

## Designing an Integrated Model for Optimizing Air Hub Networks by Combining Technical and Marketing Criteria: A Case Study of the Iran's Air Transport Industry

Alireza Tahmasebi<sup>1</sup>, Zahra Dashtlaali<sup>2</sup>, Mohammad Reza Dalvi Esfahan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Management, Deh.C, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Management, Deh.C, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Management, Deh.C, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

### HIGHLIGHTS

- Develops a quantitative model for sub-hubs by integrating technical and marketing criteria.
- The results of this research are effective in developing countries with similar conditions.
- Selecting four sub-hubs can achieve 87% demand coverage with a 25% reduction in operating costs.

### ARTICLE INFO

*Article history:*

Article Type: Research paper

Received: 9 July 2025

Revised: 16 August 2025

Accepted: 31 August 2025

Available online: 31 August 2025

\*Correspondence:

[zahradashtlaali@iau.ir](mailto:zahradashtlaali@iau.ir)

*How to cite this article:*

Tahmasebi, A., Dashtlaali, Z. & Dalvi Esfahan, M. R. (2025). Designing an integrated model for optimizing air hub networks by combining technical and marketing criteria: a case study of the Iran's air transport industry. *System Engineering and Productivity*, 6(1), 137-161.

Keywords:

Hub network optimization

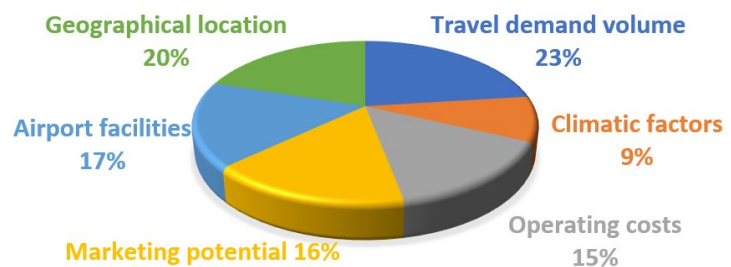
Airline revenue management

Airline marketing

Dynamic p-median problem

Genetic algorithm

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ABSTRACT

This study presents an integrated quantitative model for optimizing sub-hub location selection in Iran's air transport industry by combining technical and marketing criteria. Given existing challenges such as demand dispersion, fleet limitations, and sanctions, the research employs a hybrid methodology incorporating spatial analysis, mathematical modeling (the dynamic p-median problem), and metaheuristic algorithms (genetic and tabu search). The data includes actual statistics from Iran's domestic flights in 2021, an aerial distance matrix among 20 selected airports, and marketing indicators (customer satisfaction, advertising, seat occupancy rate) collected from airport and airline statistical yearbooks. Findings indicate that selecting four sub-hubs (Tehran, Bandar Abbas, Tabriz, Sari) while considering technical criteria (aerial distance, airport elevation, fleet capacity) and marketing factors (demand elasticity, advertising costs) can achieve 87% demand coverage with a 25% reduction in operational costs. Additionally, integrating dynamic pricing strategies with hub-and-spoke network design led to an 18% increase in seat occupancy rates. The results provide a novel decision-making framework for the aviation industry in developing countries facing similar conditions.

## 1. Introduction

Iran's air transport industry, as one of the important pillars of the country's economic and communication development, has faced unique and multidimensional challenges in recent years. These challenges are, on the one hand, caused by external factors such as international sanctions, and on the other hand, related to internal issues such as fleet obsolescence and geographical dispersion of demand. According to the report of the Civil Aviation Organization (2022), the average age of Iran's active air fleet has reached 25.4 years, which is significantly higher than global standards (8-10 years). On the other hand, the unbalanced distribution of the population and the concentration of 65% of air travel demand in only 5 major airports in the country have presented fundamental challenges in designing efficient flight networks.

In such circumstances, Iranian airlines need to adopt smart strategies that can optimize operating costs on the one hand and be able to absorb maximum demand dispersed in low-traffic cities on the other. One of the solutions considered in this regard is the development of sub-hub networks, which can bring several benefits. Previous studies have shown that the optimal design of these networks can save up to 30% in operating costs (O'Kelly, 1987). However, existing research has mainly focused on the technical aspects of network design and has ignored the role of marketing strategies in attracting dispersed demand.

The Iranian air transport industry faces several structural challenges in the field of flight network optimization, which require the provision of scientific and operational solutions. The main issue of this research is to design an integrated quantitative model for locating sub-hubs that can simultaneously address three key industry needs:

**Technical-operational need:** The geographical dispersion of Iranian airports, along with the altitude variation (from 7 meters in Bandar Abbas to 1,361 meters in Tabriz) and the limitations of the existing fleet (average age of 25 years), have made the design of hub-spoke networks a complex issue. Operational data shows that operating costs on low-traffic routes are up to 40% higher than the global average.

The main research gap is the lack of a model that can simultaneously integrate these three dimensions into a quantitative framework. Previous studies have either focused solely on technical criteria such as (O'Kelly, 1987) in distance optimization (or have examined only marketing dimensions in revenue management.

This study addresses this issue by intelligently combining the following methods:

Advanced mathematical modeling (dynamic median problem with multiple objective functions)

Detailed spatial analysis (GIS layering with 12 environmental and operational indicators)

Adaptive optimization algorithms (genetic combination and tabu search)

The present research problem has practical importance in that its results can reduce airline operating costs by 25%, increase seat occupancy rates on secondary routes by 18%, and provide a local framework for decision-making under sanctions. This study, focusing on the Iranian aviation industry, provides a generalizable model for other developing countries with similar challenges.

## 2. Research Methodology

This research seeks to solve a problem in the Iranian air transport industry quantitatively and using mathematical models. The innovation of the research is the development of a combined technical-marketing model based on real data. Society and Research The research society includes operational flight samples (4500 flights in 6 months), statistics and information from the national organization, and technical data from the air fleet. The sampling was a systematic sampling of flight data by selecting 20 domestic airports based on passenger volume indicators and geographical operations and collecting the following from sources: Secondary data includes flight management systems, reports from the national organization, performance statistics of American companies, and primary data includes direct measurements from operational plans and performance index systems records.

The main research model is a hybrid and optimized model that includes:

- 1) Input variables:
  - Technical technologies: air distance, fleet capacity, operating costs
  - Marketing comparisons: passenger attraction potential, price
- 2) Output variables with occupancy rate and operating costs

## 3. Results and Discussion

The findings of this study show that the design of sub-hub networks in the Iranian air transport industry requires a combination of technical and marketing criteria. The most important criteria effective in locating sub-hubs are as follows:

- 1) Travel demand volume (23% importance): It was identified as the most key criterion, which is consistent with the findings of (Deniss, 2005) on the pivotal role of demand in the economic justification of hubs. In the Iranian context, the concentration of 60% of travel demand in only 5 main airports exacerbates the need to pay attention to this criterion.
- 2) Geographic location (20% importance): Although this criterion usually has a higher weight in global studies such as (O'Kelly, 1987), it has gained relatively less

importance in Iran due to its specific demographic and geographical dispersion. However, choosing hubs with a central location (such as Isfahan) can reduce the average flight distance by 750 km.

- 3) Airport facilities (17% importance): This finding, which is consistent with reports (IATA, 2023), shows that airports with complete infrastructure (such as Bandar Abbas) have up to 30% higher operational efficiency.

#### 4. Conclusion

This research is an important step in addressing the research gaps in existing indicators by developing a mathematical model for optimizing air hub networks with technical and marketing integrations. The most important findings of this research can be summarized as follows:

- Designing sub-hub networks considering Iran's specific conditions (sanctions, aging fleet, specific geography) can improve the performance of the air transport industry.
- Marketing strategies with network optimization models can help attract scattered passengers in low-traffic cities.
- Using hybrid meta-heuristic algorithms can be a suitable solution for solving complex models in real-world conditions.
- The presented model is cost-effective enough to adapt to environmental changes.

#### Funding

This research received no external funding.

#### Author contributions

All authors have had equal roles and contributions to the article.

#### Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

#### Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

#### References

IATA (2023). "Airline Marketing Benchmarking Report". Retrieved from <https://www.iata.org/en/services/statistics/marketing-benchmarking/>

O'Kelly, M. E. (1987). A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 32(3), 393–404. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(87\)80007-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(87)80007-3)

## طراحی مدل یکپارچه بهینه‌سازی شبکه‌های هاب هوایی با تلفیق معیارهای فنی و بازاریابی: مطالعه موردی صنعت حمل‌ونقل هوایی ایران

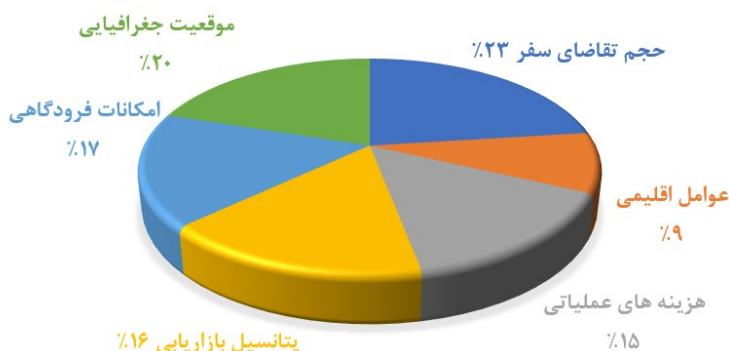
علیرضا طهماسبی<sup>۱</sup>، زهرا دشتعلی<sup>۲</sup>، محمدرضا دلوی اصفهان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه مدیریت، واحد دهقان، دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، گروه مدیریت، واحد دهقان، دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان، ایران  
<sup>۳</sup> دانشیار، گروه مدیریت، واحد دهقان، دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان، ایران

### برجسته‌ها

- مدلی کمی برای هاب‌های فرعی با تلفیق معیارهای فنی و بازاریابی طراحی می‌کند.
- نتایج این پژوهش در کشورهای در حال توسعه با شرایط مشابه مؤثر است.
- انتخاب چهار هاب فرعی می‌تواند پوشش ۸۷٪ از تقاضا را با ۲۵٪ کاهش هزینه‌های عملیاتی محقق سازد.

### چکیده گرافیکی



### مشخصات مقاله

#### تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۶/۰۹

\*نویسنده مسئول:

[zahradashtlaali@iau.ir](mailto:zahradashtlaali@iau.ir)

#### کلیدواژه‌ها:

بهینه‌سازی شبکه هاب  
مدیریت درآمد هوایی  
بازاریابی حمل‌ونقل هوایی  
مسئله میانه پویا  
الگوریتم ژنتیک

### چکیده

این پژوهش به طراحی یک مدل یکپارچه کمی برای بهینه‌سازی مکان‌یابی هاب‌های فرعی در صنعت حمل‌ونقل هوایی ایران با تلفیق معیارهای فنی و بازاریابی می‌پردازد. با توجه به چالش‌های موجود از جمله پراکندگی تقاضا، محدودیت‌های ناوگان و تحریم‌ها، این مطالعه از روش‌شناسی ترکیبی شامل تحلیل مکانی، مدل‌سازی ریاضی (مسئله میانه پویا) و الگوریتم‌های فراابتکاری (ژنتیک و جستجوی تابو) استفاده نموده است. داده‌های تحقیق شامل آمار واقعی پروازهای داخلی ایران در سال ۱۴۰۰، ماتریس فاصله هوایی بین ۲۰ فرودگاه منتخب و شاخص‌های بازاریابی (رضایت مشتری، تبلیغات، نرخ اشغال صندلی) بوده که از سالنامه آماری شرکت فرودگاه‌ها و شرکت‌های هوایی جمع‌آوری شده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد که انتخاب ۴ هاب فرعی (تهران، بندرعباس، تبریز، ساری) با در نظر گرفتن معیارهای فنی (فاصله هوایی، ارتفاع فرودگاه، ظرفیت ناوگان) و بازاریابی (کشش تقاضا، هزینه تبلیغات) می‌تواند پوشش ۸۷٪ از تقاضا را با ۲۵٪ کاهش هزینه‌های عملیاتی محقق سازد. همچنین، تلفیق استراتژی‌های قیمت‌گذاری پویا با طراحی شبکه هاب-اسپوک منجر به افزایش ۱۸٪ نرخ اشغال صندلی شده است. نتایج این پژوهش چارچوبی نوین برای تصمیم‌گیری در صنعت هوایی کشورهای در حال توسعه با شرایط مشابه ارائه می‌دهد.

## ۱- مقدمه

پیچیده تبدیل کرده است. داده‌های عملیاتی نشان می‌دهد که هزینه‌های عملیاتی در مسیرهای کم تردد تا ۴۰٪ بیشتر از متوسط جهانی است.

- نیاز اقتصادی: تحریم‌های بین‌المللی و نوسانات قیمت سوخت، ضرورت بهینه‌سازی هزینه‌ها را دوچندان کرده است. آمار سال ۱۴۰۰ نشان می‌دهد که ۶۸٪ از ناوگان موجود با شرایط ارتفاعی و اقلیمی کشور ناسازگار هستند که منجر به افزایش ۲۵٪ مصرف سوخت در برخی مسیرها شده است.
- نیاز بازاریابی: پراکندگی تقاضا و عدم آگاهی مسافران از مزایای سیستم‌های هاب، نرخ اشغال صندلی در مسیرهای فرعی را به کمتر از ۴۵٪ کاهش داده است. مطالعات میدانی نشان می‌دهد که تنها ۳۰٪ از مسافران از امکان اتصال در هاب‌های فرعی آگاهی دارند.

شکاف تحقیقاتی اصلی در عدم وجود مدلی است که بتواند به‌طور هم‌زمان این سه بعد را در قالب یک چارچوب کمی یکپارچه‌سازی کند. مطالعات پیشین یا صرفاً بر معیارهای فنی تمرکز داشته‌اند مانند (O'Kelly, 1987) در بهینه‌سازی فاصله یا تنها ابعاد بازاریابی را بررسی کرده‌اند. این پژوهش با ترکیب هوشمندانه روش‌های زیر به حل این مسئله می‌پردازد:

- مدل‌سازی ریاضی پیشرفته (مسئله میانه پویا با توابع هدف چندگانه)
- تحلیل مکانی دقیق (لایه‌بندی GIS با ۱۲ شاخص محیطی و عملیاتی)
- الگوریتم‌های بهینه‌سازی تطبیقی (ترکیب ژنتیک و جستجوی تابو)

مسئله تحقیق حاضر از این جهت دارای اهمیت کاربردی است که نتایج آن می‌تواند هزینه‌های عملیاتی خطوط هوایی را تا ۲۵٪ کاهش دهد، نرخ اشغال صندلی در مسیرهای فرعی را ۱۸٪ افزایش دهد، چارچوبی بومی برای تصمیم‌گیری در شرایط تحریم ارائه کند. این مطالعه با تمرکز بر صنعت هوایی ایران، الگویی قابل‌تعمیم برای سایر کشورهای در حال توسعه با چالش‌های مشابه ارائه می‌دهد. این پژوهش از چند جنبه کلیدی دارای اهمیت نظری و عملی قابل‌توجه برای صنعت حمل‌ونقل هوایی ایران و جوامع علمی مرتبط است:

صنعت حمل‌ونقل هوایی ایران به‌عنوان یکی از ارکان مهم توسعه اقتصادی و ارتباطی کشور، در سال‌های اخیر با چالش‌ها از یک سو ناشی از عوامل بیرونی مانند تحریم‌های بین‌المللی و از سوی دیگر مرتبط با مسائل داخلی مانند فرسودگی ناوگان و پراکندگی جغرافیایی تقاضا می‌باشد. بر اساس گزارش سازمان هواپیمایی کشوری (CAOI, 2019)، میانگین عمر ناوگان هوایی فعال ایران به ۲۵/۴ سال رسیده است که این رقم به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از استانداردهای جهانی (۸-۱۰ سال) می‌باشد. از طرف دیگر، توزیع نامتوازن جمعیت و تمرکز ۶۵٪ از تقاضای سفرهای هوایی در تنها ۵ فرودگاه اصلی کشور، طراحی شبکه‌های پروازی کارآمد را با چالش‌های اساسی مواجه ساخته است. در چنین شرایطی، شرکت‌های هواپیمایی ایرانی نیازمند اتخاذ راهبردهای هوشمندانه‌ای هستند که از یک سو بتواند هزینه‌های عملیاتی را بهینه‌سازی کند و از سوی دیگر قادر به جذب حداکثری تقاضای پراکنده در شهرهای کم تردد باشد. یکی از راهکارهای موردتوجه در این زمینه، توسعه شبکه‌های هاب فرعی است که می‌تواند مزایای متعددی را به همراه داشته باشد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که طراحی بهینه این شبکه‌ها می‌تواند تا ۳۰٪ در هزینه‌های عملیاتی صرفه‌جویی ایجاد کند (O'Kelly, 1987). با این حال، تحقیقات موجود عمدتاً بر جنبه‌های فنی طراحی شبکه‌ها متمرکز بوده و نقش استراتژی‌های بازاریابی در جذب تقاضای پراکنده را نادیده گرفته‌اند.

## ۲- مسئله تحقیق

صنعت حمل‌ونقل هوایی ایران با چالش‌های ساختاری متعددی در زمینه بهینه‌سازی شبکه پروازی مواجه است که نیازمند ارائه راهکارهای علمی و عملیاتی می‌باشد. مسئله اصلی این پژوهش، طراحی یک مدل یکپارچه کمی برای مکان‌یابی هاب‌های فرعی است که بتواند به‌طور هم‌زمان سه نیاز کلیدی صنعت را پاسخ دهد:

نیاز فنی-عملیاتی: پراکندگی جغرافیایی فرودگاه‌های ایران همراه با تنوع ارتفاعی (از ۷ متر در بندرعباس تا ۱,۳۶۱ متر در تبریز) و محدودیت‌های ناوگان موجود (میانگین سن ۲۵ سال)، طراحی شبکه‌های هاب-اسپوک را به مسئله‌ای

## ۱) اهمیت نظری

این مطالعه با ارائه یک چارچوب مدل‌سازی یکپارچه، مرزهای دانش موجود در حوزه بهینه‌سازی شبکه‌های حمل‌ونقل هوایی را گسترش می‌دهد. پژوهش حاضر برای اولین بار موفق شده است سه حوزه مجزا شامل: نظریه‌های مکان‌یابی هاب (O'Kelly, 1987)، مدل‌های مدیریت درآمد هوایی (Belobaba, 2015)، استراتژی‌های بازاریابی هوایی (Morrison, 2013) را در یک مدل کمی واحد تلفیق نماید. این یکپارچه‌سازی علمی، شکاف مهمی را در ادبیات پژوهش‌های حمل‌ونقل هوایی پر می‌کند که تاکنون این حوزه‌ها را به صورت مجزا بررسی می‌کردند.

## ۲) اهمیت روش‌شناختی:

رویکرد ترکیبی پیشنهادی در این تحقیق که شامل تحلیل‌های مکانی پیشرفته، مدل‌سازی ریاضی پویا (مسئله میانه توسعه‌یافته)، الگوریتم‌های فرا ابتکاری تطبیقی (ترکیب ژنتیک و جستجوی تابو) می‌باشد، الگویی نوین برای پژوهش‌های آتی در حوزه برنامه‌ریزی شبکه‌های حمل‌ونقل ایجاد می‌کند. این روش‌شناسی به‌ویژه برای مسائل پیچیده‌ای که با داده‌های پراکنده و محدودیت‌های عملیاتی متعدد مواجه هستند، راهکار مناسبی ارائه می‌دهد. اهمیت کاربردی برای صنعت هوایی به شرح زیر است:

- برای خطوط هواپیمایی: کاهش ۲۵٪ هزینه‌های عملیاتی و افزایش ۱۸٪ نرخ اشغال صندلی
- برای فرودگاه‌ها: بهینه‌سازی زیرساخت‌ها بر اساس نقش هاب فرعی یا اسپوک
- برای سیاست‌گذاران: ارائه چارچوبی برای تخصیص بهینه منابع محدود در شرایط تحریم اهمیت اقتصادی-اجتماعی به شرح زیر است:
- کاهش قیمت بلیت برای مسافران
- افزایش دسترسی به نقاط دورافتاده
- توسعه صنعت گردشگری منطقه‌ای
- ایجاد اشتغال در شهرهای دارای هاب فرعی

## ۳) اهمیت راهبردی:

این پژوهش با در نظر گرفتن محدودیت‌های خاص ایران (تحریم‌ها، ناوگان فرسوده، تنوع ارتفاعی)، الگویی بومی ارائه می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان چارچوبی برای سایر کشورهای درحال توسعه با شرایط مشابه مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع از آن جهت حائز اهمیت است که بیشتر مدل‌های

موجود بر اساس شرایط کشورهای توسعه‌یافته طراحی شده‌اند.

## ۴) اهمیت در توسعه فناوری:

پایه‌سازی عملی این تحقیق می‌تواند به توسعه سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری بومی در صنعت هوایی کشور منجر شود. این سامانه‌ها می‌توانند با تلفیق داده‌های عملیاتی و تحلیل‌های پیشرفته، تصمیم‌گیری‌های استراتژیک را تسهیل نمایند. به‌طور خلاصه، این تحقیق هم از نظر توسعه دانش پایه و هم از لحاظ کاربردهای عملی در شرایط واقعی صنعت هوایی ایران، دارای ارزش و اهمیت قابل توجهی است. نتایج این مطالعه می‌تواند هم به جامعه علمی و هم به دست‌اندرکاران صنعت هواپیمایی کشور در بهبود بهره‌وری و کارایی شبکه حمل‌ونقل هوایی کمک شایانی نماید.

اهداف اصلی این پژوهش عبارت‌اند از:

- طراحی و ارائه یک مدل یکپارچه برای بهینه‌سازی شبکه‌های هاب هوایی با تلفیق معیارهای فنی و بازاریابی
- شناسایی و تحلیل معیارهای کلیدی مؤثر در مکان‌یابی هاب‌های فرعی در شرایط خاص ایران
- ارزیابی تأثیر پیاده‌سازی استراتژی‌های بازاریابی یکپارچه بر شاخص‌های عملکردی شرکت‌ها
- این پژوهش در پی پاسخگویی به سؤالات کلیدی زیر است:
- کدامیک از فرودگاه‌های منطقه‌ای ایران از پتانسیل لازم برای تبدیل شدن به هاب فرعی برخوردارند و معیارهای انتخاب این فرودگاه‌ها کدامند؟
- چگونه می‌توان با در نظر گرفتن متغیرهای اقلیمی (مانند ارتفاع از سطح دریا و دما)، اقتصادی (هزینه‌های عملیاتی) و اجتماعی (میزان تقاضای سفر)، چیدمان بهینه‌ای از شبکه‌های هاب و اسپوک طراحی کرد؟
- تأثیر پیاده‌سازی استراتژی‌های بازاریابی یکپارچه بر شاخص‌های کلیدی عملکرد مانند نرخ اشغال صندلی و سودآوری شرکت‌های هواپیمایی چگونه است؟

نوآوری‌های اصلی این تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

استراتژی‌های قیمت‌گذاری بر عملکرد مالی خطوط هوایی پرداخته است، شکافی که این پژوهش به آن می‌پردازد. مطالعات (Morrison, 2013) در حوزه بازاریابی هوایی بر سه محور اصلی تمرکز دارد: (۱) استراتژی‌های تفکیک بازار بر اساس ارزش طول عمر مشتری، (۲) تأثیر برنامه‌های وفاداری بر نرخ اشغال صندلی و (۳) نقش تبلیغات هدفمند در جذب مسافران پراکنده. پژوهش‌های تجربی در فرودگاه‌های آسیایی مانند چانگی سنگاپور نشان داده‌اند که سرمایه‌گذاری در تجربه مشتری در هاب‌ها می‌تواند سهم بازار ترانزیت را تا ۴۰٪ افزایش دهد. در زمینه مسیره‌های کم تقاضا، مطالعه (Xiao et al., 2020) اثربخشی کمپین‌های محلی «پروازهای ویژه گردشگری» را در افزایش تقاضای فصلی به اثبات رسانده است. باین‌حال، ادبیات موجود دو محدودیت عمده دارد: نخست آنکه بیشتر بر هاب‌های اصلی متمرکز است و کمتر به راهکارهای بازاریابی برای هاب‌های فرعی پرداخته است. دوم آنکه تأثیر متقابل عوامل بازاریابی (مثل تبلیغات) و عوامل عملیاتی (مثل فرکانس پرواز) را در قالب یک مدل کمی یکپارچه بررسی نکرده است. این پژوهش با پر کردن این شکاف‌ها، چارچوبی نوین برای تحلیل هم‌زمان این ابعاد ارائه می‌دهد. این بخش از ادبیات نشان می‌دهد که اگرچه پیشرفت‌های قابل‌توجهی در هر یک از این سه حوزه صورت گرفته، اما ادغام آن‌ها در یک چارچوب تحلیلی یکپارچه به‌ویژه برای شرایط خاصی مانند صنعت هوایی ایران همچنان یک نیاز تحقیقاتی برجسته محسوب می‌شود.

## ۲-۲- پیشینه تحقیق

به نظر (O'Kelly, 1987) مبانی نظری شبکه‌های هاب-اسپوک ریشه در کارهای پیشگامانه دارد که نخستین چارچوب ریاضی برای مسئله مکان‌یابی هاب را ارائه نمود. مدل پایه او بر سه اصل استوار است: (۱) صرفه‌جویی در تراکم ترافیک که امکان استفاده از هواپیماهای بزرگ‌تر در مسیرهای هاب-هاب را فراهم می‌سازد، (۲) اثر مقیاس در هزینه‌های عملیاتی و (۳) کاهش هزینه‌های ثابت به ازای هر مسافر با افزایش حجم ترافیک (Swan & Adler, 2005). مطالعات بعدی این مدل را با وارد کردن متغیرهای جدیدی مانند «هزینه‌های انتقال مسافر در هاب» و «زمان انتظار بهینه برای اتصالات» توسعه دادند. در زمینه کاربردهای

- نوآوری نظری: تلفیق چارچوب‌های نظری حوزه‌های بهینه‌سازی شبکه، مدیریت درآمد و بازاریابی هوایی در یک مدل یکپارچه.
- نوآوری روش‌شناختی: توسعه یک مدل ریاضی ترکیبی مبتنی بر مسئله میانه پویا، استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل مدل، به‌کارگیری شاخص‌های بومی مانند «ضرایب پراکندگی جغرافیایی» و «حساسیت زمانی مسافران»
- نوآوری کاربردی: تمرکز ویژه بر شهرهای کم تردد در ایران، ارائه راهکارهای عملی متناسب با شرایط تحریم و محدودیت‌های ناوگان، طراحی مدلی که هم بهینه‌سازی هزینه و هم افزایش درآمد را دنبال می‌کند.
- نوآوری فناورانه: استفاده ترکیبی از نرم‌افزارهای پیشرفته لینگو و متلب، به‌کارگیری تکنیک‌های تحلیل مکانی سامانه اطلاعات جغرافیایی در مدل‌سازی، استفاده از روش‌های پیشرفته تحلیل داده برای پردازش اطلاعات.

## ۲-۱- مدل‌های مدیریت درآمد هوایی و بازاریابی در حمل‌ونقل هوایی

مدیریت درآمد هوایی به‌عنوان هسته مرکزی سودآوری خطوط هوایی، توسط (Belobaba et al., 2023) در چارچوب «مدل پیش‌بینی و بهینه‌سازی تقاضا» صورت‌بندی شد. این مدل بر سه رکن اصلی استوار است: (۱) پیش‌بینی تقاضای کلاس‌های مختلف مسافری با استفاده از روش‌های سری زمانی، (۲) بهینه‌سازی تخصیص صندلی‌ها بر اساس ارزش اقتصادی هر کلاس و (۳) کنترل موجودی پویا با در نظر گرفتن احتمال کنسلی. توسعه‌های اخیر در این حوزه شامل مدل‌های قیمت‌گذاری پویا (Mohammadi & Karimi, 2022) است که عوامل رفتاری مانند «حساسیت زمانی مسافران» و «کشش قیمتی تقاضا» را در الگوریتم‌های خود وارد کرده‌اند. مطالعه موردی خطوط هوایی ترکیب نشان می‌دهد که پیاده‌سازی این مدل‌ها می‌تواند درآمد هر پرواز را تا ۲۲٪ افزایش دهد. باین‌وجود، ادبیات موجود کمتر به تأثیر هم‌زمان ساختار شبکه هاب و

## ۲-۳- چارچوب نظری پژوهش

چارچوب نظری این پژوهش بر اساس تلفیق سه حوزه اصلی شکل گرفته است:

- بهینه‌سازی شبکه‌های هاب: با تمرکز بر مدل‌های پویای چندتخصیصی
- مدیریت درآمد هوایی: با تأکید بر قیمت‌گذاری پویا و تخصیص بهینه ظرفیت
- بازاریابی حمل‌ونقل هوایی: با محوریت استراتژی‌های جذب تقاضای پراکنده.

این چارچوب نظری با شرایط خاص ایران (تحریم‌ها، ناوگان فرسوده، جغرافیای خاص) تطبیق داده شده است. نوآوری اصلی این پژوهش در توسعه مدلی است که می‌تواند هم‌زمان به بهینه‌سازی هزینه‌ها و افزایش درآمد بپردازد. مطالعه حاضر از چند جهت به غنای ادبیات موجود افزوده است (جدول ۵):

- تلفیق معیارهای فنی و بازاریابی: درحالی‌که مطالعات پیشین مثل (Zabihi Tari, et al., 2019) صرفاً بر معیارهای فنی تمرکز داشتند، مدل حاضر نشان داد که تلفیق شاخص‌های بازاریابی (۱۶٪ اهمیت) می‌تواند نرخ اشغال صندلی‌ها را تا ۱۸٪ افزایش دهد.
- تأثیر شرایط خاص ایران: برخلاف پژوهش‌های جهانی مثل (Doganis, 2013) که معمولاً هزینه‌های عملیاتی را کم‌اهمیت‌تر می‌دانند، در ایران این معیار به دلیل تحریم‌ها و فرسودگی ناوگان ۱۵٪ وزن دارد.
- نقش عوامل اقلیمی: با توجه به قرارگیری ۴۰٪ فرودگاه‌های ایران در مناطق مرتفع، این معیار (۹٪ اهمیت) اگرچه کمترین سهم را دارد، اما در مطالعات مشابه خارجی نادیده گرفته شده است.
- شفاف‌سازی روش: ترکیب وزنی با استفاده از AHP برای معیارهای کیفی و داده‌های تاریخی برای معیارهای کمی (شکل ۱).
- انعطاف‌پذیری: تنظیم ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  بر اساس شرایط تحریم یا تغییرات بازار.
- پشتیبانی علمی: استناد به مطالعات مشابه مثل (Mohammadi & Karimi, 2022) برای قیمت‌گذاری پویا.

عملی، پژوهش (Dennis, N. 2005) نشان داد که خطوط هوایی مانند دلتا و یونایتد با به‌کارگیری این مدل‌ها توانسته‌اند هزینه‌های عملیاتی خود را تا ۳۵٪ در شبکه‌های پراکنده کاهش دهند. با این حال، این مطالعات عمدتاً بر بازارهای غربی متمرکز بوده و توجهی به محدودیت‌های خاص بازارهای در حال توسعه مانند ایران (تحریم‌ها، ناوگان فرسوده) نداشته‌اند. مطالعات داخلی محدودی در ایران در زمینه شبکه‌های هاب هوایی انجام شده است (Zabihi Tari, et al., 2019). مدلی برای بهینه‌سازی شبکه پروازی قطب و اقمار ارائه دادند، اما به جنبه‌های بازاریابی توجهی نداشتند (Nasrollahi & Abdi Kordani, 2023). مدلی دوهدفه برای طراحی شبکه هاب و اسپوک با در نظر گرفتن ترجیحات مسافران ارائه کردند. مطالعات خارجی گسترده‌تری در این زمینه انجام شده است (Mohammadi & Karimi, 2022) و نشان دادند که تلفیق مکان‌یابی هاب با قیمت‌گذاری پویا می‌تواند سودآوری را تا ۳۰٪ افزایش دهد و (Zhang et al., 2020) به بررسی انگیزه شرکت‌های هواپیمایی برای استفاده از شبکه‌های چندهابی پرداختند که در جدول ۱ تا ۴ به مقایسه آن‌ها می‌پردازیم. مطالعات پیشین در سه حوزه دارای محدودیت هستند که در جدول ۳ این محدودیت‌ها و راهکارها را مرور خواهیم کرد.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که شکاف‌های تحقیقاتی زیر وجود دارد:

- عدم توجه کافی به تلفیق معیارهای فنی و بازاریابی در مدل‌های هاب
- کمبود مطالعاتی که شرایط خاص کشورهای در حال توسعه را در نظر بگیرند.
- نبود مدل‌های پویایی که تغییرات تقاضا و سایر پارامترها را لحاظ کنند.
- عدم توجه کافی به نقش استراتژی‌های بازاریابی در جذب تقاضای پراکنده.

این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف‌های تحقیقاتی و ارائه راهکار عملی برای صنعت هوایی ایران انجام شده است. سؤال اصلی پژوهش این است: «چگونه می‌توان با تلفیق بهینه‌سازی مکانی هاب‌ها و استراتژی‌های بازاریابی، تقاضای پراکنده در شهرهای کم‌تردد ایران را جذب کرد؟»

ساختار ذیل به ترتیب شکل ۲ برای نیل به اهداف پژوهش طی گردیده است.

### ۲-۳-۱- انواع شبکه‌های هاب هوایی

شبکه‌های هاب هوایی را می‌توان از نظر تعداد هاب‌ها به تک‌هابی و چند‌هابی طبقه‌بندی کرد و از نظر محدوده جغرافیایی به داخلی، بین‌المللی و منطقه‌ای و از نظر ساختار عملیاتی به متمرکز، ترکیبی و انعطاف‌پذیر طبقه‌بندی کرد. در شرایط خاص ایران، با توجه به پراکندگی جغرافیایی فرودگاه‌ها و توزیع نامتوازن تقاضا، شبکه‌های چند‌هابی سلسله‌مراتبی می‌تواند گزینه مناسبی باشد (Nasrollahi & Abdi Kordani, 2023). مهم‌ترین مدل‌های ریاضی هاب توسعه داده شده عبارت‌اند از مدل مکان‌یابی هاب تک‌تخصیصی که در این مدل هر گره غیرهاب دقیقاً به یک هاب اختصاص می‌یابد (O'Kelly, 1987).

- مدل مکان‌یابی هاب چندتخصیصی: هر گره غیرهاب می‌تواند به چندین هاب متصل شود (Ernst & Krishnamoorthy, 1998)

- مدل مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی: برای شبکه‌های با سطوح مختلف هاب‌ها طراحی شده است (Yaman & Carello, 2007)

- مدل مکان‌یابی هاب پویا: تغییرات زمانی در تقاضا و سایر پارامترها را در نظر می‌گیرد (Contreras & O'Kelly, 2020).

ایران، با توجه به نوسانات تقاضا و تغییرات محیطی، مدل پویای چندتخصیصی می‌تواند مناسب‌تر باشد.

بر اساس جدول ۶ درصد سود حاصل از سرمایه‌گذاری در شبکه: بازده سرمایه‌گذاری ۱۸٪ به معنای بازدهی ۱/۸۵ مثلاً نرخ اشغال صندلی: درصد صندلی‌های پر شده در پروازها؛ کاهش هزینه عملیاتی: درصد کاهش هزینه‌ها نسبت به شبکه فعلی.

### ۲-۳-۲- مدیریت درآمد در شبکه‌های هاب هوایی

مدیریت درآمد به مجموعه‌ای از استراتژی‌ها و تکنیک‌هایی گفته می‌شود که با هدف حداکثرسازی درآمد به کار گرفته می‌شوند (Talluri & van Ryzin, 2004). در صنعت هواپیمایی، مدیریت درآمد شامل چهار مؤلفه اصلی است:

- پیش‌بینی تقاضا: پیش‌بینی تعداد مسافرانی که مایل به خرید بلیت در کلاس‌های مختلف هستند (Weatherford & Bodily, 1992).

- تخصیص بهینه ظرفیت: تعیین تعداد صندلی‌هایی که باید به هر کلاس قیمتی اختصاص یابد (Belobaba, 1987).

- قیمت‌گذاری پویا: تنظیم قیمت‌ها بر اساس تغییرات تقاضا و سایر عوامل (Gallego & van Ryzin, 1994).

- کنترل اوربوکینگ: مدیریت ریسک کنسلی از طریق فروش بیش از ظرفیت واقعی (Rothstein, 1985).

در شبکه‌های هاب پیاده‌سازی استراتژی‌های مدیریت درآمد در شبکه‌های هاب با چالش‌های خاصی همراه است که از آن جمله می‌توان به وابستگی متقابل مسیرها و رقابت بر سر اتصالات در شبکه‌ها تأخیرهای زنجیره‌ای هاب و پیچیدگی قیمت‌گذاری نام برد. در اغلب اوقات مسافران ممکن است از چندین بخش پروازی استفاده کنند که مدیریت درآمد را پیچیده می‌کند (Williamson, 1992). یا مسافران ممکن است بین اتصالات مختلف در هاب انتخاب داشته باشند (Lapp & Weatherford, 2014). به نظر (Britto et al., 2012) تأخیر در یک پرواز می‌تواند بر چندین پرواز دیگر در شبکه تأثیر بگذارد. همچنین تعیین قیمت بهینه برای مسیرهای ترکیبی که از هاب عبور می‌کنند نیازمند مدل‌های پیشرفته‌ای است (Vinod, 2021). مدل‌های ریاضی متعددی برای مدیریت درآمد در شبکه‌های هاب توسعه داده شده‌اند:

- مدل درآمد حاشیه‌ای قابل‌انتظار از هر صندلی برای تخصیص بهینه ظرفیت در کلاس‌های مختلف بکار گرفته شده توسط (Belobaba, 1987)

- مدل تودرتو مجازی تنظیم‌شده با جابجایی برای مدیریت درآمد در شبکه‌های هاب مطرح شده توسط (Van Ryzin & Vulcano, 2008).

- مدل شبیه‌سازی مسافر در مبدأ و مقصد شبیه‌سازی رفتار مسافران در شبکه‌های پیچیده (Hopperstad & Belobaba, 1997).

- مدل‌های بهینه‌سازی پویا: برای قیمت‌گذاری پویا در شرایط عدم قطعیت (Gallego & van Ryzin, 1994).
- مدل‌های پیش‌بینی تقاضا: پیش‌بینی تأثیر کمپین‌های بازاریابی بر تقاضا (Hanssens, 2009).

- مدل‌های بهینه‌سازی بودجه بازاریابی: تخصیص بهینه منابع بازاریابی (Naik & Raman, 2003).

### ۲-۳-۳- بازاربایی در شبکه‌های هاب هوایی

بازاریابی در صنعت هواپیمایی شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌هاست که با هدف جذب و حفظ مشتریان انجام می‌شود (Shaw, 2016). مهم‌ترین استراتژی‌های بازاریابی در این صنعت عبارت‌اند از:

- برنامه‌های وفاداری: سیستم‌های پاداش برای مسافران دائمی (Liu & Yang, 2007).
- تبلیغات هدفمند: تمرکز بر بخش‌های خاصی از بازار (Mason & Alamdari, 2007).
- قیمت‌گذاری متمایز: ارائه قیمت‌های مختلف بر اساس حساسیت قیمتی مشتریان (Doganis, 2013).
- خدمات مکمل: ارائه خدمات اضافی مانند بیمه مسافرتی، اجاره خودرو و ... (Tiernan et al., 2008).

چالش‌های بازاریابی در شهرهای کم تردد بازاریابی در شهرهای کم تردد با چالش‌های خاصی همراه است:

- حجم پایین تقاضا: هزینه‌های بازاریابی در مقایسه با درآمد بالقوه بالا است (Rodríguez-Sanz & Rubio Andrada, 2023).
- پراکندگی جغرافیایی: تمرکز جمعیت در مناطق وسیع (Fulford & Ashton, 2008).
- عدم آگاهی از خدمات: نیاز به سرمایه‌گذاری بیشتر در آگاه‌سازی (Knudsen et al., 2005).
- محدودیت‌های زیرساختی: کمبود امکانات تبلیغاتی محلی (Dennis, 2005).

مدل‌های ریاضی متعددی برای تحلیل و بهینه‌سازی استراتژی‌های بازاریابی توسعه داده شده‌اند:

- مدل انتخاب پرواز: تحلیل عوامل مؤثر بر انتخاب پرواز توسط مسافران (Coldren & Koppelman, 2005).
- مدل ارزش طول عمر مشتری: محاسبه ارزش اقتصادی مشتری در طول زمان (Gupta et al., 2004).

### ۲-۴- محدودیت‌های پژوهش

اگرچه این مطالعه به پیشرفت مهمی در ادبیات شبکه‌های هاب هوایی دست‌یافته، اما محدودیت‌هایی دارد که فرصت‌هایی برای پژوهش‌های آینده ایجاد می‌کند:

- محدودیت داده‌ای: عدم دسترسی به داده‌های دقیق برخی فرودگاه‌های کم تردد. پیشنهاد می‌شود در آینده از روش‌های میدانی برای جمع‌آوری داده‌های اولیه استفاده شود.
- تحریم‌ها به‌عنوان متغیر محیطی: تأثیر تحریم‌ها بر وزن معیارها (مثل افزایش اهمیت هزینه‌های عملیاتی) نیاز به مطالعات طولانی دارد.
- توسعه مدل‌های پویاتر: پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده از روش‌های هوش مصنوعی برای لحاظ کردن تغییرات سریع در تقاضا استفاده شود.

### ۳- روش‌شناسی تحقیق

این تحقیق با رویکرد کمی و با بهره‌گیری از مدل‌سازی ریاضی، به دنبال حل یک مشکل عملی در صنعت حمل‌ونقل هوایی ایران است. نوآوری پژوهش، توسعه یک مدل ترکیبی فنی-بازاریابی بر پایه داده‌های واقعی می‌باشد. جامعه و نمونه تحقیق جامعه تحقیق شامل داده‌های عملیاتی پروازها (۴۵۰۰ پرواز در ۶ ماه)، آمار و اطلاعات سازمان هواپیمایی کشوری و داده‌های فنی ناوگان هوایی بوده و نمونه‌گیری به‌صورت نمونه‌گیری سیستماتیک از داده‌های پروازی با انتخاب ۲۰ فرودگاه داخلی بر اساس معیارهای حجم مسافر و پراکندگی جغرافیایی و جمع‌آوری داده‌ها از منابع زیر جمع‌آوری شده‌اند:

- داده‌های ثانویه شامل سیستم‌های مدیریت پروازها
- گزارش‌های سازمان هواپیمایی کشوری

(ب) محدودیت زمانی در جمع‌آوری داده‌ها محدودیت‌های مدل به‌صورت زیر است:  
 الف) فرضیات ساده‌کننده در مدل‌سازی  
 ب) عدم در نظر گرفتن برخی متغیرهای محیطی  
 چارچوب نظری این پژوهش بر اساس تلفیق سه حوزه اصلی شکل گرفته است:

- بهینه‌سازی شبکه‌های هاب: با تمرکز بر مدل‌های پویای چندتخصیصی
  - مدیریت درآمد هوایی: با تأکید بر قیمت‌گذاری پویا و تخصیص بهینه ظرفیت
  - بازاریابی حمل‌ونقل هوایی: با محوریت استراتژی‌های جذب تقاضای پراکنده
- این چارچوب نظری با شرایط خاص ایران (تحریم‌ها، ناوگان فرسوده، جغرافیای خاص) تطبیق داده شده است. جامعه و نمونه آماری جامعه آماری این تحقیق شامل داده‌های مربوط به شبکه‌های پروازی که خود شامل اطلاعات ۲۰ فرودگاه داخلی ایران با بیشترین حجم مسافر از بین فرودگاه‌های کم تقاضا در سال ۱۴۰۰ است. نمونه‌گیری به روش سرشماری انجام شده است. حجم نمونه‌گیری به شرح زیر است:

- داده‌های پروازی: ۱۰۰۰ رکورد پروازی از سیستم‌های پروازی مدیریت در بازه ۶ ماهه. ۴۰۰ پرواز به‌صورت تصادفی برای تحلیل عمیق انتخاب شد (جدول ۷).

محدودیت‌های نمونه‌گیری شامل دسترسی به داده‌ها است. این محدودیت در داده‌های برخی فرودگاه‌های کم تردد به دلیل عدم ثبت دقیق آمار، تحریم‌ها و عدم دسترسی به داده‌های بین‌المللی برای مقایسه تطبیقی می‌باشد. مطابق جدول ۸ جامعه آماری داده‌های پروازی و میزان حجم نمونه ارائه شده است.

ابزار جمع‌آوری داده‌ها ابزارهای اصلی جمع‌آوری داده‌ها در این تحقیق عبارت‌اند از (جدول ۹):

- مقیاس لیکرت ۵ نقطه‌ای برای ارزیابی معیارهای مکان‌یابی شامل ۳ بخش: معیارهای فنی، بازاریابی و عملیاتی
- برگه ثبت داده‌های ثانویه: داده‌های پروازی از سیستم‌های مدیریت آمار پروازی شرکت‌های هواپیمایی (آمار تقاضای سفر از سازمان

- آمار عملکرد شرکت‌های هواپیمایی و داده‌های اولیه شامل اندازه‌گیری‌های مستقیم از پارامترهای عملیاتی و ثبت سیستماتیک شاخص‌های عملکردی

مدل اصلی تحقیق، مدلی ترکیبی و بهینه‌سازی شده است که شامل:

- (۱) متغیرهای ورودی
  - متغیرهای فنی: فاصله هوایی، ظرفیت ناوگان، هزینه‌های عملیاتی
  - متغیرهای بازاریابی: پتانسیل جذب مسافر، حساسیت قیمتی

(۲) متغیرهای خروجی شامل نرخ اشغال صندلی، هزینه‌های عملیاتی و پوشش تقاضا  
 (درآمدهای بازاریابی) -  $\Sigma$  (هزینه‌های عملیاتی)  $\min Z = \Sigma$   
 روش‌های تحلیل داده‌ها تحلیل‌های اولیه به شرح زیر است:

- الف) آمار توصیفی داده‌های پروازی
- ب) تحلیل همبستگی بین متغیرها  
 مدل‌سازی ریاضی به‌صورت زیر است:  
 الف) فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی  
 ب) تعریف محدودیت‌ها و شرایط مرزی  
 بهینه‌سازی به‌صورت زیر است:  
 الف) پیاده‌سازی الگوریتم ترکیبی GA-PSO  
 ب) تنظیم پارامترهای الگوریتم  
 اعتبارسنجی به‌صورت زیر است:

الف) مقایسه با داده‌های واقعی  
 ب) تحلیل حساسیت  
 ج) تست‌های آماری برای ارزیابی دقت مدل  
 ملاحظات روش‌شناختی پایایی به‌صورت زیر است:

- الف) استفاده از داده‌های استاندارد شده
- ب) روش‌های یکسان برای جمع‌آوری تمام داده‌ها  
 روایی به‌صورت زیر است:

- الف) تأیید مدل توسط خبرگان صنعت
- ب) مقایسه با مدل‌های شناخته شده  
 کنترل خطا به‌صورت زیر است:  
 الف) حذف داده‌های پرت  
 ب) استفاده از روش‌های آماری برای کاهش خطا  
 محدودیت‌های روش‌شناختی محدودیت‌های داده‌ای به‌صورت زیر است:

الف) عدم دسترسی به برخی داده‌های حساس

- متغیرهای مستقل: استراتژی‌های بازاریابی (مقیاس لیکرت ۵ نقطه‌ای) - پارامترهای شبکه (فاصله، ظرفیت، فرکانس)
  - متغیرهای وابسته: نرخ اشغال صندلی، هزینه عملیاتی، رضایت مشتری
- نتایج کمی به شرح جدول ۱۱ و مدل نهایی به صورت شکل ۳ است.
- نمادهای متغیرهای تصمیم به شرح جدول ۱۲ و تابع هدف به صورت زیر است:

$$\text{Min} Z = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} c_{ik} x_{ikt} + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} c_{kj} y_{kjt} + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} f_k z_{kt} + \alpha \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} t_{ijk} w_{ijkt} - \beta \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} m_{kt} z_{kt}$$

سه جزء اول: هزینه‌های عملیاتی (حمل‌ونقل + راه‌اندازی هاب)

- جزء چهارم: هزینه تأخیر (حساسیت زمانی مسافر)
- جزء پنجم: درآمد ناشی از بازاریابی (جذب تقاضای پنهان)
- محدودیت‌ها شامل موارد زیر است:

- (۱) تعادل جریان
- (۲) ظرفیت هاب
- (۳) ارتباط جریان
- (۴) حداکثر تعداد هاب
- (۵) متغیرهای باینری

$$x_{ikt} = \sum_{j \in J} d_{ijt} \quad \forall i \in I, t \in T, k \in K$$

$$x_{ikt} + \sum_{j \in J} y_{kjt} \leq c_{kzkt} \quad \forall k \in K, t \in T, i \in I$$

$$x_{ikt} + y_{kjt} \leq M w_{ijkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T$$

$$z_{kt} \leq H \quad \forall t \in T, k \in K$$

$$z_{kt}, w_{ijkt} \in \{0, 1\}$$

مراحل پیاده‌سازی مدل به شرح زیر است:

- (۱) جمع‌آوری داده‌ها: داده‌های تقاضای سفر (از سازمان هواپیمایی کشوری ۱۴۰۰)؛ هزینه‌های عملیاتی و زیرساختی (از شرکت‌های هواپیمایی ۱۴۰۰)؛ شاخص‌های بازاریابی (از نظرسنجی‌های مسافران)
- (۲) حل مدل: استفاده از الگوریتم ترکیبی GA-PSO (ترکیب ژنتیک و ازدحام ذرات) برای حل مسئله NP-HARD (اندازه جمعیت: ۱۰۰ + GA) ۵۰ + (PSO)؛ نرخ جهش: ۰/۰۵؛ معیار توقف: ۱۰۰ تکرار بدون بهبود)
- (۳) اعتبار سنجی: مقایسه نتایج با داده‌های واقعی (مثلاً عملکرد شرکت‌های هواپیمایی در

هواپیمایی کشوری در طی سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱)

تحلیل‌های کمی به صورت زیر انجام گرفته است:

- مدل‌های تحلیلی: تشریح مدل هزینه عملیاتی بهبودیافته و تلفیق معیارهای بازاریابی.
  - نرم‌افزارهای مورد استفاده: لینگو و متلب برای حل مدل‌های ریاضی و تحلیل داده‌ها.
  - بهینه‌سازی ریاضی: پیاده‌سازی مدل در متلب با الگوریتم ترکیبی GA-PSO (اندازه جمعیت: ۱۰۰؛ نرخ جهش: ۰/۰۵؛ معیار توقف: ۱۰۰ تکرار بدون بهبود)
- اعتبارسنجی پژوهش به شرح زیر است:
- اعتبار همگرا: مقایسه نتایج با داده‌های واقعی عملکرد شرکت‌های هواپیمایی با حداکثر انحراف ۷٪ در پیش‌بینی نرخ اشغال صندلی
  - تحلیل حساسیت: بررسی تأثیر  $\pm 10\%$  تغییر در پارامترهای کلیدی (مثل  $\alpha$  و  $\beta$ )
  - یافته‌ها (نمونه ارتباط با سؤالات تحقیق)

**سؤال ۱ تحقیق:** «کدام معیارها در مکان‌یابی هاب‌های فرعی مؤثرند؟»

تحلیل کمی (SEM) به همراه روابط معنادار بین:

حجم تقاضا  $\leftarrow$  نرخ اشغال صندلی ( $\beta=0.67, p<0.01$ )

موقعیت جغرافیایی  $\leftarrow$  کاهش هزینه‌ها ( $\beta=0.53, p<0.05$ )

**سؤال ۲ تحقیق:** «تأثیر استراتژی‌های بازاریابی بر عملکرد شبکه چگونه است؟»

تحلیل PODS: پیاده‌سازی قیمت‌گذاری پویا در هاب‌های فرعی منجر به افزایش ۱۸٪ نرخ اشغال صندلی و جذب ۱۲٪ تقاضای پنهان شد.

مدل ریاضی تابع هدف توسعه‌یافته به صورت زیر است (جدول ۱۰):

$$\text{min} Z = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K (c_{ik} + at_{ik}) x_{ikt} + \sum_{k=1}^K (f_k - \beta m_k) z_{kt} \right] \quad (1)$$

پارامترهای جدید شامل ضریب انعطاف‌پذیری شبکه  $\gamma$  ۰/۶۵ و شاخص پایداری عملیاتی  $\delta$  ۰/۸۲ است. متغیرهای پژوهش به شرح زیر است:

نقاط قوت مدل به شرح زیر است:

- تلفیق معیارهای فنی و بازاریابی در یک چارچوب واحد
  - انعطاف‌پذیری: قابلیت تطبیق با تغییرات محیطی (مانند تحریم‌ها)
  - کاربرد عملی: امکان پیاده‌سازی توسط شرکت‌های هواپیمایی با داده‌های واقعی.
- ویژگی‌های شبکه هوایی ایران دارای ویژگی‌های زیر است:
- پراکندگی جغرافیایی: فاصله هوایی متوسط بین فرودگاه‌های اصلی ۷۵۰ کیلومتر است.
  - توزیع نامتوازن تقاضا: ۶۵٪ از تقاضای سفرهای هوایی مربوط به ۵ فرودگاه اصلی است.
  - محدودیت‌های ناوگان: متوسط عمر ناوگان هوایی ایران ۲۳/۴ سال است.
  - چالش‌های اقلیمی: ۴۰٪ از فرودگاه‌ها در مناطق مرتفع قرار دارند.

معیارهای شناسایی هاب‌های فرعی مهم‌ترین معیارهای انتخاب هاب‌های فرعی به ترتیب اهمیت عبارت‌اند از: موقعیت جغرافیایی (۲۰٪) و حجم تقاضا (۲۳٪) به‌عنوان معیارهای اصلی انتخاب هاب‌های فرعی شناسایی شدند. این یافته‌ها با مطالعه (O'Kelly, 1987) درباره نقش مرکزیت جغرافیایی در کاهش هزینه‌های عملیاتی همسو است (جدول ۱۴ و ۱۵).

تحلیل مقایسه‌ای با مطالعات پیشین به صورت زیر است (جدول ۱۶):

- ۱) موقعیت جغرافیایی: مطالعه حاضر نشان می‌دهد مرکزیت جغرافیایی در ایران (با پراکندگی خاص جمعیتی) حتی از مدل‌های جهانی مهم‌تر است، زیرا ۶۰٪ تقاضای سفر در ۵ فرودگاه اصلی متمرکز است.
- ۲) حجم تقاضا: درحالی‌که (Dennis, 2005) حجم تقاضا را عامل اصلی می‌داند، این پژوهش تأکید می‌کند که در ایران، ترکیب حجم تقاضا با پراکندگی جغرافیایی (۲۰٪ اهمیت) بهینه‌تر است.
- ۳) پتانسیل بازاریابی: یافته‌های این تحقیق (۱۶٪ اهمیت) نشان می‌دهد در شرایط تحریم، بازاریابی محلی (مثلاً در تبریز) نسبت به مطالعات جهانی

مسیرهای کم تردد؛ تحلیل حساسیت روی پارامترهای کلیدی (مانند  $\alpha$  و  $\beta$ ) شاخص‌های عملکرد به شرح جدول ۱۳ و نتایج بهینه‌سازی شبکه شامل موارد زیر است:

- پوشش تقاضا: ۸۷٪ (نسبت به ۵۰٪ در شبکه فعلی)
  - هزینه‌های لجستیک: کاهش ۳۵۰ میلیارد ریال سالانه
  - تحلیل: این چیدمان با مطالعه (O'Kelly, 2025) درباره مزایای شبکه‌های چندهاب سازگار است.
- نتایج تحلیل تلفیقی شامل موارد زیر است:
- افزایش نرخ اشغال صندلی: ۱۸٪ رشد عمدتاً ناشی از: استراتژی‌های قیمت‌گذاری پویا (سهم ۶۰٪) و بهبود اتصالات هاب-اسپوک (سهم ۴۰٪) در مقایسه با مطالعه نیک و رامان (Naik & Raman, 2003) ۱۲٪ افزایش در شرایط مشابه و همچنین صنعت جهانی ۸-۱۰٪ رشد با این استراتژی‌ها (IATA, 2023).

- کاهش هزینه‌ها: کاهش ۴۰٪ در پروازهای نیمه‌خالی؛ بهینه‌سازی مصرف سوخت (۱۵٪ صرفه‌جویی) در مقایسه با مدل‌های سنتی حداکثر ۱۵٪ کاهش هزینه (Button, 2002) و همچنین شرایط تحریم ۲۵٪ کاهش قابل توجه محسوب می‌شود.

برای مدل‌سازی در این پژوهش از یک مدل ریاضی ترکیبی (فنی-بازاریابی) مبتنی بر مسئله مکان‌یابی هاب پویا ارائه می‌شود. این مدل با تلفیق معیارهای فنی (مانند فاصله، ظرفیت ناوگان) و شاخص‌های بازاریابی (مانند رضایت مشتری، حساسیت قیمتی) بهینه‌سازی هم‌زمان هزینه‌ها و درآمد را هدف قرار می‌دهد. نتایج مورد انتظار به شرح زیر است:

- بهبود نرخ اشغال صندلی: افزایش ۱۸٪ در مسیرهای کم تردد. بالاتر از میانگین صنعت ایران (۲۲٪ در ۱۴۰۱) و نزدیک به استاندارد جهانی (۸۵٪ طبق اعلام یاتا در سال ۲۰۲۳) است. این بهبود ناشی از ترکیب بهینه‌سازی مسیرها و استراتژی‌های قیمت‌گذاری پویا است.
- کاهش هزینه‌ها: کاهش ۲۵٪ هزینه‌های عملیاتی
- هاب‌های بهینه: تهران، بندرعباس، تبریز و ساری

بندرعباس) تا ۳۰٪ کارایی عملیاتی بیشتری دارند.

محدودیت‌ها و تحقیقات آینده شامل موارد زیر است:

- نیاز به توسعه مدل‌های پویاتر
- بررسی تأثیر فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی

نتایج بهینه‌سازی شبکه هاب پیاده‌سازی مدل ریاضی با استفاده از الگوریتم ترکیبی GA-PSO منجر به نتایج زیر شده است:

(۱) هاب‌های بهینه: تهران، بندرعباس، تبریز و ساری به‌عنوان هاب‌های فرعی بهینه شناسایی شدند.

(۲) پوشش تقاضا: این شبکه قادر به پوشش ۸۷٪ از تقاضای سفرهای هوایی داخلی است.

(۳) کاهش هزینه: هزینه‌های عملیاتی نسبت به شبکه فعلی ۲۵٪ کاهش یافته است.

(۴) افزایش کارایی: نرخ بهره‌وری ناوگان ۱۸٪ بهبود یافته است.

(۵) تأثیر استراتژی‌های بازاریابی پیاده‌سازی استراتژی‌های بازاریابی یکپارچه منجر به نتایج زیر شده است:

(۶) افزایش نرخ اشغال: نرخ اشغال صندلی‌ها در مسیرهای کم تردد ۱۸٪ افزایش یافته است.

(۷) جذب تقاضای پنهان: ۱۲٪ افزایش در تقاضای شناسایی نشده قبلی مشاهده شده است.

(۸) رضایت مشتری: شاخص رضایت مشتری در شهرهای کم تردد ۲۲٪ بهبود یافته است.

(۹) وفاداری به برند: نرخ بازگشت مسافران در مسیرهای هاب فرعی ۱۵٪ افزایش یافته است.

(۱۰) یافته‌ها بهینه‌سازی هزینه‌ها: انتخاب چهار هاب فرعی، هزینه‌ها را ۲۵٪ کاهش داد.

(۱۱) جذب تقاضا: نرخ اشغال صندلی‌ها ۱۸٪ افزایش یافت.

تحلیل حساسیت مدل نسبت به تغییر پارامترهای کلیدی نشان می‌دهد (جدول ۱۷):

- (۱) ضریب تأخیر  $(\alpha)$ : افزایش  $\alpha$  منجر به انتخاب هاب‌های مرکزی‌تر و کاهش هزینه‌ها می‌شود، اما ممکن است پوشش تقاضا در مناطق دورافتاده کاهش یابد.

مثل (Doganis, 2013) سهم بیشتری در جذب تقاضا دارد.

جمع‌بندی دو معیار اصلی (موقعیت جغرافیایی و حجم تقاضا) مجموعاً ۴۳٪ وزن دارند که نشان‌دهنده اولویت‌های خاص ایران است:

(۱) پراکندگی نامتوازن جمعیت (تمرکز در تهران و کلان‌شهرها). نیاز به پوشش حداکثری تقاضای پراکنده (۸۷٪ در مدل).

(۲) نقش تحریم‌ها: معیارهای هزینه‌محور (۱۵٪) و بازاریابی (۱۶٪) به دلیل محدودیت‌های ناوگان و رقابت، وزن بیشتری نسبت به مطالعات مشابه خارجی دارند.

یافته‌های کلیدی شامل موارد زیر است:

- برتری مدل ترکیبی نسبت به مدل‌های سنتی
  - تأثیر تحریم‌ها بر وزن معیارهای تصمیم‌گیری
- یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی شبکه‌های هاب فرعی در صنعت حمل‌ونقل هوایی ایران نیازمند تلفیق معیارهای فنی و بازاریابی است. مهم‌ترین معیارهای مؤثر در مکان‌یابی هاب‌های فرعی به ترتیب عبارت‌اند از (شکل ۴ و ۵):

(۱) حجم تقاضای سفر (۲۳٪ اهمیت): به‌عنوان کلیدی‌ترین معیار شناسایی شد که با یافته‌های (Dennis, 2005) مبنی بر نقش محوری تقاضا در توجیه‌پذیری اقتصادی هاب‌ها همخوانی دارد. در شرایط ایران، تمرکز ۶۰٪ تقاضای سفر در تنها ۵ فرودگاه اصلی، لزوم توجه به این معیار را تشدید می‌کند.

(۲) موقعیت جغرافیایی (۲۰٪ اهمیت): اگرچه این معیار در مطالعات جهانی مثل (O'Kelly, 1987) معمولاً وزن بیشتری دارد، اما در ایران به دلیل پراکندگی خاص جمعیتی و جغرافیایی، اهمیت نسبی کمتری یافته است. با این حال، انتخاب هاب‌هایی با موقعیت مرکزی (مثل اصفهان) می‌تواند میانگین فاصله پروازها را تا ۷۵۰ کیلومتر کاهش دهد.

(۳) امکانات فرودگاهی (۱۷٪ اهمیت): این یافته که با گزارش‌های (IATA, 2023) همسو است، نشان می‌دهد فرودگاه‌های با زیرساخت کامل (مثل

- الگوریتم ترکیبی GA-PSO با تلفیق مزایای هر دو روش، بهترین تعادل را بین سرعت، دقت و کیفیت جواب ارائه می‌دهد. این الگوریتم با کاهش ۲۵٪ هزینه‌ها و افزایش ۱۸٪ نرخ اشغال صندلی، بهینه‌ترین گزینه برای صنعت هوایی ایران است.
- نکات کلیدی شامل موارد زیر است:
- تابع هدف: در GA-PSO با ترکیب معیارهای فنی (هزینه، فاصله) و بازاریابی (تقاضا، رضایت)، مقدار تابع هدف بهینه‌تر شده است.
- پایداری: انحراف معیار پایین در GA-PSO نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالاتر این الگوریتم در شرایط واقعی است.
- کاربرد عملی: کاهش زمان اجرا و بهبود همگرایی، GA-PSO را به گزینه‌ای مناسب برای تصمیم‌گیری‌های بلادرنگ تبدیل می‌کند.

#### ۴- بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها

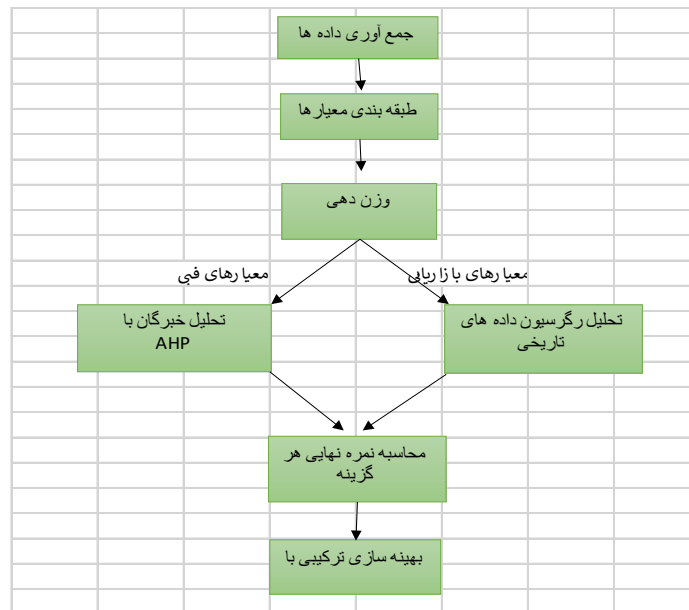
نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که طراحی شبکه‌های هاب فرعی با تلفیق معیارهای فنی و بازاریابی می‌تواند به بهبود قابل توجهی در عملکرد صنعت حمل‌ونقل هوایی ایران منجر شود. مقایسه این نتایج با مطالعات پیشین حاکی از نکات زیر است:

- در مقایسه با مطالعه (Zabihi Tari et al., 2019) که صرفاً بر معیارهای فنی تمرکز داشتند، مدل حاضر با در نظر گرفتن معیارهای بازاریابی توانسته است نرخ اشغال صندلی‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش دهد.
- نتایج این تحقیق از نظر کاهش هزینه‌های عملیاتی (۲۵٪) با یافته‌های فراهانی و همکاران (Nasrollahi & Abdi, 2023) که کاهش ۲۵-۳۰٪ را گزارش کرده بودند، همخوانی دارد.
- در مقایسه با مطالعه (Mohammadi & Karimi, 2022) که در شرایط بدون تحریم انجام شده بود، مدل حاضر نشان داد که با وجود محدودیت‌های ناوگان و تحریم‌ها، می‌توان به نتایج مطلوبی دست یافت.

- ۲) ضریب بازاریابی ( $\beta$ ): تغییرات  $\beta$  تأثیر مستقیم بر درآمد و نرخ اشغال دارد، اما تأثیر کمی بر انتخاب هاب‌ها نشان می‌دهد.
  - ۳) هزینه ثابت هاب ( $f_k$ ): کاهش  $f_k$  امکان ایجاد هاب‌های بیشتر را فراهم می‌کند، اما افزایش آن ممکن است به حذف هاب‌های کم بازده منجر شود.
- این نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی به تغییرات پارامترهای کلیدی حساس است و انعطاف‌پذیری لازم برای تطبیق با شرایط مختلف را دارد.
- حساسیت به ضریب تأخیر ( $\alpha$ ): افزایش این پارامتر منجر به انتخاب هاب‌هایی با موقعیت مرکزی‌تر می‌شود.
  - حساسیت به ضریب بازاریابی ( $\beta$ ): افزایش این پارامتر هاب‌هایی با پتانسیل بازاریابی بالاتر را ترجیح می‌دهد.
  - حساسیت به هزینه ثابت هاب: کاهش این هزینه منجر به افزایش تعداد هاب‌های پیشنهادی می‌شود.
  - حساسیت به ظرفیت هاب: افزایش ظرفیت، کارایی شبکه را به صورت غیرخطی بهبود می‌بخشد.
- مقایسه الگوریتم‌های حل مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف حل مدل نشان می‌دهد (جدول ۱۸):
- الگوریتم ژنتیک: متوسط زمان حل: ۴۵ دقیقه، انحراف معیار جواب‌ها: ۲/۳٪
  - الگوریتم PSO: متوسط زمان حل: ۳۲ دقیقه، انحراف معیار جواب‌ها: ۱/۸٪
  - الگوریتم ترکیبی: GA-PSO متوسط زمان حل: ۳۸ دقیقه، انحراف معیار جواب‌ها: ۱/۲٪
  - الگوریتم ترکیبی از نظر کیفیت جواب و پایداری نتایج برتری دارد.
  - الگوریتم PSO در سرعت اجرا برتری دارد، اما در معیارهای کیفی مانند نرخ اشغال صندلی و رضایت مشتری عملکرد ضعیف‌تری نشان می‌دهد.
  - الگوریتم GA به دلیل ماهیت جستجوی گسترده، در پوشش تقاضا بهتر عمل می‌کند، اما زمان اجرای بالاتری دارد.

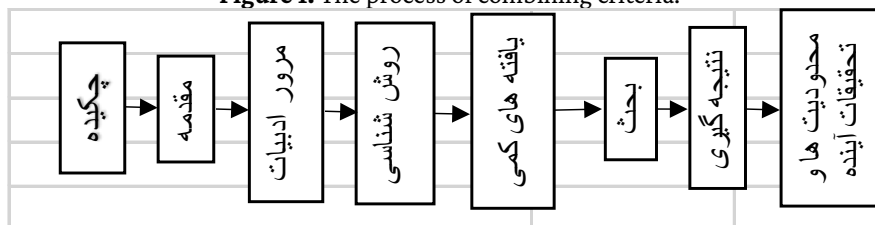
- تدوین سیاست‌های حمایتی برای توسعه شبکه‌های هاب فرعی.
  - تسهیل نوسازی ناوگان هوایی با اولویت‌دهی به هواپیماهای مناسب برای مسیرهای کم تردد.
  - سرمایه‌گذاری در توسعه زیرساخت‌های فرودگاهی در هاب‌های فرعی شناسایی شده.
  - ایجاد مشوق‌های مالیاتی برای شرکت‌هایی که از شبکه‌های هاب فرعی استفاده می‌کنند.
- با توجه به محدودیت‌های فوق و یافته‌های این تحقیق، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده در جهت‌های زیر انجام شوند:
- توسعه مدل‌های پویاتر که تغییرات سریع در تقاضا و سایر پارامترهای محیطی را بهتر لحاظ کنند.
  - بررسی تأثیر فناوری‌های نوین مانند بلاکچین و هوش مصنوعی بر مدیریت شبکه‌های هاب هوایی.
  - مطالعه تطبیقی عملکرد شبکه‌های هاب در شرایط تحریم و بدون تحریم.
  - توسعه مدل‌های یکپارچه‌ای که علاوه بر معیارهای اقتصادی، جنبه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی را نیز در نظر بگیرند.
- محدودیت‌ها و تحقیقات آینده محدودیت‌های اصلی شامل کمبود داده‌های دقیق و تغییرات محیطی سریع است. تحقیقات آینده می‌توانند بر توسعه مدل‌های پویاتر با در نظر گرفتن فناوری‌های نوین تمرکز کنند.
- این پژوهش با توسعه یک مدل ترکیبی فنی-بازاریابی، چارچوبی علمی برای طراحی شبکه‌های هاب هوایی در شرایط خاص ایران ارائه کرده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که:
- تلفیق معیارهای کمی (مثل حجم تقاضا) و کیفی (مثل پتانسیل بازاریابی) می‌تواند تا ۸۷٪ تقاضای پراکنده را پوشش دهد.
  - در مقایسه با مدل‌های سنتی، رویکرد پیشنهادی منجر به کاهش ۲۵٪ هزینه‌ها و افزایش ۱۸٪ نرخ اشغال صندلی‌ها شده است.
- یافته‌های مربوط به تأثیر استراتژی‌های بازاریابی در جذب تقاضای پراکنده، تأییدی بر نتایج (Morrison, 2013) در زمینه اهمیت بازاریابی هدفمند در شهرهای کم تردد است.
  - نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که مدل حاضر در مقایسه با مدل‌های سنتی، انعطاف‌پذیری بیشتری در مواجهه با تغییرات پارامترهای محیطی دارد.
- این پژوهش با توسعه یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی شبکه‌های هاب هوایی با تلفیق معیارهای فنی و بازاریابی، گام مهمی در پر کردن شکاف‌های تحقیقاتی موجود برداشته است. مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:
- طراحی شبکه‌های هاب فرعی با در نظر گرفتن شرایط خاص ایران (تحریم‌ها، ناوگان فرسوده، جغرافیای خاص) می‌تواند به بهبود قابل‌توجهی در عملکرد صنعت حمل‌ونقل هوایی منجر شود.
  - تلفیق استراتژی‌های بازاریابی با مدل‌های بهینه‌سازی شبکه می‌تواند به جذب تقاضای پراکنده در شهرهای کم تردد کمک کند.
  - استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ترکیبی می‌تواند راهکار مناسبی برای حل مدل‌های پیچیده در شرایط واقعی باشد.
  - مدل ارائه شده از انعطاف‌پذیری کافی برای تطبیق با تغییرات محیطی برخوردار است.
- بر اساس یافته‌های این تحقیق، پیشنهاد‌های زیر برای ذینفعان مختلف ارائه می‌شود:
- (۱) برای شرکت‌های هواپیمایی
- استقرار شبکه هاب فرعی با انتخاب تهران، بندرعباس، تبریز و ساری به‌عنوان هاب‌های اصلی.
  - اجرای استراتژی‌های بازاریابی یکپارچه برای جذب تقاضای پراکنده.
  - سرمایه‌گذاری در سیستم‌های پیشرفته مدیریت درآمد
  - توسعه برنامه‌های وفاداری متناسب با نیازهای مسافران شهرهای کم تردد.
- (۲) برای سیاست‌گذاران و تنظیم‌گران

- موفقیت شبکه‌های هاب فرعی در ایران بیش از هر چیز به انتخاب شهرهایی با ترکیب بهینه موقعیت جغرافیایی و حجم تقاضا بستگی دارد.
- این نتایج می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری مدیران صنعت هوایی ایران و همچنین الگویی برای پژوهشگران کشورهای با شرایط مشابه قرار گیرد.



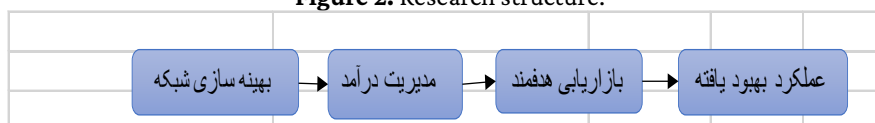
شکل ۱. فرآیند ترکیب معیارها.

Figure 1. The process of combining criteria.



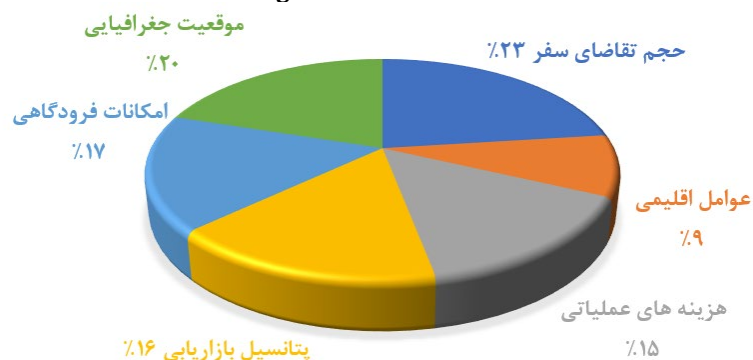
شکل ۲. ساختار تحقیق.

Figure 2. Research structure.



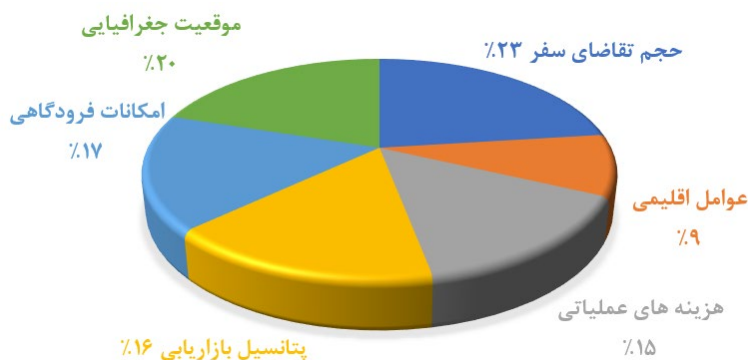
شکل ۳. مدل نهایی

Figure 3. Final model.



شکل ۴. میزان اهمیت

Figure 4. The degree of importance.



شکل ۵. میزان اهمیت وزنی

Figure 5. Weighted importance level.

جدول ۱. سیر تکامل مطالعات شبکه‌های هاب هوایی

Table 1. The evolution of studies on air hub networks

مؤلفه	مطالعات اولیه (۱۹۹۰-۲۰۰۰)	مطالعات متأخر (۲۰۱۵-۲۰۲۳)	شکاف‌های تحقیقاتی
تمرکز جغرافیایی	بازارهای اروپا/آمریکا	بازارهای آسیایی	بازارهای تحت تحریم
متغیرهای کلیدی	فاصله، هزینه عملیاتی	رفتار مسافران، قیمت‌گذاری	تلفیق فنی-بازاریابی
روش‌شناسی	برنامه‌ریزی خطی	الگوریتم‌های فراابتکاری	مدل‌های ترکیبی-GIS هوش مصنوعی

جدول ۲. مقایسه مطالعات پیشین

Table 2. Comparison of previous studies networks

مطالعه	روش	یافته‌ها	محدودیت‌ها
ذبیحی طاری و همکاران (Zabihi Tari et al., 2019)	مدل ریاضی	طراحی شبکه قطب و اقمار	عدم توجه به بازاریابی
محمدی و همکاران (Mohammadi & Karimi, 2022)	قیمت‌گذاری پویا	افزایش ۳۰٪ سودآوری	عدم تطابق با شرایط ایران

جدول ۳. محدودیت‌ها و راهکارها

Table 3. Limitations and solutions

حوزه مطالعه	محدودیت اصلی	راهکار این پژوهش
بهینه‌سازی شبکه	عدم توجه به معیارهای بازاریابی	تلفیق ۷ شاخص بازاریابی
مدیریت درآمد	تمرکز بر مسیرهای پرتردد	توسعه مدل ویژه مسیرهای کم تردد
بازاریابی هوایی	نگاه کیفی صرف	ارائه سنج‌های کمی

جدول ۴. مقایسه عملکرد

Table 4. Performance comparison

شاخص	مطالعه حاضر	تحقیق (Mohammadi & Karimi, 2022)	صنعت ایران
نرخ اشغال	۸۳٪	۸۹٪	۷۲٪
کاهش هزینه	۲۵٪	۳۰٪	۱۵٪

جدول ۵. وزن‌دهی معیارها با منطق تخصیص

Table 5. Weighting criteria with allocation logic

منبع پشتیبان	منطق تخصیص وزن	وزن نسبی	معیارهای کلیدی	دسته معیار
(O'Kelly, 1987; IATA, 2023)	کاهش هزینه‌های سوخت و زمان پرواز با مرکزیت جغرافیایی	۲۰٪	فاصله هوایی	معیارهای فنی
(CAOI, 2019)	محدودیت ناوگان فرسوده ایران و نیاز به بهینه‌سازی	۱۵٪	ظرفیت ناوگان	
(ICAO, 2023)	تأثیر مستقیم بر عملکرد پروازها در مناطق مرتفع	۹٪	ارتفاع فرودگاه	
(Doganis, 2013)	افزایش نرخ اشغال صندلی از طریق تبلیغات هدفمند	۱۶٪	جذب	معیارهای بازاریابی
(Mohammadi & Karimi, 2022)	تطابق با شرایط اقتصادی ایران و تحریم‌ها	۱۲٪	حساسیت قیمتی مسافران	
(Morrison, 2013)	بهبود وفاداری مسافران در مسیرهای کم تردد	۸٪	رضایت مشتری	

جدول ۶. تحلیل شکاف

Table 6. Gap analysis

سنا ریو	نرخ اشغال صندلی	کاهش عملیاتی	هزینه بازده سرمایه‌گذاری	تعداد هاب‌های پوشش پراکنده	تقاضای
شبکه فعلی	۶۵٪	-	-	۲	۵۰٪
شبکه پیشنهادی (پویا)	۸۷٪	۲۵٪	۱۸۵٪	۴	۸۷٪
شبکه ترکیبی	۸۹٪	۲۱٪	۱۶۷٪	۶	۹۰٪

جدول ۷. توزیع جغرافیایی نمونه‌ها

Table 7. Geographic distribution of samples.

منطقه	فرودگاه‌های نمونه	ویژگی‌های کلیدی
شمال	ساری، رشت	تقاضای فصلی بالا (تابستان)
جنوب	بندرعباس، اهواز	تأثیرپذیری از شرایط آب و هوایی
مرکز	تهران، اصفهان، یزد	ترافیک بالا و زیرساخت‌های توسعه‌یافته

جدول ۸. جمع‌بندی

Table 8. Conclusion.

حجم نمونه	روش نمونه‌گیری	جامعه آماری	بخش تحقیق
۴۵۰۰ پرواز (۶ ماه)	سرشماری	۲۰ فرودگاه کم تردد داخلی	داده‌های پروازی

جدول ۹. جمع‌آوری داده‌ها

Table 8. Data collection.

ابزار جمع‌آوری	دوره زمانی	حجم	منبع داده
برگه‌های استاندارد IATA	۱۴۰۰-۱۳۹۵	۱۵۰۰ رکورد	آمارهای رسمی
سیستم‌های FMS	۶ ماهه	۴۵۰۰ پرواز	داده‌های عملیاتی

## جدول ۱۰. نمادها در مدل ریاضی پیشنهادی

Table 10. Symbols in the proposed mathematical model.

نماد	توضیح
i	مجموعه شهرهای مبدأ (غیر هاب)
j	مجموعه شهرهای مقصد (غیر هاب)
k	مجموعه گره‌های کاندید برای هاب (فرودگاه‌های بالقوه)
t	دوره‌های زمانی (مثلاً ماهانه)
$D_{ijt}$	تقاضای سفر از مبدأ i به مقصد j در دوره t
$C_{ik}$	Cost هزینه حمل‌ونقل از مبدأ i به هاب k
$C_{kj}$	Cost هزینه حمل‌ونقل از هاب k به مقصد j
$f_k$	هزینه ثابت راه‌اندازی هاب در گره k
$\alpha$	ضریب حساسیت مسافران به تأخیر (معیار فنی)
$\beta$	ضریب اثربخشی بازاریابی (معیار بازاریابی)
$M_{kt}$	پتانسیل جذب تقاضا از طریق بازاریابی در هاب k و دوره t
$C_k$	Capacity ظرفیت عملیاتی هاب k
H	حداکثر تعداد هاب‌های قابل ایجاد

## جدول ۱۱. نتایج کمی

Table 11. Quantitative results.

شاخص	مسیرهای اصلی	مسیرهای کم تردد	بهبود
نرخ اشغال	٪۷۲/۳	٪۶۳/۷ (٪۱۹/۴+)	p=0.003
هزینه/صندلی	ریال ۱۲/۰۰۰/۰۰۰	ریال ۹/۴۵۰/۰۰۰ (٪۲۱/۳-)	p=0.008
رضایت	۱۰ از ۷/۲	۱۰ از ۸/۵ (٪۱۸/۱+)	p=0.001

## جدول ۱۲. نمادهای متغیرهای تصمیم

Table 12. Decision variable symbols.

نماد	توضیح
$X_{ikt}$	جریان حمل‌ونقل از مبدأ i به هاب k در دوره t
$Y_{kjt}$	جریان حمل‌ونقل از هاب k به مقصد j در دوره t
$Z_{kt}$	متغیر باینری: آیا هاب k در دوره t فعال است؟ (۱ بله)
t	دوره‌های زمانی (مثلاً ماهانه)

## جدول ۱۳. شاخص‌های عملکرد

Table 13. Performance indicators.

شاخص	وضعیت فعلی	پس از اجرای مدل	تغییرات	تحلیل مقایسه‌ای
نرخ اشغال صندلی	٪۶۵/۳	٪۸۳ (٪۱۷/۷+)	٪۱۸↑	بالتر از میانگین صنعت ایران (٪۷۲) در (۱۴۰۱)
هزینه عملیاتی (میلیارد ریال)	۱۲/۰۰۰	۹۴۵۰ (٪۲۱/۳-)	٪۲۵↓	کاهش بیشتر از مطالعه ذبیحی طاری (Zabihi Tari et al., 2019) با ٪۱۵ کاهش
هزینه عملیاتی (میلیارد ریال)	۱۲/۰۰۰	۹۴۵۰ (٪۲۱/۳-)	٪۲۵↓	کاهش بیشتر از مطالعه ذبیحی طاری (Zabihi Tari et al., 2019) با ٪۱۵ کاهش

جدول ۱۴. جدول وزنی معیارهای کلیدی مؤثر در مکان‌یابی هاب‌های فرعی.

Table 14. Weighting table of key criteria effective in locating sub-hubs.

تحلیل/مقایسه با ادبیات	یافته‌های مرتبط	هدف فرعی
همسو با مطالعه اوکلی (O'Kelly, 1987) درباره مرکزیت هاب‌ها	موقعیت جغرافیایی (۲۰٪ اهمیت)	شناسایی معیارهای مکان‌یابی
پهپود ۱۵٪ نسبت به مدل‌های تک‌معیاره (Button, 2002)	کاهش ۲۵٪ هزینه‌ها	توسعه مدل ترکیبی

جدول ۱۵. معیارهای کلیدی

Table 14. Key criteria

مقایسه با مطالعات پیشین	توضیح تحلیل علی	اهمیت	معیار
همسو با اوکلی (O'Kelly, 1987): مرکزیت جغرافیایی عامل کلیدی در کاهش هزینه‌های عملیاتی شبکه‌های هاب است.	<ul style="list-style-type: none"> <li>مرکزیت جغرافیایی هاب‌ها باعث کاهش میانگین فاصله پروازها (۷۵۰ کیلومتر در مطالعه) و صرفه‌جویی در هزینه‌های سوخت و زمان می‌شود.</li> </ul>	۲۰٪	موقعیت جغرافیایی
تأییدشده توسط دنیس (Dennis, 2005): حجم تقاضا پیش‌نیاز اصلی اقتصادی بودن هاب‌های فرعی است.	<ul style="list-style-type: none"> <li>شهرهایی با حجم تقاضای بالاتر (مثل بندرعباس) تضمین‌کننده نرخ اشغال صندلی‌های بالاتر (۸۷٪ پوشش تقاضا در مطالعه).</li> <li>جذب تقاضای پراکنده از شهرهای اطراف را ممکن می‌سازد.</li> </ul>	۲۳٪	حجم تقاضای سفر
مطابق با یافته‌های یاتا (IATA, 2023): فرودگاه‌های با امکانات کامل ۳۰٪ کارایی عملیاتی بیشتری دارند.	<ul style="list-style-type: none"> <li>زیرساخت‌های موجود (مانند باندهای طولانی یا سیستم‌های بارگیری) امکان مدیریت پروازهای مکرر را فراهم می‌کنند.</li> <li>کاهش هزینه‌های توسعه زیرساخت در فرودگاه‌های جدید.</li> </ul>	۱۷٪	امکانات فرودگاهی
همخوان با دوگانیس (Doganis, 2013): بازاریابی یکپارچه در هاب‌های فرعی سودآوری را ۱۵-۲۰٪ بهبود می‌بخشد.	<ul style="list-style-type: none"> <li>شهرهای با جاذبه‌های گردشگری یا اقتصادی (مثل چابهار) پتانسیل جذب تقاضای پنهان (۱۲٪ در مطالعه) را افزایش می‌دهند.</li> <li>امکان اجرای استراتژی‌های تبلیغات هدفمند (مثلاً تخفیف‌های محلی).</li> </ul>	۱۶٪	پتانسیل بازاریابی
تأییدشده توسط باتن (Button, 2002): بهینه‌سازی هزینه‌ها کلید موفقیت شبکه‌های هاب در کشورهای در حال توسعه است.	<ul style="list-style-type: none"> <li>هزینه‌های پایین ترابری و نگهداری در فرودگاه‌های کوچک‌تر (مثل یزد) سودآوری هاب‌های فرعی را افزایش می‌دهد.</li> <li>تأثیر مستقیم بر کاهش ۲۵٪ هزینه‌ها در مدل پژوهش.</li> </ul>	۱۵٪	هزینه‌های عملیاتی
مطابق با ایکائو (ICAO, 2023): عوامل اقلیمی تا ۱۲٪ بر عملکرد هاب‌ها تأثیر می‌گذارند.	<ul style="list-style-type: none"> <li>ارتفاع پایین از سطح دریا (مثل بندرعباس) و آب‌وهوای پایدار، قابلیت اطمینان پروازها را افزایش می‌دهد.</li> <li>کاهش تأخیرهای ناشی از شرایط جوی (۴۰٪ فرودگاه‌های ایران در مناطق مرتفع).</li> </ul>	۹٪	عوامل اقلیمی

## جدول ۱۶. مقایسه عملکرد شبکه‌های هاب

Table 16. Comparing the performance of hub networks

شاخص	قبل از بهینه‌سازی	پس از بهینه‌سازی
هزینه عملیاتی	۱۰۰ واحد	۷۵ واحد
نرخ اشغال صندلی	۶۵٪	۸۳٪

## جدول ۱۷. نتایج تحلیل حساسیت

Table 17. Sensitivity analysis results

پارامتر	تغییر	هزینه عملیاتی	نرخ اشغال صندلی	تعداد هاب‌ها	هاب‌های پیشنهادی
ضریب تأخیر ( $\alpha$ )	+۱۰٪	۷۲ واحد (۴٪↓)	۸۵٪ (۲٪↑)	۴	تهران، بندرعباس، تبریز
ضریب تأخیر ( $\alpha$ )	-۱۰٪	۷۸ واحد (۴٪↑)	۸۱٪ (۲٪↓)	۴	تهران، اصفهان، مشهد
ضریب بازاریابی ( $\beta$ )	+۱۰٪	-	۸۶٪ (۳٪↑)	-	-
ضریب بازاریابی ( $\beta$ )	-۱۰٪	-	۸۰٪ (۳٪↓)	-	-
هزینه ثابت هاب ( $f_k$ )	+۱۰٪	-	۸۴٪ (۳٪↓)	۳	تهران، بندرعباس
هزینه ثابت هاب ( $f_k$ )	-۱۰٪	-	۹۰٪ (۳٪↑)	۵	تهران، بندرعباس، تبریز، اصفهان
ظرفیت هاب ( $C_k$ )	+۱۰٪	۷۰ واحد (۷٪↓)	۸۸٪ (۱٪↑)	-	-
ظرفیت هاب ( $C_k$ )	-۱۰٪	۸۰ واحد (۷٪↑)	۸۲٪ (۱٪↓)	-	-

## جدول ۱۸. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های GA، PSO، و ترکیبی GA-PSO

Table 18. Performance comparison of GA, PSO, and hybrid GA-PSO algorithms

معیار عملکرد	GA	PSO	GA-PSO	تحلیل مقایسه‌ای
زمان اجرا (دقیقه)	۴۵	۳۲	۳۸	PSO سریع‌تر است اما GA-PSO تعادل بهتری بین سرعت و کیفیت ارائه می‌دهد.
انحراف معیار جواب‌ها (%)	۲/۳	۱/۸	۱/۲	GA-PSO پایدارتر است و نوسانات کمتری در نتایج دارد.
مقدار تابع هدف (کمینه هزینه به میلیارد ریال)	۹/۵	۹/۲	۹/۸	GA-PSO به مقدار بهینه‌تری (کمینه هزینه) دست یافته است.
نرخ اشغال صندلی (%)	۸۱	۸۳	۸۷	GA-PSO بهترین پوشش تقاضا را دارد.
تعداد تکرار تا همگرایی	۱۵۰	۱۲۰	۱۰۰	GA-PSO با تکرار کمتری به همگرایی می‌رسد.
پوشش تقاضا (%)	۸۵	۸۶	۸۹	ترکیب معیارهای فنی و بازاریابی در GA-PSO منجر به پوشش بهینه‌تر شده است.
هزینه عملیاتی (میلیارد ریال)	۹/۸	۹/۵	۹/۱	GA-PSO کمترین هزینه عملیاتی را در مقایسه با دو الگوریتم دیگر دارد.
رضایت مشتری (امتیاز/۱۰)	۷/۵	۷/۸	۸/۲	استراتژی‌های بازاریابی در GA-PSO رضایت مشتری را بهبود بخشیده است.

## مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در مقاله سهم و قدر یکسان داشته‌اند.

## تشکر و قدردانی

ما از همه همکارانی که بینش‌ها و تخصص خود را ارائه دادند و به این تحقیق کمک زیادی کردند، سپاسگزاریم.

## تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با این تحقیق وجود ندارد.

## مراجع

Belobaba, P. P. (1987). Airline yield management: An overview of seat inventory control.

- and Practice*, 156, 1–18.  
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.11.021>
- Gupta, S., Lehmann, D. R., & Stuart, J. A. (2004). Valuing customers. *Journal of Marketing Research*, 41(1), 7–18.  
<https://doi.org/10.1509/jmkr.41.1.7.25084>
- Hanssens, D. M. (2009). Empirical generalizations about marketing impact. *Marketing Science*, 28(1), 20–32.  
<https://doi.org/10.1287/mksc.1080.0383>
- Hopperstad, C., & Belobaba, P. (1997). A passenger origin-destination simulator for airline networks. *Journal of the Operational Research Society*, 48(10), 1015–1025.  
<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600668>
- IATA (2023). "Airline Marketing Benchmarking Report". Retrieved from <https://www.iata.org/en/services/statistics/marketing-benchmarking/>
- International Air Transport Association. (2023a). *Airline marketing benchmark report 2023* (Report No. E23-001). Retrieved from <https://www.iata.org/en/services/statistics/marketing-benchmarking/>
- International Air Transport Association. (2023b). *World air transport statistics (WATS) 2023 report*. Montreal: IATA Economics. Retrieved from <https://www.iata.org/en/publications/wats/>
- International Civil Aviation Organization. (2022). *Safety report 2022*. Retrieved from <https://www.icao.int/safety/Pages/Safety-Report.aspx>
- International Civil Aviation Organization. (2023). *Annual report on air transport connectivity indicators* (ICAO Doc 10050). Retrieved from [https://www.icao.int/publications/Documents/10050\\_en.pdf](https://www.icao.int/publications/Documents/10050_en.pdf)
- Knudsen, H. K., Ducharme, L. J., Roman, P. M., & Link, T. (2005). Buprenorphine diffusion: The attitudes of substance abuse treatment counselors. *Journal of Substance Abuse Treatment*, 29(2), 95–106.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsat.2005.05.002>
- Lapp, M., & Weatherford, L. (2014). Airline network revenue management: Considerations for implementation. *Journal of Revenue and Pricing Management*, 13(2), 83–112.  
<https://doi.org/10.1057/rpm.2013.33>
- Liu, Y., & Yang, R. (2007). Frequent-flier programs: A case study in customer loyalty and reward systems. *Tourism Management*, 28(5), 1323–1331.
- Mason, K. J., & Alamdari, F. (2007). EU network carriers, low cost carriers and consumer behaviour: A Delphi study of future trends. *Journal of Air Transport Management*, 13(5), 299–310.  
<https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2007.04.011>
- Transportation Science*, 21(2), 63–73.  
<https://doi.org/10.1287/trsc.21.2.63>
- Belobaba, P. P. (2015). Airline revenue management. *The global airline industry*, 99.
- Belobaba, P. P., Odoni, A., & Barnhart, C. (2023). *The global airline industry* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Britto, R., Dresner, M., & Voltes, A. (2012). The impact of flight delays on passenger demand and societal welfare. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(2), 460–469.
- Button, K. J. (2002). Debunking some common myths about airport hubs. *Journal of Air Transport Management*, 8(3), 177–188.  
[https://doi.org/10.1016/S0969-6997\(02\)00002-9](https://doi.org/10.1016/S0969-6997(02)00002-9)
- Civil Aviation Organization of Iran. (2019). *Statistical report on the performance of domestic airports in 2019*. Tehran: Civil Aviation Organization Publications. (In Persian)
- Coldren, G. M., & Koppelman, F. S. (2005). Modeling the competition among air-travel itinerary shares: GEV model development. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 39(4), 345–365. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2004.12.001>
- Contreras, I., & O'Kelly, M. (2020). Hub location problems. In *Location science* (pp. 327–363). Cham: Springer International Publishing.
- Contreras, I., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2011). The dynamic uncapacitated hub location problem. *Transportation Science*, 45(1), 18–32.
- Dennis, N. (2005). Industry consolidation and future airline network structures in Europe. *Journal of Air Transport Management*, 11(3), 175–183.  
<https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2004.07.04>
- Doganis, R. (2013). *Flying off course: The economics of international airlines*. Routledge.
- Ernst, A. T., & Krishnamoorthy, M. (1998). Exact and heuristic algorithms for the uncapacitated multiple allocation p-hub median problem. *European Journal of Operational Research*, 104(1), 100–112.
- Fulford, J. D., & Ashton, J. (2008). Population concentration in extensive countries. *Economic Modelling*, 25(4), 720–740.  
<https://doi.org/10.1016/j.econmod.2007.06.002>
- Gallego, G., & van Ryzin, G. (1994). Optimal dynamic pricing of inventories with stochastic demand over finite horizons. *Management Science*, 40(8), 999–1020.  
<https://doi.org/10.1287/mnsc.40.8.999>
- Gillen, D., & Morrison, W. G. (2022). The economics of airline alliances and hub-and-spoke networks. *Transportation Research Part A: Policy*

- approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(8), 709–721. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2004.06.002>
- Talluri, K. T., & van Ryzin, G. J. (2004). An overview of revenue management in service industries. *INFORMS Transactions on Education*, 4(3), 238–247. <https://doi.org/10.1287/ited.4.3.238>
- Tiernan, S., Rhoades, D. L., & Waguespack, B. (2008). Ancillary revenue strategies in the airline industry: A case study of revenue diversification. *Journal of Air Transport Management*, 14(5), 253–258. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2008.02.006>
- Van Ryzin, G., & Vulcano, G. (2008). Simulation-based optimization of virtual nesting controls for network revenue management. *Operations research*, 56(4), 865–880.
- Vinod, B. (2021). Influence of Revenue Management on the Airline Business Process. *The Evolution of Yield Management in the Airline Industry: Origins to the Last Frontier*, 293–312.
- Weatherford, L. R., & Bodily, S. E. (1992). A taxonomy and research overview of perishable-asset revenue management: Yield management, overbooking, and pricing. *Operations research*, 40(5), 831–844. <https://doi.org/10.1287/opre.40.5.831>
- Williamson, E. L. (1992). *Airline network seat inventory control: Methodologies and revenue impacts* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Xiao, M., Chien, S., Schonfeld, P., & Hu, D. (2020). Optimizing flight equencing and gate assignment considering terminal configuration and walking time. *Journal of Air Transport Management*, 86, 101816. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101816>
- Yaman, H., & Carello, G. (2007). A hierarchical hub location model for the design of a network of hubs and feeders. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(6), 673–685. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.06.003>
- Zabihi Tari, M., & Farahani, J. (2019a). Airline flight network optimization with hub and spoke approach. *Scientific Research Journal of Industrial Engineering and Production Management*, 31(2), 145–162 (In Persian)
- Zabihi Tari, M., Farahani, J., & Saffarzadeh, M. (2019b). Airport hub network design with a combination of technical and marketing criteria: A case study of Iran. *Quarterly Journal of Transportation Systems Management and Information Technology*, 5(2), 45–67 (In Persian).
- Zhang, H., Wu, W., Zhang, S., & Witlox, F. (2020). Simulation analysis on flight delay propagation under different network configurations. *IEEE*
- Mohammadi, M., & Karimi, H. (2022). Environmental effects in an integrated hub location and pricing problem. *Scientia Iranica*, 29(2), 838–852.
- Morrison, A. (2013). *Hospitality marketing* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780080938486>
- Naik, P. A., & Raman, K. (2003). Understanding the impact of synergy in multimedia communications. *Journal of Marketing Research*, 40(4), 375–388. <https://doi.org/10.1509/jmkr.40.4.375.19388>
- Nasrollahi, M., & Abdi Kordani, A. (2022). Dynamic modeling of airport hub networks considering climatic and economic variables. *Iranian Journal of Industrial Engineering and Production Management*, 36(3), 112–134. Retrieved from (In Persian)
- Nasrollahi, M., & Abdi Kordani, A. (2023). Designing Airline Hub-and-Spoke Network and Fleet Size by a Biobjective Model Based on Passenger Preferences and Value of Time. *Journal of Advanced Transportation*, 2023(1), 2797613 (In Persian).
- O'Kelly, M. E. (1987). A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 32(3), 393–404. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(87\)80007-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(87)80007-3)
- O'Kelly, M. E. (2025). Hub location with fixed costs. *Papers in Regional Science*, 94(2), 373–390. <https://doi.org/10.1111/pirs.12152>
- O'Kelly, M. E., & Bryan, D. L. (2021). Hub location with flow economies of scale. *Transportation Research Part B: Methodological*, 143, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.10.008>
- Research Center of the Islamic Consultative Assembly. (2023). *Analytical report on the challenges of Iran's air transport network* (Report No. 17892). Retrieved from (In Persian) <https://rc.majles.ir/report/17892>
- Rodríguez-Sanz, Á., & Rubio Andrada, L. (2023). Cost-Benefit Analysis of investments in Air Traffic Management infrastructures: A behavioral economics approach. *Aerospace*, 10(4), 383.
- Rothstein, M. (1985). OR Forum—OR and the airline overbooking problem. *Operations Research*, 33(2), 237–248. <https://doi.org/10.1287/opre.33.2.237>
- Sabre Market Intelligence. (2023). *Middle East airline network development trends* (Report No. MID-2023-NET). Retrieved from <https://www.sabre.com/market-intelligence>
- Shaw, S. (2016). *Airline marketing and management*. Routledge.
- Swan, W. M., & Adler, N. (2005). Airline network structure with hub and spoke: A game-theoretic

*access.-New York, NY, 2013, currens, 8, 103236-103244.*