بخش ۲، مدل ریاضی مساله مکان‌یابی تسهیلات هاب با تخصیص یگانه و ظرفیت نامحدود بیان می‌گردد. هیوریستیک ترکیبی در بخش ۳ شرح داده می‌شود. همچنین، جزئیات الگوریتم ترکیبی همچون نحوه نمایش جواب، تشکیل جمعیت اولیه، عملگر تقاطع^{۱۲}، عملگر ترکیبی و شرط توقف در بخش ۳ ارائه می‌شوند. در ادامه، رویکرد تنظیم پارامتر پیشنهادی مبتنی بر طراحی آزمایش‌ها به صورت گام به گام تبیین می‌گردد. نتایج محاسباتی شامل نتایج حاصل از تنظیم پارامتر الگوریتم‌ها و همچنین نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌ها بر روی مجموعه داده‌های CAB و AP در بخش ۴ ارائه می‌شوند. نتیجه‌گیری‌های بعمل آمده به همراه زمینه‌های تحقیقاتی آتی نیز در بخش ۵ بیان می‌گردند.

۲. مدل ریاضی مکان یابی تسهیلات هاب با تخصیص

یگانه و ظرفیت نامحدود

در این بخش به منظور توصیف ساختار مساله، یک مدل ریاضی برای USAHLP ارائه می شود. بدین منظور، ابتدا فرضیات اساسی مدل و سپس پارامترها و متغیرهای مورد استفاده در آن و در نهایت نیز مدل ریاضی بکارگرفته شده در حل USAHLP ارائه می گردد.

۲-۱. فرضیات مدل

۱. در شبکه n گره وجود دارد؛
۲. تعداد تسهیلات متغیر تصمیم در نظر گرفته می شود و به ازای گشایش هر تسهیل هاب، هزینه ثابتی به سیستم تحمیل می گردد؛
۳. همه تسهیلات هاب با یکدیگر در ارتباط هستند و این در حالی است که هیچ یک از گره های غیرهاب نمی توانند به طور مستقیم با یکدیگر ارتباط داشته باشند (همه ی جریان بایستی با استفاده از تسهیلات هاب انتقال یابد)؛
۴. هر گره غیر هاب فقط به یک تسهیل هاب تخصیص می یابد.

۲-۲. پارامترها و متغیرهای مدل

پارامترها و متغیرهای مورد نیاز برای مدل سازی مسئله به شرح زیر می باشند.

N : مجموعه ی گره های موجود در شبکه.

C_{ij} : هزینه انتقال هر واحد جریان از گره i به گره j .

W_{ij} : مقدار جریان انتقالی از گره i به گره j .

α : ضریب تخفیف^{۱۳} به منظور کاهش هزینه ی انتقال جریان ما بین تسهیلات هاب.

χ : ضریب هزینه ی انتقال جریان ما بین نقاط مبدأ و تسهیلات هاب.

δ : ضریب هزینه ی انتقال جریان ما بین تسهیلات هاب و نقاط مقصد.

f_j : هزینه ی ثابت گشایش تسهیل هاب در گره j ام.

X_{ik} : متغیر تصمیم باینری^{۱۴} نشان دهنده ی تخصیص یا عدم تخصیص گره i -ام به تسهیل هاب موجود در گره k -ام.

در اکثر موارد، هزینه ی C_{ij} متناسب با مسافت بین گره های i و j در نظر گرفته می شود و از نامساوی مثلثی^{۱۵} تبعیت می کند. با توجه به فرضیات ذکر شده در بخش ۲-۱، مسیر مابین مبدأ غیرهاب i -ام و مقصد غیرهاب j -ام متشکل از سه قسمت است: جمع آوری جریان از مبدأ i به هاب k ، انتقال جریان بین تسهیلات هاب k و l توزیع جریان از هاب l به مقصد j همچنین، هزینه انتقال جریان از طریق مسیر $(i \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow j)$ به صورت $\chi \times C_{ik} + \alpha \times C_{kl} + \delta \times C_{lj}$ محاسبه می شود. معمولاً α به دلیل حجم بالای جریان مابین تسهیلات هاب، کوچکتر از χ, δ فرض می شود بطوریکه این مقادیر در ادبیات به صورت $\alpha < 1$ و $\chi = \delta = 1$ گزارش شده اند.

۲-۳. مدل ریاضی USAHLP

O'Kelly برای اولین بار USAHLP را به صورت یک مساله بهینه سازی صفر و یک درجه دوبا محدودیت های خطی فرموله کرد [۲۰]. همچنین مساله مذکور، با استفاده از برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط^{۱۶} مدل شده است [۱۲، ۲۱]. از آنجایی که مدل عدد صحیح درجه دو تناسب بیشتری با هیوریستیک GA-SA دارد، در این مقاله از مدل O'Kelly به شرح زیر بهره گرفته می شود:

$$\min f(x) = \sum_i \sum_j W_{ij} \sum_k \chi C_{ik} X_{ik} + \sum_i \sum_j W_{ji} \sum_l \delta C_{jl} X_{jl} + \sum_i \sum_k X_{ik} \sum_j \sum_l X_{jl} \alpha C_{kl} W_{ij} + \sum_j X_{jj} f_j \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_k X_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$X_{kk} - X_{ik} \geq 0 \quad \forall i, k \quad (3)$$

$$X_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i, k \quad (4)$$

تابع هدف (۱) مدل عدد صحیح درجه دو، مجموع هزینه جمع آوری، انتقال، توزیع جریان و همچنین گشایش تسهیلات هاب را شامل می شود. محدودیت (۲) تضمین می کند که هر گره فقط به یک تسهیل هاب تخصیص یابد. محدودیت نامساوی (۳) نشان می دهد که گره i به گره k -ام تخصیص می یابد اگر k به عنوان هاب انتخاب شده باشد. محدودیت آخر نیز الزام عدد صحیح بودن همه ی متغیرها را بیان می دارد.

در مدل فوق، متغیر تصمیم عدد صحیح $X_{ik} = 1$ است اگر گره i به تسهیل هاب k تخصیص یابد و در غیر این صورت $X_{ik} = 0$ در نظر گرفته می شود. همچنین، در صورتی که گره j -ام به عنوان تسهیل هاب انتخاب شود، $X_{jj} = 1$ و در غیر این صورت $X_{jj} = 0$ خواهد بود. به عبارتی دیگر هر تسهیل هاب به خودش تخصیص داده می شود.

با فرض متقارن^{۱۷} بودن ماتریس هزینه و تعریف پارامترهای O_i و D_i به ترتیب به عنوان مجموعه جریان ورودی و خروجی گره i را می‌توان به صورت

$$O_i = \sum_j W_{ij}, D_j = \sum_i W_{ji}$$

زیر بازنویسی کرد:

$$\min f(x) = \sum_i \sum_k X_{ik} C_{ik} (\chi O_i + \delta D_i) + \sum_i \sum_k X_{ik} \sum_j \sum_l X_{jl} \alpha C_{kl} W_{ij} + \sum_j X_{jj} f_j \quad (5)$$

مناسبی در یافتن راه‌حل‌های بهینه محلی^{۲۱} دارد، در قالب یک الگوریتم جستجوگر محلی^{۲۲} به ایفای نقش می‌پردازد.

۳-۲. هیوریستیک GASAUHLP

الگوریتم GASAUHLP رویکردی مبتنی بر جمعیت است که از GA و SA به ترتیب به عنوان جستجوگر جهانی^{۲۳} و جستجوگر محلی، بهره می‌گیرد. هیوریستیک پیشنهادی، ۲/۳ جمعیت اولیه را بر مبنای میزان جریان کالا و هزینه انتقال آن‌ها در هر گره و ۱/۳ باقی مانده را به منظور جستجوی جامع فضای حل مساله، به صورت تصادفی تشکیل می‌دهد. در ادامه، با استفاده از عملگر تقاطع نسل جدیدی از جواب‌ها ایجاد می‌گردد. سپس، برای دستیابی به بهترین همسایگی هر یک از اعضای جمعیت جدید، از SA به عنوان یک جستجوگر محلی استفاده می‌شود. در نهایت، جمعیت جدید ورودی GA فرض می‌شود و فرآیند مذکور تا مشاهده شرایط توقف تکرار می‌گردد.

۳-۲-۱. نمایش جواب

در GASAUHLP، هر کروموزوم^{۲۴} (هر یک از راه‌حل‌ها) از دو آرایه هاب^{۲۵} و آرایه تخصیص^{۲۶} تشکیل می‌گردد بطوریکه طول هر یک از آرایه‌ها برابر با تعداد گره‌های موجود در شبکه است. آرایه هاب متشکل از مقادیر ۱ و ۰ است که به ترتیب، بیانگر انتخاب و یا عدم انتخاب گره به عنوان تسهیل هاب هستند. نمایش چگونگی تخصیص گره‌های غیرهاب به تسهیلات هاب با استفاده از آرایه تخصیص فراهم می‌آید به نحوی که اگر گره k به گره k تخصیص یابد، درایه‌ی متناظر در آرایه تخصیص مقدار k را اختیار می‌کند. پرواضح است که هر گره هاب به خودش تخصیص داده می‌شود.

۳-۲-۲. تشکیل جمعیت اولیه

از آنجایی که جمعیت اولیه نقش به‌سزایی در عملکرد هیوریستیک‌ها دارد، بایستی مجموعه از جواب‌های با کیفیت و در عین حال متنوع در فضای جواب را شامل شود. در USAHLP تشکیل جواب‌های شدنی به سادگی امکان‌پذیر است و این امر شرایط تشکیل جمعیت اولیه در زمان کوتاه را فراهم می‌آورد: گام نخست در تشکیل جمعیت اولیه، تعیین تعداد تسهیلات هاب است که در USAHLP به عنوان متغیر تصمیم مطرح می‌گردد. در GASAUHLP، برای ۲/۳ از جمعیت اولیه تعداد تسهیلات هاب به طور تصادفی مقداری در بازه‌ی $[1, \dots, n/4]$ اختیار می‌شود. برای

از آنجایی که ماتریس هزینه در مجموعه داده استاندارد CAB متقارن و در مجموعه داده AP نامتقارن است، محاسبه تابع هدف این مجموعه‌ها به ترتیب با استفاده از معادله (۵) و معادله (۱) صورت می‌پذیرد.

۳. هیوریستیک GA-SA ترکیبی

در این مقاله، یک هیوریستیک جدید و مقاوم از ترکیب دو الگوریتم GA و SA پیشنهاد شده است. بنابراین، ابتدا در این قسمت مروری مختصر بر الگوریتم‌های مذکور خواهیم داشت و در ادامه هیوریستیک ترکیبی GA-SA تشریح می‌گردد.

۳-۱. مروری بر الگوریتم‌های GA و SA

GA یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت^{۱۸} است که به منظور دستیابی به جواب بهینه و یا نزدیک به بهینه در فضاهای پیچیده و بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. ایده اصلی در توسعه این الگوریتم توسط Holland [۲۲] مطرح گردید و از آن برای حل گسترده‌ی وسیعی از مسائل بهره‌گرفته شده است. GA به عنوان یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت، توانایی بالایی در شناسایی نواحی مطلوب فضای جواب دارد. این در حالی است که رویکرد مذکور، تضمینی در بررسی و جستجوی دقیق ناحیه مطلوب ارائه نمی‌دهد [۲۳]. Kirkpatrick و همکاران [24]، برای اولین بار از الگوریتم SA در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی^{۱۹} استفاده کردند. SA یک الگوریتم تصادفی مبتنی بر یک راه‌حل^{۲۰} است و توالی از تکرارها را شامل می‌شود. در صورت دستیابی الگوریتم به ناحیه مطلوب فضای جواب، احتمال بالایی در یافتن جواب بهینه توسط SA متصور است [۲۳].

به طور کلی، رویکردهای مبتنی بر جمعیت، عملکرد بهتری در شناسایی نواحی مطلوب فضای جستجو از خود نشان می‌دهند. از طرف دیگر، رویکردهای مبتنی بر یک راه‌حل، کارایی بالاتری را در جستجوی نواحی مطلوب فضای جواب به ارمغان می‌آورند. در راستای ترکیب مزایای دو رویکرد مذکور، الگوریتم ترکیبی GA-SA در جهت حل USAHLP توسعه داده شده است و از این پس GASAUHLP نامیده می‌شود. GA به دلیل توانایی بالا در جستجوی گسترده‌ی فضا، به عنوان چارچوب اصلی GASAUHLP مورد استفاده قرار می‌گیرد و از آنجایی که SA عملکرد سریع و

تسهیل هاب معرفی می نماید. در نهایت، درایه متناظر با این گره ها در بردار هاب مقدار ۱ را اختیار می کنند.

به عنوان گام نهایی در تشکیل جمعیت اولیه، تخصیص گره های غیرهاب به تسهیلات هاب بر مبنای معیار فاصله صورت می پذیرد بطوریکه هر گره غیر هاب به نزدیکترین تسهیل هاب گشایش یافته تخصیص می یابد.

۳-۲-۳. عملگر تقاطع

عملگر تقاطع به منظور تولید نسل جدید در هر تکرار از GASAHLPL مورد استفاده قرار می گیرد. هدف اصلی از بکارگیری این عملگر، تولید نسلی با برازندگی بهتر است مشروط بر این که هر یک از فرزندان، مشخصه های مطلوب والدین خود را به ارث ببرند.

در GASAHLPL به منظور انتخاب والدین مناسب جهت انجام عملگر تقاطع، از روش چرخ دوآر^{۲۹} بهره گرفته می شود بطوریکه هر راه حل با احتمالی متناسب با معکوس تابع هزینه کل آن انتخاب می گردد. روش چرخ دوآر شرایطی را فراهم می آورد که به راه حل با برازندگی بهتر، شانس بالاتری در انتخاب به عنوان والد تخصیص یابد. جهت نخبه گرایی نیز بدترین جواب با بهترین آنها در هر نسل جایگزین می گردد.

از مهمترین عملگرهای تقاطع، می توان به عملگر یک نقطه ای^{۳۰}، عملگر دو نقطه ای^{۳۱} و عملگر یکتواخت^{۳۲} اشاره کرد. در عملگر تقاطع یک نقطه ای، یک نقطه یکسان بر روی هر دو آرایه هاب و تخصیص به صورت تصادفی انتخاب می گردد. فرزندان با ترکیب درایه های قبل و بعد نقطه ی تقاطع آرایه های هاب و تخصیص والدین منتخب حاصل می شوند. در صورتی که بکارگیری عملگر تقاطع منجر به تخصیص گره i -ام به گره غیرهاب گردد، جواب نشدنی مذکور با تخصیص گره i -ام به نزدیکترین تسهیل هاب شدنی می شود. همچنین، اگر هر یک از جواب های تولید شده فاقد تسهیلات هاب باشد و یا اگر تمامی گره ها به عنوان تسهیل هاب در نظر گرفته شوند، جواب بدست آمده حذف می گردد.

همانطور که در شکل (۱) مشاهده می شود گره های ۴، ۵ و ۹ برای راه حل S_1 و گره های ۱، ۳ و ۷ برای S_2 به عنوان تسهیل هاب انتخاب شده اند. پس از بکارگیری عملگر تقاطع تک نقطه ای بر روی آرایه های هاب، برای راه حل جدید S_1^* گره های ۴، ۵ و ۷ و برای S_2^* گره های ۱، ۳ و ۹ به عنوان تسهیل هاب معرفی می شوند. از آنجایی که با اعمال عملگر تقاطع، گره های ۶ و ۸ در آرایه تخصیص جدید S_1^* و گره های ۴ و ۸ در S_2^* به گره های غیرهاب تخصیص یافته اند، تسهیل هاب متناظر آن ها بر اساس معیار فاصله تعدیل می شود.

$2/3$ باقی مانده از جمعیت اولیه نیز، تعداد تسهیلات هاب از بازه ی $[n/4, \dots, n/2]$ به طور تصادفی انتخاب می شود بطوریکه مقدار n در این روابط، تعداد کل گره های موجود در شبکه است. با اتخاذ این رویکرد، حداکثر تعداد تسهیلات هاب در جمعیت اولیه برابر با نصف تعداد گره های موجود در شبکه خواهد بود. پس از انتخاب تعداد تسهیلات هاب برای هر یک از راه حل های جمعیت اولیه، آرایه ی هاب نیمی از راه حل ها که تعداد تسهیلات هاب آنها در بازه ی $[1, \dots, n/4]$ است، با استفاده از رویکرد (۱) و نیم دیگر با استفاده از رویکرد (۲) تشکیل می گردد. همچنین، آرایه هاب راه حل هایی که تعداد تسهیلات هاب آنها در بازه ی $[n/4, \dots, n/2]$ است، با بکارگیری رویکرد (۳) حاصل می شود. رویکرد (۱): این رویکرد گره های با حجم بالاتر جریان کالا را با احتمال بیشتری به عنوان تسهیل هاب انتخاب می کند. از این رو، برای هر گره احتمالی به شرح زیر محاسبه می گردد:

$$P(i) = \frac{O_i + D_i}{\sum_i O_i + D_i}, \quad \forall i \in N \quad (6)$$

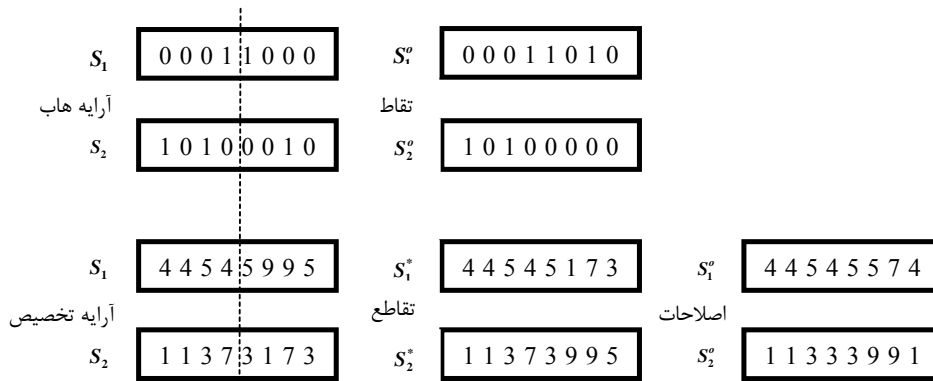
سپس، احتمالات تجمعی^{۳۷} گره ها محاسبه و ذخیره می گردد. در ادامه، عدد تصادفی r_i به طور یکتواخت^{۳۸} در بازه $[0, 1]$ تولید می شود و درایه ی متناظر با اولین گره ای که احتمال تجمعی آن از r_i بیشتر است، در بردار هاب مقدار ۱ را اختیار می کند. فرآیند مذکور تا انتخاب n' تسهیل هاب متمایز تکرار می شود بطوریکه n' تعداد تسهیلات هاب راه حل را نشان می دهد. سایر درایه های آرایه هاب، مقدار صفر دارند که بیانگر عدم انتخاب گره متناظر به عنوان تسهیل هاب است.

رویکرد (۲): از آنجایی که انتخاب گره با حجم بالاتر جریان کالا و در عین حال هزینه انتقال کمتر به عنوان تسهیل هاب منطقی به نظر می رسد، متغیر $I(i)$ به عنوان تابعی از مولفه های هزینه و جریان برای هر گره به شرح زیر تشکیل می شود:

$$I(i) = \frac{O_i + D_i}{\sum_i O_i + D_i} - \frac{\sum_j C_{ij} + C_{ji}}{\sum_i \sum_j C_{ij} + C_{ji}}, \quad \forall i, j \in N \quad (7)$$

پرواضح است که بایستی به گره با مقدار $I(i)$ بیشتر، شانس بالاتری در فرآیند انتخاب تسهیلات هاب تخصیص داد.

رویکرد (۳): این رویکرد در جهت ایجاد راه حل های متنوع بکار گرفته می شود و به صورت تصادفی n' گره متمایز را به عنوان



شکل ۱. مثالی از چگونگی بکارگیری عملگر تقاطع یک نقطه‌ای

۳-۲-۴-۱. دمای اولیه

دمای اولیه یکی از پارامترهای اساسی در عملکرد SA است. این دما نباید به اندازه‌ای بزرگ باشد که الگوریتم به سمت جستجوی تصادفی سوق پیدا نماید، اما باید مقداری اختیار نماید که شرایط تقریبی جستجوی تمام همسایگی‌های راه‌حل فعلی را فراهم آورد [۲۵]. از آنجایی که مجموعه داده‌های CAB و AP مسائل با اندازه‌های متفاوت را شامل می‌شوند، یک رابطه خطی مابین دمای اولیه (T_0) و اندازه مساله (n) به صورت $T_0 = \theta \times n$ پیشنهاد می‌شود بطوریکه θ یک ضریب ثابت در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۴-۲. ایجاد همسایگی

ساختار همسایگی در عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری نقش اساسی را ایفا می‌کند بطوریکه یک ساختار نامناسب همسایگی می‌تواند منجر به شکست در حل مساله گردد. از این رو، در این مقاله سه نوع همسایگی متداول تغییر^{۳۴}، تعویض^{۳۵} و تعویض مجاور^{۳۶} مورد بررسی قرار می‌گیرد. عملگر نوع اول روی آرایه هاب و دو عملگر دیگر روی آرایه تخصیص به شکل زیر اعمال می‌شوند:

- عملگر تغییر: در این تکنیک، یکی از درایه‌های آرایه هاب به صورت تصادفی انتخاب شده و مقدار آن تغییر می‌یابد. به طور مثال اگر مقدار درایه انتخابی ۱ باشد، به ۰ تبدیل می‌شود. تکنیک مذکور تنها زمانی قابل استفاده است که در آرایه هاب بیش از یک تسهیل به عنوان هاب انتخاب شده باشند.
- عملگر تعویض: در این روش، دو گره غیرهاب به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و تسهیلات هاب تخصیص یافته‌ی آن‌ها با یکدیگر تعویض می‌گردد. در صورت وجود تنها یک تسهیل هاب و یا یک گره غیرهاب، این نوع عملگر نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.
- عملگر تعویض مجاور: در این رویکرد، یک گره غیرهاب به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و مقدار متناظر این گره در آرایه تخصیص با مقدار درایه سمت راست آن تعویض می‌شود.

فرآیند اعمال عملگر تقاطع دو نقطه‌ای، مشابه با عملگر تقاطع یک نقطه‌ای است با این تفاوت که در این رویکرد دو نقطه یکسان بر روی هر دو آرایه هاب و تخصیص به صورت تصادفی انتخاب می‌گردد. سپس، فرزندان با تعویض درایه‌های مابین نقاط تقاطع آرایه‌های هاب و تخصیص والدین منتخب حاصل می‌شوند. عملیات اصلاحی نیز در صورت نیاز، همچون عملیات اصلاحی تقاطع یک نقطه‌ای انجام می‌پذیرد.

در استفاده از عملگر تقاطع یکنواخت، یک رشته به اندازه طول رشته آرایه هاب و یا تخصیص انتخاب می‌شود و از اعداد تصادفی پر می‌گردد. اگر عدد تصادفی i -ام از یک احتمال از پیش مشخص شده (مثلاً ۰.۵) کمتر باشد، درایه i -ام فرزند اول و دوم به ترتیب از والد اول و دوم و در غیر این صورت درایه i -ام فرزند اول و دوم به ترتیب از والد دوم و اول به ارث برده می‌شود.

نوع عملگر تقاطع در این مقاله به عنوان یک پارامتر در نظر گرفته می‌شود تا متناسب‌ترین نوع آن به منظور بکارگیری در GASAUHLP، بر اساس رویکرد مبتنی بر طراحی آزمایش‌ها تبیین گردد.

۳-۲-۴-۳. عملگر ترکیبی: جستجوگر محلی

در این بخش، به منظور افزایش کارایی الگوریتم GA در دستیابی به همسایگی بهینه هر راه حل، از SA به عنوان جستجوگر محلی در طی اجرای الگوریتم استفاده می‌گردد. در این راستا، هر یک از راه‌حل‌های جمعیت ایجاد شده توسط GA، راه‌حل آغازین SA در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب، شرایط دستیابی به همسایگی بهینه هر راه‌حل در طی تکرارهای SA فراهم می‌آید. سپس، نسل بهبود یافته به عنوان جمعیت جدید GA قلمداد می‌گردد و در نهایت فرآیندهای تقاطع و بکارگیری جستجوگر محلی SA تا مشاهده شرایط توقف تکرار می‌گردد. در ادامه، مولفه‌های جستجوگر محلی SA: دمای اولیه، ایجاد همسایگی و برنامه زمانی کاهش دما^{۳۳} به همراه جزئیات تشریح می‌گردد.

الگوریتم متوقف می‌گردد. تعیین تعداد تکرار بهینه الگوریتم با استفاده از رویکرد تنظیم پارامتر پیشنهادی صورت می‌پذیرد.

۳-۳. تنظیم پارامتر

همان طور که پیش نیز ذکر شد، عملکرد الگوریتم‌های هیوریستیک به شدت تحت تاثیر مقادیر پارامترهای آنها است. از این رو، در این بخش یک رویکرد تنظیم پارامتر مقاوم مبتنی بر طراحی آزمایش‌ها، نسبت سیگنال به اختلال^{۳۸} (SN) و تاپسیس^{۳۹} ارائه می‌گردد. رویکرد مذکور نه تنها سعی در کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های حمل و نقل دارد، بلکه کمینه‌سازی زمان اجرای الگوریتم و واریانس اهداف را نیز دنبال می‌نماید.

۳-۳-۱. تنظیم پارامتر مبتنی بر طراحی آزمایش‌ها، نسبت سیگنال به اختلال و تاپسیس

روش تنظیم پارامتر پیشنهادی از سه فاز (۱) معرفی سطوح پارامترها، (۲) طراحی آزمایش و (۳) تاپسیس اصلاح‌شده تشکیل یافته است.

۳-۳-۱-۱. معرفی سطوح پارامترها

مطابق با مطالب ذکر شده در بخش ۳-۲ همسایگی، نوع عملگر تقاطع، دمای اولیه (θ)، چگونگی کاهش دما و تعداد تکرار الگوریتم به عنوان پارامترهای موثر بر عملکرد الگوریتم GASAUHLP در نظر گرفته می‌شوند. جدول (۱) پارامترهای موثر و سطوح در نظر گرفته شده برای هر یک از پارامترها را به طور خلاصه نمایش می‌دهد.

۳-۳-۱-۲. طراحی آزمایش‌ها

هدف از پیاده‌سازی طراحی آزمایش‌ها، کسب حداکثر اطلاعات ممکن با حداقل تعداد آزمایش‌ها است. یک آزمایش مجموعه‌ای از تلاش‌های برنامه‌ریزی شده است که در آن جهت شناسایی دلایل تغییرات در مقادیر هدف، تغییرات هدفمند در فاکتورهای کنترلی فرآیند ایجاد می‌گردد [۲۷]. در این مطالعه به منظور کشف اثر هر یک از پارامترها و تعیین سطح بهینه هر یک از آنها با حداقل تعداد آزمایش از رویکرد طراحی آزمایش‌ها استفاده می‌گردد. به طور کلی دو نوع از معروف ترین طرح‌های آزمایش عبارتند از: ۱. طرح فاکتوری^{۴۰} و ۲. طرح تاگوچی^{۴۱}.

با توجه به تعداد پارامترها و سطوح در نظر گرفته‌شده برای هر یک از آنها در الگوریتم GASAUHLP، استفاده از طرح فاکتوری کامل به $6 \times 3 \times 3 \times 3 = 486$ آزمایش نیاز دارد. با در نظرگیری هزینه، زمان و همچنین ثنوری آمار، اجرای این تعداد آزمایش غیرلازم و فاقد صرفه اقتصادی است [۲۸]. از این رو، استفاده از یک طرح آزمایش تاگوچی پیشنهاد می‌شود. به منظور شناسایی آزمایش تاگوچی مناسب، ابتدا باید حداقل تعداد درجات آزادی مورد نیاز محاسبه گردد. با فرض یک درجه آزادی برای میانگین

قابل توجه است که اگر گر غیرهاب انتخابی آخرین درایه آرایه تخصیص باشد، عملگر تعویض مجاور با جابجایی اولین و آخرین درایه بردار تخصیص بکار گرفته می‌شود.

شایان ذکر است که هر ترکیب از سه عملگر فوق نیز می‌تواند به عنوان یک رویکرد ایجاد همسایگی قلمداد گردد. ساختار همسایگی مورد استفاده در GASAUHLP با استفاده از رویکرد تنظیم پارامتر پیشنهادی حاصل خواهد گردید.

۳-۴-۲-۳. برنامه زمانی کاهش دما

برنامه زمانی کاهش دما^{۴۲}، یکی از تاثیرگذارترین فاکتورها در عملکرد الگوریتم SA به شمار می‌رود. اگر کاهش دما در این الگوریتم بسیار آهسته انجام پذیرد، انتظار می‌رود که پاسخ‌های بهتری توسط الگوریتم حاصل گردد. از طرف دیگر، کاهش آهسته دما هزینه محاسباتی الگوریتم را تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد [۲۵]. دمای اولیه در GASAUHLP به یکی از سه طریق اشاره شده در ذیل و بر مبنای نتایج حاصل از تنظیم پارامتر پیشنهادی کاهش می‌یابد:

- رویکرد خطی: در این برنامه زمانی، دمای T با استفاده از رابطه $T = T_0 - \beta$ به روزآوری می‌شود که در آن β یک مقدار ثابت است. با فرض T_i به عنوان دما در i امین تکرار، رابطه (۸) قابل تعریف است:

$$T_i = T_0 - i \times \beta \quad (8)$$

- رویکرد هندسی: در این رویکرد، کاهش دما بر طبق معادله (۹) صورت می‌پذیرد و در آن $\alpha \in]0,1[$ فرض می‌شود. بر طبق ادبیات α معمولاً مقداری بین ۰.۵ تا ۰.۹۹ اختیار می‌نماید [۲۵].

$$T = \alpha T \quad (9)$$

- رویکرد کاهش بسیار آهسته: این برنامه زمانی بر طبق معادله (۱۰) عمل می‌نماید که در آن $\beta = \frac{T_0 - T_F}{(L-1)T_0 T_F}$ و T_F برابر با دمای نهایی فرض می‌شود [۲۶].

$$T_{i+1} = \frac{T_i}{1 + \beta T_i} \quad (10)$$

۳-۲-۵. شرط توقف الگوریتم GASAUHLP

شرط توقف الگوریتم GASAUHLP تکرار آن به تعداد از پیش تعیین شده در نظر گرفته می‌شود. همچنین، اگر بهبود تابع هدف در آخرین ۲۵٪ از تعداد تکرارهای الگوریتم کمتر از ۰.۰۰۱ باشد،

$$SN_{ij} = -10 \times \log\left(\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m y_{ijk}^2\right) \quad i=C \text{ or } T, j=1,2,\dots,18 \quad (12)$$

به نحوی که در رابطه (۱۲) مقدار هدف i -ام تحت آزمایش j -ام در تکرار k -ام است و m تعداد تکرار هر آزمایش را نشان می دهد.

گام ۲- نرمال سازی ماتریس عملکرد

ماتریس عملکرد نرمال شده را می توان با استفاده از فرمول تبدیل (۱۳) به دست آورد:

$$NSN_{ij} = \frac{SN_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{18} SN_{ij}^2}} \quad i=C \text{ or } T, j=1,2,\dots,18 \quad (13)$$

در رابطه (۱۳) مقدار نرمال شده هدف i -ام تحت آزمایش j -ام است.

گام ۳. ساخت ماتریس عملکرد نرمال شده موزون

به منظور تشکیل ماتریس عملکرد نرمال شده موزون (V) باید هر ستون از ماتریس عملکرد نرمال شده را در اهمیت نسبی (W_i) هدف متناظر ضرب کنیم. بنابراین ماتریس V به شرح زیر خواهد بود:

$$V = \begin{bmatrix} W_C \times NSN_{C_1} & W_T \times NSN_{T_1} \\ W_C \times NSN_{C_2} & W_T \times NSN_{T_2} \\ \dots & \dots \\ W_C \times NSN_{C_{18}} & W_T \times NSN_{T_{18}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{C_1} & V_{T_1} \\ V_{C_2} & V_{T_2} \\ \dots & \dots \\ V_{C_{18}} & V_{T_{18}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

به طوریکه W_C و W_T بترتیب اهمیت نسبی هزینه کل و زمان اجرای الگوریتم، V_{C_j} و V_{T_j} بترتیب مقادیر نسبت های سیگنال به اختلال نرمال شده موزون هزینه کل و زمان اجرای الگوریتم را در رابطه (۱۴) نشان می دهند.

گام ۴- تعیین راه حل های ایده آل مثبت و ایده آل منفی

از آنجایی که نسبت سیگنال به اختلال توابع هدف از نوع بیشینه سازی هستند، راه حل های ایده آل مثبت V^+ و ایده آل منفی V^- به شرح زیر محاسبه می گردند:

$$V^+ = \{(\max V_{C_j}, \max V_{T_j}) | j=1,2,\dots,18\} = \{V_C^+, V_T^+\}, V^- = \{(\min V_{C_j}, \min V_{T_j}) | j=1,2,\dots,18\} = \{V_C^-, V_T^-\} \quad (15)$$

$$C_j = \frac{S_j^-}{S_j^+ + S_j^-} \quad (17)$$

به طوریکه C_j در بازه صفر و یک تغییر می کند و مقدار نزدیکتر به یک از مطلوبیت بیشتر برخوردار است.

گام ۷. انتخاب سطح بهینه پارامترها.

با تجمیع نسبت های سیگنال به اختلال هزینه کل و زمان اجرای الگوریتم در قالب شاخص نزدیکی نسبی می توان سطح بهینه هر

کل، ۵ درجه آزادی برای پارامتر همسایگی و ۲ درجه آزادی برای هر یک از سایر پارامترها، حداقل به $14 = 1 + (2 \times 4) + 5$ آزمایش نیاز است. در همین راستا، انتخاب طرح تاگوچی با آرایه متعامد ${}^{(4 \times 1)}L_{18}$ به منظور تنظیم پارامتر الگوریتم GASAUHP مناسب به نظر می رسد.

۳-۱-۳. تاپسیس اصلاح شده

رویکرد پیشنهادی در فرآیند تعیین سطوح بهینه پارامترها چهار هدف کمینه سازی هزینه کل حمل و نقل شبکه، زمان اجرای الگوریتم و واریانس این اهداف را به طور همزمان دنبال می کند. از این رو، رویکرد پیشنهادی از نسبت سیگنال به اختلال برای ترکیب میانگین و واریانس هر هدف و از الگوریتم تاپسیس به عنوان یک رویکرد تصمیم گیری چند معیاره در جهت ترکیب نسبت های سیگنال به اختلال استفاده می کند. شرح کامل رویکرد مذکور در قالب ۷ گام زیر ارائه می گردد:

گام ۱- تشکیل ماتریس عملکرد.

در ماتریس عملکرد تاپسیس هر سطر به یک شاخص و هر ستون به یک گزینه ${}^{(3)}$ اختصاص داده می شود. در رویکرد تنظیم پارامتر پیشنهادی هر آزمایش از طرح L_{18} نقش یک گزینه و نسبت های سیگنال به اختلال نقش شاخص ها را ایفا می کنند. بنابراین ساختار ماتریس عملکرد به شرح زیر است:

$$D = \begin{bmatrix} SN_{C_1} & SN_{T_1} \\ SN_{C_2} & SN_{T_2} \\ \dots & \dots \\ SN_{C_{18}} & SN_{T_{18}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

بطوریکه SN_{C_j} و SN_{T_j} بترتیب نسبت سیگنال به اختلال هزینه کل و نسبت سیگنال به اختلال زمان اجرای الگوریتم را در آزمایش j -ام طرح L_{18} نمایش می دهند. از آنجایی که توابع هدف هزینه و زمان اجرای الگوریتم هر دو از نوع کمینه سازی هستند، نسبت سیگنال به اختلال آن ها به شرح زیر محاسبه می گردد:

گام ۵. محاسبه معیار های فاصله

فاصله هر آزمایش طرح L_{18} (گزینه) از راه حل های ایده آل مثبت و منفی ب با استفاده از رابطه (۱۶) قابل محاسبه هستند.

$$S_j^+ = \sqrt{(V_{C_j} - V_C^+)^2 + (V_{T_j} - V_T^+)^2}, S_j^- = \sqrt{(V_{C_j} - V_C^-)^2 + (V_{T_j} - V_T^-)^2} \quad (16)$$

گام ۶. محاسبه نزدیکی نسبی

نزدیکی نسبی هر آزمایش به راه حل ایده آل مثبت را می توان به شکل زیر محاسبه کرد:

پارامتر را از طریق محاسبه میانگین نزدیکی نسبی آزمایش‌ها به ازای سطوح مختلف تعیین نمود.

جدول ۱. میانگین نزدیکی نسبی سطوح پارامترهای موثر بر

الگوریتم GASAUHLP		
پارامتر	سطوح	میانگین نزدیکی نسبی
	تغییر	۰.۹۸
	تعویض	۰.۹۱
همسایگی	تعویض مجاور	۰.۳۳
	ترکیب تغییر و تعویض	۰.۸۴
	ترکیب تغییر و تعویض مجاور	۰.۲۷
	ترکیب تعویض و تعویض مجاور	۰.۲۹
نوع	یک نقطه‌ای	۰.۷۴
عملگر	دو نقطه‌ای	۰.۹۳
تقاطع	یکنواخت	۰.۱۱
	۱	۰.۸۶
θ	۳	۰.۵۰
	۵	۰.۳۷
چگونگی	خطی	۰.۱۵
کاهش	هندسی	۰.۵۵
دما	کاهش بسیار کند	۰.۷۴
تعداد	۶۰	۰.۷۹
تکرار	۷۵	۰.۵۸
الگوریتم	۹۰	۰.۴۳

۴. نتایج محاسباتی

در این قسمت ابتدا نتایج حاصل از بکارگیری رویکرد تنظیم پارامتر پیشنهادی ارائه می‌شود و در ادامه نتایج محاسباتی به منظور بررسی کارایی الگوریتم GASAUHLP ارائه می‌گردد. در این راستا، نتایج الگوریتم GASAUHLP با نتایج GA ارائه شده توسط Topcuoglu و همکاران [۱۷] و الگوریتم SATLUHLP پیشنهادی Chen [۱۸] مورد مقایسه قرار می‌گیرد. یادآوری می‌شود که مقاله Cunha و Silva [۱۹] جدیدترین فعالیت تحقیقاتی در حوزه UHLP محسوب می‌گردد، اما به دلیل اشتباهات موجود در این مقاله که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته می‌شود، نتایج این مقاله را نمی‌توان به عنوان بهترین نتایج موجود در ادبیات قلمداد کرد. از این رو، نتایج محاسباتی مقاله Cunha و Silva [۱۹] مبنای مقایسه‌ای برای الگوریتم GASAUHLP محسوب نمی‌شود. تمامی الگوریتم‌های ابتکاری در نرم افزار متلب ۴ کد شده و نتایج محاسباتی آن‌ها توسط سیستم یکسان با مشخصات پردازنده-ی ۲.۲۷ گیگا هرترزی و رم ۴ گیگا بایتی با سیستم عامل ویندوز ۷ بدست آمده‌اند. مقایسات ارائه شده در این بخش بر اساس دو مجموعه داده CAB و AP که از جمله داده‌های استاندارد به منظور محک‌زنی الگوریتم‌های ابتکاری در حوزه مکان‌یابی تسهیلات هاب هستند، صورت می‌پذیرد.

۴-۱. نتایج بکارگیری رویکرد تنظیم پارامتر پیشنهادی

بر اساس توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبل همسایگی، نوع عملگر تقاطع، دمای اولیه (θ)، چگونگی کاهش دما و تعداد تکرار الگوریتم به عنوان پارامترهای موثر بر عملکرد الگوریتم GASAUHLP در نظر گرفته شدند و با استفاده از رویکرد تنظیم پارامتر مبتنی بر طراحی آزمایش‌ها، نسبت سیگنال به اختلال و تاپسیس مقادیر بهینه هر یک از پارامترها مشخص گردید. جدول (۱) میانگین نزدیکی نسبی سطوح هر یک از پارامترها در الگوریتم GASAUHLP را نشان می‌دهد. یادآوری می‌شود که هر چه میانگین نزدیکی نسبی به مقدار ۱ نزدیک‌تر باشد، مطلوبیت بیشتر سطح متناظر پارامتر را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۱) می‌توان نتیجه گرفت که با انتخاب همسایگی نوع تغییر، عملگر تقاطع دو نقطه‌ای، $\theta = 1$ ، کاهش دمای بسیار کند و تعداد تکرار ۶۰، الگوریتم GASAUHLP در بهترین سطوح پارامترهای خود تنظیم می‌گردد. قابل ذکر است که تنظیم پارامتر در سایز ۲۵ مجموعه داده CAB انجام پذیرفته است.

الگوریتم GA ارائه شده در [۱۷] فاقد رویکرد دقیق در جهت تنظیم پارامتر است و در آن صرفاً با استفاده از روش سعی و خطا مقدار مناسب هر پارامتر تعیین شده است. در این مقاله با استفاده از رویکرد تنظیم پارامتر پیشنهادی الگوریتم GA مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از بکارگیری تنظیم پارامتر در جدول (۲) خلاصه گردید. الگوریتم GA تنظیم پارامتر شده از این پس Tuned GA نامیده می‌شود.

۴-۲. نتایج محاسباتی مجموعه داده CAB

مجموعه داده CAB توسط Kelly [۱۸] معرفی گردیده و به صورت گسترده‌ای در ادبیات مکان‌یابی تسهیلات هاب مورد استفاده قرار گرفته است. این مجموعه داده بر اساس جریان مسافران شبکه هوایی بین ۲۵ شهر کشور آمریکا در سال ۱۹۷۰ توسعه داده شده است. فاصله بین شهرها از نامساوی مثلثی^{۴۵} پیروی می‌نماید و جریان بین هر دو شهر متقارندر نظر گرفته می‌شود. در این مجموعه داده ضرایب هزینه جمع‌آوری و هزینه توزیع (یعنی δ , χ) برابر با ۱ فرض می‌شوند. همچنین، چهار مساله ۱۰ شهر اول، ۱۵ شهر اول، ۲۰ شهر اول و کلیه ۲۵ شهر در حل مجموعه داده CAB متصور است. برای هر یک از مسائل مذکور، ضریب تخفیف α ثابت و برابر با ۰.۱، ۰.۲، ۰.۴، ۰.۶، ۰.۸ و ۱ تنظیم می‌شود. برای هر یک از ضرایب تخفیف نیز، هزینه ثابت بازگشایی تسهیلات هاب برابر با ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰ و ۲۵۰ در

GASAUHLP را بترتیب در سایزهای ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ نشان می‌دهد. در هر یک از جداول ضریب تخفیف (α)، هزینه ثابت بازگشایی تسهیلات هاب (f) و هزینه بهینه مشخص شده‌اند. قابل ذکر است که هزینه بهینه مشخص شده در جداول (۳-۶) توسط Silva و Cunha [۱۹] و با استفاده از الگوریتم‌های دقیق‌تر فراهم آمده است.

نظر گرفته می‌شود بطوریکه مقدار آن برای کلیه‌ی گره‌ها یکسان است. در نتیجه، حل مجموعه داده CAB متشکل از حل ۸۰ مساله متفاوت است.

جداول (۳-۶) نتایج محاسباتی حاصل از حل مجموعه داده CAB بوسیله الگوریتم‌های GA، Tuned GA، SATLUHLP و

جدول ۲. سطوح بهینه پارامترهای موثر بر الگوریتم GA

پارامتر	سطوح	میانگین نزدیکی نسبی	سطح بهینه
نوع عملگر تقاطع	تک نقطه‌ای	۰.۴۴	دو نقطه‌ای
	دو نقطه‌ای	۰.۸۹	
	انتقال ^{۴۶}	۰.۲۶	
نوع عملگر جهش	تعویض	۰.۴۴	تعویض
	ترکیب انتقال، تعویض	۰.۳۲	
	۰.۶	۰.۹۹	
نرخ عملگر تقاطع	۰.۷	۰.۶۵	۰.۶
	۰.۸	۰.۰۷	
	۰.۴	۰.۷۷	
نرخ عملگر جهش	۰.۴۵	۰.۵۵	۰.۴
	۰.۵	۰.۳۸	
	۱۵۰	۰.۹۲	
اندازه جمعیت	۱۷۵	۰.۵۱	۱۵۰
	۲۰۰	۰.۱۲	
	۱۵۰	۰.۹۹	
تعداد تکرار الگوریتم	۱۷۵	۰.۴۹	۱۵۰
	۲۰۰	۰.۱۲	

است که زمان اجرای الگوریتم‌ها را نیز به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد.

در نهایت نیز مقایسات مربوط به الگوریتم GASAUHLP ارائه می‌گردد. از آنجایی که هر سه الگوریتم Tuned GA، SATLUHLP و GASAUHLP در حل ۸۰ مساله مجموعه داده CAB به پاسخ‌های بهینه دست یافته‌اند، مبنای مقایسه الگوریتم‌ها زمان اجرای آنها فرض می‌شود. این نتایج بیان می‌دارد که GASAUHLP به طور متوسط ۳.۲ برابر سریع‌تر از SATLUHLP و ۱.۷۵ برابر سریع‌تر از Tuned GA است. با توجه به توضیحات ارائه شده الگوریتم GASAUHLP چه از نظر دستیابی به جواب‌های بهینه و چه از نظر زمان اجرای آن، بر سایر الگوریتم‌های موجود در ادبیات غلبه می‌نماید. قابل توجه است که با افزایش ابعاد مساله، سرعت الگوریتم GASAUHLP در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها افزایش می‌یابد. همچنین، در زمانی که تعداد تسهیلات هاب در جواب بهینه کمتر است، بهبود در سرعت محاسباتی الگوریتم GASAUHLP بیشتر است. شکل (۲) مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری در سایزهای مختلف مجموعه داده CAB را نشان می‌دهد.

ستون چهارم تا ستون هفتم جداول بترتیب نتایج استفاده از الگوریتم‌های GA، Tuned GA، SATLUHLP و GASAUHLP را نشان می‌دهد بطوریکه هر یک از این ستون‌ها شامل مقدار هزینه و زمان اجرای الگوریتم متناظر با آن ستون است. بر اساس جداول (۳-۶)، هر سه الگوریتم Tuned GA، SATLUHLP و GASAUHLP به مقادیر بهینه دست یافته‌اند و این در حالی است که الگوریتم GA نیز در تمامی موارد به جز یک مورد ($n=25, f=100, \alpha=1$) به جواب بهینه رسیده است. این مورد در جدول (۶) پررنگ شده است. همچنین، مشاهده می‌شود که زمان اجرای GA در مقایسه با Tuned GA تقریباً ۲.۵ برابر بیشتر است. با توجه به توضیحات Chen [۱۸]، SATLUHLP یک الگوریتم ترکیبی ابتکاری بر اساس SA، TS و فرآیند بهبود^{۴۷} است که بر سایر الگوریتم‌های موجود در ادبیات غلبه کرده و در زمان‌های سریع‌تری به بهترین جواب‌های شناخته شده^{۴۸} دست یافته است. متوسط زمان اجرای Tuned GA در مقایسه با SATLUHLP نیز تقریباً ۱.۸ برابر سریع‌تر است. این امر بیان می‌دارد که بکارگیری رویکرد تنظیم پارامتر پیشنهادی علاوه بر افزایش توانایی الگوریتم‌ها در دستیابی به جواب‌های بهتر، قادر

جدول ۳. نتایج اجرای الگوریتم‌های ابتکاری در مجموعه داده CAB، $n=10$

GASAUHLP		SATLUHLP		Tuned GA		GA		تسهیلات هاب	هزینه	f	α
زمان	هزینه	زمان	هزینه	زمان	هزینه	زمان	هزینه	در پاسخ بهینه	بهینه		
(ثانیه)		(ثانیه)		(ثانیه)		(ثانیه)					
۰.۳۹	۷۹۱.۹۳	۱.۲۸	۷۹۱.۹۳	۰.۶۷	۷۹۱.۹۳	۱.۳۸	۷۹۱.۹۳	۴, ۶, ۷	۷۹۱.۹۳	۱۰۰	
۰.۳۷	۹۱۵.۹۹	۰.۸۰	۹۱۵.۹۹	۰.۶۵	۹۱۵.۹۹	۱.۴۳	۹۱۵.۹۹	۷, ۹	۹۱۵.۹۹	۱۵۰	۰.۲
۰.۳۸	۱۰۱۵.۹۹	۰.۹۶	۱۰۱۵.۹۹	۰.۶۶	۱۰۱۵.۹۹	۱.۳۶	۱۰۱۵.۹۹	۷, ۹	۱۰۱۵.۹۹	۲۰۰	
۰.۳۹	۱۱۱۵.۹۹	۱.۲۰	۱۱۱۵.۹۹	۰.۶۷	۱۱۱۵.۹۹	۱.۷۴	۱۱۱۵.۹۹	۷, ۹	۱۱۱۵.۹۹	۲۵۰	
۰.۴۰	۸۶۷.۹۱	۱.۵۸	۸۶۷.۹۱	۰.۶۸	۸۶۷.۹۱	۱.۷۱	۸۶۷.۹۱	۴, ۶, ۷	۸۶۷.۹۱	۱۰۰	
۰.۳۵	۹۷۴.۳۰	۰.۷۳	۹۷۴.۳۰	۰.۶۷	۹۷۴.۳۰	۱.۱۷	۹۷۴.۳۰	۷, ۹	۹۷۴.۳۰	۱۵۰	۰.۴
۰.۳۵	۱۰۷۴.۳۰	۰.۸۱	۱۰۷۴.۳۰	۰.۶۵	۱۰۷۴.۳۰	۱.۲۰	۱۰۷۴.۳۰	۷, ۹	۱۰۷۴.۳۰	۲۰۰	
۰.۳۹	۱۱۷۴.۳۰	۱.۰۰	۱۱۷۴.۳۰	۰.۶۵	۱۱۷۴.۳۰	۱.۱۸	۱۱۷۴.۳۰	۷, ۹	۱۱۷۴.۳۰	۲۵۰	
۰.۴۶	۹۳۲.۶۲	۰.۶۱	۹۳۲.۶۲	۰.۶۷	۹۳۲.۶۲	۱.۱۸	۹۳۲.۶۲	۷, ۹	۹۳۲.۶۲	۱۰۰	
۰.۳۶	۱۰۳۲.۶۲	۰.۷۹	۱۰۳۲.۶۲	۰.۶۶	۱۰۳۲.۶۲	۱.۱۶	۱۰۳۲.۶۲	۷, ۹	۱۰۳۲.۶۲	۱۵۰	۰.۶
۰.۳۴	۱۱۳۱.۰۵	۰.۳۳	۱۱۳۱.۰۵	۰.۶۳	۱۱۳۱.۰۵	۱.۱۵	۱۱۳۱.۰۵	۴	۱۱۳۱.۰۵	۲۰۰	
۰.۳۵	۱۱۸۱.۰۵	۰.۲۸	۱۱۸۱.۰۵	۰.۶۴	۱۱۸۱.۰۵	۱.۱۴	۱۱۸۱.۰۵	۴	۱۱۸۱.۰۵	۲۵۰	
۰.۴۳	۹۹۰.۹۴	۱.۰۶	۹۹۰.۹۴	۰.۶۶	۹۹۰.۹۴	۱.۵۰	۹۹۰.۹۴	۷, ۹	۹۹۰.۹۴	۱۰۰	
۰.۳۵	۱۰۸۱.۰۵	۰.۲۱	۱۰۸۱.۰۵	۰.۶۴	۱۰۸۱.۰۵	۱.۱۵	۱۰۸۱.۰۵	۴	۱۰۸۱.۰۵	۱۵۰	۰.۸
۰.۳۵	۱۱۳۱.۰۵	۰.۲۹	۱۱۳۱.۰۵	۰.۶۶	۱۱۳۱.۰۵	۱.۱۴	۱۱۳۱.۰۵	۴	۱۱۳۱.۰۵	۲۰۰	
۰.۳۴	۱۱۸۱.۰۵	۰.۲۸	۱۱۸۱.۰۵	۰.۶۵	۱۱۸۱.۰۵	۱.۱۴	۱۱۸۱.۰۵	۴	۱۱۸۱.۰۵	۲۵۰	
۰.۳۵	۱۰۳۱.۰۵	۰.۳۱	۱۰۳۱.۰۵	۰.۶۴	۱۰۳۱.۰۵	۱.۱۴	۱۰۳۱.۰۵	۴	۱۰۳۱.۰۵	۱۰۰	
۰.۳۵	۱۱۸۱.۰۵	۰.۳۷	۱۱۸۱.۰۵	۰.۶۶	۱۱۸۱.۰۵	۱.۱۴	۱۱۸۱.۰۵	۴	۱۱۸۱.۰۵	۱۵۰	۱
۰.۳۵	۱۱۳۱.۰۵	۰.۳۶	۱۱۳۱.۰۵	۰.۶۶	۱۱۳۱.۰۵	۱.۱۵	۱۱۳۱.۰۵	۴	۱۱۳۱.۰۵	۲۰۰	
۰.۳۴	۱۱۸۱.۰۵	۰.۳۵	۱۱۸۱.۰۵	۰.۶۵	۱۱۸۱.۰۵	۱.۱۵	۱۱۸۱.۰۵	۴	۱۱۸۱.۰۵	۲۵۰	
۰.۳۷		۰.۶۷		۰.۶۶		۱.۲۷		متوسط زمان حل			

بر اساس Ernst و Krishnamoorthy مجموعه داده AP شامل دو نوع هزینه ثابت loose و tight است بطوریکه حل مسائل با هزینه tight دشوارتر به نظر می‌رسد [۳۱]. در مسائل با هزینه tight، گره‌هایی با حجم بیشتر جریان کالا دارای مقدار هزینه ثابت بالاتر هستند و این امر انتخاب این گره‌ها را به عنوان تسهیل هاب سخت‌تر می‌نماید. در این بخش کلیه مسائل AP با سایزهای مختلف حل می‌شوند بطوریکه داده‌های مورد نیاز به صورت مستقیم از شخص Andreas T. Ernst تهیه شده‌اند. ایشان یکی از اولین ارائه‌دهندگان مجموعه داده AP در ادبیات هستند [۲۷-۲۸] قابل ذکر است که OR-Library فاقد مقادیر هزینه ثابت در مسائل AP با ابعاد ۱۰۰ و ۲۰۰ است [۳۲].

۳-۴. نتایج محاسباتی مجموعه داده AP

مجموعه داده AP بر اساس جریان مراسلات پستی^{۴۹} بین شهرهای کشور استرالیا به وجود آمده است [۲۹-۳۰]. از آنجایی که این مجموعه داده شامل ۲۰۰ گره در شبکه است، می‌تواند فرصت مناسبی به منظور بررسی مسائل واقعی با ابعاد بالا محسوب گردد. همچنین، مسائل با ابعاد $n = \{10, 20, 25, 40, 50, 100\}$ نیز از مجموعه داده اصلی قابل استخراج است. در مجموعه داده AP مقدار ضرایب جمع‌آوری، انتقال و توزیع تریب برابر با $\chi = 3, \alpha = 0.75, \delta = 2$ در نظر گرفته می‌شوند بطوریکه رابطه $\chi > \delta > \alpha$ برقرار می‌ماند. مقدار جریان در این مجموعه داده متقارن نیست ($w_{ij} \neq w_{ji}$) و مراسلات پستی می‌تواند از هر منطقه پستی به خود آن منطقه ارسال گردد ($w_{ii} \neq 0$). همچنین،

جدول ۴. نتایج اجرای الگوریتم های ابتکاری در مجموعه داده CAB، $n=15$

GASAUHLP		SATLUHLP		Tuned GA		GA		تسهیلات هاب در پاسخ بهینه	هزینه بهینه	f	α
زمان (ثانیه)	هزینه	زمان (ثانیه)	هزینه	زمان (ثانیه)	هزینه	زمان (ثانیه)	هزینه				
۰.۹۷	۱۰۳۰.۰۷	۷.۶۰	۱۰۳۰.۰۷	۲.۵۹	۱۰۳۰.۰۷	۴.۴۲	۱۰۳۰.۰۷	۳۰۴.۷۰، ۱۲.۱۴	۱۰۳۰.۰۷	۱۰۰	۰.۲
۰.۷۷	۱۲۳۹.۷۷	۵.۵۱	۱۲۳۹.۷۷	۱.۹۱	۱۲۳۹.۷۷	۴.۲۴	۱۲۳۹.۷۷	۴.۷۰، ۱۲.۱۴	۱۲۳۹.۷۷	۱۵۰	
۰.۴۷	۱۳۸۱.۲۸	۱.۳۰	۱۳۸۱.۲۸	۱.۰۷	۱۳۸۱.۲۸	۱.۵۴	۱۳۸۱.۲۸	۴.۱۲	۱۳۸۱.۲۸	۲۰۰	
۰.۴۸	۱۴۸۱.۲۸	۱.۱۷	۱۴۸۱.۲۸	۰.۹۵	۱۴۸۱.۲۸	۱.۳۶	۱۴۸۱.۲۸	۴.۱۲	۱۴۸۱.۲۸	۲۵۰	۰.۴
۰.۹۹	۱۱۷۹.۷۱	۳.۶۶	۱۱۷۹.۷۱	۱.۳۱	۱۱۷۹.۷۱	۲.۸۳	۱۱۷۹.۷۱	۴.۷۰، ۱۲.۱۴	۱۱۷۹.۷۱	۱۰۰	
۰.۵۰	۱۳۵۵.۰۹	۲.۵۱	۱۳۵۵.۰۹	۱.۳۵	۱۳۵۵.۰۹	۲.۴۳	۱۳۵۵.۰۹	۴.۷۰، ۱۲	۱۳۵۵.۰۹	۱۵۰	
۰.۴۳	۱۴۶۲.۶۲	۱.۰۱	۱۴۶۲.۶۲	۰.۸۲	۱۴۶۲.۶۲	۱.۴۶	۱۴۶۲.۶۲	۴.۱۲	۱۴۶۲.۶۲	۲۰۰	۰.۶
۰.۴۱	۱۵۵۶.۶۶	۰.۳۳	۱۵۵۶.۶۶	۰.۸۱	۱۵۵۶.۶۶	۱.۳۲	۱۵۵۶.۶۶	۴	۱۵۵۶.۶۶	۲۵۰	
۰.۵۰	۱۳۰۹.۹۲	۳.۱۱	۱۳۰۹.۹۲	۱.۹۵	۱۳۰۹.۹۲	۲.۹۸	۱۳۰۹.۹۲	۴.۷۰، ۱۲	۱۳۰۹.۹۲	۱۰۰	
۰.۴۲	۱۴۴۳.۹۷	۱.۱۱	۱۴۴۳.۹۷	۰.۹۸	۱۴۴۳.۹۷	۱.۵۲	۱۴۴۳.۹۷	۴.۱۲	۱۴۴۳.۹۷	۱۵۰	۰.۸
۰.۴۱	۱۵۰۶.۶۶	۰.۳۹	۱۵۰۶.۶۶	۰.۷۶	۱۵۰۶.۶۶	۱.۳۱	۱۵۰۶.۶۶	۴	۱۵۰۶.۶۶	۲۰۰	
۰.۴۲	۱۵۵۶.۶۶	۰.۳۷	۱۵۵۶.۶۶	۰.۷۹	۱۵۵۶.۶۶	۱.۳۲	۱۵۵۶.۶۶	۴	۱۵۵۶.۶۶	۲۵۰	
۰.۴۳	۱۳۹۰.۷۶	۱.۱۰	۱۳۹۰.۷۶	۱.۱۹	۱۳۹۰.۷۶	۱.۶۰	۱۳۹۰.۷۶	۴.۱۱	۱۳۹۰.۷۶	۱۰۰	۱
۰.۴۳	۱۴۵۶.۶۶	۰.۳۳	۱۴۵۶.۶۶	۰.۷۷	۱۴۵۶.۶۶	۱.۳۷	۱۴۵۶.۶۶	۴	۱۴۵۶.۶۶	۱۵۰	
۰.۴۱	۱۵۰۶.۶۶	۰.۴۱	۱۵۰۶.۶۶	۰.۷۹	۱۵۰۶.۶۶	۱.۳۶	۱۵۰۶.۶۶	۴	۱۵۰۶.۶۶	۲۰۰	
۰.۴۸	۱۵۵۶.۶۶	۰.۳۹	۱۵۵۶.۶۶	۰.۷۵	۱۵۵۶.۶۶	۱.۳۳	۱۵۵۶.۶۶	۴	۱۵۵۶.۶۶	۲۵۰	۱
۰.۴۳	۱۴۰۶.۶۶	۰.۳۳	۱۴۰۶.۶۶	۰.۷۵	۱۴۰۶.۶۶	۱.۳۰	۱۴۰۶.۶۶	۴	۱۴۰۶.۶۶	۱۰۰	
۰.۴۲	۱۴۵۶.۶۶	۰.۳۳	۱۴۵۶.۶۶	۰.۷۳	۱۴۵۶.۶۶	۱.۳۰	۱۴۵۶.۶۶	۴	۱۴۵۶.۶۶	۱۵۰	
۰.۴۲	۱۵۰۶.۶۶	۰.۳۱	۱۵۰۶.۶۶	۰.۷۹	۱۵۰۶.۶۶	۱.۳۳	۱۵۰۶.۶۶	۴	۱۵۰۶.۶۶	۲۰۰	۱
۰.۴۱	۱۵۵۶.۶۶	۰.۳۹	۱۵۵۶.۶۶	۰.۷۶	۱۵۵۶.۶۶	۱.۳۴	۱۵۵۶.۶۶	۴	۱۵۵۶.۶۶	۲۵۰	
۰.۵۱		۱.۵۸		۱.۰۹		۱.۸۸		متوسط زمان حل			

به حل مساله AP با سایز ۲۰۰ در جداول ۷ و ۹ به صورت پرننگ نشان داده شده اند. ستون چهارم تا ستون هفتم جدول بترتیب نتایج استفاده از الگوریتم های GA، Tuned GA، SATLUHLP و GASAUHLP را نشان می دهد بطوریکه هر یک از این ستون ها شامل مقدار هزینه و زمان اجرای الگوریتم متناظر با آن ستون هستند. همچنین، ستون Strun درصد موفقیت الگوریتم در دستیابی به پاسخ بهینه و یا بهترین جواب موجود را در ۱۰۰ مرتبه اجرا نشان می دهد. بر اساس جدول (۷)، هر سه الگوریتم Tuned GA، SATLUHLP و GASAUHLP به مقادیر بهینه و یا بهترین جواب شناخته شده دست یافته اند و این در حالی است که الگوریتم GA نیز در تمامی موارد به جز یک مورد ($n=200$) به جواب بهینه رسیده است. در مورد مذکور، GA تسهیلات ۵۳ و ۱۸۴ را به درستی به عنوان هاب انتخاب کرده و این در حالی است که اندک خطای مشاهده شده در هزینه، ناشی از تخصیص غیر بهینه الگوریتم است. نتایج محاسباتی بیان می دارند که سرعت محاسباتی Tuned GA در مقایسه با GA، ۱.۸ برابر سریع تر است. مزیت بکارگیری روش تنظیم پارامتر در حل این مسائل نیز مشهود است.

جداول (۷) و (۹) نتایج محاسباتی حاصل از مجموعه داده AP را زمانی که هزینه ثابت بترتیب از نوع loose و tight می باشد را نشان می دهد. هر یک از الگوریتم ها در هر سایز مختلف ۱۰۰ مرتبه اجرا و جواب با کمترین هزینه در جداول ارائه گردیده اند. کلیه پارامترهای الگوریتم GASAUHLP نیز همانند مجموعه داده CAB تنظیم می گردند با این تفاوت که در حل مسائل AP با ابعاد بزرگ ($n = \{100, 200\}$) همسایگی مورد استفاده در جستجوگر محلی ۳ مرتبه در هر تکرار بکار گرفته می شود. ستون اول هر یک از جداول (۷) و (۹) سایز مساله، ستون دوم هزینه بهینه و یا بهترین هزینه شناخته شده در ادبیات و ستون سوم تسهیلات هاب انتخابی متناظر با هزینه مذکور را نشان می دهد. قابل ذکر است که هزینه بهینه مجموعه داده AP برای مسائل $n = \{10, 20, 25, 40, 50, 100\}$ توسط Silva و Cunha [۱۹] و با استفاده از الگوریتم های دقیق فراهم آمده اند و این در حالی است که حل مساله AP با سایز ۲۰۰ به دلیل محدودیت های حافظه همچنان ناممکن است. از این رو، مقدار بهینه مساله AP با سایز ۲۰۰ و مستقل از نوع هزینه ثابت نامشخص است و مبنای مقایسه در این مساله بهترین نتایج شناخته شده در ادبیات فرض می گردد. سطرهای مربوط

در مسائل AP با سایز $n = \{10, 20, 25, 40, 50, 100\}$ در این مقاله، مطابق با بهترین پاسخ‌های موجود در ادبیات است و این در حالی است که در این مقاله ادعا می‌شود با انتخاب گره‌های ۴۴ و ۱۴۹ در مساله با سایز $n=200$ نتایج بهتری در مقایسه با بهترین نتایج موجود در ادبیات حاصل می‌گردد. بهترین نتایج موجود در ادبیات در حل مساله مذکور نیز مربوط به معرفی گره‌های ۵۳ و ۱۸۴ توسط Topcuoglu و همکاران [۱۷] و تخصیص بهینه‌Chen [۱۸] است. در این مقاله با استفاده از نرم افزار CPLEX هزینه بهینه مساله تخصیص با در نظر گیری گره‌های ۵۳ و ۱۸۴، یا ۴۴ و ۱۴۹ به عنوان تسهیلات هاب محاسبه گردیده‌اند و نتایج آن در جدول (۸) ارائه گردیده است.

در ادامه نیز مقایسات مربوط به الگوریتم GASAUHLP ارائه می‌گردد. از آنجایی که هر سه الگوریتم Tuned GA، SATLUHLP و GASAUHLP در حل مجموعه داده AP با هزینه ثابت loose به پاسخ‌های بهینه دست یافته‌اند، مبنای مقایسه الگوریتم‌ها زمان اجرای آنها فرض می‌شود. این نتایج بیان می‌دارد که GASAUHLP به طور متوسط تقریباً ۰.۷ برابر سریع‌تر از SATLUHLP و Tuned GA است. با توجه به توضیحات ارائه شده الگوریتم GASAUHLP از نظر زمان اجرا، بر سایر الگوریتم‌های موجود در ادبیات غلبه می‌نماید.

مقاله Silva و Cunha [۱۹] جدیدترین فعالیت تحقیقاتی در حوزه UHLP محسوب می‌گردد. مقادیر ارائه شده به عنوان هزینه بهینه

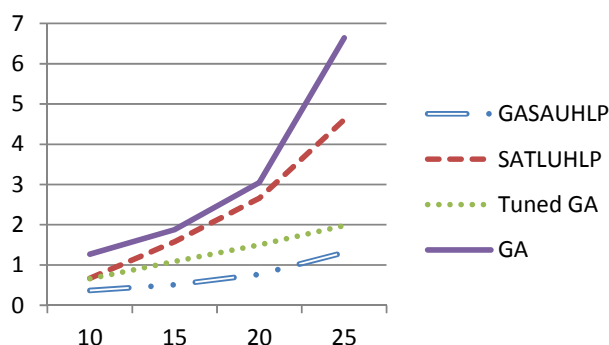
جدول ۵. نتایج اجرای الگوریتم‌های ابتکاری در مجموعه داده CAB، $n=200$

GASAUHLP		SATLUHLP		Tuned GA		GA		تسهیلات هاب در پاسخ بهینه	هزینه بهینه	f	α
زمان (ثانیه)	هزینه	زمان (ثانیه)	هزینه	زمان (ثانیه)	هزینه	زمان (ثانیه)	هزینه				
۱.۶۱	۹۶۷.۷۴	۹.۸۳	۹۶۷.۷۴	۲.۸۰	۹۶۷.۷۴	۵.۳۳	۹۶۷.۷۴	۴.۷، ۱۲، ۱۴، ۱۷	۹۶۷.۷۴	۱۰۰	۰.۲
۰.۶۳	۱۱۷۴.۵۳	۳.۲۷	۱۱۷۴.۵۳	۱.۷۶	۱۱۷۴.۵۳	۳.۱۲	۱۱۷۴.۵۳	۴.۱، ۲.۱۷	۱۱۷۴.۵۳	۱۵۰	
۰.۷۴	۱۳۲۴.۵۳	۳.۳۲	۱۳۲۴.۵۳	۱.۶۰	۱۳۲۴.۵۳	۳.۶۹	۱۳۲۴.۵۳	۴.۱، ۲.۱۷	۱۳۲۴.۵۳	۲۰۰	
۰.۸۱	۱۴۷۴.۵۳	۴.۷۹	۱۴۷۴.۵۳	۲.۰۳	۱۴۷۴.۵۳	۵.۱۱	۱۴۷۴.۵۳	۴.۱، ۲.۱۷	۱۴۷۴.۵۳	۲۵۰	۰.۴
۱.۲۸	۱۱۲۷.۰۹	۷.۶۰	۱۱۲۷.۰۹	۲.۹۱	۱۱۲۷.۰۹	۵.۵۹	۱۱۲۷.۰۹	۱.۴، ۱۲، ۱۷	۱۱۲۷.۰۹	۱۰۰	
۱.۳۰	۱۲۹۷.۷۶	۵.۱۱	۱۲۹۷.۷۶	۲.۹۴	۱۲۹۷.۷۶	۵.۲۶	۱۲۹۷.۷۶	۴.۱، ۲.۱۷	۱۲۹۷.۷۶	۱۵۰	
۰.۴۷	۱۴۴۲.۵۶	۲.۵۱	۱۴۴۲.۵۶	۱.۱۴	۱۴۴۲.۵۶	۳.۶۰	۱۴۴۲.۵۶	۴.۱۷	۱۴۴۲.۵۶	۲۰۰	۰.۶
۰.۴۵	۱۵۴۲.۵۶	۱.۲۸	۱۵۴۲.۵۶	۰.۸۵	۱۵۴۲.۵۶	۲.۲۲	۱۵۴۲.۵۶	۴.۱۷	۱۵۴۲.۵۶	۲۵۰	
۱.۵۷	۱۲۶۹.۱۵	۷.۰۵	۱۲۶۹.۱۵	۱.۸۷	۱۲۶۹.۱۵	۵.۴۷	۱۲۶۹.۱۵	۱.۴، ۱۲، ۱۷	۱۲۶۹.۱۵	۱۰۰	
۰.۴۶	۱۴۰۶.۰۴	۱.۳۳	۱۴۰۶.۰۴	۱.۳۶	۱۴۰۶.۰۴	۲.۹۵	۱۴۰۶.۰۴	۴.۱۷	۱۴۰۶.۰۴	۱۵۰	۰.۸
۰.۴۸	۱۵۰۶.۰۴	۱.۱۷	۱۵۰۶.۰۴	۰.۹۷	۱۵۰۶.۰۴	۲.۹۴	۱۵۰۶.۰۴	۴.۱۷	۱۵۰۶.۰۴	۲۰۰	
۰.۶۱	۱۵۷۰.۹۱	۰.۲۸	۱۵۷۰.۹۱	۰.۸۵	۱۵۷۰.۹۱	۱.۴۶	۱۵۷۰.۹۱	۶	۱۵۷۰.۹۱	۲۵۰	
۰.۴۶	۱۳۶۹.۵۲	۱.۲۳	۱۳۶۹.۵۲	۱.۱۹	۱۳۶۹.۵۲	۲.۹۷	۱۳۶۹.۵۲	۴.۱۷	۱۳۶۹.۵۲	۱۰۰	۱
۰.۴۸	۱۴۶۹.۵۲	۱.۱۲	۱۴۶۹.۵۲	۰.۸۶	۱۴۶۹.۵۲	۱.۵۲	۱۴۶۹.۵۲	۴.۱۷	۱۴۶۹.۵۲	۱۵۰	
۰.۵۱	۱۵۲۰.۹۱	۰.۲۵	۱۵۲۰.۹۱	۰.۸۴	۱۵۲۰.۹۱	۱.۴۷	۱۵۲۰.۹۱	۶	۱۵۲۰.۹۱	۲۰۰	
۰.۵۲	۱۵۷۰.۹۱	۰.۲۷	۱۵۷۰.۹۱	۰.۸۶	۱۵۷۰.۹۱	۱.۴۸	۱۵۷۰.۹۱	۶	۱۵۷۰.۹۱	۲۵۰	
۱.۶۶	۱۴۱۰.۰۷	۱.۶۳	۱۴۱۰.۰۷	۱.۹۴	۱۴۱۰.۰۷	۲.۴۰	۱۴۱۰.۰۷	۴.۲۰	۱۴۱۰.۰۷	۱۰۰	۱
۰.۴۸	۱۴۷۰.۹۱	۰.۳۵	۱۴۷۰.۹۱	۰.۸۴	۱۴۷۰.۹۱	۱.۴۳	۱۴۷۰.۹۱	۶	۱۴۷۰.۹۱	۱۵۰	
۰.۵۱	۱۵۲۰.۹۱	۰.۳۶	۱۵۲۰.۹۱	۰.۸۲	۱۵۲۰.۹۱	۱.۴۸	۱۵۲۰.۹۱	۶	۱۵۲۰.۹۱	۲۰۰	
۰.۴۷	۱۵۷۰.۹۱	۰.۴۱	۱۵۷۰.۹۱	۰.۸۴	۱۵۷۰.۹۱	۱.۴۴	۱۵۷۰.۹۱	۶	۱۵۷۰.۹۱	۲۵۰	
۰.۷۷		۲.۶۶		۱.۵۰		۳.۰۵		متوسط زمان حل			

جدول ۶. نتایج اجرای الگوریتم‌های ابتکاری در مجموعه داده CAB، $n=25$

GASAUHLP		SATLUHLP		Tuned GA		GA		تسهیلات هاب در پاسخ بهینه	هزینه بهینه	f	α
زمان (ثانیه)	هزینه	زمان (ثانیه)	هزینه	زمان (ثانیه)	هزینه	زمان (ثانیه)	هزینه				
۱.۹۰	۱۰۲۹.۶۳	۹.۳۵	۱۰۲۹.۶۳	۳.۳۴	۱۰۲۹.۶۳	۶.۲۹	۱۰۲۹.۶۳	۴.۱۲، ۱۷، ۲۴	۱۰۲۹.۶۳	۱۰۰	۰.۲
۱.۵۶	۱۲۱۷.۳۴	۵.۳۶	۱۲۱۷.۳۴	۳.۰۶	۱۲۱۷.۳۴	۵.۴۲	۱۲۱۷.۳۴	۴.۱، ۲.۱۷	۱۲۱۷.۳۴	۱۵۰	
۱.۸۸	۱۳۶۷.۳۴	۵.۷۱	۱۳۶۷.۳۴	۲.۸۰	۱۳۶۷.۳۴	۵.۹۰	۱۳۶۷.۳۴	۴.۱، ۲.۱۷	۱۳۶۷.۳۴	۲۰۰	

۰.۹۳	۱۵۰۰.۹۰	۱.۹۸	۱۵۰۰.۹۰	۱.۲۰	۱۵۰۰.۹۰	۲.۶۰	۱۵۰۰.۹۰	۱۲.۲۰	۱۵۰۰.۹۰	۲۵.۰	
۱.۱۶	۱۱۸۷.۵۱	۹.۸۷	۱۱۸۷.۵۱	۲.۵۴	۱۱۸۷.۵۱	۶.۴۱	۱۱۸۷.۵۱	۱.۴۰۱۲.۱۷	۱۱۸۷.۵۱	۱۰۰	
۱.۸۳	۱۳۵۱.۶۹	۷.۰۸	۱۳۵۱.۶۹	۲.۲۶	۱۳۵۱.۶۹	۶.۰۶	۱۳۵۱.۶۹	۴.۱۲.۱۸	۱۳۵۱.۶۹	۱۵۰	۰.۴
۱.۰۰	۱۵۰۱.۶۲	۲.۱۱	۱۵۰۱.۶۲	۱.۲۶	۱۵۰۱.۶۲	۴.۶۵	۱۵۰۱.۶۲	۱۲.۲۰	۱۵۰۱.۶۲	۲۰۰	
۱.۳۰	۱۶۰۱.۶۲	۲.۶۹	۱۶۰۱.۶۲	۱.۳۷	۱۶۰۱.۶۲	۴.۲۴	۱۶۰۱.۶۲	۱۲.۲۰	۱۶۰۱.۶۲	۲۵۰	
۱.۹۸	۱۳۳۳.۵۶	۵.۶۹	۱۳۳۳.۵۶	۳.۵۵	۱۳۳۳.۵۶	۶.۳۵	۱۳۳۳.۵۶	۲.۴.۱۲	۱۳۳۳.۵۶	۱۰۰	
۱.۲۶	۱۴۸۳.۵۶	۸.۳۳	۱۴۸۳.۵۶	۱.۳۶	۱۴۸۳.۵۶	۶.۴۷	۱۴۸۳.۵۶	۲.۴.۱۲	۱۴۸۳.۵۶	۱۵۰	۰.۶
۱.۰۱	۱۶۰۱.۲۰	۵.۷۴	۱۶۰۱.۲۰	۱.۴۲	۱۶۰۱.۲۰	۴.۵۰	۱۶۰۱.۲۰	۱۲.۲۰	۱۶۰۱.۲۰	۲۰۰	
۱.۴۳	۱۷۰۱.۲۰	۳.۱۱	۱۷۰۱.۲۰	۱.۶۵	۱۷۰۱.۲۰	۴.۸۱	۱۷۰۱.۲۰	۱۲.۲۰	۱۷۰۱.۲۰	۲۵۰	
۲.۲۵	۱۴۵۸.۸۳	۴.۳۰	۱۴۵۸.۸۳	۳.۶۰	۱۴۵۸.۸۳	۶.۳۲	۱۴۵۸.۸۳	۲.۴.۱۲	۱۴۵۸.۸۳	۱۰۰	
۱.۸۳	۱۵۹۴.۰۸	۸.۸۸	۱۵۹۴.۰۸	۱.۳۴	۱۵۹۴.۰۸	۶.۰۷	۱۵۹۴.۰۸	۱۲.۲۰	۱۵۹۴.۰۸	۱۵۰	۰.۸
۰.۶۶	۱۶۹۰.۵۷	۲.۲۱	۱۶۹۰.۵۷	۱.۰۵	۱۶۹۰.۵۷	۲.۶۴	۱۶۹۰.۵۷	۵	۱۶۹۰.۵۷	۲۰۰	
۰.۶۲	۱۷۴۰.۵۷	۱.۲۱	۱۷۴۰.۵۷	۱.۱۶	۱۷۴۰.۵۷	۲.۱۰	۱۷۴۰.۵۷	۵	۱۷۴۰.۵۷	۲۵۰	
۱.۸۳	۱۵۵۶.۶۳	۳.۳۱	۱۵۵۶.۶۳	۳.۲۰	۱۵۵۶.۶۳	۵.۵۰	۱۵۵۶.۱۹	۴.۸.۲۰	۱۵۵۶.۶۳	۱۰۰	
۰.۶۶	۱۶۴۰.۵۷	۳.۸۸	۱۶۴۰.۵۷	۱.۱۳	۱۶۴۰.۵۷	۲.۲۶	۱۶۴۰.۵۷	۵	۱۶۴۰.۵۷	۱۵۰	
۰.۶۷	۱۶۹۰.۵۷	۰.۶۹	۱۶۹۰.۵۷	۱.۱۹	۱۶۹۰.۵۷	۲.۱۲	۱۶۹۰.۵۷	۵	۱۶۹۰.۵۷	۲۰۰	۱
۰.۵۷	۱۷۴۰.۵۷	۰.۷۳	۱۷۴۰.۵۷	۱.۱۲	۱۷۴۰.۵۷	۲.۱۳	۱۷۴۰.۵۷	۵	۱۷۴۰.۵۷	۲۵۰	
	۱.۳۱		۴.۶۱		۱.۹۸		۶.۶۴		متوسط زمان حل		



شکل ۲. مقایسه متوسط زمان اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری در حل سایزهای مختلف مجموعه داده CAB

جدول ۷. حل مسائل مجموعه داده AP با در نظرگیری هزینه ثابت loose

Srun	GASAUHLP		SATLUHLP		Tuned GA		GA		تسهیلات هاب در پاسخ بهینه	هزینه بهینه	n
	زمان (ثانیه)	هزینه	زمان (ثانیه)	هزینه	زمان (ثانیه)	هزینه	زمان (ثانیه)	هزینه			
۷۳	۱.۵۱	۲۲۴۲۵۰.۰۵	۳.۷۹	۲۲۴۲۵۰.۰۵	۲.۴۴	۲۲۴۲۵۰.۰۵	۳.۷۴	۲۲۴۲۵۰.۰۵	۳.۴.۷	۲۲۴۲۵۰.۰۵	۱۰
۹۲	۲.۰۲	۲۳۴۶۹۰.۹۵	۱.۹۹	۲۳۴۶۹۰.۹۵	۲.۶۸	۲۳۴۶۹۰.۹۵	۴.۵۶	۲۳۴۶۹۰.۹۵	۷.۱۴	۲۳۴۶۹۰.۹۵	۲۰
۹۳	۲.۸۱	۲۳۶۶۵۰.۶۲	۳.۴۴	۲۳۶۶۵۰.۶۲	۳.۸۰	۲۳۶۶۵۰.۶۲	۷.۸۸	۲۳۶۶۵۰.۶۲	۸.۱۸	۲۳۶۶۵۰.۶۲	۲۵
۶۳	۵.۹۳	۲۴۰۹۸۶.۲۳	۷.۰۱	۲۴۰۹۸۶.۲۳	۷.۱۸	۲۴۰۹۸۶.۲۳	۱۴.۸۲	۲۴۰۹۸۶.۲۳	۱۴.۲۸	۲۴۰۹۸۶.۲۳	۴۰
۴۸	۶.۰۸	۲۳۷۴۲۱.۹۸	۱۵.۹۸	۲۳۷۴۲۱.۹۸	۱۰.۲۶	۲۳۷۴۲۱.۹۸	۲۴.۴۰	۲۳۷۴۲۱.۹۸	۱۵.۳۶	۲۳۷۴۲۱.۹۸	۵۰
۴	۱۷.۰۰	۲۳۸۰۱۶.۲۸	۳۳.۱۷	۲۳۸۰۱۶.۲۸	۳۳.۵۲	۲۳۸۰۱۶.۲۸	۵۸.۷۱	۲۳۸۰۱۶.۲۸	۲۹.۷۳	۲۳۸۰۱۶.۲۸	۱۰۰
۱	۶۶.۸۵	۲۲۸۹۴۷.۰۸	۸۵.۰۹	۲۲۸۹۴۷.۰۸	۹۹.۹۲	۲۲۸۹۴۷.۰۸	۱۷۵.۳۱	۲۲۸۹۴۷.۰۸	۵۳.۱۸۴	۲۲۸۹۴۷.۰۸	۲۰۰
		۱۴.۶		۲۱.۵		۲۲.۸۳		۴۱.۳۴		متوسط زمان حل	

جدول ۸. حل مسائل مجموعه داده (loose) AP سایز $n=200$ با نرم افزار CPLEX

n	تسهیلات هاب	هزینه تخصیص بهینه Cunha[19] و Silva	هزینه تخصیص بهینه CPLEX
۲۰۰	۵۳۱۸۴ و	۳۵۲۳۸۳.۳۷	۲۲۸۹۴۷.۰۸
	۴۴ و ۱۴۹	۲۳۳۸۰۳.۰۰	۲۷۵۵۳۷.۶۵

در نهایت نیز مقایسه الگوریتم GASAUHLP ارائه می‌گردد. از آنجایی که هر سه الگوریتم Tuned GA, SATLUHLP و GASAUHLP در حل مجموعه داده AP با هزینه ثابت tight به پاسخ‌های بهینه دست یافته‌اند، مبنای مقایسه الگوریتم‌ها زمان اجرای آنها فرض می‌شود. نتایج ارائه شده حکایت از سرعت محاسباتی بالاتر GASAUHLP در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها دارد و بدین طریق کارایی الگوریتم پیشنهادی در این مقاله به اثبات می‌رسد. شکل (۳) مقایسه زمان اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری بر مجموعه داده AP را به تصویر می‌کشد.

مقادیر ارائه شده به عنوان هزینه بهینه در مسائل AP با در نظرگیری هزینه ثابت tight و با سایز $n = \{10, 20, 25, 40, 50, 100\}$ در مقاله Cunha و Silva [۱۹]، مطابق با بهترین پاسخ‌های موجود در ادبیات است و این در حالی است که در این مقاله ادعا می‌شود با انتخاب گره‌های ۵۵ و ۱۲۳ در مساله با سایز $n=200$ نتایج بهتری در مقایسه با بهترین نتایج موجود در ادبیات حاصل می‌گردد. بهترین نتایج موجود در ادبیات در حل مساله مذکور نیز مربوط به معرفی گره‌های ۵۳ و ۱۸۴ توسط Topcuoglu و همکاران [۱۷] و تخصیص بهینه Chen [۱۸] است. با استفاده از نرم افزار CPLEX هزینه بهینه مساله تخصیص با در نظرگیری گره‌های ۵۳ و ۱۸۴، یا ۵۵ و ۱۲۳ به عنوان تسهیلات هاب محاسبه گردیده‌اند و نتایج آن در جدول (۱۰) ارائه گردیده است.

نتایج ارائه شده در جدول (۸) بیان می‌دارد که هزینه ارائه شده توسط Cunha و Silva [۱۹] در مساله AP با سایز $n=200$ و هزینه ثابت loose با خطا همراه است و حال آنکه در حال حاضر دستیابی به جواب بهینه مساله مذکور به عنوان تنها چالش مجموعه داده AP محسوب می‌گردد. از این رو، نمی‌توان نتایج مقاله Cunha و Silva [۱۹] را به عنوان بهترین نتایج موجود در ادبیات قلمداد کرد و این نتایج در مقایسات این مقاله کنار گذاشته می‌شود.

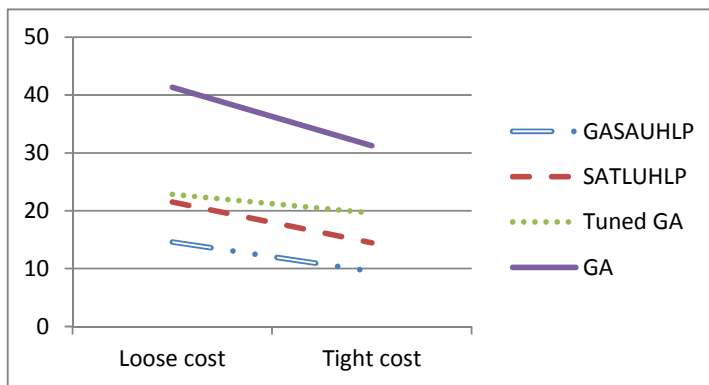
جدول (۹)، نتایج محاسباتی حاصل از حل مجموعه داده AP را با فرض هزینه ثابت tight نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، هر سه الگوریتم Tuned GA, SATLUHLP و GASAUHLP به مقادیر بهینه و یا بهترین جواب شناخته شده دست یافته‌اند و این در حالی است که الگوریتم GA نیز در تمامی موارد به جز یک مورد ($n=200$) به جواب بهینه رسیده است. در مورد مذکور، GA تسهیلات ۵۳ و ۱۸۴ را به درستی به عنوان هاب انتخاب کرده است و اختلاف هزینه مشاهده شده ناشی از عدم موفقیت در تخصیص بهینه گره‌های غیرهاب به تسهیلات هاب است. همچنین نتایج محاسباتی بیان می‌دارند که سرعت محاسباتی Tuned GA در مقایسه با GA، ۱.۸ برابر سریع‌تر است. توضیحات مذکور بیان می‌دارد که چگونه بکارگیری رویکرد تنظیم پارامتر پیشنهادی علاوه بر افزایش کارایی الگوریتم‌ها در دستیابی به مقادیر بهینه، سرعت محاسباتی آنها را نیز افزایش می‌دهد.

جدول ۹. حل مسائل مجموعه داده AP با در نظرگیری هزینه ثابت tight

n	هزینه بهینه	تسهیلات هاب در پاسخ بهینه		GA		Tuned GA		SATLUHLP		GASAUHLP	
		زمان	هزینه	زمان	هزینه	زمان	هزینه	زمان	هزینه	زمان	هزینه
۱۰	۲۶۳۳۹۹.۹۴	۴،۵۱۰	۲۶۳۳۹۹.۹۴	۴.۱۳	۲۶۳۳۹۹.۹۴	۲.۴۴	۲۶۳۳۹۹.۹۴	۵.۷۱	۲۶۳۳۹۹.۹۴	۱.۲۵	۲۶۳۳۹۹.۹۴
۲۰	۲۷۱۱۲۸.۱۸	۷،۱۹	۲۷۱۱۲۸.۱۸	۴.۷۲	۲۷۱۱۲۸.۱۸	۲.۲۸	۲۷۱۱۲۸.۱۸	۳.۲۲	۲۷۱۱۲۸.۱۸	۱.۵۳	۲۷۱۱۲۸.۱۸
۲۵	۲۹۵۶۶۷.۸۴	۱۳	۲۹۵۶۶۷.۸۴	۳.۲۸	۲۹۵۶۶۷.۸۴	۱.۹۲	۲۹۵۶۶۷.۸۴	۰.۹۱	۲۹۵۶۶۷.۸۴	۱.۰۴	۲۹۵۶۶۷.۸۴
۴۰	۲۹۳۱۶۴.۸۳	۱۹	۲۹۳۱۶۴.۸۳	۷.۳۱	۲۹۳۱۶۴.۸۳	۴.۹۳	۲۹۳۱۶۴.۸۳	۱.۴۱	۲۹۳۱۶۴.۸۳	۱.۶۲	۲۹۳۱۶۴.۸۳
۵۰	۳۰۰۴۲۰.۹۸	۲۴	۳۰۰۴۲۰.۹۸	۸.۲۶	۳۰۰۴۲۰.۹۸	۴.۳۴	۳۰۰۴۲۰.۹۸	۱.۸۸	۳۰۰۴۲۰.۹۸	۳.۵۶	۳۰۰۴۲۰.۹۸
۱۰۰	۳۰۵۰۹۷.۹۶	۵۲	۳۰۵۰۹۷.۹۶	۱۷.۲۸	۳۰۵۰۹۷.۹۶	۱۳.۱۱	۳۰۵۰۹۷.۹۶	۴.۹۱	۳۰۵۰۹۷.۹۶	۴.۸۹	۳۰۵۰۹۷.۹۶
۲۰۰	۲۳۳۵۴۰.۲۴	۵۳،۱۸۴	۲۳۳۵۴۰.۲۴	۱۷۳.۶۶	۲۳۳۵۴۰.۲۴	۱۰۸.۲۱	۲۳۳۵۴۰.۲۴	۸۳.۲۱	۲۳۳۵۴۰.۲۴	۵۲.۷۳	۲۳۳۵۴۰.۲۴
	متوسط زمان حل	۳۱.۲۳				۱۹.۶۰		۱۴.۴۶		۹.۵۲	

جدول ۱۰. حل مسائل مجموعه داده AP (tight) سایز $n=200$ با نرم افزار CPLEX

n	تسهیلات هاب	هزینه تخصیص بهینه Cunha[19] و Silva	هزینه تخصیص بهینه CPLEX
۲۰۰	۵۳۱۸۴ و	۳۵۶۹۷۲.۵۶	۲۳۳۵۴۰.۲۴
	۵۵ و ۱۲۳	۲۷۲۲۳۷.۷۸	۴۷۰۰۶۳.۱۶



شکل ۳. مقایسه متوسط زمان اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری در حل مجموعه داده AP

مجموعه داده‌های استاندارد CAB و AP که کاربرد گسترده‌ای در محک‌زنی الگوریتم‌های توسعه داده شده در حوزه مکان‌یابی تسهیلات هاب دارند، بهره گرفته شد. همچنین، با استفاده از رویکرد تنظیم پارامتر پیشنهادی الگوریتم GA ارائه شده توسط Topcuoglu و همکاران [۱۷] مورد بررسی قرار گرفت و الگوریتم تنظیم پارامتر شده Tuned GA نامیده شد. در ادامه، با استفاده از الگوریتم‌های GA، Tuned GA، SATLUHLP ارائه شده توسط Chen [۱۸] و GASAUHLP مسائل مجموعه داده‌های CAB و AP حل گردید. بر اساس نتایج محاسباتی، بکارگیری رویکرد تنظیم پارامتر پیشنهادی قادر است علاوه بر افزایش توانایی الگوریتم‌ها در دستیابی به جواب‌های بهتر، زمان اجرای الگوریتم‌ها را نیز به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. مقایسه هزینه ارائه شده الگوریتم GASAUHLP با هزینه‌های بهینه ارائه شده توسط Cunha و Silva [۱۹] و بهترین نتایج موجود در ادبیات، حکایت از توانایی GASAUHLP در دستیابی به هزینه بهینه و یا بهترین جواب شناخته شده دارد. همچنین، مقایسه زمان اجرای الگوریتم GASAUHLP با الگوریتم‌های GA، Tuned GA، SATLUHLP بیان از سرعت محاسباتی بالاتر الگوریتم GASAUHLP دارد بطوریکه در حل مسائل با ابعاد بالا و یا مسائلی که در آنها تعداد تسهیلات هاب در جواب بهینه کمتر است، بهبود در سرعت محاسباتی الگوریتم GASAUHLP نمود بیشتر می‌یابد. بطور خلاصه الگوریتم GASAUHLP قادر است مساله UHLP را به صورت بهینه و یا نزدیک به بهینه با سرعت محاسباتی بالاتر در مقایسه با الگوریتم‌های موجود در ادبیات حل

نتایج ارائه شده در جدول (۱۰) بیان می‌دارد که هزینه ارائه شده توسط Cunha و Silva [۱۹] در مساله AP با سایز $n=200$ و هزینه ثابت tight با خطای قابل ملاحظه‌ای همراه است. اشتباهات مذکور در حل مسائل AP و در عین حال در چالش برانگیزترین مسائل مجموعه داده مذکور، الگوریتم GASAUHLP را به عنوان بهترین الگوریتم موجود به منظور حل مسائل UHLP معرفی می‌نماید.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مساله مکان‌یابی تسهیلات هاب با تخصیص یگانه و ظرفیت نامحدود (USAHLP) مورد بررسی قرار گرفت. به منظور حل مساله مذکور، یک هیوریستیک جدید و مقاوم در چارچوب الگوریتم ترکیبی ژنتیک - تیرید شبیه‌سازی شده (GA-SA) توسعه داده شد و در ادامه به صورت GASAUHLP نامگذاری گردید. الگوریتم ژنتیک در GASAUHLP به منظور تشکیل تعدادی از راه-حل‌های آغازین متنوع در فضای حل مساله مورد استفاده قرار گرفت و در ادامه الگوریتم تیرید شبیه‌سازی شده به منظور بهبود هر دو بردار مکان و تخصیص مساله به کار گرفته شد. با توجه به این که عملکرد الگوریتم‌های هیوریستیک به شدت تحت تاثیر مقادیر پارامترهای آنها است، یک رویکرد تنظیم پارامتر مبتنی بر طراحی آزمایش‌ها، نسبت سیگنال به اختلال و تاپسیس پیشنهاد گردید که سطوح بهینه هر یک از پارامترهای همسایگی، نوع عملگر تقاطع، دمای اولیه، چگونگی کاهش دما و تعداد تکرار الگوریتم GASAUHLP را مشخص نمود. در راستای تبیین کارایی رویکرد تنظیم پارامتر پیشنهادی و الگوریتم GASAUHLP، از

41. Taguchi Design
42. Orthogonal array
43. Alternative
44. Matlab
45. Triangular inequality
46. Shift
47. Improvement procedure
48. Best-known solution
49. Mail flow

نماید. قابل ذکر است که اعتبار هزینه‌های ارائه شده توسط الگوریتم مذکور نیز با مقایسه نتایج حاصل از بکارگیری الگوریتم‌های دقیق و نرم‌افزار CPLEX مورد تأیید قرار گرفت. توسعه مسائلی که در آنها هزینه بازگشایی تسهیلات هاب، تابعی از ظرفیت است و هر گره غیرهاب می‌تواند به تعداد مشخصی از تسهیلات هاب تخصیص یابد، از جمله تحقیقات آتی در حوزه مسائل USAHLP به شمار می‌رود. همچنین، حل مسائل مکان‌یابی تسهیلات هاب با تخصیص چندگانه و ظرفیت محدود بوسیله الگوریتم GASAUHL. نیز می‌تواند از تحقیقات آتی محسوب گردد.

مراجع

- [1] Toh RS, Higgins RC. The impact of hub and spoke network centralization and route monopoly on domestic airline profitability, *Transportation Journal*, (1985), Vol. 24, pp. 16-27.
- [2] Aykin T. Networking policies for hub-and-spoke systems with application to the air transportation system”, *Transportation Science*, (1995), Vol. 29, No. 3, pp. 201-221.
- [3] Yang TH, Huang Y. Hub-and-spoke airline network design under competitive market, *Journal of Industrial and Production Engineering*, (2015), Vol. 32, pp. 186-195.
- [4] Kuby MJ, Gray RG. Hub network design problem with stopovers and feeders: case of federal express, *Transportation Research*, (1993), Vol. 27, pp. 1-12.
- [5] Gelareh S, Monemi RN, Nickel S. Multi-period hub location problems in transportation, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, (2015), Vol. 75, pp. 67-94.
- [6] Lumsden K, Dallari F, Ruggeri R. Improving the efficiency of the hub and spoke system for the SKF European distribution network, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, (1999), Vol. 29, pp. 50-64.
- [7] Lee Y, Lim B, Park J. A hub location problem in designing digital data service networks: lagrangian relaxation approach, *Location Science*, (1996), Vol. 4, pp. 185-194.
- [8] O’Kelly M. A quadratic integer program for the location of interacting Hub facilities, *European Journal of Operational Research*, (1987), Vol. 32, pp. 393-404.
- [9] Drezner Z, Hamacher HW. *Facility location: applications and theory*, Berlin, Springer, (2002).
- [10] Aykin T. Lagrangian relaxation based approaches Hub-and-Spoke network design problem,

پی‌نوشت

1. Location-Allocation problem
2. Uncapacitated Single-Allocation Hub Location Problem (USAHLP)
3. Uncapacitated Single-Allocation p-Hub Median Problem (USApHMP)
4. Quadratic integer problem
5. Genetic Algorithm (GA)
6. Branch-and-Bound (B&B)
7. Hybrid
8. Tabu Search (TS)
9. Upper Bound
10. Simulated Annealing (SA)
11. Multi-Start Tabu Search (MSTS)
12. Crossover
13. Discount factor
14. Binary
15. Triangle inequality
16. Mixed Integer Linear Programing
17. Symmetric
18. Population based
19. Combinatorial Optimization Problem (COM)
20. Single-solution based
21. Local optimum
22. Local search
23. Global search
24. Chromosome
25. Hub Array
26. Assign Array
27. Cumulative
28. Uniform
29. Roulette wheel
30. Single-point crossover
31. Two-point crossover
32. Uniform crossover
33. Cooling schedule
34. Flip
35. Exchange
36. Adjacent exchange
37. Cooling schedule
38. Signal to Noise ratio
39. TOPSIS
40. Factorial Design

- [23] Blum C, Roli A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison, *ACM Computing Surveys*, (2003), Vol. 35, pp. 268-308.
- [24] Kirkpatrick S, Gelatt CD, Vecchi MP. Optimization by simulated annealing, *Science*, (1983), Vol. 220, pp. 671-680.
- [25] Talbi EG. Metaheuristics: from design to implementation, Wiley, (2009).
- [26] Lundy M, Mees A. Convergence of an annealing algorithm", *Mathematical Programming*, (1986), Vol. 34, pp. 111-124.
- [27] Montgomery DC. Design and Analysis of Experiments (6th Ed.), John Wiley & Sons, Inc, ISBN 0-471-48735-X, (2005).
- [28] Akbaripour H, Masehian E. Efficient and Robust Parameter Tuning for Heuristic Algorithms, *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*, (2013), Vol. 24, pp. 143-150.
- [29] Ernst AT, Krishnamoorthy M. Exact and heuristic algorithms for the uncapacitated multiple allocation p-hub median problem, *European Journal of Operations Research*, (1998), Vol. 104, pp. 100-112.
- [30] Ernst AT, Krishnamoorthy M. Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem", *Location Science*, (1996), Vol. 24, No. 104, pp. 139-154.
- [31] Ernst AT, Krishnamoorthy M. Solution algorithms for the capacitated single allocation hub location problem, *Annals of Operations Research*, (1999), Vol. 86, pp. 141-159.
- [32] Akbaripour H, Masehian E. Application of Simulated Annealing in Solving the Uncapacitated Hub Location Problem, (in Persian), in *Proceedings of the 5th International Conference of Iranian Operations Research Society*, (2012), Tabriz, Iran.
- [11] Love RF, Morris JG, Wesolowsky G. Facility location: models and methods, New York, North-Holland, Publications in operations research, (1988).
- [12] Campbell JF. Integer programming formulations of discrete Hub location problems, *European Journal of Operational Research*, (1994), Vol. 72, pp. 387-405.
- [13] Campbell JF, O'Kelly ME. Twenty-five years of hub location research, *Transportation Science*, (2012), Vol. 46, pp. 153-169.
- [14] Farahani RZ, Hekmatfar M, Arabani AB, Nikbakhsh E. Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications, *Computers & Industrial Engineering*, (2103), Vol. 64, pp. 1096-1109.
- [15] Abdinnour- Helm S, Venkataramanan MA. Solution approaches to hub location problems, *Annals of Operations Research*, (1998), Vol. 78, pp. 31-50.
- [16] Abdinnour-Helm S. A hybrid heuristic for the uncapacitated hub location problem, *European Journal of Operations Research*, (1998), Vol. 106, pp. 489-499.
- [17] Topcuoglu H, Corut F, Ermis M, Yilmaz G. Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms, *Computers & Operations Research*, (2005), Vol. 32, pp. 967-984.
- [18] Chen JA. A hybrid heuristic for the uncapacitated single allocation hub location problem, *Omega*, (2007), Vol. 35, pp. 211-220.
- [19] Silva MR, Cunha CB. New simple and efficient heuristics for the uncapacitated single allocation hub location problem, *Computers & Operations Research*, (2009), Vol. 36, No. 12, pp. 3152-3165.
- [20] O'Kelly M. Hub facility location with fixed costs, *The Journal of the Regional Science Association International*, (1992), Vol. 71, pp. 293-306.
- [21] Ebery J. Solving large single allocation p-Hub problems with two or three Hubs, *European Journal of Operational Research*, (2001), Vol. 128, pp. 447-458.
- [22] Holland JH. Adaptation in natural and artificial systems, Michigan: University of Michigan Press, (1975).