



## Agent-Based Modelling for Backup Aircraft Site Selection to Decrease Flight Delay Time (Case Study: Qeshm Airlines)

Mohammad Akhondi<sup>1\*</sup>, Mohammad Saadi Mesgari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty Member, Department of Surveying Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Associate Professor, Member and Head of Geoinformation Technology Center of Excellence, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

**Received:** 04.12.2022

**Revised:** 06.09.2022

**Accepted:** 06.21.2022

**Keyword:**

Agent-based  
Location  
Air transport  
Backup aircraft  
Delay time  
Flight

**\*Corresponding Author:**

Mohammad Akhondi

**Email:** [makhondi@tvu.ac.ir](mailto:makhondi@tvu.ac.ir)

### ABSTRACT

Flight delays are one of the most important and pervasive problems in the aviation industry. One way to reduce flight delays is to use backup planes. In previous research, less attention was paid to the issue of backup aircrafts and particularly the location of their deployment in order to reduce air traffic delays. Therefore, in this research, an agent-based modelling and simulation was used to find the optimum deployment location of backup aircrafts. The main objectives of this study were to investigate the effect of locating backup aircraft as well as the effect of increasing their number in reducing the average delay time of flights. In modelling, three scenarios were examined based on the number of backup aircrafts. The first, second and third scenario consisted of one, two and three backup aircrafts, respectively. The results showed a 26% and 29% increase in the number of backup aircrafts from one to two aircrafts and from two to three aircrafts in reducing the average delay time. In addition, in each of the scenarios, the difference between the worst and best locations found for the deployment of backup aircrafts and its impact on latency was examined. This effect was 70%, 77% and 84% in the first, second and third scenarios, respectively. These great differences showed the major impact of optimal location of the deployment centers in reducing flight delays.



---

## EXTENDED ABSTRACT

---

### Introduction

Flight delay is one of the greatest and widespread problems in air transportation industry. One method of reducing delay time is to use backup aircrafts that replace the failed aircrafts. In previous research studies, less attention has been paid to the issue of backup aircrafts and selection of their best locations. In this research, an agent-based simulation model was developed and used for site selection of backup aircrafts with the aim of reducing the average flight delay. The main goals of this research was to investigate the impact of both the number and the site selection of backup aircrafts in reducing flight delays.

### Methodology

Considering the goals mentioned in the previous section, in this research, the airlines and airports used by Qeshm Air, an Iranian air transportation company, were modeled and simulated using Anylogic software. A brief description of the agents and their behavior are as follows:

- 1- The main agent as a center of control and management of flight information: this high-level agent accesses and monitors real-time information of all agents. It provides a platform of communication and interaction for other agents during simulation.
- 2- The main aircrafts as the first type of moving agents: origin and destination were considered for each aircraft. For each aircraft, one of the airports was considered as its assigned airport, which is the airport of the city of departure. By the time of the first flight, the aircraft first adds a record to the flights of its assigned airport, and determines its destination for the assigned airport. Then, the aircraft moves to the destination. After reaching the destination, it immediately moves back to the airport of origin. When the aircraft arrives, it waits for the next flight.
- 3- Airport agent: based on the increase in the number of its flights or the breakdown of a plane, and based on a certain probability, the airport agent sends a backup request message to the nearest backup aircraft, dedicated to that airport. In addition, the destination airport of the canceled flight updates its information to the dedicated backup aircraft.
- 4- The second type of mobile agent as backup aircrafts: every backup aircraft that is situated at its own airport and after receiving a backup request message from an airport, flies to that airport. After reaching destination, it does its duty by moving to the destination of the canceled flight of that airport. Finally, after finishing the flight, it returns to its dedicated airport, settles there and waits for the next request message to carry out the next mission. The time interval for the backup aircraft to arrive at the requesting airport is considered to be the delay time of the canceled flight.
- 5- Airline agent: in the model, an agent called airline was considered for better observation of air routes.

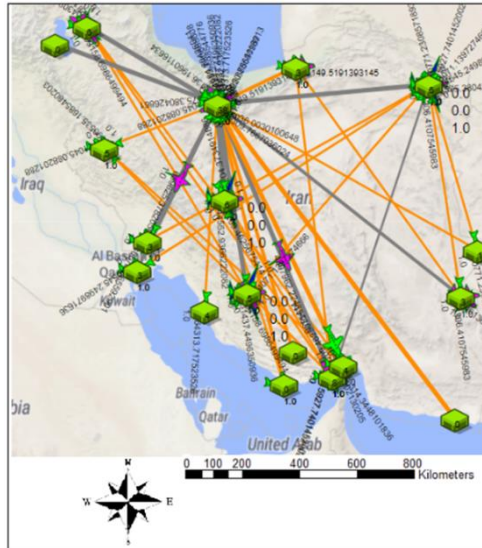


Figure 1. The agents during the simulation run

### Results and discussion

The model was implemented using the tools and facilities of Anylogic software, and the required program was coded in Java programming language. Then, the real data of the Qeshm Air flights was entered into the software database. The data included the origin and destination of the aircrafts and the number and time of their flights during the week. Then, three scenarios were considered according to the research objectives. The first scenario was to have one backup aircraft, the second scenario was to have two backup aircrafts, and the third scenario was to have three backup aircrafts. These three scenarios were considered to investigate the impact of increasing the number of backup aircrafts in reducing the average delay time of the air flights. In addition, in each of the scenarios, all possible modes were implemented separately and the best and worst results were obtained. This was done to check the impact of the appropriate location of backup aircrafts in reducing the average delay time of air flights. Table 1 shows the results of the three scenarios.

Table 1. The results of three scenarios

| Scenario | Number of Backup Aircraft | Best Site Selection | Worst Site Selection | The Average Delay Ttime (S) | Impact of Good Site Selection (%) |
|----------|---------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| 1        | 1                         | Tehran              |                      | 2539.69                     | 70                                |
|          |                           |                     | Chabahar             | 8365.07                     |                                   |
| 2        | 2                         | Tehran              |                      | 1885.28                     | 77                                |
|          |                           | Shiraz              | Chabahar<br>Chabahar | 8138.46                     |                                   |
| 3        | 3                         | Tehran              |                      | 1338.49                     | 84                                |
|          |                           | Qeshm<br>Ahvaz      | Chabahar<br>Chabahar | 8074.81                     |                                   |

| Scenario | Number of Backup Aircraft | Best Site Selection | Worst Site Selection | The Average Delay Ttime (S) | Impact of Good Site Selection (%) |
|----------|---------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Chabahar |                           |                     |                      |                             |                                   |

According to the results of this table, the following can be stated:

- 1- With one, two and three backup aircrafts in the best location, the average delay times were 2539.69, 1885.28 and 1338.49 seconds, respectively. The results clearly show the effect of increasing the number of backup aircrafts in reducing the average flight delay time. They demonstrate a decrease of approximately 26% for two backup aircrafts compared to one aircraft, and a decrease of approximately 29% for three backup aircrafts compared to two aircrafts in the best locations.
- 2- With one, two and three backup aircrafts in the worst location, the average delay times were 8365.07, 8138.46 and 8074.81 seconds, respectively. The large difference between the numbers obtained from the worst location and the best location shows the great impact of suitable location of backup aircrafts in reducing the average flight delay time by approximately 70%, 77% and 84% reduction with one, two and three backup aircrafts, respectively.

## Conclusion

One of the main goals of this research was to investigate the impact of the appropriate location of backup aircraft in reducing the average of flight delay time. The results demonstrated a significant impact of this factor. Another main goal was to investigate the effect of increasing the number of backup aircraft in reducing the average delay time of flights. The results show a remarkable reduction in the average delay time of flights by increasing the number of backup aircraft in their best locations in different scenarios. According to the results, agent-based modeling has a great capability in modeling the dynamic and complex world of air transportation. It provides the possibility of direct observations of aircrafts, airports and their performance and interactions. It also provides the possibility of evaluating their behavior and defining different scenarios.



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



# مدل‌سازی عامل مبنا برای مکان‌یابی محل استقرار هواپیماهای پشتیبان با هدف کاهش زمان تأخیر در پروازهای هوایی (مطالعه موردی: شرکت هواپیمایی قشم‌ایر)

محمد آخوندی<sup>\*۱</sup>، محمد سعدی مسگری<sup>۲</sup>

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- دانشیار، عضو و مدیر قطب علمی فناوری اطلاعات مکانی گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

## چکیده

در دنیای امروز تأخیر در پروازهای هوایی یکی از مشکلات مهم و فراگیر در صنعت حمل‌ونقل هوایی می‌باشد. یکی از راه‌های کاهش زمان تأخیر، استفاده از هواپیماهای پشتیبان است. در تحقیقات پیشین، به مبحث هواپیماهای پشتیبان و مخصوصاً مکان‌یابی محل استقرار آن‌ها در راستای کاهش هرچه بیشتر تأخیر در پروازهای هوایی کمتر توجه شده است. بنابراین در این تحقیق تصمیم گرفته شد یک مدل‌سازی و شبیه‌سازی عامل مبنا برای مکان‌یابی محل استقرار هواپیماهای پشتیبان انجام شود. اهداف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر مکان‌یابی هواپیماهای پشتیبان و همین‌طور بررسی تأثیر افزایش تعداد آن‌ها در کاهش میانگین زمان تأخیر در پروازهای هوایی بوده است. در مدل‌سازی سه سناریو براساس تعداد هواپیماهای پشتیبان بررسی شد. سناریوی اول شامل یک هواپیمای پشتیبان، سناریوی دوم شامل دو هواپیمای پشتیبان و سناریوی سوم شامل سه هواپیمای پشتیبان بود. نتایج به‌دست‌آمده، تأثیر ۲۶ و ۲۹ درصدی افزایش تعداد هواپیماهای پشتیبان از یک به دو و دو به سه هواپیما را در کاهش میانگین زمان تأخیر در پروازهای هوایی نشان داده است. همچنین، در هرکدام از سناریوها، تفاوت بدترین و بهترین مکان‌های یافت شده برای استقرار هواپیماهای پشتیبان و تأثیر آن در زمان‌های تأخیر بررسی شد. این تأثیر در سناریوهای اول، دوم و سوم به ترتیب ۷۷، ۷۰ و ۸۴ درصد بود. این تفاوت‌های فاحش نشان‌دهنده تأثیر زیاد مکان‌یابی بهینه این مراکز استقرار در کاهش زمان‌های تأخیر است.

## اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۳۱

## کلید واژگان:

عامل مبنا  
مکان‌یابی  
حمل‌ونقل هوایی  
هواپیمای پشتیبان  
زمان تأخیر  
پرواز

\*نویسنده مسئول: محمد آخوندی

پست الکترونیکی:

[makhondi@tvu.ac.ir](mailto:makhondi@tvu.ac.ir)



## مقدمه

سیستم‌های پیچیده، سیستم‌هایی هستند که در آنها تعداد بسیار زیادی از عناصر، معمولاً به شکل غیرخطی، با هم تعامل دارند و رفتارهای نوظهوری را ایجاد می‌کنند که معمولاً پیش‌بینی آنها دشوار است. سیستم‌های حمل‌ونقل هوایی در این دسته قرار می‌گیرند که تعداد زیادی هواپیما از برنامه‌های تعیین‌شده پیروی می‌کنند. از طرفی محاسبات مبتنی بر عامل، یکی از قوی‌ترین تکنولوژی‌ها برای توسعه سیستم‌های پیچیده توزیع یافته است. تکنولوژی عامل‌های هوشمند می‌توانند به‌خصوص از طریق شبیه‌سازی و سناریوسازی، قابلیت همکاری و تعامل و توانایی محاسبه توزیع یافته سیستم‌های اطلاعات متمرکز را بهبود بخشند [۱-۳]. در زمینه استفاده از مدل‌سازی عامل‌مینا<sup>۱</sup> در شبیه‌سازی صنعت حمل‌ونقل هوایی مطالعات زیادی در سطح جهانی انجام شده است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد:

محققان در [۴] با استفاده از یک مدل‌سازی و تحلیل عامل مینا، به ارتباط بین تعداد مسافران در نقاط خاصی از جمله نقطه بازرسی امنیتی فرودگاه و امنیت فرودگاه پرداختند. در [۵] با توجه به هزینه‌های عملیاتی، خطرات ایمنی و محدودیت‌های قانونی در آزمایش پرنده‌های بدون سرنشین، یک مقایسه بین چارچوب‌های شبیه‌سازی عامل مینا برای استفاده در این زمینه انجام شده است. نویسندگان در [۶] یک مدل‌سازی عامل مینا برای بررسی تعاملات و عملکرد اپراتورهای انسانی و تجهیزات فنی سیستم حمل‌ونقل هوایی انجام داده‌اند. مرجع [۷] یک مدل‌سازی عامل مینا و چند لایه برای پیش‌بینی‌های بلندمدت تراز شاخص کلیدی عملکرد در سیستم حمل‌ونقل هوایی انجام داده و نتایج را برای سال‌های ۲۰۳۵ و ۲۰۵۰ ارائه داده است. همچنین در [۸] یک مدل‌سازی چند عاملی از مدیریت ترافیک هوایی پرنده‌های بدون سرنشین به‌منظور پیمودن مسیر توسط ناوگان‌های متعدد از آن‌ها به‌صورت ایمن ارائه شده است.

در زمینه تأخیر در پروازهای هوایی نیز مطالعات زیادی انجام شده است که برخی عامل‌مینا بوده‌اند. از جمله در [۹] محققان بر ارزیابی از پشتیبانی سیستم‌های چند عاملی از کنترل خطوط هوایی و کاهش تأخیر در پروازها متمرکز شدند. نویسندگان در [۱۰] یک مدل عامل‌مینا را برای تحلیل تأخیر در پروازهای عمدتاً ناشی از شرایط آب‌وهوایی در ساختار SOS<sup>۲</sup> حمل‌ونقل هوایی ارائه و پیشنهاد دادند. محققان در [۱۱] یک مدل شبیه‌سازی مبتنی بر عامل را برای فرودگاه بین‌المللی شهر بنگلور برای پیش‌بینی تأثیر سیاست‌های مختلف با هدف بهبود توان عملیاتی فرودگاه توسعه داده‌اند. در [۳] با استفاده از مدل‌سازی عامل‌مینا، مقایسه‌ای را بین گسترش تأخیر ناشی از خرابی یا اختلالات دیگر در شبکه‌های ترافیک هوایی آمریکا و اروپا انجام داده شده است. پژوهشگران در [۱۲] یک مدل‌سازی عامل‌مینا مبتنی بر داده انتشار تأخیر تحت شرایط بد آب‌وهوایی را انجام دادند. نتایج نشان داد که مدل آن‌ها می‌تواند به مدیران به‌عنوان ابزاری برای کاهش تأثیر شرایط بد آب‌وهوایی بر برنامه پروازها کمک کند. همچنین در مرجع [۱۳] یک مدل عامل‌مینا به‌منظور اجرای یک فرایند مدیریت تأخیر در پروازهای هوایی ارائه شده است.

در مورد مدل‌سازی‌های غیر عامل‌مینا می‌توان به مرجع [۱۴] اشاره کرد که در آن براساس یک رویکرد یادگیری عمیق، نحوه پیش‌بینی تأخیر پرواز و همین‌طور کاهش آن در حمل‌ونقل هوایی تجاری بررسی شده است. در تحقیق دیگری، از داده‌کاوی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی احتمال تأخیر در پروازهای هوایی استفاده شده است [۱۵]. همچنین در [۱۶] یک مدل‌سازی تأخیر پرواز در کره جنوبی برای مقایسه میزان تأخیر در پروازهای داخلی و بین‌المللی انجام شده است.

همان‌طور که اشاره شد و مواردی نیز مطرح گردید تحقیقات زیادی در حوزه کاربرد عامل‌ها در سیستم حمل‌ونقل هوایی و همین‌طور تأخیر در پروازها صورت گرفته است. اما در این تحقیقات به هواپیماهای پشتیبان که در زمان خرابی

<sup>1</sup> Agent-Based Modelling

<sup>2</sup> System of systems

هوایمماهای اصلی، به جای آن‌ها پرواز کرده و مکان‌یابی محل استقرار آن‌ها کمتر توجه شده است. به خصوص اینکه به دلیل عمر بالاتر ناوگان هوایی در کشور ما پرداختن به این موضوع اهمیت بیشتری دارد. در مورد مدل‌سازی‌های عامل‌مبنا که تقریباً در این زمینه کاری انجام نگرفته است.

بنابراین در این تحقیق تصمیم گرفته شد یک مدل‌سازی و شبیه‌سازی عامل‌مبنا برای مکان‌یابی محل استقرار هوایمماهای پشتیبان به‌منظور کاهش میانگین زمان تأخیر در پروازها انجام شود. یکی از اهداف اصلی این تحقیق، بررسی میزان تأثیر مکان‌یابی مناسب محل استقرار هوایمماهای پشتیبان در کاهش زمان تأخیر در پروازها در یک دوره زمانی مشخص و براساس برنامه پروازی واقعی یکی از شرکت‌های هوایمماهای داخلی است. یکی دیگر از اهداف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر افزایش تعداد هوایمماهای پشتیبان در کاهش میانگین زمان تأخیر در پروازهاست. توزیع‌یافتگی در محاسبات و تصمیم‌گیری‌ها هم از دیگر اهداف این تحقیق بوده است. هدف دیگر شبیه‌سازی مرادده اطلاعاتی و ارتباطاتی بین اجزای مختلف شبکه حمل‌ونقل هوایی است. برای اجرا نیز از نرم‌افزار Anylogic استفاده شده است. جنبه‌های جدید این تحقیق را در مقایسه با تحقیقات مرور شده می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- الف) در این تحقیق از روش مدل‌سازی عامل‌مبنا استفاده شده است. استفاده از این روش صرف‌نظر از قابلیت‌های بسیار بالای مدل‌سازی‌های عامل‌مبنا در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده‌ای مانند سیستم حمل‌ونقل هوایی و همین‌طور صرف‌نظر از ایجاد امکان دیدن فضای تعاملات عامل‌ها به‌صورت گرافیکی و درک بسیار بیشتر از شبکه حمل‌ونقل هوایی، در مواردی از جمله هنگام ارسال درخواست‌های تقریباً هم‌زمان از جانب دو یا چند فرودگاه برای ارسال هوایمماهای پشتیبان به‌منظور انجام پرواز جایگزین یا نحوه عملکرد مطابق با واقعیت هوایمماهای پشتیبان در رفتن به سمت فرودگاه درخواست‌کننده و سپس حرکت به سمت مقصد هوایمماهای معیوب و در نهایت بازگشت به سمت فرودگاه محل استقرار اصلی خود و انتظار تا پرواز بعدی نسبت به روش‌های بهینه‌سازی<sup>۱</sup> موجود بهتر و دقیق‌تر عمل می‌کند.
- ب) در تحقیقات پیشین بیشتر به تأخیرهای ناشی از شرایط بد آب‌وهوایی یا خرابی هوایمماها و مدیریت آن پرداخته شده است. اما در این تحقیق، به یکی از عوامل مهم دیگر یعنی هوایمماهای پشتیبان و مکان‌یابی محل استقرار آن‌ها برای کاهش زمان تأخیر در پروازها با سناریوسازی پرداخته شده است.
- ج) سعی شده است که تا حد امکان تمام عامل‌ها از جمله همه هوایمماها و فرودگاه‌ها در عین مرادده اطلاعاتی، به‌صورت توزیع‌یافته و غیرمتمرکز محاسبات و تصمیم‌گیری‌ها را انجام دهند.

## مواد و روش کار

### محیط شبیه‌سازی و داده‌های مورد استفاده

همان‌طور که در مقدمه هم اشاره شد برای اجرا از نرم‌افزار Anylogic استفاده شد. این نرم‌افزار امکانات ویژه‌ای برای ایجاد محیط شبیه‌سازی یا ورود داده‌ها و نقشه‌ها دارد. در این تحقیق از نقشه<sup>۲</sup> GIS خود نرم‌افزار که با اتصال به اینترنت امکان دسترسی به اطلاعات دقیق همه کشورها و شهرها را در اختیار قرار می‌دهد، به‌عنوان محیط شبیه‌سازی استفاده شد. شکل ۱ نقشه GIS مورد استفاده را نشان می‌دهد. همین‌طور از داده‌های شرکت هوایمماهای

<sup>1</sup> Optimization

<sup>2</sup> Geospatial Information System

قشم ایر به عنوان داده‌های واقعی استفاده شد. این داده‌ها شامل مسیرهای پروازی و زمان دقیق پروازهای مورد استفاده شرکت قشم ایر است.



شکل ۱. نقشه GIS مورد استفاده به عنوان محیط شبیه سازی

## عامل‌ها

با توجه به هدف بیان شده در بخش قبل، در این تحقیق، یک بخش از شبکه حمل‌ونقل هوایی ایران شامل خطوط هوایی مورد استفاده شرکت هواپیمایی قشم ایر و فرودگاه‌های مورد استفاده این شرکت به‌صورت عامل مبنا مدل‌سازی و شبیه‌سازی شد. عامل‌ها عبارتند از:

- ۱- عامل اصلی<sup>۱</sup> به‌عنوان مرکز کنترل و مدیریت اطلاعات پرواز
- ۲- عامل متحرک نوع اول<sup>۲</sup> به‌عنوان هواپیماهای اصلی شرکت هواپیمایی قشم ایر
- ۳- عامل فرودگاه<sup>۳</sup> به‌عنوان فرودگاه‌های مورد استفاده شرکت هواپیمایی قشم ایر

<sup>1</sup> Main Agent

<sup>2</sup> First Mobile Agent

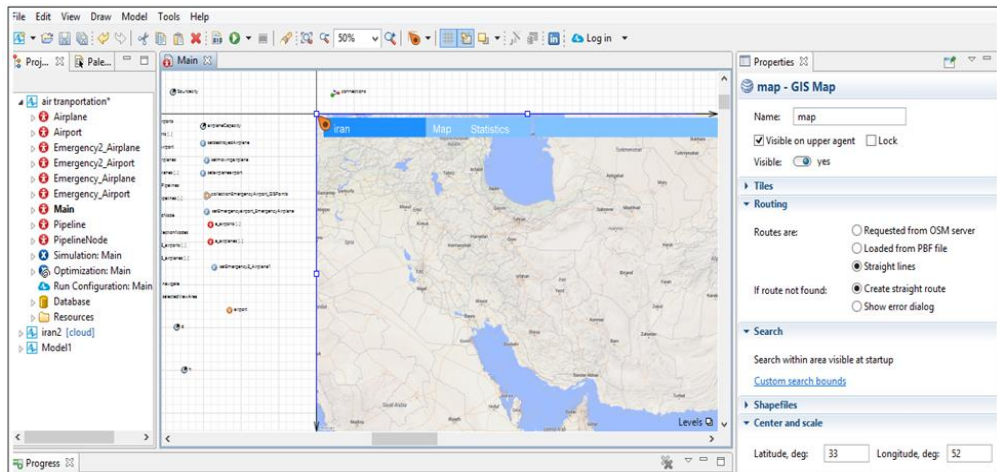
<sup>3</sup> Airport Agent



- ۴- عامل متحرک نوع دوم<sup>۱</sup> به‌عنوان هواپیماهای پشتیبان شرکت هواپیمایی قشم ایر
  - ۵- عامل خطوط هوایی<sup>۲</sup> به‌عنوان مسیرهای مورد استفاده هواپیماها
- همچنین فرض‌هایی برای حل مسئله و مدل‌سازی در نظر گرفته شد که عبارتند از:
- الف) انطباق کامل حرکت و پرواز هواپیماها با برنامه پرواز شرکت هواپیمایی
  - ب) امکان تغییر راحت تعداد هواپیماهای متحرک نوع اول و نوع دوم و فرودگاه‌ها و مسیرهای پروازی
  - ج) انطباق سرعت حرکت هواپیماها با میانگین سرعت حرکت هواپیماها در مسیرهای مورد استفاده.

### عامل اصلی به‌عنوان مرکز کنترل و مدیریت اطلاعات پرواز

در نرم‌افزار Anylogic، هنگام اجرای یک مدل عامل‌مبنا، اولین عاملی که ایجاد می‌شود عامل اصلی است. یکی از مهم‌ترین موارد استفاده از عامل اصلی ایجاد محیط شبیه‌سازی است. امکانات بسیار دیگری هم در محیط توسعه‌ای عامل اصلی وجود دارد. در واقع عامل اصلی به‌عنوان یک عامل رده بالاتر می‌تواند نقش نظارت و همین‌طور دسترسی به اطلاعات بالادرنگ همه عامل‌ها را هنگام شبیه‌سازی بر عهده بگیرد. همچنین برای برقراری ارتباط و تعامل بین عامل‌ها می‌توان کدنویسی‌هایی به زبان برنامه‌نویسی جاوا به محیط توسعه‌ای عامل اصلی اضافه کرد که از آن در بخش‌هایی از مدل‌سازی انجام شده مانند یافتن نزدیک‌ترین هواپیمای پشتیبان برای فرودگاه‌ها استفاده شد. از طرفی می‌توان به اضافه کردن کدهایی برای دیدن اطلاعات لحظه‌ای همه عامل‌ها در هنگام شبیه‌سازی و نمودارهای آن هم اشاره کرد. البته به انجام محاسبات به‌صورت توزیع‌یافته و در محیط توسعه هر یک از عامل‌ها به‌طور جداگانه هم توجه شد. شکل ۲ محیط توسعه‌ای عامل اصلی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. محیط توسعه‌ای عامل اصلی

<sup>1</sup> Second Mobile Agent

<sup>2</sup> Airline Agent

## عامل‌های متحرک نوع اول به عنوان هواپیماهای اصلی شرکت هواپیمایی قشم ایر

### چرخه حیات عامل متحرک نوع اول

برای هر هواپیما یک مبدأ و مقصد در نظر گرفته شد و اطلاعات آن‌ها در پایگاه داده<sup>۱</sup> وارد شد. از طرفی برای هر هواپیما، یکی فرودگاه‌ها که فرودگاه شهر مبدأ حرکت آن است به عنوان فرودگاه اختصاصی و محل استقرار اولیه در نظر گرفته شد. هواپیماها منتظر می‌مانند تا لحظه پرواز آن‌ها فرا برسد. به محض رسیدن به لحظه پرواز، هواپیما ابتدا با تابع کندیسی شده یک پرواز به پروازهای فرودگاه اختصاصی خود اضافه می‌کند و از طرف دیگر با استفاده از تابع دیگری مقصد خود را برای فرودگاه اختصاصی مشخص می‌کند. به این ترتیب تعداد کل پروازهای انجام شده و همین‌طور مقصد هر پرواز تازه شروع شده از مبدأ هر فرودگاه در دسترس آن عامل فرودگاه است. داشتن مقصد هر پرواز تازه شروع شده از مبدأ هر فرودگاه، در تعاملش با هواپیماهای پشتیبان مهم است. سپس هواپیما به سمت مقصد حرکت می‌کند و پس از رسیدن به مقصد بلافاصله به سمت فرودگاه مبدأ حرکت می‌کند و پس از رسیدن در آن جا منتظر رسیدن لحظه پرواز بعدی می‌مانند. البته به محض رسیدن به فرودگاه مبدأ با استفاده از تابع محاسبه فاصله، نصف فاصله طی شده را به فاصله قبلی خود اضافه می‌کند و بنابراین در هر لحظه ما به کل تعداد پروازها و همین‌طور مجموع فواصل طی شده هواپیماها دسترسی خواهیم داشت. مشخص است که اجرای خیلی از توابع و محاسبات مربوطه توسط عامل متحرک نوع اول و نه عامل اصلی و به صورت توزیع یافته مدل شده است.

### فرودگاه محور بودن چرخه حرکت هواپیماها

هواپیماها پس از رفتن به مقصد و بازگشت به مبدأ به دلیل اینکه در واقعیت برگشتی به سمت مبدأ وجود ندارد، نصف فاصله طی شده را به مجموع فواصل طی شده قبلی خود اضافه می‌کنند. یعنی در واقعیت هر هواپیما پس از رسیدن به مقصد، دوباره پس از وقفه‌ای کوتاه و سوار شدن مسافران جدید به سمت مقصد جدید حرکت می‌کند و این کار ادامه می‌یابد تا هواپیما به مبدأ اولیه خود برسد و این چرخه تکرار می‌شود. ولی در اینجا و در مدل‌سازی انجام شده، چرخه حیات هواپیماها به دلیل دسترسی نداشتن به اطلاعات اختصاصی هریک از هواپیماهای شرکت هواپیمایی قشم ایر به صورت فرودگاه محور در نظر گرفته شد و حرکت هواپیماها فقط براساس اطلاعات پروازهای شرکت هواپیمایی قشم ایر از هر فرودگاه به فرودگاه دیگر موجود در سایت شرکت و همین‌طور زمان پروازهای موجود در پایگاه‌های فروش بلیت هواپیما مدل شد. بنابراین با توجه به اینکه برگشت بلافاصله هواپیماها پس از هر پرواز از فرودگاه مقصد به فرودگاه مبدأ برخلاف واقعیت و صرفاً برای تداوم روند انجام پروازها مطابق با واقعیت در مدل‌سازی لحاظ شد، فاصله طی شده هواپیماها در بازگشت به فرودگاه مبدأ در مجموع فواصل طی شده آن‌ها لحاظ نشد. البته این مدل‌سازی انجام شده هم در نهایت اطلاعات مورد نیاز ما را از جمله تعداد کل پروازها و کل مسافت طی شده توسط هواپیماها را در هر لحظه به‌طور دقیق مطابق واقعیت در اختیار ما قرار می‌دهد.

<sup>1</sup> Database

### سرعت حرکت هواپیماها

برای شبیه شدن هرچه بیشتر حرکت هواپیماها به واقعیت، میانگین سرعت حرکت هواپیماهای شرکت هواپیمایی قشم ایر برای حرکت آن‌ها لحاظ شد. به این ترتیب که برای همه مسیرهای پروازی شرکت قشم ایر، زمان شروع و خاتمه پرواز و بنابراین مدت زمان پرواز مشخص است. از طرفی با توجه به فاصله مشخص بین مبدأ و مقصد در هر مسیر پروازی، میانگین سرعت پرواز هواپیماها در هر مسیر و در نهایت میانگین سرعت پرواز در همه مسیرهای پروازی به عنوان سرعت حرکت هواپیماها در محیط شبیه‌سازی در نظر گرفته شد.

### مکانیزم طراحی شده برای انطباق دقیق زمان پرواز هواپیماها با واقعیت

در شرکت قشم ایر از ۱ پرواز تا حداکثر ۹ پرواز در هفته در مسیرهای مختلف وجود داشت. برای همه هواپیماها به تعداد پروازهای خود در هفته پارامتر زمان که در واقع ساعت پروازهای هفتگی هواپیما است در نظر گرفته شد و اطلاعات آن‌ها در پایگاه داده وارد و برای هواپیماهای با تعداد پرواز یکسان در هفته چرخه حیات هفتگی اختصاصی در نظر گرفته شد. در این چرخه هواپیماها در فرودگاه مبدأ منتظر رسیدن به زمان اولین پرواز خود می‌مانند. پس از رسیدن به زمان اولین پرواز در هفته به سمت مقصد حرکت می‌کند و پس از رسیدن به مقصد بلافاصله به سمت مبدأ حرکت می‌کند و مدتی منتظر می‌مانند تا دوباره زمان دومین پرواز آن‌ها فرا برسد. پس از رسیدن به زمان دوم پرواز در هفته دوباره رفت و برگشت هواپیما انجام شده و این کار ادامه پیدا می‌کند تا آخرین پرواز هم انجام شود و پس از بازگشت به فرودگاه مبدأ هواپیما منتظر می‌ماند تا هفته خاتمه یافته و هفته جدید شروع شود. برای اینکه پرواز هواپیماها در هر مسیر پروازی دقیقاً منطبق با زمان واقعی آن‌ها انجام شود، برای زمان‌های انتظار از روابط ۱، ۲ و ۳ استفاده شد.

$$Timeouting_1 = T_1 \quad (1)$$

که در آن  $Timeouting_1$  زمان انتظار هر هواپیما برای انجام پرواز اول در هفته برحسب ساعت و  $T_1$  ساعت پرواز اول در هفته می‌باشد.

$$Timeouting_i = T_i - (T_{i-1} + \frac{2L}{3600V}) \quad (2)$$

که در آن  $Timeouting_i$  زمان انتظار هر هواپیما برای انجام پرواز  $i$  ام در هفته پس از انجام رفت و برگشت پرواز  $i-1$  ام برحسب ساعت،  $T_i$  ساعت پرواز  $i$  ام در هفته،  $T_{i-1}$  ساعت پرواز  $i-1$  ام در هفته،  $L$  فاصله از مبدأ تا مقصد برحسب متر و  $V$  میانگین سرعت حرکت هواپیماها برحسب متر بر ثانیه است.

$$Timeouting_{n+1} = 168 - (T_n + \frac{2L}{3600V}) \quad (3)$$

که در آن  $Timeouting_{n+1}$  زمان انتظار هر هواپیما برای پایان یافتن هفته پس از انجام رفت و برگشت آخرین پرواز در هفته برحسب ساعت و  $T_n$  ساعت آخرین پرواز در هفته است.

### مکانیزم زمانی پروازهای با شرایط خاص

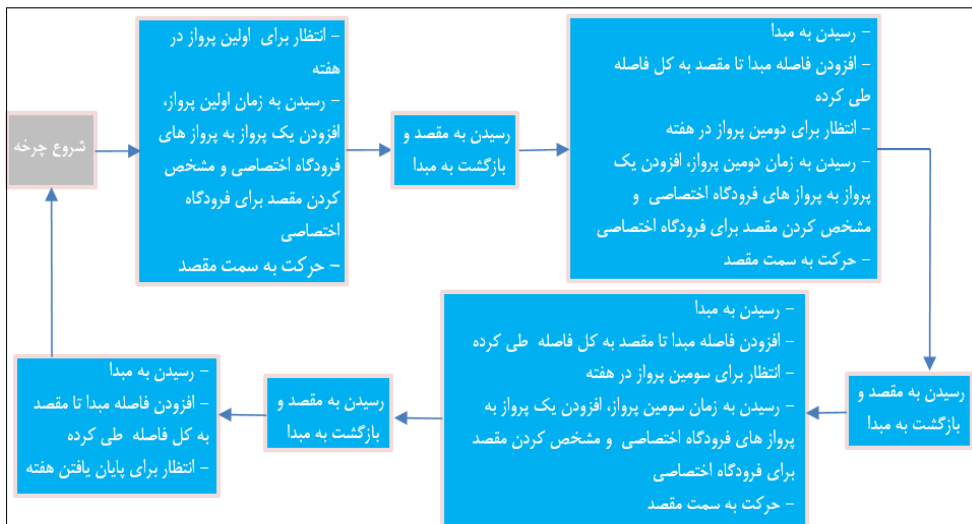
برای پروازهایی که نزدیک ساعات پایانی هفته انجام شده و بنابراین ممکن بود رابطه ۳ برای آن‌ها قابل استفاده نباشد، از رابطه ۴ به جای رابطه ۳ و نیز از چرخه حیات مستقلی استفاده شد.

$$Timeouting_2 = 180 - (T_1 + \frac{2L}{3600V}) \quad (۴)$$

که در آن،  $Timeouting_2$  زمان انتظار هر هواپیما پس از انجام رفت و برگشت تنها پرواز در هفته برای شروع چرخه حیات جدید برحسب ساعت و  $T_1$  ساعت اولین و آخرین پرواز در هفته است.

نکته‌ای که باید گفته شود این است که در این پروازها در اولین چرخه حیات خود، زمان انتظار برای اولین پرواز  $T_1$  و در چرخه‌های بعدی زمان انتظار برای اولین پرواز  $T_1-12$  در نظر گرفته شد تا این پروازها هم دقیقاً تا آخر در زمان مقرر خود انجام شوند. از طرفی برای پروازهایی که در انتهای هفته هم انجام نشده، ولی به دلیل فاصله بسیار کم زمان پرواز با پرواز بعدی یا قبلی خود، رابطه ۲ برای آن‌ها قابل استفاده نبود هم تمهیدی در نظر گرفته شد. به این ترتیب که برای مثال اگر این پرواز در یک مسیر پروازی با ۸ پرواز در هفته وجود داشت، آن مسیر پروازی به دو بخش یک پروازی و ۷ پروازی جداگانه تقسیم می‌شد و برای آن پرواز مذکور از چرخه حیات مختص مسیرهای پروازی یک پروازی و برای هفت پرواز باقیمانده هم از چرخه حیات مختص مسیرهای پروازی هفت پروازی استفاده شد و به این ترتیب مشکل رفع گردید.

با توجه به مطالب پیش‌گفته و مکانیزم طراحی‌شده، برای تمام هواپیماهای مسیرهای پروازی با تعداد پروازهای یکسان در هفته چرخه حیات مستقل و یکسانی در نظر گرفته شد. شکل ۳ برای مثال چرخه حیات هواپیماهای مسیرهای پروازی با ۳ پرواز در هفته را نشان می‌دهد.



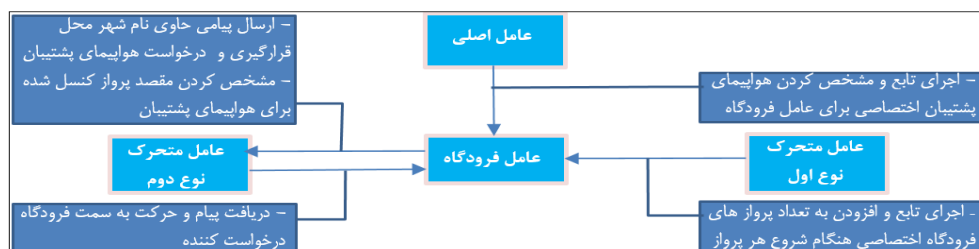
شکل ۳. چرخه حیات هواپیماهای مسیرهای پروازی با ۳ پرواز در هفته

### عامل فرودگاه به‌عنوان فرودگاه‌های مورد استفاده شرکت هواپیمایی قشم ایر

همان‌طور که در قبلا بیان شد هواپیماها پس از رفتن به مقصد و بازگشت، با استفاده از فراخوانی تابعی مخصوص، به تعداد پروازهای فرودگاه اختصاصی خود یک پرواز اضافه می‌کنند. بنابراین به‌مرور زمان به تعداد پروازهای هر فرودگاه اضافه می‌گردد. هر فرودگاه با توجه به افزایش تعداد پروازهای خود و براساس احتمال مشخصی که با توجه به آمارهای کنسلی پرواز در ایران و همین‌طور براساس میزان تأثیرگذاری خرابی هواپیماها در کنسلی پروازها حدوداً ۲ درصد در نظر گرفته شد، پیامی را حاوی نام شهر قرارگیری خود برای درخواست هواپیمای پشتیبان به نزدیک‌ترین هواپیمای پشتیبانی که هواپیمای پشتیبان اختصاصی آن فرودگاه محسوب می‌شود، ارسال و همچنین فرودگاه مقصد پرواز کنسل شده خود را هم که با توجه به توضیحات داده شده در بخش قبلی در اختیار دارد و در هر پرواز به‌روزرسانی می‌شود، با اجرای تابعی برای هواپیمای پشتیبان اختصاصی خود مشخص می‌کند. هواپیمای پشتیبان هم پس از دریافت پیام، مطابق توضیحات داده شده در بخش قبلی مأموریت خود را انجام می‌دهد.

### امکان تغییر و به‌روزرسانی هواپیمای پشتیبان اختصاصی هر فرودگاه

در صورتی که هواپیمای پشتیبان اختصاصی هر فرودگاه حین ارسال درخواست توسط فرودگاه، در حال انجام مأموریت برای فرودگاه دیگری باشد، موقتاً هواپیمای پشتیبان اختصاصی فرودگاه به نزدیک‌ترین هواپیمای پشتیبان آماده انجام مأموریت البته در صورت وجود با توجه به تعداد آن‌ها تغییر کرده تا اختلالی در روند جایگزینی هواپیمای خراب با هواپیمای پشتیبان به‌وجود نیاید بعداً بیشتر در این مورد توضیح داده خواهد شد. شکل ۴ نحوه تعامل عامل فرودگاه را با عامل‌های دیگر نشان می‌دهد.



شکل ۴. نحوه تعامل عامل فرودگاه با عامل‌های دیگر

### عامل‌های متحرک نوع دوم به‌عنوان هواپیماهای پشتیبان شرکت هواپیمایی قشم ایر

#### نحوه تعیین هواپیمای پشتیبان اختصاصی هر فرودگاه

هواپیماهای پشتیبان همه فرودگاه‌ها در ابتدای شروع شبیه‌سازی با اجرای تابعی توسط عامل اصلی مشخص می‌شود. این تابع با توجه به محل استقرار هواپیماهای پشتیبان، نزدیک‌ترین هواپیمای پشتیبان به هر فرودگاه را به‌عنوان هواپیمای پشتیبان اختصاصی آن فرودگاه تعیین می‌کند و بنابراین پس از شروع شبیه‌سازی هر فرودگاه هواپیمای پشتیبان

اختصاصی خود را می‌شناسد. با توجه به تعداد هواپیماهای پشتیبان و نیز تعداد فرودگاه‌ها که هر دو به راحتی در مدل‌سازی انجام شده و در پایگاه داده مربوطه قابل تغییر است، هر هواپیمای پشتیبان می‌تواند هواپیمای پشتیبان اختصاصی چندین فرودگاه باشد.

### چرخه حیات عامل متحرک نوع دوم و مسیر حرکتی مثلثی شکل آن

در چرخه حیات هواپیماهای پشتیبان، هر هواپیما در فرودگاه اختصاصی یا همان فرودگاه محل استقرار اصلی خود منتظر دریافت پیام از یک فرودگاه می‌ماند. البته این امکان فراهم شد که حتی همه هواپیماهای پشتیبان بتوانند در یک فرودگاه مستقر شده و دارای فرودگاه اختصاصی مشترک باشند. پس از خرابی یک هواپیما در یک فرودگاه، فرودگاه پیامی را برای انجام مأموریت به هواپیمای پشتیبان اختصاصی خود ارسال می‌کند. هواپیمای پشتیبان هم پس از دریافت پیام، به سمت آن فرودگاه با سرعتی برابر با همان سرعت حرکت هواپیماهای اصلی پرواز می‌کند و پس از رسیدن به فرودگاه درخواست‌کننده، به سمت مقصد پرواز کنسل شده فرودگاه درخواست‌کننده حرکت می‌کند. قبلاً مکانیزم دسترسی به مقصد پرواز کنسل شده فرودگاه درخواست‌کننده توضیح داده شد. در نهایت پس از رسیدن به مقصد پرواز کنسل شده، دوباره به فرودگاه اختصاصی خود باز می‌گردد و در آن جا مستقر شده و منتظر پیام جدیدی برای انجام مأموریت بعدی می‌ماند. بنابراین هواپیمای پشتیبان یک مسیر مثلثی شکل را در هر مأموریت می‌پیماید.

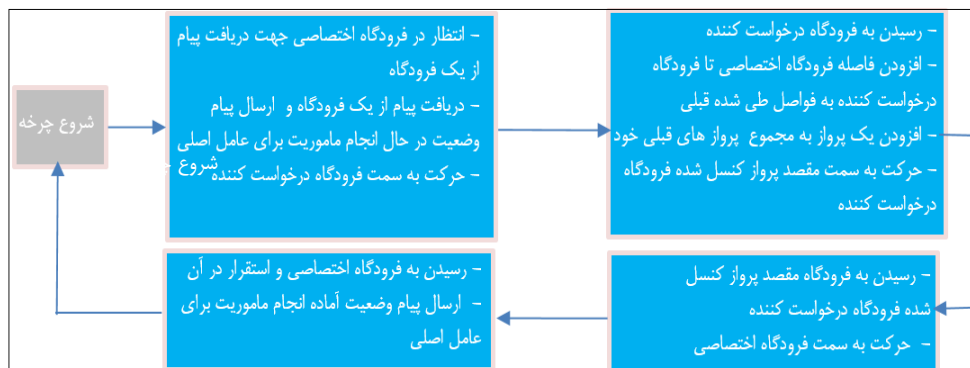
### مکانیزم محاسباتی هواپیماهای پشتیبان

هواپیمای پشتیبان پس از رسیدن از فرودگاه اختصاصی به فرودگاه درخواست‌کننده هواپیمای پشتیبان، با اجرای توابعی یک پرواز به پروازهای قبلی خود و همین‌طور فقط فاصله ما بین فرودگاه اختصاصی و فرودگاه درخواست‌کننده را به فواصل طی شده قبلی خود اضافه می‌کند و تعداد پروازها و فواصل طی شده در مراحل بعدی مأموریت یعنی هنگام پرواز از مبدأ فرودگاه درخواست‌کننده به سمت فرودگاه مقصد پرواز کنسل شده و همین‌طور هنگام بازگشت به فرودگاه اختصاصی را لحاظ نمی‌کند؛ زیرا هدف اصلی از انجام این تحقیق رسیدن به بهترین محل‌های استقرار هواپیماهای پشتیبان به منظور کاهش زمان تأخیر در پروازهای هوایی است. برای این منظور، هواپیماهای پشتیبان باید در فرودگاه‌هایی مستقر باشند که در نهایت میانگین زمان رسیدن آن‌ها به فرودگاه‌های درخواست‌کننده هواپیمای پشتیبان که در واقع همان میانگین زمان تأخیر در پروازهای هوایی بر اثر خرابی هواپیماها هم می‌باشد، مینیمم شود. بنابراین فقط برای مطابقت زمان رسیدن هواپیماهای پشتیبان به فرودگاه اختصاصی پس از انجام هر مأموریت و آمادگی برای انجام مأموریت بعدی با واقعیت، انجام پرواز به سمت فرودگاه مقصد پرواز کنسل شده و سپس بازگشت به فرودگاه اختصاصی در چرخه حیات عامل‌های متحرک نوع دوم گنجانده شد.

### مکانیزم تغییر و به‌روزرسانی هواپیمای پشتیبان اختصاصی هر فرودگاه

هر هواپیمای پشتیبان در لحظه شروع مأموریت، با ارسال پیامی برای عامل اصلی وضعیت خود را که در حال انجام مأموریت است برای عامل اصلی مشخص می‌کند و بنابراین عامل اصلی فوراً با اجرای تابع مخصوصی، هواپیماهای پشتیبان اختصاصی فرودگاه‌ها را به‌روزرسانی می‌کند. در این به‌روزرسانی، هواپیمای پشتیبان در حال انجام مأموریت از فهرست هواپیماهای پشتیبان خارج می‌شود و بنابراین این تابع، فقط از بین هواپیماهای پشتیبان آماده انجام مأموریت، هواپیماهای پشتیبان اختصاصی فرودگاه‌ها را مشخص می‌کند. بنابراین در این به‌روزرسانی ممکن است هواپیمای پشتیبان اختصاصی

اولیه تعدادی از فرودگاه‌ها موقتاً تغییر کند. علت این امر این است که در صورت نیاز فرودگاهی به هواپیمای پشتیبان و در حال انجام مأموریت بودن هواپیمای پشتیبان اختصاصی‌اش برای فرودگاهی دیگر، نزدیک‌ترین هواپیمای پشتیبان آماده انجام مأموریت به‌عنوان هواپیمای پشتیبان موقتش، این مأموریت را انجام دهد. پس از پایان مأموریت هم هر هواپیمای پشتیبان دوباره پیامی برای عامل اصلی ارسال می‌کند و وضعیت خود را مبنی بر آماده انجام مأموریت بودن اعلام می‌کند و عامل اصلی هم دوباره هواپیماهای پشتیبان اختصاصی همه فرودگاه‌ها را به‌روزرسانی می‌کند. شکل ۵ چرخه حیات عامل متحرک نوع دوم را نشان می‌دهد.



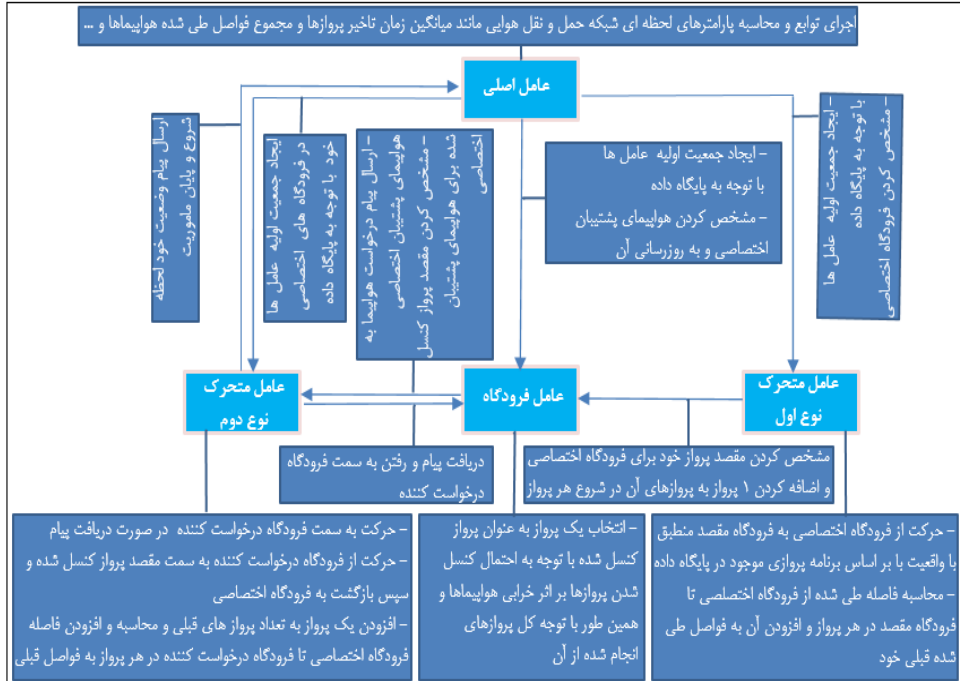
شکل ۵. چرخه حیات عامل متحرک نوع دوم

### عامل خطوط هوایی به‌عنوان مسیرهای مورداستفاده هواپیماها

در مدل‌سازی انجام شده، عاملی هم تحت عنوان خط هوایی برای مشاهده بهتر مسیرهای هوایی هنگام اجرای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. برای ایجاد این عامل‌ها از بانک اطلاعاتی حاوی فرودگاه‌های مبدأ و مقصد مسیرهای پروازی هواپیماها استفاده شد. در شکل ۷ این خطوط هوایی قابل مشاهده هستند.

### فلوچارت فعالیت و تعاملات عامل‌ها

شکل ۶ فلوچارت خلاصه فعالیت‌ها و تعاملات همه عامل‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۶. فلوجارت خلاصه فعالیت‌ها و تعاملات همه عامل‌ها

### مکانیزم محاسبه میانگین زمان تأخیر در پروازهای هوایی

#### محاسبه میانگین زمان تأخیر در پروازهای هوایی کنسل شده بر اثر خرابی هواپیماها

همان‌طور که قبلاً بیان شد میانگین زمان رسیدن هواپیماهای پشتیبان به فرودگاه‌های درخواست‌کننده، در واقع همان میانگین زمان تأخیر در پروازهای هوایی بر اثر خرابی هواپیماها نیز محسوب می‌شود. از طرفی با توجه به مطالب پیش‌گفته مشخص است که در هر لحظه از شبیه‌سازی به تعداد کل پروازهای انجام شده توسط هواپیماهای پشتیبان و مجموع کل فواصل طی شده آن‌ها از فرودگاه اختصاصی تا فرودگاه‌های درخواست‌کننده هواپیمای پشتیبان دسترسی داریم. بنابراین با استفاده از رابطه ۵ میانگین زمان تأخیر در پروازهای هوایی کنسل شده بر اثر خرابی هواپیماها به‌دست می‌آید.

$$t_{mean} = \frac{\sum L_i}{nv} \quad (5)$$

که در آن  $t_{mean}$  میانگین زمان تأخیر در پروازهای هوایی کنسل شده بر اثر خرابی هواپیماها برحسب ثانیه،  $L_i$  مجموع فواصل طی شده از فرودگاه اختصاصی تا فرودگاه‌های درخواست‌کننده توسط هواپیمای پشتیبان  $i$  ام برحسب متر،  $n$  تعداد کل پروازهای انجام شده توسط هواپیماهای پشتیبان و  $V$  سرعت حرکت و پرواز هواپیماهای پشتیبان برحسب متر بر ثانیه است.



## محاسبه میانگین زمان تأخیر در کل پروازهای هوایی بر اثر خرابی هواپیماها

از رابطه ۶ میانگین زمان تأخیر در کل پروازهای هوایی بر اثر خرابی هواپیماها به دست می آید.

$$T_{mean} = \frac{\sum L_i}{mv} \quad (6)$$

که در آن  $T_{mean}$  میانگین زمان تأخیر در کل پروازهای هوایی بر اثر خرابی هواپیماها برحسب ثانیه،  $L_i$  مجموع فواصل طی شده از فرودگاه اختصاصی تا فرودگاه‌های درخواست‌کننده توسط هواپیمای پشتیبان  $i$  ام برحسب متر،  $m$  تعداد کل پروازهای انجام شده توسط هواپیماهای اصلی و  $v$  سرعت حرکت و پرواز هواپیماهای پشتیبان برحسب متر بر ثانیه است.

## اجرای مدل و شبیه‌سازی و مشاهده نتایج

## ورود داده‌ها

همان‌طور که در مقدمه نیز گفته شد در اجرا از نرم‌افزار Anylogic استفاده شد. پس از اجرای مدل با استفاده از ابزارها و امکانات متعدد نرم‌افزار و همین‌طور کدنویسی‌های موردنیاز به زبان برنامه‌نویسی جاوا، داده‌های واقعی پروازهای شرکت هواپیمای قشم ایر وارد پایگاه داده نرم‌افزار شد. اطلاعات مسیره‌های پروازی داخلی شرکت قشم ایر بین ۱۸ فرودگاه در شهرهای تهران، مشهد، اصفهان، شیراز، زاهدان، تبریز، قشم، کیش، گرگان، ارومیه، زابل، اهواز، آبادان، بندرعباس، بوشهر، چابهار، لار و کرمانشاه هم در پایگاه داده وارد شد که این مسیره‌های پروازی در شکل ۷ نشان داده شده است. البته تعداد مسیره‌های پروازی و در فرودگاه‌های مورداستفاده موجود در سایت این شرکت هواپیمایی بیشتر از این تعداد بود، اما با توجه به اینکه برای رسیدن به زمان پروازهای شرکت هواپیمایی قشم ایر در طول هفته در هر یک از مسیره‌های پروازی مورد استفاده این شرکت از سایت‌های فروش بلیت هواپیما و اطلاعات آن‌ها استفاده شد، مشخص شد که تعدادی از مسیره‌های پروازی فعلاً غیرفعال هستند و بنابراین فقط اطلاعات مسیره‌های پروازی فعال و دارای پرواز هفتگی وارد پایگاه داده شد. جدول ۱ بخشی از داده‌های وارد شده در پایگاه داده را شامل مبدأ و مقصد هواپیماها و تعداد و زمان پرواز آن‌ها را در طول هفته نشان می‌دهد.

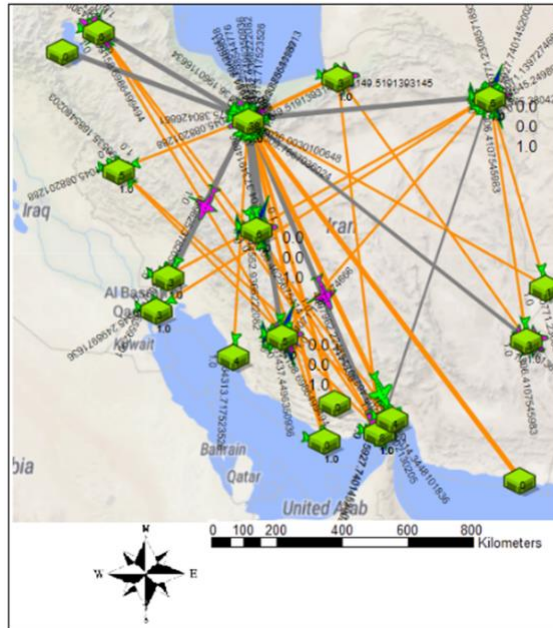
جدول ۱. بخشی از داده‌های وارد شده در پایگاه داده

| مبدأ  | مقصد   | تعداد پرواز در هفته | 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) |
|-------|--------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| تهران | چابهار | ۲                   | ۱۰۸                             | ۱۶۰                             |                                 |                                   |                                  |                                 |
| تهران | اهواز  | ۳                   | ۶۵/۴۱۷                          | ۱۰۱                             | ۱۲۴/۷۵                          |                                   |                                  |                                 |
| تهران | آبادان | ۴                   | ۳۹/۸۳۳                          | ۸۶/۷۵                           | ۱۴۰/۵                           | ۱۵۳                               |                                  |                                 |

| مبدأ   | مقصد   | تعداد پرواز در هفته | 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) |
|--------|--------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| تهران  | ارومیه | ۵                   | ۶۲/۷۵                           | ۸۰/۳۳۳                          | ۱۰۹                             | ۱۳۳/۹۱۷                           | ۱۵۵/۴۱۷                          |                                 |
| تهران  | اصفهان | ۵                   | ۱۵/۷۵                           | ۴۰/۲۵                           | ۵۲/۵۸۳                          | ۷۷/۰۸۳                            | ۱۰۱/۶۶۷                          |                                 |
| تهران  | بوشهر  | ۶                   | ۱۹/۹۱۷                          | ۴۳/۵۸۳                          | ۵۶/۵                            | ۸۹/۸۳۳                            | ۱۱۵/۵                            | ۱۳۴/۵۸۳                         |
| اصفهان | تهران  | ۵                   | ۱۷/۵                            | ۴۶/۵                            | ۵۸/۷۵                           | ۷۸/۸۳۳                            | ۱۰۳/۴۱۷                          |                                 |
| بوشهر  | تهران  | ۶                   | ۲۱/۸۳۳                          | ۴۶/۱۶۷                          | ۶۱/۲۵                           | ۹۲/۰۸۳                            | ۱۱۷/۷۵                           | ۱۳۶/۸۳۳                         |

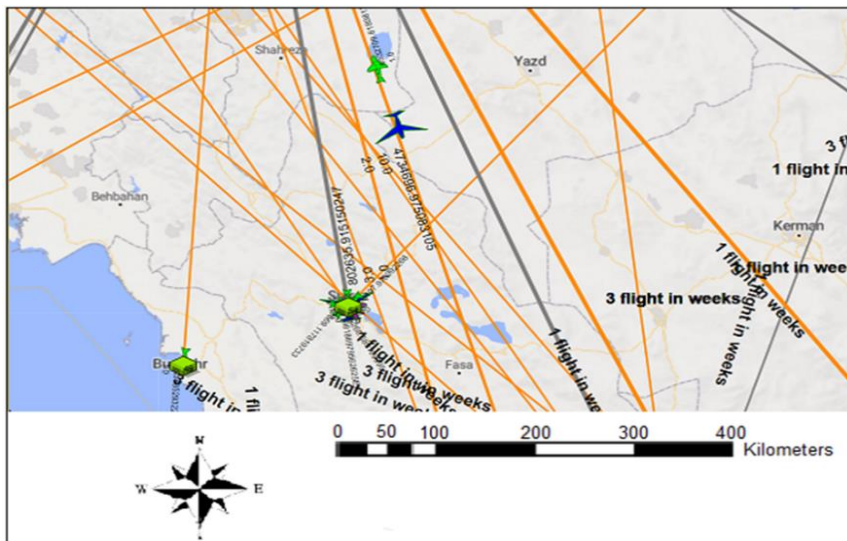
### سناریوسازی و اجرای شبیه‌سازی‌ها

سه سناریو با توجه به اهداف تحقیق در نظر گرفته شد. سناریوی اول داشتن یک هواپیمای پشتیبان، سناریوی دوم داشتن دو هواپیمای پشتیبان و سناریوی سوم داشتن سه هواپیمای پشتیبان. این سناریوسازی به‌منظور بررسی میزان تأثیر افزایش تعداد هواپیماهای پشتیبان در کاهش میانگین زمان تأخیر در پروازهای هوایی با توجه به یکی از اهداف اصلی تحقیق انجام شد. با توجه به فراهم کردن امکان قرارگیری همه هواپیماهای پشتیبان در یک فرودگاه، تعداد حالت‌ها و شبیه‌سازی‌های ممکن برای سناریوی اول ۱۸ حالت، برای سناریوی دوم ۱۷۱ حالت و برای سناریوی سوم ۱۱۴۰ حالت شد و همه حالت‌ها در هر کدام از سناریوها به‌صورت جداگانه اجرا و بهترین و بدترین نتیجه برای رسیدن به حداکثر میزان تأثیر مکان‌یابی مناسب محل استقرار هواپیماهای پشتیبان در کاهش میانگین زمان تأخیر در پروازهای هوایی با توجه به یکی دیگر از اهداف اصلی تحقیق مورد توجه قرار گرفت. برای اجرای شبیه‌سازی‌ها نیز از ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار Anylogic استفاده شد. با استفاده از این ابزار امکان تغییر دادن فرودگاه‌های محل استقرار هواپیماهای پشتیبان در پایگاه داده با توجه به تعداد آن‌ها براساس سناریوی موردنظر به‌صورت اتوماتیک و اجرای شبیه‌سازی‌ها و رسیدن به نتایج با بالاترین سرعت فراهم شد. شکل ۷ اجرای یکی از شبیه‌سازی‌ها و فرودگاه‌ها و مسیرهای پروازی و حرکت هواپیماها در محیط شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نمایش فرودگاه‌ها و مسیرهای پروازی و حرکت هواپیماها در محیط شبیه‌سازی

همین‌طور در محیط شبیه‌سازی، اطلاعات لحظه‌ای عامل‌ها با توجه به شکل ۸، قابل مشاهده است.



شکل ۸. نمایش اطلاعات لحظه‌ای عامل‌ها در محیط شبیه‌سازی

مطابق شکل، به ترتیب مجموع پروازها و مجموع فواصل طی شده هواپیمای پشتیبان متحرک آبی‌رنگ ۱۰ پرواز و ۴۷۳۴۶۹۶ متر و مجموع پروازهای فرودگاه‌های شیراز و بوشهر به ترتیب ۵۴ و ۴۹ پرواز است.

### نتایج به‌دست‌آمده پس از اجرا

پس از ورود داده‌ها و اجرای سیستم با آن‌ها در ۳ سناریو، نتایج مطابق جدول ۲ به‌دست آمد.

جدول ۲. نتایج حاصل از سناریوهای مختلف اجرا شده

| شماره سناریو | روش اجرا (سناریو)        |                               | مکان یابی             | تعداد کل پروازهای انجام شده توسط هواپیمای اصلی در طول یک سال | تعداد کل پروازهای انجام شده توسط هواپیمای پشتیبان در طول یک سال | تعداد کل پروازهای انجام شده توسط هواپیمای پشتیبان در طول یک سال (متر) | مجموع فواصل طی شده توسط هواپیمای اصلی در طول یک سال | مجموع فواصل طی شده توسط هواپیمای پشتیبان در طول یک سال (متر) | میانگین زمان تأخیر در پروازهای هوایی کنسل شده بر اثر خرابی هواپیماها (ثانیه) | میانگین زمان تأخیر در کل پروازهای هوایی بر اثر خرابی هواپیماها (ثانیه) |
|--------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------|--|---|---|---|--|--|--|
|              | تعداد هواپیماهای پشتیبان | تعداد شش‌په‌سازی‌های اجرا شده |                       |  |   |   |   |  |  |  |
| ۱            | ۱                        | ۱۸                            | تهران                 | ۸۳۹۳   | ۶۵۱۸۰۰۰۰۰   | ۱۴۲   | ۴۲۱۹۷   | ۲۵۳۹/۶۹  | ۴۲۱۹۷  |  |
| ۲            | ۲                        | ۱۷۱                           | تهران<br>شیراز        | ۸۳۹۳   | ۶۵۱۸۰۰۰۰۰   | ۱۵۷   | ۱۳۵/۵۵  | ۸۳۶۵/۰۷  | ۱۳۵/۵۵   |  |
| ۳            | ۳                        | ۱۱۴۰                          | تهران<br>قشم<br>اهواز | ۸۳۹۳   | ۶۵۱۸۰۰۰۰۰   | ۱۶۰   | ۱۴۸/۳۶  | ۱۳۳۸/۴۹  | ۱۴۸/۳۶   |  |
|              |                          |                               | چابهار                | ۸۳۹۳   | ۶۵۱۸۰۰۰۰۰   | ۱۵۷   | ۱۵۱/۰۴  | ۸۰۷۴/۸۱  | ۱۵۱/۰۴   |  |

براساس مطالعه نتایج این جدول، مطالب زیر قابل استخراج می‌باشند:

- مجموع پروازها و فواصل طی شده به دلیل برنامه پروازی یکسان هواپیماها، در همه اجراها ثابت است.
- بهترین فرودگاه‌ها برای استقرار یک، دو و سه هواپیمای پشتیبان به ترتیب فرودگاه تهران، فرودگاه‌های تهران و شیراز و فرودگاه‌های تهران، قشم و اهواز با میانگین زمان تأخیر به ترتیب ۲۵۳۹/۶۹، ۱۸۸۵/۲۸ و ۱۳۳۸/۴۹ ثانیه بوده است. نتایج به‌وضوح تأثیر افزایش تعداد هواپیماهای پشتیبان در کاهش میانگین زمان تأخیر در پروازهای هوایی کنسل شده بر اثر خرابی هواپیماها را با کاهش حدوداً ۲۶ درصدی برای دو هواپیمای پشتیبان نسبت به یک هواپیما و همین‌طور کاهش حدوداً ۲۹ درصدی برای سه هواپیمای پشتیبان نسبت به دو

- هوایما را حداقل در بهترین محل‌های استقرارشان نشان می‌دهد. این کاهش برای میانگین زمان تأخیر در کل پروازهای هوایی به ترتیب حدوداً ۱۸ درصد و ۲۸ درصد بوده است.
- ۳- با یک، دو و سه هوایمای پشتیبان تعداد پروازهای آن‌ها در بهترین فرودگاه‌ها به ترتیب ۱۴۲، ۱۵۷ و ۱۶۰ پرواز بوده است. کمتر شدن محسوس تعداد پروازها با کاهش تعداد آن‌ها، نشان‌دهنده پاسخ ندادن به درخواست بعضی فرودگاه‌ها برای انجام مأموریت به دلیل در حال انجام مأموریت بودنشان در لحظه ارسال درخواست بوده است. بنابراین اگر تأخیر زیاد صورت گرفته در پروازهای این فرودگاه‌ها را لحاظ کنیم، با کاهش تعداد هوایمهای پشتیبان نتایج برای میانگین زمان تأخیر از اعداد به دست آمده نیز بدتر می‌شود.
- ۴- با یک، دو و سه هوایمای پشتیبان، بدترین فرودگاه‌ها برای استقرار آن‌ها با توجه به امکان قرارگیری آن‌ها در یک فرودگاه، فرودگاه چابهار با میانگین زمان تأخیر به ترتیب ۸۳۶۵/۰۷ ثانیه، ۸۱۳۸/۴۶ ثانیه و ۸۰۷۴/۸۱ ثانیه بوده است. اختلاف زیاد اعداد حاصل از بدترین فرودگاه‌ها با بهترین فرودگاه‌ها نشان‌دهنده تأثیر زیاد مکان‌یابی مناسب هوایمهای پشتیبان در کاهش میانگین زمان تأخیر در پروازها به میزان حدوداً ۷۰ درصد، ۷۷ درصد و ۸۴ درصد کاهش به ترتیب با یک، دو و سه هوایمای پشتیبان بوده است.
- ۵- کمتر شدن تعداد پروازهای هوایمهای پشتیبان با کاهش تعداد آن‌ها با ۱۵۷، ۱۵۳ و ۱۳۶ پرواز به ترتیب برای سه، دو و یک هوایمای پشتیبان در بدترین فرودگاه‌ها برای استقرار آن‌ها هم مشهود است.

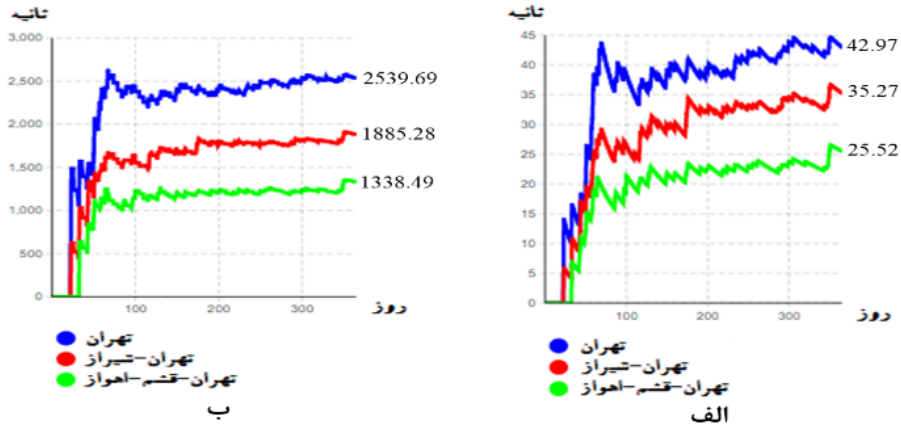
### جدول ۳. تعداد پروازهای انجام شده از مبدأ هر فرودگاه

| فرودگاه     | تهران | قشم | مشهد | بندرعباس | زاهدان | کاشانه | بوشهر | کرمان | اهواز | زابل | تفت | ارومیه | لار | چابهار |
|-------------|-------|-----|------|----------|--------|--------|-------|-------|-------|------|-----|--------|-----|--------|
| تعداد پرواز | ۳۴۹۲  | ۸۳۳ | ۵۷۴  | ۴۱۸      | ۴۰۵    | ۴۰۵    | ۴۰۵   | ۴۰۵   | ۴۰۵   | ۴۰۵  | ۴۰۵ | ۴۰۵    | ۴۰۵ | ۴۰۵    |

از طرفی تعداد پروازهای هر فرودگاه در جدول ۳ آمده است. با توجه به آن، نکاتی بیان می‌شود:

- ۱- فرودگاه تهران با ۳۴۹۲ پرواز به دلیل تعداد زیاد پروازها و بنابراین نیاز بیشترش به هوایمای پشتیبان نسبت به بقیه فرودگاه‌ها، در هر سه سناریو در بین بهترین فرودگاه‌ها برای استقرار هوایمای پشتیبان قرار داشته است که طبیعتاً مهم‌ترین عامل این نتیجه تعداد بالای پروازها و سپس موقعیت مناسبش بوده است.
- ۲- فرودگاه قشم هم با ۸۳۳ پرواز و دومین فرودگاه به لحاظ تعداد پروازها، در سناریوی دوم در فهرست بهترین فرودگاه‌ها بوده است که همچنان تعداد بالای پروازها عامل اصلی این نتیجه بوده است.
- ۳- در مورد فرودگاه‌های شیراز و اهواز که به ترتیب در سناریوهای دوم و سوم در بین بهترین فرودگاه‌ها و دارای رتبه ششم و سیزدهم تعداد پروازها بوده‌اند، دلیل اصلی این نتیجه موقعیت مناسبشان بوده است.
- ۴- فرودگاه مشهد با رتبه سوم تعداد بالای پروازها، در هیچ سناریویی در فهرست بهترین فرودگاه‌ها قرار نداشته است که دلیل آن موقعیت نامناسبش با توجه به برنامه پروازهای شرکت قشم ایر بوده است.
- ۵- تعداد پروازهای انجام شده از مبدأ سه فرودگاه ارومیه، لار و چابهار هم صفر بوده است که دلیل این امر این است که این فرودگاه‌ها فقط مقصد پرواز بوده‌اند و پروازی از مبدأ این فرودگاه‌ها انجام نشده است.

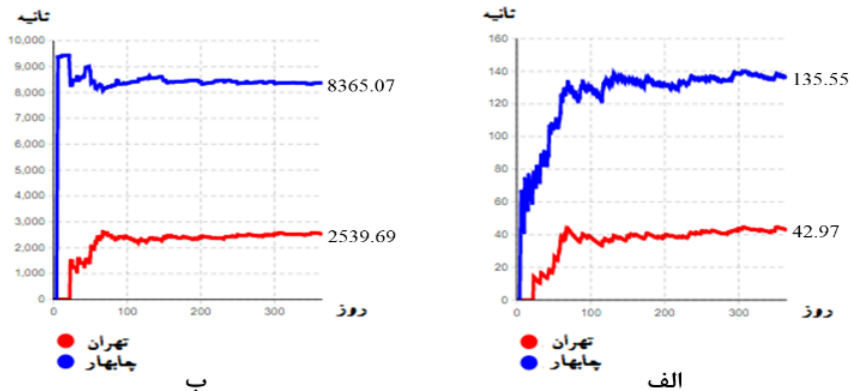
در ادامه در شکل‌های ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ تغییرات میانگین زمان تأخیر در پروازها نشان داده شده است.



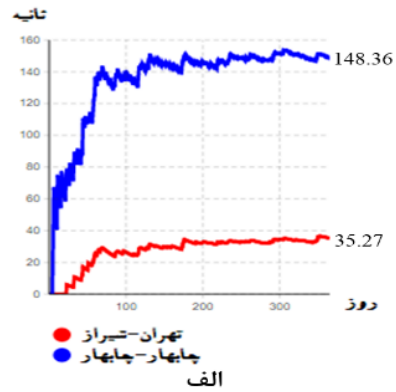
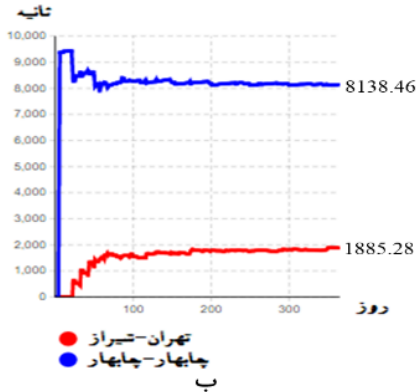
شکل ۹. تغییرات زمان تأخیر پروازها در بهترین فرودگاه‌های استقرار هواپیماها در هر سه سناریو

در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب به ترتیب نمودار تغییرات میانگین زمان تأخیر در کل پروازها بر اثر خرابی هواپیماها و در پروازهای کنسل شده بر اثر خرابی هواپیماها در بهترین فرودگاه‌ها در هر سه سناریو، نشان داده شده است. هر دو شکل الف و ب به خوبی کاهش میانگین زمان تأخیر در پروازها با افزایش تعداد هواپیماهای پشتیبان را با اختلاف قابل توجهی تقریباً در کل مدت یک سال شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

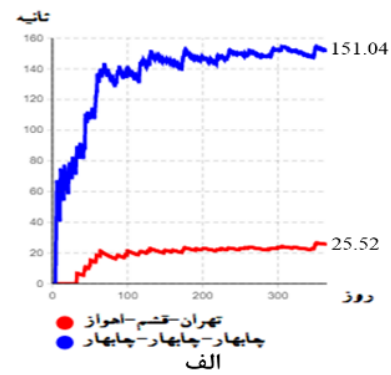
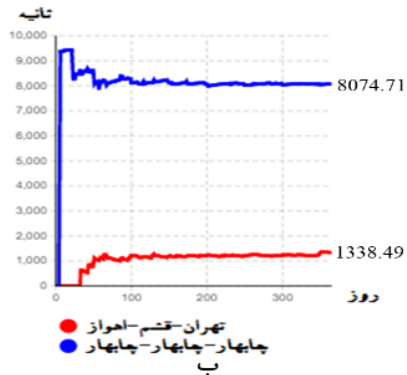
در شکل‌های ۱۰-الف، ۱۱-الف و ۱۲-الف هم، نمودار تغییرات میانگین زمان تأخیر در کل پروازها بر اثر خرابی هواپیماها در بهترین و بدترین فرودگاه‌های استقرار هواپیماهای پشتیبان به ترتیب برای سناریوهای اول، دوم و سوم و همین‌طور در شکل‌های ۱۰-ب، ۱۱-ب و ۱۲-ب نیز نمودار تغییرات میانگین زمان تأخیر در پروازهای کنسل شده بر اثر خرابی هواپیماها در بهترین و بدترین فرودگاه‌های استقرار هواپیماهای پشتیبان به ترتیب برای سناریوهای اول، دوم و سوم برای مدت یک سال شبیه‌سازی نشان داده شده است.



شکل ۱۰. تغییرات زمان تأخیر پروازها در بهترین و بدترین فرودگاه استقرار هواپیما در سناریوی اول



شکل ۱۱. تغییرات زمان تأخیر پروازها در بهترین و بدترین فرودگاه‌های استقرار هواپیما در سناریوی دوم



شکل ۱۲. تغییرات زمان تأخیر پروازها در بهترین و بدترین فرودگاه‌های استقرار هواپیما در سناریوی سوم

شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به خوبی تأثیر بسیار بالای مکان‌یابی مناسب محل استقرار هواپیماهای پشتیبان را در کاهش میانگین زمان تأخیر در پروازهای هوایی در کل مدت یک سال نشان می‌دهند.

از طرفی میانگین زمان تأخیر در کل پروازهای هوایی در بدترین فرودگاه‌های استقرار هواپیماهای پشتیبان برخلاف روند معمول قابل مشاهده در نمودارها، با کاهش تعداد هواپیماهای پشتیبان، کاهش داشته است. دلیل این امر کاهش محسوس تعداد پروازهای هواپیماهای پشتیبان با کاهش تعداد آنهاست که موجب کاهش کاذب میانگین زمان تأخیر براساس رابطه شماره ۶ می‌شود و در صورت لحاظ کردن تأخیر زیاد در پروازهایی که برای آنها هواپیماهای پشتیبان ارسال نشده، وضعیت تغییر می‌کند.

## نتیجه‌گیری

از اهداف اصلی این تحقیق و مدل‌سازی عامل‌مبنا، بررسی میزان تأثیر مکان‌یابی مناسب محل استقرار هواپیماهای پشتیبان در کاهش میانگین زمان تأخیر در پروازها بوده است که نتایج به‌دست‌آمده تأثیر زیاد و قابل‌توجهی را در این زمینه نشان داد. از اهداف اصلی دیگر، بررسی تأثیر افزایش تعداد هواپیماهای پشتیبان در کاهش میانگین زمان تأخیر در پروازها بوده است که نتایج به‌دست‌آمده کاهش مناسبی در میانگین زمان تأخیر در پروازها را با افزایش تعداد هواپیماهای پشتیبان حداقل در بهترین محل‌های استقرار هواپیماهای پشتیبان در سناریوهای مختلف نشان داد. توزیع‌یافتگی در محاسبات و تصمیم‌گیری‌ها و نیز امکان مرادده و ارتباط عامل‌ها با هم مطابق با توضیحات داده شده در بخش قبلی محقق شد.

با توجه به تجربیات حاصل از این تحقیق می‌توان گفت مدل‌سازی عامل‌مبنا توانایی زیادی در مدل‌سازی دنیای پویا و پیچیده حمل‌ونقل هوایی دارد و امکان مشاهده مستقیم و زنده هواپیماها و فرودگاه‌ها و عملکرد آن‌ها، ارتباطات آن‌ها و نیز امکان ارزیابی و اصلاح رفتارهای آن‌ها و همین‌طور امکان تعریف سناریوهای مختلف را به‌خوبی فراهم می‌کند. در ادامه پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده مطرح می‌گردد:

در این تحقیق، مطابق با توضیحات داده شده قبلی مدل‌سازی به‌صورت فرودگاه پایه انجام شد اما می‌توان آن را به‌صورت هواپیماپایه انجام داد؛ به این معنی که اگر به اطلاعات همه هواپیماها از جمله تعداد هواپیماها و نیز عمر، ظرفیت پذیرش مسافر، شرکت سازنده و ... دسترسی داشته باشیم، می‌توانیم با بررسی میزان تأثیر هر یک از این پارامترها در خرابی هواپیماها و استفاده از این اطلاعات در مدل، به نتایج دقیق‌تری رسید. یکی دیگر از پیشنهادها انجام مکان‌یابی محل استقرار هواپیماهای پشتیبان نه فقط در بین فرودگاه‌های مورد استفاده شرکت هواپیمایی بلکه در بین تعداد بیشتری از فرودگاه‌های کشور است. یکی دیگر از پیشنهادها لحاظ کردن پارامترهای دیگری مانند میانگین فاصله طی شده توسط هواپیماهای پشتیبان در مسیرهای مثلی شکل خود غیر از پارامتر زمان تأخیر در پروازها برای مکان‌یابی آن‌هاست.

## References

- [1] Adler, J. L., Satapathy, G., Manikonda, V., Bowles, B., & Blue, V. J. (2005). A multi-agent approach to cooperative traffic management and route guidance. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(4), 297-318. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2004.03.005>
- [2] Adler, J. L., & Blue, V. J. (2002). A cooperative multi-agent transportation management and route guidance system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 10(5), 433-454. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(02\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(02)00030-X)
- [3] Campanelli, B., Fleurquin, P., Arranz, A., Etxebarria, I., Ciruelos, C., Eguíluz, V. M., & Ramasco, J. J. (2016). Comparing the modeling of delay propagation in the US and European air traffic networks. *Journal of Air Transport Management*, 56, 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.03.017>
- [4] Janssen, S., Sharpanskykh, A., & Curran, R. (2019). Agent-based modelling and analysis of security and efficiency in airport terminals. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 100, 142-160. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.012>
- [5] Mualla, Y., Bai, W., Galland, S., & Nicolle, C. (2018). Comparison of Agent-based Simulation Frameworks for Unmanned Aerial Transportation Applications. *Procedia Computer Science*, 130, 791-796. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.137>



- [6] Stroeve, S. H., & Everdij, M. H. C. (2017). Agent-based modelling and mental simulation for resilience engineering in air transport. *Safety Science*, 93, 29-49. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.11.003>
- [7] Delgado, L., Gurtner, G., Cook, A., Martín, J., & Cristóbal, S. (2020). A multi-layer model for long-term KPI alignment forecasts for the air transportation system. *Journal of Air Transport Management*, 89, 101905. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101905>
- [8] Liu, Y. (2021). A multi-agent semi-cooperative unmanned air traffic management model with separation assurance. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 10, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2021.100058>
- [9] Bouarfa, S., Müller, J., & Blom, H. (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>
- [10] Esmaeilzadeh, E., Grenn, M. W., & Roberts, B. (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>
- [11] Verma, A., Tahlyan, D., & Bhusari, S. (2020). Agent based simulation model for improving passenger service time at Bangalore airport. *Case Studies on Transport Policy*, 8(1), 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2018.03.001>
- [12] Fleurquin, P., Ramasco, J. J., & Eguíluz, V. (2013, Jun 10-13). *Data-driven modeling of systemic delay propagation under severe meteorological conditions*. Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Chicago.
- [13] Gurtner, G., Delgado, L., & Valput, D. (2021). An agent-based model for air transportation to capture network effects in assessing delay management mechanisms. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 133(1), 103358. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103358>
- [14] Yu, B., Guo, Z., Asian, S., Wang, H., & Chen, G. (2019). Flight delay prediction for commercial air transport: A deep learning approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 125, 203-221. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.013>
- [15] Truong, D. (2021). Using causal machine learning for predicting the risk of flight delays in air transportation. *Journal of Air Transport Management*, 91(1), 101993. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101993>
- [16] Kim, M., & Bae, J. (2021). Modeling the flight departure delay using survival analysis in South Korea. *Journal of Air Transport Management*, 91(6), 101996. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101996>