

Research Article

The Impact of Economic Complexities and Energy Security on Energy Efficiency Indicators in Iran

Fateh Habibi^{*1} , Sheller Ayazi² 

1. Associate Professor, Department of Economic, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
2. Ph.D. Student in Economics, Department of Economic, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Received 04 August 2025 Revise 27 October 2025 Accepted 02 November 2025 Publish 23 September 2026

Abstract

Given the pivotal role of energy in economic development and the growing emphasis on sustainable energy resources, analyzing the determinants of energy efficiency is of paramount importance. This study investigates the impact of economic complexity and energy security risk on energy efficiency indicators in Iran. Using macroeconomic data together with indices of energy security and economic complexity, the study examines the relationship between these factors and energy productivity—proxied by energy intensity and carbon emissions—over the period 1995–2023, employing the Fully Modified Ordinary Least Squares (FMOLS) method. The findings reveal that economic complexity has a positive and statistically significant relationship with both energy intensity and carbon emissions, implying that greater economic complexity is associated with higher energy consumption and increased environmental pollution. Conversely, energy security risk exhibits a negative and statistically significant relationship with energy intensity and a positive and statistically significant relationship with carbon emissions, indicating that while an increase in energy security risk reduces energy intensity, it simultaneously leads to higher carbon emissions. These results underscore the complex interplay between economic indicators and energy security factors and highlight the need to address both dimensions simultaneously in order to improve energy efficiency and mitigate environmental degradation in Iran.

Keywords: Economic Complexity, Energy Security Risk, Carbon Emissions, Iran

JEL Classification: Q47, Q43, F64

* **Corresponding Author:** Fateh Habibi

E-mail: f.habibi@uok.ac.ir

Tel: +9887133664600

Cite This Article (APA): Habibi, F. & Ayazi, S. (2025). The impact of economic complexities and energy security on energy efficiency indicators in Iran. *Journal of Economic Policies and Research*, 5(3), 1-30. <https://doi.org/10.22034/jepr.2025.144222.1294> [In Persian].

Homepage of this Article: https://jepr.uok.ac.ir/article_64190.html?lang=en



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

Introduction

Climate change and global warming represent pressing challenges for countries worldwide, and concerted international efforts—particularly in the energy sector—are essential to address these crises. One of the key strategies for tackling these challenges is improving energy efficiency, which can reduce energy consumption, lower carbon emissions, and contribute to the achievement of sustainable development goals. Within this context, economic complexity and energy security risk have emerged as significant factors that may shape energy efficiency outcomes. Given Iran's heavy reliance on fossil fuels, understanding how economic complexity and energy security risk affect energy efficiency in the country is of considerable importance.

This study analyzes the long-term impacts of these factors on energy efficiency and explores their implications for environmental policy and energy security in Iran. The primary objective of the research is to examine the effect of economic complexity on energy efficiency—proxied by energy intensity and carbon emissions—and to determine how this relationship changes under conditions of energy security instability. The key question guiding the study is whether an increase in economic complexity exerts a positive and significant effect on energy efficiency in Iran and how this effect changes during periods of heightened energy security risk.

By exploring these dynamics, the study aims to provide valuable insights into how Iran can improve its energy efficiency while simultaneously managing the risks associated with energy security and the complexities of its economic structure. Such insights can ultimately contribute to more effective policymaking in the areas of environmental sustainability and energy security.

Methodology

The relationships among the variables are investigated using the Fully Modified Ordinary Least Squares (FMOLS) method. First introduced by Phillips and Hansen (1990), FMOLS is designed to estimate long-run relationships among cointegrated variables. This method is particularly effective in addressing issues such as non-stationarity, endogeneity, and serial correlation in the error terms, which frequently bias conventional regression models. Standard regression techniques may yield inaccurate or misleading results in the presence of these problems; FMOLS corrects for them by applying semi-parametric adjustments to the coefficients, thereby providing consistent and asymptotically efficient estimates.

Table 1. Variables and sources of research data

Symbol	Variable	Variable Measurement	Source
ENE	Energy Efficiency	Primary energy intensity (MJ/\$2017 PPP GDP)	WDI
CO2	Energy Efficiency	Carbon dioxide intensity (kg per unit of energy equivalent to crude oil)	WDI
ECI	Economic Complexity	Economic Complexity Index: This index is based on the diversity and comprehensiveness of goods produced in a country.	Harvard CID
ESR	Energy Security Risk	Energy Security Risk Index: This index measures the energy risk by comparing countries' vulnerabilities to global energy fluctuations. A lower score indicates lower energy security risk, while a higher score indicates higher risk.	Business Monitor Index
REN	Renewable Energy Consumption	Renewable energy consumption (percentage of total final energy consumption)	WDI
OPE	Trade Openness	Trade openness (the sum of exports and imports of goods and services as a percentage of GDP)	WDI
GDP	Gross Domestic Product	Gross Domestic Product (measured in constant US dollars, 2015)	WDI

The study covers the period from 1995 to 2023 (1374 to 1402 in the Iranian calendar). The data employed in this research are drawn from reputable international sources, including both governmental and non-governmental organizations, and are analyzed using EViews software. The application of the FMOLS estimator enables the study to produce more accurate and reliable estimates of the long-term effects of economic complexity and energy security risk on energy efficiency in Iran. The findings are expected to provide valuable insights into the complex interplay among these variables and to support more informed decision-making. Ultimately, this research is intended to assist policymakers in improving energy efficiency while simultaneously addressing the critical challenges of energy security, environmental sustainability, and economic development in Iran.

$$ENE_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 ECI_{it} + \alpha_2 ESR_{it} + \alpha_3 REN_{it} + \alpha_4 OPE_{it} + \alpha_5 GDP_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

$$CO_{2it} = \gamma_0 + \gamma_1 ECI_{it} + \gamma_2 ESR_{it} + \gamma_3 REN_{it} + \gamma_4 OPE_{it} + \gamma_5 GDP_{it} + \mu_{it} \quad (2)$$

Results and Discussion

The results of the unit root tests indicate that the null hypothesis of a unit root at levels cannot be rejected, meaning that none of the variables is stationary in level form. After first differencing, however, all variables become stationary, with the null hypothesis rejected at the 1% significance level. To identify potential long-run equilibrium relationships, the Johansen cointegration test is applied. Both the trace and maximum eigenvalue statistics reject the null hypothesis of no cointegrating vector at the 95% confidence level, confirming the presence of one cointegrating vector among the variables. The optimal lag length is selected using the Schwarz Information Criterion (SIC).

The Fully Modified Ordinary Least Squares (FMOLS) method is employed to estimate the long-run relationships among economic complexity, energy security risk, and energy efficiency. FMOLS corrects for endogeneity and serial correlation in the error terms, yielding consistent and asymptotically efficient estimates. The results reveal that economic complexity has a positive and statistically significant relationship with energy intensity, suggesting that greater economic complexity is associated with higher energy consumption. In contrast, energy security risk exhibits a negative relationship with energy intensity, implying that increased risk reduces energy intensity. In addition, higher shares of renewable energy consumption and economic growth are both found to be associated with lower energy intensity.

Regarding carbon emissions, the findings indicate that both economic complexity and energy security risk contribute to higher emissions. However, with technological progress, these effects could potentially be reversed. Economic growth, given its dependence on fossil fuels, is also associated with increased carbon emissions. Conversely, trade openness and renewable energy consumption are found to mitigate environmental pollution by reducing emissions. These results suggest that policies promoting renewable energy adoption and economic diversification can play a crucial role in addressing long-term environmental and energy security challenges.

Conclusion

In recent decades, the pursuit of greater energy efficiency and lower carbon emissions has led researchers and policymakers to examine the economic and structural factors shaping energy performance. This study analyzes the impact of two such factors—economic complexity and energy security risk—on energy intensity and carbon emissions in Iran.

The results show that economic complexity is positively associated with both energy intensity and carbon emissions, as the expansion of production and industrialization drives higher energy consumption and pollution. Energy security risk significantly reduces energy intensity, thereby improving efficiency, yet the continued reliance on fossil fuels still results in higher carbon emissions. Furthermore, renewable energy consumption exerts a favorable effect by reducing both energy intensity and emissions, although the share of renewables in Iran's energy mix remains low.

The findings indicate that, for Iran to achieve sustainable growth and minimize negative environmental impacts, it is essential to develop technology-intensive industries and invest substantially in renewable energy sources.

Additional information

Authors' Contributions

All Authors Contributed Equally to The Writing of The Article.

Conflict of interest

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

Financial Support

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

ORCID



Fateh Habib

<https://orcid.org/0000-0001-7204-2566>



Sheller Ayaz

<https://orcid.org/0009-0003-3823-4873>

تأثیر پیچیدگی‌های اقتصادی و ریسک امنیت انرژی بر شاخص‌های کارایی انرژی در ایران

فاتح حبیبی^{۱*}، شلیر ایازی^۲

۱. دانشیار، گروه علوم اقتصادی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.
۲. دانشجوی دکتری علوم اقتصادی، گروه علوم اقتصادی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

چکیده

باتوجه به نقش حیاتی انرژی در توسعه اقتصادی و اهمیت پایداری منابع انرژی، تحلیل عوامل مؤثر بر بهره‌وری انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است. مقاله حاضر به بررسی تأثیر پیچیدگی‌های اقتصادی و ریسک امنیت انرژی بر شاخص‌های کارایی انرژی در کشور ایران می‌پردازد. در این مطالعه، با استفاده از داده‌های اقتصاد کلان و شاخص‌های مرتبط با امنیت انرژی و پیچیدگی اقتصادی، ارتباط بین این عوامل و بهره‌وری انرژی در بازه زمانی ۱۳۷۴-۱۴۰۲ (۱۹۹۵-۲۰۲۳) و با استفاده از روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح‌شده (FMOLS) مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که پیچیدگی اقتصادی رابطه‌ای مثبت و معنادار با شدت مصرف انرژی و انتشار کربن دارد، به این معنا که افزایش پیچیدگی اقتصادی با افزایش مصرف انرژی و آلاینده‌های زیست‌محیطی همراه است. از سوی دیگر، ریسک امنیت انرژی رابطه‌ای منفی و معنادار با شدت انرژی و رابطه‌ای مثبت و معنادار با انتشار کربن نشان می‌دهد؛ یعنی با افزایش ریسک امنیت انرژی، شدت مصرف انرژی کاهش می‌یابد؛ اما انتشار کربن افزایش پیدا می‌کند. این نتایج نشان‌دهنده پیچیدگی تعامل بین شاخص‌های اقتصادی و عوامل امنیت انرژی است و اهمیت توجه هم‌زمان به این عوامل را برای بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش آلودگی زیست‌محیطی در ایران برجسته می‌کند.

واژگان کلیدی: پیچیدگی اقتصادی، ریسک امنیت انرژی، کارایی انرژی، ایران.

طبقه‌بندی JEL: Q47, Q43, F64

تلفن تماس: ۰۹۸۸۷۱۳۳۶۴۶۰۰

آدرس رایانامه: f.habibi@uok.ac.ir

* نویسنده مسئول: فاتح حبیبی

استناد به مقاله (APA): حبیبی، فاتح و ایازی، شلیر. (۱۴۰۴). تأثیر پیچیدگی‌های اقتصادی و ریسک امنیت انرژی بر شاخص‌های کارایی

انرژی در ایران. نشریه سیاست‌ها و تحقیقات اقتصادی، ۵(۳)، ۱-۳۰. <https://doi.org/10.22034/jepr.2025.144222.1294>

https://jepr.uok.ac.ir/article_64190.html

صفحه اصلی مقاله در سامانه نشریه:

۱. مقدمه

یکی از چالش‌هایی که امروزه جهان با آن مواجه است، تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی است که در دهه اخیر، نهادهای بین‌المللی مانند آژانس بین‌المللی انرژی و آژانس حفاظت از محیط‌زیست تلاش‌هایی جهت مقابله با این چالش را آغاز کرده‌اند. دستیابی به انرژی پاک و مقرون‌به‌صرفه برای همه، و انجام اقدام‌های فوری برای مقابله با تغییرات اقلیمی، از اهداف کلیدی توسعه پایدار به شمار می‌رود. این اهداف بیانگر یک راهبرد دوگانه شامل ترویج دسترسی به انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در این راستا بهره‌وری انرژی به‌عنوان یک استراتژی کلیدی مطرح می‌شود که می‌تواند این اهداف را به‌صورت هم‌زمان تحقق بخشد. بهره‌وری انرژی معمولاً از طریق شاخص شدت انرژی اندازه‌گیری می‌شود؛ این شاخص نشان‌دهنده میزان انرژی مصرفی به‌ازای تولید یک واحد کالا یا خدمات است. کاهش شدت انرژی به معنای تولید همان مقدار کالا یا خدمات با مصرف انرژی کمتر است که موجب جداسازی رشد اقتصادی از افزایش مصرف انرژی می‌شود. این فرایند همچنین به کاهش انتشار کربن کمک می‌کند (Solarin, 2020). افزون بر این، بهبود بهره‌وری انرژی زمانی که همراه با استفاده از فناوری انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر باشد، منجر به کاهش شدت کربن نیز می‌شود. این دو شاخص شدت انرژی و شدت کربن، به‌عنوان شاخص‌های مهم توسعه پایدار شناخته شده و نشان‌دهنده کارایی استفاده از انرژی در فعالیت‌های اقتصادی، تجاری و انتقال به سیستم‌های انرژی پاک هستند. مطالعات سنتی عمدتاً بر رشد اقتصادی، توسعه فناوری و الگوهای مصرف انرژی تمرکز داشته‌اند و به بررسی عوامل مختلف تعیین‌کننده تقاضای انرژی پرداخته‌اند تا بهره‌وری در بخش‌های مختلف افزایش یابد. اما ادبیات جدیدتر اهمیت ریسک امنیت انرژی و پیچیدگی اقتصادی را در شکل‌دهی به مصرف انرژی و نتایج بهره‌وری برجسته کرده است (Payne et al., 2023).

امنیت انرژی مفهومی فراگیر است که در محافل اقتصادی و زیست‌محیطی کاربرد گسترده‌ای دارد (Demski et al., 2018). از زمان بحران نفتی دهه ۱۹۷۰، بیشتر پژوهشگران امنیت انرژی را محدود به امنیت نفت تعریف کرده‌اند. در آن زمان، آژانس بین‌المللی انرژی، امنیت انرژی را به معنای تأمین پایدار انرژی باقیمت مناسب تعریف کرد. با رشد سریع فناوری انرژی، مرکز تحقیقات انرژی آسیا و اقیانوسیه تعریف جدیدی برای امنیت انرژی ارائه می‌کند. طبق این تعریف، امنیت انرژی توانایی اقتصادی برای تأمین پایدار انرژی است به‌گونه‌ای که قیمت انرژی در سطحی پایدار باقی بماند و تأثیری منفی بر عملکرد اقتصادی باقی نگذارد. این مرکز، ابعاد کلیدی امنیت انرژی را شامل سه مؤلفه اصلی در دسترس بودن، مقرون‌به‌صرفه بودن و مقبولیت می‌داند. در دسترس بودن به خودکفایی تولید انرژی اولیه خود یک کشور اشاره دارد که عمدتاً توسط توانمندی‌های انرژی اولیه، اکتشاف و بهره‌برداری آن کشور تعیین می‌شود. مقرون‌به‌صرفه بودن بر دو معنا دلالت دارد. اول اینکه یک کشور می‌تواند انرژی را با قیمت مناسب و قابل قبول از کشورهای خارجی خریداری کند. دوم اینکه قیمت انرژی داخلی مورد قبول مردم خودش باشد. مقبولیت به استفاده از انرژی اشاره دارد که عمدتاً شامل دو جنبه بهره‌وری انرژی و ساختار مصرف انرژی است. دسترسی به معنای امکان تأمین انرژی از واردات است. با افزایش آگاهی از توسعه پایدار اخیراً، نقش منفی اثرات خارجی انرژی نیز در ارزیابی پایداری انرژی گنجانده شده است. مجموعه‌ای از مطالعات اشاره کرده‌اند که توسعه قابلیت امنیت انرژی یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های پایداری انرژی است (Fang et al., 2021).

پیچیدگی اقتصادی^۱ از عواملی است که می‌تواند از طریق ارتقای فناوری و نوآوری، میسر توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر را فراهم کند و موجب کاهش انتشار کربن شود و بهره‌وری انرژی را بهبود بخشد (سلیمی و همکاران، ۱۴۰۲). همچنین، پیچیدگی اقتصادی بیانگر دانش نهفته در ساختار تولیدی اقتصاد بوده و از یک‌سو محرک اصلی رشد است و از سوی دیگر شرایط زیست‌محیطی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. یک اقتصاد پیچیده‌تر، نظام‌های تولیدی پیشرفته‌تری را پرورش می‌دهد و با بهره‌گیری از دانش و فناوری، تأثیرات زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند. صنعتی‌شدن و تنوع تولید، کشورهایی با پیچیدگی اقتصادی بالاتر را به سمت فناوری‌های دانش‌بنیان مانند انرژی‌های تجدیدپذیر و کالاهای کم‌مصرف انرژی سوق می‌دهد و زمینه یک اقتصاد پایدار را فراهم می‌کند (Bhatt & Chavda, 2025). به‌طور کلی جهت دستیابی به اهداف توسعه پایدار درک نقش بهره‌وری انرژی ضروری است. با بهبود آن کشورها می‌توانند هدر رفت انرژی را کاهش دهند، انتشار کربن را کم کنند و به اهداف خالص صفر نزدیک شوند درحالی‌که رقابت‌پذیری اقتصادی و امنیت انرژی نیز حفظ می‌شود (Solarin, 2020).

کشور ایران به‌عنوان یکی از اقتصادهای وابسته به نفت، برای تأمین انرژی به سوخت‌های فسیلی وابسته است. استفاده از این نوع سوخت‌ها می‌تواند بهره‌وری انرژی را کاهش و انتشار کربن را به حداکثر برساند. همچنین این کشور به دلیل پتانسیل بالا در زمینه تأمین انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی باد، خورشیدی و غیره می‌تواند با استفاده از فناوری‌های پیشرفته و بهبود تکنولوژی، شرایط مساعدی را جهت استفاده از این انرژی‌ها فراهم آورد و از این طریق کیفیت محیط‌زیست خود را بهبود بخشد. باتوجه به شرایط خاص این کشور، ازجمله تحریم‌های بین‌المللی، نوسانات ارزی و محدودیت‌های ساختاری در نظام تولیدی، بررسی تأثیر پیچیدگی‌های اقتصادی و ریسک امنیت انرژی^۲ از اهمیت بالایی برخوردار است. پرسش اصلی که در این مطالعه مطرح می‌شود این است که آیا افزایش در پیچیدگی اقتصادی تأثیر مثبت و معناداری بر کارایی انرژی در ایران دارد؟ همچنین در شرایط ناپایدار امنیت انرژی، این رابطه چگونه تغییر می‌کند؟ پژوهش حاضر با استفاده از مدل‌های سنجی و داده‌های سری زمانی تلاش می‌کند با بررسی تأثیرات بلندمدت متغیرهای کلیدی، به این پرسش‌ها پاسخ دهد.

۲. ادبیات پژوهش

۲-۱. مبانی نظری

انرژی به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی رشد و توسعه اقتصادی در بسیاری از کشورهای جهان شناخته می‌شود. بهره‌گیری از منابع انرژی، به‌ویژه در بخش‌های صنعتی و حمل‌ونقل، آثار مثبتی بر توسعه اقتصادی دارد، اما درعین‌حال مصرف انرژی، به‌ویژه سوخت‌های فسیلی، پیامدهای منفی مانند تخریب محیط‌زیست و تغییرات اقلیمی را نیز به دنبال دارد (Adkoya et al., 2023). این واقعیت موجب شده است که سیاست‌گذاران و اقتصاددانان با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی، تمرکز خود را بر افزایش بهره‌وری انرژی و جایگزینی منابع تجدیدناپذیر با انرژی‌های تجدیدپذیر معطوف کنند (Goh & Ang, 2020).

بهره‌وری انرژی که به معنای کاهش مقدار انرژی مصرفی برای انجام یک فرایند مشخص است، به‌عنوان توانایی رشد اقتصادی بدون افزایش متناسب مصرف انرژی تعریف می‌شود (Malinauskay et al., 2019). به بیان دیگر، این شاخص نشان‌دهنده میزان خدمات انرژی ارائه شده به‌ازای هر واحد انرژی ورودی است (Gillingham et al., 2009). در سطح محصول، بهره‌وری انرژی به‌عنوان یکی از ویژگی‌های مهم در کنار هزینه و سایر مشخصه‌ها مطرح است (Newell et al., 1999) و در سطح کلان، با نسبت تولید ناخالص داخلی به‌ازای هر واحد انرژی مصرف شده اندازه‌گیری می‌شود (Gillingham et al., 2009). همچنین، طبق تعریف آژانس بین‌المللی انرژی^۱ (۲۰۲۳)، کارایی انرژی به مقدار انرژی اولیه مصرف شده برای تولید یک‌میزان مشخص خروجی اقتصادی اشاره دارد که به دلیل دسترسی آسان و مقرون‌به‌صرفه بودن، به‌عنوان سوخت نخستین شناخته می‌شود. این کارایی راهکاری پاک‌تر، سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر برای افزایش عرضه انرژی و ارتقای پایداری زیست‌محیطی به شمار می‌رود (Marimuthu et al., 2021).

الگوهای بهره‌وری انرژی در کشورهای مختلف با توجه به شرایط اقتصادی و ساختاری متفاوت است و شدت انرژی هر کشور که نشان‌دهنده میزان انرژی مصرفی برای تولید هر واحد محصول است، ارتباط نزدیکی با توسعه آن کشور دارد و به تبع آن بر انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز تأثیرگذار است (Lapinskiene et al., 2014). تأمین مستمر و بی‌وقفه انرژی برای ثبات اقتصادی و رشد کشورها امری ضروری است. در این چارچوب امنیت انرژی شامل چهارعنصر کلیدی است: دسترسی‌پذیری منابع فیزیکی انرژی، قابلیت دسترسی به منابع از منظر ژئوپلیتیکی، مقرون‌به‌صرفه بودن از بعد اقتصادی، و مقبولیت زیست‌محیطی و اجتماعی (Kruyt et al., 2009). ریسک امنیت انرژی بسته به توسعه زیرساخت‌ها و وابستگی به منابع محدود انرژی در مناطق مختلف، تفاوت‌های قابل توجهی دارد. دسترسی به انرژی کافی با هزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه، یکی از دغدغه‌های اصلی کشورها جهت دستیابی به رشد پایدار است (Payne et al., 2023). به‌علاوه، تأمین انرژی کافی باقیمت مناسب اغلب با ریسک‌های امنیت انرژی همراه است که این موضوع اهمیت بالایی دارد (Neagu & Teodoru, 2019).

در ساده‌ترین تعریف، ریسک امنیت انرژی را می‌توان احتمال وقوع یک اختلال در تأمین یا دسترسی به انرژی در شدت پیامدهای آن دانست. این تعریف نشان می‌دهد که ریسک تنها به وقوع یک تهدید خلاصه نمی‌شود، بلکه شامل احتمال وقوع تهدید و میزان تأثیرگذاری آن بر اقتصاد و جامعه است. به بیانی دیگر، ریسک امنیت انرژی تابعی از دو مؤلفه اصلی است: تهدیدها و آسیب‌پذیری. تهدیدها می‌توانند ناشی از منابع مختلف اقتصادی، ژئوپلیتیکی، فنی و زیرساختی، و محیط‌زیستی ناشی شود. اما این تهدیدها به‌تنهایی امنیت انرژی را تهدید نمی‌کنند، بلکه سطح آسیب‌پذیری داخلی تعیین می‌کند که یک سیستم انرژی تا چه حد در برابر این تهدیدها آسیب می‌بیند. جهت مفهوم‌سازی ریسک امنیت انرژی باید سه بعد کلیدی را در نظر گرفت: ۱- منابع ریسک (منشأ تهدیدها)، ۲- دامنه تأثیر (گستره‌ای که تهدید می‌تواند بر آن اثر بگذارد، از سطح خانوار تا کل اقتصاد ملی)، ۳- شدت تأثیر (میزان و ویژگی پیامدها که شامل سرعت، اندازه، دوام، گستره جغرافیایی و قطعیت اثر است) (Winzer, 2012).

ازسوی دیگر، بریار و همکاران (۲۰۱۷)^۱، در مرور نظام‌مند خود نشان می‌دهد که یکی از ضعف‌های ادبیات سنتی امنیت انرژی^۲، نبود تعریف مشترک و جامع از این مفهوم است. وی پیشنهاد می‌کند که برای تحلیل بهتر، باید تهدید، آسیب‌پذیری، و پیامدهای ناشی از آنها هم زمان در چارچوب ریسک امنیت انرژی لحاظ شود. وی بیان می‌کند که امنیت انرژی ایستا نیست؛ بلکه یک وضعیت پویای پر ریسک است که با تغییر در عرضه و تقاضای جهانی، سیاست‌های داخلی و چالش‌های زیست‌محیطی دائماً دگرگون می‌شود.

در طول زمان، مفهوم ریسک امنیت انرژی فراتر از نگرانی‌های پیرامون تأمین نفت گسترش یافته است؛ و شامل دسترسی و مقرون به صرفه بودن انرژی‌های مدرن و تأثیر آنها بر شدت کربن نیز شده است (Kumar, 2016; Malik et al., 2020). این ریسک به مسائلی مانند اختلال در عرضه انرژی ناشی از شوک‌های جهانی، بلایای طبیعی^۳، آسیب‌پذیری‌های اقلیمی، جنگ‌ها و بحران‌های مالی مرتبط است و به همین دلیل به عنوان متغیری کلیدی در سیاست‌گذاری کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه مطرح می‌شود (Ibrahim & Musaheb, 2021). به طور کلی، ریسک امنیت انرژی باید ابعاد مختلف شدت انرژی و شدت کربن که دو شاخص مهم کارایی انرژی محسوب می‌شوند، را در نظر بگیرد تا بتواند تأثیر نوآوری‌ها را بر شکل‌دهی چشم‌انداز آینده انرژی و محیط زیست به طور جامع بررسی کند (Cherp & Jewell, 2014).

شدت انرژی^۴ بالا بیانگر آن است که برای تولید یک واحد محصول ناخالص داخلی، میزان زیادی انرژی مصرف می‌شود. چنین وضعیتی علاوه بر ناکارایی اقتصادی، وابستگی کشور به منابع انرژی داخلی یا خارجی را افزایش می‌دهد و در نتیجه ریسک امنیت انرژی را در دو بعد دسترسی‌پذیری و مقرون به صرفگی، تشدید می‌کند. به بیان دیگر، هر چه شدت انرژی بیشتر باشد، فشار بر منابع انرژی و نیاز به واردات افزایش یافته و هزینه‌های تولید و مصرف‌کننده نهایی نیز بالاتر می‌رود که خود تهدیدی برای امنیت انرژی محسوب می‌شود. ازسوی دیگر، شدت کربن^۵ نشان‌دهنده میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای^۶ در فرایند تولید و مصرف انرژی مربوط می‌شود. شدت کربن بالا می‌تواند کشور را در معرض فشارهای بین‌المللی برای کاهش انتشار، اعمال مالیات یا تعرفه کربنی و نیز محدودیت‌های زیست‌محیطی قرار دهد. همچنین، شدت بالای انتشارها هزینه‌های گذار به انرژی‌های پاک و فناوری‌های کم‌کربن را افزایش داده و پایداری بلندمدت را نیز بالا می‌برد (Yao & Chang, 2014).

باتوجه به اینکه ریسک امنیت انرژی شامل وقوع اختلال در تأمین انرژی و شدت پیامدهای آن در اقتصادها است. افزایش میزان ریسک امنیت انرژی باعث می‌شود که کشورها به کارایی بالاتر و تنوع منابع انرژی روی بیاورند که می‌تواند شدت انرژی را کاهش دهد. ازسوی دیگر، ریسک بالای امنیت انرژی ممکن است موجب افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی داخلی و ذخایر انرژی ارزان شود که منجر به افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود (Breyer et al., 2018).

-
1. Breyer et al. (2018)
 2. Energy Security
 3. Natural Disaster
 4. Energy Intensity
 5. Carbon Intensity
 6. Greenhouse gas

پیچیدگی اقتصادی نقش مهمی در توسعه محصولات سبز و فناورانه ایفا می‌کند که برای رشد پایدار اقتصادی ضروری است. این مفهوم بازتابی از توانایی یک اقتصاد در تولید طیف گسترده و متنوعی از کالاها و خدمات است که نه تنها الگوهای اقتصادی بلکه الگوهای مصرف انرژی را شکل می‌دهد و در نهایت بر محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد (Bhatt & Chavda, 2025). پیچیدگی اقتصادی نشان می‌دهد که یک کشور چه محصولاتی را می‌تواند تولید کند و چگونه می‌تواند از دانش موجود برای بهبود فرایند تولید بهره ببرد. این پیچیدگی با عوامل متعددی مانند دانش تولیدی، ترکیب ابزارها و مواد، الگوریتم‌ها، متون راهنما و توانایی‌های شناختی انسان‌ها مرتبط است. مدل توسعه‌یافته هیدالگو و هاوسمن (۲۰۰۹)^۱، نیز بر اساس الگوی صادرات کشورها به بررسی سطح پیچیدگی محصولات صادراتی می‌پردازد تا میزان توسعه پیچیدگی اقتصادی را تعیین کند (Balland et al., 2022).

تولید محصولات نیازمند مصرف انرژی است؛ بنابراین کشورها باید دانش تولیدی خود را بهینه‌سازی کنند تا شدت مصرف انرژی کاهش یابد و بهره‌وری انرژی افزایش پیدا کند. با این حال، در بسیاری از کشورها، نوآوری‌های فناوری باعث گسترش تولید و افزایش مصرف انرژی شده است (Boleti et al., 2021). چو و هونگ (۲۰۲۰)، معتقدند که پیچیدگی اقتصادی به پرسش مهمی پاسخ می‌دهد؛ این که یک کشور به طور مؤثر قادر به تولید چه محصولاتی است؟ پیچیدگی اقتصادی را می‌توان به مثابه شمشیر دو لبه‌ای به صورت یک روی مثبت و یک روی منفی دانست. از یک سو، کشورهایی که پیچیدگی اقتصادی بالایی دارند معمولاً از سرمایه انسانی، سرمایه فیزیکی و نهادهای قوی برخوردارند که می‌توانند محصولات پیشرفته و فناوری‌های بهینه در مصرف انرژی را تولید کنند. در این کشورها فرایند تحقیق و توسعه گسترده موجب افزایش تنوع تولیدات و ارتقای بهره‌وری انرژی می‌شود (Kazemzadeh et al., 2023). از سوی دیگر، افزایش پیچیدگی اقتصادی می‌تواند به رشد سریع اقتصادی و افزایش تولید منجر شود که در پی آن تقاضای انرژی بالا می‌رود. این موضوع در صورت عدم دسترسی کافی به منابع انرژی تجدیدپذیر، می‌تواند وابستگی به سوخت‌های فسیلی را افزایش داده و روند گذار به انرژی‌های پاک را تهدید کند (Kazemzadeh et al., 2023).

برای تمرکز بر تأثیر پیچیدگی اقتصادی بر شدت انرژی، پیشنهاد شده که رابطه‌ای به صورت U وارونه میان آنها برقرار است که تحت تأثیر اثرات مقیاسی، ساختاری و فناورانه قرار می‌گیرد. در مراحل ابتدایی رشد اقتصادی، به دلیل فرایندهای صنعتی‌سازی ناکارآمد، انتظار می‌رود شدت انرژی با افزایش پیچیدگی اقتصادی نیز افزایش یابد. در این مرحله فناوری‌های توسعه‌نیافته و در حال توسعه به مصرف انرژی بالا منجر شده و پیامدهای زیست محیطی اغلب نادیده گرفته می‌شود؛ این شرایط موجب شکل‌گیری اثر مقیاس و افزایش محسوس شدت انرژی می‌گردد (Zafar et al., 2019). با پیشرفت رشد اقتصادی و تغییر ساختار اقتصاد (اثر ساختاری)؛ دانش بیشتر و پیشرفت‌های فناورانه و اقتصادی منجر به فعالیت‌های پاک‌تر و کاهش شدت انرژی می‌شود (Cole, 2006). در سطوح بالای درآمد، فناوری‌های توسعه‌نیافته جایگزین فناوری‌های پیشرفته می‌شوند؛ این تغییر که به اثر فناورانه معروف است، به افزایش بهره‌وری، کارایی انرژی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی منجر شده و در نهایت شدت انرژی را کاهش می‌دهد (Bano et al., 2018).

1. Hidalgo & Hausmann (2009)

باتوجه به اینکه پیچیدگی اقتصادی تنوع و پیچیدگی محصولات تولیدی یک کشور را نشان می‌دهد، معمولاً با بهره‌وری بالای انرژی و استفاده کارآتر از منابع همراه است. اقتصادهای پیچیده‌تر غالباً فناوری‌های پیشرفته و فرایندهای تولید بهینه دارند که شدت انرژی را کاهش می‌دهند. با این حال، اگر این تولید پیچیده مبتنی بر سوخته‌ای فسیلی باشد، ممکن است انتشار دی‌اکسیدکربن را افزایش دهد (Hidalgo et al., 2009). از طرفی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش سهم این انرژی‌ها می‌تواند موجب کاهش شدت انرژی و انتشار کربن شود. این منابع جایگزین سوخت‌های فسیلی شده و بهره‌وری انرژی را افزایش می‌دهند و موجب کاهش اثرات زیست‌محیطی می‌شوند (IEA, 2021).

باز بودن تجارت نیز می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر شدت انرژی و انتشار کربن داشته باشد. از یک سو، دسترسی به فناوری‌های پیشرفته و منابع انرژی کارآتر می‌تواند منجر به کاهش شدت انرژی شود و از سوی دیگر، تجارت ممکن است به انتقال صنایع پر مصرف انرژی و انتشار بالای کربن منجر شود، بنابراین باز بودن تجارت بر انتشار کربن می‌تواند دوگانه باشد و به شرایط خاص هر کشور بستگی دارد (Frankel et al., 1999). تولید ناخالص داخلی معمولاً با افزایش مصرف انرژی و در نتیجه افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن همراه است، اما در سطوح بالاتر توسعه اقتصادی، ممکن است به دلیل استفاده از فناوری‌های کارآتر و بهبود کارایی انرژی، و انتشار کربن کاهش یابد که نشان‌دهنده وجود یک رابطه پیچیده بین رشد اقتصادی و انتشار گازهای گلخانه‌ای است و به شرایط خاص هر کشور و سیاست‌های اتخاذی بستگی دارد (Stern, 2007).

۲-۲. پیشینه پژوهش

حاکمی و همکاران (۱۴۰۰)، در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر پیچیدگی اقتصادی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از مدل رگرسیون انتقال ملایم پنلی (PSTR)^۱ در کشورهای منتخب صادرکننده نفت طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۹ پرداختند. نتایج نشان داد که شاخص پیچیدگی اقتصادی تأثیر منفی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد.

امینی و همکاران (۱۴۰۱)، در مطالعه‌ای مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و ریسک امنیت انرژی را در بازه زمانی ۱۳۵۹-۱۴۰۰ با استفاده از روش خودرگرسیون برداری (VAR)^۲ برای کشور ایران مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه نشان داد که مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر تأثیری مثبت و افزایشی بر ریسک امنیت انرژی دارد. همچنین یکی از دلایل افزایش روند صعودی شاخص ریسک انرژی ایران مصرف فزاینده انرژی‌های تجدیدناپذیر است.

ذبیحی و همکاران (۱۴۰۲)، اثر ریسک امنیت انرژی را در بازه زمانی ۱۹۹۱-۲۰۲۱ با استفاده از رگرسیون کوانتیل برای کشور ایران بررسی می‌کنند. نتایج حاکی از آن است که شاخص ریسک امنیت انرژی موجب کاهش ثبات اقتصادی می‌شود. همچنین نتایج حاصله اهمیت همکاری‌های بین‌المللی برای توسعه یک سیستم انرژی پایدارتر که موجب افزایش امنیت تأمین انرژی و ثبات اقتصادی می‌شود را بیش‌ازپیش نمایان می‌کند.

1. Panel Gentle Transmission Regression (PSTR)

2. Vector Autoregression

محمدی و همکاران (۱۴۰۲)، در مطالعه‌ای به بررسی پیچیدگی‌های اقتصادی و مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورهای در حال توسعه با استفاده از روش گشتاورهای تعمیم‌یافته (GMM)^۱ در بازه زمانی ۲۰۱۹-۲۰۰۰ پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که پیچیدگی اقتصادی تأثیری منفی و معناداری بر انتشار کربن دارد و همچنین متغیرهایی مانند باز بودن تجارت، و شدت انرژی موجب افزایش انتشار کربن می‌شوند.

سلیمی و همکاران (۱۴۰۲)، در مطالعه‌ای برای ایران به بررسی تأثیر پیچیدگی‌های اقتصادی بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در بازه زمانی ۱۳۶۸-۱۴۰۰ با استفاده از روش خودتوضیح با وقفه‌های گسترده (ARDL)^۲ پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که در بلندمدت پیچیدگی اقتصادی موجب افزایش انرژی تجدیدپذیر در ایران می‌شود. همچنین سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی، رشد اقتصادی و نرخ شهرنشینی موجب افزایش مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران می‌شود در حالی که انتشار سرانه دی‌اکسید کربن مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر را کاهش می‌دهد.

سالاروند و همکاران (۱۴۰۴)، در مطالعه‌ای به بررسی اثر پیچیدگی اقتصادی و ریسک‌های بین‌المللی بر توسعه پایدار در ۴۷ کشور نوظهور با استفاده از رویکرد رگرسیون انتقال ملایم پنلی (PSTR) طی بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۱ پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که ارتباط منفی و معناداری میان پیچیدگی اقتصادی و توسعه پایدار در رژیم اول و قبل از حد آستانه و ارتباط مثبت و معناداری میان پیچیدگی اقتصادی و توسعه پایدار در رژیم دوم و بعد از حد آستانه وجود دارد. همچنین میان ریسک مالی و توسعه پایدار در رژیم اول و قبل از حد آستانه پیچیدگی اقتصادی ارتباط مثبت و معناداری و در رژیم دوم ارتباط منفی و معناداری وجود دارد. از طرفی اثر ریسک اقتصادی و سیاسی بر توسعه پایدار در رژیم اول منفی و در رژیم دوم مثبت و معنادار است.

آزگالیوا و همکاران (۲۰۲۰)^۳، در مطالعه کشورهای سازمان توسعه و همکاری اقتصادی^۴ در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۱۶ با استفاده از روش میانگین گروهی اثرات همبسته مشترک نشان دادند که یک رابطه منفی و معنادار بین تولید ناخالص داخلی با قیمت انرژی کل اقتصاد و شدت کربن وجود دارد.

فنگ و همکاران (۲۰۲۱)^۵، در مطالعه ۲۵ کشور عضو سازمان همکاری و توسعه اقتصادی در بازه زمانی ۲۰۱۶-۱۹۷۸ با استفاده از روش پنل نشان می‌دهند که قیمت انرژی و پیچیدگی اقتصادی تأثیری منفی بر تقاضای انرژی دارد.

آلمزرو و همکاران (۲۰۲۱)^۶، در مطالعه ۱۸ کشور منتخب در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۰۰ نشان دادند که ریسک امنیت انرژی با مصرف بالای سوخت‌های فسیلی و وابستگی به واردات انرژی رابطه‌ای مستقیم دارد. این مطالعه همچنین اهمیت زیرساخت‌های انرژی تجدیدپذیر را برای دستیابی به پایداری زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری انرژی در آفریقا مطرح می‌کند.

1. Generalized Method of Moments (GMM)

2. Autoregressive Distributed Lag (ARDL)

3. Azhgaliyeva et al. (2020)

4. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)

5. Fang et al. (2021)

6. Alemzero et al. (2021)

سری و فرناندز (۲۰۲۱)^۱، در مطالعه ۲۱ کشور آمریکای لاتین در بازه زمانی ۱۹۶۰-۲۰۱۷ با استفاده از روش خودتوضیح با وقفه‌های گسترده (ARDL) نشان دادند که در برخی کشورها، منحنی کوزنتس معکوس معتبر است؛ یعنی پس از رسیدن به سطح مشخصی از درآمد سرانه، رشد تولید ناخالص داخلی موجب کاهش انتشار کربن می‌شود.

علی و همکاران (۲۰۲۲)^۲، در مطالعه‌ای برای کشور چین در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۱۹ با استفاده از تکنیک خودتوضیح با وقفه‌های گسترده (ARDL) و مدل اصلاح خطای نامحدود^۳ نشان دادند که سرمایه‌گذاری مداوم در منابع انرژی تجدیدپذیر، نوآوری در آن و بهبود بهره‌وری انرژی موجب کاهش انتشار کربن می‌شود.

لی و وانگ (۲۰۲۲)^۴، در مطالعه خود که ۲۰ کشور در حال توسعه و ۳۰ کشور توسعه‌یافته را در بازه زمانی ۲۰۰۲-۲۰۱۸ با استفاده از تکنیک‌های سنجی مورد بررسی قرار دادند، عنوان کردند که توسعه سرمایه انسانی موجب بهبود امنیت انرژی می‌شود، در حالی که پیشرفت فناوری و اطلاعات و ارتباطات، تأثیری منفی بر آن دارد. دوگان و همکاران (۲۰۲۲)^۵، در مطالعه‌ای کشورهای جی ۷ و ای ۷ را در بازه زمانی ۱۹۹۱-۲۰۱۷ با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی پویا (DOLS)^۶ و رگرسیون همگرایی کانونی (CCR)^۷ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پیچیدگی اقتصادی در بلندمدت اگر همراه با نوآوری زیست محیطی باشد می‌تواند شدت انرژی و شدت کربن را کاهش و به توسعه اقتصادی کمک کنند.

پین و همکاران (۲۰۲۳)^۸، در مطالعه‌ای تأثیر پیچیدگی اقتصادی و ریسک امنیت انرژی را بر بهره‌وری انرژی، بر روی ۲۵ کشور و با استفاده از روش کوانتیل^۹ پنبلی بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که افزایش پیچیدگی اقتصادی از طریق کاهش شدت انرژی و شدت کربن موجب افزایش بهره‌وری می‌شود و همچنین در مقابل، افزایش ریسک امنیت انرژی شدت انرژی را افزایش می‌دهد.

لیو و همکاران (۲۰۲۳)^{۱۰}، در مطالعه‌ای کشور چین را در بازه زمانی ۲۰۰۲-۲۰۱۹ با استفاده از داده‌های تابلویی مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که مصرف انرژی تجدیدپذیر می‌تواند شدت کربن و انتشار کربن را به طور قابل توجهی کاهش دهد.

بروزان (۲۰۲۴)^{۱۱}، در مطالعه خود کشورهای اتحادیه اروپا را در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۱ مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل از تخمین گر گروه میانگین افزوده و تخمین گر گروه اثرات همبسته مشترک پویای جدید نشان داد که ریسک امنیت انرژی موجب افزایش انتشار دی‌اکسید کربن در بلندمدت می‌شود.

-
1. Seri & Fernandez (2021)
 2. Ali et al. (2022)
 3. Uvcn
 4. Lee & Wang (2022)
 5. Dogan et al. (2022)
 6. Dynamic Ordinary Least Squares (DOLS)
 7. Canonical Cointegrating Regression (CCR)
 8. Payne et al. (2023)
 9. Quantile Regression
 10. Liu et al. (2023)
 11. Borozan (2024)

بات و چاودا (۲۰۲۵)^۱، در مطالعه خود کشور هند را در بازه زمانی ۱۹۹۵-۲۰۲۱ با استفاده از روش خودتوضیح با وقفه‌های گسترده (ARDL) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش پیچیدگی‌های اقتصادی باعث کاهش اثرات زیست‌محیطی در بلندمدت می‌شود و شدت انرژی یکی از عوامل تخریب محیط است؛ بنابراین افزایش پیچیدگی اقتصادی به طور غیرمستقیم شدت انرژی را کاهش می‌دهد.

آیدین و همکاران (۲۰۲۵)^۲، در پژوهشی در ایالات متحده آمریکا در دوره زمانی ۱۹۹۰-۲۰۱۹ با استفاده از روش خودتوضیح با وقفه‌های گسترده (ARDL) نشان می‌دهند که ریسک امنیت انرژی، شدت انرژی را کاهش می‌دهد در حالی که منابع طبیعی و رشد اقتصادی آن را افزایش می‌دهند.

۲-۳. نوآوری پژوهش

آنچه در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است، بررسی هم‌زمان تأثیر پیچیدگی اقتصادی و ریسک امنیت انرژی بر کارایی انرژی در ایران است. موضوعی که تاکنون در ادبیات داخلی و بین‌الملل کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به پژوهش‌های قبلی که عمدتاً به بررسی تأثیر متغیرهایی مانند رشد اقتصادی و مصرف انرژی پرداخته‌اند، این تحقیق با بهره‌گیری از روش حداقل مربعات معمولی کاملاً اصلاح شده (FMOLS)، رابطه بلندمدت میان متغیرهای ساختاری و انرژی محور را در بستری متفاوت مورد ارزیابی قرار می‌دهد. بسیاری از پژوهش‌های مشابه در کشورهای سازمان توسعه و همکاری اقتصادی انجام شده است؛ اما در این مطالعه با تمرکز بر کشور ایران به‌عنوان نمونه‌ای با ویژگی‌های منحصر به فرد در زمینه اقتصاد انرژی، ارزش سیاست‌گذاری و کاربردی مطالعه را افزایش داده است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

هدف از این پژوهش تأثیر پیچیدگی‌های اقتصادی و ریسک امنیت انرژی بر کارایی انرژی در کشور ایران با استفاده از روش رگرسیون حداقل مربعات کاملاً اصلاح شده طی دوره زمانی ۱۳۷۴-۱۴۰۲ (۱۹۹۵-۲۰۲۳) است. از این روش جهت برآورد روابط بلندمدت بین متغیرهای هم‌انباشته استفاده می‌شود. این روش نخستین بار توسط فیلیپس و هانسن (۱۹۹۰) معرفی و به‌گونه‌ای طراحی شده است که تورش ناشی از هم‌انباشتگی و همچنین ناهمسانی واریانس و خودهمبستگی جملات خطا را اصلاح می‌کند. در تخمین روابط بلندمدت، روش حداقل مربعات معمولی دچار سوگیری می‌شود، زیرا متغیرهای هم‌انباشته غالباً با جملات خطا همبسته‌اند. این روش با اعمال اصلاحات نیمه پارامتریک در ضرایب، مشکل را برطرف کرده و برآوردهای سازگار و کارای آماری ارائه می‌دهد. این روش یک روش ناپارامتریک است که همبستگی احتمالی بین اجزای خطای مدل و تفاضل مرتبه اول متغیرهای توضیحی با وجود ضریب ثابت، به‌منظور تصحیح خودهمبستگی سریالی را مورد محاسبه قرار می‌دهد و تخمین‌زن حداقل مربعات معمولی را به‌صورت ناپارامتریکی تصحیح می‌کند. سیستم هم‌انباشتگی به‌صورت روابط ۱ و ۲ نشان داده می‌شود.

1. Bhatt & Chavda (2025)

2. Aydin et al. (2025)

$$y_{it} = \beta_0 + X_{it}\beta_1 + \vartheta_{it} \quad (1)$$

$$x_{it} = X_{it-1} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

در اینجا روند بردار خطا $\xi_{it} = (\vartheta_{it}, \varepsilon_{it})$ یک روند ایستا است باتوجه به ماتریس کوواریانس که توسط Ω_i نشان داده می‌شود (Philips & Hansen, 1990).

جهت دستیابی به هدف پژوهش، از عوامل تعیین‌کننده کارایی انرژی که توسط فیلیپوویچو همکاران (۲۰۱۵)^۱ و پاراماتی و همکاران (۲۰۲۲)^۲ ارائه شده، استفاده شده است. در این مطالعه، در خصوص عوامل تعیین‌کننده کارایی انرژی (EFF)، علاوه بر عوامل سنتی مانند انرژی تجدیدپذیر (REN)، تجارت بین‌الملل (OPE) و تولید ناخالص داخلی (GDP)، دو متغیر جدید پیچیدگی اقتصادی (ECI) و ریسک امنیت انرژی (ESR) نیز وارد مدل شده است. اگرچه این دو عامل به‌عنوان عوامل بالقوه اثرگذار بر کارایی انرژی در نظر گرفته می‌شوند، اما شواهد تجربی در مورد تأثیر آنها تاکنون محدود بوده است؛ بنابراین، باتوجه به ادبیات موجود، مدل تجربی به‌صورت رابطه (۳) ارائه شده است.

$$EFF = f(ECI, ESR, REN, OPE, GDP) \quad (3)$$

جدول ۱: تعریف و منبع متغیرهای پژوهش

منبع	تعریف	نماد	متغیر
WDI ⁴	سطح شدت انرژی انرژی اولیه ^۳ ، نسبت بین عرضه انرژی و تولید ناخالص داخلی است که بر اساس برابری قدرت خرید اندازه‌گیری می‌شود. شدت انرژی نشانه‌ای از میزان انرژی مورد استفاده برای تولید یک واحد خروجی اقتصادی است. نسبت پایین‌تر نشان می‌دهد که انرژی کمتری برای تولید یک واحد خروجی استفاده می‌شود.	ENE	کارایی انرژی
WDI	شدت دی‌اکسیدکربن (کیلوگرم به‌ازای مصرف انرژی معادل نفت خام): انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف سوخت جامد عمدتاً به انتشار گازهای ناشی از استفاده از زغال سنگ به عنوان منبع انرژی اشاره دارد.	CO2	کارایی انرژی
Harvsrd CID	این شاخص بر اساس تنوع و فراگیری کالاهای تولید شده در یک کشور ساخته می‌شود.	ECI	پیچیدگی اقتصادی
Business Monitor index ⁵	این شاخص با مقایسه آسیب‌پذیری کشورها در برابر نوسانات جهانی انرژی، میزان ریسک انرژی را می‌سنجد و مشخص می‌کند که هر چه امتیاز شاخص پایین‌تر باشد ریسک امنیت انرژی کمتر و هر چه بالاتر باشد، ریسک امنیت انرژی بیشتر است.	ESR	ریسک امنیت انرژی
WDI	مصرف انرژی تجدیدپذیر (درصدی از مصرف نهایی کل انرژی)	REN	مصرف انرژی تجدیدپذیر
WDI	درجه باز بودن تجاری (مجموع صادرات و واردات کالا و خدمات، درصدی از تولید ناخالص داخلی)	OPE	درجه باز بودن تجاری
WDI	تولید ناخالص داخلی (برحسب دلار ثابت آمریکا ۲۰۱۵)	GDP	تولید ناخالص داخلی

1. Filipovich et al. (2015)

2. Paramati et al. (2022)

3. Energy intensity level of primary energy (MJ/\$2017 PPP GDP)

4. World Development Indicators

5. BMI Country Risk And Industry Research

در این مطالعه، برای تصریح مدل باتوجه به مطالعه پین و همکاران (۲۰۲۳) از دو شاخص شدت انرژی و شدت کربن به عنوان جانشین‌های کارایی انرژی استفاده می‌کند. شاخص اول، میزان انرژی اولیه مصرف شده برای تولید یک واحد محصول را اندازه‌گیری می‌کند. در حالی که شاخص دوم نشان‌دهنده میزان انتشار کربن به ازای مصرف انرژی است؛ بنابراین، معادله (۳) به صورت معادلات (۴) و (۵) تبدیل شده است.

$$ENE_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 ECI_{it} + \alpha_2 ESR_{it} + \alpha_3 REN_{it} + \alpha_4 OPE_{it} + \alpha_5 GDP_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

$$CO_{2it} = \gamma_0 + \gamma_1 ECI_{it} + \gamma_2 ESR_{it} + \gamma_3 REN_{it} + \gamma_4 OPE_{it} + \gamma_5 GDP_{it} + \mu_{it} \quad (5)$$

در این مطالعه تمامی متغیرها از سایت بانک جهانی و متغیر پیچیدگی اقتصادی از سایت اطلس پیچیدگی اقتصادی که توسط مرکز توسعه بین‌المللی دانشگاه هاروارد محاسبه می‌شود، و متغیر ریسک امنیت انرژی از مؤسسه تحلیل و تحقیق اقتصادی و مالی استخراج شده است. همچنین از تمامی متغیرها به غیر از شاخص پیچیدگی اقتصادی لگاریتم گرفته شده است. متغیرها و منابع داده‌های پژوهش در جدول (۱) تعریف شده است.

۴. یافته‌های پژوهش

۴-۱. آمار توصیفی

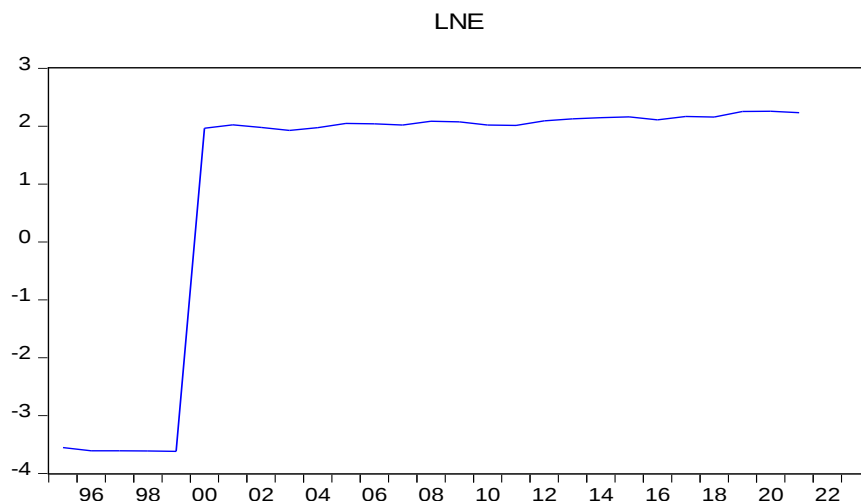
یافته‌های توصیفی داده‌های مورد مطالعه در جدول (۲) گزارش شده است. باتوجه به نتایج، میانگین انتشار کربن حدود ۵/۰۶ میلیون تن در سال بوده و انحراف معیار آن ۱/۴۳ است که نشان‌دهنده معیاری نسبتاً بالا و نوسانات شدیدی در انتشار کربن در این دوره است. میانگین پیچیدگی اقتصادی در ایران ۰/۶۸- است که از نظر پیچیدگی تولیدی در رده پایین‌تری نسبت به میانگین جهانی قرار دارد. حداقل آن برابر با ۱/۳۲- و حداکثر امتیاز پیچیدگی برابر با ۰/۱۹- است. میانگین ریسک امنیت انرژی برابر ۱۴۷۰ واحد است. حداقل آن برابر با ۱۱۴۲/۹۶ و حداکثر آن برابر با ۱۷۵۵/۰۳ برآورد است که نشان‌دهنده این است که امنیت انرژی ایران به مرور در حال افزایش بوده است. میانگین تولید ناخالص داخلی ۴۶۶۳ میلیارد دلار برحسب قدرت خرید است. بیشترین مقدار ۵۳۸۱ و کمترین مقدار برابر ۳۴۹۲، یعنی در طول دوره رشد قابل توجهی داشته است. میانگین مصرف انرژی تجدیدپذیر ۰/۹۰ است. حداقل آن برابر با ۶۰/۲۳ و حداکثر آن برابر با ۷۶/۳۷ است که نشان‌دهنده این است که ایران سهم بسیار کمی از انرژی تجدیدپذیر دارد. میانگین درجه باز بودن اقتصاد ۵/۶۹ است که حداقل آن برابر با ۳/۴۹ و حداکثر آن برابر با ۸/۰۵ است.

شکل (۱) نمودار روند شدت انرژی طی دوره مطالعه در ایران را تصویر کرده است. شدت انرژی در ایران طی دوره زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۳ روندی پرنوسان اما عمدتاً صعودی داشته است. در اواخر ۱۹۹۸ یک جهش قابل توجه مشاهده می‌شود که پس از آن، شاخص در سطحی بالاتر تثبیت شده است. این وضعیت نشان می‌دهد که مصرف انرژی برای تولید هر واحد محصول یا درآمد در اقتصاد ایران نسبت به ابتدای دوره به شدت افزایش یافته و به عبارتی، بهره‌وری انرژی در سطح پایینی قرار داشته است. در سال‌های پایانی شدت انرژی همچنان در سطح بالایی باقی مانده است که بیانگر استمرار اتکای اقتصاد ایران به مصرف انرژی فسیلی و عدم بهبود محسوس کارایی انرژی است.

جدول ۲: آمار توصیفی متغیرها

متغیر	نماد	میانگین	میانه	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	مشاهدات
شدت دی‌اکسیدکربن	CO2	۵/۰۶	۵/۲۳	۷/۱۰	۲/۶۷	۱/۴۳	۲۷
سطح شدت اولیه انرژی	ENE	۶/۵۸	۷/۶۹	۹/۵۴	۰/۰۲۶	۲۷۶/۵	۲۷
پیچیدگی اقتصادی	ECI	-۰/۶۸	-۰/۷۵	-۰/۱۹۰	-۱/۳۲	۲/۶۱	۲۷
ریسک امنیت انرژی	ESR	۱۴۷۰/۱۴	۱۴۹۵/۹	۱۷۵۵/۰۳	۱۱۴۲/۹۶	۹۳۳۸۸۷۸	۲۷
مصرف انرژی تجدیدپذیر	REN	۰/۹۰	۰/۹۰	۷۶/۳۷	۶۰/۲۳	۱/۳۸	۲۷
درجه باز بودن تجاری	OPE	۵/۶۹	۵/۳۴	۸/۰۵	۳/۴۹	۵/۳۱	۲۷
تولید ناخالص داخلی	GDP	۴۶۶۳/۹	۴۹۵۲/۷	۵۳۸۱/۱۸	۳۴۹۲/۱۷	۱۰۲۵۷۲۱۷	۲۷

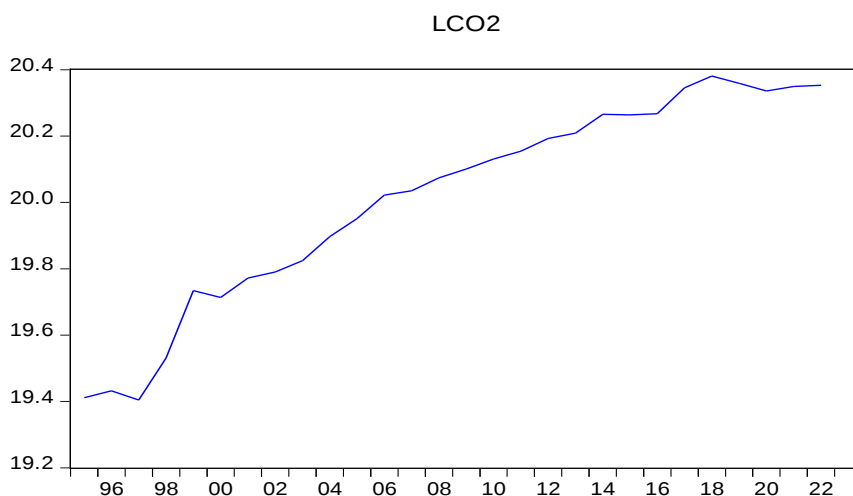
منبع: یافته‌های پژوهش



شکل ۱: نمودار روند شاخص شدت انرژی طی دوره مطالعه در ایران

منبع: یافته‌های پژوهش

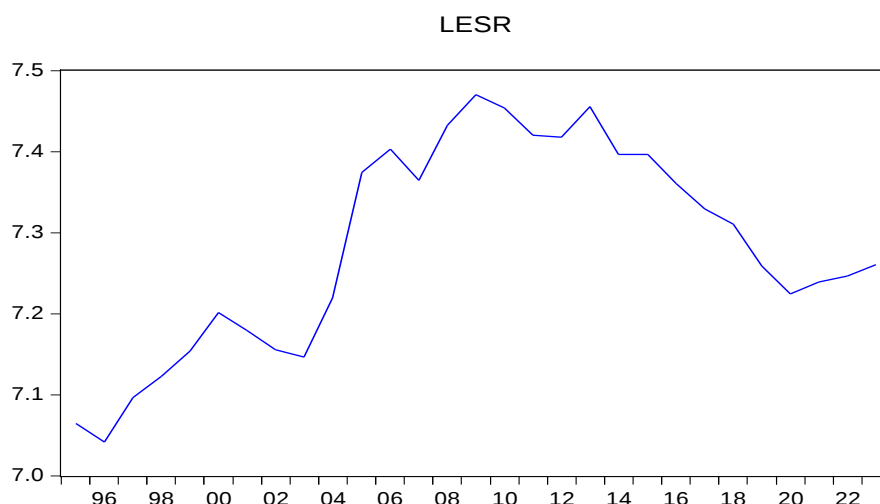
روند انتشار کربن در ایران طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۳ در نمودار شکل (۲) نشان‌دهنده یک مسیر عمدتاً صعودی است. در سال‌های ابتدایی سطح انتشار پایین‌تر بوده، اما با رشد اقتصادی مبتنی بر مصرف بالای انرژی‌های فسیلی و افزایش تقاضای داخلی، این شاخص به‌مرور روندی افزایشی را تجربه کرده است. در دهه ۲۰۰۰ به‌ویژه حوالی ۲۰۱۰، شتاب رشد انتشار کربن بیشتر شده که می‌تواند به دلیل توسعه صنایع انرژی بر، یارانه‌های سوخت‌های فسیلی و گسترش شهرنشینی باشد. هرچند در برخی سال‌ها نوساناتی مشاهده می‌شود، اما کلیت مسیر نشان‌دهنده این است که کشور در طول زمان با افزایش انتشار کربن مواجه بوده است. این روند هم‌راستا با شدت وابستگی به انرژی‌های فسیلی است و نشان می‌دهد که ساختار تولیدی و مصرفی ایران همچنان بر منابع پر کربن متکی است. ازسوی دیگر، سرعت پایین توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و محدودیت‌های فناورانه سبب شده‌اند که مسیر انتشار کربن روندی کاهشی نداشته باشد.



شکل ۲: نمودار روند شاخص شدت کربن طی دوره مطالعه در ایران

منبع: یافته‌های پژوهش

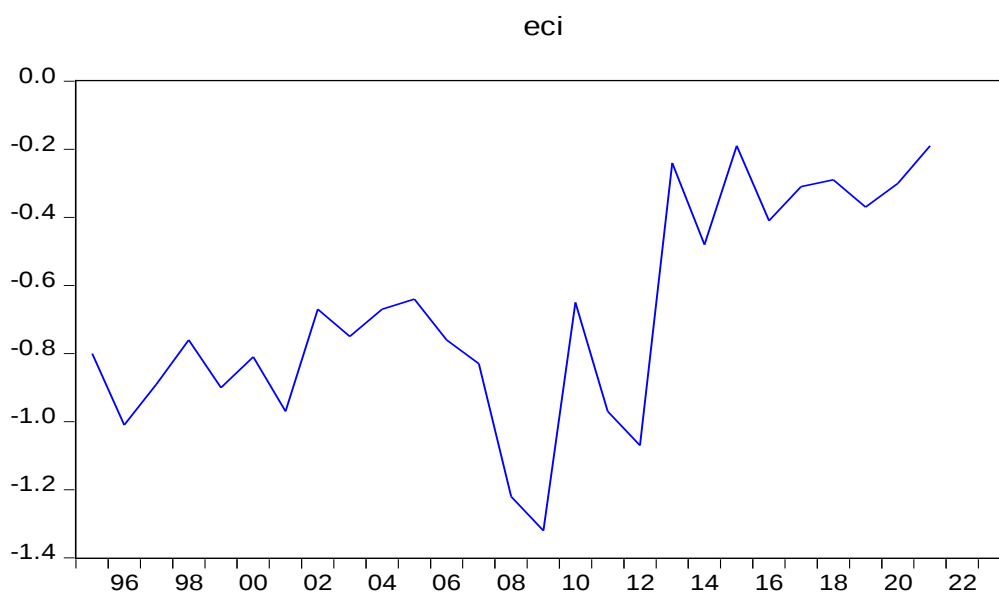
شکل (۳) نمودار روند شاخص ریسک امنیت انرژی را نشان می‌دهد. بر اساس نمودار روند شاخص ریسک امنیت انرژی طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۳، مشاهده می‌شود که مقدار این شاخص در ابتدای دوره در سطح پایین‌تری قرار داشته و سپس تا حدود سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۲ روندی افزایشی را تجربه کرده است. افزایش این شاخص در این سال‌ها نشان‌دهنده تشدید ریسک و شکنندگی در عرضه انرژی کشور است؛ به بیانی دیگر، مقدار بالاتر شاخص به معنای کاهش امنیت انرژی است. پس از این دوره، شاخص روندی نزولی به خود گرفته و در سال‌های پایانی دوباره به سمت افزایش خفیف حرکت کرده است. این نوسانات نشان می‌دهد که در سال‌هایی که ریسک امنیت انرژی افزایش یافته، فشار بیشتری بر سیاست‌گذاری و مصرف انرژی کشور وارد شده است. همین مسئله باعث می‌شود شدت انرژی (به‌عنوان شاخص کارایی) تحت تأثیر قرار گیرد و کاهش یابد.



شکل ۳: نمودار روند شاخص ریسک امنیت انرژی طی دوره مطالعه در ایران

منبع: یافته‌های پژوهش

بررسی روند شاخص پیچیدگی اقتصادی ایران طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۳ در نمودار شکل (۳) نشان می‌دهد که این شاخص در بیشتر سال‌ها مقادیری منفی داشته و بیانگر ساختار اقتصادی مبتنی بر کالاهای اولیه و صنایع کم پیچیدگی است. طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ این شاخص افت محسوسی را تجربه کرده است که این امر ممکن است ناشی از محدودیت‌های تجاری و تحریم‌های اقتصادی باشد. از سال ۲۰۱۳ به بعد روند شاخص روبه‌بهبود بوده و در برخی سال‌ها به آستانه صفر نزدیک شده است. این امر نشان‌دهنده حرکت تدریجی اقتصاد به سمت تنوع بیشتر و افزایش سهم صنایع نسبتاً پیچیده‌تر است، هر چند همچنان فاصله قابل توجهی با کشورهای دارای ساختار تولید پیشرفته وجود دارد.



شکل ۴: نمودار روند شاخص پیچیدگی اقتصادی طی دوره مطالعه در ایران

منبع: یافته‌های پژوهش

۲-۴. آزمون ریشه واحد (مانایی)

یکی از مهم‌ترین پیش‌شرط‌ها در تحلیل‌های اقتصادسنجی سری زمانی، بررسی مانایی متغیرهای پژوهش است. یک سری زمانی، زمانی مانا تلقی می‌شود که میانگین، واریانس و کوواریانس آن در طول زمان ثبات و مستقل از زمان باشد. عدم مانایی داده‌ها می‌تواند منجر به رگرسیون کاذب شود. در این مطالعه جهت بررسی آزمون مانایی متغیرها از آزمون ریشه واحد دیکی فولر تعمیم یافته (ADF) استفاده شده است. به‌منظور اطمینان از صحت نتایج، آزمون‌های مانایی هم در سطح و هم در تفاضل مرتبه اول برای تمامی متغیرها اجرا شده است. نتایج این آزمون در جدول (۳) آورده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که فرضیه صفر مبنی بر وجود ریشه واحد در سطح رد نشده به عبارت دیگر متغیرها در سطح مانا نیستند. در نتیجه نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که تمامی متغیرها با یک‌بار تفاضل‌گیری مانا هستند و فرضیه صفر (وجود ریشه واحد) برای تمام متغیرها در سطح ۱ درصد رد شده است.

جدول ۳: نتایج آزمون ریشه واحد دیکی – فولر تعمیم یافته (ADF)

متغیر	ADF در سطح	ADF در تفاضل مرتبه اول	مقادیر بحرانی در سطوح			مرتبه مانایی	وضعیت
			۱ درصد	۵ درصد	۱۰ درصد		
سطح شدت اولیه انرژی	-۲/۱۵	-۳/۵۰	-۳/۳۷	-۲/۹۹	-۲/۶۳	I(1)	عرض از مبدأ
شدت دی‌اکسیدکربن	-۲/۱۶	-۴/۵۷	-۳/۷۱	-۲/۹۸	-۲/۶۲	I(1)	عرض از مبدأ
پیچیدگی اقتصادی	-۲/۶۶	-۷/۵۱	-۳/۷۲	-۲/۹۸	-۲/۶۳	I(1)	عرض از مبدأ
ریسک امنیت انرژی	-۲/۲۵	-۳/۷۷	-۳/۶۹	-۲/۹۷	-۲/۶۲	I(1)	عرض از مبدأ
مصرف انرژی تجدیدپذیر	-۲/۳۳	-۴/۶۳	-۳/۷۲	-۲/۹۸	-۲/۶۳	I(1)	عرض از مبدأ
درجه بازبودن تجارت	-۲/۱۶	-۲/۱۰	-۲/۶۵	-۱/۹۵	-۱/۶۰	I(1)	عرض از مبدأ
تولید ناخالص داخلی	-۱/۶۷	-۴/۵۸	-۳/۶۹	-۲/۹۷	-۲/۶۲	I(1)	عرض از مبدأ

منبع: یافته‌های پژوهش

۴-۳. آزمون هم‌انباشتگی

به‌منظور تعیین بردارهای هم‌انباشتگی میان متغیرها، از آزمون جوهانسن استفاده شده است. این آزمون بر اساس دو آزمون اثر و حداکثر مقدار ویژه انجام می‌شود. آزمون اثر به طور تجمعی تعداد بردارهای هم‌انباشتگی را بررسی می‌کند، درحالی‌که آماره حداکثر مقدار ویژه وجود یک بردار اضافی را در هر گام آزمون می‌کند. همچنین برای اجرای آزمون هم‌انباشتگی تعداد وقفه‌های پایه پیش از آزمون با استفاده از معیار شوارتز (SC) تعیین شد. مقادیر آزمون برای وقفه‌های ۰ تا ۲ محاسبه و کمترین مقدار آن برابر با ۲۲/۸۶- برای وقفه یک به دست آمد و به‌عنوان وقفه بهینه انتخاب شد. نتایج آزمون هم‌انباشتگی جوهانسن در جداول (۴) گزارش شده است.

جدول ۴: آزمون هم‌انباشتگی جوهانسن در مدل‌های پژوهش

آزمون حداکثر مقدار ویژه (max)				آزمون ماتریس اثر (Trace)				فرضیه صفر
سطح احتمال	مقدار بحرانی	آماره (max)	مقدار ویژه	سطح احتمال	مقدار بحرانی	آزمون اثر (Trace)	مقدار ویژه	
مدل (۱) وابسته: شدت انرژی								
۰/۰۰	۴۶/۲۳	۵۶/۲۱	۰/۸۹۴	۰/۰۰	۱۲۵/۶۱	۱۷۸/۹۷	۰/۸۹۴	سطح
۰/۰۴	۴۰/۰۷	۴۰/۷۹	۰/۸۰۴	۰/۰۰	۹۵/۷۵	۱۲۲/۷۵	۰/۸۰۴	حداکثر بردار ۱
۰/۱۱	۳۳/۸۷	۳۰/۶۷	۰/۷۰۶	۰/۰۰	۶۹/۸۱	۸۱/۹۵	۰/۷۰۶	حداکثر بردار ۲
-	-	-	-	۰/۰۲	۴۷/۸۵	۵۱/۲۷	۰/۵۸۵	حداکثر بردار ۳
-	-	-	-	۰/۰۵	۲۹/۷۹	۲۹/۲۷	۰/۵۲۵	حداکثر بردار ۴
مدل (۲) وابسته: شدت کربن								
۰/۰۰	۴۰/۹۵	۴۹/۱۸	۰/۸۶۰	۰/۰۰	۱۰۳/۸۴	۱۴۷/۷۴	۰/۸۶۰	سطح
۰/۰۰	۳۴/۸۰	۴۳/۱۳	۰/۸۲۱	۰/۰۰	۷۶/۹۷	۹۸/۵۶	۰/۸۲۱	حداکثر بردار ۱
۰/۲۷	۲۸/۵۸	۲۱/۹۶	۰/۵۸۴	۰/۰۳	۵۴/۰۷	۵۵/۴۲	۰/۵۸۴	حداکثر بردار ۲
-	-	-	-	۰/۰۷	۳۵/۱۹	۳۳/۴۶	۰/۴۲۶	حداکثر بردار ۳

منبع: یافته‌های پژوهش

نتایج آزمون اثر و حداکثر مقدار آزمون هم انباشتگی جوهانسن در جداول نشان می‌دهد که در سطح اطمینان ۰/۹۵، فرض صفر مبنی بر عدم وجود بردار هم انباشتگی رد می‌شود. براین اساس، وجود ۱ بردار هم انباشتگی تأیید می‌شود. این امر بیان می‌کند که یک رابطه بلندمدت میان متغیرهای وابسته (شدت انرژی و انتشار کربن) و سایر متغیرهای مستقل وجود دارد.

۴-۴. نتایج بر آورد مدل به روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح شده (FMOLS)

هدف از استفاده این روش در پژوهش حاضر، برآورد روابط بلندمدت میان پیچیدگی اقتصادی، ریسک امنیت انرژی و شاخص‌های کارایی انرژی است. با توجه به اینکه متغیرهای مدل نامانا در سطح و مانا در تفاضل مرتبه اول هستند و آزمون هم جمعی وجود یک رابطه بلندمدت را تأیید کرده است، لازم است از روشی استفاده شود که بتواند برآوردی سازگار و بدون تورش ارائه دهد. این روش دقیقاً برای چنین شرایطی مناسب بوده و با رفع مشکل ناهمسانی و خودهمبستگی در خطاها، می‌تواند تخمینی دقیق از ضرایب بلندمدت فراهم کند. مزیت اصلی روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح شده (FMOLS) نسبت به روش حداقل مربعات معمولی (OLS) آن است که مشکلات خودهمبستگی جملات اخلاص و درون‌زایی متغیرهای توضیحی را اصلاح می‌کند و برآوردگرهای سازگار و کارایی ضرایب بلندمدت ارائه می‌دهد. بنابراین، به منظور بررسی رابطه بلندمدت میان متغیرها، از روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح شده (FMOLS) استفاده شده است. همچنین با انتخاب وقفه یک بر اساس معیار اطلاعاتی شوارتز، ضرایب مدل تخمین زده شده‌اند.

نتایج حاصل از جدول (۵) نشان می‌دهد که پیچیدگی اقتصادی یک رابطه مثبت و معناداری با شدت انرژی دارند. یعنی افزایش یک درصدی پیچیدگی اقتصادی شدت انرژی را ۲/۶۴ درصد افزایش می‌دهد. همچنین افزایش یک درصدی ریسک امنیت انرژی، شدت انرژی را ۱/۴۷- درصد کاهش می‌دهد. این امر به دلیل قرار گرفتن کشور ایران در مراحل اولیه توسعه اقتصادی و راه‌اندازی صنایع پیچیده انرژی بر و سعی در مصرف بهینه انرژی است. به‌طور کلی اگرچه پیچیدگی اقتصادی در بلندمدت می‌تواند منجر به بهره‌وری شود، اما در مراحل ابتدایی کشور با افزایش مصرف انرژی مواجه می‌شوند. این امر ممکن است به دلیل ساختار انرژی بر صنایع نوظهور و فناوری‌های ناکارآمد در مراحل اولیه صنعتی شدن است. افزایش ریسک امنیت انرژی کشور را وادار می‌کند که مصرف انرژی را بهینه کند. این امر برای تحول ساختار مصرف انرژی جهت رسیدن به بهره‌وری بالاتر ضروری است. افزایش درجه باز بودن تجارت موجب افزایش شدت انرژی می‌شود. باز بودن تجارت معمولاً فعالیت‌های اقتصادی و صادرات - واردات بیشتر کالا و انرژی را تحریک می‌کند که این امر مصرف انرژی به‌ازای تولید را افزایش می‌دهد. افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر شدت انرژی را کاهش می‌دهد. استفاده بیشتر از این انرژی‌ها به افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی منجر می‌شود، بنابراین شدت انرژی کاهش پیدا می‌کند. همچنین رابطه منفی و معنادار رشد اقتصادی با شدت انرژی بیانگر آن است که اقتصاد در بلندمدت تا حدی توانسته است از الگوی رشد مبتنی بر مصرف گسترده فاصله گرفته و با تغییرات ساختاری و بهبود نسبی بهره‌وری، رشد اقتصادی را با مصرف انرژی کمتر دنبال کند.

جدول ۵: نتایج برآورد مدل به روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح‌شده (متغیر وابسته: شدت انرژی)

متغیرها	ضریب	خطای انحراف معیار	آماره t	سطح احتمال
پیچیدگی اقتصادی	۲/۶۴	۰/۱۰	۲۶/۴۱	۰/۰۰
لگاریتم ریسک امنیت انرژی	-۱/۴۷	۰/۳۲۱	-۴/۵۸	۰/۰۰
لگاریتم تولید ناخالص داخلی	۱۲/۶۱	۰/۳۱۶	۳۹/۸۱	۰/۰۰
لگاریتم درجه بازبودن تجارت	۴/۲۳	۰/۱۲۵	۳۳/۶۶	۰/۰۰
لگاریتم مصرف انرژی تجدیدپذیر	-۳/۰۰	۰/۰۸	-۳۴/۰۲	۰/۰۰
ضریب ثابت	۰/۸۰	-	-	-
آزمون‌های تشخیصی				
نرمالیتی	-	-	-	۰/۸۵
خودهمبستگی	-	-	-	۰/۲۰
ناهمسانی واریانس	-	-	-	۰/۳۵

منبع: یافته‌های پژوهش

جدول ۶: نتایج برآورد مدل به روش حداقل مربعات کاملاً اصلاح‌شده (متغیر وابسته: شدت کربن)

متغیرها	ضریب	خطای انحراف معیار	آماره t	سطح احتمال
پیچیدگی اقتصادی	۰/۱۴۲	۰/۰۴۴	۳/۲۳	۰/۰۰
لگاریتم ریسک امنیت انرژی	۰/۳۷۷	۰/۱۴۱	۲/۶۶	۰/۰۱
لگاریتم تولید ناخالص داخلی	۱/۹۳۶	۰/۱۳۹	۱۳/۸۷	۰/۰۰
لگاریتم درجه باز بودن تجارت	-۰/۲۳۶	۰/۰۵۵	-۴/۲۷	۰/۰۰
لگاریتم مصرف انرژی تجدیدپذیر	-۰/۱۶۶	۰/۰۳	-۴/۲۷	۰/۰۰
ضریب ثابت	۰/۹۵	-	-	-
آزمون‌های تشخیصی				
نرمالیتی	-	-	-	۰/۵۷
خودهمبستگی	-	-	-	۰/۹۱
ناهمسانی واریانس	-	-	-	۰/۳۶

منبع: یافته‌های پژوهش

باتوجه به نتایج حاصل از جدول (۶)، ریسک امنیت انرژی و پیچیدگی اقتصادی یک رابطه مثبت و معناداری با شدت انتشار کربن دارند. افزایش یک‌درصدی پیچیدگی اقتصادی و ریسک امنیت انرژی به ترتیب انتشار کربن را ۰/۱۴۲ و ۰/۳۷۷ درصد افزایش می‌دهد؛ به‌طور کلی، پیچیدگی اقتصادی در مراحل اولیه می‌تواند منجر به افزایش انتشار کربن شود. اما با گذر زمان و استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌تر این نتایج ممکن است نتیجه عکس

داشته باشد. استفاده از منابع آلاینده و ناکارآمد داخلی موجب شده است که دولت‌ها جهت حفظ عرضه به سوخت‌های فسیلی روی آورند. همچنین نتایج فوق نشان می‌دهد که تولید ناخالص داخلی اثر مثبت و معناداری بر انتشار کربن دارد. بدین معنا که رشد اقتصادی همچنان متکی بر مصرف انرژی‌های فسیلی بوده و موجب افزایش آلاینده‌های کربنی شده است. در مقابل، باز بودن تجارت اثر منفی و معناداری بر شدت انتشار کربن دارد؛ به گونه‌ای که افزایش تجارت خارجی از طریق واردات فناوری‌های پاک‌تر و ارتقای استانداردهای زیست‌محیطی، به کاهش آلودگی کمک کرده است. این امر نشان می‌دهد که تعاملات بین‌المللی می‌تواند نقش مثبتی در کاهش آثار زیست‌محیطی رشد اقتصادی ایفا کند. افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر باعث کاهش شدت انتشار کربن می‌شود. استفاده از این انرژی‌ها موجب کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و گازهای گلخانه‌ای می‌شود.

ضریب تعیین مدل اول برابر $0/80$ و مدل دوم $0/95$ است که نشان می‌دهد که مدل دوم قدرت توضیح‌دهندگی بسیار بالاتری نسبت به مدل اول دارد. به بیان دیگر، حدود 80 درصد از تغییرات متغیر وابسته در هر دو مدل توسط متغیرهای مستقل توضیح داده شده است. نتایج آزمون‌های تشخیص برای مدل حداقل مربعات کاملاً اصلاح‌شده برای هر دو معادله در انتهای جداول 5 و 6 آورده شده است. به‌منظور بررسی نرمال بودن جملات اخلال از آزمون جاک برا استفاده شد. نتایج نشان داد که در جدول 5 مقدار احتمال $0/85$ و در جدول 6 مقدار احتمال آن برابر با $0/57$ است که در نتیجه بزرگ‌تر از $0/05$ است؛ بنابراین فرضیه صفر مبنی بر نرمال بودن توزیع اخلال‌ها رد نمی‌شود و توزیع باقیمانده‌ها در هر دو مدل مورد مطالعه نرمال است. همچنین نتایج آزمون خودهمبستگی نشان می‌دهد که در جدول 5 و 6 مقدار احتمال به ترتیب در مدل‌های مورد بررسی برابر $0/20$ و $0/91$ است که در نتیجه از $0/05$ بزرگ‌تر است؛ بنابراین فرضیه صفر مبنی بر نبود خودهمبستگی رد نمی‌شود و فاقد خودهمبستگی است. نتایج حاصل از آزمون ناهمسانی واریانس نشان می‌دهد که در جدول 5 و 6 این نتایج به ترتیب برابر $0/35$ و $0/36$ است که این مقدار از $0/05$ بزرگ‌تر بوده و فرضیه صفر رد نمی‌شود و هر دو مدل فاقد مشکل ناهمسانی واریانس است؛ بنابراین باقیمانده‌ها نرمال بوده و مدل مشکل خودهمبستگی و ناهمسانی واریانس ندارد. همچنین، بررسی تورم واریانس نشان می‌دهد که میان متغیرها هم‌خطی وجود ندارد. نتایج تورم واریانس در جدول 7 آورده شده است.

جدول ۷: نتایج آزمون هم‌خطی تورم واریانس (VIF) بین متغیرها

متغیرها	مقدار VIF
پیچیدگی اقتصادی	۲/۳۱
لگاریتم ریسک امنیت انرژی	۳/۷۹
لگاریتم تولید ناخالص داخلی	۳/۹۷
لگاریتم درجه باز بودن تجارت	۱/۲۵
لگاریتم مصرف انرژی تجدیدپذیر	۱/۳۵

منبع: یافته‌های پژوهش

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در دهه‌های اخیر، افزایش توجه به بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار کربن، توجه محققان و سیاست‌گذاران را به عوامل اقتصادی و ساختاری مؤثر بر کارایی انرژی جلب کرده است. در این مطالعه دو عامل کلیدی یعنی پیچیدگی اقتصادی و ریسک امنیت انرژی به‌عنوان متغیرهای اصلی تحلیل شده‌اند تا نقش آنها در شکل‌دهی به شدت انرژی و شدت کربن در ایران بررسی شود. پیچیدگی اقتصادی به‌عنوان شاخصی از تنوع و پیشرفته بودن ساختار تولید کشور، معرف ظرفیت اقتصاد برای تولید محصولات متنوع و فناورانه است (Hidaho & Hausmann, 2009). مطالعات اخیر نشان می‌دهند که پیچیدگی اقتصادی می‌تواند اثرات متضادی بر محیط‌زیست داشته باشد؛ برخی کشورها با توسعه فناوری و تولید کالای پیشرفته، کاهش شدت انرژی و انتشار کربن را تجربه کرده‌اند. درحالی‌که در شرایط دیگر، افزایش فعالیت‌های صنعتی پیچیده ممکن است با افزایش مصرف انرژی و انتشار کربن همراه باشند؛ بنابراین، تأثیر پیچیدگی اقتصادی بر کارایی انرژی کشورها، بسته به ساختار اقتصادی و فناوری موجود می‌تواند متفاوت باشد (Ullah & Lin, 2025). ریسک امنیت انرژی نیز یکی دیگر از عوامل مهمی است که هم بر مصرف انرژی و هم بر انتخاب منابع انرژی اثرگذار است. در اقتصادهایی که ریسک امنیت انرژی بالا است، فشار برای مدیریت منابع انرژی و کاهش وابستگی به واردات افزایش می‌یابد که می‌تواند انگیزه‌ای برای ارتقای بهره‌وری انرژی و استفاده از منابع انرژی جایگزین و تجدیدپذیر باشد. ازاین‌رو، تحلیل رابطه میان ریسک امنیت انرژی و کارایی انرژی در ایران، می‌تواند بینش مفیدی برای سیاست‌گذاری در حوزه انرژی و محیط‌زیست فراهم کند. پژوهش حاضر به بررسی تأثیر پیچیدگی اقتصادی و ریسک امنیت انرژی بر شاخص‌های کارایی انرژی در کشور ایران طی بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۳ با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی کاملاً اصلاح شده می‌پردازد.

یافته‌های حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که متغیر ریسک امنیت انرژی رابطه‌ای منفی و معنادار با شدت مصرف انرژی و رابطه‌ای مثبت و معنادار با شدت انتشار کربن دارد. به‌طورکلی، افزایش نااطمینانی در زمینه امنیت انرژی موجب شده مصرف انرژی در اقتصاد بهینه‌تر و کارآمدتر شود که این امر می‌تواند ناشی از اجرای سیاست‌های صرفه‌جویی و مدیریت مصرف انرژی باشد. ازسوی دیگر، رابطه مثبت و معنادار ریسک امنیت انرژی با شدت انتشار کربن نشان‌دهنده تمایل کشور به استفاده از منابع فسیلی در شرایط ناامنی انرژی است. این امر هرچند ممکن است بهبود ظاهری در شدت انرژی ایجاد کند، اما به دلیل افزایش آلاینده‌ها و هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف انرژی‌های فسیلی، بهره‌وری کل اقتصاد را تحت تأثیر منفی قرار می‌دهد. این نتایج با یافته‌های مطالعات بروزان (۲۰۲۴) و آیدین و همکاران (۲۰۲۵) همسو بوده و با نتایج مطالعه پین و همکاران (۲۰۲۳) تفاوت دارد.

براساس نتایج، پیچیدگی اقتصادی رابطه‌ای مثبت و معنادار با شدت انرژی و انتشار کربن در ایران دارد. این به معنای آن است که با افزایش پیچیدگی اقتصادی، میزان مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز افزایش می‌یابد. به این معنی که با افزایش پیچیدگی اقتصادی در کشور به دلیل افزایش تقاضای انرژی منجر به افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن می‌گردد. این یافته می‌تواند نشان‌دهنده آن باشد که رشد تولید و صنعتی‌شدن در کشور با افزایش تقاضای انرژی و وابستگی به منابع انرژی موجود همراه بوده است، به‌ویژه در بخش‌هایی که

تکنولوژی‌های کم‌مصرف یا انرژی‌های پاک هنوز به طور کامل جایگزین نشده‌اند. نتایج این بخش از مطالعه با مطالعات دوگان و همکاران (۲۰۲۲)، فنگ و همکاران (۲۰۲۱) همسو بوده و با مطالعات پین و همکاران (۲۰۲۳) و محمدی و همکاران (۱۴۰۲) همخوانی ندارد. آنها نشان داده‌اند که در کشورهای در حال توسعه و برخی کشورهای صنعتی، افزایش پیچیدگی‌های اقتصادی می‌تواند با افزایش مصرف انرژی همراه باشد؛ خصوصاً زمانی که رشد اقتصادی سریع با بهبود فناوری‌های انرژی بر همراه نباشد. همچنین برخی مطالعات دیگر مانند یولاح و لین (۲۰۲۵)، تأکید کرده‌اند که اثر پیچیدگی اقتصادی بر محیط‌زیست ممکن است در کوتاه‌مدت مثبت و در بلندمدت منفی باشد که نشان‌دهنده ترکیب رشد اقتصادی با سیاست‌های انرژی کارا و پاک است.

مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر نیز رابطه‌ای منفی و معنادار با شدت انرژی و شدت انتشار کربن دارد که نشان‌دهنده افزایش بهره‌وری و کاهش آثار زیست‌محیطی با رشد استفاده از این منابع است. با این حال، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی کشور همچنان پایین بوده و سرمایه‌گذاری‌های لازم برای توسعه این منابع به اندازه کافی صورت نگرفته است؛ بنابراین نمی‌توان این روند را نشانه‌ای از پیشرفت پایدار در این حوزه دانست. این یافته‌ها با نتایج مطالعات لیو و همکاران (۲۰۲۳) و علی و همکاران (۲۰۲۲) هماهنگ است. مهم‌ترین موانع توسعه پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران شامل نبود سازوکار و برنامه‌هایی جهت توسعه، نبود قوانین ملی و محلی در قبال انرژی‌های تجدیدپذیر، ضعف در مدیریت منابع انسانی و موانع انتقال فناوری و تحریم‌های بین‌المللی اشاره کرد. مصرف بی‌رویه انرژی‌های تجدیدناپذیر میزان انتشار کربن و آلودگی زیست‌محیطی را افزایش داده است. برای جلوگیری از این امر می‌بایست سیاست‌هایی در جهت کاهش مصرف این نوع از انرژی و جایگزین نمودن با سایر انرژی‌ها از جمله انرژی‌های تجدیدشونده صورت‌پذیرد. از جمله این سیاست‌ها می‌توان به افزایش بهره‌وری انرژی در تمامی بخش‌های اقتصادی اشاره کرد.

در نهایت، تولید ناخالص داخلی رابطه‌ای منفی و معنادار با شدت انرژی و رابطه‌ای مثبت و معنادار با شدت انتشار کربن دارد. این نتایج بیانگر این است که رشد اقتصادی در ایران با بهبود نسبی کارایی انرژی همراه بوده و اقتصاد توانسته است به‌ازای هر واحد تولید، انرژی کمتری مصرف کند. با این حال نتایج رابطه مثبت و معنادار با شدت انتشار کربن بدین معناست که علی‌رغم کاهش شدت انرژی، اتکای ساختاری اقتصاد ایران به منابع فسیلی موجب افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و گسترش شدت انتشار کربن شده است. به بیانی دیگر، اقتصاد ایران در مسیر رشد اقتصادی توانسته بهبودهایی در بهره‌وری انرژی ایجاد کند، اما این رشد همچنان با افزایش هزینه‌های زیست‌محیطی همراه است. این نتایج با یافته‌های آزگالیوا و همکاران (۲۰۲۰) و سری و همکاران (۲۰۲۱) همسو است. بنابراین، برای بهره‌مندی کامل ایران از مزایای پیچیدگی اقتصادی و افزایش تاب‌آوری انرژی، لازم است کشور به سمت توسعه صنایع فناوری‌محور، سرمایه‌گذاری گسترده در انرژی‌های تجدیدپذیر و تدوین سیاست‌های هوشمندانه مدیریت انرژی حرکت کند. همچنین توسعه بخش فناوری و نوآوری‌های نو و ایجاد بستری مناسب برای تولید و انتقال دانش و فناوری‌های پیشرفته از راه‌های ارتقای پیچیدگی اقتصادی و تنوع‌بخشی فعالیت‌های اقتصادی است.

به‌طور کلی سیاست‌های کشور باید بر چند محور متمرکز شوند: کاهش وابستگی به منابع انرژی خارجی و تقویت زیرساخت‌های پایدار انرژی برای کاهش اثر شوک‌های انرژی، حمایت از صنایع فناوری‌محور و پیچیده همراه با ارتقای بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار کربن، ترویج و تسهیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از طریق مشوق‌های مالی، زیرساخت‌ها و چارچوب قانونی مناسب، طراحی رشد اقتصادی همسو با بهره‌وری انرژی و کاهش آلاینده‌ها از طریق نوآوری و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک. اجرای این سیاست‌ها می‌تواند ضمن افزایش کارایی انرژی، اثرات منفی ریسک انرژی و پیچیدگی اقتصادی بر محیط‌زیست را کاهش دهد.

توضیحات تکمیلی

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در نگارش مقاله سهم و نقش یکسان داشته‌اند.

تضاد منافع

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

حامی مالی

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

شناسه اُرکید (ORCID)

<https://orcid.org/0000-0001-7204-2566>

فاتح حبیبی



<https://orcid.org/0009-0003-3823-4873>

شلیر ایازی



منابع و مأخذ

- امینی، امید، امانی، رامین و قاری، سامان. (۱۴۰۱). مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر، تجدیدنپذیر و ریسک امنیت انرژی در ایران: کاربرد مدل خودرگرسیون برداری ساختاری (SVAR). *نشریه انرژی ایران*، ۲۵(۴)، ۸۱-۱۰۳.
<https://necjournals.ir/article-1-1845-fa.html>
- خاکی، نرگس، خورسندی، مرتضی، محمدی، تیمور، فریدزاد، علی و عزیزی، زهرا. (۱۴۰۰). تأثیر شاخص پیچیدگی اقتصادی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشورهای منتخب صادرکننده نفت: رویکرد مدل رگرسیون انتقال ملایم پانلی (PSTR). *نشریه پژوهش‌نامه اقتصاد انرژی ایران*، ۱۰(۳۹)، ۹۹-۱۲۵.
<https://doi.org/10.22054/jiee.2022.67727.1911>
- ذبیحی، سیدمحمدقائم، اکبری، فاطمه و صالح‌نیا، نرگس. (۱۴۰۲). اثر شاخص ریسک امنیت انرژی بر ثبات اقتصادی در ایران. *نشریه اقتصاد باثبات*، ۴(۳)، ۱۳۴-۱۶۴.
<https://doi.org/10.22111/sedj.2023.46891.1399>
- سلیمی، لیلا، مستولی زاده، سید محمد و فراهتی، محبوبه. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر پیچیدگی اقتصادی بر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران. *نشریه سیاست‌ها و تحقیقات اقتصادی*، ۲(۳)، ۲۰-۱.
<https://doi.org/10.22034/jep.2023.140173.1062>
- سالاروند، بهار و حسنوند، علی. (۱۴۰۴). بررسی اثر پیچیدگی اقتصادی و ریسک‌های بین‌المللی بر توسعه پایدار در کشورهای نوظهور: رویکرد رگرسیون انتقال ملایم پانلی (PSTR). *فصلنامه اقتصاد مقداری*، ۱(۱۴۰۴)، آماده انتشار، انتشار آنلاین از تاریخ ۱۸ اردیبهشت ۱۴۰۴.
<https://doi.org/10.22055/jqe.2024.47924.2656>

محمدی، نجمه، سحابی، بهرام، حیدری، حسن و صادقی سقدل، حسین. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر پیچیدگی اقتصادی و مصرف انرژی تجدیدپذیر بر آلودگی‌های زیست‌محیطی در کشورهای در حال توسعه. *نشریه پژوهش‌ها و چشم‌اندازهای اقتصادی*، ۲۳(۴)، ۲۴-۱

<https://doi.org/10.22034/ECOR.23.4.1>

References

- Adekoya, O. B., Kenku, O. T., Oliyide, J. A., Al-Faryan, M. A. S., & Ogunjemilua, O. D. (2023). Does economic complexity drive energy efficiency and renewable energy transition?. *Energy*, 278, 127712. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127712>
- Alemzero, D. A., Sun, H., Mohsin, M., Iqbal, N., Nadeem, M., & Vo, X. V. (2021). Assessing energy security in Africa based on multi-dimensional approach of principal composite analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(2), 2158-2171. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10554-0>
- Ali, U., Guo, Q., Kartal, M. T., Nurgazina, Z., Khan, Z. A., & Sharif, A. (2022). The impact of renewable and non-renewable energy consumption on carbon emission intensity in China: Fresh evidence from novel dynamic ARDL simulations. *Journal of Environmental Management*, 320, 115782. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115782>
- Amini, O., Amani, R., & Ghaderi, S. (2023). Renewable, Non-Renewable Energy Consumption and Energy Security Risk in Iran: An Application of Structural VAR. *Iranian Energy Journal*, 25(4), 81-103. <http://necjournals.ir/article-1-1845-fa.html> (In Persian)
- Aydin, M., Guney, E., Degirmenci, T., & Demirtas, N. (2025). Analyzing the impact of environmental technological regulations, energy security, and natural resources on energy intensity in the USA. *Energy Reports*, 14, 500-507. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.06.013>
- Azhgaliyeva, D., Liu, Y., & Liddle, B. (2020). An empirical analysis of energy intensity and the role of policy instruments. *Energy Policy*, 145, 111773. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111773>
- Balland, P. A., Broekel, T., Diodato, D., Giuliani, E., Hausmann, R., o'Clery, N., & Rigby, D. (2022). Reprint of the new paradigm of economic complexity. *Research Policy*, 51(8), 104568. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2022.104568>
- Bano, S., Zhao, Y., Ahmad, A., Wang, S., & Liu, Y. (2018). Identifying the impacts of human capital on carbon emissions in Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1082-1092. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.008>
- Bhatt, M., & Chavda, P. (2025). Impact of Economic Complexity and Energy Intensity on Environmental Sustainability. *Evidence from India*. Available at SSRN 5271860. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5271860>
- Boleti, E., Garas, A., Kyriakou, A., & Lapatinas, A. (2021). Economic complexity and environmental performance: evidence from a world sample. *Environmental modeling & assessment*, 26(3), 251-270. <https://doi.org/10.1007/s10666-021-09750-0>
- Borožan, D. (2024). Do geopolitical and energy security risks influence carbon dioxide emissions? Empirical evidence from European Union countries. *Journal of cleaner production*, 439, 140834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140834>
- Breyer, C., Dmitrii Bogdanov, A. A., Ashish Gulagi, M. C., Ayobami Solomon Oyewo, J. F., Kristina Sadovskaia, P. V. (2017). Solar photovoltaics demand for the global energy transition in the power sector. *Eu Pvssec Paper*, 26(8). <https://doi.org/10.1002/pip.2950>
- Cherp, A., & Jewell, J. (2014). The concept of energy security: Beyond the four As. *Energy policy*, 75, 415-421. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.09.005>

- Chu, L. K., & Hoang, D. P. (2020). How does economic complexity influence income inequality? New evidence from international data. *Economic Analysis and Policy*, 68, 44-57. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2020.08.004>
- Cole, M. A. (2006). Does trade liberalization increase national energy use?. *Economics Letters*, 92(1), 108-112. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2006.01.018>
- Doğan, B., Ghosh, S., Hoang, D. P., & Chu, L. K. (2022). Are economic complexity and eco-innovation mutually exclusive to control energy demand and environmental quality in E7 and G7 countries?. *Technology in Society*, 68, 101867. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101867>
- Demski, C., Wouter Poortinga, L. W., Gisela Böhm, S. F., Linda Steg, R. U., Pekka, J. & Pasi, P., (2018), National context is a key determinant of energy security concerns across Europe. *Nature Energy*, 3, 882–888 (2018), <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0235-8>
- Fang, J., Gozgor, G., Mahalik, M. K., Padhan, H., & Xu, R. (2021). The impact of economic complexity on energy demand in OECD countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(26), 33771-33780. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12089-w>
- Filipović, S., Verbič, M., & Radovanović, M. (2015). Determinants of energy intensity in the European Union: A panel data analysis. *Energy*, 92, 547-555. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.011>
- Gillingham, K., Newell, R. G., & Palmer, K. (2009). Energy efficiency economics and policy. *Annual Review of Resource Economics*, 1(1), 597-620. <https://doi.org/10.1146/annurev.resource.102308.124234>
- Goh, T., & Ang, B. W. (2020). Four reasons why there is so much confusion about energy efficiency. *Energy Policy*, 146, 111832. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111832>
- Hidalgo, C. A., & Hausmann, R. (2009). The building blocks of economic complexity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 106(26), 10570–10575. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900943106>
- Ibrahim, M. A., & Musaheb, J. M. (2021). Energy Security and Energy Transition in Germany. *Review of International Geographical Education Online*, 11(7), 1433-1439. <https://rigeo.org/menu-script/index.php/rigeo/article/view/1949>
- International Energy Agency (IEA). 2019. Energy transitions indicators [Online] Available at: <https://www.iea.org/articles/energy-transitions-indicators>. (Accessed 21 March 2022)
- Kazemzadeh, E., Fuinhas, J. A., Koengkan, M., & Shadmehri, M. T. A. (2023). Relationship between the share of renewable electricity consumption, economic complexity, financial development, and oil prices: a two-step club convergence and PVAR model approach. *International Economics*, 173, 260-275. <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2022.12.001>
- Khaki, N., khorsandi, M., Mohammadi, T., Faridzad, A. & Azizi, Z. (2021). The Impact of Economic Complexity Index on Greenhouse Gas Emissions in Selected Oil Exporting Countries: A Panel Gentle Transmission Regression (PSTR) Model Approach. *Iranian Energy Economics*, 10(39), 99-125. <https://doi.org/10.22054/jiee.2022.67727.1911> (in Persian)
- Kruyt, B., Van Vuuren, D. P., de Vries, H. J., & Groenenberg, H. (2009). Indicators for energy security. *Energy policy*, 37(6), 2166-2181. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.006>
- Kumar, S. (2016). Assessment of renewables for energy security and carbon mitigation in Southeast Asia: The case of Indonesia and Thailand. *Applied Energy*, 163, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.019>
- Lapinskienė, G., Tvaronavičienė, M., & Vaitkus, P. (2014). Greenhouse gases emissions and economic growth—evidence substantiating the presence of environmental Kuznets curve in the EU. *Technological and economic development of economy*, 20(1), 65-78. <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.881434>

- Lee, C. C., & Wang, C. S. (2022). Financial development, technological innovation and energy security: Evidence from Chinese provincial experience. *Energy Economics*, 112, 106161. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106161>
- Liu, X., Niu, Q., Dong, S., & Zhong, S. (2023). How does renewable energy consumption affect carbon emission intensity? Temporal-spatial impact analysis in China. *Energy*, 284, 128690. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128690>
- Malik, S., Qasim, M., Saeed, H., Chang, Y., & Taghizadeh-Hesary, F. (2020). Energy security in Pakistan: Perspectives and policy implications from a quantitative analysis. *Energy Policy*, 144, 111552. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111552>
- Malinauskaite, J., Jouhara, H., Ahmad, L., Milani, M., Montorsi, L., & Venturelli, M. (2019). Energy efficiency in industry: EU and national policies in Italy and the UK. *Energy*, 172, 255-269. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.130>
- Marimuthu, M., Khan, H., & Bangash, R. (2021). Reverse causality between fiscal and current account deficits in asean: evidence from panel econometric analysis. *Mathematics*, 9(10), 1124, 1-18. <https://doi.org/10.3390/math9101124>
- Mohamadi, N., Sahabi, B., Heydari, H. & Sadeghi, H. (2024). Economic Complexity, Renewable and Non-renewable Energy Consumption A Comparative Study of Developed and Developing Countries. *Economic Research and Perspectives*, 24(2), 91-114. <https://doi.org/10.22034/24.2.91> (in Persian)
- 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. <https://doi.org/10.3390/su11020497>
- Newell, R. G., Jaffe, A. B., & Stavins, R. N. (1999). The Induced Innovation Hypothesis and Energy-Saving Technological Change. *The Quarterly Journal of Economics*, 114(3), 941-975. <https://doi.org/10.1162/003355399556188>
- Paramati, S. R., Shahzad, U., & Doğan, B. (2022). The role of environmental technology for energy demand and energy efficiency: Evidence from OECD countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111735. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111735>
- Payne, J. E., Truong, H. H. D., Chu, L. K., Doğan, B., & Ghosh, S. (2023). The effect of economic complexity and energy security on measures of energy efficiency: Evidence from panel quantile analysis. *Energy Policy*, 177, 113547. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113547>
- Phillips, P. C., & Hansen, B. E. (1990). Statistical inference in instrumental variables regression with I(1) processes. *The review of economic studies*, 57(1), 99-125. <https://doi.org/10.2307/229754>
- Salimi, L. , mostolizadeh, S. M. and Farahati, M. (2023). Investigating the Effect of Economic Complexity on Renewable Energy Consumption in Iran. *Economic Policies and Research*, 2(3), 1-20. <https://doi.org/10.22034/jep.2023.140173.1062> (in Persian)
- Seri, C., & Fernandez, A. (2021). The relationship between economic growth and environment. Testing the EKC hypothesis for Latin American countries. *arXiv preprint arXiv:2105.11405* . <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.11405>
- Solarin, S. A. (2020). Towards Sustainable Development in Developing Countries: Aggregate and Disaggregate Analysis of Energy Intensity and the Role of Fossil Fuel Subsidies. *Sustainable Production and Consumption*, 24, 254-265. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.07.011>
- Stern DI, Economic growth and energy (2007). *Encyclopedia of energy*, 2, 10.1016/B0-12-176480-X/00147-9.

- Salarvand, B., & Hasanvand, A. (2025). Investigating the Impact of Economic Complexity and International Risks on Sustainable Development in Emerging Countries: A Panel Smooth Transition Regression (PSTR) Approach. *Quarterly Journal of Quantitative Economics (JQE)*. <https://doi.org/10.22055/jqe.2024.47924.2656> (in Persian)
- Ullah, S., & Lin, B. (2025). An environmental assessment through load capacity factor: the dynamic effects of technological cooperation grants and energy depletion in Pakistan. *Frontiers in Sustainable Energy Policy*, 3, 1438573. <https://doi.org/10.3389/fsuep.2024.1438573>
- Winzer, C. (2012). Conceptualizing energy security. *Energy Policy*, 46, July 2012, 36-48, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.067>
- Yao, L., & Chang, Y. (2014). Energy security in China: A quantitative analysis and policy implications. *Energy Policy*, 67, 595-604. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.047>
- Zabihi, S. M. G., Akbari, F., & Salehnia, N. (2023). The Effect of the Energy Security Risk Index on Economic Stability in Iran. *Stable Economy Journal*, 4(3), 134-164. <https://doi.org/10.22111/sedj.2023.46891.1399> (in Persian)
- Zafar, M. W., Zaidi, S. A. H., Khan, N. R., Mirza, F. M., Hou, F., & Kirmani, S. A. A. (2019). The impact of natural resources, human capital, and foreign direct investment on the ecological footprint: the case of the United States. *Resources Policy*, 63, 101428. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101428>