The University of Tehran Press

Natural Resources Governance

Vol. 3, No. 1, Spring 2026

Online ISSN: 3060-7183

Home Page: https://jnrg.ut.ac.ir/

Investigating the Share of Economic Sectors in CO_2 Emissions and the Ecological Deficit in Iran: A Quantile Regression Approach

Mostafa Salimifar[1*] | Pooneh Nasiri[2]

1. Corresponding Author, Department of Economics, Faculty of Economic & Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: mostafa@um.ac.ir
2. Department of Economics, Faculty of Economic & Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received 27 December, 2025
Revised 18 February, 2026
Accepted 19 February, 2026
Published online 21 March, 2026

Keywords:
CO_2 Emissions,
Ecological Deficit,
Economic Sectors,
Environmental Sustainability,
Quantile Regression.

ABSTRACT

This study analyzes the impact of carbon dioxide (CO_2) emissions from different economic sectors on Iran's ecological deficit from 1970 to 2024. To address data heterogeneity and heteroscedasticity, the quantile regression method has been used, enabling the evaluation of sector-specific effects at various levels of ecological deficit. The model includes CO_2 emissions from agriculture, buildings, fuel, industry, power generation, industrial processes, and transportation. Industrial processes refer to emissions from production reactions in heavy industries, including cement, steel, aluminum, and chemical manufacturing. Meanwhile, the fuel sector encompasses activities related to extracting, refining, and transforming fossil fuels. Empirical results indicate that CO_2 emissions from industry, industrial processes, and transport have positive and statistically significant effects across all examined quantiles (0.25, 0.5, and 0.75), directly contributing to an increase in ecological deficit. In contrast, the agriculture and building sectors exhibit weaker effects, with neutral impacts observed at the median quantile. Notably, the fuel sector displays negative coefficients across all quantiles, suggesting an inverse relationship between fuel-related emissions and ecological deficit, which may be attributed to Iran's reliance on heavier fuels, such as fuel oil and coal, in certain economic activities. Additionally, the coefficient for the electricity sector is significant only at the 0.75 quantile. Overall, the findings highlight the heterogeneous impacts of sectoral emissions on Iran's ecological deficit and suggest that policymakers can accelerate the country's transition toward ecological sustainability by focusing on replacing fossil fuels with renewable energies, improving fuel efficiency, and reforming energy consumption patterns.

Cite this article: Salimifar, M., Nasiri, P. (2026). Investigating the Share of Economic Sectors in CO_2 Emissions and the Ecological Deficit in Iran: A Quantile Regression Approach. *Journal of Natural Resources Governance*, 3 (1), 49-66. https://doi.org/10.22059/jnrg.2026.407794.1080

© Mostafa Salimifar, Pooneh Nasiri
Publisher: University of Tehran Press. https://doi.org/10.22059/jnrg.2026.407794.1080

Extended Abstract

Introduction

In the contemporary era, sustainable economic growth and environmental protection have emerged as two major priorities in global policymaking. However, the strong interconnection between economic activities and their environmental consequences has created serious challenges for achieving sustainable development. One of the most widely recognized environmental impacts of economic activity is the emission of greenhouse gases. Among these gases, carbon dioxide (CO_2) is considered the most prevalent and influential greenhouse gas, playing a crucial role in climate change and environmentally destructive processes such as global warming, sea level rise, and the increasing occurrence of extreme weather events. These emissions largely originate from the combustion of fossil fuels used for energy production, transportation, industrial activities, and agricultural operations. In addition to greenhouse gas emissions, the concept of ecological deficit has become an important indicator for evaluating the pressure exerted by human activities on natural resources and ecosystem services. Ecological deficit refers to the gap that emerges when human demand for ecological resources—such as food, timber, and freshwater—exceeds the regenerative capacity of the biosphere, including forests, soils, and oceans, to replenish these resources and absorb associated wastes. In other words, ecological deficit occurs when human consumption surpasses the natural environment's ability to regenerate resources and assimilate waste. This condition reflects the growing pressure imposed by economic activities, particularly current patterns of production and consumption, on essential ecosystem resources and services.In other words, when human consumption exceeds the regenerative and absorptive capacity of nature, ecological imbalance occurs. This condition reflects the intensifying pressure imposed by economic activities—particularly prevailing patterns of production and consumption—on vital ecosystem resources and services, thereby posing a serious threat to environmental sustainability.

Method

Iran, as a developing country with a growing population and an economy that remains heavily dependent on fossil energy resources, faces considerable challenges in balancing economic development with environmental protection. Various economic sectors in Iran—including agriculture, industry, transportation, and energy production—each contribute to carbon dioxide emissions and place pressure on ecological resources. Therefore, understanding the specific contribution of each sector and evaluating its impact on ecological deficit is essential for designing effective and sustainable environmental policies. Accordingly, this study focuses on the sectoral structure of the Iranian economy and investigates how emissions from different economic sectors influence ecological deficit under varying levels of environmental pressure. To conduct a comprehensive sectoral analysis of environmental pressure, this research employs long-term time-series data covering the period from 1970 to 2024. Using the quantile regression approach, the study analyzes the impact of carbon dioxide emissions from major economic sectors on ecological deficit in Iran across three quantiles: 0.25, 0.50, and 0.75. The model includes sectoral CO_2 emissions from agriculture, buildings, fuel-related activities, industry, electricity generation, industrial processes, and transportation. Industrial processes refer to emissions generated from chemical and production reactions in heavy industries such as cement, steel, aluminum, and chemical manufacturing. Meanwhile, the fuel sector includes activities associated with the extraction, transformation, and refining of fossil fuels. This sectoral classification allows for a more precise examination of how different sources of emissions contribute to ecological imbalance in Iran.

Findings

The empirical results obtained from the quantile regression analysis reveal notable differences in the impact of sectoral emissions on ecological deficit. Specifically, carbon dioxide emissions from the industrial sector, industrial processes, and transportation are found to be positive and statistically significant across all examined quantiles. This indicates that increases in emissions from these sectors directly intensify ecological deficit in Iran. Industrial activities and their related processes have long been recognized as major sources of environmental pollution due to their energy-intensive nature

and heavy reliance on fossil-based inputs. Similarly, emissions from the transportation sector contribute significantly to ecological imbalance, reflecting the growing demand for mobility and the continued dependence on fossil-fuel-based transport systems. In contrast, the agriculture and building sectors exhibit weaker effects on ecological deficit. In the median quantile, the influence of these sectors is not statistically significant. This result may be attributed to differences in energy consumption patterns, technological characteristics, and the nature of environmental impacts associated with these sectors. In many cases, the environmental effects of agricultural and building activities may become more evident only over longer periods or at higher levels of emissions. Another notable finding concerns the fuel sector. The estimated coefficient for this sector is negative across all three quantiles, suggesting an inverse relationship between emissions from fuel-related activities and ecological deficit. In other words, an increase in CO_2 emissions from this sector is associated with a reduction in ecological deficit. This unexpected result may reflect the complexity involved in accurately measuring emissions from fuel-related activities or the heterogeneity of fuel types used within the sector. In particular, heavier fuels such as fuel oil and coal—commonly used in certain industries and power plants in Iran—may influence the relationship between emissions and ecological deficit in ways that require further investigation. Additionally, the coefficient associated with the electricity generation sector is statistically significant only at the 0.75 quantile.

Conclusion

This finding indicates that emissions from electricity generation become particularly influential under conditions of higher environmental pressure and resource demand. In such circumstances, the environmental impact of electricity production intensifies and contributes more significantly to ecological deficit. This highlights the importance of reforming the structure of electricity generation in Iran, reducing dependence on fossil-fuel-based thermal power plants, and increasing the share of renewable energy sources within the national energy mix. Overall, the results of this study demonstrate that the environmental impacts of sectoral emissions on ecological deficit in Iran are heterogeneous. Achieving ecological sustainability therefore requires a comprehensive and multidimensional policy approach. Such an approach should include structural reforms in the economic system, greater adoption and diffusion of green technologies, and fundamental changes in prevailing patterns of production and consumption. Only through coordinated efforts in these areas can Iran move toward a more balanced relationship between economic development and environmental sustainability.

Funding

This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authors' Contribution

Authors' Contributions: All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection, and analysis were performed collaboratively. All authors contributed to writing the manuscript and approved the final version.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Acknowledgments

The author(s) declare that there are no acknowledgments.

انتشارات دانشگاه تهران

نشریهٔ حکمرانی منابع طبیعی
دوره ۳، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵
سایت نشریه: https://jnrg.ut.ac.ir/

شاپا الکترونیکی: ۷۱۸۳- ۳۰۶۰

بررسی سهم بخش‌های اقتصادی در انتشار دی‌اکسیدکربن و میزان ناترازی اکولوژیکی در ایران با رویکرد رگرسیون کوانتایل

مصطفی سلیمی‌فر [۱*] | پونه نصیری [۲]

۱) نویسنده مسئول، گروه اقتصاد، داشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: mostafa@um.ac.ir
۲) گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
علمی – پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

کلیدواژه:
انتشار دی‌اکسیدکربن، بخش‌های اقتصادی، پایداری محیط‌زیست، رگرسیون کوانتایل، کسری اکولوژیک.

چکیده

پژوهش حاضر با هدف تحلیل اثرات انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از بخش‌های مختلف اقتصادی بر کسری اکولوژیکی ایران طی دوره ۱۹۷۰ الی ۲۰۲۴ انجام شده است. در این راستا، از روش رگرسیون کوانتایل به عنوان رویکردی مقاوم در برابر ناهمگنی داده‌ها استفاده شده تا تفاوت اثرات در سطوح مختلف کسری اکولوژیکی بررسی شود. متغیرهای مدل شامل انتشار دی‌اکسیدکربن از بخش‌های کشاورزی، ساختمان، سوخت، صنعت، برق، فرآیندهای صنعتی و حمل‌ونقل است. بخش فرآیندهای صنعتی به انتشار ناشی از واکنش‌های تولیدی در صنایع سنگین نظیر سیمان، فولاد، آلومینیوم و مواد شیمیایی اشاره دارد، در حالی‌که بخش سوخت شامل فعالیت‌های مرتبط با استخراج، پالایش و تبدیل سوخت‌های فسیلی تعریف شده است. یافته‌های مطالعه حاضر نشان می‌دهد که انتشار دی‌اکسیدکربن در بخش‌های صنعت، فرآیندهای صنعتی و حمل‌ونقل در تمامی کوانتایل‌ها (۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵) مثبت و معنادار بوده به طوری‌که افزایش انتشار آلاینده این بخش‌ها مستقیما کسری اکولوژیکی را شدت می‌بخشد. در مقابل، بخش‌های کشاورزی و ساختمان شدت تاثیرگذاری ضعیف‌تری داشته و در کوانتایل میانه اثر آن‌ها خنثی است. ضریب بخش سوخت در هر سه کوانتایل منفی بوده و نشان‌دهنده رابطه معکوس بین انتشار ناشی از فرآیندهای سوختی و کسری اکولوژیکی است. این نتیجه می‌تواند ناشی از استفاده ایران از سوخت‌های سنگین‌تر مانند نفت‌کوره و ذغال‌سنگ در برخی بخش‌های اقتصادی باشد. همچنین ضریب بخش برق تنها در چندک ۰/۷۵ معنادار است. نتایج حاصله بیانگر ناهمگنی اثرات آلایندگی بخش‌های اقتصادی بر کسری اکولوژیکی ایران است و نشان می‌دهد که تمرکز سیاست‌گذاران بر جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر، افزایش بهره‌وری سوخت و اصلاح الگوی مصرف انرژی می‌تواند مسیر حرکت ایران به‌سوی پایداری اکولوژیکی را تسریع نماید.

استناد: سلیمی‌فر؛ مصطفی، نصیری؛ پونه (۱۴۰۵). بررسی سهم بخش‌های اقتصادی در انتشار دی‌اکسیدکربن و میزان ناترازی اکولوژیکی در ایران با رویکرد رگرسیون کوانتایل. *حکمرانی منابع طبیعی*، ۳ (۱)، ۶۶-۴۹. https://doi.org/10.22059/jnrg.2026.407794.1080

© مصطفی سلیمی‌فر، پونه نصیری
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
https://doi.org/10.22059/jnrg.2026.407794.1080

۱. مقدمه

رابطه پیچیده میان رشد اقتصادی و پیامدهای زیست‌محیطی، از حوزه‌های کلیدی و پرچالش در ادبیات توسعه اقتصادی به شمار می‌رود. وابستگی جوامع به سوخت‌های فسیلی ناشی از نیاز فزاینده به تأمین تقاضای رو به رشد جوامع و صنعتی شدن ساختار اقتصاد است. از آنجا که رشد اقتصادی همراه با مصرف انرژی در مراحل برداشت، تولید و توزیع است، انتشار گازهای گلخانه‌ای پدیده‌ای غیرقابل اجتناب به نظر می‌رسد. به همین دلیل طی دهه‌های گذشته رشد اقتصادی دستاوردهایی نظیر کاهش فقر، افزایش اشتغال و بهبود سطح زندگی داشته اما هزینه آن را با خسارت به محیط‌زیست و تغییرات اقلیمی داده است (Pathiranage, 2024). توسعه اقتصادی که هدف غایی کشورها برای تضمین سعادت و بالندگی جوامع تعریف می‌شود، در گام اول توسط رشد اقتصادی به ثمر می‌نشیند. اما خطرات زیستی و تهدیدهای اقلیمی که منتج از انتشار آلاینده‌ها می‌باشد، با توسعه اقتصادی که پیش‌نیاز آن رشد است تعارض منافع دارد. افزایش تولید غالباً به افزایش مصرف انرژی و انتشار CO_2 منجر می‌شود که می‌تواند تغییرات اقلیمی را تشدید کرده و تهدیدی برای سلامت بشر باشد (Glavina et al., 2025; Foster et al., 2023; Herrera-Franco et al., 2024). به این ترتیب، نوعی تعارض میان توسعه اقتصادی سنتی و سلامت محیط‌زیست پدید آمده است (Meadows, 2012).

تغییرات اقلیمی، گرمایش جهانی و اضمحلال منابع طبیعی عمدتاً پیامد رفتارهای انسان هستند. تولید کالا، مصرف انرژی، فعالیت‌های کشاورزی، حمل‌ونقل و سیستم‌های گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها در مجموع سالانه حدود ۵۱ میلیارد تُن گاز گلخانه‌ای را به جو زمین وارد می‌کنند. در نتیجه، ظرفیت زیستی[1] سیاره تحت فشار قرار گرفته و کیفیت زندگی بشر را متأثر کرده است (WWF[2], 2024). در این میان، کشورهای در حال توسعه از جمله ایران، با توجه به ساختار اقتصادی متکی بر منابع فسیلی و روند رو به رشد مصرف انرژی در کنار خلأ سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر، سهم قابل‌توجهی در افزایش انتشار این گاز دارند. به گزارش سازمان بین‌المللی انرژی ایران رتبه هشتم جهانی انتشار آلاینده و رتبه اول در میان کشورهای اپک را دارد (سازمان بین‌المللی انرژی[3]). در نتیجه ایران به‌عنوان یکی از تولیدکنندگان بزرگ نفت و گاز جهان، در مسیر توسعه اقتصادی خود با چالشی دوگانه روبه‌روست: از یک سو نیاز به رشد اقتصادی و تأمین رفاه اجتماعی، و از سوی دیگر الزام به کاهش انتشار کربن و گذار به اقتصاد سبز (فریدزاد، ۲۰۲۳).

الگوی رشد اقتصادی در ایران عمدتاً مبتنی بر مصرف انرژی‌های فسیلی بوده و این امر موجب شده است که شدت انرژی و انتشار CO_2 در مقایسه با میانگین جهانی در سطح بالایی قرار گیرد. به طوری‌که در بازه زمانی ۱۹۹۰ الی ۲۰۱۷ سهم سوخت‌های فسیلی از کل تأمین انرژی ۹۸ درصد بوده و منابع تجدیدپذیر سهمی کمتر از ۱ درصد داشتند که خود گواهی بر مسیر رشد پرکربن اقتصاد ایران است (سلیمانی، ۲۰۲۰). ساختار یارانه‌ای انرژی، ضعف در کارایی فناوری، و کمبود سیاست‌های یکپارچه زیست‌محیطی از جمله عواملی هستند که موجب شده‌اند کنترل انتشار کربن در کشور با چالش‌های جدی مواجه شود. علاوه بر این، تحریم‌های اقتصادی بین‌المللی نیز دسترسی به فناوری‌های پاک را محدود کرده و روند گذار به اقتصاد کم‌کربن را کند کرده‌اند (Esmaeili & Afshar Kazemi, 2025). مواجه با تغییرات اقلیمی و افزایش آلاینده‌ها جوی نیازمند رویکردی یکپارچه و چندوجهی است. دولت‌ها به عنوان متصدی سیاست‌گذارای کلان اقتصادی باید با شناخت عوامل اثرگذار بر شدت انتشار و سهم بخش‌های مختلف اقتصادی در میزان فشار به محیط‌زیست، بسته سیاستی متناسب با گذار به اقتصاد چرخشی، که بر بهره‌وری منابع و کاهش پسماند تأکید دارد فراهم کرده و به سوی اهداف توسعه گام بردارند (Yakymchuk & Rataj, 2025; Yoro & Daramola, 2020).

مسئله اصلی پژوهش حاضر بررسی میزان و ساختار انتشار CO_2 در بخش‌های مختلف اقتصادی ایران و تعیین سهم هر بخش در ایجاد کسری اکولوژیکی کشور است. نوآوری این مقاله در بازتعریف بخش‌های اقتصاد (صنعت برق، احتراق صنعتی، ساختمان‌ها، حمل‌ونقل، کشاورزی، بهره‌برداری از سوخت‌ها و فرایندهای صنعتی) و استفاده از داده های میزان انتشار CO_2 برای بازه بلندمدت

[1] Biocapacity
[2] World Wide Fund for Nature
[3] IEA

۵۴ سال است. همچنین این مقاله می‌کوشد تا با بهره‌گیری از رهیافت کوانتایل، اثرگذاری انتشار کربن بر سطوح مختلف کسری اکولوژیکی را بررسی کرده و مسئولیت تاریخی هر بخش را در پویایی کسری اکولوژیکی شناسایی نماید.

انتخاب بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۴ با هدف پوشش تحولات ساختاری بلندمدت در ساختار اقتصاد و الگوی انتشار آلاینده‌ها در ایران صورت گرفته است. دهه ۱۹۷۰ نقطه آغاز ثبت‌های نسبتاً منسجم داده‌های بخشی انتشار دی‌اکسیدکربن محسوب شده و هم‌زمان با جهش‌های نفتی جهانی، گسترش صنایع انرژی‌بر و تغییر نقش بخش‌های اقتصادی در ساختار تولید همراه بوده است.

این بازه زمانی همچنین شامل رویدادهای سیاسی–اقتصادی مهمی نظیر انقلاب اسلامی، جنگ ایران و عراق، دوره‌های نوسازی صنعتی، اصلاحات ساختاری انرژی، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، رشد شهرنشینی و تحولات فناوری در بخش‌های صنعت، برق و حمل‌ونقل است که همگی می‌توانند نقش تأثیرگذاری در تغییر شدت و نحوه اثرگذاری انتشار آلاینده‌ها بر کسری اکولوژیکی داشته باشند.

از این‌رو، استفاده از یک دوره زمانی بلند امکان بررسی ناهمگنی اثرات بخشی در سطوح مختلف کسری اکولوژیکی را فراهم نموده و توجیه‌کننده به‌کارگیری روش رگرسیون کوانتایل در این مطالعه است.

۲. روش‌شناسی پژوهش

در این بخش به بررسی ادبیات گذشته درباره ارتباط بین متغیرهای اصلی پژوهش یعنی انتشار CO_2 بخش‌های اقتصاد و کسری اکولوژیکی پرداخته خواهد شد. تخمین مدل با نرم‌افزار R و با کتابخانه‌های tseries، tidyverse، urca، lmtest و quantreg انجام شده است.

در این پژوهش، کوانتایل‌های ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ به‌طور هدفمند انتخاب شده‌اند تا امکان بررسی ناهمگنی اثرات انتشار دی‌اکسیدکربن بخش‌های اقتصادی در سطوح مختلف کسری اکولوژیکی مهیا شود. کوانتایل ۰/۲۵ نمایانگر وضعیت فشار زیستی پایین، کوانتایل ۰/۵ بیانگر وضعیت میانه و کوانتایل ۰/۷۵ نمایانگر شرایط فشار زیستی بالا است. این تفکیک سه‌گانه، علاوه بر داشتن پشتوانه نظری در ادبیات رگرسیون کوانتایل از دیدگاه سیاست‌گذاری نیز کاربردی‌تر خواهد بود. زیرا امکان طراحی سیاست‌های تفکیک‌شده برای شرایط مختلف اکولوژیکی را پیش‌روی متصدیان قانون‌گذاری قرار می‌دهد. در مطالعات حوزه اقتصاد انرژی نیز این ترکیب کوانتایلی به‌طور گسترده برای تحلیل اثرات ناهمگن مصرف انرژی و انتشار CO_2 به‌کار رفته است، چراکه تفسیر نتایج آن نسبت به استفاده از کوانتایل‌های بسیار افراطی (مانند ۰/۰۵ یا ۰/۹۵) ملموس‌تر بوده و برای سیاست‌گذاری اجرایی مناسب‌تر است (Shahbaz & co. 2018).

همچنین تمرکز بر این سه کوانتایل، از ناپایداری آماری و حساسیت بیش از حد برآوردها در کوانتایل‌های حدی جلوگیری کرده و توازن مناسبی میان دقت آماری و قابلیت تفسیر اقتصادی ایجاد می‌کند.

۲–۱. انتشار CO_2

رابطه بین رشد اقتصادی و دی‌اکسیدکربن همواره موضوعی مورد مناقشه در اقتصاد محیط‌زیست بوده است. آلاینده‌های تزریق شده به جو موجب گرمایش جهانی، کاهش کیفیت هوا، تغییر الگوهای بارش شده و تهدیدی برای پایداری اکولوژیکی در نظر گرفته می‌شود. در میان نظریات اقتصادی، رابطه میان رشد اقتصادی و انتشار آلاینده‌ها در قالب منحنی زیست‌محیطی کوزنتس[1](EKC) تبیین می‌شود. این فرضیه بیان می‌کند که با رشد درآمد سرانه، در مراحل اولیه توسعه، آلودگی افزایش می‌یابد، اما پس از رسیدن به سطحی معین از درآمد سرانه، روند انتشار کاهش یافته و منحنی شکلی معکوس U به خود می‌گیرد. به بیان دیگر، اقتصادها در مسیر توسعه ابتدا با افزایش تخریب محیط‌زیست مواجه می‌شوند، اما پس از آن، به‌واسطه پیشرفت فناوری، تغییر ساختار اقتصادی و ارتقای آگاهی زیست‌محیطی، میزان انتشار کاهش می‌یابد (Leal & Marques, 2020).

مطالعات متعددی در کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه، الگوهای متفاوتی از این رابطه را گزارش کرده‌اند. برای نمونه، پژوهش‌های انجام‌شده در چین (Dong et al., 2018; He et al., 2017) و هند (Riti et al, 2017) نشان می‌دهد که مراحل

[1] Environmental Kuznets Curve

صنعتی‌شدن سریع و اتکای شدید به سوخت‌های فسیلی در ابتدا منجر به افزایش انتشار CO_2 شده است. با این حال، با به‌کارگیری سیاست‌های انرژی تجدیدپذیر و اصلاح ساختار صنعتی، در بلندمدت روندی نزولی در انتشار مشاهده می‌شود (Wang et al., 2016; Xia & Wang, 2020).

در ایران نیز مطالعاتی نظیر خوش‌نویس یزدی[1] و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده‌اند که مصرف بالای سوخت‌های فسیلی و شدت انرژی در بخش‌های تولید نیرو، صنعت و حمل‌ونقل، موجب افزایش قابل‌توجه انتشار CO_2 شده است. این مطالعات تأکید می‌کنند که اقتصاد ایران به دلیل اتکای بالا به انرژی‌های فسیلی، شدت کربن بالایی دارد و بهره‌وری انرژی پایین است. به بیان دیگر سهم بالای صنایع انرژی‌بر در انتشار گازهای گلخانه‌ای ایران، مانع از تحقق اهداف توسعه پایدار و کاهش آلاینده‌ها شده است (Esmaeili et al. 2025). در نهایت می‌توان گفت نظریاتی مانند منحنی زیست‌محیطی کوزنتس برای انتشار آلاینده در گام‌های ابتدایی مسیر توسعه، یعنی رشد اقتصادی توجیهی دارند اما ماندگاری این اثرات و کاهش آلاینده‌ها در مراحل بعدی توسعه، بدون به‌کارگیری سیاست‌های انرژی پاک، فناوری‌های کم‌کربن و اصلاح ساختار بخش‌های اقتصادی، ممکن نیست.

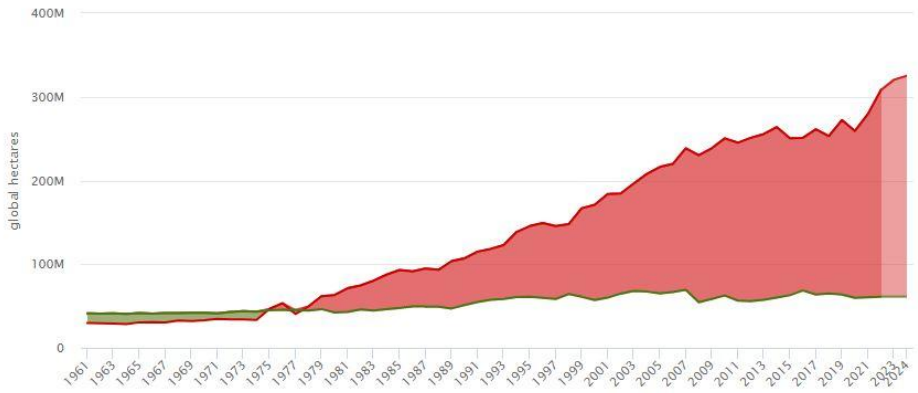
۲-۲. پایداری محیط‌زیست

تا به امروز شاخص‌های متعددی برای بررسی پایداری محیط‌زیست تعریف شده است. شاخص‌هایی که در مطالعه حاضر برای بررسی تراز محیط‌زیست ایران به کار رفته عبارتند از ظرفیت زیستی سرانه[2] و دیگری ردپای بوم‌شناختی مصرف سرانه[3] و در نهایت اختلاف این دو مؤلفه برای توضیح کسری اکولوژیکی[4]. ظرفیت زیستی سرانه، میزان زمین و منابع زیستیِ در دسترس برای هر فرد در یک کشور یا منطقه را نشان می‌دهد. این شاخص بیانگر توانایی اکوسیستم برای تولید منابع تجدیدپذیر و جذب پسماندها (به‌ویژه CO_2) است. به‌عبارت دیگر، ظرفیت زیستی سرانه، مقدار زمین بوم‌شناختی در دسترس (بر حسب هکتار جهانی) است که می‌تواند به‌طور پایدار نیازهای مصرفی هر فرد را پاسخ دهد و مبین عرضه محیط‌زیست است (Wackernagel et al. 2002). ردپای بوم‌شناختی مصرف سرانه بیانگر میزان زمینی است که هر فرد برای تأمین مصرف خود از منابع طبیعی و جذب CO_2 ناشی از آن نیاز دارد و منعکس‌کننده تقاضای محیط‌زیست است. این شاخص ترکیبی از مصرف داخلی و تجارت خارجی است و شامل منابع وارداتی و کسر صادرات می‌شود (Kitzes et al. 2013).

تفاضل میان ردپای بوم‌شناختی مصرف سرانه و ظرفیت زیستی سرانه، کسری یا مازاد بوم‌شناختی را مشخص می‌کند. اگر مقدار منفی باشد جامعه بیش از توان بازتولید اکوسیستم‌ها مصرف کرده و کسری بوم‌شناختی (کسری اکولوژیکی) رخ داده و در صورت مثبت بودن مازاد بوم‌شناختی محقق شده که به معنای وجود منابع زیستی کافی برای پاسخ به مصرف افراد جامعه است (Wackernagel et al. 2002).

کسری اکولوژیکی زمانی رخ می‌دهد که مصرف منابع طبیعی و تولید آلاینده‌ها از ظرفیت زیست‌پذیری سرزمین فراتر رود. در این چارچوب، کشورها نه‌تنها بر اساس سطح فعلی انتشار بلکه بر مبنای پیشینه تاریخ خود در ایجاد ناپایداری محیطی ارزیابی می‌شوند (Karbassi et al., 2007). همچنین این شاخص به‌صورت مستقیم نشان‌دهنده فشار اقتصادی و جمعیتی بر اکوسیستم‌ها تعریف شده و بازتابی از «مسئولیت تاریخی» هر کشور در بحران اقلیمی تلقی می‌شود. کشورهایی با کسری بوم‌شناختی بالا معمولاً دارای ردپای کربن گسترده‌تری هستند، چراکه تولید اقتصاد آن‌ها وابستگی شدیدی به مصرف انرژی‌های فسیلی دارند (Yakymchuk & Rataj, 2025). مطابق با گزارش شبکه جهانی ردپای بوم‌شناختی[5] در سال ۲۰۲۴، محیط‌زیست ایران از سال ۱۹۷۵ دچار کسری اکولوژیکی بوده است.

[1] Khoshnevis Yazdi
[2] Biocapacity per Capita
[3] Ecological Footprint of Consumption per Capital
[4] Ecological Deficit
[5] Footprint Network



شکل ۱. روند کسری اکولوژیکی ایران به گزارش (منبع: شبکه جهانی ردپای بوم‌شناختی)

۲-۳. بخش‌های اقتصادی

تحلیل رابطه بین انتشار CO_2 و کسری بوم‌شناختی از منظر بخشی دارای اهمیت فراوانی است، زیرا هر بخش از اقتصاد نقش و سهم متفاوتی در تولید آلاینده‌ها و ایجاد فشارهای زیست‌محیطی ایفا می‌کند. در این میان، بخش صنعت و نیروگاه‌های حرارتی به‌عنوان اصلی‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی فسیلی، بیشترین سهم را در انتشار مستقیم دی‌اکسیدکربن دارند، چرا که فرایندهای تولیدی انرژی‌بر و متکی به سوخت‌های غیربازگشت‌پذیر، منجر به افزایش ردپای کربنی در این بخش می‌شود (Wang et al., 2016; Riti et al., 2017). علاوه بر آن، بخش حمل‌ونقل نیز به دلیل وابستگی بالا به فرآورده‌های نفتی و رشد سریع وسایل نقلیه موتوری، سهم قابل‌توجهی در افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای دارد، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که زیرساخت‌های حمل‌ونقل پایدار هنوز توسعه‌یافته نیست (Saboori et al., 2017).

از سوی دیگر، بخش کشاورزی با وجود ماهیت زیستی خود، از طریق فعالیت‌هایی مانند احتراق بقایای زراعی، مدیریت نامناسب فضولات دامی، و مصرف گسترده کودها و سموم شیمیایی، موجب انتشار غیرمستقیم گازهای گلخانه‌ای و فشار مضاعف بر ظرفیت زیست‌پذیری اکوسیستم‌ها می‌شود (Li et al., 2016; Ahmed et al., 2020). همچنین، بخش مسکونی از طریق مصرف انرژی در گرمایش، سرمایش و ساخت‌وساز نیز سهم انتشار قابل‌توجهی از دی‌اکسیدکربن دارد، به‌ویژه در شهرهای بزرگ که رشد سریع جمعیت و شهرنشینی منجر به افزایش ردپای بوم‌شناختی شده است. در چنین شرایطی، رشد اقتصادی نامتوازن و تمرکز بیش از حد بر بخش‌های انرژی‌بر، می‌تواند روند پایداری محیط‌زیست را مختل نموده و موجب افزایش کسری اکولوژیکی گردد (Pata & Caglar, 2021).

در مجموع، نوآوری اصلی این مقاله در ترکیب رویکرد بخشی انتشار CO_2 با شاخص‌های کسری بوم‌شناختی و ردپای کربن در افق زمانی بلندمدت است. رویکردی که در مطالعات پیشین عمدتاً به‌صورت جداگانه یا در سطح کلان بررسی شده بود. تمایز دیگر این مطالعه، تمرکز بر پویایی‌های بخشی و ارتباط آن با ساختار انرژی و رشد اقتصادی در ایران است که می‌تواند بینش‌های تازه‌ای برای سیاست‌گذاری زیست‌محیطی و گذار به اقتصاد کم‌کربن ارائه دهد.

ادبیات حوزه پایداری زیست‌محیطی و انتشار کربن در دهه‌های اخیر از رویکردهای خطی سنتی خارج شده و به سمت چارچوب‌های غیرخطی، توزیعی و با لحاظ اثر نهادها حرکت کرده است. زیرا بیش از ۸۰ درصد کل گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی است و اگر سیاست‌ها فوراً به سمت کاهش شدید مصرف زغال‌سنگ و نفت متمرکز نشود، امکان مهار گرمایش جهانی در آستانه ۱/۵ درجه‌ای سلیسیوس وجود ندارد (Yoro & Daramola, 2020). در جهانی که استفاده از انرژی‌های فسیلی تا به این اندازه رخنه کرده است، حذف و یا جایگزینی منبع انتشار به سادگی ممکن نیست و باید تغییرات ساختاری و در بستر زمان منطبق بر ساختار انرژی جهان اتخاذ کرد.

مطالعه یاکیم‌چاک و راتاج[1] (۲۰۲۵) در حوزه اقتصاد انرژی اروپا نشان داد رشد اقتصادی همچنان یکی از پیشران‌های اصلی انتشار دی‌اکسیدکربن در اقتصادهای متکی بر سوخت‌های فسیلی است، اما شدت اثرگذاری این رابطه به کیفیت سیاست‌های انرژی و سطح تحولات فناوری وابسته است. شواهد تجربی حاکی از آن بود که سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر، ارتقای بهره‌وری انرژی و طراحی سیاست‌های بومی منطبق با ساختار هر کشور می‌تواند گذار جداسازی رشد از انتشار را تسریع کند. در واقع، نقش مصرف انرژی و ترکیب آن در کنار فعالیت اقتصادی و متغیرهای جمعیتی، تضمینی برای پایداری زیست‌محیطی در کشورهای اروپایی است.

در راستای تعمیق ریشه‌یابی انتشار کربن تحقیق راباج‌سیک[2] (۲۰۲۵) نشان داد تقاضای انرژی که عامل اصلی انتشار شناخته می‌شود به سبب اهمیت و رشد مستمری که دارد، قادر به حذف شدن نیست و تنها با تکنولوژی‌های نوین مانند انرژی زیستی و منابع تجدیدپذیر تنها می‌توان میزان CO_2 را کاهش داد. به بیان دیگر در چهارچوب رویکردهای سیاست‌محور، گذار به مسیر کم‌کربن و مدیریت انتشار صرفاً وابسته به کاهش حجم مصرف منابع فسیلی نبوده و سیاست‌های کارآمد در زنجیره انرژی نقش تعیین‌کننده دارند. بازتعریف نقش نهادها در حفظ کیفیت محیط‌زیست در مطالعات اخیر توانسته جایگاه ویژه‌ای برای خود باز نماید. به طور مثال دنگ و همکاران[3] (۲۰۲۴) در مطالعه خود پایداری محیط‌زیست را با توجه به تأثیر عدم قطعیت سیاست اقتصادی، سرمایه انسانی، مالیات زیست‌محیطی، ICT و توسعه مالی در یک تواتر زمانی بلند مدت ۲۴ ساله بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها حاکی از اثر مثبت عدم قطعیت سیاست اقتصادی بر انتشار CO_2 و اثر منفی معنادار ICT، مالیات زیست‌محیطی و توسعه مالی در انتشار بود.

گلوینا و همکاران[4] (۲۰۲۵) در پژوهشی با عنوان تأثیر رشد اقتصادی و پیشرفت فناوری بر محیط‌زیست نقش فناوری‌های ذخیره کربن، حسابداری کربن و رویکردهای بخشی در کاهش آلودگی را بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که رشد اقتصادی در مراحل توسعه بالاتر می‌تواند با کاهش آلودگی همراه باشد، به‌ویژه در حضور سیاست‌های حمایتی، فناوری و مشارکت اجتماعی باید گفت تحقق اهداف توسعه پایدار که محور اصلی آن حفظ توان اکوسیستم است در مطالعات اخیر از مسیر نهادهای باکیفیت میگذرد. دام و همکاران[5] (۲۰۲۴) نشان دادند در کشورهای OECD بهبود ردپای اکولوژیکی و رشد سبز ناشی از کیفیت نهادها بوده و نتیجه آن‌ها با تکیه بر آزمون‌های پیشرفته پنلی و بلندمدت CUP-FM و CUP-BC گزارش شد. نتیجه مشابهی توسط موروس و همکاران[6] (۲۰۲۲) و هم‌راستا با این فرضیه تایید شد؛ به گونه‌ای که افزایش ۱٪ رشد سبز باعث کاهش ۰/۵۶۳ درصد انتشار CO_2، ۰/۳۷۳ درصد ردپای اکولوژیکی و ۰/۱۹۸ درصد ظرفیت معکوس بار می‌شود و کیفیت نهادی در بلندمدت اثر مثبت و معنی‌داری بر کاهش آلودگی دارد. در حوزه دیگر و با جامعه آماری کشورهای متفاوت (۱۱ کشور غرب آفریقا) مطالعه کتیا و همکاران[7] (۲۰۲۲) نیز قابل ذکر است. آن‌ها تغییرات ظرفیت زیستی را متأثر از درآمد واقعی، منابع طبیعی، سرمایه انسانی، گردشگری و انرژی‌های تجدیدپذیر در نظر گرفته و اعلام کردند ظرفیت‌زیستی رابطه مثبت و سرمایه انسانی و گردشگری رابطه منفی با ردپای اکولوژیکی داشته و سیاست‌ها باید در راستای بهره‌وری منابع و ارتقا سرمایه انسانی باشد.

مطالعات دیگر و همسو با یافته‌های مذکور معتقدند که شاخص‌های اقتصادی، کیفیت نهادی و بهره‌وری انرژی میتوانند منجر به کاهش ردپای اکولوژیکی شده و گاه ارتباط غیرمستقیم بین آنها را نتیجه می‌گیرند. به این صورت که دولت‌ها می‌توانند با جهانی شدن مالی، برتری شهری و پیشرفت اقتصادی تغییرات سرانه ظرفیت‌زیستی را در سطحی پایدار نگه دارند. این نتیجه توسط مطالعه آلوارادو[8] (۲۰۲۲) با استفاده از روش رگرسیون کوانتایل برای کشورهای آمریکای لاتین توانایی بهتری برای تبیین اثرگذاری بر کسری یا مازاد ظرفیت زیستی، فراهم می‌کند.

---

[1] Yakymchuk & Rataj
[2] Rabajczyk
[3] Deng
[4] Glavina
[5] Dam
[6] Moros-Ochoa
[7] Nketiah
[8] Alvaradoe

اثر معنادار کیفیت سیاست‌گذاری در پایش ردپای اکولوژیکی و انتشار کربن توسط مطالعات داخلی نیر تأیید می‌شود. به طور مثال ذبیحی و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی سرانه انتشار کربن در ایران طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۸ را در قالب متغیرهای ریسک اقتصادی، ریسک مالی و ریسک سیاسی و روش تحلیل انتخابی رگرسیون کوانتایل بر کوانتایل (QQR) بررسی نمودند. نتایج نشان داد که تمامی ریسک‌ها در اکثر کوانتایل‌ها تأثیر مثبت بر سرانه انتشار کربن دارند و برخی کوانتایل‌ها اثر قوی‌تری نشان می‌دهند. گواهی که ثابت می‌کند میزان تخریب محیط‌زیست تنها از متغیرهای اقتصادی صرف نشأت نمی‌گیرد و سیاست‌های کارآمد در مواجهه با این ریسک‌ها می‌تواند اثرگذاری معناداری داشته باشد. در تحقیقی دیگر توسط همان نویسندگان (۱۴۰۳) آثار آستانه‌ای ساختار مصرف انرژی و تولید ناخالص داخلی سرانه بر انتشار کربن این بار برای ۳۷ کشور با درآمد متوسط به بالا در دوره زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۹ و روش تحقیق از نوع غیرخطی با الگوهای رگرسیونی انتقال ملایم پانلی بررسی شد. متغیرهای انتخابی شامل ساختار مصرف انرژی، تولید ناخالص داخلی سرانه، شهرنشینی و بازبودن تجاری انتخاب شده و نتایج نشان داد افزایش کارایی در ساختار مصرف انرژی و تولید ناخالص داخلی سرانه می‌تواند منجر به کاهش انتشار کربن شود و شهرنشینی و بازبودن تجاری اثر مثبت بر انتشار کربن دارند. واقعیت این است که کیفیت سیاست‌گذاری کشورها در کنار جایگزینی حامل‌های انرژی آلاینده می‌تواند رشد اقتصادی را در کنار حفظ کیفیت محیط‌زیست تضمین نماید. به طور مثال کشورهای هفت‌گانه اپک که همگی بهره‌مند از موهبت نفت هستند می‌توانند توسعه پایدار را تجربه کنند به شرطی که نااطمینانی سیاست اقتصادی را به حداقل برسانند. این گذاره مهر تأییدی بر رابطه منحنی زیست‌محیطی کوزنتس بین رشد اقتصادی و کیفیت محیط‌زیست بوده که نتیجه تحقیق آماده و همکاران (۲۰۲۴) است.

در نهایت می‌توان اینگونه برداشت کرد که ادبیات داخلی مرتبط با انتشار دی‌اکسیدکربن در ایران مبتنی بر دو جریان تحلیلی نسبتاً متمایز است. نخست، رویکردهای ساختاری و علّی که با تکیه بر چارچوب‌های نظری مانند STIRPAT تلاش می‌کنند سازوکارهای تعیین‌کننده انتشار را شناسایی نموده و دوم مطالعات توصیفی–روندی که بر پایش بلندمدت مصرف سوخت‌های فسیلی و تخمین حجم انتشار متمرکز هستند. با کنار هم گذاشتن این دو جریان می‌توان تصویر جامع‌تری از دینامیک انتشار در اقتصاد ایران به تصویر کشید. به عنوان نمونه در چارچوب رویکرد ساختاری، پژوهش انجام‌شده توسط غزالی و آزادی (۲۰۲۳) با بهره‌گیری از مدل‌یابی معادلات ساختاری (SEM) مبتنی بر الگوی STIRPAT، تلاش کرده است اثر هم‌زمان عوامل اجتماعی، اقتصادی و فنی را بر انتشار CO_2 در سطح ۲۸ استان کشور طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۹ برآورد نماید. مزیت اصلی این مطالعه در آن است که به جای تحلیل‌های تک‌متغیره یا رگرسیون‌های خطی ساده، یک چارچوب علّی چندبعدی را به کار می‌گیرد که امکان بررسی روابط مستقیم و غیرمستقیم میان متغیرها را فراهم می‌سازد. نتایج نشان می‌دهد متغیرهای اجتماعی –که معمولاً شامل شاخص‌هایی نظیر آموزش، شهرنشینی یا ساختار جمعیتی هستند– نقش معنادار بازدارنده در انتشار دارند، در مقابل مؤلفه‌های اقتصادی و فنی اثر افزایشی و تقویت‌کننده بر سطح انتشار بر جای می‌گذارند. نکته کلیدی در یافته‌های این مطالعه، ناهمگنی منطقه‌ای اثرات است؛ به بیان دیگر، شدت و جهت تأثیر متغیرها در استان‌های مختلف یکسان نیست. این نتیجه از منظر سیاست‌گذاری بخشی و آمایش سرزمین از اهمیت بسزایی برخوردار است، زیرا نشان می‌دهد طراحی سیاست‌های کاهش انتشار در ایران نمی‌تواند مبتنی بر نسخه واحد ملی باشد و باید تفاوت‌های ساختاری مناطق و صنایع مستقر را در شامل شود.

در مقابل، مطالعه ولایت‌زاده (۲۰۱۹) با رویکردی توصیفی–تحلیلی، بر برآورد روند تاریخی انتشار کربن ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در ایران طی بازه بسیار بلندمدت ۱۳۰۶ تا ۱۳۹۴ تمرکز دارد. این پژوهش با استفاده از داده‌های آمارنامه مصرف فرآورده‌های نفتی و تفکیک سوخت‌هایی نظیر بنزین، نفت‌گاز، نفت‌کوره و نفت سفید، تصویری مبرهن از مسیر وابستگی اقتصاد ایران به انرژی‌های فسیلی ارائه می‌دهد. نتایج بیانگر روندی فزاینده و تقریباً مستمر در مصرف سوخت‌های فسیلی و به تبع آن افزایش انتشار کربن و آلاینده‌های جوی است؛ به‌گونه‌ای که تنها در سال ۱۳۹۴، میزان انتشار به حدود ۵۹/۶ میلیارد کیلوگرم دی‌اکسیدکربن رسیده است. اهمیت این مطالعه در مستندسازی مسیر تاریخی انتشار و نشان دادن پیوند ساختاری میان الگوی مصرف انرژی و فشار زیست‌محیطی غیرقابل انکار جایگاه ویژه‌ای دارد.

برآیند مطالعات مذکور نشان می‌دهد که اگرچه ادبیات داخلی و خارجی توانسته است هم تصویری تاریخی از روند انتشار ارائه دهد و هم به تحلیل ساختاری عوامل تعیین‌کننده بپردازد، اما همچنان خلأهایی وجود دارد. تحلیل‌های علّی موجود کمتر به تفکیک بخشی اقتصاد (کشاورزی، صنعت، حمل‌ونقل، برق و...) در قالب مدل‌های توزیعی پرداخته‌اند و از سوی دیگر، مطالعات روندی نیز فاقد چارچوب تحلیلی برای سنجش ناهمگنی اثرات در سطوح مختلف انتشار و فشارهای اکولوژیکی هستند. بنابراین، پیوند دادن تحلیل بخشی با روش‌های اقتصادسنجی پیشرفته –به‌ویژه رویکردهایی که بتوانند رفتار انتشار را در چندک‌های مختلف توزیع بررسی نماید– می‌تواند گامی تکمیلی در توسعه ادبیات حوزه پایداری اکوسیستم بوده و شکاف میان تحلیل توصیفی و مدل‌سازی علّی را پر نماید.

۳. یافته‌های پژوهش

رگرسیون کوانتایل یک تکنیک مدل سازی و برآورد آماری پیشرفته است که توسط کانکر و باست[1] در سال ۱۹۸۷ معرفی گردید. این روش امکان تحلیل تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته را در تمام نقاط توزیع آن فراهم می‌کند و محدود به میانگین توزیع، همانند رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS) نیست. همچنین این تکنیک با حداقل کردن مجموع قدر مطلق باقی‌مانده‌های موزون، مقاومتی بیشتر در برابر داده‌های پرت و واریانس ناهمسان ارائه می‌دهد و می‌تواند اثرات ناهمگن متغیرهای توضیحی را در کوانتایل‌های مختلف شناسایی کند. به عنوان مثال، مطالعه آلوارادو و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که استفاده از رگرسیون کوانتایل در تحلیل سرانه ظرفیت زیستی کشورهای آمریکای لاتین، امکان شناسایی تأثیر متفاوت شاخص‌های اقتصادی و شهری در کشورهایی با کسری یا مازاد ظرفیت زیستی را فراهم کرده و در نتیجه بینش دقیق‌تری برای سیاست‌گذاری محیط‌زیست ارائه می‌دهد. این مزیت‌ها باعث می‌شوند رگرسیون کوانتایل ابزاری مناسب برای تحلیل داده‌های اقتصادی و بررسی سهم تأثیرگذاری در متغیر وابسته مدل یعنی کسری اکولوژیکی باشد.

مدل کوانتایل را به صورت رابطه (۱) می‌توان نشان داد:

$$ED_i = \mu_i + \beta_\theta x_i + u_{it}\ Quant_\theta\ (ED|x_i) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن بردار x_i متغیرهای مستقل و β_θ برداری از پارامترها می‌باشد. $Quant_\theta\ (ED|x_i)$ نیز نشان‌دهنده θ امین ($0 < \theta < 1$) کوانتایل شرطی کسری اکولوژیکی در مقادیر بردار x_i داده‌شده می‌باشد.

جدول ۱. متغیرهای مورد استفاده در مدل تصریح شده

نام	اختصار	نوع متغیر	توضیح
کسری اکولوژیکی	EF	وابسته	کسری اکولوژیکی نشان‌دهنده فشار انسان بر اکوسیستم و منابع زیست‌محیطی است. افزایش EF به معنای کاهش پایداری محیط‌زیست است و در این پژوهش به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شده است. داده‌ها از شبکه جهانی ردپای بوم‌شناختی جمع‌آوری شده و پوشش زمانی ۱۹۷۰–۲۰۲۴ دارد.
کشاورزی	Agriculture	مستقل	انتشار CO_2 بخش کشاورزی نشان‌دهنده میزان گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های زراعی و دامداری
ساختمان‌ها	Buildings	مستقل	انتشار CO_2 بخش ساختمان‌ها، شامل مصرف انرژی و سوخت در ساختمان‌ها به سبب سیستم‌های گرمایش و سرمایش
سوخت	Fuel	مستقل	انتشار CO_2 توسط استخراج، تولید، پالایش و تبدیل سوخت‌های فسیلی است
صنعتی	Industrial	مستقل	انتشار CO_2 ناشی از فرآیندهای احتراقی در واحدهای تولیدی و صنعتی
نیروگاه‌ها	Power	مستقل	انتشار CO_2 ناشی از تولید برق در نیروگاه‌ها
فرآیندها	Processes	مستقل	انتشار CO_2 ناشی از فرآیندهای صنعتی مانند تولید سیمان و فولاد
حمل و نقل	Transport	مستقل	انتشار CO_2 حمل و نقل، شامل جابه‌جایی کالا و مسافر

(منبع: محاسبات پژوهش)

۳–۱. برآورد مدل و تفسیر نتایج

در این بخش به بررسی آمار توصیفی متغیرهای مدل پرداخته شده است و سپس نتایج آزمون جارک–برا در برآورد مدل به روش حداقل مربعات معمولی مورد بحث قرار گرفته است. بنا بر فروض کلاسیک، نرمال بودن جملات خطا در برآورد مدل به

[1] Koenker & Bassett

روش حداقل مربعات امری ضروری است؛ اما در رگرسیون کوانتایل الزامی بر نرمال بودن توزیع جملات خطا وجود ندارد و تخمین‌ها نسبت به نرمال نبودن توزیع مستحکم هستند. بنابراین در این پژوهش ابتدا آزمون نرمال بودن جارک برا را انجام داده، سپس به آزمون مانایی و تخمین مدل پرداخته می شود.

جدول ۲. آمار توصیفی

متغیر	میانگین	میانه	انحراف معیار	کشیدگی	چولگی	Prob JB	نتیجه
Agricultural	۱/۱۷۸	۱/۳۴۸	۰/۵۰۰	۲/۰۹۵	-۰/۶۰۰	۰/۰۷۵۲	نرمال
Buildings	۸۸/۸۷۵	۹۰/۹۶۸	۵۱/۵۹۴	۱/۶۴۶	۰/۰۴۹	۰/۱۲۱۱	نرمال
Fuel	۵۰/۷۵۳	۵۲/۵۴۰	۲۱/۳۶۰	۲/۵۸۲	۰/۲۳۲	۰/۶۳۹۷	نرمال
Industrial	۵۴/۰۱۰	۴۳/۳۶۲	۳۶/۷۱۵	۲/۵۴۱	۰/۷۷۲	۰/۰۵۱۱	نرمال
Power	۷۷/۹۳۴	۵۸/۴۰۳	۶۳/۹۱۳	۱/۸۷۵	۰/۵۳۵	۰/۰۶۳۳	نرمال
Process	۲۳/۸۴۹	۱۴/۷۱۱	۲۰/۹۵۱	۱/۸۳۳	۰/۶۸۵	۰/۰۲۴۴	غیرنرمال
Transport	۷۲/۸۰۱	۶۱/۲۶۸	۴۸/۱۳۵	۱/۴۸۸	۰/۱۹۲	۰/۰۶۱۶	نرمال
Pressure	-۱/۴۲۳	-۱/۳۹۵	۰/۹۶۶	۱/۹۳۶	۰/۲۹۸	۰/۱۸۲۰	نرمال

(منبع: محاسبات پژوهش)

طبق آزمون جارک-برا، در سطح اطمینان ۹۵ درصد تقریباً تمامی متغیرها دارای توزیع نرمال هستند. همچنین مقادیر چولگی بین ۰/۶- تا ۰/۷ قرار دارند، بنابراین هیچ‌کدام از سری‌ها به‌طور قابل توجهی چوله نیستند. کشیدگی نیز عمدتاً بین ۱/۴ تا ۲/۵ بوده و به نرمال نزدیک است. نزدیکی میانگین و میانه در اغلب متغیرها نشان‌دهنده تقارن توزیع داده‌ها است و نبود داده‌های پرت چشمگیر را تأیید می‌کند. تنها متغیر Process از توزیع نرمال پیروی نمی‌کند که می‌تواند نشان‌دهنده وجود ناهمگنی یا روند ساختاری در داده‌های مربوط به فرآیندهای صنعتی باشد. با این حال، چون در مقاله حاضر قرار است از مدل رگرسیون کوانتایل استفاده شود، این موضوع مشکلی ایجاد نمی‌کند. زیرا این مدل نسبت به نقض فروض نرمال بودن جملات خطا و ناهمسانی واریانس حساسیت کمتری دارد و می‌تواند روابط بین متغیرها را حتی در حضور داده‌های چوله یا دارای دم‌های بلند، به‌درستی برآورد نماید (Chen, 2021).

به منظور جلوگیری از رگرسیون کاذب انجام آزمون مانایی امری ضروری و الزامی است. درصورتی که متغیرها نامانا باشند، ضرایب غیر قابل اعتبار و ضریب تعیین بالا به دست می‌آید. اگرچه ممکن است بین متغیر وابسته و مستقل هیچ رابطه منطقی برقرار نباشد، اما انجام آزمون مانایی جهت جلوگیری از رگرسیون کاذب ضروری است؛ چراکه ممکن است منجر به استنباط اشتباه محقق در تفسیر نتایج شود (Whelam, 2011).

جدول ۳. نتایج آزمون مانایی

نام متغیر	قبل از t مقدار آماره تفاضل	ارزش احتمال قبل از تفاضل	بعد از t مقدار آماره تفاضل	ارزش احتمال بعد از تفاضل	درجه مانایی
Agricultural	-۱/۸۸۹	۰/۶۱۹۳	-۵/۸۴۶	۰/۰۰۰۷	I(۱)
Buildings	-۲/۵۵۸	۰/۳۴۹۸	-۵/۵۶۴	۰/۰۰۱۲	I(۱)
Fuel	-۱/۵۲۶	۰/۷۶۵۶	-۴/۹۶۴	۰/۰۰۲۳	I(۱)
Industrial	-۱/۳۲۷	۰/۸۴۵۸	-۴/۴۵۶	۰/۰۰۳۱	I(۱)
Power	-۱/۵۸۵	۰/۷۴۲۰	-۵/۷۰۵	۰/۰۰۱۸	I(۱)
Processes	-۱/۷۴۸	۰/۶۷۵۹	-۳/۵۲۸	۰/۰۰۷۴	I(۱)
Transport	-۱/۶۲۳	۰/۷۲۶۵	-۶/۱۹۷	۰/۰۰۰۳	I(۱)
Presure	-۱/۴۲۳	۰/۸۱۲۰	-۶/۰۶۳	۰/۰۰۰۱	I(۱)

(منبع: محاسبات پژوهش)

در جدول ۳ نتایج آزمون دیکی–فولر تعمیم‌یافته برای تمامی متغیرهای مورد بررسی درج شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمامی متغیرها در سطح اولیه غیرمانا بودند و برای تحقق شرط مانایی، لازم بود تفاضل مرتبه اول از آن‌ها گرفته شود. مقادیر آماره t و ارزش احتمال مربوط به هر متغیر، قبل و بعد از تفاضل در جدول ارائه گردیده است. این نتایج نشان می‌دهد که پس از اعمال تفاضل مرتبه اول، تمامی متغیرها مانا شده‌اند.

با توجه به تأیید مانایی متغیرها و نتایج آزمون‌های توصیفی پیشین، شرایط لازم برای استفاده از مدل رگرسیون کوانتایل فراهم گردیده و تحلیل‌های رگرسیونی در ادامه براساس تصریح مدل آورده شد.

جدول ۴. نتایج تخمین مدل

متغیر مستقل	چندک ٪۲۵	SE	چندک ٪۵۰	SE	چندک ٪۷۵	SE
Agricultural	-۰/۰۶۹	۰/۰۳۱**	-۰/۰۶۳	۰/۰۴۱	۰/۱۹۵	۰/۰۵۸**
Buildings	−۰/۰۹۱	۰/۰۴۲***	۰/۰۹۵	/۰۷۱	۰/۱۸۹	۰/۰۸۳***
Fuel	−۰/۰۴۵	۰/۰۲۱**	-۰/۰۷۳	۰/۰۲۹ **	-۰/۰۸۳	۰/۰۳۴**
Industrial	۰/۴۰۷	۰/۰۹۷***	۰/۱۷۹	۰/۰۷۴ **	۰/۱۹۳	۰/۰۸۱**
Power	−۰/۱۰۶	۰/۰۸۹	۰/۰۴۵	۰/۰۶۷	۰/۴۲۳	۰/۱۹۱**
Process	۰/۳۰۶	۰/۰۱۲۱**	۰/۳۴۶	۰/۱۰۹ **	۰/۱۹۳	۰/۰۹۵**
Transport	۰/۳۲۱	۰/۱۲۸**	۰/۳۹۹	۰/۱۳۷ **	۰/۵۱۱	۰/۱۸۲***

*، **و *** به‌ترتیب نشان‌دهنده معناداری آماری در سطوح **۱۰ درصد، ۵ درصد و ۱ درصد** هستند.

(منبع: محاسبات پژوهش)

بر اساس نتایج برآورد مدل رگرسیون کوانتایل، اثر انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از فعالیت‌های اقتصادی بر کسری اکولوژیکی ایران، الگوی ناهمگنی را از خود نشان می‌دهد. در بررسی ضریب‌های برآوردشده، مشاهده می‌شود که در بخش کشاورزی، ضرایب در چندک پایین‌تر (فشار بر محیط‌زیست کمتر است) منفی و در چندک بالاتر (زمانی که ناترازی اکولوژیکی شدت گرفته است) مثبت هستند. این موضوع بیانگر آن است که در سطوح پایین‌تر فشار زیستی، فعالیت‌های کشاورزی می‌توانند حتی نقشی ترمیمی در اکوسیستم داشته باشند، اما با افزایش شدت توسعه و صنعتی‌شدن این بخش، استفاده از نهاده‌های شیمیایی و سوخت‌های فسیلی افزایش یافته و در نتیجه اثر آن بر محیط زیست منفی می‌شود (FAO, 2024; Khan et. al., 2021). در واقع، کشاورزی سنتی ممکن است به حفظ تعادل زیستی کمک کند، اما کشاورزی مدرن و مکانیزه موجب تشدید انتشار و تخریب زیست‌محیطی می‌گردد. به بیان دیگر نقش کشاورزی در تخریب محیط‌زیست به ساختار تولید و مدیریت این بخش بستگی دارد. به‌عنوان نمونه در مطالعه‌ای روی بخش کشاورزی آفریقای جنوبی محققان نشان داده‌اند که افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن بخش کشاورزی می‌تواند به کاهش پتانسیل ترسیب کربن در خاک (کاهش قدرت خاک) منجر شود، به گونه‌ای‌که افزایش یک‌واحدی در انتشار کربن کشاورزی به‌طور قابل‌توجهی موجب کاهش ۰/۵ درصد کاهش در ترسیب کربن می‌شود (Iyke-Ofoedu et al., 2024).

جمیع این نتایج گواهی است که رفتار بخش کشاورزی در توزیع فشار زیستی می‌تواند ناهمگن و تابع رفت و برگشت با سیاست‌های خرد و ساختارهای نهادی باشد که با مشاهده ضرایب ضعیف یا ناپایدار در برخی کوانتایل‌های مطالعه ما همگرا می‌باشد.

در بخش ساختمان‌ها، ضریب منفی در چندک پایین و ضرایب مثبت در چندک‌های میانی و بالاتر مشاهده می‌شود. این الگو نشان می‌دهد که در مراحل ابتدایی توسعه، ساخت‌وساز جدید می‌تواند با بهبود کارایی انرژی و جایگزینی ساختمان‌های فرسوده فشار بر محیط‌زیست را تقلیل دهد، اما در سطوح بالاتر کسری اکولوژیکی، انباشت ساختمان‌های پرمصرف انرژی و گسترش

شهرنشینی غیرپایدار باعث تشدید فشار بر محیط‌زیست می‌شود. این خروجی با یافته‌های سرور[1] (۲۰۲۴) و وانگ و همکاران[2] (۲۰۲۲) نیز مطابقت دارد.

بخش سوخت دارای ضرایب منفی در تمام چندک‌هاست، که حاکی از آن است که افزایش انتشار از این بخش با کاهش نسبی فشار زیست‌محیطی همراه بوده است. این نتیجه در نگاه اول متناقض به نظر می‌رسد، اما می‌توان آن را با تغییر ترکیب سبد انرژی ایران توضیح داد. زیرا در دهه‌ی اخیر سهم گاز طبیعی در مصرف نهایی انرژی ایران افزایش یافته و استفاده از سوخت‌های مایع و زغال‌سنگ کاهش یافته است. همچنین ارتقای فناوری‌های احتراقی و بهبود بهره‌وری انرژی در بخش‌های خانگی و صنعتی، شدت انتشار را پایین آورده است (IEA, 2023؛ Edgar, 2023).

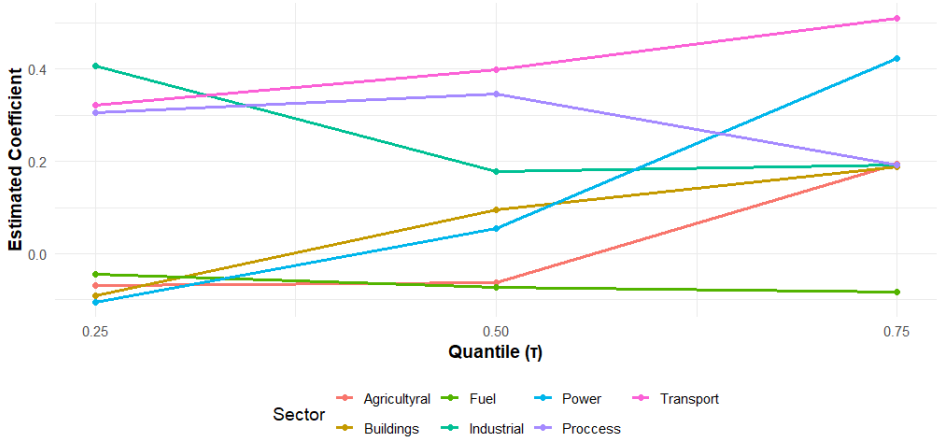
در مقابل، ضرایب بخش صنعت در تمامی چندک‌ها مثبت است و نشان‌دهنده‌ی تأثیر مستمر و قابل توجه این بخش بر شدت کسری اکولوژیکی است. رشد صنعتی، به‌ویژه در صنایع انرژی‌بر نظیر فولاد، سیمان و پتروشیمی، باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در انتشار CO_2 و مصرف منابع زیستی شده است (OECD, 2023). نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های حسن و همکاران[3] (۲۰۲۴) و ژانگ و کیو[4] (۲۰۲۰) سازگار است که نشان می‌دهند توسعه صنعتی در کشورهای در حال توسعه اغلب بدون در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی محقق شده و به تشدید ردپای اکولوژیکی منجر می‌گردد.

در بخش نیرو، ضرایب از منفی در چندک پایین به مثبت در چندک بالا تغییر می‌یابد. هرچند طبق نتایج جدول (۴) تنها اثر این بخش در چندک بالا معنی‌دار است. این روند نشان می‌دهد که در مراحل اولیه توسعه، گسترش زیرساخت‌های تولید برق می‌تواند از طریق افزایش دسترسی به انرژی نسبتاً پاک‌تر (نظیر برق گازی یا برق آبی) به کاهش فشار زیستی کمک کند، اما در سطوح بالاتر توسعه، وابستگی بیشتر به نیروگاه‌های حرارتی موجب افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه افزایش کسری اکولوژیکی می‌شود (IEA, 2023).

ضرایب بخش فرایندهای صنعتی در همه چندک‌ها مثبت است، که بیانگر تأثیر مداوم و مخرب این بخش بر محیط‌زیست است. این بخش شامل فرایندهایی نظیر تولید سیمان، فلزات، و کودهای شیمیایی است که انتشار آنها اغلب ماهیت فرآیندی دارد و کنترل آن با سیاست‌های معمول انرژی دشوار است. یافته‌ها با پژوهش‌های لی و همکاران[5] (۲۰۲۲) و سو و همکاران[6] (۲۰۲۱) مطابقت دارد که نشان داده‌اند کاهش انتشار فرآیندی مستلزم تحول فناورانه و استفاده از فناوری‌های جذب و ذخیره‌سازی کربن است.

در نهایت، بخش حمل‌ونقل بیشترین ضرایب مثبت را در تمامی چندک‌ها دارد، به‌ویژه در چندک بالاتر که شدت اثرگذاری آن بیشتر می‌شود. این نشان می‌دهد که حمل‌ونقل از اصلی‌ترین محرک‌های افزایش کسری اکولوژیکی است. با رشد سطح رفاه و توسعه شهری، تقاضا برای جابجایی و وابستگی به خودروهای شخصی افزایش یافته و در غیاب سامانه‌های کارآمد حمل‌ونقل عمومی، انتشار گازهای گلخانه‌ای این بخش به‌طور چشمگیری افزایش یافته است (IPCC, 2023؛ world Bnak, 2024). این یافته با الگوی جهانی سهم بالای حمل‌ونقل در انتشار CO_2 مطابقت داشته و بر ضرورت مداخله سیاستی در این حوزه تأکید دارد. در انتها شکل ۳ نشان‌دهنده تأثیر انتشار CO_2 توسط بخش‌های اقتصادی مربوطه در سه کوانتایل ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ و نمود بصری آنچه گفته شد است.

[1] Sarwar
[2] Wang
[3] Hassan
[4] Zhang & Qiu
[5] Li
[6] Su



شکل ۲. تاثیرگذاری متغیرهای مستقل در کوانتایل‌های مختلف متغیر وابسته

(منبع: محاسبات پژوهش)

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از برآورد مدل کوانتایلی نشان می‌دهد که اثر انتشار بخشی بر کسری اکولوژیکی در اقتصاد ایران، ناهمگن و وابسته به سطح توسعه و شدت فشار زیستی است. به طور کلی، ضرایب برآوردی در چندک‌های مختلف نشان دادند که بخش‌های صنعت، حمل‌ونقل و فرآیندهای صنعتی بیشترین اثر مثبت و معنادار را بر افزایش کسری اکولوژیکی دارند، در حالی‌که بخش‌های سوخت و کشاورزی در سطوح پایین‌تر توسعه، اثر نسبتاً خنثی یا حتی منفی بر فشار زیستی دارند. این الگو بیانگر آن است که با تغییر ساختار اقتصادی کشور از فعالیت‌های سوخت‌محور به سمت صنایع تولیدی و خدماتی، سهم نسبی انتشار کربن از بخش‌های مصرفی و صنعتی افزایش یافته است، در حالی‌که شدت انرژی در بخش سوخت به‌ویژه با گسترش مصرف گاز طبیعی و حذف تدریجی سوخت‌های سنگین، روندی کاهشی را تجربه کرده است (IEA, 2023; Edgar, 2023).

در تبیین نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که افزایش کسری اکولوژیکی ناشی از رشد بخش صنعت، ناشی از ماهیت انرژی‌بر و کربن‌محور فعالیت‌های صنعتی ایران است. بخش حمل‌ونقل نیز با سهم بالای سوخت‌های فسیلی و ناوگان فرسوده، اثر قابل توجهی بر فشار زیستی وارد می‌کند. در مقابل، نتایج مربوط به بخش سوخت نشان می‌دهد که با افزایش انتشار ناشی از احتراق سوخت، فشار بر ظرفیت زیستی کاهش یافته است. این رابطه معکوس می‌تواند ناشی از تغییر ترکیب سوخت مصرفی و افزایش سهم گاز طبیعی به‌عنوان سوخت پاک‌تر باشد (World Bank, 2024). همچنین در بخش کشاورزی، کاهش شدت انتشار می‌تواند نتیجه افزایش بهره‌وری و سیاست‌های مرتبط با بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها باشد که اثر مستقیم آن بر کسری اکولوژیکی کمتر شده است.

بر اساس این یافته‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که الگوی اثرگذاری انتشارهای بخشی بر محیط‌زیست کشور هم‌زمان از عوامل ساختاری، نهادی و تکنولوژیکی تأثیر می‌پذیرد. ازاین‌رو، سیاست‌های زیست‌محیطی ایران باید از رویکرد کلی و یکسان به سمت مدیریت بخشی انتشارها تغییر یابد. در بخش صنعت، توسعه فناوری‌های پاک، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و اعمال استانداردهای سخت‌گیرانه بر فرآیندهای تولید می‌تواند کاهش قابل ملاحظه‌ای در انتشار گازهای گلخانه‌ای ایجاد کند. در بخش حمل‌ونقل، نوسازی ناوگان عمومی، گسترش سوخت‌های جایگزین و حمل‌ونقل ریلی از جمله سیاست‌های اولویت‌دار هستند. در بخش سوخت، تداوم روند جایگزینی سوخت‌های مایع با گاز طبیعی و توسعه زیرساخت‌های گازرسانی در صنایع کوچک و نیروگاه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

یافته‌های پژوهش همچنین نشان می‌دهد که ثبات در سیاست‌های اقتصادی و انرژی و حمایت مالی از طرح‌های کم‌کربن، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش کسری اکولوژیکی داشته باشد. درواقع، سیاست‌های ناپایدار و تغییرات ناگهانی در قیمت انرژی،

انگیزه سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک را تضعیف می‌کند و می‌تواند اثر مثبت سیاست‌های زیست‌محیطی را خنثی سازد (Khan et al., 2021؛ Su et al. 2021).

از منظر پژوهشی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از رهیافت کوانتایلی قادر است ناهمگنی پنهان میان بخش‌ها و سطوح توسعه‌ای را آشکار سازد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با استفاده از داده‌های تابلویی استانی یا بین‌المللی، به تحلیل پویایی مکانی و زمانی اثر انتشارهای بخشی بر ظرفیت زیستی بپردازند. همچنین، بررسی نقش متغیرهای نهادی مانند کیفیت حکمرانی زیست‌محیطی، سطح نوآوری سبز و سرمایه انسانی می‌تواند ابعاد جدیدی از رابطه میان توسعه اقتصادی و پایداری اکولوژیکی را روشن کند.

با تکیه بر یافته‌های پژوهش پیشنهادات سیاستی به تفکیک افق زمانی ارائه می‌شود. در کوتاه‌مدت، تمرکز سیاست‌گذار باید بر ارتقای بهره‌وری انرژی در بخش‌های صنعت و حمل‌ونقل، بهینه‌سازی مصرف سوخت و کاهش اتلاف انرژی از طریق اصلاح استانداردها و مشوق‌های قیمتی باشد. در میان‌مدت اصلاح ساختار تولید صنعتی، نوسازی فناوری‌های آلاینده و جایگزینی با فناوری‌های سبز می‌تواند منجر به کاهش شدت انرژی در بخش‌های دارای اثرگذاری بالا بر کسری اکولوژیکی مانند صنعت و فرآیندهای صنعتی باشد. در افق زمانی بلندمدت، گذار تدریجی به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر، تنوع‌بخشی به سبد انرژی و بازطراحی الگوی مصرف انرژی به‌عنوان مسیر پایدار کاهش فشار زیستی و بهبود وضعیت اکولوژیکی کشور می‌تواند رهیافت مناسبی برای حفظ توان اکوسیستم و رسیدن به اهداف توسعه پایدار قلمداد شود.

در مجموع نتایج پژوهش حاضر تأکید می‌کند که دستیابی به رشد پایدار و هم‌زمان کاهش کسری اکولوژیکی، مستلزم ترکیب سیاست‌های صنعتی، انرژی و زیست‌محیطی است. اصلاح ساختار تولید، بهبود بهره‌وری انرژی و توسعه فناوری‌های سبز، مسیر اصلی حرکت ایران به‌سوی اقتصاد کم‌کربن و هم‌راستا با اهداف توسعه پایدار خواهد بود.

با وجود تلاش برای استفاده از داده‌های رسمی و معتبر، جمع داده های این پژوهش با محدودیت‌هایی همراه بود. در وهله اول کیفیت و یکنواختی داده‌های بلندمدت انتشار دی‌اکسیدکربن در سطح تفکیک‌بندی بخشی با چالش‌هایی مواجه است، به خصوص در سال‌های ابتدایی دوره زمانی مورد بررسی که تغییر در روش‌های اندازه‌گیری، بازتعریف طبقه‌بندی بخش‌های اقتصادی و وقفه‌های آماری می‌تواند منجر به ناهمگنی در داده‌ها شود.

دوم با وجود مزیت رگرسیون کوانتایل در مواجهه با ناهمگنی و داده‌های پرت، نتایج این روش همچنان به کیفیت داده‌های ورودی حساس بوده و محدودیت‌های آماری موجود می‌تواند بر دقت برآوردها، به‌ویژه در کوانتایل‌های حدی، اثرگذار باشد.

References

Alkasasbeh, O. M., Alassuli, A., & Alzghoul, A. (2023). Energy consumption, economic growth, and CO_2 emissions in the Middle East. *International Journal of Energy Economics and Policy, 13*(2), 123–134. https://doi.org/10.1016/j.ijeep.2023.123456

Alvarado, R., Tillaguango, B., Cuesta, L., Pinzón, S., Alvarado-Lopez, M. R., Işık, C., & Dagar, V. (2022). Biocapacity convergence clubs in Latin America: An analysis of their determining factors using quantile regressions. *Environmental Science and Pollution Research, 29*(44), 66605–66621. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20567-6

Amadeh, H., Moghaddam, A., & Khorsandi, M. (2024). The effect of economic policy uncertainty on carbon dioxide emissions: Evidence from OPEC member countries. *Iranian Journal of Energy Economics, 13*(2), 1–38. (In Persian)

Chen, I. C. (2021). Quantile regression for exposure data with repeated measurements. *Statistical Methods in Medical Research, 30*(5), 1234–1245. https://doi.org/10.1177/0962280221991234

Dam, M. M., Durmaz, A., Bekun, F. V., & Tiwari, A. K. (2024). The role of green growth and institutional quality in environmental sustainability: A comparison of CO_2 emissions, ecological footprint, and inverted load capacity factor for OECD countries. *Journal of Environmental Management, 365*, 121551. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121551

Dehghani, S. M. Q., Akbari, F., & Salakhnia, N. (2023). Investigating the role of economic, financial, and political risks on carbon emissions in Iran: A quantile-on-quantile regression (QQR) approach. *Iranian Economic Research Journal, 28*(96), 7–52. (In Persian)

Dehghani, S. M. Q., Kamalian, R., Akbari, F., & Najimideh, A. K. (2024). Investigating the threshold effects of energy consumption structure and per capita gross domestic product on carbon emissions: A panel smooth transition regression (PSTR) approach. *Iranian Journal of Energy Economics, 13*(50), 11–48. (In Persian)

Deng, X., Qamruzzaman, M., & Karim, S. (2024). Unlocking the path to environmental sustainability: Navigating economic policy uncertainty, ICT, and environmental taxes for a sustainable future. *Environmental Science and Pollution Research, 31*(25), 37136–37162. https://doi.org/10.1007/s11356-024-33566-6

EDGAR. (2023). *EDGAR CO_2 emissions database*. European Commission, Joint Research Centre. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/

Esmaeili, H., Afshar Kazemi, M. A., Radfar, R., & Pilevari, N. (2025). Integrated strategies for carbon emission control and air quality improvement in Iran. *Environmental Challenges, 12*, 100654. https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100654

Faraji Dizaji, S., Ghasemi, S., & Sargolzaie, A. (2022). Investigating the effect of renewable and non-renewable energy consumption on social welfare in developing Asian countries: A quantile regression approach. *Quarterly Journal of Economic Research and Policies, 30*(103), 389–419. http://qjerp.ir/article-1-3262-fa.html

Faridzad, A. (2023). Impact of COVID-19 pandemic on greenhouse gas emissions in Iran: An environmental input–output approach. *Emission Control Science and Technology, 9*, 200–211. https://doi.org/10.1007/s40825-023-00231-2

Ghazali, S., Shabani, Z. D., & Azadi, H. (2023). Social, economic, and technical factors affecting CO_2 emissions in Iran. *Environmental Science and Pollution Research, 30*, 70397–70420. https://doi.org/10.1007/s11356-023-27344-z

International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*. OECD/IEA.

Iyke-Ofoedu, M., Takon, S. M., Ugwunta, D. O., Ezeaku, H. C., & Nsofor, E. S. (2024). Impact of CO_2 emissions embodied in the agricultural sector on carbon sequestration in South Africa: The role of environmental taxes and technological innovation. *Journal of Cleaner Production, 444*, 141210. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141210

Khan, I., Hou, F., & Le, H. P. (2021). The impact of natural resources, energy consumption, and population growth on environmental quality: Fresh evidence from the United States of America. *The Science of the total environment*, *754*, 142222. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142222

Khoshnevis Yazdi, S., & Shakouri, B. (2017). The effects of renewable energy on sustainable development and CO_2 mitigation in Iran. *Renewable Energy, 111*, 574–583. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.041

Koenker, R., & Bassett, G. (1978). Regression quantiles. *Econometrica, 46*(1), 33–50. https://doi.org/10.2307/1913643

Leal, P. H., & Marques, A. C. (2022). The evolution of the environmental Kuznets curve hypothesis assessment: A literature review under a critical analysis perspective. *Heliyon, 8*, e11521. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11521

Li, P., Abbas, J., Balsalobre-Lorente, D., Wang, Q., Zhang, Q., & Shah, S. A. R. (2025). The role of social, economic, and technical factors in CO_2 emissions in Pakistan: A STIRPAT analysis. *Environmental Science and Pollution Research, 30*, 94515–94536. https://doi.org/10.1007/s11356-023-28923-w

Meadows, D., & Randers, J. (2012). *The limits to growth: The 30-year update*. Routledge.

Moros-Ochoa, M. A., Castro-Nieto, G. Y., Quintero-Español, A., & Llorente-Portillo, C. (2022). Forecasting biocapacity and ecological footprint at a worldwide level to 2030 using neural networks. *Sustainability, 14*(17), 10691. https://doi.org/10.3390/su141710691

Muhammad, A., Saleha, A., & Hassan, S. (2024). Exploring the relationship between CO_2 emissions, economic growth, and energy consumption at the aggregate level: A panel data analysis. *Journal of Economic Impact, 34*. https://doi.org/10.1016/j.jeconimp.2024.123456

Nketiah, E., Song, H., Obuobi, B., Adu-Gyamfi, G., Adjei, M., & Cudjoe, D. (2022). The impact of ecological footprint in West Africa: The role of biocapacity and renewable energy. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 29*(6), 514–529. https://doi.org/10.1080/13504509.2022.2051637

Pathiranage, H. S. K. (2024). Navigating the trade-offs between economic growth and environmental sustainability. *Journal of Environmental Economics, 12*(3), 45–59. https://doi.org/10.1080/27658511.2024.2419161

Sarwar, N. (2024). Impact of urbanization and human development on ecological footprints. *Environmental Science & Policy, 129*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.11.003

Shahbaz, M., Zakaria, M., Shahzad, S. J. H., & Mahalik, M. K. (2018). The energy consumption and environmental degradation nexus in developing countries: A quantile regression approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 84*, 337–347. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.12.005

Solaymani, S. (2020). A CO_2 emissions assessment of the green economy in Iran. *Greenhouse Gases: Science and Technology, 10*(2), 390–407. https://doi.org/10.1002/ghg.1969

Su, H.-W., Khan, K., Umar, M., & Zhang, W. (2021). Does renewable energy redefine geopolitical risks? *Energy Policy, 158*, 112566. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112566

Valayat Zadeh, M. (2019). Estimation of carbon emissions from fossil fuel consumption in Iran during the period 1975–2015. *Research in Environmental Health, 4*(3), 237–246. https://sid.ir/paper/261422/fa (In Persian)

Wang, Q., Zhang, F., & Li, Y. (2016). Economic growth, energy consumption, and CO_2 emissions: Evidence from the BRICS countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 65*, 1025–1034. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.045

Whelan, K. (2011). *Spurious regressions and cointegration*. https://www.karlwhelan.com/Teaching/MA Econometrics/part4.pdf

World Bank. (2024). *World development indicators: Energy and emissions dataset*. World Bank.

WWF. (2014). *Living planet report 2014: Species and spaces, people and places*. WWF.

Yakymchuk, A., & Rataj, M. A. (2025). Economic analysis of fossil CO_2 emissions: A European perspective on sustainable development. *Energies, 18*(8), 2106. https://doi.org/10.3390/en18082106

Yoro, K. O., & Daramola, M. O. (2020). CO_2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In *Advances in carbon capture* (pp. 3–28). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3