



Examining the Direct and Indirect Effects of Information and Communication Technology on Carbon Dioxide Emissions with an Emphasis on the Role of Renewable Energy

Somayeh Azami ^{1✉}, Saba Mohamadi², Jamal Fathollahi ³

1. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Economics, Razi University, Kermanshah, Iran. s.azami@razi.ac.ir

2. Master of Economics (E-Commerce), Faculty of Strategic Sciences and Technologies, Razi University, Kermanshah, Iran. saba.mohammadi7274@gmail.com

3. Associate Professor, Department of Economics, Razi University, Kermanshah, Iran. J.fathollahi@razi.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	The objective of this study is to examine the effects of Information and Communication Technology (ICT) indicators, including Internet use, mobile phone subscriptions, and fixed-line telephone subscriptions, on environmental quality in twenty selected Asian countries with the largest shares of global carbon dioxide emissions over the period from 1990 to 2022. The cointegration test indicates the existence of a long-run relationship among the model variables. The N-shaped Environmental Kuznets Curve (EKC) is confirmed for this group of countries, and renewable energy consumption leads to a significant reduction in carbon dioxide emissions. The results show that the direct effects of ICT indicators on CO ₂ emissions are negative and statistically significant, whereas their indirect effects through the trade channel are positive and statistically significant. The net effect is negative up to the trade threshold level, becomes zero at the threshold level, and turns positive beyond the threshold, thereby helping to resolve the ambiguity surrounding the impact of ICT on the environment. The results are confirmed using a composite ICT index based on Principal Component Analysis (PCA), and trade has a positive and statistically significant effect on carbon dioxide emissions. Internet use makes the largest contribution to the composite ICT index, accounting for 66.25%. Policymakers are advised to promote the use of ICT to reduce emissions while, as economies move toward globalization and increased trade, replacing fossil fuels with renewable energy sources in order to mitigate the indirect environmental effects of ICT through the trade channel.
Article history: Received: February 2025 Accepted: July 2026	
JEL: F64, Q53, Q56.	
Keywords: E-Commerce, ICT, Quality, FGLS.	

Cite this article: Azami, s., Mohamadi, S., & Fathollahi, J. (2026). Examining the Direct and Indirect Effects of Information and Communication Technology on Carbon Dioxide Emissions with an Emphasis on the Role of Renewable Energy. *Applied Theories of Economic*, 13(3), 27-54.

<https://doi.org/10.22034/econj.2026.65467.3392>



© The Author(s).

DOI: 10.22034/econj.2026.65467.3392

Publisher: University of Tabriz

Introduction

The most important environmental issue is global warming and climate change. The expansion of Information and Communication Technology (ICT) activities, in addition to their desirable economic consequences, can also have environmental consequences. On the one hand, advances in Information and Communication Technology through the widespread adoption of electronic goods and services, such as online meetings, online education, e-books, electronic banking, and e-commerce, have reduced the use of many traditional goods and services. This shift reduces resource use and, consequently, resource-intensive activities associated with the use of underlying infrastructure that contribute to environmental degradation. In addition, the ICT revolution has led to the adoption of modern transportation systems and the deployment of advanced software that assists in traffic management, resulting in lower energy consumption and reduced emissions. Therefore, Information and Communication Technology has promoted e-commerce as a substitute for other trading systems, reducing human interactions and transportation, as well as energy consumption, which are major sources of CO₂ emissions. On the other hand, Information and Communication Technology increases economic activity through trade and foreign direct investment. It also promotes industrialization and economies of scale. A boom in economic activity increases CO₂ emissions through energy consumption, such as the use of fossil fuels. Despite the extensive body of research, a review of the literature shows that most studies have focused on examining the direct effects of ICT and have overlooked its indirect effects through the channels of trade and threshold levels. This study seeks to fill this gap. The study is significant in several respects. First, it specifically focuses on Asian countries that account for a large share of global emissions. Second, several ICT indicators, including fixed-line telephone subscriptions, mobile phone subscriptions, Internet use, and secure Internet servers, are considered. In addition, a composite ICT index is constructed using the Principal Component Analysis (PCA) method, and the effect of this index on emissions is also examined. Third, the direct and indirect effects of ICT on CO₂ emissions are analyzed. ICT indirectly affects CO₂ emissions through trade. This analysis shows that the effect of ICT on CO₂ emissions depends on the level of trade, and it is expected that this effect will become positive as trade increases beyond the threshold level. This finding helps resolve the ambiguity surrounding the impact of ICT on CO₂ emissions.

Methodology

Using panel econometrics, this study examines the effect of Information and Communication Technology on environmental quality in the twenty major Asian carbon dioxide-emitting countries, namely China, India, Japan, Iran, Indonesia, South Korea, Saudi Arabia, Vietnam, Thailand, Malaysia, Kazakhstan, the United Arab Emirates, Pakistan, Iraq, the Philippines, Uzbekistan, Bangladesh, Kuwait, Qatar, and Oman, over the period from 1990 to 2022. These countries ranked among the countries with the largest shares of global carbon dioxide emissions in 2022. The research model is estimated using the Feasible Generalized Least Squares (FGLS) method. Given the results of the diagnostic tests, which indicated the presence of heteroskedasticity, serial correlation, and cross-sectional dependence in the data, the Feasible Generalized Least Squares (FGLS) estimator is employed because it is robust to these problems and provides efficient estimates.

Results and Discussion

The cointegration test indicates the existence of a long-run relationship among the model variables. The N-shaped Environmental Kuznets Curve (EKC) is confirmed for this group of countries, and renewable energy consumption leads to a significant reduction in carbon dioxide emissions. The results show that the direct effects of ICT indicators on CO₂ emissions are negative and statistically significant, whereas their indirect effects through the trade channel are positive and statistically significant. The net effect is negative up to the trade threshold level, becomes zero at the threshold level, and turns positive beyond

the threshold, thereby helping to resolve the ambiguity surrounding the impact of ICT on the environment. The results are confirmed using a composite ICT index based on Principal Component Analysis, and trade has a positive and statistically significant effect on carbon dioxide emissions. Internet use has the largest contribution to the composite ICT index, accounting for 66.25%. Policymakers are advised to promote the use of ICT to reduce emissions while, as economies move toward globalization and increased trade, replacing fossil fuels with renewable energy sources in order to mitigate the indirect environmental effects of ICT through the trade channel.



بررسی تأثیرات مستقیم و غیر مستقیم فناوری اطلاعات و ارتباطات بر انتشار دی‌اکسید کربن با تأکید بر نقش انرژی تجدیدپذیر^۱

سمیه اعظمی^۱✉، صبا محمدی^۲، جمال فتح اللهی^۳

۱. نویسنده مسئول، دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده علوم اجتماعی و تربیتی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: s.azami@razi.ac.ir

۲. کارشناسی ارشد تجارت الکترونیک، گروه اقتصاد، دانشکده علوم اجتماعی و تربیتی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: saba.mohammadi7274@gmail.com

۳. دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده علوم اجتماعی و تربیتی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: J.fathollahi@razi.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۹ JEL: F64, Q53, Q56. واژه‌های کلیدی: تجارت الکترونیک، فناوری اطلاعات و ارتباطات، کیفیت محیط زیست، FGLS	هدف این پژوهش، بررسی تأثیر شاخص‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات (اینترنت، موبایل و تلفن ثابت) بر کیفیت محیط‌زیست بیست کشور آسیایی منتخب با بیشترین سهم انتشار دی‌اکسید کربن در جهان طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۲۲ است. آزمون هم‌انباشتگی حاکی از وجود ارتباط بلندمدت میان متغیرهای مدل است. منحنی زیست‌محیطی کوزنتس N-شکل در این گروه کشورها مورد تأیید است و مصرف انرژی تجدیدپذیر منجر به کاهش معنی‌دار انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود. نتایج نشان می‌دهد اثرات مستقیم شاخص‌های ICT بر انتشار CO₂ منفی و معنی‌دار، اما اثرات غیرمستقیم از کانال تجارت مثبت و معنی‌دار است. اثر خالص تا سطح آستانه تجارت منفی است، در سطح آستانه صفر و پس از آن مثبت می‌شود که به رفع ابهام تأثیر ICT بر محیط‌زیست کمک می‌کند. با استفاده از شاخص ترکیبی ICT (مبتنی بر تحلیل مؤلفه اصلی) نتایج تایید می‌شود و تجارت تأثیر مثبت و معنی‌دار بر انتشار دی‌اکسید کربن دارد. بیشترین نقش در شاخص ترکیبی ICT اینترنت با سهم ۶۶/۲۵٪ دارد. به سیاست‌گذاران توصیه می‌شود ضمن ترویج کاربرد ICT در جهت کاهش انتشار، با حرکت اقتصادها به سمت جهانی‌سازی و افزایش تجارت، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را جایگزین سوخت‌های فسیلی نمایند تا اثرات غیرمستقیم ICT از کانال تجارت بر محیط‌زیست تعدیل شود.

استناد: اعظمی، سمیه، محمدی، صبا و فتح‌اللهی، جمال (۱۴۰۵). بررسی تأثیرات مستقیم و غیر مستقیم فناوری اطلاعات و ارتباطات بر انتشار دی‌اکسید کربن با تأکید بر نقش انرژی تجدیدپذیر. *نظریه‌های کاربردی اقتصاد*، ۱۳(۳)، ۵۴-۲۷.

DOI: 10.22034/eco.j.2026.65467.3392

حق مؤلف © نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز



^۱ این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد صبا محمدی با راهنمایی دکتر سمیه اعظمی و مشاوره دکتر جمال فتح اللهی است.

۱-مقدمه

از زمان تصویب برنامه توسعه پایدار پس از سال ۲۰۱۵، نهادهای سیاست‌گذاری به دنبال راه درست و اتخاذ سیاست‌های مناسب برای تحقق این رویا بوده‌اند که هنوز در چشم بسیاری از کشورها به ویژه کشورهای در حال توسعه یک توهم به نظر می‌رسد. اما برای تحقق این رویا، باید از هر حوزه‌ای که می‌تواند بر تحولات اجتماعی، زیست محیطی و اقتصادی تأثیر بگذارد، بهره‌برداری کرد. در این راستا، فناوری اطلاعات و ارتباطات^۱ (ICT) یکی از بخش‌هایی است که در دو دهه گذشته رشد چشمگیری داشته و امروزه در محیط اجتماعی و کسب و کار امروزی ضروری است. فناوری اطلاعات و ارتباطات به عنوان ابزاری جدید با امکان تغییر در آینده با تأثیرگذاری بر فعالیت‌های اقتصادی مانند تجارت و سرمایه‌گذاری خارجی، نزدیک‌تر کردن فرهنگها و جوامع، و حذف مرزهای جغرافیایی ظاهر شد (احمد و لی^۲، ۲۰۲۱). فناوری اطلاعات و ارتباطات توانسته رشد اقتصادی، آموزش، سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی، توسعه مالی، حکمرانی خوب، تجارت و مصرف انرژی را تسهیل کند. اکثر کشورها برای افزایش رفاه و توان رقابتی خود در حال گسترش حوزه‌های تکنولوژیکی خود هستند و به سمت و سوی دولت الکترونیک، اقتصاد الکترونیک، آموزش الکترونیک و کسب و کارهای اینترنتی می‌روند. تجارت الکترونیک برای نخستین بار در جهان در سال ۱۹۶۰ معرفی شد و به معنی انجام معاملات تجاری، از طریق ابزارهای الکترونیکی مانند اینترنت، تلفن، تلویزیون و کامپیوتر است.

گسترش فعالیت‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات جدا از تبعات مطلوب در حوزه اقتصاد، می‌تواند تبعات محیط‌زیستی نیز به همراه داشته باشد. امروزه، اثرات زیست محیطی ICT با شتاب بیشتری مورد توجه محققین و سیاست‌گذاران قرار گرفته است (آپیه-اوتو و همکاران^۳، ۲۰۲۲). مهمترین مسئله زیست‌محیطی گرم شدن زمین و تغییرات آب و هوایی است. افزایش تدریجی دمای جهانی عمده‌تأ ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای است. دی‌اکسید کربن با سهم ۵۸/۸ درصدی از گازهای گلخانه‌ای بیشترین سهم را میان آلاینده‌ها به خود اختصاص داده است. در گزارش آماری که توسط مرکز تحقیقات دانشگاه هریوت وات اسکاتلند منتشرشده خرید آنلاین در مقایسه با خرید سنتی، منجر به تولید دی‌اکسید کربن کمتری در فضا می‌شود. در گزارش تحقیقی که بر مرحله نهایی تحویل کالا در فرآیند خرید متمرکز بود، نشان داد در حالی که حمل کالایی که به صورت آنلاین خریداری شده است معادل ۱۸۱ گرم دی‌اکسید کربن تولید می‌کند، رانندگی در سطح شهر به منظور خرید کردن معادل ۴۷۲۴ گرم دی‌اکسید کربن در فضا تولید خواهد نمود (مرتضوی و علی احمدی جشفقانی^۴، ۱۳۹۸). از سوی دیگر، فناوری اطلاعات و ارتباطات باعث افزایش فعالیت‌های اقتصادی از طریق تجارت و سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی خواهد شد. صنعتی شدن و صرفه جویی در مقیاس را افزایش خواهد داد. رونق در فعالیت‌های اقتصادی باعث افزایش انتشار CO₂ از طریق استفاده از انرژی (به عنوان مثال سوخت‌های فسیلی) می‌شود.

از لحاظ نظری اثرات زیست‌محیطی ICT مبهم است. برای حل تجربی آن، این مطالعه به پیامدهای ناهمگون ICT برای محیط‌زیست در کشورهای آسیایی اشاره می‌کند. این مطالعه با استفاده از اقتصاد سنجی پانل به دنبال بررسی تأثیر

¹ Information & Communication Technology

² Ahmed & Le

³ Appiah-Otoo et al.

⁴ Mortazavi & AliAhmadi Jeshfaghani (2019)

فناوری اطلاعات و ارتباطات بر کیفیت محیط‌زیست بیست کشور آسیایی بزرگ منتشر کننده دی‌اکسید کربن؛ چین، هند، ژاپن، ایران، اندونزی، کره جنوبی، عربستان سعودی، ویتنام، تایلند، مالزی، قزاقستان، امارات متحده عربی، پاکستان، عراق، فیلیپین، ازبکستان، بنگلادش، کویت، قطر و عمان در دوره زمانی ۲۰۲۲-۱۹۹۰ است. این کشورها به ترتیب بیشترین سهم در انتشار دی‌اکسید کربن در جهان را در سال ۲۰۲۲ دارند. اهداف اصلی این پژوهش عبارتند از: بررسی اثرات مستقیم شاخص‌های ICT بر انتشار CO₂ بررسی اثرات غیرمستقیم ICT از کانال تجارت بر انتشار CO₂، محاسبه سطح آستانه تجارت که در آن اثر خالص ICT بر انتشار صفر می‌شود، و ساخت شاخص ترکیبی ICT با استفاده از روش PCA^۱ و مقایسه نتایج. این مطالعه از چند جنبه قابل توجه و اهمیت است. اولاً، به طور ویژه بر کشورهای آسیایی که سهم بالایی در انتشار جهانی دارند متمرکز است. ثانیاً، چند شاخص فناوری اطلاعات و ارتباطات؛ تلفن ثابت، موبایل، اینترنت و سرورهای اینترنتی امن در نظر گرفته می‌شوند. همچنین، یک شاخص ترکیبی فناوری اطلاعات و ارتباطات با استفاده از روش تحلیل مؤلفه اصلی ساخته می‌شود و تأثیر این شاخص نیز بر انتشار بررسی می‌شود. ثالثاً، اثرات مستقیم و غیر مستقیم فناوری اطلاعات و ارتباطات بر انتشار آلاینده تحلیل می‌شود. فناوری اطلاعات و ارتباطات از طریق تجارت به طور غیرمستقیم بر انتشار آلاینده تأثیر می‌گذارند. این تحلیل نشان می‌دهد که تأثیر ICT بر انتشار به سطح تجارت بستگی دارد و انتظار می‌رود با افزایش تجارت از سطح آستانه این تأثیر مثبت شود. این نتیجه به رفع ابهام تأثیر ICT بر انتشار کمک می‌کند.

سازمان‌دهی مقاله به این صورت است که در ادامه مبانی نظری مطرح می‌شود. پیشینه پژوهش موضوع بخش دوم است. روش شناسی پژوهش و یافته‌های تجربی به ترتیب به بخش سوم و چهارم اختصاص دارد. نتیجه‌گیری و توصیه سیاستی در بخش ششم مطرح می‌شود.

۲- ادبیات موضوع

۲-۱- مبانی نظری

در ادامه به ارتباط ICT و کیفیت محیط زیست پرداخته می‌شود و تحلیل می‌شود که ICT با چه مکانیزم‌هایی بر کیفیت محیط‌زیست تأثیر گذار است. سپس، به ارتباط رشد- آلودگی پرداخته می‌شود و توضیح داده می‌شود تولید چگونه آلودگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۲-۱-۱- ICT و کیفیت محیط‌زیست

ادبیات مربوط به رابطه بین ICT و توسعه پایدار اساساً بر تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر اهداف توسعه پایدار متمرکز است که توسط سازمان ملل در سال ۲۰۱۵ برجسته شد. این تأثیر از چند کانال انجام می‌شود. کانال اجتماعی به تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر آموزش، سلامت، نابرابری و حتی توسعه انسانی می‌پردازد. در حالی که کانال اقتصادی شامل تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر توسعه اقتصادی از طریق رشد و کاهش فقر است. فناوری اطلاعات و ارتباطات یکی از دلایل اساسی برای پیشرفت اقتصادی سریع‌تر است و تأثیر آن بر رشد اقتصادی در سال‌های اخیر

^۱ Principal Component Analysis

مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (آشنا^۱، ۱۴۰۳). کانال زیست‌محیطی عمدتاً شامل تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر انتشار گازهای گلخانه‌ای است (چوفونگ و آسونگو^۲، ۲۰۲۱).

گروهی از نویسندگان استدلال می‌کنند که فناوری اطلاعات و ارتباطات با انتشار CO₂ رابطه مثبت دارد (آوم و همکاران^۳، ۲۰۲۰؛ چن^۴، ۲۰۲۲؛ لیو و همکاران^۵، ۲۰۲۱؛ سو و همکاران^۶، ۲۰۲۱). بر این اساس، فناوری اطلاعات و ارتباطات باعث افزایش فعالیت‌های اقتصادی از طریق تجارت و سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی خواهد شد. صنعتی‌شدن و صرفه جویی در مقیاس را افزایش خواهد داد. رونق در فعالیت‌های اقتصادی باعث افزایش انتشار CO₂ از طریق استفاده از انرژی (به عنوان مثال سوخت‌های فسیلی) می‌شود. آووم و همکاران (۲۰۲۰) فرض می‌کنند که ICT عمدتاً انتشار CO₂ را از طریق تجارت و توسعه مالی و مصرف انرژی افزایش می‌دهد. انتشار CO₂ از طریق مصرف انرژی به نوع انرژی بستگی دارد. در حالی که انرژی‌های تجدیدپذیر انتشار CO₂ را کاهش می‌دهد، انرژی‌های تجدیدناپذیر انتشار CO₂ را افزایش می‌دهد (دوگان و سکر^۷، ۲۰۱۶). علاوه بر این، باز بودن تجارت باعث ارتقای یکپارچگی اقتصادی و زنجیره‌های ارزش جهانی می‌شود که در سال‌های اخیر به عنوان منبع اصلی انتشار CO₂ شناخته شده‌اند (اساندو و همکاران^۸، ۲۰۲۰).

گروه دیگری از نویسندگان استدلال می‌کنند که فناوری اطلاعات و ارتباطات با انتشار CO₂ رابطه منفی دارد (احمد و لی، ۲۰۲۱؛ وانگ و زو^۹، ۲۰۲۱؛ ندی و همکاران^{۱۰}، ۲۰۲۱؛ چین و همکاران^{۱۱}، ۲۰۲۱). بهبود فناوری اطلاعات و ارتباطات از طریق تعدد پذیرش کالاهای الکترونیکی مانند جلسات آنلاین، آموزش آنلاین، کتاب الکترونیک، بانکداری الکترونیک و تجارت الکترونیک، استفاده از بسیاری از کالاهای سنتی را کاهش داده است. به عنوان مثال جلسات آنلاین تا حد زیادی جایگزین جلسات سنتی شده است. علاوه بر این، تجارت الکترونیک نیاز به سفر را کاهش داده است، کتاب‌های سنتی جای خود را به کتاب‌های الکترونیکی داده‌اند و نامه‌ها نیز به همان اندازه جایگزین ایمیل‌ها شده‌اند. این تغییر، استفاده از منابع و در نتیجه فعالیت‌های مربوط به استفاده از منابع زیربنایی را که باعث تخریب محیط زیست می‌شود، کاهش می‌دهد. علاوه بر این، انقلاب ICT منجر به پذیرش سیستم‌های حمل‌ونقل مدرن و قرار دادن نرم‌افزارهای مدرنی شده است که به مدیریت ترافیک کمک می‌کند و منجر به مصرف انرژی کمتر و انتشار کمتر می‌شود (گارسیا زابالوس و همکاران^{۱۲}، ۲۰۱۸؛ حسیب و همکاران^{۱۳}، ۲۰۱۹؛ احمد و لی، ۲۰۲۱). بنابراین، فناوری اطلاعات و

¹ Ashna (2024)

² Nchofoung & Asongu

³ Avom et al.

⁴ Chen

⁵ Liu et al.

⁶ Su et al.

⁷ Dogan & Seker

⁸ Essandoh et al.

⁹ Wang & Xu

¹⁰ N'dri et al.

¹¹ Chien et al.

¹² García Zaballos et al.

¹³ Haseeb et al.

ارتباطات، تجارت الکترونیک را در جایگزینی سایر سیستم‌های تجارت، کاهش تماس‌ها و حمل‌ونقل انسانی و همچنین مصرف انرژی که حوزه‌های اصلی انتشار CO₂ هستند، افزایش داده است. در کنار دو دیدگاه فکری که توضیح داده شد، چندین گروه از مطالعات روابط غیر خطی بین ICT و انتشار CO₂ را برجسته کرده‌اند (عثمان و همکاران^۱، ۲۰۲۱؛ اعظم و همکاران^۲، ۲۰۲۱؛ سو و همکاران، ۲۰۲۱). فناوری اطلاعات و ارتباطات می‌تواند به افزایش سطوح انتشار CO₂ در حوزه تولید دستگاه‌ها و ماشین آلات فناوری اطلاعات و ارتباطات، مصرف انرژی و بازیافت زباله‌های الکترونیکی کمک کند. در عین حال، پیش‌بینی می‌شود که فناوری اطلاعات و ارتباطات می‌تواند انتشار دی‌اکسید کربن را در سطح جهانی کاهش دهد، اگر این فناوری اطلاعات و ارتباطات در جهت توسعه سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمندتر، شهرها، شبکه‌های الکتریکی و فرآیندهای صنعتی طراحی شود. این دو تأثیر در جهت‌های متضاد ظاهر می‌شوند، بنابراین یک پیوند U معکوس بین انتشار CO₂ و ICT ایجاد می‌کنند (آن هیگن و همکاران^۳، ۲۰۱۷). هنگامی که ICT توسط شرکت‌ها پذیرفته می‌شود، می‌تواند به بهره‌وری و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق اثر مقیاس کمک کند. با وجود سرمایه ICT، فرآیند تولید بهینه می‌شود و بهره‌وری انرژی تحقق می‌یابد که منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق اثر فناوری می‌شود. در پایان، برخی از نویسندگان مانند آسونگو و همکاران^۴ (۲۰۱۸) استدلال کرده‌اند که ICT هیچ تأثیری بر محیط زیست ندارد.

۲-۱-۲- رابطه N- شکل تولید- آلودگی

رابطه پویا بین انتشار دی‌اکسید کربن و سایر متغیرهای کلان اقتصادی مدتهاست در ادبیات ثابت شده است و دی‌اکسید کربن به عنوان یکی از متغیرهایی دیده می‌شود که شرایط محیطی را در اقتصاد جهانی نشان می‌دهد. بخش تولید نقش کلیدی در رشد اقتصادی هر کشور ایفا می‌کند. با این حال، ارتباط آن با انتشار دی‌اکسید کربن یکی از دلایل اصلی آسیب‌های زیست‌محیطی است که می‌تواند به طور جدی کیفیت محیط را تحت تأثیر قرار دهد. برخلاف مطالعاتی که صرفاً به بررسی منحنی U معکوس در تبیین رابطه تولید- آلودگی پرداخته‌اند، این پژوهش با استفاده از داده‌های پانل و متغیرهای درجه سوم تولید، امکان آزمون فرضیه N- شکل را فراهم می‌کند که با توجه به سطوح بالای رشد اقتصادی در برخی کشورهای آسیایی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

اعتقاد بر این است که دستیابی به سطح بالاتری از رشد اقتصادی با تخریب بیشتر محیط زیست مطابقت دارد. شهزاد و همکاران^۵ (۲۰۲۲) نشان دادند رابطه رشد- آلودگی می‌تواند N شکل باشد. ارتباط N شکل رشد- آلودگی بدان مفهوم است که پس از گذر از یک فاز شبیه EKC (U معکوس که در آن پس از یک دوره تخریب محیط زیست به واسطه رشد اقتصادی کیفیت محیط زیست بهبود یافته)، رشد اقتصادی بیشتر مجدداً منجر به تخریب محیط زیست می‌شود. فرسودگی محیطی مدت کوتاهی پس از افزایش سطح درآمد از سطح مناسب دوباره افزایش می‌یابد. توراس و بویس^۶ (۱۹۹۸) عنوان کردند منحنی زیست‌محیطی کوزنتس N شکل زمانی رخ می‌دهد که گذار تکنولوژیکی رخ دهد. از

¹ Usman et al.

² Azam et al.

³ An Hign et al.

⁴ Asongu et al.

⁵ Shehzad et al.

⁶ Torras & Boyce

آنجایی که تکنولوژی‌های کاهش آلودگی برای آلاینده‌های مختلف متفاوت است، منحنی زیست محیطی کوزنتس U معکوس برای همه آلاینده‌ها پیش‌بینی نمی‌شود. برای مثال، اگر تکنولوژی کاهش آلودگی در سطوح پایین درآمد بازدهی فزاینده نسبت به مقیاس و در سطوح بالای درآمد بازدهی‌های کاهنده نسبت به مقیاس را نشان دهد، ممکن است یک مسیر N شکل نیز ایجاد شود. درونی کردن آثار جانبی نیز می‌تواند باعث ایجاد یک رابطه آلودگی - درآمد N شکل شود. درونی کردن آثار جانبی به مفهوم در نظر گرفتن آثار جانبی و یا بیرونی فعالیت‌های اقتصادی است (اعمال سیاست‌های زیست‌محیطی مانند مالیات‌های زیست‌محیطی به نوعی درونی کردن آثار زیست‌محیطی فعالیت‌های اقتصادی است). بنابر یک مدل ساده، پزی^۱ (۱۹۸۹) پیش‌بینی می‌کند که ابتدا آلودگی بیرونی می‌شود بطوری که آلودگی با توجه به اثر مقیاس افزایش می‌یابد. با این حال، با افزایش آلودگی و درآمد، سیاستگذار شروع به درونی کردن اثرات جانبی می‌کند. همان‌طور که درونی شدن پیش می‌رود، آلودگی کاهش می‌یابد. هنگامی که درونی سازی کامل شد، آلودگی دوباره به دلیل اثر مقیاس افزایش می‌یابد. پیشرفت فنی ممکن است رابطه آلودگی - درآمد N شکل را توضیح دهد. دی بروین^۲ (۲۰۰۰) استدلال می‌کند وقتی که فرصت‌های تکنولوژیکی برای کاهش بیشتر آلودگی متوقف و یا پرهزینه شود، کاهش فشار زیست محیطی یک پدیده موقتی است (اعظمی و همکاران^۳، ۱۴۰۳). مطالعاتی مانند پال و میترا^۴ (۲۰۱۷)، آلارد و همکاران^۵ (۲۰۱۸)، راشدان و همکاران^۶ (۲۰۲۱)، بیست^۷ (۲۰۲۲)، زرابی و همکاران^۸ (۲۰۲۲) و در ایران اعظمی و همکاران (۱۴۰۳) بر ارتباط N شکل رشد - آلودگی تأکید دارند.

۲-۲- پیشینه پژوهش

ژانگ و لیو^۹ (۲۰۱۵) در کشور چین در بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۰ به بررسی اثر صنعت ICT بر انتشار CO₂ در سطح منطقه‌ای و ملی، با استفاده از مدل STIRPAT پرداخته‌اند. نتایج حاکی از این است که صنعت ICT بر کاهش انتشار CO₂ کمک می‌کند و اثر صنعت ICT بر انتشار CO₂ در منطقه مرکزی چین بزرگتر از اثر آن در منطقه شرقی است و در منطقه غربی اثر چندانی ندارد. صلاح الدین و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۶) اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت استفاده از اینترنت و رشد اقتصادی را بر انتشار دی‌اکسید کربن کشورهای OECD برای دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۲ برآورد می‌کند. اگرچه تخمین‌های PMG نشان‌دهنده یک رابطه مثبت و معنی‌دار بلندمدت بین استفاده از اینترنت و انتشار CO₂ است، این ضریب بسیار کوچک است و هیچ علیت بین آنها وجود ندارد، که هر دو نشان می‌دهند که رشد سریع استفاده از اینترنت هنوز یک تهدید زیست‌محیطی برای منطقه نیست. ماجد^{۱۱} (۲۰۱۸) رابطه بین ICT و پایداری زیست‌محیطی را در ۱۳۲ کشور توسعه یافته و در حال توسعه در بازه زمانی ۲۰۱۶-۱۹۸۰ مورد مطالعه قرار داد. یافته‌های تحقیق نشان

¹ Pezzy

² De Bruyan

³ Azami et al. (2024)

⁴ Pal & Mitra

⁵ Allard et al.

⁶ Rashadan et al.

⁷ Bisset

⁸ Zeraibi et al.

⁹ Zhang & Liu

¹⁰ Salahuddin et al.

¹¹ Majeed

داد که ICT قدرت تعیین آینده اکولوژیکی جهان را دارد. با این حال، نتایج مطلوب آن تنها در کشورهای توسعه یافته مشاهده می‌شود در حالی که اثرات نامطلوب در کشورهای در حال توسعه حاکم است.

عثمان و همکاران (۲۰۲۱) در کشورهای جنوب آسیا (بنگلادش، هند، پاکستان و سری لانکا) در بازه زمانی ۲۰۱۸-۱۹۹۰ اثرات ICT را بر رشد اقتصادی و مصرف انرژی جنوب آسیا بررسی کردند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد هند تنها کشوری است که در آن فناوری اطلاعات و ارتباطات موجب افزایش بهره‌وری انرژی شده است. هالداری و ستی^۱ (۲۰۲۲) اثرات مستقیم ICT بر محیط‌زیست و همچنین اثرات غیرمستقیم از طریق تعامل با انرژی‌های تجدیدپذیر، نوآوری، تجارت و توسعه مالی را در ۱۶ اقتصاد نوظهور از سال ۲۰۱۸-۲۰۰۰ بررسی می‌کنند. طبق این مطالعه، افزایش استفاده از اینترنت، مصرف انرژی تجدیدپذیر و تجارت، انتشار CO₂ را کاهش می‌دهد. تعامل بین نوآوری و استفاده از اینترنت به طور مشترک انتشار CO₂ را کاهش می‌دهد. به طور مشابه، انرژی‌های تجدیدپذیر، نوآوری تجارت و توسعه مالی انتشار CO₂ ناشی از افزایش استفاده از موبایل را کاهش می‌دهند.

هان و همکاران^۲ (۲۰۲۳) به نقش توسعه تجارت الکترونیک در کنترل آلودگی کشاورزی غیر نقطه‌ای در ۲۸۳ شهر چین در بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۹ می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد توسعه تجارت الکترونیک اثرات زیست محیطی مثبت قابل توجهی دارد که با تحریک به روز رسانی ساختار صنعتی و ترویج نوآوری در فناوری سبز به دست می‌آید، در حالی که مکانیسم افزایش سطح کشت تمایل به تشدید آلودگی منابع غیر نقطه‌ای کشاورزی دارد. ایمران و همکاران^۳ (۲۰۲۳) با استفاده از مدل‌های PMG-ARDL و اثرات ثابت به بررسی اثرات نوری تجارت الکترونیک، تقاضای انرژی‌های تجدیدپذیر و تجارت خدمات بر انتشار کربن در پنج کشور توسعه یافته آسیایی از سال ۲۰۲۰-۱۹۹۰ می‌پردازد. بر اساس یافته‌ها، خرید آنلاین اثر کوتاه مدت مطلوبی بر انتشار کربن دارد، اما تأثیر منفی بلندمدت دارد. افزایش بلندمدت در انتشار کربن به هزینه‌های تحقیق و توسعه و خدمات تجارت نسبت داده می‌شود، اما کاهش کوتاه مدت انتشار ناشی از خدمات تجارت است. آکیل^۴ (۲۰۲۳) به بررسی ارتباطات متقابل ICT، کیفیت نهادی، مخارج سلامت و انتشار کربن در کشور عربستان سعودی در بازه زمانی ۲۰۱۹-۱۹۹۵ می‌پردازد. این مطالعه به طور تجربی نقش اساسی کیفیت نهادی و ICT را برای افزایش کیفیت هوا و کاهش مخارج سلامت تعیین می‌کند. شی و همکاران^۵ (۲۰۲۳) به بررسی تأثیر تجارت الکترونیک بر اهداف پایداری زیست محیطی در کشورهای منتخب اروپایی در بازه زمانی ۲۰۰۲-۲۰۱۹ پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که تجارت الکترونیک به طور منفی بر انتشار کربن تأثیر می‌گذارد و نتایج رگرسیون چندک پانل همچنین نشان می‌دهد که تجارت الکترونیک بر انتشار کربن در چندک‌های متوسط و بالاتر تأثیر منفی می‌گذارد.

در ایران نیز مطالعاتی به بررسی تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر کیفیت محیط‌زیست پرداخته‌اند. مرادحاصل و مزینی^۶ (۱۳۹۲) در بازه زمانی ۲۰۰۵-۱۹۹۰ با برآورد اثر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر کیفیت محیط‌زیست در دو

¹ Haldar & Sethi

² Han et al.

³ Imran et al.

⁴ Akeel

⁵ Xie et al.

⁶ Moradhasel & Mazini (2013)

گروه کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه (از جمله ایران) با استفاده از روش داده‌های تلفیقی به این نتیجه دست یافتند که فناوری اطلاعات و ارتباطات در کشورهای توسعه‌یافته روند فزاینده انباشت آلودگی را تعدیل می‌نماید، در حالیکه در کشورهای در حال توسعه چنین نیست. قاسمی و محمدخان‌پور اردبیل^۱ (۱۳۹۳) در کشور های OECD و OPEC در بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۰ تأثیرگذاری فناوری اطلاعات و ارتباطات بر شدت مصرف فرآورده های نفتی در بخش حمل و نقل را با استفاده از الگوی پانل پویا بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که در کشورهای منتخب OECD فناوری اطلاعات و ارتباطات، شدت مصرف فرآورده های نفتی را در بخش حمل‌ونقل این کشورها افزایش می‌دهد. در حالیکه در کشورهای منتخب OPEC با افزایش کاربرد ICT، شدت مصرف فرآورده‌های نفتی در بخش حمل‌ونقل کاهش می‌یابد و ICT، پتانسیل کاهش شدت مصرف انرژی در بخش حمل‌ونقل را در این گروه از کشورها که دارای شدت مصرف انرژی بالایی هستند، دارا است. سرمدی و معصومی فرد^۲ (۱۳۹۴) نشان می‌دهند با توجه به ویژگی‌های نظام آموزش مبتنی بر ICT مانند انعطاف‌پذیری در زمان و مکان این نظام می‌تواند با حذف بعد مسافت و در نتیجه کاهش مهاجرت از روستاها به شهرها برای دستیابی به نظام آموزشی با کیفیت و جلوگیری از پیامدهای تراکم جمعیت در شهرها به کاهش مشکلات زیست‌محیطی به ویژه در محیط‌های شهر کمک نماید. همچنین از آنجا که آگاهی کلید اصلی حفاظت از محیط‌زیست است، نظام آموزش مبتنی بر ICT می‌تواند با ارائه آگاهی‌های زیست‌محیطی به همه افراد تحت، آموزش به بهبود چالش‌های زیست‌محیطی کمک نماید.

جعفری پرویز خانلو و همکاران^۳ (۱۴۰۰) به بررسی تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات و رشد اقتصادی بر انتشار دی‌اکسید کربن در کشورهای حوزه خلیج فارس در طول دوره زمانی ۲۰۱۵-۲۰۰۰ با استفاده از روش داده‌های تابلویی پرداختند. بر اساس نتایج، فناوری اطلاعات و ارتباطات تأثیر مستقیم و مجذور آن تأثیر منفی بر انتشار دی‌اکسید کربن در کشورهای حوزه خلیج فارس داشته است. مشایخی و همکاران^۴ (۱۴۰۰) تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات و سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی بر بهره‌وری سبز را در ایران با استفاده از آزمون هم جمعی در بازه زمانی ۱۳۹۲-۱۳۵۹ مورد بررسی قرار می‌دهند. یافته‌ها نشان دهنده تأثیر مثبت شاخص فناوری اطلاعات و ارتباطات و تأثیر منفی سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی بر شاخص بهره‌وری سبز در ایران بوده است. میر شفیع و همکاران^۵ (۱۴۰۰) به بررسی رابطه فناوری اطلاعات و ارتباطات با پایداری محیطی پرداختند و نتایج نشان می‌دهد که بین پایداری محیطی و ICT رابطه مثبت و معنی‌داری وجود دارد. توسلی و حمدی^۶ (۱۴۰۰) عنوان می‌کنند بهره‌گیری از فناوری اطلاعات، یکی از حلقه‌های لازم برای افزایش کارایی تجاری در اقتصاد ملی است. پژوهش آنها با هدف شناسایی و رتبه‌بندی مزایای زیست‌محیطی تجارت الکترونیک در مقابل تجارت معمولی انجام شده است. طبق نتایج به دست آمده، رتبه‌بندی مزایای زیست‌محیطی تجارت الکترونیک در مقابل تجارت معمولی به ترتیب عبارت است از: صرفه‌جویی در مصرف، تغییر سبک زندگی به شیوه توسعه پایدار، افزایش کارایی و بهینه‌سازی فرایندها و کاهش آلودگی.

¹ Ghasemi & Mohammadkhanpour Ardabil (2014)

² Sarmadi & Masoumi Fard (2015)

³ Jafari Parvizkhanloo et al. (2021)

⁴ Mashayekhi et al. (2017)

⁵ Mirshafiei et al. (2021)

⁶ Tavasli & Hamdi (2021)

آریانفر و همکاران^۱ (۱۴۰۲) اثر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر کیفیت محیط‌زیست را با تأکید بر فرضیه پناهگاه آلودگی در کشور های عضو اوپک در طی سال های ۲۰۱۹-۲۰۰۸ با روش گشتاورهای تعمیم یافته بررسی می‌کنند. نتایج برآورد بیانگر وجود رابطه U بین فناوری اطلاعات و ارتباطات و انتشار دی‌اکسید کربن است. اعظمی و همکاران^۲ (۱۴۰۲) به بررسی تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر کیفیت محیط‌زیست در آلوده کننده‌های بزرگ آسیایی در طی بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰ برای دو گروه کشور های در حال توسعه و توسعه یافته می‌پردازند. نتایج نشان می‌دهد شاخص ترکیبی ICT به طور معنی داری منجر به کاهش کیفیت محیط‌زیست کشورهای در حال توسعه می‌شود. در کشورهای توسعه یافته، شاخص ترکیبی ICT تأثیر معنی دار بر کیفیت محیط‌زیست ندارد، در حالی که دسترسی به اینترنت به طور معنی داری منجر به بهبود کیفیت محیط‌زیست می‌شود. طیار و همکاران^۳ (۱۴۰۲) به بررسی پویایی فناوری اطلاعات و ارتباطات و تخریب محیط‌زیست (شواهدی از کشورهای در حال توسعه) در بازه زمانی ۲۰۱۸-۱۹۹۲ در ۱۱۳ کشور منتخب در حال توسعه با بهره‌گیری از روش پانل دیتا پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضریب نفوذ تلفن همراه موجب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و انتشار دی‌اکسید کربن و افزایش اثر رد پای اکولوژیکی شده است. با این وجود، افزایش ضریب نفوذ اینترنت سبب کاهش میزان انتشار دی‌اکسید کربن و افزایش گازهای گلخانه‌ای و افزایش اثر رد پای اکولوژیکی شده است.

سیرتی و شیر افکن لمسو^۴ (۱۴۰۳) به بررسی تأثیر استفاده از فناوری اطلاعات و ارتباطات و انرژی های نوظهور بر کاهش آلودگی زیست محیطی در کشورهای عضو گروه D8 از جمله ایران برای دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۵ با استفاده از روش GMM می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که با یک درصد افزایش استفاده از فناوری اطلاعات و ارتباطات، دی‌اکسید کربن ۳/۳۳ درصد کاهش می‌یابد و با افزایش یک درصدی مصرف انرژی های تجدیدپذیر، دی‌اکسید کربن ۷/۷ درصد کاهش می‌یابد.

با وجود گستردگی مطالعات، مرور ادبیات نشان می‌دهد که اغلب پژوهش‌ها به بررسی اثرات مستقیم ICT بسنده کرده و اثرات غیرمستقیم آن از کانال تجارت و سطح آستانه را نادیده گرفته‌اند. این مطالعه به دنبال پر کردن این شکاف است. جمع‌بندی مرور منابع نشان می‌دهد که اگرچه اکثر مطالعات بر تأثیر منفی ICT بر انتشار CO₂ تأکید دارند، اما نتایج در مورد اثرات غیرمستقیم از کانال‌هایی مانند تجارت و مصرف انرژی، ناهمگون است. همچنین، کمتر پژوهشی به محاسبه سطح آستانه تجارت برای تعیین نقطه عطف اثر ICT پرداخته است که نوآوری اصلی مطالعه حاضر محسوب می‌شود. این مطالعه از چند جنبه قابل توجه و اهمیت است. اولاً، به طور ویژه بر کشورهای آسیایی که سهم بالایی در انتشار دی‌اکسید کربن جهانی دارند متمرکز است. ثانیاً، چند شاخص فناوری اطلاعات و ارتباطات؛ تلفن ثابت، موبایل، اینترنت و سرورهای اینترنتی امن در نظر گرفته می‌شوند. همچنین، یک شاخص ترکیبی فناوری اطلاعات و ارتباطات با استفاده از روش تحلیل مؤلفه اصلی ساخته می‌شود و تأثیر این شاخص نیز بر انتشار بررسی می‌شود. ثالثاً، اثرات مستقیم و غیر مستقیم فناوری اطلاعات و ارتباطات بر انتشار آلاینده تحلیل می‌شود. فناوری اطلاعات و ارتباطات از

¹ Arianfar et al. (2023)

² Azami et al. (2023)

³ Tayari et al. (2023)

⁴ Sirati & Shirafkan Lamsu (2014)

طریق تجارت به طور غیر مستقیم بر انتشار آلاینده تأثیر می‌گذارند. این تحلیل نشان می‌دهد که تأثیر ICT بر انتشار به سطح تجارت بستگی دارد و انتظار می‌رود با افزایش تجارت از سطح آستانه این تأثیر مثبت شود.

۳- روش شناسی تحقیق

۳-۱- مدل داده‌های تابلویی

به منظور بررسی تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر کیفیت محیط‌زیست الگوی رگرسیونی (۱) در نظر گرفته می‌شود.

$$CO_{2it} = \beta_0 + \beta_1 GDP_{it} + \beta_2 GDP_{it}^2 + \beta_3 GDP_{it}^3 + \beta_4 Renew_{it} + \beta_5 ICT_{it} + \beta_6 Trade_{it} + \beta_7 ICT_{it} * Trade_{it} + U_{it} \quad (1)$$

CO_2 انتشار دی‌اکسید کربن، ICT فناوری اطلاعات و ارتباطات، GDP تولید ناخالص داخلی، Renew مصرف انرژی تجدیدپذیر، Trade درجه باز بودن تجارت و U جمله اختلال است. i و t به ترتیب بیانگر کشور و زمان است. مطابق با اقتصادسنجی پانل، رابطه (۱) به منظور بررسی تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر کیفیت محیط‌زیست برآورد می‌شود. β_5 اثر مستقیم ICT بر انتشار دی‌اکسید کربن و $\beta_7 * Trade$ اثر غیر مستقیم ICT بر انتشار دی‌اکسید کربن است. اثر خالص مجموع دو اثر مستقیم و غیر مستقیم است. تجارت آستانه در جایی تعیین می‌شود که اثر خالص صفر شود.

۳-۲- برآوردگر FGLS^۱

مدل پژوهش با استفاده از روش حداقل مربعات تعمیم یافته امکان‌پذیر (FGLS) برآورد می‌شود. با توجه به نتایج آزمون‌های تشخیصی که حکایت از وجود ناهمسانی واریانس، خودهمبستگی و وابستگی مقطعی در داده‌ها داشت، از برآوردگر حداقل مربعات تعمیم‌یافته امکان‌پذیر (FGLS) استفاده شده است که نسبت به این مشکلات مقاوم بوده و برآوردهای کارآمدی ارائه می‌دهد. برآوردگر حداقل مربعات تعمیم‌یافته (GLS) مستقیماً ناهمسانی واریانس، خود همبستگی و همبستگی مقطعی را در برآورد در نظر می‌گیرد. به خوبی شناخته شده است که GLS کارآمدتر از OLS است. الگوی رگرسیونی (۱) را که در آن بردار متغیر وابسته، X بردار متغیرهای توضیحی، β بردار ضرایب رگرسیونی و E بردار جملات اختلال است را با در نظر گرفتن این فرض که $EY = X\beta$ در نظر می‌گیریم (اعظمی و همکاران، ۱۴۰۳).

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

با وجود ناهمسانی واریانس، خود همبستگی و همبستگی مقطعی فرض کلاسیک $\sigma^2 I$ $V(y) = V(\varepsilon)$ صادق نیست و در عوض فرض $V(y) = \sigma^2 \Omega$ در نظر گرفته می‌شود که در آن V ماتریس معین مثبت است. $\hat{\beta} = (XX')^{-1}X'Y$ است. $V(\hat{\beta}) = (X'X)^{-1}X'VX(X'X)^{-1}$ در این حالت $V(\hat{\beta})$ است. ایده اصلی GLS این است که ماتریس مشاهده $[Y \ X]$ به گونه‌ای تبدیل می‌شود که واریانس در مدل تبدیل شده $\sigma^2 I$ باشد. از آنجایی که ماتریس V معین مثبت است، V^{-1} نیز معین مثبت است. بنابراین، یک ماتریس غیر منفرد P وجود دارد که $V^{-1} = P'P$. با تبدیل $Y = X\beta + \varepsilon$ رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$Py = PX\beta + P\varepsilon \quad (3)$$

که:

^۱ Feasible Generalized Least Squares

$$EP\varepsilon = PE\varepsilon = 0 \quad (۴)$$

$$V(P\varepsilon) = PE\varepsilon\varepsilon'P' = PVP' = P(P'P)^{-1}P' = I \quad (۵)$$

یعنی، مدل تبدیل شده $Py = PX\beta + \varepsilon$ شرایطی را برآورده می‌کند که تحت آن برآوردهای حداقل مربعات توسعه داده می‌شوند. بنابراین، برآوردهای LS در مدل تبدیل شده BLUE^۱ است. برآوردهای LS برای β در مدل $Py = PX\beta + \varepsilon$ ، برآوردهای GLS برای β در مدل $y = X\beta + \varepsilon$ است. برآوردهای GLS عبارتست از:

$$\hat{\beta}_G = (X'P'PX)^{-1}X'P'Py = (X'V^{-1}X)^{-1}X'V^{-1}y \quad (۶)$$

که:

$$\begin{aligned} V(\hat{\beta}_G) &= E(X'V^{-1}X)^{-1}X'V^{-1}\varepsilon\varepsilon'V^{-1}X(X'V^{-1}X)^{-1} \\ &= (X'V^{-1}X)^{-1}X'V^{-1}VV^{-1}X(X'V^{-1}X)^{-1} = (X'V^{-1}X)^{-1} \end{aligned}$$

۹

$$\hat{\beta}_G - \beta = (X'V^{-1}X)^{-1}X'V^{-1}\varepsilon$$

مطابق با قضیه آیتکن، برآوردهای GLS، BLUE است.

اگر Ω معلوم نباشد، امیدی به تخمین Ω نیست. بنابراین، معمولاً برخی از محدودیت‌های پارامتری را به صورت $\Omega = \Omega(\theta)$ با پارامتر ثابت θ_a ایجاد می‌شود. سپس می‌توان امیدوار بود که θ را با استفاده از مربع‌ها و اثرات متقاطع باقیمانده‌های LS تخمین زد یا می‌توان از ML استفاده کرد. بنابراین، "سازگاری" به تخمین θ اشاره دارد. مطابق با تعریف $\hat{\Omega} = \Omega(\hat{\theta})$ ، تخمین زن سازگاری از Ω است اگر و فقط اگر θ تخمین گر سازگاری از θ باشد. FGLS روش تخمینی است که وقتی Ω ناشناخته است استفاده می‌شود. FGLS همان GLS است با این تفاوت که به جای Ω از یک $\hat{\Omega}$ تخمینی استفاده می‌کند، مثلاً $\hat{\Omega} = \Omega(\hat{\theta})$.

$$\hat{\beta}_{FG} = (X'\hat{\Omega}^{-1}X)^{-1}X'\hat{\Omega}^{-1}y \quad (۷)$$

توجه داریم که

$$\hat{\beta}_{FG} - \beta = (X'\hat{\Omega}^{-1}X)^{-1}X'\hat{\Omega}^{-1}\varepsilon \quad (۸)$$

سازگاری $\hat{\theta}$ به معنای سازگاری برآوردهای FGLS است.

۳-۳- تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

در ادامه در مورد نحوه ساخت شاخص ترکیبی فناوری اطلاعات و ارتباطات توضیح داده می‌شود. یکی از متداول‌ترین روش‌های تحلیل عاملی، روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی با نام اختصاری و متداول PCA است. تحلیل مؤلفه‌های اصلی تبدیلی در فضای برداری است، که بیشتر برای کاهش ابعاد مجموعه داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی توسط پیرسون^۲ (۱۹۰۱) ارائه شد. این روش در بسیاری از زمینه‌های علوم شامل بیولوژی، کشاورزی، اقتصاد، گرافیک، شیمی، علوم اجتماعی و رفتاری و غیره جهت تشخیص الگو، دسته بندی و طبقه بندی، مدل سازی نرم و ... کاربرد گسترده‌ای دارد. اولین قدم، یافتن بزرگترین جهت واریانس در ماتریس داده‌هاست که به آن مؤلفه اصلی اول یا به اختصار PC_1 گویند. مؤلفه اصلی دوم یا PC_2 به نحوی تعریف می‌شود که حداکثر واریانس موجود در داده‌ها را که توسط PC_1 محاسبه نشده‌اند، را نشان دهد اما بر PC_1 عمود باشد. مؤلفه‌های اصلی دیگر نیز به همین نحو انتخاب

^۱ Best Linear Unbiased Estimator

^۲ Pearson

می‌شوند که حداکثر واریانس موجود در داده‌ها را نشان دهند اما بر مولفه‌های اصلی دیگر عمود باشند. عمود بودن PCها یا مولفه‌های اصلی برهم یعنی اینکه مولفه‌های اصلی هیچ هم بستگی با هم ندارند و هم بستگی بین آنها صفر است.

داده اولیه معمولاً، برای انتقال به مرکز سیستم مختصات و هم مقیاس شدن متغیرها با هم، به پیش پردازش نیاز دارند. رسم بهترین خط برازش شده از میان داده‌های اولیه، جهت حداکثر واریانس تصویر سازی شده روی خط را نشان می‌دهد. این خط همان مولفه اصلی اول یا PC_1 است. بنابراین PC_1 ترکیب خطی از تمام متغیرهای اولیه است و می‌توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$PC_1 = a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \dots + a_{p1}X_p \quad (9)$$

و همین طور برای PC_2 :

$$PC_2 = a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{p2}X_p \quad (10)$$

اندیس‌های a ضرایب متغیرها در مولفه‌های اصلی هستند. توجه شود که مولفه اصلی اول (PC_1) بیشترین واریانس داده‌ها را نشان می‌دهد و مولفه‌های اصلی بعدی، به ترتیب واریانس‌های کمتری، که در مولفه‌های اصلی قبلی لحاظ نشده، را نشان می‌دهند.

لازم به ذکر است پیش از انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی، داده‌های متغیرهای ICT (اینترنت، موبایل و تلفن ثابت) با استفاده از روش z-score استانداردسازی شدند تا تأثیر تفاوت در مقیاس اندازه‌گیری حذف گردد.

۳-۴- داده

بیشتر کشورهای آسیایی بزرگ منتشرکننده دی‌اکسید کربن؛ چین، هند، ژاپن، ایران، اندونزی، کره جنوبی، عربستان سعودی، ویتنام، تایلند، مالزی، قزاقستان، امارات متحده عربی، پاکستان، عراق، فیلیپین، ازبکستان، بنگلادش، کویت، قطر و عمان در دوره زمانی ۲۰۲۲-۱۹۹۰ است. این کشورها به ترتیب بیشترین سهم در انتشار دی‌اکسید کربن در جهان را در سال ۲۰۲۲ دارند. جدول (۱) گزارشی از متغیرهای الگو و منبع گردآوری اطلاعات هر متغیر ارائه می‌دهد.

جدول (۱): متغیرها و منبع داده‌ها

متغیر	تعریف	واحد	منبع
GDP	تولید ناخالص داخلی سرانه ^۱	به دلار ثابت ۲۰۱۵	The World Bank
CO ₂	دی‌اکسید کربن سرانه ^۲	تن متریک	The World Bank
Trade	تجارت ^۳	% از تولید ناخالص داخلی	The World Bank
Renew	مصرف انرژی تجدیدپذیر ^۴	% از کل مصرف انرژی نهایی	The World Bank
Mobile	اشتراک‌های تلفن همراه ^۵	به ازای هر ۱۰۰ نفر	The World Bank
Ft	اشتراک‌های تلفن ثابت ^۶	به ازای هر ۱۰۰ نفر	The World Bank

^۱ GDP per capita (constant 2015 US\$)

^۲ Carbon dioxide (CO₂) emissions excluding LULUCF per capita (t CO₂e/capita)

^۳ Trade (%of GDP)

^۴ Renewable energy consumption (%of total final energy consumption)

^۵ Mobile cellular subscriptions (per 100 people)

^۶ Fixed telephone subscriptions (per 100 people)

The World Bank	به ازای هر یک میلیون نفر	سرورهای اینترنتی امن ^۱	Si
The World Bank	% از جمعیت	افراد استفاده کننده از اینترنت ^۲	Ii

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول (۲) گزارشی از توصیف آماری متغیرهای الگو ارایه می‌دهد. لازم به ذکر است که داده متغیر سرورهای اینترنتی امن صرفاً برای بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۲۲ در سایت بانک جهانی در دسترس است و داده‌های مربوط به دوره‌های قبل برای این متغیر در دسترس نیست.

جدول (۱): خلاصه آماری داده‌ها

متغیر	مشاهده	میانگین	انحراف معیار	کمترین	بیشترین
CO ₂	۶۶۰	۹/۶۵۴۷	۱۱/۰۰۸	۰/۱۲۴۴	۵۳/۰۷۴۵
GDP	۶۰۵	۱۲۹۳۲/۸۲	۱۶۳۱۷/۴۵	۵۱۲/۰۹۶۶	۶۶۰۲۳/۶۳
Trade	۶۲۹	۷۴/۰۰۴۸	۴۴/۸۳۳۹۱	۰/۰۲۰۹۹۹۲	۲۲۰/۴۰۶۸
Renew	۶۴۰	۱۶/۰۲۲۳	۲۰/۲۵۴۱	۰	۷۵/۹
Mobile	۶۵۹	۶۲/۶۵۴۴	۶۰/۱۲۲۰	۰	۲۲۱/۳۰۸۸
Ft	۶۵۷	۱۵/۰۵۲۶	۱۴/۲۳۸۹	۰/۱۵	۶۰/۷
Si	۲۶۰	۱۱۷۸/۱۳۸	۳۳۶۶/۸۶	۰/۰۳۱۹۸۴۸	۲۸۹۳۴/۰۷
Ii	۶۵۱	۲۸/۸۵۷۸	۳۳/۲۸۲۹	۰	۱۰۰

منبع: یافته‌های تحقیق

۴- یافته‌های تحقیق

در ادامه تلاش بر این است که مدل پژوهش (۱) برآورد شود. در مطالعه داده‌های ترکیبی، با توجه به در نظر گرفتن کشورهای مختلف می‌بایست قبل از انجام آزمون‌های پایایی متغیرهای مدل وابستگی مقطعی بررسی شود. وابستگی مقطعی مسئله مهمی در اقتصادسنجی داده‌های ترکیبی است. با وجود همبستگی مقاطع، نتایج تخمین به طور کلی ناسازگار و تورش‌دار (به سمت بالا) می‌شوند. بنابراین، آزمون وابستگی مقطعی قبل از انجام هر تجزیه و تحلیلی ضروری است.

۴-۱- آزمون وابستگی مقطعی

اگر وجود وابستگی مقطعی در داده‌ها تایید شود، می‌بایست از آزمون‌های ریشه واحد و هم‌انباشتگی‌ای که این وابستگی را لحاظ می‌کنند استفاده کرد. در غیر اینصورت، از آزمون‌های ریشه واحد و هم‌انباشتگی معمولی (سنتی) می‌توان استفاده کرد. در این مطالعه، آزمون وابستگی مقاطع فری^۳ استفاده شده است.

^۱ Secure internet servers (per 1 million people)

^۲ Individual using the Internet (%of population)

^۳ Frees' Q distribution

جدول (۳): نتایج آزمون وابستگی مقطعی فری

نتیجه	مقدار احتمال	آماره	معادله
وجود وابستگی مقطعی	۰/۰۰۰	۲/۲۷۷	Mobile
وجود وابستگی مقطعی	۰/۰۰۰	۳/۰۹۷	Ft
وجود وابستگی مقطعی	۰/۰۱	۱/۸۶۲	Si
وجود وابستگی مقطعی	۰/۰۰۰	۲/۸۰۷	Ii

منبع: یافته‌های تحقیق

مطابق با مقدار احتمال در جدول (۳)، فرضیه مقابل دال بر وجود وابستگی مقطعی تأیید می‌شود. بنابراین بین مقاطع (کشورها) وابستگی وجود دارد. این بدان مفهوم است که در کشورهای مورد مطالعه یک شوک که یک کشور را تحت تأثیر قرار می‌دهد کشور دیگر را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین برای انجام آزمون ریشه واحد از آزمون‌های نسل دوم مانند پسران (۲۰۰۷) که این وابستگی را در نظر می‌گیرند استفاده می‌شود.

۴-۲-آزمون ریشه واحد

با وجود همبستگی مقطعی، آزمون‌های ریشه واحد سنتی به منظور بررسی همبستگی مقطعی نامناسب است و باید از آزمون‌های دیگری که این وابستگی را در نظر می‌گیرند استفاده کرد. پسران (۲۰۰۷) آزمون ریشه واحد IPS را با در نظر گرفته وابستگی مقطعی پیشنهاد داد (CIPS).

$$CIPS = N^{-1} \sum_{i=1}^N t_i(N, T) \quad (18)$$

که $t_i(N, T)$ آماره دیکی فولر تعمیم یافته مقطعی برای واحد i ام است. نتایج این آزمون در جدول (۴) گزارش می‌شود.

جدول (۴): آزمون ریشه واحد

متغیر	آماره CIPS	سطح معنی داری			نتیجه
		۱٪	۵٪	۱۰٪	
		مقدار بحرانی			
LCO ₂	-۲/۲۸۶	-۲/۲۵	-۲/۱۱	-۲/۰۳	I(0)
LGDP	-۲/۵۷۰	-۲/۲۵	-۲/۱۱	-۲/۰۳	I(0)
LGDP ²	-۲/۴۷۷	-۲/۲۵	-۲/۱۱	-۲/۰۳	I(0)
LGDP ³	-۲/۲۹۰	-۲/۲۵	-۲/۱۱	-۲/۰۳	I(0)
Trade	-۱/۶۶۶	-۲/۲۵	-۲/۱۱	-۲/۰۳	I(1)
Renew	-۱/۶۸۱	-۲/۲۵	-۲/۱۱	-۲/۰۳	I(1)
Mobile	-۱/۹۹۲	-۲/۲۵	-۲/۱۱	-۲/۰۳	I(1)
Ft	-۲/۲۳۰	-۲/۲۵	-۲/۱۱	-۲/۰۳	I(0)
Si	-۲/۸۸۳	-۲/۲۵	-۲/۱۱	-۲/۰۳	I(0)
Ii	-۰/۸۰۷	-۲/۲۵	-۲/۱۱	-۲/۰۳	I(1)
Ft*Trade	-۲/۲۲۰	-۲/۲۵	-۲/۱۱	-۲/۰۳	I(0)
Mobile*Trade	-۱/۶۸۰	-۲/۲۵	-۲/۱۱	-۲/۰۳	I(1)
Si*Trade	-۲/۱۶۱	-۲/۲۵	-۲/۱۱	-۲/۰۳	I(0)
Ii*Trade	-۰/۴۹۸	-۲/۲۵	-۲/۱۱	-۲/۰۳	I(1)

منبع: یافته‌های تحقیق

فرضیه صفر این آزمون ریشه واحد عبارتست از: "متغیر ریشه واحد دارد" و یا "نامانا است". لذا، اگر قدرمطلق مقدار آماره از قدرمطلق مقادیر بحرانی بزرگتر باشد متغیر در سطح مانا است و اگر قدرمطلق مقدار آماره از قدرمطلق مقادیر بحرانی کوچکتر باشد متغیر در سطح مانا نیست و ریشه واحد دارد. مطابق با جدول (۴) و بر اساس مقایسه مقدار آماره با مقادیر بحرانی در سطوح معنی‌داری، متغیرهای LCO_2 ، $LGDP$ ، $LGDP^2$ ، $LGDP^3$ ، Ft ، Si ، $Ft*Trade$ و $Si*Trade$ در سطح مانا هستند و بقیه متغیرها هم انباشته از درجه یک هستند و با یکبار تفاضل‌گیری مانا می‌شوند. با توجه به نتایج آزمون ریشه واحد متغیرها، می‌بایست آزمون هم‌انباشتگی با وجود وابستگی مقطعی به منظور بررسی وجود ارتباط بلندمدت میان متغیرهای مدل انجام شود.

۴-۳- آزمون هم‌انباشتگی

وجود وابستگی مقطعی باعث می‌شود در بررسی هم‌انباشتگی میان متغیرها وابستگی میان مقاطع در نظر گرفته شود. بنابراین، فرآیند هم‌انباشتگی پانل جدید که توسط وسترلاند (۲۰۰۷) معرفی شده است به کار می‌رود. وسترلاند (۲۰۰۷) چهار آزمون پانل جدید با یک گزینه نمونه‌گیری (نمونه‌سازی) که وجود روابط بلندمدت میان متغیرهای هم‌انباشته را با وجود همبستگی مقاطع آزمون می‌کند را توسعه داد. هدف بررسی وجود و عدم وجود ارتباط بلندمدت است که از طریق مدل تصحیح خطا تعیین می‌شود. جدول (۵) نتایج آزمون هم‌انباشتگی وسترلاند را گزارش می‌دهد.

جدول (۵): آزمون هم‌انباشتگی: بررسی ارتباط بلندمدت میان متغیرهای مدل

نتیجه	مقدار احتمال	آماره	معادله
وجود ارتباط بلندمدت	۰/۰۳۳۷	-۱/۸۲۸۸	Mobile
وجود ارتباط بلندمدت	۰/۰۴۶۳	۱/۶۸۲۳	Ft
وجود ارتباط بلندمدت	۰/۰۷۲۸	۱/۴۵۵۳	Si
وجود ارتباط بلندمدت	۰/۰۵۴۶	-۱/۶۰۱۴	li

منبع: یافته‌های تحقیق

مطابق با جدول (۵)، مقدار احتمال در همه موارد از سطح معنی‌داری ۱۰٪ کوچکتر است که حاکی از تایید ارتباط بلندمدت میان متغیرهای مدل است.

۴-۴- برآورد مدل

از آزمون واریانس ناهمسانی والد اصلاح شده و آزمون خودهمبستگی ولد ریچ به ترتیب برای بررسی واریانس ناهمسانی و خودهمبستگی استفاده شده است. نتایج این آزمون‌ها در جدول (۶) گزارش می‌شود.

جدول (۶): آزمون واریانس ناهمسانی، خودهمبستگی و همبستگی پسماندهای مقاطع

نتیجه	مقدار احتمال	آماره	معادله
واریانس ناهمسانی وجود دارد	۰/۰۰۰	$\chi^2_{(17)} = 5334.61$	Mobile
خودهمبستگی وجود دارد	۰/۰۰۰	$F(1, 16) = 12/953$	
واریانس ناهمسانی وجود دارد	۰/۰۰۰	$\chi^2_{(17)} = 590.175$	Ft
خودهمبستگی وجود دارد	۰/۰۰۰	$F(1, 16) = 17/464$	
واریانس ناهمسانی وجود دارد	۰/۰۰۰	$\chi^2_{(20)} = 1411.17$	si

	$F(1, 19) = 11/958$	۰/۰۰۲۶	خودهمبستگی وجود دارد
li	$\chi^2 (16) = 1833/0.3$	۰/۰۰۰	واریانس ناهمسانی وجود دارد
	$F(1, 15) = 12/541$	۰/۰۰۳۰	خودهمبستگی وجود دارد

منبع: یافته‌های تحقیق

مطابق جدول (۶)، در همه معادلات واریانس ناهمسانی و خودهمبستگی وجود دارد. مطابق با نتایج آزمون واریانس ناهمسانی و خودهمبستگی از روش FGLS برای تخمین مدل استفاده می‌شود. نتایج برآورد مدل در جداول (۷) تا (۱۰) گزارش می‌شود. تفاوت این جداول در انتخاب شاخص فناوری اطلاعات و ارتباطات است.

جدول (۷): برآورد مدل به روش FGLS: موبایل به عنوان متغیر ICT

متغیر	ضریب	مقدار احتمال
LGDP	۱/۵۳۲۵۸۳	۰/۰۰۰
LGDP ²	-۰/۲۰۹۱۹۲۱	۰/۰۰۴
LGDP ³	۰/۰۱۳۷۵۸۳	۰/۰۴۱
Trade	-۰/۰۰۰۳۵۱	۰/۰۰۰
Renew	-۰/۰۱۲۴۰۶	۰/۰۰۰
Mobile	-۰/۰۰۱۲۰۱۹	۰/۰۰۰
Mobile*Trade	۰/۰۰۰۰۱۳۹	۰/۰۰۰
Net Effect	-۰/۰۰۰۲۰۵۳۹	
Threshold Trade	۸۶/۴۶۷۶۲۸	
تعداد مشاهدات	۵۴۴	
Wald chi2	۸۸۰۴۸۶/۲۹	
مقدار احتمال	۰/۰۰۰	

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول (۸): برآورد مدل به روش FGLS: تلفن ثابت به عنوان متغیر ICT

متغیر	ضریب	مقدار احتمال
LGDP	۱/۳۹۱۳۰۶	۰/۰۰۰
LGDP ²	-۰/۱۷۴۶۸۴۹	۰/۰۲۸
LGDP ³	۰/۰۱۱۹۲۲	۰/۱۰۱
Trade	-۰/۰۰۳۹۶۷	۰/۰۰۰
Renew	-۰/۰۱۲۱۹۶۴	۰/۰۰۰
Ft	-۰/۰۰۴۷۰۹۲	۰/۰۰۰
Ft*Trade	۰/۰۰۰۰۴۹۶	۰/۰۰۰
Net Effect	-۰/۰۰۱۱۵۳۳۲	
Threshold Trade	۹۴/۹۴۳۵۵	
تعداد مشاهدات	۵۴۴	
Wald chi2	۵۱۴۰۹۰/۲۶	
مقدار احتمال	۰/۰۰۰۰	

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول (۹): برآورد مدل به روش FGLS: سرور اینترنتی امن به عنوان متغیر ICT

متغیر	ضریب	مقدار احتمال
LGDP	۳/۱۳۷۶۰۱	۰/۰۰۰
LGDP ²	-۰/۵۲۴۹۳۷۸	۰/۰۱۶
LGDP ³	۰/۰۳۵۶۴۵۵	۰/۰۶۱
Trade	۰/۰۰۰۵۷۵	۰/۰۰۰
Renew	-۰/۰۱۱۳۲۱	۰/۰۰۰
Si	-۰/۰۰۰۰۱۵۴	۰/۰۰۰
Si*Trade	۱/۱۲e-۰۸	۰/۵۵۱
*Net Effect	-۰/۰۰۰۰۱۴۵	
Threshold Trade	۷۶/۴۴	
تعداد مشاهدات	۲۴۰	
Wald chi2	۳۳۲۴۸۶/۰۳	
مقدار احتمال	۰/۰۰۰۰	

منبع: یافته‌های تحقیق

به دلیل بی معنی بودن ضریب Si*Trade، اثرات خالص و تجارت آستانه معنی دار نیست.

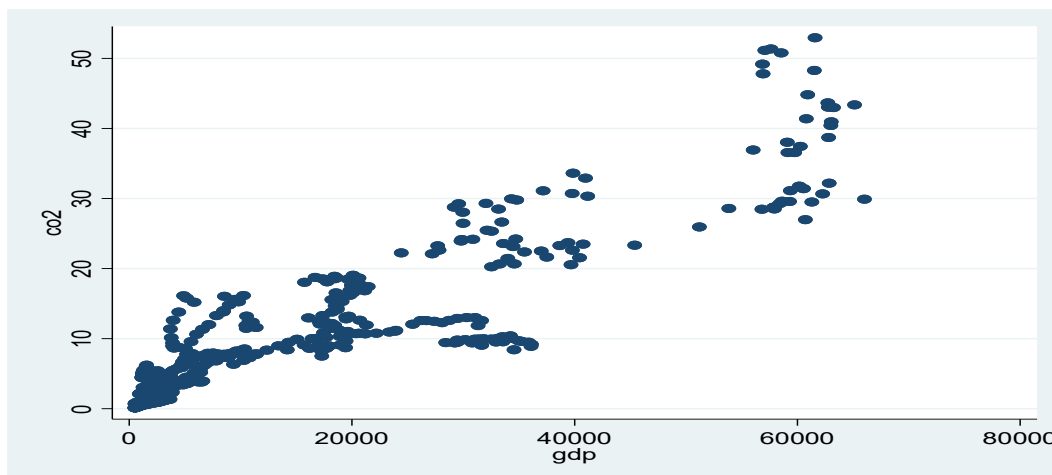
جدول (۱۰): برآورد مدل به روش FGLS: دسترسی به اینترنت به عنوان متغیر ICT

متغیر	ضریب	مقدار احتمال
LGDP	۴/۸۶۱۶۰۴	۰/۰۰۰
LGDP ²	-۰/۹۹۳۶۶۷	۰/۰۰۰
LGDP ³	۰/۰۷۵۵۶۵	۰/۰۰۰
Trade	۰/۰۰۰۰۲۸۲	۰/۲۶۷
Renew	-۰/۰۱۰۸۹۳۷	۰/۰۰۰
li	-۰/۰۰۱۴۳۴۹	۰/۰۰۰
li*Trade	۰/۰۰۰۰۱۶۲	۰/۰۰۰
Net Effect	-۰/۰۰۰۲۷۳۵	
Threshold Trade	۸۸/۵۷۴۰۷۴	
تعداد مشاهدات	۵۱۲	
Wald chi2	۵۸۸۳۲۲/۳۵	
مقدار احتمال	۰/۰۰۰۰	

منبع: یافته‌های تحقیق

مطابق با جداول (۷) تا (۱۰)، ضریب LGDP مثبت و معنی‌دار و ضریب LGDP² منفی و معنی‌دار و ضریب LGDP³ مثبت و معنی‌دار است. این گویای تایید فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس N شکل در کشورهای آسیایی است. بر اساس ضرایب برآوردی، نقطه عطف منحنی در سطح ۵/۰۶، ۴/۸۸، ۴/۹ و ۴/۳۸ از لگاریتم تولید ناخالص داخلی به ترتیب در معادله موبایل، تلفن ثابت، سرور اینترنتی امن و دسترسی به اینترنت واقع شده است.

به منظور بررسی دقیق تر این ارتباط پراکنش تولید- انتشار در نمودار (۱) نشان داده است. پراکنش تولید- انتشار در نمودار (۱) تایید کننده این فرضیه است.



نمودار (۱): پراکنش دی‌اکسید کربن - تولید

منبع: یافته‌های تحقیق

مطابق با جدول (۷) تا (۱۰)، ضریب Renew منفی و معنی‌دار است. مصرف انرژی تجدیدپذیر منجر به کاهش معنی‌دار انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود. این نتیجه همسو با مطالعه جعفری صمیمی و همکاران (۱۴۰۳) است که بر نقش انرژی تجدیدپذیر در کیفیت محیط‌زیست تأکید دارند.

مطابق با جدول (۷) تا (۱۰)، اثرات مستقیم ICT بر انتشار دی‌اکسید کربن منفی و معنی‌دار است. در جدول (۷) ضریب Mobile، در جدول (۸) ضریب Ft، در جدول (۹) ضریب Si و در جدول (۱۰) ضریب Ii منفی و معنی‌دار است. اثرات غیر مستقیم ICT بر انتشار دی‌اکسید کربن مثبت و معنی‌دار است. در جدول (۷) ضریب Mobile*trade، در جدول (۸) ضریب Ft*trade، در جدول (۱۰) ضریب Ii*trade مثبت و معنی‌دار و در جدول (۹) ضریب Si*trade مثبت و بی‌معنی است. در این مدل، به بررسی مکانیسم‌هایی پرداخته می‌شود که فناوری اطلاعات و ارتباطات از طریق آن بر انتشار دی‌اکسید کربن تأثیر می‌گذارد. تلفن همراه، تلفن ثابت و اینترنت با باز بودن تجارت در تعامل هستند تا اثرات مستقیم منفی و اثرات غیرمستقیم مثبت ایجاد کنند. تا سطح تجارت آستانه، اثرات مستقیم بر اثرات غیر مستقیم غلبه می‌کند و منجر به یک اثر منفی می‌شود. اثر خالص برای همه شاخص‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات تا سطح آستانه تجارت منفی و معنی‌دار است. در سطح آستانه تجارت، اثر خالص صفر و بعد از آن مثبت می‌شود. سطح آستانه تجارت برای شاخص موبایل ۸۶/۴۶، تلفن ثابت ۹۴/۹۴، سرور اینترنتی امن ۷۶/۴۴ و دسترسی به اینترنت ۸۸/۵۷ درصد از تولید ناخالص داخلی محاسبه شده است که نشان‌دهنده لزوم توجه به سطح باز بودن تجارت در ارزیابی اثرات زیست‌محیطی ICT است.

در مورد تأثیر تجارت بر انتشار دی‌اکسید کربن نتیجه قاطعی وجود ندارد. در جدول (۷) و (۸) تجارت تأثیر منفی و معنی‌دار، در جدول (۹) تجارت تأثیر مثبت و معنی‌دار و در جدول (۱۰) تأثیر مثبت و بی‌معنی بر انتشار دی‌اکسید کربن دارد. می‌توان با استفاده از رویکرد تحلیل مؤلفه‌های اصلی با کاهش ابعاد متغیرها یک شاخص ترکیبی برای

فناوری اطلاعات و ارتباطات ارائه نمود و به بررسی تأثیر تجارت بر انتشار دی‌اکسید کربن پرداخت. همچنین، می‌توان تأثیر کلی فناوری اطلاعات و ارتباطات را ملاحظه نمود. جدول (۱۱) گزارشی از متغیر شاخص ترکیبی فناوری اطلاعات و ارتباطات ارائه می‌دهد. با توجه به دسترسی محدود به داده متغیر سرورهای اینترنتی امن (بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۱۰)، شاخص ترکیبی با استفاده از دسترسی به اینترنت ساخته شده است.

جدول (۱۱): شاخص ترکیبی فناوری اطلاعات و ارتباطات

نسبت تجمعی	نسبت	مقدار ویژه	
۰/۶۸۹۶	۰/۶۸۹۶	۲/۰۶۸۹	مؤلفه اول
۰/۹۵۳۰	۰/۲۶۳۴	۰/۷۹۰۱	مؤلفه دوم
۱/۰۰۰۰	۰/۰۴۷۰	۰/۱۴۰۸	مؤلفه سوم
مؤلفه سوم	مؤلفه دوم	مؤلفه اول	
۰/۲۲۵۳	۰/۸۷۱۴	۰/۶۶۲۵	Ii
۰/۶۳۸۷	-۰/۴۶۹۸	۰/۶۰۹۳	Mobile
-۰/۷۳۵۷	-۰/۱۴۱۰	۰/۴۳۵۷	Ft

منبع: یافته‌های تحقیق

مطابق با جدول (۱۱) مقدار ویژه اولین مؤلفه بزرگتر از یک است و تقریباً ۶۹ درصد پراکندگی مجموعه داده‌ها توسط این مؤلفه قابل بیان است. به عبارت دیگر همه معیارها نشان‌دهنده این است که انتخاب مؤلفه اول کافی است. بدین ترتیب سهم هر یک از متغیرها در این تحقیق از طریق واریانس تبیین‌شده به وسیله هر عامل جهت شاخص ترکیبی محاسبه شده است. در قسمت انتهایی جدول (۱۱) مشخص شده که هر متغیر چگونه روی هر جزء و یا مؤلفه بارگذاری شده است. اینترنت (۶۶/۲۵٪)، موبایل (۶۰/۹۳٪) و تلفن ثابت (۴۳/۵۷٪) به ترتیب، بیشترین نقش را در ساخت مؤلفه اول دارند. نتایج برآورد مدل با شاخص ترکیبی فناوری اطلاعات و ارتباطات به روش FGLS در جدول (۱۲) گزارش شده است.

جدول (۱۲): برآورد مدل به روش FGLS با شاخص ترکیبی فناوری اطلاعات و ارتباطات

متغیر	ضریب	مقدار احتمال
LGDP	۷/۱۹۰۶	۰/۰۰۰۰
LGDP ²	-۱/۸۱۶۷	۰/۰۰۰۰
LGDP ³	۰/۱۶۵۰	۰/۰۰۰۰
LTrade	۰/۰۰۰۵۶	۰/۰۰۰۰
LRenew	-۰/۰۱۲۵۱	۰/۰۰۰۰
ICT-PCA	-۰/۰۷۸۰۱	۰/۰۰۰۰
ICT-PCA *Trade	۰/۰۰۰۷۶۰۷	۰/۰۰۰۰
Net Effect	-۰/۰۲۲۷	
Threshold Trade	۱۰۲/۵۵	
تعداد مشاهدات	۵۷۶	
Wald chi2	۶۶۸۹۱۴/۷۳	
مقدار احتمال	۰/۰۰۰۰	

منبع: یافته‌های تحقیق

مطابق با جدول (۱۲)، ضریب LGDP مثبت و معنی‌دار و ضریب LGDP² منفی و معنی‌دار و ضریب LGDP³ مثبت و معنی‌دار است. این گویای تایید فرضیه زیست محیطی کوزنتس N شکل در کشورهای آسیایی است. بر اساس ضرایب برآوردی، نقطه عطف منحنی در سطح ۳/۶۷ از لگاریتم تولید ناخالص داخلی واقع شده است. مصرف انرژی تجدیدپذیر منجر به کاهش معنی‌دار انتشار دی‌اکسید کربن این کشورها می‌شود.

ضریب ICT-PCA در جدول (۱۲) منفی و معنی‌دار است و بدان مفهوم است که اثر مستقیم شاخص ترکیبی ICT منجر به کاهش معنی‌دار انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود. ضریب ICT-PCA * Trade مثبت و معنی‌دار است که بدان مفهوم است که اثر غیر مستقیم شاخص ترکیبی ICT بر انتشار دی‌اکسید کربن مثبت و معنی‌دار است. اثر خالص شاخص ترکیبی ICT تا سطح آستانه تجارت منفی و معنی‌دار است. در سطح آستانه تجارت، اثر خالص صفر و بعد از آن مثبت می‌شود. تجارت به طور مثبت و معنی‌داری انتشار دی‌اکسید کربن را افزایش می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری و توصیه‌های سیاستی

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در کشورهای آسیایی منتخب، اثر مستقیم موبایل بر انتشار CO₂ منفی (۰/۰۰۱۲) و اثر غیرمستقیم از کانال تجارت مثبت (۰/۰۰۰۰۱۳۹) است که منجر به اثر خالص منفی تا سطح آستانه تجارت حدود ۸۶/۴۶ درصد می‌شود. اثر مستقیم تلفن ثابت بر انتشار CO₂ منفی (۰/۰۰۰۰۴۷) و اثر غیرمستقیم از کانال تجارت مثبت (۰/۰۰۰۰۴۹۶) است که منجر به اثر خالص منفی تا سطح آستانه تجارت حدود ۹۴/۹۴ درصد می‌شود. اثر مستقیم سرور اینترنتی امن بر انتشار CO₂ منفی (۰/۰۰۰۰۱۵۴) و اثر غیرمستقیم از کانال تجارت مثبت و بی‌معنی (۰/۰۰۰۰۱۲۸) است که منجر به اثر خالص منفی تا سطح آستانه تجارت حدود ۷۶/۴۴ درصد می‌شود. اثر مستقیم دسترسی به اینترنت بر انتشار CO₂ منفی (۰/۰۰۰۰۱۴۳۴۹) و اثر غیرمستقیم از کانال تجارت مثبت (۰/۰۰۰۰۱۶۲) است که منجر به اثر خالص منفی تا سطح آستانه تجارت حدود ۸۸/۵۷ درصد می‌شود.

در مورد تأثیر تجارت بر انتشار دی‌اکسید کربن با در نظر گرفتن یکی از شاخص‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات نتیجه قاطعی وجود ندارد ولی با وجود شاخص ترکیبی فناوری اطلاعات و ارتباطات تجارت به طور مثبت و معنی‌داری انتشار دی‌اکسید کربن را افزایش می‌دهد.

نتایج حاکی از آن است که فرضیه زیست محیطی کوزنتس N شکل در کشورهای منتخب آسیایی مورد تایید است. رشد اقتصادی بیش از حد به طور قابل توجهی از بهبود کیفیت محیط زیست جلوگیری می‌کند. وجود الگوی N شکل برای همه نگران‌کننده است. اگر این نوع تخریب افسار گسیخته کنترل نشده رها شود دیر یا زود این اقتصادها ممکن است بطور کامل به سمت واقعیت‌های ناپایدار بیفتند. افزایش مصرف انرژی تجدیدپذیر منجر به کاهش معنی‌دار انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود. اجرای سیاست‌هایی که انرژی‌های تجدیدپذیر را ترویج کند پیشنهاد می‌شود. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در این کشورها می‌تواند به کاهش کربن کمک کند. جایگزین نمودن تکنولوژیهای پاک و سازگار با محیط زیست، هدایت تولیدکنندگان به سمت استفاده از تکنولوژیهای حامی محیط زیست توصیه می‌شود.

بر اساس یافته‌ها، پیشنهادات سیاستی زیر ارائه می‌شود: (۱) با توجه به اثر مثبت ICT بر انتشار CO₂ در سطوح بالای بازبودن تجارت، سیاست‌های تشویقی برای واردات فناوری‌های پاک و انرژی‌های تجدیدپذیر در نظر گرفته شود. (۲) با توجه به نقش غالب اینترنت در شاخص ترکیبی ICT، توسعه زیرساخت‌های اینترنت پرسرعت با رویکرد کاهش مصرف

انرژی و انتشار کربن (مانند مراکز داده سبز) در اولویت قرار گیرد. (۳) با توجه به اثر منفی انرژی تجدیدپذیر بر انتشار CO₂، سیاست‌های حمایتی برای سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های خورشیدی و بادی و همچنین اصلاح قیمت‌گذاری انرژی به نفع منابع تجدیدپذیر اجرا شود.

این پژوهش با محدودیت‌هایی مانند عدم دسترسی به داده‌های برخی شاخص‌های ICT مانند سرورهای اینترنتی امن برای کل دوره و همچنین عدم لحاظ اثرات نهادی و حکمرانی بر محیط‌زیست مواجه بوده است که می‌تواند در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد.

تضاد منافع

نویسندگان نبود تضاد منافع را اعلام می‌دارند.

فهرست منابع

- 1- Ahmed, Z., & Le, H. P. (2021). Linking Information Communication Technology, trade globalization index, and CO2 emissions: evidence from advanced panel techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 8770-8781.
- 2- Akeel, H. (2022). The nexus among ICT, institutional quality, health expenditure, and carbon emission: a case study from Saudi Arabia. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(44), 67170-67179.
- 3- Allard, A., Takman, J., Uddin, G. S., & Ahmed, A. (2018). The N-shaped environmental Kuznets curve: an empirical evaluation using a panel quantile regression approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(6), 5848-5861.
- 4- An Hign, D., Gholami, R., & Shirazi, F. (2017). ICT and environmental sustainability. *Telematics and Informatics*, 34(4), 85-95.
- 5- Appiah-Otoo, I., Acheampong, A. O., Song, N., & Chen, X. (2023). The impact of information and communication technology (ICT) on carbon dioxide emissions: Evidence from heterogeneous ICT countries. *Energy & Environment*, 34(8), 3080-3102.
- 6- Arianfar, F., Elmi, Z., Issazadeh Roshan, Y. (2023). Investigating the effect of information and communication technology on environmental quality with emphasis on the pollution shelter hypothesis in OPEC member countries. *Economic Analysis of Development of Iran*, 3, 165-192 (In Persian).
- 7- Ashna, M. (2024). Emerging developments in money demand: The role of ICT expansion and financial development. *Applied Theories of Economics*, 11(3), 108-73 (In Persian).
- 8- Asongu, S. A., Le Roux, S., & Biekpe, N. (2018). Enhancing ICT for environmental sustainability in sub-Saharan Africa. *Technological Forecasting and Social Change*, 127, 209-216.
- 9- Avom, D., Nkengfack, H., Fotio, H. K., & Totouom, A. (2020). ICT and environmental quality in Sub-Saharan Africa: Effects and transmission channels. *Technological Forecasting and Social Change*, 155, 120028.
- 10- Azami, S., Mahmoudvand, M., & Soheili, K. (2023). Investigating the effect of information and communication technology on environmental quality in major Asian polluters. *Economic Analysis of Development of Iran*, 9(2), 45-72 (In Persian).
- 11- Azami, S., Rahmani, H., & Delangizan, S. (2024). The N-shaped environmental Kuznets curve: evidence from developing and developed countries. *Economic Growth and Development Research*, (55)14, 109-93 (In Persian).
- 12- Azam, A., Rafiq, M., Shafique, M., & Yuan, J. (2021). An empirical analysis of the non-linear effects of natural gas, nuclear energy, renewable energy and ICT-Trade in leading CO2 emitter countries: Policy towards CO2 mitigation and economic sustainability. *Journal of Environmental Management*, 286, 112232.
- 13- Bisset, T. (2023). N-shaped EKC in sub-Saharan Africa: the three-dimensional effects of governance indices and renewable energy consumption. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(2), 3321-3334.
- 14- Chen, L. (2022). How CO2 emissions respond to changes in government size and level of digitalization? Evidence from the BRICS countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1), 457-467.

- 15- Chien, F., Anwar, A., Hsu, C. C., Sharif, A., Razzaq, A., & Sinha, A. (2021). The role of information and communication technology in encountering environmental degradation: proposing an SDG framework for the BRICS countries. *Technology in society*, 65, 101587.
- 16- Dogan, E., & Seker, F. (2016). Determinants of CO2 emissions in the European Union: the role of renewable and non-renewable energy. *Renewable energy*, 94, 429-439.
- 17- Essandoh, O. K., Islam, M., & Kakinaka, M. (2020). Linking international trade and foreign direct investment to CO2 emissions: any differences between developed and developing countries? *Science of the Total Environment*, 712, 136437.
- 18- Ghasemi, A. R., & Mohammadkhanpour Ardabil, R. (2014). Study of the impact of information and communication technology on energy consumption intensity in the transportation sector. *Quarterly Journal of Iranian Energy Economics*, 4(13), 169-190 (In Persian).
- 19- García Zaballos, A., & Iglesias Rodriguez, E. (2018). Technology for climate action in latin America and the caribbean: how ict and mobile solutions contribute to a sustainable, low-carbon future.
- 20- Liu, X., Latif, Z., Latif, S., & Mahmood, N. (2021). The corruption-emissions nexus: do information and communication technologies make a difference? *Utilities Policy*, 72, 101244.
- 21- Haldar, A., & Sethi, N. (2022). Environmental effects of Information and Communication Technology-Exploring the roles of renewable energy, innovation, trade and financial development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111754.
- 22- Han, A., Liu, P., Wang, B., & Zhu, A. (2023). E-commerce development and its contribution to agricultural non-point source pollution control: Evidence from 283 cities in China. *Journal of Environmental Management*, 344, 118613.
- 23- Haseeb, A., Xia, E., Saud, S., Ahmad, A., & Khurshid, H. (2019). Does information and communication technologies improve environmental quality in the era of globalization? An empirical analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(9), 8594-8608.
- 24- Imran, M., Khan, I., Nassani, A. A., Binsaeed, R. H., Abro, M. M. Q., Zaman, K., & Haffar, M. (2023). A green perspective: Investigating the optical effects of e-commerce, renewable energy demand, and services trade on carbon emissions. *Optik*, 283, 170918.
- 25- Jafari Parvizkhanloo, K., Paytakhi Oskoui, S. A., & Azali, R. (2021). Investigating the impact of information and communication technology and economic growth on environmental pollution: A case study of the Persian Gulf countries. *Two scientific quarterly journals of economic studies and policies*, 8(1), 111-138 (In Persian).
- 26- Jafari Samimi, A., Zarouki, Sh., & Amiri Largani, M. (2014). The impact of total energy subsidies, renewable and non-renewable energy subsidies on the environment in selected countries of the world. *Applied Theories of Economics*, 11(1), 149-174 (In Persian).
- 27- Majeed, M. T. (2018). Information and communication technology (ICT) and environmental sustainability: a comparative empirical analysis. *Pakistan Journal of Commerce and Social Sciences (PJCSS)*, 12(3), 758-783.
- 28- Mashayekhi, B., Hejbar Kiani, K., Khalili, F., & Askari, F. (2017). Study of the impact of information and communication technology and foreign direct investment on green productivity in Iran. *Quarterly Journal of Environmental Science and Technology*, 23(1), 253-266 (In Persian).

- 29- Mirshafiei, S. A. A., & Maleknia, M. (2021). *Investigating the relationship between information and communication technology and environmental sustainability*. 6th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology (In Persian).
- 30- Morad Hasel, N., & Mazini, A. H. (2013). Assessment of the impact of information and communication technology on the environment. *Environmental Research*, 4(7), 103-114 (In Persian).
- 31- Mortazavi, M. R., & AliAhmadi Jeshfaghani, H. (2019). The Impact of Electronic Commerce on the Environment", *First International Conference and Fourth National Conference on Protection of Natural Resources and the Environment*, (In Persian).
- 32- Nchofoung, T. N., & Asongu, S. A. (2022). ICT for sustainable development: Global comparative evidence of globalisation thresholds. *Telecommunications policy*, 46(5), 102296.
- 33- N'dri, L. M., Islam, M., & Kakinaka, M. (2021). ICT and environmental sustainability: any differences in developing countries? *Journal of Cleaner Production*, 297, 126642.
- 34- Pal, D., & Mitra, S. K. (2017). The environmental Kuznets curve for carbon dioxide in India and China: Growth and pollution at crossroad. *Journal of Policy Modeling*, 39(2), 371-385.
- 35- Pearson, K. (1901). LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science*, 2(11), 559-572.
- 36- Pesaran, M. H. (2007). A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence. *Journal of applied econometrics*, 22(2), 265-312.
- 37- Pezzy, J. (1989). *Economic Analysis of Sustainable Growth Development*. The World Bank, Washington, DC, Environment Department. Working Paper, 15.
- 38- Rashdan, M. O. J., Faisal, F., Tursoy, T., & Pervaiz, R. (2021). Investigating the N-shape EKC using capture fisheries as a biodiversity indicator: empirical evidence from selected 14 emerging countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(27), 36344-36353.
- 39- Sarmadi, M. R., & Masoumi Fard, M. (2015). Studying the role of education based on information and communication technology in reducing environmental challenges (with emphasis on urban environment). *Quarterly Journal of Environmental Education and Sustainable Development*, (2)4, 38-50 (In Persian).
- 40- Sirati, Z., & Shirafkan Lamsu, M. (2014). Studying the impact of using information and communication technology and emerging energies in reducing environmental pollution in D8 member countries. *Quarterly Journal of Maritime and Port Services Development*, (4)1, 61-90 (In Persian).
- 41- 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.
- 42- Shehzad, K., Zeraibi, A., & Zaman, U. (2022). Testing the N-shaped environmental Kuznets Curve in Algeria: An imperious role of natural resources and economic globalization. *Resources Policy*, 77, 102700.
- 43- Su, C. W., Xie, Y., Shahab, S., Faisal, C. M. N., Hafeez, M., & Qamri, G. M. (2021). Towards achieving sustainable development: role of technology innovation, technology adoption and CO2 emission for BRICS. *International journal of environmental research and public health*, 18(1), 277.
- 44- Tavasli, M., & Hamdi, K. (2021). Identifying and prioritizing the environmental benefits of trade versus conventional trade (case study: E-Commerce Development Center), *Quarterly Journal of Economics and Urban Management*. 10(1(37)), 84-71 (In Persian).

- 45- Tayari, M., Mahmoud Zadeh, M., & Mousavi, M. H. (2013). Study of the dynamics of information and communication technology and environmental degradation (evidence from developing countries). *Iranian Energy Economics Research Paper*, 47, 101-127 (In Persian)
- 46- Torras, M., & Boyce, J. K. (1998). Income, inequality, and pollution: a reassessment of the environmental Kuznets curve. *Ecological economics*, 25(2), 147-160.
- 47- Usman, A., Ozturk, I., Hassan, A., Zafar, S. M., & Ullah, S. (2021). The effect of ICT on energy consumption and economic growth in South Asian economies: an empirical analysis. *Telematics and Informatics*, 58, 101537.
- 48- Wang, J., & Xu, Y. (2021). Internet usage, human capital and CO2 emissions: A global perspective. *Sustainability*, 13(15), 8268.
- 49- Xie, H., Chang, S., Wang, Y., & Afzal, A. (2023). The impact of e-commerce on environmental sustainability targets in selected European countries. *Economic research-Ekonomska istraživanja*, 36(1), 230-242.
- 50- Zeraibi, A., Ahmed, Z., Shehzad, K., Murshed, M., Nathaniel, S. P., & Mahmood, H. (2022). Revisiting the EKC hypothesis by assessing the complementarities between fiscal, monetary, and environmental development policies in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(16), 23545-23560.
- 51- Zhang, C., & Liu, C. (2015). The impact of ICT industry on CO2 emissions: a regional analysis in China. *Renewable and sustainable energy reviews*, 44, 12-19.