Journal of Technology in Aerospace Engineering

Vol. 10, No. 1, pp. 53-66, 2026

https://doi.org/10.22034/jtae.2026.10.1.5

Journal Homepage: https://www.jtae.ari.ac.ir

E-ISSN: 2676-4253

Original Research Paper

Analysis and Optimization of Economic Fueling Strategies for Airline Fuel Network Management Based on Real Flight Data

Seyed Jalal Ziaei[1*] and Sharareh Farahani Kheyrabadi [2]

*1. Industrial Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
2. Industrial Engineering and Management Department, Ghiaseddin Jamshid Kashani University, Qazvin, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 18 August 2025
Revised 26 October 2025
Accepted 26 October 2025
Available Online 26 October 2025

Keywords:

Economic fueling
Aviation industry
Airlines
Operational costs
Fuel management
Linear programming

ABSTRACT

Efficient fuel management in airlines is critically important because fuel costs account for a substantial share of overall flight operations. This study presents a linear programming model to determine optimal fuel loading across an airline's flight network, incorporating aircraft technical and operational constraints, airport-specific fuel price variations, and flight-specific conditions. Unlike traditional methods that operate segment-by-segment using a fixed fuel consumption coefficient, the proposed model models fuel consumption as a function of flight distance, cruising altitude, meteorological conditions, and aircraft weight. To evaluate the model's performance, real operational data from a Brazilian airline network comprising 12 flight segments were used. Results indicate that, despite a slight increase in total fuel consumption, the proposed strategy significantly reduces overall fuel procurement costs—resulting in annual savings exceeding USD 2.3 million for a 10-aircraft fleet. The analysis shows that maximum fuel loading occurs at airports with lower fuel prices, whereas at high-cost airports, fueling is restricted to the legal minimum. These findings confirm the model's potential to lower operational costs and enhance fuel efficiency in airline operations.

* Corresponding Author's E-mail: ziayei@yahoo.com

How to Cite this Article:
S. J. Ziaei and S. Farahani Kheyrabadi, "Analysis and optimization of economic fueling strategies for airline fuel network management based on real flight data," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 53-66, 2026, (in Persian), https://doi.org/10.22034/jtae.2026.10.1.5.

COPYRIGHTS
Authors retain the copyright and full publishing rights.
Published by ARI. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

OPEN ACCESS

فناوری در مهندسی هوافضا

سال ۱۴۰۵، دورهٔ ۱۰، شمارهٔ ۱، صفحهٔ ۵۳-۶۶

https://doi.org/10.22034/jtae.2026.10.1.5

Journal Homepage: https://www.jtae.ari.ac.ir

شاپای الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۲۵۳

مقاله پژوهشی

تحلیل و بهینه‌سازی استراتژی‌های سوخت‌گیری اقتصادی برای مدیریت شبکه‌ای سوخت خطوط هوایی بر اساس داده‌های واقعی پرواز

سید جلال ضیایی[1*] و شراره فراهانی‌خیرآبادی[2]

*۱- کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت و صنایع، دانشگاه غیاث الدین جمشید کاشانی، قزوین، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۷ مرداد ۱۴۰۴

بازنگری ۰۴ آبان ۱۴۰۴

پذیرش ۰۴ آبان ۱۴۰۴

اولین انتشار ۰۴ آبان ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

سوخت‌گیری اقتصادی

صنعت هوانوردی

خطوط هوایی

هزینه‌های عملیاتی

مدیریت سوخت

برنامه‌ریزی خطی

چکیده

مدیریت بهینه سوخت در خطوط هوایی، به‌دلیل سهم بالای هزینه سوخت در عملیات پروازی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای تعیین مقادیر بهینه سوخت‌گیری در شبکه پروازی خطوط هوایی ارائه می‌دهد که ضمن لحاظ محدودیت‌های فنی و عملیاتی هواپیما، تفاوت قیمت سوخت در فرودگاه‌ها و شرایط پروازی را نیز در نظر می‌گیرد. برخلاف روش‌های مرسوم که اغلب به‌صورت بخش به بخش و با فرض ضریب ثابت مصرف سوخت عمل می‌کنند، مدل پیشنهادی مصرف سوخت را به‌صورت تابعی از مسافت، ارتفاع پرواز و شرایط جوی مدل‌سازی کرده و اثر وزن هواپیما را نیز وارد محاسبات می‌سازد. به منظور اعتبارسنجی مدل، داده‌های واقعی مربوط به یک شبکه خطوط هوایی در برزیل با ۱۲ بخش پروازی به‌کار گرفته شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد، با وجود افزایش اندک مصرف سوخت، موجب کاهش قابل توجه هزینه‌های تأمین سوخت می‌شود که برای یک ناوگان ۱۰ فروندی معادل صرفه‌جویی سالانه بیش از ۲.۳ میلیون دلار است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که بیشترین سوخت‌گیری در فرودگاه‌های با قیمت پایین انجام شده و در فرودگاه‌های با قیمت بالا به حداقل مقدار قانونی محدود شده‌است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از مدل پیشنهادی می‌تواند به کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود بهره‌وری سوخت در خطوط هوایی منجر شود.

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ziayei@yahoo.com

How to Cite this Article:

S. J. Ziaei and S. Farahani Kheyrabadi, "Analysis and optimization of economic fueling strategies for airline fuel network management based on real flight data," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 53-66, 2026, (in Persian), https://doi.org/10.22034/jtae.2026.10.1.5.

COPYRIGHTS

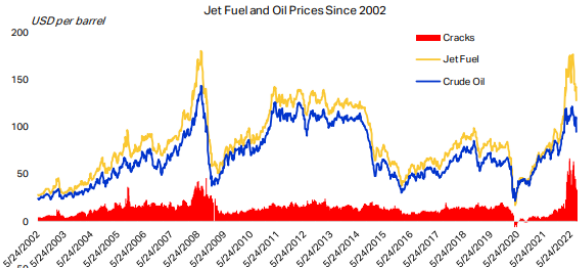
Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by ARI. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

OPEN ACCESS

۱ مقدمه

طبق مطالعات انجام شده، مصرف سوخت، بعد از هزینه‌های نیروی انسانی، بیشترین هزینه را برای خطوط هوایی در بر دارد. براساس برآوردهای انجام شده، مصرف سوخت می‌تواند بین ۲۰ تا ۳۵ درصد از کل هزینه‌های عملیاتی مستقیم را در هر نوع خط هوایی در برگیرد. یکی از ویژگی‌های بارز در هوانوردی اقتصادی، حضور در بازارهای رقابتی با سود حاشیه‌ای کمتر، در مقایسه با شیوه‌های حمل و نقل دیگر است. در این صورت، خطوط هوایی که می‌توانند مصرف سوخت را به‌طور بهینه‌ای مدیریت کنند، بلاشک می‌توانند بازارهای رقابتی را تسخیر کرده و بقاء خود را تضمین کنند. براساس تخمین‌های IATA[1] ، به ازای هر دلار که برای سوخت هزینه می‌شود، خطوط هوایی می‌بایست سودی برابر با ۲۰–۱۵ دلار دریافت کنند تا سود حاشیه‌ای گفته‌شده، حاصل شود.



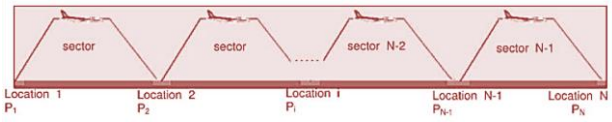
شکل ۱– سیر تکاملی قیمت نفت خام و سوخت جت.

Fig. 1. Evolution of crude oil and jet fuel prices.

علاوه بر این، از سال ۲۰۰۰، صنعت خطوط هوایی با محیطی مواجه شده‌است که مشخصه آن قیمت سوخت و نوسانات بسیار بالاتر است. پر واضح است که قیمت بازار برای سوخت جت بسیار مرتبط با قیمت نفت خام خواهد بود. در اوایل سال ۲۰۰۲، قیمت میانگین یک بشکه نفت ۲۶/۰۱ دلار آمریکا بود و در اواخر سال ۲۰۰۵ به ۵۶/۰۸ دلار آمریکا افزایش یافت و این در حالی بود که در آگوست ۲۰۰۸ به بالاترین میزان خود یعنی ۱۶۱/۱۳ دلار آمریکا رسید. برخلاف پیشرفتهای تکنولوژیکی در صنعت نفت که منجر به کشف ذخایر جدید شده‌است، طبیعت ژئوپولیتیک خاورمیانه و حوادث طبیعی و بحران مالی جهانی در سال ۲۰۰۸ باعث متغیر بودن قیمت نفت و افزایش چشمگیر آن در طی سالهای اخیر شده‌است. در اوایل سال ۲۰۰۹ به دلیل رکود شدید اقتصاد جهانی، قیمت نفت تا حد قابل توجهی کاهش یافت. با این حال، قیمت نفت در اواسط سال ۲۰۱۰ به حدود ۷۰/۰۰ دلار آمریکا رسید. در دهه ۲۰۱۰، قیمت سوخت جت شش برابر سطح دهه ۱۹۹۰ بود. در حالی که قیمت سوخت جت با شروع همه‌گیری کووید–۱۹ به میزان قابل‌توجهی کاهش یافت، پس از آن به دلیل فشارهای تورمی و جنگ در اوکراین در اوایل سال ۲۰۲۲ به شدت بازگشت شکل (۱).

بنابراین، در طی سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به مصرف سوخت در خطوط هوایی شده‌است. استفاده از برنامه‌های حفاظت از سوخت، یکی از روش‌های مناسب جهت بقای خطوط هوایی است، به‌طوری‌که مجموعه‌ای از تخمین‌ها در زمینه عملیات و نگهداری خطوط هوایی منجر به حداقل رساندن مصرف سوخت شده‌است. گروه‌های چند رشته‌ای در خطوط هوایی، تمامی جنبه‌های مرتبط با مصرف سوخت، مانند کاهش پسا (تطابق سطوح، وضعیت سطوح رنگ‌شده و یا صیقل‌کاری شده، تنظیمات کنترل پرواز و غیره)، فرسایش موتور، تمیزی هواپیما، افزایش وزن عملیاتی پایه (BOP)[2] به دلیل جذب گرد و خاک و رطوبت، را آنالیز می‌کنند و همچنین روش‌های عملیاتی مرتبط با تکنیک‌های پرواز و رویه‌های اتخاذ شده را هم بررسی می‌کنند [۱].

منطقه عملیاتی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش سوخت داشته باشد زیرا این بخش، تنها قسمتی است که قادر به تأثیرگذاری و تعیین مستقیم حجم کلی سوخت مصرف شده می‌باشد. البته در میان سیاست‌ها و روش‌های مناسبی که از سوی خلبان و توزیع کنندگان اتخاذ می‌شوند شکل (۲). بر طبق مطالعات انجام شده توسط شرکت امبرائر[3]، ۱٪ صرفه‌جویی در مصرف سوخت می‌تواند به راحتی از طریق شیوه‌های عملیاتی منسجم مانند روش‌های عملیاتی متمرکز بر صرفه‌جویی آسان سوخت که نیازمند سرمایه و هزینه گزافی نیست و به ویژه آموزش خلبان و عزیمت پروازی انجام شود [۲].



شکل ۲– برنامه پروازی هر هواپیما روی یک مسیر.

Fig. 2. Flight plan of each aircraft on a route.

یکی از شیوه‌هایی که غالباً توسط خطوط هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد سوخت‌گیری اقتصادی[4] یا سوخت رسانی اضافه[5] می‌باشد. تغییرات قیمت سوخت در هر منطقه، در دسترس نبودن

1. International Air Transport Association
2. Basic Operating Weight
3. EMBRAER
4. Economic Fueling
5. Fuel Tankering

سوخت (مثلاً در فرودگاه‌های دور دست) و یا محدودیت‌های مربوط به قرارداد با تأمین‌کنندگان سوخت در طی مسیر می‌تواند منجر به حمل سوخت بیشتری نسبت به کمترین میزان مورد نیاز سوخت هواپیما برطبق آئین و مقررات شود، در این صورت هزینه‌های تأمین سوخت هم به حداقل می‌رسد. به این روش که در طی آن، سوختی مازاد بر آنچه که مورد نیاز هواپیماست، حمل می‌شود سوخت‌گیری مازاد یا ذخیره اقتصادی گفته می‌شود. از آنجایی که حمل سوخت اضافه، منجر به وزن اضافه و در نتیجه مصرف سوخت بیشتر می‌شود، تجزیه و تحلیل هزینه حمل این سوخت اضافه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌طور کلی، خطوط هوایی، امکان‌سنجی اقتصادی حمل سوخت را به‌صورت بخش به بخش در یک هواپیما تحلیل می‌کنند. در هر بخش، اگر سوخت‌گیری امکان‌پذیر باشد، در این صورت در مبدأ به اندازه‌ای سوخت اضافه وارد هواپیما می‌شود که هنگام رسیدن به مقصد، سوخت مورد نیاز تعیین‌شده براساس مقررات بخش بعدی تأمین باشد.

علاوه بر این، به‌دلیل وزن اضافه‌ای که این عملیات به هواپیما تحمیل می‌کند، برخی نیازمندی‌ها و شروط باید در هر بخش از هواپیما که سوخت اضافه حمل می‌شود، لحاظ شوند. مثلاً: حداکثر وزن برخاست[1] (MTOW) در فرودگاه مبدأ نباید بیش از مقدار مجاز باشد، همچنین حداکثر وزن فرود[2] (MLW) در فرودگاه مقصد نباید بیش از حد مجاز باشد و ظرفیت سوخت ماکزیمم در مخازن هواپیما هم نباید بیش از حد باشد. یکی دیگر از جنبه‌های مهم این قضیه که عموماً توسط خطوط هوایی مورد توجه قرار نمی‌گیرد خرابی و نقصان سیستم‌های دیگر هواپیماست که متأثر از وزن فرود تحمیل شده‌است. مطالعات انجام شده توسط ناسا نشان می‌دهد که فرسایش ترمزها، تایرها و سیستم‌های برگشتی موتور در هنگامی که هواپیما با وزنی قریب به ماکزیمم وزن فرود سازه‌ای پرواز می‌کند، تشدید می‌شود [۳].

عموماً، خطوط هوایی از یک آنالیز بخش به بخش برای مطالعه امکان‌پذیری و سودمندی سوخت‌گیری مازاد استفاده می‌کنند. تأثیرات شبکه، مانند به حداقل رساندن قیمت برای تمامی منابع از طریق برنامه‌ریزی برای یک هواپیمای در حال پرواز به شکل همزمان و یکپارچه، هنوز مورد ارزیابی قرار نگرفته‌اند. اغلب، آنالیز قیمت سر به سر دارای قاعده و اسلوب خاصی نیست و معمولاً سوخت‌گیری مازاد فقط زمانی که قیمت سوخت ارزان‌تر است، اجرا می‌شود. بعضی اپراتورها مسائل مربوط به مصرف سوخت اضافه‌ای که ناشی از وزن برخاست افزوده به دلیل سوخت‌گیری مازاد است را نادیده می‌گیرند. لذا در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی ارائه شده‌است که با درنظر گرفتن تمامی ملاحظات از قبیل مشخصات فنی و عملیاتی هواپیما، محدودیت‌ها و شروط عملیاتی، مقادیر بهینه سوخت‌گیری در طول یک مسیر شبکه ای از خطوط هوایی را تعیین می‌کند.

۲ پیشینه تحقیق

بنابر مطالعات شرکت امبرائر [۴]، آنالیز امکان‌پذیری اقتصادی سوخت‌گیری مازاد در یک بخش واحد، با مقایسه قیمت سر به سر (P_{deq}) و با استفاده از چارت‌ها و جداول در دفترچه راهنمای عملکرد هواپیما و با توجه به قیمت واقعی سوخت در مقصد (P_d)، انجام می‌شود. اگر قیمت واقعی سوخت در مقصد بیشتر از قیمت سر به سر باشد، سوخت‌گیری اضافه در فرودگاه مبدأ امکان‌پذیر است. توصیه می‌شود که مقدار سوخت در فرودگاه مبدأ باید تا حدی باشد که در هنگام فرود هواپیما در فرودگاه مقصد، سوخت باقیمانده دقیقاً کمترین میزان سوخت مورد نیاز برای بخش بعدی باشد. روابط زیر تعیین‌کننده قیمت سر به سر در مقصد هستند.

$$P_{deq} = \frac{P_o}{(1-f)} \qquad (۱)$$

$$f = \frac{dWf}{dW} \qquad (۲)$$

P_{deq} در رابطه (۱) نشان‌دهنده قیمت سر به سر در مقصد است. این معادلات نشان‌دهنده کمترین قیمت سوخت در ایستگاه مقصد هستند که حمل سوخت اضافه از ایستگاه مبدأ را از نظر اقتصادی امکان‌پذیر می‌سازند. در این معادلات، P_o قیمت سوخت در فرودگاه مبدأ، f ضریب مصرف سوخت dWf، تغییر سوخت مصرفی(kg) و dW تغییر وزن هواپیما هستند. ضریب f نسبت به طول بخش پروازی، ارتفاع و سرعت پرواز و میانگین سرعت باد دارای حساسیت می‌باشد. به‌طور کلی، ضریب f از طریق سیستم‌های برنامه‌ریزی ناوبری کامپیوتری اعلام می‌شود. انتظار می‌رود که مقادیر بین ۳ تا ۵٪ در بخش‌های کوتاه یا متوسط (تا ۱۰۰۰nm) در هواپیماهای منطقه‌ای با ظرفیت ۱۱۰–۷۰ سرنشین، منطقی باشد. چارت‌های موجود در دفترچه راهنمای پرواز این هواپیماها می‌توانند برای تعیین ضریب f و همچنین P_{deq} به‌کار روند. به عقیده سابویا [۵] قیمت‌های سر به سر و قیمت‌های واقعی سوخت در مقصد باید با هم مقایسه شوند. برای انجام این مقایسه، می‌توان با استفاده از الگوریتمی که با توجه به اطلاعات ارائه شده در دفترچه راهنمای پرواز هر هواپیما، تهیه می‌شود، ضریب f را تعیین نمود. با

1. Maximum Takeoff Weight

2. Maximum Landing Weight

استفاده از این الگوریتم می‌توان درصد میانگین سوخت اضافه در هواپیما را با توجه به یک وزن فرود مرجع، که حدود $۴۰۰۰kg$ کمتر از بیشترین وزن فرود سازه‌ای (MSLW) در یک بخش مشخص است، تعیین کرد. برای رسیدن به این هدف، درصد سوخت اضافه در این نوار وزنی، تقریباً ثابت در نظر گرفته می‌شود. مقدار سوخت برای هر بخش با استفاده از چارت‌های ساده شده برنامه‌ریزی در دفترچه راهنمای عملکرد هواپیما، محاسبه می‌شود. سپس، درصد میانگین سوخت برای مجموعه‌ای از مسافت‌ها و ارتفاعات پروازی از پیش تعیین شده محاسبه خواهد شد. درصدهای بدست آمده نشان‌دهنده ارزش ضریب f هستند.

استروپ و لاکی [۶] یک مدل تصمیم‌گیری ارائه می‌کنند که براساس آن می‌توان آن قسمت از مسیر را که هواپیما به سوخت‌گیری مازاد احتیاج دارد، تعیین کرد. براساس این مدل می‌توان قیمت سوخت و محدودیت‌های مربوط به تأمین سوخت و مکان تأمین سوخت را مشخص نمود. آنها از یک ضریب ثابت f در تحلیل‌های خود استفاده می‌کنند.

دارابل و لوفلین [۷] یک استراتژی را برای سوخت‌گیری پیشنهاد می‌کنند که می‌تواند برای پروازهای کوتاه‌مدت و متوسط مورد توجه قرار گیرد. آنها یک مدل جهت انتخاب بهترین مکان‌ها و تأمین‌کنندگان سوخت در هر بخش را براساس: قیمت، قابلیت دسترسی، مصرف سوخت و هزینه های سوخت‌گیری با توجه به یک ضریب ثابت f و اطلاعات واقعی مربوط به پرواز موردنظر، ارائه می‌دهند. استروپ و ولمر [۸] هم یک مدل کلی برنامه‌ریزی خطی جهت به حداقل رساندن هزینه‌های تأمین سوخت در هواپیماهای مختلف پیشنهاد می‌کنند. این مدل نیز براساس یک ضریب ثابت f ارائه شده‌است. در مدل ایشان تصمیم‌گیری‌های پیرامون تأمین سوخت براساس قیمت سوخت و دو محدودیت شبکه‌ای اتخاذ می‌شوند. محدودیت‌های مربوط به فرودگاه: کل سوختی که فرودگاه می‌تواند برای تمامی پروازهایش تأمین کند و کل سوختی که فرودگاه با تأمین کننده سوخت قرارداد کرده است. این مدل جهت به حداقل رساندن هزینه‌های تأمین سوخت در یک هواپیمای مشخص، در دو مسیر و با ده بخش دور از هم انجام شده و نهایتاً صرفه‌جویی ۵/۶۹ درصد در هزینه‌های سوخت حاصل شده‌است.

زوئین و همکارانش [۹] یک مدل تصمیم‌گیری جهت تعیین مقدار سوختی که در هر فرودگاه براساس برنامه زمانی هواپیما باید تأمین شود ارائه می‌کنند. این مدل برای به حداقل رساندن هزینه‌های تأمین سوخت و با توجه به افق‌های برنامه‌ریزی مشخص زمانی است. این مسأله به‌عنوان یک مسأله موجودی چندمرحله‌ای مدل‌سازی شده و در مسیرهای خطوط هوایی خاورمیانه به‌کارگرفته شده‌است. آبدلقانی و همکارانش [۱۰] با توجه به یک ضریب ثابت f و استفاده از آن در سناریوهای قیمتی مختلف، از این مدل برای تأمین سوخت در مکان‌های مختلف استفاده کرده‌اند. ایشان چندین سناریوی تأمین سوخت و سناریوی بخش به بخش را تحلیل نموده‌اند. براساس تحقیقات ایشان در آنالیز بخش به بخش با صرفه‌جویی ۵ درصدی و در آنالیز چندبخشی با صرفه‌جویی ۳ درصدی مواجه شده‌اند.

گابریل و سان جووان [۱۱] یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه را برای بارگیری سوخت خطوط هوایی با درنظر گرفتن سوخت پایدار هوانوردی (SAF)[1] توسعه داده‌اند که معیارهای اقتصادی و زیست محیطی را بطور همزمان با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی بهینه کرده و استراتژی ها و سیاست‌ها را برای اجرای استفاده از سوخت پایدار هوانوردی یکپارچه می‌کنند. مدل توسعه یافته ایشان کاهش ۱۷/۱۶ درصدی تأثیرات زیست محیطی را با درنظرگرفتن حداکثر ترکیب ده درصدی SAF نشان می‌دهد که پتانسیل سوخت پایدار هوانوردی را برای کربن‌زدایی صنعت هوانوردی برجسته می‌کند. ایشان در تحقیق خویش به تمایل خطوط هوایی به سوخت‌گیری اقتصادی و سوخت‌گیری مازاد زمانی‌که هزینه‌های سوخت بالاست اشاره نموده و قوانین وضع شده از سوی دولت‌های حاکم را جهت پیاده‌سازی کامل مدل ضروری می‌دانند.

گارسوی و آلتکین [۱۲] نیز یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی را با هدف کاهش هزینه‌های سوخت از طریق سناریوهای حمل سوخت اضافی ارائه کرده‌اند تا تأثیر فاصله پروازی، نرخ بار و قیمت سوخت را مورد بررسی قرار دهند. اریلی و همکاران [۱۳] نیز در تحقیق خود تأثیر روش سوخت‌گیری مازاد را بر انتشار کل کربن مورد بررسی قرار داده و سناریوهای مختلف سوخت‌گیری اقتصادی را در کشور برزیل با درنظرگرفتن سیاست‌ها و مقررات جهانی و ملی مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌دهند. پژوهش ایشان دیدگاه مناسبی را جهت تدوین یک مدل نظری و تصمیم‌گیری پیرامون سوخت‌گیری مازاد با ملاحظات کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه می‌دهد. الیورا و همکاران [۱۴] یک روش سوخت‌گیری اقتصادی پویا جهت محاسبه دینامیکی مقدار کل سوخت برای هواپیمای برنامه‌ریزی شده در یک مسیر پروازی ارائه می‌کنند که در هر بخش اطلاعات مربوط به عوامل متغیر از قبیل: شرایط آب و هوایی، ضریب مصرف سوخت و اطلاعات تأخیر را برای محاسبه مقدار افزایش سوخت مربوطه در ایستگاه‌های ورودی در بخش‌های باقیمانده با یک مدل خطی برآورد و بروزرسانی می‌کند. ایگال و میرولو [۱۵] نیز روش سوخت‌گیری اقتصادی را برای سفرهای یک بخشی که هواپیما به جهت صرفه‌جویی، سوخت‌گیری مسیر برگشت را به جهت ارزان‌تر

1. Sustainable Aviation Fuel

بودن در فرودگاه مبدأ انجام می‌دهد، مورد بررسی قرار داده و پیشنهاداتی را نیز جهت کاهش انتشار کربن در این روش ارائه می‌کنند.

این مقاله با توجه به مشخصات فنی هواپیما و شروط و محدودیت‌های عملیاتی، به ارائه نتایج تحقیق به‌عنوان اصلاحیه‌ای برای مدل کنترل موجودی چندمرحله‌ای زوئین می‌پردازد. در مدل پیشنهادی، محدودیت‌هایی از قبیل حداکثر ظرفیت سوخت، قوانین و مقررات استاندارد و شیوه‌های رایج عملیاتی لحاظ شده‌اند. محدودیت‌های مربوط به وزن و ظرفیت در هر بخش شامل حداکثر وزن برخاست در مبداء، حداکثر وزن فرود در مقصد، کل ظرفیت سوخت و حداقل سوخت ایمن یا ذخیره اطمینان (سوخت باقیمانده در مقصد) می‌باشد. علاوه براین، ضریب مصرف سوخت که در مطالعات قبل به‌عنوان یک مقدار ثابت درنظر گرفته شده، در مقاله حاضر به‌عنوان تابعی از ارتفاع و مسافت در یک مدل چندجمله‌ای لحاظ می‌شود که این مسأله باعث نزدیک‌تر شدن راه‌حل به محیط واقعی و عملیاتی می‌گردد.

۳ مدل‌سازی مسأله

در این قسمت مدل ریاضی مسأله ارائه می‌گردد. مدل پیشنهادی می‌تواند در برنامه روزانه گروهی از هواپیماها در یک توالی شبکه پروازی مورد استفاده قرار گیرد. هر هواپیما برای تعداد i بخش برنامه‌ریزی می‌شود (N i=1,…,N-1, و N تعداد کل ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد). فرض بر این است که در هر فرودگاه، قیمت سوخت به‌صورت $P_i(kg)$ از پیش تعریف شده‌است. تعیین مقدار سوختی که در هر فرودگاه باید تأمین شود تا هزینه کلی عملیات هواپیما به حداقل ممکن خود برسد، یکی از مواردیست که در این مسئله، مورد توجه قرار می‌گیرد.

۳. ۱ شروط عملیاتی

- MTOW در فرودگاه‌های مبدأ نباید از حد خود تجاوز کنند.
- MLW در فرودگاه‌های مقصد نباید بیشتر از حد مجاز باشد.
- حداکثر ظرفیت سوخت هواپیما باید مورد توجه قرار گیرد و مقدار سوخت، از آن مقدار بیشینه تجاوز نکند.
- مقدار سوخت تأمین شده نباید کمتر از حداقل میزان تعیین شده توسط قوانین باشد.
- سوخت باقیمانده در مقصد نباید کمتر از حداقل میزان سوخت ذخیره تعریف شده توسط قوانین عملیاتی شرکت سازنده باشد.

۳. ۲ فرضیات مسأله

- در هر جایگاه باید یک تأمین‌کننده سوخت مجزا وجود داشته باشد. از آنجایی که خطوط هوایی همیشه باید به دنبال انتخاب ارزان‌ترین منبع باشند، چنین فرضیه‌ای بسیار منطقی به نظر می‌رسد.
- هیچ‌گونه محدودیتی در رابطه با حجم کلی سوخت خریداری شده برای یک تأمین کننده مشخص در طی یک مسیر نباید وجود داشته باشد. در واقع، خرید سوخت نباید با محدودیت همراه باشد.
- تمامی جایگاه‌ها باید دارای قابلیت فراهم‌سازی میزان سوخت مورد نیاز تمامی پروازها را داشته باشند. این به این معناست که هیچگونه محدودیتی پیرامون ظرفیت ذخیره سوخت جهت تأمین سوخت تمامی هواپیماها در تمامی جایگاه‌ها نباید وجود داشته باشد.

در این صورت، تأمین سوخت یک هواپیما به هیچ وجه با تأمین سوخت هواپیماهای دیگر در یک مسیر واحد تداخل نخواهد داشت و به هر هواپیما به‌صورت جداگانه و براساس برنامه مجزای خود رسیدگی می‌شود. هزینه کل تأمین سوخت برای مسیرها باید از طریق مجموع هزینه‌های تأمین سوخت برای هر هواپیما محاسبه شود.

این مسئله می‌تواند از طریق مدل برنامه‌ریزی خطی حل شود، که در آن هزینه کل تأمین سوخت در طی N جایگاه در طول برنامه روزانه یک هواپیما به حداقل خود می‌رسد. متغیر تصمیم (Xi) عبارت است از مقدار سوختی که برای هر بخش i، در جایگاه و محل i ، (i=1,…,N-1) باید فراهم شود. سایر متغیرها و پارامترهای مسأله در جدول ۱ تعریف شده‌اند. لذا برای هر هواپیما در برنامه روزانه، مدل برنامه‌ریزی خطی زیر می‌تواند به‌کار گرفته شود.

۳. ۳ تابع هدف و محدودیت‌های مسأله

$$Min\ Z = \sum_{i=1}^{N-1} P_i X_i \qquad (۳)$$

محدودیت حداکثر وزن برخاست

$$ZFW_i + FOB_i \le MTOW_i \quad for\ i = 1, \dots, N-1 \qquad (۴)$$

محدودیت حداکثر وزن فرود

$$TOW_i - TRIP_i \le MLW_i \quad for\ i = 1, \dots, N-1 \qquad (۵)$$

محدودیت حداکثر ظرفیت سوخت هواپیما

$$REM_i + X_i \le MAXF \quad for\ i = 1, \dots, N-1 \qquad (۶)$$

قانون حداقل سوخت برای بخش i

$$REM_i + X_i \ge FOB0_i \quad for\ i = 1, \dots, N-1 \qquad (۷)$$

حداقل سوخت باقیمانده در مقصد

$$FOB_{i-1} + TRIP_{i-1} \geq MINF_i \quad for\ i = 2, \dots, N \tag{۸}$$

تنظیم مصرف سوخت از طریق ضریب f

$$f_i = \frac{dWf}{dW} \approx \left(\frac{TRIP_i - TRP0_i}{FOB_i - FOB0_i}\right) \quad for\ i = 1, \dots, N-1 \tag{۹}$$

تعریف سوخت سوار بر هواپیما در مبدأ

$$FOB_i = REM_i + X_i \quad for\ i = 1, \dots, N-1 \tag{۱۰}$$

تعریف سوخت باقیمانده در مقصد

$$REM_i = FOB_{i-1} - TRIP_{i-1} \quad for\ i = 1, \dots, N-1 \tag{۱۱}$$

مقادیر تأمین سوخت مثبت

$$X_i \geq 0 \tag{۱۲}$$

جدول ۱- متغیرها و پارامترهای مسأله.

Table 1. Problem variables and parameters.

symbol	definition
f_i	fuel Adjustment Constant
$FOB0_i$	regulation minimum fuel on sector i
FOB_i	total fuel aboard on sector i (kg)
MAXF	maximum fuel capacity in tanks (kg)
P_i	price of fuel at airport of origin on sector i (US$/kg)
$MTOW_i$	maximum structural takeoff weight (kg)
$MSLW_i$	maximum structural landing weight (kg)
$MZFW_i$	maximum zero fuel weight (kg)
LW_i	landing weight on sector i (kg)
ZFW_i	zero fuel weight on sector i (kg)
REM_i	remaining fuel after landing on sector i (kg)
$TRP0_i$	consumption from sector i with minimum regulation fuel (kg)
$TRIP_i$	Consumption from sector i (kg)

معادلات مربوط به بخش i عبارتند از ترکیباتی خطی از معادلات مربوط به بخش قبل (i-1) که باعث می‌شوند مدل دارای ماهیت برگشتی باشد. علاوه بر این، تعداد محدودیت‌ها و شرط‌ها، تابعی از تعداد جایگاه‌ها و محل‌های موجود است. برای N جایگاه، 5(N-1) محدودیت وجود خواهد داشت که براساس معادلات (۸)-(۴) محاسبه می‌شود. در معادلات (۱۱)-(۹) نیز بعضی متغیرهای مربوط به محدودیت‌های در نظر گرفته شده تعریف شده‌اند. در این مدل پیشنهادی، یکی از ویژگی‌های خاصی که وجود دارد، شیوه متفاوت مدل‌سازی ضریب f است. یک رابطه چند جمله‌ای به‌عنوان تابعی از مسافت و ارتفاع پرواز برای یک نمودار مشخص از سرعتها در هر بخش، در نظر گرفته می‌شود. تأثیر وزن هواپیما نیز در چنین مدل‌سازی مورد توجه قرار می‌گیرد.

گاهی بنا به دلایل عملیاتی مانند پیش‌بینی‌های وضع بد هوا در طول مسیرهای پروازی، تأخیرهای پیش‌بینی شده، و توقف‌های طولانی مدت در مقصد در ساعات پر ترافیک، بعضی خلبان‌ها بدون در نظر گرفتن تحلیل قیمت سوخت، سوختی بیشتر از حداقل میزان تعیین شده در ایستگاه مبدأ را درخواست می‌کنند. این سوخت‌گیری اجباری[1] همان درخواست سوخت اضافه از سوی کاپیتان[2] است که در مدل فعلی مدنظر قرار نمی‌گیرد.

۴ پیاده‌سازی مدل در یک شبکه خطوط هوایی

در این قسمت به منظور نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی در مسأله سوخت‌گیری اقتصادی، آن را بر روی مجموعه داده‌های واقعی پیاده‌سازی می‌کنیم. مجموعه داده‌های مورد بررسی در این قسمت، از مجموعه داده‌های مورد استفاده در پژوهش‌های سابویا [۵]، استروپ و ولمر [۸]، زوئین [۹] و اریلی و همکاران [۱۳] استخراج شده‌اند. جهت تحلیل مقایسه‌ای نتایج بین رویکرد مرسوم و رویکرد پیشنهادی و به دلیل در دسترس بودن داده‌های مربوط به روش مرسوم سوخت‌گیری، داده‌های مربوط به یک شبکه خطوط هوایی در برزیل انتخاب شدند. از آنجاییکه در برزیل، در میان ایالت‌ها، تغییرات عمده‌ای در نرخ مالیات سوخت هوایی وجود دارد، سوخت‌گیری مازاد بسیار رایج است (تغییری بین ۴٪ تا ۲۵٪). لذا با توجه به یک مسیر که توسط خط هوایی داخلی برزیل و برنامه‌ریزی متناسب با آن برای یک هواپیما در طی یک روز در نظر گرفته شده، مدل پیشنهادی تحقیق حاضر جهت تعیین تأمین سوخت در ۱۲ بخش به‌کار گرفته شد.

در مطالعه حاضر یک مدل هواپیمای منطقه‌ای با ظرفیت ۱۰۸ سرنشین، مجهز به موتورهای GE CF34-10E6 که ۱۸۵۰۰ پوند بر

1. Forced

2. Captain Extra Fuel

فوت حداکثر رانش برخاست را در سطح دریا در شرایط اتمسفر استاندارد بین المللی[1](ISA) توسعه می‌دهند، مورد بررسی قرار گرفته است. نرم‌افزار پیشرفته مدل‌سازی چند بعدی یکپارچه AIMMS[2] به دلیل داشتن ماهیت برگشتی برای حل مسئله برنامه‌ریزی خطی مورد استفاده قرار گرفت. کل هزینه سوخت محاسبه شده (پیش‌بینی شده برای یک ماه) با کل هزینه تأمین سوخت با روش مرسوم مقایسه شد البته این در حالی است که هر جایگاه و محل با حداقل میزان سوخت مقرر شده تأمین شود.

از منابع داده ورودی زیر در مراجع پیش گفته جهت پیاده‌سازی مدل و تحلیل نتایج استفاده شده‌است:

- ویژگی‌های هواپیما: برگرفته از دفترچه راهنمای عملیاتی: MSZFW، برخاست (MSTOW) ، فرود (MSLW) و حداکثر ظرفیت سوخت (MAXF). چارت برنامه‌ریزی مصرف سوخت برای پروازهای طولانی مدت جهت اطمینان از مصرف سوخت برای محاسبه ضریب f مورد استفاده قرار گرفت.
- ZFW_i: که از طریق ضریب بار میانگین ۶۵٪ و ذخیره $500kg$ از بار در تمامی بخشها تخمین زده می‌شود. در این تحقیق میانگین وزن هر مسافر ۸۵ کیلوگرم در نظر گرفته شد همراه با ۵ کیلوگرم بار دستی و ۲۰ کیلوگرم بار سوار بر هواپیما و یک BOP با وزن ۲۷۴۰۰ کیلوگرم. ZFW در نظر گرفته شده برای تمامی بخش‌ها، ۳۵۶۰۰ کیلوگرم است.
- $MTOW_i$ و MLW_i : که از طریق یک نرم‌افزار خاص تولید شده توسط سازنده هواپیما برای محاسبه عملکرد برخاست و فرود، محاسبه می‌شود. برای انجام این محاسبات، دماهای مرجع، باد آرام و پرکاربردترین پارامترهای آماری در فرودگاه مورد توجه قرار گرفتند.
- مصرف سوخت بدون سوخت‌گیری مازاد $(TRP0_i)$ و حداقل سوخت مقرر شده $(FOB0_i)$: که از طریق یک نرم‌افزار خاص تولید شده توسط سازنده هواپیما جهت محاسبه نقشه‌های ناوبری تعیین می‌شود.
- برای هر بخش، بادها و دماهای قابل توجه در سرعت گشت‌زنی، حدود ۸۵٪ از آمارهای سالانه در نظر گرفته شد.
- سوخت باقیمانده: کمترین میزان سوخت در هنگام نشستن در فرودگاه مقصد $(MINF_i)$، $2000kg$ در تمامی بخش‌ها در نظر گرفته شد. برای حل درست مسأله، تعیین ضریب f برای هر بخش i ضروری است. از این رو، متدولوژی ذکر شده در مرجع سابویا [۵] اتخاذ شده‌است.

۱. انتخاب یک مرجع وزنی نشست $36000kg$، که تقریباً مطابق با ZFW در مطالعه حاضر است.

۲. استفاده از چارت برنامه‌ریزی مصرف سوخت در پروازهای طولانی مدت در دفترچه راهنمای عملیاتی هواپیما جهت محاسبه مصرف سوخت در ترکیبات وزن‌های نشست، ارتفاعات و مسافت‌های پروازی که قبلاً تعیین شده‌اند. در اینجا، فواصل زیر مد نظر قرار گرفت:

- مسافت‌ها: nm ۱۲۰۰ و ۱۰۰۰ و ۸۰۰ و ۶۰۰ و ۴۰۰ و ۲۰۰
- ارتفاعات: ft ۴۱۰۰۰ و ۳۹۰۰۰ و ۳۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ و ۲۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰
- وزنها: kg (MSLW) ۴۳۰۰۰ و ۴۲۰۰۰ و ۴۰۰۰۰ و ۳۸۰۰۰ و (وزن مرجع) ۳۶۰۰۰

۳. برای هر مجموعه‌ای از وزنها در یک مسافت و ارتفاع مشخص، با توجه به وزن مرجع در آن مجموعه، اختلاف درصد مصرف سوخت، محاسبه می‌شود. انحراف درصد میانگین عبارت است از ضریب f متناظر با مجموعه ارتفاع و مسافت.

فرضیه موجود در این متدولوژی بر این اساس است که تأثیر مسافت و یا ارتفاع بر افزایش مصرف سوخت بیشتر خواهد بود تا تأثیر وزن. در این صورت برای مجموعه‌ای از وزن‌های نزدیک به MLW و مجموعه ارتفاع و مسافت، مقدار میانگینی از ضریب f را می‌توان در نظر گرفت. در جدول (۲) می‌توان نتایج کامل را برای تمامی ارتفاعات مناسب مشاهده کرد. با در نظر گرفتن ۳ دقیقه از کمترین زمان گشت زنی، بیشترین ارتفاعات برای مسافت‌های در نظر گرفته شده انتخاب شده‌اند. برای محاسبه دقیق ضریب f می‌توان جدول (۴) را به راحتی به شکل چند جمله‌ای و از طریق معادلات زیر، مدل‌سازی کرد:

$$f = A_0 + A_1 d_i + A_2 d_i^2 + A_3 d_i^3 \quad (۱۴)$$

$$A_0 = A_{00} + A_{01} H_i + A_{02} H_i^2 + A_{03} H_i^3 \quad (۱۵)$$

$$A_1 = A_{10} + A_{11} H_i + A_{12} H_i^2 + A_{13} H_i^3 \quad (۱۶)$$

$$A_2 = A_{20} + A_{21} H_i + A_{22} H_i^2 + A_{23} H_i^3 \quad (۱۷)$$

$$A_3 = A_{30} + A_{31} H_i + A_{32} H_i^2 + A_{33} H_i^3 \quad (۱۸)$$

1. International Standard Atmosphere

2. Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software

جدول ۲- تحلیل فاکتور f.

Table 2. Factor analysis f.

Dist (100nm) \ Altitude (1000ft)	15	20	25	30	35	37	39	41
2	1.30%	1.19%	1.07%	0.99%	0.94%	—	—	—
4	2.94%	2.68%	2.43%	2.24%	2.12%	2.10%	2.10%	—
6	—	4.19%	3.81%	3.50%	3.30%	3.26%	3.24%	3.26%
8	—	—	5.19%	4.77%	4.51%	4.45%	4.43%	4.45%
10	—	—	—	6.06%	5.75%	5.71%	5.72%	5.78%
12	—	—	—	—	7.05%	7.05%	7.14%	7.32%

d_i عبارت است از مسافت در بخش i (nm) ، H_i عبارت است از ارتفاع پروازی در بخش $i(ft)$ و A_{nm} ضرایب تنظیم را نشان می‌دهد. با استفاده از روش حداقل مربعات می‌توان، از مقادیر A_{nm} اطمینان حاصل نمود. جدول ۳ این مقادیر را نشان می‌دهد. با توجه به این مقادیر، ضریب همبستگی (R^2) برابر با 0.9998 خواهد بود، که برای حل مسئله حاضر، کافی به نظر می‌رسد.

جدول ۳- ضرایب درون‌یابی (A_{mn}) برای تابع $f = f(d,H)$

Table 3. Interpolation coefficients(A_{mn}) for the function f=f(d,H).

A_{nm}	m			
n	0	1	2	3
0	-6.5862E-03	3.1845E-07	-8.4929E-12	8.0717E-17
1	9.8221E-05	-1.3562E-10	-8.8946E-14	1.7485E-18
2	2.1868E08	-3.6676E-12	1.9498E-16	-3.1524E-21
3	-8.3698E-12	1.5333E-15	-8.6796E-20	1.5039E-24

طبق تحقیقات شرکت بوئینگ [۱۶]، اگر تأثیر باد در طول مسیر را در نظر داشته باشیم، مسافت d_i که در جداول بالا ذکر شده‌است را می‌توان مسافت طی شده توسط هواپیما در توده‌ای از هوا پنداشت که به دلیل وجود باد با مسافت طی شده توسط هواپیما بر روی زمین کاملاً متفاوت است. با توجه به سمت تعیین شده، متوسط حرکت باد در طول محور طولی هواپیما (V_W) و سرعت واقعی باد (TAS)[1] در طول مسیر، برای تعیین یک مقدار معادل برای "d"، تصحیحی باید پیرامون مسافت طی شده نسبت به زمین (یا مسافت کل مسیر) انجام شود. در این راستا می‌توان از رابطهٔ زیر استفاده کرد:

$$d_i = D_i\left(\frac{TAS_i}{TAS_i + V_{wi}}\right) \qquad (۱۹)$$

که در آن TAS_i سرعت واقعی هواپیما در بخش i و V_{wi} متوسط بردار حرکت باد برای محور طولی هواپیما در بخش i می‌باشد. مقادیر منفی نشان‌دهنده بادهای موافق و مقادیر مثبت نشان‌دهنده بادهای مخالف هستند. D_i نیز مسافت طی شده توسط هواپیما بر روی زمین (یا مسیر هوایی) بر حسب nm در بخش i است. این مقایر با استفاده از چارت‌های ناوبری استخراج شده‌اند. مقدار TAS باید از طریق سیستم برنامه‌ریزی ناوبری تولید شده توسط سازنده هواپیما تعیین شود. علاوه بر این، تنظیم مصرف سوخت متناسب با شرایط میانگین دمایی در یک مسیر متفاوت با مسیر استاندارد، ضروری است. دمای استاندارد به‌عنوان دمای استاتیک هوا در ارتفاعی تعریف می‌شود که در مدل ISA ارائه شده توسط ICAO تعیین شده‌است. (جزئیات بیشتر را در مراجع پادیلا [۱۷] و بوئینگ [۱۶] مشاهده کنید). بر طبق آنچه که در بخش برنامه‌ریزی پرواز در دفترچه راهنمای عملیاتی هواپیماها آمده است، برای هر $1°c$ بیشتر از دمای ISA ، ۰/۴ درصد به مصرف سوخت هواپیما در هر ساعت اضافه می‌شود. از آنجاییکه فاکتور f به‌طور مستقیم متناسب با مصرف سوخت کلی هواپیما می‌باشد لذا می تواند از طریق معادله زیر تخمین زده شود:

$$f_i^* = f_i(1 + 0.004 * DELTA_ISA_i) \qquad (۲۰)$$

که در رابطه فوق f_i^* ضریب تنظیم مصرف سوخت در شرایط دمایی غیر از دمای هوای استاتیک استاندارد در بخش i می‌باشد. $DELTA_ISA_i$ انحراف دما در ارتفاع پرواز نسبت به دمای هوای استاتیک ISA در بخش i می‌باشد. برای محاسبه d_i و f_i^* انحرافات آماری دمای استاندارد استاتیک سالانه و بادها در هر مسیر، با معناداری ۸۵٪ مورد استفاده قرار می‌گیرند.

1. True Air Speed

۵ نتایج عددی

سوخت حامل هواپیما در ابتدای برنامه زمانی، ۲۰۰۰ کیلوگرم درنظر گرفته شده‌است که به‌طور کلی، این مقدار، حداقل میزان سوختی است که می‌تواند بر طبق قوانین عملیاتی خطوط هوایی، توسط هواپیما حمل شود. جدول ۴ تمامی اطلاعات ورودی مورد نیاز جهت حل مسئله را نمایش می‌دهد. جدول ۵ نتایج را مطابق با استراتژی تأمین سوخت مرسوم و متعارف ارائه می‌کند که بر طبق قوانین، برخاستن هواپیما با کمترین میزان ممکن سوخت انجام می‌شود. این جدول میزان سوخت تأمین شده در هر پایگاه (x_i) و همچنین هزینه‌های تأمین را بر طبق نرخ سوخت نشان می‌دهد. جدول ۶ نیز هزینه‌های تأمین را با استفاده از مدل پیشنهادی نمایش می‌دهد. جدول ۷ خلاصه‌ای از تأثیرات عمده مدل پیشنهادی را همراه با تحلیل مقایسه‌ای نتایج بین رویکرد مرسوم و رویکرد پیشنهادی ارائه می‌کند. برآوردهای ماهانه و سالانه برای یک هواپیمای واحد که برنامه پیشنهادی را ۶ روز در هر هفته اجرا می‌کند، نشان داده شده‌اند. باید خاطرنشان کرد که اگر چه با این استراتژی سوخت‌رسانی جدید، سوخت بیشتری در طول روز مصرف می‌شود اما سودهای اقتصادی اساسی در طول سال حاصل می‌شود.

جدول ۴– داده‌های ورودی.

Table 4. Input data.

	From	To	P_i (US$/kg)	D(nm)	ALT CRZ(ft)	ISA Dev CRZ (℃)	WIND CRZ (Kt)	TAS (kt)	d(nm)	f^*(%)	ZFW_i (kg)	MTW_i (kg)	MLW_i (kg)	$MFOB0_i$ (kg)	$TRIP0_i$ (kg)
1	FOR	REC	1.26	339	39000	4	-11	404	348	1.80	35600	50300	43000	4870	1957
2	REC	MCZ	1.01	98	15000	17	-5	310	100	0.46	35600	50300	43000	2639	1143
3	MCZ	AJU	1.16	116	20000	17	-9	330	119	0.57	35600	50198	43000	2841	964
4	AJU	SSA	1.16	137	24000	16	-9	347	141	0.67	35600	50300	43000	3093	1085
5	SSA	GRU	1.05	846	38000	6	-44	439	940	5.31	35600	50300	43000	6818	4395
6	GRU	CWB	0.96	194	30000	12	-52	386	224	1.13	35600	50300	43000	3707	1400
7	CWB	GRU	0.93	221	31000	12	5	377	218	1.07	35600	46971	43000	3520	1382
8	GRU	SSA	0.96	787	39000	4	2	432	783	4.33	35600	50300	43000	5941	3675
9	SSA	AJU	1.05	137	25000	16	-17	353	144	0.68	35600	50300	43000	3093	1098
10	AJU	MCZ	1.16	116	19000	17	-10	325	120	0.58	35600	50300	43000	2750	973
11	MCZ	REC	1.16	98	18000	17	-10	319	101	0.45	35600	50198	43000	2633	867
12	REC	FOR	1.01	337	38000	6	-22	408	356	1.84	35600	50300	43000	4875	1986

جدول ۴– داده‌های ورودی.

Table 4. Input data.

	From	To	P_i (US$/kg)	D(nm)	ALT CRZ(ft)	ISA Dev CRZ (℃)	WIND CRZ (Kt)	TAS (kt)	d(nm)	f^*(%)	ZFW_i (kg)	MTW_i (kg)	MLW_i (kg)	$MFOB0_i$ (kg)	$TRIP0_i$ (kg)
1	FOR	REC	1.26	339	39000	4	-11	404	348	1.80	35600	50300	43000	4870	1957
2	REC	MCZ	1.01	98	15000	17	-5	310	100	0.46	35600	50300	43000	2639	1143
3	MCZ	AJU	1.16	116	20000	17	-9	330	119	0.57	35600	50198	43000	2841	964
4	AJU	SSA	1.16	137	24000	16	-9	347	141	0.67	35600	50300	43000	3093	1085
5	SSA	GRU	1.05	846	38000	6	-44	439	940	5.31	35600	50300	43000	6818	4395
6	GRU	CWB	0.96	194	30000	12	-52	386	224	1.13	35600	50300	43000	3707	1400
7	CWB	GRU	0.93	221	31000	12	5	377	218	1.07	35600	46971	43000	3520	1382
8	GRU	SSA	0.96	787	39000	4	2	432	783	4.33	35600	50300	43000	5941	3675
9	SSA	AJU	1.05	137	25000	16	-17	353	144	0.68	35600	50300	43000	3093	1098
10	AJU	MCZ	1.16	116	19000	17	-10	325	120	0.58	35600	50300	43000	2750	973
11	MCZ	REC	1.16	98	18000	17	-10	319	101	0.45	35600	50198	43000	2633	867
12	REC	FOR	1.01	337	38000	6	-22	408	356	1.84	35600	50300	43000	4875	1986

جدول ۵- استراتژی مرسوم سوخت‌گیری.

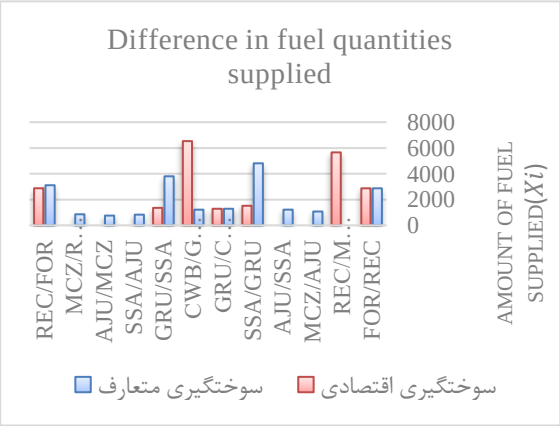
Table 5. Conventional fueling strategy

I	From	To	(kg)REM_i	(kg)X_i	(kg)FOB_i	(kg)Tw_i	(kg)$TRIP_i$	$(kg)Lw_i$	*COST (US$)*
1	FOR	REC	2000	2870	4870	40470	1957	38513	$3604.53
2	REC	MCZ	2913	0	2913	38513	1143	37370	-
3	MCZ	AJU	1770	1071	2841	38441	964	37477	$1243.64
4	AJU	SSA	1877	1216	3093	38693	1085	37608	$1407.17
5	SSA	GRU	2008	4810	6818	42418	4395	38023	$5042.84
6	GRU	CWB	2423	1284	3707	39307	1400	37907	$1227.57
7	CWB	GRU	2307	1213	3520	39120	1382	37738	$1124.01
8	GRU	SSA	2138	3803	5941	41541	3675	37866	$3635.86
9	SSA	AJU	2266	827	3093	38693	1098	37595	$867.03
10	AJU	MCZ	1995	755	2750	3350	973	37377	$873.69
11	MCZ	REC	1777	856	2633	38233	867	37366	$993.74
12	REC	FOR	1766	3109	4875	40475	1986	38489	$3152.93
Total							20925		$23173.01

جدول ۶- استراتژی تأمین با استفاده از مدل پیشنهادی.

Table 6. Procurement strategy using the proposed model.

	From	*To*	*(kg)REM_i*	*(kg)X_i*	*(kg)FOB_i*	*(kg)Tw_i*	*(kg)$TRIP_i$*	*(kg)Lw_i*	*COST (US$)*
1	FOR	REC	2000	2870	4870	40470	1957	38513	$3604.53
2	REC	MCZ	2913	5657	8570	44170	1170	43000	$5737.21
3	MCZ	AJU	7400	0	7400	43000	990	42010	-
4	AJU	SSA	6410	0	6410	42010	1107	40903	-
5	SSA	GRU	5303	1515	6818	42418	4395	38023	$1588.56
6	GRU	CWB	2423	1284	3707	39307	1400	37907	$1227.57
7	CWB	GRU	2307	6532	8839	44439	1439	43000	$6052.70
8	GRU	SSA	7400	1355	8755	44355	3797	40558	$1295.40
9	SSA	AJU	4958	0	4958	40558	1111	39447	-
10	AJU	MCZ	3847	0	3847	39447	979	38468	-
11	MCZ	REC	2868	0	2868	38468	868	37600	-
12	REC	FOR	2000	2875	4875	40475	1986	38489	$2915.62
Total							21199		$22421.60



شکل ۳- اختلاف مقادیر سوخت تأمین شده (X_i) در طی مسیرها از طریق استراتژی متعارف و استراتژی اقتصادی.

Fig. 3. Difference in fuel quantities supplied (X_i) along the routes through the conventional strategy and the economic strategy.

جدول ۷- نتایج نهایی.

Table 7. Final results.

Annual forecast	Monthly forecast	Daily	Final results (per aircraft)
231.865,00	19.322,08	(3.24%) 751,41	Saving (US$)
	$62,62		Average saving per sector (US$)
338.294	28.191	(1,31%) 1096	Extra consumption (kg)
	23		Extra consumption per sector (kg)

در شکل (۳) استراتژی‌های حمل سوخت (مقادیر تأمین شده- X_i) باتوجه به برنامه‌ریزی پروازی مرسوم و حمل سوخت بهینه که از طریق مدل سوخت‌گیری اقتصادی، پیش‌بینی شده، نشان داده شده‌اند. قابل توجه است که در ایستگاه‌های خروجی که قیمت سوخت ارزان تر است مقدار بیشتری از سوخت به هواپیما تزریق می‌شود.

۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج نشان داد که در ۱۲ بخش آنالیز شده، سودی برابر با۳/۲۴ درصد حاصل می‌گردد که در صنعت هوانوردی، سود قابل توجهی است و این در حالی است که کاهش هزینه‌های عملیاتی به میزان یک درصد بسیار رضایت‌بخش است. برای سناریوی تحلیل شده، ناوگانی متشکل از ۱۰ هواپیما با ۶ پرواز هفته‌ای منجر به صرفه‌جویی سالانه معادل ۲۳۱۸۶۵۰ دلار آمریکا خواهد شد. مدل پیشنهادی با نتایج یافت شده توسط استروپ و ولمر [۸] زمانی که مدل خود را بدون محدودیت در مقادیر سوخت عرضه شده در فرودگاه‌ها به‌کار بردند، سازگار است. با توجه به فرضیات مدل پیشنهادی، تمامی نتایج حاصل دارای اعتبار کافی می‌باشند.

در مدل پیشنهادی حساسیت بالایی به قیمت سوخت وجود دارد و به‌طور کلی در ایستگاه‌هایی که قیمت سوخت پایین‌تر است، میزان سوخت بیشتری به هواپیما تزریق خواهد شد. همانطور که از شرایط و محدودیتهای مربوط به مدل خطی انتظار می‌رود، در ایستگاههایی که قیمت سوخت بالاتر است، تزریق سوخت می‌تواند صفر باشد و حداقل میزان سوخت دقیقاً برابر با سوخت باقیمانده از بخش پیشین است. اگر چه این مدل برای یک شبکه خطوط هوایی داخلی برزیل به‌کار گرفته شده اما نتایج می‌تواند برای هرگونه خط هوایی دیگری که تحت استانداردهای مربوط به عملیات پرواز مشابه عمل می‌کند، به‌کار گرفته شود زیرا الزامات حداقل سوخت، مشابه است. هرچند باید تأکید کرد که سوخت‌گیری اقتصادی در کنار منافع اقتصادی می‌تواند باعث ایجاد تأثیرات محیطی قابل ملاحظه‌ای شود. در مثالی که مورد تحلیل قرار گرفته، با مصرف سوخت اضافه‌ای با میانگین ۲۳ کیلوگرم در هر بخش و یا ۳۳۸ تن در هر هواپیما به‌طور سالانه روبرو خواهیم بود. این سوخت اضافه می‌تواند باعث پخش شدن مواد آلاینده در لایه‌های بالاتر تروپوسفر[1](پایین ترین بخش اتمسفر) و تروپوپاز[2] که عموماً جت‌های تجاری پرواز می‌کنند، شود. برطبق مطالعات انجام شده توسط FAA [۱۸]، به ازای هر ۱۰۰۰ کیلوگرم سوخت JET-A1 ، هواپیما/ موتور به‌طور متوسط ۳.۱۵۵ کیلوگرم گاز CO_2 تولید می‌کند. در این صورت می‌توان گفت که با توجه به این میزان آلایندگی، سوخت‌گیری مازاد می‌تواند باعث پخش شدن ۱۰۶۷ تن از این گاز آلاینده در هوا به‌طور سالانه برای هر هواپیما باشد.

امروزه تأثیر گازهای استخراج شده از فعالیت‌های بشری بر گرمای زمین، شدیداً مورد انتقاد قرار گرفته است. هم‌اکنون مطالعاتی پیرامون تأثیر تجارت خطوط هوایی بر پدیده گلخانه‌ای در حال انجام است. تخمین‌ها حاکی از آن است که خطوط هوایی قریب ۲/۵ درصد از کل CO_2 پخش شده در هوا را باعث می‌شوند که معادل ۱۲٪ از آلودگی‌های تولید شده توسط وسایل حمل و نقل استفاده کننده از سوختهای فسیلی است. برطبق مطالعات سازمان بین‌المللی هوانوردی غیرنظامی (ICAO[3])، پرداخت هزینه برای نشست و پارک هواپیما می‌تواند برحسب میزان آلودگی تولید شده توسط هواپیما محاسبه شود [۱۹]. این مسأله درحال اجرا شدن در بعضی نقاط جهان، مانند فرودگاه‌های بین‌المللی شهرهای زوریخ و استکهلم است. در طی سالهای آتی انتظار می‌رود که سازمان بین‌المللی هوانوردی غیرنظامی، ارائه دهنده پیشنهاداتی پیرامون چنین هزینه‌هایی و طبقه‌بندی هواپیماهای آلاینده باشد. در این صورت خطوط هوایی استفاده کننده از هواپیماهایی با میزان آلایندگی بیشتر موظف به پرداخت هزینه بیشتری جهت آسیب‌های زیست محیطی هستند.

با وجود اینکه سوخت‌گیری مازاد می‌تواند منجر به حصول منافع و صرفه اقتصادی قابل توجهی شود اما افزایش تزریق سوخت، افزایش مصرف سوخت و در نتیجه افزایش صدور آلاینده‌ها را در پی خواهد داشت، بنابراین بقاء سلامت محیط، مهمترین محدودیت این روند عملیاتی است. لذا مهمترین چالش در تحقیقات آتی، ارزیابی روش سوخت‌گیری اقتصادی، با توجه به تأثیر آن بر محیط خواهد بود. یکی از راه‌کارها، حرکت در جهت استفاده از سوخت پایدار هوانوردی می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌گردد جهت ایجاد تعادل بین مبادلات زیست‌محیطی و اقتصادی، مدل پیشنهادی در این مقاله با ملاحظات درنظر گرفته شده در مدل گابریل و سان جووان [۱۱] بازنگری و تقویت شود. همچنین می‌توان از نتایج پژوهش‌های صورت گرفته در مراجع [۱۳]، [۱۵] و [۲۰] که به بررسی تأثیرات زیست محیطی روش سوخت‌گیری اقتصادی پرداخته‌اند، در این راستا بهره جست.

نکته دیگری که در اینجا می‌توان به آن اشاره نمود این است که به‌کارگیری مدل پیشنهادی باعث کاهش هزینه‌های عملیاتی خطوط هوایی شده و روند افزایش قیمت بلیط هواپیما که ناشی از افزایش قیمت سوخت هواپیماست، تعدیل می‌کند. طبق لایحه بودجه سال ۱۴۰۴ قرار بر این است که سوخت هواپیما به ۳۰ درصد قیمت تمام شده پالایشگاه محاسبه شود. با این تغییر محاسبه قیمت هر لیتر سوخت هواپیما از ۶۰۰ تومان فعلی به ۷۰۰۰ تومان افزایش پیدا می‌کند که این به معنای افزایش ۱۱ برابری قیمت سوخت هواپیما در هر لیتر است. در حال حاضر، اثرگذاری قیمت هر لیتر بنزین ۶۰۰ تومانی بر روی قیمت تمام شده برای هر ساعت صندلی حدود ۲۴ هزار تومان است، اما با افزایش قیمت سوخت از ۶۰۰ تومان به ۷۰۰۰ تومان، اثرگذاری آن بر روی قیمت هر ساعت صندلی به ۲۸۰ هزار تومان افزایش می‌یابد. هرچند

1.Troposphere
2. Tropopause
3. International Civil Aviation Organization

اصلاح قیمت حامل‌های انرژی علاوه بر واقعی‌سازی اقتصاد بنگاه‌ها و حرکت آنها به سمت ارتقا و بهینه‌سازی مصرف سوخت، بستری برای بازتوزیع عادلانه یارانه انرژی را نیز فراهم می‌کند. اما ملاحظات اجتماعی و درهم‌تنیدگی معیشت مردم با سوخت یارانه‌ای عمدتاً دست دولت‌ها را برای اصلاح قیمت سوخت می‌بندد، ضمن اینکه تجربه تلخ آبان‌ماه سال ۹۸ نیز ملاحظات و حساسیت‌های اصلاح قیمت در این حوزه را دوچندان کرده است. به‌طور میانگین روزانه حدود ۴ الی ۴/۵ میلیون لیتر سوخت جت در هواپیماهای مسافری مصرف می‌شود که معادل سالانه رقم ۱/۶۵ میلیارد لیتر است. در حال حاضر قیمت سوخت جت لیتری ۶۰۰ تومان است درحالی که طبق آمار بورس انرژی، سوخت جت با میانگین قیمت لیتری ۱۳/۴۰۰ تومان قیمت‌گذاری و صادر می‌شود. در نتیجه طبق محاسبات سالانه رقمی معادل ۲۰ هزار میلیارد تومان، یارانه سوخت جت به ۴ درصد از پردرآمدهای جامعه داده می‌شود که از ناوگان هوایی برای سفرهای کاری و تفریحی خود استفاده می‌کنند در حالی که اقشار متوسط و ضعیف چندان بهره‌ای از این یارانه ندارند. درواقع سالانه ۱/۲ میلیارد دلار یارانه سوخت پنهان به هواپیماها اختصاص می‌یابد. اما صنعت هواپیمایی کشور به دلیل تحریم‌ها با فرسودگی مواجه است و دولت ناچار به حمایت از این صنعت است و یکی از حمایت‌های دولت هم اعطای سوخت یارانه‌ای به هواپیماها است. حدود ۵۰ درصد پروازها به کشورهای خارجی است و در واقع به این صورت در حال تخصیص سوخت به خارجی‌ها هستیم و ارز از کشور خارج می‌شود. این حمایت در غالب سوخت یارانه‌ای به صنایع، حمایت کمی هم نیست ولی دولت در صورت حذف این یارانه سوخت باید تن به افزایش چند برابری بلیط هواپیما بدهد که باز هم شرایط را بدتر می‌کند. باید شرایطی را فراهم کنیم که هزینه‌های خطوط هواپیمایی پایین بیاید. اگر این شرایط ترمیم شود می‌توان زمینه حذف سوخت یارانه‌ای هواپیماها را به وجود آورده و به توزیع عادلانه یارانه‌ها کمک نمود. بهره‌گیری از مدل ارائه شده در تحقیق حاضر در بهبود شرایط پیش گفته نیز مؤثر خواهد بود.

باتوجه به مطالب فوق، توصیه می‌شود در توسعه‌های آینده مدل، معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی همزمان لحاظ شود تا تعادل پایدار بین کاهش هزینه و حفاظت از محیط‌زیست برقرار گردد و اتصال مدل به سامانه‌های مدیریت پرواز و پیش‌بینی آب‌وهوا برای به‌روزرسانی لحظه‌ای تصمیمات سوخت‌گیری به‌کار گرفته شود. همچنین، گسترش کاربرد مدل به انواع هواپیما و مسیرهای بین‌المللی با پروفیل‌های مصرف سوخت متفاوت می‌تواند دقت و کارایی آن را افزایش دهد و بهره‌گیری از خروجی مدل به‌عنوان ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری برای اصلاح یارانه سوخت و تعیین تعرفه‌های خدمات فرودگاهی می‌تواند سیاست‌گذاری بهینه را تسهیل کند؛ علاوه بر این، یکپارچه‌سازی مدل با سوخت‌های جایگزین و ارزیابی عملکرد آن در شرایط استفاده از سوخت پایدار هوانوردی یا ترکیب سوخت‌های فسیلی و زیستی می‌تواند ضمن کاهش اثرات زیست‌محیطی، بهره‌وری اقتصادی را نیز حفظ کند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده‌است

مراجع

[1]International Air Transport Association (IATA), *Guidance Material on Microbiological Contamination in Aircraft Fuel Tanks* (GM-MCAFT), 6th ed., 2025, Available: https://www.iata.org.

[2] S. S. Trincheiras, "Fuel conservation strategies through flight operation optimization at PGA," M.S. Thesis, Department. of Aerospace Engineering, Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, Lisbon, Portugal, 2016, [Online]. Available: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997256306/Thesis%20-%20Simao%20Trincheiras.pdf.

[3] D. H. Allen, *Landing Gear Integration in Aircraft Conceptual Design*, NASA Technical Paper 19970031272, 1997, Available: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19970031272/downloads/19970031272.pdf.

[4] Embraer, *Embraer 190 Operations Manual*, vol. 1-ch. 6 "Flight Planning," São José dos Campos, 2006, Available: https://www.embraercommercialaviation.com/wp-content/uploads/2017/06/APM_190.pdf.

[5] E. W. Saboya, *Airline Flight Operation Manual*, Varig Airlines, Porto Alegre, Brazil, 1992.

[6] J. W. Stroup and W. J. Lackey, *Fuel Management Model*, NASA Technical Paper 19770023066, 1977, [Online]. Available: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19770023066/downloads/19770023066.pdf.

[7] D. W. Darnell and C. Loflin, "National airlines fuel management and allocation model," *Interfaces*, vol. 7, no. 2, pp. 1–16, 1977, https://doi.org/10.1287/inte.7.2.1.

[8] J. S. Stroup and R. D. Wollmer, "A fuel management model for the airline industry," *Operations Research*, vol. 40, no. 2, pp. 229-237, 1992, https://doi.org/10.1287/opre.40.2.229.

[9]P. P. Zouein, W. R. Abillama, and E. Tohme, "A multiple period capacitated inventory model for airline fuel management: A case study," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 53, no. 4, pp. 379-386, 2002, https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601315.

[10]K. Abdelghany, A. Abdelghany, and S. Raina, "A model for the airlines' fuel management strategies," *Journal of Air Transport Management*, vol. 11, no. 4, pp. 199-206, 2005, https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2004.10.002.

[11]J. Gabriel and J. L. San Juan, "Multi-objective optimization of airline fuel loading problem considering sustainable aviation fuel and

book-and-claim," *Journal of Cleaner Production*, vol. 482, 2024, Art. no. 144241, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144241.

[12] N. C. Gürsoy and N. Alptekin, "Modelling strategy of airline tankering with nonlinear programming," *Verimlilik Dergisi*, vol. 57, no. 2, pp. 365–392, 2023, https://doi.org/10.51551/verimlilik.1065007.

[13]P. O'Reilly, F. Sulzbacher, D. Coutinho, and M. Petrescu, "Aviation fuel tankering and sustainability: The brazilian scenario," *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, vol. 10, no. 2, 2023. https://doi.org/10.58940/2374-6793.1786.

[14]G. Romani de Oliveira, G. Balvedi, and J. Fregnani, "Dynamic fuel tankering," U.S. Patent US674837B2, 2020, Available: https://www.researchgate.net/publication/340792937_Dynamic_Fuel_Tankering.

[15]J. Egal and M. Mirolo, *Tankering in Aviation: Assessing the Impact of the ReFuelEU SAF Mandate*, Transport and Environment, 2022. Available: https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2022111_tankering_aviation_refuelEU.pdf.

[16]Boeing Company, *Jet Transport Performance Methods (D6-1420)*, 2009, Available: https://vdoc.pub/documents/jet-transport-performance-methods-d6-1420-lhme5clm1ik0.

[17] C. E. Padilla, *Optimizing Jet Transport Efficiency – Performance, Operations and Economics*, McGraw-Hill, New York, 1996, Available: https://ntu-sp.primo.exlibrisgroup.com/permalink/65NTU_INST/g52r33/alma991008241589705146.

[18] Federal Aviation Administration (FAA), *System for assessing Aviation's Global Emissions (SAGE): Global Aviation Emissions Inventories for 2000–2004*, "Appendix D Modal Aircraft Fuel Burn and Emissions for 2004,"Washington, DC, 2005, Rep. FAA-EE-2005-02, Available: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/6250.

[19]International Civil Aviation Organization (ICAO), *Guidance on Aircraft Emissions Charges Related to Local Air Quality (Doc 9884)*, 1st ed., Montréal, 2007, Available: https://www.normsplash.com/ICAO/163574828/ICAO-9884?src=spdf.

[20]L. Tabernier, E. Calvo Fernández, A. Tautz, R. Deransy, and P. Martin, "Fuel tankering: Economic benefits and environmental impact for flights up to 1500 NM (full tankering) and 2500 NM (Partial Tankering)," *Aerospace*, vol. 8, no. 2, 2021, Art. no. 37, https://doi.org/10.3390/aerospace8020037.