



The effect of air transport on pollution emissions in the context of the environmental Kuznets hypothesis (evidence from BRICS countries)

Maryam Asadpourkordi 

Corresponding Author, Department of Economics of Natural Resources and Environment, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: m.asadpourkordi@sanru.ac.ir

Article Info	ABSTRACT	
Article type: Research Article	The transportation industry is one of the most influential sectors in the economy of any country, and its role in the spread of pollution is no secret to anyone. Meanwhile, aviation is the second largest producer of greenhouse gas emissions, responsible for approximately 2 to 4 percent of total human emissions. Carbon emissions from the aviation sector are more dangerous than other transportation activities, because they both distort the composition of the atmosphere at high altitudes and intensify the concentration of greenhouse gases in the surface environment. Therefore, considering this important issue, the present study examines the effect of aviation, along with energy consumption, economic growth, and urban population, on CO2 emissions, in the framework of the Kuznets environmental hypothesis. To achieve this goal, data from BRICS member countries from 1990 to 2022 were used and the Dynamic Ordinary Least Squares (DOLS) method was used for estimation. The results of this study showed that the environmental Kuznets hypothesis was confirmed among BRICS member countries during the period under study. The results of this study also showed that air transport and energy consumption have a positive effect and urbanization has a negative effect on CO2 emissions. According to the results, it is suggested that clean and environmentally friendly energy sources be used in the transportation sector.	
Article history: Received 06 April 2025 Received in revised form 27 May 2025 Accepted 26 June 2025 Published online 20 June 2025		
Keywords: <i>CO2 emissions,</i> <i>Economic growth,</i> <i>Environment,</i> <i>Urbanization.</i>		
Cite this article: Asadpourkordi, M. (2025). The effect of air transport on pollution emissions in the context of the environmental Kuznets hypothesis (evidence from BRICS countries). <i>Journal of Natural Environment</i> , 78 (1), 31-40. DOI: http://doi.org/10.22059/jne.2025.392165.2787		
 © The Author(s). Publisher: University of Tehran Press. DOI: http://doi.org/10.22059/jne.2025.392165.2787		

اثر حمل و نقل هوایی بر انتشار آلودگی در قالب فرضیه محیط زیستی کوزنتس (شواهدی از کشورهای عضو بریکس)

مریم اسدپور کردی ✉

نویسنده مسئول، گروه اقتصاد منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران. رایانامه: m.asadpourkordi@sanru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	صنعت حمل و نقل یکی از بخش های تأثیرگذار در اقتصاد هر کشوری بوده و از طرفی نقش آن در انتشار آلودگی برکسی پوشیده نیست. در این بین، حمل و نقل هوایی دومین تولیدکننده بزرگ در انتشار گازهای گلخانه ای در این بخش بوده و تقریباً مسئول ۲ تا ۴ درصد از کل انتشارات انسانی است، انتشار کربن از بخش حمل و نقل هوایی خطرناک تر از سایر فعالیت های حمل و نقل است، زیرا هم ترکیب جو در ارتفاعات بالا را مخدوش می کند و هم غلظت گازهای گلخانه ای را در محیط سطح تشدید می کند بنابراین با توجه به این مهم، تحقیق حاضر به بررسی اثر حمل و نقل هوایی به همراه مصرف انرژی، رشد اقتصادی و جمعیت شهرنشینی بر انتشار گاز CO ₂ و در قالب فرضیه محیط زیستی کوزنتس می پردازد. برای رسیدن به این هدف اطلاعات کشورهای عضو بریکس طی سال های ۱۹۹۰ الی ۲۰۲۲ جمع آوری شده و از روش حداقل مربعات معمولی پویا (DOLS) برای برآورد استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که فرضیه محیط زیستی کوزنتس در طول دوره مورد بررسی، بین کشورهای عضو بریکس تأیید شده است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که حمل و نقل هوایی و مصرف انرژی اثر مثبت و شهرنشینی اثر منفی بر انتشار CO ₂ دارد. با توجه به نتایج، پیشنهاد می شود که از منابع انرژی پاک و سازگار با محیط زیست در بخش حمل و نقل استفاده گردد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۳۰	
کلیدواژه ها:	
انتشار CO ₂	
شهرنشینی	
رشد اقتصادی	
محیط زیست	

استناد: اسدپور کردی، مریم (۱۴۰۴). اثر حمل و نقل هوایی بر انتشار آلودگی در قالب فرضیه محیط زیستی کوزنتس (شواهدی از کشورهای عضو بریکس). محیط

زیست طبیعی، ۷۸ (۱)، ۳۱-۴۰.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.392165.2787>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

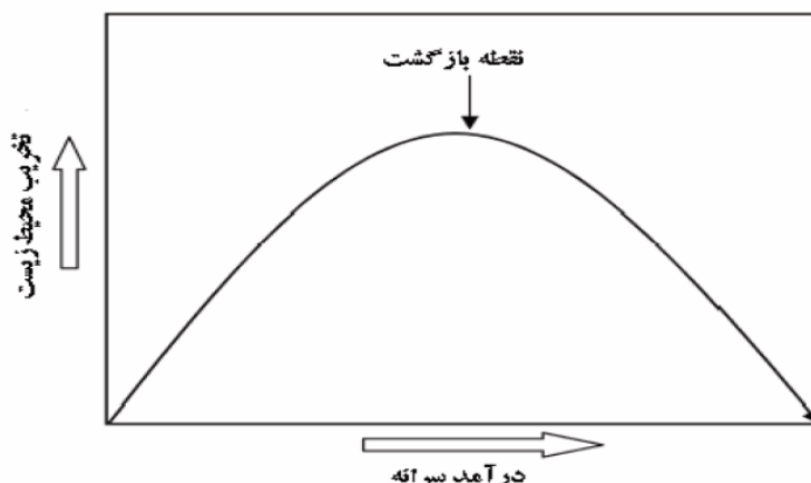
مقدمه

رابطه بسیار نزدیکی بین اقتصاد و مشکلات محیط‌زیستی وجود دارد که اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کند. افزایش سریع فعالیت‌های اقتصادی در عین حال که باعث ایجاد مشکلات محیط‌زیستی می‌شود، بر توسعه اقتصادی و ساختار اقتصادی نیز تأثیر منفی می‌گذارد. توسعه اقتصادی باعث افزایش آلودگی محیط‌زیست می‌شود و آلودگی محیط‌زیست هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی توسعه اقتصادی را افزایش می‌دهد. دلیل اصلی این است که اقتصاد و محیط‌زیست به هم مرتبط هستند و نمی‌توان مشکلات محیط‌زیستی را حذف کرد. در این زمینه استفاده مؤثر از منابع محیط‌زیستی از نظر توسعه اقتصادی پایدار از اهمیت بالایی برخوردار است (Dursun, 2022). علاوه بر این، تخریب محیط‌زیست در سراسر جهان و کاهش کیفیت محیط‌زیستی و رسیدن به سطوحی که نسل‌های آینده را تهدید می‌کند، اخیراً علاقه به محیط‌زیست را افزایش داده است. محیط‌زیست با اقتصاد و همچنین با بسیاری از زمینه‌های دیگر در تعامل است. رشد اقتصادی به دلیل آلودگی هوا و تخریب محیط‌زیست به طبیعت آسیب می‌رساند. به همین دلیل تخریب محیط‌زیست هزینه توسعه اقتصادی را افزایش می‌دهد (Erdogan et al., 2020).

اما یکی از بخش‌های تأثیرگذار در اقتصاد هر کشوری، حمل‌ونقل است. حمل‌ونقل از طریق زمین، دریا و هوا به انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسید کربن کمک می‌کند. گروه اقدام حمل‌ونقل هوایی^۱ (ATAG) گزارش داده است که فعالیت‌های حمل‌ونقل، مسئول ۱۴ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در این بین عامل اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های حمل‌ونقل؛ به حمل‌ونقل جاده‌ای نسبت داده می‌شود و حمل‌ونقل هوایی دومین تولیدکننده بزرگ در انتشار گازهای گلخانه‌ای در این بخش است و تقریباً مسئول ۲ تا ۴ درصد از کل انتشارات انسانی است (Air Transport Action Group, 2019). با این حال، انتشار کربن از صنعت خطوط هوایی خطرناک‌تر از سایر فعالیت‌های حمل‌ونقل است، زیرا هم ترکیب جو در ارتفاعات بالا را مخدوش می‌کند و هم غلظت گازهای گلخانه‌ای را در محیط سطح تشدید می‌کند. اگرچه ارتفاع پرواز هواپیماهای تجاری عموماً در حدود ۱۰ تا ۱۲ کیلومتر است، اما اثرات محیط‌زیستی آنها ممکن است در سطوح مختلفی از جو، از جمله در حدود ۶ کیلومتری نیز مشاهده شود (Balkanski et al., 2010). شاید بتوان گفت که صنعت هواپیمایی هم غلظت انتشار گازهای گلخانه‌ای را در سطح و هم در جو افزایش می‌دهد که به نوبه خود باعث افزایش آلودگی محیط‌زیست می‌شود. علاوه بر این، صنعت حمل‌ونقل یکی از بخش‌های استراتژیک بود که در پروتکل کیوتو در سال ۱۹۹۷ مورد تأکید قرار گرفت و نیاز به توجه داشت. هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سراسر جهان تا سال ۲۰۱۲ به میزان ۵/۲ درصد از سطح سال ۱۹۹۰ بود (Chapman, 2007). اگرچه انتشار گازهای گلخانه‌ای از حمل‌ونقل خطرات محیط‌زیستی بزرگی به همراه دارد اما بخش حمل‌ونقل نقش مهمی در توسعه اقتصادی است. از این رو، نیاز به مقررات و سیاست‌های سخت‌گیرانه‌تر در مورد حفاظت از محیط‌زیست برای کنترل رابطه انتقال و انتشار دی‌اکسید کربن وجود دارد (Ouyang et al., 2019).

یکی از فرضیه‌های مهم در ادبیات اقتصاد محیط‌زیستی، فرضیه محیط‌زیستی کوزنتس است. این فرضیه یک ابزار مفهومی مفید برای مقابله با مسائل محیط‌زیستی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای است (Sarkodie and Strezov, 2019) و نشان می‌دهد که فشار محیطی تا سطح معینی از رشد درآمد افزایش می‌یابد و پس از آن کاهش می‌یابد. در مطالعات متعددی فرضیه محیط‌زیستی کوزنتس (EKC) یعنی یک رابطه U شکل معکوس بین انتشار دی‌اکسید کربن و درآمد سرانه تأیید شده است (Sugiawan and Managi, 2016; Al-mulali et al., 2015; Zaman et al., 2016). محدود کردن مسائل محیط‌زیستی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر به افزایش سطح درآمد به نقطه‌ای می‌شود که فشار محیط‌زیستی شروع به کاهش می‌کند. براساس فرضیه EKC (شکل ۱)، آلودگی محیط‌زیست در ابتدا با توسعه اقتصادی افزایش می‌یابد، اما پس از رسیدن درآمد به یک سطح معین، آلودگی محیط‌زیست شروع به کاهش می‌کند (Amirnejzd and Asadpourkordi, 2014; Erdogan et al., 2020).

¹Air Transport Action Group



شکل ۱- فرضیه محیط‌زیستی کوزنتس

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر انتشار آلودگی مصرف انرژی است. مصرف انرژی منجر به افزایش انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود این در حالی است که سیستم حمل‌ونقل به‌شدت از انرژی استفاده می‌کند و همان‌طور که پیش‌تر بیان شد حمل‌ونقل هوایی بیشتر از حمل‌ونقل جاده‌ای در انتشار گازهای گلخانه‌ای نقش دارد در نتیجه حمل‌ونقل هوایی مستقیماً بر محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد (Erdogan et al., 2020).

تحقیقات زیادی در ادبیات دانشگاهی وجود دارد که رابطه بین رشد اقتصادی و انتشار کربن را بررسی می‌کند (Beşe and Kalayci, 2021; Kalayci and Özden, 2021; Ozturk et al., 2021; Sheikhzeinoddin et al., 2022; Yazici, 2022; Farooq et al., 2022) که این مطالعات به بررسی رشد اقتصادی و انتشار آلودگی در قالب منحنی کوزنتس محیط‌زیستی (EKC) پرداختند. در خصوص ارتباط حمل‌ونقل هوایی و انتشار آلودگی مطالعات کمی وجود دارد که به‌عنوان نمونه می‌توان به مطالعات Erdogan و همکاران (۲۰۲۰) اشاره کرد که به بررسی اثر حمل‌ونقل هوایی و ریلی بر انتشار CO₂ طی سال‌های ۱۹۹۵ الی ۲۰۱۴ پرداختند. نتایج آنها نشان داد که ارتباط مثبت و معنی‌داری بین انتشار CO₂ و حمل‌ونقل هوایی وجود دارد و بین حمل‌ونقل ریلی و شهرنشینی ارتباط منفی با انتشار CO₂ داشته است. همچنین در مطالعه دیگری Dursun (۲۰۲۲) به بررسی اثر حمل‌ونقل هوایی بر انتشار CO₂ در کشورهای نفتا^۲ (NFTA) طی سال‌های ۱۹۷۰ الی ۲۰۲۰ پرداختند. نتایج این مطالعه نیز نشان داد که ارتباط مثبت و معنی‌داری میان حمل‌ونقل هوایی و انتشار CO₂ وجود دارد. Brida و همکاران (۲۰۱۶) ارتباط بلندمدت بین رشد اقتصادی و حمل‌ونقل هوایی مکزیکی را از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۳ مورد بررسی قرار دادند. با توجه به یافته‌های آنها، ارتباط بلندمدت بین تولید ناخالص داخلی و حمل‌ونقل هوایی وجود دارد که به‌صورت تجربی ثابت شده است. علاوه بر این، آزمون علیت وجود یک پیوند متقابل بین رشد اقتصادی و حمل‌ونقل هوایی را نشان می‌دهد. Low و همکاران (۲۰۲۲) نشان می‌دهد که در تحقیقات آنها که به کمک روش ADRL بوده است ارتباط معنی‌دار مثبتی بین رشد اقتصادی و حمل‌ونقل هوایی در میانمار، لائوس، کامبوج و ویتنام، در بلندمدت وجود دارد. Hazeri و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای با عنوان تأثیر بخش حمل‌ونقل در رابطه مبادلات انرژی و انتشار CO₂ به بررسی اثر حمل‌ونقل بر انتشار CO₂ بر دو گروه از کشورهای درحال توسعه و توسعه‌یافته پرداختند. نتایج آنها نشان داد که ارتباط مثبت و معنی‌داری میان حمل‌ونقل و انتشار CO₂ در هر دو گروه از کشورها وجود دارد. Klantarzadeh و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای به بررسی رابطه میان حمل‌ونقل، رشد اقتصادی و محیط‌زیست در کشورهای منتخب منا پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که رشد اقتصادی و حمل‌ونقل اثر مثبت معنی‌دار بر انتشار آلودگی دارد.

با توجه به بررسی‌های انجام شده مطالعات کمی تأثیر صنعت خطوط هوایی بر آلودگی محیط‌زیست را در چارچوب فرضیه EKC بررسی کرده‌اند بنابراین هدف اصلی این مطالعه بررسی نقش حمل‌ونقل خطوط هوایی بر آلودگی محیط‌زیست در بین

²North American Free Trade Agreement

کشورهای بریکس می باشد. در این مطالعه، گروه «بریکس» به ترکیب کشورهای در حال توسعه اطلاق شده است که شامل اعضای اولیه بریکس یعنی برزیل، روسیه، هند، چین، و آفریقای جنوبی و همچنین کشورهای جدیدی مانند اتیوپی، مصر، ایران و امارات متحده عربی می شود. انتخاب کشورهای عضو بریکس به عنوان نمونه مطالعه به چند دلیل اساسی صورت گرفته است. نخست اینکه، این کشورها شامل اقتصادهای نوظهوری هستند که رشد اقتصادی سریع آنها با افزایش مصرف انرژی و گسترش صنایع مختلف، از جمله حمل و نقل هوایی، همراه بوده است. دوم، کشورهای عضو بریکس به دلیل جمعیت بالا و سطح فزاینده فعالیت های اقتصادی، سهم قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه ای دارند و بررسی تأثیر صنعت هوایی در این کشورها می تواند تصویری جامع از رابطه بین رشد اقتصادی، توسعه حمل و نقل هوایی و آلودگی محیط زیستی ارائه دهد. سوم، این کشورها در تلاش برای گذار به سمت فناوری های پایدار و سیاست های محیط زیستی مؤثر هستند و یافته های این مطالعه می تواند به تدوین استراتژی های کاهش آلودگی و توسعه حمل و نقل هوایی پایدار در این کشورها کمک کند. بنابراین یافته های این مطالعه ممکن است برای تضمین پایداری محیط زیستی فناوری های حمل و نقل دوستدار محیط زیست کلیدی باشد.

روش شناسی پژوهش

این مطالعه به بررسی ارتباط بین مصرف انرژی، انتشار CO₂، رشد اقتصادی، حمل و نقل هوایی و شهرنشینی را در قالب فرضیه محیط زیستی کوزنتس و با استفاده از مدل حداقل مربعات معمولی پویا^۳ از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۲ برای کشورهای عضو بریکس که شامل کشورهای آفریقای جنوبی، هند، چین، برزیل، روسیه، اتیوپی، مصر، ایران و امارات متحده عربی می پردازد. و برای برآورد اثرات متغیرها از روش حداقل مربعات معمولی پویا (DOLS) استفاده شده است.

با توجه به ماهیت بلندمدت مطالعه و هدف آن در بررسی رابطه بین متغیرهای اقتصادی و محیط زیستی، از روش حداقل مربعات معمولی پویا (DOLS) استفاده شد. دلیل انتخاب این روش آن است که DOLS یکی از رویکردهای معتبر برای برآورد مدل داده های تلفیقی پویا می باشد که برای تخمین رابطه بلندمدت که توسط Stock و Watson (۱۹۹۳) مطرح شده است، استفاده می شود. در این روش با اعمال تعدیلاتی در روش حداقل مربعات معمولی، واکنش یک متغیر وابسته نسبت به تغییرات متغیرهای مستقل را مورد بررسی قرار می دهد (Alizadeh and Golkhandan, 2014). علاوه بر این، در مطالعات مشابه در حوزه محیط زیست که به بررسی اثر انرژی، رشد اقتصادی و حمل و نقل بر انتشار CO₂ پرداخته اند، روش DOLS به عنوان یکی از بهترین رویکردهای تخمین بلندمدت مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین انتخاب این روش بر مبنای آزمون های هم جمعی، ساختار داده ها و هدف پژوهش صورت گرفته است. از مهمترین مزیت های این روش در مقایسه با دیگر تخمین زنده های بردار هم انباشتگی این است که در نمونه های کوچک نیز کاربرد داشته و از ایجاد تورش همزمان جلوگیری می کند و از توزیع مجانبی نرمال برخوردار است (Fotros et al., 2012). همچنین، لازم به یادآوری است که کائو نشان می دهد که این روش برآورد، از کارایی بیشتری برخوردار است و امکان استنباط های آماری معتبر را فراهم می سازد (Kao, 2000).

در این روش برای برآورد ضرایب بلندمدت به صورت رابطه ۱ عمل می شود:

$$Y_{it} = \alpha_i + \beta X_{it} + \sum_{j=1}^q \gamma_j \Delta X_{i,t-j} + \sum_{j=1}^q \delta_j \Delta X_{i,t+j} + u_{it} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در این رابطه q: روندهای گذشته و آینده (تقدم یا تأخر، Lag and Lead)، $\Delta X_{i,t-j}$: تفاضل متغیر توضیحی با وقفه، $\Delta X_{i,t+j}$: تفاضل متغیر توضیحی با روندهای آینده، γ_j : ضرایب وقفه ها یا روندهای گذشته، δ_j : ضرایب روندهای آینده، u_{it} : خطای برآورد رابطه بلندمدت پویا و Y_{it} : متغیر وابسته است (Feghehmajidi and Ebrahimi, 2014; Asadpourkordi et al., 2016). معادله رگرسیونی مورد نظر در این مطالعه به صورت رابطه ۲ ارائه شده است (Erdogan et al., 2020).

رابطه ۲

$$LCO2_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 LGDP_{it} + \alpha_2 LGDP_{it}^* + \alpha_3 LE_{it} + \alpha_4 LAIR_RTANS_{it} + \alpha_5 LU_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

³Dynamic Ordinary Least Squares (DOLS)

که در این رابطه، $LCO2_{it}$: لگاریتم طبیعی انتشار سرانه دی اکسید کربن (متریک تن)^۴، $LGDP_{it}$: لگاریتم طبیعی تولید ناخالص داخلی سرانه به عنوان شاخصی برای نشان دادن رشد اقتصادی^۵، $LGDP^2_{it}$: توان دوم تولید ناخالص داخلی سرانه، LE_{it} : لگاریتم طبیعی مصرف انرژی سرانه^۶، $LAIR_TRANS_{it}$: لگاریتم طبیعی حمل و نقل هوایی بر حسب میلیون تن-کیلومتر^۷ و LU_{it} : لگاریتم طبیعی جمعیت شهر نشینی (درصدی از جمعیت)^۸، اندیس i کشور و اندیس t دوره زمانی را نشان می دهد. داده های این مطالعه شامل تولید ناخالص داخلی سرانه، جمعیت شهری و حمل و نقل هوایی از سایت بانک جهانی (WB) و داده مربوط به مصرف انرژی از آژانس بین المللی انرژی (IEA) تهیه شده است.

یافته های پژوهش

برای آشنایی با متغیرهای مورد استفاده در مطالعه ویژگی های آماری متغیرهای مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار متغیرها خلاصه شده است. با توجه به نتایج، بیشترین سرانه انتشار گاز مربوط به کشور امارات در سال ۱۹۹۵ و کمترین مربوط به کشور اتیوپی بوده که در سال ۱۹۹۲ می باشد. همچنین بیشترین CO_2 و کمترین تولید ناخالص داخلی سرانه مربوط به کشور امارات در سال ۲۰۲۲ و کشور اتیوپی در سال ۲۰۰۲ بوده است. بیشترین حمل و نقل هوایی مربوط به کشور چین در سال ۲۰۱۹ و کمترین مربوط به کشور آفریقای جنوبی در سال ۲۰۲۱ بوده است. کمترین جمعیت شهری مربوط به کشور اتیوپی در سال ۱۹۹۰ و بیشترین جمعیت شهری مربوط به کشور برزیل در سال ۲۰۲۲ می باشد. همچنین بیشترین و کمترین سرانه مصرف انرژی مربوط به کشور امارات در سال ۱۹۹۱ و کشور اتیوپی در سال ۱۹۹۷ بوده است.

جدول ۱- ویژگی های آماری متغیرهای مورد استفاده در مطالعه

نام متغیر	واحد اندازه گیری	میانگین	ضریب تغییرات	بیشینه	کمینه
CO_2	متریک تن	۶/۶۰	۱/۱۳	۳۰/۸۸	۰/۰۲۹
GDP	دلار - هر نفر	۷۴۳۲/۴۲	۱/۵	۵۳۷۵۷/۸۶	۱۱۰/۴۶
E	کیلووات ساعت - هر نفر	۳۴۳۹۸/۷۷	۱/۳۶	۲۰۵۳۹/۷	۱۹۱/۷۷
Air_trans	میلیون تن - کیلومتر	۲۷۷۶/۰۱	۱/۷۸	۲۵۳۹۴/۵۹	۱۵/۱۳
U	درصدی از جمعیت	۵۲/۲۰	۰/۴۶	۸۷/۵۵	۱۲/۶۲

مأخذ: یافته های تحقیق

پیش از بررسی روابط بین متغیرها بایستی ایستایی سری های مورد بررسی را به کمک آزمون های ریشه واحد بررسی نمود. به دلیل اینکه امکان ساختگی بودن برآورد با متغیرهای نایستا وجود دارد و استناد به نتایج چنین برآوردهایی به نتایج گمراه کننده ای منجر خواهد شد بنابراین بررسی ایستایی قبل از برآورد باید انجام گردد. از این رو، در این مطالعه از دو آزمون پرکاربرد ریشه واحد در الگوهای پانلی شامل آزمون لوین، لین و چو^۹ و آزمون ایم، پسران و شین^{۱۰} استفاده شده است. خلاصه نتایج این دو آزمون در سطح و تفاضل مرتبه اول در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۲ که نشان دهنده دو آزمون لوین-لین-چو و ایم-پسران-شین برای ایستایی متغیرهای مدل در سطح و تفاضل مرتبه اول است؛ نشان می دهد که، تمامی متغیرهای مدل در سطح یک درصد نایستا بوده و تفاضل مرتبه اول آن در سطح یک درصد ایستا بوده است.

تخمین مدل در حالت نایستا بودن متغیرها منجر به ایجاد رگرسیون کاذب در مدل می شود که برای جلوگیری از اتکا به رگرسیون کاذب روش های تفاضل گیری و آزمون هم انباشتگی وجود دارد. اما هنگام استفاده از تفاضل متغیرها در برآورد ضرایب

^۴CO2 emissions (metric tons per capita)

^۵GDP per capita,.

^۶Energy consumption per capita (kWh/person)

^۷Freight (million ton-km)

^۸Urban population (% of total)

^۹Levin, Lin. and Chu

^{۱۰}Im, Pesaran and Shin

الگو اطلاعات ارزشمندی در رابطه با سطح متغیرها از دست می‌رود به همین دلیل استفاده از این روش برای جلوگیری از ایجاد رگرسیون کاذب مناسب نمی‌باشد که می‌توان برای رفع این مشکل از آزمون‌های هم‌انباشتگی استفاده کرد. مفهوم هم‌انباشتگی تداعی‌کننده یک رابطه تعادلی بلندمدت است که سیستم اقتصادی در طول زمان به سمت آن حرکت می‌کند. بنابراین اگر با وجود متغیرهای نایستا در مدل، بین آنها هم‌انباشتگی برقرار باشد، نتایج حاصل از تخمین مدل قابل اعتماد خواهد بود. آزمون‌های هم‌انباشتگی در داده‌های پانلی دارای قدرت و اعتبار بیشتری نسبت به آزمون‌های هم‌انباشتگی برای هر مقطع به صورت جداگانه است و حتی این آزمون‌ها قابلیت استفاده در شرایطی که دوره زمانی کوتاه و حجم نمونه نیز کوتاه باشد، نیز دارد. در این مطالعه برای بررسی آزمون هم‌انباشتگی در مدل از روش ارائه شده توسط کائو^{۱۱} استفاده شده است. فرضیه صفر در این آزمون، عدم وجود هم‌انباشتگی یا رابطه بلندمدت است. نتایج آماره t در آزمون کائو در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج آزمون ریشه واحد متغیرها در سطح و تفاضل مرتبه اول

متغیر	در سطح		تفاضل مرتبه اول	
	آزمون لوین-لین-چو	آزمون ایم-پسران-شین	آزمون لوین-لین-چو	آزمون ایم-پسران-شین
	آماره t	احتمال	آماره t	احتمال
LCO2	-۲/۶۵	۰/۰۹	-۴/۰۷	۰/۱۰
LGDP	۱/۰۳	۰/۱۵	-۰/۹۸	۰/۱۶
LE	-۴/۲۳	۰/۲۰	-۴/۵۶	۰/۱۰
LU	۱/۷۷	۰/۰۹	-۱/۱۶	۰/۱۲
LAIR_TRANS	-۴/۵۳	۰/۰۹	-۷/۱۷	۰/۱۵

مأخذ: یافته‌های تحقیق (***) معنی‌داری در سطح ۱ درصد می‌باشد

جدول ۳- نتایج آزمون کائو برای انتشار CO₂

نام متغیر	آماره	آماره t	احتمال
CO2	ADF	-۷/۷۴***	۰/۰۰

مأخذ: یافته‌های تحقیق (***) معنی‌داری در سطح ۱ درصد می‌باشد

با توجه به نتایج آزمون کائو (جدول ۳) مقدار آماره ADF برای انتشار آلودگی در سطح اطمینان یک درصد کاملاً معنی‌دار می‌باشد. بنابراین، با توجه به نتایج آزمون کائو وجود رابطه بلندمدت میان انتشار CO₂ و سایر متغیرهای مدل مورد تأیید قرار گرفته است. به بیان دیگر، فرضیه صفر مبنی بر عدم وجود هم‌انباشتگی یا رابطه بلندمدت رد شده است. پس از اثبات وجود هم‌انباشتگی در مدل با استفاده از آزمون هم‌انباشتگی کائو به تخمین رابطه به روش DOLS پرداخته می‌شود که در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- نتایج به دست آمده از برآورد مدل به روش حداقل مربعات معمولی پویا (DOLS) برای انتشار CO₂

متغیر	مقدار ضریب	خطای استاندارد	آماره t	احتمال
LGDP _{it}	۰/۳۰**	۰/۱۲	۲/۵۲	۰/۰۱
LGDP2 _{it}	-۰/۰۱**	۰/۰۰۷	-۲/۵۴	۰/۰۱
LE _{it}	۱/۲۳***	۰/۰۳	۳۹/۶۶	۰/۰۰
LAir_trans _{it}	۰/۰۲***	۰/۰۰۵	۴/۱۲	۰/۰۰
LU _{it}	-۰/۴۰***	۰/۰۳	-۱۱/۴۳	۰/۰۰
$\bar{R}^2 = ۰/۹۶ \quad R^2 = ۰/۹۹$				

مأخذ: یافته‌های تحقیق (***) و ** معنی‌داری در سطح ۱ و ۵ درصد می‌باشد

با توجه به نتایج جدول ۴، تمامی متغیرهای مدل در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار بوده‌اند. با توجه به علامت توان اول و دوم متغیر تولید ناخالص داخلی سرانه، بین انتشار گاز CO₂ (شاخص آلودگی) و تولید ناخالص داخلی سرانه (شاخص رشد اقتصادی) رابطه U برعکس برقرار است به عبارتی با توجه به این نتیجه می‌توان فرضیه محیط زیستی کوزنتس را تأیید کرد. همچنین با توجه

^۱Kao

به نتایج، مصرف انرژی و حمل و نقل هوایی رابطه مثبت و شهرنشینی رابطه منفی با انتشار آلودگی دارند. با توجه به اینکه متغیرها با لگاریتم طبیعی وارد مدل شده اند ضرایب متغیرها همان کشش خواهند بود بنابراین می توان این گونه ضرایب را تفسیر نمود که یک درصد افزایش در مصرف انرژی و حمل و نقل هوایی، ۱/۲۳ و ۰/۰۲ درصد بر انتشار آلودگی می افزاید. همچنین با توجه به علامت منفی متغیر شهرنشینی، یک درصد افزایش در شهرنشینی باعث کاهش ۰/۴۰ درصدی انتشار آلودگی می شود. اما با توجه به اینکه متغیر تولید ناخالص داخلی به صورت غیرخطی وارد مدل شده است با استفاده از رابطه زیر می توان کشش این متغیر را محاسبه نمود:

$$\hat{\eta}_{ij} = \frac{\partial \ln Y}{\partial \ln X} = \hat{\beta}_1 + 2\hat{\beta}_2 \ln X$$

در رابطه فوق، $\hat{\eta}_{ij}$: کشش تولید ناخالص داخلی، Y : متغیر وابسته (انتشار آلودگی)، X : متغیر مستقل (تولید ناخالص داخلی)، $\hat{\beta}_1$: مقدار ضریب $\ln X$ و $\hat{\beta}_2$: مقدار ضریب $\ln X^2$ می باشد. با توجه به رابطه فوق کشش متغیر تولید ناخالص داخلی ۰/۱۲ محاسبه شده است که نشان می دهد با افزایش یک درصدی در تولید ناخالص داخلی، ۰/۱۲ درصد بر میزان انتشار آلودگی افزوده می شود. همچنین با توجه به نتایج کشش های متغیرهای مورد استفاده بیشترین کشش مربوط به متغیر مصرف انرژی بوده که نشان دهنده اهمیت این متغیر در میزان انتشار آلودگی دارد.

بحث، نتیجه گیری و پیشنهادها

با ورود ماشین آلات به زندگی بشر، انجام کارها بسیار آسان و زندگی سرعت بیشتری گرفته است اما این ماشین آلات برای کار کردن نیاز به سوزاندن سوخت های فسیلی دارند و با سوختن انرژی، گازهای گلخانه ای تولید شده و وارد محیط می شود. از طرفی افزایش بیش از حد استفاده از سیستم های مختلف حمل و نقل باعث برهم خوردن نظم طبیعت می شود یعنی دیگر قدرت خود پالایندگی طبیعت برای از بین بردن آلودگی ها کافی نخواهد بود و این امر منجر به پایین آمدن کیفیت آب و خاک، آلودگی صوتی و تغییرات آب و هوا می شود. با توجه به این مهم تحقیق حاضر به بررسی اثر حمل و نقل هوایی، مصرف انرژی، شهرنشینی و تولید ناخالص داخلی بر انتشار گاز CO₂ در قالب فرضیه محیط زیستی کوزنتس می پردازد. نتایج حاصل از برآورد مدل DOLS نشان داد که فرضیه محیط زیستی کوزنتس در طول دوره ۱۹۹۰ الی ۲۰۲۲ در بین کشورهای عضو بریکس تأیید شده است. همچنین نتایج نشان داد که مصرف انرژی باعث افزایش انتشار آلودگی می شود که این نتیجه در تحقیقات مختلف (Jebli et al., 2016; Destek et al., 2018; Sarkodie and Strezov, 2019; Erdogan et al., 2020; Dursun, 2022) تأیید شده است. همچنین در این تحقیق اثر حمل و نقل هوایی بر انتشار CO₂ مثبت بوده که این نتیجه نیز در مطالعات Sarkodie و همکاران (۲۰۲۰) و Erdogan و همکاران (۲۰۲۰) نیز تأیید شده است. علاوه بر این نتایج تحقیق حاضر نشان داد شهرنشینی از نظر آماری اثر منفی معنی داری بر انتشار CO₂ دارد که ممکن است در نگاه اول غیرمنتظره به نظر برسد. اما نتایج مطالعه حاضر با برخی شواهد تجربی و نظری قابل توضیح است، به ویژه در زمینه کشورهای بریکس که در سال های اخیر با توسعه زیرساخت های شهری، پیشرفت فناوری، و سیاست گذاری های محیط زیستی روبه رو بوده اند.

توسعه حمل و نقل عمومی و زیرساخت های شهری کارآمد: در بسیاری از شهرهای بزرگ کشورهای بریکس (مانند شانگهای، سائوپائولو، بمبئی، ژوهانسبورگ و مسکو)، سرمایه گذاری های قابل توجهی در حوزه حمل و نقل عمومی، بهینه سازی مصرف انرژی در ساختمان ها، و مدیریت پسماند انجام شده است که می تواند شدت انتشار آلاینده ها را کاهش دهد. برای مثال، چین از سال ۲۰۱۰ تاکنون بزرگ ترین ناوگان اتوبوس های الکتریکی جهان را در کلانشهرها مستقر کرده است.

نقش فناوری، آموزش و نوآوری شهری: شهرها مراکز نوآوری و تحقیق و توسعه هستند. براساس گزارش سازمان جهانی شهرهای پایدار (ICLEI, 2019)، بسیاری از نوآوری های مرتبط با انرژی های پاک و بهره وری انرژی در محیط های شهری شکل می گیرند. همچنین گزارش شده است که شهرنشینان مزایای بیشتری برای آموزش عالی دارند که به افزایش آگاهی در مورد مسائل محیط زیستی و تقاضا برای یک محیط پاک کمک می کند (Sarkodie et al., 2020). همچنین افزایش تعداد افراد تحصیل کرده ممکن است سیاستگذاران را به اتخاذ تدابیری برای گسترش فعالیت های پاک تر وادار کند، علاوه بر این، شهرها منبع فعالیت های تحقیق و

توسعه، نوآوری و پیشرفت فناوری هستند. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که تعداد فزاینده‌ای از فعالیت‌های تحقیق و توسعه بر روی فناوری‌های تولید سازگار با محیط‌زیست در شهرها انجام شود که همه این عوامل منجر به تغییرات ساختاری اقتصادی شده و منجر به کاهش انتشار آلودگی می‌شود.

یافته‌های مشابه در مطالعات تجربی: این نتایج در مطالعات Sarkodie و همکاران (۲۰۲۰) و Erdogan و همکاران (۲۰۲۰) نیز مشاهده شده است.

در نهایت با توجه به نتایج این مطالعه، سیاست‌های زیر توصیه می‌شود:

(۱) با توجه به رابطه مثبت و معنی‌دار بین انتشار CO₂، مصرف سوخت فسیلی و رشد اقتصادی که حاکی از توسعه اقتصادی و انتشار آلودگی است لازم است ساختارهای مصرف انرژی، بهینه‌سازی شده و از نقطه‌نظر سیاست، نیاز فوری به تمرکززدایی استفاده از انرژی سوخت فسیلی به منابع انرژی پاک‌تر می‌باشد.

(۲) رابطه مثبت و معنی‌دار حمل‌ونقل هوایی و انتشار CO₂ نشان‌دهنده تخریب محیط‌زیست ناشی از حمل‌ونقل می‌باشد، که توصیه می‌شود کشورها به سمت هواپیماها و حامل‌های سوخت کم کربن حرکت کنند. همچنین نیاز است که مدیران تلاش‌های خود را برای تحقیق و توسعه در خطوط هوایی کم‌مصرف‌تر و سازگار با محیط‌زیست تشدید کنند. البته در این خصوص گسترش استفاده از راه آهن یک گزینه جایگزین برای کاهش اثرات آلاینده صنعت هواپیمایی می‌تواند تا حدودی مفید واقع شود.

References

- Air Transport Action Group, 2019. Fact & Figures. Retrieved from. <https://www.atag.org/facts-figures.html>.
- Alizadeh, M., Golkhandan, A., 2014. International Capital Mobility and the Feldstein-Horyauka Conundrum: A Comparative Comparison of MENA and G7 Countries. Quarterly Journal of Economic Development Research 14, 67-98. (In Persian).
- Amirnejad, H., Asadpourkordi, M., 2014. The group examined the relationship between air pollution, GDP, energy intensity and openness in Iran (Applications of Environmental Kuznets hypothesis). Agriculture Economics 8(3), 117-132. (In Persian)
- Asadpourkordi, M., Amirnejad, H., Mojaverian, S.M., 2016. Effects of long-term and short-term changes in climate variables on cotton yield. Agriculture Economics 10(2), 111-129. (In Persian)
- Balkanski, Y., Myhre, G., Gauss, M., Radel, G., Highwood, E., Shine, K., (2010). Direct radiative effect of aerosols emitted by transport from road, shipping and aviation. Atmospheric Chemistry and Physics 10, 4477-4489.
- Beşe, E., Kalayci, S., 2021. Environmental Kuznets Curve (EKC): Empirical relationship between economic growth, energy consumption, and CO₂ emissions: Evidence from 3 developed countries. Panoeconomicus 68(4), 483-506.
- Brida, J.G., Rodríguez-Collazo, S., Lanzilotta, B., Rodríguez- Brindis, M.A., 2016. Testing linearity in the long-run relationship between economic growth and passenger air transport in Mexico. International Journal of Transport Economics 43, 437-450.
- Chapman, L., 2007. Transport and climate change: a review. Journal of Transport Geography 15(5), 354-367.
- Destek, M.A., Ulucak, R., Dogan, E., 2018. Analyzing the environmental Kuznets curve for the EU countries: the role of ecological footprint.. Environmental Science and Pollution Research 25(29), 29387-29396.
- Dursun, E., 2022. Investigating the Air Transport-Induced EKC Hypothesis: Evidence from NAFTA Countries, International Journal of Energy Economics and Policy 12(4), 494-500.
- Erdogan, S., Adedoyin, F.F., Bekun, F.V., Sarkodie, S.A., 2020. Testing the transport-induced environmental Kuznets curve hypothesis: The role of air and railway transport. Journal of Air Transport Management 89(2020), 101935.
- Farooq, S., Ozturk, I., Majeed, M.T., Akram, R., 2022. Globalization and CO₂ emissions in the presence of EKC: A global panel data analysis. Gondwana Research 106, 367-378.
- Fegheh Majidi, A., Ebrahimi, S., 2014. Applied panel data econometric (using eviews), Noor Alam Publications. First Edition. 175 p. (In Persian)

- Fotros, M.H., Aghazadeh, A., Jabraili, S., 2012. Impact of Economic Growth on the Consumption of Renewable Energy: A Comparative Study of Selected OECD and Non-OECD (Including Iran) Countries. *Quarterly Journal of Economic Research and Policy* 19(60), 81-98. (In Persian)
- Hazeri, H., Hashem dizaj, A., Akhijani, R., 2023, Impacts of Fossil Energy Trade on CO2 Emissions: Examining the Impact Channels of Fossil Energy Trade: Transportation and Gross Domestic Product (GDP) on CO2 Emissions. *Geography and Human Relationships* 6(1), 434-452. (In Persian).
- ICAO. 2022. Environmental Report. International Civil Aviation Organization.
- Jebli, M.B., Youssef, S.B., Ozturk, I., 2016. Testing environmental Kuznets curve hypothesis: the role of renewable and non-renewable energy consumption and trade in OECD countries. *Ecology Journal* 60, 824-831.
- Kalantarzadeh, M., Zandi, F., Khezri, M., Safavi, B., 2021. The Relationship between Transport, Economic Growth, and the Environment in Selected MENA Countries. *Journal of Agricultural Economics Research* 13(2), 173-196. (In Persian)
- Kalayci, S., Yanginlar, G., 2016. The effects of economic growth and foreign direct investment on air transportation: Evidence from Turkey. *International Business Research* 9(3), 154-162.
- Kao, C., Chiang, M.H., 2000. On the estimation and inference of a cointegrated regression in panel data. *Advances Econometrics* 15, 179-222.
- Kommenda, N., 2019. How your flight emits as much CO2 as many people do in a year. *The Guardian*. Retrieved from. <https://www.theguardian.com/environment/ng-interactive/2019/jul/19/carbon-calculator-how-taking-one-flight-emits-as-much-a-s-many-people-do-in-a-year>.
- Law, C.C., Zhang, Y., Gow, J., Vu., X.B., 2022. Dynamic relationship between air transport, economic growth and inbound tourism in Cambodia, Laos, Myanmar and Vietnam. *Journal of Air Transport Management* 98, 102161.
- Ouyang, X., Shao, Q., Zhu, X., He, Q., Xiang, C. Wei, G, 2019. Environmental regulation, economic growth and air pollution: panel threshold analysis for OECD countries. *Science of The Total Environment* 657, 234-241.
- Ouyang, X., Shao, Q., Zhu, X., He, Q., Xiang, C., Wei, G., 2019. Environmental regulation, economic growth and air pollution: panel threshold analysis for OECD countries, *Science of The Total Environment* 657, 234-241.
- Ozkan, T., Yanginlar, G., Kalayci, S., 2019. Testing the transportation-induced environmental Kuznets Curve hypothesis: Evidence from eight developed and developing countries. *International Journal of Energy Economics and Policy* 9(1), 174-183.
- Ozturk, I., Majeed, M.T., Khan, S., 2021. Decoupling and decomposition analysis of environmental impact from economic growth: A comparative analysis of Pakistan, India, and China. *Environmental and Ecological Statistics* 28(4), 793-820.
- Sarkodie, S.A. Strezov, V., 2019. A review on Environmental Kuznets Curve hypothesis using bibliometric and meta-analysis, *Science of The Total Environment* 649, 128-145.
- Sarkodie, S.A., Strezov, V., 2019. Effect of foreign direct investments, economic development and energy consumption on greenhouse gas emissions in developing countries. *Science of The Total Environment* 646, 862-871.
- Sheikhzeinoddin, A., Tarazkar, M.H., Behjat, A., Al-mulali, U., Ozturk, I., 2022. The nexus between environmental performance and economic growth: New evidence from the Middle East and North Africa region. *Journal of Cleaner Production* 331, 129892.
- Stock, J.H., Watson, M.W., 1993. A simple estimator of cointegrating vectors in higher order integrated systems, *Econometrica* 61, 783-820.
- Yazici, S., 2022. Investigating the maritime freight-induced EKC hypothesis: The case of Scandinavian countries. *Frontiers in Environmental Science* 289, 1-18.