New Economy and Trade, Institute for Humanities and Cultural Studies (IHCS)
Quarterly Journal, Vol. 18, No. 4, Winter 2023, 73-107
https://www.doi.org/10.30465/jnet.2024.45679.2047

The Impact of ICT on Carbon Dioxide Emissions:

A Panel Smooth Transition Regression Model (PSTR)

Esfandiar Jahangard[*], Teymour Mohammadi[**]
Abdolrasoul Ghasemi[***], Zeynab Iranshahi[****]

Abstract

Climate change is becoming a global crisis that can affect all aspects of human life on Earth, including the economy**.** So, protecting the environment and achieving sustainable development goals are now on the agenda of many governments.

This article uses the Panel Smooth Transition Regression Model to test the role of information communication technology as a transition variable. In this research, it is investigated whether ICT can decouple the economic growth from the increase in pollution by changing the effect of productivity on CO_2 emission. The goal is to show whether policymakers can use the development of the digital economy around the world to achieve better environmental and economic outcomes. This study was conducted on a global scale and data from 108 countries was used from 2003 to 2019. The results show that the co_2 emission follows a PSTR model with ICT as a transition variable that changes the effect of total factor productivity on co_2 emission in favor of the environment. ICT development will improve carbon efficiency and reduce climate change.

* Associate Professor, Faculty of Economics, Allameh Tabatabai University, Tehran, Iran, jahangarde@gmail.com

** Professor, Faculty of Economics, Allameh Tabatabai University, Tehran, Iran, atmahmadi@gmail.com

*** Associate Professor, Faculty of Economics, Allameh Tabatabai University, Department of Energy, Agriculture and Environment Economics, Tehran, Iran, ghasemi.a@hotmail.com

**** PhD student, Oil and Gas Economics, Faculty of Economics, Allameh Tabatabai University (Corresponding Author), Tehran, Iran, iranshahi1983@gmail.com

Date received: 30/05/2023, Date of acceptance: 24/12/2023

Keywords: Digital Economy, Total Factor Productivity, Carbon Dioxide Emissions, Panel Smooth Transition Regression Model, Environmental Kuznets Curve.

JEL Classification: Q56, Q53, D2, C33, C23.

اقتصاد و تجارت نوین، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
فصل‌نامهٔ علمی (مقالهٔ پژوهشی)، سال ۱۸، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۴۰۲

تاثیر ICT بر انتشار گاز دی‌اکسید کربن:
مدل رگرسیون انتقال ملایم تابلویی (PSTR)

اسفندیار جهانگرد*
تیمور محمدی**، **عبدالرسول قاسمی*****، **زینب ایرانشاهی******

چکیده

تغییرات آب و هوایی در حال تبدیل شدن به یک بحران جهانی است. بحرانی که تمام جنبه‌های زندگی انسان روی زمین، از جمله اقتصاد را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به همین دلیل، حفظ محیط زیست و دستیابی به اهداف توسعه پایدار اکنون در دستور کار بسیاری از دولت‌ها قرار دارد.

این مقاله از مدل رگرسیون انتقال ملایم تابلویی برای آزمون نقش فناوری اطلاعات و ارتباطات به عنوان متغیر انتقال استفاده می‌کند. به‌طور خاص در این پژوهش بررسی می‌شود که آیا ICT می‌تواند با تغییر اثر بهره‌وری بر انتشارآلاینده‌ها موجب جداسازی رشد اقتصادی از افزایش آلودگی شود. هدف این است که نشان دهیم آیا سیاست‌گذاران می‌توانند از توسعه اقتصاد دیجیتال در سراسر جهان برای دستیابی به نتایج زیست‌محیطی و اقتصادی بهتر استفاده کنند یا خیر؟ این مطالعه در مقیاس جهانی انجام شده و از داده‌های ۱۰۸ کشور جهان در دوره زمانی ۲۰۱۹-۲۰۰۳ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد الگوی انتشار CO_2 از یک مدل غیرخطی با ICT به عنوان یک متغیر انتقالی پیروی می‌کند که اثر بهره‌وری کل عوامل بر انتشار

* دانشیار گروه اقتصاد نظری، دانشکدهٔ اقتصاد، دانشگاه علامه‌طباطبائی، تهران، ایران، jahangarde@gmail.com
** استاد، دانشکدهٔ اقتصاد، دانشگاه علامه‌طباطبائی، تهران، ایران، atmahmadi@gmail.com
*** دانشیار گروه انرژی و محیط زیست، دانشکدهٔ اقتصاد، دانشگاه علامه‌طباطبائی، تهران، ایران، ghasemi.a@hotmail.com
**** دانشجوی دکترای، اقتصاد نفت و گاز، دانشکدهٔ اقتصاد، دانشگاه علامه‌طباطبائی، تهران، ایران (نویسندهٔ مسئول)، iranshahi1983@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۳

CO_2 را تحت تأثیر قرار می‌دهد. استفاده بیشتر از ICT کارایی کربن را بهبود می‌بخشد و تغییرات آب و هوایی را کاهش دهد.

کلیدواژه‌ها: اقتصاد دیجیتال، بهره‌وری کل عوامل تولید، انتشار گاز CO_2، مدل رگرسیونی انتقال ملایم تابلویی، منحنی کوزنتس زیست‌محیطی.

طبقه‌بندی JEL: C23, C33, D2, Q53, Q56.

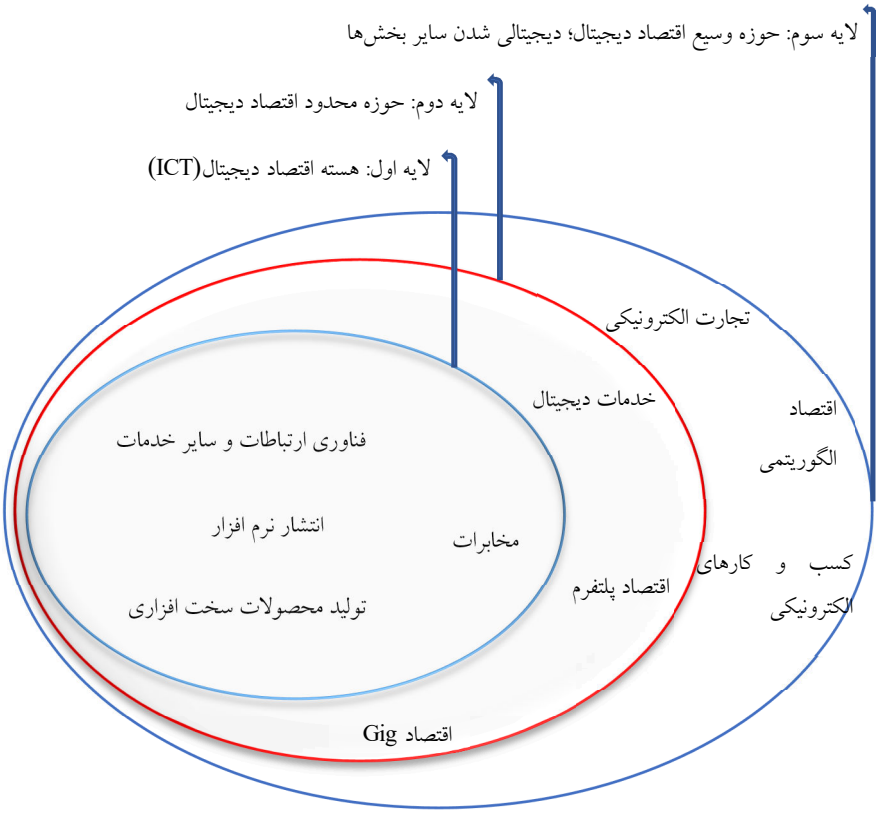
۱. مقدمه

توسعه پایدار فرآیندی از تغییر است که در آن بهره‌برداری از منابع، جهت‌گیری سرمایه‌گذاری‌ها، جهت‌گیری توسعه فناوری و تغییرات نهادی همه با هم هماهنگ هستند و پتانسیل فعلی و آتی را برای برآوردن نیازها و آرزوهای انسان افزایش می‌دهند (WCED, 1987 : p.43). در دهه‌های اخیر با توجه به تغییرات شدید آب و هوایی و بحران‌های زیست‌محیطی ناشی از آن بخش قابل توجهی از ادبیات توسعه پایدار به رابطه رشد اقتصادی و آلودگی‌های زیست‌محیطی اختصاص یافته است. از آنجا که گرمایش جهانی ناشی از افزایش روز افزون انتشار آلاینده‌ها، با اهداف توسعه پایدار در تضاد است، کاهش انتشار آلاینده‌ها برای محدودکردن تغییرات آب و هوا ضروری است. افزایش بهره‌وری می‌تواند یکی از راه‌های دستیابی به توسعه اقتصادی و جلوگیری از تغییرات محیطی ناشی از انتشار آلاینده‌ها باشد. در مباحث اقتصاد نوین، استدلال می‌شود که منافع حاصل از جهانی شدن فعالیت‌های تجاری و انقلاب دیجیتال در قالب بهبود در بهره‌وری ورشد اقتصادی حاصل می‌شود (پاجولا Pohjola ،۲۰۰۲). بنابراین شاید بتوان از طریق توسعه اقتصاد دیجیتال و اثرگذاری بر بهره‌وری، ضمن دستیابی به اهداف اقتصادی، به‌طور موثر انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داد.

در حالی‌که دستیابی به رشد اقتصادی به منظور افزایش رفاه شهروندان از اهداف بدیهی علم اقتصاد است، سطوح بالاتر انتشار CO_2 چالش اصلی پایداری و خطری برای رفاه و موجودیت بشر است (بن جبلی و همکاران Ben-jebli et al، ۲۰۱۶). حال اگر توسعه اقتصاد دیجیتال بتواند اهداف رشد اقتصادی را محقق کند و همزمان انتشارآلاینده‌ها را کاهش دهد، سیاست‌گذاران می‌توانند از پتانسیل آن استفاده کنند و ضمن دستیابی به رشد اقتصادی بالاتر، کیفیت بهتر محیط زیست را تامین نمایند. دستیابی به رشد اقتصادی بالا همزمان با انتشار کمتر آلودگی معمولا با جهت‌گیری فعالیت‌های اقتصادی به سمت بخش‌های بدون انتشار، به ویژه خدمات و صنایع سبک با فناوری پیشرفته، همراه بوده است. یعنی سیاست‌گذاری‌های کلان موجب جداسازی

رشد اقتصادی از انتشار کربن شده است. این مطالعه به منظور بهبود درک و مدیریت سیاستگذاران از رابطه بین یک سندرم سیاستی (به عنوان مثال، آلودگی محیط زیست) و یک متغیر کلان اقتصادی (یعنی رشد اقتصادی) انجام می‌شود.

ICT (Information Communication Technology) هسته اصلی اقتصاد دیجیتال است، بنابراین در این مطالعه از ICT برای اشاره به اقتصاد دیجیتال استفاده می‌شود. محدوده اقتصاد دیجیتال توسط باخت و هیکس (Bukht & Hicks، ۲۰۱۷) ارائه شده. است . شکل ۱ محدوده اقتصاد دیجیتال را نشان می‌دهد.



شکل ۱. محدوده اقتصاد دیجیتال

مأخذ: باخت و هیکس (Bukht & Hicks، ۲۰۱۷)

در عصر دیجیتال کنونی، ICT به ستون اساسی گذار بـه اقتصـاد و جامعـه مبتنـی بـر دانـش تبدیل شده است (کلیموا و همکاران.Klimova et al، ۲۰۱۶). گروسمن و کروگـر (Grossman & Krueger، ۱۹۹۱) استدلال مـی‌کننـد کـه اثـرات رشـد اقتصـادی بـر محـیط زیسـت بـه درجـه پیشرفت‌های فناوری مانند فناوری اطلاعات و ارتباطات و نحوه استفاده از آنهـا در یـک کشـور بستگی دارد. ICT به عنوان یک تسهیل کننده کلیدی انتقال نوآوری و فنـاوری، مـی‌توانـد نقـش مهمی در کاهش شدت انرژی و انتشار گازهـای گلخانـه‌ای داشـته باشـد (نیبـلNiebel ، ۲۰۱۸). سرمایه‌گذاری‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات را می‌توان به‌عنوان محرک رشد بهره‌وری کـربن از طریق ایجاد فرآیندهای تولید پاک‌تر/پایدار در نظر گرفـت (نگـوین و همکـاران.Nguyen et al ،۲۰۲۰) علاوه بر این، ICT محرک تغییر برای یک اقتصاد و جامعه عادلانـه‌تـر، پایـدار و رقـابتی تلقی می‌شود (گووه و همکاران .Gouvea et al، ۲۰۱۸). ICT این ظرفیـت را دارد کـه بـا افـزایش عملکرد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در دستیابی به اهـداف توسـعه پایـدار کمـک کنـد (بانک جهـانی، ۲۰۱۴). امیـد زیـادی وجـود دارد کـه فنـاوری اطلاعـات و ارتباطـات پتانسـیل جداکردن رشد اقتصادی از انتشار CO_2 را داشته باشد (پلپیس Plepys ، ۲۰۰۲).

از نظر تجربی، ادبیات مطالعات انجام شده برای بررسی تاثیر ICT بر رشد اقتصـادی و انتشـار CO_2 را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد:

گروه اول ارتباط بین ICT و رشد اقتصادی را در چارچوب مدل‌های رشد نئوکلاسیک سـولو (Solow ، ۱۹۵۶) و درون‌زای رومر (Romer ، ۱۹۹۴) بررسی کرده‌اند. نتایج تجربی آنها عمومـا از این ایده حمایت می‌کند که فناوری اطلاعات و ارتباطات، رشد اقتصادی را تسهیل مـی‌کنـد. بـه عنوان مثال، هفتو (Haftu ، ۲۰۱۹) ، با استفاده از سیستم دو مرحله‌ای GMMتأثیر تلفـن همـراه و اینترنت بر درآمد سرانه کشورهای جنـوب صـحرای آفریقـا را بـا اسـتفاده از داده‌هـای تـابلویی ۴۰ کشور تجزیه و تحلیل کرده است. نتایج نشان داد که رشد ضریب نفوذ تلفن همـراه بـه‌طـور قابـل تـوجهی بـه تولیـد ناخـالص داخلـی سـرانه منطقـه کمـک کـرده اسـت. همچنـین نیبـل (Niebel، ۲۰۱۸) با به‌کارگیری یک تابع کاب داگلاس، تاثیر فناوری اطلاعات بـر رشـد اقتصـادی در کشورهای در حال توسعه، نوظهور و توسعه یافته را تحلیل می‌کند و نتیجه مـی‌گیـرد، رابطـه مثبت بین سرمایه‌گذاری ICT و رشد تولید ناخالص داخلی وجود دارد.

گروه دوم اثرات همزمان فناوری اطلاعات و ارتباطات و رشد اقتصادی بر انتشـار CO_2 را در چارچوب EKC(Energy Kuznets Curve) بررسی کرده‌اند. ایـن گـروه از مطالعـات در خصـوص تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر انتشارCO_2 هنوز به یک اجماع نرسیده‌اند. یعنی رابطـه بـین

ICT و پایداری محیط زیست هنوز قطعی نیست و توافقی بین محققان وجود ندارد (خانKhan ، ۲۰۱۴).

به عنوان مثال مطالعه آسونگو و همکاران (Asongu et al.، ۲۰۱۸) نشان داد افزایش نفوذ ICT در جنوب صحرای آفریقا می‌تواند با کاهش انتشار CO_2 به پایداری محیط‌زیست کمک کند. همچنین گوویا و همکاران (Gouvea et al.، ۲۰۱۸)، دریافتند سرمایه گذاری درICT به دلیل تاثیر مثبت بر سرمایه انسانی موجب کاهش انتشار CO_2 می‌گردد. اما مطالعه آووم و همکاران (Avom et al.، ۲۰۲۰) با بررسی کانال‌هایی که از طریق آن ICT بر محیط زیست تأثیر می‌گذارد، نشان داد که اثر مستقیم ICT بر انتشار CO_2 مثبت است و اثر غیرمستقیم آن از طریق تأثیر بر مصرف انرژی و توسعه مالی مثبت و از طریق باز بودن تجارت، منفی است به‌طوریکه، اثر کل مثبت است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد توسعه ICT کیفیت محیط زیست را در جنوب صحرای آفریقا بدتر می‌کند. مطالعه موير و هیوز (Moyer & Hughes ، ۲۰۱۲) نشان داد تنها در صورتیکه سرمایه‌گذاری درICT با سیاست‌گذاری‌های مناسب در خصوص انتشار آلاینده‌ها همراه باشد می‌تواند موجب کاهش انتشار CO_2 گرد. نتایج مطالعه هیگون و همکاران (Higon et al.، ۲۰۱۷) گویای پیامدهای ناهمگون ICT بر انتشار CO_2 در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه است. بر اساس این مطالعه رابطه بین ICT و انتشار CO_2 به شکل U وارونه است و فقط کشورهای توسعه یافته به سطحی از توسعه فناوری اطلاعات و ارتباطات رسیده‌اند، که در آن انتشار CO_2 با توسعه ICT کاهش می‌یابد.

بنابراین در حالی‌که برخی از مطالعات از نقش سودمند فناوری اطلاعات و ارتباطات در کاهش انتشار CO_2 حمایت می‌کنند برخی دیگر استدلال می‌کنند که سطوح بالاتر فناوری اطلاعات و ارتباطات منجر به تخریب محیط زیست می‌شود.

هدف این مقاله اتخاذ موضعی متفاوت از مطالعات قبلی در مورد رابطه بین انتشار CO_2 و رشد اقتصادی است. در حالی‌که دو جریان اصلی ادبیات موجود یا بر پیوندهای بین رشد اقتصادی و کیفیت محیطی تحت فرضیه EKC یا بر روابط بین ICT، رشد اقتصادی و انتشار CO_2 تمرکز دارند، این مطالعه به نقش حیاتیICT ، به عنوان یک متغیر انتقال، که پتانسیل جداسازی بین انتشار CO_2 و رشد اقتصادی را دارد متمرکز است. بنابراین، مطالعه حاضر از چندین جنبه از ادبیات موجود که رابطه بین ICT، انتشار CO_2 و رشد اقتصادی را در چارچوب EKC بررسی می‌کند، متفاوت است:

یک: از دیدگاه نظری، فرض شده است که کشش درآمدی آلودگی محیطی به‌طور مستقیم به سطح درآمد بستگی دارد. این فرض کاملاً محدود کننده است زیرا مکانیسم‌های انتقال (کانال‌های انتقال) را که منجر به انتشار کمتر CO_2 در سطوح کافی درآمد می‌شوند، در نظر نمی‌گیرد. مطالعات موجود به سادگی ICT را به عنوان یک متغیر توضیحی اضافی در سمت راست EKC معرفی کرده‌اند. در واقع مطالعات قبلی نسبت به شناسایی و بررسی نقش مهم فناوری اطلاعات و ارتباطات به‌عنوان مکانیزم یا کانال انتقالی اثرگذار بر رشد اقتصادی و آلودگی محیطی ناکام بوده‌اند. بنابراین هنوز شکاف‌های قابل توجهی در رابطه با اثربخشی فناوری اطلاعات و ارتباطات در بهبود رشد اقتصادی و همزمان دستیابی به کیفیت بهتر محیط زیست وجود دارد. این مطالعه، ICT را به عنوان متغیری در نظر می‌گیرد که ضمن تاثیر مستقیم بر انتشار CO_2 به‌طور غیرمستقیم ارتباط بین دو متغیر رشد اقتصادی و انتشار CO_2 را تغییر می‌دهد و با آزمون نقش فناوری اطلاعات و ارتباطات به عنوان یک متغیر انتقال در هنگام مطالعه اثرات رشد اقتصادی بر کیفیت محیطی، شکاف موجود را برطرف می‌کند.

دو: ازنظر تکنیک اقتصادسنجی، این مطالعه با عمده مطالعات موجود متفاوت است. با توجه به اینکه متغیرها در چارچوب EKC از یک الگوی ناهمگن و غیرخطی پیروی می‌کنند، به‌منظور استفاده از یک تکنیک اقتصادسنجی مناسب و قابل اعتماد از مدل رگرسیون انتقال ملایم تابلویی (PSTR) استفاده شده که برای مدل‌های تغییر رژیم با داده‌های تابلویی مناسب است. بر اساس ادبیات تجربی قبلی، هیچ مطالعه‌ای وجود ندارد که از این مدل و با آزمون فناوری اطلاعات و ارتباطات به‌عنوان متغیر انتقالی در چارچوب فرضیه EKC استفاده کرده باشد.

سه: از نظر اندازه‌گیری متغیر، این مطالعه به دنبال روشن کردن اثر غیرخطی بهره‌وری کل عوامل بر انتشار CO_2 است. یعنی از بهره‌وری کل عوامل (TFP) به عنوان معیاری برای فعالیت‌های اقتصادی به جای تولید ناخالص داخلی استفاده شده است. اخیراً این عقیده که TFP می‌تواند به عنوان یک جایگزین برای تولید ناخالص داخلی مورد استفاده قرار گیرد در ادبیات اقتصاد محیط زیست رایج شده است. طبق گفته لادو و ملدو (Ladu & Meleddu،۲۰۱۴)، بهره‌وری کل عوامل، معیار مناسبی برای رشد به جای تولید ناخالص داخلی است. برخی از مطالعاتی که بر پیوند بین TFP و انرژی تمرکز دارند به شرح زیر است:

توکگو (Tugcu، ۲۰۱۳) ؛ آخان و آدو (Ackah & Adu، ۲۰۱۴)؛ لادو و ملدو (Ladu & Meleddu، ۲۰۱۴)؛ راث و همکاران (Rath et al. ، ۲۰۱۹)؛ همچنین ارتباط بین TFP و CO_2

توسط امری و همکاران (Amri et al. ، ۲۰۱۹)؛ آلتینوز و همکاران (Altinoz et al. ، ۲۰۲۰) و بن لاهول و همکاران (Ben Lahouel ، ۲۰۲۱) بررسی شده است.

بر اساس مدل‌های رشد، افزایش بهره‌وری که اصلی‌ترین وجه آن بهبود فناوری تولید است از مهم‌ترین عوامل دستیابی به رشد اقتصادی است اما رشد اقتصادی لزوما منجر به توسعه پایدار نخواهد شد. این مطالعه بر فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات (ICT) و بهره‌وری کل عوامل (TFP) به جای عوامل سنتی مؤثر بر انتشار CO_2 تمرکز دارد و ICT را به عنوان متغیری در نظر می‌گیرد که می‌تواند ارتباط بین دو متغیر رشد اقتصادی و انتشار CO_2 را به سود محیط زیست تغییر دهد، در واقع این مطالعه با بررسی نقش ICT به‌عنوان متغیر انتقال و با وارد کردن متغیر TFP در مدل، به شیوه‌ای جدید بررسی می‌کند که آیا توسعه نفوذ ICT به عنوان آخرین فناوری GPT (General Purpose Technologies) می‌تواند فناوری تولید و به دنبال آن رشد اقتصادی را به نفع حفظ محیط زیست تغییر دهد به‌طوریکه رشد اقتصادی در نهایت منجر به تحقق توسعه پایدار گردد یا خیر.

ادامه مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. در بخش ۲، ادبیات موضوع ارائه شده است. در این بخش، ضمن مرور ادبیات منحنی کوزنتس زیست‌محیطی (EKC)، رابطه بین ICT، TFP و انتشار CO_2، ارائه شده است. بخش ۳ به روش‌شناسی تحقیق اختصاص دارد. در بخش ۴ یافته‌های تحقیق ارائه خواهد شد و بخش پنجم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲. ادبیات موضوع

۱.۲ کوزنتس زیست‌محیطی EKC

با مطالعه گروسمن و کروگر(۱۹۹۱)، رابطه میان شاخص‌های مختلف تخریب محیط زیست و رشد اقتصادی به شکل U وارون، به‌عنوان منحنی زیست‌محیطی کوزنتس در مطالعات اقتصادی و زیست‌محیطی مطرح شد. این منحنی با ۳ اثر مقیاس، ترکیبی و فنی توضیح داده می‌شود. به‌طوریکه در سطوح اولیه رشد، افزایش مقیاس فعالیت‌های اقتصادی آلودگی را افزایش خواهد داد (اثر مقیاس)، اثر ترکیبی به این واقعیت اشاره دارد که در مراحل مختلف رشد، اقتصاد تحولات ساختاری عمیقی را تجربه می‌کند تغییر ترکیب ساختار اقتصاد ازکشاورزی به اقتصاد صنعتی که متکی به منابع طبیعی است، درابتدا موجب افزایش آلاینده‌ها می‌گردد اما درادامه تغییر ترکیب صنایع از صنایع انرژی‌بر به صنایع دانش محور و خدمات موجب

انتشارکمترآلودگی خواهد شد. مطابق با اثر فنی، با افـزایش درآمـد سـرانه، تقاضـا بـرای محـیط زیست با کیفیت بهتر افزایش یافته و قوانین زیست‌محیطی شدیدتر بـه جـایگزینی فنـاوری‌هـای قدیمی با فناوری‌های پاک‌تر می‌انجامد (اثر فنی)، بنابراین بعـد از یـک حـد مشـخص از درآمـد سرانه منحنی نزولی خواهد شد.

در ادبیات EKC، انتشار CO_2 معمولاً به عنوان نماینده‌ای برای تخریب محیط زیسـت اسـتفاده می‌شود. با این حال، از زمان مطرح شدن EKC تا کنون شاخص‌های مختلفی از تخریـب محـیط زیست برای آزمایش فرضیه EKC استفاده شده است: سطح آلاینده‌ها ماننـد کیفیـت هـوا و آب، غلظت آلودگی محیط و سـایر شـاخص‌هـای آلـودگی از قبیـل فرسـایش خـاک، بیابـان زایـی، ازدست‌دادن تنوع زیستی، بهداشت شهری، تغییرات آب و هوایی و غیره از جمله پراکسـی‌هـای مختلف در دسترس برای تخریب محیط زیسـت هسـتند. بـه عنـوان مثـال، آلمیـدا و همکـاران (Almeida et al. ، ۲۰۱۷)، فرضیه EKC را برای پانلی متشـکل از ۱۵۲ کشـور بـا اسـتفاده از یـک شاخص ترکیبی از شاخص‌های زیست‌محیطی، بررسـی کردنـد. ایـن مطالعـه نتوانسـت فرضـیه EKC را اثبات کند و به این نتیجه رسید که رشد اقتصادی به تنهایی برای بهبـود کیفیـت محیطـی کافی نیست. از سوی دیگـر، اولوچـاک و بیلگیلـی (Bilgili & Ulucak ، ۲۰۱۸) از متغیـر ردپـای اکولوژیکی (Ecological Footprint) اسـتفاده کردنـد و رابطـه U شـکل معکـوس را بـرای پـانلی متشکل از ۴۵ کشور تأیید نمودند. آمادور و همکاران (Fernández-Amador، ۲۰۲۰) اثـرات رشـد اقتصادی را بر سرانه انتشار متان برای نمونه ای از ۶۶ کشور تجزیه و تحلیل کردند. ایـن مطالعـه نشان داد که رشد اقتصادی به‌طور قابل ملاحظه‌ای انتشار سرانه متـان را در نمونـه آنهـا افـزایش داده است.

فرضیه EKC از زمان مطرح شدن به دفعات آزمایش شده است با ایـن وجـود، ادبیـات EKC شواهد متناقضی در مورد وجود EKC ارائه مـی‌دهـد. مهـرآرا و همکـاران (۱۳۹۱) نشـان دادنـد رابطه بین مصرف سرانه انرژی و درآمد سرانه بـرای ۱۳ کشـور عضـو اوپـک بـه‌صـورت یـک منحنی U معکوس قابل نمایش است. همچنـین بـن‌جبلـی و همکـاران (Ben-jebli et al. ، ۲۰۱۶) وجود فرضیه U شکل معکوس را برای ۲۵ کشور OECD در بازه زمـانی ۱۹۸۰ تـا ۲۰۱۰ اثبـات کردند. در مقابل، نوراوغلو و کونست (Nuroglu &Kunst ، ۲۰۱۸) نشان دادند که داده‌های آنهـا از فرضیه EKC برای کشورهای در حال توسعه برای بازه زمانی ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۱ حمایـت نمـی‌کنـد، سوری و چاپمن (Chapman &Suri ، ۱۹۹۸) نشان دادند که کشورهای توسـعه یافتـه در شـاخه نزولی و کشورهای در حال توسعه در شاخه صـعودی منحنـی کـوزنتس زیسـت‌محیطـی قـرار

دارند. در مطالعه فریدل و گتزنر (Friedle &Getzner ، ۲۰۰۳) شکل منحنی N شکل بـرای اتـریش تایید گردید.

همچنین از آنجا که رابطه میان رشد اقتصادی و آلودگی محـیط زیسـت فقـط در چـارچوب یک مدل دو متغیره قابل بیان نیست، در مطالعات تجربی انجام شده، بر اسـاس هـدف پـژوهش، متغیرهای توضیح دهنده مختلفی مانند سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی، شاخص توسعه مالی، اثـر سواد، نابرابری و آزادی مدنی، جمعیت و ترکیب آن، ساختار صنعتی و نهـادی، حجـم تجـارت خارجی و فناوری اطلاعات و ارتباطات به مدل اضافه شـده اسـت. بـه عنـوان مثـال مهـدوی و بابایی (۱۳۹۴) اثر توسعه مالی بر کیفیت محیط زیست ایـران را بررسـی کردنـد و نشـان دادنـد سطوح بالاتر توسعه مالی موجب کاهش انتشـار دی‌اکسـید کـربن مـی‌گـردد. شـعبانی و اربـاب (۱۳۹۶) نشان دادند گسترش بخش فنـاوری اطلاعـات و ارتباطـات عـلاوه بـر تـاثیر مثبـت بـر اقتصاد، تبعات زیست‌محیطی مناسبی دارد. صادقی و همکاران (۱۳۹۴) با در نظـر گـرفتن نقـش توسعه مالی و درجـه بـاز بـودن اقتصـاد، رابطـه غیرخطـی بـین درآمـد و شـدت انـرژی را در کشورهای منتخب MENA بررسی کردند و فرضیه زیست‌محیطی کـوزنتس را در یـک مـدل دو رژیمی تایید کردند. ازترک و آکار اوچـی (Ozturk &Acaravci ، ۲۰۱۲) بـا بررسـی تـاثیر حجـم تجارت خارجی نتیجه گرفتند طیف کالاهای صادر یا وارد شده بـر محـیط زیسـت اثـر گذارنـد به‌طوریکه واردات کالاهای با فناوری پیشرفته می‌تواند موجـب کـاهش انتشـار CO_2 و صـادرات کالاهای انرژی بر موجب افزایش انتشـار CO_2 مـی‌گـردد. بـارت و گریـدی (Barrett & Graddy ، ۲۰۰۰) با اضافه کردن معیار آزادی‌های سیاسی و مدنی دریافتنـد نزولـی شـدن منحنـی EKC بـا سیاست‌گذاری‌های حمایت از محیط زیست همراه است و هرچه سیسـتم سیاسـی دمکـرات‌تـر باشد کیفیت محیط زیست، به دلیل تقاضای شهروندان به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد.

۲.۲ ICT ، TFP و انتشار CO_2

۱.۲.۲ ICT و TFP

در خصوص تاثیر ICT بر بهره‌وری، این نظریه وجود دارد که پذیرش اولیه یـک فنـاوری فراگیـر جدید در یک اقتصاد ممکن است، قبل از بهبود بهره‌وری، به دلیل: زمان مورد نیاز بـرای توسـعه زیرساخت‌های جدید، هزینه‌های یادگیری و منسوخ شدن فنـاوری‌هـا و مهـارت‌هـای قـدیمی، عملاً آن را کاهش دهد. بعد از مطـرح شـدن پـارادوکس بهـره‌وری توسـط سـولو در ۱۹۸۷ بـا

جمله‌ی «می‌توان عصر کامپیوتر را در همه جا به جز در آمار بهره‌وری مشاهده کرد» برینجولفسون و همکاران (Brynjolfsson et al. ، ۲۰۲۱) استدلال کردند که پارادوکس سولو منحصر به فرد نبوده بلکه در انقلاب صنعتی و اختراع ماشین بخار، همچنین دوران برقی‌سازی و توسعه استفاده از الکتریسیته تجربه شده است. آنها استدلال می‌کنند که همراه فناوری‌های GPT (General Purpose Technologies)، فناوری‌هایی که می‌توانند کل اقتصاد را در سطح ملی یا جهانی تحت تاثیر قرار دهند) مانند هوش مصنوعی، سرمایه‌گذاری‌های مکمل قابل توجهی از جمله اختراع فرآیندها، مدل‌های تجاری و سرمایه انسانی جدید نیاز است که در طی زمان ایجاد می‌شوند، اما این سرمایه‌گذاری‌های مکمل اغلب نامشهود بوده و در حساب‌های ملی به درستی اندازه‌گیری نمی‌شوند، این حقیقت منجر به کم برآورد کردن رشد بهره‌وری درسال‌های اولیه GPT جدید می‌شود و بعدا، زمانی که مزایای سرمایه‌گذاری‌های نامشهود آشکار می‌شود، رشد بهره‌وری بیش از حد برآورد می‌شود که یک منحنی J شکل بهره‌وری تولید می‌کند شکلی که می‌تواند کاهش بهره‌وری با ظهور GPT و همچنین افزایش آتی بهره‌وری، به دلیل وجود دارایی‌های نامشهود و زمان مورد نیاز برای طرح‌بندی مجدد و بهره‌برداری کامل از مزایای فناوری جدید تولید را توضیح دهد.

ICT به‌طور مستقیم و غیرمستقیم به رشد بهره‌وری کمک می‌کند:

برای مشخص کردن کانال‌هایی که ICT بر بهره‌وری و رشد اقتصادی اثر می‌گذارد تابع تولید زیر توسط پاجولا معرفی شده است:

$$y_t = y(y_t^{ICT}, y_t^0) = A_t F(C_t, K_t, H_t, L_t) \qquad (۱)$$

به‌طوریکه در هر دوره (t)، ارزش افزوده (y_t)، از مجموع کالاها و خدمات بخش ICT (y_t^{ICT}) و سایر بخش‌ها (y_t^0) بدست می‌آید، این ستانده‌ها با استفاده از نهاده‌های سرمایه بخش ICT (C_t)، سرمایه غیر ICT(K_t)، سرمایه انسانی (H_t) و نیروی کار (L_t) تولید می‌شوند. سطح فناوری در اینجا به شکل خنثی هیکسی است (افزایش ستانده با پارامتر A نشان داده می‌شود). اکنون می‌توان دید که فناوری اطلاعات و ارتباطات به سه طریق زیر بر تولید و رشد اقتصادی تأثیر می‌گذارد. اول، تولید کالاها و خدمات ICT (y_t^{ICT}) بخشی از کل ارزش افزوده تولید شده در یک اقتصاد را تشکیل می‌دهد. دوم، استفاده از سرمایه ICT(C_t)، به عنوان نهاده در تولید همه کالاها و خدمات اثرگذار است و باعث رشد اقتصادی می‌شود. در نهایت، ICT می‌تواند رشد اقتصادی را از طریق مشارکت صنایع ICT در تغییرات فناوری افزایش دهد. اگر رشد سریع

تولید ICT مبتنی بر بهره‌وری و افزایش بهره‌وری در این صنایع باشد، این امر به رشد بهره‌وری در سطح اقتصاد کلان نیز کمک می‌کند. با این حال، مشکل این است که این تأثیر را نمی‌توان مستقیماً از تخمین تابع تولید استنباط کرد و تجزیه و تحلیل باید با ارزیابی بخشی از تغییر فناوری A که به صنعت ICT نسبت داده می‌شود، همراه باشد (پاجولاPohjola ، ۲۰۰۲).

فناوری اطلاعات و ارتباطات به عنوان هسته اقتصاد دیجیتال، نه تنها می‌تواند رشد اقتصادی را از طریق تعمیق نهاده سرمایه، بهبود فناوری و کیفیت کار توسعه دهد (تاثیر مستقیم بر بهره‌وری)، بلکه از طریق سازماندهی مجدد ساختار تولید با افزایش منافع مصرف کننده و از طریق بهبود فرآیندهای بازار مانند انتشار آسان‌تر اطلاعات و کاهش هزینه‌های مبادله، بهره‌وری را افزایش می‌دهد، در واقع انتشار ایده‌ها و اطلاعات جدید، کارآفرینی و سرریز دانش و افزایش رقابت‌پذیری از طریق ICT موجب بهبود بهره‌وری می‌شود یعنی ICT به شکل غیرمستقیم نیز به رشد نوآوری کمک می‌کند (اسپیزاSpieza ، ۲۰۱۱).

در سال‌های اخیر ICT به‌عنوان عامل اصلی تغییر، رشد و نوآوری اجتماعی پذیرفته شده است. این عقیده وجود دارد که تحولات فناوری اطلاعات و ارتباطات به سرمایه اضافی مانند سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، نیاز دارد. از سوی دیگر، استفاده گسترده از فناوری اطلاعات و ارتباطات در افزایش بهره‌وری در تولید از طریق انتشار یک اثر خارجی مثبت به اقتصاد نقش دارد (رام و آچاریا Ram & Acharya ، ۲۰۱۶).

مطالعه پاپایونو (Papaioannou، ۲۰۰۴) به بررسی اثرات ICT بر TFP و رشد اقتصادی در کشورهای درحال توسعه و توسعه‌یافته می‌پردازد. نتایج نشان داد سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی که در تابع تولید این مطالعه، نماینده پیشرفت فناوری است اثر مثبت و معناداری بر رشد اقتصادی و بهره‌وری در کشورهای مورد بررسی دارد و این تأثیر در کشورهای درحال توسعه بیش‌تر است. هم‌چنین یک رابطه مثبت از تأثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر رشد اقتصادی و بهره‌وری، برای کل کشورهای موجود در مدل به‌دست آمده است.

۲.۲.۲ ICT و انتشار CO_2

ICT سه اثر متفاوت بر انتشار CO_2 دارد:

۱. اثر استفاده: این اثر به چرخه تولید ICTمربوط می‌شود، مانند تولید تجهیزات و دستگاه‌ها، نصب و پردازش، عملیات توزیع و بازیافت زباله الکترونیکی. این اثر به‌طور قابل توجهی

به افزایش مصرف انرژی و متعاقباً افزایش انتشار CO_2 کمک می‌کند (شعبانی و شهنازی Shabani & Shahnazi ، ۲۰۱۹).

۲. اثر جانشینی : به معنی بازطراحی مجدد فرآیندهای تولید از طریق غیرمادی شدن، تحرک‌زدایی و کربن‌زدایی است که موجب کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی و انتشار CO_2 می‌گردد. مثل جایگزینی بین کالاها و خدمات فیزیکی با مجازی، مثلا نوشتن نامه و خواندن کتاب و مجلات که چاپی هستند با ایمیل، کتاب‌های الکترونیکی و مجلات الکترونیکی جایگزین شده است یا نیازبه حضور و تحرک فیزیکی از طریق جلسات مجازی، ارتباط از راه دور، بانکداری آنلاین، دولت الکترونیک، تجارت الکترونیک، یادگیری مجازی و غیره کاهش می‌یابد (لوپز ومونتا-Ollo-Lopez & Armenia Muneta،۲۰۱۲؛ شعبانی و شهنازی، ۲۰۱۹)

۳. اثر هزینه‌یابی: ICTموجب افزایش تقاضا برای سایر کالاها و خدمات به‌دلیل قیمت‌های پایین‌تر می‌گردد در نتیجه انتظار می‌رود انتشار CO_2 افزایش یابد (شعبانی و شهنازی، ۲۰۱۹).

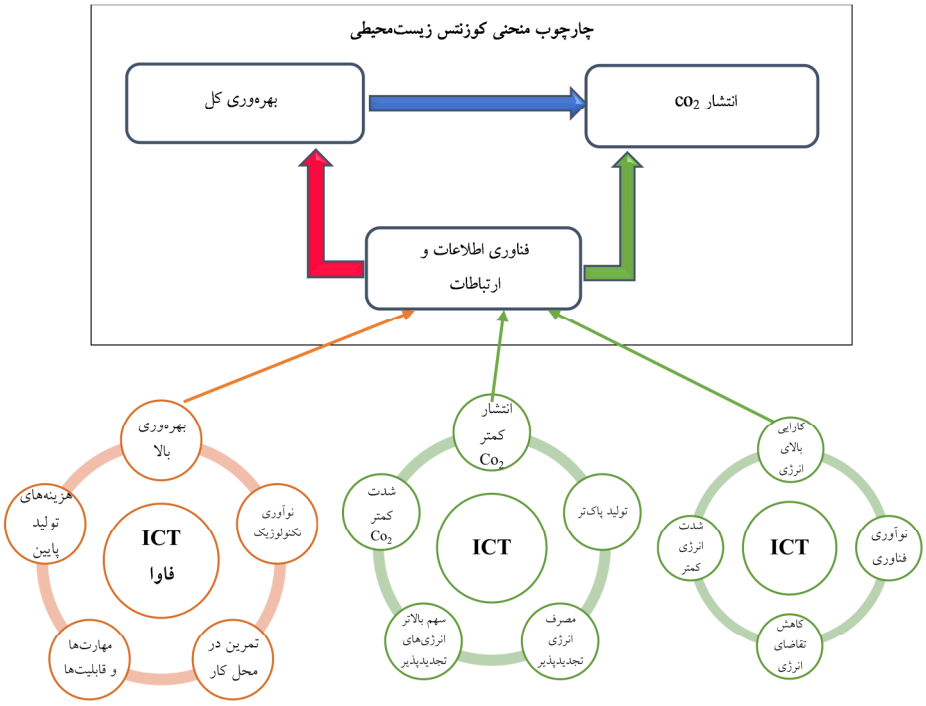
با مراجعه به ادبیات فوق می‌توان اشاره کرد که تأثیر محیطی ICT پیچیده و مبهم است. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که ICT باعث افزایش انتشار آلودگی می‌شود مانند لی و براهماسرن (Lee & Brahmasrene، ۲۰۱۴)؛ رحیم و همکاران (.Raheem et al ، ۲۰۱۹) در حالی‌که برخی دیگر به نتیجه معکوس دست یافته‌اند (ژانگ و لیو (Zhang & Liu ، ۲۰۱۵)؛ اوزگان و آپرکیس (Ozcan & Apergis، ۲۰۱۷) و آسونگو (Asongu ، ۲۰۱۸)). با این‌حال، این مطالعه دیدگاه سبز ICT را اتخاذ می‌کند وامید زیادی به توانایی آن برای بدست‌آوردن مزایای زیست محیطی و اثرات خارجی مثبت مانند کاهش انتشار CO_2 دارد.

۳.۲.۲ تاثیر ICT بر TFP و انتشار CO_2

اعتقاد بر این است که ICT به‌طور قابل ملاحظه‌ای هزینه‌های تولید را کاهش داده، کارایی تخصیص منابع را افزایش و سرمایه‌گذاری بیشتری را در بخش‌های مختلف اقتصاد تحریک می‌کند (پرادان و همکاران.Pradhan et al ، ۲۰۱۸). زیرساخت ICT ارائه خدمات را بهبود می‌بخشد، شفافیت را ترویج می‌کند و تعامل بین دولت و شهروندان را تشویق می‌کند. همچنین رشد بخش ICT انتشار CO_2 را کاهش می‌دهد زیرا ICTفرآیندهای تولید را بهینه می‌کند، کارایی انرژی را بهبود می‌بخشد، شدت انتشار را کاهش می‌دهد، سیستم‌های حمل و نقل را توسعه

می‌دهد و شهرهای هوشمندتری را می‌سازد (آکانده و همکاران Akande et al. ، ۲۰۱۹). این نشان دهنده نقش مثبت زیرساخت ICT درکاهش انتشار CO2 است در حالی‌که منجر به رشد اقتصادی می‌شود (صلاح‌الدین و همکاران Salahuddin et al. ، ۲۰۱۶).

مطابق شکل ۲ فناوری اطلاعات وارتباطات به‌طور همزمان بر رشد اقتصادی ومحیط زیست تأثیر دارد.



شکل ۲. ابعاد اثرگذاری ICT بر TFP و انتشار CO_2

مأخذ: بن لاهول Ben Lahoul، ۲۰۲۱

همچنان که ذکر شد، عمده مطالعات قبلی یا روابط بین ICT، بهره‌وری و رشد اقتصادی (فلش قرمز رنگ) را بررسی کرده‌اند و یا بر روابط بین ICTو انتشار CO_2 تمرکز دارند (فلش سبز رنگ) و نقش ICT به عنوان متغیری که ضمن اثرگذاری بر رشد اقتصادی و انتشار CO_2 عملا می‌تواند با اثرگذاری بر رابطه این دو موجب توسعه اقتصاد و کاهش انتشار آلاینده‌ها

گردد (فلش آبی رنگ)، نادیده گرفته شده است. این پـژوهش بـه‌دنبـال پـر کـردن ایـن شـکاف درمطالعات صورت گرفته است.

۳. روش‌شناسی

۱.۳ مدل رگرسیون انتقال ملایم تابلویی (PSTR)

در مدل‌های PTR که توسط هنسن (Hansen، ۱۹۹۹) ارائه شده‌اند ضرایب رگرسـیونی مـی‌تواننـد در طول زمان و برای واحدهای مقطعی تغییر یابند. در این مدل‌ها مشاهدات بر اساس بیشـتر یـا کمتر بودن از مقادیر آستانه‌ای به رژیم‌های همگن تقسیم می‌شوند. ضعف ایـن مـدل‌هـا وجـود جهش‌های شدید به دلیل قرار گرفتن مشاهدات بسیار نزدیک به مقادیر آسـتانه‌ای در رژیـم‌هـای متفاوت با وجود اختلافات ناچیزاست. مدل PSTR، شکل توسعه یافتـه مـدل PTR اسـت کـه بـا کمک تابع انتقال لاجستیک، مشکل جهش داده‌ها را برطرف مـی‌کنـد در ایـن مـدل شـیب تـابع انتقال که بیان کننده سرعت تعدیل است تغییر ملایم ضرایب رگرسیونی را از یک رژیم به رژیـم دیگر میسر می‌کند. شکل تعمیم یافته مدل PSTR با بیش از یک تابع انتقال به شکل زیـر تصـریح می‌شود:

$$Y_{it}= \mu_i+ B_0x_{it} + \sum_{J=1}^{r}[B_1x_{it}]\, G(q_{it};\, C;\, \gamma)+ U_{it} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، Y_{it} متغیر وابسته، μ_i اثرات ثابت مقاطع، X_{it} برداری از متغیرهای برونزا، r بیـانگر تعداد توابع انتقال، B_0 و B_1 پارامترهای مـدل و U_{it} جملـه خطاسـت کـه فـرض مـی‌شـود شـرط $iid\sim N(0,\Sigma_e^2)$ را تامین می‌کند. همچنین $G(q_{it};\, C;\, \gamma)$ تابع انتقال است که به‌صورت تابع لاجسـتیکی زیر تصریح می‌شود:

$$G(Q_{it};\, C;\, \gamma) = [1+\mathrm{Exp}(-\gamma \prod_{j=1}^{m}(q_{it} - c_j))]^{-1} \qquad (۳)$$

$$\text{With } \gamma > 0\ ,\ C_1 \leq C_2 \leq \ldots \leq C_{m'}$$

در تابع فوق q_{it} متغیر انتقال است، γ پارامتر شیب است که سرعت انتقـال از یـک رژیـم بـه رژیم دیگر را نشان می‌دهد. (اگر $\gamma \to ۰$ دراینصورت ($G = \frac{۱}{۲}$) خواهد بود و مـدل بـه یـک مـدل خطی تبدیل می‌شود). همچنین $c= (C_1,\ldots,C_m)'$ یک بردار m بعدی از پارامترهای حد آستانه‌ای یـا مکان‌های وقوع تغییر رژیم است. در واقع m تعداد دفعات تغییر رژیـم را نشـان مـی‌دهـد. تـابع انتقال به‌طور معمول یک یا دو حد آستانه‌ای($m=۲m\ ,\ =۱$) دارد (گونزالس وهمکـاران Gonzalez

et al، ۲۰۰۵). بر اساس مطالعه کولتاز و هارولین(Colletazy &Hurlin، ۲۰۰۶) یک مدل PSTR با یک تابع انتقال و دو رژیم حدی، به‌صورت رابطه (۴) تصریح می‌شود:

$$Y_{it}= \mu_i+ B_0x_{it} +B_1x_{it} G (q_{it}; C; \gamma) + U_{it} \quad I=1,...,N , T=1,...,T \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، متغیرها مشابه رابطه ۲ است. تابع انتقال یک تابع پیوسته (نسبت به متغیر q_{it}) و کراندار بین ۰ و ۱ است. با فرض m =۱ یک حد آستانه‌ای با دو رژیم حدی وجود دارد. اگر $\gamma \to \infty$ یعنی سرعت انتقال از یک رژیم به رژیم دیگر بی‌نهایت باشد در صورتی‌که $q_{it} > C$ تابع انتقال مقدار عددی یک (G =۱) و در صورتیکه $q_{it} < C$ تابع انتقال مقدار عددی صفر (G =۰) دارد. این مقادیر تابع انتقال در صورتیکه $(q - C) \to \infty$ یا $(q - C) \to -\infty$ نیز رخ خواهد داد. یعنی اگر مقدار متغیر انتقال از مقدار آستانه خیلی بزرگتر باشد دراینصورت، G =۱ و اگر خیلی کوچکتر باشد G =۰ خواهد بود. همچنین با فرض m = ۲ دو حد آستانه‌ای با سه رژیم وجود دارد در این حالت اگر $\gamma \to \infty$ برای مقادیر $q_{it} < C1$ و $q_{it} > C_2$ ، G =۱ و در غیر اینصورت ($C_1 \leq q_{it} \leq C_2$)، G =۰ است. در واقع اگرسرعت انتقال بی‌نهایت باشد ($\gamma \to \infty$)، مدل رگرسیون به مدل PTR تبدیل می‌شود.

بنابراین در مدل PSTR ضرایب تخمینی با توجه به مشاهدات متغیر انتقال و پارامتر شیب به‌صورت پیوسته بین دوحالت حدی زیر تغیر می‌کنند، یعنی دو رژیم حدی وجود دارد و بین آن‌ها بر اساس مقدار G طیفی از رژیم‌ها موجود است:

$$Y_{it}=\begin{cases} \mu_i + B_0 X_{it} + U_{it} & G = 0 \\ \mu_i + (B_0 + B_1)X_{it} + U_{it} & G = 1 \end{cases} \qquad (۵)$$

همان‌طور که ذکر شد در مدل PSTRمانند PTR مشکل ناهمگنی داده‌های تابلویی برطرف شده است یعنی ضرایب رگرسیونی می‌توانند در طول زمان و برای واحدهای مقطعی تغییر یابند. کولیتاز و هارولین (۲۰۰۶) برای محاسبه کشش هر مقطع در طول زمان دو حالت را معرفی کرده است. در حالت اول متغیر انتقال (q_{it}) به‌عنوان متغیر توضیحی در مدل وارد نشده است:

$$e_{it} = \frac{\partial Y_{it}}{\partial X_{it}} = B_0 + B_1 G(qit; C; \gamma) \qquad (۶)$$

و حالت دوم که مانند این مطالعه، متغیر انتقال (q_{it}) به عنوان متغیر توضیحی در مدل وارد شده است:

$$e_{it} = \frac{\partial Y_{it}}{\partial X_{it}} = B_0 + B_1 G(qit; C; \gamma) + B_1 X_{it} \frac{\partial G(qit; C; \gamma)}{\partial X_{it}} \qquad (۷)$$

۲.۳ تصریح مدل

این مطالعه با برجسته کردن اهمیت ICT به‌عنوان یک متغیر انتقال رابطه غیرخطی بین TFP وانتشار CO_2 را با استفاده از رویکرد رگرسیونی انتقال ملایم تابلویی آزمون می‌کند. برای این منظور از رابطه ۴ استفاده می‌شود به‌طوریکه Y_{it}وX_{it} و Q_{it} به ترتیب معرف انتشار CO_2، TFP و ICT خواهند بود، علاوه بر TFP، متغیرهای بالقوه دیگری که تصور می‌شود بر انتشار CO_2 تأثیر می‌گذارند عبارتند از تولید ناخالص داخلی سرانه (GDP) و مصرف انرژی (EC) که با ارزش حرارتی سرانه انرژی اندازه‌گیری می‌شود.

بنابراین برای یک مقدار آستانه معین از متغیر انتقال (ICT)، دو رژیم حدی در معادله ۵ به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$CO_{2it}=\begin{cases}\mu_i+\beta_0 TFP_{it}+\alpha_0 ICT_{it}+\varphi_0 GDP_{it}+\theta_0 EC_{it}+u_{it} & G=0\\ \mu_i+(\beta_0+\beta_1)TFP_{it}+(\alpha_0+\alpha_1)ICT_{it}+(\varphi_0+\varphi_1)GDP_{it}+(\tau_0+\tau_1)EC_{it}+u_{it} & G=1\end{cases}$$

رابطه TFP و انتشار CO_2در حضور این متغیرهای توضیحی آزمون می‌شود و در صورتیکه نتایج ناشی از این مدل نقش ICT را به‌عنوان متغیر انتقال و تعیین کننده رابطه این دو تایید کند می‌توان نسبت به نقش فناوری اطلاعات و ارتباطات در بهبود عملکرد زیست‌محیطی و ترویج رشد اقتصادی پایدار، مطمئن بود.

به پیروی از گونزالز و همکاران (۲۰۰۵) و کولیتاز و هارولین (۲۰۰۶) برای تصریح یک مدل PSTR در مرحله اول باید آزمون خطی بودن در مقابل PSTR انجام شود ودر صورت رد فرض صفر مبنی برخطی بودن و تایید مدل PSTR ، باید تعداد توابع انتقال برای تعیین دقیق مدل (PSTR1 ، PSTR2 و...) مشخص گردد.

آزمون غیرخطی بودن در مدل PSTR می تواند با آزمون‌های زیر انجام شود:

$$(A)\begin{cases}H_0:\gamma=0\\ H_1:\gamma\neq 0\end{cases}\qquad (B)\begin{cases}H_0:B_0=B_1=0\\ H_1:B_0\ \text{یا}\ B_1\neq 0\end{cases}$$

بر اساس معادله A آزمون می‌کنیم که پارامتر سرعت انتقال معنی‌دار است یا خیر و بر اساس معادله B معنی‌داری ضرایب بخش غیرخطی را آزمون می‌کنیم. اما از آنجا که پارامترهای بخش غیرخطی تحت فرضیه H_0 قابل شناسایی نخواهند بود، آماره آزمون هر دو آزمون A و B غیراستاندارد خواهد بود یعنی به دلیل حضور پارامترهای نامعین، توزیع آماره آزمون مختل شده

و از توزیع آماره آزمون F استاندارد پیروی نخواهد کرد بنابراین از بسط تیلور تابع انتقال حول $\gamma = 0$ به‌صورت زیر استفاده می‌گردد:

$$\mathrm{Yit} = \mu_i + \mathrm{B}_0\,\mathrm{X}_{it} + \theta_0 \mathrm{B}_1\,\mathrm{X}_{it} + \theta_1 \mathrm{qitB}_1\,\mathrm{X}_{it} + \cdots + \theta_n \mathrm{q}_{\mathrm{it}}^{n} \mathrm{B}_1\,\mathrm{X}_{it} + \mathrm{u}_{it} \qquad \text{(C)}$$

بنابراین براساس تقریب سری تیلور درمعادله بالا آزمون خطی بودن از طریق آزمون $H_0: \theta_1 = \cdots = \theta_n = 0$ در مقابل $H_1: \theta_1 \neq \cdots \neq \theta_n \neq 0$ انجام می‌شود. برای آزمون این فرضیه، کولیتاز وهارولین (۲۰۰۶) آماره‌های ضریب لانگرانژ والد Wald Lagrange Multiplier (LM_W)، ضریب لانگرانژ فیشر Fisher Lagrange Multiplier (LM_F) و نسبت درستنمایی Likelihood Ratio (LR)، را پیشنهاد کرده‌اند.

در صورت رد فرض صفر و تایید رابطه غیرخطی، در مرحله بعد باید تعداد توابع انتقال در مدل PSTR مشخص گردد. ابتدا فرضیه وجود یک تابع انتقال در مقابل حداقل دو تابع برای تصریح مدل PSTR آزمون می‌شود، فرآیند این آزمون نیز مشابه آزمون خطی بودن است با این تفاوت که در این حالت تابع انتقال دوم مانند معادله زیر به‌صورت تقریب تیلور تصریح می‌شود.

$$\mathrm{Yit} = \mu_i + \mathrm{B}_0\,\mathrm{X}_{it} + \mathrm{B}_1\,\mathrm{X}_{it}\mathrm{G}(\mathrm{qit};\ \mathrm{C};\ \gamma) + \theta_0 \mathrm{B}_2\,\mathrm{X}_{it} + \cdots + \theta_n \mathrm{q}_{\mathrm{it}}^{n} \mathrm{B}_2\,\mathrm{X}_{it} + \mathrm{u}_{it} \qquad \text{(D)}$$

آزمون وجود یک تابع انتقال بوسیله آزمون $H_0: \theta_1 = \cdots = \theta_n = 0$ در مقابل $H_1: \theta_1 \neq \cdots \neq \theta_n \neq 0$ انجام می‌شود، در صورت رد فرض صفر و تایید وجود حداقل دو تابع انتقال، فرضیه وجود دو تابع انتقال در مقابل حداقل سه تابع برای تصریح مدل PSTR آزمون می‌شود و این فرآیند تا زمان تایید فرض صفر ادامه می‌یابد.

۴. داده‌ها و یافته‌های تحقیق

۱.۴ داده‌ها

انتشار CO_2 برحسب تن سرانه و ICT با ضریب نفوذ اینترنت به‌صورت درصدی از جمعیت که از اینترنت استفاده می‌کنند اندازه‌گیری می‌شود، این داده‌ها به همراه تولید ناخالص داخلی سرانه (GDP)، از پایگاه داده شاخص‌های بانک جهانی(WBI) جمع‌آوری شده‌اند، TFP، با روش شاخص عددی به قیمت ثابت سال ۲۰۱۷ محاسبه و از داده‌های منتشر شده توسط دانشگاه خرونینخن (Penn World Table, Version 10) جمع‌آوری شده است. مصرف انرژی (EC) که با

ارزش حرارتی سرانه انرژی، اندازه‌گیری می‌شود از داده‌های منتشر شده توسط IEA استخراج شده است.

در تخمین مدل از شکل لگاریتمی سری داده‌ها استفاده می‌شود. با توجه به اینکه تغییرات آب و هوا و مسئله گرمایش زمین ناشی از بحران محیط زیست یک موضوع جهانی است و مدیریت آن نیازمند اجماع جهانی است، به‌منظور ارائه راه‌کارهای بین‌المللی برای حفظ محیط زیست، این پژوهش در سطح جهانی انجام می‌شود و با توجه به در دسترس بودن داده‌های مورد نیازبه ویژه داده‌های TFP، شامل داده‌های ۱۰۸ کشور از جمله ایران برای دوره زمانی ۲۰۰۳–۲۰۱۹ است. این پژوهش در سطح بین‌المللی انجام می‌شود و به‌دلیل موجود نبودن داده‌های TFP در مراجع معتبر آماری، از کل کشورهای جهان، تعداد ۱۰۸ کشور در مطالعه وارد شده‌اند و برخی از کشورهای کمتر توسعه یافته به دلیل فقدان داده‌های مورد نیاز، از پژوهش حذف شده‌اند.

۲.۴ مانایی

از آنجا که استفاده از متغیر نامانا در رگرسیون می‌تواند نتایج رگرسیونی کاذب ایجاد کند و موجب شود آماره‌های t و F که به‌صورت رایج برای معنی‌داری ضرایب رگرسیون استفاده می‌شود قابل استفاده نباشند، همچنین با توجه به اینکه یکی از پیش‌شرط‌های اصلی استفاده از مدل PSTR مانا بودن متغیرها است، قبل از استفاده از مدل باید بررسی شود که آیا متغیرهای مدل مانا هستند یا خیر. اگرمتغیرها در سطح مانا باشند از خود متغیرها در مدل استفاده می‌شود در غیر اینصورت لازم است از رویکردهای رایج برای مانا کردن متغیرها مانند تفاضل‌گیری استفاده شود و در نهایت داده‌های مانا در مدل وارد شوند. بنابراین بررسی مانایی متغیرها قبل از انجام تخمین، ضروری است.

از آنجاکه هرکدام از آزمون‌های ریشه واحد نقاط ضعف و قوتی دارند و ممکن است تحت شرایطی توان هریک از آزمون‌ها کاهش یابد و نتایج اشتباه ارائه دهند بنابراین برای نتیجه‌گیری درست در خصوص مانایی متغیرها از چند آزمون ریشه واحد استفاده شده است. همانطور که مشخص است، در مجموع آزمون‌ها، فرضیه صفر(وجود ریشه واحد یا نامانایی در سری) را رد می‌کنند و تمام متغیرها در سطح مانا هستند.

جدول ۱. نتایج آزمون‌های ریشه واحد براساس آزمون‌های ریشه واحد مختلف

	CO_2		TFP		ICT		GDP		EC	
method	Statistic	Prob	Statistic	Prob	Statistic	Prob	Statistic	Prob	Statistic	Prob
Null: Unit root (common unit root)										
Levin, Lin & Chu t*	−۲۵/۲۹۸	۰/۰۰۰	−۶/۶۸۶	۰/۰۰۰	−۱۱/۶۵۱	۰/۰۰۰	−۶/۸۳۷	۰/۰۰۰	−۲۰/۵۹۲	۰/۰۰۰
Null: Unit root (individual unit root)										
Im, Pesaran and Shin W-statistic	−۳/۴۳۷	۰/۰۰۰	−۰/۸۶۹	۰/۱۹۲	−۱/۹۰۴	۰/۰۲۸	۰/۵۱۳	۰/۶۹۶	−۴/۰۴۰	۰/۰۰۰
ADF - Fisher Chi-square	۵۰۹/۵۸۶	۰/۰۰۰	۲۸۶/۵۴۳	۰/۰۰۰	۶۰۴/۰۹۲	۰/۰۰۰	۴۶۴/۳۲۷	۰/۰۰۰	۷۳۰/۷۰۲	۰/۰۰۰
PP - Fisher Chi-square	۵۳۷/۸۰۰	۰/۰۰۰	۲۷۹/۹۳۰	۰/۰۰۲	۷۳۹/۲۷۲	۰/۰۰۰	۵۵۵/۴۰۶	۰/۰۰۰	۷۸۵/۲۵۷	۰/۰۰۰

مأخذ: یافته‌های پژوهش

برای متغیر انتشار CO_2 و مصرف سرانه انرژی (EC) ، فرض صفر تمامی آزمون‌ها در سطح معنی‌داری یک درصد رد می‌شوند بنابراین بر اساس هر ۴ آزمون انجام شده، این دو متغیر مانا است.

متغیرهای ضریب نفوذ اینترنت (ICT)، تولید ناخالص سرانه (GDP)و بهره‌وری کل عوامل (TFP) ، به‌جز آزمون ایم پسران-شین بر اساس سه آزمون دیگر در سطح معنی‌داری یک درصد مانا هستند، بنابراین در مجموع آزمون‌ها، این سه متغیر نیز در سطح، مانا هستند.

۳.۴ نتایج تجربی

همان‌طور که در روش‌شناسی ذکر شد مرحله اول در مدل PSTR، بررسی وجود رابطه غیرخطی بین متغیرها است. در واقع در این مرحله این مسئله آزمون می‌شود که آیا تغییر در مقدارICT می‌تواند رابطه بین متغیرهای توضیحی مدل با متغیر وابسته را دستخوش تغییر کند یا خیر؟ در صورتی‌که فرض صفر آزمون یعنی فرض خطی بودن مدل رد شود به این معنی است که مدل غیرخطی است. یعنی زمانی‌که ICT در سطوح پایینی قرار دارد، رابطه متغیرها بر اساس رژیم پایین و ضرایب ظاهر شده در این بخش و زمانی‌که ICT از یک مقدار آستانه عبور می‌کند رابطه متغیرها تغییر کرده و از ضرایب متفاوتی که در رژیم بالا در مدل ظاهر می‌گردد پیروی می‌کنند. در این‌صورت مدل خطی مدل مناسبی برای بررسی رابطه بین متغیرها نیست و باید از روش PSTR برای مدل‌سازی رفتار متغیرها استفاده گردد.

به دلیل مشکلات موجود در آزمون غیرخطی بودن در مدل PSTR، از سه آزمون مختلف والد، فیشر و نسبت درستنمایی استفاده شده است و مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۲، براساس هر سه آزمون، در سطح معنی‌داری یک درصد فرض صفر(خطی بودن مدل)، رد می‌شود و غیرخطی بودن مدل تایید می‌گردد. بنابراین با فرض اینکه ICT یک متغیر انتقالی است، نتایج نشان می‌دهد که رابطه بین متغیرها خطی نیست و در صورت استفاده از مدل خطی دچار خطای تصریح مدل خواهیم شد. با توجه به اینکه فرضیه مخالف این آزمون مدل PSTR با حداقل یک متغیر انتقال است، مدل PSTR برای مدل‌سازی رفتار انتشار CO_2 مناسب است و از آنجاکه ICT موجب ایجاد رابطه غیرخطی بین متغیرهای مدل شده است نقش آن به عنوان متغیر انتقال در این مرحله تایید می‌شود.

جدول ۲. نتایج آزمون غیرخطی بودن

H0: Linear Model H1: PSTR model with at least one Threshold Variable (r=۱)

Wald Tests (LM): W = ۶۶/ ۹۸۵ pvalue = ۰/۰۰۰

Fisher Tests (LMF): F = ۱۶/ ۳۲۰ pvalue = ۰/۰۰۰

LRT Tests (LRT): LRT = ۶۸/۲۳۸ pvalue = ۰/۰۰۰

مأخذ: یافته‌های پژوهش

بعد از تایید غیرخطی بودن مدل باید تعیین شود آیا رابطه متغیرها با در نظر گرفتن دو رژیم حدی قابل تبیین است و دو رژیم برای مدل‌سازی کافی است یا خیر. جدول ۳ نتایج آزمون مدلPSTR با یک متغیر انتقال (PSTR1) را در برابر مدلPSTR با حداقل دو متغیر انتقال (PSTR2) نشان می‌دهد، مطابق نتایج هرسه آزمون والد، فیشر و نسبت درستنمایی، فرض صفر در سطح معنی‌داری پنج درصد رد نمی‌شود و مدل با یک تابع انتقال و دو رژیم حدی (PSTR1) تایید می‌گردد.

جدول ۳. نتایج آزمون تعیین نوع PSTR

H0: PSTR with r = ۱ against H1: PSTR with at least r = ۲		
Wald Tests (LM):	W =۸ / ۷۹۷	pvalue = ۰ / ۰۶۶
Fisher Tests (LMF):	F =۲ / ۰۶۵	pvalue = ۰ / ۰۸۳
LRT Tests (LRT):	LRT =۸ / ۸۱۹	pvalue = ۰ / ۰۶۶

مأخذ: یافته‌های پژوهش

پس از اطمینان از غیرخطی بودن مدل و تعیین تعداد رژیم‌های مورد نیاز برای توضیح رابطه بین متغیرها، ضرایب مدل برآورد می‌شود که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است:

جدول ۴. نتایج تخمین مدل PSTR1

متغیر	ضرایب بخش خطی	ضرایب بخش غیرخطی
TFP	*-۰/۲۴۶۸ (۰/۰۷۷۰)	*-۰/۴۲۲۸ (۰/۱۲۷۵)
ICT	-۰/۰۰۴۹ (۰/۰۰۵۶)	*-۰/۰۶۹۲ (۰/۰۱۲۹)
GDP	*۰/۰۵۷۲ (۰/۰۱۷۵)	-۰/۰۱۳۵ (۰/۰۲۱۱)
EC	*۰/۹۳۵۵ (۰/۰۱۷۹)	۰/۰۴۵۸ (۰/۰۴۱۹)

مأخذ: یافته‌های پژوهش/
سطح معنی‌داری: *:۱درصد، **:۵ درصد، *: ۱۰درصد**

ـ انحراف معیار مربوط به هر یک از ضرایب داخل پرانتز گزارش شده است.

ضرایب رژیم حدی پایین (زمانیکه $G = ۰$) دقیقا همان ضرایب بخش خطی است اما رژیم حدی بالا (زمانیکه $G = ۱$) است، از جمع ضرایب بخش خطی و غیرخطی بدست می‌آید و بین این دو رژیم بر اساس مقدار بدست آمده برای تابع لجستیکی انتقال (G) طیفی از رژیم‌ها وجود دارد و ضرایب متغیرها در هر رژیم از جمع ضرایب بخش خطی با ضرب تابع انتقال در ضرایب بخش غیرخطی، مطابق رابطه زیر بدست می‌آید:

ضرایب بخش خطی — ضرایب بخش غیرخطی

$$co_2 = B_0 x_{it} + B_1 x_{it} \underbrace{\frac{1}{1+e^{-\gamma(ict-c)}}}_{\text{تابع انتقال (G)}} + U_{it}$$

بنابراین در رابطه بالا مقدار ضرایب در رژیم حدی پایین B_0و در رژیم حدی بالا $B_0 + B_1$ و در رژیم‌های بین این دو با توجه به مقدار تابع انتقال برابر $(\frac{1}{1+e^{-\gamma(ict-c)}})$ $B_0 + B_1$ است. می‌توان دورژیم حدی را به شکل زیر نمایش داد:

$$\begin{cases} CO_2 = -۰/۲۴۶۸\mathrm{TFP_{it}} - ۰/۰۰۴۹\mathrm{ICT_{it}} + ۰/۰۵۷۲\mathrm{GDP_{it}} + ۰/۹۳۵۵\mathrm{EC_{it}} + u_{it} & \text{رژیم حدی پایین} \\ CO_2 = -۰/۶۶۹۶\mathrm{TFP_{it}} - ۰/۰۷۴۱\mathrm{ICT_{it}} + ۰/۰۴۳۷\ \mathrm{GDP_{it}} + ۰/۹۸۱۳\ \mathrm{EC_{it}} + u_{it} & \text{رژیم حدی بالا} \end{cases}$$

c=۴/۲	γ =۲۱/۵

و البته با صفر در نظر گرفتن ضرایب بی‌معنی که در جدول ۴ با رنگ قرمز مشخص شده‌اند خواهیم داشت:

$$\begin{cases} CO_2 = -۰/۲۴۶۸\mathrm{TFP_{it}} + ۰/۰۵۷۲\mathrm{GDP_{it}} + ۰/۹۳۵۵\mathrm{EC_{it}} + u_{it} & \text{رژیم حدی پایین} \\ CO_2 = -۰/۶۶۹۶\mathrm{TFP_{it}} - ۰/۰۶۹۲\mathrm{ICT_{it}} + /۰۵۷۲\ \mathrm{GDP_{it}} + ۰/۹۳۵۵\ \mathrm{EC_{it}} + u_{it} & \text{رژیم حدی بالا} \end{cases}$$

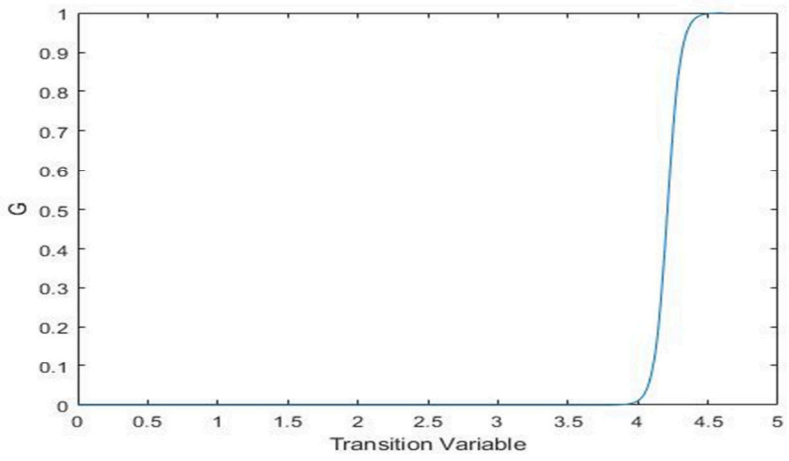
c=۴/۲	γ =۲۱/۵

بر اساس رابطه بالا، زمانی‌که در رژیم حدی پایین قرار داریم، به دلیل بی‌معنی شدن ضریب ICT این متغیر تاثیر مثبتی در کاهش انتشار CO_2 ندارد. در حالیکه در رژیم حدی بالا، نه تنها مستقیما و از طریق ضریب منفی و معنی‌دار ICT، موجب کاهش انتشار CO_2 می‌شود بلکه به‌طور غیرمستقیم از طریق منفی‌تر کردن ضریب متغیر TFP نیز بر کاهش انتشار CO_2، اثرگذار است. این نتیجه به‌خوبی مزیت زیست‌محیطی سرمایه‌گذاری در ICT را نشان می‌دهد و تایید می‌کند برای ظهور نتایج مثبت، باید مقدار ICT حداقل به اندازه‌ای باشد که از رژیم حدی پایین خارج شده باشیم و حداکثر نتایج مثبت زمانی آشکار می‌شود که مقدار ICT برای قرار گرفتن در رژیم حدی بالا کافی باشد.

تاثیر دو متغیر توضیحی دیگر یعنی تولید ناخالص داخلی سرانه و مصرف سرانه انرژی بر انتشار CO_2 در هر دو رژیم حدی بالا و پایین، بدون تغییر و مثبت است که نشان می‌دهد مقادیر متفاوت ICT، نوع اثرگذاری GDP و EC را بر انتشار CO_2 تغییر نمی‌دهد.

مطابق با نتایج بدست آمده با مقدار آستانه‌ای ۴/۲ و پارامتر شیب ۲۱/۵ در زمان تغییر رژیم تابع انتقال (G) به شکل زیر است:

$$G = \frac{1}{1+e^{-۲۱/۵\,(ict-۴/۲)}}$$



شکل ۳. تابع انتقال

مأخذ: یافته‌های پژوهش

بر اساس شکل ۳، G (محور عمودی) بین صفر تا یک است. همانطور که پیشتر اشاره شد با $G = ۰$ در رژیم حدی پایین و با $G = ۱$ در رژیم حدی بالا قرار داریم و بین این دو رژیم بر اساس مقدار بدست آمده برای تابع لجستیکی انتقال (G) طیفی از رژیم‌ها وجود دارد و درست زمانی‌که متغیر انتقال (محور افقی) ۴/۲ است رژیم تغییر می‌کند (از رژیم پایین به رژیم بالا). از آن‌جا که در تخمین مدل از شکل لگاریتمی داده‌ها استفاده شده است، عدد مکان انتقال با استفاده ازتابع exponential به عدد ۶۶/۴ تبدیل می‌شود. یعنی زمانیکه ضریب نفوذ اینترنت کمتر از۴ /۶۶ درصد است دررژیم پایین و زمانیکه بالاتر از ۶۶/۴ باشد در رژیم بالا قرار داریم. همچنین بر اساس نتایج تخمین، پارامتر شیب (γ) معادل ۲۱/۵ بوده که نشان دهنده سرعت تغییر رژیم است.

با قرار دادن c= ۴/۲ وγ=۲۱/۵ در تابع انتقال، و با صفر در نظر گرفتن ضرایب بی‌معنی که در جدول ۴ با رنگ قرمز مشخص شده‌اند خواهیم داشت:

$$co_2 = (-۰/۲۴۶۸ + (-۰/۴۲۲۸(\frac{1}{1+e^{-۲۱/۵(ict-۴/۲)}}))) \text{ TFP}_{it} + (-۰/۰۶۹۲(\frac{1}{1+e^{-۲۱/۵(ict-۴/۲)}})) \text{ ICT}_{it} + (۰/۰۵۷۲) \text{ GDP}_{it} + (۰/۹۳۵۵) \text{ EC}_{it}$$

مطابق با رابطه فوق در رژیم‌های بین دو رژیم حدی بالا و پایین، ضرایب GDP و EC مثبت بوده و از رابطه خطی با انتشار CO_2 پیروی می‌کنند یعنی با عبور مقدار ICT از حد آستانه‌ای (۴/۲) ضرایب و نحوه اثرگذاری این دو متغیر بر متغیر وابسته تغییر نمی‌کند.

ضریب متغیر ICT بین دو مقدار صفر در رژیم حدی پایین و۰/۰۶۹۲- در رژیم حدی بالا، بنا بر مقدارICT تغییر می‌کند والبته مادامی‌که مقدار ICT از۴/۲ (۶۶/۴ درصد) کمتر باشد در رژیم پایین قرار دارد (ضریب منفی و در بدترین حالت یعنی زمانیکه در رژیم حدی پایین قرار دارد، صفر است) و با بیشتر شدن مقدار ICT از ۴/۲ در رژیم بالا قرارمی‌گیرد (ضریب منفی و در بهترین حالت یعنی زمانیکه در رژیم حدی بالا قرار دارد، ۰/۰۶۹۲- است).

به عنوان مثال اگر ICT =۰ را در معادله بالا قرار دهیم خواهیم داشت:

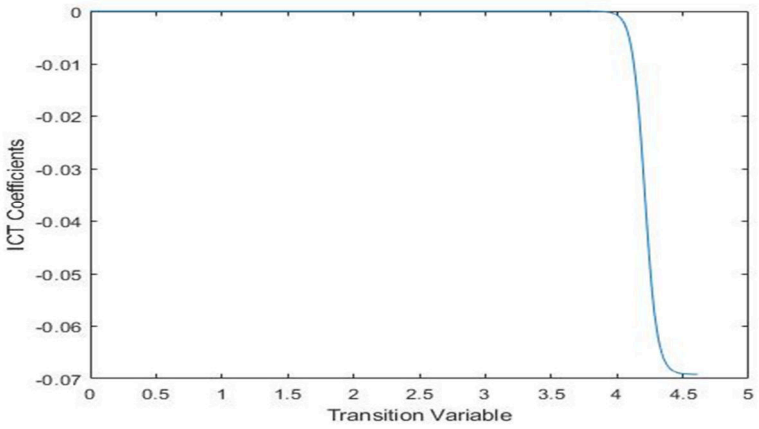
$$\underbrace{(-۰/۰۶۹۲(\frac{1}{1+e^{-۲۱/۵(۰-۴/۲)}}))}_{=۰} \text{ ICT}_{it} = (۰)\text{ICT}_{it} = ۰$$

در مکان انتقال از رژیم پایین به بالا، یعنی ICT =۴/۲ خواهیم داشت:

$$\underbrace{(-۰/۰۶۹۲(\frac{1}{1+e^{-۲۱/۵(۴/۲-۴/۲)}}))}_{=\frac{۱}{2}} \text{ ICT}_{it} = (-۰/۰۳۴۶)\text{ICT}_{it}$$

و با ICT =۴/۵ خواهیم داشت:

$$(-۰/۰۶۹۲(\underbrace{\frac{1}{1+e^{-۲۱/۵(۴/۵-۴/۲)}}}_{=۱})) \ ICT_{it}=(-۰/۰۶۹۲)ICT_{it}$$



شکل ۴. ضرایب متغیر ICT

مأخذ: یافته‌های پژوهش

به همین ترتیب ضریب متغیر TFP بین دو مقدار ۰/۲۴۶۸- در رژیم حدی پایین و۰/۶۶۹۶- در رژیم حدی بالا، بنابر مقدار ICTتغییر می‌کند والبته مادامی‌که مقدار ICT از ۶۶/۴ درصد کمتر باشد در رژیم پایین قرار دارد (ضریب منفی و در بدترین حالت ۰/۲۴۶۸- است) و با افزایش مقدار ICT از ۶۶/۴ در رژیم بالا قرارمی‌گیرد (ضریب منفی و در بهترین حالت ۰/۶۶۹۶- است) به عنوان مثال اگر ICT= ۰ را در معادله بالا قرار دهیم خواهیم داشت:

$$(-۰/۲۴۶۸ + (-۰/۴۲۲۸(\underbrace{\frac{1}{1+e^{-۲۱/۵(۰-۴/۲)}}}_{=۰}))) \ TFP_{it}=-۰/۲۴۶۸TFP_{it}$$

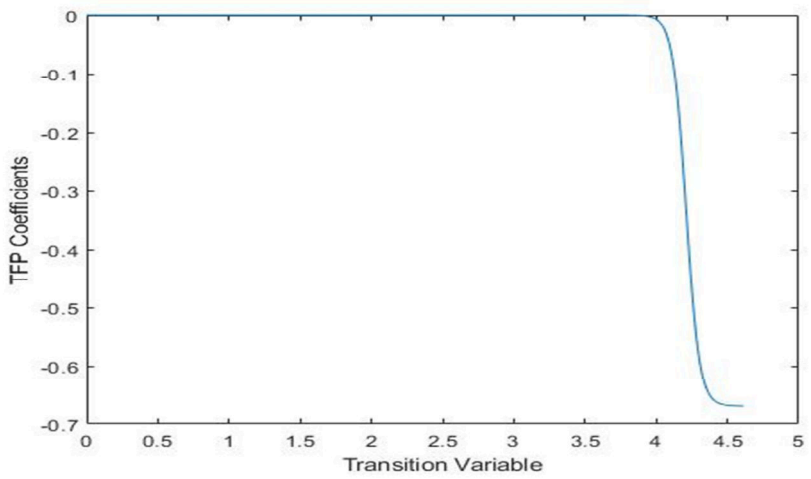
در مکان انتقال از رژیم پایین به بالا، یعنی ICT= ۴/۲ خواهیم داشت:

$$(-۰/۲۴۶۸ + (-۰/۴۲۲۸(\underbrace{\frac{1}{1+e^{-۲۱/۵(۴/۲-۴/۲)}}}_{=\frac{۱}{2}}))) \ TFP_{it}=-۰/۴۵۸۲TFP_{it}$$

و با ICT = ۴/۵ خواهیم داشت:

$$TFP_{it}=-۰/۶۶۹۶TFP_{it} (-۰/۲۴۶۸ + (-۰/۴۲۲۸(\frac{1}{1+e^{-۲۱/۵(۴/۵-۴/۲)}})))$$

$$=۱$$



شکل ۵. ضرایب متغیر TFP

مأخذ: یافته‌های پژوهش

اکثر مطالعات تجربی ذکر شده در قسمت ادبیات موضوع، فرضیه EKC و رابطه بین ICT، رشد اقتصادی و کیفیت محیط زیست را در چارچوب مدل‌های رگرسیون خطی بررسی کرده‌اند درحالیکه به احتمال زیاد متغیرها در فرضیه EKC از اشکال غیرخطی پیروی می‌کنند و انتظار می‌رود که ضرایب متغیرهای مستقل نسبت به انتشار CO_2 در دوره‌های زمانی مختلف متفاوت بوده و همچنین ضرایب برای مقاطع (کشورهای) مختلف ناهمگن باشد. واضح است ارائه یک پارامتر ثابت برای تمامی کشورها و یا حتی یک پارامتر برای کل دوره زمانی یک کشور معقول و منطقی نمی‌باشد زیرا نه تنها ویژگی ساختار تولید و اقتصاد کشورها ممکن است کاملا متفاوت باشد بلکه یک متغیر می‌تواند در طول زمان در یک کشور نیز رفتار یکسانی نداشته باشد که این مساله متاثر از اتفاقات و چالش‌های متعدد و اجتناب‌ناپذیری است که طی زمان برای یک کشور و متغیرهای اقتصادی آن رخ می‌دهد.

در این مطالعه بر خلاف سایر مطالعات تجربی،ICT صرفا به‌عنوان یک عامل تعیین کننده اضافی در نظر گرفته نشده است بلکه مطابق شکل ۱ به‌عنوان متغیری طراحی شده که به‌طور مشترک بر رشد اقتصادی و انتشار CO_2 تأثیر می‌گذارد در حالی‌که ارتباط بین این دو متغیر به

سطح ICT بستگی دارد. در نهایت در این پژوهش با وارد کردن TFP در مدل، فرضیه زیر آزمون شده است:

یک تغییر رژیم در رابطه بین TFP و انتشار CO2 وجود خواهد داشت که به سطح آستانه ICT بستگی دارد.

مطابق این فرضیه انتظار می‌رود که ضریب TFP نسبت به انتشار CO_2 در دوره‌های زمانی مختلف متفاوت باشد. بنابراین، انتظار می رود تأثیر TFP بر انتشار CO_2 بسته به مقدار متغیر انتقال (ICT)از یک رژیم به رژیم دیگر تغییر کند.

هدف اصلی این مطالعه، برجسته کردن اهمیت ICT به‌عنوان یک کانال انتقال (متغیر انتقال) است که از طریق آن EKC رخ می‌دهد، برای این منظور از مدل رگرسیون انتقال ملایم تابلویی (PSTR) استفاده شده که برای مدل‌های تغییر رژیم با داده‌های تابلویی مناسب است. در مدل PSTR، ضرایب رگرسیونی می‌توانند در طول زمان و برای واحدهای مقطعی تغییر یابند. به این معنی که یک واحد مقطعی، می‌تواند در زمان‌های مختلف بر اساس بیشر یا کمتر بودن از مقدار آستانه و قرار گرفتن در رژیم بالا یا پایین ضرایب متفاوتی داشته باشد. همچنین واحدهای مقطعی متفاوت در یک زمان، بر اساس قرار گرفتن در رژیم‌های متفاوت می‌توانند ضرایب متفاوتی داشته باشند. این مدل از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار است و رابطه غیرخطی احتمالی بین متغیرها را با استفاده از تابع انتقال و بر مبنای مشاهدات آستانه‌ای به شیوه‌ای پیوسته مدلسازی می‌کند به‌طوریکه بدون تحمیل تابعی خاص و محدود کننده بر رابطه میان متغیرها امکان متفاوت بودن ضرایب تخمینی برای مقاطع و زمان‌های مختلف فراهم گردد و مشکل ناهمگنی ضرایب تخمینی در داده‌های تابلویی برطرف شود این موضوع نشان می‌دهد مدل PSTR تطابق بیشتری با دنیای واقعی دارد و برای بررسی وجود منحنی کوزنتس زیست‌محیطی مناسب‌تر است.

نتایج با تایید مدل PSTR1 در حضور ICT به‌عنوان متغیر انتقال به تعمیق درک ما در مورد نقش ICT به‌عنوان یک کانال انتقال که از طریق آن رشد اقتصادی توسط ضریب TFP بر آلودگی محیط زیست تأثیر مثبت می‌گذارد، کمک می‌کند. یعنی اگرچه در سطح جهان، رشد اقتصادی (افزایش GDP) موجب افزایش انتشار CO_2 خواهد شد توسعه فناوری اطلاعات و ارتباطات از طریق بخش غیرخطی، به‌طور مستقیم (از طریق ضریب ICT) و غیرمستقیم (از طریق ضریب TFP) موجب کاهش انتشار CO_2 شده و از آنجاکه افزایش تولیدکالاها و خدمات بخش ICT به‌عنوان بخشی از اقتصاد، می‌تواند منجر به افزایش GDP گردد، سیاست‌گذاران می‌توانند با

سرمایه‌گذاری درICT ، همزمان با افزایش درآمد سرانه، کیفیت بهتر محیط زیست را تامین نمایند. یعنی ICT پتانسیل جدا کردن رشد اقتصادی از انتشار CO_2و دستیابی به اهداف توسعه پایدار را دارد و مطابق نتایج این مطالعه با ICT ≥ ۴/۲ (حداقل ضریب نفوذ اینترنت ۶۶/۴ درصد) و قرار گرفتن در رژیم بالا می‌توان به‌خوبی از این پتانسیل استفاده کرد.

۵. نتیجه‌گیری

این مطالعه با استفاده از مدل انتقال ملایم تابلویی (PSTR) یک رویکرد جدید در مطالعه الگوی ارتباط بین رشد اقتصادی و انتشار CO_2 در دوره ۲۰۱۹-۲۰۰۳ دارد و به نقش حیاتی ICT، به عنوان یک متغیر انتقال، که پتانسیل جداسازی بین انتشار CO_2 و رشد اقتصادی را دارد متمرکز است. نتایج نشان می‌دهد که الگوی انتشار CO_2 از یک مدل غیرخطی PSTR1با فناوری اطلاعات و ارتباطات به‌عنوان یک متغیر انتقالی که بر رابطه بین انتشار TFP و CO_2 تأثیر می‌گذارد، پیروی می‌کند. به نظر می‌رسد استفاده بیشتر از فناوری اطلاعات و ارتباطات، از طریق توسعه تکنولوژی دوست‌دار محیط زیست، بهره‌وری را به نفع توسعه کم‌کربن، بهبود می‌بخشد. در واقع نفوذ ICT علاوه بر اثر مستقیم ناشی از تحرک زدایی، تاثیر مثبت غیرمستقیمی بر توسعه کم‌کربن دارد زیرا بر رابطه بین بهره‌وری کل عوامل و کیفیت محیطی تأثیر می‌گذارد. توسعه نفوذ ICT می‌تواند موجب توسعه تکنولوژی‌های تولید کم کربن شده و از طریق بهره‌وری درنهایت انتشار CO_2 را کاهش دهد. این مطالعه نشان داد که یک مزیت توسعه پایدار (از نظر نقش مثبت رشد اقتصادی در کاهش آلودگی محیط زیست) همراه با افزایش نفوذ فناوری اطلاعات و ارتباطات وجود دارد. بنابراین استفاده و نفوذ ICT ابزار مفیدی برای توسعه اقتصاد سبز خواهد بود.

در بسیاری از مطالعات تجربی انجام شده، تفسیر اشتباه منحنی کوزنتس زیست‌محیطی به این شکل که تمامی تأثیرات منفی زیست‌محیطی، الگوی منحنی زیست‌محیطی کوزنتس را دنبال خواهند کرد، منجر به انتخاب‌های نامناسب در سیاست‌گذاری و در نتیجه آسیب‌های زیست‌محیطی زیادی شده است. این در حالیست که نقطه بازگشت منحنی ناشی از رشد تولید ناخالص داخلی می‌تواند چنان دیرپا باشد که عملا نتواند کمک چندانی به بهبود کیفیت محیط زیست نماید. از آنجا که آلودگی محیط زیست تهدیدی فوری برای زندگی بشر است، توسعه نفوذ ICT می‌تواند همزمان با تحقق اهداف رشد اقتصادی، انتشارآلاینده‌ها را کاهش دهد،

بنابراین سیاست‌گذاران می‌توانند از پتانسیل آن استفاده کنند و ضمن دستیابی به رشد اقتصادی بالاتر، کیفیت بهتر محیط زیست را تامین نمایند.

سیاست‌گذاران باید آگاه شوند که توسعه اقتصادی به تنهایی انتشار CO_2 را کاهش نخواهد داد، رشد درآمد باید همراه با سیاست‌های مکمل به منظورارتقاء بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار CO_2 باشد. نتایج این مطالعه نشان داد درشرایطی که جهان نیازمند تجدید نظر در سیاست‌های حفاظت از محیط زیست به‌منظور جلوگیری از گرم شدن کره زمین است، توسعه نفوذ ICT می‌تواند اثر مثبتی بردستیابی به اهداف توسعه پایدارداشته باشد.

کتاب‌نامه

ارباب، حمیدرضا؛ شعبانی، اسماعیل (۱۳۹۶). تاثیر فناوری اطلاعات و ارتباطات بر آلودگی‌های زیست‌محیطی در کشورهای D8، فصلنامه مطالعات مدیریت فناوری اطلاعات، سال پنجم، شماره ۱۰۲،۲۰-۷۷.

مهدوی، ابوالقاسم؛ امیربابایی، سونای (۱۳۹۴). بررسی اثر توسعه مالی بر کیفیت محیط زیست در ایران، فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی، سال پانزدهم، شماره چهارم،۲۳-۱.

صادقی، علی اکبر؛ تقوی، مهدی؛ شاکری، عباس و محمدی، تیمور. (۱۳۹۴). رابطه غیرخطی بین درآمد و شدت انرژی درکشورهای منتخب منا (MENA) با در نظر گرفتن نقش توسعه مالی و درجه باز بودن اقتصاد، پژوهش نامه اقتصاد انرژی ایران، سال بیستم، شماره ۲۶،۶۴-۱.

مهرآرا، محسن؛ امیری، حسین و حسنی سرخ بوزی، محمد. (۱۳۹۱). رابطه مصرف انرژی و درآمد: آزمون فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس با استفاده از رویکرد مدل‌های رگرسیونی انتقال ملایم پانلی، فصلنامه پژوهش‌ها وسیاست‌های اقتصادی، شماره۱۹۴،۶۲-۱۷۱.

Acharya, Ram C. "ICT use and total factor productivity growth: intangible capital or productive externalities?" Oxford Economic Papers 68, no. 1 (2016): 16-39.

Ackah, I., & Adu, F. (2014). The Impact of Energy Consumption and Total Factor Productivity on Economic Growth Oil Producing African Countries. Bulletin of Energy Economics, 2(2), 28-40.

Akande, A., Cabral, P., & Casteleyn, S. (2019). Assessing The Gap Between Technology and The Environmental Sustainability of European Cities. Information Systems Frontiers, 21, 581-604.

Almeida, T. A., Cruz, L., Barata, E., & García-Sánchez, I. M. (2017). Economic Growth and Environmental Impacts: An Analysis Based on a Composite Index of Environmental Damage. Ecological Indicators, 76, 119-130.

Altinoz, B., Vasbieva, D., & Kalugina, O. (2021). The Effect of Information and Communication Technologies and Total Factor Productivity on CO2 Emissions in Top 10 Emerging Market Economies. Environmental Science and Pollution Research, 28(45), 63784-63793.

Amri, F., Zaied, Y. B., & Lahouel, B. B. (2019). ICT, Total Factor Productivity, And Carbon Dioxide Emissions in Tunisia. Technological Forecasting and Social Change, 146, 212-217.

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.

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.

Basu, S., Fernald, J. (2007). Information and Communications Technology as a General-Purpose Technology: Evidence from US Industry Data. German Economic Review, 8(2), 146-173.

Barrett, S., &Graddy, K. (2000). Freedom, Growth, And the Environment. Environment and Development Economics,5(4),433-456.

Bukht, R., & Hicks, R. (2017). Definition, Concept and Measurement of the Digital Economy. Bulletin of International Organizations, 13(2), 143-172.

Beckerman, W. (1992). Economic Growth and The Environment: Whose Growth? Whose Environment? World Development, 20(4), 481-496.

Brundtland, G.H. (1987) Our Common Future Report of the World Commission on Environment and Development. Geneva, UN-Dokument A/42/427.

Brynjolfsson, E., Rock, D., & Syverson, C. (2021). The Productivity J-Curve: How Intangibles Complement General Purpose Technologies. American Economic Journal: Macroeconomics, 13(1), 333-72.

Colletaz, G., & Hurlin, C. (2006). Threshold Effects of the Public Capital Productivity: An International Panel Smooth Transition Approach. Working Paper, 1/2006, LEO, Université d'Orléans.

González, A., Teräsvirta, T., & Van Dijk, D. (2004). Panel Smooth Transition Regression Model and an Application to Investment Under Credit Constraints. Working Paper Series in Economics and Finance, 604, Stockholm School of Economics.

Gonzalez, A., Teräsvirta, T., Van Dijk, D., & Yang, Y. (2017). Panel Smooth Transition Regression Models.

Gouvea, R., Kapelianis, D., & Kassicieh, S. (2018). Assessing The Nexus of Sustainability and Information & Communications Technology. Technological Forecasting and Social Change, 130, 39-44.

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement (No. W3914). National Bureau of Economic Research.

Haftu, G. G. (2019). Information Communications Technology and Economic Growth in Sub-Saharan Africa: A Panel Data Approach. Telecommunications Policy, 43(1), 88-99.

Hansen, B. E. (1999). Threshold Effects in Non-Dynamic Panels: Estimation, Testing, And Inference. Journal of Econometrics, 93(2), 345-368.

Higón, D. A., Gholami, R., & Shirazi, F. (2017). ICT and Environmental Sustainability: A Global Perspective. Telematics and Informatics, 34(4), 85-95.

Imperatives, S. (1987). Report of The World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Accessed Feb, 10, 1-300.

International Energy Agency (2022), World Energy Outlook 2022, IEA. Licence: Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0.

Jebli, M. B., Youssef, S. B., & Ozturk, I. (2016). Testing Environmental Kuznets Curve Hypothesis: The Role of Renewable and Non-Renewable Energy Consumption and Trade in OECD Countries. Ecological Indicators, 60, 824-831.

Khan, F. N., Sana, A., & Arif, U. (2020). Information and Communication Technology (ICT) And Environmental Sustainability: A Panel Data Analysis. Environmental Science and Pollution Research, 27, 36718-36731.

Khan, M. A., Khan, M. Z., Zaman, K., Irfan, D., & Khatab, H. (2014). Questing The Three Key Growth Determinants: Energy Consumption, Foreign Direct Investment and Financial Development in South Asia. Renewable Energy, 68, 203–215.

Klimova, A., Rondeau, E., Andersson, K., Porras, J., Rybin, A., & Zaslavsky, A. (2016). An International Master's Program in Green ICT as A Contribution to Sustainable Development. Journal of Cleaner Production, 135, 223-239.

Ladu, M. G., & Meleddu, M. (2014). Is There Any Relationship Between Energy and TFP (Total Factor Productivity)? A Panel Cointegration Approach for Italian Regions. Energy, 75, 560-567.

Lahouel, B. B., Taleb, L., Zaied, Y. B., & Managi, S. (2021). Does ICT Change the Relationship Between Total Factor Productivity and CO2 Emissions? Evidence Based on a Nonlinear Model. Energy Economics, 101, 105406.

Lee, J. W., & Brahmasrene, T. (2014). ICT, CO2 emissions and economic growth: evidence from a panel of ASEAN. Global Economic Review, 43(2), 93-109.

Energy International Master's Program in Green ICT as A Contribution to Sustainable Development. J. Clean. Prod. 135, 223-239.

Friedl, B., &Getzner, M. (2003). Determinants of CO2 emissions in a small open economy. Ecological economics, 45(1), 133-148. doi: 10.1016/S0921-8009(03)00008-9

Feenstra, R. C., Inklaar, R., & Timmer, M. P. (2015). The Next Generation of the Penn World Table. American Economic Review, 105(10), 3150-3182.

Fernández-Amador, O., Francois, J. F., Oberdabernig, D. A., & Tomberger, P. (2020). The Methane Footprint of Nations: Stylized Facts from A Global Panel Dataset. Ecological Economics, 170, 106528.

Malecki, E., Moriset, B. (2008). The Digital Economy: Business Organization, Production Processes and Regional Developments. Netlibrary, Inc.

Mohammadi, T.(2016). Economic Growth, Financial Development and CO2 Emission: PSTR Approach. IJES, 5(2), 145-171.

Moyer, J. D., & Hughes, B. B. (2012). Icts: Do They Contribute to Increased Carbon Emissions? Technological Forecasting and Social Change, 79(5), 919-931.

Nguyen, T. T., Pham, T. A. T., & Tram, H. T. X. (2020). Role of Information and Communication Technologies and Innovation in Driving Carbon Emissions and Economic Growth in Selected G-20 Countries. Journal of Environmental Management, 261, 110162.

Niebel, T. (2018). ICT and Economic Growth–Comparing Developing, Emerging and Developed Countries. World Development, 104, 197-211.

Nuroglu, E., & Kunst, R. M. (2018). Kuznets and Environmental Kuznets Curves for Developing Countries. In Industrial Policy and Sustainable Growth (Pp. 175-188). Springer, Singapore.

Ollo-López, A., & Aramendía-Muneta, M. E. (2012). ICT Impact on Competitiveness, Innovation and Environment. Telematics and Informatics, 29(2), 204-210.

Ozcan, B., Apergis, N., 2018. The impact of internet use on air pollution: evidence from emerging countries. Environ. Sci. Pollut. Res. 25 (5), 4174–4189.

Ozturk, I., &Acaravci, A., (2010). "CO2 emissions, energy consumption and economic growth in Turkey", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(9), pp. 3220-3225.

Papaioannou, S. K., & Sotiris, K. (2004). FDI and ICT Innovation Effect on productivity growth: A Comparison between developing and developed countries. Athens University of Economics and business, Athens, Greece.

Plepys, A.(2002). The Grey Side of ICT. Environ. Impact Assess. Rev. 22 (5), 509–523.

Pohjola, M. (2002). The New Economy in Growth and Development. Oxford Review of Economic Policy, 18(3), 380-396.

Pradhan, R. P., Mallik, G., & Bagchi, T. P. (2018). Information Communication Technology (ICT) Infrastructure and Economic Growth: A Causality Evinced by Cross-Country Panel Data. IIMB Management Review, 30(1), 91-103.

Raheem, I. D., Tiwari, A. K., & Balsalobre-Lorente, D. (2020). The role of ICT and financial development in CO2 emissions and economic growth. Environmental Science and Pollution Research, 27(2), 1912-1922.

Rath, B. N., Akram, V., Bal, D. P., & Mahalik, M. K. (2019). Do Fossil Fuel and Renewable Energy Consumption Affect Total Factor Productivity Growth? Evidence from Cross-Country Data with Policy Insights. Energy Policy, 127, 186-199.

Romer, P.M.(1994). The Origins of Endogenous Growth. J. Econ. Perspect. 8 (1), 3–22.

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.

Shabani, Z. D., & Shahnazi, R. (2019). Energy Consumption, Carbon Dioxide Emissions, Information and Communications Technology, And Gross Domestic Product in Iranian Economic Sectors: A Panel Causality Analysis. Energy, 169, 1064-1078.

Solow, R. M. (1956). A Contribution to The Theory of Economic Growth. The Quarterly Journal of Economics, 70(1), 65-94.

Solow, R. (1987). "We'd Better Watch Out." New York Times Book Review, 1987.

Spiezia, V. (2011). Are ICT users more innovative? an analysis of ICT-enabled innovation in OECD firms. OECD Journal: Economic Studies, 2011(1), 1-21.

Suri, V., & Chapman, D. (1998). Economic Growth, Trade and Energy: Implications for The Environmental Kuznets Curve. Ecological Economics, 25(2), 195-208.

Tugcu, C. T. (2013). Disaggregate Energy Consumption and Total Factor Productivity: A Cointegration and Causality Analysis for The Turkish Economy. International Journal of Energy Economics and Policy, 3(3), 307-314.

Ulucak, R., & Bilgili, F. (2018). A Reinvestigation of EKC Model by Ecological Footprint Measurement for High, Middle and Low Income Countries. Journal of Cleaner Production, 188, 144-157.

World Bank, 2020. Worldwide Governance Indicators. The World Bank, Washington, D.C., United States.

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.