Journal of Industrial Innovations 3(4) (2025) 18 – 36

Industrial Innovations

https://jii.araku.ac.ir

ISSN: 3092-7811

Maximizing Airline Revenue through Uncertain Dynamic Pricing: Integrating Carbon Tax and Green Tickets within the Liu Theory Framework

Maryam Almasi [a*], Mehri Bagherian [a]

[a] Department of Applied Mathematics, Faculty of Mathematical Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online

Citation: Almasi M, Bagherian M. Maximizing Airline Revenue through Uncertain Dynamic Pricing: Integrating Carbon Tax and Green Tickets within the Liu Theory Framework. Industrial Innovations. 2025;3 (4):18-36.

https://doi.org/10.61882/jii.3.4.18.

KEYWORDS

Liu's Uncertainty Theory;
Carbon Tax;
Pricing.

ABSTRACT

Environmental and policy pressures have forced airlines to reconsider their traditional pricing strategies. This study proposes a dynamic pricing model for airline tickets in an uncertain environment, where demand uncertainty, inflation, seasonal fluctuations, and carbon costs are considered simultaneously. The proposed framework is developed based on Liu's uncertainty theory and incorporates carbon cost into the objective function as an uncertain parameter derived from expert judgment. The objective of the model is to maximize the expected revenue of the airline while considering environmental sustainability requirements. The results of a case study for a domestic airline show that including carbon costs can significantly change the optimal price structure, redistribute demand between flight classes, and create a balance between economic profitability and environmental responsibility. The model also provides a practical tool for designing sustainable pricing policies in situations where historical data are limited.

Extended Abstract

1. Introduction

The aviation industry has become one of the fundamental pillars of the global economy, playing a crucial role in facilitating international trade, tourism, and the mobility of human capital. By generating millions of jobs and contributing significantly to global GDP, the sector has evolved into an essential infrastructure for economic growth and global connectivity [1,2]. Despite its strategic importance, revenue management particularly the pricing of airline tickets remains a major operational challenge. This complexity arises from the dynamic and reciprocal relationship between price and demand, influenced by passenger behavior, market competition, and macroeconomic conditions. Moreover, the time-limited nature of ticket sales and the non-storable capacity of aircraft seats amplify the effects of each pricing decision on overall revenue. Consequently, determining the optimal price within the framework of "dynamic pricing" has become a central topic in the revenue management literature [3].

Previous studies have mainly addressed this problem using probabilistic models, including dynamic programming and demand modeling based on non-homogeneous Poisson processes [4]. However, the heavy reliance on historical data limits the effectiveness of these approaches in volatile economic environments or markets characterized by high uncertainty. At the same time, the aviation sector is increasingly confronted with environmental pressures. Its contribution to global CO_2 emissions, along with regulatory mechanisms such as CORSIA and the EU ETS, has intensified the need to incorporate carbon-related costs into operational and economic decision-making. In this context, the concept of the "green ticket" a mechanism for carbon offsetting or the use of sustainable aviation fuels has emerged as part of the pricing structure [5].

* Corresponding author.
E-mail address: mbagherian@guilan.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.61882/jii.3.4.18
Received: January 6, 2026; Received in revised form: February 18, 2026; Accepted: February 22, 2026.
Article type: Research Paper

In the domain of decision-making under uncertainty, Almasi et al. [6] introduced a framework for dynamic pricing based on Liu's uncertainty theory, enabling the modeling of uncertain variables such as demand and inflation. This approach demonstrates particular advantages over probabilistic methods in data-scarce or highly unpredictable environments. Building on this foundation, the present study extends their model by incorporating carbon emission costs as an uncertain variable within the pricing framework. The proposed model treats carbon offsetting costs and the demand for green tickets as uncertain elements and examines their impact on optimal pricing and the revenue structure of airlines. The key contribution of this research lies in integrating environmental sustainability considerations into an uncertainty-based dynamic pricing framework, enabling a simultaneous assessment of both economic and environmental implications.

2. Motivation of the Research and Uncertainty Theory

The aviation industry, despite its essential role in global mobility and economic development, is increasingly scrutinized for its rising greenhouse gas emissions. As a market-based response, the "green ticket" has emerged as a mechanism that incorporates environmental externalities into airfare pricing, thereby influencing demand patterns and generating financial resources for carbon mitigation. Yet, the effectiveness of this policy fundamentally depends on how green ticket prices are determined and on stakeholders' willingness to bear the associated carbon cost.

Unlike classical ticket pricing which primarily targets revenue maximization and capacity control green ticket pricing requires balancing financial goals with environmental and regulatory constraints. A central challenge is the considerable uncertainty surrounding the appropriate level of the carbon cost. This cost is shaped not only by market behavior but also by expert judgment, managerial perspectives, and varying degrees of policy consensus. As a result, using a fixed carbon price may distort the expected economic and behavioral impacts of the policy.

Although previous studies have examined carbon-pricing mechanisms in aviation through probabilistic or scenario-based approaches, these models rely heavily on stable statistical distributions and rich historical data both of which are limited for emerging policies like green ticketing. Liu's Uncertainty Theory provides a suitable alternative, enabling the structured incorporation of belief-based uncertainties, particularly expert assessments related to the adoption of carbon costs.

The core motivation of this study is to develop a pricing model in which the carbon cost operates simultaneously as an economic parameter and an uncertain policy variable. Expert belief degrees regarding the application of carbon costs are quantified through uncertain distributions, and their effects on ticket prices and expected airline revenue are evaluated. This framework allows for the systematic analysis of green ticket outcomes under different levels of policy acceptance and expert consensus, thereby linking aviation pricing research with market‑based environmental policy design.

In Uncertainty Theory, an uncertain variable ξ is a measurable function from an uncertainty space (Γ,L,M) to R, with its uncertainty distribution defined as

$$.\Phi(x) = M\{\xi \leq x\} \forall x \in \Re \tag{1}$$

Common uncertain variables include:

• Normal uncertain variable N(e,σ) with distribution

$$\Phi(x) = (1 + exp(\frac{\pi(e-x)}{\sqrt{3}\sigma}))^{-1} \qquad x \in \Re \tag{2}$$

Linear uncertain variable L(a,b) L(a,b) L(a,b) with distribution

$$\Phi(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \dfrac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \tag{3}$$

Zigzag uncertain variable Z(a,b,c) with distribution

$$\Phi(\mathrm{x}) = \begin{cases} 0 & \mathrm{x} \leq \mathrm{a} \\ \dfrac{(\mathrm{x}-\mathrm{a})}{2(\mathrm{b}-\mathrm{a})} & \mathrm{a} \leq \mathrm{x} \leq \mathrm{b} \\ \dfrac{(\mathrm{x}+\mathrm{c}-\mathrm{b})}{2(\mathrm{c}-\mathrm{b})} & \mathrm{b} \leq \mathrm{x} \leq \mathrm{c} \\ 1 & \mathrm{x} \geq \mathrm{c} \end{cases} \tag{4}$$

Uncertain programming, introduced by Liu, addresses optimization problems with subjective or belief-based uncertainty. Given a decision vector x and uncertain vector ξ, the uncertain objective function is optimized via its expected value:

$$\min_x \; E[f(x,\xi)] \tag{5}$$

$$s.t: M\{g_i(x,\xi) \leq 0\} \geq \alpha_j, \quad j = 1,2,\ldots,p$$

If the objective is increasing in $\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_k$ and decreasing in $\xi_{k+1}, \xi_{k+2}, \ldots, \xi_n$, its expected value is expressed as [22]:

$$\int_0^1 f\left(x.\Phi_1^{-1}(\alpha).\cdots.\Phi_k^{-1}(\alpha).\Phi_{k+1}^{-1}(\alpha).\cdots.\Phi_n^{-1}(\alpha)\right)d\alpha. \tag{6}$$

3 .Problem Definition and Modeling

The objective of this study is to determine optimal airline ticket prices across flight classes to maximize expected revenue under uncertainty. Pricing decisions in the aviation sector are influenced by several uncertain factors, including demand fluctuations, macroeconomic conditions, and environmental regulations. To address these uncertainties, Liu's Uncertainty Theory is employed as a framework for modeling belief-based uncertainties derived from expert judgments.

In the proposed model, carbon cost is incorporated into the objective function as an uncertain economic parameter. The key purpose is to analyze how integrating carbon cost based on experts' belief degrees affects airline pricing strategies and expected revenue.

3.1. Indices, Parameters, and Variables

Index	Parameters
J : flight class index	M : total seat capacity
Decision Variable	ω : uncertain inflation rate
C_j : demand in class j	δ : uncertain seasonal factor
P^j: ticket price in class j	M^j :number of seats in class j
Tax_j : estimated carbon tax for class j	

The airline operates with a fixed seat capacity distributed across classes. Ticket prices are dynamically adjustable during the booking horizon, while demand, inflation, seasonal effects, and carbon cost are modeled as uncertain variables.

The optimization model is defined as:

$$\begin{aligned}
&\max_{p^j} \sum_{j=1}^{3} C_j\,(p^j - Tax_j)\\
&C_1 \le M^1\\
&C_2 \le M^2\\
&(1+\omega)p^j \le (1+\delta)P^j, j = 1,2\\
&p^j \ge 0\\
&\omega.\delta \ge 0.
\end{aligned} \tag{7}$$

Applying the expectation operator converts the uncertain model into a deterministic form:

$$\begin{aligned}
&\max_{p^j} E\{\sum_{j=1}^{3} C_j(\,p^j - \quad Tax_j\,)\}\\
&E\{C_1\} \le M^1\\
&E\{C_2\} \le M^2\\
&E\{(1+\omega)p^j\} \le E\{(1+\delta)P^j\}, \qquad j = 1,2,3\\
&p^j \ge 0, Tax_j \ge 0\\
&\omega, \delta \ge 0.
\end{aligned} \tag{8}$$

3.2. Research Limitations

The model assumes fixed aircraft capacity and a predefined class structure, and it does not consider competition among airlines. In addition, uncertain distributions are derived from expert judgments, which may not fully capture all market dynamics.

4 .Results and Discussion

Model (8) was applied to an Iranian airline with a capacity of 240 seats. The uncertain distributions for key variables including demand C_j, inflation ω, seasonal factor δ, and carbon tax Tax_jwere estimated using expert judgment through the Delphi method and uncertainty regression. This approach allowed the model to work reliably even without historical data.

Estimated Distributions

Passenger demand was modeled with logistic uncertainty distributions for both classes.
Inflation and seasonality were modeled with linear distributions.
Carbon taxes for the two classes followed zigzag uncertainty functions.

Optimization Results

Solving the model in MATLAB produced the following outcomes:
Total revenue: USD 8,851
Economy price: USD 41
Business price: USD 71.5
Total carbon tax: USD 1,108

The demand pattern shows high price sensitivity in autumn and a shift toward essential travel. This highlights the importance of including seasonal and macroeconomic factors in dynamic pricing.

Validation

A comparison between the uncertainty model and a probabilistic model showed similar decision-making behavior, even though the exact numbers differed. This consistency confirms that the uncertainty-based approach is stable and reliable, especially in environments with limited data.

Sensitivity Analysis

Three carbon‑tax allocation scenarios were examined:
Scenario 1: Airline pays the tax → lowest revenue and highest financial pressure.
Scenario 2: Customer pays the tax → highest revenue but potential fairness concerns.
Scenario 3: No carbon tax → moderate revenue but weak environmental performance.

Overall, the results show that carbon tax is not only a cost. It also works as a behavioral signal that reshapes demand across classes and encourages more sustainable travel choices.

نوآوری‌های صنعتی

شاپا: ۷۸۱۱-۳۰۹۲

حداکثرسازی درآمد خطوط هوایی با قیمت‌گذاری پویای نایقینی: ادغام مالیات کربن و بلیت سبز در چارچوب نظریه لئو

مریم الماسی[الف]، مهری باقریان[ب*]

[الف] گروه ریاضی کاربردی، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. almasi69@gmail.com

[ب] گروه ریاضی کاربردی، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. *mbagherian@guilan.ac.ir*

واژگان کلیدی

نظریه عدم قطعیت لئو؛
مالیات کربن؛
قیمت‌گذاری.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳

چکیده

افزایش فشارهای سیاستی و زیست‌محیطی، شرکت‌های هواپیمایی را ناگزیر به بازنگری در راهبردهای قیمت‌گذاری سنتی کرده است. این پژوهش یک مدل قیمت‌گذاری پویا برای بلیت هواپیما در محیط نایقین ارائه می‌دهد که در آن، عدم قطعیت تقاضا، تورم، نوسانات فصلی و هزینه کربن به‌صورت همزمان لحاظ شده‌اند. چارچوب پیشنهادی بر پایه نظریه نایقینی لئو توسعه یافته و هزینه کربن را به‌عنوان یک پارامتر نایقین مبتنی بر قضاوت خبرگان به تابع هدف وارد می‌کند. هدف مدل، بیشینه‌سازی درآمد مورد انتظار شرکت هواپیمایی همراه با در نظر گرفتن الزامات پایداری زیست‌محیطی است. نتایج مطالعه موردی برای یک شرکت هواپیمایی داخلی نشان می‌دهد که گنجاندن هزینه کربن می‌تواند به تغییر معنادار ساختار قیمت بهینه، باز توزیع تقاضا بین کلاس‌های پروازی و ایجاد تعادل میان سودآوری اقتصادی و مسئولیت زیست‌محیطی منجر شود. این مدل ابزاری عملی برای طراحی سیاست‌های قیمت‌گذاری پایدار در شرایط کمبود داده‌های تاریخی فراهم می‌آورد.

۱- مقدمه

صنعت هوانوردی به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی اقتصاد جهانی، امکان جابه‌جایی گسترده مسافران و حمل‌ونقل بار را در سطح بین‌المللی فراهم می‌آورد. این صنعت که در مراحل اولیه توسعه خود، عمدتاً به‌عنوان خدماتی لوکس و محدود به طبقات مرفه شناخته می‌شد، امروزه به زیرساختی بنیادین برای تجارت بین‌المللی، گردشگری و تبادلات فرهنگی تبدیل شده است. بر اساس گزارش دوگانیس [۱] و داده‌های انجمن بین‌المللی حمل‌ونقل هوایی یاتا[1] [۲]، فعالیت‌های هوانوردی میلیون‌ها فرصت شغلی مستقیم و غیرمستقیم ایجاد کرده و سهم قابل‌توجهی در تولید ناخالص داخلی جهانی ایفا می‌کنند. علاوه بر این، این بخش با تسهیل ارتباطات میان‌ملل، به تقویت روابط دیپلماتیک و فرهنگی کمک شایانی نموده است. همین نقش محوری، اهمیت استراتژیک صنعت هوانوردی را به‌ویژه در شرایط عدم ثبات اقتصادی و تنش‌های ژئوپلیتیکی برجسته می‌سازد.

یکی از چالش‌های اصلی در مدل‌سازی مسئله قیمت‌گذاری بلیت خطوط هوایی، وجود رابطه دوسویه و پویا میان تقاضا و قیمت است. این تعامل دینامیک، که تحت تأثیر ترجیحات فردی مسافران و متغیرهای کلان اقتصادی قرار دارد، منجر به ایجاد محیطی با عدم قطعیت بالا می‌گردد؛ محیطی که در آن پارامترهای کلیدی از نوع تصادفی و نامعین هستند. عامل دیگری که

[1] IATA

* نویسنده مسئول؛
آدرس پست الکترونیک: mbagherian@guilan.ac.ir

پیچیدگی مدل را افزایش می‌دهد، محدودیت زمانی کوتاه برای تصمیم‌گیری در خصوص قیمت‌گذاری است. تعیین قیمت‌های پایین در ابتدای بازه زمانی موجب رزرو زودهنگام و اشغال ظرفیت می‌شود، اما در صورت بروز تغییرات اقتصادی نظیر افزایش تورم یا هزینه‌های عملیاتی، می‌تواند به کاهش حاشیه سود و حتی زیان‌دهی شرکت منجر گردد.

در مقابل، قیمت‌گذاری بیش‌ازحد بالا تقاضا را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد و کاهش‌های قیمتی در مراحل پایانی بازه زمانی نیز معمولاً قادر به پر کردن ظرفیت باقی‌مانده نیستند. بنابراین، مسئله اصلی برای شرکت‌های هواپیمایی، تعیین قیمت بهینه در هر بازه زمانی است به‌نحوی‌که حداکثرسازی درآمد، حفظ سهم بازار و جذب تقاضای مشتریان به‌طور هم‌زمان محقق شود. ازآنجاکه تصمیمات قیمت‌گذاری در هر دوره بر دوره‌های آتی تأثیرگذار است و نیازمند بازبینی مداوم و تطبیق با شرایط متغیر محیطی هستند، این مسئله در ادبیات تخصصی به‌عنوان «قیمت‌گذاری پویا[1]» شناخته می‌شود [۳].

قیمت‌گذاری پویا به‌معنای تنظیم مستمر قیمت‌ها بر اساس زمان، شرایط بازار، سطح تقاضا و متغیرهای اقتصادی حاکم است. مگلاراس و همکاران (۲۰۰۶) در یک مطالعه مروری جامع، روش‌های مختلف قیمت‌گذاری شامل برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی، برنامه‌ریزی پویا و مدل‌های آماری معین و تصادفی را بررسی کردند. نتایج این مرور نشان می‌دهد که در اکثر مدل‌های تقاضا، از فرایند پواسون ناهمگن[2] برای توصیف ورود تقاضا استفاده‌شده و تعداد خریدها در هر بازه زمانی با بهره‌گیری از توابع توزیع احتمال تخمین زده می‌شوند. به‌طورکلی، چارچوب مفهومی غالب این رویکردها بر پایه نظریه احتمال و مدل‌سازی تصادفی استوار است [۴].

در دهه‌های اخیر، مفهوم توسعه پایدار به‌عنوان یک چارچوب استراتژیک کلیدی در تمامی بخش‌های صنعتی، ازجمله هوانوردی، تثبیت شده است. این مفهوم بر ایجاد تعادل میان سه بعد اساسی رشد اقتصادی، حفاظت از محیط‌زیست و ارتقای عدالت اجتماعی تأکید دارد. صنعت هوانوردی، با وابستگی ساختاری به سوخت‌های فسیلی و سهم تقریبی ۲/۵ درصدی در انتشار جهانی دی‌اکسید کربن مرتبط با انرژی، نیازمند بررسی دقیق‌تر جنبه‌های پایداری است تا ریسک‌های زیست‌محیطی را مدیریت کند و با اهداف جهانی مانند توافق پاریس همسو شود.

بر اساس مطالعات جامع، این صنعت پیش از همه‌گیری کووید-۱۹، حدود ۳/۹ درصد از تولید ناخالص داخلی جهانی را به خود اختصاص داده و بیش از ۸۶/۵ میلیون فرصت شغلی مستقیم و غیرمستقیم ایجاد کرده بود. بااین‌حال، انتشار گازهای گلخانه‌ای آن چالش‌های جدی به همراه دارد و راهکارهای فنی مانند بهینه‌سازی مصرف سوخت، ادغام فناوری‌های پیشرفته (مانند موتورهای کارآمدتر) و توسعه سوخت‌های پایدار هوانوردی[3] برای کاهش اثرات زیست‌محیطی در اولویت قرار گرفته‌اند.

کاواچیک[4] و همکاران در پژوهشی تحلیلی بر توسعه پایدار در صنعت هوانوردی، با تمرکز بر مورد شرکت هواپیمایی ترکیش ایرلاینز، چالش‌های اقتصادی-زیست‌محیطی این بخش را بررسی کرده و راهکارهایی مانند یکپارچه‌سازی مدل‌های پایدار در عملیات را پیشنهاد داده‌اند. این مطالعه، مبنایی برای درک تعاملات میان رشد صنعت و الزامات پایداری فراهم می‌آورد و بر ضرورت ادغام هزینه‌های خارجی زیست‌محیطی در مدل‌های تصمیم‌گیری تأکید دارد [۵].

با تشدید نگرانی‌های زیست‌محیطی جهانی و اعمال فشارهای نظارتی برای کاهش ردپای کربن از جمله طرح کورسیا[5] سازمان ایکائو و سیستم تجارت انتشار اروپا [6] صنعت هوانوردی نیز تحت تأثیر قرار گرفته است. در این زمینه، مفهوم «بلیت سبز[7]»، که به ارائه گزینه‌های پروازی همراه با جبران انتشار کربن[8] یا بهره‌گیری از سوخت‌های پایدار اشاره دارد، به‌تدریج در استراتژی‌های قیمت‌گذاری شرکت‌های هواپیمایی ادغام شده است. در چنین چارچوبی، قیمت کربن به‌عنوان یک هزینه خارجی[9] وارد مدل‌های

[1] Dynamic Pricing
[2] Non-homogeneous Poisson Process
[3] Sustainable Aviation Fuels(SAF)
[4] Kavacık
[5] CORSIA
[6] EU ETS
[7] green ticket
[8] carbon offsetting
[9] externality

درآمدی شرکت‌ها می‌گردد و می‌تواند تأثیر مستقیمی بر ساختار قیمت‌گذاری بلیت‌ها داشته باشد.

الماسی و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی نوآورانه، با بهره‌گیری از نظریه نایقینی [1]لئو، چارچوبی مؤثر برای قیمت‌گذاری پویای بلیت در شرایط ناپایدار بازار پیشنهاد کرده‌اند؛ چارچوبی که در آن تقاضا، تورم و نوسانات فصلی به‌صورت متغیرهای نامعین مدل‌سازی شده‌اند [۶]. این مدل پایه‌ای محکم برای مدیریت عدم قطعیت‌های اقتصادی فراهم می‌آورد. با توجه به اهمیت فزاینده مسائل زیست‌محیطی در صنعت هوانوردی، مقاله حاضر این چارچوب را با افزودن بعد پایداری گسترش می‌دهد و هزینه‌های مرتبط با انتشار کربن را به‌عنوان یک متغیر نامعین در نظر می‌گیرد؛ عواملی که نه‌تنها بر هزینه‌های عملیاتی اثر می‌گذارند، بلکه رفتار تقاضای مسافران در بازارهای حساس به پایداری را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند.

در ادامه این پژوهش، مقاله حاضر مدل پیشنهادی الماسی و همکاران را با ادغام متغیر قیمت کربن و تقاضای نامطمئن برای بلیت‌های سبز توسعه می‌بخشد. در این مدل گسترش‌یافته، هزینه جبران کربن به‌صورت یک متغیر نامعین (بر پایه چارچوب عدم قطعیت لئو) به تابع هدف و محدودیت‌ها افزوده‌شده و تأثیر آن بر سطوح قیمت‌گذاری کلاس‌های مختلف پرواز و ترکیب درآمدی شرکت هواپیمایی تحلیل می‌گردد

نوآوری اصلی پژوهش حاضر در توسعه یک چارچوب قیمت‌گذاری پویا برای صنعت هوانوردی نهفته است که به‌طور صریح هزینه کربن را به‌عنوان یک متغیر نایقین در فرآیند تصمیم‌گیری وارد می‌کند. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر مدل‌های احتمالاتی متکی بر داده‌های تاریخی تمرکز دارند، این پژوهش از نظریه نایقینی لئو و نظرات خبرگان صنعت برای مدل‌سازی متغیرهای کلیدی استفاده می‌کند. علاوه بر این، مفهوم «بلیت سبز» در قالب یک ابزار سیاستی بازارمحور در مدل ادغام شده و امکان بررسی همزمان پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی قیمت‌گذاری فراهم شده است. چارچوب پیشنهادی نه‌تنها به بهبود تصمیمات درآمدی در شرایط کمبود داده کمک می‌کند، بلکه زمینه‌ساز طراحی راهبردهای قیمت‌گذاری همسو با اهداف پایداری در صنعت هوانوردی است.

۲- مرور بر ادبیات

روش‌های تحقیق در عملیات نقش محوری در مدل‌سازی و بهینه‌سازی قیمت‌گذاری صندلی‌های هواپیما ایفا می‌کنند و چارچوبی ساخت‌یافته برای مدیریت پیچیدگی‌های سیستم‌های مدیریت درآمد[2] ارائه می‌دهند. این روش‌ها به شرکت‌های هواپیمایی امکان می‌دهند تا در برابر نوسانات تقاضا، رقابت قیمتی و محدودیت‌های عملیاتی به‌ویژه در محیط‌های نامطمئن پاسخ‌های مؤثر و بهینه اتخاذ کنند. پژوهش‌های اولیه در این حوزه عمدتاً بر کنترل موجودی کلاس‌های کرایه[3] متمرکز بودند و نشان دادند که مدل‌های بهینه‌سازی می‌توانند تصمیم‌گیری در تخصیص صندلی و راهبردهای قیمت‌گذاری را به‌طور چشمگیری بهبود بخشند. این مطالعات، پایه‌های نظری و عملی مدیریت ظرفیت و قیمت‌گذاری پویا را استوار ساختند.

در همین راستا، مطالعات نظری مدیریت درآمد و قیمت‌گذاری پویا نیز توسعه یافتند. لیتل‌وود [۷] به بررسی تمایز قیمتی میان کلاس‌های ثابت و تخفیفی پرداخت و اثبات کرد که پذیرش رزروهای کلاس تخفیفی تا زمانی بهینه است که درآمد آن‌ها بیش از هزینه فرصت[4] ناشی از رزرو شدن صندلی برای مسافران کلاس کامل باشد. این رویکرد، نخستین مدل ریاضی رسمی مدیریت درآمد مبتنی بر کنترل کمیت[5] را معرفی کرد؛ مدلی که در آن تصمیم‌گیری بر پایه تخصیص ظرفیت برای هدایت و کنترل تقاضا صورت می‌گیرد.

بر اساس گزارش اسمیت و همکاران [۸] قیمت‌گذاری ثابت سنتی شده است. در دهه‌های بعدی، پیشرفت‌های فناوری و پژوهش‌های علمی به توسعه مدل‌های دقیق‌تر و کارآمدتر منجر گردید. امروزه مدیریت درآمد یکی از الزامات کلیدی و

[1] uncertainty theory
[2] Revenue Management Systems
[3] fare class inventory control
[4] opportunity cost
[5] quantity-based revenue management

پرکاربردترین ابزارها در صنایع خدماتی، به‌ویژه صنعت هوانوردی، به شمار می‌رود.

یکی از مطالعات برجسته در حوزه مدیریت درآمد هوانوردی، پژوهش ودرفورد و بادلی [۹] است که تخصیص ظرفیت را در شرایط قیمت‌گذاری رقابتی بررسی کرده است. این پژوهش با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی، ساختارهای بهینه کرایه و توزیع ظرفیت را تعیین می‌نماید و بر اهمیت تصمیمات راهبردی قیمت‌گذاری در مواجهه با پویایی‌های بازار رقابتی تأکید دارد.

در سال‌های‌اخیر، پژوهشگران نظریه مجموعه‌های فازی را به‌عنوان رویکردی جایگزین برای مدیریت عدم‌قطعیت در قیمت‌گذاری خطوط هوایی مورد کاوش قرار داده‌اند. برخلاف مدل‌های احتمالاتی سنتی که به توزیع‌های احتمال دقیق وابسته‌اند، نظریه فازی در موقعیت‌هایی کاربرد دارد که داده‌های تاریخی محدود یا ناموجود باشند و قضاوت‌های خبرگانی نقش محوری در مدل‌سازی ایفا کنند. برای مثال، یائو [۱۰] از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی برای تدوین راهبردهای بهینه قیمت‌گذاری در شرایط تقاضای مبهم بهره برده است. به‌طور مشابه، پژوهش دیگری [۱۱] منطق فازی را با سیستم‌های مدیریت درآمد یکپارچه ساخته تا تصمیمات قیمت‌گذاری پویا و تخصیص صندلی را در حضور ورودی‌های نامعین و ذهنی ارتقا دهد. این مطالعات بر ارزش نظریه فازی در مدیریت عدم‌قطعیت‌های واقعی که اغلب فراتر از چارچوب مدل‌های تصادفی سنتی قرار می‌گیرند تأکیددارند و عملکرد عملیاتی را در محیط‌های پیچیده بهبود می‌بخشند.

یائوژی ژانگ (۲۰۲۲) عوامل روان‌شناختی و رفتاری مؤثر بر تمایل مسافران هوایی چینی به مشارکت در برنامه‌های جبران داوطلبانه کربن[1] را بررسی کرده است. نتایج تحلیل معادلات ساختاری[2] و عاملی تأییدی[3] بر داده‌های ۲۰۲ مسافر در فرودگاه‌های شانگهای حاکی از آن است که ارزش‌های نوع‌دوستانه و زیست‌محور تأثیر مثبت قابل‌توجهی بر دانش زیست‌محیطی و تمایل به مشارکت دارند، درحالی‌که ارزش‌های خودمحور تأثیر منفی بر دانش دارند اما اثر مستقیم بر تمایل به کاهش مشارکت ندارند. این مطالعه بر اهمیت آموزش و ارتقای آگاهی برای افزایش مشارکت در طرح‌های جبران کربن تأکید می‌کند [۱۲].

پژوهشی دیگر بر ضرورت اقدام فوری برای کاهش انتشار کربن در هوانوردی تمرکز دارد که در حال حاضر ۲ تا ۳ درصد از انتشار جهانی را تشکیل می‌دهد و در صورت ادامه روند فعلی تا سال ۲۰۳۷ دو برابر خواهد شد. این پژوهش چهار ستون اصلی پایداری سوخت‌های پایدار هوانوردی[4]، فناوری و طراحی جدید، جبران و کاهش کربن، و بهبود عملیات و زیرساخت‌ها را به‌عنوان چارچوبی جامع برای کاهش اثرات زیست‌محیطی معرفی می‌کند. همچنین، نوآوری‌های مالی مانند اوراق قرضه سبز و اوراق مرتبط با پایداری را ابزارهای کلیدی حمایت از این تغییرات می‌داند و چالش‌های تعریف دقیق تأمین مالی سبز و نیاز به سیستم امتیازدهی برای ارزیابی تعهدات پایداری را برجسته می‌سازد [۱۳].

مطالعه‌ای نشان می‌دهد شرکت‌های هواپیمایی به‌طور فزاینده‌ای از استراتژی‌های بازاریابی سبز بهره می‌برند تا با تغییرات اقلیمی مقابله کنند و حمل‌ونقل پایدار را ترویج دهند. این استراتژی‌ها شامل اقدامات دوستدار محیط‌زیست مانند کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از سوخت‌های پایدار و گزارش‌دهی شفاف است که نه‌تنها همسویی با مقررات مانند کورسیا[5] را تسهیل می‌کند، بلکه اعتبار سازمانی را افزایش داده و مشتریان آگاه به محیط‌زیست را جذب می‌نماید. نتایج بر ارتباط نزدیک میان آگاهی اقلیمی، اهداف پایداری و بازاریابی سبز تأکید دارد و نقش آن در نوآوری، رضایت مشتری و هدایت صنعت به‌سوی آینده‌ای مسئولانه را برجسته می‌سازد [۱۴].

در ادبیات مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها در هوانوردی، ابعاد زیست‌محیطی و اقتصادی نقش محوری ایفا می‌کنند. فشارهای روزافزون اقلیمی و افزایش آگاهی عمومی، شرکت‌ها را به پاسخ‌گویی و کاهش اثرات منفی وادار کرده است؛ این امر از طریق سوخت‌های زیستی، فناوری‌های نوین و مدیریت منابع محقق می‌شود. همزمان، پایداری اقتصادی شامل ثبات مالی، مدیریت کارآمد منابع و توسعه زیربنایی ضروری است. این ادبیات به‌طور غیرمستقیم بر اهمیت زنجیره تأمین سبز و ضرورت همکاری با

[1] VCO
[2] SEM
[3] CFA
[4] SAF
[5] CORSIA

نهادهای دولتی، جامعه مدنی و علمی تأکید دارد که می‌تواند مبنایی برای مدل‌های ریاضی طراحی زنجیره تأمین پایدار فراهم کند [۱۵].

سیو (۲۰۱۹) مالیات کربن را در قیمت‌گذاری رقابتی شرکت‌های هواپیمایی کم‌هزینه وارد کرده و رابطه بین تقاضا و انتشار کربن را مدل‌سازی کرد. وی از تابع انتخاب احتمالاتی مسافر استفاده کرده و نشان داد هواپیماهای کم‌انتشار و کانال‌های فروش مستقیم سودآوری بیشتری دارند و وفاداری مسافران قیمت بهینه و سود را افزایش داده است. یافته‌ها نقش استراتژی قیمت‌گذاری، انتخاب ناوگان و مدیریت کانال‌های توزیع در کاهش اثرات اقتصادی مقررات زیست‌محیطی را برجسته کرده است [۱۶].

صنعت هوانوردی هدف کاهش ۵۰٪ انتشار CO_2 تا ۲۰۵۰ نسبت به سطح ۲۰۰۵ را تعیین کرده است. مطالعات نشان داده‌اند که بهبود بهره‌وری سوخت تنها کاهش محدودی ایجاد می‌کند و نوسازی کند ناوگان، کمبود سوخت پایدار هوایی و محدودیت‌های عملیاتی، پتانسیل کاهش را محدود کرده است. سوخت‌های پایدار هوایی می‌توانستند تا ۹۰٪ انتشار را کاهش دهند، اما مقیاس وسیع آن‌ها با کمبود مواد اولیه محدود شده است. اقدامات عملیاتی اثر متوسطی دارند و ابزارهای اقتصادی مانند طرح‌های تجارت انتشار برای پرکردن شکاف باقی‌مانده پیشنهاد شده‌اند، هرچند اجرای جهانی آن‌ها با چالش‌های نهادی و قانونی مواجه شده است [۱۷].

مطالعات نشان داده‌اند که مشارکت در برنامه‌های داوطلبانه جبران کربن در هواپیمایی محدود بوده و عمدتاً تحت تأثیر نگرش فردی و کنترل ادراک‌شده قرار دارد، و افزایش شفافیت، اعتبار و سهولت دسترسی، کلید ارتقای مشارکت مسافران است[۱۸].

علاوه براین قیمت‌گذاری کربن و سیاست‌های مبتنی بر سوخت پایدار هوایی نقش مهمی در طراحی شبکه و سودآوری خطوط هوایی دارند. ابزارهای بازار مانند EU ETS و CORSIA می‌توانند رقابت بین حامل‌های اروپایی و غیراروپایی را تغییر دهند، اما بسیاری از مطالعات پیچیدگی عملیاتی شبکه‌های چندهاب را نادیده گرفته‌اند. تحقیقات اخیر با شبکه‌های دوهاب نشان داده‌اند که قیمت‌گذاری کربن بر تصمیمات طراحی شبکه تأثیر قابل‌توجهی دارد و اختلاف بین حداکثرسازی سود و رفاه اجتماعی را آشکار می‌کند. با وجود حمایت‌هایی مانند مقررات استفاده از سوخت پایدار در هوانوردی اتحادیه اروپا، محدودیت‌های عملیاتی و مقرراتی اثربخشی سیاست‌های پایداری را کاهش و هزینه‌های انطباق خطوط هوایی را افزایش می‌دهند [۱۹].

در مجموع، مرور ادبیات توسعه پایدار در صنعت هوانوردی حاکی از نیاز به اقدامات ترکیبی در سطوح سیاست‌گذاری، فناوری و مدیریت سازمانی است تا چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی قرن حاضر به‌طور مؤثر پاسخ داده شود.

۳- انگیزه پژوهش و نظریه نایقینی

صنعت هوانوردی، درحالی‌که نقش حیاتی در پیشبرد اقتصاد جهانی و تسهیل حمل‌ونقل بین‌المللی ایفا می‌کند، به‌عنوان یکی از منابع اصلی و روبه افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مورد تأکید فزاینده سیاست‌گذاران حوزه محیط‌زیست قرار گرفته است. در واکنش به این چالش، مفهوم «بلیت سبز» به‌عنوان یک مکانیسم نوین سیاست‌گذاری و اقتصادی ظهور کرده است؛ مکانیسمی که از طریق ادغام هزینه‌های خارجی زیست‌محیطی در ساختار قیمت بلیت، به تعدیل الگوهای تقاضا می‌پردازد و منابع مالی ضروری برای کاهش یا جبران انتشار کربن را فراهم می‌سازد. باوجوداین، اثربخشی بلیت سبز به‌طور مستقیم با شیوه‌های قیمت‌گذاری و سطح پذیرش هزینه مرتبط توسط ذی‌نفعان گره خورده است.

در تمایز با رویکردهای کلاسیک قیمت‌گذاری بلیت که اساساً بر حداکثرسازی درآمد و کنترل ظرفیت متمرکزند، تعیین قیمت بلیت سبز ایجاب‌کننده تعادل پیچیده‌ای میان اهداف مالی، الزامات اکولوژیکی و محدودیت‌های سیاست‌گذاری است. یکی از موانع کلیدی، عدم قطعیت در تعیین سطح بهینه هزینه کربن است؛ سطحی که نه‌تنها از دینامیک‌های بازار و تقاضا تأثیر می‌پذیرد، بلکه به‌طور قابل‌توجهی به ارزیابی‌های تخصصی، نگرش‌ها و درجه اجماع میان کارشناسان، مدیران صنعت و تصمیم‌گیران سیاستی وابسته است. اتکا به هزینه کربن ثابت و پیش‌تعریف‌شده در چنین بستری می‌تواند به تخمین‌های غیرواقعی از پیامدهای اقتصادی و رفتاری این سیاست بینجامد.

بخش عمده مطالعات پیشین، سیاست بلیت سبز یا مکانیسم‌های قیمت‌گذاری کربن در هوانوردی را در قالب مدل‌های احتمالاتی یا تحلیل‌های مبتنی بر سناریو کاوش کرده‌اند. این روش‌ها معمولاً به داده‌های تاریخی جامع و توزیع‌های آماری پایدار نیاز دارند؛ درحالی‌که بلیت سبز، به‌عنوان سیاستی نوپا، با محدودیت داده‌های تجربی و پراکندگی گسترده در دیدگاه‌های ذی‌نفعان روبرو است. در این شرایط، بهره‌گیری از نظریه عدم قطعیت لئو امکان ادغام ساختارمند عدم قطعیت‌های مبتنی بر باور و ارزیابی انسانی به‌ویژه درجه تمایل کارشناسان به گنجاندن هزینه کربن در قیمت بلیت در فرآیند مدل‌سازی را فراهم می‌کند.

انگیزه محوری پژوهش حاضر، طراحی مدلی برای قیمت‌گذاری بلیت سبز است که در آن هزینه کربن همزمان به‌عنوان یک عامل هزینه‌ای و یک ابزار سیاست‌گذاری نایقین در نظر گرفته شود. در این چارچوب، درجه باور کارشناسان در مورد اعمال هزینه کربن از طریق توزیع‌های نایقین کمی‌سازی می‌شود و تأثیر آن بر سطوح قیمت بلیت و درآمد پیش‌بینی‌شده شرکت‌های هواپیمایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این رویکرد امکان تحلیل پیامدهای اجرای بلیت سبز تحت سطوح متفاوت پذیرش سیاستی و باورهای کارشناسی بر ساختار قیمت‌گذاری و پایداری مالی خطوط هوایی را مهیا می‌سازد.

در نهایت، مطالعه حاضر در پی برقراری ارتباطی میان پژوهش‌های قیمت‌گذاری در حوزه هوانوردی و سیاست‌های زیست‌محیطی بازارمحور است و چارچوبی تحلیلی پیشنهاد می‌کند که می‌تواند پایه‌ای برای تدوین و ارزشیابی سیاست‌های بلیت سبز در صنعت هوانوردی فراهم آورد.

در نظریه نایقینی، یک متغیر نایقین ξ جهت مدل‌سازی کمی رویدادهای نایقین به کار می‌رود [۲۰] به‌طوری‌که، این متغیر تابعی قابل اندازه‌گیری از فضای نایقین (Γ, L, M) به مجموعه اعداد حقیقی است، به‌طوری‌که برای هر مجموعه بورل B، مجموعه $\{\xi \in B\} = \{\gamma \in \Gamma | \xi(\gamma) \in B\}$ یک رویداد در-σ جبر Lتلقی می‌شود. توزیع نایقینی متغیر نامعین ξ به‌صورت زیر تعریف می‌شود :

$$\Phi(x) = M\{\xi \leq x\} \forall x \in \Re \quad (۱)$$

متغیر نایقین ξ نرمال گویند هرگاه توزیع نایقینی آن به‌صورت

$$\Phi(x) = (1 + exp(\frac{\pi(e-x)}{\sqrt{3}\sigma}))^{-1} \qquad x \in \Re \quad (۲)$$

باشد که با $N(e, \sigma)$ نشان داده می‌شود و e وσ اعداد حقیقی هستند به‌طوری‌که $\sigma > 0$.

متغیر نامعین ξ خطی گویند هرگاه توزیع نایقینی خطی آن به‌صورت

$$\Phi(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a} & a \leq x \leq b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (۳)$$

باشد که با $\mathcal{L}(a, b)$ نشان داده می‌شود؛ در اینجا a و b اعداد حقیقی هستند به‌طوری‌که $a < b$.

متغیر نامعین ξ زیگزاگی گویند هرگاه توزیع نایقینی زیگزاگیان به‌صورت

$$\Phi(x) = \begin{cases} 0 & x \le a \\ \dfrac{(x - a)}{2(b - a)} & a \le x \le b \\ \dfrac{(x + c - 2b)}{2(c - b)} & b \le x \le c \\ 1 & x \ge c \end{cases} \quad (۴)$$

باشد که با $Z(a,b,c)$ نمایش داده می‌شود؛ در اینجا a ، b و c اعداد حقیقی هستند به‌طوری‌که $a < b < \boldsymbol{c}$.

برنامه‌ریزی نایقینی که نخستین‌بار توسط لئو [۲۱] صورت‌بندی گردید به‌عنوان تعمیمی نظام‌مند از رویکردهای کلاسیک بهینه‌سازی شناخته می‌شود، زیرا به‌طور صریح به مسائل تصمیم‌گیری در شرایط وجود اطلاعات ناقص، مبهم یا مبتنی بر قضاوت‌های ذهنی می‌پردازد.

برنامه‌ریزی نایقین نوعی از برنامه‌ریزی ریاضی شامل متغیرهای نایقین است. فرض کنید x یک بردار تصمیم و ξ یک بردار نایقین است. تابع هدف نایقین $f(x,\xi)$ را نمی‌توان مستقیم کمینه کرد. می‌توان بجای آن مقدار مورد انتظار را کمینه کرد یعنی

$$\min_x f(x,\xi) \quad (۵)$$
$$s.t: M\{g_i(x,\xi) \le 0\} \ge \alpha_j, \quad j = 1,2,\dots,p$$

تبدیل می‌شود به

$$\min_x \; E[f(x,\xi)] \quad (۶)$$
$$s.t: M\{g_i(x,\xi) \le 0\} \ge \alpha_j, \quad j = 1,2,\dots,p$$

بطوریکه $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$دارای تابع توزیع $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ باشد. با استفاده از قواعد عملگر امید ریاضی در نظریه نایقینی، تابع هدفی به‌صورت $E[f(x,\xi_1,\xi_2,\dots,\xi_n)]$, که نسبت به $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ صعودی و نسبت به $\xi_{k+1}, \xi_{k+2}, \dots, \xi_n$ نزولی است، می‌تواند به‌صورت زیر نمایش داده شود [۲۲]:

$$\int_0^1 f\left(x.\Phi_1^{-1}(\alpha).\cdots.\Phi_k^{-1}(\alpha).\Phi_{k+1}^{-1}(\alpha).\cdots.\Phi_n^{-1}(\alpha)\right)d\alpha. \quad (۷)$$

به‌طور مشابه، قیود مدل را نیز می‌توان با ترکیب توزیع‌های معکوس نامعینِ مرتبط با متغیرهای نایقین موجود در مدل برنامه‌ریزی نایقین بیان کرد.

۴- تعریف مسئله و مدل‌سازی

مسئله اصلی موردمطالعه در پژوهش حاضر، تعیین سطوح بهینه قیمت بلیت هواپیما در کلاس‌های مختلف پروازی با هدف حداکثرسازی درآمد مورد انتظار شرکت‌های هواپیمایی در محیط نامعین است. تصمیم‌گیری در این حوزه با عدم قطعیت‌های گوناگونی نظیر نوسانات تقاضا، تحولات اقتصادی کلان و الزامات سیاست‌گذاری زیست‌محیطی همراه است. به همین دلیل، مطالعه از نظریه نایقینی لئو به‌عنوان چارچوبی مناسب برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مبتنی بر ارزیابی و باور خبرگان بهره می‌گیرد.

در مدل پیشنهادی، هزینه کربن به‌عنوان پارامتری نامعین با منشأ اقتصادی به تابع هدف افزوده شده و تأثیر آن بر ساختار قیمت‌گذاری بلیت بررسی می‌گردد. تمرکز محوری مدل بر تحلیل این پرسش است که گنجاندن هزینه کربن بر پایه درجه باور

خبرگان چه اثری بر تصمیمات قیمت‌گذاری شرکت‌های هواپیمایی خواهد گذاشت.

پارامترها

M: تعداد کل صندلی‌ها، تقسیم‌شده به ۳ کلاس

ω: نرخ تورم، متغیرنایقین

δ : پارامتری نایقین که اثرات فصلی را منعکس می‌کند

M^j: تعداد صندلی‌های موجود در هر کلاس

اندیس‌ها

J : اندیس مجموعه کلاس‌ها

متغیرهای تصمیم

C_j: تعداد تقاضای برآورد شده هر کلاس

P^j: قیمت صندلی‌ها در هر کلاس

Tax_j: مالیات کربن برآورد شده

مدل پیشنهادی یک شرکت هواپیمایی را در نظر می‌گیرد که دارای ظرفیت ثابت M صندلی است و این صندلی‌ها به دو کلاس اصلی اقتصادی و تجاری تقسیم‌بندی شده‌اند. هدف اصلی مدل، قیمت‌گذاری پویا و بهینه بلیت در کلاس‌های مختلف پروازی به‌منظور حداکثرسازی درآمد مورد انتظار شرکت هواپیمایی در محیط نایقین، با تأکید ویژه بر ادغام هزینه‌های مرتبط با انتشار کربن به‌عنوان پارامتر اقتصادی نایقین است.

تصمیم‌گیری در این حوزه با نایقینی‌های متعددی نظیر نوسانات تقاضا، تحولات اقتصادی کلان، الزامات سیاست‌گذاری زیست‌محیطی و هزینه کربن همراه است. به همین دلیل، مدل از نظریه نایقینی بائودینگ لئو به‌عنوان چارچوبی مناسب برای مدل‌سازی نایقینی‌های مبتنی بر درجه باور و ارزیابی خبرگان صنعت بهره می‌گیرد؛ رویکردی که به‌ویژه در شرایط محدودیت داده‌های تاریخی معتبر، دقت بالاتری نسبت به مدل‌های احتمالاتی سنتی ارائه می‌دهد.

در چارچوب پیشنهادی، قیمت بلیت در هر کلاس به‌عنوان متغیر تصمیم پویا تعریف می‌شود که در آن $j = 1,2$ به ترتیب کلاس‌های اقتصادی و تجاری، و t نشان‌دهنده زمان در فرآیند رزرو است. تقاضای واقعی برای هر کلاس (C_j) به‌صورت متغیر نایقین مدل‌سازی می‌گردد. هزینه کربن به‌عنوان یک متغیر نایقین اقتصادی به تابع هدف افزوده شده و توزیع‌های نایقین آن بر پایه درجه باور خبرگان تعیین می‌شود. تمامی صندلی‌ها باید تا زمان بسته شدن فروش T (معمولاً چند ساعت پیش از پرواز) تخصیص یابند، اما قیمت‌ها قابلیت تنظیم پویا بر اساس تقاضای مشاهده‌شده و نایقینی هزینه کربن را دارند.

هدف محوری مدل، بیشینه‌سازی درآمد مورد انتظار در شرایط نایقین، با تمرکز بر تحلیل دقیق تأثیر گنجاندن هزینه کربن بر استراتژی‌های قیمت‌گذاری پویا است. این چارچوب امکان شبیه‌سازی سناریوهای واقعی بازار را فراهم می‌کند و راهکارهایی برای برقراری تعادل میان سودآوری اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی پیشنهاد می‌دهد.

مدل بهینه‌سازی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned}
&\max_{p^j} \sum_{j=1}^{3} C_j\,(p^j - Tax_j) \\
&C_1 \le M^1 \\
&C_2 \le M^2 \\
&(1+\omega)p^j \le (1+\delta)P^j, j = 1,2 \\
&p^j \ge 0 \\
&\omega.\delta \ge 0.
\end{aligned} \qquad (۸)$$

تابع هدف سود شرکت هواپیمایی و قیود اول و دوم محدودیت صندلی‌های هواپیما در دو کلاس پروازی را بیان می‌کنند. رضایت مشتری در قیمت‌گذاری بلیت خطوط هوایی تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل بیرونی قرار دارد، از جمله شرایط آب‌وهوایی، الگوهای تقاضای فصلی، شاخص‌های اقتصادی منطقه‌ای، فشارهای تورمی و پویایی‌های اجتماعی ـ فرهنگی. این عوامل موجب

پیچیدگی در تصمیم‌گیری‌های مربوط به قیمت‌گذاری می‌شوند، زیرا تأثیر آن‌ها بر رفتار مصرف‌کننده اغلب مبهم است یا تنها با استفاده از داده‌های تاریخی به‌سختی قابل کمی‌سازی است. برای در نظر گرفتن این عدم‌قطعیت، چنین عواملی باید توسط خبرگان صنعت ارزیابی شده و به‌صورت متغیرهای نامعین در مدل وارد شوند. این رویکرد با اصول نظریه عدم‌قطعیت همسو است و امکان نمایش رسمی دانش ذهنی و بینش‌های کیفی را فراهم می‌سازد. در قید سوم p^j قیمت فعلی بلیت برای کلاس j، P^j بیشترین قیمت تاریخی که شرکت هواپیمایی در یک‌فصل مشابه برای فروش صندلی در کلاس j دریافت کرده است و δ یک متغیر نامعین است که اثرات فصلی بر قیمت‌گذاری را نشان می‌دهد. قید سوم تضمین می‌کند که تعدیلات قیمتی در محدوده‌های قابل‌قبول ناشی از تورم و نوسانات تقاضای فصلی باقی بماند. با افزایش تورم، تمایل مصرف‌کنندگان به هزینه‌کرد برای سفرهای غیرضروری معمولاً کاهش می‌یابد و این امر خطر فروش نرفتن صندلی‌ها را افزایش می‌دهد. برای مقابله با این وضعیت، شرکت‌های هواپیمایی ممکن است ناچار شوند قیمت بلیت‌ها را کاهش دهند تا توان رقابتی خود را حفظ کنند. به‌عنوان مثال، هنگام تعدیل قیمت بلیت در واکنش به روندهای تورمی، می‌توان یک پارامتر نامعین $\omega \geq 0$ را معرفی کرد تا میزان حساسیت قیمت نسبت به افزایش هزینه‌های اقتصادی را منعکس کند.

به‌کمک اعمال عملگر امید ریاضی، مسئله برنامه‌ریزی نایقین به یک مدل ریاضی معین و قابل‌حل‌تر تبدیل می‌شود:

$$
\begin{aligned}
&\max_{p^j} E\{\sum_{j=1}^{3} C_j(p^j - \quad Tax_j)\} && \text{تابع هدف}\\
&E\{C_1\} \leq M^1 && \text{محدودیت کلاس اول}\\
&E\{C_2\} \leq M^2 && \text{محدودیت کلاس دوم} \quad (۹)\\
&E\{(1+\omega)p^j\} \leq E\{(1+\delta)P^j\}, \qquad j = 1,2,3 && \text{محدودیت وابستگی قیمت به تورم و فصل}\\
&p^j \geq 0, Tax_j \geq 0 && \text{دامنه متغیرها}\\
&\omega, \delta \geq 0. && \text{دامنه متغیرها}
\end{aligned}
$$

٤-١- محدودیت‌های پژوهش

با وجود دستاوردهای پژوهش حاضر، برخی محدودیت‌ها قابل‌توجه است. نخست، ظرفیت هواپیما و ساختار کلاس‌های پروازی به‌صورت ثابت فرض شده و تصمیمات عملیاتی نظیر لغو پرواز یا تغییر نوع هواپیما در مدل لحاظ نشده است. دوم، مدل رقابت بین خطوط هوایی را در نظر نمی‌گیرد و تصمیمات قیمت‌گذاری در چارچوب یک شرکت منفرد تحلیل شده‌اند. سوم، توزیع‌های نایقینی بر پایه قضاوت خبرگان استخراج شده‌اند که هرچند در شرایط کمبود داده رویکردی مناسب است، اما ممکن است بازتاب‌دهنده تمامی پویایی‌های بازار نباشد. این محدودیت‌ها می‌توانند در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرند.

٥- نتایج پژوهش و بحث

مدل (۸) برای یک آژانس هواپیمایی ایرانی به‌منظور ارزیابی عملکرد آن در شرایط عملیاتی واقعی به‌کار گرفته شد. برای برآورد توزیع‌های نایقینی متغیرهای کلیدی شامل تقاضای برآورده‌شده (C_j)، فشار تورمی(ω) ، اثرات فصلی (δ) و (Tax_j) مالیات کربن برآورد شده از یک فرایند ساختاریافته استخراج قضاوت‌های خبرگانی بهره گرفته شد.

با الهام از روش دلفی و بر اساس رویکرد پیشنهادی وانگ و همکاران[۲۳]، کارشناسان صنعت هوانوردی از طریق پرسشنامه‌های ساخت‌یافته مورد ارزیابی قرار گرفتند تا درجه باور آن‌ها در خصوص پارامترهای نایقین استخراج شود. پاسخ‌های جمع‌آوری‌شده ادغام گردیدند و برای ایجاد توابع توزیع نایقینی تجربی به کار گرفته شدند. سپس، این توابع با استفاده از روش‌های رگرسیون نایقین [۲۴] مورد بررسی قرار گرفتند. این ترکیب روش‌شناختی امکان تخمین دقیق متغیرهای نایقین را حتی در نبود داده‌های تاریخی معتبر فراهم آورد.

این مطالعه بر هواپیماهای تجاری استاندارد مورد استفاده شرکت هواپیمایی متمرکز بود که دارای ظرفیت کل ۲۴۰ صندلی

بوده و صندلی‌ها در دو کلاس توزیع شده‌اند: ۲۰ صندلی در کلاس تجاری[1] و ۲۲۰ صندلی در کلاس اقتصادی[2].

علاوه بر این، حداکثر قیمت مجاز برای هر کلاس بلیت بر اساس مقادیر تاریخی دوره مشابه به‌صورت زیر محدود گردید.

اقتصادی $P^1 = \$40$

تجاری $P^2 = \$80$

تمام محاسبات در فصل پاییز و با تمرکز بر پروازهای داخلی شرکت انجام شده است.

نتایج تحلیل نشان داد که تقاضای نایقینی برآورده‌شده برای کلاس اقتصادی(C_1) ، کلاس تجاری(C_2) از توزیع‌های نایقینی متمایزی پیروی می‌کند که بر اساس قضاوت‌های خبرگانی استخراج شده و با اتکا به نظریه نایقینی لئو مدل‌سازی گردیده‌اند. این توزیع‌ها در ادامه به‌صورت خلاصه ارائه‌شده‌اند.

$$C_1 \cong \Phi_1(x) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\pi(160 - x)}{12\sqrt{3}}\right)} \quad (۱۰)$$

$$\mathrm{C}_2 \cong \Phi_2(x) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\pi(17 - x)}{3\sqrt{3}}\right)} \quad (۱۱)$$

علاوه بر این، همان روش ساختاریافته‌ای که برای برآورد نایقینی تقاضا به‌کار گرفته شده است، برای توصیف رفتار پارامترهای اقتصادی در شرایط نایقینی نیز به‌کاررفته است به‌ویژه عامل تورم (ω) و اثر فصلی (δ) .بر اساس استخراج قضاوت‌های خبرگانی و ارزیابی‌های مبتنی بر درجات باور، هر دو متغیر با استفاده از توزیع‌های نایقینی خطی مدل‌سازی شدند؛ توزیع‌هایی که در برنامه‌ریزی نایقین کاربرد دارند که درجات باور در یک بازه مشخص به‌صورت یکنواخت افزایش می‌یابند.

توزیع‌های نایقینی برآوردشده برای این پارامترها به‌صورت زیر هستند:

$$\omega \cong \Psi_1(x) = \frac{x - 1.1}{1.5 - 1.1} \quad (۱۲)$$

$$\delta \cong \Psi_2(x) = \frac{x - 1}{2.4 - 1}. \quad (۱۳)$$

نتایج تحلیل نشان داد که مالیات برآورد شده برای کلاس اقتصادی(C_1) ، کلاس تجاری(C_2) از توزیع‌های نایقینی متمایزی پیروی می‌کند که بر اساس قضاوت‌های خبرگانی استخراج‌شده و با اتکا به نظریه نایقینی لئو مدل‌سازی گردیده‌اند. این توزیع‌ها در ادامه به‌صورت خلاصه ارائه‌شده‌اند.

$$Tax_1 = \Phi(x) = \begin{cases} x \le 3 \\ \frac{(x - a)}{2(b - a)} \; 3 \le x \le 5 \\ \frac{(x + c - 2b)}{2(c - b)} \; 5 \le x \le 8 \\ 1 \qquad\qquad x \ge 8 \end{cases} \quad (۱۴)$$

[1] Business
[2] Economy

$$Tax_2 = \Phi(x) = \begin{cases} x \le 8 \\ \frac{(x - a)}{2(b - a)} \; 8 \le x \le 15 \\ \frac{(x + c - ۲b)}{2(c - b)} \; 15 \le x \le 18 \\ 1 \qquad x \ge 18 \end{cases} \qquad (۱۵)$$

این توابع، توزیع تجمعی درجات باور مربوط به هر متغیر نایقین را نمایش می‌دهند؛ توزیع‌هایی که بر اساس نظر باور خبرگان صنعت در فصل پاییز برای پروازهای داخلی استخراج‌شده‌اند. با بهره‌گیری از این توزیع‌ها، مدل برنامه‌ریزی نایقین متناظر با رابطه (۸) برای مطالعه موردی حاضر فرموله شده است، سپس در نرم‌افزار متلب[1] کد مربوط به مدل نوشته‌شده است.

حل این مدل، منجر به تعیین راهبرد بهینه قیمت‌گذاری به‌صورت زیر می‌گردد:

جدول ۱ مقادیر بهینه قیمت‌ها

درآمد کل	8851 $
P^1	41 $
P^2	71.5 $
Tax_1	5 $
Tax_2	14 $
مالیات کربن	1108 $

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که عامل فصلی‌بودن نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری استراتژی‌های قیمت‌گذاری پویا ایفا می‌کند. به‌ویژه در فصل پاییز، تمایل به پرداخت[2] مسافران به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و تقاضا عمدتاً به سمت سفرهای کاری و تجاری متمایل می‌شود. این الگو حاکی از آن است که مسافران در این دوره، حساسیت قیمتی بالاتری دارند و اولویت آن‌ها بر کارایی و ضرورت سفر استوار است.

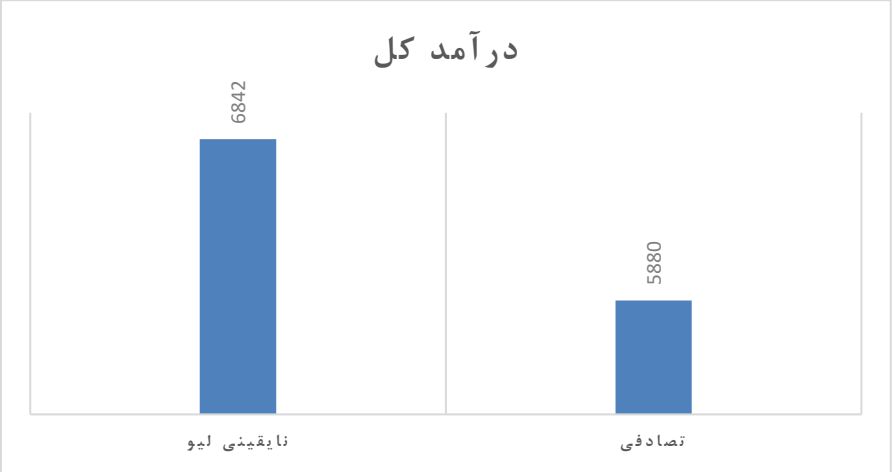
این نتیجه‌گیری بر ضرورت ادغام همزمان متغیرهای کلان‌اقتصادی و عوامل زمانی در چارچوب‌های قیمت‌گذاری پویا تأکید دارد، به‌خصوص در بازارهایی که با نوسانات فصلی شدید مواجه‌اند. چنین رویکردی نه‌تنها دقت پیش‌بینی تقاضا را افزایش می‌دهد، بلکه امکان تنظیم بهینه قیمت‌ها را برای حفظ سهم بازار و حداکثرسازی درآمد در شرایط نامطمئن فراهم می‌سازد. درنهایت، مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن این دینامیک‌های فصلی، راهکاری عملی برای تعادل میان سودآوری اقتصادی و پاسخگویی به الگوهای رفتاری مسافران ارائه می‌دهد.

۵-۱- اعتبارسنجی

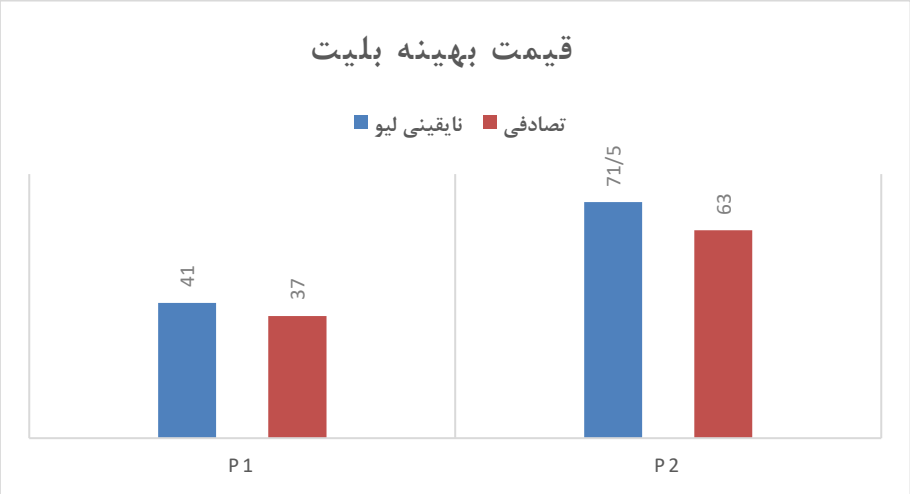
به‌منظور ارزیابی اعتبار مدل پیشنهادی، یک مطالعه مقایسه‌ای بین رویکرد مبتنی بر نظریه عدم‌قطعیت لئو و برنامه‌ریزی احتمالاتی[3] انجام شد. ازآنجاکه داده‌های تاریخی برای برخی پارامترهای کلیدی مدل محدود یا نامطمئن است، انتظار می‌رود رویکردهای مبتنی بر باور عملکرد متفاوتی نسبت به رویکردهای مبتنی بر احتمال داشته باشند.

نتایج حاصل از حل دو مدل به‌صورت زیر نشان داده‌شده است، که اگرچه مقادیر بهینه برخی متغیرها متفاوت است، اما الگوی کلی تصمیم‌گیری و جهت تغییرات در هر دو مدل مشابه است. این همگرایی رفتاری بیانگر پایداری ساختار مدل و اعتبار فرمول‌بندی ارائه‌شده است.

[1] MATLAB
[2] willingness to pay
[3] Stochastic



شکل ۱ مقایسه درآمد روش نایقینی لئو و تصادفی



شکل ۲ مقایسه قیمت‌های بهینه هر کلاس

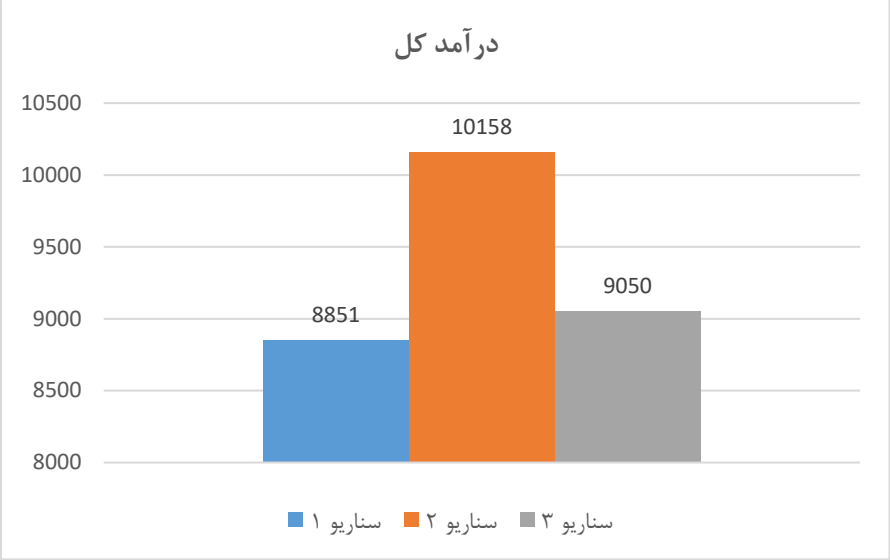
درمجموع، این مقایسه نشان می‌دهد که مدل مبتنی بر نظریه عدم‌قطعیت لئو می‌تواند به‌عنوان ابزاری قابل‌اعتماد برای تصمیم‌گیری در شرایط فقدان داده‌های آماری کافی مورد استفاده قرار گیرد

۵-۲- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت به‌عنوان ابزاری مدیریتی کلیدی، امکان ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای اصلی مدل به‌ویژه نحوه تخصیص مالیات کربن بر عملکرد اقتصادی شرکت هواپیمایی را فراهم می‌کند. این تحلیل بر پایه سه سناریو اصلی بنا شده است که هرکدام یکی از ابعاد پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) را به چالش می‌کشد و به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا سیاست‌های متعادل‌تری طراحی کنند. نتایج مدل برای یک شرکت هواپیمایی ایرانی با ظرفیت ۲۴۰ صندلی (تقسیم‌شده به کلاس‌های اقتصادی و تجاری) نشان می‌دهد که درآمد کل و سطوح قیمت‌گذاری تحت تأثیر مستقیم نحوه اعمال مالیات کربن قرار دارد.

جدول ۲ نتایج تحلیل حساسیت تحت سناریوهای مختلف

سناریو	درآمد کل	قیمت اقتصادی	قیمت تجاری	مجموع مالیات
سناریو ۱	۸۸۵۱	۴۱	۷۱.۵	۱۱۰۸
سناریو ۲	۱۰۱۵۸	۴۶	۸۵.۵	۱۱۰۸
سناریو ۳	۹۰۵۰	۴۱	۷۱.۵	۱۱۰۸



شکل ۳ تحلیل حساسیت سناریوهای مختلف

سناریو ۱: پرداخت مالیات کربن توسط شرکت هواپیمایی

در این سناریو، شرکت تمام هزینه مالیات کربن را تقبل می‌کند و قیمت بلیت ثابت می‌ماند. درآمد کل به ۸۸۵۱ دلار می‌رسد، که پایین‌ترین سطح میان سناریوهاست. این رویکرد از دیدگاه زیست‌محیطی مطلوب است، زیرا انتشار را کاهش می‌دهد و با اهداف توافق پاریس همخوانی دارد، اما از منظر اقتصادی، سود شرکت را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد و پایداری مالی را تهدید می‌کند. از دیدگاه مدیریتی، این سناریو ریسک کاهش سرمایه‌گذاری در فناوری‌های سبز را افزایش می‌دهد و برای شرکت‌های با حاشیه سود پایین غیرقابل پایدار است.

سناریو ۲: پرداخت مالیات کربن توسط مشتری (افزایش قیمت بلیت)

در این حالت، مالیات کربن به قیمت بلیت اضافه می‌شود، که درآمد کل را به بالاترین سطح (۱۰۱۵۸ دلار) می‌رساند. قیمت کلاس اقتصادی به ۴۶ دلار و کلاس تجاری به ۸۵.۵ دلار افزایش می‌یابد، درحالی‌که مجموع مالیات ثابت (۱۱۰۸ دلار) مستقیماً به جبران کربن اختصاص می‌یابد. این سناریو عملکرد زیست‌محیطی را بهبود می‌بخشد، اما از دیدگاه اجتماعی، تحمیل هزینه بر مصرف‌کنندگان (به‌ویژه اقشار حساس به قیمت) می‌تواند تقاضا را کاهش دهد و عدالت دسترسی را مختل کند. مدیران می‌توانند با بازاریابی سبز و گزینه‌های اختیاری جبران کربن، پذیرش مشتریان را افزایش دهند و ریسک از دست دادن سهم بازار را مدیریت کنند.

سناریو ۳: عدم اعمال مالیات کربن

این سناریو درآمد کل را در سطح متوسط (۹۰۵۰ دلار) نگه می‌دارد و قیمت‌ها را ثابت (۴۱ دلار اقتصادی و ۷۱.۵ دلار تجاری) حفظ می‌کند. از منظر اقتصادی ایده‌آل است و دسترسی اجتماعی را تضمین می‌نماید، اما از دیدگاه زیست‌محیطی ناکارآمد است، زیرا انتشار کربن کنترل نمی‌شود و با تعهد کربن صفر تا ۲۰۵۰ ناسازگار است. از دیدگاه مدیریتی، این رویکرد ریسک‌های بلندمدت مانند تحریم‌های بین‌المللی یا فشارهای قانونی را افزایش می‌دهد و برای صنعتی حساس مانند هوانوردی، غیرعملی به شمار می‌رود.

۵-۳- نتیجه‌گیری تحلیل حساسیت و پیشنهادات سیاست‌گذاری

تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که سناریو ۲ بالاترین درآمد را فراهم می‌کند، اما تعادل پایداری را بر هم می‌زند: سناریو ۱ اقتصاد را، سناریو ۲ عدالت اجتماعی را و سناریو ۳ پایداری زیست‌محیطی را فدا می‌کند. از دیدگاه مدیریتی، رویکرد بهینه ترکیبی

است، مانند اعمال مالیات تدریجی با یارانه‌های دولتی برای شرکت‌ها تا هزینه مالیات کمتر شود و ریسک‌های مالی کاهش یابد، یا گزینه‌های اختیاری برای مشتریان تا مسئولیت زیست‌محیطی حفظ شود. تصمیم‌گیران (مدیران شرکت‌ها و سیاست‌گذاران) می‌توانند با شبیه‌سازی‌های پیشرفته‌تر، سیاست‌هایی طراحی کنند که همزمان سودآوری را حداکثر کند، دسترسی را عادلانه نگه دارد و انتشار را به سمت اهداف جهانی هدایت نماید. این تحلیل ابزار ارزشمندی برای استراتژی‌های بلندمدت در صنعت هوانوردی فراهم می‌آورد.

نتایج عددی نشان می‌دهد که گنجاندن هزینه کربن در تابع هدف، تنها به افزایش سطح قیمت بلیت منجر نمی‌شود، بلکه ساختار نسبی قیمت بین کلاس‌های پروازی را نیز دستخوش تغییر می‌کند. به‌طور مشخص، انتقال بخشی از هزینه کربن به مسافران باعث افزایش حساسیت قیمتی در کلاس اقتصادی و تمرکز تقاضا بر سفرهای ضروری‌تر می‌شود، درحالی‌که کلاس تجاری پایداری تقاضای بیشتری از خود نشان می‌دهد. این الگو بیانگر آن است که قیمت‌گذاری سبز می‌تواند به‌عنوان یک سیگنال رفتاری عمل کرده و انتخاب‌های مصرف‌کنندگان را به سمت الگوهای سفر آگاهانه‌تر از نظر زیست‌محیطی هدایت کند. در نتیجه، سیاست قیمت‌گذاری مبتنی بر کربن نه‌تنها ابزاری برای جبران انتشار، بلکه مکانیزمی مؤثر برای مدیریت تقاضا و همسویی رفتار مسافران با اهداف پایداری محسوب می‌شود..

۵-٤- پیشنهادهای مطالعات آتی

پژوهش‌های آینده می‌توانند چارچوب پیشنهادی را در چند مسیر گسترش دهند. نخست، توسعه مدل به سطح شبکه پروازی و بررسی تعامل بین مسیرها می‌تواند واقع‌گرایی مدل را افزایش دهد. دوم، ادغام تصمیمات عملیاتی نظیر لغو پرواز، تخصیص ناوگان و انتخاب نوع هواپیما در حضور هزینه کربن، افق جدیدی برای تحلیل سودآوری پایدار فراهم می‌کند. سوم، مدل‌سازی رقابت قیمتی بین خطوط هوایی با استفاده از بازی‌های نایقینی یا مدل‌های دوسطحی می‌تواند رفتار استراتژیک بازار را بهتر تبیین کند. در نهایت، ترکیب نظریه عدم‌قطعیت با ابزارهای یادگیری ماشین برای به‌روزرسانی پویا توزیع‌های مبتنی بر باور خبرگان، مسیر نوینی برای تصمیم‌گیری تطبیقی در صنعت هوانوردی پیشنهاد می‌دهد.

۶- مراجع

[1] Doganis R. Flying off course: The economics of international airlines. London: Routledge; 2013.

[2] International Air Transport Association. IATA review. Montreal: IATA; 2019.

[3] Talluri KV. The theory and practice of revenue management. Vol. 1. Boston: Kluwer Academic Publishers; 2004.

[4] Maglaras C. Dynamic pricing strategies for multiproduct revenue management problems. Manuf Serv Oper Manag. 2006;8:136–148.

[5] Kavacık MZ. Sustainable development in aviation industry and the case of Turkish Airlines. In: Proceedings of the 3rd International Symposium on Sustainable Development; 2012; Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.

[6] Almasi M, Bagerian M. Airline pricing: an uncertain programming approach. OPSEARCH. 2025;62(1):123–145. doi:10.1007/s12597-025-00998-8..

[7] Littlewood K. Forecasting and control of passenger bookings. The Airline Group of the International Federation of Operational Research Societies. 1972;12:95–117.

[8] Smith BC, Leimkuhler JF, Darrow RM. Yield management at American Airlines. Vol. 1. 1992.

[9] Weatherford LA. A taxonomy and research overview of perishable-asset revenue management: yield management, overbooking, and pricing. Oper Res. 1992;40(5):831–844. doi:10.1287/opre.40.5.831.

[10] Yao K. Uncertain regression analysis: an approach for imprecise observations. Soft Comput. 2018;22:5579–5582. doi:10.1007/s00500-017-2521-y.

[11] Yu JC. A novel fuzzy multi-objective programming model for airline dynamic seat. J Comput Appl Math. 2017;312:71–84.

[12] Zhang Y. The impacts of pro-environmental values and knowledge on aviation voluntary carbon offsetting: a Mainland China study. J China Tour Res. 2022;18(3):495–509. doi:10.1080/19388160.2020.1868368.

[13] Raghavan S. Metrics for sustainable aviation finance. J Int Finance Econ. 2023;23(1):129–141. doi:10.18374/JIFE-23-1.9.

[14] Koç E. Green marketing strategies and climate change awareness in sustainable transportation: the case of airline companies. Mar Sci Technol Bull. 2023;12(4):459–472. doi:10.33714/masteb.1375842.

[15] Kyrylenko OM. Intellectualization of logistics and supply chain management. Intellect Logist Supply Chain Manag. 2023;20:38–45. doi:10.46783/smart-scm/2023-20-4.

[16] Cui Q. The online pricing strategy of low-cost carriers when carbon tax and competition are considered. Transp Res Part A Policy Pract. 2019;121:420–432. doi:10.1016/j.tra.2019.02.002.

[17] Grimme W. Measuring the long-term sustainability of air transport – an assessment of the global airline fleet and its CO2-emissions up to the year 2050. Cologne: German Aerospace Center (DLR), Air Transport and Airport Research; 2024.

[18] Fahimi B. Customer willingness to pay for carbon offsetting in aviation: a theory of planned behavior approach. Padua: University of Padua, Department of Economics and Business; 2025.

[19] International Air Transport Association. Access to SAF Europe brief [Internet]. Montreal: IATA; 2025 [cited 2026 Feb 25]. Available from: https://www.iata.org/en/programs/sustainability/reports/access-to-saf-europe-brief/

[20] Liu B. Uncertainty theory. In: Uncertainty Theory. Berlin: Springer; 2007.

[21] Liu B. Some research problems in uncertainty theory. J Uncertain Syst. 2009;3(1):3–10.

[22] Liu B. Theory and practice of uncertain programming. Vol. 239. Berlin: Springer; 2009.

[23] Wang XS, G Z. Delphi method for estimating uncertainty distributions. Inf: An Int Interdiscip J. 2012;15(2):449–460.

[24] Liu B. Uncertainty Theory. Berlin: Springer; 2015. doi:10.1007/978-3-662-44354-5.