

Comparative Analysis of the Environmental Kuznets Curve (EKC) and Renewable Energy Kuznets Curve (RKC) Hypotheses in Iran

Fereshteh Mohamadian¹, Hussein Raheem Hussein², Mundher Azeez Abdulridha³, Muntadher Riyadh Shaeewit⁴

1. Assistant Professor, Department of Economics, Faculty of Literature and Humanities, University of Ilam, Ilam, Iran. (Corresponding Author) F.Mohamadian@ilam.ac.ir,  <https://orcid.org/0000-0002-9680-530X>

2. Master's student in Economics, Faculty of Literature and Humanities, Ilam University, Ilam, Iran.  husein.raheem2020@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-3072-4215>

3. Master's student in Economics, Faculty of Literature and Humanities, Ilam University, Ilam, Iran. mundherkut@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0004-2524-6741>

4. Master's student in Economics, Faculty of Literature and Humanities, Ilam University, Ilam, Iran. nadhrikut@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0005-3580-6375>

Abstract:

In today's world, considering environmental challenges and the need to transition toward clean and renewable energy sources, analyzing the relationship between economic development and environmental pollution is of particular importance. This study conducts a comparative analysis of the Environmental Kuznets Curve (EKC) and the Renewable Energy Kuznets Curve (RKC) hypotheses in Iran using two separate models, based on data from 1965 to 2023 and the Dynamic Ordinary Least Squares (DOLS) method. The results show that per capita income and fossil fuel consumption have a significant positive impact on carbon dioxide emissions, and as per capita income increases, pollution levels gradually begin to decline. Furthermore, in the RKC model, it was observed that renewable energy consumption decreases in the early stages of economic growth but significantly increases in the later stages as income rises. Therefore, both the inverted U-shaped EKC and the U-shaped RKC hypotheses are confirmed for Iran. The EKC threshold in Iran is \$707, while the RKC threshold is \$3,719. This indicates that the EKC hypothesis materializes earlier than the RKC hypothesis, meaning that positive changes in pollution reduction and the use of cleaner energy sources begin in the early stages of Iran's economic growth. Based on these findings, it is recommended to focus on the development of clean technologies and improving per capita income in the early stages of economic growth to accelerate the reduction of pollution and the adoption of renewable energy sources.

Keywords: Environmental Kuznets Curve, Renewable Energy Kuznets Curve, Per Capita Income, Iran.

JEL Classification: Q43, Q56, O13, Q58

Extended abstract

1. Introduction

Economic growth has always been accompanied by environmental and energy challenges. In developing countries such as Iran, heavy reliance on fossil energy resources has led to a situation where increases in per capita GDP are associated with higher consumption of these resources and, consequently, increased pollutant emissions. This trend has undesirable consequences, including intensified climate change, increased air pollution, degradation of natural resources, and reduced quality of life. On the other hand, sustainable development requires attention to the use of clean and renewable energy sources—resources that can meet energy needs while playing a significant role in reducing environmental degradation.

¹ Corresponding Author: Fereshteh Mohamadian

Postal address: Department of Economics, Faculty of Literature and Humanities, University of Ilam, Ilam, Iran.

Email: F.Mohamadian@ilam.ac.ir

Phone Number: 09188419840

In the economic literature, various models and hypotheses have been proposed to explain the relationship between economic growth, pollution, and energy consumption. One of the most widely used models is the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis, which emphasizes the existence of a nonlinear, inverted-U relationship between per capita income and environmental pollution. According to this hypothesis, in the early stages of economic growth, environmental degradation increases, but after surpassing a certain income level, countries acquire the financial and technological capacity to improve environmental quality and reduce pollution. Alongside this model, the Renewable Energy Kuznets Curve (RKC) hypothesis has also emerged in recent years, explaining a U-shaped relationship between renewable energy consumption and economic growth. According to this hypothesis, in the early stages of development, the use of fossil fuels increases due to their lower cost and easier availability, reducing the share of renewable energy. However, in more advanced stages of economic growth, investments in modern technologies and environmental concerns lead to increased consumption of renewable energy.

Despite numerous studies on the EKC and RKC hypotheses in various countries, the simultaneous examination of these two curves in Iran—particularly using long-term data—has received less attention. This is while Iran, due to its significant reliance on fossil resources, low share of renewable energy in the energy mix, growing urbanization trends, and high vulnerability to climate change, represents an important case for empirically testing these hypotheses.

2. Method

In this study, to test the Environmental Kuznets Curve (EKC) and Renewable Energy Kuznets Curve (RKC) hypotheses in Iran, time series data from 1965 to 2023 were used. The main variables include carbon dioxide emissions as an indicator of environmental degradation, fossil and renewable energy consumption, per capita income, and the level of urbanization, which were collected from reliable international sources such as the World Bank and British Petroleum reports.

To avoid spurious regression, unit root tests were first conducted, followed by the use of the ARDL bounds testing approach to examine the existence of long-term relationships among the variables. Subsequently, model estimation was performed using the Dynamic Ordinary Least Squares (DOLS) method to analyze the effects of per capita income (and its square) and other explanatory variables on pollutant emissions and renewable energy consumption. The research design was implemented through two separate models: in the EKC model, CO₂ emissions were considered the dependent variable, and the effects of per capita income, fossil energy consumption, and renewable energy consumption were tested. In the RKC model, renewable energy consumption was considered the dependent variable, and the roles of per capita income and urbanization in explaining it were examined.

3. Results and Discussion

The results from the model estimations indicate that in Iran, there exists a significant nonlinear relationship among economic growth, energy consumption, and environmental quality. In the EKC model, per capita income and fossil energy consumption have a positive and significant effect on carbon dioxide emissions; in other words, in the early stages of economic growth, rising income intensifies pollution. However, the negative coefficient of the squared income term confirms the inverted-U relationship, indicating that after surpassing an income threshold of approximately \$707, the trend of pollutant emissions begins to decline. Furthermore, renewable energy consumption has a significant negative effect on CO₂ emissions, highlighting the positive role of these sources in improving environmental conditions.

In the RKC model, the results show that in the initial stages of economic growth, renewable energy consumption decreases; however, as income rises and surpasses an income level of approximately \$3,719, a significant upward trend in renewable energy consumption is observed. This confirms the existence of a U-shaped relationship between per capita income and renewable energy consumption in Iran. In addition, the level of urbanization has a positive and significant effect on renewable energy consumption, indicating that population concentration in urban areas can act as a driver for increased use of cleaner energy sources.

4. Conclusion

The results of the study indicate that both the Environmental Kuznets Curve (EKC) and the Renewable Energy Kuznets Curve (RKC) hypotheses are valid in Iran. In other words, in the early stages of economic growth, increases

in per capita income and fossil energy consumption lead to higher pollution, but after surpassing an income threshold of \$707, a declining trend in carbon dioxide emissions begins. Similarly, renewable energy consumption decreases at the initial stages of development but shows a significant upward trend upon reaching an income level of \$3,719. These findings suggest that pollution reduction occurs earlier than the increase in clean energy consumption in Iran's economy, providing policymakers with an opportunity to steer development toward a sustainable path.

Accordingly, it is recommended to increase investment in renewable energy and clean technologies and to design and implement supportive policies such as subsidies, financial incentives, and promotion of green innovations. In addition, strengthening sustainable urban infrastructure, raising public awareness and fostering a culture of clean energy consumption, as well as reducing reliance on fossil resources through economic diversification, are key strategies for accelerating the transition to a low-carbon economy and achieving sustainable development in Iran.

Funding: There is no funding support.

Conflict of interest: Authors declared no conflict of interest

Authors' contributions: Authors contributed to the conceptualization and writing of the article. All the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the journal officials and referees.

(In Press) نشر مقاله

تحلیل مقایسه‌ای فرضیه‌های منحنی کوزنتس زیست‌محیطی (EKC) و منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر (RKC) در ایران

منظر ریاض شیبوط^۴

منذر عزیز عبدالرضا^۲

حسین رحیم حسین^۲

فرشته محمدیان^{۱*}

۱. استادیار گروه اقتصاد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران (نویسنده مسئول)، ایمیل: F.Mohamadian@ilam.ac.ir، شناسه ارکید: <https://orcid.org/0000-0002-9680-530X>

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران، ایمیل: hussain.raheem2020@gmail.com، شناسه ارکید: <https://orcid.org/0009-0005-3072-4215>

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران، ایمیل: mundherkut@gmail.com، شناسه ارکید: <https://orcid.org/0009-0004-2524-6741>

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران، ایمیل: nadhrikut@gmail.com، شناسه ارکید: <https://orcid.org/0009-0005-3580-6375>

چکیده:

در دنیای امروز، با توجه به چالش‌های محیط‌زیستی و نیاز به گذار به سمت منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر، تحلیل ارتباط بین توسعه اقتصادی و آلودگی زیست‌محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق در دو مدل جداگانه با استفاده از داده‌های دوره ۱۹۶۵ تا ۲۰۲۳ و روش حداقل مربعات پویا (DOLS) به تحلیل مقایسه‌ای فرضیه‌های منحنی کوزنتس زیست‌محیطی (EKC) و منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر (RKC) در ایران پرداخته شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که درآمد سرانه و مصرف انرژی‌های فسیلی تأثیر مثبت بر انتشار دی‌اکسید کربن دارند و با افزایش درآمد سرانه، به تدریج روند کاهش آلودگی‌ها آغاز می‌شود. همچنین، در مدل RKC مشاهده شد که مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در مراحل اولیه رشد اقتصادی کاهش می‌یابد، اما با افزایش درآمد سرانه در مراحل بعدی، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر به طور معناداری افزایش می‌یابد. بنابراین، هر دو فرضیه منحنی کوزنتس زیست‌محیطی (رابطه U معکوس) و منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر (رابطه U شکل) برای ایران تأیید می‌شوند. آستانه مدل EKC در ایران برابر با ۷۰۷ دلار و آستانه مدل RKC برابر با ۳۷۱۹ دلار است. این نشان می‌دهد که فرضیه منحنی کوزنتس زیست‌محیطی زودتر از منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر به وقوع می‌پیوندد، به این معنا که تغییرات مثبت در کاهش آلودگی‌ها و استفاده از منابع انرژی پاک‌تر در مراحل اولیه رشد اقتصادی ایران شروع می‌شود. بر اساس این یافته‌ها، پیشنهاد می‌شود که با تمرکز بر توسعه فناوری‌های پاک و ارتقای درآمد سرانه در مراحل ابتدایی رشد اقتصادی، حرکت به سمت کاهش آلودگی‌ها و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر تسریع شود.

واژگان کلیدی: منحنی کوزنتس زیست‌محیطی، منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر، درآمد سرانه، ایران

طبقه‌بندی JEL: Q43, Q56, O13, Q58.

* نویسنده مسئول: فرشته محمدیان

در طول سال‌ها، پژوهشگران مدل‌ها و فرضیات مختلفی را برای بررسی ارتباط میان درآمد، انرژی و محیط‌زیست ارائه کرده‌اند. یکی از این مدل‌ها، فرضیه نردبان انرژی^۱ است که در چارچوب نظریه اقتصادی نئوکلاسیک مطرح شده و بیان می‌کند که با افزایش درآمد، خانوارها به‌منظور بهینه‌سازی مطلوبیت خود، از سوخت‌های پرتقاضتر استفاده می‌کنند (ون در کرون و همکاران^۲، ۲۰۱۳). همچنین، فرضیه پارادوکس سبز^۳ بیان می‌کند که افزایش مالیات بر انتشار CO₂ می‌تواند منجر به استخراج سریع‌تر منابع فسیلی و در نهایت تخریب محیط‌زیست شود (اشنایدر^۴، ۲۰۲۳؛ میدن و همکاران^۵، ۲۰۲۳). فرضیه اثر بازگشتی نیز بر تأثیرات سیاست‌های صرفه‌جویی انرژی و میزان صرفه‌جویی بالقوه آن تمرکز دارد و بیان می‌کند که افزایش بهره‌وری انرژی می‌تواند قیمت انرژی را کاهش داده و این کاهش قیمت به افزایش مصرف آن منجر شود (روزننتی و بوسنسی^۶، ۲۰۰۸). فرضیه «پناهگاه آلودگی»^۷ اشاره دارد به این که در برخی کشورها، سیاست‌ها و مقررات زیست‌محیطی ضعیف می‌تواند باعث انتقال فعالیت‌های آلاینده شرکت‌های چندملیتی به این کشورها و در نتیجه افت کیفیت محیط‌زیست شود (علی و وانگ^۸، ۲۰۲۴). در مقابل، فرضیه «هاله آلودگی» استدلال می‌کند که این شرکت‌ها از فناوری‌های دوستدار محیط‌زیست استفاده می‌کنند و انتقال این فناوری‌ها به کشورهای میزبان می‌تواند به بهبود کیفیت محیط‌زیست کمک کند (پاتا و همکاران^۹، ۲۰۲۵).

مدل تأثیرات تصادفی از طریق رگرسیون بر جمعیت، رفاه و فناوری^{۱۰} (STIRPAT) که به بررسی تأثیرات جمعیت، رفاه و فناوری بر تخریب محیط‌زیست می‌پردازد، نیز فرض می‌کند که جمعیت و پیشرفت فناوری می‌توانند موجب افزایش یا کاهش تخریب محیط‌زیست شوند، در حالی که تأثیر فرآیند رشد اقتصادی بر محیط‌زیست پیچیده و چندبعدی است (وانگ و همکاران^{۱۱}، ۲۰۲۴؛ لین و ژئو^{۱۲}، ۲۰۱۷). از سوی دیگر، فرضیه منحنی کوزنتس زیست‌محیطی^{۱۳} (EKC) یکی از شناخته‌شده‌ترین مدل‌هاست که رابطه‌ای U وارونه میان درآمد سرانه و تخریب محیط‌زیست را توضیح می‌دهد. این فرضیه بر این اساس است که با رشد اقتصادی ابتدا کیفیت محیط‌زیست کاهش می‌یابد و پس از رسیدن به یک نقطه عطف درآمدی، بهبود می‌یابد (سارکودی و استرزوف^{۱۴}، ۲۰۱۹). به‌علاوه، در برخی پژوهش‌ها، فرضیه منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر^{۱۵} (RKC) مطرح شده است که رابطه‌ای U شکل میان مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و درآمد سرانه را توضیح می‌دهد. در این مدل، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در مراحل اولیه رشد اقتصادی کاهش می‌یابد، اما با افزایش درآمد در مراحل بعدی، این مصرف به‌طور معناداری افزایش می‌یابد (یاو و

¹ ladder hypothesis

² Van der Kroon et al.

³ Green Paradox Hypothesis

⁴ Schneider

⁵ Meijden et al.

⁶ Ruzzenenti & Basosi

⁷ Pollution haven

⁸ Ali & Wang

⁹ Pata et al.

¹⁰ The Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology

¹¹ Wang et al.

¹² Lin & Xu

¹³ Environmental Kuznets Curve

¹⁴ Sarkodie & Strezov

¹⁵ Renewable Energy Kuznets Curve

همکاران^۱، ۲۰۱۹). این فرضیه‌ها، به‌ویژه فرضیه منحنی کوزنتس زیست‌محیطی، از جمله مهم‌ترین مدل‌ها در ادبیات اقتصاد محیط‌زیست هستند که به‌ویژه در مطالعات مربوط به کشورهای در حال توسعه اهمیت دارند. همچنین، پژوهش‌ها و مطالعات متعددی نشان داده‌اند که رابطه میان تولید ناخالص داخلی و شاخص‌های مختلف مانند انرژی‌های تجدیدپذیر و ظرفیت تحمل محیط‌زیست به‌صورت U شکل است (دوگان و پاتا^۲، ۲۰۲۲). با وجود این، تحلیل فرضیه منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر (RKC) همچنان یک موضوع پژوهشی جدید است و مطالعات محدودی در این زمینه وجود دارد. در حالی که در برخی کشورها این فرضیه بررسی شده، هنوز هیچ مطالعه‌ای فرضیه RKC را برای ایران بررسی نکرده است. با توجه به اهمیت این موضوع، این تحقیق به تحلیل فرضیه‌های EKC و RKC در ایران پرداخته و مدل‌های مختلف را در دوره زمانی ۱۹۶۵ تا ۲۰۲۳ با استفاده از روش حداقل مربعات پویا مورد بررسی قرار می‌دهد. در ادامه ساختار مقاله به صورت زیر است که، بخش بعدی به مبانی نظری اختصاص دارد. بخش سوم به پیشینه پژوهش و بخش چهارم به معرفی روش‌شناسی تحقیق، از جمله روش و مدل مورد استفاده، می‌پردازد. در بخش پنجم، نتایج حاصل از برآورد مدل بررسی و تحلیل می‌شود. سرانجام، بخش ششم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها اختصاص دارد.

۲. مبانی نظری

تحلیل رابطه میان رشد اقتصادی، مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن (CO_2) در دهه‌های اخیر به یکی از موضوعات اصلی در ادبیات اقتصاد محیط‌زیست تبدیل شده است. در این زمینه، فرضیه‌های منحنی کوزنتس زیست‌محیطی (EKC) و منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر (RKC) چارچوب نظری مهمی برای بررسی پویایی این روابط فراهم می‌کنند. فرضیه EKC نخستین‌بار توسط گروسمن و کروگر^۳ (۱۹۹۱) مطرح و سپس توسط پانایوتو^۴ (۲۰۰۳) توسعه یافت. این فرضیه که از منحنی نابرابری کوزنتس الهام الهام گرفته است، بیان می‌کند که رابطه‌ای U-شکل معکوس بین رشد اقتصادی و تخریب محیط‌زیست وجود دارد. بر اساس این دیدگاه، در مراحل اولیه توسعه اقتصادی، فرایند صنعتی‌شدن، شهرنشینی و استفاده گسترده از انرژی‌های فسیلی موجب افزایش انتشار آلاینده‌هایی نظیر CO_2 می‌شود؛ اما با افزایش سطح درآمد و پیشرفت فناوری، کشورها به سمت ساختارهای تولیدی کارا تر، فناوری‌های پاک و سیاست‌های محیط‌زیستی سخت‌گیرانه‌تر حرکت می‌کنند که در نتیجه آن، میزان آلودگی کاهش می‌یابد. این فرضیه از منظر نظری با چند چارچوب دیگر پیوند دارد. نخست، نظریه انتقال ساختاری^۵ که بیان می‌کند با رشد اقتصادی، ساختار تولید از بخش‌های آلاینده صنعتی به بخش‌های کم‌مصرف خدماتی تغییر می‌کند و شدت انتشار آلاینده‌ها کاهش می‌یابد (استرن^۶، ۲۰۰۴). دوم، نظریه رشد درون‌زا^۷ که بر نقش سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه و فناوری‌های پاک تأکید دارد (رومر^۸، ۱۹۹۰؛ لوکاس^۹، ۱۹۹۸). این نظریه نشان می‌دهد که نوآوری‌های فناورانه می‌توانند در بلندمدت اثرات منفی رشد اقتصادی بر

¹ Yao et al.

² Dogan & Pata

³ Grossman & Krueger

⁴ Panayotou

⁵ Structural Change Theory

⁶ Stern

⁷ Endogenous Growth Theory

⁸ Romer

⁹ Lucas Jr

محیط‌زیست را جبران کنند. سوم، نظریه پورتر^۱ که توسط مایکل پورتر^۲ (۱۹۹۱) ارائه شد و بیان می‌کند که مقررات محیط‌زیستی محیط‌زیستی می‌توانند به جای افزایش هزینه‌ها، موجب نوآوری و ارتقای کارایی شوند. این دیدگاه با بخش نزولی منحنی EKC هم‌راستا است؛ زیرا در مراحل پیشرفته‌تر توسعه، سیاست‌های محیط‌زیستی سخت‌گیرانه‌تر می‌توانند رشد سبز را تسهیل کنند (آمبک و همکاران^۳، ۲۰۱۳). افزون بر این، نظریه گذار انرژی^۴ نیز توضیح می‌دهد که کشورها در مسیر توسعه از انرژی‌های پرکربن پرکربن به انرژی‌های کم‌کربن و تجدیدپذیر حرکت می‌کنند (اسمیل^۵، ۲۰۱۰) و این فرایند اساس شکل‌گیری منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر را تشکیل می‌دهد.

فرضیه RKC در واقع بسط منطقی EKC است و بر نقش مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در بهبود کیفیت محیط‌زیست تأکید دارد. در مراحل اولیه رشد اقتصادی، به دلیل محدودیت‌های فناوری و هزینه‌های بالا، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر ناچیز است و تمرکز عمدتاً بر استفاده از منابع فسیلی قرار دارد. اما با افزایش سطح درآمد، گسترش فناوری‌های نوین و اتخاذ سیاست‌های حمایتی، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی افزایش می‌یابد. در این حالت، رابطه میان درآمد سرانه و مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر به شکل U دیده می‌شود؛ به این معنا که در ابتدا با رشد اقتصادی، استفاده از منابع فسیلی افزایش می‌یابد، اما پس از عبور از نقطه عطف مشخص، مصرف انرژی‌های پاک بیشتر می‌شود. این روند توسط مطالعات متعددی همچون آلحارثی و همکاران^۶ (۲۰۲۱)، ماتا و همکاران^۷ (۲۰۲۴) و بالسالوبر-لورنته و همکاران^۸ (۲۰۲۱) مورد تأیید قرار گرفته است.

سازوکارهای اثرگذاری متغیرهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی نیز در این چارچوب قابل توضیح است. در مراحل ابتدایی توسعه، افزایش درآمد سرانه با صنعتی‌شدن، رشد شهرنشینی و مصرف بیشتر سوخت‌های فسیلی همراه است و منجر به افزایش انتشار CO₂ می‌شود؛ اما در مراحل پیشرفته‌تر، افزایش درآمد با توسعه فناوری‌های پاک، اصلاح ساختار تولید و افزایش آگاهی عمومی نسبت به محیط‌زیست، تأثیر معکوس بر آلودگی دارد (پانایوتو، ۲۰۰۳؛ موراتوغللو و همکاران^۹، ۲۰۲۴). مصرف انرژی‌های فسیلی از اصلی‌ترین عوامل افزایش انتشار CO₂ است (آلحارثی و همکاران، ۲۰۲۱). در حالی که مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور مستقیم باعث کاهش انتشار و بهبود کیفیت محیط‌زیست می‌شود (دونگ و همکاران^{۱۰}، ۲۰۲۰؛ ماتا و همکاران، ۲۰۲۴). تأثیر شهرنشینی در این رابطه دوگانه است؛ از یک سو افزایش جمعیت شهری تقاضا برای انرژی و آلودگی را افزایش می‌دهد، اما از سوی دیگر، تمرکز جمعیت و توسعه زیرساخت‌های شهری کارآمد می‌تواند بهره‌وری انرژی را افزایش داده و در بلندمدت به کاهش انتشار منجر شود (ژانگ^{۱۱}، ۲۰۲۱؛ بک و جوشی^{۱۲}، ۲۰۱۵؛ بالسالوبر لورنته و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات تجربی انجام‌شده در کشورهای مختلف شواهد متفاوتی درباره شکل دقیق منحنی EKC و RKC ارائه کرده‌اند. در کشورهای منطقه خاورمیانه و شمال

¹ Porter Hypothesis

² Michael Porter

³ Ambec et al.

⁴ Energy Transition Theory

⁵ Smil

⁶ Alharthi et al.

⁷ Mata et al.

⁸ Balsalobre-Lorente, et al.

⁹ Muratoğlu et al.

¹⁰ Dong et al.

¹¹ Zhang

¹² Beck & Joshi

آفریقا (آلحارثی و همکاران، ۲۰۲۱)؛ کشورهای جنوب آسیا (آفریدی و همکاران^۱، ۲۰۱۹) و اقتصادهای پیشرفته (ماتا و همکاران، ۲۰۲۴) وجود رابطه U معکوس بین رشد اقتصادی و انتشار CO₂ تأیید شده است. با این حال، در چین (ژانگ، ۲۰۲۱) و برخی کشورهای عضو سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (بک و جوشی، ۲۰۱۵) رابطه N-شکل مشاهده شد که نشان‌دهنده بازگشت مجدد آلودگی در مراحل بسیار پیشرفته رشد است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که شکل دقیق این منحنی‌ها وابسته به ساختار اقتصادی، سطح توسعه، سیاست‌های انرژی و نهادهای محیط‌زیستی هر کشور است و رابطه بین رشد اقتصادی، مصرف انرژی و کیفیت محیط‌زیست ماهیتی چندوجهی و پویا دارد و می‌توان آن را به «شمشیری دو لبه» تشبیه کرد. رشد اقتصادی در مراحل اولیه به دلیل افزایش تولید و مصرف انرژی، منجر به افزایش آلودگی می‌شود، اما در مراحل پیشرفته‌تر، همین رشد می‌تواند منابع مالی، ظرفیت فناوری و نهادهای لازم برای کاهش آلودگی و دستیابی به رشد پایدار را فراهم آورد (پانایوتو، ۲۰۰۳). همچنین هرچند انرژی‌های تجدیدپذیر عامل مؤثری در کاهش انتشار هستند، اما در صورت نبود سیاست‌های حمایتی و تشویقی مؤثر، رشد سریع اقتصادی می‌تواند اثر مثبت آن‌ها را خنثی کند (دونگ و همکاران، ۲۰۲۰). در مجموع، فرضیه‌های کوزنتس زیست‌محیطی و کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر نشان می‌دهند که مسیر توسعه اقتصادی کشورها الزاماً یکسان نیست و پویایی میان رشد، انرژی و محیط‌زیست به ساختار اقتصادی، سطح فناوری، سیاست‌های انرژی و نهادهای حاکمیتی هر کشور بستگی دارد.

۳. پیشینه تحقیق

در دهه‌های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه رابطه میان رشد اقتصادی، کیفیت محیط‌زیست و مصرف انرژی صورت گرفته است. یکی از مهم‌ترین رویکردهای بررسی این رابطه، فرضیه «منحنی کوزنتس زیست‌محیطی (EKC) است که نخستین بار توسط گروسمن و کروگر (۱۹۹۱) مطرح شد. این فرضیه بیان می‌کند که رابطه‌ای غیرخطی و به‌شکل U وارونه بین آلودگی محیط‌زیست و درآمد سرانه وجود دارد؛ به‌طوری که در مراحل اولیه رشد اقتصادی، آلودگی افزایش می‌یابد، اما پس از رسیدن به سطح مشخصی از درآمد، این روند معکوس شده و کیفیت محیط‌زیست بهبود می‌یابد. مطالعات اولیه‌ای همچون شافیک و بندپ^۲ (۱۹۹۲) و هالتز-اکین و سلدن^۳ (۱۹۹۵) با استفاده از داده‌های پانل برای کشورهای مختلف، شواهدی از وجود رابطه EKC ارائه داده‌اند. نتایج این تحقیقات در برخی آلاینده‌ها از جمله دی‌اکسید گوگرد و ذرات معلق، از الگوی EKC پشتیبانی کرده‌اند؛ در حالی که برای سایر آلاینده‌ها همچون دی‌اکسید کربن، این رابطه چندان مشخص نبود. در سال‌های اخیر، نیز توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان عامل مهمی در بهبود کیفیت محیط‌زیست و تحقق توسعه پایدار افزایش یافته است. در این راستا، مفهوم جدیدی با عنوان «منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر (RKC)» مطرح شده است که نشان می‌دهد سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی کشورها ممکن است با رشد اقتصادی ابتدا کاهش یافته و سپس در مراحل بالاتر توسعه اقتصادی، افزایش یابد. تحقیقات تجربی مانند پاتا و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی این رابطه در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه پرداخته‌اند و شواهدی از وجود منحنی RKC مشاهده شده است. محمود و همکاران^۴ (۲۰۲۳) در یک مرور ادبیات که شامل ۶۹ مطالعه از کشورهای مختلف در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۲۳ می‌شود، نشان دادند که ۵۷ مطالعه از این تعداد فرضیه منحنی کوزنتس زیست‌محیطی (EKC) را تأیید

¹ Afridi et al.

² Shafik & Bandyopadhyay

³ Holtz-Eakin & Selden

⁴ Mahmood et al.

کرده و ۶۴ مطالعه به این نتیجه رسیده‌اند که مصرف انرژی تجدیدپذیر به کاهش انتشار آلاینده‌ها کمک می‌کند. علاوه بر این، وانگ و همکاران^۱ (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای مقایسه‌ای بر روی چین و ایالات متحده مشاهده کردند که همکاری‌های بین‌المللی در تحقق فرضیه EKC، حتی با وجود تنش‌های ژئوپولیتیکی، افزایش یافته است. سیمونسکو و همکاران^۲ (۲۰۲۱) در تحقیقی که بر روی کشورهای گروه ۷۴ و کشورهای حوزه بالتیک در بازه زمانی ۱۹۹۶-۲۰۱۹ انجام دادند، الگوهای معکوس N و U شکل را شناسایی کرده و اظهار داشتند که انرژی تجدیدپذیر از حفاظت محیط‌زیست حمایت می‌کند. مانیزوک و همکاران^۳ (۲۰۲۰) نیز در تحقیقی بر روی ۴۴ کشور فرضیه EKC را در ۳ از ۸ جامعه اقتصادی تأیید کردند و به این نتیجه رسیدند که مصرف انرژی تجدیدپذیر به کاهش تخریب محیط‌زیست کمک می‌کند. هوروبت و همکاران^۴ (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای بر روی کشورهای اروپایی با استفاده از مدل‌های خودرگرسیون با وقفه توزیعی تعمیم‌یافته مقطعی^۵ (CS-ARDL) و رگرسیون کوانتایل مبتنی بر گشتاور^۶ (MMQR) به شناسایی نابرابری‌های منطقه‌ای در فرضیه EKC پرداخته و اظهار داشتند که تأثیرات انرژی تجدیدپذیر در مناطق مختلف متفاوت است. گومز و رودریگو^۷ (۲۰۲۰) در تحقیق خود بر روی کشورهای USMCA در بازه زمانی ۱۹۸۰-۲۰۱۶ از روش اقتصادسنجی پانلی استفاده کردند. آنها فرضیه EKC را تأیید و نشان دادند که مصرف انرژی تجدیدپذیر به کاهش تخریب محیط‌زیست کمک می‌کند. تومی^۸ (۲۰۲۴) در تحقیق خود بر روی کشورهای دریافت‌کننده عمده حواله‌ها در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۲ با استفاده از رویکرد خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی کوانتایل پانل^۹ (PQARDL) به چالش کشید که آیا فرضیه EKC به‌طور جهانی قابل اعمال است یا خیر، و نتیجه‌گیری کرد که انرژی تجدیدپذیر به‌طور مداوم به کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کند. آکویین و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای بر روی منطقه آسیا و اقیانوسیه (۱۹۶۰-۲۰۱۹) با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی پانلی^{۱۱} (POLS)، فرضیه EKC و فرضیه منحنی کوزنتس انرژی-زیست‌محیطی^{۱۲} (E-EKC) را برای کشورهای منتخب تأیید کردند. در تحقیق شین و مایتی^{۱۳} (۲۰۲۵) بر روی کشورهای منتخب اروپایی در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰، فرضیه EKC برای کشورهای اتریش، بلژیک و دانمارک تأیید شد؛ که نشان می‌دهد انتشار آلاینده‌ها ابتدا با رشد اقتصادی افزایش می‌یابد، اما پس از آن با ادامه رشد اقتصادی کاهش می‌یابد. وارساگه و همکاران^{۱۴} (۲۰۲۵) در تحقیقی بر روی کشورهای IGAD نشان دادند که فرضیه EKC معتبر است. شیانو و همکاران^{۱۵} (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای بر روی کشورهای منتخب آسیایی در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰ با استفاده از مدل رگرسیون پانلی فرضیه EKC را تأیید کرد و به این نتیجه رسید که روش‌های تولید سبز می‌توانند به

¹ Wang et al.

² Simionescu et al.

³ Maneejuk et al.

⁴ Horobet et al.

⁵ Cross-Sectionally Augmented Autoregressive Distributed Lag

⁶ Method of Moments Quantile Regression

⁷ Gómez & Rodríguez

⁸ Toumi

⁹ Quantile Autoregressive Distributed Lag of Panel Data

¹⁰ Acuin et al.

¹¹ Panel Ordinary Least Squares

¹² Energy-Environmental Kuznets Curve

¹³ Shine & Maiti

¹⁴ Warsame et al.

¹⁵ Xiao et al.

کاهش انتشار کربن کمک کنند، در حالی که ریسک‌های ژئوپولیتیکی این اثرات را افزایش می‌دهند. آگوسالیم و همکاران^۱ (۲۰۲۵) (۲۰۲۵) در تحقیقی بر روی کشورهای مذهبی در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۲ با استفاده از مدل خودرگرسیون با وقفه توزیعی پانلی^۲ (PARDL) نتیجه گرفتند که فرضیه EKC در کشورهای با درآمد پایین پشتیبانی نمی‌شود، اما مصرف انرژی تجدیدپذیر به کاهش انتشار CO₂ کمک می‌کند. ژو و همکاران^۳ (۲۰۲۵) در تحقیق خود بر روی کشورهای با آلودگی بالا در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۱ از تحلیل مقطعی استفاده کردند و فرضیه EKC را تأیید کردند. آنها نشان دادند که انرژی تجدیدپذیر می‌تواند موجب کاهش انتشار کربن شود، در حالی که انرژی‌های غیرتجدیدپذیر آن را افزایش می‌دهند. الساقاف^۴ (۲۰۲۵) در تحقیقی بر روی کشورهای G20 و OECD در بازه زمانی ۱۹۸۰-۲۰۱۹ با استفاده از مدل‌های میانگین گروهی تلفیقی^۵ (PMG) و MMQR نشان داد که منحنی EKC؛ EKC؛ U شکل معکوس است و به تأثیر استفاده از زمین و انرژی تجدیدپذیر بر کاهش انتشار آلاینده‌ها اشاره کرد. کوتچو و همکاران^۶ (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای بر روی کشورهای منتخب در بازه زمانی ۱۹۹۷-۲۰۲۲ از مدل رگرسیون کوانتایل داده‌های پانل^۷ (QRPD) استفاده و فرضیه EKC را تأیید کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که عدم قطعیت در سیاست‌های اقتصادی تأثیر مثبتی بر کیفیت محیط‌زیست دارد، در حالی که ریسک‌های ژئوپولیتیکی اثر منفی بر آن دارند. اوبریو-آلوگو و همکاران^۸ (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای بر روی رومانی در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۱ با استفاده از روش خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی^۹ (ARDL) نتیجه گرفتند که مالیات‌های زیست‌محیطی به‌طور قابل‌توجهی انتشار CO₂ را کاهش می‌دهند و شهرنشینی موجب افزایش انتشار آلاینده‌ها می‌شود. در نهایت، فاطیما و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای بر روی کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه در بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۲۳ از رگرسیون خطی بیزین استفاده کرده، فرضیه EKC را تأیید و نشان دادند که مصرف انرژی تجدیدپذیر به‌طور مستمر به کاهش تخریب محیط‌زیست کمک می‌کند.

بررسی بالا حاکی از این است که مطالعات خارجی به نتایج متنوعی در خصوص تأثیر انرژی تجدیدپذیر بر آلودگی و رشد اقتصادی دست یافته‌اند که نشان می‌دهد مصرف انرژی تجدیدپذیر نقش مؤثری در کاهش تخریب محیط‌زیست ایفا می‌کند و الگوهای رابطه بین رشد اقتصادی و آلودگی در مناطق مختلف می‌تواند تفاوت‌های قابل‌توجهی داشته باشد.

در ایران نیز مطالعات متعددی در زمینه روابط میان رشد اقتصادی، آلودگی محیط‌زیست و مصرف انرژی صورت گرفته است. به‌طور خاص، برخی از پژوهش‌ها به بررسی تأثیر انرژی تجدیدپذیر بر کاهش آلودگی و رشد اقتصادی پرداخته‌اند؛ در مورد مصرف انرژی، محمدیان^{۱۱} (۱۴۰۰) با استفاده از مدل فضا-حالت و داده‌های دوره ۱۳۴۶ تا ۱۳۹۶، به برآورد اثر بازگشتی انرژی در گستره اقتصاد ایران پرداخت. نتایج نشان داد که میانگین سالیانه اثر بازگشتی انرژی در دوره مورد بررسی ۵۷ درصد بوده و این روند در

¹ Agusalim et al.

² Panel Autoregressive Distribution Regression Model

³ Zhou et al.

⁴ Alsaggaf

⁵ Pooled Mean Group

⁶ Cutcu et al.

⁷ Quantile Regression of Panel Data

⁸ Obwori Alwago, et al.

⁹ Autoregressive Distributed Lag

¹⁰ Fatima et al.

¹¹ Mohamadian

زیر دوره‌های مختلف تغییرات صعودی نشان داده است. همچنین، محمدیان و اسماعیلی^۱ (۱۴۰۳) با استفاده از داده‌های دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۱ و دو روش حداقل مربعات معمولی پویا و حداقل مربعات معمولی کاملاً اصلاح شده، به بررسی تأثیر حکمرانی و رشد اقتصادی بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در یازده کشور منتخب عضو مجمع کشورهای صادرکننده گاز پرداختند. نتایج نشان داد که رشد اقتصادی تأثیر مثبت بر مصرف هر دو نوع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر دارد. در زمینه فرضیه کوزنتس، شیرخانی و همکاران^۲ (۱۴۰۱) با استفاده از روش گشتاورهای تعمیم‌یافته روش گشتاورهای تعمیم‌یافته^۳ (GMM) و داده‌های دوره ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۴ به بررسی فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس در ایران پرداختند. نتایج نشان داد که فرضیه در بخش صنعت تأیید نمی‌شود، که به معنای این است که در ایران، رابطه‌ای غیرخطی میان رشد اقتصادی و آلودگی محیط‌زیست در بخش صنعتی وجود ندارد. همچنین، سپهوند و همکاران^۴ (۱۴۰۰) با استفاده از روش رگرسیون حداقل مربعات دومرحله‌ای^۵ (2SLS) و داده‌های دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۸ به بررسی تأثیر پیچیدگی اقتصادی بر عملکرد زیست‌محیطی در کشورهای منطقه منا پرداختند. آنها فرضیه منحنی زیست‌محیطی کوزنتس را نیز آزمون کردند و نتایج نشان داد که منحنی U وارون زیست‌محیطی کوزنتس در این مطالعه تأیید نشده است. در زمینه مصرف انرژی، مطالعه علمی و آریان‌فر^۶ (۱۴۰۲) با استفاده از داده‌های دوره ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۹ و روش گشتاورهای تعمیم‌یافته به بررسی نقش فناوری اطلاعات و ارتباطات بر کیفیت محیط‌زیست در کشورهای منتخب صادرکننده نفت، از جمله ایران، پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق، وجود رابطه U معکوس بین فناوری اطلاعات و ارتباطات و انتشار دی‌اکسیدکربن را نشان دادند و تأیید کردند که فرضیه منحنی کوزنتس در کشورهای مورد مطالعه معتبر است. از سوی دیگر، برخی مطالعات داخلی دیگر به بررسی تأثیر انرژی تجدیدپذیر و مصرف انرژی بر کاهش آلودگی و رشد اقتصادی پرداخته‌اند، مانند پژوهش‌های خورسند وکیل‌زاده و جدیدزاده^۷ (۱۴۰۳) که نشان دادند فرضیه کوزنتس به‌ویژه در زمینه رشد اقتصاد سبز در ایران تأیید می‌شود. در تحقیقی دیگر، علمی و آریان‌فر (۱۴۰۲) به این نتیجه رسیدند که انرژی تجدیدپذیر به کاهش آلودگی و بهبود کیفیت محیط‌زیست در ایران کمک می‌کند.

نتایج این مطالعات نشان می‌دهند که اگرچه برخی از مطالعات داخلی به بررسی فرضیه‌های کوزنتس و انرژی تجدیدپذیر پرداخته‌اند، اما مقایسه تجربی نتایج دو فرضیه در یک کشور واحد مانند ایران، به‌ویژه با استفاده از داده‌های بلندمدت و روش‌های هم‌انباشتگی پویا، هنوز به‌طور کامل مورد توجه قرار نگرفته است؛ بنابراین توجه به تأثیر مصرف انرژی تجدیدپذیر در کاهش آلودگی، از ویژگی‌های نوآورانه این مطالعه به شمار می‌آید.

۴. روش شناسی

بررسی روند تاریخی متغیرهای اقتصادی و زیست‌محیطی ایران در دوره ۱۹۶۵ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که رشد درآمد سرانه همراه با تغییرات جمعیت شهری و مصرف انرژی، تأثیر قابل توجهی بر انتشار دی‌اکسید کربن و مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر داشته است.

¹ Mohamadian & Esmaeili

² Shirkhani et al.

³ Generalized Method of Moments

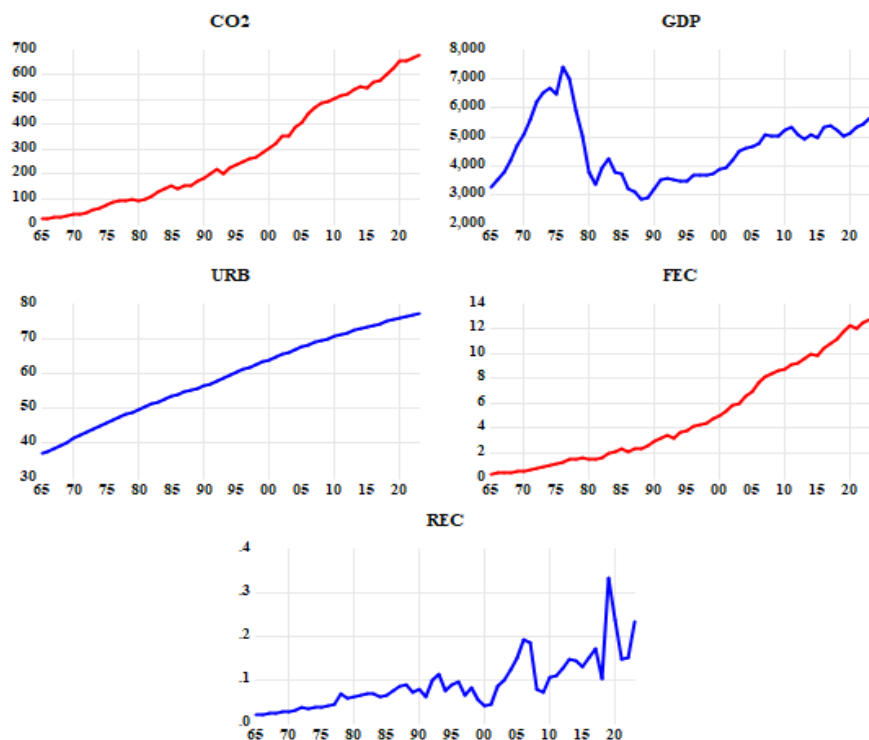
⁴ Sepahvand et al.

⁵ Two-Stage Least Squares

⁶ Elmi & Arianfar

⁷ Khorsand Vakilzadeh & Jadidzadeh

بر اساس نمودار (۱) در دهه ۱۹۶۵ تا ۱۹۷۵، درآمد سرانه از ۳۲۵۵ به ۶۴۶۸ دلار افزایش یافت و همزمان انتشار CO₂ از ۲۱/۲۳ به ۷۴/۴۰ میلیون تن رشد کرد. این دوره با افزایش جمعیت شهری از ۳۷/۰۷ درصد به ۴۵/۷۵ درصد و رشد مصرف نهایی انرژی از ۰/۳۵ اگزائول به ۱/۱۷ اگزائول همراه بود. این روند نشان می‌دهد که در مراحل اولیه توسعه اقتصادی، صنعتی‌شدن و افزایش مصرف انرژی‌های فسیلی عامل اصلی رشد انتشار CO₂ بوده است، که مطابق با چارچوب نظری منحنی کوزنتس زیست‌محیطی EKC است. در دهه ۱۹۸۰، با کاهش نسبی درآمد سرانه و نوسانات درآمد، انتشار CO₂ همچنان افزایشی بود و از ۹۵/۰۸ میلیون تن در سال ۱۹۸۰ به ۲۰۱/۴۷ میلیون تن در سال ۱۹۹۱ رسید. سهم مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در این دوره همچنان اندک و در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۰۶ اگزائول بود، که بیانگر محدودیت فناوری و هزینه‌های بالای جایگزینی انرژی‌های فسیلی است. با این حال، روند افزایش تدریجی سهم انرژی‌های تجدیدپذیر نشان می‌دهد که حتی در شرایط رشد محدود، عوامل ساختاری و سیاست‌های اولیه تشویقی می‌توانند تأثیر خود را بر مصرف انرژی‌های پاک آغاز کنند. از سال ۱۹۹۲ به بعد، با افزایش درآمد سرانه به حدود ۵۳۲۵ دلار در سال ۲۰۲۱ و رشد جمعیت شهری از ۵۷/۶۵ درصد در سال ۱۹۹۲ به ۷۶/۳۵ درصد در سال ۲۰۲۱، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر شتاب قابل توجهی یافت؛ به گونه‌ای که از ۰/۰۹ اگزائول در سال ۱۹۹۲ به ۰/۲۳ اگزائول در سال ۲۰۲۳ رسید. این نشان می‌دهد که پس از عبور از نقطه عطف درآمدی، رشد اقتصادی همراه با توسعه فناوری‌های نوین و سیاست‌های حمایتی مانند مشوق‌های مالی و تسهیلات سرمایه‌گذاری، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر را افزایش داده است. این الگو مطابق با فرضیه منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر RKC است؛ مصرف انرژی‌های پاک ابتدا کند یا کاهش نسبی داشته و سپس با افزایش درآمد و پیشرفت فناوری به شکل قابل توجهی رشد کرده است. بررسی روند داده‌ها در نمودار (۱) همچنین نشان می‌دهد که جمعیت شهری نقش دوگانه‌ای دارد؛ افزایش جمعیت شهری باعث رشد تقاضای انرژی و انتشار آلاینده‌ها شده، اما توسعه زیرساخت‌های شهری و سیاست‌های محیط‌زیستی، بهره‌وری انرژی را افزایش داده و به رشد مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر کمک کرده است. برای نمونه، جمعیت شهری از ۵۶/۳۳ درصد در سال ۱۹۹۰ به ۷۷/۲۶ درصد در سال ۲۰۲۳ افزایش یافت، در حالی که مصرف نهایی انرژی از ۲/۹۲ اگزائول در سال ۱۹۹۰ به ۱۲/۷۱ اگزائول در سال ۲۰۲۳ رسید و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر به طور قابل توجهی افزایش یافت. در مجموع، روند تاریخی نشان می‌دهد که در ایران امکان وجود منحنی EKC به شکل U معکوس و منحنی RKC به شکل U قابل مشاهده است.



نمودار ۱. روند متغیرهای پژوهش

منبع: یافته‌های پژوهش

برای بررسی اینکه آیا فرضیه‌های منحنی کوزنتس زیست‌محیطی و منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران غالب هستند یا خیر؛ به پیروی از پاتا و همکاران (۲۰۲۵) مدل‌های تجربی زیر در نظر گرفته شده است:

$$\ln CO_2 = \delta_0 + \delta_1 \ln Y_t + \delta_2 (\ln Y)_t^2 + \delta_3 \ln FEC_t + \delta_4 \ln REC_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\ln REC_2 = \lambda_0 + \lambda_1 \ln Y_t + \lambda_2 (\ln Y)_t^2 + \delta_3 \ln URB_t + \varepsilon_t \quad (2)$$

مدل EKC در معادله (۱) و مدل RKC در معادله (۲) نشان داده شده است. مبنای نظری این معادلات با در نظر گرفتن اثر فناوری که توسط گروسمن و کروگر (۱۹۹۱) پیشنهاد شد، بنا شده است. زمانی که درآمد سرانه از یک آستانه معین فراتر رود، کشورها می‌توانند بودجه خود را به پروژه‌هایی اختصاص دهند که از طریق اثر فناوری به توسعه فناوری‌های پاک کمک می‌کنند. علاوه بر این، سیاست‌گذاران ممکن است فرصت‌هایی برای ترویج استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر (REC) از طریق بهبود فرصت‌های مالی بیابند. در این راستا، این تحقیق مبنای نظری معادلات (۱) و (۲) را به ترتیب بر اساس فرضیه‌های EKC و RKC قرار داده است. فرضیه EKC نشان می‌دهد که رشد درآمد ابتدا باعث افزایش و سپس کاهش تخریب محیط‌زیست می‌شود. به عبارت دیگر، توسعه اقتصادی می‌تواند در آینده به کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی که یک کشور در گذشته ایجاد کرده است، کمک کند. انتقال از سوخت‌های فسیلی به سوخت‌های تجدیدپذیر گزینه‌ای اساسی برای به حداقل رساندن آسیب‌های زیست‌محیطی است. در این زمینه، پیشرفت اقتصادی یک کشور می‌تواند سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر را تأمین مالی کند و ممکن است بین درآمد و سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر یک رابطه غیرخطی وجود داشته باشد. فرضیه RKC این رابطه غیرخطی را توضیح می‌دهد.

و بیان می‌کند که در یک نقطه عطف مشخص، توسعه اقتصادی یک کشور می‌تواند به‌طور نظری سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر را تسریع کند. CO₂ یکی از مهم‌ترین عوامل گرمایش جهانی است و بسیاری از پژوهشگران آن را به‌عنوان شاخصی برای آلودگی زیست‌محیطی در نظر می‌گیرند (لی و همکاران^۱، ۲۰۲۴؛ عمر و همکاران^۲، ۲۰۲۴)؛ در این تحقیق داده‌های این متغیر به واحد تن از بریتیش پترولیوم استخراج شده است. در این مطالعه، مطابق با پژوهش گروسمن و کروگر (۱۹۹۱)، از درآمد سرانه (Y) و مقدار مجذور آن (Y²) به واحد دلار ثابت ۲۰۱۵ آمریکا استفاده شده است. افزودن مجذور درآمد سرانه به مدل، برای بررسی رابطه غیرخطی میان رشد اقتصادی و تخریب زیست‌محیطی یا مصرف انرژی تجدیدپذیر است. در مدل EKC، ضریب مثبت برای متغیر درآمد و ضریب منفی برای مجذور آن، نشانگر وجود رابطه U وارونه میان درآمد و انتشار CO₂ است؛ یعنی در مراحل اولیه رشد، آلودگی افزایش یافته و پس از نقطه عطف، کاهش می‌یابد. در مدل RKC، برعکس، ضریب منفی برای درآمد و ضریب مثبت برای مجذور آن بیانگر رابطه U شکل است که نشان می‌دهد با افزایش درآمد، ابتدا مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر کاهش یافته و پس از عبور از آستانه خاصی، افزایش می‌یابد. علاوه بر این سوخت‌های فسیلی یکی از مهم‌ترین عوامل انتشار CO₂ محسوب می‌شوند و به دلیل قدرت توضیحی بالای آن‌ها در مدل لحاظ شده‌اند. در بسیاری از مطالعات، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر (REC) به‌عنوان یکی از بهترین راهکارهای کاهش انتشار CO₂ شناسایی شده است (پاتا و همکاران، ۲۰۲۵). بر این اساس، در این تحقیق REC به‌همراه مصرف نهایی انرژی (FEC) به‌عنوان متغیرهای توضیحی در مدل در نظر گرفته شده است و واحد این متغیرها تن و از داده‌های شرکت بریتیش پترولیوم استخراج شده‌اند. برخی مطالعات عوامل مؤثر بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر (REC) را بررسی کرده‌اند. یانگ و همکاران^۳ (۲۰۱۶) دریافتند که شهرنشینی (URB) توسعه REC را در چین محدود می‌کند. در مقابل، هان و همکاران^۴ (۲۰۲۲) گزارش کردند که شهرنشینی تأثیری بر REC در چین ندارد. اسلام و همکاران^۵ (۲۰۲۲) اشاره کردند که شهرنشینی باعث کاهش REC در بنگلادش می‌شود. سو و همکاران^۶ (۲۰۲۲) تأکید کردند که شهرنشینی عاملی حمایتی برای REC در ۱۱۶ کشور است. مصرف شدید انرژی در مناطق شهری می‌تواند به روش‌های مختلف بر مصرف نهایی انرژی و تجدیدپذیر تأثیر بگذارد. بنابراین، در این تحقیق تأثیر شهرنشینی بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران بررسی می‌شود. مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر (REC) مطابق با فرضیه RKC به‌عنوان متغیر وابسته در معادله (۲) در نظر گرفته شده است. فرضیه RKC نشان می‌دهد که درآمد سرانه عاملی است که فراتر از یک سطح مشخص، باعث افزایش REC می‌شود و از نظر تئوری، شاخص‌های انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان متغیرهای وابسته در مدل‌های RKC در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین اگر δ_1 معنادار و مثبت و δ_2 معنادار و منفی باشد، فرضیه EKC تأیید می‌شود. علاوه بر این، اگر λ_1 معنادار و منفی و λ_2 معنادار و مثبت باشد، فرضیه RKC غالب خواهد بود. اگر نتایج تجربی نشان دهند که هر دو فرضیه تأیید می‌شوند. نقطه عطف برای GDP سرانه در مدل به‌صورت $\frac{-\delta_1}{2\delta_2}$ محاسبه می‌شود، درحالی‌که در مدل RKC این مقدار برابر با $\frac{-\lambda_1}{2\lambda_2}$ است.

منابع انرژی تجدیدپذیر (RE) پاک و دوستدار محیط‌زیست هستند، در حالی که سوخت‌های فسیلی آلاینده بوده و برای محیط‌زیست مضر هستند. بنابراین، انتظار می‌رود که ضرایب δ_3 و δ_4 ترتیب مثبت و منفی باشند، زیرا بسیاری از مطالعات پیشین

¹ Li et al.

² Umar et al.

³ Yang et al.

⁴ Han et al.

⁵ Islam et al.

⁶ Su et al.

به نتایج مشابهی رسیده‌اند (پاتا و همکاران، ۲۰۲۵؛ بیلگیلی و همکاران^۱، ۲۰۱۷). در مقابل مطالعه سان و همکاران^۲ (۲۰۲۴) تأکید کرد که شهرنشینی منجر به افزایش تقاضای انرژی می‌شود. بنابراین، ضریب شهرنشینی (λ_3) می‌تواند مثبت یا منفی باشد، بسته به این که نیاز انرژی ناشی از فرایند شهرنشینی چگونه تأمین شود. در این تحقیق از روش خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی (ARDL) که توسط پسران و همکاران^۳ (۲۰۰۱) پیشنهاد شده است، برای بررسی هم‌انباشتگی میان سری‌ها استفاده شده است. آزمون کرانه‌ای ARDL برای ارزیابی هم‌انباشتگی نسبت به سایر روش‌های یک‌مرحله‌ای مزایای متعددی دارد. اولاً، این آزمون زمانی قابل استفاده است که سری‌ها دارای مرتبه ترکیبی از هم‌انباشتگی باشند، زیرا آزمون کرانه‌ای ARDL فرضیات اجباری ندارد و نیازی نیست که همه متغیرها در یک مرتبه یکسان در تحلیل لحاظ شوند. ثانیاً، این روش به‌ویژه برای نمونه‌های کوچک به‌طور قابل توجهی قابل اعتمادتر است. ثالثاً، این آزمون یک برآورد دقیق برای مدل بلندمدت ارائه می‌دهد. بنابراین، در روش آزمون کرانه‌ای ARDL هم‌انباشتگی می‌تواند در مرتبه (0) I یا (1) I رخ دهد. آزمون کرانه‌ای ARDL به‌صورت زیر در معادله (۳) و (۴) نمایش داده شده است:

$$\Delta \ln CO_2 = \tau_0 + \tau_1 \ln CO_{2,t-1} + \tau_2 \ln Y_{t-1} + \tau_3 (\ln Y)_{t-1}^2 + \tau_4 \ln FEC_{t-1} + \tau_5 \ln REC_{t-1} + \sum_{i=1}^p \beta_1 \Delta \ln CO_{2,t-i} + \sum_{i=1}^q \beta_2 \Delta \ln Y_{t-i} + \sum_{i=1}^q \beta_3 \Delta (\ln Y)_{t-i}^2 + \sum_{i=1}^q \beta_4 \Delta \ln FEC_{t-i} + \sum_{i=1}^q \beta_5 \Delta \ln REC_{t-i} + \varepsilon_t \quad (3)$$

$$\Delta \ln REC_2 = \tau_0 + \tau_1 \ln REC_{t-1} + \tau_2 \ln Y_{t-1} + \tau_3 (\ln Y)_{t-1}^2 + \tau_4 \ln URB_{t-1} + \sum_{i=1}^p \beta_1 \Delta \ln REC_{t-i} + \sum_{i=1}^q \beta_2 \Delta \ln Y_{t-i} + \sum_{i=1}^q \beta_3 \Delta (\ln Y)_{t-i}^2 + \sum_{i=1}^q \beta_4 \Delta \ln URB_{t-i} + \varepsilon_t \quad (4)$$

که در آن Δ نشان‌دهنده عملگر تفاضل مرتبه اول است و q طول وقفه بهینه در معادله (۳) است. آزمون کرانه‌ای خودرگرسیون با وقفه توزیعی^۴ (ARDL) از توزیع F تبعیت می‌کند و مقادیر بحرانی آن توسط پسران و تیمرمان^۵ (۲۰۰۵) پیشنهاد شده است. روش برآورد با استفاده از معادله (۳) و (۴) آغاز می‌شود و از حداقل مربعات معمولی (OLS) برای انجام آزمون F به‌منظور ارزیابی معناداری مشترک ضرایب متغیرهای با وقفه استفاده می‌کند. هدف این روش بررسی وجود هرگونه رابطه بلندمدت بین متغیرها است. در آزمون کرانه‌ای ARDL فرضیه صفر (H_0) بیان می‌کند که هیچ رابطه هم‌انباشتگی بین متغیرهای مستقل وجود ندارد. برای ارزیابی این فرضیه، مقدار آماره F با مقادیر بحرانی حدود بالا و پایین مقایسه می‌شود. اگر آماره F بیشتر از مقدار بحرانی بالایی باشد، فرضیه صفر رد شده و وجود رابطه بلندمدت بین متغیرها تأیید می‌شود. اگر آماره F کمتر از مقدار بحرانی پایینی باشد، فرضیه صفر پذیرفته شده و نشان‌دهنده عدم وجود رابطه هم‌انباشتگی است. در صورتی که آماره F بین مقادیر بحرانی بالا و پایین قرار گیرد، نتیجه آزمون نامشخص خواهد بود (ریحان و توسپکوا^۶، ۲۰۲۲). علاوه بر این برای بررسی ضرایب متغیرها در این مطالعه از روش حداقل مربعات پویا^۷ (DOLS) استفاده می‌شود. آزمون هم‌انباشتگی DOLS در برابر همبستگی سریالی مقاوم است (ریحان و همکاران، ۲۰۲۲). روش DOLS برای این مناسب است که عوامل موجود در چارچوب هم‌انباشتگی را زمانی که یک ترتیب ترکیبی از هم‌انباشتگی وجود دارد، با پیش‌بینی پارامتر وابسته بر اساس عوامل توضیحی در سطوح، تأخیرها و وقفه‌ها، یکپارچه

¹ Bilgili et al.

² Sun et al.

³ Pesaran et al.

⁴ Bound ARDL Testing Approach

⁵ Pesaran & Timmermann

⁶ Raihan & Tuspekova

⁷ Dynamic Ordinary Least Squares

کند (بگوم و همکاران^۱، ۲۰۲۰). مزیت اساسی برآورد DOLS وجود هم‌انباشتگی با ترتیب‌های مختلف از متغیرها در چارچوب هم‌انباشتگی است. روش DOLS با استفاده از تأخیرها و وقفه‌های؛ پارامترهای مستقل، درون‌زایی و خودهمبستگی را حذف می‌کند (پاتا و همکاران^۲، ۲۰۲۵).

۵. برآورد مدل

نتایج آمار توصیفی در جدول (۱) نشان می‌دهد که میانگین انتشار دی‌اکسیدکربن در ایران طی دوره ۱۹۶۵ تا ۲۰۲۳ برابر ۲۸۳/۸۸ میلیون تن بوده و با توجه به دامنه تغییرات بین ۲۳/۲۱ تا ۶۷۸/۵۴، نوسانات قابل توجهی مشاهده می‌شود. مقدار انحراف معیار ۲۱۰/۶۸ بیانگر پراکندگی بالای انتشار CO₂ در طول این دوره است. درآمد سرانه با میانگین ۴۵۹۰/۰۶ (به واحد دلار ثابت ۲۰۱۵ آمریکا) و انحراف معیار ۱۰۸۰/۵۴، توزیع نسبتاً متقارنی را نشان می‌دهد که حاکی از پراکندگی متوسط درآمد در کشور طی این سال‌هاست. مصرف انرژی فسیلی با میانگین ۴/۹۱ اگزاژول و دامنه تغییرات بین ۰/۳۵ تا ۱۲/۷۱، دارای نوسانات قابل توجهی بوده و انحراف معیار ۳/۹۲ نشان‌دهنده تفاوت در الگوی مصرف انرژی بین سال‌های مختلف است. از سوی دیگر، مصرف انرژی تجدیدپذیر با میانگین ۰/۰۹ اگزاژول و انحراف معیار ۰/۰۶، پایین‌ترین میزان نوسان را داشته و نشان‌دهنده ثبات نسبی مصرف این نوع انرژی در کشور است. نرخ شهرنشینی نیز با میانگین ۵۸/۹۹ درصد و انحراف معیار ۱۲/۰۷، توزیع نسبتاً همگنی را نشان می‌دهد که بیانگر تفاوت اندک در سطح شهرنشینی ایران طی سال‌های ۱۹۶۵ تا ۲۰۲۳ است. به طور کلی، داده‌ها نشان می‌دهند که مصرف انرژی فسیلی به‌طور قابل توجهی بیشتر از انرژی‌های تجدیدپذیر است و کشور همچنان وابستگی بالایی به منابع سوخت فسیلی دارد.

جدول ۱. آمار توصیفی متغیرهای پژوهش

متغیر	نماد	میانگین	میانه	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	مشاهدات	منبع
انتشار دی‌اکسیدکربن	CO ₂	۲۸۳/۸۸	۲۲۷/۴۳	۶۷۸/۵۴	۲۱/۲۳	۲۱۰/۶۸	۵۹	https://www.bp.com
درآمد سرانه	Y	۴۵۹۰/۰۶	۴۶۵۰/۴۰	۷۴۲۲/۱۰	۲۸۳۳/۲۰	۱۰۸۰/۵۴	۵۹	https://worldbank.org
نرخ شهرنشینی	URB	۵۸/۹۹	۵۹/۳۸	۷۷/۲۶	۳۷/۰۷	۱۲/۰۷	۵۹	https://worldbank.org
مصرف انرژی فسیلی	FEC	۴/۹۱	۳/۶۳	۱۲/۷۱	۰/۳۵	۳/۹۲	۵۹	https://www.bp.com
مصرف انرژی تجدیدپذیر	REC	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۳۳	۰/۰۲	۰/۰۶	۵۹	https://www.bp.com

نکته: آمار توصیفی در حالت غیر لگاریتمی ارائه شده است.

منبع: یافته‌های پژوهش

برای جلوگیری از رگرسیون کاذب، انجام آزمون ریشه واحد ضروری است. از آنجایی که کارایی آزمون‌های ریشه واحد با اندازه نمونه تغییر می‌کند، چندین مطالعه پیشنهاد کرده‌اند که برای ارزیابی ترتیب هم‌انباشتگی سری‌ها، آزمون‌های متعددی انجام شود (ریحان و توسپکووا، ۲۰۲۲). در این تحقیق از دو آزمون دیکی-فولر تعمیم‌یافته^۳ (ADF) که توسط دیکی و فولر (۱۹۷۹) پیشنهاد شد و آزمون فیلیپس-پرون^۴ (P-P) که توسط فیلیپس و پرون (۱۹۸۸) معرفی شد، استفاده شده است. در این آزمون‌ها، با رد

¹ Begum et al.

² Pata et al.

³ Augmented Dickey-Fuller

⁴ Phillips & Perron

فرضیه H_0 ، نایستایی یا وجود ریشه واحد متغیرها رد می‌شود؛ مطابق نتایج ارائه شده در جدول (۲) رفتار سری‌های زمانی متغیرهای تحقیق از نظر ایستایی متفاوت است. متغیرهای انتشار دی‌اکسیدکربن، مصرف انرژی فسیلی و شهرنشینی در سطح ایستا و مقدار احتمال آن‌ها کمتر از ۰/۰۵ است که نشان‌دهنده رد فرضیه وجود ریشه واحد در سطح ۵ درصد است. در مقابل، متغیرهای درآمد سرانه و مصرف انرژی تجدیدپذیر در سطح دارای ریشه واحد و مقدار احتمال آزمون‌های ADF و PP برای آن‌ها بیشتر از ۰/۰۵، که نشان‌دهنده عدم ایستایی این متغیرها در سطح است. با تفاضل‌گیری اول، متغیرهای غیرایستا شامل درآمد سرانه و مصرف انرژی تجدیدپذیر ایستا شده‌اند، به‌طوری‌که مقدار احتمال آزمون‌های ADF و PP برای آن‌ها کمتر از ۰/۰۵ است. این نتایج نشان می‌دهد که این دو متغیر در سطح نامانا بوده اما در تفاضل اول ایستا هستند، که بیانگر هم‌انباشتگی مرتبه اول (1) I آن‌ها است. این یافته‌ها در تعیین روش تخمین مدل اقتصادسنجی اهمیت دارد، زیرا وجود متغیرهای (1) I در کنار متغیرهای (0) I لزوم بررسی هم‌انباشتگی را مطرح می‌کند.

جدول ۲. نتایج آزمون ریشه واحد

فیلیپس-پرون		دیکی فولر تعمیم یافته	
متغیر	نماد	احتمال	آماره
ریشه واحد در سطح			
انتشار دی اکسیدکربن	Ln CO2	۰/۰۰۰	-۴/۸۸۵
درآمد سرانه	Ln Y	۰/۲۱۵	-۲/۱۸۱
مصرف انرژی فسیلی	Ln FEC	۰/۰۰۱	-۴/۱۱۲
مصرف انرژی تجدیدپذیر	Ln REC	۰/۲۸۵	۲/۰۰۰
شهرنشینی	Ln URB	۰/۰۳۵	-۳/۰۶۱
متغیر		ریشه واحد در تفاضل اول	
درآمد سرانه	Ln Y	۰/۰۰۰	-۴/۴۰۰
مصرف انرژی تجدیدپذیر	Ln REC	۰/۰۰۰	-۷/۴۰۰

منبع: یافته‌های پژوهش

با توجه به درجه ایستایی متغیرها، از آزمون کرانه‌ای ARDL برای ارزیابی هم‌انباشتگی استفاده شده است. نتایج آزمون در جدول (۳) نشان می‌دهد که مقدار آماره F در هر دو مدل تحقیق بیشتر از حد بحرانی در سطح ۵ درصد است بنابراین فرض صفر رد می‌شود و یک رابطه بلندمدت بین متغیرهای مربوطه وجود دارد.

جدول ۳. نتایج آزمون همجمعی کرانه‌های پسران

مدل EKC			
سطح اطمینان	۱۰ درصد	۵ درصد	آماره F محاسباتی
کرانه پایین I (0)	۱/۹	۳/۴۸	۴/۵۷۴

کرانه بالا I (1)		۳/۰۱	۲/۲۶
مدل RKC			
سطح اطمینان	۱۰ درصد	۵ درصد	آماره F محاسباتی
کرانه پایین I (0)	۳/۱	۳/۶۳	۴/۸۰۵
کرانه بالا I (1)	۲/۰۱	۲/۴۵	

منبع: یافته‌های پژوهش

در جدول (۴) نتایج برآورد مدل‌های تحقیق نشان‌دهنده روابط معنادار و اثرات قابل توجه متغیرهای مختلف در مدل‌های EKC و RKC است؛ در ادامه، ابتدا تحلیل نتایج مدل EKC و سپس مدل RKC ارائه می‌شود. در مدل EKC، درآمد سرانه ($\ln Y$) با ضریب 0.53 و احتمال 0.00 تأثیر مثبت و معناداری بر انتشار دی اکسید کربن دارد. این نتیجه با نتایج مطالعات مشابه همچون پاتا و همکاران (۲۰۲۵) و سیمبی و همکاران^۱ (۲۰۲۵) هم‌راستا است که نشان می‌دهند در مراحل ابتدایی رشد اقتصادی، مصرف انرژی و آلودگی‌ها به دلیل تمرکز بر منابع انرژی فسیلی افزایش می‌یابد. علاوه بر این توان دوم درآمد سرانه ($\ln Y$)^۲، با ضریب -0.04 و احتمال 0.00 ، نشان می‌دهد که پس از رسیدن به یک سطح خاص از درآمد، ارتباط منفی بین درآمد سرانه و آلودگی آغاز می‌شود. در مراحل بعدی توسعه اقتصادی، با پیشرفت‌های فناوری و بهبود زیرساخت‌ها، تمایل به استفاده از منابع انرژی پاک‌تر و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی وجود دارد. این یافته نیز با نتایج مطالعاتی مانند شین و مایتی^۲ (۲۰۲۵) و آگوسالیم و همکاران (۲۰۲۵) که نشان می‌دهند با افزایش درآمد و توسعه اقتصادی، کشورها به تدریج به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش آلودگی می‌روند، همخوانی دارد. بنابراین، فرضیه منحنی کوزنتس زیست‌محیطی در این تحقیق برای ایران تأیید می‌شود. نتایج مدل EKC همچنین نشان می‌دهد مصرف انرژی فسیلی تأثیر مثبت و معنادار بر انتشار دی اکسید کربن دارد. مشابه مطالعه زالد و امام‌اوغلو^۳ (۲۰۲۴) این نتیجه تأکید می‌کند که با افزایش مصرف انرژی‌های فسیلی، انتشار آلاینده‌ها، به‌ویژه دی اکسید کربن، افزایش می‌یابد. این در حالی است که، مصرف انرژی تجدیدپذیر ($\ln REC$) با ضریب -0.35 و احتمال 0.00 نشان‌دهنده تأثیر منفی و معنادار مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر بر انتشار دی اکسید کربن است. این یافته مشابه با نتایج الملحم و همکاران^۴ (۲۰۲۵) است که نشان می‌دهند افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود شرایط زیست‌محیطی کمک می‌کند. نتایج برآورد مدل RKC نیز به‌طور واضح تأثیرات معنادار و قابل توجهی از متغیرها بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر را نشان می‌دهد. در این مدل، درآمد سرانه ($\ln Y$) با ضریب $4/8$ و احتمال 0.00 تأثیر منفی و معناداری بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر دارد. این بدان معناست که در مراحل اولیه رشد اقتصادی و تا رسیدن به درآمد مشخص، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر کاهش می‌یابد. در این مرحله، به دلیل اولویت داشتن رشد اقتصادی و استفاده از منابع انرژی فسیلی و دسترسی آسان‌تر و ارزان‌تر به آن‌ها، تمایل به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر کمتر است. این یافته مطابق با نتایج پاتا و همکاران (۲۰۲۵) است که نشان داده‌اند در مراحل اولیه رشد اقتصادی، مصرف انرژی‌های فسیلی نسبت به انرژی‌های تجدیدپذیر غالب است. توان دوم درآمد سرانه ($\ln Y$)^۲، با ضریب $0/2$ و احتمال 0.00 ، نشان‌دهنده رابطه غیرخطی و معناداری است که نشان می‌دهد پس از رسیدن به درآمد مشخص و در مراحل

¹ Habimana Simbi et al.

² Shine & Maiti

³ Zaland & İmamoğlu

⁴ Almulhim et al.

بعدی توسعه، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش می‌یابد. این تغییرات در بلندمدت می‌تواند نشان‌دهنده شیفت به سمت استفاده بیشتر از منابع انرژی پاک‌تر و پایدارتر باشد؛ بنابراین، با توجه به ضریب‌های معنادار و احتمال‌های پایین، فرضیه منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر (RKC) در مورد ایران تأیید می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که شهرنشینی ($\ln \text{URB}$) با ضریب $0/02$ و احتمال $0/00$ نیز تأثیر مثبت و قابل توجهی بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر دارد. این نشان می‌دهد که در مناطق شهری، به دلیل تمرکز جمعیت و نگرانی‌های محیط‌زیستی، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر بیشتر از مناطق روستایی است. این یافته با مطالعه سو و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد که نشان می‌دهند در مناطق شهری تمایل به استفاده از انرژی‌های سبز و پایدار بیشتر است.

جدول ۴. نتایج برآورد مدل‌های پژوهش

متغیر	نماد	مدل EKC: متغیر وابسته انتشار دی اکسید کربن		مدل RKC: متغیر وابسته مصرف انرژی تجدیدپذیر	
		ضریب	آماره T	احتمال	ضریب
درآمد سرانه	$\ln Y$	$0/536$	$11/852$	$0/000$	$-4/806$
توان دوم درآمد سرانه	$(\ln Y)^2$	$-0/040$	$-15/198$	$0/000$	$3/183$
مصرف انرژی فسیلی	$\ln \text{FEC}$	$0/983$	$1831/169$	$0/000$	-
مصرف انرژی تجدیدپذیر	$\ln \text{REC}$	$-0/035$	$-25/272$	$0/000$	-
شهرنشینی	$\ln \text{URB}$	-	-	-	$2/023$
عرض از مبدأ	C	$0/075$	$0/411$	$0/684$	$4/201$
R-squared		$0/99$	$0/99$	$0/79$	
Adjusted R-squared		$0/99$	$0/99$	$0/77$	

منبع: یافته‌های پژوهش

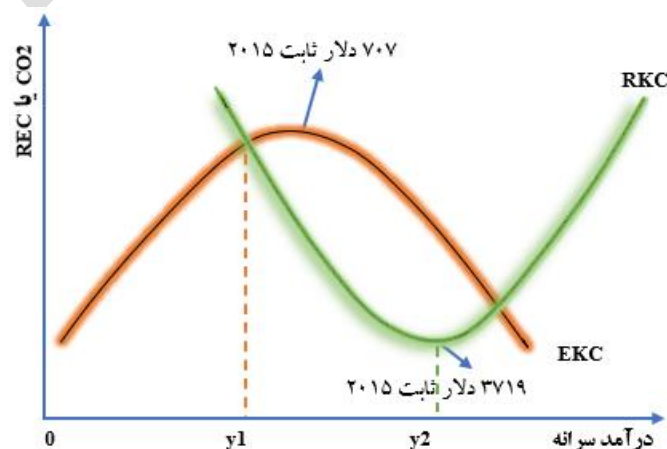
۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در تحقیق به بررسی و تحلیل مقایسه‌ای فرضیه‌های منحنی کوزنتس زیست‌محیطی (EKC) و منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر (RKC) در ایران پرداخت. نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های EKC و RKC نشان داد که در ایران، روابط غیرخطی و معناداری بین درآمد سرانه، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و انتشار دی‌اکسید کربن وجود دارد. در مراحل ابتدایی رشد اقتصادی، درآمد سرانه و مصرف انرژی‌های فسیلی تأثیر مثبت و معناداری بر انتشار آلاینده‌ها دارند. با افزایش سطح درآمد سرانه، ارتباط منفی بین درآمد و انتشار آلاینده‌ها آغاز می‌شود و در مراحل بعدی رشد اقتصادی، به‌ویژه در سطوح بالاتر درآمد سرانه، تمایل به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش می‌یابد؛ بنابراین فرضیه منحنی کوزنتس زیست‌محیطی (EKC) در ایران تأیید شد. در این راستا، همان‌طور که درآمد سرانه افزایش می‌یابد، مصرف انرژی‌های فسیلی کاهش یافته و به‌تدریج جای خود را به انرژی‌های پاک‌تر می‌دهد. این تغییرات به دلیل پیشرفت‌های فناوری، بهبود زیرساخت‌ها و تغییرات در الگوهای مصرف انرژی در مراحل مختلف توسعه اقتصادی مشاهده می‌شود. برای مدل EKC، همان‌طور که در نمودار (۲) نشان داده شده است؛ آستانه درآمد سرانه برابر با ۷۰۷ دلار است. این آستانه نشان می‌دهد که پس از رسیدن به این سطح از درآمد سرانه، روند کاهش آلودگی‌ها آغاز

می‌شود و حرکت به سمت استفاده از منابع انرژی پاک‌تر و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن آغاز می‌شود. در مدل منحنی کوزنتس انرژی‌های تجدیدپذیر (RKC) نیز تأثیرات مشابهی مشاهده شد. مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در مراحل ابتدایی رشد اقتصادی کاهش می‌یابد، اما پس از رسیدن به سطح مشخصی از درآمد سرانه، این مصرف به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. در این مدل نیز آستانه‌ای وجود دارد که در آن مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور معناداری افزایش می‌یابد. آستانه مدل RKC برای ایران برابر با ۳۷۱۹ دلار است. این آستانه نشان‌دهنده نقطه‌ای است که در آن مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور معناداری افزایش می‌یابد و استفاده از این منابع انرژی به یک گزینه مهم و استراتژیک تبدیل می‌شود. با توجه به این نتایج، می‌توان مشاهده کرد که آستانه مدل EKC (۷۰۷ دلار) نسبت به آستانه مدل RKC (۳۷۱۹ دلار) بسیار زودتر اتفاق می‌افتد. این به این معناست که در مراحل ابتدایی رشد اقتصادی، کاهش آلودگی‌ها و حرکت به سمت منابع انرژی پاک‌تر سریع‌تر از افزایش مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در مراحل بعدی رشد اقتصادی اتفاق می‌افتد.

با توجه به نتایج تحقیق، پیشنهاد می‌شود که سرمایه‌گذاری بیشتری در ایران برای توسعه و بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر انجام شود. این امر می‌تواند به کاهش وابستگی به انرژی‌های فسیلی و کاهش انتشار آلاینده‌ها کمک کند. لازم است دولت سیاست‌هایی طراحی کند که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را در مراحل مختلف توسعه اقتصادی تشویق کند. این سیاست‌ها می‌تواند شامل مشوق‌های مالی، اعطای یارانه به پروژه‌های انرژی‌های پاک و حمایت از تکنولوژی‌های نوآورانه باشد. کاهش وابستگی به منابع انرژی فسیلی و حرکت به سمت تنوع اقتصادی و منابع انرژی پاک‌تر می‌تواند نقش مهمی در حفظ محیط‌زیست و بهبود شرایط زیست‌محیطی ایفا کند. در این راستا، دولت لازم است به تقویت زیرساخت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و ایجاد بستر مناسب برای نوآوری‌های انرژی توجه کند. همچنین، ارتقاء آگاهی عمومی و ترویج فرهنگ محیط‌زیستی می‌تواند به تغییر نگرش‌ها و عادات مصرفی مردم کمک کند و باعث تقویت تمایل به استفاده از منابع انرژی پاک‌تر شود.

با توجه به آستانه‌های شناسایی‌شده در مدل‌های EKC و RKC (آستانه ۷۰۷ دلار برای مدل EKC و آستانه ۳۷۱۹ دلار برای مدل RKC)، سیاست‌گذاران باید تلاش کنند تا شرایط لازم برای عبور از این آستانه‌ها و حرکت به سمت توسعه پایدار فراهم شود. این امر نیازمند تغییرات اساسی در سیاست‌های انرژی و اقتصادی کشور است تا از این طریق به یک مدل انرژی پایدار و کم‌کربن دست یابند.



نمودار ۲. آستانه مدل‌های EKC و RKC

منبع: یافته‌های تحقیق

تامین مالی

هیچ حمایت مالی برای این پژوهش وجود ندارد.

تضاد منافع

هیچگونه تضاد منافع برای این پژوهش وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان در مفهوم سازی و نگارش مقاله مشارکت داشتند. همه نویسندگان محتوای مقاله را تایید کردند و در مورد تمام جنبه‌های کار توافق داشتند.

تشکر و قدردانی

از مسئولین و داوران مجله سپاسگزاریم.

منابع

- Acuin, S. A. J., Cabral, M. N. S., & Cabauatan, R. R. (2022). Empowering development in the 21st century: Energy–growth–environment nexus in the Asia Pacific region. *Malaysian Journal of Social Sciences and Humanities (MJSSH)*, 7(2), e001290-e001290. doi:<https://doi.org/10.47405/mjssh.v7i2.1290>
- Afridi, M. A., Kehelwalatenna, S., Naseem, I., & Tahir, M. (2019). Per capita income, trade openness, urbanization, energy consumption, and CO2 emissions: an empirical study on the SAARC Region. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(29), 29978-29990. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-019-06154-2>
- Agusalim, L., Karim, M., Irfany, M. I., Lestari, A. V. A., & Pebrianti, H. (2025). Economic Development and Climate Change: Insights from Religious Countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 15(2), 58-83. doi:<https://doi.org/10.32479/ijeep.17975>
- Alharthi, M., Dogan, E., & Taskin, D. (2021). Analysis of CO2 emissions and energy consumption by sources in MENA countries: evidence from quantile regressions. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(29), 38901-38908. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-021-13356-0>
- Ali, M. U., & Wang, Y. (2024). Pollution haven or pollution halo? The role of global value chains in Belt and Road economies. *Review of Development Economics*, 28(1), 168-189. doi:<https://doi.org/10.1111/rode.13041>
- Almulhim, A. A., Inuwa, N., Chaouachi, M., & Samour, A. (2025). Testing the impact of renewable energy and institutional quality on Consumption-Based CO2 emissions: Fresh insights from MMQR approach. *Sustainability*, 17(2), 704. doi:<https://doi.org/10.3390/su17020704>
- Alsagaf, M. I. (2025). Exploring the role of land utilization, renewable energy, and ICT to counter the environmental emission: a panel study of selected G20 and OECD countries. *Land Degradation & Development*, 36(5), 1707-1723. doi:<https://doi.org/10.1002/ldr.5458>

- Ambec, S., Cohen, M. A., Elgie, S., & Lanoie, P. (2013). The Porter hypothesis at 20: can environmental regulation enhance innovation and competitiveness? *Review of Environmental Economics and Policy*. doi:<https://doi.org/10.1093/reep/res016>
- Balsalobre-Lorente, D., Leitão, N. C., & Bekun, F. V. (2021). Fresh validation of the low carbon development hypothesis under the EKC Scheme in Portugal, Italy, Greece and Spain. *Energies*, 14(1), 250. doi:<https://doi.org/10.3390/en14010250>
- Beck, K. A., & Joshi, P. (2015). An analysis of the environmental Kuznets curve for carbon dioxide emissions: evidence for OECD and non-OECD countries. *European Journal of Sustainable Development*, 4(3), 33-33. doi:<https://doi.org/10.14207/EJSD.2015.V4N3P33>
- Begum, R. A., Raihan, A., & Said, M. N. M. (2020). Dynamic impacts of economic growth and forested area on carbon dioxide emissions in Malaysia. *Sustainability*, 12(22), 9375. doi:<https://doi.org/10.3390/su12229375>
- Bilgili, F., Koçak, E., Bulut, Ü., & Kuşkaya, S. (2017). Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 830-845. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.109>
- Cutcu, I., Altiner, A., & Bozkurt, E. (2025). The impact of economic policy uncertainty and geopolitical risk on environmental quality: An analysis of the environmental kuznets curve hypothesis with the novel QRPD approach. *Sustainability*, 17(1), 269. doi:<https://doi.org/10.3390/su17010269>
- Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the american statistical association*, 74(366a), 427-431. doi:<https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10482531>
- Dogan, A., & Pata, U. K. (2022). The role of ICT, R&D spending and renewable energy consumption on environmental quality: Testing the LCC hypothesis for G7 countries. *Journal of Cleaner Production*, 380, 135038. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135038>
- Dong, K., Dong, X., & Jiang, Q. (2020). How renewable energy consumption lower global CO2 emissions? Evidence from countries with different income levels. *The World Economy*, 43(6), 1665-1698. doi:<https://doi.org/10.1111/twec.12898>
- Elmi, Z. M., & Arianfar, F. (2023). The role of information and communication technology and per capita income on CO2 emissions in OPEC Plus oil exporting countries with an emphasis on the Kuznets environmental curve. *Journal of Environmental Science Studies*, 8(3), 7130-7148 [in Persian]. doi:<https://doi.org/10.22034/jess.2023.390380.1991>
- Fatima, Q., Batool, S. A., & Anjum, S. (2025). Disaggregated Analysis of Economic Growth and Environmental Degradation. *The Critical Review of Social Sciences Studies*, 3(1), 2575-2588. doi:<https://doi.org/10.59075/sw0vvp81>
- Gómez, M., & Rodríguez, J. C. (2020). The ecological footprint and Kuznets environmental curve in the USMCA countries: A method of moments Quantile regression analysis. *Energies*, 13(24), 6650. doi:<https://doi.org/10.3390/en13246650>
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement. In: National Bureau of economic research Cambridge, Mass., USA. <https://www.nber.org/papers/w3914>.
- Habimana Simbi, C., Yao, F., & Zhang, J. (2025). Sustainable Development in Africa: A Comprehensive Analysis of GDP, CO2 Emissions, and Socio-Economic Factors. *Sustainability*, 17(2), 679. doi:<https://doi.org/10.3390/su17020679>
- Han, J., Zeeshan, M., Ullah, I., Rehman, A., & Afridi, F. E. A. (2022). Trade openness and urbanization impact on renewable and non-renewable energy consumption in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(27), 41653-41668. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-021-18353-x>
- Holtz-Eakin, D., & Selden, T. M. (1995). Stoking the fires? CO2 emissions and economic growth. *Journal of Public Economics*, 57(1), 85-101. doi:[https://doi.org/10.1016/0047-2727\(94\)01449-X](https://doi.org/10.1016/0047-2727(94)01449-X)
- Horobet, A., Belascu, L., Radulescu, M., Balsalobre-Lorente, D., Botoroga, C.-A., & Negreanu, C.-C. (2024). Exploring the Nexus between Greenhouse Emissions, Environmental Degradation and Green Energy in Europe: A Critique of the Environmental Kuznets Curve. *Energies (19961073)*, 17(20). doi:<https://doi.org/10.3390/en17205109>
- Islam, M. M., Irfan, M., Shahbaz, M., & Vo, X. V. (2022). Renewable and non-renewable energy consumption in Bangladesh: The relative influencing profiles of economic factors, urbanization, physical infrastructure and institutional quality. *Renewable Energy*, 184, 1130-1149. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.020>

- Khorsand Vakilzadeh, M., & Jadidzadeh, A. (2024). Examining the hypothesis of Kuznets environmental curve using Indicators of environmental performance and green economy growth. *Journal of Economic Research and Policies*, 32(109), 98-138. [in persian] <http://qjerp.ir/article-131-3556-en.html>.
- Li, R., Wang, Q., & Guo, J. (2024). Revisiting the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis of carbon emissions: exploring the impact of geopolitical risks, natural resource rents, corrupt governance, and energy intensity. *Journal of Environmental Management*, 351, 119663. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119663>
- Lin, B., & Xu, B. (2017). Which provinces should pay more attention to CO2 emissions? Using the quantile regression to investigate China's manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 164, 980-993. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.022>
- Lucas Jr, R. E. (1988). On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*, 22(1), 3-42. doi:[https://doi.org/10.1016/0304-3932\(88\)90168-7](https://doi.org/10.1016/0304-3932(88)90168-7)
- 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. doi:<https://doi.org/10.32479/ijeep.14270>
- Maneejuk, N., Ratchakom, S., Maneejuk, P., & Yamaka, W. (2020). Does the environmental Kuznets curve exist? An international study. *Sustainability*, 12(21), 9117. doi:<https://doi.org/10.3390/su12219117>
- Mata, J. P. V., Bautista, M. G. G., Granda, L. E. S., & Zurita Moreano, E. (2024). Evaluating the environmental Kuznets Curve: the role of renewable energy, economic growth, urban density and trade openness on CO2 emissions: an analysis for high-income countries Using the CS-ARDL Model. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14(6), 580-596. doi:<https://doi.org/10.32479/ijeep.16740>
- Meijden, G., Benchekroun, H., van der Ploeg, F., & Withagen, C. (2023). Do strong oligopolies reverse Green Paradox effects? *European Journal of Political Economy*, 79, 102434. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejpoleco.2023.102434>
- Mohamadian, f. (2021). Estimating the Iran's Economy-Wide Energy Rebound Effect. *The Economic Research*, 21(4), 149-180 [in persian]. doi:<https://sid.ir/paper/1038949/en>
- Mohamadian, F., & Esmaeili, Z. (2024). Investigating the Impact of Good Governance and Economic Growth on Renewable and Non-Renewable Energy Consumption: Evidence from the Gas Exporting Countries Forum. *The Economic Policies And Research*, 3(2), 1-29 [in persian]. doi:<https://doi.org/10.22034/jepr.2024.141593.1137>
- Muratoğlu, Y., Songur, M., Uğurlu, E., & Şanlı, D. (2024). Testing the environmental Kuznets Curve hypothesis at the sector level: Evidence from PNARDL for OECD countries. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1452906. doi:<https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1452906>
- Obwori Alwago, W., David, D., Sgardea, F. M., & Marais, S.-L. (2025). The effect of environmental tax on CO2 emissions in Romania: an ARDL-linked cointegration approach. *The Journal of Risk Finance*, 26(3), 367-392. doi:<https://doi.org/10.1108/JRF-07-2024-0188>
- Panayotou, T. (2003). Economic growth and the environment. *Economic survey of Europe*, 45-72. doi:<https://doi.org/10.4337/9781849807418.00007>
- Pata, U. K., Bulut, U., Balsalobre-Lorente, D., & Chovancova, J. (2025). Does income growth affect renewable energy or carbon emissions first? A Fourier-based analysis for renewable and fossil energies. *Energy Strategy Reviews*, 57, 101615. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101615>
- Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. J. (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of applied econometrics*, 16(3), 289-326. doi:<https://doi.org/10.1002/jae.616>
- Pesaran, M. H., & Timmermann, A. (2005). Small sample properties of forecasts from autoregressive models under structural breaks. *Journal of econometrics*, 129(1-2), 183-217. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2004.09.007>
- Phillips, P. C., & Perron, P. (1988). Testing for a unit root in time series regression. *biometrika*, 75(2), 335-346. doi:<https://doi.org/10.1093/biomet/75.2.335>

- Raihan, A., Muhtasim, D. A., Pavel, M. I., Faruk, O., & Rahman, M. (2022). Dynamic impacts of economic growth, renewable energy use, urbanization, and tourism on carbon dioxide emissions in Argentina. *Environmental Processes*, 9(2), 38. doi:<https://doi.org/10.1007/s40710-022-00590-y>
- Raihan, A., & Tuspekova, A. (2022). Dynamic impacts of economic growth, renewable energy use, urbanization, industrialization, tourism, agriculture, and forests on carbon emissions in Turkey. *Carbon Research*, 1(1), 20. doi:<https://doi.org/10.1007/s44246-022-00019-z>
- Romer, P. M. (1990). Endogenous technological change. *Journal of political economy*, 98(5, Part 2), S71-S102. doi:<https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/261725>
- Ruzzenenti, F., & Basosi, R. (2008). The rebound effect: An evolutionary perspective. *Ecological Economics*, 67(4), 526-537. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.08.001>
- Sarkodie, S. A., & Strezov, V. (2019). A review on environmental Kuznets curve hypothesis using bibliometric and meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 649, 128-145. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.276>
- Schneider, N. (2023). Climate policy, resource owners' anticipations and the green paradox: model set-up and empirical considerations. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 12(1), 33-43. doi:<https://doi.org/10.1080/21606544.2022.2071344>
- Sepahvand, R., Sayehmiri, A., & Shirkhani, A. (2021). The Impact of Economic Complexity on Environmental Performance in the MENA Countries. *Economic Research and Perspectives*, 21(3), 177-208. [in persian] https://ecor.modares.ac.ir/article_13498_c13428cccd14486efb13636bd13497d13753ca13452d13487.pdf.
- Shafik, N., & Bandyopadhyay, S. (1992). *Economic growth and environmental quality: time-series and cross-country evidence* (Vol. 904): World Bank Publications. <https://www.scrip.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1704133>.
- Shine, L., & Maiti, S. (2025). Revisiting and Validating Environmental Kuznets Curve (EKC) in Some Selected Developed Countries in Europe. *International Journal of Innovative Research in Engineering and Management*, 12(1). doi:<https://doi.org/10.55524/ijirem.2025.12.1.2>
- Shirkhani, A., Sayehmiri, A., & Oshani, M. (2022). Factors affecting industrial water consumption in Iranian provinces: evidence from environmental Kuznets curve hypothesis. *Journal of Iranian Economic Issues*, 2(18), 153-175 [in persian] <https://www.sid.ir/paper/1154982/en>.
- Simionescu, M., Wojciechowski, A., Tomczyk, A., & Rabe, M. (2021). Revised environmental Kuznets curve for V4 countries and Baltic states. *Energies*, 14(11), 3302. doi:<https://doi.org/10.3390/en14113302>
- Smil, V. (2010). Energy Transitions: History, Requirements. *Prospects*, 1, 919-931. <https://www.environmentandsociety.org/mml/energy-transitions-history-requirements-prospects>.
- Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the environmental Kuznets curve. *World Development*, 32(8), 1419-1439. doi:<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2004.03.004>
- Su, M., Wang, Q., Li, R., & Wang, L. (2022). Per capita renewable energy consumption in 116 countries: The effects of urbanization, industrialization, GDP, aging, and trade openness. *Energy*, 254, 124289. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124289>
- Sun, Y., Usman, M., Radulescu, M., Pata, U. K., & Balsalobre-Lorente, D. (2024). New insights from the STIPART model on how environmental-related technologies, natural resources and the use of the renewable energy influence load capacity factor. *Gondwana Research*, 129, 398-411. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.05.018>
- Toumi, S. (2025). Unveiling impact of financial development, renewable energy, and technological innovation on ecological footprint in major remittance-receiving economies—A PQARDL approach. *International Journal of Renewable Energy Development*, 14(1), 180-199. doi:<https://doi.org/10.61435/ijred.2025.60762>
- Umar, M., Ji, X., Safi, A., & Afshan, S. (2024). Decentralization, institutional quality, and carbon neutrality: Unraveling the nexus in China's pursuit of sustainable development. *Economic Analysis and Policy*, 82, 1238-1249. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eap.2024.05.008>

- Van der Kroon, B., Brouwer, R., & Van Beukering, P. J. (2013). The energy ladder: Theoretical myth or empirical truth? Results from a meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 504-513. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.045>
- Wang, Ren, F., & Li, R. (2024). Exploring the impact of geopolitics on the environmental Kuznets curve research. *Sustainable Development*, 32(3), 1700-1722. doi:<https://doi.org/10.1002/sd.2743>
- Warsame, A. A., Daror, H. O., & Abdullahi, A. M. (2025). Unraveling the environmental Kuznets curve in IGAD countries: interplay between ecological footprint, economic growth, renewable energy, and globalization. *Environmental Research Communications*, 7(1), 015031. doi:<https://doi.org/10.1088/2515-7620/adaac7>
- Xiao, M., Abbas, A., Hamid, A., Keoy, K. H., Cong, G., Saleem, F., & Anwar, A. (2025). Green production practices for sustainable development: Impact of geopolitical risk, renewable energy, and foreign direct investment on environmental quality. *Energy & Environment*, 0958305X251319369. doi:<https://doi.org/10.1177/0958305X251319369>
- Yang, J., Zhang, W., & Zhang, Z. (2016). Impacts of urbanization on renewable energy consumption in China. *Journal of Cleaner Production*, 114, 443-451. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.158>
- Yao, S., Zhang, S., & Zhang, X. (2019). Renewable energy, carbon emission and economic growth: A revised environmental Kuznets Curve perspective. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1338-1352. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.069>
- Zaland, Z., & İmamoğlu, H. (2024). Revisiting the environmental Kuznets curve hypothesis in the context of renewable and non-renewable energy in China. *Business & Management Studies: An International Journal*, 12(2), 240-252. doi:<https://doi.org/10.15295/bmij.v12i2.2348>
- Zhang, J. (2021). Environmental Kuznets curve hypothesis on CO2 emissions: evidence for China. *Journal of Risk and Financial Management*, 14(3), 93. doi:<https://doi.org/10.3390/JRFM14030093>
- Zhou, Z. Z., Hassan, M. S., Saeed, M. I., Mahmood, H., Kalim, R., & Houaneb, A. (2025). From pollution to sustainable environment: unlocking the role of energy intensity and renewable energy in highly pollutant nations. *Environmental Research Communications*, 7(2), 025004. doi:<https://doi.org/10.1088/2515-7620/adac38/meta>