



Evaluation of Bee Meta-Heuristic Algorithm with Improved Local Search Mechanism to Find the Best Airports for Replacement Planes Establishment (Case Study: Qeshm Air Airline)

Mohammad Akhondi¹

¹ Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 2025.08.03

Revised: 2025.11.16

Accepted: 2026.01.22

Keyword:

Air transportation

Bee meta-heuristic algorithm

Agent-based

Replacement plane

Airport

*Corresponding Author:

Mohammad Akhondi

Email: makhondi@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Today, flight delays caused by various factors are one of the most fundamental challenges in the air transportation system. One of the main factors of these delays is the breakdown of planes and the time-consuming nature of replacing them with another plane. Finding the best airports to deploy these replacement planes can help reduce the time it takes for them to arrive at the requesting airports and thus reduce flight delays. On the other hand, meta-heuristic algorithms, including the bee algorithm, have been used in recent years and have shown their high abilities in solving problems and optimizations in various fields. Therefore, in this research, it was decided to use the bee meta-heuristic algorithm in order to find suitable airports for the deployment of replacement planes as a problem with discrete variables. On the other hand, in the local search mechanism section of the bee algorithm, a change to improve the performance of the algorithm has been given and suggested as the main goal of the research. The proposed algorithm has shown a significant performance improvement in the convergence parts of the algorithm, the repeatability of the results, and the average number of repetitions to achieve the best result. Of course, the proposed algorithm was also applied to the traveling salesman and knapsack problems, which showed a suitable performance improvement. For modeling and simulation, Anylogic, a powerful simulation software, has been used for agent-based simulation of the air transport network.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Today, one of the most important factors in flight delays is the breakdowns of planes and the time-consuming nature of replacing them with other planes. Finding the best airports to deploy these replacement planes (RP) can help reduce flight delays. Therefore, it was decided to conduct an agent-based simulation to can deploy RPs at different airports and obtain their average flight time to the requesting airports, or the same average flight delay, during the simulation. On the other hand, in this study, the honey bee algorithm (HBA) was used as one of the famous meta-heuristic algorithms to find the best airports for the deployment of RPs. The primary purpose of this study was to make a heuristic change in the local search process of the HBA and to evaluate its effect on improving the performance of this algorithm. Also, the data of Qeshm Air airline has been used in this study.

Methodology

According to the main purpose of this research, an agent-based simulation of the air transportation system was performed with four intelligent agents, including the main agent, the airport agent, the principal planes agent, and the RPs agent. The main agent can run a series of functions for different agents and make a series of computations. For example, it can specify the nearest RP for any of the airports. As soon as the simulation begins, the principal planes will move to their destination based on their flight times per week and then return to the airport of origin. Then, airports will send a message to their dedicated RP to perform an alternative flight if needed, according to the possibility of the plane's failure. The RP immediately departs to the requesting airport. After reaching it, it moves to the destination of the canceled flight and then returns to its airport of origin. Also, the number of RPs and airports, have been considered to be six and 18, respectively.

Regarding the use of the meta-heuristic HBA, a string or chromosome with 6 genes was considered to solve the problem, where each gene can assign real numbers between 0 and 17 to itself in proportion to the 18 airports mentioned. In this study, the initial population of bees and the number of top bees are considered to be 50 and 25, respectively. The superior bees are obtained by sorting the population of bees according to the lowest target function. The target function of each chromosome or wasp is the same as the average time it takes for the RPs located in the cities of that chromosome to arrive at the airports requesting the RP, which is obtained by running the simulation. Of the top 25 bees, 15 bees with the lowest target function are considered as the top selected bees, and the other 10 bees are considered as the top remaining bees, and a local search is done around them with a neighborhood radius of 3. The number of local searcher bees in the vicinity of the selected and remaining top bees have been considered 3 and 2, respectively. The other 25 bees with the bigger target function will also be eliminated, and another chromosome will randomly replace them. In each iteration of the algorithm run, for each of the bees in the population, according to the number of each of the 6 genes of that bee, 6 RPs are placed at the airports of their cities. Then, the simulation is executed at the highest speed, and the target function of that bee is obtained. This work is done for all bees, and therefore, the top and non-top bees will be updated. The important point in using the HBA is an innovative suggestion for how to perform the local search of the algorithm in which local searcher bees, instead are obtained with adding a random integer in the range $[-3,3]$ to the genes of the superior bees, are obtained using the genes of the superior bee's neighbor bees at a maximum distance equal to the intended neighborhood radius.

Figure 1 shows the proposed local search mechanism, for example, for the eighth top bee.

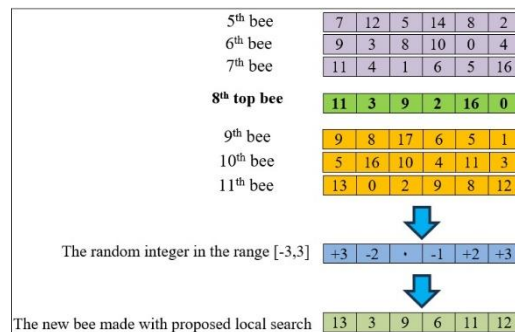


Figure 1. The proposed local search mechanism for each one of the top bees

Results and discussion

In this study, it was decided that in all runs and for both the proposed and modified algorithm as well as the initial HBA, the algorithm parameters as well as the bees' primary population should be used in the same way to compare their performance under the same conditions. On the other hand, both algorithms were run 50 times, and the results of their performance were examined in the sections of algorithm convergence, repeatability of the results, and the number of iterations to achieve the best results. In all 3 sections, the proposed modified algorithm has shown a significant improvement over the initial HBA. Of course, the proposed algorithm was also applied to the traveling salesman and knapsack problems, which showed a suitable performance improvement. Finally, using the improved HBA and a 1-year simulation, the best airports for the deployment of RPs were obtained: Tehran, Mashhad, Qeshm, Shiraz, Zahedan, and Ahvaz airports.

Conclusion

The main purpose of this study was to make an Innovative change in the local search process of the HBA and to evaluate its effect on improving the performance of this algorithm in finding the best locations for RPs. The meta-heuristic HBA showed a significant improvement over the original algorithm in all criteria with the proposed change in the local search section. According to the experiences gained from this research, we can say that the combination of agent-based simulation and modeling and meta-heuristic algorithms can be used to solve many problems and optimizations, especially in complex and dynamic environments, including aviation.



ارزیابی الگوریتم فراابتکاری زنبور عسل با مکانیزم جستجوی محلی بهبود یافته در یافتن بهترین فرودگاه ها برای استقرار هواپیماهای جایگزین (مطالعه موردی : شرکت قشم ایر)

محمد آخوندی^۱

۱- گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

چکیده

امروزه تأخیرهای پرواز ناشی از عوامل مختلف یکی از چالش های مهم و اساسی در سیستم حمل و نقل هوایی است. یکی از عوامل اصلی این تأخیرها خرابی هواپیماها و زمانبر بودن جایگزینی آن ها با هواپیمای دیگر است. یافتن بهترین فرودگاه ها برای استقرار این هواپیماهای جایگزین، می تواند به کاهش زمان رسیدن آن ها به فرودگاه های درخواست کننده و در نتیجه به کاهش زمان تأخیر در پروازها کمک کند. از طرفی الگوریتم های فراابتکاری از جمله الگوریتم زنبور عسل در سالیان اخیر مورد استفاده قرار گرفته و در حل مسائل و بهینه سازی ها در حوزه های مختلف توانایی های بالای خود را نشان داده اند. بنابراین در این تحقیق تصمیم گرفته شد که از الگوریتم فراابتکاری زنبور عسل به منظور یافتن فرودگاه های مناسب جهت استقرار هواپیماهای جایگزین به عنوان یک مسأله با متغیرهای گسسته استفاده شود. از طرفی در بخش مکانیزم جستجوی محلی الگوریتم زنبور عسل هم تغییری در جهت بهبود عملکرد الگوریتم به عنوان هدف اصلی تحقیق داده شده و پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی در بخش های همگرایی الگوریتم، تکرارپذیری نتایج و همین طور میانگین تعداد تکرار برای رسیدن به بهترین نتیجه، بهبود عملکرد قابل توجهی را نشان داده است. البته الگوریتم پیشنهادی برای مسائل معیار فروشنده دوره گرد و کوله پشتی هم استفاده شد که ارتقاء عملکرد مناسبی را نشان داد. برای مدل سازی و شبیه سازی هم از نرم افزار شبیه سازی قدرتمند Anylogic جهت شبیه سازی عامل مبنای شبکه حمل و نقل هوایی استفاده شده است.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

کلید واژگان:

حمل و نقل هوایی
الگوریتم فراابتکاری زنبور عسل
عامل مبنای
هواپیمای جایگزین
فرودگاه

*نویسنده مسئول:

محمد آخوندی

پست الکترونیکی:

makhondi@tvu.ac.ir



۱. مقدمه

سیستم‌های حمل و نقل هوایی و مدیریت ترافیک هوایی، ویژگی‌هایی دارند که آنها را برای شبیه‌سازی‌های مبتنی بر عامل مناسب می‌سازد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- وجود تعداد زیادی از عوامل با نقش‌های گوناگون مانند فرودگاه‌ها و هواپیماها و پیچیدگی سیستم
- هدف گرا بودن
- قابلیت تعامل عوامل در محیط

اولین ویژگی، سیستم‌های حمل و نقل هوایی را به عنوان سیستمی معرفی می‌کند که در آن عوامل برای ایجاد رفتار کلان سیستم عمل می‌کنند. خصوصیت دوم نشان می‌دهد که طراحان سیستم باید رفتارهای سطح خرد مانند رفتار خلبانان را برای رسیدن به اهداف کلان مدیریت و کنترل کنند. ویژگی سوم هم تأکید زیادی بر اهمیت محیط پیرامون و تعامل عوامل در آن دارد [۱].

در زمینه استفاده از مدل سازی عامل مینا^۱ در شبیه سازی و مدیریت صنعت حمل و نقل هوایی مطالعات زیادی در سطح جهانی انجام شده است. در سال ۲۰۱۳ گریدر و همکاران، یک شبیه سازی و مدل سازی را از صنعت حمل و نقل هوایی انجام دادند. در این تحقیق، یک مدل سازی و شبیه سازی چند عامله برای تحلیل و پیش بینی رفتار عوامل و بازیگران موجود در سیستم حمل و نقل هوایی با هدف کاهش زمان سفر در مسافرت‌های با فاصله متوسط انجام شده است [۲]. در سال ۲۰۱۸ لوییز و همکاران یک مدل سازی عامل مینا را برای پوشش و جبران تأخیرهای خطوط هوایی در پرتقال پیشنهاد دادند. در این مدل سازی یک بازار الکترونیکی عامل مینا ارائه شده است تا در مرکز کنترل عملیات خطوط هوایی این اطمینان حاصل شود که همه پروازها در زمان‌های از پیش تعیین شده خود انجام شده و یا در صورت بروز مشکل بتواند یک راه حل قابل قبول را طوری ارائه کند که کمترین تأثیر را در طرح عملیاتی مرکز و هزینه‌های خطوط هوایی داشته باشد. در واقع یک بازار الکترونیک به صورت یک سیستم چند عامله طوری طراحی شد که شرکت‌های هواپیمایی در این فضا امکان مذاکره و تامین منابع مورد نیازشان را داشته باشند [۳]. در سال ۲۰۲۳ محققان بر یک شبیه سازی عامل مینا از سیستم حمل و نقل هوایی به منظور مکان‌یابی هواپیماهای پشتیبان و کاهش تأخیر در پروازها تمرکز کردند [۴]. محققان در سال ۲۰۲۴ یک مدل سازی و شبیه سازی عامل مینا را به منظور طراحی و برنامه ریزی پرواز در فرودگاه‌ها انجام داده‌اند. در این تحقیق یک چارچوب تجزیه و تحلیل چرخه عمر جهت توصیف نحوه تعامل هواپیما با سیستم برنامه ریزی پرواز فرودگاه ارائه شده است [۵]. در سال ۲۰۱۲ محققان یک روش عامل مینا را برای مدل سازی و ارزیابی عملکرد فرودگاه‌ها به کار گرفتند. با توجه به اینکه فرودگاه به دلیل پارامترهای بسیار تأثیرگذار در عملکرد و عدم قطعیت و غیرقابل پیش بینی بودن یک سیستم بسیار پیچیده است، آن‌ها در این پژوهش با در نظر گرفتن نیاز به درک این سیستم بسیار پیچیده، یک مدل سازی عامل مینا برای بررسی رفتار و رویکرد فرودگاه‌ها با در نظر گرفتن پارامترها و عناصر تأثیرگذار و تعامل بین آن‌ها را توسعه دادند [۶]. در سال ۲۰۲۴ محققان از فناوری چند عاملی به منظور کنترل سقوط هواپیما از طریق زیرساخت‌های هوانوردی و بهبود ایمنی هوانوردی استفاده کردند [۷]. در سال ۲۰۱۸ سوفیان و همکاران یک ارزیابی از یک روش سیستم چند عاملی برای مدیریت اختلالات در خطوط هوایی مانند شرایط نامساعد آب و هوایی، خدمه بیمار یا هواپیماهای آسیب دیده که اغلب منجر به تأخیر در برنامه شرکت‌های هواپیمایی می‌شود، انجام دادند. این تحقیق نشان می‌دهد که واحد کنترل عملیات خطوط هوایی پشتیبانی شده توسط سیستم چند عاملی قادر به یافتن راه حل

^۱ Agent-Based Modeling

بهینه است و این کار را به طور قابل توجهی سریعتر انجام می دهد [۸]. در سال ۲۰۱۹ احسان و همکاران یک مدل عامل مبنا برای بهبود نظام تصمیم گیری SoS^۱ در حمل و نقل هوایی ارائه دادند. آن ها از مدل مبتنی بر عامل پیشنهادی برای آزمایش تأخیر پرواز در ساختار SoS حوزه حمل و نقل هوایی استفاده کردند [۹]. در سال ۲۰۱۷ محققان از مدل سازی عامل مبنا و شبیه سازی ذهنی برای مهندسی تاب آوری در حمل و نقل هوایی استفاده کردند [۱۰]. در سال ۲۰۱۹ استف و همکاران یک مدل سازی عامل مبنا را برای ارزیابی و تحلیل امنیت و کارایی و روابط بین آن ها در پایانه های فرودگاهی انجام دادند. این روش ترکیبی از رویکرد ارزیابی ریسک امنیتی مبتنی بر عامل با برآورد کارایی مبتنی بر عامل است [۱۱].

برای مسائل پیچیده و مشکل در بهینه سازی های ترکیبی، استفاده از الگوریتم های دقیق برای رسیدن به جواب بهینه در مثال ها و مقیاس های کوچک قابل استفاده است. برای نمونه های بزرگتر و پیچیده تر لازم است که از الگوریتم های فراابتکاری استفاده شود [۱۲]. وقتی صحبت از مدل سازی سیستم های پیچیده با استفاده از رویکرد مبتنی بر عامل می شود، مشکل انتخاب تکنیک بهینه سازی پارامتر مناسب وجود دارد. این مشکل با این واقعیت تشدید می شود که فضای پارامتر در سیستم های پیچیده مبتنی بر عامل می تواند ابعاد بزرگی داشته باشد و زمان مورد نیاز برای انجام آزمایش های عددی می تواند زیاد باشد. یک رویکرد جایگزین برای روش های بهینه سازی سنتی، الگوریتم های به اصطلاح فراابتکاری هستند که یک راه حل تقریبی را در یک زمان قابل قبول ارائه می دهند [۱۳]. در زمینه های مختلف مهندسی از این جمله در بهینه سازی های مرتبط با ربات های لامسه ای [۱۴] و یا روش های مسیریابی در اینترنت اشیا [۱۵] از این الگوریتم ها استفاده شده است. در زمینه استفاده از الگوریتم های فراابتکاری در موضوعات مرتبط با صنعت حمل و نقل هوایی و همین طور مدل سازی های عامل مبنا هم تحقیقاتی صورت گرفته است. از جمله ریدوان و همکاران در سال ۲۰۲۴ یک مدل سازی بروز از استراتژی های مختلف پروازی هواپیماهای ترابری با استفاده از الگوریتم های فراابتکاری ژنتیک و توده ذرات به منظور بررسی تأثیرات زیست محیطی و مصرف سوخت انجام دادند [۱۶]. میلوس و همکاران مسئله تخصیص گیت مشارکتی را به عنوان یک مفهوم جدید برای کاهش زمان انتظار گیت هواپیما فرموله کرده و ارائه داده اند. آن ها با توجه به پیچیدگی های مسئله از الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل استفاده کرده اند [۱۲]. محققان در سال ۲۰۱۷ یک بهینه سازی عملکرد آیرودینامیکی نوک بال هواپیما را با استفاده از الگوریتم های ژنتیک ارائه و عملکرد الگوریتم را از نظر همگرایی و متناسب با شرایط طراحی بررسی کردند. از طرفی نتایج آن را با الگوریتم های کلونی زنبور عسل و گرادیان نزولی مورد مقایسه قرار دادند [۱۷]. در سال ۲۰۱۴ ژوزه مانوئل و همکاران یک ابزار خودکار مبتنی بر الگوریتم ژنتیک را برای مدیریت تغییرات پیکربندی باند فرودگاه ارائه و اعتبارسنجی کردند. آن ها این کار را به منظور پشتیبانی از فرآیند پیچیده تصمیم گیری در مورد تغییرات پیکربندی باند با توجه به پارامترهای متعدد موثر بر آن از جمله تأخیرهای پرواز، مصرف سوخت، ایمنی و موارد دیگر انجام داده اند [۱۸]. اریک و همکاران در سال ۲۰۲۰ یک الگوریتم فراابتکاری جدید مبتنی بر اصول سیستم های عامل مبنا ارائه و این الگوریتم را با معیارهای مختلفی مورد ارزیابی قرار دادند [۱۹]. در سال ۲۰۲۴ محققان چندین الگوریتم فراابتکاری را برای تنظیم پارامترها و تحلیل اثربخشی استفاده از آن ها برای ۲ مدل عامل مبنا با پیچیدگی های مختلف استفاده کردند و مورد مقایسه قرار دادند [۱۳].

از طرفی تأخیر در پروازها هم یکی از مشکلات عمده در صنعت حمل و نقل هوایی است. مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است. بیشتر این مطالعات به مسائلی غیر از هواپیماهای جایگزین که در زمان خرابی هواپیماهای اصلی، به جای آن ها پرواز را انجام می دهند و تأثیر محل استقرار آن ها در کاهش زمان تأخیر پرواز

¹ System of systems

پرداخته اند. از جمله می توان به مطالعات در زمینه هایی مانند مقایسه تأخیر در پرواز ها در کشورهای مختلف [۲۰]، مقایسه وضعیت تأخیر در پروازهای ملی و بین المللی [۲۱]، بررسی انتشار تأخیر پرواز [۲۲] و [۲۳]، استفاده از یادگیری ماشین در پیش بینی و کنترل تأخیر پرواز [۲۴] و ارائه روش هایی برای کنترل و کاهش تأخیر پرواز [۲۵] اشاره کرد.

با توجه به مطالب گفته شده در مورد قابلیت های الگوریتم های فراابتکاری در حل بهینه سازی های پیچیده و همین طور پیچیدگی های سیستم حمل و نقل هوایی و بهینه سازی های این حوزه، در این تحقیق تصمیم گرفته شد که از الگوریتم زنبور عسل به عنوان یکی از الگوریتم های فراابتکاری معروف برای یافتن بهترین فرودگاه ها جهت استقرار هواپیماهای جایگزین استفاده شود. هدف اصلی از این تحقیق انجام یک تغییر ابتکاری در فرآیند جستجوی محلی الگوریتم زنبور عسل و ارزیابی نتایج آن در حل مسئله بهینه سازی پیچیده انتخاب بهترین محل های استقرار هواپیماهای جایگزین به منظور کاهش میانگین زمان تأخیر در پروازها هنگام خرابی هواپیماها بوده است و نتایج این تغییر در بخش های همگرایی الگوریتم، تکرارپذیری نتایج و میانگین تعداد تکرارها برای رسیدن به بهترین نتیجه مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی با توجه به قابلیت های بالای عامل های هوشمند در مدل سازی و شبیه سازی محیط های پیچیده و متغیر و دینامیک، در این تحقیق سعی شد که از این قابلیت ها در جهت مدل سازی شبکه حمل و نقل هوایی به همراه المان های اصلی آن از جمله هواپیما ها و فرودگاه ها به عنوان عامل های هوشمند اصلی به عنوان یکی دیگر از اهداف استفاده شود. برای مدل سازی و شبیه سازی هم از نرم افزار شبیه سازی Anylogic استفاده شده است که قابلیت های بسیار بالایی در مدل سازی و شبیه سازی های عامل مینا دارد. از طرفی برای کدنویسی هم از زبان برنامه نویسی جاوا استفاده شد که هم امکان ایجاد انواع عامل ها و حرکت و تعامل آن ها با دیگر عامل ها را در محیط شبیه سازی فراهم کرد و هم قابلیت اضافه کردن الگوریتم فراابتکاری زنبور عسل به نرم افزار و اجرای آن را در جهت دستیابی به هدف اصلی تحقیق ایجاد کرد.

بنابراین نوآوری اصلی این تحقیق، انجام یک تغییر ابتکاری و ارزیابی نتایج آن در ارتقاء عملکرد الگوریتم فراابتکاری زنبور عسل در مسئله یافتن بهترین فرودگاه ها برای استقرار هواپیماهای جایگزین بوده است. از طرفی در این پژوهش تا آنجایی که اینجانب اطلاع دارم، برای اولین بار از مدل سازی عامل مینا در ترکیب با الگوریتم فراابتکاری زنبور عسل در نرم افزار Anylogic به منظور بهینه سازی استفاده شده است. روش مورد استفاده برای این منظور، برای سایر الگوریتم های فراابتکاری هم قابل استفاده است. از سوی دیگر، کدنویسی به زبان برنامه نویسی جاوا طوری انجام شده است که محدودیت حداکثر ۵۰۰ تکرار که در ابزار بهینه سازی اصلی نرم افزار Anylogic وجود دارد نیز حذف شده است.

۲. مواد و روش کار

۲-۱. محیط شبیه سازی و داده های مورد استفاده

در این تحقیق از نقشه GIS^۱ ای خود نرم افزار Anylogic به عنوان محیط شبیه سازی استفاده شد. با اولین ارتباط با اینترنت اطلاعات شهرهای مختلف و موقعیت آن ها برای همه کشورها در دسترس خواهد بود. بنابراین از این طریق نقشه کشور ایران به عنوان محیط شبیه سازی همراه با موقعیت همه شهرها در دسترس قرار گرفت. بنابراین کدنویسی ها در نرم افزار طوری انجام گرفت که هر یک از عامل ها با توجه به پایگاه داده^۲

^۱ Geospatial Information System

^۲ DataBase

مرتبط با خود، هنگام شروع شبیه سازی در محیط شبیه سازی ایجاد شده و به تعامل با محیط و یا سایر عامل ها بپردازد. به عنوان مثال با توجه به اسامی شهرها در پایگاه داده نرم افزار، فرودگاه ها در محل آن شهرها در محیط شبیه سازی ایجاد شوند و یا هواپیماها هنگام شروع شبیه سازی در فرودگاه شهر مبدأ در محیط شبیه سازی مستقر شده و در حین شبیه سازی و بر اساس برنامه زمان بندی وارد شده در پایگاه داده، از شهر مبدأ به شهر مقصد با سرعت مشخصی حرکت کنند. از طرفی از داده های پروازی شرکت هواپیمایی قشم ایر به عنوان داده واقعی استفاده شد. شکل ۱ محیط شبیه سازی را نشان می دهد.



شکل ۱. محیط شبیه سازی

۲-۲. عامل ها

با توجه به هدف ذکر شده در بخش قبل، در این تحقیق، یک شبیه سازی و مدل سازی عامل مبنا از سیستم حمل و نقل هوایی شامل ۴ عامل هوشمند انجام شد. عامل های در نظر گرفته شده عبارتند از :

- ۱ - عامل اصلی به عنوان مرکز کنترل و جمع آوری اطلاعات سیستم حمل و نقل هوایی
- ۲ - عامل فرودگاه ها
- ۳ - عامل هواپیماهای اصلی
- ۴ - عامل هواپیماهای جایگزین

۲-۲-۱. نحوه تعامل عامل ها با هم در محیط شبیه سازی

عامل اصلی به عنوان یک عامل سطح بالا، امکان ارتباط با همه عامل ها را دارد و همین طور می تواند توابعی را برای عامل های مختلف در لحظه شروع شبیه سازی و یا در حین شبیه سازی اجرا و محاسباتی را انجام دهد. به عنوان مثال می تواند نزدیکترین هواپیمای جایگزین را برای هر یک از فرودگاه ها به عنوان هواپیمای جایگزین اختصاصی آن فرودگاه در لحظه شروع شبیه سازی و یا در صورت نیاز در حین شبیه سازی مشخص کند. از طرفی امکان دسترسی به اطلاعات لحظه ای شبیه سازی را فراهم می کند. نحوه تعامل عامل ها به این صورت است که همان طور که در بخش ۲-۱ هم بیان شد، به محض شروع شبیه سازی، با توجه به نام شهرهای موجود

در پایگاه داده عامل های فرودگاه و هواپیمای اصلی و جایگزین، این عامل ها در محیط شبیه سازی در محل شهر مورد نظر بر روی نقشه مستقر می شوند. بنابراین در لحظه شروع شبیه سازی، هواپیمای اصلی در فرودگاه شهر مبدا خود با توجه به پایگاه داده قرار گرفته و بر اساس زمان پروازهای خود در هفته به سمت مقصد حرکت کرده و پس از رسیدن به مقصد دوباره به مبدا بر می گردند. بخشی از این داده های موجود در پایگاه داده مربوط به هواپیمای اصلی در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. بخشی از داده های وارد شده در پایگاه داده

مبدا	مقصد	تعداد پرواز	زمان اولین پرواز در هفته (ساعت)	زمان دومین پرواز در هفته (ساعت)	زمان سومین پرواز در هفته (ساعت)	زمان چهارمین پرواز در هفته (ساعت)	زمان پنجمین پرواز در هفته (ساعت)	زمان ششمین پرواز در هفته (ساعت)
مشهد	زاهدان	۲	۳۷/۶۶۷	۱۳۹/۵				
گرگان	تهران	۵	۴۲/۷۵	۶۸/۹۱۷	۸۷/۲۵	۱۱۶/۵	۱۶۴/۷۵	
تهران	شیراز	۴	۴/۷۵	۳۸/۸۳۳	۶۳/۰۸۳	۱۱۰/۸۳۳		
تهران	گرگان	۴	۳۵/۳۳۳	۶۷/۱۶۷	۷۹/۵	۱۱۴/۷۵		
بوشهر	تهران	۶	۲۱/۸۳۳	۴۶/۱۶۷	۶۱/۲۵	۹۲/۰۸۳	۱۱۷/۷۵	۱۳۶/۸۳۳

در ابتدای هر پرواز هواپیمای اصلی با اجرای تابعی یک پرواز به پروازهای انجام شده فرودگاه مبدا خود اضافه می کنند. بنابراین پس از شروع شبیه سازی تعداد پروازهای انجام شده از مبدا همه فرودگاه ها به مرور زمان زیاد شده و با توجه به درصد خرابی هواپیماها که در این تحقیق ۲ درصد در نظر گرفته شده است، فرودگاه ها با ارسال پیامی به هواپیمای جایگزین اختصاصی خود، آن را برای انجام خدمت و پرواز جایگزین فرا می خوانند. هواپیمای جایگزین هم بلافاصله بعد از دریافت پیام، به سمت فرودگاه درخواست کننده حرکت کرده و پس از رسیدن به آن، به سمت مقصد پرواز کنسل شده به دلیل خرابی هواپیما حرکت کرده و پس از رسیدن به مقصد دوباره به سمت فرودگاه مبدا و محل استقرار خود باز می گردد و منتظر پیام بعدی از فرودگاه دیگری می ماند. سرعت حرکت همه هواپیمای اصلی و جایگزین هم در محیط شبیه سازی ثابت و یکسان در نظر گرفته شده است.

تعداد فرودگاه ها در این تحقیق ۱۸ فرودگاه با توجه به تعداد فرودگاه های مورد استفاده شرکت هواپیمایی قشم ایر شامل فرودگاه های تهران، مشهد، اصفهان، شیراز، زاهدان، تبریز، قشم، کیش، گرگان، ارومیه، زابل، اهواز، آبادان، بندرعباس، بوشهر، چابهار، لار و کرمانشاه و تعداد هواپیمای جایگزین ۶ هواپیما در نظر گرفته شده است. بنابراین به عنوان مثال در یکی از شبیه سازی ها ۶ هواپیمای جایگزین در فرودگاه های اصفهان، مشهد، بوشهر، کیش، زاهدان و اهواز مستقر شده و پس از اجرای کامل شبیه سازی، میانگین زمان پرواز هواپیمای جایگزین مستقر در این ۶ شهر به فرودگاه های درخواست کننده هواپیمای جایگزین به دست می آید. مشخص است که این میانگین با استقرار ۶ هواپیمای جایگزین در شهرهایی متفاوت از شهرهای قبلی، تغییر می کند. هدف در واقع یافتن بهترین فرودگاه ها جهت استقرار هواپیمای جایگزین برای به حداقل رسیدن میانگین زمان پرواز هواپیمای جایگزین به فرودگاه های درخواست کننده در کل مدت شبیه سازی و بنابراین کاهش زمان تأخیر در پروازهاست. از طرفی مشخص است که با یک مسأله با متغیرهای از نوع گسسته یعنی شهرهای محل قرارگیری هواپیمای جایگزین مواجه هستیم. بنابراین اینجاست که با توجه به تعداد بالای حالت

های ممکن قرارگیری ۶ هواپیمای جایگزین در ۱۸ فرودگاه مورد استفاده شرکت هواپیمایی، یک الگوریتم زنبور عسل مختص این مسئله با پارامترهای گسسته وارد عمل شده و با سرعت بسیار بالا شبیه سازی ها را اجرا و بهترین شهرها را برای استقرار هواپیماهای جایگزین به دست می آورد. از طرفی امکان دستیابی به هدف اصلی تحقیق یعنی ارزیابی الگوریتم زنبور عسل با مکانیزم جستجوی محلی بهبودیافته هم فراهم می شود.

۳-۲. الگوریتم زنبور عسل

همان طور که در بخش ۱ گفته شد، هدف اصلی از این تحقیق انجام یک تغییر ابتکاری در فرآیند جستجوی محلی الگوریتم زنبور عسل و ارزیابی نتایج آن در حل مسئله بهینه سازی پیچیده انتخاب بهترین محل های استقرار هواپیماهای جایگزین به منظور کاهش میانگین زمان تأخیر در پروازها هنگام خرابی هواپیماهاست. از طرفی در بخش ۲-۲-۱ بیان شد که در این تحقیق تعداد هواپیماهای پشتیبان که همان تعداد متغیرهای مسئله هم هست، ۶ و تعداد شهرهایی که امکان استقرار هواپیماهای جایگزین در فرودگاه های آن ها وجود دارد هم ۱۸ در نظر گرفته شده و متغیرهای مسئله هم از نوع گسسته است. بنابراین برای حل مسئله رشته یا کروموزومی با ۶ ژن در نظر گرفته شد که هر یک از ژن ها می تواند اعداد حقیقی بین ۰ تا ۱۷ را متناسب با شهرهای مورد اشاره به خود اختصاص دهد. در این تحقیق تعداد جمعیت اولیه زنبورها ۵۰ و از این بین تعداد زنبورهای برتر و با تابع هدف بهتر ۲۵ در نظر گرفته شده است. زنبورهای برتر با مرتب سازی جمعیت زنبورها بر اساس کمترین تابع هدف به دست می آید. تابع هدف هر کروموزوم یا زنبور هم همان میانگین زمان رسیدن هواپیماهای جایگزین مستقر در شهرهای آن کروموزوم به فرودگاه های درخواست کننده هواپیمای جایگزین است که با اجرای شبیه سازی به دست می آید. از ۲۵ زنبور برتر، ۱۵ زنبور با بهترین تابع هدف و یا در واقع تابع هدف کمتر به عنوان زنبورهای منتخب برتر و ۱۰ زنبور دیگر به عنوان زنبورهای باقیمانده برتر در نظر گرفته شده است و جستجوی محلی پیرامون آن ها با شعاع همسایگی ۳ انجام می شود. بنابراین ۵۰ کروموزوم در شروع الگوریتم مورد استفاده قرار می گیرد که ژن های هر کدام از این کروموزوم ها اعدادی بین ۰ تا ۱۷ هستند. تعداد زنبورهای جستجوگر محلی در همسایگی زنبورهای برتر منتخب ۳ و تعداد زنبورهای جستجوگر محلی در همسایگی زنبورهای باقیمانده برتر هم ۲ در نظر گرفته شده است. ۲۵ زنبور باقیمانده با تابع هدف بیشتر و در واقع دارای منابع غذایی با کیفیت کمتر هم، حذف شده و به صورت تصادفی کروموزوم هایی جایگزین آن ها خواهد شد تا بخش جستجوی سراسری الگوریتم را پوشش دهد. در هر تکرار از اجرای الگوریتم زنبور عسل که با کدنویسی به زبان جاوا به نرم افزار Anylogic اضافه شده است، برای هر یک از کروموزوم های جمعیت، متناسب با اعداد هر یک از ۶ ژن آن کروموزوم، نام شهر مربوطه در پایگاه داده عامل های هواپیماهای جایگزین قرار می گیرد. بنابراین ۶ هواپیمای جایگزین در فرودگاه ۶ شهر محل استقرار خود قرار گرفته و شبیه سازی با بالاترین سرعت با مکانیزم توضیح داده شده در بخش ۲-۲-۱ اجرا شده و تابع هدف آن به دست می آید. این کار برای همه کروموزوم ها به سرعت انجام شده و بنابراین تابع هدف همه آن ها به دست می آید. بنابراین با توجه به محاسبه تابع هدف همه زنبورها، زنبورهای برتر منتخب و باقیمانده به روزرسانی خواهند شد. این مراحل به تعداد در نظر گرفته شده برای اجرای الگوریتم تکرار خواهد شد.

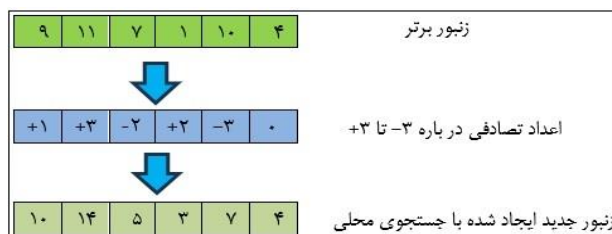
۳-۲-۱. نحوه انجام جستجوی محلی الگوریتم زنبور عسل

پس از انتخاب زنبورها یا کروموزوم های برتر منتخب و باقیمانده، نحوه انجام جستجوی محلی پیرامون هر یک از آن ها برای رسیدن به منابع غذایی بهتر و در واقع نحوه به روزرسانی اعداد هر یک از ژن های کروموزوم های برتر از طریق رابطه ۱ خواهد بود.

$$N_{ij} = n_{ij} + a \quad (1)$$

که در آن N_{ij} عدد اختصاصی ژن i از کروموزوم یا زنبور برتر i ام پس از جستجوی محلی، n_{ij} عدد اختصاصی ژن i از کروموزوم یا زنبور برتر i ام قبل از جستجوی محلی و a یک عدد تصادفی حقیقی در بازه شعاع همسایگی می باشد.

در واقع هنگام جستجوی محلی یا همسایگی پیرامون کروموزوم ها یا زنبورهای برتر، ابتدا عدد هر یک از ژن های این کروموزوم ها مشخص می شود. سپس با توجه به گسسته بودن متغیرهای مسئله و همین طور با توجه به شعاع همسایگی که ۳ در نظر گرفته شده است، به هر عدد، عدد حقیقی تصادفی در بازه ۳- تا ۳+ اضافه می شود. بنابراین ژن های هر یک از این کروموزوم ها تغییر و در واقع کروموزوم یا زنبور جدیدی ایجاد می گردد. این کار با توجه به توضیحات داده شده در بخش ۲-۳، ۳ مرتبه برای ۱۵ زنبور منتخب برتر و ۲ مرتبه برای ۱۰ زنبور باقیمانده برتر انجام می شود. نحوه انجام جستجوی محلی برای هر یک از ۲۵ زنبور برتر در شکل شماره ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نحوه انجام جستجوی محلی برای هر یک از زنبورهای برتر

بنابراین برای هر یک از زنبورهای برتر منتخب ۳ زنبور و برای هر یک از ۱۰ زنبور باقیمانده برتر ۲ زنبور جدید با مکانیزم گفته شده برای جستجوی محلی منابع غذایی با کیفیت ایجاد می گردد. سپس در هر تکرار تابع هدف این زنبورهای جدید محاسبه می شود. در ادامه اگر تابع هدف هر یک از ۳ زنبور به دست آمده برای زنبورهای منتخب برتر با استفاده از مکانیزم جستجوی محلی، از تابع هدف خود زنبور منتخب بهتر و در واقع عدد کمتری باشد، آن زنبور جایگزین زنبور منتخب قبلی خواهد شد. در غیر این صورت، ۳ زنبور حذف خواهند شد. این روند برای هر یک از ۲ زنبور به دست آمده برای زنبورهای برتر باقیمانده هم انجام می شود. ذکر این نکته ضروریست که ممکن است پس از روند جستجوی محلی، به هر یک از ژن های کروموزوم ها اعداد کمتر از ۰ و یا بیشتر از ۱۷ اختصاص داده شود که در محدوده فضای جستجوی متغیرهای مسئله قرار ندارد. بنابراین برای رفع این مشکل در نظر گرفته شد که در صورتی که در مرحله جستجوی محلی برای هر یک از ژن ها اعداد ۳-، ۲-، ۱-، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ به دست آید، به ترتیب با اعداد ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۰، ۱ و ۲ جایگزین شود.

۲-۳-۲. جستجوی محلی پیشنهادی برای بهبود عملکرد الگوریتم زنبور عسل

روش ابتکاری و پیشنهادی برای جستجوی محلی پیرامون زنبورهای برتر و در واقع نحوه به روز رسانی اعداد هر یک از ژن های کروموزوم های برتر از طریق رابطه ۲ خواهد بود.

$$N_{ij} = N_{(i+a)j} \quad (2)$$

که در آن N_{ij} عدد اختصاصی ژن j ام از کروموزوم یا زنبور برتر i ام پس از جستجوی محلی، $N_{(i+a)j}$ عدد اختصاصی ژن j ام از کروموزوم یا زنبور برتر $(i + a)$ ام و a یک عدد تصادفی حقیقی در بازه شعاع همسایگی می باشد.

در واقع هدف این است که جستجوی همسایگی بر اساس ژن های هر کروموزوم و با اضافه کردن یک عدد حقیقی تصادفی در بازه شعاع همسایگی به عدد اختصاصی هر ژن انجام نشود. بلکه به جای آن ابتدا در هر تکرار، کروموزوم ها بر اساس مقدار تابع هدف مرتب شوند. در ادامه برای هر یک از ژن های کروموزوم برتری که قرار است جستجوی محلی پیرامون آن انجام شود، یک عدد حقیقی تصادفی در بازه شعاع همسایگی که در اینجا ۳ است ایجاد شود. سپس عدد اختصاصی آن ژن با عدد اختصاصی ژن متناظر کروموزومی که دارای فاصله ای برابر با عدد تصادفی به دست آمده در جمعیت مرتب شده با کروموزوم مورد نظر است، تعویض گردد. اگر عدد حقیقی تصادفی منفی شد، از کروموزوم های قبلی و با فاصله ای برابر با عدد حقیقی به دست آمده با کروموزوم مورد نظر و اگر عدد مثبت شد، از کروموزوم های بعدی برای تعویض عدد اختصاصی هر ژن استفاده می شود. این روش باعث می شود که دیگر اعداد خارج از فضای جستجو که بازه اعداد حقیقی بین ۰ تا ۱۷ است هم، در روند تغییر اعداد هر یک از ژن های کروموزوم های برتر با استفاده از مکانیزم جستجوی محلی بر خلاف روش قبلی ایجاد نشود که خود یک مزیت است. شکل ۳، نحوه تغییر اعداد ژن های زنبورهای برتر را به عنوان مثال برای زنبور برتر هشتم در جستجوی محلی پیشنهادی نشان می دهد.

۷	۱۲	۵	۱۴	۸	۲	زنبور پنجم
۹	۳	۸	۱۰	۰	۴	زنبور ششم
۱۱	۴	۱	۶	۵	۱۶	زنبور هفتم
۱۱	۳	۹	۲	۱۶	۰	زنبور برتر هشتم
۹	۸	۱۷	۶	۵	۱	زنبور نهم
۵	۱۶	۱۰	۴	۱۱	۳	زنبور دهم
۱۳	۰	۲	۹	۸	۱۲	زنبور یازدهم
↓						
+۳	-۲	۰	-۱	+۲	+۳	اعداد تصادفی در بازه ۳- تا ۳+
↓						
۱۳	۳	۹	۶	۱۱	۱۲	زنبور جدید ایجاد شده با جستجوی محلی پیشنهادی

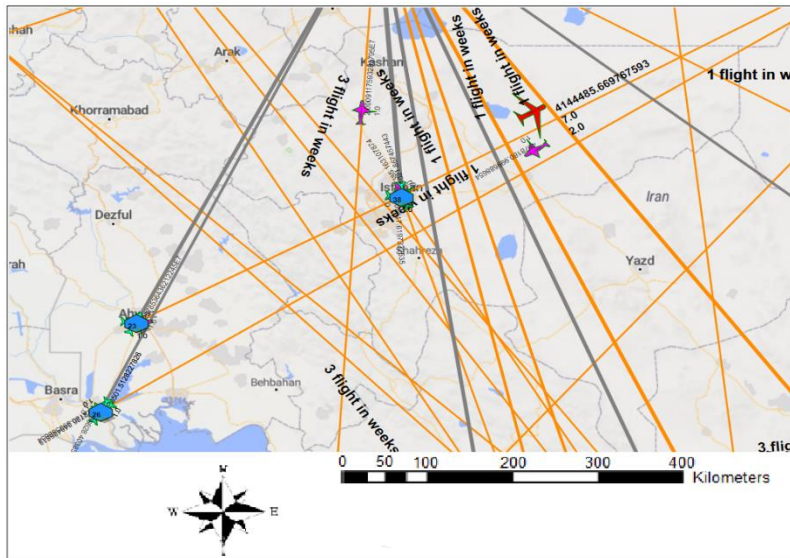
شکل ۳. نحوه انجام جستجوی محلی پیشنهادی برای هر یک از زنبورهای برتر

این کار برای همه کروموزوم ها یا در واقع زنبورهای برتر منتخب ۳ بار و برای زنبورهای برتر باقیمانده ۲ بار انجام می شود. در ادامه همانند قبل، اگر تابع هدف هر یک از ۳ زنبور به دست آمده برای زنبورهای منتخب برتر با استفاده از مکانیزم جستجوی محلی پیشنهادی، از تابع هدف خود زنبور برتر منتخب بهتر و در واقع عدد کمتری باشد، آن زنبور جایگزین زنبور منتخب قبلی خواهد شد. در غیر این صورت، ۳ زنبور حذف خواهند شد. این روند برای هر یک از ۲ زنبور به دست آمده برای زنبورهای برتر باقیمانده هم انجام می شود.

۳. نتایج به دست آمده از اجرای شبیه سازی و الگوریتم زنبور عسل

۳-۱. اجرای شبیه سازی

پس از اجرای شبیه سازی، همان طور که در بخش ۲-۱ بیان شد، عامل های فرودگاه، هواپیماهای اصلی و هواپیماهای جایگزین در محل های اولیه خود در محیط شبیه سازی با توجه به اطلاعات موجود در پایگاه داده قرار می گیرند. سپس با گذشت زمان که ۳ ماه در نظر گرفته شد، به فعالیت های خود در محیط شبیه سازی و تعامل با دیگر عامل ها می پردازند. شکل ۴ هر ۳ نوع عامل را در محیط شبیه سازی هنگام اجرای آن نشان می دهد.



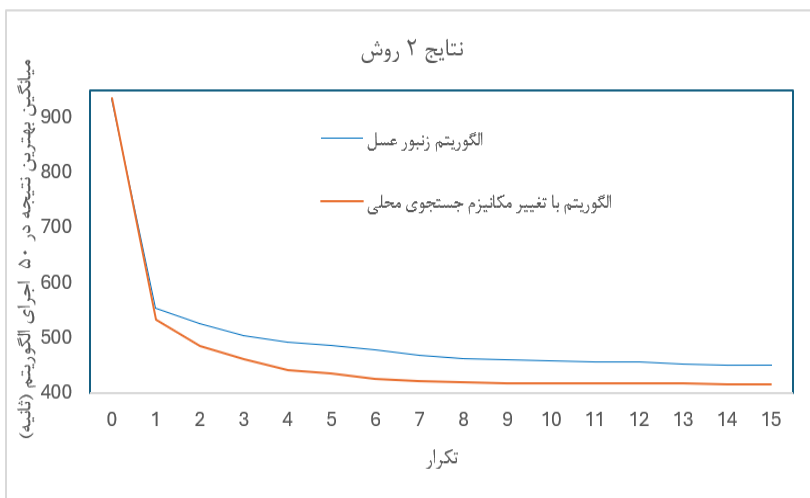
شکل ۴. عامل های فرودگاه و هواپیماهای اصلی و جایگزین در محیط شبیه سازی

با توجه به شکل، دو هواپیمای اصلی و یک هواپیمای جایگزین در حال حرکت به ترتیب با رنگ های صورتی و قرمز و فرودگاه های اصفهان، اهواز و آبادان با رنگ آبی در محیط شبیه سازی قابل مشاهده است.

۳-۲. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم زنبور عسل

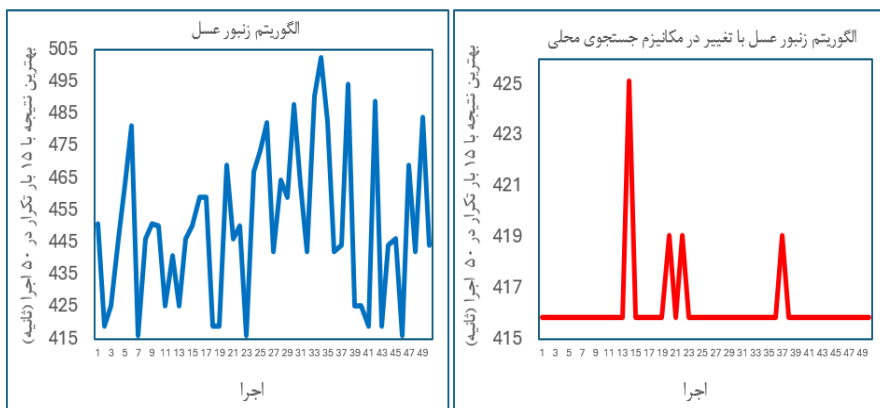
با توجه به ارائه پیشنهادی برای بهبود عملکرد الگوریتم زنبورها در بخش جستجوی محلی در تحقیق حاضر، تصمیم گرفته شد که در تمام اجراها و برای هر دو الگوریتم پیشنهادی و اصلاح شده و همین طور الگوریتم اولیه زنبور عسل، پارامترها به صورت یکسان مورد استفاده قرار گیرد تا عملکرد آن ها در شرایط یکسان مورد مقایسه قرار گیرد. این پارامترها همان طور که در بخش ۲-۳ هم به آن اشاره شد، شامل تعداد جمعیت زنبورها، تعداد زنبورهای برتر منتخب، تعداد زنبورهای برتر باقیمانده، تعداد زنبورهای جستجوگر محلی در همسایگی زنبورهای برتر منتخب، تعداد زنبورهای جستجوگر محلی در همسایگی زنبورهای برتر باقیمانده و همین طور شعاع همسایگی است که به ترتیب ۵۰، ۱۵، ۱۰، ۳، ۲ و ۳ در نظر گرفته شده است. از طرفی کیفیت زنبورهای موجود در جمعیت اولیه زنبورها هم در همه اجراها برای دو الگوریتم اولیه و الگوریتم پیشنهادی یکسان در نظر گرفته شد تا در مورد نتایج عملکرد آن ها مقایسه بهتری صورت گیرد. از طرفی هر دو الگوریتم ۵۰ بار با مکانیزم توضیح داده شده در بخش ۲-۳ اجرا گردید و در هر اجرا ۱۵ تکرار به عنوان حداکثر تعداد تکرار در نظر گرفته شد و نتایج عملکرد آن ها در بخش های همگرایی الگوریتم، تکرارپذیری نتایج و تعداد تکرارها برای رسیدن به

بهترین نتیجه مورد بررسی قرار گرفت. شکل های ۵، ۶ و ۷ نتایج اجرای دو الگوریتم را در هر ۳ بخش نشان می دهد.



شکل ۵. روند همگرایی دو الگوریتم

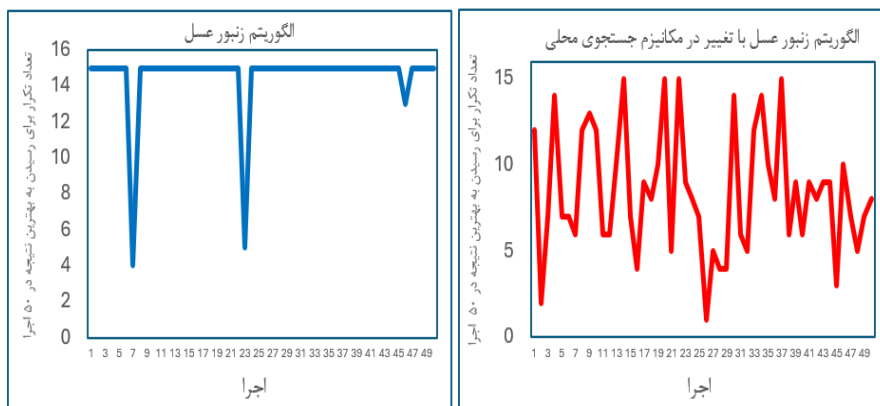
در بخش روند همگرایی الگوریتم، برای بهتر مقایسه شدن دو الگوریتم، میانگین بهترین نتایج به دست آمده در هر یک از تکرارهای ۱ ام تا ۱۵ ام در ۵۰ اجرای انجام شده، به عنوان به بهترین نتیجه آن تکرار برای ترسیم نمودار روند همگرایی دو الگوریتم استفاده شده است. همان طور که در شکل ۵ مشخص است، تغییر در مکانیزم جستجوی محلی الگوریتم، روند همگرایی الگوریتم را نسبت به الگوریتم اولیه بهبود داده است.



شکل ۶. تکرار پذیری نتایج دو الگوریتم در ۵۰ اجرا

با توجه به شکل ۶ مشخص است که تکرارپذیری نتایج با تغییر مکانیزم جستجوی محلی الگوریتم زنبور عسل به طرز قابل توجهی بهبود پیدا کرده است. در واقع مشخص است که در الگوریتم بهبودیافته، در همه ۵۰

اجرا به غیر از ۴ اجرا پس از ۱۵ بار تکرار جواب بهینه به دست آمده است، اما در الگوریتم اولیه تقریباً با شرایط معکوسی به غیر از ۳ اجرا در سایر اجراها الگوریتم به جواب بهینه نرسیده است. از طرفی بازه نتایج به دست آمده برای الگوریتم بهبودیافته هم به مراتب کمتر از الگوریتم اولیه است که نشان دهنده عملکرد به مراتب بهتر الگوریتم پیشنهادی است.



شکل ۷. تعداد تکرارها در دو الگوریتم برای رسیدن به بهترین نتیجه در ۵۰ اجرا

در این بخش هم با توجه به شکل ۷ کاملاً مشخص است که وضعیت الگوریتم پیشنهادی و بهبودیافته، به طرز قابل توجهی بهتر از الگوریتم اولیه است و در همه اجراها غیر از ۴ اجرا در کمتر از ۱۵ تکرار و با میانگین $8/4$ تکرار به بهترین جواب خود دست پیدا کرده است. از طرفی با توجه به شکل ۶ مشخص است که در همه نتایج غیر از همان ۴ اجرا، بهترین جواب به دست آمده جواب بهینه یعنی عدد $415/85$ ثانیه بوده است. البته لحاظ کردن عدد $415/85$ ثانیه به عنوان جواب بهینه به این دلیل است که در هیچ یک از مجموعاً ۱۰۰ اجرای انجام شده برای ۲ الگوریتم عدد کمتر از این مقدار به دست نیامد. اما الگوریتم اولیه در بیشتر اجراها غیر از ۳ اجرا در ۱۵ امین تکرار و با میانگین $14/54$ تکرار به بهترین جواب خود رسیده است. با توجه به شکل ۶ مشخص است که در همه نتایج غیر از همان ۳ اجرا، بهترین جواب به دست آمده جواب بهینه یعنی عدد $415/85$ ثانیه نبوده است. بنابراین مشخص است که با افزایش حداکثر تعداد تکرارها به بیشتر از ۱۵ تکرار و همین طور مبنا قرار دادن رسیدن به عدد بهینه $415/85$ ثانیه به عنوان بهترین نتیجه، به طور قطع نتایج الگوریتم اولیه در معیار میانگین تعداد تکرارها برای رسیدن به بهترین نتیجه از نتایج این تحقیق هم بدتر می شود. در نهایت هم با استفاده از الگوریتم بهبود یافته زنبور عسل و در یک شبیه سازی ۱ ساله، بهترین فرودگاه ها برای استقرار هواپیماهای جایگزین با توجه به برنامه پروازی شرکت هواپیمایی، فرودگاه های تهران، مشهد، قشم، شیراز، زاهدان و اهواز با میانگین زمان تأخیر $615/42$ ثانیه به دست آمد.

۳-۱-۲-۳. بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در مسائل دیگر

به منظور اطمینان بیشتر از ارتقاء عملکرد الگوریتم زنبور عسل بهبود یافته با تغییر ابتکاری در مکانیزم جستجوی محلی آن، در این قسمت تصمیم گرفته شد که عملکرد آن در برخی از مسائل معیار و معروف هم مورد سنجش قرار گیرد. با توجه به اینکه متغیرهای مسئله پرداخته شده در مقاله از نوع گسسته است، دو مورد

از مسائل معیار ریاضیاتی با متغیرهای گسسته یعنی مسئله فروشنده دوره گرد و همین طور مسئله معروف کوله پشتی برای این منظور انتخاب گردید.

- مسئله فروشنده دوره گرد: همان طور که در بخش ۲-۲-۱ هم بیان شد، در این تحقیق هدف ما یافتن ۶ شهر از بین ۱۸ شهر تهران، مشهد، اصفهان، شیراز، زاهدان، تبریز، قشم، کیش، گرگان، ارومیه، زابل، اهواز، آبادان، بندرعباس، بوشهر، چابهار، لار و کرمانشاه برای استقرار هواپیماهای جایگزین به منظور به حداقل رساندن تأخیرهای پرواز بود. در اینجا و در مسئله فروشنده دوره گرد هدف یافتن کوتاه ترین مسیر قرار داده شد که فروشنده دوره گرد از کرمان شروع به سفر نماید و از هریک از ۱۸ شهر یک بار عبور کرده و دوباره به کرمان بازگردد.

- مسئله کوله پشتی: در مورد این مسئله، برای هر یک از ۱۸ شهر مذکور یک وزن از ۱ تا ۱۸ و همین طور یک جمعیت فرضی در نظر گرفته شد. در ادامه هدف مسئله یافتن ۶ شهر از بین این ۱۸ شهر با مجموع وزن های کمتر از ۶۰ و با بیشترین مجموع جمعیت قرار داده شد. در مورد هر دو مسئله به صورت جداگانه، ۲ الگوریتم اولیه زنبور عسل و الگوریتم زنبور عسل پیشنهادی ۱۰ مرتبه با جمعیت اولیه یکسان و هر بار با ۱۵ تکرار اجرا گردید. نتایج آن در جدول شماره ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲. نتایج به دست آمده ۲ الگوریتم برای مسائل دیگر

مسئله	هدف مسئله	الگوریتم	تعداد جمعیت اولیه	تعداد اجرا	تعداد تکرار در هر اجرا	میانگین بهترین تابع هدف به دست آمده از ۱۰ اجرا	میانگین بهترین تابع هدف به دست آمده از ۱۰ مرتبه اجرا (ثابته)	میانگین زمان اجرای الگوریتم
فروشنده دوره گرد	یافتن کمترین فاصله طی شده (شروع از کرمان، عبور از هر یک از ۱۸ شهر و بازگشت به کرمان)	الگوریتم زنبور عسل پیشنهادی	۵۰	۱۰	۱۵	۱۰۲۷۶۲۹۵/۵۲۹ متر	۹۲۷۱۶۷۲/۷۷۹ متر	۱۸۴/۹۲۹
		الگوریتم زنبور عسل اولیه	۵۰	۱۰	۱۵	۱۰۹۴۹۹۱۱/۰۰۸ متر	۱۰۳۱۱۶۰۰/۳۸۱ متر	۱۸۴/۳۲۰
کوله پشتی	یافتن ۶ شهر با بیشترین مجموع جمعیت (البته با مجموع وزن کمتر از ۶۰)	الگوریتم زنبور عسل پیشنهادی	۵۰	۱۰	۱۵	۶۸۳۰۰	۶۸۳۰۰	۱۹۰/۴۷۷
		الگوریتم زنبور عسل اولیه	۵۰	۱۰	۱۵	۶۶۲۷۰	۶۸۳۰۰	۱۹۰/۷۷۷

همان طور که مشخص است، در مورد مسئله فروشنده دوره گرد الگوریتم پیشنهادی برتری محسوسی نسبت به الگوریتم قبلی با زمان اجرای تقریباً مشابه دارد و به فواصل کمتری رسیده است. در مورد مسئله کوله پشتی هم همین وضعیت وجود دارد و در همه ۱۰ اجرا به عدد ۶۸۳۰۰ (احتمالاً جواب بهینه) رسیده است.

اما به منظور مقایسه بهتر قدرت و زمان محاسباتی دو الگوریتم، تصمیم گرفته شد که با در نظر گرفتن یک شرط مرزی دلخواه به عنوان هدف، عملکرد دو الگوریتم مورد مقایسه قرار گیرد. برای این منظور همان مسأله کوله پستی در نظر گرفته شد. هدف رسیدن الگوریتم به جواب یا همان مجموع جمعیت بالای ۶۶۰۰۰ (البته با مجموع وزن کمتر از ۶۰) قرار داده شد. نتایج در جدول شماره ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳. مقایسه قدرت و زمان محاسباتی ۲ الگوریتم

الگوریتم	تعداد جمعیت اولیه	تعداد اجرا	کمترین تعداد تکرار از بین ۱۰ اجرا برای رسیدن به هدف	بیشترین تعداد تکرار از بین ۱۰ اجرا برای رسیدن به هدف	میانگین تعداد تکرارها در ۱۰ اجرا برای رسیدن به هدف	میانگین زمان اجرای الگوریتم در ۱۰ مرتبه اجرا (ثانیه)
الگوریتم پیشنهادی	۵۰	۱۰	۲	۶	۳/۶	۴۴/۲۵۶
الگوریتم اولیه	۵۰	۱۰	۴	۴۷	۱۵/۱	۱۸۴/۵۴۵

در اینجا هم هر دو الگوریتم برای رسیدن به هدف ۱۰ مرتبه با جمعیت اولیه یکسان اجرا شده است. همان طور که مشخص است در مورد قدرت و زمان محاسباتی، الگوریتم پیشنهادی برتری بسیار قابل توجهی نسبت به الگوریتم قبلی نشان داده است و در تعداد تکرارها و در نتیجه زمان بسیار کمتری به جواب رسیده است.

۴. نتیجه گیری

همان طور که در بخش ۱ به آن اشاره شد، هدف اصلی از این تحقیق انجام یک تغییر ابتکاری در فرآیند جستجوی محلی الگوریتم زنبور عسل و ارزیابی نتایج آن در حل مسأله بهینه سازی پیچیده انتخاب بهترین محل های استقرار هواپیماهای جایگزین به منظور کاهش زمان تأخیر در پروازها و بررسی نتایج آن بوده است. از طرفی استفاده از قابلیت های مدل سازی عامل مبنا در جهت شبیه سازی شبکه حمل و نقل هوایی هم یکی دیگر از اهداف تحقیق بود. در مورد هدف اصلی تحقیق با توجه به اطلاعات داده شده در بخش ۳-۲، الگوریتم فراابتکاری زنبور عسل با تغییر پیشنهادی در بخش جستجوی محلی، در همه معیارها از جمله روند همگرایی، تکرارپذیری نتایج و میانگین تعداد تکرارها برای رسیدن به بهترین نتیجه بهبود قابل توجهی را نسبت به الگوریتم اولیه نشان داده است. البته الگوریتم بهبود یافته پیشنهادی، برای مسائل معیار و معروف فروشنده دوره گرد و کوله پستی هم مورد استفاده قرار گرفت که ارتقاء عملکرد قابل توجهی را خصوصا در بخش قدرت و زمان محاسباتی نشان داد. هدف دوم هم به خوبی محقق شد و در بخش ۳-۱ مشخص است که عامل ها ایجاد شده و در محیط شبیه سازی در حال حرکت و تعامل با محیط هستند.

با توجه به تجربیات به دست آمده از این تحقیق می توان گفت ترکیب شبیه سازی و مدل سازی عامل مبنا و الگوریتم های فراابتکاری، می تواند برای حل بسیاری از مسائل و بهینه سازی ها خصوصا در محیط های پیچیده و دینامیک از جمله حمل و نقل هوایی مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه پیشنهاداتی برای آینده مطرح می گردد: - در این تحقیق یکی از الگوریتم های فراابتکاری یعنی الگوریتم زنبور عسل مورد استفاده قرار گرفت و یک بهبود و تغییری هم در بخشی از آن صورت گرفت. می توان الگوریتم های دیگری نظیر الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات و یا مورچگان را هم استفاده و نتایج آن ها را با هم مقایسه کرد.

- یکی دیگر از پیشنهادات انجام مکان یابی محل استقرار هواپیماهای جایگزین نه فقط در بین فرودگاه های مورد استفاده شرکت هواپیمایی، بلکه در بین تعداد بیشتری از فرودگاه های کشور است. از طرفی در صورت دسترسی به داده های کل شبکه حمل و نقل هوایی کشور و هماهنگی همه شرکت های هواپیمایی، می توان سامانه ای برای کل شبکه حمل و نقل هوایی در جهت کاهش زمان تأخیر در پروازها هنگام خرابی هواپیماها طراحی و پیاده سازی کرد.

فهرست منابع

- [۱] Feigh, K. M., Pritchett, A. R., Shah, A. P., Kalaver, S. A., Jadhav, A., Holl, D. M., & Bea, R. C. G., A. Z. (2005). *Analyzing Air Traffic Management Systems Using Agent-based Modeling and Simulation* Proceedings of the 6th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Baltimore, Maryland . <http://hdl.handle.net/1853/24616>.
- [۲] Grether, D., Furbas, S. & Nagel, K. (2013). *Agent-based Modelling of Air Transport Technology*. Procedia Computer Science (ELSEVIER), 19, 821-828 . <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.109>.
- [۳] Luis, P. R., Ana, P. R. & Antonio, J. M. C. (2018, January 16-18). *An Agent-based Electronic Market to Help Airlines to Recover from Delays* 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2018), Funchal, Madeira Portugal . <https://doi.org/10.5220/0006582401760183>.
- [۴] Akhondi, M., Mesgari, M. S. (2023). *Agent-based Modelling for Backup Aircraft Site Selection to Decrease Flight Delay Time (Case Study: Qeshm Airlines)*. Karafan Quarterly Scientific Journal, 20(1), 453-476 . <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.334125.2047>. (in Persian)
- [۵] Xiaoyu, M., Zhou, H., Pengfei, Y., Xiyang, L. & Wei, L. (2024). *Agent-based modelling and simulation for life-cycle airport flight planning and scheduling*. Journal of Simulation, 18(1), 15-26 . <https://doi.org/10.1080/17477778.2023.2169643>.
- [۶] Soufiane, B. H., A. P. B. & Richard, C. (2012, June). *Airport performance modeling using an agent based approach*. 3rd International Air Transport and Operations Symposium (ATOS2012), Delft, Netherlands . <https://www.researchgate.net/publication/255685727>.
- [۷] Sunidhi, T., Somesh, K. S., Raman, P. & Vikram, S. (2024). *Controlling aeroplane crashing through aviation infrastructure using multi-agent technology*. INTERNATIONAL JOURNAL OF CRASHWORTHINESS, 29(5), 935-955 . <https://doi.org/10.1080/13588265.2024.2328913>.
- [۸] Soufiane, B., Jasper, M. & Henk, B. (2018). *Evaluation of a Multi-Agent System approach to airline disruption management*. Journal of Air Transport Management, 71, 108-118 . <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2018.05.009>.
- [۹] Ehsan, E., Michael, W. G & Blake, R. (2019). *An agent-based model for improved system of systems decision making in air transportation*. Systems Engineering, 22(1), 20-42 . <https://doi.org/10.1002/sys.21465>.

- [۱۰] Sybert, H. S. & Mariken, H. C. E. (2017). *Agent-based modelling and mental Simulation for resilience engineering in air transport*. Safety Science, 93, 29-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2016.11.003>.
- [۱۱] Stef, J., Alexei, S. & Richard, C. (2019). *Agent-based modelling and analysis of security and efficiency in airport terminals*. Transportation Research Part C, 100, 142-160. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.012>.
- [۱۲] Milos, N., Jasenka, R. & Dusan, T. (2024). *Formulation of the airport collaborative gate allocation problem and the Bee Colony Optimization solution approach*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 128(C), Article 107433. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107433>.
- [۱۳] Andrei, I. V., Alexei, A. R. & Tatiana, E. S. (2024). *Parameter Tuning of Agent-Based Models: Metaheuristic Algorithms*. Mathematics, 12(14), Article 2208. <https://doi.org/10.3390/math12142208>.
- [۱۴] Mashayekhi, A., Karami, A. & Beygi, A. Z. (2023). *Position Optimization of a Redundant Haptic Device for Increasing the Simulating Virtual Damping Using Metaheuristic Methods based on Swarm Intelligence*. Karafan Quarterly Scientific Journal, 20(3), 265-285. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.404933.2618>. (in Persian)
- [۱۵] Sabzevari, K., Solymani, A. (2024). *Providing a Routing Method in Internet of Things for Better Load Distribution Using the Improved Gray Wolf Optimization Algorithm*. Karafan Quarterly Scientific Journal, 21(1), 129-151. <https://doi.org/10.48301/kssa.2024.421630.2740>. (in Persian)
- [۱۶] Ridvan, O., Tolga, B. (2024). *Cruise range modeling of different flight strategies for transport aircraft using genetic algorithms and particle swarm optimization*. Energy, 294, Article 130917. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130917>.
- [۱۷] Andreea, K., Oliviu, S. G., Joran, A., Guillaume, B., Gregoire, P., Ruxandra, M., & B., M., M. & Youssef, M. (2017). *Optimization and design of an aircraft's morphing wing-tip demonstrator for drag reduction at low speed, Part I – Aerodynamic optimization using genetic, bee colony and gradient descent algorithms*. Chinese Journal of Aeronautics, 30(1), 149-163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2016.12.013>.
- [۱۸] Jose, M. R. F., Mario, R. S., Jose, J. G. L. & Santiago, T. R. (2014). *Solving air transport contingencies by using genetic algorithms – RUCCMAN*. Transportation Research Procedia, 3, 249-258. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.004>.
- [۱۹] Erik, C., Jorge, G., Karla, A., Miguel, T. & Vahid, R. (2020). *A new metaheuristic approach based on agent systems principles*. Journal of Computational Science, 47, Article 101244. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2020.101244>.
- [۲۰] Yanjun, W., Hongfeng, Z., Fan, W., Jun, C. & Mark, H. (2020). *A Comparative Study on Flight Delay Networks of the USA and China*. Journal of Advanced Transportation, 2020, Article 1369591. <https://doi.org/10.1155/2020/1369591>.
- [۲۱] Kim, M. & Bae, J. (2021). *modeling the flight departure delay using survival analysis in South Korea*. Journal of Air Transport Management, 91, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101996>.
- [۲۲] Jiyeon, L. & Ilkyeong, M. (2023). *Flight rescheduling of an airline under the ground delay program considering delay propagation in multiple airports*.

Transportmetrica B: Transport Dynamics, 11(1), 1871-1892 .

<https://doi.org/10.1080/21680566.2023.2254939>.

- [۲۳] Haoyu, Z., Weiwei, W., Yu, J. & Xinyuan, C. (2024). *Flight delay propagation in the multiplex network system of airline networks* . Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 648, Article 129883 .

<https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129883>.

- [۲۴] Truong, D. (2021). *Using causal machine learning for predicting the risk of flight delays in air transportation*. Journal of Air Transport Management, 91, 1-17 .

<https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101993>.

- [۲۵] Álvaro, R. S., Rosa, M. M. A. V., Javier, A. P. C., Pablo, L. C. & Victor, F. G. C. (2022). *Tactical runway scheduling for demand and delay management*. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 94(1), 2-13 .

<https://doi.org/10.1108/AEAT-12-2020-0314>.