

Research Article

The Role of Digital Transformation in Mitigating Carbon Dioxide Emissions: Empirical Evidence from Upper-Middle-Income Countries**

Parviz Vafadar^{*1} , Mahmood Mahmoodzadeh² , Salleh Ghavidel² 

1. Ph.D. Student in Iranian Economics, Department of Economics, Faculty of Economics and Accounting, Firuzkuh Branch, Islamic Azad University, Firuzkuh, Iran.

2. Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Economics and Accounting, Firuzkuh Branch, Islamic Azad University, Firuzkuh, Iran.

Received 15 August 2025 Revise 01 October 2025 Accepted 04 October 2025 Publish 23 September 2026

Abstract

This study examines the impact of information and communication technology (ICT) on carbon dioxide emissions in upper-middle-income countries over the period 1995–2022. To measure ICT development, a composite index was constructed using Principal Component Analysis (PCA) to reduce multicollinearity among technological variables and obtain more stable and accurate estimates. The model was estimated using the Generalized Method of Moments (GMM). The results indicate that ICT development and renewable energy consumption have negative and statistically significant effects on carbon emissions, whereas income growth and industrial development significantly contribute to higher emissions. In addition, exports of high-technology goods have a reducing effect on carbon emissions, although this effect is statistically insignificant. The validity of the instruments employed in the model was also confirmed using the Sargan test. Upper-middle-income countries were selected because of their transitional development characteristics, as these countries simultaneously possess relatively advanced technological infrastructure and experience rapid industrial growth. The findings indicate that ICT development and the expansion of clean energy can serve as effective strategies for reducing environmental pollution and supporting sustainable development pathways in these countries.

Keywords: Information and Communication Technology (ICT), Environmental Pollution, Principal Component Analysis, Upper-Middle-Income Countries

JEL Classification: C19, O44, Q53

* **Corresponding Author:** Parviz Vafadar

E-mail: parvizvafadar@gmail.com

Tel: +989127270516

** **Note:** This article is derived from the doctoral dissertation of [Parviz Vafadar](#) in Iranian Economy at Firuzkuh Branch, Islamic Azad University.

Cite This Article (APA): Vafadar, P., Mahmoodzadeh, M. & Ghavidel, S. (2025). The Role of Digital Transformation in Mitigating Carbon Dioxide Emissions: Empirical Evidence from Upper-Middle-Income Countries. *Journal of Economic Policies and Research*, 5(3), 31-62. <https://doi.org/10.22034/jepr.2025.144229.1296> [In Persian].

Homepage of this Article: https://jepr.uok.ac.ir/article_64134.html?lang=en



© The Author(s), 2026. *Economic Policies and Research*, Published online by University of Kurdistan. This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License](#), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Introduction

In recent decades, digitalization has emerged as one of the most important drivers of global transformation, affecting various dimensions of the economy and society. Information and communication technology (ICT) lies at the center of this transformation and has facilitated the creation of new platforms for information exchange, the optimization of production and service processes, and the reduction of resource waste. Despite these achievements, the rapid expansion of digital infrastructure, data centers, and telecommunications networks has been accompanied by a substantial increase in energy consumption, placing considerable pressure on the environment, particularly through increased carbon dioxide emissions.

As a result of these contrasting effects, digital transformation has a dual nature. On the one hand, it can help reduce pollution by improving energy efficiency, reducing reliance on physical resources, and promoting the optimal use of modern technologies. On the other hand, growing energy demand, increasing volumes of electronic waste, and the need to extract minerals for the production of digital hardware create new environmental challenges.

The significance of this duality becomes even more apparent in upper-middle-income countries, which simultaneously possess relatively advanced technological infrastructure and are rapidly progressing toward industrialization. The present study is designed to analyze the role of digital transformation in carbon dioxide emissions in these countries. For this purpose, a composite ICT index based on Principal Component Analysis (PCA), along with long-term panel data covering the period 1995–2022, is employed, and the Generalized Method of Moments (GMM) is applied. The main research questions focus on the nature of the relationship between digitalization and carbon dioxide emissions, the role of technological and industrial infrastructure, and policy solutions for sustainable digital development.

Methodology

This study examines the effect of information and communication technology (ICT) on carbon dioxide emissions in upper-middle-income countries while also analyzing the role of key economic and energy-related factors. Annual panel data are employed, with countries selected based on the World Bank classification and the availability of complete data to ensure the reliability of the analysis.

To capture both short- and long-term effects and address potential endogeneity and heterogeneity in the data, the Generalized Method of Moments (GMM) approach is employed. The model is specified as follows:

$$LCO_{2(i,t)} = \beta_1 LCO_{2(i,t-1)} + \gamma_1 ICT_{(i,t)} + \gamma_2 INDU_{(i,t)} + \gamma_3 REGT_{(i,t)} + \gamma_4 MEX_{(i,t)} + \gamma_5 LINCO_{(i,t)} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Where, $LCO_{2(i,t)}$ denotes CO₂ emissions in country (i) at time (t), with $LCO_{2(i,t-1)}$ as the lagged value capturing dynamic effects. $ICT_{(i,t)}$ is the ICT development index, $INDU_{(i,t)}$ the industrial sector value added, $REGT_{(i,t)}$ the share of renewable energy, $MEX_{(i,t)}$ exports of medium- and high-technology goods, and $LINCO_{(i,t)}$ GDP. μ_i and λ_t represent country- and time-specific fixed effects, and ε_{it} is the error term. Coefficients β_1 and $\gamma_1 \dots \gamma_5$ indicate the magnitude and direction of each variable's impact on CO₂ emissions.

Results and Discussion

The results obtained from the model estimation provide important evidence regarding the factors influencing carbon dioxide emissions in upper-middle-income countries. First, the negative and statistically significant coefficient of squared GDP indicates the existence of a nonlinear, inverted U-shaped relationship between economic growth and pollutant emissions. This finding supports the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis, according to which rising income increases emissions during the early stages of development, whereas after income exceeds a certain turning point, pollutant emissions begin to decline.

At the same time, the results reveal that GDP in its linear form continues to have a positive and statistically significant effect on emissions, indicating the persistent dependence of economic growth on fossil energy and carbon-intensive activities.

The control variables also exhibit different effects. Fossil energy consumption and the expansion of industrial activities significantly increase emissions, which is consistent with existing evidence from emerging economies. In contrast, renewable energy consumption has a negative and statistically significant coefficient, indicating that substituting renewable energy sources for conventional energy can play an effective role in reducing carbon emission intensity.

In addition, exports of high-technology goods have a negative but statistically insignificant coefficient, indicating their limited impact in the short term while highlighting their substantial potential for long-term effects through the development of green innovations.

One of the key findings is the negative and statistically significant effect of information and communication technology. This finding indicates that ICT development can alleviate environmental pressure by improving energy efficiency, optimizing production processes, and reducing resource waste. This result is consistent with the theoretical perspective of the Environmental Kuznets Curve and suggests that, at higher income levels, modern technologies can play a strategic role in reducing pollutant emissions.

Conclusion

The findings of this study indicate that reducing carbon dioxide emissions in upper-middle-income countries requires a combination of ICT development and an increased share of renewable energy. By improving energy efficiency and optimizing production processes, these factors exert a mitigating effect on carbon emissions. In contrast, industrial and economic growth continue to exert environmental pressure, while reliance on fossil fuels remains persistent. High-technology exports have a limited effect in the short term but possess considerable long-term potential. The findings emphasize the importance of coordinated policies in the areas of technology, clean energy, and smart industrial growth management to facilitate sustainable development and reduce carbon emissions.

Additional information

Authors' Contributions

This article is derived from the Doctoral dissertation of *Parviz Vafadar* in the field Iranian Economics, conducted under the supervision of Dr. **Mahmood Mahmoodzadeh** and with the advisement of Dr. **Salleh Ghavidel**, in the Department of Economics, Firuzkuh Branch, Islamic Azad University, Firuzkuh, Iran.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Financial Support

The authors received no financial support for the research and publication of this article.

ORCID

 <i>Parviz Vafadar</i>	https://orcid.org/0009-0004-8597-1881
 <i>Mahmood Mahmoodzadeh</i>	https://orcid.org/0000-0002-5844-8604
 <i>Salleh Ghavidel</i>	https://orcid.org/0000-0003-0851-9969

مقاله پژوهشی

نقش تحول دیجیتال در تعدیل انتشار دی‌اکسید کربن: شواهدی از کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط**

پرویز وفادار*^۱، محمود محمودزاده^۲، صالح قویدل^۲

۱. دانشجوی دکتری اقتصاد ایران، گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و حسابداری، واحد فیروز کوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروز کوه، ایران.
۲. دانشیار، گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و حسابداری، واحد فیروز کوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروز کوه، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

چکیده

این پژوهش اثر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر انتشار دی‌اکسید کربن را در کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۲ بررسی می‌کند. به منظور سنجش فاوا، شاخص ترکیبی با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی تدوین شد تا هم‌خطی میان متغیرهای فناوریانه کاهش یافته و برآوردهایی پایدارتر و دقیق‌تر حاصل شود. برآورد مدل با روش گشتاورهای تعمیم یافته انجام گرفت، نتایج نشان می‌دهد فاوا و مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر اثر منفی و معناداری بر انتشار کربن دارند، درحالی‌که رشد درآمد و توسعه صنعتی به طور معناداری موجب افزایش آن می‌شوند. همچنین، صادرات کالاهای با فناوری بالا اثری کاهنده اما از نظر آماری غیرمعنادار بر انتشار کربن دارد. اعتبار ابزارهای مدل نیز با استفاده از آزمون سارگان تأیید شد. انتخاب کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط به دلیل شرایط گذار توسعه‌ای آن‌ها صورت گرفت؛ کشورهایی که هم‌زمان از زیرساخت‌های فناوریانه نسبتاً پیشرفته و رشد سریع صنعتی برخوردارند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد توسعه فاوا و گسترش انرژی‌های پاک می‌تواند به عنوان راهبردی مؤثر در کاهش آلودگی زیست‌محیطی و پشتیبانی از مسیر توسعه پایدار در این کشورها عمل کند.

واژگان کلیدی: فناوری اطلاعات و ارتباطات، آلودگی محیط‌زیست، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط

طبقه‌بندی JEL: C19, O44, Q53

* نویسنده مسئول: پرویز وفادار آدرس رایانامه: parvizvafadar@gmail.com تلفن تماس: ۰۹۱۳۷۲۷۰۵۱۶

** یادداشت: مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری پرویز وفادار در رشته اقتصاد ایران در دانشگاه آزاد اسلامی واحد فیروز کوه است.

استناد به مقاله (APA): وفادار، پرویز، محمودزاده، محمود و قویدل، صالح. (۱۴۰۴). نقش تحول دیجیتال در تعدیل انتشار دی‌اکسید کربن:

شواهدی از کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط. نشریه سیاست‌ها و تحقیقات اقتصادی، ۳(۳)، ۳۱-۶۲.

<https://doi.org/10.22034/jep.2025.144229.1296>

https://jep.ouk.ac.ir/article_64134.html

صفحه اصلی مقاله در سامانه نشریه:

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، دیجیتال‌سازی^۱ اقتصاد و جامعه، یکی از مهم‌ترین روندهای جهانی بوده است که به بازتعریف شیوه‌های تولید، مصرف و مدیریت منابع منجر شده است. فناوری اطلاعات و ارتباطات^۲ به عنوان محور این تحول، نه تنها موجب تسهیل ارتباطات و تبادل اطلاعات شده، بلکه امکان بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی و خدماتی و کاهش ضایعات را فراهم ساخته است. با این حال، رشد سریع زیرساخت‌های دیجیتال، مراکز داده و شبکه‌های مخابراتی، مصرف انرژی را افزایش داده و فشار قابل توجهی بر محیط زیست، به ویژه انتشار دی‌اکسید کربن، وارد کرده است. بررسی رابطه بین توسعه فاوا و تغییرات زیست محیطی، به ویژه در کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط که ترکیبی از فناوری پیشرفته و رشد صنعتی سریع دارند، اهمیت ویژه‌ای یافته است (Müller et al., 2020). تحول دیجیتال می‌تواند به شکل دوگانه بر محیط زیست اثر بگذارد، از یک سو، بهبود کارایی انرژی، کاهش نیاز به منابع فیزیکی و استفاده بهینه از فناوری‌های نوین می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد. از سوی دیگر، افزایش مصرف انرژی زیرساخت‌ها، تولید پسماندهای الکترونیکی و استخراج منابع معدنی مورد نیاز برای سخت‌افزارهای دیجیتال، فشارهای زیست محیطی جدیدی ایجاد می‌کند که بر انتشار دی‌اکسید کربن تأثیر مستقیم دارد (Jones & Smith, 2021). این اثرات در کشورهایی که هم‌زمان رشد صنعتی بالایی دارند و زیرساخت‌های دیجیتال پیشرفته‌ای توسعه داده‌اند، برجسته‌تر است و توجه به آن‌ها برای سیاست‌گذاران و محققان حیاتی است (Li et al, 2020). پژوهش حاضر باهدف شناسایی و تحلیل نقش تحول دیجیتال در تعدیل انتشار دی‌اکسید کربن در کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط انجام شده است، این کشورها به دلیل موقعیت گذار توسعه‌ای و برخورداری هم‌زمان از زیرساخت‌های فناورانه پیشرفته و صنعتی شدن سریع، نمونه‌ای مناسب برای تحلیل اثرات زیست محیطی فاوا محسوب می‌شوند. تحلیل دقیق این کشورها امکان ارائه راهکارهای سیاستی عملی و هدفمند برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در فرایند توسعه دیجیتال را فراهم می‌کند.

برای برآورد دقیق اثرات، این مطالعه از شاخص ترکیبی فناوری اطلاعات و ارتباطات بهره برده است که با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی ساخته شده و هم‌خطی میان متغیرهای فناورانه را کاهش می‌دهد. همچنین، داده‌های پانل بلندمدت این پژوهش طی سال‌های ۲۰۲۲-۱۹۹۵ با استفاده از روش گشتاورهای تعمیم‌یافته تحلیل شده‌اند تا اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت تحول دیجیتال بر انتشار دی‌اکسید کربن مورد بررسی قرار گیرد، این رویکرد امکان کنترل ناهمسانی و درون‌زایی داده‌ها را فراهم می‌سازد و اعتبار آماری نتایج را تضمین می‌کند. ادبیات موجود نشان می‌دهد که تحول دیجیتال می‌تواند ضمن کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی فرایندها، به افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای نیز منجر شود. پژوهش‌های پیشین عمدتاً به اثرات فناورانه در سطح توسعه‌یافته یا در حال توسعه پرداخته‌اند، اما تمرکز بر کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط امکان ارائه شواهد دقیق‌تر و کاربردی‌تر درباره رابطه میان دیجیتال‌سازی و انتشار دی‌اکسید کربن را فراهم می‌کند (Jones & Smith, 2021; Kang & Kim, 2019).

1. Digitization

2. Information and Communications Technology

هدف اصلی این پژوهش، بررسی نقش تحول دیجیتال و فناوری اطلاعات و ارتباطات در تعدیل انتشار دی‌اکسیدکربن در کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط است، باتوجه به این هدف کلی، پرسش‌های اصلی تحقیق به شرح زیر تعیین شده‌اند:

۱. آیا توسعه فناوری اطلاعات و ارتباطات باعث کاهش یا افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن در کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط می‌شود؟

۲. نقش زیرساخت‌های فناورانه پیشرفته و رشد صنعتی در تعدیل اثر فاوا بر انتشار دی‌اکسیدکربن چیست؟

۳. چگونه می‌توان از یافته‌های این تحقیق برای طراحی سیاست‌های توسعه دیجیتال پایدار و کاهش فشارهای زیست‌محیطی بهره برد؟

این اهداف و پرسش‌ها محور اصلی تحقیق را مشخص کرده و چارچوب تحلیل، روش‌شناسی و ارائه نتایج مقاله را هدایت می‌کنند. ساختار مقاله به این ترتیب است: بخش دوم مرور ادبیات، بخش سوم روش‌شناسی و داده‌ها، بخش چهارم ارائه نتایج و بخش پنجم جمع‌بندی و بحث نهایی. یافته‌های این مطالعه می‌تواند راهنمای سیاست‌گذاران و پژوهشگران در طراحی و اجرای برنامه‌های توسعه دیجیتال پایدار باشد.

۲. ادبیات پژوهش

۲-۱. مبانی نظری

۲-۱-۱. فناوری اطلاعات و ارتباطات

فناوری اطلاعات و ارتباطات یکی از مهم‌ترین ابزارهای تحول در جوامع امروزی محسوب می‌شود. این فناوری با فراهم کردن امکان پردازش و انتقال سریع اطلاعات، موجب بهبود بهره‌وری، رشد اقتصادی و ارتقای کیفیت زندگی شده است (Hilty & Aebischer, 2015). با این حال، گسترش فاوا پیامدهایی زیست‌محیطی نیز به همراه داشته است که در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند (Andrae & Edler, 2015). اثر زیست‌محیطی فناوری اطلاعات و ارتباطات به تأثیرات مثبت و منفی این حوزه بر محیط‌زیست اشاره دارد. در یک نگاه کلی، این اثرات می‌توانند در سه دسته اصلی خلاصه شوند (جدول ۱) (GeSI, 2020):

الف. اثرات مستقیم:

تولید تجهیزات فاوا (مثل گوشی‌های هوشمند، سرورها، لپ‌تاپ‌ها) نیازمند استخراج مواد معدنی کمیاب و مصرف زیاد انرژی است.

مصرف برق مراکز داده، شبکه‌های ارتباطی و دستگاه‌های کاربران، باعث تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود. پسماند الکترونیکی ناشی از پایان عمر دستگاه‌ها، چالش بزرگی برای مدیریت پسماند و آلودگی محیط‌زیست ایجاد می‌کند.

ب. اثرات غیرمستقیم:

استفاده از فاوا می‌تواند به بهبود بهره‌وری انرژی در صنایع دیگر کمک کند (مثلاً با هوشمندسازی ساختمان‌ها یا حمل‌ونقل) که در نتیجه مصرف انرژی کاهش می‌یابد (Hilty & Aebischer, 2015).

فناوری‌های دیجیتال می‌توانند موجب کاهش نیاز به سفرهای فیزیکی (از طریق ویدئوکنفرانس‌ها یا کار از راه دور) شوند و در نتیجه انتشار کربن کمتر شود (GeSI, 2020).

ج. اثرات سیستمیک (طولانی مدت):

تغییر الگوهای مصرف (مثل خرید آنلاین) می‌تواند اثرات زیست‌محیطی مثبت یا منفی داشته باشد، بسته به چگونگی تولید، حمل‌ونقل و مصرف کالاها (Hilty & Aebischer, 2015).
توسعه زیرساخت‌های فاوا ممکن است نیاز به منابع طبیعی (آب، برق، فضا) را افزایش دهد.

جدول ۱: دسته‌بندی اثرات زیست‌محیطی فناوری اطلاعات و ارتباطات

نوع اثر	شرح اثرات	نمونه
اثرات مستقیم	اثراتی که ناشی از تولید، استفاده و پایان عمر تجهیزات فاوا هستند.	مصرف انرژی مراکز داده تولید گازهای گلخانه‌ای پسماند الکترونیکی
اثرات غیرمستقیم	اثراتی که فاوا از طریق بهبود بهره‌وری یا جایگزینی فرایندهای سنتی بر محیط‌زیست دارد	کاهش سفرهای کاری با ویدئوکنفرانس ساختمان‌ها و حمل‌ونقل هوشمند بهینه‌سازی تولید
اثرات سیستمیک	تغییرات بلندمدت و ساختاری در رفتار مصرف‌کننده و ساختار اقتصادی به واسطه گسترش فاوا	افزایش تجارت الکترونیکی تغییر الگوهای مصرف انرژی افزایش مصرف منابع برای زیرساخت

منبع: Organization for Economic Co-operation and Development (2001)

۲-۱-۲. آثار مثبت و منفی فاوا بر محیط‌زیست

فناوری اطلاعات و ارتباطات به یکی از ارکان اصلی توسعه اقتصادی و اجتماعی در عصر دیجیتال تبدیل شده است. از خدمات اینترنتی گرفته تا تجهیزات هوشمند و مراکز داده، همه این فناوری‌ها باهدف ارتقای کیفیت زندگی، بهبود بهره‌وری و تسهیل ارتباطات انسانی به کار گرفته می‌شوند (Hilty & Aebischer, 2015). بااین‌حال، توسعه سریع این فناوری‌ها هم‌زمان اثراتی مثبت و منفی بر محیط‌زیست به‌جا گذاشته است که شناخت و مدیریت این اثرات برای تحقق توسعه پایدار ضروری است (Andrae & Edler, 2015).

الف. آثار مثبت فاوا بر محیط‌زیست

بهینه‌سازی مصرف انرژی: فاوا با استفاده از ابزارها و سیستم‌های هوشمند، بهینه‌سازی فرایندها و تجهیزات و استفاده مؤثر از منابع می‌تواند به کاهش مصرف انرژی کمک کند (افشار و همکاران، ۱۴۰۲). به‌طوری‌که فناوری‌های هوشمند مبتنی بر فاوا، مانند سیستم‌های مدیریت هوشمند انرژی در ساختمان‌ها و صنایع، می‌توانند مصرف انرژی را به طور چشمگیری کاهش دهند. این سیستم‌ها با استفاده از حسگرها و داده‌کاوی، مصرف انرژی را بهینه‌سازی کرده و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهند (قهرمانی و همکاران، ۱۳۹۶).

توسعه شهرهای هوشمند: فاوا در توسعه شهرهای هوشمند نقش کلیدی دارد. استفاده از داده‌های آنی برای مدیریت ترافیک، سیستم حمل‌ونقل عمومی، و کنترل کیفیت هوا می‌تواند به کاهش مصرف سوخت، کاهش آلودگی و ارتقای کیفیت زندگی کمک کند (Zanella et al., 2014).

پایش محیط‌زیست و هشدارهای زودهنگام: فناوری‌های سنجش‌ازدور، اینترنت اشیا و تحلیل داده‌های بزرگ، امکان نظارت لحظه‌ای بر محیط‌زیست را فراهم می‌کنند. این فناوری‌ها در تشخیص زودهنگام آتش‌سوزی‌های جنگلی، خشکسالی، آلودگی‌های شیمیایی و تغییرات اقلیمی بسیار مؤثرند (Li et al., 2021). کاهش نیاز به جابه‌جایی فیزیکی: افزایش استفاده از خدمات آنلاین، جلسات مجازی و آموزش از راه دور، به کاهش نیاز به سفر و جابه‌جایی فیزیکی منجر شده است. این امر به طور مستقیم در کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی هوا مؤثر بوده است (Hilty & Aebischer, 2020; Hook et al., 2015).

ب. آثار منفی فاوا بر محیط‌زیست

مصرف بالای انرژی: شبکه‌های ارتباطی، مراکز داده و میلیون‌ها دستگاه دیجیتال، نیاز به انرژی فزاینده دارند. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، تنها مراکز داده حدود یک درصد از مصرف برق جهانی را به خود اختصاص داده‌اند و این رقم در حال افزایش است (IEA, 2021). بسیاری از این انرژی از منابع فسیلی تأمین می‌شود که باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد.

تولید زباله‌های الکترونیکی: تمایل بازار به ارتقای مداوم تجهیزات دیجیتال منجر به کاهش عمر مفید دستگاه‌ها شده است. در سال ۲۰۱۹ حدود ۵۳/۶ میلیون تن زباله الکترونیکی در جهان تولید شده که تنها ۱۷/۴ درصد آن به صورت رسمی بازیافت شده است (ITU, 2020). این زباله‌ها اغلب حاوی مواد سمی و فلزات سنگین هستند که می‌توانند منابع آب و خاک را آلوده کنند.

استخراج منابع طبیعی کمیاب: تجهیزات فاوا برای تولید به موادی مانند لیتیوم، کبالت و فلزات خاکی کمیاب نیاز دارند. استخراج این مواد معمولاً با تخریب زیست‌محیطی، تخریب جنگل‌ها و آلودگی منابع آبی همراه است (Vidal et al., 2013). باتوجه‌به آنچه گذشت می‌توان نتیجه گرفت فاوا تأثیر دوگانه‌ای بر محیط‌زیست دارد. از یک سو، مصرف بالای انرژی، تولید زباله‌های سمی و استخراج منابع کمیاب از تهدیدات جدی این حوزه برای محیط‌زیست است. ازسوی دیگر، فاوا می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای بهینه‌سازی مصرف منابع، توسعه فناوری‌های پایدار، و پایش هوشمند محیطی به کار گرفته شود. راه‌حل کلیدی، استفاده مسئولانه، طراحی سبز، توسعه بازیافت و سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی هوشمند در زمینه فاوا است تا بتوان تعادل میان پیشرفت فناوری و حفاظت از محیط‌زیست را حفظ کرد.

ج. نظریه منحنی کوزنتس زیست‌محیطی^۱

یکی از چارچوب‌های نظری پرکاربرد در تبیین رابطه میان رشد اقتصادی و کیفیت محیط‌زیست، نظریه منحنی کوزنتس زیست‌محیطی است. این نظریه بر مبنای الگوی کوزنتس (۱۹۵۵) در مورد نابرابری درآمدی شکل گرفت و توسط اقتصاددانان محیط‌زیست به حوزه آلودگی تعمیم داده شد (Grossman & Krueger, 1991). مطابق این نظریه، رابطه بین درآمد سرانه و آلودگی زیست‌محیطی غیرخطی و به شکل U وارونه است. به طوری که در مراحل اولیه توسعه اقتصادی، کشورها برای رشد و صنعتی‌سازی به شدت به مصرف انرژی‌های فسیلی و فعالیت‌های

1. Environmental Kuznets Curve

آلاینده وابسته‌اند. در این مرحله، افزایش درآمد سرانه همراه با تشدید انتشار آلاینده‌ها و تخریب محیط‌زیست است (Grossman & Krueger, 1995). اما با تداوم رشد اقتصادی و رسیدن به سطح بالاتری از درآمد، نقطه عطفی^۱ پدیدار می‌شود که پس از آن افزایش درآمد، به جای افزایش آلودگی، منجر به کاهش آن می‌گردد. این تغییر مسیر ناشی از چند عامل کلیدی است:

۱. تغییر ساختار اقتصادی: با رشد درآمد، سهم بخش خدمات و صنایع کم کربن افزایش یافته و نقش صنایع سنگین و آلاینده کاهش می‌یابد (Shahbaz et al., 2017).

۲. تقاضای اجتماعی برای محیط‌زیست سالم: جوامع ثروتمندتر حساسیت بیشتری نسبت به آلودگی دارند و فشار اجتماعی برای سیاست‌گذاری زیست‌محیطی بیشتر می‌شود (Panayotou, 1993).

۳. پیشرفت فناوری: توسعه فناوری‌های پاک، بهبود بهره‌وری انرژی و نوآوری‌های سبز انتشار آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد (Stern, 2017).

۴. سیاست‌ها و مقررات محیط‌زیستی: دولت‌ها با وضع مالیات‌های زیست‌محیطی، استانداردهای سخت‌گیرانه و حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر، مسیر رشد اقتصادی را سبزتر می‌کنند (Copeland & Taylor, 2004). از منظر نظری، این رابطه معمولاً به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$CO_{2,t} = \alpha + \beta_1 Y_{i,t} + \beta_2 Y_{i,t}^2 + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

که در آن Y نشان‌دهنده درآمد سرانه است. اگر $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$ باشد، فرضیه کوزنتس زیست‌محیطی تأیید می‌شود؛ بدین معنا که ابتدا افزایش درآمد منجر به رشد انتشار می‌شود، اما پس از رسیدن به سطح مشخصی از درآمد (نقطه عطف)، روند معکوس شده و انتشار کاهش می‌یابد (Dinda, 2004).

مطالعات تجربی متعدد در دهه‌های اخیر به بررسی این فرضیه پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که الگوی کوزنتس زیست‌محیطی در بسیاری از کشورهای در حال توسعه و به‌ویژه در کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط مصداق دارد. در این کشورها رشد اقتصادی در کوتاه‌مدت غالباً موجب افزایش انتشار می‌شود، اما با توسعه فناوری اطلاعات و ارتباطات، افزایش بهره‌وری انرژی، و تغییر ساختار اقتصادی، روند بلندمدت به سمت کاهش انتشار حرکت می‌کند (Shahbaz et al., 2020; Destek & Sinha, 2020). در مجموع، نظریه کوزنتس زیست‌محیطی چارچوبی کلیدی برای تحلیل ارتباط میان توسعه اقتصادی و پایداری محیط‌زیست فراهم می‌آورد. این نظریه به سیاست‌گذاران هشدار می‌دهد که دستیابی به کاهش انتشار تنها با رشد اقتصادی خودکار اتفاق نمی‌افتد، بلکه نیازمند سیاست‌های هوشمند، توسعه فناوری‌های سبز و تغییر ساختار تولیدی و مصرفی است.

۲-۲. پیشینه پژوهش

محمودزاده و شاه بیگی (۱۳۹۰)، برای ۲۵ کشور در حال توسعه منتخب و با استفاده از داده‌های تلفیقی در دوره زمانی ۱۹۹۵-۲۰۰۸ و با استفاده از روش گشتاور تعمیم‌یافته نشان دادند که اثر درآمدی از اثر جانشینی قوی‌تر بوده است، اگرچه اثر بعضی از شاخص‌های فاوا بر شدت انرژی اثر منفی داشته باشد.

ارباب و شعبانی (۱۳۹۶)، برای دوره زمانی ۱۹۹۴ لغایت ۲۰۱۴ در کشورهای D8 از جمله ایران با استفاده از روش داده‌های تلفیقی به برآورد اثر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر آلودگی‌های زیست‌محیطی پرداخته، نتایج حکایت از اثر مستقیم افزایش تولید ناخالص داخلی با آلودگی است.

جعفری و همکاران (۱۴۰۰)، در دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۰۰ با استفاده از روش پانل دیتا برای کشورهای حوزه خلیج فارس به بررسی تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات و رشد اقتصادی بر انتشار دی‌اکسیدکربن پرداختند، نتایج حاکی از اثر مستقیم فناوری اطلاعات و ارتباطات و اثر منفی مجذور آن بر انتشار دی‌اکسیدکربن دارد.

طیاری و محمودزاده (۱۴۰۲)، برای ۱۱۳ کشور منتخب درحال توسعه و با روش پنل دیتا در دوره زمانی ۱۹۹۲-۲۰۱۸ به بررسی ارزیابی نقش فناوری اطلاعات و ارتباطات بر ردپای اکولوژیکی از دیدگاه اثر فردی و روند ذخایر کشورها و نوع زمین پرداختند، نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضریب نفوذ تلفن همراه موجب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و انتشار دی‌اکسیدکربن و افزایش اثر ردپای اکولوژیکی شده است.

اعظمی و همکاران (۱۴۰۲)، به بررسی تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر کیفیت محیط‌زیست در آلوده-کننده‌های بزرگ آسیایی در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۰ پرداختند. نتایج حاکی از وجود رابطه بلندمدت میان متغیرهای الگو است. فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس در هر دو گروه کشورها مورد تأیید است.

محمدیان و اسماعیلی (۱۴۰۳)، با بررسی ۱۱ کشور عضو مجمع کشورهای صادرکننده گاز طی دوره ۱۹۹۶-۲۰۲۱، با استفاده از مدل‌های حداقل مربعات معمولی پویا و حداقل مربعات معمولی کاملاً اصلاح‌شده، نشان دادند که رشد اقتصادی مصرف هر دو نوع انرژی را افزایش می‌دهد، درحالی‌که بهبود کیفیت نظارتی و حاکمیت قانون موجب کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی می‌شود. سایر ابعاد حکمرانی، از جمله اثربخشی دولت و کنترل فساد، نیز تأثیر متفاوتی بر مصرف انرژی‌ها دارند.

صلاح‌الدین و عالم (۲۰۱۶)^۱، در مطالعه‌ای بر ۱۲ کشور سازمان همکاری و توسعه اقتصادی دریافتند که افزایش نفوذ اینترنت به افزایش مصرف برق و در نتیجه رشد انتشار دی‌اکسیدکربن منجر شده است.

شهباز و همکاران (۲۰۱۹)^۲، به بررسی منحنی کوزنتس زیست‌محیطی در کشورهای نوظهور پرداخته شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر انتشار دی‌اکسیدکربن غیرخطی است و به سطح درآمد سرانه و بلوغ فناوری بستگی دارد. در کشورهای با درآمد سرانه پایین و بلوغ فناوری کمتر، توسعه فاوا ممکن است منجر به افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن شود. اما در کشورهای با درآمد سرانه بالاتر و بلوغ فناوری بیشتر، این تأثیر معکوس شده و توسعه فاوا می‌تواند به کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن کمک کند.

دستک و سینها (۲۰۲۰)^۳، تأکید کردند که در کشورهایی با سیاست‌های زیست‌محیطی فعال، فناوری‌های دیجیتال منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند، درحالی‌که در کشورهایی فاقد این سیاست‌ها، ممکن است اثر منفی غالب باشد.

1. Salahuddin & Alam (2016)

2. Shahbaz et al. (2019)

3. Destek & Sinha (2020)

وانگ و همکاران (۲۰۲۰)^۱، با استفاده از داده‌های کشورهای گروه G7 در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۷ و به‌کارگیری مدل CS-ADRL^۲، نقش ارزش افزوده کشاورزی، منابع طبیعی و توسعه مالی را بر آلودگی و جهانی‌سازی اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که ارزش افزوده کشاورزی باعث کاهش نرخ انتشار دی اکسید کربن می‌شود. اما از سوی دیگر، جهانی‌سازی و متغیرهای زیست‌محیطی دیگر موجب افزایش انتشار دی اکسید کربن می‌شوند.

عثمان و همکاران (۲۰۲۱)^۳، با استفاده از داده‌های پانل کشورهای آسیایی، نشان دادند که افزایش استفاده از اینترنت و فناوری‌های دیجیتال، شدت انرژی را کاهش داده و در نهایت اثر مثبتی بر محیط‌زیست دارد. آچیمپونگ و همکاران (۲۰۲۱)^۴، با استفاده از یک روش پانلی مبتنی بر گشت‌او تعمیم‌یافته رابطه علی زمانی بین رشد اقتصادی، انرژی تجدیدپذیر، کیفیت نهادی و انتشار گاز دی اکسید کربن برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ در کشورهای اروپایی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مصرف انرژی تجدیدپذیر و رشد اقتصادی در بلندمدت دارای رابطه علی دوطرفه هستند.

آلاتاس (۲۰۲۱)^۵، همبستگی بین انتشار دی اکسید کربن و فاوا را در ۹۳ کشور از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۶، با استفاده از روش الگوریتم داده‌محور درون‌زا مورد بررسی قرارداد، نتایج تأثیر آماری معنی‌دار و مطلوب فاوا بر آلاینده‌ها را نشان داد.

خان و همکاران (۲۰۲۱)^۶، با استفاده از مدل‌های ایستا و پویا، رابطه بین مصرف انرژی، تخریب محیط‌زیست و کیفیت نهادی را در ۱۸۸ کشور طی دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۸ بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که متغیرهای کیفیت نهادی نظیر آزادی بیان و پاسخگویی، ثبات سیاسی و کنترل فساد موجب کاهش تخریب محیط‌زیست می‌شوند.

ندری و همکاران (۲۰۲۱)^۷، تأثیر فاوا بر انتشار دی اکسید کربن در ۵۸ اقتصاد در حال توسعه برای داده‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ را با استفاده از مدل PMG-ARDL^۸ بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از فاوا، از نظر زیست‌محیطی برای کشورهای در حال توسعه مفید است.

لیو و همکاران (۲۰۲۲)^۹، در بررسی کشورهای گروه E7 در بازه ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۸ از روش‌های حداقل مربعات تعمیم‌یافته قابل اجرا، رگرسیون پنلی صدکی و تجزیه واریانس استفاده کردند. یافته‌های این مطالعه تأیید می‌کند که مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر، نوآوری‌های فناورانه و کیفیت نهادی نقش مؤثری در کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن دارند.

-
1. Wang et al. (2020)
 2. Cross-Sectionally Augmented Autoregressive Distributed Lag
 3. Usman et al. (2021)
 4. Acheampong et al. (2021)
 5. Alatas (2021)
 6. Khan et al. (2021)
 7. N'dri et al. (2021)
 8. Pooled Mean Group Autoregressive Distributed Lag
 9. Liu et al. (2022)

خان و همکاران (۲۰۲۴)^۱، به بررسی تأثیر نوآوری‌های فناوری، تحقیق و توسعه و مصرف انرژی تجدیدپذیر بر انتشار دی‌اکسیدکربن در کشورهای گروه ۷ پرداختند، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که نوآوری‌های فناوری و مصرف انرژی تجدیدپذیر نقش مهمی در کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن دارند. این مطالعه همچنین تأکید می‌کند که سیاست‌های زیست‌محیطی فعال و زیرساخت‌های مناسب برای انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند اثرات مثبت این فناوری‌ها را تقویت کنند.

بنابراین مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که اثر فاوا بر انتشار دی‌اکسیدکربن در میان کشورها متغیر و تابعی از عوامل ساختاری، سیاستی و تکنولوژیکی است. درحالی‌که در برخی کشورها، فاوا به‌عنوان ابزاری برای کاهش آلودگی عمل کرده، در برخی دیگر، به‌واسطه مصرف انرژی فسیلی و نبود زیرساخت‌های سبز، نقش افزایشی داشته است. همچنین، بخش زیادی از مطالعات تمرکز خود را بر کشورهای توسعه‌یافته یا کشورهای درحال توسعه به‌طور کلی گذاشته‌اند، درحالی‌که پژوهش حاضر با تمرکز خاص بر کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط و بهره‌گیری از روش‌های اقتصادسنجی پیشرفته گشتاور تعمیم‌یافته سیستم و تحلیل مؤلفه‌های اصلی، درصدی پر کردن این خلأ پژوهشی است.

۳-۲. نوآوری پژوهش

۳-۱-۲. تحلیل انتقادی

مطالعات متعددی در دو دهه گذشته تلاش کرده‌اند تا ارتباط میان توسعه فناوری اطلاعات و ارتباطات (فاوا) و انتشار دی‌اکسیدکربن را بررسی کنند. باوجود رشد کمی این پژوهش‌ها، تحلیل انتقادی آن‌ها نشان می‌دهد که ادبیات موجود از جنبه‌های نظری، روش‌شناسی، و دامنه تجربی، هنوز با چالش‌هایی مهم مواجه است.

۱. عدم اجماع نظری و نتایج متناقض

یکی از چالش‌های مهم در ادبیات موجود، تضاد در یافته‌ها است. برخی مطالعات فاوا را عامل کاهش آلودگی زیست‌محیطی معرفی کرده‌اند، درحالی‌که برخی دیگر آن را منبع جدیدی از مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای دانسته‌اند. این تناقض می‌تواند ناشی از تفاوت در انتخاب شاخص‌های فاوا، متغیرهای کنترلی، ساختار اقتصادی کشورها و افق زمانی تحلیل باشد. در بسیاری از مطالعات، تأثیرات بلندمدت و کوتاه‌مدت از یکدیگر تفکیک نشده‌اند که می‌تواند منجر به تفسیرهای ناقص و گمراه‌کننده شود.

۲. ضعف در ساخت شاخص‌های ترکیبی و چندبعدی بودن فاوا

فاوا پدیده‌ای چندبعدی است که شامل زیرساخت‌ها، دسترسی، استفاده، مهارت دیجیتال، و نوآوری می‌شود. بااین‌حال، اغلب مطالعات تنها از یک یا دو متغیر ساده (مانند تعداد کاربران اینترنت یا خطوط موبایل) استفاده کرده‌اند که نمی‌تواند نمایانگر کامل توسعه فناوری باشد. عدم استفاده از روش‌هایی مانند تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای ساخت شاخص ترکیبی، یکی از نواقص رایج در پژوهش‌های پیشین است که باعث کاهش دقت مدل‌سازی و استنباط می‌شود.

۳. استفاده محدود از روش‌های پویا و کنترل درون‌زایی

بسیاری از مطالعات از روش‌های ایستا مانند حداقل مربعات معمولی، اثرات ثابت یا اثرات تصادفی استفاده کرده‌اند که نمی‌توانند با پویایی داده‌های پانل یا مسئله درون‌زایی متغیرها مقابله کنند. این امر می‌تواند موجب بروز تورش در ضرایب برآوردی و استنباط نادرست از روابط علی شود. تعداد محدودی از پژوهش‌ها از گشتاور تعمیم‌یافته سیستمی یا مدل پنل پویا بهره گرفته‌اند که نشان‌دهنده یک خلأ روش‌شناسی در بدنه ادبیات است.

۴. تمرکز بیش از حد بر کشورهای توسعه‌یافته یا در حال توسعه به‌طور کلی

ادبیات تجربی عمدتاً بر کشورهای با درآمد بالا یا کشورهای با درآمد پایین تمرکز دارد و کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط که ویژگی‌های ساختاری و گذار فناورانه خاصی دارند، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این در حالی است که این کشورها هم‌زمان با رشد اقتصادی، رشد سریعی در حوزه فاوا دارند و تأثیر آن بر محیط‌زیست ممکن است الگوهای متفاوتی را نشان دهد. در نتیجه، شناسایی اثرات فاوا در این گروه خاص از کشورها یک خلأ پژوهشی مهم محسوب می‌شود.

۵. عدم تلفیق نظریه‌های توسعه پایدار با رویکردهای فناورانه

بسیاری از پژوهش‌ها به‌صورت صرفاً تجربی به تحلیل رابطه فاوا و دی‌اکسیدکربن پرداخته‌اند و فاقد چارچوب نظری منسجم هستند. کمتر مطالعه‌ای نظریه‌هایی مانند منحنی کوزنتس زیست‌محیطی، مدل‌های رشد سبز، یا نظریه‌های نوآوری محیط‌زیستی را در تحلیل خود لحاظ کرده است. این ضعف نظری موجب می‌شود نتایج به‌خوبی در بافت مفهومی گسترده‌تری قرار نگیرند و نتوان از آن‌ها برای سیاست‌گذاری استفاده کاربردی کرد. در مجموع، ادبیات موجود اگرچه بینش‌های مهمی در خصوص رابطه میان فاوا و انتشار دی‌اکسیدکربن فراهم آورده است، اما از نظر، عدم ساخت شاخص‌های ترکیبی از فاوا، استفاده محدود از روش‌های پویا مانند گشتاور تعمیم‌یافته سیستمی، تمرکز ناکافی بر کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط و عدم تبیین نظری دقیق دارای محدودیت‌هایی جدی است. پژوهش حاضر باهدف رفع این خلأها، رویکردی ترکیبی را در پیش گرفته است؛ از یک‌سو با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی شاخصی جامع از توسعه فاوا می‌سازد، و از سوی دیگر با بهره‌گیری از مدل گشتاور تعمیم‌یافته در چارچوب نظری منحنی کوزنتس زیست‌محیطی، تصویری دقیق‌تر و علمی‌تر از رابطه فاوا و آلودگی زیست‌محیطی ارائه می‌دهد.

۲-۳-۲. نوآوری پژوهش

نخست، در این مطالعه به‌منظور سنجش جامع و دقیق توسعه فناوری اطلاعات و ارتباطات، از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای ساخت یک شاخص ترکیبی فاوا استفاده شده است. این رویکرد با کاهش ابعاد داده و حذف هم‌خطی میان متغیرهای مرتبط با فناوری، نظیر کاربران اینترنت، خطوط تلفن همراه و میزان پهنای باند، زمینه‌ساز برآوردی پایدارتر و قابل‌اعتمادتر در مدل‌سازی اثر فاوا بر انتشار دی‌اکسیدکربن شده است. در بسیاری از مطالعات مشابه، متغیرهای فناورانه به‌صورت منفرد وارد مدل شده‌اند که می‌تواند موجب تورش آماری شود، درحالی‌که استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی به‌عنوان یک روش نوین، دقت تحلیل را افزایش داده و اعتبار استنباط‌ها را تقویت می‌کند.

دوم، به کارگیری تخمین گر گشتاورهای تعمیم یافته در این تحقیق، نوآوری مهمی در سطح روش‌شناسی محسوب می‌شود. این روش نه تنها امکان مدل سازی پویایی داده‌های پانل را فراهم می‌سازد، بلکه از طریق کنترل ناهمسانی و درون زایی، نتایج را از لحاظ آماری معتبرتر می‌سازد. درحالی که بسیاری از مطالعات پیشین به روش‌های ایستا یا مقطعی اکتفا کرده‌اند، استفاده از به پژوهش حاضر اجازه می‌دهد تا تأثیرات بلندمدت و کوتاه‌مدت فاوا بر انتشار کربن را به طور هم‌زمان بررسی کند.

سوم، تمرکز پژوهش بر کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط نوآوری دیگری است که کمتر در ادبیات مورد توجه قرار گرفته است. این گروه از کشورها در موقعیتی گذار از توسعه یافتگی قرار دارند؛ از یک سو از زیرساخت‌های فناوری نسبتاً پیشرفته برخوردارند و از سوی دیگر، در مسیر صنعتی شدن و رشد اقتصادی سریع قرار دارند که این ترکیب، وضعیت زیست محیطی آن‌ها را پیچیده و خاص می‌سازد. مطالعه اختصاصی این کشورها می‌تواند بینش‌هایی متفاوت از نتایج کلی حاصل از بررسی کشورهای توسعه یافته یا در حال توسعه ارائه دهد.

در نهایت، استفاده از مجموعه داده‌ای گسترده در بازه زمانی بلندمدت (۱۹۹۵-۲۰۲۲) و تلفیق نظریه‌های محیط زیستی مانند منحنی کوزنتس زیست محیطی با متغیرهای فناورانه، این پژوهش را در زمره مطالعات میان رشته‌ای و نوآورانه قرار می‌دهد که می‌تواند سهم مهمی در تبیین سازوکارهای گذار به توسعه پایدار ایفا کند.

۳. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر باهدف بررسی اثر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر انتشار دی‌اکسید کربن در کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط و تحلیل نقش سایر متغیرهای اقتصادی و انرژی انجام شده است. داده‌ها به صورت پنلی سالانه برای کشور با درآمد بالاتر از متوسط طی دوره مورد مطالعه جمع‌آوری شده‌اند. انتخاب این کشورها بر اساس طبقه‌بندی بانک جهانی و دسترسی کامل به داده‌ها صورت گرفته است تا اعتبار تحلیل‌ها تضمین شود.

۳-۱. تصریح مدل

از لحاظ نظری، این مقاله از تابع تولید کاب - داگلاس (۱۹۲۸) با اصلاحات لازم به منظور بررسی رابطه بین فاوا، منابع انرژی تجدیدناپذیر و سوخت فسیلی، تجارت کالا، مراعات و جنگلبانی و انتشار دی‌اکسید کربن در چارچوب کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط استفاده می‌کند.

$$LCO_{2(i,t)} = \beta_0 + \gamma_0 X_{(i,t)} \quad (۲)$$

$$LCO_{2(i,t)} = \beta_0 + \gamma_0 X_{(i,t)} + \varepsilon_{(i,t)} \quad (۳)$$

LCO_2 و X به ترتیب نشان‌دهنده گزارش انتشار CO_2 (فیلتر برای پایداری محیط زیست) و رگرسیوها هستند. ما مدل سیستم گشتاور تعمیم یافته را از معادله (۳) گرفته و به صورت ذیل نمایش می‌دهیم:

$$LCO_{2(i,t)} = \beta_1 LCO_{2(i,t-1)} + \gamma_1 ICT_{(i,t)} + \gamma_2 INDU_{(i,t)} + \gamma_3 REGT_{(i,t)} + \gamma_{(4)} MEX_{(i,t)} + \gamma_5 LINCO_{(i,t)} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (۴)$$

در مدل تصریح شده CO_2 متغیر وابسته، ICT فناوری اطلاعات و ارتباطات، REGT انرژی تجدیدپذیر، INCO مقدار تولید ناخالص ملی، INDU ارزش افزوده بخش صنعت و MEX صادرات کالاهای با تکنولوژی متوسط و بالا است و β ، μ_i ، λ_t و ε_{it} به ترتیب نشان‌دهنده ضریب رگرسیون و اثرات ثابت مخصوص کشور i ، اثرات زمان و جملات خطا در کشور i در زمان t است، متغیرها به تفصیل در جدول (۲) معرفی گردیده‌اند.

۳-۲. داده‌ها

این مطالعه از داده‌های پانل سالانه برای ۱۵۴ کشور با درآمد بالاتر از متوسط که دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۲ را پوشش می‌دهند، استفاده کرد. اطلاعات از داده‌های بانک جهانی استخراج شده‌اند. انتخاب نمونه‌ی ۵۴ کشور بر اساس معیارهای شفاف و عینی انجام شده است تا هم اعتبار آماری تحلیل حفظ شود، هم مسئله کامل بودن و هم قابل مقایسه بودن داده‌ها پوشش یابد. به طور مشخص، معیارهای گزینش به شرح زیر بوده‌اند:

۱. معیار سطح درآمد: کشورهایی وارد نمونه شدند که بر اساس طبقه‌بندی درآمدی بانک جهانی در دسته‌های با درآمد بالاتر از متوسط، بسته به تعریف مورد استفاده در مطالعه قرار داشتند. این شرط، همسویی نمونه با هدف تحقیق (تمرکز بر کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط) را تضمین می‌کند.

۲. معیار دسترسی و کامل بودن داده‌ها: ورود هر کشور مشروط بر وجود داده سالانه قابل قبول برای کلیه متغیرهای اصلی پژوهش (دی‌اکسید کربن، تولید ناخالص داخلی، مصرف انرژی فسیلی، مصرف انرژی تجدیدپذیر، سهم صنعت/ارزش افزوده صنعتی، صادرات فناوری‌محور، شاخص‌های فاوا و متغیرهای کنترلی دیگر) در بازه زمانی مطالعه بوده است. تنها کشورهایی که پوشش داده‌ای کافی برای تشکیل پنل متوازن یا تقریباً متوازن فراهم می‌کردند نگه داشته شدند. حذف کشورها عمدتاً به دلیل نبود داده یا پراکندگی شدید ناپیوسته در سری‌های زمانی صورت گرفت.

۳. حذف واحدهای نامتناسب و داده‌های پرت: برای اجتناب از اثرگذاری نامتناسب مشاهدات دارای خطای گزارش، واحدهایی با اندازه اقتصادی بسیار کوچک یا با نوسانات غیرعادی حذف شدند.

۴. نمایندگی منطقه‌ای و فراگیری: با اعمال معیارهای فوق، نمونه نهایی شامل کشورهای از مناطق جغرافیایی مختلف شد تا یافته‌ها بیشترین تعمیم‌پذیری ممکن را در چارچوب «کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط» داشته باشد.

نتیجه اجرای این چهاربند، مجموعه ۵۴ کشور بود، عددی که تعادل مناسب بین تنوع کشورها و کیفیت کامل بودن داده‌ها را فراهم می‌آورد و از منظر روش‌شناختی برای برآوردهای مبتنی بر گشتاور تعمیم‌یافته مناسب است.

۱. آلبانی، الجزیره، آرژانتین، ارمنستان، آذربایجان، بلاروس، بلژ، بوسنی و هرزگوین، بوتسوانا، برزیل، چین، کلمبیا، کاستاریکا، کوبا، دومینیکو، تووالو، اوکراین، اکوادور، السالوادور، گینه استوایی، فیجی، گابن، گرجستان، گرنادا، گواتمالا، اندونزی، ایران، عراق، جامائیکا، قزاقستان، کوزوو، لیبی، مالزی، مالدیو، جزایر مارشال، موریتانی، مکزیک، مولداوی، مغولستان، مونته‌نگرو، نامیبیا، مقدونیه شمالی، پاراگوئه، پرو، صربستان، آفریقای جنوبی، سنت‌لویس، سنت وینسنت و گرنادا، سورینام، تایلند، تونگا، ترکیه، ترکمنستان، جمهوری دومینیکن.

جدول ۲: معرفی متغیرهای تحقیق

منبع	شرح	متغیر	
بانک جهانی	ضریب نفوذ اینترنت (درصد از جمعیت)	INT	ICT
بانک جهانی	ضریب نفوذ تلفن همراه (از هر یک صد نفر)	MOB	
بانک جهانی	پهنای باند ثابت (از هر یک صد نفر)	BROD	
بانک جهانی	ضریب نفوذ تلفن ثابت	TEL	
بانک جهانی	انتشار دی اکسید کربن (کیلوگرم بر حسب تولید ناخالص داخلی)	CO ₂	
بانک جهانی	مصرف سوخت انرژی تجدیدپذیر (درصد از کل)	REC	REGT
بانک جهانی	تولید برق تجدیدپذیر (درصد از کل تولید برق)	REO	
بانک جهانی	ارزش افزوده صنعت (درصد از تولید ناخالص)	INDU	
بانک جهانی	صادرات کالای با تکنولوژی متوسط و بالا (درصد صادرات کارخانه‌ای)	MEX	
بانک جهانی	تولید ناخالص داخلی	INCO	

۳-۳. مدل گشتاور تعمیم‌یافته: چارچوب نظری و کاربرد

روش گشتاور تعمیم‌یافته یکی از تکنیک‌های قدرتمند و انعطاف‌پذیر در اقتصادسنجی نوین است که نخستین بار توسط لارس پیتر هانسن در سال ۱۹۸۲ معرفی شد. این روش عمدتاً برای برآورد مدل‌هایی به کار می‌رود که در آن‌ها فرض کلاسیک برون‌زایی متغیرهای توضیحی نقض شده و مشکلاتی نظیر درون‌زایی، ناهمسانی واریانس یا خودهمبستگی در جملات خطا وجود دارد. روش گشتاور تعمیم‌یافته بر مبنای مجموعه‌ای از شرایط گشتاور تعریف می‌شود که بیان می‌دارند امید ریاضی حاصل ضرب بین متغیرهای ابزار و خطای مدل برابر صفر است. به بیان دقیق‌تر، در این روش فرض می‌شود که متغیرهای ابزاری^۱ با خطای مدل ناهمبسته هستند، درحالی‌که ممکن است برخی متغیرهای توضیحی با خطا همبستگی داشته باشند. در عمل، به جای استفاده از امید ریاضی واقعی (که معمولاً ناشناخته است)، از میانگین نمونه‌ای شرایط گشتاور استفاده می‌شود. سپس پارامترهای مدل به گونه‌ای برآورد می‌شوند که این شرایط گشتاور تا حد امکان برآورده شوند؛ یعنی مقدار میانگین نمونه‌ای حاصل ضرب خطا در ابزارها به صفر میل کند. این امر از طریق کمینه‌سازی یک تابع هدف صورت می‌گیرد که شامل ماتریسی از وزن‌هاست و در نسخه دومرحله‌ای روش گشتاور تعمیم‌یافته، وزن‌ها بر اساس واریانس شرطی بهینه‌سازی می‌شوند. یکی از مزایای مهم روش گشتاور تعمیم‌یافته آن است که برخلاف روش‌های سنتی مانند حداقل مربعات معمولی یا حداقل مربعات دومرحله‌ای^۲، نیازمند فرض نرمال بودن توزیع جملات خطا نیست و درعین حال، در مواجهه با ناهمسانی واریانس و ساختارهای پیچیده همبستگی عملکرد قابل‌قبولی دارد. این روش به‌ویژه در داده‌های پانلی و مدل‌های دینامیک، از جمله مدل‌های آریلانو - باند، کاربرد گسترده‌ای دارد. برای اعتبارسنجی

1. Instrumental Variables
2. Two-Stage Least Squares

مدل روش گشتاور تعمیم یافته، آزمون‌هایی نظیر آزمون هانسن یا سارگان به کار می‌روند که اعتبار ابزارها و صحت شرایط گشتاور را مورد بررسی قرار می‌دهند. به علاوه، در مدل‌های پانلی، بررسی خودهمبستگی جملات خطا از طریق آزمون‌های $AR(1)$ ، $AR(2)$ ضروری است. در مجموع، روش گشتاور تعمیم یافته به عنوان یک ابزار تخمین قوی، سازگار و منعطف، جایگاه ویژه‌ای در تحلیل‌های اقتصادسنجی یافته است؛ به ویژه در مواردی که چالش‌های آماری و نقض فروض کلاسیک مانع استفاده از روش‌های ساده‌تر می‌شوند.

۳-۴. تحلیل مؤلفه‌های اصلی

تحلیل مؤلفه‌های اصلی یکی از روش‌های شناخته شده در تحلیل آماری چندمتغیره است که باهدف کاهش ابعاد داده‌ها و درعین حال حفظ بیشترین میزان اطلاعات انجام می‌شود. این روش به ویژه هنگام مواجهه با داده‌هایی با ابعاد بالا و هم خطی بین متغیرها بسیار سودمند است. تحلیل مؤلفه‌های اصلی مجموعه‌ای از متغیرهای اصلی را به مجموعه‌ای کوچک‌تر از مؤلفه‌های مستقل تبدیل می‌کند که به ترتیب، بیشترین واریانس موجود در داده‌ها را توضیح می‌دهند (Wold et al., 2021)، در این روش، متغیرهای اولیه با یکدیگر ترکیب شده و مؤلفه‌های جدیدی را تشکیل می‌دهند که هر کدام جهت جدیدی را در فضای داده‌ها تعریف می‌کنند. نخستین مؤلفه اصلی بیشترین تغییرپذیری را در داده‌ها نمایش می‌دهد. مؤلفه‌های بعدی نیز به ترتیب با حفظ استقلال از مؤلفه‌های قبلی، بخش دیگری از واریانس باقیمانده را توضیح می‌دهند. این ساختار سلسله‌مراتبی به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا تنها مؤلفه‌های مهم را نگه دارد و مؤلفه‌های کم‌اهمیت‌تر را حذف کند. نتیجه آن، ساده‌سازی ساختار داده‌ها بدون از دست دادن اطلاعات اصلی است (Abdi & Williams, 2021). در این مقاله ابتدا دو شاخص ترکیبی برای فاوا و انرژی تجدیدپذیر و به صورت زیر می‌سازیم.

با استفاده از روش مؤلفه‌های اصلی چهار شاخص موبایل، اینترنت و تلفن ثابت و پهنای باند ثابت که بیانگر شاخص فاوا هستند، تبدیل به یک شاخص ترکیبی می‌شود؛ بنابراین حداکثر چهار مؤلفه اصلی وجود خواهد داشت که با $PC1$ ، $PC2$ ، $PC3$ و $PC4$ نشان داده، و مقدار هر کدام به ترتیب ۵۱، ۵۳، ۳۸ و ۵۴ درصد از تغییرات شاخص ترکیبی فاوا در کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط را توضیح می‌دهد. باتوجه به آزمون اسکری^۱ - که در نمودار سنگ‌ریزه‌ای^۲ که در نمودار زیر آورده شده است - از بین چهار مؤلفه، مؤلفه اول بیشترین توضیح‌دهندگی تغییرات شاخص ترکیبی فاوا را دارد و گفتنی است که شاخص ترکیب بر اساس این مؤلفه ساخته می‌شود، وزن اجزای شاخص فاوا در جدول (۳) و نمودار (۱) آورده شده است.

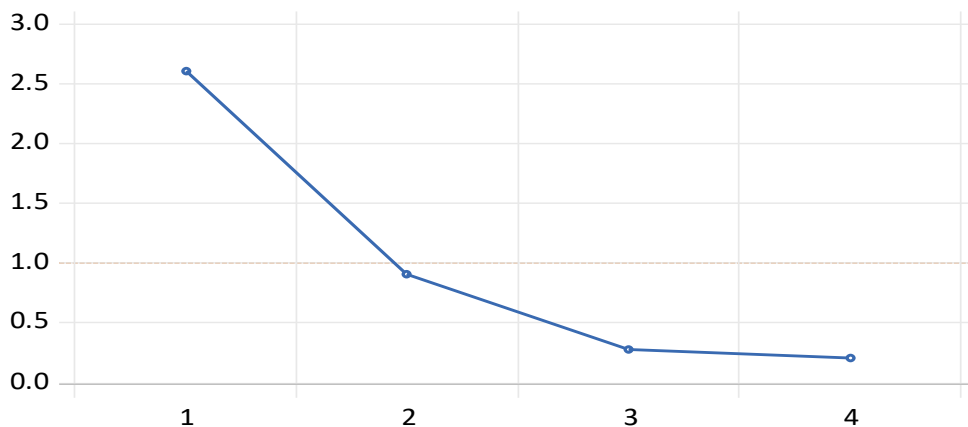
جدول ۳: وزن اجزای شاخص فاوا بر اساس $PC1$

متغیر	تلفن ثابت	موبایل	اینترنت	پهنای باند	درصد توضیح‌دهندگی
$PC1$	۳۸٪	۵۱٪	۵۳٪	۵۴٪	۶۵

منبع: یافته‌های پژوهش

1. Scree Test
2. Scree Plot

Scree Plot (Ordered Eigenvalues)

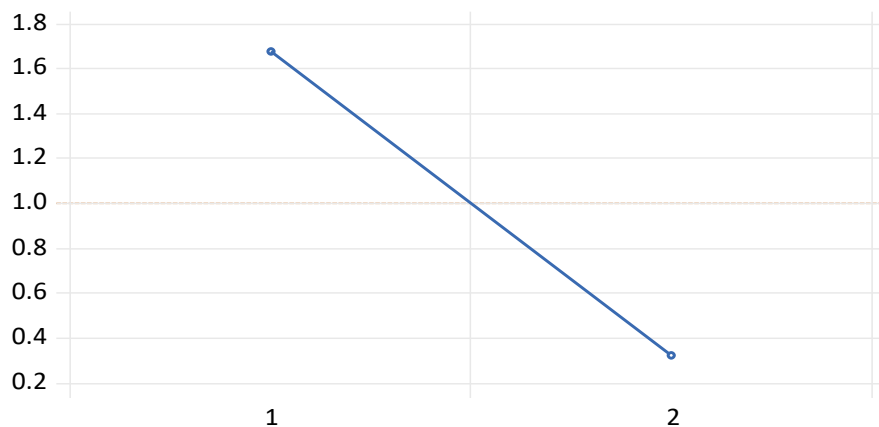


شکل ۱: نمودار مؤلفه‌های شاخص ترکیبی فاوا

منبع: یافته‌های پژوهش

در ادامه دو شاخص مصرف انرژی تجدیدپذیر و تولید انرژی تجدیدپذیر الکتریسیته به یک شاخص تبدیل می‌شود که به صورت ذیل است. وزن اجزای شاخص فاوا در جدول (۴) و نمودار (۲) آورده شده است.

Scree Plot (Ordered Eigenvalues)



شکل ۲: نمودار مؤلفه‌های شاخص ترکیبی فاوا

منبع: یافته‌های پژوهش

جدول ۴: وزن اجزای شاخص انرژی تجدیدپذیر بر اساس PC1

متغیر	مصرف انرژی تجدیدپذیر	تولید برق تجدیدپذیر	درصد توضیح‌دهندگی
PC1	۳۸٪	۵۴٪	۸۳

منبع: یافته‌های پژوهش

۴. یافته‌های پژوهش

۴-۱. یافته‌های توصیفی

به‌منظور بررسی ویژگی‌های اولیه داده‌ها و ایجاد درک مقدماتی از ساختار متغیرها، ابتدا آماره‌های توصیفی متغیرهای مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ایویوز محاسبه گردید. این آماره‌ها شامل شاخص‌هایی همچون میانگین، میانه، انحراف معیار، حداقل و حداکثر مقادیر است. نتایج یافته‌های توصیفی داده‌های پژوهش در جدول ۵ گزارش شده است.

جدول ۵: آماره‌های توصیفی متغیرهای پژوهش

متغیرها	میانگین	میانه	حداکثر	حداقل	انحراف معیار
CO2	-۰/۵۸۴۲	-۰/۷۲۳۷	۱/۶۴۳۷	-۲/۱۷۹۹	۰/۷۳۲۳
ICT	۵۶/۵۷۰۳	۵۲/۷۲۶۲	۱۸۱/۷۵۴۸	۰/۰۰۰۰	۴۵/۱۳۶۱
INDU	۲۹/۵۷۴۸	۲۶/۸۰۶۹	۹۲/۷۶۳۸	۵/۴۰۳۱	۱۳/۴۵۱۷
REGT	۲۸/۶۷۴۷	۱۷/۴۰۷۲	۱۲۰/۷۳۱۹	۰/۰۰۰۰	۳۱/۲۲۳۴
MEX	۲۶/۴۴۴۷	۲۳/۲۴۹۸	۸۱/۷۲۹۸	۰/۰۰۰۰	۲۰/۸۱۰۱
INCO	۸/۲۹۸۲	۸/۳۰۷۳	۹/۳۹۴۸	۴/۸۵۹۳	۰/۴۸۹۶

منبع: خروجی نرم‌افزار ایویوز

آماره‌های توصیفی جدول ۵ نشان می‌دهد که میانگین انتشار دی‌اکسید کربن منفی است و این بیانگر کاهش خالص انتشار دی‌اکسید کربن در دوره مطالعه است. دامنه تغییرات و انحراف معیار پایین این متغیر نشان می‌دهد که نوسانات انتشار دی‌اکسید کربن در کشورهای نمونه نسبتاً محدود بوده است. متغیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بیشترین دامنه تغییرات و انحراف معیار را دارد که بیانگر تفاوت چشمگیر سطح توسعه فاوا میان کشورها و دوره‌هاست. ارزش افزوده بخش صنعت با میانگین متوسط و دامنه تغییرات وسیع نشان می‌دهد که ساختار صنعتی کشورها بسیار متنوع است و سهم صنعت در تولید ناخالص داخلی آنها یکسان نیست. مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر میانگین پایین اما دامنه تغییرات بالایی دارد و این موضوع بیانگر تفاوت معنادار کشورها در استفاده از منابع انرژی پاک است. صادرات کالاهای با فناوری متوسط و بالا نیز دامنه نوسانات گسترده‌ای دارد که نشان‌دهنده شکاف میان کشورها در سطح رقابت‌پذیری فناورانه و ساختار صادرات است. تولید ناخالص داخلی توزیعی متقارن و کمترین انحراف معیار را دارد که بیانگر همگرایی نسبی در سطح فعالیت اقتصادی کشورهای مورد مطالعه است. به‌طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد که متغیرهای کلیدی پژوهش، به‌ویژه توسعه فاوا، سهم صنعت، مصرف انرژی تجدیدپذیر و صادرات فناورانه، دارای ناهمگنی بالایی بین کشورها هستند. این ناهمگنی ضرورت استفاده از مدل‌های پانل و لحاظ اثرات خاص کشورها را برای دستیابی به برآورد دقیق تأثیر آنها بر انتشار دی‌اکسید کربن برجسته می‌کند.

۴-۲. آزمون ریشه واحد

بیش از برآورد مدل‌های اقتصادسنجی مبتنی بر داده‌های پانلی، بررسی مانایی متغیرها ضروری است، زیرا وجود روند یا ساختار نامانا در داده‌ها می‌تواند منجر به نتایج تورش دار و رگرسیون کاذب شود. در این مقاله، برای آزمون وجود ریشه واحد، از روش لوین - لین - چو^۱ استفاده گردید که به طور ویژه برای داده‌های تابلویی طراحی شده و یکی از آزمون‌های کلاسیک در این حوزه محسوب می‌شود. روش لوین چاو ابتدا داده‌ها را با حذف اثرات مقطعی و روند زمانی مشترک تصفیه کرده، سپس آماره t تعدیل شده را برای ضریب خودرگرسیون برآورد می‌کند. معناداری منفی این آماره در سطوح اطمینان متداول (یک، پنج یا ده درصد) منجر به رد فرض صفر و تأیید مانایی متغیر می‌گردد.

در این مقاله باتوجه به نتایج آزمون ریشه واحد در جدول (۶)، نشان می‌دهد که متغیرهای CO_2 و $INDU$ در سطح خود مانا هستند، درحالی که متغیرهای $REGT$ ، ICT ، MEX و $INCO$ پس از تفاضل گیری مرتبه اول مانا می‌شوند و دارای یکپارچگی مرتبه اول هستند. این ترکیب متغیرهای مانا در سطح و مانا با تفاضل مرتبه اول ضرورت بررسی هم انباشتگی پانلی و استفاده از روش‌های مدل سازی مناسب مانند روش گشتاورهای تعمیم یافته را نشان می‌دهد تا بتوان اثر بلندمدت و کوتاه مدت فاوا، ساختار صنعتی، مصرف انرژی تجدیدپذیر و صادرات فناورانه بر انتشار دی اکسیدکربن را به طور دقیق برآورد کرد.

جدول ۶: نتایج آزمون ریشه واحد برای متغیرهای تحقیق

نام متغیر	مقدار آماره	مقدار احتمال	نتیجه
CO_2	-۳/۲۳۴۳	۰/۰۰۰۶	تأیید مانایی در سطح
ICT	-۱۱/۴۰۳۵	۰/۰۰۰۰	تأیید مانایی با تفاضل مرتبه اول
$INDU$	-۴/۰۳۵۶	۰/۰۰۰۰	تأیید مانایی در سطح
$REGT$	-۲۴/۰۳۶۳	۰/۰۰۰۰	تأیید مانایی با تفاضل مرتبه اول
MEX	-۲۱/۷۱۲۹	۰/۰۰۰۰	تأیید مانایی با تفاضل مرتبه اول
$INCO$	-۱۵/۴۹۸۶	۰/۰۰۰۰	تأیید مانایی با تفاضل مرتبه اول

منبع: خروجی نرم افزار ایویوز

۴-۳. آزمون هم انباشتگی (هم جمعی)

پس از تعیین درجه انباشتگی متغیرها و اطمینان از هم درجه بودن آن‌ها، گام بعدی بررسی وجود رابطه تعادلی بلندمدت بین متغیرهاست. در این مقاله، برای آزمون هم جمعی داده‌های پانلی از روش کائو (۱۹۹۹) استفاده شد. این آزمون بر اساس رویکرد انگل-گرنجر^۲ توسعه یافته و فرض می‌کند ضرایب متغیرها در بین مقاطع همگن هستند.

1. Levin-Lin-Chu

2. Engle-Granger

جدول ۷: نتایج آزمون هم انباشتگی

مقدار احتمال	مقدار آماره t	نام آزمون
۰/۰۱۸۱	-۲/۰۹۴۸	آزمون هم انباشتگی باقیمانده‌های کائو

منبع: خروجی نرم افزار ایویوز

آزمون کائو معمولاً بر اساس آماره دیکی فولر تعدیل شده گزارش می شود. اگر مقدار آماره آزمون منفی و از نظر آماری معنادار باشد، فرض صفر رد شده و وجود رابطه هم جمعی بین متغیرها تأیید می گردد. باتوجه به مقادیر جدول (۷)، نتایج آزمون کائو نشان داد که مقدار آماره دیکی فولر تعدیل شده منفی و در سطح اطمینان ۱ درصد معنادار است؛ بنابراین، فرض صفر رد شده و می توان نتیجه گرفت که بین متغیرهای مدل یک رابطه تعادلی بلندمدت پایدار وجود دارد. این یافته، استفاده از مدل های پویا نظیر مدل تصحیح خطا یا مدل آردل پانلی را برای تحلیل رفتار کوتاه مدت و بلندمدت متغیرها موجه می سازد.

۴-۴. بررسی هم خطی متغیرهای توضیحی و مستقل

یکی از مراحل مهم پیش از برآورد مدل های اقتصادسنجی، بررسی وجود هم خطی میان متغیرهای توضیحی است. هم خطی شدید باعث افزایش واریانس ضرایب برآوردی، کاهش معناداری آماری و ناپایداری نتایج می شود. برای شناسایی این مشکل، در این مقاله از تحلیل کوواریانس به روش عادی در نرم افزار ایویوز استفاده گردید. این روش با محاسبه ماتریس کوواریانس و ضرایب همبستگی پیرسون بین جفت متغیرهای توضیحی، میزان وابستگی خطی میان آن ها را مشخص می کند. مقادیر بالای همبستگی (به ویژه بالاتر از ۰/۸ یا ۰/۹) نشانگر احتمال بالای وجود هم خطی است و نیازمند توجه ویژه در انتخاب متغیرها یا اصلاح مدل است.

در مقاله حاضر، ابتدا ماتریس کوواریانس و سپس ماتریس همبستگی بین متغیرهای مستقل محاسبه شد. بررسی ضرایب همبستگی نشان داد که اکثر مقادیر، جدول (۸)، در محدوده قابل قبول (کمتر از ۰/۸) قرار دارند و بنابراین، خطر هم خطی شدید در مدل پایین است. این نتیجه اطمینان می دهد که ضرایب برآوردی مدل، از پایداری و قابلیت تفسیر کافی برخوردار هستند و اثرات متغیرهای توضیحی به صورت مستقل قابل شناسایی است.

جدول ۸: ماتریس همبستگی بین متغیرهای توضیحی

ضریب همبستگی (احتمال)	ICT	INDU	REGT	MEX	INCO
ICT	۱/۰۰۰ (---)				
INDU	۰/۱۹۷- (۰/۰۰۰)	۱/۰۰۰ (---)			
REGT	۰/۲۶۴ (۰/۰۰۰)	۰/۱۵۴- (۰/۰۰۰)	۱/۰۰۰ (---)		
MEX	۰/۰۰۷- (۰/۴۸۶)	۰/۲۲۶- (۰/۰۰۰)	۰/۰۹۵- (۰/۰۰۹)	۱/۰۰۰ (---)	
INCO	۰/۰۳۰ (۰/۰۴۸)	۰/۲۳۳- (۰/۰۰۰)	۰/۰۴۹- (۰/۱۷۷)	۰/۳۸۰- (۰/۰۰۰)	۱/۰۰۰ (---)

منبع: خروجی نرم افزار ایویوز

به‌طور کلی، استفاده از تحلیل کوواریانس به روش عادی به‌عنوان یک آزمون مقدماتی، ابزاری کارآمد برای ارزیابی هم‌خطی پیش از اجرای روش‌های پیچیده‌تر همچون ضریب تورم واریانس^۱ محسوب می‌شود. این گام نه‌تنها مانع از بروز مشکلات برآوردی می‌گردد، بلکه باعث افزایش اعتبار نتایج و استنتاج‌های آماری پژوهش می‌شود.

۴-۵. برآورد مدل رگرسیونی و آزمون فرضیه

برای آزمون فرضیات، از روش تحلیل رگرسیون با استفاده از نرم‌افزار ایویوز استفاده می‌شود؛ لذا لازم است ابتدا مدل رگرسیونی و ضرایب رگرسیون برآورد و آنگاه با تفسیر خروجی‌های حاصله، فرضیات تحقیق آزمون گردد. باتوجه‌به ساختار داده‌ها، پیش از برآورد نهایی مدل، لازم است تعیین شود که آیا داده‌ها از نوع پانل هستند یا می‌توان آن‌ها را به‌صورت ترکیبی^۲ برآورد کرد. به بیان دیگر، باید مشخص گردد که آیا مدل دارای اثرات ثابت یا اثرات تصادفی است. برای این منظور، در گام نخست از آزمون اف - لیمر استفاده شد. این آزمون با مقایسه برآورد مدل مقطعی ترکیبی با مدل دارای اثرات ثابت، تصمیم‌گیری در مورد پذیرش یا رد فرضیه صفر (مبنی بر برتری مدل پولد) را امکان‌پذیر می‌سازد. در صورتی که نتایج آزمون اف - لیمر وجود اثرات ثابت را تأیید نماید، در گام بعد از آزمون هاسمن^۳ برای انتخاب بین اثرات ثابت و اثرات تصادفی استفاده می‌شود. این فرایند تضمین می‌کند که روش برآورد انتخابی، منطبق با ویژگی‌های داده‌ها بوده و نتایج به‌دست‌آمده از اعتبار و دقت لازم برخوردار باشند.

۴-۵-۱. بررسی مدل تجمیعی یا پانل

در این مقاله، آزمون اف - لیمر با استفاده از نرم‌افزار ایویوز اجرا گردید. نتایج، جدول (۹)، نشان داد که مقدار آماره F در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است و در نتیجه، فرض صفر مبنی بر کفایت مدل تجمیعی رد شد؛ بنابراین، استفاده از مدل پانل با دارای اثرات یا تصادفی برای برآورد روابط بین متغیرها انتخاب گردید. در صورتی که بر اساس نتایج آزمون اف لیمر برای هر یک از فرضیه‌ها، استفاده از روش داده‌های پانل مورد تأیید واقع شود، به‌منظور این که مشخص گردد کدام روش (اثرات ثابت و یا اثرات تصادفی) برای برآورد مناسب‌تر است (تشخیص ثابت یا تصادفی بودن تفاوت‌های واحدهای مقطعی) از آزمون هاسمن استفاده می‌شود. در این آزمون، تأیید فرض H_0 به معنای برتری مدل با اثرات تصادفی است (بین اثرات فردی و متغیرهای توضیحی همبستگی وجود ندارد) و تأیید فرض H_1 به معنای برتری مدل با اثرات ثابت (بین اثرات فردی و متغیرهای توضیحی همبستگی وجود دارد) است. باتوجه‌به نتایج جدول (۹) و اینکه مقدار احتمال آزمون هاسمن کمتر از ۰/۰۵ و معنادار است، در نتیجه این فرض آماری که مدل دارای اثرات تصادفی باشد، رد می‌شود؛ بنابراین در نهایت نتیجه حاصل می‌شود که مدل دارای اثرات ثابت بر روی مقاطع است و با این تنظیمات، مدل رگرسیون برآورد می‌گردد.

1. Variance Inflation Factor

2. Pooled

3. Hausman Test

جدول ۹: نتیجه آزمون اف لیمر و آزمون هاسمن

نوع آزمون	آماره	مقدار آماره	مقدار احتمال	نتیجه
آزمون اف لیمر	T	۱۷۷/۳۳۵۱	۰/۰۰۰۰	مدل پانل (دارای اثرات ثابت یا تصادفی) است
آزمون هاسمن	χ^2	۳۷/۴۳۴۶	۰/۰۰۰۰	مدل دارای اثرات تصادفی نیست (اثرات ثابت دارد)

منبع: خروجی نرم افزار ایویوز

۴-۵-۲. برآورد گشتاور تعمیم یافته

پس از تعیین نوع مدل پانل و برآورد اولیه با استفاده از مدل های اثرات ثابت یا تصادفی، برای برآورد دقیق و کنترل مشکلات هم خطی و آلایندهی متغیرهای توضیحی، از روش گشتاور تعمیم یافته استفاده می شود. این روش یکی از تکنیک های قدرتمند اقتصادسنجی برای داده های پانلی پویا است و امکان برآورد ضرایب در حضور متغیرهای توضیحی داخلی و خودهمبستگی باقیمانده ها را فراهم می کند.

جدول ۱۰: برآورد گشتاور تعمیم یافته برای دی اکسید کربن

متغیر	ضریب	انحراف معیار	احتمال	آماره t	مقدار
دی اکسید کربن	۰/۶۴۳۱	۰/۰۱۴۲	۰/۰۰۰۰	۴۵/۱۱۹۳	-
فاوا	-۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۸	-۳/۶۳۰۳	-
صنعت	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۷	۰/۰۴۳۰	۲/۰۸۹۹	-
انرژی تجدیدپذیر	-۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۳	-۳/۹۹۲۸	-
درآمد	۰/۰۳۸۱	۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۴۸	۲/۵۴۶۴	-
صادرات کالای با تکنولوژی بالا	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۲	۰/۱۲۵۱	-۱/۵۶۶۴	-
آماره سارگان	-	-	-	-	۰/۰۹۱۷۶

منبع: خروجی نرم افزار ایویوز

در این مقاله، پس از آزمون اثرات ثابت و تصادفی و انتخاب مدل مناسب، روش گشتاور تعمیم یافته با استفاده از نرم افزار ایویوز برای برآورد نهایی ضرایب مدل به کار گرفته شد. همان طور که در جدول (۱۰) مشاهده می شود، مقادیر احتمال آزمون سارگان^۱ و هانسن^۲ بزرگتر از سطح خطای ۵ درصد هستند؛ بنابراین فرضیه صفر مبنی بر «عدم همبستگی ابزارها با جمله اخلاص» رد نمی شود. این نتیجه نشان می دهد ابزارهای انتخاب شده معتبر بوده و برآوردها دچار تورش ناشی از شناسایی ضعیف ابزارها نیستند. افزون بر این، مقادیر نزدیک به هم این دو آزمون نشان می دهد که مدل از مشکل استفاده بیش از حد از ابزارها نیز رنج نمی برد. بدین ترتیب می توان گفت که نتایج حاصل از برآورد گشتاور تعمیم یافته از نظر اعتبار آماری قابل اتکا هستند و یافته های پژوهش از پشتوانه روش شناختی لازم برخوردارند.

1. Sargan
2. Hansen

۴-۵-۳. تحلیل نتایج تخمین مدل

نتایج جدول ۱۰ نشان می‌دهد که ضریب تولید ناخالص داخلی به توان دو منفی و معنادار است که حاکی از وجود رابطه غیرخطی و وارونه U بین درآمد و انتشار دی‌اکسیدکربن در کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط است. به عبارت دیگر، در مراحل ابتدایی توسعه، افزایش درآمد با افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن همراه است، اما پس از رسیدن به یک نقطه عطف درآمدی، رشد اقتصادی موجب کاهش انتشار می‌شود. متغیرهای کنترل‌کننده مانند مصرف انرژی فسیلی و سهم صنعت اثر افزایشی، و مصرف انرژی تجدیدپذیر و صادرات کالاهای با فناوری بالا اثر کاهشی بر انتشار دی‌اکسیدکربن دارند. همچنین، فناوری اطلاعات و ارتباطات اثر دوگانه داشته و می‌تواند هم افزایش‌دهنده و هم کاهش‌دهنده انتشار باشد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر، ارتقای بهره‌وری صنعتی و توسعه فناوری‌های کم‌کربن می‌تواند نقطه عطف درآمدی را سریع‌تر محقق کرده و روند کاهش انتشار در بخش نزولی منحنی کوزنتس زیست‌محیطی را تسریع کند.

ضریب فناوری اطلاعات و ارتباطات منفی و معنادار است که نشان می‌دهد توسعه این فناوری در کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط به کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن منجر می‌شود. فاوا می‌تواند با ارتقای کارایی انرژی، بهبود فرایندهای تولید و کاهش هدررفت انرژی، اثر کاهنده قابل توجهی بر فشار زیست‌محیطی داشته باشد. از دیدگاه نظری، این نتایج با چارچوب منحنی کوزنتس زیست‌محیطی همسو هستند، زیرا کشورهایی که درآمدشان در سطح بالاتر قرار دارد، می‌توانند با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، روند انتشار دی‌اکسیدکربن را کنترل کرده و وارد مرحله کاهش انتشار در بخش نزولی منحنی شوند. به بیان دیگر، فاوا نه تنها موجب افزایش کارایی اقتصادی می‌شود، بلکه به عنوان یک ابزار راهبردی برای کاهش انتشار در مرحله پس از نقطه عطف درآمدی عمل می‌کند؛ بنابراین، سیاست‌هایی که توسعه فناوری اطلاعات و ارتباطات را همراه با سرمایه‌گذاری در نوآوری‌های دیجیتال و فناوری‌های سبز ترویج می‌کنند، می‌توانند نقش مؤثری در مدیریت انتشار دی‌اکسیدکربن ایفا کرده و دستیابی به کاهش آلودگی نیازمند تلفیق فناوری با سیاست‌های انرژی و محیط‌زیست است.

افزایش تولید ناخالص داخلی اثر مثبت و معناداری بر انتشار دی‌اکسیدکربن دارد. این یافته بیانگر آن است که کشورهای مورد بررسی هنوز در مرحله‌ای از توسعه قرار دارند که رشد اقتصادی عمدتاً بر پایه مصرف انرژی‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی پرکربن استوار است. چنین نتیجه‌ای با شواهد مطالعات گذشته همخوانی دارد که نشان می‌دهند به طور میانگین در بسیاری از اقتصادها هنوز جداسازی کامل رشد اقتصادی از انتشار CO₂ محقق نشده است (Scientific Reports, 2024). در چارچوب نظری منحنی کوزنتس زیست‌محیطی نیز قابل توضیح است، چراکه در سطوح پایین و متوسط درآمد، افزایش درآمد معمولاً با رشد انتشار همراه است و تنها پس از عبور از یک نقطه عطف می‌توان انتظار کاهش آلودگی را داشت (Destek, 2020). علاوه بر این، نقش فاوا می‌تواند این رابطه را تشدید یا تضعیف کند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که بخش فاوا از یک سو با مصرف انرژی دیتاسنترها و زیرساخت‌های دیجیتال می‌تواند سهم قابل توجهی در انتشار داشته باشد، اما از سوی دیگر با ارتقای کارایی انرژی و دیجیتالی‌سازی فرایندها قادر است شدت کربن را کاهش دهد (Wang et al., 2024)؛ بنابراین

یافته‌ها نه تنها تأییدی بر وجود رابطه افزایشی میان تولید ناخالص داخلی و انتشار دی اکسید کربن است، بلکه اهمیت سیاست گذاری در گذار انرژی و مدیریت پایدار فاوا را برای تغییر جهت این رابطه برجسته می‌سازد. تحلیل مدل نشان می‌دهد که ضریب صادرات کالاهای با فناوری بالا منفی اما غیرمعنادار است که بیانگر آن است که در حال حاضر توسعه صادرات فناوری محور تأثیر قابل توجهی بر کاهش انتشار دی اکسید کربن ندارد؛ بنابراین، در کوتاه مدت این بخش نقش محدودی در کاهش فشار زیست محیطی ایفا می‌کند، اما پتانسیل آن برای اثرگذاری در بلندمدت و همراه با توسعه فناوری و نوآوری‌های سبز وجود دارد.

بر اساس نتایج حاصله از برآورد مدل رشد بخش صنعت در کشورهای مورد مطالعه اثر مثبت و معناداری بر انتشار دی اکسید کربن دارد. این یافته تأییدی بر این نکته است که در مراحل فعلی توسعه، صنعتی شدن همچنان بر پایه مصرف انرژی‌های فسیلی و فرایندهای پر کربن استوار است. مطالعات اخیر نیز نشان می‌دهند که در اغلب اقتصادهای نوظهور، صنعتی سازی به دلیل وابستگی به انرژی‌های آلاینده موجب افزایش انتشار دی اکسید کربن می‌شود (Zhang et al., 2022)؛ بنابراین، حرکت به سمت صنایع دانش بنیان، سرمایه گذاری در نوآوری سبز و ارتقای کارایی انرژی می‌تواند مسیر این رابطه را تغییر داده و در بلندمدت منجر به کاهش اثر منفی صنعت بر محیط زیست شود (Wang & Dong, 2023).

افزایش نگرانی‌های زیست محیطی و فشارهای جهانی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای، کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط را به سمت توسعه و گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر سوق داده است. طبق نتایج برآورد مدل، متغیر مصرف انرژی تجدیدپذیر دارای ضریب منفی و معنادار است. این بدان معناست که افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط، منجر به کاهش انتشار دی اکسید کربن شده است. این نتیجه کاملاً قابل انتظار است؛ زیرا انرژی‌های تجدیدپذیر (خورشیدی، بادی و...) برخلاف سوخت‌های فسیلی، فاقد یا دارای آلاینده‌گی بسیار ناچیز هستند و جایگزینی آن‌ها با سوخت‌های آلاینده، شدت انتشار کربن را کاهش می‌دهد. این نتیجه با شواهد مطالعات گذشته نیز همخوانی دارد که نشان می‌دهند توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر یکی از مهم ترین ابزارهای دستیابی به رشد سبز و تحقق اهداف کاهش انتشار در توافق نامه پاریس است (Apergis & Payne, 2021; Uzar, 2022; Wang et al., 2023)؛ بنابراین، تقویت سیاست‌های حمایتی از سرمایه گذاری در بخش انرژی تجدیدپذیر و ارتقای زیرساخت‌های مرتبط، می‌تواند به تغییر ساختار انرژی و حرکت به سمت مسیر پایدارتر کمک شایانی کند.

۵. نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱. نتیجه گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که متغیرهای فناوری اطلاعات و ارتباطات، انرژی‌های تجدیدپذیر، فعالیت صنعتی، درآمد و صادرات کالاهای با فناوری بالا تأثیر قابل توجهی بر انتشار دی اکسید کربن دارند. ابتدا، اثر توسعه فناوری اطلاعات و ارتباطات بر انتشار دی اکسید کربن منفی و معنادار بود که بیانگر نقش کاهش دهنده فناوری‌های دیجیتال بر آلاینده‌گی است. این اثر می‌تواند از طریق افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی

و تسهیل اجرای راهکارهای سبز تحقق یابد. یافته‌های مشابهی در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است؛ به‌عنوان مثال، ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که توسعه فاوا می‌تواند با بهبود مدیریت منابع و کاهش مصرف انرژی، اثر مهمی در کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن داشته باشد. این نتایج نشان می‌دهند که فناوری اطلاعات و ارتباطات نه تنها ابزاری برای رشد اقتصادی و توسعه اجتماعی است، بلکه می‌تواند به طور مستقیم در حفاظت از محیط‌زیست نقش مؤثری ایفا کند.

نتایج پژوهش همچنین نشان داد که انرژی‌های تجدیدپذیر تأثیر منفی و معناداری بر انتشار دی‌اکسیدکربن دارند، این یافته بیانگر اثر مثبت منابع انرژی پاک در کاهش آلاینده‌گی است و با مطالعات بین‌المللی همسو است. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (۲۰۲۱)، افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی کشورها به طور مستقیم باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. حسن و همکاران (۲۰۲۴)، به بررسی تأثیر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر بر کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در کشورهای سازمان همکاری و توسعه اقتصادی پرداخته و یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در این کشورها با کاهش قابل توجهی در انتشار دی‌اکسیدکربن همراه بوده است. این مطالعه بر اهمیت انتقال به سمت منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر در راستای کاهش آلاینده‌گی‌های زیست‌محیطی تأکید دارد.

این نتایج اهمیت سیاست‌گذاری در جهت افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را در چارچوب توسعه پایدار برجسته می‌سازد. در مقابل، فعالیت صنعتی و درآمد تأثیر مثبت و معناداری بر انتشار دی‌اکسیدکربن داشتند، این نتایج نشان می‌دهد که رشد صنعتی و اقتصادی، به‌ویژه در مراحل اولیه توسعه، می‌تواند فشار قابل توجهی بر محیط‌زیست وارد کند. یافته‌ها با نظریه منحنی کوزنتس زیست‌محیطی همسو است و مطالعات پیشین نشان داده‌اند که افزایش رشد اقتصادی و صنعتی شدن می‌تواند منجر به افزایش مصرف انرژی و در نتیجه افزایش انتشار آلاینده‌ها شود (Grossman & Krueger, 1995). تأثیر صادرات کالاهای با فناوری بالا منفی اما غیرمعنادار بود که نشان‌دهنده اثر محدود این متغیر در کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن است. همچنین، اعتبار ابزارهای استفاده‌شده توسط آزمون سارگان تأیید شد (آماره = ۰/۹۱۷۶) که نشان می‌دهد برآوردهای ارائه‌شده قابل اعتماد هستند و نتایج پژوهش از استحکام آماری مناسبی برخوردارند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که توسعه فناوری اطلاعات و ارتباطات و افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر نقش مؤثری در کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن دارند، درحالی‌که رشد صنعتی و درآمدی همچنان فشار افزاینده بر محیط‌زیست ایجاد می‌کند. این یافته‌ها بر اهمیت اتخاذ سیاست‌های جامع تأکید دارند؛ سیاست‌هایی که با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، توسعه انرژی‌های پاک و مدیریت هوشمند رشد صنعتی و اقتصادی، می‌توانند به کاهش آلاینده‌گی و تحقق توسعه پایدار کمک کنند. نتایج پژوهش با مطالعات پیشین همسو بوده و نشان‌دهنده ضرورت تلفیق رویکردهای فناوریانه، انرژی پاک و سیاست‌گذاری اقتصادی برای مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی و بهبود کیفیت زندگی جوامع است. هدف این مقاله ارزیابی آثار فناوری اطلاعات و ارتباطات بر کیفیت محیط‌زیست (انتشار دی‌اکسیدکربن) در کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط با بهره‌گیری از روش گشتاورهای تعمیم‌یافته در دوره

زمانی ۱۹۹۵-۲۰۲۲ است که نشان می‌دهد کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در کشورهای با درآمد بالاتر از متوسط مستلزم ترکیبی از توسعه فاوا، سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر، اصلاح ساختار صنعتی و سیاست‌های زیست‌محیطی هماهنگ است. رشد اقتصادی به‌تنهایی نمی‌تواند عامل کاهش آلودگی باشد و دستیابی به بخش نزولی منحنی کوزنتس زیست‌محیطی نیازمند سیاست‌گذاری یکپارچه و مبتنی بر شواهد است.

۵-۲. پیشنهادها

باتوجه به رشد روزافزون استفاده از فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات در تمام ابعاد زندگی فردی، اجتماعی و اقتصادی، توجه به تأثیرات زیست‌محیطی این فناوری‌ها، به‌ویژه در زمینه انتشار گازهای گلخانه‌ای، بیش‌ازپیش ضروری است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که فاوا می‌تواند نقش مؤثری در کاهش انتشار دی‌اکسید کربن ایفا کند؛ هرچند خود مصرف‌کننده انرژی است، اما از طریق دیجیتالی‌سازی فرایندها، بهینه‌سازی مصرف منابع و افزایش بهره‌وری انرژی در سایر بخش‌ها، اثر کاهنده قابل‌توجهی بر فشار زیست‌محیطی دارد. براین اساس، مجموعه‌ای از اقدامات سیاستی، فنی، فرهنگی و تحقیقاتی باید به طور هماهنگ طراحی و اجرا شود.

۱. سیاست‌های ملی و اقتصادی:

در سطح سیاست‌گذاری، لازم است چارچوبی ملی برای توسعه پایدار فاوا طراحی شود که در آن اصول کاهش کربن در تدوین مقررات، استانداردها و مشوق‌های اقتصادی لحاظ گردد. دولت‌ها می‌توانند با تدوین استانداردهای اجباری مصرف انرژی برای تجهیزات دیجیتال، الزام استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در مراکز داده و شبکه‌های مخابراتی، و اعطای تسهیلات مالی به کسب‌وکارهای فناوری‌محور سبز، زیرساخت‌های قانونی و اقتصادی لازم برای حرکت به‌سوی فناوری‌های کم‌کربن را فراهم کنند. ایجاد کارگروه‌های تخصصی بین‌بخشی میان نهادهای فناوری، انرژی و محیط‌زیست نیز هماهنگی لازم در تدوین سیاست‌ها را تضمین خواهد کرد.

۲. اقدامات فنی و زیرساختی:

تمرکز بر طراحی و پیاده‌سازی زیرساخت‌های دیجیتال با بهره‌وری بالای انرژی ضروری است. مراکز داده باید با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین خنک‌سازی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و توزیع هوشمند جغرافیایی، مصرف انرژی خود را کاهش دهند. توسعه نرم‌افزارها و الگوریتم‌های بهینه، تولید تجهیزات کم‌مصرف با قابلیت بازیافت، و استفاده گسترده از رایانش ابری و مجازی‌سازی از دیگر ابزارهای کلیدی کاهش مصرف منابع در سطوح مختلف فاوا محسوب می‌شوند.

۳. ابعاد فرهنگی و رفتاری:

تغییر الگوهای کاری و مصرف کاربران نقش مهمی در اثرگذاری بلندمدت فاوا دارد. ترویج دورکاری، جلسات مجازی، آموزش آنلاین و خدمات دولت الکترونیک می‌تواند به کاهش تردهای غیرضروری، مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شود. ارتقای سواد دیجیتال زیست‌محیطی از طریق آموزش در مدارس، دانشگاه‌ها و رسانه‌ها نیز نگرش جامعه را نسبت به نقش فناوری در حفظ محیط‌زیست بهبود می‌بخشد.

۴. پژوهش و نوآوری:

تقویت پژوهش‌های بین‌رشته‌ای در زمینه پایش، ارزیابی و مدل‌سازی اثرات زیست‌محیطی فاوا، توسعه شاخص‌های ملی برای اندازه‌گیری ردپای کربن دیجیتال و استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی برای تحلیل و بهینه‌سازی مصرف انرژی، می‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر و آینده‌نگرانه‌تر در این حوزه کمک کند. به‌طور کلی، فناوری اطلاعات و ارتباطات اگر به‌درستی هدایت شود، نه تنها تهدید زیست‌محیطی نیست، بلکه می‌تواند یکی از مؤثرترین ابزارها برای گذار به اقتصاد کم‌کربن، توسعه پایدار و مقابله با تغییرات اقلیمی باشد. تحقق این هدف نیازمند نگاه چندبُعدی، اقدام هماهنگ و تعهد جمعی تمامی ذی‌نفعان، از سیاست‌گذاران و طراحان فناوری تا کاربران نهایی است.

۵-۳. محدودیت‌های پژوهش

این پژوهش با چند محدودیت همراه بوده است. نخست، کیفیت و دسترسی به داده‌های مرتبط با شاخص‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات در برخی کشورها محدود بوده و این امر می‌تواند بر دقت نتایج اثرگذار باشد. دوم، ناهمگنی ساختاری، نهادی و اقتصادی میان کشورها ممکن است بر تعمیم‌پذیری یافته‌ها تأثیر بگذارد. سوم، دوره زمانی انتخاب‌شده تمامی تحولات فناورانه و سیاستی اخیر را به طور کامل پوشش نمی‌دهد؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با استفاده از داده‌های دقیق‌تر، رویکردهای منطقه‌ای یا مقایسه‌ای، و دوره‌های زمانی طولانی‌تر انجام شوند تا نتایج جامع‌تر و قابل‌اتکاتری به دست آید.

توضیحات تکمیلی

مشارکت نویسندگان

این مقاله برگرفته از رساله دکتری، **پرویز وفادار** در رشته اقتصاد ایران است که تحت راهنمایی دکتر محمود محمودزاده و با مشاوره دکتر صالح قویدل در گروه اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد فیروزکوه انجام شده است.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع در این پژوهش وجود ندارد.

حامی مالی

نویسندگان هیچ‌گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

شناسه ارکید (ORCID)

<https://orcid.org/0009-0004-8597-1881>

<https://orcid.org/0000-0002-5844-8604>

<https://orcid.org/0000-0003-0851-9969>

پرویز وفادار 

محمود محمودزاده 

صالح قویدل 

منابع و مأخذ

- ارباب، حمیدرضا و شعبانی، اسماعیل. (۱۳۹۶). تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر آلودگی‌های زیست‌محیطی در کشورهای D8. فصلنامه مطالعات مدیریت فناوری اطلاعات، ۵(۲۰)، ۷۷-۱۰۲. <https://doi.org/10.22054/ims.2017.8617>
- اعظمی، سمیه، محمودوند، میلاد و سهیلی، کیومرث. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر کیفیت محیط زیست در آلوده کننده‌های بزرگ آسیایی. تحلیل‌های اقتصادی توسعه ایران، ۹(۲)، ۴۵-۷۲. <https://doi.org/10.22051/ieda.2024.45399.1380>
- جعفری پرویزخانلو، کرم، پایتختی اسکویی، سیدعلی و ازلی، رباب. (۱۴۰۰). بررسی تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات و رشد اقتصادی بر آلودگی محیط زیست: مطالعه موردی کشورهای حوزه خلیج فارس. نشریه مطالعات و سیاست‌های اقتصادی، ۱۸(۱)، ۱۱۱-۱۳۸. <https://doi.org/10.22096/esp.2021.129466.1364>
- طیاری، مریم، محمودزاده، محمود و موسوی، میرحسین. (۱۴۰۲). بررسی پویایی‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات و تخریب محیط زیست (شواهدی از کشورهای در حال توسعه). نشریه پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۱۲(۴۷)، ۱۰۱-۱۲۷. <https://doi.org/10.22054/jiee.2023.74581.2021>
- قهرمانی، مهرداد، نظری هریس، مرتضی، زارع، کاظم و محمدی ایوانلو، بهنام. (۱۳۹۶). مدیریت انرژی پارکینگ خودروهای برقی در شبکه توزیع برق با استفاده از روش بهینه‌سازی مقاوم. چهارمین کنفرانس بین‌المللی فناوری و مدیریت انرژی. (۱۱ صفحه). <https://civilica.com/doc/749895>
- محمودزاده، محمود، شاه بیگی، حامد (۱۳۹۱). آثار فناوری اطلاعات و ارتباطات بر شدت انرژی در کشورهای در حال توسعه. فصلنامه اقتصاد و تجارت نوین، ۲۳(۲۴)، ۶۷-۸۸. <https://ensani.ir/fa/article/325037/>
- محمدیان، فرشته و اسماعیلی، زهرا. (۱۴۰۳). بررسی تأثیر حکمرانی خوب و رشد اقتصادی بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر: شواهدی از مجمع کشورهای صادرکننده گاز. نشریه سیاست‌ها و تحقیقات اقتصادی، ۳(۲)، ۱-۲۹. <https://doi.org/10.22034/jep.2024.141593.1137>

References

- Abdi, H., & Williams, L. J. (2021). Principal component analysis: Theoretical overview and recent advances. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 13(1), e1510. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
- Alatas, A. (2021). The role of information and communication technologies for environmental sustainability: evidence from a large panel data analysis. *Journal of Environmental Management*. 293 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112889>
- Andrae, A. S. G., & Edler, T. (2015). On global electricity usage of communication technology: Trends to 2030. *Challenges*, 6(1), 117-157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2021). Renewable energy, CO₂ emissions, and economic growth: Evidence from OECD countries. *Energy Policy*, 156, 112-137
- Arbab, H., & Shabani, E. (2017). The impact of information and communication technology on environmental pollution in D8 countries. *Journal of Information Technology Management Studies*, 5(20), 77-102. <https://doi.org/10.22054/ims.2017.8617> [In Persian]
- Azami, S., Mahmoodvand, M. & Sohaili, K. (2023). Investigating the Impact of Information and Communication Technology on Environmental Quality in Major Asian Emitters. *Iranian Economic Development Analyses*, 9(2), 45-72. <https://doi.org/10.22051/ieda.2024.45399.1380> [In Persian]
- Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (2004). Trade, growth, and the environment. *Journal of Economic Literature*, 42(1), 7-71. <https://doi.org/002205104773558047/10.1257>

- Destek, M. A. (2020). Shining a new light on the environmental Kuznets curve for CO₂. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 20764-20773. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08917-2>
- Destek, M. A., & Sinha, A. (2020). Renewable, non-renewable energy consumption, economic growth, trade openness and ecological footprint: Evidence from organisation for economic co-operation and development countries. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118537. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118537>
- Destek, M. A., & Sinha, A. (2020). The impact of digital technologies on greenhouse gas emissions: Evidence from developing countries. *Environmental Science and Policy*, 114, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.08.003>
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve hypothesis: A survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431-455. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>
- GeSI. (2020). Digital with purpose: Delivering a SMARTer 2030. Global e-Sustainability Initiative (GeSI). Retrieved from <https://gesi.org/research>
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377. <https://doi.org/2118443/10.2307>
- Hansen, L. P. (1982). Large sample properties of generalized method of moments estimators. *Econometrica*, 50(4), 1029-1054. <https://doi.org/10.2307/1912775>
- IEA (2021). Data Centres and Data Transmission Networks. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>
- IEA (2021). Global energy review 2021: CO₂ emissions. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/co2-emissions>
- ITU (2020). Global E-waste Monitor 2020. International Telecommunication Union. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/publications/e-waste2020.aspx>
- Jafari, K., & Khanlou, P. (2021). Investigating the effects of information and communication technology and economic growth on environmental pollution: A case study of the Persian Gulf countries. *Economic Studies and Policies*, 17(1). <https://civilica.com/doc/1327987> [In Persian]
- Jones, P., & Smith, L. (2021). Digitalization and environmental sustainability: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128123>
- Hassan, H., Zhang, X., & Li, J. (۲۰۲۴). A deep dive into renewable energy's influence on OECD countries' carbon emissions. *Energy Economics*, 92, 103025. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.103025>
- Hilty, L. M., & Aebischer, B. (2015). ICT for sustainability: An emerging research field. In L. M. Hilty & B. Aebischer (Eds.), *ICT innovations for sustainability* (pp. 3-36). Springer. https://doi.org/978-3-319-09228-7/10.1007/_1
- Hook, A., Court, V., Sovacool, B. K., & Sorrell, S. (2020). A systematic review of the energy and climate impacts of teleworking. *Environmental Research Letters*, 15(9), 093003. <https://doi.org/1748-9326/10.1088/ab8a84>
- Kang, J., & Kim, Y. (2019). ICT development and CO₂ emissions: Panel data evidence from OECD countries. *Telecommunications Policy*, 43(5), 101823. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2019.03.002>
- Khan, S., & Alam, M. (2024). Pathways to carbon neutrality in G7 economies: The role of technological innovation, R&D, and renewable energy consumption. *Science and Technology for the Environment*, 25(3), 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.ste.2024.03.012>

- Khan, D., Yaseen, M. R., & Rehman, A. (2021). High-technology exports, renewable energy and CO₂ emissions: Evidence from BRICS economies. *Journal of Cleaner Production*, 286, 124941
- Li, S., Yu, H., Xu, Y., & Shi, Y. (2021). Remote Sensing for Environmental Monitoring: Progress and Perspectives. *Remote Sensing*, 13(3), 475. <https://doi.org/10.3390/rs13030475>
- Li, Y., Zhao, R., & Zhang, X. (2022). ICT and carbon emissions: Dynamic effects in developing economies. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 875421 DOI: 10.3389/fenvs.2022.875421
- Liu, H., Anwar, A., Razzaq, A., & Yang, L. (2022). Modeling the macroeconomic determinants of carbon dioxide emissions in E-7 countries: The role of technological innovation and institutional quality. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(33), 50168–50180. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23723-0>
- N'dri, L. M., Islam, M., & Kakinaka, M. (2021). ICT and environmental sustainability: any differences in developing countries?. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126642. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126642>
- Mohammadian, F., & Esmacili, Z. (2024). Investigating the impact of good governance and economic growth on renewable and non-renewable energy consumption: Evidence from the Gas Exporting Countries Forum. *Journal of Economic Policies and Research*, 3(2), 1-29. <https://doi.org/10/22034/JEPR.2024/141593/1137> [in Persian]
- Mahmoudzadeh, M., & Shahbeigi, H. (2012). The effects of information and communication technology on energy intensity in developing countries. *New Economy and Trade Quarterly*, 23(24), 67–88. <https://ensani.ir/fa/article/325037> [in Persian]
- Müller, E., Stucki, T., & Woerter, M. (2020). The effect of ICT on environmental sustainability: Evidence from Swiss manufacturing firms. *Environmental and Resource Economics*, 75(1), 1–34. <https://doi.org/10.1007/s10640-019-00394-8>
- OECD (2020). Digital Economy Outlook 2020. Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://www.oecd.org/digital/digital-economy-outlook>
- Panayotou, T. (1993). Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development. ILO Working Paper, World Employment Programme, International Labour Office.
- Salahuddin, M., Alam, K., & Ozturk, I. (2016). The effects of internet usage and economic growth on CO₂ emissions in OECD countries: A panel investigation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1226–1235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.018>
- Freire-González, J., Padilla Rosa, E. & Raymond, J. L. (2024). World economies' progress in decoupling from CO₂ emissions. *Scientific reports*, 14(1), 20480. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71101-2>
- Shahbaz, M., Balsalobre-Lorente, D., & Sinha, A. (2022). Export diversification, technological innovation, and environmental sustainability. *Technological Forecasting and Social Change*, 176, 121451. DOI: 10/1016/j.techfore.2022/121451
- Shahbaz, M., Sinha, A., & Mahalik, M. (2019). Modeling the environmental Kuznets curve for emerging economies: The role of ICT and economic growth. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(22), 22934–22947. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05158-2>
- Shahbaz, M., Khraief, N., & Jemaa, M. M. B. (2017). On the causal nexus of road transport CO₂ emissions and macroeconomic variables in Tunisia: Evidence from combined cointegration tests. *Natural Hazards*, 86(1), 465-485. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2693-8>

- Stern, D. I. (2017). The environmental Kuznets curve after 25 years. *Journal of Bioeconomics*, 19(1), 7-28. <https://doi.org/10.1007/s1-9243-017-10818>
- Tayyari, M., Mahmoudzadeh, M., & Mousavi, M. H. (2023). Investigating the dynamics of information and communication technology and environmental degradation: Evidence from developing countries. *Iranian Journal of Energy Economics*, 12(47), 101-127. <https://doi.org/10.22054/jiee.2023.74581.2021> [inPersian]
- Usman, A., Shahbaz, M., & Wang, S. (2021). Does ICT have symmetric or asymmetric effects on CO₂ emissions? Evidence from nine Asian economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(1), 112-125. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10710-6>
- Uzar, U. (2022). Renewable energy consumption and environmental sustainability in emerging economies. *Renewable Energy*, 190, 947-0957
- Vidal, O., Goffé, B., & Arndt, N. (2013). Metals for a low-carbon society. *Nature Geoscience*, 6(11), 894-896. <https://doi.org/10.1038/ngeo1993>
- Wold, S., Esbensen, K., & Geladi, P. (2021). Principal Component Analysis: A Retrospective. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 214, 104322. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(87\)80084-9](https://doi.org/10.1016/0169-7439(87)80084-9)
- Wang, J., Liu, Q., & Xu, H. (2024). The impact of the global digital economy on carbon emissions: Evidence from developed and developing countries. *Sustainability*, 16(5), 02140 DOI: 10/3390/su16052140
- Wang, S., & Dong, K. (2023). Green industrialization and carbon neutrality: Empirical evidence from panel data. *Sustainable Production and Consumption*, 36, 45-58. *Journal of Cleaner Production* .Doi:10.1016/S0959-6526(22)05189-7
- Wang, L., Vo, X. V., Shahbaz, M., & Ak, A. (2020). Globalization and carbon emissions: Is there any role of agriculture value-added, financial development, and natural resource rent in the aftermath of COP21? *Journal of Environmental Management*, 276, 111712. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111712>
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22-32. Doi: 10.1109/JIOT.2014.2306328
- Zhang, Z., et al. (2024). Digital economy development and carbon emission: Evidence from 72 countries. *Scientific Reports*, 14, 12345. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78831-3>
- Zhang, J., Wang, Y., & Liu, Z. (2022). Industrialization and CO₂ emissions in emerging economies: The role of energy structure and technological innovation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(32) 48564-48577. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18888-1>
- Zhang, Y., Li, K., & Zhou, M. (2021). Industrialization, energy consumption and CO₂ emissions: Evidence from developing countries. *Energy Policy*, 149, 112-124.