Journal of Econometric Modelling 2025, 10(1): 123-156
DOI: 10.22075/jem.2025.31811.1873
This is an Open Access paper licensed under the Creative Commons License CC BY 4.0 license.

Semnan University

Journal of Econometric Modelling

Journal homepage: https://jem.semnan.ac.ir/?lang=en

Research Article

Estimating the Effects of Technology and Economic Complexity on Per Capita Carbon Emissions in Iran: A Quantile-on-Quantile Approach

Seyyed Mohammad Ghaem Zabihi (Corresponding Author)
PhD Student in Economics, Faculty of Administrative and Economic Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
smq.zabihi@mail.um.ac.ir

Fatemeh Akbari
Master's Student in Economics, Faculty of Administrative and Economic Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
akbari.fa@mail.um.ac.ir

Narges Salehnia
Associate professor and Faculty Member of the Department of Economics, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
n.salehnia@um.ac.ir

PAPER INFO

Paper history:
Received: 19. 09. 2023
Revised: 17. 01. 2025
Accepted: 06. 05. 2025

JEL Classification:
C21, O33, Q54, Q58

Keywords:
Technological Innovation,
Economic Complexity Index,
Per Capita Carbon Emissions,
Quantile-on-Quantile Regression

ABSTRACT

Technological innovation and economic complexity are two pivotal factors shaping contemporary social and environmental transformations. Their impact on carbon emissions—a key driver of climate change—is critically significant. This study investigates the role of technological innovation, the Economic Complexity Index (ECI), economic growth, and population density in reducing per capita carbon dioxide (CO_2) emissions in Iran, employing the novel Quantile-on-Quantile Regression (QQR) modelling approach for the period 1996–2020. The statistical relationships between these variables are analysed using EViews12 and MATLAB software. Findings reveal that advancements in technological innovation and improvements in the Economic Complexity Index can lead to a substantial reduction in carbon emissions. Consequently, prioritizing policies that foster technological innovation, enhance economic complexity, and amplify their effectiveness in lowering per capita CO_2 emissions is imperative for environmental sustainability.
© 2023 Published by Semnan University Press. All rights reserved.

برآورد آثار تکنولوژی و پیچیدگی اقتصادی بر سرانه انتشار کربن در ایران: رویکرد چندک بر چندک

سیدمحمدقائم ذبیحی (نویسنده مسئول)
دانشجوی دکتری علوم اقتصادی، دانشکده علوم اداری و اقتصادی،
دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
smq.zabihi@mail.um.ac.ir

فاطمه اکبری
دانشجوی کارشناسی ارشد علوم اقتصادی، دانشکده علوم اداری و اقتصادی،
دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
akbari.fa@mail.um.ac.ir

نرگس صالح‌نیا
دانشیار و عضو هیئت علمی گروه اقتصاد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
n.salehnia@um.ac.ir

نوع مقاله: علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

چکیده:
نوآوری تکنولوژی و پیچیدگی اقتصادی، دو عامل بسیار مهم در تحولات اجتماعی و محیط‌زیستی جهان معاصر هستند. تأثیر این دو بر انتشار کربن که یکی از عوامل تغییرات آب‌وهوایی است، بسیار حائز اهمیت است. ازاین‌رو، پژوهش حاضر به دنبال بررسی نقش نوآوری تکنولوژی، شاخص پیچیدگی اقتصادی، رشد اقتصادی و تراکم جمعیت در کاهش سرانه انتشار کربن‌دی‌اکسید (CO_2) با بهره‌گیری از رویکرد رگرسیون چندک بر چندک (QQR) در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۰ است. رابطه آماری بین متغیرهای ذکرشده با استفاده از نرم‌افزارهای ایویوز۱۲ و متلب برای کشور ایران مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که بهبود نوآوری تکنولوژی و شاخص پیچیدگی اقتصادی می‌توانند منجر به کاهش قابل‌توجهی در انتشار کربن شوند. بدین ترتیب، لزوم توجه به سیاست‌های توسعه نوآوری‌های تکنولوژی و بهبود شاخص پیچیدگی اقتصادی و ارائه راهکارهایی جهت تأثیرگذاری بیش‌تر آن‌ها بر کاهش سرانه انتشار CO_2 در محیط‌زیست از اهمیت بالایی برخوردار است.

طبقه‌بندی JEL: C21, O33, Q54, Q58

کلید واژه‌ها: نوآوری تکنولوژی، شاخص پیچیدگی اقتصادی، سرانه انتشار کربن، رگرسیون چندک بر چندک

۱. مقدمه

امروزه تغییرات آب‌وهوایی و به تبع آن گرم‌شدن زمین به‌طورجدی محیط زندگی انسان‌ها را تحت‌تأثیر قرار داده و آن را به یک چالش جدی برای همه کشورهای جهان تبدیل کرده است (لیو[۱] و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات موجود نشان داده‌اند که با تسریع در مصرف انرژی و فعالیت‌های تولیدی، انتشار انبوه CO_2 می‌تواند تأثیرات منفی بر تولید کشورها و از همه مهم‌تر بر ابعاد مختلف زندگی اقتصادی و اجتماعی جوامع داشته باشد (وانگ[۲] و همکاران، ۲۰۲۳؛ آن[۳] و همکاران، ۲۰۲۱).

در همین راستا، براساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی[۴] (۲۰۲۲) انتشار جهانی CO_2 مرتبط با انرژی ۰.۹ درصد یا ۳۲۱ میلیون تن در سال ۲۰۲۲ رشد نموده و به بیش از ۳۶.۸ گیگا تن رسیده است. انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) ناشی از احتراق انرژی ۴۲۳ میلیون تن افزایش یافته، درحالی‌که انتشارات ناشی از فرایندهای صنعتی ۱۰۲ میلیون تن کاهش یافته است. همچنین انتشار (GHG) در بازارهای نوظهور آسیا و اقتصادهای درحال‌توسعه، به‌استثناء چین، بیش از هر منطقه دیگری در سال ۲۰۲۲ رشد کرده و ۴.۲ درصد (۲۰۶ میلیون تن CO_2) افزایش یافته است. بدین ترتیب، باتوجه‌به مسائل جدی آب‌وهوایی جهانی، ترویج توسعه کم‌کربن به یک توافق عمومی و با اهمیت فراوان در همه کشورها تبدیل شده است (وانگ و همکاران، ۲۰۲۳).

از سوی دیگر؛ گفته می‌شود انتشار گازهای گلخانه‌ای تابعی از تکنولوژی‌های نهفته و منابع انرژی مورد استفاده در فرایند تولید است. به گفته برخی از محققان، نوآوری‌های تکنولوژیکی می‌تواند به کاهش انتشار CO_2 و بهبود کیفیت محیطی کمک کند (فی[۵] و همکاران، ۲۰۱۴؛ فرناندز[۶] و همکاران، ۲۰۱۸؛ شهباز[۷] و همکاران، ۲۰۱۸؛ چرچیل[۸] و همکاران، ۲۰۱۹؛ یو و خو[۹]، ۲۰۱۹). ازاین‌رو، دلایل متعددی برای تأثیر منفی تکنولوژی بر انتشار CO_2 وجود دارد. به‌عنوان‌مثال،

---

1. Liu
2. Wang
3. An
4. International Energy Agency (IEA)
5. Fei
6. Fernández
7. Shahbaz
8. Churchill
9. Yu and Xu

تشدید مقررات زیست‌محیطی باعث افزایش مستمر نوآوری و تکنولوژی‌های زیست‌محیطی برای کاهش انتشار CO_2 می‌شود (کوستانتینی[۱] و همکاران، ۲۰۱۷). از سوی دیگر، چندین مطالعه اذعان داشته‌اند که نوآوری‌های تکنولوژیکی ممکن است به طور نامطلوب بر کیفیت محیط‌زیست تأثیر بگذارد (ژای و سانگ[۲]، ۲۰۱۳؛ چنگ[۳] و همکاران، ۲۰۱۹؛ چن و لی[۴]، ۲۰۲۰؛ پتروویچ و لوبانوف[۵]، ۲۰۲۰). این مطالعات نشان می‌دهد درحالی‌که تکنولوژی‌های مدرن می‌توانند کارایی منابع را افزایش دهند، می‌توانند منجر به گسترش سریع مقیاس اقتصادی شده که لزوم سرمایه‌گذاری‌های اضافی در حفظ کیفیت منابع طبیعی را تحمیل می‌کنند (چنگ و همکاران، ۲۰۱۹). بااین‌وجود، این یک سؤال باقی می‌ماند که آیا کشورهای درحال‌توسعه (مانند ایران) می‌توانند از طریق تقلید از بخش‌های مولدتر اقتصادهای توسعه‌یافته به رشد فراگیر و کم‌کربن دست یابند؟.

همچنین در کنار نوآوری‌های تکنولوژیکی، برای دستیابی به کاهش مؤثر تغییرات اقلیمی، درک رابطه بین پیچیدگی اقتصادی و انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیر ابزارهای سیاستی خاص بسیار مهم است. در تحقیقات اخیر از اطلاعات مربوط به سطح تنوع صادرات کشورها و تعداد کشورهایی که هر محصول را صادر می‌کنند برای محاسبه شاخص پیچیدگی اقتصادی استفاده می‌شود. همچنین مطالعات جدید نقش زیست‌محیطی پیچیدگی اقتصادی را به‌عنوان یکی از تفاوت‌های ساختاری بین اقتصاد کشورها برجسته می‌کنند. بدین ترتیب، پیچیدگی اقتصادی شاخص خوبی برای ساختار تولید است. هاسمن[۶] و همکاران (۲۰۱۱) پیچیدگی اقتصادی را به‌عنوان تعداد دانش پنهان در ساختار تولید یک اقتصاد تعریف می‌کنند. همچنین، رومرو و گرامکو[۷] (۲۰۲۱) نتیجه می‌گیرند که شاخص پیچیدگی اقتصادی حاوی دانش موردنیاز برای فناوری تولید پاک در شرایط مختلف است.

---

1. Costantini
2. Zhai and Song
3. Cheng
4. Chen and Lee
5. Petrović and Lobanov
6. Hausmann
7. Romero and Gramco

بدین ترتیب، چندین مطالعه ارتباط بین پیچیدگی اقتصادی و انتشار CO_2 را مورد بررسی قرار داده‌اند (لاپاتیناس[۱] و همکاران، ۲۰۱۹؛ میلی و تیتلبویم[۲]، ۲۰۲۰؛ لی و وانگ، ۲۰۲۱؛ رومرو و گرامکو، ۲۰۲۱). ازاین‌رو، کان و گزگور[۳] (۲۰۱۷) به این نتیجه رسیده‌اند که افزایش پیچیدگی اقتصادی باعث کاهش انتشار کلی CO_2 می‌شود. همینطور نیاگو و تئودورو[۴] (۲۰۱۹) نشان دادند که کشورهای با پیچیدگی اقتصادی بالاتر کاهش سریع‌تری در انتشار CO_2 به دلیل تفاوت در کارایی انرژی را تجربه می‌کنند. بااین‌حال، افزایش پیچیدگی اقتصادی ممکن است منجر به تخریب بیش‌تر محیط‌زیست به دلیل افزایش تولید و تقاضا برای انرژی شود. نیاگو (۲۰۱۹) اخیراً گزارش داد که پیچیدگی اقتصادی در طی مراحل اولیه صادرات به آلودگی (به دلیل استفاده گسترده از منابع برای حفظ محصولات صادراتی) کمک می‌کند؛ اما پس از یک نقطه خاص، پیچیدگی اقتصادی منجر به کاهش آلودگی از طریق تکنولوژی‌های کم‌تر آلاینده می‌شود.

بر این اساس، با مروری بر مطالعات پیشین، می‌توان به این مهم دست یافت که رابطه بین پیچیدگی اقتصادی و انتشار کربن چندوجهی است. پیچیدگی اقتصادی با سطوح بالاتر تولید ناخالص داخلی همراه است (فریره[۵]، ۲۰۱۷)، که با سطح بالاتر انتشار کربن مرتبط می‌شود. در همین حال، گذار از صنایع انرژی‌بر به صنایع مبتنی بر فناوری بالا[۶] ممکن است تخریب محیط‌زیست را کاهش دهد. بدین ترتیب، درک عمیق عوامل تعیین‌کننده انتشار کربن، سیاست‌گذاران را قادر می‌سازد تا سیاست‌ها و مقرراتی را به سمت یک مسیر تعادلی پایدار ارائه کنند.

شایان‌ذکر است که ایده پژوهش حاضر در راستای بررسی نقش نوآوری تکنولوژی و شاخص پیچیدگی اقتصادی (در کنار دو متغیر مهم رشد اقتصادی و تراکم جمعیت) بر سرانه انتشار کربن از بداعت بسیار بالایی برخوردار است. همچنین این پژوهش با روش‌شناسی تازه‌ای تحت عنوان رگرسیون چندک بر چندک (QQR)[۷] به دنبال بررسی نتایج مربوطه خواهد بود. شایان‌ذکر است

---

1. Lapatinas
2. Mealy and Teytelboym
3. Can and Gozgor
4. Neagu and Teodoru
5. Freire
6. High Technology
7. Quantile-on-Quantile Regression

که تا زمان نگارش این پژوهش هیچ مطالعه داخلی مبنی بر مطالعه نقش نوآوری تکنولوژی و شاخص پیچیدگی اقتصادی (با حضور دو متغیر رشد اقتصادی و تراکم جمعیت) بر سرانه انتشار کربن با استفاده از این روش‌شناسی یافت نشده است. بدین ترتیب، پژوهش حاضر دارای نوآوری‌هایی در زمینه موضوعی، تکنیکی و جامعه موردمطالعه (دوره زمانی) است. ازاین‌رو، نتایج حاصله می‌توانند جدید و حائز اهمیت باشند.

بدین ترتیب، هدف پژوهش حاضر ارائه یک ارزیابی دقیق از بررسی نقش نوآوری تکنولوژی و شاخص پیچیدگی اقتصادی (و دو متغیر رشد اقتصادی و تراکم جمعیت) بر سرانه انتشار کربن‌دی‌اکسید در کشور ایران است. ازاین‌رو، در بخش دوم ادبیات موضوع با تمرکز بر مبانی نظری و پیشینه پژوهش، در بخش سوم روش‌شناسی مورد استفاده، در بخش چهارم به تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی رگرسیون چندک بر چندک و در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهای مربوطه ارائه خواهند شد.

۲. ادبیات موضوع

۲-۱. مبانی نظری

در این بخش به بررسی ادبیات گذشته درباره رابطه بین متغیرهای اصلی پژوهش حاضر یعنی نوآوری تکنولوژی، شاخص پیچیدگی اقتصادی و سرانه انتشار کربن پرداخته خواهد شد.

۲-۱-۱. نوآوری تکنولوژی و سرانه انتشار کربن

انتشار کربن و نوآوری تکنولوژیکی موضوعات مهمی هستند و برای مدت طولانی در مورد رابطه بین آن‌ها صحبت می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۲۳، وانگ و همکاران، ۲۰۲۳، دو[1] و همکاران، ۲۰۲۰). دو نظر متفاوت در مورد چگونگی تأثیر نوآوری‌های تکنولوژی بر انتشار کربن وجود دارد (محمود[2] و همکاران، ۲۰۲۳). اولین نظر این است که نوآوری‌های تکنولوژیکی می‌توانند انتشار CO_2 را مهار کنند. از آن‌جایی‌که نوآوری تکنولوژیکی می‌تواند استفاده کارآمد از زغال سنگ و سایر انرژی‌های فسیلی را تحقق بخشد، این پتانسیل را دارد که رشد منابع جدید انرژی را تقویت

[1]. Du
[2]. Mahmood

کند و میزان انرژی جدید را در مصرف کلی انرژی افزایش دهد (لی و همکاران، ۲۰۲۲، محمود و همکاران، ۲۰۲۳). بای[1] و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که نوآوری تکنولوژیکی انرژی‌های تجدیدپذیر به کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن سرانه کمک می‌کند. تحلیل‌های تجربی انجام‌شده توسط محققان نشان می‌دهد که تلاش‌های مرتبط با نوآوری‌های تکنولوژیکی ظرفیت کاهش انتشار CO_2 را با استفاده از داده‌هایی در سراسر کشورهای BRICS - یعنی برزیل، روسیه، هند، چین و آفریقای جنوبی - نشان می‌دهد. علاوه بر این، تأثیر متقابل بین نوآوری تکنولوژی، اجاره منابع طبیعی و مصرف انرژی تجدیدپذیر به همان اندازه نقشی اساسی در کاهش انتشار CO_2 ایفا می‌کند (آدبایو[2] و همکاران، ۲۰۲۳، محمود و همکاران، ۲۰۲۳).

نظر دوم برعکس نظر اول است و معتقد است که نوآوری تکنولوژیکی به انتشار کربن کمک می‌کند. این مهم به این دلیل است که نوآوری تکنولوژی می‌تواند توسعه اقتصادی را ارتقاء دهد که به ناچار منجر به مصرف بالای انرژی می‌شود و باعث افزایش سریع انتشار کربن می‌شود (محمود، ۲۰۲۰، صدیق[3] و همکاران، ۲۰۲۰). جمیل[4] و همکاران (۲۰۲۱) روش تعمیم یافته لحظه‌ها[5] را به کار بردند و داده‌های پانلی را از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۴ برای ۴۹ کشور تجزیه‌وتحلیل کردند و دریافتند که فناوری‌های جدید منجر به افزایش انتشار CO_2 شده‌اند (جمیل و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، برخی از کارشناسان معتقدند که عدم اطمینان در مورد تأثیر نوآوری‌های تکنولوژیکی بر کارایی انتشار CO_2 وجود دارد. به عنوان مثال، برخی از محققان ادعا کردند که نوآوری‌های تکنولوژیکی منجر به افزایش قابل توجه در تولید صنعتی و همچنین افزایش قابل توجهی در مصرف انرژی و انتشار CO_2 شده است که منجر به عدم اطمینان در مورد رابطه بین فناوری‌های جدید و انتشار کربن شده است (فیشر-واندن و وینگ[6]، ۲۰۰۸).

بدین ترتیب، بررسی ادبیات نشان می‌دهد که تحقیقات آکادمیک فعلی در مورد نوآوری‌های تکنولوژیکی و انتشار کربن یکسری نتایج غنی به همراه داشته است، اما هنوز کاستی‌های خاصی وجود دارد. پژوهشگران هنوز در مورد تأثیر نوآوری تکنولوژی بر کارایی کربن اتفاق نظر ندارند.

---

1. Bai
2. Adebayo
3. Sadiq
4. Jamil
5. The generalized methodology of moments
6. Fisher-Vanden and Wing

این مهم ممکن است به این دلیل باشد که هر منطقه دارای پایگاه اقتصادی و فناوری متفاوت و شرایط محیطی مختلف است. بنابراین، تأثیر نوآوری‌های تکنولوژیکی بر کارایی انتشار کربن در هر منطقه نیاز به بررسی بیش‌تر دارد. ازاین‌رو، پژوهش حاضر درصدد آن است تا به بررسی تأثیر نوآوری تکنولوژی بر انتشار (CO_2) در کشور ایران بپردازد.

۲-۱-۲. شاخص پیچیدگی اقتصادی و سرانه انتشار کربن

در ابتدا، هیدالگو[۱] و هاسمن (۲۰۰۹) شاخص پیچیدگی اقتصادی[۲] را به‌عنوان نماینده ساختار اقتصادی معرفی کردند و در ادامه رویکرد تولید سنتی را برای توصیف رشد و توسعه اقتصادی مورد انتقاد قرار دادند (کان و گزگور، ۲۰۱۷). بر این اساس، شاخص پیچیدگی اقتصادی، شاخص جدیدی برای توسعه و پیشرفت اقتصادی است که توانایی یک کشور برای تولید و صادرات محصولات پیچیده و دانش‌بر با ارزش افزوده بالا را می‌سنجد (چو[۳]، ۲۰۲۱؛ اکرام[۴] و همکاران، ۲۰۲۱). به عبارتی دیگر، یک اقتصاد در صورتی پیچیده است که محصولات آن نه‌تنها مبتنی بر دانش باشد، بلکه پیچیدگی اقتصادی به‌عنوان سطح توسعه اقتصادی در یک کشور با ارائه دیدگاهی جامع از مقیاس و فناوری در آن کشور تعریف شود (دوگان[۵] و همکاران، ۲۰۱۹). شایان‌ذکر است که تاچلا[۶] و همکاران (۲۰۱۳) براساس نظریه اصلی هیدالگو و هاسمن (۲۰۰۹) یک شاخص جایگزین پیچیدگی اقتصادی (ECI+) ایجاد کردند. همچنین آلبیک[۷] و همکاران (۲۰۱۷) اشاره می‌کنند که (ECI+) در پیش‌بینی رشد اقتصادی نسبت به ECI برتری دارد.

با مروری بر مطالعات پیشین می‌توان استنباط نمود که برخی از محققان دریافته‌اند پیچیدگی اقتصادی می‌تواند کیفیت محیط‌زیست را بهبود بخشد. کان و گزگور (۲۰۱۷) استدلال می‌کنند که افزایش پیچیدگی اقتصادی به کاهش انتشار CO_2 کمک می‌کند. به همین ترتیب، دوگان و همکاران (۲۰۲۱) دررابطه‌با انتشار CO_2 نشان داده‌اند که پیچیدگی اقتصادی می‌تواند به کاهش انتشار کربن انرژی‌های تجدیدپذیر از طریق فناوری‌های نوآورانه کمک کند. علاوه بر این،

---

1. Hidalgo
2. Economic complexity Index (ECI)
3. Chu
4. Ikram
5. Doğan
6. Tacchella
7. Albeaik

لاپاتیناس و همکاران (۲۰۱۹) نشان می‌دهند که عملکرد زیست‌محیطی به بهبود پیچیدگی اقتصادی کمک می‌کند. بااین‌حال، پیچیدگی اقتصادی بالاتر همیشه برای محیط‌زیست مفید نیست. پاتا[1] (۲۰۲۰) نتیجه می‌گیرد که با افزایش پیچیدگی اقتصادی، انتشار CO_2 ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. میلی و تیتلبویم (۲۰۲۰) با ساختن یک شاخص پیچیدگی اقتصادی سبز جدید، یک رابطه مثبت بین پیچیدگی اقتصادی و کیفیت محیطی را نشان می‌دهند. اما با مروری بر مطالعات پیشین می‌توان به این مهم دست‌یافت که تأثیر پیچیدگی اقتصادی بر انتشار کربن، می‌تواند نتایج متفاوتی داشته باشد. بدین ترتیب، دیگر رسالت مهم پژوهش حاضر بررسی تأثیر شاخص پیچیدگی اقتصادی بر انتشار CO_2 در کشور ایران است.

در کنار متغیرهای نوآوری تکنولوژی و شاخص پیچیدگی اقتصادی، در سال‌های اخیر؛ محققان رابطه رشد اقتصادی، جمعیت و سرانه انتشار کربن را از منظرهای مختلف مورد تجزیه‌وتحلیل قرار داده‌اند. تعدادی از مطالعات رابطه بین انتشار CO_2 و رشد اقتصادی را بررسی کردند، به‌عنوان‌مثال، مین[2] و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی روابط علی بین انتشار CO_2، رشد اقتصادی، سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، و جمعیت شهری در ویتنام با استفاده از منحنی زیست‌محیطی کوزنتس[3] پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که رشد اقتصادی با انتشار CO_2 تا یک سطح آستانه مشخص افزایش می‌یابد و سپس انتشار CO_2 کاهش می‌یابد. همچنین اسلم[4] و همکاران (۲۰۲۱) رابطه صنعتی شدن، رشد اقتصادی و انتشار دی‌اکسیدکربن را برای اقتصاد چین همراه با بازبودن تجاری و تراکم جمعیت بررسی می‌کنند. همچنین منحنی کوزنتس محیطی (EKC) را ارزیابی می‌کنند. برآوردهای محاسبه شده نشان می‌دهد که تولید ناخالص داخلی سرانه انتشار CO_2 را در بلندمدت بدتر می‌کند و این مهم مطابق با یافته‌های هائو[5] و همکاران (۲۰۲۲) است. اما تأثیر رشد جمعیت بر انتشار جهانی CO_2 توجهات کافی را به خود جلب نکرده است. بااین‌حال، مطالعات نشان می‌دهند که رشد جمعیت یکی از عوامل اصلی افزایش انتشار کربن در جهان بوده است (اسلم و همکاران، ۲۰۲۱؛ خو و همکاران، ۲۰۱۴؛ شی[6]،

---

1. Pata
2. Minh
3. Environmental Kuznets curve
4. Aslam
5. Huo
6. Shi

۲۰۰۱؛ ماهونی[1] و همکاران، ۲۰۱۳). بدین ترتیب، در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر دو متغیر کلیدی و مهم رشد اقتصادی و تراکم جمعیت بر انتشار CO_2 در کنار متغیرهای اصلی (نوآوری تکنولوژی و شاخص پیچیدگی اقتصادی) پرداخته خواهد شد. در بخش بعدی به ادبیات تجربی به تفکیک مطالعات خارجی و داخلی پرداخته خواهد شد.

۲-۲. پیشینه پژوهش

در این بخش به تفکیک به بررسی ادبیات تجربی (مطالعات خارجی و داخلی) مرتبط و به‌روز در زمینه موضوع مورد پژوهش پرداخته خواهد شد.

۲-۲-۱. مطالعات خارجی

ژائو[2] و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای بررسی می‌کنند که چگونه اقتصاد دیجیتال بر تأثیر نوآوری سبز بر عملکرد انتشار کربن بر اساس داده‌های پانل ۲۴۰ شهر چین از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۹ تأثیر می‌گذارد و در این راستا، رویکرد رگرسیون چندک پانل را اتخاذ کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که، (۱) نوآوری سبز عملکرد انتشار کربن را بهبود می‌بخشد، و (۲) اقتصاد دیجیتال (شامل توسعه دیجیتال و دیجیتالی‌شدن صنعت) تأثیر مثبت نوآوری سبز بر عملکرد انتشار کربن را ترویج می‌کند.

لیو و ژانگ (۲۰۲۴) با استفاده از نمونه‌ای از شرکت‌های فهرست‌شده با مصرف انرژی بالا از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱، یک مدل اثر ثابت دوگانه برای تأیید تأثیر نوآوری سبز بر عملکرد کاهش انتشار کربن شرکت‌های پرمصرف انرژی ساخته‌اند، و تحول دیجیتال را به عنوان یک متغیر تعدیل‌کننده برای تحلیل استفاده کرده‌اند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که نوآوری سبز می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد کاهش انتشار کربن شرکت‌های مصرف‌کننده انرژی را بهبود بخشد، درحالی‌که تحول دیجیتال به طور مثبت اثر نوآوری سبز را بر عملکرد کاهش انتشار کربن شرکت‌های مصرف‌کننده انرژی تعدیل می‌کند.

لیو[3] و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی به بررسی تأثیر اقتصاد دیجیتال بر انتشار کربن پرداخته‌اند. بدین منظور، از مدل اثرات ثابت پانل و مدل میانجی برای تأثیر اقتصاد دیجیتال بر انتشار کربن

---

1. O'Mahony
2. Zhao
3. Lyu

در چین از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۹ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد توسعه اقتصاد دیجیتال می‌تواند به طور مؤثر شدت انتشار کربن را از طریق اثر تخصیص منابع کاهش دهد.

ژن[1] و فریره (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای رابطه بین پیچیدگی اقتصادی و ردپای کربن را در ۱۰۱ اقتصاد جهان از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵ در نظر می‌گیرند. نتایج حاصله مبین آن است که افزایش پیچیدگی با ردپای کربن کم‌تر در آینده همراه است، همچنین این تأثیر برای کشورهای درحال‌توسعه بیش‌تر است.

منگ[2] و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای بر تجزیه‌وتحلیل نقش اقتصاد دیجیتال در کاهش انتشار کربن در شهرهای چین متمرکز بوده‌اند. بر این اساس از داده‌های پانل ۲۸۲ شهر در چین از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۹ استفاده شده است. نتایج به دست آمده این نکته را نشان می‌دهد که اقتصاد دیجیتال می‌تواند با ارتقاء نوآوری سبز، انتشار کربن را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد.

یو[3] و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه خود به بررسی رابطه علی بین رشد اقتصادی، پیچیدگی اقتصادی و انتشار کربن با استفاده از داده‌های پانلی برای دوره زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵ پرداخته‌اند، همچنین از رویکرد جدید پانل گرنجر[4] پیشنهاد شده توسط جودیس[5] و همکاران (۲۰۲۱) برای بررسی ارتباط فوق استفاده کرده‌اند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که بین رشد اقتصادی، پیچیدگی اقتصادی و انتشار CO_2 علیت دوطرفه وجود دارد.

۲-۲-۲. مطالعات داخلی

ذبیحی و همکاران (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای به بررسی نقش ریسک‌های اقتصادی، مالی و سیاسی در کاهش سرانه انتشار کربن با بهره‌گیری از رویکرد رگرسیون کوانتایل بر کوانتایل (QQR) در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۸ پرداخته‌اند. نتایج به دست آمده، بیانگر آن است که متغیر ریسک اقتصادی در تمام کوانتایل‌ها تأثیر مثبت بر سرانه انتشار کربن در تمام کوانتایل‌ها داشته است؛ متغیر ریسک مالی در تمام کوانتایل‌ها تأثیر مثبت بر سرانه انتشار کربن در تمام کوانتایل‌ها داشته است؛ همچنین متغیر ریسک سیاسی در تمام کوانتایل‌ها تأثیر مثبت بر سرانه انتشار کربن در تمام کوانتایل‌ها داشته است.

---

1. Zhen
2. Meng
3. You
4. Granger panel
5. Judis

محمدی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی به بررسی رابطه بین پیچیدگی اقتصادی، بازبودن تجاری، شدت انرژی و انتشار کربن در کشورهای درحال‌توسعه در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ با استفاده از روش اقتصادسنجی (GMM) پرداخته‌اند. نتایج مربوطه نشان می‌دهند که شاخص پیچیدگی اقتصادی تأثیر منفی و معنادار بر انتشار کربن دارد، همچنین سایر متغیرها همچون بازبودن تجاری و شدت انرژی با انتشار کربن ارتباط مثبت و معناداری داشته‌اند.

لعل خضری و آشنا (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای ارتباط میان شاخص پیچیدگی اقتصادی و انتشار کربن را با روش غیرخطی خود توضیحی با وقفه‌های توزیعی (NARDL) در بازه زمانی ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۸ در ایران مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصله مبین آن است که با افزایش پیچیدگی اقتصادی، انتشار کربن کاهش می‌یابد.

مریدیان و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به بررسی رابطه بین رشد اقتصادی، شاخص پیچیدگی اقتصادی، مصرف انرژی و انتشار کربن در ایران با کمک روش اقتصادسنجی (FARDL)[1] برای دوره زمانی ۱۹۶۵ تا ۲۰۱۷ پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مصرف انرژی و رشد اقتصادی باعث افزایش انتشار کربن می‌شود و همچنین پیچیدگی اقتصادی اثر کاهنده بر انتشار کربن دارد.

بدین ترتیب، با درنظرداشتن مطالعات تجربی و پیشینه پژوهش مذکور، می‌توان به این نکته دست‌یافت که اگرچه تحقیقات پراکنده‌ای در مورد ارتباط بین پیشرفت نوآوری تکنولوژی، شاخص پیچیدگی اقتصادی، رشد اقتصادی، تراکم جمعیت و سرانه انتشار (CO_2) انجام شده است، اما کم‌تر مطالعه‌ای به بررسی تأثیر هم‌زمان این متغیرها بر سرانه انتشار CO_2 در کشور ایران با مدل‌سازی اقتصادسنجی تازه و جدید رگرسیون چندک بر چندک پرداخته‌اند. شایان‌ذکر است که اگرچه مطالعه ژن و فریره (۲۰۲۳) به این موضوع پرداخته که پیچیدگی اقتصادی می‌تواند با کاهش انتشار کربن مرتبط باشد؛ یا مریدیان و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی رابطه بین رشد اقتصادی، شاخص پیچیدگی اقتصادی، مصرف انرژی و انتشار کربن پرداخته‌اند؛ اما هیچ‌گاه این متغیرها را در کنار هم با مدل‌سازی اقتصادسنجی QQR مورد بررسی قرار نداده‌اند. بدین ترتیب، این مطالعه با بررسی روابط متقابل و استفاده از رویکرد رگرسیون چندک بر چندک برجسته می‌شود. برخلاف رگرسیون کوانتایل معمولی، رگرسیون چندک بر چندک امکان ارزیابی

[1]. FourierARDL

چندک‌های دومتغیر را برای اهداف مقایسه‌ای فراهم می‌کند. با اتخاذ این رویکرد، سیاست‌گذاران می‌توانند بینش‌های ارزشمندی برای توسعه تکنیک‌های کاهش سرانه انتشار CO_2 به دست آورند. اما مهم‌ترین سؤال این است که اثر هر یک از متغیرها بر سرانه انتشار کربن چگونه است و کدامیک مؤثرتر هستند؟. بنابراین، پژوهش حاضر به دنبال پرکردن شکاف‌های تجربی مربوطه است و از مدل‌های تفکیک شده (رگرسیون چندک بر چندک) برای هر متغیر استفاده کرده تا به صورت دقیق بررسی کند که در دوره زمانی موردمطالعه و در کشور ایران در هر کوانتایل اثر متغیرها بر سرانه انتشار کربن چگونه بوده است و کدامیک اثرگذاری بیش‌تری بر سرانه انتشار کربن داشته‌اند. بدین ترتیب، این مطالعه نشان‌دهنده اولین پژوهش تجربی است که این ارتباطات را با استفاده از داده‌های سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۰ برای کشور ایران بررسی می‌کند. همچنین، اندیشه و رسالت اصلی پژوهش حاضر بر این سؤال کلیدی استوار است که آیا نوآوری تکنولوژی، شاخص پیچیدگی اقتصادی، رشد اقتصادی و تراکم جمعیت بر سرانه انتشار کربن تأثیرگذارند؟. در بخش بعدی به بیان روش‌شناسی پژوهش حاضر پرداخته خواهد شد.

۳. تصریح مدل مورد استفاده

رویکرد رگرسیون چندک بر چندک (QQR) یک رویکرد جدید برای تحلیل معادلات دومتغیره است. این رویکرد اولین‌بار توسط سیم و ژو[1] (۲۰۱۵) ارائه شد که ترکیبی از رگرسیون کوانتایل[2] (QR) و تخمین ناپارامتریک[3] است و اطلاعات غنی‌تری را در مقایسه با روش‌های تخمین سنتی ارائه می‌دهد. رگرسیون QQR می‌تواند در یک محیط نامتقارن عملکرد خوبی داشته باشد و یک رابطه جامع بین چندک‌های پایین و بالای سری داده‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد؛ بدین ترتیب، رگرسیون QQR در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم، تصویری واقعی‌تر از تحلیل ارائه می‌دهد (یو و همکاران، ۲۰۲۲).

رویکرد رگرسیون کمی معمولی به‌خودی‌خود شکلی توسعه‌یافته از مدل رگرسیون کلاسیک در نظر گرفته می‌شود؛ اما بسیار جامع‌تر است از این منظر که تأثیر یک متغیر مستقل را نه‌تنها بر

1. Sim and Zhou
2. Quantile Regression
3. Non-parametric estimation

مرکز متغیر وابسته بلکه در انتهای آن نیز مورد سنجش قرار می‌دهد. اما رویکرد رگرسیون معمولی قادر به یافتن وابستگی کامل بین متغیرها نیست، اگرچه ناهمگونی را در رابطه در نظر می‌گیرد. در نهایت، در این پژوهش از رویکرد رگرسیون چندک بر چندک برای بررسی رابطه جامع بین متغیرها استفاده شده است. این مدل اصلاحی بر روی رگرسیون کوانتایل مرسوم است که بر تأثیر چندک‌های یک متغیر مستقل بر چندک‌های مختلف متغیر وابسته تمرکز دارد؛ بنابراین، رویکرد رگرسیون چندک بر چندک، به‌جای روش‌های سنتی مانند OLS و رویکرد رگرسیون (QR)، می‌تواند به درک رابطه اساسی و تجزیه‌وتحلیل‌های قوی‌تر کمک کند (یو و همکاران، ۲۰۲۲).

بدین ترتیب، مطابق رابطه ۱، مدل پایه را می‌توان با مدل زیر از رگرسیون چندک ناپارامتریک تشکیل داد:

$$\begin{aligned} CO_{2t} &= \beta^{\theta}(TECH_t) + \boldsymbol{\mu_t^{\theta}} \\ CO_{2t} &= \beta^{\theta}(ECI_t) + \boldsymbol{\mu_t^{\theta}} \\ CO_{2t} &= \beta^{\theta}(GDP_t) + \boldsymbol{\mu_t^{\theta}} \\ CO_{2t} &= \beta^{\theta}(POP_t) + \boldsymbol{\mu_t^{\theta}} \end{aligned} \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، CO_2 نشان‌دهنده سرانه انتشار دی‌اکسیدکربن است. همچنین TECH نشان‌دهنده نوآوری تکنولوژی، ECI نشان‌دهنده شاخص پیچیدگی اقتصادی[1]، GDP نشان‌دهنده رشد اقتصادی[2] و POP نشان‌دهنده تراکم جمعیت[3] هستند. همچنین θ نشان‌دهنده θ ام توزیع شرطی انتشار CO_2 است. μ_t^{θ} عبارت خطای کوانتایلی است و کمیک شرطی θ آن صفر است. ازآن‌جایی‌که در مورد ارتباط بین TECH، ECI، GDP، POP و CO_2 در فرایند مدل‌سازی دانش قبلی وجود ندارد، بدین ترتیب، $\beta^{\theta}()$ یک تابع ناشناخته فرض می‌شود. بدین جهت، برای بررسی رابطه ۱، از رگرسیون خطی برای نوآوری تکنولوژی، شاخص پیچیدگی اقتصادی، رشد اقتصادی و تراکم جمعیت به‌صورت زیر استفاده می‌شود (رابطه ۲):

---

1. Economic complexity index
2. Economic Growth
3. Population density

$$\beta^{\theta}(TECH_t) = \beta^{\theta}(TECH^{\tau}) + \beta'^{\theta}(TECH^{\tau})(TECH_t - TECH^{\tau})$$
$$\beta^{\theta}(ECI_t) = \beta^{\theta}(ECI^{\tau}) + \beta'^{\theta}(ECI^{\tau})(ECI_t - ECI^{\tau}) \quad (۲)$$
$$\beta^{\theta}(GDP_t) = \beta^{\theta}(GDP^{\tau}) + \beta'^{\theta}(GDP^{\tau})(GDP_t - GDP^{\tau})$$
$$\beta^{\theta}(POP_t) = \beta^{\theta}(POP^{\tau}) + \beta'^{\theta}(POP^{\tau})(POP_t - POP^{\tau})$$

در رابطه ۲، β'^{θ} مشتق جزئی $\beta^{\theta}(TECH_t)$، $\beta^{\theta}(ECI_t)$، $\beta^{\theta}(GDP_t)$ و $\beta^{\theta}(POP_t)$ را باتوجه‌به $TECH_t$، ECI_t، GDP_t و POP_t نشان می‌دهد که به عنوان اثر جزئی تعریف شده است. $\beta^{\theta}(TECH^{\tau})$، $\beta^{\theta}(ECI^{\tau})$، $\beta^{\theta}(GDP^{\tau})$، $\beta^{\theta}(POP^{\tau})$، $\beta'^{\theta}(TECH^{\tau})$، $\beta'^{\theta}(ECI^{\tau})$، $\beta'^{\theta}(GDP^{\tau})$و $\beta'^{\theta}(POP^{\tau})$ در رابطه ۲ توابعی از θ و τ هستند. بنابراین، مطابق رابطه ۳، شکل اصلاح شده رابطه ۲ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\beta^{\theta}(TECH_t) = \beta_0(\theta,\tau) + \beta_1(\theta,\tau)(TECH_t - TECH^{\tau})$$
$$\beta^{\theta}(ECI_t) = \beta_0(\theta,\tau) + \beta_1(\theta,\tau)(ECI_t - ECI^{\tau}) \quad (۳)$$
$$\beta^{\theta}(GDP_t) = \beta_0(\theta,\tau) + \beta_1(\theta,\tau)(GDP_t - GDP^{\tau})$$
$$\beta^{\theta}(POP_t) = \beta_0(\theta,\tau) + \beta_1(\theta,\tau)(POP_t - POP^{\tau})$$

حال با جایگزینی رابطه ۳ در رابطه ۱، رابطه ۴ برای روش چندک بر چندک به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$CO_{2t} = \beta_0(\theta,\tau) + \beta_1(\theta,\tau)(TECH_t - TECH^{\tau})/* + \boldsymbol{\varepsilon_t^{\theta}}$$
$$CO_{2t} = \beta_0(\theta,\tau) + \beta_1(\theta,\tau)(ECI_t - ECI^{\tau})/* + \boldsymbol{\varepsilon_t^{\theta}} \quad (۴)$$
$$CO_{2t} = \beta_0(\theta,\tau) + \beta_1(\theta,\tau)(GDP_t - GDP^{\tau})/* + \boldsymbol{\varepsilon_t^{\theta}}$$
$$CO_{2t} = \beta_0(\theta,\tau) + \beta_1(\theta,\tau)(POP_t - POP^{\tau})/* + \boldsymbol{\varepsilon_t^{\theta}}$$

رابطه ۴، شکل عملکردی تکنیک QQR را نشان می‌دهد. قسمت (*) کوانتایل مشروط را نشان می‌دهد. β_0 و β_1 پارامترهایی هستند که به‌صورت مضاعف در θ و τ نمایه می‌شوند و ارتباط کمی بین $TECH$، ECI، GDP، POP و CO_2 را تعریف می‌کنند. مقادیر β_0 و β_1 ممکن است بسته به مقادیر چندک متغیرهای وابسته و مستقل متفاوت باشند (یو و همکاران، ۲۰۲۲).

بدین ترتیب، به‌منظور بررسی نحوه اثرگذاری نوآوری تکنولوژی، شاخص پیچیدگی اقتصادی، رشد اقتصادی و تراکم جمعیت بر سرانه انتشار (CO_2) مبتنی بر ادبیات نظری مدل اقتصادسنجی به‌قرار رابطه ۵ تصریح شده است:

$$CO_{2t} = F(TECH_t, ECI_t, GDP_t, POP_t, \varepsilon_t) \quad (۵)$$

در رابطه ۵، CO_{2t} معرف سرانه انتشار کربن، $TECH_t$ معرف نوآوری تکنولوژی، ECI_t معرف شاخص پیچیدگی اقتصادی، GDP_t معرف رشد اقتصادی، POP_t معرف تراکم جمعیت و ε_t جز خطای مدل است. در جدول ۱ به تعریف متغیرهای مورد استفاده و نیز منبع استخراج آن‌ها پرداخته شده است.

جدول (۱): متغیرهای مورد استفاده در مدل معرفی شده[۱]

متغیر	نام اختصاری	توضیح	نوع	انتظار از رابطه	منبع
سرانه انتشار کربن	LCO_2	دی‌اکسیدکربن اغلب از طریق فعالیت‌های انسانی مانند سوزاندن سوخت‌های فسیلی (از قبیل: نفت، زغال‌سنگ یا گاز و غیره) در جو منتشر می‌شود. بدین ترتیب، در پژوهش حاضر از متغیر مهم سرانه انتشار کربن استفاده شده است.	متغیر وابسته		پایگاه جهان ما درداده[۲]
نوآوری تکنولوژی	TECH	این متغیر از مجموع ثبت اختراعات افراد ایرانی و غیرمقیم در ایران حاصل می‌شود. *درخواست‌های ثبت اختراع*: درخواست‌های ثبت اختراع در سراسر جهان هستند که از طریق رویه معاهده همکاری ثبت اختراع یا با یک دفتر ثبت اختراع ملی برای حقوق انحصاری یک اختراع - محصول یا فرایندی که روش جدیدی برای انجام کاری ارائه می‌کند یا راه‌حل فنی جدیدی برای یک مشکل ارائه می‌دهد.	متغیر مستقل	+/−	بانک جهانی
شاخص پیچیدگی اقتصادی	ECI	شاخص پیچیدگی اقتصادی (ECI) معیاری جامع از قابلیت‌های تولیدی سیستم‌های اقتصادی بزرگ، معمولاً شهرها، مناطق یا کشورها است و با استفاده از یک روش تکراری محاسبه می‌شود که در آن مقدار	متغیر مستقل	+/−	آمارهای دانشگاه هاروارد

[۱] در پژوهش حاضر از متغیرهای سرانه انتشار کربن، رشد اقتصادی و تراکم جمعیت لگاریتم‌گیری شده است؛ چرا که لگاریتم‌گیری موجب کاهش چولگی مثبت داده‌ها شده، از سویی دیگر، اثر داده‌های پرت را کم کرده و همچنین به برقراری فروض کلاسیک کمک می‌کند.

[۲] انتشارات تحقیقاتی در مورد جهان ما درداده (ourworldindata.org) به بسیاری از مشکلات جهانی در بهداشت، آموزش، خشونت، قدرت سیاسی، حقوق بشر، جنگ، فقر، نابرابری، انرژی، گرسنگی و تأثیرات زیست‌محیطی بشریت اختصاص دارد. بدین ترتیب، امروزه این پایگاه به یک مرجع معتبر و مهم در زمینه دریافت اطلاعات و داده‌های آماری تبدیل شده است.

		میانگین اندازه‌گیری با مقادیر اولیه تنوع یک کشور و فراگیر بودن یک محصول محاسبه می‌شود.			
رشد اقتصادی	LGDP	تولید ناخالص داخلی سرانه، تولید ناخالص داخلی تقسیم بر جمعیت میان‌سال است. تولید ناخالص داخلی مجموع ارزش ناخالص اضافه شده توسط همه تولیدکنندگان مقیم در اقتصاد به‌اضافه هرگونه مالیات بر محصول و منهای یارانه‌هایی است که در ارزش محصولات لحاظ نشده است. بدون کسر برای استهلاک دارایی‌های ساخته شده یا برای تخلیه و تخریب منابع طبیعی محاسبه می‌شود. داده‌ها به دلار آمریکا ۲۰۱۵ ثابت هستند.	متغیر مستقل	+/−	بانک جهانی
تراکم جمعیت	LPOP	تراکم جمعیت عبارت است از: تقسیم جمعیت در اواسط سال بر مساحت زمین بر حسب کیلومترمربع.	متغیر مستقل	+/−	بانک جهانی

مأخذ: یافته‌های پژوهش

بدین ترتیب، در بخش بعدی به تجزیه‌وتحلیل یافته‌های پژوهش حاضر پرداخته خواهد شد.

۴. تجزیه و تحلیل داده‌ها

به‌منظور بررسی ارتباط بین نوآوری تکنولوژی، شاخص پیچیدگی اقتصادی، رشد اقتصادی، تراکم جمعیت و سرانه انتشار کربن در کشور ایران در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۰ به بررسی آمار توصیفی، بررسی مانایی متغیرها، آزمون تشخیصی (آزمون خودهمبستگی اجزا اخلال)، آزمون هم انباشتگی جوهانسن[1] و در انتها به تخمین مدل رگرسیون چندک بر چندک پرداخته شده است. نتایج به‌دست‌آمده در ادامه و به تفکیک توضیح داده شده است.

[1]. Johansen cointegration test

۴-۱. نتایج آمار توصیفی و آزمون مانایی

براساس اطلاعات موجود در جدول ۲، با در نظر گرفتن تنها یک کشور در این پژوهش، تصمیم گرفته شده است که نمودارهای مربوط به هر یک از متغیرها در این گزارش قرار نگرفته و تنها به گزارش آمار توصیفی آن‌ها پرداخته شود.

جدول ۱: نتایج آمار توصیفی

نام متغیر	میانگین	میانه	بیش‌ترین	کم‌ترین	انحراف استاندارد
LCO_2	۰/۸۲۸	۰/۸۶۲	۰/۹۲۲	۰/۶۳۰	۰/۰۸۲
TECH	۸۱۵۰/۷۲۰	۱۱۱۵۰/۰۰۰	۱۶۲۵۹/۰۰۰	۳۹۹/۰۰۰	۶۰۰۸/۲۹۲
ECI	۱/۲۹۷	۱/۲۴۹	۱/۸۱۰	۰/۶۷۶	۰/۳۰۸
LGDP	۳/۶۷۳	۳/۷۰۰	۳/۷۳۶	۳/۵۷۲	۰/۰۵۸
LPOP	۱/۶۵۴	۱/۶۵۳	۱/۷۳۰	۱/۵۷۷	۰/۰۴۷

مأخذ: یافته‌های پژوهش

همچنین یکی دیگر از آزمون‌های مهم در مدل‌سازی اقتصادسنجی بررسی مانایی (آزمون ریشه واحد) است. بدین ترتیب، در این بخش از آزمون ریشه واحد دیکی فولر تعمیم‌یافته[1] استفاده شده است. در جدول ۳ نتایج آزمون دیکی فولر برای متغیرهای مورد سنجش به تفکیک ارائه شده است و برای مانایی برخی متغیرها بایستی تفاضل مرتبه اول و دوم گرفته می‌شد که این عملیات اجرا شده و مقدار احتمال و مقدار آماره t درج گشته است.

جدول ۲: نتایج آزمون مانایی

نام متغیر	مقدار آماره t	مقدار احتمال	درجه مانایی
LCO_2	- ۵/۲۰۹	۰/۰۰۰	I (1)
TECH	- ۳/۳۹۰	۰/۰۲۲	I (1)
ECI	- ۷/۰۵۱	۰/۰۰۰	I (1)
LGDP	- ۴/۰۲۹	۰/۰۰۵	I (1)
LPOP	- ۳/۹۴۵	۰/۰۰۶	I (2)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

[1]. Augmented Dicky Fuller (ADF)

۴-۲. نتایج برآورد آزمون‌های استنباطی

براساس اطلاعات مندرج در جدول ۴، نتایج آزمون تشخیصی (خودهمبستگی اجزا اخلال) گزارش شده است. در تخمین، نتایج آزمون خودهمبستگی نشان‌دهنده خودهمبستگی است؛ زیرا مقدار احتمال کوچک‌تر از مقدار بحرانی (۰.۰۵) می‌باشد و درنتیجه فرضیه H_0 که نشان‌دهنده عدم خودهمبستگی است، رد می‌شود. همچنین نتایج آزمون هم انباشتگی جوهانسن نشان می‌دهد، چون مقدار احتمال کم‌تر از مقدار بحرانی (۰.۰۵) است، در نتیجه فرضیه (H_0) رد می‌شود و بدین ترتیب، متغیرهای این پژوهش دارای ارتباط بلندمدت هستند.

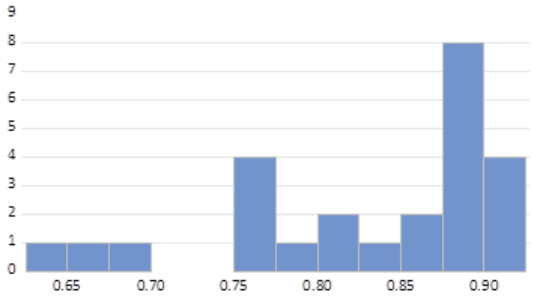
جدول ۳: نتایج خودهمبستگی جزء اخلال و هم انباشتگی جوهانسن

	آزمون خودهمبستگی		آزمون هم انباشتگی جوهانسن	
نوع تخمین	آزمون بروش پاگان	مقدار احتمال	مقدار بحرانی	مقدار احتمال
LCO_2 VS TECH	۱۰/۰۵۷	۰/۰۰۰	۱۵/۴۹۴	۰/۰۰۱
LCO_2 VS ECI	۱۵/۳۲۸	۰/۰۰۰	۱۵/۴۹۴	۰/۰۲۷
LCO_2 VS LGDP	۴/۸۶۸	۰/۰۱۸	۱۵/۴۹۴	۰/۰۰۱
LCO_2 VS LPOP	۱۲/۴۴۵	۰/۰۰۰	۱۵/۴۹۴	۰/۰۱۳

مأخذ: یافته‌های پژوهش

شایان‌ذکر است که در این پژوهش متغیر سرانه انتشار کربن دارای توزیع نامتقارن است؛ بدین ترتیب، برای برآورد مدل می‌توان از تکنیک رگرسیون چندک بر چندک استفاده کرد؛ زیرا این روش می‌تواند نتایج قابل‌اطمینان‌تری ارائه دهد (شکل ۱).

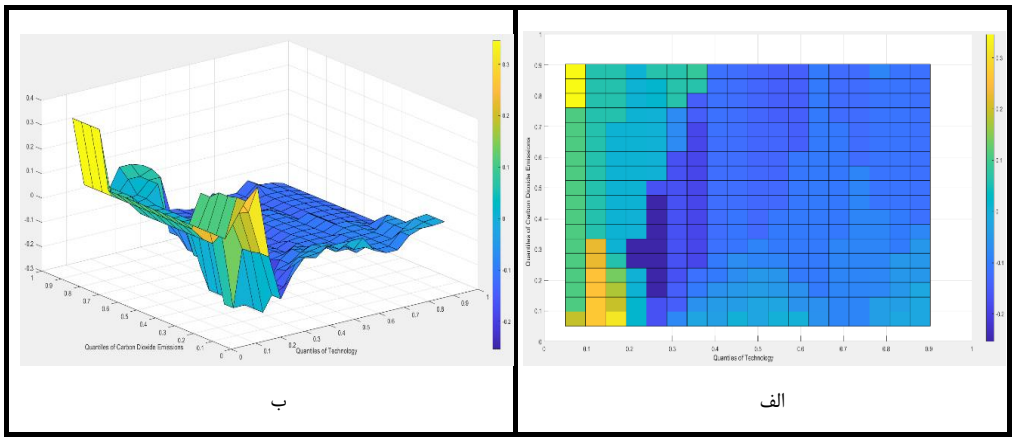
شکل (۱): بررسی توزیع متغیر وابسته (سرانه انتشار کربن)



مأخذ: یافته‌های پژوهش

حال که نتایج آزمون‌های توصیفی و استنباطی (آزمون‌های پیش از تخمین) به‌درستی ارائه گردید؛ در این بخش به تخمین مدل رگرسیون چندک بر چندک (کوانتایل بر کوانتایل) در چهار مدل مجزا (**مدل اول:** سرانه انتشار کربن و نوآوری تکنولوژی)، (**مدل دوم:** سرانه انتشار کربن و شاخص پیچیدگی اقتصادی)، (**مدل سوم:** سرانه انتشار کربن و رشد اقتصادی) و (**مدل چهارم:** سرانه انتشار کربن و تراکم جمعیت) پرداخته شده است. نتایج مدل اول در **شکل ۲** ذکر گردیده است.

شکل (۲): نتایج رگرسیون چندک بر چندک (سرانه انتشار کربن و نوآوری تکنولوژی)[1]



ب الف

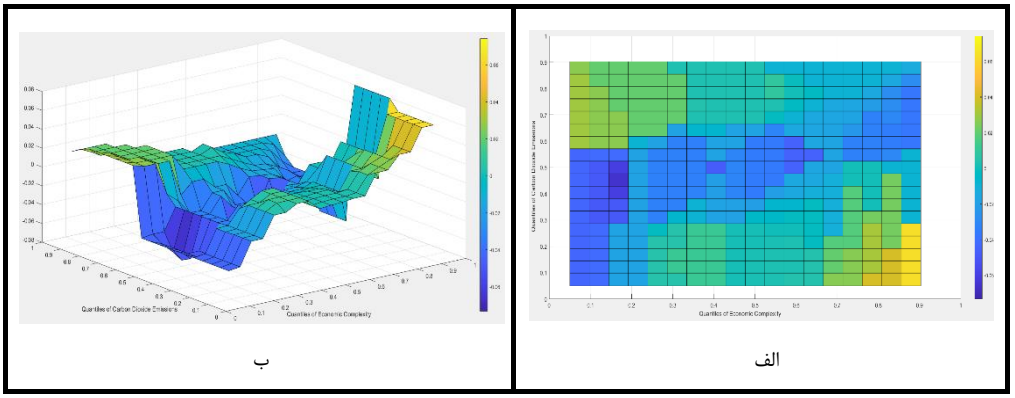
مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۲ را می‌توان این‌گونه تفسیر نمود: متغیر نوآوری تکنولوژی در برخی از کوانتایل‌ها (چندک‌ها) تأثیر منفی و در برخی از کوانتایل‌ها تأثیر مثبت بر سرانه انتشار کربن داشته است و این ارتباط منفی در کوانتایل‌های (۰/۲۵ تا ۰/۳۵) متغیر نوآوری تکنولوژی و کوانتایل‌های (۰/۰۵ تا ۰/۵) سرانه انتشار کربن نسبتاً قوی‌تر بوده است. بدین ترتیب، تأثیر سطح نوآوری تکنولوژی بر سرانه انتشار کربن منفی است که نشان می‌دهد بهبود سطح نوآوری تکنولوژی اثر بازدارنده قابل توجهی بر سرانه انتشار کربن دارد. بنابراین، نوآوری‌های تکنولوژیکی می‌توانند انتشار CO_2 را مهار کنند. از آن‌جایی‌که نوآوری تکنولوژیکی می‌تواند استفاده کارآمد از زغال‌سنگ و سایر انرژی‌های فسیلی را تحقق بخشد، این پتانسیل را دارد که رشد منابع جدید

[1]. تخمین چندک بر چندک ضریب شیب، $\beta_1(\theta,\tau)$ تأثیر متغیرهای مستقل بر سرانه انتشار کربن.

انرژی را تقویت کند و میزان انرژی جدید را در مصرف کلی انرژی افزایش دهد (لی و همکاران، ۲۰۲۲، محمود و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، دلایل متعددی برای تأثیر منفی تکنولوژی بر انتشار CO_2 وجود دارد. به عنوان‌مثال، تشدید مقررات زیست‌محیطی باعث افزایش مستمر نوآوری و تکنولوژی‌های زیست‌محیطی برای کاهش انتشار CO_2 می‌شود (کوستانتینی و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین ارتباط مثبت در کوانتایل‌های (۰/۰۵ تا ۰/۱) متغیر نوآوری تکنولوژی و کوانتایل‌های (۰/۷۵ تا ۰/۹) سرانه انتشار کربن نسبتاً قوی‌تر بوده است. بدین ترتیب، نوآوری تکنولوژیکی به انتشار کربن کمک می‌کند. این مهم به این دلیل است که نوآوری تکنولوژی می‌تواند توسعه اقتصادی را ارتقاء دهد که به ناچار منجر به مصرف بالای انرژی می‌شود و باعث افزایش سریع انتشار کربن می‌شود (محمود، ۲۰۲۰، صدیق و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، برخی از کارشناسان معتقدند که عدم اطمینان در مورد تأثیر نوآوری‌های تکنولوژیکی بر کارایی انتشار CO_2 وجود دارد. به عنوان مثال، برخی از محققان ادعا کردند که نوآوری‌های تکنولوژیکی منجر به افزایش قابل توجه در تولید صنعتی و همچنین افزایش قابل توجهی در مصرف انرژی و انتشار CO_2 شده است که منجر به عدم اطمینان در مورد رابطه بین فناوری‌های جدید و انتشار کربن شده است (فیشر-واندن و وینگ، ۲۰۰۸). از سویی دیگر، نتایج حاصل از تخمین مدل دوم مطابق **شکل ۳** به‌دست آمده است.

شکل (۳): نتایج رگرسیون چندک بر چندک (سرانه انتشار کربن و شاخص پیچیدگی اقتصادی)



الف ب

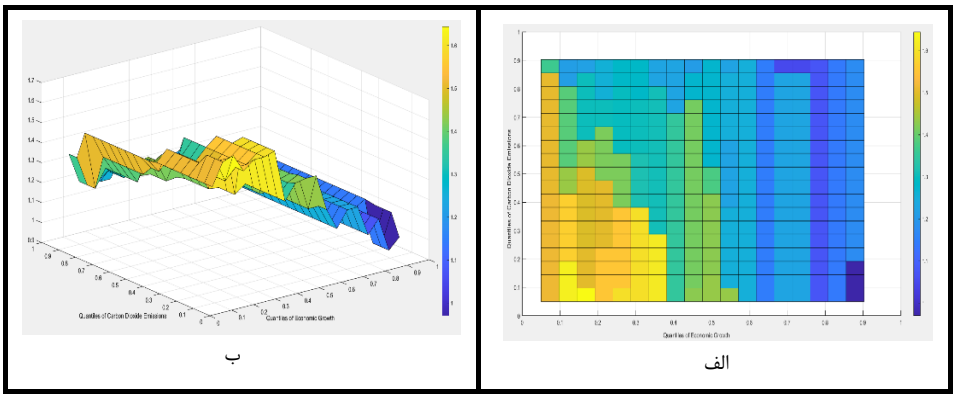
مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۳ را می‌توان این‌گونه تفسیر نمود: متغیر شاخص پیچیدگی اقتصادی در برخی از کوانتایل‌ها تأثیر منفی و در برخی از کوانتایل‌ها تأثیر مثبت بر سرانه انتشار کربن داشته است و این ارتباط منفی در کوانتایل‌های (۰/۰۵ تا ۰/۲) متغیر شاخص پیچیدگی اقتصادی و کوانتایل‌های (۰/۰۵ تا ۰/۵۵) سرانه انتشار کربن نسبتاً قوی‌تر بوده است. بدین ترتیب، یافته‌ها چنین استنباط می‌کنند که پیچیدگی اقتصادی پایداری زیست‌محیطی را تضمین می‌کند، زیرا شاخص پیچیدگی اقتصادی رابطه معناداری منفی با انتشار CO_2 و GHG دارد. دگرگونی ساختاری از طریق پیچیدگی اقتصادی، توسعه فناوری‌های موجود را تضمین می‌کند که به طور قابل‌توجهی تخریب محیط‌زیست را کاهش می‌دهد. پیچیدگی اقتصادی گنجاندن دانش مدرن در اقتصاد را تضمین و جایگزین سیستم تولید منسوخ شده می‌کند که باعث مشکلات زیست‌محیطی عظیمی می‌شود. علاوه بر این، پیچیدگی اقتصادی کارایی انرژی را افزایش می‌دهد و به تسریع عملکرد سیستم تولید کمک می‌کند. هر دو عامل منجر به کاهش انتشار آلودگی می‌شوند. همچنین مانع از بهره‌برداری بیش از حد از منابع طبیعی می‌شود و انتشار گازهای گلخانه‌ای را محدود می‌کند. دوگان و همکاران (۲۰۲۱) استدلال می‌کنند که پیچیدگی اقتصادی، گذار به تولید مبتنی بر دانش را تضمین می‌کند و استفاده از دانش پیچیده را برای انجام فعالیت‌های مختلف اقتصادی افزایش می‌دهد. این عوامل به طور قابل ملاحظه‌ای انتشار کربن را کاهش می‌دهند. علاوه بر این، صافی[1] و همکاران (۲۰۲۳)، پیشنهاد کردند که اقتصادهای دارای پیچیدگی اقتصادی به انتشار آلودگی کم نسبت به اقتصادهایی که پیچیدگی اقتصادی پایینی دارند، نسبت داده می‌شوند، به این معنی که پیچیدگی اقتصادی عامل مهمی در تضمین پایداری زیست‌محیطی است. وانگ و همکاران (۲۰۲۳)، حدس زدند که گذار به ساختار اقتصادی مبتنی بر دانش و فناوری از طریق پیچیدگی اقتصادی بالا، کارایی توسعه سبز را بهبود می‌بخشد. چنین حرکتی به سمت توسعه سبز، پایداری محیط‌زیست را تضمین می‌کند. بدین ترتیب، بهبود شاخص پیچیدگی اقتصادی می‌تواند به کاهش انتشار کربن کمک کند (کان و گزگور، ۲۰۱۷؛ دوگان و همکاران، ۲۰۲۱). بااین‌حال، پیچیدگی اقتصادی بالاتر همیشه برای محیط‌زیست مفید نیست، زیرا افزایش پیچیدگی اقتصادی ممکن است منجر به تخریب بیش‌تر محیط‌زیست به دلیل افزایش

[1]. Safi

تولید و تقاضا برای انرژی شود (خضری و همکاران، ۲۰۲۲). از سویی دیگر، نتایج حاصل از تخمین مدل سوم مطابق **شکل ۴** به‌دست آمده است.

شکل ۱: نتایج رگرسیون چندک بر چندک (سرانه انتشار کربن و رشد اقتصادی)



ب الف

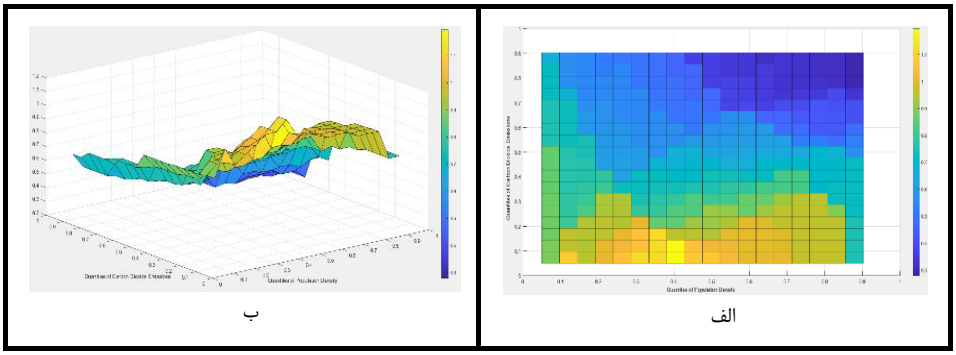
مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۴ را می‌توان این‌گونه تفسیر نمود: متغیر رشد اقتصادی در تمام کوانتایل‌ها تأثیر مثبت بر سرانه انتشار کربن در تمام کوانتایل‌ها داشته است و این ارتباط مثبت در کوانتایل‌های (۰/۰۵ تا ۰/۵) رشد اقتصادی و کوانتایل‌های (۰/۰۵ تا ۰/۶) سرانه انتشار کربن نسبتاً قوی‌تر بوده است. بدین ترتیب، مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد رابطه بین انتشار CO_2 و رشد اقتصادی مثبت و معنی‌دار است. محققان به طور مداوم بحث کرده‌اند که رشد اقتصادی همیشه به طور نامطلوب تخریب محیط‌زیست را تحمیل می‌کند. اخیراً، شواهد تجربی اعلام کرده‌اند که تخریب محیط‌زیست و توسعه اقتصادی به طور قابل توجهی مرتبط هستند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲). درنتیجه می‌توان گفت که افزایش تولید ناخالص داخلی ناشی از تبدیل انرژی و منابع طبیعی به کالاهای سرمایه‌ای و مصرفی منجر به افزایش آلودگی محیط‌زیست می‌شود (آلاگانتیران و آنابا[1]، ۲۰۲۲). بدین ترتیب، افزایش رشد اقتصادی باعث تخریب بیش‌تر

[1]. Alaganthiran and Anaba

محیط‌زیست می‌شود (هائو و همکاران، ۲۰۲۲؛ اسلم و همکاران،۲۰۲۱). از سویی دیگر، نتایج حاصل از تخمین مدل چهارم مطابق **شکل ۵** به‌دست آمده است.

شکل (۶): نتایج رگرسیون چندک بر چندک (سرانه انتشار کربن و تراکم جمعیت)



ب الف

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۵ را می‌توان این‌گونه تفسیر نمود: متغیر تراکم جمعیت در تمام کوانتایل‌ها تأثیر مثبتی بر سرانه انتشار کربن در تمام کوانتایل‌ها داشته است و این ارتباط مثبت در کوانتایل‌های (۰/۱ تا ۰/۸۵) تراکم جمعیت و کوانتایل‌های (۰/۰۵ تا ۰/۳) سرانه انتشار کربن نسبتاً قوی‌تر بوده است. بدین ترتیب، رشد جمعیت مستقیماً با مصرف بیش از حد انرژی مرتبط است که منجر به افزایش CO_2 می‌شود. رشد جمعیت یکی از نیروهای محرکه اصلی افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن در سراسر جهان طی دو دهه گذشته بوده است. این امر به ویژه در کشورهای درحال‌توسعه که تأثیر جمعیت بر انتشار گازهای گلخانه‌ای بارزتر بوده است، صادق است (شی، ۲۰۰۱). بنابراین مروری بر مطالعات نشان می‌دهند که رشد جمعیت یکی از عوامل اصلی افزایش انتشار کربن در جهان بوده است (اسلم و همکاران، ۲۰۲۱؛ خو و همکاران، ۲۰۱۴؛ شی، ۲۰۰۱؛ ماهونی و همکاران، ۲۰۱۳).

۵. بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به دنبال بررسی جامعی از نقش نوآوری تکنولوژی، شاخص پیچیدگی اقتصادی، رشد اقتصادی و تراکم جمعیت در کاهش سرانه انتشار (CO_2) بوده است. ازاین‌رو، با استفاده از

رهیافت اقتصادسنجی جدید رگرسیون چندک بر چندک، رابطه آماری بین متغیرهای نوآوری تکنولوژی، شاخص پیچیدگی اقتصادی، رشد اقتصادی، تراکم جمعیت و سرانه انتشار (CO_2) بررسی شده است، زیرا رگرسیون چندک بر چندک اطلاعات غنی‌تری را در مقایسه با روش‌های تخمین معمول ارائه می‌دهد. رگرسیون QQR می‌تواند در یک محیط نامتقارن عملکرد خوبی داشته باشد و یک رابطه جامع بین چندک‌های پایین و بالای سری داده‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد؛ بدین ترتیب، رگرسیون QQR در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم، تصویری واقعی‌تر از تحلیل‌های مبتنی بر داده‌های سری زمانی ارائه می‌دهد (یو و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین روش‌های دیگر اقتصادسنجی ممکن است به توزیع‌های خاص محدود شده باشند و برای مدل‌سازی به فرضیات خاصی نیاز داشته باشند که در بسیاری از موارد دقت مدل را کاهش می‌دهد. به‌عنوان‌مثال، روش‌های پارامتریک ممکن است به فرضیاتی مانند توزیع نرمال اتکا کنند که ممکن است با واقعیت داده‌ها همخوانی نداشته باشد. بنابراین رگرسیون چندک بر چندک (QQR) به عنوان یک روش آماری و مبتنی بر توزیع‌های تجربی، دقت بیش‌تری نسبت به روش‌های دیگر ارائه می‌دهد. همچنین امکان مقایسه بین چندک‌های پیش‌بینی‌کننده و متغیر مورد نظر را فراهم می‌آورد و درنتیجه توانایی پیش‌بینی قوی‌تری به دلیل افزایش در نظر گرفتن تنوع بین دو مؤلفه ایجاد می‌کند (شهزاد[1] و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین، این روش پیشرفته برای تجزیه‌وتحلیل ارتباط بین سری‌های اقتصاد کلان خارج از میانگین داده‌ها بسیار توصیه می‌شود. ازاین‌رو، برای بررسی نقش بین چندک‌های سری توضیحی در چندک‌های متنوع سری توضیح‌داده‌شده، رگرسیون چندک استاندارد با رگرسیون خطی ترکیب می‌شود. این امر دقت نتایج تجربی را افزایش می‌دهد و مبنایی برای درک رابطه پنهان در میان مجموعه‌های تحت بررسی فراهم می‌کند. همچنین امکان ارزیابی تأثیر چندک‌های یک متغیر بر متغیر دیگر را نیز فراهم می‌کند. علاوه بر این، به تحلیلگران اجازه می‌دهد تا با حداقل خطا پیش‌بینی کنند. همچنین این روش نسبت به موارد پَرت و غیرعادی در داده‌های واقعی کارآمد است و به عنوان یک روش رگرسیون خطی محلی ناپارامتریک، می‌تواند توزیع شرطی را منعکس کند و جهش‌های ساختاری بالقوه را آشکار کند. همچنین هر چندک (کوانتایل) نشان‌دهنده یک بازه از توزیع متغیر

[1]. Shahzad

مستقل و یا وابسته است. بدین ترتیب، با رویکرد مدل‌سازی چندک بر چندک می‌توان درک کرد که تأثیرات تفاوت‌های متغیرها در بازه‌های مختلف توزیع آن‌ها چگونه است.

نتایج حاصل از مدل‌سازی چندک بر چندک نشان‌دهنده آن است که نوآوری‌های تکنولوژی و شاخص پیچیدگی اقتصادی توانایی قابل‌توجهی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند و به بهبود کیفیت زیست‌محیطی کمک می‌کنند؛ اما افزایش رشد اقتصادی و تراکم جمعیت موجب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. همچنین پیشنهادهای سیاستی پژوهش حاضر را نیز می‌توان این‌گونه ابراز داشت: (۱) توسعه تکنولوژی‌های کم کربن (سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه تکنولوژی‌های جدید و کارآمد در صنایع مختلف برای کاهش انتشار کربن)، (۲) ایجاد مشوق‌هایی مانند تسهیلات اعتباری برای شرکت‌هایی که در زمینه توسعه محصولات سازگار با محیط‌زیست فعالیت می‌کنند)، (۳) توسعه صنایع کم کربن (تمرکز بر توسعه صنایع با فناوری بالا و کم کربن برای کاهش شدت انتشار کربن)، (۴) ترویج شهرسازی پایدار، (۵) اجرای استانداردهای زیست‌محیطی برای صنایع مختلف، و (۶) اقتصادهای مختلف باید اقداماتی را برای تسریع وضعیت پیچیدگی اقتصادی در داخل کشور تشویق کنند. در این راستا، می‌توان سهامداران خصوصی را برای ارتقاء پیچیدگی اقتصادی در داخل کشور تشویق کرد. در سوی دیگر؛ استفاده از فناوری مدرن باید برای دستیابی به اهداف شکوفایی اقتصادی و پایداری محیطی ترویج شود. علاوه بر این، می‌توان از بخش مالی برای کاهش مسائل روزافزون زیست‌محیطی در داخل کشور دعوت کرد. دولت باید چنین سیاست‌هایی را طراحی کند که همکاری بین بخش مالی و بخش خصوصی یک اقتصاد را برای کاوش در پروژه‌های مختلف مرتبط با پایداری زیست‌محیطی افزایش دهد. همچنین رشد و توسعه اقتصادی باید با مفروضات محیط سبز همسو شود.

از سویی دیگر؛ رشد و توسعه اقتصادی مستلزم انباشت دانش مولد و استفاده از آن در صنایع پیچیده است. رتبه‌بندی کشوری آزمایشگاه رشد هاروارد، وضعیت فعلی دانش تولیدی یک کشور را از طریق شاخص پیچیدگی اقتصادی (ECI) ارزیابی می‌کند. کشورها با افزایش تعداد و پیچیدگی محصولاتی که با موفقیت صادر می‌کنند، ECI خود را بهبود می‌بخشند. به عبارت دیگر؛ شاخص پیچیدگی اقتصادی، رتبه‌بندی کشورها براساس تنوع و پیچیدگی سبد صادراتی آن‌هاست. کشورهای با پیچیدگی بالا دارای طیف وسیعی از قابلیت‌های پیچیده و تخصصی هستند و بنابراین قادر به تولید مجموعه‌ای بسیار متنوع از محصولات پیچیده هستند. تعیین پیچیدگی

اقتصادی یک کشور تنها به دانش تولیدی یک کشور بستگی ندارد. اطلاعات در مورد تعداد توانایی‌های کشور نه تنها در تعداد مطلق محصولاتی که تولید می‌کند، بلکه در فراگیر بودن آن محصولات (تعداد کشورهایی که محصول را صادر می‌کنند) و در پیچیدگی و تنوع محصولات دیگر موجود است. پیچیدگی اقتصادی بیانگر تنوع و پیچیدگی قابلیت‌های تولیدی نهفته در صادرات هر کشور است. نشان داده شده است که شاخص پیچیدگی اقتصادی (ECI) تفاوت درآمد بین کشورها را توضیح می‌دهد و رشد آینده را بهتر از هر معیار دیگری پیش‌بینی می‌کند.[1] در این میان، ایران کشوری با درآمد متوسط پایین است و از میان ۱۴۶ اقتصاد مورد مطالعه در رتبه ۹۴ ثروتمندترین اقتصاد سرانه قرار دارد. ایران در رتبه‌بندی شاخص پیچیدگی اقتصادی (ECI) هفتاد و دومین کشور پیچیده است. در مقایسه با یک دهه قبل، اقتصاد ایران پیچیده‌تر شده و ۴۵ رتبه در رتبه‌بندی ECI بهبود یافته است. پیشرفت پیچیدگی ایران به دلیل تنوع بخشیدن به صادرات آن بوده است. ایران در حرکت رو به جلو در موقعیتی قرار دارد که از تعداد متوسطی از فرصت‌ها برای تنوع بخشیدن به تولید خود با استفاده از دانش موجود خود استفاده کند. ایران از نظر سطح درآمد به همان اندازه که انتظار می‌رود پیچیده است. پیش‌بینی می‌شود اقتصاد به کُندی رشد کند. پیش‌بینی‌های رشد ۲۰۳۱ آزمایشگاه رشد، رشد سالانه ۲.۹ درصدی ایران در دهه آینده را پیش‌بینی می‌کند که در نیمه پایینی کشورهای جهان قرار دارد.[2]

بدین ترتیب، لزوم توجه به بهبود نوآوری تکنولوژی به‌ویژه تکنولوژی‌های سبز و شاخص پیچیدگی اقتصادی در کشور ایران برای بهبود کیفیت محیط‌زیست از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. باتوجه‌به این مهم که ایران به لحاظ تکنولوژی تولید نسبتاً در وضعیت ضعیفی قرار دارد، اما از آن‌جایی‌که بهبود سطح نوآوری تکنولوژی اثر بازدارنده قابل توجهی بر سرانه انتشار کربن دارد و نوآوری‌های تکنولوژیکی می‌توانند انتشار CO_2 را مهار کنند و از آن‌جا که نوآوری تکنولوژیکی می‌تواند استفاده کارآمد از زغال سنگ و سایر انرژی‌های فسیلی را تحقق بخشد، و این پتانسیل را دارد که رشد منابع جدید انرژی را تقویت کند و میزان انرژی جدید را در مصرف انرژی افزایش دهد، بنابراین در کشور ایران هم باید به این مهم برای مقابله با تغییرات آب‌وهوایی توجه بیش‌تر شود. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌گردد تا سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان اجتماعی توجه خاصی به این دو

[1]. https://atlas.hks.harvard.edu/
[2]. https://atlas.hks.harvard.edu/

فاکتور کلیدی و نیز عوامل مهم دیگری نظیر رشد اقتصادی و تراکم جمعیت داشته باشند. بی‌شک شناسایی عوامل مؤثر بر انتشار کربن در ایران از اهمیت بالایی برخوردار بوده و براین‌اساس پیشنهاد می‌گردد تا در قالب پژوهش‌های آتی محققین به بررسی دیگر عوامل نظیر عوامل نهادی و نیز تجزیه‌وتحلیل‌هایی برای استان‌های ایران بپردازند.

فهرست منابع:

Adebayo, T. S., Ullah, S., Kartal, M. T., Ali, K., Pata, U. K., & Ağa, M. (2023). Endorsing sustainable development in BRICS: The role of technological innovation, renewable energy consumption, and natural resources in limiting carbon emission. Science of the Total Environment, 859, 160181.

Albeaik, S., Kaltenberg, M., Alsaleh, M., Hidalgo, C.A. (2017). Improving the economic complexity index. arXiv preprint arXiv:170705826.

An, Y., Zhou, D., Yu, J., Shi, X., and Wang, Q. (2021). Carbon emission reduction characteristics for China's manufacturing firms: Implications for formulating carbon policies. J. Environ. Manage. 284:112055.

Aslam, B., Hu, J., Shahab, S., Ahmad, A., Saleem, M., Shah, S. S. A., Javed, M. S., Aslam, M. K., Hussain, S., & Hassan, M. (2021). The nexus of industrialization, GDP per capita and CO2 emission in China. Environmental Technology & Innovation, 23, 101674.

B Doğan, B., Driha, O. M., Balsalobre Lorente, D., & Shahzad, U. (2021). The mitigating effects of economic complexity and renewable energy on carbon emissions in developed countries. Sustainable Development, 29(1), 1-12.

Bai, C., Feng, C., Yan, H., Yi, X., Chen, Z., & Wei, W. (2020). Will income inequality influence the abatement effect of renewable energy technological innovation on carbon dioxide emissions?. Journal of environmental management, 264, 110482.

Can, M., & Gozgor, G. (2017). The impact of economic complexity on carbon emissions: evidence from France. Environmental Science and Pollution Research, 24, 16364-16370.

Chen, Y., & Lee, C.-C. (2020). Does technological innovation reduce CO2 emissions? Cross-country evidence. Journal of Cleaner Production, 263, 121550.

Cheng, C., Ren, X., & Wang, Z. (2019). The impact of renewable energy and innovation on carbon emission: An empirical analysis for OECD countries. Energy Procedia, 158, 3506-3512.

Chu, L. K. (2021). Economic structure and environmental Kuznets curve hypothesis: new evidence from economic complexity. Applied Economics Letters, 28(7), 612-616.

Churchill, S. A., Inekwe, J., Smyth, R., & Zhang, X. (2019). R&D intensity and carbon emissions in the G7: 1870–2014. Energy Economics, 80, 30-37.

Costantini, V., Crespi, F., Marin, G., & Paglialunga, E. (2017). Eco-innovation, sustainable supply chains and environmental performance in European industries. Journal of cleaner production, 155, 141-154.

Doğan B, Saboori B, Can M (2019). Does economic complexity matter for environmental degradation? An empirical analysis for different stages of development. Environ Sci Pollut Res, 26(31), 31900–31912.

Du, Y., Arkesteijn, M. H., den Heijer, A. C., & Song, K. (2020). Sustainable assessment tools for higher education institutions: Guidelines for developing a tool for China. Sustainability, 12(16), 6501.

Fei, Q., Rasiah, R., & Shen, L. J. (2014). The clean energy-growth nexus with CO2 emissions and technological innovation in Norway and New Zealand. Energy & environment, 25(8), 1323-1344.

Fernández, Y. F., López, M. F., & Blanco, B. O. (2018). Innovation for sustainability: the impact of R&D spending on CO2 emissions. Journal of cleaner production, 172, 3459-3467.

Fisher-Vanden, K., & Wing, I. S. (2008). Accounting for quality: Issues with modeling the impact of R&D on economic growth and carbon emissions in developing economies. Energy economics, 30(6), 2771-2784.

Freire (2017). Diversification and Structural Economic Dynamics. UNU-Merit/MGSoG dissertation series, No. 191. Boekenplan. Maastricht.

Ghazali, S., Shabani, Z. D., & Azadi, H. (2023). Social, economic, and technical factors affecting CO2 emissions in Iran. Environmental Science and Pollution Research, 30(27), 70397-70420.

Hausmann, R., Hidalgo, C., Bustos, S., Coscia, M., Simoes, A., & Yildirim, M. A. (2011). The atlas of economic complexity: Mapping paths to prosperity. Cambridge: Center for International Development, Harvard University.

Hidalgo, C. A., & Hausmann, R. (2009). The building blocks of economic complexity. Proceedings of the national academy of sciences, 106(26), 10570-10575.

https://iea.blob.core.windows.net/assets/3c8fa115-35c4-4474-b237 1b00424c8844/CO2Emissionsin2022.pdf.

Huo, C., Hameed, J., Sharif, A., Albasher, G., Alamri, O., & Alsultan, N. (2022). Recent scenario and nexus of globalization to CO2 emissions: evidence from wavelet and Quantile on Quantile Regression approach. Environmental Research, 212, 113067.

Ikram, M., Xia, W., Fareed, Z., Shahzad, U., & Rafique, M. Z. (2021). Exploring the nexus between economic complexity, economic growth and ecological footprint: contextual evidences from Japan. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 47, 101460.

J Yu, J., Tang, Y. M., Chau, K. Y., Nazar, R., Ali, S., & Iqbal, W. (2022). Role of solar-based renewable energy in mitigating CO2 emissions: evidence from quantile-on-quantile estimation. Renewable Energy, 182, 216-226.

Jamil, B., Yaping, S., Ud Din, N., Nazneen, S., & Mushtaq, A. (2021). Do governance indicators interact with technological innovation and income inequality in mitigating CO2 emissions in Belt and Road Initiative countries?. Environmental Science and Pollution Research, 28(37), 51278-51296.

Khezri, M., Heshmati, A., & Khodaei, M. (2022). Environmental implications of economic complexity and its role in determining how renewable energies affect CO2 emissions. Applied Energy, 306, 117948.

Lalkhezri, H. and Ashena, M. (2022). The Relationship between Economic Complexity and Carbon Dioxide Emissions in Iran Using NARDL Model. Journal of Applied Economics Studies in Iran, 11(42), 251-277. (In Persian)

Lapatinas, A., Garas, A., Boleti, E., Kyriakou, A. (2019). Economic Complexity and Environmental Performance: Evidence from a World Sample. MPRA Paper, University Library of Munich, Germany, 92833.

Lee, C.C. & Wang, E.Z. (2021). Economic complexity and income inequality: Does country risk matter? Social Indicators Research 154 (1), 35–60.

Li, R., Li, L., & Wang, Q. (2022). The impact of energy efficiency on carbon emissions: evidence from the transportation sector in Chinese 30 provinces. Sustainable Cities and Society, 82, 103880.

Liu, X. M., & Zhang, Y. Q. (2024). RETRACTED ARTICLE: Digital transformation, green innovation, and carbon emission reduction performance of energy-intensive enterprises. Scientific Reports, 14(1), 3905.

Liu, X., Ji, Q. & Yu, J. (2021). Sustainable development goals and firm carbon emissions: Evidence from a quasi-natural experiment in China. Energy Econ. 103, 105627.

Lyu Y, Zhang L and Wang D (2023). Does digital economy development reduce carbon emission intensity? Front. Ecol. Evol. 11:1176388.

Mahmood, H. (2020). CO2 emissions, financial development, trade, and income in North America: a spatial panel data approach. Sage Open, 10(4), 2158244020968085.

Mahmood, H., Furqan, M., Hassan, M. S., & Rej, S. (2023). The environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis in China: A review. Sustainability, 15(7), 6110.

Mahmood, H., Hassan, M. S., Rej, S. & Furqan, M. (2023). The environmental Kuznets curve and renewable energy consumption: a review. International Journal of Energy Economics and Policy, 13(3), 279-291.

Mealy, P. & Teytelboym, A. (2022). Economic complexity and the green economy. Research Policy, 51(8), 103948.

Meng, Z., Li, W. B., Chen, C. & Guan, C. (2023). Carbon emission reduction effects of the digital economy: mechanisms and evidence from 282 cities in China. Land, 12(4), 773.

Minh, T. B., Ngoc, T. N., & Van, H. B. (2023). Relationship between carbon emissions, economic growth, renewable energy consumption, foreign direct investment, and urban population in Vietnam. Heliyon, 9(6).

Moridian, A., Yarmohammadian, N., Motalebi, M., & Shadmehr, A. (2021). The Role of Economic Complexity in the Ecological Footprint: A Review of the EKC Hypothesis for Iran. Planning and Budgeting, 26(2), 153-179. (In Persian)

Neagu, O. (2019). The link between economic complexity and carbon emissions in the European Union countries: a model based on the Environmental Kuznets Curve (EKC) approach. Sustainability, 11(17), 4753.

Neagu, O., & Teodoru, M. C. (2019). The relationship between economic complexity, energy consumption structure and greenhouse gas emission: Heterogeneous panel evidence from the EU countries. Sustainability, 11(2), 497.

O'Mahony, T., Zhou, P., & Sweeney, J. (2013). Integrated scenarios of energy-related CO2 emissions in Ireland: A multi-sectoral analysis to 2020. Ecological Economics, 93, 385-397.

Pata, U.K. (2020). Renewable and non-renewable energy consumption, economic complexity, CO2 emissions, and ecological footprint in the USA: Testing the EKC hypothesis with a structural break. Environ. Sci. Pollut. Res. 28, 846–861.

Petrović, P., & Lobanov, M. M. (2020). The impact of R&D expenditures on CO2 emissions: evidence from sixteen OECD countries. Journal of Cleaner Production, 248, 119187.

Romero, J. P., & Gramkow, C. (2021). Economic complexity and greenhouse gas emissions. World Development, 139, 105317.

Sadiq, M., Singh, J., Raza, M., & Mohamad, S. (2020). The impact of environmental, social and governance index on firm value: Evidence from Malaysia. International Journal of Energy Economics and Policy, 10(5), 555-562.

Safi, A., Wei, X., Sansaloni, E. M., & Umar, M. (2023). Breaking down the complexity of sustainable development: A focus on resources, economic complexity, and innovation. Resources Policy, 83, 103746.

Mohammadi, N, Sahabi B, Heydari H, & Sadeghi H. (2023). Investigating the Impact of Economic Complexity and Renewable Energy Consumption on Environmental Pollution in Developing Countries. QJER, 23(4), 1-24. (In Persian).

Sahabi, B., Heydari, H., & Sadeghi, H. (2023). Investigating the impact of economic complexity and renewable energy consumption on environmental pollution in developing countries. The Economic Research, 23(4), 1-24.

Shahbaz, M., Nasir, M. A., & Roubaud, D. (2018). Environmental degradation in France: the effects of FDI, financial development, and energy innovations. Energy Economics, 74, 843-857.

Shahzad, S.J.H., Kumar, R.R., Zakaria, M., & Hurr, M. (2017). Carbon emission, energy consumption, trade openness and financial development in Pakistan: a revisit. Renew. Sustain. Energy Rev. 70, 185–192.

Shi, A. (2001, August). Population growth and global carbon dioxide emissions. In IUSSP Conference in Brazil/session-s09 (pp. 1-36).

Sim, N., & Zhou, H. (2015). Oil prices, US stock return, and the dependence between their quantiles. Journal of Banking & Finance, 55, 1-8.

Tacchella, A., Cristelli, M., Caldarelli, G., Gabrielli, A., & Pietronero, L. (2013). Economic complexity: conceptual grounding of a new metrics for global competitiveness. Journal of Economic Dynamics and Control, 37(8), 1683-1691.

Wang, K., Su, X., & Wang, S. (2023). How does the energy-consuming rights trading policy affect China's carbon emission intensity? Energy, 276, 127579.

Wang, Q., Li, L., & Li, R. (2023). Uncovering the impact of income inequality and population aging on carbon emission efficiency: an empirical analysis of 139 countries. Science of The Total Environment, 857, 159508.

Wang, Q., Wang, L., & Li, R. (2022). Renewable energy and economic growth revisited: the dual roles of resource dependence and anticorruption regulation. Journal of Cleaner Production, 337, 130514.

Wang, Q., Wang, L., & Li, R. (2023). Trade protectionism jeopardizes carbon neutrality–decoupling and breakpoints roles of trade openness. Sustainable Production and Consumption, 35, 201-215.

Xu, S. C., He, Z. X., & Long, R. Y. (2014). Factors that influence carbon emissions due to energy consumption in China: Decomposition analysis using LMDI. Applied Energy, 127, 182-193.

You, W., Zhang, Y., & Lee, C.-C. (2022). The dynamic impact of economic growth and economic complexity on CO2 emissions: An advanced panel data estimation. Economic Analysis and Policy, 73, 112-128.

Yu, J., Tang, Y. M., Chau, K. Y., Nazar, R., Ali, S., & Iqbal, W. (2022). Role of solar-based renewable energy in mitigating CO2 emissions: evidence from quantile-on-quantile estimation. Renewable Energy, 182, 216-226.

Yu, Y., & Xu, W. (2019). Impact of FDI and R&D on China's industrial CO2 emissions reduction and trend prediction. Atmospheric Pollution Research, 10(5), 1627-1635.

Zabihi, S. M. G. , Akbari, F. and Salehnia, N. (2023). Investigating the Role of Economic, Financial, and Political Risks on Carbon Emissions in Iran: Quantile-on-Quantile Regression (QQR) Approach. Iranian Journal of Economic Research, 28(96), 7-52. (In Persian)

Zhai, S., & Song, G. (2013, June). Exploring carbon emissions, economic growth, energy and R&D investment in China by ARDL approach. In 2013 21st International Conference on Geoinformatics (pp. 1-6). IEEE.

Zhao, Z., Zhao, Y., Shi, X., Zheng, L., Fan, S., & Zuo, S. (2024). Green innovation and carbon emission performance: The role of digital economy. Energy Policy, 195, 114344.

Zhen, N., & Freire, C. (2023, March). The inter-links between the economic complexity and carbon footprint. In UNCTAD Background Paper, United Nations Conference on Trade and Development, Geneva.