



## **Evaluating the Efficiency of Airline Companies with the Goal of Reducing the Potential for Global Warming Using a Robust Two-Stage Data Envelopment Analysis Method with Unfavorable Output**

**Farhad Sanchooli <sup>1</sup>, Seyed Ismail Najafi <sup>2\*</sup>, Farhad Hosseinzadeh Lotfi <sup>3</sup>, Farzad Movahedi Sobhani <sup>4</sup>**

- 1- Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.  
E-mail: fsanchooli@gmail.com
- 2- Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.  
(Corresponding Author) E-mail: najafi1515@yahoo.com
- 3- Department of Mathematics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.  
E-mail: farhad@hosseinzadeh.ir
- 4- Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.  
E-mail: f-movahedi@srbiau.ac.ir

---

<b>Article Info</b>	<b>Abstract</b>
<b>Article type:</b> Research Article	The aviation industry is expanding rapidly around the world, and the efficiency of airlines has been of interest since the industry's inception. Nonetheless, despite increased revenue, the aviation industry has contributed to environmental degradation in recent years. As a result, this industry requires businesses that reduce their environmental impact while increasing their profits. With this topic in mind, a two-stage robust data envelopment analysis model with unfavorable output is presented to evaluate the performance of airline companies according to their internal structure with the aim of increasing the final revenue of the system and reducing the unfavorable output of global warming potential and uncertainty in the warming potential. The purpose of this article is to assess the efficiency of 11 airlines during the years 2010 to 2019. Through these models, it was concluded that most of the United States airlines are relatively efficient and their average overall efficiency score is above 0.8. Only two companies, Spirit and Allegiant, have a lower average total efficiency. On the other hand, all the companies in the first stage are relatively efficient and have an average efficiency score above 0.8, and except for the two companies Spirit and Allegiant, they are also efficient in the flight sector and have an average above 0.9. The overall performance of companies is more affected by the performance of their flight department.
<b>Article history:</b> Received: 2023/10/10 Acceptance: 2024/03/03 Published online: 2024/05/22	
<b>Key words:</b> Airlines, Operational Efficiency, Robust Two-Stage Data Envelopment Analysis, Global Warming Potential.	

---

**Cite this article:** Sanchooli, F., Najafi, S., Hosseinzadeh Lotfi, F., & Movahedi Sobhani, F. (2024). Evaluating the Efficiency of Airline Companies with the Goal of Reducing the Potential for Global Warming Using a Robust Two-Stage Data Envelopment Analysis Method with Unfavorable Output. *Green Management*, 4(1), 91-117.

## ارزیابی کارایی شرکت‌های هواپیمایی با هدف کاهش پتانسیل گرمایش جهانی با روش تحلیل پوششی

### داده‌های دومرحله‌ای استوار با خروجی نامطلوب

فرهاد سنچولی<sup>۱</sup>، سیداسماعیل نجفی<sup>۲\*</sup>، فرهاد حسین‌زاده لطفی<sup>۳</sup>، فرزاد موحدی سبحانی<sup>۴</sup>

- ۱- گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: fsanchooli@gmail.com  
۲- گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول) رایانامه: najafi1515@yahoo.com  
۳- گروه ریاضی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: farhad@hosseinzadeh.ir  
۴- گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: f-movahedi@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	صنعت هوانوردی در سراسر جهان با سرعتی بالا در حال رشد است و از ابتدای تولد این صنعت، کارایی شرکت‌های هواپیمایی مورد توجه بوده است. با این حال، با وجود افزایش درآمد آن، صنعت هوانوردی در چند سال گذشته در تخریب محیط زیست موثر بوده است. لذا این صنعت به شرکت‌هایی نیاز دارد که ضمن افزایش درآمد خود، تاثیر بر محیط زیست را کاهش دهند. یک مدل تحلیل پوششی داده‌های استوار دومرحله‌ای برای ارزیابی عملکرد شرکت‌های هواپیمایی با توجه به ساختار داخلی آن‌ها با هدف افزایش درآمد نهایی سیستم و کاهش خروجی نامطلوب میزان پتانسیل گرمایش جهانی و عدم قطعیت در در پتانسیل گرمایش ارائه شده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۸	این مقاله بر ارزیابی کارایی ۱۱ شرکت هواپیمایی در طی سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۹ متمرکز شده است. از طریق این مدل‌های، نتیجه گرفته شد که اکثر خطوط هوایی ایالات متحده، به طور نسبی کارا بوده و میانگین امتیاز کارایی کل آن‌ها بالای ۰.۸ می‌باشد. تنها دو شرکت اسپریت و آلیجنت دارای میانگین کارایی کل پایین‌تری می‌باشند. از سوی دیگر تمامی شرکت‌ها در مرحله اول نسبتاً کارا و دارای میانگین امتیاز کارایی بالای ۰.۸ و به جز دو شرکت اسپریت و آلیجنت، در بخش پرواز نیز کارا و دارای میانگین تقریباً بالاتر از ۰.۹ هستند. عملکرد کلی شرکت‌ها بیشتر متأثر از عملکرد بخش پرواز آن‌ها می‌باشد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۰۲	
کلمات کلیدی: خطوط هواپیمایی، کارایی عملیاتی، تحلیل پوششی داده‌های دومرحله‌ای استوار، پتانسیل گرمایش جهانی.	

**استناد:** سنچولی، فرهاد؛ نجفی، سیداسماعیل؛ موحدی سبحانی، فرزاد، و حسین‌زاده لطفی، فرهاد (۱۴۰۳). ارزیابی کارایی شرکت‌های هواپیمایی با هدف کاهش پتانسیل گرمایش جهانی با روش تحلیل پوششی داده‌های دومرحله‌ای استوار با خروجی نامطلوب. مدیریت سبز، ۴(۱)، ۹۱-۱۱۷.

## مقدمه

صنعت هوانوردی با بهبود استانداردهای زندگی و افزایش تجارت اقتصادی بین مناطق به سرعت توسعه یافته است. انتظار می‌رود گردش مالی جهانی مسافر از ۸,۶۸ تریلیون در سال ۲۰۱۹ به ۲۰ تریلیون در سال ۲۰۵۰ افزایش یابد و سالانه ۳ درصد رشد کند در حالی که تقاضای محموله‌های هوایی بین‌المللی در سال ۲۰۱۹ حدود ۹,۶ درصد افزایش یافته است. اما موضوع انتشار کربن هوانوردی توجه جامعه را بیشتر و بیشتر به خود جلب کرده است. صنعت حمل و نقل یک صنعت انرژی‌بر در سطح جهان است، که بیش از هر بخش دیگری، به جز صنایع شیمیایی، گازهای گلخانه‌ای منتشر می‌کند. این در حالی است که مصرف انرژی در صنعت هوانوردی سالانه ۶ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش مصرف انرژی، آلودگی زیست محیطی نیز افزایش یافته است. داده‌های منتشر شده توسط انجمن بین‌المللی حمل و نقل هوایی<sup>۱</sup> (IATA) نشان می‌دهد که انتشار کربن در بخش صنعت هواپیمایی ۲,۴ درصد از کل ۳۷,۵ میلیارد تن در سال ۲۰۱۸ را تشکیل می‌دهد که باعث تخریب محیط‌زیست شده است. براساس پیش‌بینی سازمان بین‌المللی هوانوردی غیرنظامی<sup>۲</sup> (ICAO)، انتشار کربن هوانوردی در سال ۲۰۵۰، ۴ تا ۶ برابر سال ۲۰۱۰ خواهد بود. برای کاهش این وضعیت، بسیاری از استراتژی‌های دستورالعمل‌های بین‌المللی اجرا شده‌اند (لی و همکاران، ۲۰۲۲).

حمل و نقل هوایی معمولاً از خدمات مسافری و باری تشکیل شده است. حمل و نقل مسافر بخش بزرگی از اکثر شرکت‌ها را تشکیل می‌دهد و درآمد آن بسیار بیشتر از درآمد حمل و نقل محموله است. با این حال، صنعت حمل و نقل هوایی سالانه ۷۰ میلیارد دلار ارزش اقتصادی تولید می‌کند که حدود ۱۵ درصد از کل تجارت صنعت حمل و نقل هوایی را تشکیل می‌دهد. محموله هوایی ۱,۵ تا ۲ برابر سریع‌تر از تولید ناخالص داخلی رشد می‌کند حتی سریع‌تر از حمل و نقل هوایی مسافر. براساس گزارش IATA، درآمد حمل و نقل بار صنعت بین‌المللی هوانوردی در سال ۲۰۲۰ روند رو به رشدی را نشان داده است و با وجود آن که تحت تأثیر بیماری کووید-۱۹ قرار گرفته، نسبت به سال ۲۰۱۹ افزایش ۱۵ درصدی داشته است به طوری که بسیاری از خطوط هوایی برای افزایش درآمد، کابین مسافر خود را به کابین بار تغییر داده‌اند مانند خطوط هوایی یونایتد و لوفت‌هانزا. علاوه بر این، داده‌های تجربی ثابت می‌کنند که محموله هوایی به طور معناداری و مثبت با تولید ناخالص داخلی ملی همبستگی دارد و محموله هوایی سالانه تقریباً ۵۷ میلیون شغل در سراسر جهان ایجاد می‌کند. بنابراین، حمل و نقل هوایی به یک شاخص مهم برای تعیین وضعیت یک شرکت با توسعه سریع آن تبدیل می‌شود. در نتیجه بررسی آن

1-International Air Transport Association

2-International Civil Aviation Organization

ضروری است. حدود ۵۵ درصد از اقلام حمل و نقل هوایی در هواپیماهای مسافربری قرار می‌گیرند، بنابراین سیستم‌های مسافری و باری در عملیات روزانه مخلوط می‌شوند (چانگ و همکاران، ۲۰۱۳).

حمل و نقل مسافر و بار اقلام اصلی درآمد این کسب و کار هستند، هرچند مجموع درآمد مسافر و بار سهم قابل توجهی از کل درآمد شرکت‌ها را تشکیل می‌دهد اما مجموع این دو برابر ۱۰۰ درصد نیست. خطوط هوایی دارای زیرسیستم‌های درآمدزای دیگری مانند کسب و کار اجاره هواپیما، خدمات تبلیغاتی و خدمات نگهداری ناوگان هستند. با این حال، این زیرسیستم‌ها نسبت درآمد کمی دارند و منبع درآمد اولیه شرکت‌های هواپیمایی نیستند، بنابراین ما این زیرسیستم‌ها را در نظر نمی‌گیریم.

این مقاله عملکرد شرکت‌ها حمل و نقل را به دو زیربخش سیستم پشتیبانی و سیستم پرواز تقسیم نموده است که به طور سری عمل می‌نمایند. این مدل ورودی‌های اولیه مانند تعداد هواپیما، میزان سوخت و تعداد پرسنل را به خروجی‌های نهایی درآمد مسافر، درآمد بار و میزان پتانسیل گرمایش جهانی تبدیل می‌کند. برخلاف مطالعات قبلی، این مقاله شاخص میزان پتانسیل گرمایش جهانی برای نمایش میزان انتشار آلودگی حاصل از عملکرد خطوط هوایی را بکار برده است.

تکامل دائمی محیط عملیاتی هوانوردی باعث پیشرفت مداوم صنعت هوایی شده است. در هوانوردی تجاری، افزایش قیمت سوخت و معرفی قوانین محدودکننده‌ی انتشار گازهای گلخانه‌ای، نیاز به یافتن روش‌های بهبوددهنده کارایی عملیاتی و زیست محیطی و اعمال تغییرات برای بهبود این کارایی‌ها را برانگیخته است. از سوی دیگر، در سال‌های اخیر با توسعه سریع اقتصاد جهانی به دلیل جریان جهانی شدن افراد و کالاها، هزینه‌های انرژی خطوط هوایی و انتشار گاز CO<sub>2</sub> به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. براساس داده‌های آماری سال IATA در سال ۲۰۱۵، کل هزینه انرژی برای خطوط هوایی در سال ۲۰۱۲ بیش از ۱۶۰ میلیارد دلار بود. علاوه بر این، حجم انتشار CO<sub>2</sub> در آن زمان بیش از ۰٫۶۷۶ میلیارد تن بود که تقریباً ۲٪ از کل انتشار جهانی CO<sub>2</sub> است. در واقع، صنعت هوانوردی یکی از معدود بخش‌هایی است که مصرف انرژی در آن طی ۱۰ سال گذشته بیش از ۶ درصد افزایش یافته است. در همین حال، طبق پیش‌بینی شرکت هواپیمایی تجاری چین<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۴، برای ۲۰ سال آینده، درآمد کیلومتر مسافر (RPK) کل صنعت هوانوردی ۴٫۸ درصد در سال و کل تقاضای حمل و نقل مسافر نیز ۲٫۶ برابر سطح فعلی افزایش خواهد یافت. با این حال، تولید انرژی عقب مانده و در مدت مشابه کمتر از ۶ درصد افزایش خواهد یافت و لذا شکاف بین عرضه و تقاضای انرژی روز به روز آشکارتر می‌شود. بنابراین، مشکل استفاده از انرژی در

صنعت هواپیمایی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق کاهش مصرف سوخت توجه عمومی را به خود جلب نموده است. کارایی یک شرکت هواپیمایی تحت تأثیر همه ورودی‌ها و خروجی‌های عملیات، مدیریت کارکنان و سرمایه و مصرف منابع است. با ایجاد درک بهتری از کارایی خطوط هوایی و بررسی رابطه آن با ردپای زیست محیطی یک شرکت هواپیمایی، رهبری سازمانی خطوط هوایی می‌تواند از استراتژی‌های طراحی شده برای کاهش اثرات زیست محیطی و کاهش مصرف انرژی آن استفاده کند (چن و همکاران، ۲۰۱۷).

ساختار این مقاله به شرح زیر است: پس از این مقدمه، به "بررسی ادبیات" موضوع می‌پردازیم. سپس در بخش "روش‌شناسی" به ارائه روشی برای اندازه‌گیری عملکرد سیستم‌های سری دومرحله‌ای با در نظر گرفتن ورودی‌های خارجی مرحله دوم و خروجی‌های نامطلوب پرداخته و در بخش "مطالعه موردی" رویکرد پیشنهادی را برای ۱۱ شرکت هواپیمایی در ایالات متحده اعمال و مقادیر کارایی به دست آمده‌اند. در نهایت بخش "نتیجه‌گیری" به بحث و بررسی نتایج حاصله و نتیجه‌گیری و بیان محدودیت‌ها خواهد پرداخت.

#### ادبیات نظری و پیشینه تحقیق

اصطلاح کارایی یا بهره‌وری برای توصیف توانایی یک واحد تجاری برای به حداکثر رساندن خروجی در عین به حداقل رساندن ورودی، استفاده می‌شود. به طور مشابه، کارایی خطوط هوایی، توانایی نسبی خطوط هوایی را برای به حداکثر رساندن عملکرد خود در حالی که مصرف منابع خود را به حداقل می‌رساند، توصیف می‌کند (فورسایت و همکاران، ۱۹۸۶). مطالعات اولیه عملکرد خطوط هوایی به طور معمول فقط بر اندازه شرکت متمرکز بودند. همان‌طور که تحقیقات در صنعت تکامل یافت، زمینه‌های تمرکز و روش‌های تحقیق مورد استفاده نیز رشد پیدا کرد. تحلیل عملکرد شرکت‌های هواپیمایی بر حداکثر کردن درآمد و استفاده از دارایی متمرکز بود. در دنیای شرکت‌های هوایی، عملکرد با عوامل بار هواپیما و درآمد به ازای هر مایل صندلی نشان داده می‌شود (مالیکارجون و همکاران، ۲۰۱۴).

تا جایی که می‌دانیم، تحقیقاتی که برای شناخت جنبه زیست محیطی عملیات خطوط هوایی انجام شده‌اند، اثرات زیست محیطی را به عنوان خروجی عملیات خطوط هوایی شناسایی کرده‌اند. در یک تحقیق ویژه که توسط کمیته بین‌المللی تغییرات آب و هوایی<sup>۱</sup> (IPCC) انجام شد، محققان نتیجه گرفتند که هوانوردی ۳٫۵ درصد از انتشار CO<sub>2</sub> در جهان را به خود اختصاص داده است (IPCC، ۱۹۹۹). رشد مداوم صنعت هوانوردی، همراه با موانع کمی برای رشد انتشار گازها، نشان می‌دهد که حمل و نقل هوایی می‌تواند ۱۵ تا ۴۰ درصد از انتشار CO<sub>2</sub> جهان را تا سال ۲۰۵۰ تشکیل دهد. در تحقیقات اخیر، بومیستر<sup>۲</sup> و آنکیلا<sup>۱</sup> (۲۰۱۷) پیشنهاد کردند که یک برچسب زیست محیطی (

1- Intergovernmental Panel on Climate Change  
2-Baumeister

افشاء عمومی، که به‌طور خلاصه اثرات زیست‌محیطی آن کالا یا خدمات را قبل از خرید در دسترس مصرف‌کنندگان احتمالی قرار می‌دهد) باید ایجاد شود تا به مصرف‌کنندگان هواپیمایی شفافیت بیشتری در انتخاب خطوط هوایی خود ارائه دهد. با در نظر گرفتن تأثیر عملیات خطوط هوایی بر محیط زیست، کوی<sup>۲</sup> و لی<sup>۳</sup> (۲۰۱۶) تحلیلی بر روی کارایی خطوط هوایی انجام دادند تا اثربخشی نسبی تبدیل سرمایه انسانی و مادی به قابلیت درآمد و همچنین دی‌اکسید کربن را ارزیابی کند (ساینی، ۲۰۱۸).

تحلیل پوششی داده‌ها<sup>۴</sup> برای اولین بار در اواسط دهه ۱۹۹۰ برای تحلیل کارایی خطوط هوایی معرفی شد. DEA یک روش تحلیل ناپارامتریک برای ارزیابی کارایی واحدهای تصمیم‌گیری<sup>۵</sup>، که دارای ورودی و خروجی‌های متعدد هستند، می‌باشد (سنگوپتا، ۱۹۹۹). این روش امکان مقایسه کارایی نسبی DMUها را فراهم می‌کند و محققان را قادر می‌سازد تا یک الگو و/یا بهترین عملکرد برای تعریف مرز کارایی بهینه آن محیط صنعتی ایجاد کنند. جنبه کلیدی DEA این است که نیازی به تبدیل مقادیر ورودی و خروجی به یک معادل مالی یا واحد اندازه‌گیری مشترک برای ارزیابی کارایی DMU ندارد. این روش، مصرف ورودی‌ها و تولید خروجی‌ها را در مقایسه با سطوح عملکرد بهینه فرضی ارزیابی می‌کند. سنگوپتا (۱۹۹۹) خاطر نشان می‌کند که توانایی انجام تحلیل کارایی بدون اطلاعات هزینه، DEA را به یک انتخاب محبوب برای شرکت‌های بخش دولتی و سازمان‌های غیرانتفاعی تبدیل می‌کند. مرکت<sup>۷</sup> و هنشر<sup>۸</sup> (۲۰۱۱) تأکید می‌کنند که این ویژگی DEA هم‌چنین آن را به یک ابزار کارآمد محبوب برای تحقیقات در هوانوردی تبدیل می‌کند - صنعتی که به ویژه به داده‌ها حساس است. مجموعه دانش فعلی نشان می‌دهد که DEA برای مدل‌سازی و مقایسه عملیات خطوط هوایی اصلی برای ارزیابی کارایی مفید است. چندین محقق این روش را برای تحلیل عملیات خطوط هوایی از جنبه‌های مختلف انتخاب نموده‌اند (مالیکارجون، ۲۰۱۵).

تحلیل کارایی خطوط هوایی اولیه با استفاده از روش DEA بر عملیات تجاری سنتی متمرکز بود (به عنوان مثال، تبدیل سرمایه، مواد و ورودی‌های نیروی کار به قابلیت تولید درآمد). سنگوپتا (۱۹۹۹) مطالعه‌ای را بر روی ۱۴ شرکت هواپیمایی بین‌المللی انجام داد که در آن کارایی مصرف‌شان از ظرفیت هواپیما، هزینه عملیاتی کل و کل دارایی‌های غیرپرواز را برای تولید درآمد مسافری و غیرمسافری ارزیابی کرد. از آنجایی که صنعت خطوط هوایی اثرات زیست‌محیطی را پذیرفته است، کاربردهای تحقیقاتی DEA به موضوع اثرات زیست

1-Onkila

2- Cui

3-Li

4-Data Envelopment Analysis (DEA)

5-Decision Making Units (DMUs)

6-Sengupta

7-Merket

8-Hensher

محیطی مرتبط با هوانوردی نیز گسترش یافته است. کوی و لی (۲۰۱۶) از یک مدل چند مرحله‌ای DEA برای ارزیابی کارایی خطوط هوایی با توجه به کاهش دی‌اکسید کربن استفاده کردند. این مطالعه تحقیقاتی یکی از نمونه‌های متعدد در سال‌های اخیر در بررسی کارایی خطوط هوایی و ارتباط آن‌ها با اثرات زیست‌محیطی هوانوردی است. با این حال، در ارزیابی کارایی سوخت یا کارایی انرژی برای خطوط هوایی در مقالات فوق خروجی نامطلوب در نظر گرفته نشده است. در برخی مقالات موجود در رابطه با کارایی انرژی مانند وی و همکاران (۲۰۰۷)، ژو و آنگ (۲۰۰۸)، ماندال (۲۰۱۰) و تائو و همکاران (۲۰۱۲) خروجی نامطلوب اصلی میزان انتشار CO<sub>2</sub> می‌باشد. اگرچه خطوط هوایی تنها چیزی حدود ۲٫۵ درصد از انتشار CO<sub>2</sub> جهانی را تشکیل می‌دهند، محدودیت اعمال شده توسط اتحادیه اروپا بر انتشار کربن خطوط هوایی توجه بسیاری از خطوط هوایی را به خود جلب کرده است (سابینی، ۲۰۱۸).

در واقع، چندین موضوع مختلف توسط مطالعات تحقیقاتی خطوط هوایی مبتنی بر DEA در کشورها یا مناطق مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر رتبه‌بندی کارایی و مقایسه‌های شان، می‌توان اشاره نمود که به عنوان مثال تأثیر اندازه شبکه، مالکیت و اقدامات نظارتی بر عملکرد صنعت هواپیمایی با رگرسیون امتیازات کارایی بر روی متغیرهای زمینه‌ای یا محیطی مورد بررسی قرار گرفته است. (باروس و همکاران، ۲۰۱۳؛ باروس و وانگ، ۲۰۱۵؛ کانو و همکاران، ۲۰۱۵؛ لی و کوی، ۲۰۱۵؛ کوی و لی، ۲۰۱۷؛ زانگ و همکاران، ۲۰۱۷). خوانندگان می‌توانند برای بررسی ادبیات جامع در مورد این موضوع، به این نویسندگان مراجعه کنند.

با این حال، توجه به این نکته مهم است که به تازگی تمرکز بر کارایی انرژی/سوخت خطوط هوایی افزایش یافته است، هرچند برخورد با انتشار CO<sub>2</sub> به عنوان یک خروجی نامطلوب هنوز کمیاب است (کوی و لی، ۲۰۱۴؛ کوی و همکاران، ۲۰۱۴؛ کوی و لی، ۲۰۱۵). ژو و همکاران (۲۰۱۴) از رویکردهای مرزی مبتنی بر نسبت، قطعی و تصادفی، برای بررسی کارایی سوخت ۱۵ اپراتور جت بزرگ در ایالات متحده استفاده کرد. نتایج نشان داد که صرفه جویی در هزینه خطوط هوایی اصلی می‌تواند در سال ۲۰۱۰ به حدود ۱ میلیارد دلار برسد. کوی و لی (۲۰۱۵) از یک VFB-DEA برای اندازه‌گیری بازده انرژی ۱۱ شرکت هواپیمایی از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ استفاده کردند، و سپس، آنها از یک مدل اندازه‌گیری مبتنی بر اپسیلون پویا برای ارزیابی کارایی دینامیک ۱۹ شرکت هواپیمایی بین‌المللی بزرگ از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که بحران مالی جهانی که در سال ۲۰۰۸ آغاز شد تأثیرات منفی قابل توجهی بر کارایی انرژی خطوط هوایی داشت.

در بیشتر مقالات، کارایی انرژی برای منعکس کردن رابطه بین خروجی‌ها و ورودی‌ها تعریف شده است. بر اساس تعریف کلی پاترسون (۱۹۹۶) از کارایی انرژی به استفاده از انرژی کمتر برای تولید همان مقدار خدمات یا خروجی‌های مفید اشاره دارد و کارایی انرژی شرکت‌های هواپیمایی را بر اساس تعریف اولیه، انتشار  $CO_2$  در نظر گرفته است.

از سویی، علاوه بر مهم‌ترین گاز گلخانه‌ای ساخته‌ی دست بشر یعنی دی‌اکسید کربن ( $CO_2$ )، گازهای گلخانه‌ای دیگری مانند متان یا اکسیدنیترژن نیز وجود دارد. گازهای مختلف به یک اندازه در اثر گلخانه‌ای نقش ندارند و برای دوره‌های زمانی مختلف در جو باقی می‌مانند. به منظور مقایسه اثرات گازهای گلخانه‌ای مختلف، کمیته بین‌المللی تغییرات آب و هوایی سازمان ملل متحد اصطلاح «پتانسیل گرمایش جهانی»<sup>۱</sup> (GWP) را تعریف کرده است. این شاخص اثر گرم‌شدن زمین بر اثر مقدار معینی از گازهای گلخانه‌ای را در یک دوره زمانی معین (معمولاً ۱۰۰ سال) در مقایسه با  $CO_2$  بیان می‌کند. به عنوان مثال، تأثیر متان بر آب و هوا ۲۵ برابر شدیدتر از  $CO_2$  است، اما به مدت طولانی در جو باقی نمی‌ماند. به طور معمول، انتشار گازهای گلخانه‌ای در واحدهای معادل دی‌اکسید کربن<sup>۲</sup> ( $CO_2e$ ) گزارش می‌شود. گازها با ضرب در GWP به  $CO_2e$  تبدیل می‌شوند. بدین منظور کمیته بین‌المللی تغییرات آب و هوایی، GWP مربوط به گازهای گلخانه‌ای حاصل از سوخت هواپیما را محاسبه نموده که در جدول ۱ آورده شده است.<sup>۳</sup>

جدول ۱. ضرایب GWP برای گازهای معادل  $CO_2$

نام	فرمول شیمیایی	پتانسیل گرمایش جهانی (در ۱۰۰ سال)
دی‌اکسید کربن	$CO_2$	۱
متان	$CH_4$	۲۵
اکسید نیترژن	$N_2O$	۲۹۸

هم‌چنین IPCC، میزان انتشار سالانه  $CO_2$ ،  $CH_4$  و  $N_2O$  از منابع احتراق سوخت در حالت پرواز هواپیما برحسب تن متریک را محاسبه نموده است. این مقادیر در جدول ۲ نمایش داده شده‌اند.

1- global warming potential

2- carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>e)

3- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Fourth Assessment Report (AR4), 2007. See the source note to Table 11 for further explanation.



جدول ۲. میزان تولید واحدهای معادل دی‌اکسیدکربن در احتراق در حال پرواز هواپیما

نوع وسیله نقلیه	عامل CO <sub>2</sub> (کیلوگرم / واحد)	عامل CH <sub>4</sub> (گرم/واحد)	عامل N <sub>2</sub> O (گرم/واحد)	واحد
سفر هوایی - مسافت کوتاه (>۳۰۰ مایل)	۰,۲۰۷	۰,۰۰۶۴	۰,۰۰۰۶	مسافر-مایل
سفر هوایی - مسافت متوسط (=۳۰۰ مایل، >۲۳۰۰ مایل)	۰,۱۲۹	۰,۰۰۰۶	۰,۰۰۴۱	مسافر-مایل
سفر هوایی - مسافت طولانی (<=۲۳۰۰ مایل)	۰,۱۳۶	۰,۰۰۰۶	۰,۰۰۵۲	مسافر-مایل

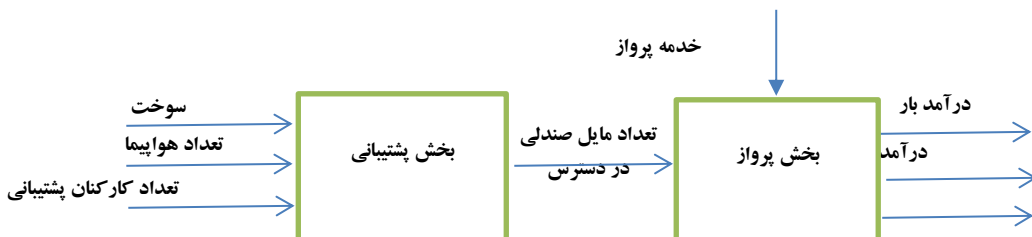
تحقیقات کمی در مورد تاثیر خطوط هوایی در گرمایش زمین انجام شده است و بیشتر مطالعات تنها بر میزان تولید دی‌اکسیدکربن در خطوط هوایی تمرکز دارند. از سوی دیگر مقدار تولید CO<sub>2</sub> در تمام پروازها ثابت و برابر در نظر گرفته شده‌اند، در حالی که همان‌طور که از جدول ۲ ملاحظه می‌شود میزان تولید گازهای آلاینده در هواپیماهای با ابعاد مختلف، متفاوت می‌باشد. در نتیجه نادیده گرفتن سایر آلاینده‌های حاصله در گرمایش جهانی، ارزیابی کارایی را دچار خطا نموده است. علاوه بر این، ثابت فرض نمودن این مقادیر، عدم قطعیت موجود در داده‌ها را نادیده می‌گیرد که می‌تواند منجر به جواب‌های نشدنی گردد.

این مقاله به صوت مبتکرانه یک چارچوب نظری را پیشنهاد می‌کند که شامل حمل و نقل مسافر و بار با خطوط هوایی با لحاظ نمودن پتانسیل گرمایش جهانی به عنوان یک خروجی نامطلوب می‌باشد. این روش محاسبه کارایی می‌تواند به شناسایی دلایل واقعی ناکارایی و به دست آوردن برآورد دقیق‌تر کارایی کمک نماید. این مقاله یک مدل NDEA سری با خروجی نامطلوب غیرقطعی برای تحلیل کارایی زیست محیطی خطوط هوایی پیشنهاد می‌کند که می‌تواند کارایی کلی و کارایی زیرسیستم‌ها را محاسبه کند. در نهایت مطالعه موردی ما نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی چگونه کار می‌کند و یافته‌های کلیدی را ارائه می‌کند که برای تصمیم گیرندگان مفید است.

## روش شناسی

این پژوهش از نظر جهت‌گیری پژوهش، در زمره‌ی مطالعات بنیادی است. از بعد روش‌شناسی، پژوهش حاضر از نوع کمی است. روش کمی گردآوری اطلاعات از نوع استفاده از اطلاعات موجود بوده و از این دیدگاه پژوهش در زمره‌ی مطالعات موردی حساب می‌شود که هدف کاربردی آن بررسی عملکرد شرکت‌های هواپیمایی با هدف افزایش درآمدهای شرکت و کاهش تاثیر آن بر آلودگی زیست محیطی است. در این تحقیق با تحلیل دقیق ادبیات موضوع و مطالعه داده‌های شرکت‌ها، مدل مفهومی مساله طرح‌ریزی شده و اطلاعات مورد نیاز از طریق پایگاه داده‌های آنلاین اداره حمل و نقل ایالات متحده جمع‌آوری شده است.

در پژوهش کنونی، به منظور تحلیل مضمون از مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای کائو و هوانگ و رویکرد استوار سازی برتسیماس و سیم استفاده شده است. تحلیل پوششی داده‌ها در حال حاضر به‌طور گسترده برای محاسبه کارایی زیست محیطی در صنعت هوانوردی استفاده می‌شود. هنگام در نظر گرفتن خروجی‌های نامطلوب، مجموعه تولید به صورت زیر است:



شکل ۱- نمودار مفهومی سیستم شبکه‌ای خطوط هوایمایی

$$T = \{(X, Y, Z) : X \text{ can produce } (Y, Z)\} \quad (1)$$

در معادله (۱)،  $X = \{x_{mk}\}^{M \times K}$  مخفف ماتریس ورودی‌ها،  $Y = \{y_{nk}\}^{N \times K}$  مخفف ماتریس خروجی‌های مطلوب و  $Z = \{z_{lk}\}^{L \times K}$  مخفف ماتریس خروجی نامطلوب است.  $K$  تعداد DMU ها و  $M, N, L$  به ترتیب تعداد ورودی‌ها، خروجی‌های مطلوب و خروجی نامطلوب را نشان می‌دهد.

یکی از راه‌های رایج برای مدیریت خروجی‌های نامطلوب، روش دور ریختنی قوی است که به ظرفیت محیط برای رسیدگی به مقدار از پیش تعیین شده خروجی‌های نامطلوب اعتقاد دارد. یعنی خروجی‌های نامطلوب به عنوان ورودی و ورودی‌های نامطلوب به عنوان خروجی تلقی می‌شوند. تمام روش‌ها در مقالات دانشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، در حالی که نتایج حاصل از کوی و همکاران (۲۰۱۸) نشان می‌دهد که دورریختنی قوی در هنگام برخورد با خروجی‌های نامطلوب معقول‌تر است. بنابراین، ما یک مدل NDEA استوار با قابلیت دورریختنی قوی معرفی می‌کنیم تا کارایی یک سیستم سری را به‌طور منطقی مقایسه کنیم.

**فرمول‌سازی مساله:** مدل اندازه‌گیری کارایی، امتیازهای کارایی را برای هر شرکت هواپیمایی مسافربری ایجاد می‌کند و به دنبال منابع ناکارآمدی است. بر اساس تحقیقات آکادمیک قبلی و روند عملیات روزانه شرکت‌های هواپیمایی، ورودی‌ها و خروجی‌های خطوط هوایی را انتخاب کرده و یک سیستم جدید برای ساختار داخلی خطوط هوایی می‌سازیم. مدل کارایی خطوط هوایی شامل شبکه‌ای از دو مرحله با چهار ورودی، سه خروجی و یک محصول میانی است. شکل ۱ مدل بازده عملیاتی خطوط هواپیمایی را به همراه شاخص‌های عملکردی مهم نشان می‌دهد.

مرحله اول یا مرحله پشتیبانی از ورودی‌های سوخت، تعداد هواپیما و تعداد کارکنان برای تولید متغیر میانی مایل صندلی موجود<sup>۱</sup> (ASM) استفاده می‌کند. ASM به عنوان حاصل ضرب مایل هواپیماهای موجود برای مسافرت بین مقاصد و تعداد صندلی‌های موجود برای خدمات درآمد مسافری بین مقاصد تعریف می‌شود (اداره آمار حمل و نقل،<sup>۲</sup> ۲۰۱۳). ASM نشان دهنده ظرفیت عرضه یک شرکت هواپیمایی است. مرحله اول شاخص کارایی شرکت هواپیمایی را نشان می‌دهد. ASM هم خروجی از مرحله اول و هم ورودی مرحله دوم است. بنابراین، ASM یک محصول میانی در مدل است که مراحل اول و دوم را به هم متصل می‌کند.

مرحله دوم یا مرحله پرواز، ASM را مصرف می‌کند تا خروجی‌های میزان بار، تعداد مسافر و میزان انتشار CO<sub>2</sub>e را تولید کند. میزان بار حمل شده و تعداد مسافر جابجا شده، خروجی‌های مطلوب شرکت هواپیمایی می‌باشد و لذا بدنبال افزایش آن هستیم ولی میزان انتشار CO<sub>2</sub>e خروجی نامطلوب است و می‌بایست آن را کاهش داد. مدل پیشنهادی صرفاً بر اندازه‌گیری کارایی عملیات خطوط هوایی داخلی ایالات متحده با در نظر گرفتن کاهش آلودگی هوا و کمک به مدیران برای بهبود عملکرد عملیاتی متمرکز است. از این رو، مدل فقط کمیت‌های مربوط به عملیات را در نظر می‌گیرد.

مدل کارایی خطوط هوایی شامل دو مرحله، چهار ورودی، سه خروجی و یک محصول میانی است. برای دستیابی به راندمان بهینه، بدیهی است که ورودی‌ها (سوخت، تعداد هواپیما، تعداد کارکنان پشتیبانی و تعداد خدمه پرواز) باید کاهش و خروجی‌های مطلوب (درآمد بار، درآمد مسافر) افزایش و خروجی نامطلوب (میزان انتشار CO<sub>2</sub>e) نیز کاهش یابد. با این حال، محصول میانی (ASM) به عنوان ورودی و خروجی رفتار می‌کند و انتخاب جهت‌گیری آن مشخص نیست. بنابراین، مدیران خطوط هوایی باید به دنبال یافتن سطوح بهینه ASM باشند تا هزینه‌ها را کاهش یا درآمد را افزایش دهند. متغیرهای مساله به شرح زیر تعریف می‌شوند:

- سوخت: کل سوخت مصرفی بر حسب میلیون گالن
- تعداد هواپیما: کل ناوگان عملیاتی شرکت می‌باشند که شامل انواع زیر می‌باشد.
- هواپیمای کوچک باریک: به طور معمول ۱۵۰ صندلی یا کمتر در یک پیکربندی دو کلاس (به عنوان مثال بوئینگ ۷۳۷-۷۰۰،

ایرباس A319)

1-Available Seat Miles (ASM)

2-Bureau of Transportation Statistics

- هواپیمای بزرگ باریک: به طور معمول ۱۵۱ صندلی یا بیشتر با پیکربندی دو کلاس (به عنوان مثال بوئینگ ۷۳۷-۸۰۰ / بوئینگ ۷۵۷، ایرباس A321 / A320 NEO / A321NEO)
- هواپیمای پهن‌پیکر: پیکربندی دو راهرو
- تعداد کارکنان پشتیبانی: شامل کل کارکنان حوزه مدیریت، حوزه تعمیر و نگهداری داخلی و کارکنان مرتبط با مسافر، بار و جابجایی هواپیما می‌باشد
- تعداد کارکنان پرواز: شامل کل خلبانان و کمک خلبانان و کل کارکنان خدمه پرواز
- ASM: (مایل\_صندلی موجود) معیار رایج صنعت از خروجی شرکت هواپیمایی که اشاره به یک صندلی هواپیما دارد که یک مایل پرواز کرده است، چه اشغال شده باشد یا نشود. هواپیمایی با ۱۰۰ صندلی مسافر، با مسافت ۱۰۰ مایل پرواز کرده و ۱۰ هزار مایل صندلی در دسترس ایجاد می‌کند.
- درآمد مسافر: درآمد دریافت شده توسط شرکت هواپیمایی از حمل و نقل مسافران در عملیات برنامه‌ریزی شده برحسب میلیون دلار.
- درآمد بار: درآمد دریافت شده توسط شرکت هواپیمایی از جابجایی بار در عملیات برنامه‌ریزی شده برحسب میلیون دلار.
- CO<sub>2</sub>e: علاوه بر مهم‌ترین گاز گلخانه‌ای ساخته‌ی دست‌بشر یعنی دی‌اکسیدکربن (CO<sub>2</sub>)، گازهای گلخانه‌ای دیگری مانند متان یا اکسیدنیتروژن نیز وجود دارد. به طور معمول، انتشار گازهای گلخانه‌ای در واحدهای معادل دی‌اکسیدکربن (CO<sub>2</sub>e) گزارش می‌شود. میزان انتشار گازها با ضرب در GWP به CO<sub>2</sub>e تبدیل می‌شوند.
- میزان تولید گازهای گلخانه‌ای بسته به اندازه و نوع هواپیما و نیز سن ناوگان متفاوت است، لذا مقدار این متغیر غیرقطعی و به صورت یک داده استوار بیان خواهد شد ولی سایر داده‌ها قطعی می‌باشند. مقادیر متغیرهای این تحقیق از داده‌های استخراج شده از پرونده‌های شرکت حمل و نقل هوایی بدست می‌آید که از طریق پایگاه داده‌های آنلاین اداره حمل و نقل (BTS, 2021) در دسترس است.
- برای اندازه‌گیری بازده عملیاتی کلی خطوط هوایی، ما مدل DEA خروجی\_محور (لوئیس و همکاران، ۲۰۱۳) را برای مدل شبکه دو مرحله‌ای خطوط هوایی اعمال می‌کنیم. برای دستیابی به راندمان عملیاتی بهینه، ما تمایل داریم که با حفظ ورودی، خروجی را به طور هم‌زمان افزایش دهیم. با این حال، هیچ وزن ذهنی نسبی برای ورودی و خروجی وجود ندارد که نشان‌دهنده اهمیت آن‌ها باشد.

در این بخش ابتدا به یادآوری مدل دومرحله‌ای خروجی محور کائو و هوانگ (۲۰۰۸) برای محاسبه کارایی کل و مدل دومرحله‌ای خروجی محور کائو (۲۰۱۴) پرداخته و سپس مدل تغییر یافته برای ارائه مدلی جهت ارزیابی کارایی در حضور ورودی‌های میانی، عوامل مطلوب و نامطلوب به طور هم‌زمان استفاده خواهد شد.

در ابتدا مفاهیم پایه‌ای زیر را تعریف می‌کنیم.

$$J = \{1, \dots, 11\} : j \in J : \text{مجموعه اندیس ۱۱ واحد تصمیم‌گیری}$$

$$k \in \{1, \dots, 11\} : \text{اندیس DMU تحت ارزیابی}$$

$$X_j = (x_{ij}, i = 1, 2, 3) : \text{بردار ورودی‌های خارجی مرحله اول مصرف شده توسط DMU}_j$$

$$x_j^2 : \text{ورودی خارجی مرحله دوم مصرف شده توسط DMU}_j$$

$$z_j^1 : \text{خروجی میانی مرحله اول تولید شده توسط DMU}_j$$

$$Y_j = (y_{rj}, r = 1, 2, 3) : \text{بردار خروجی‌های نهایی آخرین مرحله تولید شده توسط DMU}_j$$

$$V = (v_i, i = 1, 2, 3) : \text{بردار وزن‌های ورودی‌های خارجی اولین مرحله}$$

$$w^1 : \text{بردار وزن خروجی میانی مرحله اول}$$

$$U = (u_r, r = 1, 2, 3) : \text{بردار وزن‌های خروجی‌های نهایی آخرین مرحله}$$

$$E_k : \text{کارایی کلی DMU}_k$$

$$E_k^1 : \text{کارایی مرحله اول DMU}_k$$

$$E_k^2 : \text{کارایی مرحله دوم DMU}_k$$

امتیاز کارایی کل  $DMU_k$  توسط مدل خروجی\_محور کائو و هوانگ (۲۰۰۸) به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$E_k = \max \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} \quad (1)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1$$

$$\sum_{d=1}^D w_d^1 z_{dj}^1 - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{d=1}^D w_d^1 z_{dj}^1 \leq 0, \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r \geq 0, v_i \geq 0, \quad r = 1, \dots, s, \quad i = 1, \dots, m$$

$$w_d^1 \geq 0, \quad d = 1, \dots, D.$$

که در آن مولفه  $x_{ij}$  مقدار ورودی  $i$ ام و نیز  $y_{rj}$  مقدار خروجی  $r$ ام از  $DMU_j$  خواهند بود. با توجه به افزوده شده متغیر ورودی

مرحله دوم  $(x_j^2)$ ، مدل DEA دومرحله‌ای (۱) به شرح زیر تغییر می‌یابد.

$$E_k = \max \sum_{r=1}^r u_r y_{rk} \quad (2)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^r v_i x_{ik} + v^r x_k^r = 1, \quad i = 1, \dots, m$$

$$w^1 z_j^1 - \sum_{i=1}^r v_i x_{ij} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{r=1}^r u_r y_{rj} - w^1 z_j^1 - v^r x_j^r \leq 0, \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r \geq 0, v_i \geq 0, \quad r = 1, \dots, s, \quad i = 1, \dots, m$$

$$w^1 \geq 0, v^r \geq 0.$$

سیستم شکل (۱) علاوه بر استفاده و تولید ورودی‌ها و خروجی‌های مطلوب (میزان سوخت، تعداد هواپیما، تعداد کارکنان پشتیبانی، تعداد صندلی/مایل در دسترس، تعداد کارکنان پرواز، درآمد مسافر و درآمد بار) به تولید خروجی نامطلوب (میزان انتشار CO<sub>2</sub>e) نیز می‌پردازد. تفکیک کردن مولفه‌های مطلوب و نامطلوب از یکدیگر در بردار خروجی و نیز بررسی تاثیر این عوامل، مساله مهمی است که سبب بهبود روند عملیاتی افزایش سطح کارآیی واحدها می‌گردد. مدل‌های ارزیابی‌کننده چنین سیستم‌هایی، باید برای افزایش سطح کارآیی، از میزان تولید خروجی‌های نامطلوب بکاهند. به عبارت دیگر مدل‌های DEA در چنین مواقعی بایستی رفتار متفاوت با عوامل مطلوب و نامطلوب موجود داشته باشند. در چنین مدل‌هایی با کاهش سطح خروجی‌های نامطلوب به افزایش شاخص کارآیی چنین واحدهایی اقدام می‌نمایند. حال فرض کنید که در کنار عوامل مطلوب  $x_{ij}^D$ ،  $y_{ij}^D$  و  $z_{dj}^D$  عامل نامطلوب  $y_{ij}^U$  نیز ظاهر گردند. در این هنگام ناحیه شدنی متشکل از بردارهایی به فرم  $X_j = (x_{1j}^D, x_{2j}^D, x_{3j}^D, x_j^r)$ ،  $Y_j = (y_{1j}^D, y_{2j}^D, y_{3j}^U)$  و  $Z_j = (z_j^1)$  می‌باشد. در مدل (۲) متغیر خروجی سوم (میزان انتشار CO<sub>2</sub>e) به عنوان خروجی نامطلوب سیستم به شمار می‌آید، لذا جهت سهولت شناسایی آن را با نماد  $y_{3j}^U$  نمایش می‌-

دهیم.

لذا می‌توان نوشت:

$$E_k = \max (u_1 y_{1k}^D + u_2 y_{2k}^D + u_3 y_{3k}^U) \quad (3)$$

$$s.t. \quad v_1 x_{1k}^D + v_2 x_{2k}^D + v_3 x_{3k}^D + v^r x_k^r = 1$$

$$w^1 z_j^1 - v_1 x_{1j}^D - v_2 x_{2j}^D - v_3 x_{3j}^D \leq 0, \quad j = 1, \dots, 11$$

$$u_1 y_{1j}^D + u_2 y_{2j}^D + u_3 y_{3j}^U - w^1 z_j^1 - v^r x_j^r \leq 0, \quad j = 1, \dots, 11$$

$$w^1 \geq 0, u_r \geq 0, v_i \geq 0, v^r \geq 0, \quad r = 1, 2, 3, \quad i = 1, 2, 3.$$

برای تحلیل کارایی در حضور عوامل نامطلوب دو گونه روش پیشنهاد شده است. گونه اول، شامل روش‌هایی است که تخمین کارایی را از طریق اعمال تغییرات مناسب روی مدل انجام می‌دهند و گونه دوم، شامل روش‌هایی می‌باشد که از طریق اعمال تغییرات مناسب در داده‌ها، کارایی را ارزیابی می‌کنند. در این تحقیق ما از روشی از گونه اول استفاده می‌کنیم. همان‌گونه که پیشتر اشاره شد در این تحقیق، از روش دور ریختنی قوی استفاده شده است که در آن با خروجی‌های نامطلوب مانند ورودی‌ها رفتار می‌شود و همچنین با ورودی‌های نامطلوب مانند خروجی رفتار می‌شود. در این صورت متغیر در تابع هدف به ضریب منفی و در محدودیت سوم به عنوان متغیر ورودی مرحله سوم خواهد بود. لذا خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}
 E_k &= \max \left( u_1 y_{1k}^D + u_r y_{rk}^D - u_r y_{rk}^U \right) & (4) \\
 \text{s.t.} \quad & v_1 x_{1k}^D + v_r x_{rk}^D + v_3 x_{3k}^D + v^z x_k^z = 1 \\
 & w^1 z_j^1 - v_1 x_{1j}^D - v_r x_{rj}^D - v_3 x_{3j}^D \leq 0, \quad j = 1, \dots, 11 \\
 & u_1 y_{1j}^D + u_r y_{rj}^D - u_r y_{rj}^U - w^1 z_j^1 - v^z x_j^z \leq 0, \quad j = 1, \dots, 11 \\
 & w^1 \geq 0, u_r \geq 0, v_i \geq 0, v^z \geq 0, \quad r = 1, 2, 3, \quad i = 1, 2, 3
 \end{aligned}$$

مشاهده می‌شود که مدل (۴) درصد کاهش خروجی‌های نامطلوب و افزایش خروجی‌های مطلوب و همچنین افزایش ورودی‌های نامطلوب و کاهش ورودی‌های مطلوب است.

مدل DEA برای ارزیابی کارایی مرحله اول برای DMU  $k$  بدین صورت می‌باشد: (کاتو، ۲۰۱۴)

$$\begin{aligned}
 E_k^1 &= \max \left( w^1 z_k^1 \right) & (5) \\
 \text{s.t.} \quad & v_1 x_{1k}^D + v_r x_{rk}^D + v_3 x_{3k}^D = 1 \\
 & w^1 z_j^1 - v_1 x_{1j}^D - v_r x_{rj}^D - v_3 x_{3j}^D \leq 0, \quad j = 1, \dots, 11 \\
 & w^1 \geq 0, v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, 3
 \end{aligned}$$

و به شیوه مشابه مدل DEA برای ارزیابی کارایی مرحله دوم DMU  $k$  نیز به شرح زیر است: (کاتو، ۲۰۱۴)

$$\begin{aligned}
 E_k^r &= \max \left( u_1 y_{1k}^D + u_r y_{rk}^D - u_r y_{rk}^U \right) & (6) \\
 \text{s.t.} \quad & w^1 z_{1k}^1 + v^z x_k^z = 1 \\
 & u_1 y_{1j}^D + u_r y_{rj}^D - u_r y_{rj}^U - w^1 z_j^1 - v^z x_j^z \leq 0, \quad j = 1, \dots, 11 \\
 & w^1 \geq 0, u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, 3
 \end{aligned}$$

همان‌طور که پیشتر عنوان شد، متغیر خروجی  $y_{rj}^U$  غیرقطعی می‌باشد. حال اگر فرض می‌کنیم به ازای هر  $j \in \{1, \dots, 11\}$

$y_{rj}^U = \bar{y}_{rj}^U + \eta \hat{y}_{rj}^U$ ، که در آن  $\eta \in [-1, 1]$  و  $\bar{y}_{rj}^U$  برآورد پارامتر و  $\hat{y}_{rj}^U$  میزان انحراف مجاز پارامتر باشد، آن‌گاه با جایگذاری

مقدار  $y_{rj}^U$  در روابط (۴) مدل (۶) به صورت زیر تبدیل می‌شود.

$$\begin{aligned}
 E_k &= \max E & (7) \\
 s.t. \quad E &\leq u_1 y_{1k}^D + u_r y_{rk}^D - u_r (\bar{y}_{rk}^U + \eta \hat{y}_{rk}^U) \\
 v_1 x_{1k}^D + v_r x_{rk}^D + v_3 x_{3k}^D + v^r x_k^r &= 1 \\
 w^1 z_j^1 - v_1 x_{1j}^D - v_r x_{rj}^D - v_3 x_{3j}^D - v^r x_j^r &\leq 0, \quad j = 1, \dots, 11 \\
 u_1 y_{1j}^D + u_r y_{rj}^D - u_r (\bar{y}_{rj}^U + \eta \hat{y}_{rj}^U) - w^1 z_j^1 - v^r x_j^r &\leq 0, \quad j = 1, \dots, 11 \\
 w^1 \geq 0, u_r \geq 0, v_i \geq 0, v^r \geq 0, \quad r = 1, 2, 3, \quad i = 1, 2, 3
 \end{aligned}$$

به منظور داشتن جوابی که به ازای تمام مقادیر  $y_{rj}^U$  در مدل (۷) صدق باید رابطه زیر را داشته باشیم.

$$\begin{aligned}
 E_k &= \max E & (8) \\
 s.t. \quad E - u_1 y_{1k}^D - u_r y_{rk}^D + u_r \bar{y}_{rk}^U + \max \eta u_r \hat{y}_{rk}^U &\leq 0 \\
 v_1 x_{1k}^D + v_r x_{rk}^D + v_3 x_{3k}^D + v^r x_k^r &= 1 \\
 w^1 z_j^1 - v_1 x_{1j}^D - v_r x_{rj}^D - v_3 x_{3j}^D - v^r x_j^r &\leq 0, \quad j = 1, \dots, 11 \\
 u_1 y_{1j}^D + u_r y_{rj}^D - u_r \bar{y}_{rj}^U - \min \eta u_r \hat{y}_{rj}^U - w^1 z_j^1 - v^r x_j^r &\leq 0, \quad j = 1, \dots, 11 \\
 w^1 \geq 0, u_r \geq 0, v_i \geq 0, v^r \geq 0, \quad r = 1, 2, 3, \quad i = 1, 2, 3
 \end{aligned}$$

با تکنیک استوارسازی برتسیماس، مدل همتای استوار مدل (۷) به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned}
 E_k &= \max E & (9) \\
 s.t. \quad E - u_1 y_{1k}^D - u_r y_{rk}^D + u_r \bar{y}_{rk}^U + p_k \Gamma_k + q_{rk} &\leq 0 \\
 v_1 x_{1k}^D + v_r x_{rk}^D + v_3 x_{3k}^D + v^r x_k^r &= 1 \\
 w^1 z_j^1 - v_1 x_{1j}^D - v_r x_{rj}^D - v_3 x_{3j}^D - v^r x_j^r &\leq 0, \quad j = 1, \dots, 11 \\
 u_1 y_{1j}^D + u_r y_{rj}^D + u_r \bar{y}_{rj}^U + p_j \Gamma_j + q_{rj} - w^1 z_j^1 - v^r x_j^r &\leq 0, \quad j = 1, \dots, 11 \\
 p_j \Gamma_j + q_{rj} &\geq u_r \hat{y}_{rj}^U \\
 w^1 \geq 0, v^r \geq 0, \\
 v_i \geq 0, u_r \geq 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad r = 1, 2, 3 \\
 p_j \geq 0, q_{rj} \geq 0, \quad j = 1, \dots, 11
 \end{aligned}$$

به شیوه مشابه مدل‌های همتای استوار برای مدل‌های محاسبه ارزیابی مراحل اول و دوم، مدل‌های (۵) و (۶)، به صورت زیر به دست می‌آید.



$$E_k^1 = \max E^1 \quad (10)$$

$$s.t. \quad E^1 - w^1 z_j^1 \leq 0.$$

$$v_1 x_{1k}^D + v_2 x_{2k}^D + v_3 x_{3k}^D = 1$$

$$w^1 z_j^1 - v_1 x_{1j}^D - v_2 x_{2j}^D - v_3 x_{3j}^D \leq 0, \quad j = 1, \dots, 11$$

$$w^1 \geq 0, v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, 3$$

و

$$E_k^2 = \max E^2 \quad (11)$$

$$s.t. \quad E^2 - u_1 y_{1k}^D - u_2 y_{2k}^D + u_3 \bar{y}_{3k}^U + p_k \Gamma_k + q_{\tau k} \leq 0.$$

$$w^1 z_k^1 + v^2 x_k^2 = 1$$

$$u_1 y_{1j}^D + u_2 y_{2j}^D + u_3 \bar{y}_{3j}^U + p_j \Gamma_j + q_{\tau j} - w^1 z_j^1 - v^2 x_j^2 \leq 0, \quad j = 1, \dots, 11$$

$$p_j \Gamma_j + q_{\tau j} \geq u_3 \hat{y}_{3j}^U$$

$$w^1 \geq 0, v^2 \geq 0,$$

$$v_i \geq 0, u_r \geq 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad r = 1, 2, 3$$

$$p_j \geq 0, q_{\tau j} \geq 0, \quad j = 1, \dots, 11$$

## یافته‌ها

این مقاله از داده‌های ۱۰ سال برای تحقیقات تجربی از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ استفاده می‌کند. به دلیل اهمیت نسبی تجارت حمل‌ونقل، داده‌های بخش حمل‌ونقل در برخی از خطوط هوایی ناقص است. پس از فیلتر کردن دقیق، داده‌های تجربی از ۱۱ شرکت هواپیمایی ایالات متحده به شرح زیر به دست آمده است: آمریکا<sup>۱</sup>، کانتینتال<sup>۲</sup>، دلتا<sup>۳</sup>، ویرجین آمریکا<sup>۴</sup>، یونایتد<sup>۵</sup>، یو اس ایرویز<sup>۶</sup>، سوئوست<sup>۷</sup>، جت‌بلو<sup>۸</sup>، فرونتیر<sup>۹</sup>، آلاسکا<sup>۱۰</sup>، هاوایی<sup>۱۱</sup>.

داده‌های تعداد کارکنان بخش دفتری، تعداد کارکنان بخش پرواز، تعداد ناوگان هواپیمایی، میزان سوخت، تعداد مایل/صندلی در دسترس، میزان درآمد حاصل از حمل مسافر و میزان درآمد حاصل از حمل‌ونقل بار از گزارش‌های سالانه ۱۱ شرکت هواپیمایی استخراج

- 1- American
- 2-Continental
- 3-Delta
- 4-Virgin America
- 5-United
- 6-US Airways
- 7-Southwest
- 8-JetBlue
- 9-Frontier
- 10- Alaska
- 11-Hawaiian

شده است. داده‌های مربوط به میزان گرمایش زمین از گزارش‌های پایداری، محیط زیست و مسئولیت اجتماعی و بر مبنای مایل/صندلی در دسترس شرکت‌ها حاصل شده است.

آمار توصیفی ورودی‌ها و خروجی‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. جدول ۳ مقدار میانگین، انحراف استاندارد، حداقل مقدار و حداکثر مقدار را در بخش حمل و نقل ۱۱ شرکت هواپیمایی نشان می‌دهد. داده‌های ASM و درآمد بار دارای تفاوت زیادی هستند که اولی از ۶۰۳۹,۶۸۷ تا ۲۵۳۲۵۴,۵۷۲ متغیر و انحراف استاندارد ۸۵۸۰۴,۳۵۹ است. دامنه دوم از ۵ تا ۱۰۰۲۳ و انحراف استاندارد آن ۳۴۲۵ می‌باشد.

جدول ۳- آمار توصیفی ورودی‌ها و خروجی‌ها در طول سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۹

میانگین	مقدار بیشینه	مقدار کمینه	انحراف استاندارد	
۲۶۱۸۸,۶۲۵	۹۰۳۷۵	۷۷۹	۲۹۸۲۶,۶۰۹	کارکنان بخش پشتیبانی (نفر)
۱۲۱۰,۵۶۴	۳۶۶۶,۳۷۹	۹۷,۸۲۶	۱۲۸۵,۰۶۰	سوخت (میلیون گالن)
۳۱۸,۵۵۵	۹۷۱,۸۹۰	۲۸,۳۵۹	۳۱۱,۸۴۳	تعداد ناوگان (فروند)
۸۳۹۵۵,۴۰۴	۲۵۳۲۵۴,۵۷۲	۶۰۳۹,۶۸۷	۸۵۸۰۴,۳۵۹	ASM
۱۲۱۶۱,۵۲۱	۳۸۹۰۲	۷۷۲	۱۲۷۵۲,۹۶۶	کارکنان خدمه پرواز (نفر)
۹۸۵۸	۳۲۸۴۸	۴۵۸	۱۰۶۹۷	درآمد مسافر (میلیون دلار)
۲۲۴۰	۱۰۰۲۳	۵	۳۴۲۵	درآمد بار (میلیون دلار)
۱۴۰۲۰,۵۵۳	۴۲۲۹۳,۵۱۴	۱۰۰۸,۶۲۸	۱۴۳۲۹,۳۲۸	پتانسیل گرمایش (کیلوگرم)

این بدان معناست که حمل و نقل مسافر و بار در خطوط هوایی مختلف دارای سطوح مختلف توسعه است. با این وجود، داده‌های مساله با واقعیت مطابقت دارند. محدوده انتشار پتانسیل گرمایش زمین از ۱۰۰۸,۶ تا ۴۲۲۹۳,۵ کیلوگرم است و دلیل آن حالات توسعه متنوع خطوط هوایی، تفاوت ASM و نیز اختلاف نوع هواپیماهای مورد استفاده است. بنابراین، در نظر گرفتن خروجی‌های نامطلوب در ارزیابی بهره‌وری انرژی از اهمیت بیشتری برخوردار است.

جدول ۴- ضرایب همبستگی ورودی‌ها و خروجی‌ها

کارکنان پشتیبانی	سوخت	تعداد ناوگان	دسترس مایل/صندلی در	کارکنان خدمه پرواز	درآمد مسافر	درآمد بار	پتانسیل گرمایش	
۱,۰۰۰	۰,۹۹۶	۰,۹۷۲	۰,۹۹۴	۰,۹۹۶	۰,۹۸۹	۰,۹۲۱	۰,۹۹۴	کارکنان پشتیبانی
۰,۹۹۶	۱,۰۰۰	۰,۹۷۴	۰,۹۹۷	۰,۹۹۵	۰,۹۹۴	۰,۹۱۷	۰,۹۹۷	سوخت
۰,۹۷۲	۰,۹۷۴	۱,۰۰۰	۰,۹۸۱	۰,۹۸۲	۰,۹۸۳	۰,۸۱۸	۰,۹۸۱	تعداد ناوگان
۰,۹۹۴	۰,۹۹۷	۰,۹۸۱	۱,۰۰۰	۰,۹۹۸	۰,۹۹۷	۰,۹۰۳	۱,۰۰۰	مایل/صندلی در دسترس
۰,۹۹۶	۰,۹۹۵	۰,۹۸۲	۰,۹۹۸	۱,۰۰۰	۰,۹۹۴	۰,۹۰۲	۰,۹۹۸	کارکنان خدمه پرواز
۰,۹۸۹	۰,۹۹۴	۰,۹۸۳	۰,۹۹۷	۰,۹۹۴	۱,۰۰۰	۰,۸۹۱	۰,۹۹۷	درآمد مسافر
۰,۹۲۱	۰,۹۱۷	۰,۱۸۱	۰,۹۰۳	۰,۹۰۲	۰,۸۹۱	۱,۰۰۰	۰,۹۰۳	درآمد بار
۰,۹۹۴	۰,۹۹۷	۰,۹۸۱	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۰,۹۹۷	۰,۹۰۳	۱,۰۰۰	پتانسیل گرمایش

ارزیابی کارایی شرکت‌های هواپیمایی با هدف کاهش پتانسیل گرمایش جهانی با روش تحلیل پوششی داده‌های دومرحله‌ای استوار با خروجی نامطلوب

\* همه ضرایب همبستگی از نظر آماری در سطح ۱ درصد معنی دار هستند.

جدول ۴ ضرایب همبستگی پیرسون این مقاله را بین ورودی‌ها و خروجی‌ها نشان می‌دهد. باز هم، اکثر ضرایب مثبت و نزدیک به ۱ هستند، که نشان دهنده همبستگی قوی بین متغیرهای ورودی و خروجی است. بنابراین، انتخاب شاخص‌ها منطقی است.

### کارایی کلی و بخش‌ها

سطح محافظه‌کاری مساله روی ۰,۵ تنظیم شده است. ما از نرم افزار لینگو<sup>۱</sup> نسخه ۱۷ برای محاسبه مدل دومرحله‌ای شبکه‌ای تحلیل پوششی

داده‌های استوار (۹) استفاده می‌کنیم و نتایج در جدول ۵ آورده شده است. سپس از تحلیل پوششی داده‌های استوار (۱۰) و (۱۱) برای محاسبه کارایی مرحله اول و مرحله دوم خطوط هوایی استفاده و نتایج در جدول ۶ و ۷ آورده شده است.

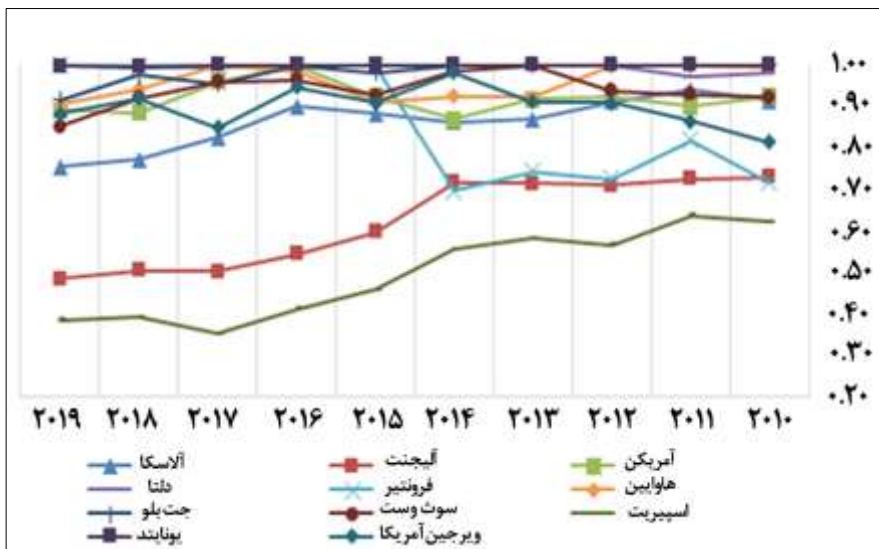
جدول ۵- امتیازات کارایی کل شرکت‌های هواپیمایی ایالات متحده در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹

	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	میانگین
آمریکن	۰,۹۲۴۰۰	۰,۸۹۹۸۸	۰,۹۲۱۰۰	۰,۹۱۷۳۳	۰,۸۶۸۹۶	۰,۹۲۴۶۹	۰,۹۹۸۰۲	۰,۹۵۹۳۱	۰,۸۸۳۵۶	۰,۸۹۰۴۴	۰,۹۱۸۷۲
دلتا	۰,۹۸۰۳۹	۰,۹۷۰۴۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۹۲۸۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۹۴۳۶
یونایتد	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۹۸۵۶	۰,۹۹۷۹۱	۰,۹۹۸۴۳	۰,۹۹۹۴۹
سوت‌وست	۰,۹۲۱۴۴	۰,۹۲۹۷۳	۰,۹۳۶۵۵	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۸۶۲۴	۰,۹۲۵۶۴	۰,۹۶۵۱۹	۰,۹۵۹۱۰	۰,۹۱۹۸۲	۰,۸۵۲۰۶	۰,۹۳۹۵۸
جت‌بلو	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۸۱۵۰	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۵۵۶۲	۰,۹۷۵۰۹	۰,۹۱۵۶۶	۰,۹۸۲۷۹
فرونیر	۰,۷۱۶۹۸	۰,۸۱۸۵۱	۰,۷۲۵۸۹	۰,۷۴۳۴۴	۰,۶۹۵۲۴	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۹۷۹۱	۱,۰۰۰۰۰	۰,۸۶۹۸۰
ویرجین آمریکا	۰,۸۱۲۷۱	۰,۸۶۳۳۶	۰,۹۰۷۸۳	۰,۹۱۰۹۰	۰,۹۸۱۸۸	۰,۹۰۸۰۹	۰,۹۴۵۳۴	۰,۸۴۹۴۲	۰,۹۱۹۸۲	۰,۸۸۱۲۵	۰,۸۹۸۰۶
آلاسکا	۰,۹۱۳۷۱	۰,۹۴۰۰۱	۰,۹۱۱۱۹	۰,۸۶۸۴۱	۰,۸۶۱۴۸	۰,۸۸۳۰۵	۰,۹۰۰۵۹	۰,۸۲۴۲۰	۰,۷۷۰۴۵	۰,۷۵۴۴۴	۰,۸۶۲۷۶
هاوایی	۰,۹۹۶۲۵	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۹۸۷۴	۰,۹۲۲۹۶	۰,۹۲۴۳۳	۰,۹۱۲۰۴	۰,۹۸۶۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۴۲۱۶	۰,۹۰۳۳۲	۰,۹۵۸۵۸
اسپیریت	۰,۶۲۱۳۶	۰,۶۳۵۵۲	۰,۵۶۵۱۱	۰,۵۸۱۳۴	۰,۵۵۳۷۲	۰,۴۵۶۱۰	۰,۴۰۹۲۰	۰,۳۵۰۸۳	۰,۳۸۹۳۹	۰,۳۳۸۹۱	۰,۴۹۴۶۵
آلیجنت	۰,۷۲۹۱۶	۰,۷۲۴۲۸	۰,۷۰۹۹۵	۰,۷۱۳۳۸	۰,۷۱۶۱۵	۰,۵۹۶۷۵	۰,۵۴۲۷۲	۰,۵۰۰۰۰	۰,۵۰۴۰۵	۰,۴۸۳۴۲	۰,۶۲۱۹۹
میانگین	۰,۸۷۴۱۸	۰,۸۸۹۲۵	۰,۸۷۹۶۶	۰,۸۷۷۹۸	۰,۸۷۱۶۴	۰,۸۷۱۶۲	۰,۸۸۶۱۰	۰,۸۵۳۶۲	۰,۸۴۵۲۷	۰,۸۳۳۹۰	

در جدول ۵، ستون‌های ۲ تا ۱۱ امتیازات کارایی کلی شرکت‌های هواپیمایی را بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ نشان می‌دهد، در حالی که ستون آخر نشان دهنده میانگین امتیازات کارایی است. بازده سالانه برخی از خطوط هوایی ۱ است که نشان دهنده کارایی آن شرکت هواپیمایی در آن سال است.

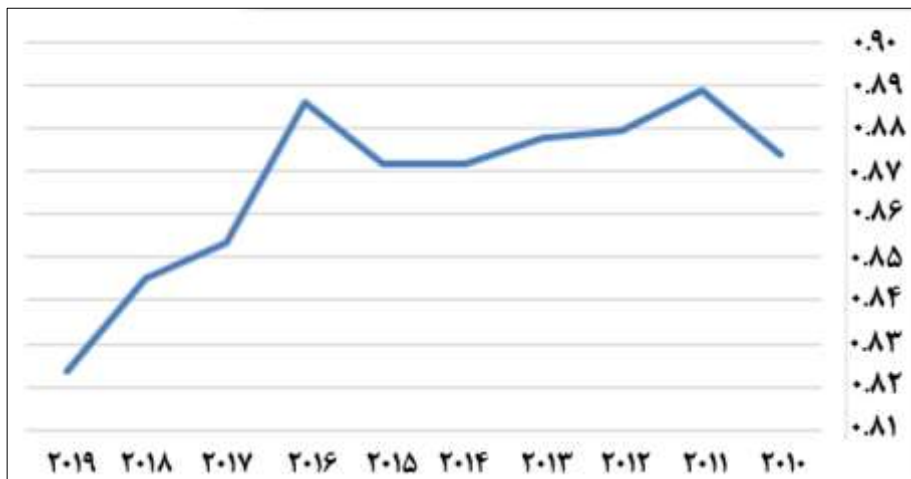
با بررسی جدول ۵، می‌توان دریافت که سه شرکت هواپیمایی یونایتد و دلتا با هفت و شرکت جت‌بلو با شش سال امتیاز کارایی کل کامل، بالاترین عملکرد را در بین شرکت‌های موردنظر داشته‌اند، در حالی که پنج شرکت آمریکن، ویرجین آمریکا، آلاسکا، اسپیریت و آلیجنت در هیچ سالی کارآ نبوده‌اند و شرکت‌های اسپیریت و آلیجنت دارای پایین‌ترین عملکرد در طی این سال‌ها بوده‌اند. هم‌چنین، با توجه به ستون میانگین امتیازات کارایی کل شرکت‌ها می‌توان دید شرکت یونایتد با میانگین امتیاز ۰,۹۹۹۴۹ بالاترین رتبه را داشته و به دنبال آن به-

ترتیب دلتا، جت بلو، هاواین، سوئوست، آمریکن، ویرجین آمریکا، فرونتیر، آلاسکا، آلجنت قرار دارند و شرکت اسپیریت در رتبه آخر قرار خواهد داشت.



نمودار ۲- امتیاز کارایی شرکت‌های هواپیمایی ایالات متحده در طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹

با توجه به نمودار ۱، می‌توان دید که شرکت‌های هواپیمایی به دو گروه تقسیم می‌شوند، گروه اول شامل ۹ شرکت که دارای کارایی کل به‌طور نسبی بالایی هستند و گروه دوم شامل دو شرکت اسپیریت و آلجنت که همواره در طی این دوره دارای بازده عملکرد پایین می‌باشند. البته شرکت فرونتیر در پنج سال اول دارای بازده عملکرد پایین بوده ولی از سال ۲۰۱۵ عملکرد این شرکت رشد قابل توجهی داشته و این شرکت را از گروه دوم به گروه اول انتقال داده است. حال مساله اصلی یافتن عوامل و دلایل پایین بودن بازده عملکرد دو شرکت اسپیریت و آلجنت و ارائه یک الگو جهت بهبود عملکرد تمام شرکت‌ها به‌خصوص این دو شرکت می‌باشد.



نمودار ۳- روند تغییرات میانگین امتیازات کل سالانه شرکت‌ها از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹

ارزیابی کارایی شرکت‌های هواپیمایی با هدف کاهش پتانسیل گرمایش جهانی با روش تحلیل پوششی داده‌های دومرحله‌ای استوار با خروجی نامطلوب

از سوی دیگر، مطابق جدول ۵ مقدار میانگین سالانه بازده از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ افزایش و کاهش داشته است اما روندی نزولی را از ۰٫۸۷۴۱۸۱۸ در سال ۲۰۱۰ به ۰٫۸۲۳۹۰۲۷ در سال ۲۰۱۹ نشان می‌دهد. متأسفانه از این منظر، چشم‌انداز توسعه خطوط هوایی خوب نیست. این روند در نمودار ۳ قابل ملاحظه می‌باشد.

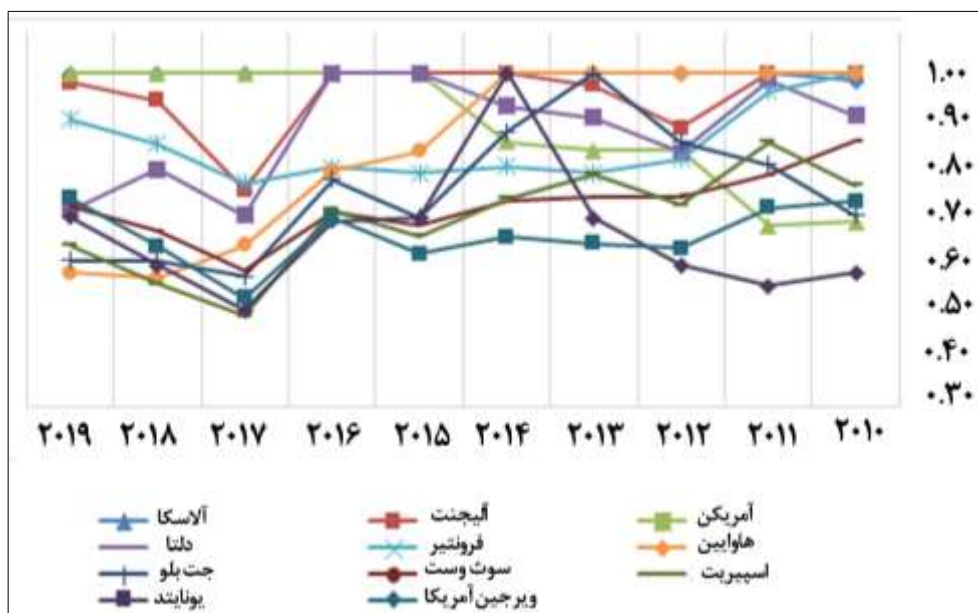
در ادامه جهت تعیین علل ناکارایی شرکت‌ها به محاسبه امتیاز کارایی مرحله اول (بخش پشتیبانی) و مرحله دوم (بخش پرواز) هر شرکت می‌پردازیم. بدین منظور، ابتدا با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌های استوار (۱۰) امتیاز کارایی بخش پشتیبانی را محاسبه می‌کنیم. در این بخش شرکت‌ها تلاش می‌کنند با استفاده از ورودی‌های میزان سوخت مصرفی، تعداد ناوگان هواپیمایی و نیز تعداد کارکنان پشتیبانی، بیشینه تعداد مایل/صندلی در دسترس را ایجاد نمایند. نتایج این ارزیابی در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- امتیازات کارایی مرحله اول شرکت‌های هواپیمایی ایالات متحده در سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۹

	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	میانگین
هاواین	۰٫۹۹۱۲۳	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۰٫۹۹۹۱۲
اسپیریت	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۰٫۹۳۴۳۶	۰٫۹۸۵۷۷	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۰٫۸۵۹۷۹	۰٫۹۶۷۵۸	۰٫۹۸۱۷۴	۰٫۹۷۳۶۲
فرونیر	۰٫۸۲۲۳۷	۰٫۸۱۷۵۰	۰٫۹۰۷۴۶	۰٫۹۰۸۲۱	۰٫۹۱۷۶۳	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۰٫۹۳۷۳۲
آلاسکا	۰٫۹۴۹۰۰	۰٫۹۹۲۱۴	۰٫۹۰۵۹۷	۰٫۹۴۷۶۵	۰٫۹۶۰۳۲	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۰٫۸۲۹۳۴	۰٫۸۸۴۷۵	۰٫۸۳۶۹۶	۰٫۹۳۰۶۲
یونایتد	۱٫۰۰۰۰۰	۰٫۹۷۹۰۷	۰٫۸۹۸۰۲	۰٫۸۸۰۳۶	۰٫۸۸۱۷۸	۰٫۸۸۱۰۷	۰٫۸۸۷۷۵	۰٫۸۶۸۴۴	۰٫۹۱۵۹۳	۰٫۹۴۴۶۳	۰٫۹۱۴۴۱
ویرجین	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰۰	۰٫۹۰۶۸۵	۰٫۸۸۳۰۸	۰٫۷۹۳۱۲	۰٫۷۵۳۵۹	۰٫۷۶۰۷۱	۰٫۹۰۹۷۴
سوت‌وست	۰٫۸۲۹۸۳	۰٫۸۹۱۱۰	۰٫۹۱۸۳۸	۱٫۰۰۰۰۰	۰٫۹۳۰۰۶	۰٫۸۲۷۵۴	۰٫۸۷۲۶۵	۰٫۷۵۶۴۰	۰٫۷۷۴۲۱	۰٫۷۷۵۸۴	۰٫۸۵۷۶۰
دلتا	۰٫۹۱۹۳۸	۰٫۸۷۸۶۱	۰٫۸۵۲۵۸	۰٫۸۵۰۶۶	۰٫۸۴۷۷۴	۰٫۸۱۸۸۳	۰٫۸۳۳۹۶	۰٫۷۶۳۴۰	۰٫۸۱۰۳۴	۰٫۸۴۰۸۵	۰٫۸۴۱۶۴
جت‌بلو	۰٫۸۶۵۵۶	۰٫۹۱۸۴۶	۰٫۸۴۱۶۶	۰٫۸۷۹۱۲	۰٫۸۵۰۰۹	۰٫۸۰۴۷۹	۰٫۸۳۶۹۰	۰٫۷۰۹۲۴	۰٫۷۴۷۵۲	۰٫۷۹۳۹۲	۰٫۸۲۴۷۳
آلیجنت	۰٫۷۶۰۴۵	۰٫۷۴۴۴۳	۰٫۷۶۹۵۰	۰٫۸۲۶۰۵	۱٫۰۰۰۰۰	۰٫۸۲۶۷۵	۰٫۸۲۲۷۰	۰٫۷۱۵۰۷	۰٫۷۷۰۰۹	۰٫۸۲۷۵۷	۰٫۸۰۶۲۶
آمریکن	۰٫۸۴۶۹۳	۰٫۸۳۲۸۸	۰٫۷۹۰۲۵	۰٫۷۹۵۹۱	۰٫۸۰۳۶۵	۰٫۷۸۲۸۵	۰٫۸۲۵۹۱	۰٫۷۳۰۷۷	۰٫۷۹۲۱۱	۰٫۸۵۰۵۵	۰٫۸۰۵۷۲
میانگین	۰٫۹۰۷۷۱	۰٫۹۱۴۵۱	۰٫۸۹۲۵۶	۰٫۹۱۵۷۹	۰٫۹۲۷۱۲	۰٫۸۹۵۳۴	۰٫۹۰۵۷۲	۰٫۸۲۰۵۱	۰٫۸۵۶۰۱	۰٫۸۷۴۵۲	

همان‌گونه که در جدول ۶ ملاحظه می‌گردد، مشخص می‌شود که در این بخش پشتیبانی شرکت‌هاواین با نه سال امتیاز کارایی کامل، بالاترین عملکرد را دارد و شرکت‌های اسپیریت، فرونیر و ویرجین آمریکا با پنج سال امتیاز کارایی کامل در رده دوم قرار دارند. شرکت آلاسکا با دوسال امتیاز کارایی کامل، شرکت‌های یونایتد، سوت‌وست و آلیجنت با یک سال و نیز شرکت‌های آمریکن، دلتا و جت‌بلو بدون امتیاز کامل در طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ در انتهای گروه قرار می‌گیرند. با رتبه‌بندی شرکت‌ها براساس میانگین کارایی، جالب است بدانیم که دو شرکت دلتا و یونایتد که در بخش کارایی کل، دارای امتیازات بالایی بودند، در این بخش از عملکرد خیلی خوبی برخوردار نیستند و در مقابل شرکت اسپیریت که پایین‌ترین کارایی کل را داشت در این بخش عملکرد بسیار خوبی داشته و توانسته در رتبه دوم قرار گیرد.

با دقت در نمودار ۴ می‌توان دید که با وجود آن که امتیازات کارایی مرحله اول شرکت‌ها در طی این سال‌ها افزایش یا کاهش داشته اما از یک سو این تغییرات در اغلب شرکت‌ها وجود داشته و از سوی دیگر این تغییرات برای همه شرکت‌ها در محدوده تقریباً ثابتی قرار می‌گیرد و کاهش چشمگیری نیز نداشته‌اند. اما نکته قابل تامل در این بخش این موضع است که امتیاز کارایی مرحله اول شرکت‌ها با وجود اختلاف و کم و زیاد بودن مقادیر میانگین امتیاز کارایی هر شرکت هواپیمایی در جدول ۶، مقادیر نسبتاً بالایی هستند، که نشان دهنده‌ی تخصیص معقول منابع و بهره‌وری نسبی عملکرد در بخش پشتیبانی شرکت‌ها می‌باشد.



نمودار ۴- امتیاز کارایی مرحله اول شرکت‌های هواپیمایی ایالات متحده در طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹

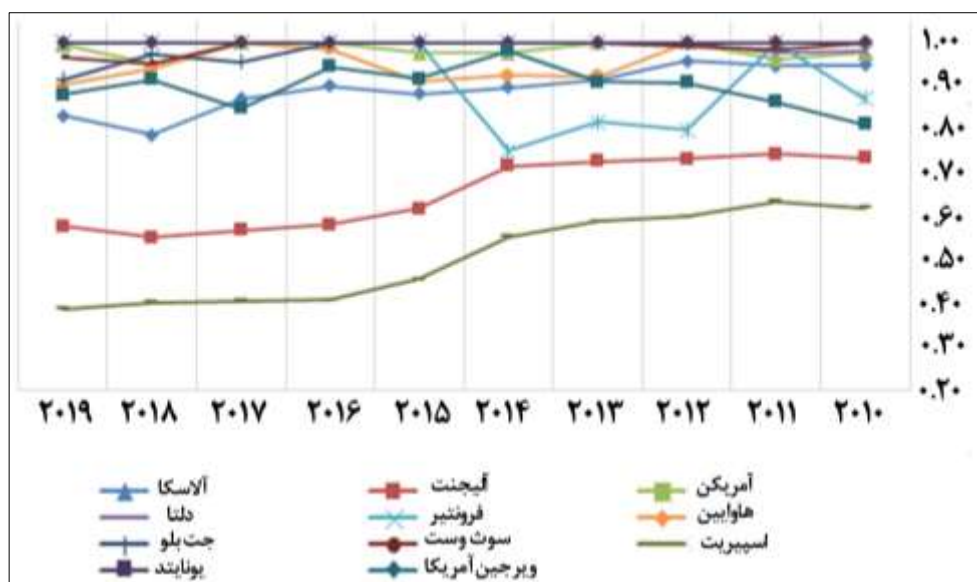
در مرحله بعد با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌های استوار با متغیر نامطلوب (۱۱) امتیازات کارایی مرحله دوم (بخش پرواز) شرکت‌ها را محاسبه نموده و نتایج در جدول ۶ نمایش داده شده‌است. همان‌گونه که از جدول ۶ ملاحظه می‌شود شرکت یونایتد در طی تمام سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ دارای امتیاز کارایی یک در بخش دوم بوده است. پس از آن شرکت دلتا هشت سال، شرکت جت بلو هفت سال، شرکت سوئت وست شش سال، شرکت فرونتیر پنج سال و شرکت‌های هاواین و آمریکن سه سال امتیاز کارایی یک در بخش پرواز دریافت کرده‌اند. اما براساس میانگین امتیاز کارایی ده‌ساله شرکت یونایتد با میانگین امتیاز کارایی یک در رتبه اول و شرکت دلتا با میانگین ۰,۹۹۵۵۹ در رتبه دوم قرار دارد و به ترتیب شرکت‌های سوئت وست، جت بلو، آمریکن، هاواین، فرونتیر و آلاسکا قرار گرفته و در انتهای صف شرکت‌های آلیجنت با مقدار میانگین امتیاز کارایی ۰,۶۵۵۴۹ و اسپیریت با مقدار میانگین ۰,۵۰۶۴۰ قرار دارند.

ارزیابی کارایی شرکت‌های هواپیمایی با هدف کاهش پتانسیل گرمایش جهانی با روش تحلیل پوششی داده‌های دومرحله‌ای استوار با خروجی نامطلوب

جدول ۷- امتیازات کارآیی مرحله دوم شرکت‌های هواپیمایی ایالات متحده در سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۹

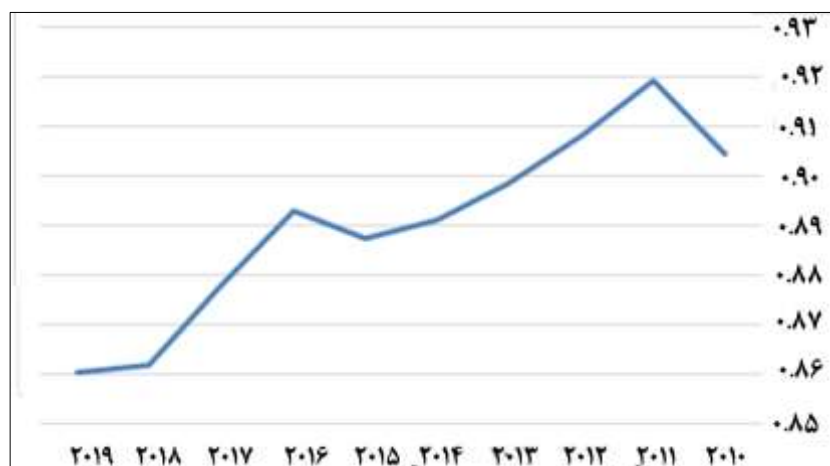
	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	میانگین
آمریکن	۰,۹۷۷۲۱	۰,۹۶۲۴۵	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۷۶۰۱	۰,۹۷۶۳۲	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۵۲۶۵	۰,۹۹۵۲۵	۰,۹۸۳۸۳
دلنا	۰,۹۸۰۱۵	۰,۹۷۶۴۱	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۹۵۵۹
یونایتد	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰
سوت وست	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۸۴۲۶	۰,۹۹۲۶۵	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۵۳۴۳	۰,۹۶۸۵۹	۰,۹۹۵۳۳
جت بلو	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۵۶۳۵	۰,۹۷۵۴۶	۰,۹۱۶۰۲	۰,۹۸۴۶۴
فرونیتیر	۰,۸۷۲۶۸	۱,۰۰۰۰۰	۰,۸۰۰۶۳	۰,۸۱۹۵۳	۰,۷۵۱۸۴	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۲۴۱۵
ویرجین آمریکا	۰,۸۱۳۹۵	۰,۸۶۳۱۲	۰,۹۰۸۰۵	۰,۹۱۱۸۴	۰,۹۸۲۱۵	۰,۹۱۷۶۵	۰,۹۴۵۳۲	۰,۸۴۹۵۶	۰,۹۱۵۲۶	۰,۸۸۱۴۵	۰,۸۹۸۴۷
الاسکا	۰,۸۱۳۷۵	۰,۹۴۷۱۲	۰,۹۵۷۴۳	۰,۹۱۴۱۶	۰,۸۹۷۷۴	۰,۸۳۳۴۳	۰,۹۰۱۵۳	۰,۸۷۲۳۱	۰,۷۸۸۲۵	۰,۸۳۳۴۹	۰,۸۹۴۱۴
هاواین	۱,۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۹۹۸۷	۰,۹۲۳۶۵	۰,۹۲۴۵۱	۰,۹۱۲۳۷	۰,۹۸۶۵۳	۱,۰۰۰۰۰	۰,۹۴۲۱۵	۰,۹۰۳۷۸	۰,۹۵۸۹۶
اسپیریت	۰,۶۲۱۴۵	۰,۶۳۶۷۵	۰,۶۰۰۳۲	۰,۵۹۰۲۴	۰,۵۵۴۲۶	۰,۴۵۶۸۷	۰,۴۰۹۶۵	۰,۴۰۸۲۵	۰,۴۰۲۱۵	۰,۳۸۸۶۲	۰,۵۰۶۴۰
آلیجنت	۰,۷۳۵۲۶	۰,۷۴۴۱۵	۰,۷۳۳۲۴	۰,۷۲۷۴۵	۰,۷۱۶۳۵	۰,۶۱۹۸۷	۰,۵۸۲۴۳	۰,۵۶۹۸۷	۰,۵۵۳۶۴	۰,۵۷۹۳۵	۰,۶۵۵۴۹
میانگین	۰,۹۰۴۳۳	۰,۹۱۹۱۶	۰,۹۰۸۰۵	۰,۸۹۸۴۱	۰,۸۹۰۹۷	۰,۸۷۵۷۲	۰,۸۹۲۹۷	۰,۸۷۷۶۰	۰,۸۶۱۹۴	۰,۸۶۰۲۵	

با نگاهی به نمودار ۵، درمی‌یابیم که شرکت‌های مورد بحث از لحاظ امتیازات کارایی مرحله دوم به دو گروه تقسیم می‌شوند، گروه اول، شامل دو شرکت آلیجنت و اسپیریت، دارای مقادیر امتیاز پایین و گروه دوم شامل، سایر شرکت‌های هواپیمایی، مقادیر امتیاز کارایی مرحله دوم به طور نسبی بالاتری دارند. هم‌چنین شرکت فرونتیر در پنج سال اول به‌طور کلی دارای امتیازات کارایی پایین‌تر بوده و در گروه اول قرار می‌گیرند ولی از سال ۲۰۱۵ امتیازات کارایی آن افزایش یافته و به گروه دوم ملحق می‌گردد.



نمودار ۵- امتیاز کارایی مرحله دوم شرکت‌های هواپیمایی ایالات متحده در طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹

از سوی دیگر، براساس جدول ۷ مقدار میانگین سالانه بازده عملکرد مرحله دوم شرکت‌ها از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ افزایش و کاهش مداوم داشته است اما در کل یک روندی نزولی از ۰,۹۰۴۳۳ در سال ۲۰۱۰ به ۰,۸۶۰۲۵ در سال ۲۰۱۹ را نشان می‌دهد. این روند در نمودار ۶ ملاحظه می‌شود. این بدان معنی است که شرکت‌ها در بخش پرواز که باعث تبدیل مایل/صندلی‌های در دسترس به درآمدهای حاصل از جابجایی مسافر و بار و نیز تولید پتانسیل گرمایش زمین می‌گردد، دچار کاهش عملکرد شده و بهره‌وری آن‌ها کاهش یافته است.



نمودار ۶- روند تغییرات میانگین امتیازات کل سالانه شرکت‌ها از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹

علاوه بر این، می‌دانیم که بازده کلی در جدول ۵ و کارایی بخش پشتیبانی در جدول ۶ در مقایسه با کارایی بخش پرواز در جدول ۷ نسبتاً بالا هستند. این نشان می‌دهد که شرکت‌های هواپیمایی بر توسعه بخش پشتیبانی تمرکز می‌کنند، اما نه بر افزایش بهره‌وری و حل مشکلات ناشی از آلودگی هوا در بخش پرواز. بنابراین، همه خطوط هوایی باید اقدامات کاهش انتشار، تقویت پیشگیری از آلودگی و صرفه جویی در انرژی را در نظر بگیرند. در نهایت، تفاوت قابل توجهی در کارایی بین بخش‌های پشتیبانی و پرواز وجود دارد و شرکت‌های هواپیمایی باید توسعه را هماهنگ و متعادل کنند.

### بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه توانایی اجرای یک مدل DEA نسبی چندگانه (با استفاده از معماری دو مرحله‌ای و داده‌های غیرقطعی) را نشان می‌دهد. این مدل شامل ساختار کاهش انتشار آلودگی است در عین حال که ساختار تحلیل عملیات تجاری که اجازه می‌دهد مراحل تولید ظرفیت و تولید درآمد را جداگانه حفظ کند، در خود جای دهد. تحقیقات موجود محدودی اثرات زیست محیطی یا کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را به عنوان خروجی کل عملیات خطوط هوایی در نظر می‌گیرند. ساختار مدل ایجاد شده در این مطالعه به طور خاص کاهش انتشار



گازهای گلخانه‌ای را بخشی از تصمیم‌گیری شرکت در مرحله خروجی‌های نهایی و تولید درآمد می‌کند. بنابراین، فلسفه و طراحی مدل، کاهش انتشار را به یک متغیر تصمیم‌گیری تبدیل می‌کند، نه نتیجه بهینه‌سازی درآمد.

مدل DEA شبکه‌ای دومرحله‌ای در این تحلیل به صورت فلسفی ترکیبی از فلسفه سه مرحله‌ای برای کارایی عملیاتی خطوط هوایی تعریف شده توسط مالیکارجون (۲۰۱۵) با ساختار کارایی عملیاتی محیطی توسعه‌یافته توسط کوی و لی (۲۰۱۶) ارائه می‌کند. با استفاده از ویژگی‌های دو مرحله‌ای ضربی بکار رفته توسط کائو و هوانگ (۲۰۰۸)، مدل DEA دو مرحله‌ای که برای این مطالعه توسعه یافته است، امکان ارزیابی و مقایسه موفقیت‌آمیز کارایی نسبی بین خطوط هوایی موجود در مطالعه را فراهم می‌کند. این تحقیق کارایی خطوط هواپیمایی را برحسب تولید درآمد و کاهش آلودگی محیط زیست بررسی می‌کند.

تجزیه و تحلیل نتایج مدل DEA دومرحله‌ای استوار شبکه‌ای در ارتباط با عملکرد خطوط هوایی برمبنای داده‌های عمومی بیان شده برای دوره مطالعه، اثربخشی مدل را در مقایسه خطوط هوایی برای عملیات تجاری و کاهش محیط‌زیست تأیید می‌کند. مدل‌های متمرکز بر استراتژی شبکه و کسب‌وکار نشان می‌دهند که داشتن مدل‌های تحلیلی شامل تنها خطوط هوایی مشابه می‌تواند به برجسته کردن نقاط قوت و فرصت‌های خاص آن خطوط هوایی کمک کند.

این مقاله تحلیلی از کارایی خطوط هوایی ایالات متحده طی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۱۰، با استفاده از یک مدل DEA شبکه‌ای استوار جدید (RNDEA) برای محاسبه غیرقطعی بودن خروجی‌های نامطلوب مانند پتانسیل گرمایش جهانی ارائه می‌کند. اطلاعات سالانه از ۱۱ شرکت هواپیمایی برای یک دوره ده ساله جمع‌آوری شده است. چندین گونه از مدل DEA شبکه‌ای برای ارزیابی و مقایسه بازده کل خطوط هوایی و ارزیابی مراحل داخلی شبکه در سال‌های مختلف طراحی و اجرا شد.

این مدل پس از برنامه‌ریزی دومرحله‌ای برای سیستم، کارایی کل شرکت‌های هواپیمایی را ارزیابی می‌کند و در ادامه در مرحله اول "بازده بخش پشتیبانی" را اندازه‌گیری می‌کند در حالی که "بازده بخش پرواز" را در مرحله دوم تخمین می‌زند. در همین حال، از تکنیک استوارسازی برتسیماس و سیم (۲۰۰۴) برای کنترل اثرات تغییر میزان آلاینده‌گی برحسب نوع هواپیما و طول سفر هنگام محاسبه کارایی خطوط هوایی در مراحل مختلف استفاده شده است. در نهایت، متفاوت از روش سنتی، ما از مدل خطی استوار شبکه‌ای برای بررسی تاثیر متغیرهای زمینه‌ای بر کارایی استفاده شد.

از طریق این مدل‌های نوآورانه و تجزیه و تحلیل تجربی آن‌ها، نتیجه می‌گیرد که اکثر خطوط هوایی ایالات منحنه، به جز دو شرکت، به طور نسبی کارا هستند و میانگین امتیاز کارایی کل آن‌ها بالای ۰٫۸ می‌باشد. تنها دو شرکت اسپریت و آلجنت دارای میانگین کارایی کل پایین‌تری می‌باشند. از سوی دیگر تمامی شرکت‌ها در مرحله اول نسبتاً کارا هستند و میانگین امتیاز کارایی بخش پشتیبانی در این شرکت‌ها بالای ۰٫۸ می‌باشد همچنین تمام شرکت‌ها، به جز دو شرکت اسپریت و آلجنت، در بخش پرواز دارای میانگین تقریباً ۰٫۹ و بالاتر هستند یعنی خطوط هواپیمایی بخش پشتیبانی نسبتاً کارآمدتری نسبت به بخش پرواز دارند. علاوه بر این، در طول دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۰، سطح کارایی شرکت‌های مختلف در مراحل مختلف تغییر کمی داشته است. هرچند، کارایی کل نزول آهسته‌ای در طی این دوره نشان می‌دهد. همچنین می‌توان دید که کارایی کل، بیشتر تحت تاثیر کارایی «بخش پرواز» قرار دارد که کارایی این بخش نیز به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر حاکمیت، سن و گستره شبکه می‌باشد.

## منابع

- Babikian, R., Lukachko, S.P., Waitz, I.A., 2002. The historical fuel efficiency characteristics of regional aircraft from technological, operational, and cost perspectives. *J. Air Transp. Manag.* 8 (6), 389-400.
- Barros, C.P., Couto, E., 2013. Productivity analysis of European airlines, 2000e2011. *J. Air Transp. Manag.* 31, 11e13.
- Barros, C.P., Liang, Q.B., Peypoch, N., 2013. The technical efficiency of US airlines. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 50, 139e148.
- Barros, C.P., Peypoch, N., 2009. An evaluation of European airlines' operational performance. *Int. J. Prod. Econ.* 122, 525e533.
- Bureau of Transportation Statistics, 2022. *BTS statistical standards manual October 2022*. Research and Innovative Technology Administration, Washington D.C.
- Bureau of Transportation Statistics, 2022b. *T-100 Market Data*. Research and Innovative Technology Administration, Washington DC.
- Charnes, A., Cooper, W.W., Rhodes, E., 1978. Measuring the efficiency of decision-making units. *Eur. J. Oper. Res.* 2, 429e444.
- Chen, Z., Wanke, P., Antunes, J., Junio M., Zhang, N., 2017. Chinese Airline Efficiency under CO2 Emissions and Flight Delays: A Stochastic Network DEA Model, *Energy Economics*.
- Choi, K., Lee, D., Olson, D.L., 2013. Service quality and productivity in the US airline industry: a service quality-adjusted DEA model. *Serv. Bus.* 1e24.
- Cui, Q., Li, Y., 2015. An empirical study on the influencing factors of transportation carbon efficiency: evidences from fifteen countries. *Appl. Energy* 141, 209-217.
- Cui, Q., Kuang, H.B., Wu, C.Y., Li, Y., 2014. The changing trend and influencing factors of energy efficiency: the case of nine countries. *Energy* 64, 1026-1034.
- Cui, Q., & Li, Y. (2016). Airline energy efficiency measures considering carbon abatement: A new strategic framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 49, 246-258.
- Forsyth, P.J., Hill, R., Trengove, C., 1986. Measuring airline efficiency. *Fisc. Stud.* 7, 61-81.
- Kao, C., & Hwang, S. (2008). Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan. *European Journal of Operational Research*, 185(1), 418-429.
- Li, Y., Wang, Y., & Cui, Q. 2015. Evaluating airline efficiency: An application of virtual frontier network SBM. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 81, 1-17.
- Li, Y., Huang, Z.C., & Cui, Q. 2022. Exploring the environmental efficiency of airlines through a parallel RAM approach. *Energy Efficiency*, 81, 15-45.
- Mallikarjun, S., Lewis, H.F., Sexton, T.R., (2014). Operational performance of US public rail transit and implications for public policy. *Socio-Econ. Plan. Sci.* 48, 74-88.
- Mallikarjun, S. (2015). Efficiency of U.S. airlines: A strategic operating model. *Journal of Air Transport Management*, 43, 46-56.
- Mandal, S.K., 2010. Do undesirable output and environmental regulation matter in energy efficiency analysis? Evidence from Indian cement industry. *Energy Policy* 38 (10), 6076-6083

- Merkert, R., Hensher, D.A., 2011. The impact of strategic management and fleet planning on airline efficiency random effects Tobit model based on DEA efficiency scores. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 45, 686e695.
- Morrell, P., 2009. The potential for European aviation CO2 emissions reduction through the use of larger jet aircraft. *J. Air Transp. Manag.* 15, 151-157
- Miyoshi, C., Merkert, R., 2010. Changes in carbon efficiency, unit cost of firms over time and the impacts of the fuel priced an empirical analysis of major European airlines. In: *Proceedings of the 14th Air Transport Research Society (ATRS) World Conference, Porto, Portugal*
- Patterson, M.G., 1996. What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy* 24 (5), 377-390.
- Saini, Arun Paul, "Evaluation of Airline Efficiency and Environmental Impacts Using Data Envelopment Analysis" (2018). *Dissertations and Theses.* 417.
- Sengupta, J. K. (1999). A dynamic efficiency model using data envelopment analysis. *International Journal of Production Economics*, 62(3), 209-218
- Sengupta, J.K., 1999. A dynamic efficiency model using data envelopment analysis. *Int. J. Prod. Econ.* 62, 209e218.
- Tao, F., Li, L., Xia, X.H., 2012. Industry efficiency and total factor productivity growth under resources and environmental constraint in China. *Sci. World J.*
- Zhou, P., Ang, B.W., 2008. Linear programming models for measuring economywide energy efficiency performance. *Energy Policy* 38, 2911-2916
- Zou, B., Elke, M., Hansen, M., Kafle, N., 2014. Evaluating air carrier fuel efficiency in the US airline industry. *Transp. Res. A* 59, 306-330