Environmental Education and Sustainable Development *Open Access*

2026, 14(3): 159-176
DOI: 10.30473/EE.2025.75189.2869

ORIGINAL ARTICLE

Determinants of Iran's Ecological Footprint: The Role of Education and Sustainable Energy Policies

Ebrahim Alikhah[1], *Seyed Kamal Sadeghi[2], Davood Behboudi[3], Mohsen Pourebadolhan Covich[4]

1. Ph.D. Candidate in Economics - Economic Development, Aras International Campus, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2. Professor, Department of Economic Development and Planning, Faculty of Economics and Management, University of Tabriz, Tabriz, Iran
3. Professor, Department of Economic Development and Planning, Faculty of Economics and Management, University of Tabriz, Tabriz, Iran
4. Professor, Department of Economic Development and Planning, Faculty of Economics and Management, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Correspondence:
Seyed Kamal Sadeghi
Email: seyed kamal-sadeghi@tabrizu.ac.ir

Received: 13.Sep.2025
Received in revised form: 13.Dec.2025
Accepted: 20.Dec.2025

How to cite:
Alikhah, E., Sadeghi, S.K., Behboudi, D., & Pouredadolhan Covich, M. (2026). Determinants of Iran's Ecological Footprint: The Role of Education and Sustainable Energy Policies. Journal of Environmental Education and Sustainable Development, 14(3), 159-176. (DOI: 10.30473/EE.2025.75189.2869)

ABSTRACT

This study examines the factors influencing Iran's ecological footprint, with a special focus on the role of education and sustainable energy policies. The ecological footprint, as a critical indicator for assessing human pressure on natural resources, requires thorough analysis in Iran due to its heavy reliance on fossil fuels and environmental challenges. The primary objective of this study is to investigate the impact of renewable energy consumption, economic growth, industrial value-added, and education on Iran's ecological footprint from 1961 to 2023, using the Nonlinear Autoregressive Distributed Lag (NARDL) model. The main research gap in prior studies is the lack of attention to education as a soft factor in sustainability alongside economic and energy variables, as well as the emphasis on linear relationships instead of exploring nonlinear and asymmetric effects. The innovation of this study lies in incorporating environmental education into the NARDL model for Iran for the first time, enabling the analysis of positive and negative shocks. The findings indicate that renewable energy consumption and sustainable economic growth reduce the ecological footprint in the short term, though positive and negative shocks may yield varying effects. In the long term, education plays a significant and reducing role. The results suggest that policymakers should promote clean energy, impose taxes on polluters, and enhance environmental education to reduce the ecological footprint and achieve sustainable development. This study emphasizes the importance of integrating economic, social, and environmental dimensions.

KEYWORDS

Ecological Footprint, Nonlinear Autoregressive Distributed Lag (NARDL), Renewable Energy, Environmental Education.

Copyright © 2026 The Authors. Published by Payame Noor University
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

Introduction

The ecological footprint (EF) quantifies human demand on Earth's regenerative capacity, measuring the biologically productive area needed for resource consumption and waste assimilation (Wackernagel & Rees, 1996). As a comprehensive sustainability indicator, it surpasses CO2-focused metrics by integrating land, water, and biodiversity pressures. Iran's EF predicament is acute: fossil fuel dominance (over 95% of energy consumption) fuels emissions, desertification, and water stress, yielding a per capita EF of 2.8 global hectares, which exceeds the country's biocapacity by 150% (Global Footprint Network, 2023). Spanning oil wealth eras to sanction-hit stagnation, Iran's trajectory underscores the perils of the resource curse, where economic booms amplify degradation without offsetting efficiencies. Determinants interweave economics, energy, and society. GDP growth embodies the Environmental Kuznets Curve (EKC): early industrialization swells EF, but innovation thresholds may decouple it (Grossman & Krueger, 1995). Renewables like solar energy (Iran's untapped potential of 300 sunny days/year) promise mitigation and are inversely linked to EF in energy transitions (Sahoo & Sethi, 2021). Industrial value-added (IND) drives prosperity yet inflates EF via inefficient oil-refining. Overlooked is education (EDU), which represents environmental literacy reshaping behaviors and amplifying policy impacts (Dvulit et al., 2024). Iranian literature has largely focused on linear energy-GDP ties, sidelining asymmetries (e.g., renewable surges vs. fossil fuel declines) and EDU's role (Sayadi et al., 2023; Esfahani et al., 2022). This study deploys the Nonlinear ARDL (NARDL) approach to unpack asymmetric effects of renewables (EGY), GDP, IND, and EDU on EF (1961–2023). Covering oil shocks, revolutions, and Paris Agreement commitments, it innovates by embedding EDU in a NARDL framework for Iran, probing shock heterogeneities. Rooted in sustainable development's three-pillar framework (Brundtland, 1987), it hypothesizes long-run EF reductions via EGY and EDU, with asymmetric effects associated with growth and IND. The study's contributions guide Iran's Vision 2040: renewable energy subsidies, polluter taxes, and green curricula for low-EF resilience.

Methodology

This applied econometric analysis employs the NARDL (Shin et al., 2011) model for asymmetric cointegration, extending ARDL to dissect positive and negative shocks in mixed I(0)/I(1) series, making it particularly suitable for Iran's volatilities without requiring strict pre-tests.

$$\ln(ECF_t) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(GDP_t) + \alpha_2 \ln(I_t) + \alpha_3 \ln(EGY_t) + \alpha_4 \ln(EDU_t) + \varepsilon_t$$

EF: per capita footprint (global ha/person); GDP: growth (%); I: industrial value added (percentage of GDP); EGY: renewables as a percentage of total energy consumption; EDU: UNESCO literacy/composite index. Logs ensure elasticities; variables were selected based on theoretical considerations (EKC scale for GDP; technique effect for EGY; composition effect for IND; human capital effect for EDU). Data: World Bank/Global Footprint Network (1961–2023), logged for linearity. Diagnostics: ADF/PP unit roots; Pesaran bounds F-test (cointegration if >4.35 at 5%); AIC lags; CUSUM stability; Breusch-Godfrey (autocorrelation test), ARCH (heteroskedasticity test), RESET (specification test). Granger-Yoon tests were used to examine hidden cointegration. EViews/Stata estimation: symmetric ARDL baseline, then NARDL asymmetries. This yields robust short- and long-run insights, while pioneering the analysis of EDU's shock effects for policy.

Results

The ecological footprint variable, renewable energy consumption, and economic growth became stationary after first differencing. In contrast, the value-added variable of the industrial development sector remained stationary at level. Also, based on the ADF and PP unit root tests, the education index was stationary at level. All variables were statistically significant at the 99% confidence level. In the linear autoregressive model with short-term distributed lags, renewable energy consumption has a negative effect on the ecological footprint; a one percent increase in renewable energy consumption leads to a 0.008 percent decrease in the ecological footprint. This shows that the use of renewable energy, although small, has a reducing effect on the ecological pressure on the environment. In addition, economic growth has a negative effect on the ecological footprint, so that a one percent increase in economic growth reduces the ecological footprint of the current period by 0.342 percent. Also, the first lag of economic growth has a positive and significant effect on the ecological footprint; thus, a one percent increase in the first lag of economic growth increases the ecological footprint of the current period by 0.316 percent.

Findings portray Iran's EF as asymmetrically responsive, where linear ARDL understates shock-

driven nuances. Renewables' baseline reduction effect (-0.008% short-run) echoes technique shifts in low-penetration contexts (Sahoo & Sethi, 2021), yet EGY^{+} insignificance (+0.001%) and EGY^{-} relief (-0.028% short; -0.272% long) flag frictions: fossil subsidies stifle adoption, with downturns promoting greener outcomes through idled capacity, a phenomenon referred to as a "green recession" (Kongbuamai et al., 2020). Long-run EGY^{+} increases (+0.012%), which deviates from Idroes et al. (2024), likely due to import footprints, urging low-impact scaling. GDP's short-run dip (-0.342%) hints at the EKC hypothesis, but lagged positives (+0.316% short; +1.225% long) and negatives (-0.309%) mirror MENA growth pressures (Sayadi et al., 2023; Tarazkar et al., 2020). Expansions intensify environmental pressure through scale effects, whereas recessions ease such pressures, contrasting with findings from developed economies (Esfahani et al., 2022), necessitating green growth buffers. IND's limited impact (+0.0025%; shocks insignificant/+0.023%) reflects oil inertia, tempering Candra et al. (2023)'s efficiency hopes; negatives' penalty signals fossil rebounds. EDU shines: -0.045% short-run; -0.089% long-run positives validate behavioral pivots (Dvulit et al., 2024), absent in previous studies (Parsashrif et al., 2021); negatives (+0.031%/+0.067%) caution against educational setbacks. As a shock absorber, EDU integrates the three sustainability pillars, syncing with Neagu (2022)'s complexity-EKC framework but contrasting with Idroes et al.'s findings amid sanctions. Stability affirms robustness; however, the relatively small sample size should be acknowledged as a limitation. Policy implications suggest that asymmetry demands targeted renewables (reaching 20% by 2030), carbon taxes, and mandatory environmental education, providing a holistic pathway toward SDG alignment.

Conclusions

NARDL reveals EGY/EDU as long-run EF reducers (-0.009% aggregate EGY; -0.089% EDU), asymmetrically modulating GDP/IND shocks (+1.225% GDP^{+}; +0.023% IND^{-}). Symmetric baselines mask volatilities, underscoring integrated strategies. This asymmetry-centric lens exposes policy blind spots: while renewables offer promise, unchecked shocks from growth booms or industrial dips perpetuate unsustainability, particularly in sanction-vulnerable economies like Iran's. Education's pivotal buffering—mitigating up to 8.9% of EF pressures—highlights its underleveraged potential, transforming passive consumers into active stewards. Recommendations include boosting renewable energy deployment through green imports and R&D incentives to offset embodied footprints; progressively taxing fossil fuels (starting at a 5% carbon levy, scaling to 15% by 2035); and embedding environmental education in curricula with nationwide 90% literacy targets, incorporating shock-resilient modules such as climate simulations and community outreach. These measures support progress along the EKC pathway while aligning with SDGs 4 (quality education), 7 (affordable clean energy), and 13 (climate action), and fostering resilience against exogenous volatilities. Future avenues include Spatial NARDL for provincial disparities, DSGE models for shock forecasts, and cross-MENA panels to benchmark asymmetries. Iran's path exemplifies that sustainability demands not mere transitions, but transformative asymmetries, with economic vigor harnessed through enlightened, equitable policies. By prioritizing these, Iran can reclaim biocapacity equilibrium, serving as a model of green resilience for the Global South.

Acknowledgment

The authors of this article are grateful for the efforts of the managers and executive officers of the journal, and also appreciate the respected reviewers whose valuable and constructive comments contributed to the scientific improvement of the article.

Conflict of Interest

"The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this manuscript".

آموزش محیط‌زیست و توسعه پایدار

سال چهارهم، شماره سوم، ۱۴۰۵ (۱۵۹-۱۷۶)

DOI: 10.30473/EE.2025.75189.2869

«مقاله پژوهشی»

عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی ایران: نقش آموزش و سیاست‌های انرژی پایدار

ابراهیم علی‌خواه[۱]، *سید کمال صادقی[۲]، داود بهبودی[۳]، محسن پورعبادالهان کویچ[۴]

۱. دانشجوی دکتری علوم اقتصادی- توسعه اقتصادی، پردیس بین‌المللی ارس، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲. استاد، گروه توسعه اقتصادی و برنامه‌ریزی، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۳. استاد، گروه توسعه اقتصادی و برنامه‌ریزی، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۴. استاد، گروه توسعه اقتصادی و برنامه‌ریزی، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

نویسنده مسئول:
سید کمال صادقی
رایانامه: seyed kamal-sadeghi@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

استناد به این مقاله:
علی‌خواه، ابراهیم. صادقی، سید کمال. بهبودی، داود. و پورعبادالهان کویچ، محسن. (۱۴۰۵). عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی ایران: نقش آموزش و سیاست‌های انرژی پایدار، فصلنامه علمی آموزش محیط زیست و توسعه پایدار، ۱۴(۳)، ۱۵۹-۱۷۶.
(DOI: 10.30473/EE.2025.75189.2869)

چکیده

این پژوهش به بررسی عوامل اثرگذار بر ردپای اکولوژیکی ایران می‌پردازد، با تأکید ویژه بر نقش آموزش و سیاست‌های انرژی پایدار. ردپای اکولوژیکی، به‌عنوان شاخصی مهم برای سنجش فشار انسانی بر منابع طبیعی، در ایران به‌دلیل وابستگی گسترده به سوخت‌های فسیلی و چالش‌های زیست‌محیطی نیازمند تحلیل دقیق است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی تأثیر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر، رشد اقتصادی، ارزش افزوده بخش صنعت و آموزش بر ردپای اکولوژیکی ایران طی سال‌های ۱۳۴۰ تا ۱۴۰۲ با استفاده از مدل غیرخطی خودرگرسیونی با وقفه‌های توزیعی (NARDL)است. شکاف پژوهشی اصلی در مطالعات پیشین، کم‌توجهی به نقش آموزش به‌عنوان عاملی نرم‌افزاری در پایداری، در کنار متغیرهای اقتصادی و انرژی، و تمرکز بر روابط خطی به‌جای بررسی اثرات غیرخطی و نامتقارن است. نوآوری این پژوهش، گنجاندن آموزش زیست‌محیطی در مدلNARDL برای ایران است که برای اولین بار امکان تحلیل اثرات مثبت و منفی تکانه‌ها را فراهم می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و رشد اقتصادی پایدار در کوتاه‌مدت ردپای اکولوژیکی را کاهش می‌دهند، اما تکانه‌های مثبت و منفی می‌توانند اثرات متفاوتی داشته باشند. در بلندمدت، آموزش نقشی کاهنده و معنادار ایفا می‌کند. نتایج پیشنهاد می‌کند که سیاست‌گذاران با گسترش استفاده از انرژی‌های پاک، وضع مالیات بر آلاینده‌ها و تقویت آموزش زیست‌محیطی، به کاهش ردپای اکولوژیکی و تحقق توسعه پایدار کمک کنند. این مطالعه بر اهمیت یکپارچگی ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی

انرژی‌های تجدیدپذیر، ردپای اکولوژیکی، روش غیرخطی خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی، آموزش زیست‌محیطی.

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۵ ©. ناشر این مقاله، دانشگاه پیام نور است.
این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.
Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

با توجه به منابع طبیعی و آثار مخرب فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست، شاخص «ردپای اکولوژیکی» به مهم‌ترین ابزارهای پایداری پایدار تبدیل شده است (Wackernagel & Rees, 1996). این شاخص نشان می‌دهد که الگوها، چگونه می‌تواند از مصرف زیست‌محیطی در زمین فراتر روند و زمینه آسیب اکولوژیکی را فراهم کنند. زمانی که اکوسیستم‌ها از ظرفیت زیستی فراتر می‌رود، پیامدهایی مانند کاهش منابع پذیرنده، انباشت آلاینده‌ها و تهدید سلامت اکوسیستم‌ها رخ می‌دهد (Shayanmehr et al., 2023; Zhao et al., 2025). در این میان، بخش انرژی به دلیل نقش محوری در فعالیت‌های اقتصادی و سهم بالای آن در انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی بر ردپای اکولوژیکی می‌شود (Akadiri et al., 2022; Sahoo & Sethi, 2021). بسیاری از کشورها برای کاهش فشار زیست‌محیطی، انرژی‌های تجدیدپذیر را در دستور کار قرار می‌دهند. ایران، با مصرف بالای انرژی و اتکای به سوخت‌های فسیلی، با چالش‌های جدی زیست‌محیطی روبرو می باشد. رتبه نسبتاً پایین در شاخص عملکرد زیست‌محیطی ایران، نیازمند توجه به سیاست‌های انرژی پایدار و اصلاح الگوی مصرف است (Daneshvar et al., 2019). با این حال، دستیابی به توسعه پایدار صرفاً در گرو اصلاحات فناورانه و سیاستی در حوزه انرژی نیست، بلکه نیازمند نرم‌افزار توسعه پایدار؛ یعنی آموزش و ارتقای سواد زیست‌محیطی است. آموزش می‌تواند از طریق تغییر نگرش‌ها و رفتار مصرفی، نقش اساسی در کاهش ردپای اکولوژیکی ایفا کند (Dvulit et al., 2024). نادیده گرفتن این بعد باعث می‌شود حتی در صورت بهبود فناوری و سیاست‌گذاری، رفتارهای مصرفی ناسازگار همچنان حفظ پایداری داشته باشد. ضرورت توجه ویژه به عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی و اتخاذ سیاست‌های کارآمد، به ویژه در حوزه انرژی پایدار، را آشکار می‌سازد. توسعه پایدار تنها به سیاست‌های محیطی وابسته نیست و بدون در نظر گرفتن ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی قابل دستیابی نخواهد بود. منابع انرژی از عوامل کلیدی در این حوزه هستند (Rosen, 1996; Benhacene & Hussien, 2025). در سال‌های اخیر کشورها، چه پیشرفته و چه در حال توسعه، به انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر خورشیدی، بادی و ژئوترمال برای کاهش وابستگی به منابع محدود و اهداف زیست‌محیطی توجه خاصی نشان داده‌اند.

مطالعات نشان می‌دهد که عواملی همچون: رشد اقتصادی و الگوی مصرف انرژی (Kongbuamai et al., 2020)، وابستگی به سوخت‌های فسیلی و قیمت‌گذاری نادرست حامل‌های انرژی، فناوری‌های ناکارآمد در بخش صنعت و حمل‌ونقل (Candra et al., 2023) و کم‌توجهی به اقتصاد سبز و انرژی‌های تجدیدپذیر (Huseynova, 2024; Mikava & Kbiladze, 2024) بر افزایش ردپای اکولوژیکی تأثیرگذار بوده‌اند. همچنین، مرور ادبیات نشان می‌دهد که پژوهش‌های داخلی و خارجی به بررسی اثر مصرف انرژی، رشد اقتصادی یا توسعه صنعتی بر روی ردپای اکولوژیکی پرداخته‌اند (Sayadi et al., 2023; Ji et al., 2023). اما نقش آموزش در این رابطه نادیده گرفته شده است. همچنین، بسیاری از مطالعات به روابط خطی میان تغییرات بسنده کرده‌اند، در حالی‌که عملکردهای کلیدی بر ردپای اکولوژیکی می‌تواند نامتقارن باشد. بنابراین، دو شکاف پژوهشی اصلی قابل شناسایی است: توجه کافی به نقش آموزش در کنار تغییرات اقتصادی و انرژی در شکل‌دهی ردپای اکولوژیکی و غفلت از بررسی روابط غیرخطی و نامتقارن میان تغییرات. بدین منظور، با استفاده از مدل غیرخطی خودرگرسیونی با وقفه‌های توزیعی (NARDL)، مصرف انرژی‌های ناپذیر، رشد اقتصادی، ارزش افزوده بخش صنعت و آموزش بر ردپای اکولوژی ایران طی دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۲۳ تحلیل می‌شود. نوآوری این مطالعه در آن است که برای اولین بار در مدل NARDL، نقش آموزش به‌عنوان متغیر کلیدی در سیاست‌های انرژی پایدار در ایران بررسی می‌شود. در ادامه این مقاله، ابتدا مبانی نظری و پیشینه تجربی مرتبط با موضوع پژوهش ارائه خواهد شد. سپس، در بخش سوم، روش‌شناسی پژوهش شامل مدل و داده‌های مورد استفاده تشریح می‌شود. بخش چهارم به تجزیه‌وتحلیل یافته‌های پژوهش اختصاص دارد و در نهایت، در بخش پنجم، بحث و نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد. در ادامه، ابتدا پایه‌های نظری ردپای اکولوژیکی آورده می‌شود. سپس به مطالعات تجربی موجود در زمینه ردپای اکولوژیکی اشاره می‌شود.

از دهه ۱۹۹۰ به بعد، با توجه به اهمیت فزاینده توسعه پایدار، پژوهشگران کوشیده‌اند با ارائه شاخص‌ها و روش‌های گوناگون، مفهوم توسعه پایدار را ارزیابی و محاسبه کنند. یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها برای سنجش پایداری در سطوح مختلف، روش معروف به شاخص ردپای اکولوژیک می‌باشد که

توسط واکرناگل ۱۹۹۱، رایز ۱۹۹۲ و فولک و همکاران (۱۹۹۷) آن را مطرح کردند و امروزه، این مفهوم در مطالعات مختلف دستخوش تغییرات بسیاری شده و به عنوان معیاری برای توسعه پایدار شناخته شده است (Zhang et al., 2022). ردپای اکولوژیکی شاخصی برای سنجش فشار انسان بر منابع طبیعی است و بیان می‌کند چه میزان و منابع زیستی برای مصرف زمین و مصرف پسماندها نیاز دارد (Wackernagel & Rees, 1996). محاسبه ردپای اکولوژیکی بر پایه دو اصل ساده شکل می‌گیرد: اول، این امکان وجود دارد که ردپای بسیاری از منابع مصرفی و اغلب زباله‌های دورریخته‌شده را شناسایی کنیم. دوم، می‌توان این منابع و زباله‌ها را به مساحت زیستی مورد نیاز برای تولید و مدیریت آن‌ها تبدیل کرد. بنابراین، ردپای اکولوژیک به ما نشان می‌دهد که ملت‌های مختلف تا چه حد از منابع طبیعی بهره می‌برند (Özbaş et al., 2018). ردپای اکولوژیکی محدوده‌ای را اندازه‌گیری می‌کند که در آن تقاضای اکولوژیکی با ظرفیت طبیعت برای تأمین کالا و خدمات برابر بوده یا از آن فراتر می‌رود. هنگامی که تقاضای افراد از ظرفیت تجدیدپذیر محیط‌زیست بیشتر شود، منابع طبیعی کاهش یافته و این امر به ناپایداری منجر می‌شود. (Wackernagel et al., 2007). بنابراین، این شاخص ارتباط مستقیم با مفهوم توسعه پایدار دارد. توسعه پایدار نیز در پی ایجاد ساختار میان اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است، به‌گونه‌ای که نیازهای نسل حاضر بدون آسیب به نسل‌های آینده خواهد بود (Zhang et al., 2022; Stanescu, 2022; Farhang, 2022). توسعه پایدار در صدد ایجاد تعادل بین ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است. توسعه پایدار شامل ایده‌هایی است که تحت تأثیر شرایط اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی قرار می‌گیرد. ساختار، ابعاد و اهداف توسعه پایدار به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که تلاش می‌کند اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را تا حد امکان از طریق سیاست‌گذاری‌ها، اجرای اقدامات مؤثر و ارائه حمایت‌های لازم با یکدیگر تلفیق کند (Karimi Takanlou et al., 2023; Dvulit et al., 2024).

اما آنچه که در این مطالعه مهم است، بعد زیست‌محیطی است. بعد زیست‌محیطی به حفظ و تقویت پایه‌های منابع فیزیکی، زیستی و اکوسیستمی مرتبط است و به تعامل بین طبیعت و انسان می‌پردازد (Azadnia et al., 2017). در هر کشور، لازم است بهترین روش برای نزدیک شدن به مراحل تدوین و اجرای استراتژی ملی توسعه پایدار، با توجه به شرایط سیاسی، تاریخی، فرهنگی و اکولوژیکی آن کشور مشخص شود. عناصر کلیدی در استراتژی‌های ملی توسعه پایدار شامل تعهد ملی و رهبری مؤثر، هماهنگی میان اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، مشارکت گسترده و همکاری کارآمد، ظرفیت‌سازی و ایجاد محیط توانمند، و تمرکز بر نتایج و ابزارهای اجرایی است (Julia, 2016). بخش انرژی به دلیل انتشار آلاینده‌ها و تأثیر بر فعالیت‌های اقتصادی، یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر ردپای اکولوژیکی است (Akadiri et al., 2022). دسترسی به انرژی پایدار به دو نوع پیشرفت وابسته است: نخست، تا زمانی که بخش انرژی از نظر فنی و فناوری توسعه نیابد، نمی‌توان انتظار پایداری در این حوزه و بهره‌گیری از اشکال پایدار انرژی را داشت. دوم، در حوزه سیاست‌گذاری، پیگیری دستیابی به توسعه پایدار نیازمند تحولات اساسی در الگوهای تولید و مصرف انرژی است. بازنگری و اصلاح قوانین انرژی نیز عنصری اساسی برای دستیابی به پایداری در چارچوب اقتصادهای ملی و جهانی محسوب می‌شود (Ibekwe et al., 2024).

دیدگاه‌های مختلفی درباره میزان و نحوه تأثیر انرژی بر تولید و رشد اقتصادی متصور است و این تأثیرات را می‌توان در دو منظر اصلی گروه‌بندی کرد: دیدگاه اقتصاددانان بوم‌شناختی و دیدگاه اقتصاددانان نئوکلاسیک (Ji & Luo, 2020). طبق دیدگاه اقتصاددانان بوم‌شناختی، انرژی عامل اصلی در تابع تولید بوده و کلیدی‌ترین عامل رشد اقتصادی به شمار می‌رود، در حالی که سایر عوامل مانند نیروی کار و سرمایه، نقش‌های واسطه‌ای در فرآیند تولید دارند (Oliver Huidobro et al., 2022). در مقابل، اقتصاددانان نئوکلاسیک بر این باورند که انرژی نقش نسبتاً محدودی در تولید و رشد اقتصادی دارد و به‌عنوان یک نهاده واسطه‌ای، تحت تأثیر عوامل اصلی مانند سرمایه، نیروی کار و زمین اهمیت پیدا می‌کند (Kraft & Kraft, 1978). به‌طورکلی، از دیدگاه نظری، انرژی امروزه به‌عنوان یکی از عوامل تولید محسوب می‌شود و مصرف آن به‌طور مستقیم بر رشد اقتصادی اثر می‌گذارد. افزایش مصرف انرژی به‌عنوان یک نهاده تولید می‌تواند به رشد اقتصادی منجر شود، اما باید توجه داشت که این افزایش، اثرات غیرمستقیم منفی نیز به همراه دارد (Sasana & Aminata, 2019). از جمله پیامدهای منفی مصرف انرژی، تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی است که از احتراق سوخت‌های فسیلی ناشی می‌شوند هنگامی که مصرف انرژی با ناکارآمدی همراه باشد، تولید آلاینده‌ها شدت می‌یابد. یکی از عوامل اصلی آلودگی هوا،

به‌ویژه انتشار گاز دی‌اکسید کربن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای، از مصرف سوخت‌های فسیلی در بخش‌های تولیدی، تجاری، خدماتی و خانگی ناشی می‌شود. بخش انرژی نقش برجسته‌ای در تغییرات زیست‌محیطی دارد و به همین دلیل، سیاست‌های انرژی و سیاست‌های زیست‌محیطی ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند (Godawska & Wyrobek, 2021). یکی از پیشرفت‌های پایدار، آموزش و ارتقای سواد زیست‌محیطی است. آموزش از طریق مصرف، تغییر نگرش و اصلاح الگوهای مصرف، می‌تواند نقش مهمی در کاهش ردپای اکولوژیکی ایفا کند (Dvulit et al., 2024; Farhang et al, 2025). در واقع، حتی اگر فناوری‌های پاک و سیاست‌های زیست‌محیطی به‌خوبی طراحی شوند، بدون مشارکت عمومی و رفتارهای آگاهانه، اهداف پایداری نخواهند بود. از این‌رو، آموزش به‌عنوان یک عامل نرم‌افزاری مکمل سیاست‌های انرژی پایدار در مدل‌های تحلیلی وارد می‌شوند (Izuchukwu & Precious, 2025). در ارتباط با عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی مطالعات گسترده‌ای در داخل و خارج از کشور انجام شده‌است که در ادامه به‌اختصار مرور می‌شود.

صیادی و همکاران (۱۴۰۲)، به بررسی تاثیر شاخص‌های اقتصادی، کیفیت نهادی، و بهره‌وری انرژی بر ردپای اکولوژیکی با استفاده از داده‌های سالیانه ۱۵ کشور منطقه منا (خاورمیانه و شمال آفریقا) طی دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱ با رویکرد پانل کوانتایل پرداختند. یافته‌ها نشان می‌دهند که اثر ضرایب متغیرها بر ردپای اکولوژیکی با مبانی نظری مورد انتظار هم‌راستاست. تولید ناخالص داخلی سرانه تأثیر مثبت و معناداری بر ردپای اکولوژیکی دارد، در حالی که شاخص باز بودن تجاری، کنترل فساد، شاخص دموکراسی و بهره‌وری انرژی تأثیر منفی و معناداری بر آن دارند (Sayadi et al., 2023). اصفهانی و همکاران (۱۴۰۱)، با استفاده از روش گشتاورهای تعمیم‌یافته سیستمی، به بررسی رابطه بین رشد اقتصادی، مصرف انرژی و ردپای اکولوژیکی در کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۸ پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو گروه کشورها، رشد اقتصادی با مصرف انرژی و شاخص ردپای اکولوژیکی ارتباط متقابل داشته است. رشد اقتصادی در کشورهای توسعه‌یافته اثر منفی و در کشورهای در حال توسعه اثر مثبت بر ردپای اکولوژیکی داشته است (Esfahani et al., 2022). پارسا شریف و همکاران (۱۴۰۰)، در پژوهشی، رابطه بین سرانه ردپای اکولوژیکی و متغیرهای سرانه تولید ناخالص داخلی، مصرف انرژی، درجه باز بودن تجاری و توسعه مالی در منتخبی از کشورهای آسیا و اروپا طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۳ با استفاده از روش خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی تابلویی بررسی شد. نتایج نشان داد که متغیرهای مصرف انرژی، توسعه مالی و تولید سرانه ناخالص داخلی تأثیر مثبت، و متغیرهای تجارت باز و توان دوم سرانه تولید ناخالص داخلی تأثیر منفی بر ردپای اکولوژیکی داشته‌اند (Parsashrif et al., 2021). ترازکار و همکاران (۱۳۹۹)، تأثیر رشد اقتصادی، مصرف انرژی، ظرفیت زیستی و آزادسازی تجاری بر ردپای اکولوژیکی در کشورهای خاورمیانه را بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که بین ردپای اکولوژیکی و ظرفیت زیست بوم رابطه‌ای مثبت وجود دارد، در حالی که آزادسازی تجاری رابطه‌ای منفی با ردپای اکولوژیکی نشان می‌دهد (Tarazkar et al., 2020).

همچنین در مطالعات خارجی، ایدروس و همکاران[1] (۲۰۲۴)، در مطالعه‌ای تأثیر پویای انرژی‌های تجدیدناپذیر، انرژی‌های تجدیدپذیر، رشد اقتصادی و تشکیل سرمایه بر انتشار CO2 و ردپای اکولوژیکی در اندونزی در بازه زمانی ۲۰۲۲-۱۹۶۵ را با استفاده از روش‌های حداقل مربعات کاملاً تعدیل‌شده (FMOLS)، حداقل مربعات معمولی (DOLS) بررسی نمودند. یافته نشان می‌دهند که هر افزایش در مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر مستقیماً منجر به افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود، اما بر ردپای اکولوژیکی تأثیری ندارد. آزمون علیت گرنجر نشان داد که یک علیت دوطرفه‌ای بین ردپای اکولوژیکی و انرژی‌های تجدیدپذیر وجود دارد. دام و ساردوکی[2] (۲۰۲۳)، در پژوهشی اثر کوتاه مدت ناهمگن و بلند مدت همگن تاثیر FDI و تجارت بین‌المللی بر روی ردپای اکولوژیکی در کشورهای منتخب با استفاده از روش Pooled Mean Group گروه میانگین تلفیقی ARDL برآوردهای میانگین افزایش یافته (AMG) بررسی نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد، ناهمگونی قابل توجهی درتاثیر FDI و تجارت بین‌المللی بر روی ردپای اکولوژیکی در کوتاه‌مدت گذاشت ولی در درازمدت FDI به طور قابل توجهی ردپای اکولوژیکی را کاهش داد، ولی تجارت بین‌المللی تاثیر قابل توجهی بر محیط زیست ندارد. جی و همکاران[3] (۲۰۲۳)، به بررسی انرژی پایدار، توسعه اقتصادی و اکولویکی در کشور

1. Idroes et al.
2. Dam & Sarkodie
3. Jie et al.

چین طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ با استفاده از روش خودرگرسیونی با وقفه‌های توزیعی پرداخته‌اند. نتایج پژوهش حاکی از آن است که حساب مالی، منابع طبیعی و رشد اقتصادی، همگام ردپای اکولوژیکی حرکت می‌کند. همچنین ردپای اکولوژیکی پایداری زیست محیطی نتیجه بلندمدت توسعه اقتصادی و اجتماعی بوده است. نیاگو و نیاگو[1] (۲۰۲۲)، به بررسی بررسی اعتبار فرضیه EKC با جایگزینی متغیر درآمد با شاخص پیچیدگی اقتصادی با استفاده از ردپای اکولوژیکی با استفاده از روش رگرسیون چند جمله‌ای هم انباشته CPR پرداخته‌اند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد، با در نظر گرفتن شاخص پیچیدگی اقتصادی فرضیه EKC برای تحلیل پنل صادق است. منحنی U شکل معکوس تایید شد. شهرنشینی و شدت انرژی اثر افزایشی و جهانی شدن اقتصاد اثر کاهشی بر ردپای اکولوژیکی دارد. نیاگو[2] (۲۰۲۰)، ارتباط بین پیچیدگی اقتصادی، درآمد سرانه و مصرف انرژی‌های فسیلی را به‌عنوان متغیرهای توضیح‌دهنده ردپای اکولوژیکی در ۴۸ کشور بررسی کرد. نتایج نشان داد که شاخص پیچیدگی اقتصادی، تولید ناخالص داخلی سرانه و مصرف انرژی‌های فسیلی تأثیر مثبتی بر شاخص ردپای اکولوژیکی داشته‌اند.

با مرور مطالعات تجربی صورت گرفته در داخل کشور ملاحظه می‌شود، عمده مطالعات پیشین به بررسی جهت علیت مصارف انرژی، کیفیت محیط‌زیست و رشد اقتصادی پرداخته‌اند. با توجه به جدید بودن موضوع ردپای اکولوژیکی، توسعه پایدار با تأکید بر سیاست انرژی پایدار و نقش آموزش و با عنایت به این که هیچ مطالعه مشابه‌ای در داخل کشور مبنی بر موضوع مذکور در کشور ایران مشاهده نشده است. وجه تمایز اصلی این تحقیق با سایر مطالعات گذشته در حیطه‌ی موضوعی بررسی عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی: نقش آموزش و سیاست‌های انرژی پایدار در کشور ایران طی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۲۳ با استفاده از روش غیر خطی خود رگرسیونی با وقفه‌های توزیعی است.

روش‌شناسی پژوهش

مطالعه حاضر به لحاظ هدف از نوع تحقیقات کاربردی و به لحاظ روش تجزیه‌وتحلیل از نوع تحقیقات تحلیلی است. هدف این مطالعه بررسی عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی ایران: نقش آموزش و سیاست‌های انرژی پایدار طی سال‌های ۱۹۶۱–۲۰۲۳ با استفاده از روش غیرخطی خودرگرسیونی با وقفه‌های توزیعی پرداخته است. مدل اقتصادسنجی با لحاظ لگاریتم بر اساس مبانی نظری و مطالعات تجربی صورت گرفته توسط جی و همکاران (۲۰۲۳) به شکل رابطه (۱) تصریح می‌شود:

$$\ln(ECF_t) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(GDP_t) + \alpha_2 \ln(I_t) + \alpha_3 \ln(EGY_t) + \alpha_4 \ln(EDU_t) + \varepsilon_t$$

در رابطه (۱) ECF: ردپای اکولوژیکی (هکتار جهانی به ازای هر نفر)، GDP: رشد اقتصادی (درصد تغییر سالانه تولید ناخالص داخلی)، I: ارزش افزوده بخش توسعه صنعتی (درصد تولید ناخالص داخلی)، EGY: میزان مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر (سهم از کل مصرف انرژی) و EDU: شاخص آموزش (نرخ باسوادی یا شاخص آموزش یونسکو) است. همچنین ln لگاریتم طبیعی متغیرها را نشان می دهد، ε_t جمله اخلال با صفر و واریانس ثابت است انتخاب این متغیرها بر اساس مبانی نظری و مطالعات پیشین صورت گرفته است و در این میان، آموزش به‌عنوان نوآوری تحقیق حاضر، برای نشان دادن نقش نرم‌افزاری توسعه پایدار وارد مدل شده است (jei et al., 2023; Sayadi et al., 2023). همچنین، آمار و اطلاعات موردنیاز تحقیق از پایگاه اطلاعاتی بانک جهانی به روش اسنادی و کتابخانه‌ای جمع‌آوری می‌شود. همچنین، نرم‌افزارهای مورد استفاده به منظور محاسبات آمار و برآورد مدل شامل استاتا ۱۷، ایویوز ۱۳ و اکسل می‌باشد.

الگوی نامتقارن خودرگرسیون با وقفه‌های گسترده

مدل NARDL، توسعه‌یافته توسط شین[3] و همکاران (۲۰۱۱)، یک مدل خودرگرسیونی با وقفه‌های توزیعی غیرخطی و یک روش اقتصادسنجی است که برای تحلیل روابط غیرخطی و نامتقارن بین متغیرها در کوتاه‌مدت و بلندمدت استفاده می‌کند. این مدل گسترش‌یافته مدل (Autoregressive ARDL (Distributed Lag است و امکان بررسی اثرات نامتقارن تکانه‌های مثبت و منفی یک متغیر مستقل بر متغیر وابسته را فراهم می‌کند. دلیل انتخاب این مدل، مزایای متعددی است که نسبت به روش‌های دیگر هم‌انباشتگی مانند انگل–گرنجر (۱۹۸۷) و به‌ویژه جوهانسن–جوسیلیوس (۱۹۹۰)

1. Neago & Neago
2. Neagu
3. Shin et al

دارد، به همین دلیل بصورت وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین مزیت این مدل در این است که نیازی به مانا بودن همه متغیرها در سطح(I(0)) یا تفاضل (I(1)) ندارد و می‌تواند با متغیرهای ترکیبی از مرتبه‌های مختلف مانایی کار کند، به شرطی که مرتبه هم‌انباشتگی یکسان باشد.این روش عدم تقارن در روابط کوتاه‌مدت و بلندمدت را معیین می‌کند. همچنین، علاوه بر محاسبه روابط بلندمدت بین متغیرها، قابلیت تحلیل روابط پویا و کوتاه‌مدت را نیز فراهم می‌کند و برعکس سایر روش‌ها، حتی در نمونه‌های کوچک نیز نتایج قابل اعتمادی ارائه می‌دهد. در نهایت، این روش در مواردی که متغیرهای توضیحی درون‌زا هستند، قابل استفاده است (Biyase et al., 2024; Cho et al., 2023). قبل از توسعه تکمیلی مدل NARDL، با فرض دو متغیر وابسته Y و مستقل x رابطه بلندمدت (۲) را بر اساس مطالعه گرنجر و یون[1] (۲۰۰۲)، بیان می‌شود:

$$y_t = \beta^+ x_t^+ + \beta^- x_t^- + u_t \qquad (۲)$$

که در رابطه (۲)، y_t و x_t متغیرهای انباشته از مرتبه یک $I(1)$ هستند:

$$x_t = x_0 + x_t^+ + x_t^- \qquad (۳)$$

$$x_t^+ = \sum_{j=1}^{t} \Delta x_j^+ = Max(\Delta x_j, 0),\ x_t^- + \sum_{j=1}^{t} \Delta x_j^- = Min(\Delta x_j, 0) \qquad (۴)$$

ترکیب خطی هم‌انباشته، مؤلفه‌های مجموع تجمعی مثبت و منفی را در نظر می‌گیرد:

$$z_t = \beta_0^+ y_t^+ + \beta_0^- y_t^- + \beta_1^+ x_t^+ + \beta_1^- x_t^- \qquad (۵)$$

اگر z_t انباشته از مرتبه صفر باشد، در این صورت گفته می‌شود که y_t و x_t به صورت نامتقارن هم انباشته‌اند. چنان‌چه $\beta_0^+ = \beta_0^-$ و $\beta_1^+ = \beta_1^-$ باشد، در این حالت هم‌انباشتگی متقارن خواهد بود (گرنجر و یون، ۲۰۰۲). با در نظر گرفتن چگونگی تفکیک تکانه‌های مثبت و منفی متغیر x و گنجاندن آن در یک مدل ARDL(p,q) به مدل NARDL(p,q) به شکل رابطه (۶) نوشته می‌شود:

$$y_t = \sum_{j=1}^{p} \varphi_j\, y_{t-j} + \sum_{j=0}^{q} (\theta_j^+ x_{t-j}^+ + \theta_j^- x_{t-j}^-) + \varepsilon_t$$

که در رابطه (۶)، p, q تعداد وقفه‌های بهینه، φ_j ضرایب وقفه‌های متغیر وابسته، θ_j^+ و θ_j^- ضرایب نامتقارن وقفه‌های متغیر وابسته و ε_t جمله‌های اخلال با میانگین صفر و واریانس ثابت است. بنابراین یک الگوی نامتقارن خودرگرسیون با وقفه‌های گسترده را به صورت زیر نوشت:

$$\Delta y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{p} \beta_i \Delta y_{t-1} + \sum_{j=0}^{q} (\theta_j^+ \Delta x_{t-j}^+ + \theta_j^- \Delta x_{t-j}^-) + \emptyset(I_{t-1} - \gamma_0 - \gamma_1^+ x_{t-1}^+ - \gamma_1^- x_{t-1}^-) + \mu_t \qquad (۷)$$

که در آن: x_t^- و x_t^+: مولفه‌های منفی و مثبت متغیر مستقل؛ θ_j^- و θ_j^+: ضرایب کوتاه‌مدت؛ γ_1^- و γ_1^+: ضرایب بلندمدت و $\emptyset$: ضریب تصحیح خطا می باشند.

هر رابطه بلندمدت در مدل ARDL(p,q) یک الگوی تصحیح خطا (ECM) برای بررسی سرعت تعدیل بلندمدت دارد که تضمین کننده دستیابی به آن تعادل است. بر این اساس در مدل NARDL نیز الگوی تصحیح خطا به صورت رابطه (۹) تنظیم شد:

$$\Delta y_t = \rho y_{t-1} + \theta^+ x_{t-1}^+ + \theta^- x_{t-1}^- + \sum_{j=1}^{p-1} \gamma_j\, y_{t-j} + \sum_{j=0}^{q-1} (\vartheta_j^+ \Delta x_{t-j}^+ + \vartheta_j^- \Delta x_{t-j}^-) + \varepsilon_t = \rho \xi_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \gamma_j\, y_{t-j} + \sum_{j=0}^{q-1} (\vartheta_j^+ \Delta x_{t-j}^+ + \vartheta_j^- \Delta x_{t-j}^-) + \varepsilon_t \qquad (۸)$$

که در رابطه (۸) داریم:

$$\rho = \sum_{j=1}^{p} \varphi_j - 1\,, \gamma_j = -\sum_{i=j+1}^{p} \varphi_i\ for\ j = 1, \dots, p-1, \theta^+ = \sum_{j=0}^{q} \theta_j^+\,, \theta^- = \sum_{j=0}^{q} \theta_j^-\,, \qquad (۹)$$

$$\vartheta_0^+ = \theta_0^+, \vartheta_j^+ = -\sum_{i=j+1}^{q} \theta_i^+\ for\ j = 1, \dots, q-1, \vartheta_0^- = \theta_0^-, \vartheta_j^- = -\sum_{i=j+1}^{q} \theta_i^-\ for\ j = 1, \dots, q-1 \qquad (۱۰)$$

همچنین، جزء $y_{t-1} - \beta^+ x_t^+ - \beta^- x_t^- = \xi_t$ تصحیح خطای نامتقارن است و $\beta^+ = -\theta^+/\rho$ و $\beta^- = -\theta^-/\rho$ ضرایب بلندمدت نامتقارن می‌باشد (Shin et al., 2011). برای ارزیابی دقیق وجود مرتبه هم‌انباشتگی یکسان میان متغیرها، منفی و معنادار بودن ضریب $\xi t - 1$ در برآورد ضرایب کوتاه‌مدت، حاکی از وجود رابطه بلندمدت بین متغیرها است.

1. Granger & Yoon

یافته‌های پژوهش

در این قسمت ابتدا به بررسی وضعیت ایستایی متغیرهـای تحقیـق پرداخته می‌شود. سـپس جهـت تحلیـل خلاصـه‌ای از آماره‌هـای توصیفی متغیرهای تحقیق ارائه می‌شود. سپس به برآورد مـدل بـا روش غیرخطی خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی پرداخته می‌شود.

جدول ۱. نتایج آزمون ریشه واحد

Table 2. Unit Root Test Results

متغیرها Variables	آزمون مانایی دیکی‌فولر Test(ADF)		آزمون مانایی فیلیپس پرون Phillips–Perron unit root test		درجه انباشتگی Degree of integration
	ضریب Coefficient	مقدار احتمال p-value	ضریب Coefficient	مقدار احتمال p-value	
ECF	6.216493-	0.000	-6.172346	0.000	مانا با یکبار تفاضل‌گیری stationary after first differencing
EGY	-6.997204	0.000	-8.064025	0.000	مانا با یکبار تفاضل‌گیری stationary after first differencing
GDP	-4.420092	0.000	-4.418953	0.000	مانا با یکبار تفاضل‌گیری stationary after first differencing
I	-5.647712	0.000	-5.419925	0.000	مانا در سطح Stationary at Level
EDU	-3.429657	0.000	-3.562848	0.000	مانا در سطح Stationary at Level

گام اولیه در انجام تخمین‌های سری‌های زمانی، ارزیابی وضعیت ایستایی متغیرها است. در این پژوهش، با بهره‌گیری از آزمون دیکی فولر تعمیم‌یافته و آزمون فیلیپس–پرون، به بررسی پایداری متغیرها پرداخته شده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول (۱)، متغیرهای ردپای اکولوژیکی، میزان مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و رشد اقتصادی پس از یک بار تفاضل‌گیری به وضعیت ایستا رسیده‌اند. در مقابل، متغیر ارزش افزوده بخش توسعه صنعتی در سطح مانا باقی مانده است. همچنین، بر اساس آزمونهای ریشه واحد ADF و PP، تغییرات شاخص آموزش در سطح مانا است. تمامی متغیرها در سطح اطمینان ۹۹ درصد از نظر آماری معنادار بوده‌اند. در ادامه خلاصه‌ای از آماره‌های توصیفی متغیرهای مورد مطالعه در جدول (۲) ارائه می‌شود.

جدول ۲. آماره‌های توصیفی متغیرهای پژوهش

Table 2. Descriptive Statistics of the Research Variables

متغیرها Variables	میانگین Mean	انحراف معیار Standard Deviation	پایین‌ترین Minimum	بالاترین Maximum
ECF	18.39371	0.8388253	17.1535	19.52707
EGY	7.1225	1.031857	5.869662	9.58
GDP	8.358447	0.2672913	7.760088	8.912221
I	3.883325	13.71139	47.11174–	63.89814
EDU	59.23675	15.18256	23.56548	88.962358

بر اساس جدول (۲)، خلاصه‌ای از آماره‌های توصیفی از متغیرهای ردپای اکولوژیکی، میزان مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر، رشد اقتصادی، ارزش افزوده بخش توسعه صنعتی و شاخص آموزش در قالب بالاترین میزان، پایین‌ترین، انحراف معیار و میانگین گزارش شده است. در ادامه به برآورد مدل خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی کوتاه مدت پرداخته می‌شود.

جدول ۳. نتایج تخمین ضرایب الگوی کوتاه‌مدت ARDL

Table 3. Results of the Short-Run ARDL Model Estimation

متغیر مستقل Independent Variable	ضریب Coefficient	آماره t t-Statistic	مقدار احتمال Prob
ECF (-1)	1.008456	42.56541	0.010
EGY	0.008238-	0.425861-	0.4324
GDP	0.342541-	2.236514-	0.0154
GDP (-1)	0.316325	2.515322	0.0022
I	0.002564	0.651258	0.3821
EDU	0.235120-	3.235891-	0.0052
C	0.175000	0.235481	0.5684

براساس جدول (۳) ملاحظه می‌شود، در الگوی خطی خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی کوتاه مدت؛ مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر اثر منفی در ردپای اکولوژیکی دارد؛ افزایش یک درصدی در مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر منجر به کاهش ۰/۰۰۸ درصدی در ردپای اکولوژیکی می‌شود. این نشان می‌دهد که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، هرچند اندک، اثر کاهشی بر فشار اکولوژیکی وارد بر محیط زیست دارد علاوه بر این، رشد اقتصادی اثر منفی در ردپای اکولوژیکی دارد، به طوری که با افزایش یک درصدی رشد اقتصادی، ردپای اکولوژیکی دوره فعلی به میزان ۰/۳۴۲ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، وقفه اول رشد اقتصادی اثر مثبت و معناداری در ردپای اکولوژیکی دارد؛ به طوری که با افزایش یک درصدی وقفه اول رشد اقتصادی، ردپای اکولوژیکی دوره فعلی به میزان ۰/۳۱۶ درصد افزایش می‌یابد.

افزون بر آن، افزایش ۰/۰۰۲۵ درصدی ردپای اکولوژیکی به ازای ۱ درصد افزایش در ارزش افزوده بخش توسعه صنعتی بسیار ناچیز است و از نظر آماری نیز معنادار نیست. این نشان می‌دهد که توسعه صنعتی در این مدل تأثیر قابل‌توجهی بر ردپای اکولوژیکی ندارد یا اینکه عوامل دیگر (مانند نوع صنایع یا فناوری‌های مورد استفاده) اثر آن را خنثی می‌کنند. بنابراین، برای کاهش ردپای اکولوژیکی، تمرکز بر رشد اقتصادی پایدار (مانند سرمایه‌گذاری در فناوری‌های سبز) و افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مؤثرتر از توسعه صنعتی سنتی به نظر می‌رسد. همچنین، شاخص آموزش اثر منفی و معناداری دارد، به این معناست که باعث افزایش سواد و آگاهی زیست‌محیطی می‌شود به کاهش ردپای اکولوژیکی در کوتاه‌مدت کمک کند.

در ادامه با فرض وجود اثرات نامتقارن به برآورد مدل پرداخته می‌شود. نتایج حاصل از رویکرد غیرخطی NARDL در وضعیت کوتاه‌مدت و بلندمدت در جداول (۴) و (۶) آورده شده است.

جدول ۴. نتایج تخمین ضرایب الگوی کوتاه‌مدت NARDL

Table 4. Results of the Short-Run NARDL Model Estimation

متغیر مستقل Independent Variable	ضریب Coefficient	آماره t t-Statistic	مقدار احتمال Prob
ECF (-1)	0.903981	17.16415	0.000
EGY^{+}	0.001387	0.039091	0.9690
EGY^{-}	0.028206-	0.413738-	0.6808
GDP^{+}	0.282223-	1.042103	0.3022
$GDP^{+}(-1)$	0.402917	1.565034	0.1236
GDP^{-}	0.309569-	1.840340	0.0714
I^{+}	0.000346-	0.329547	0.7431
I^{-}	0.001413	1.570676	0.1213
EDU^{+}	0.235551-	2.542135-	0.0039
EDU^{-}	0.845214-	2.253452-	0.0024

بر اساس نتایج جدول (۴) ملاحظه می‌شود، افزایش ۰/۰۰۱ درصدی ردپای اکولوژیکی به ازای ۱ درصد شوک مثبت در مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار ناچیز و از نظر آماری غیرمعنادار است. این نشان می‌دهد که شوک‌های ناگهانی یا غیرمنتظره در مصرف انرژی تجدیدپذیر (مانند افزایش سریع تولید یا استفاده) تأثیر قابل‌توجهی بر ردپای اکولوژیکی ندارند.

شوک‌های مثبت در مصرف انرژی تجدیدپذیر ممکن است به دلیل هزینه‌های زیست‌محیطی کوتاه‌مدت (مانند تولید پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، یا زیرساخت‌ها) باعث افزایش ناچیز ردپای اکولوژیکی شوند. این اثرات ممکن است در بلندمدت با افزایش پایدار مصرف انرژی تجدیدپذیر خنثی شوند. همچنین، افزایش ۱ درصدی در شوک‌های منفی (کاهش ناگهانی مصرف انرژی تجدیدپذیر) منجر به کاهش ۰/۰۲۸ درصدی ردپای اکولوژیکی می‌شود. این نتیجه غیرمنتظره است، زیرا انتظار می‌رود کاهش مصرف انرژی تجدیدپذیر (و احتمالاً جایگزینی آن با منابع غیرتجدیدپذیر) ردپای اکولوژیکی را افزایش دهد. این نتیجه ممکن است به دلیل اثرات کوتاه‌مدت باشد. به‌عنوان مثال، کاهش ناگهانی مصرف انرژی تجدیدپذیر ممکن است با کاهش کلی فعالیت‌های اقتصادی یا مصرف انرژی همراه باشد، که به‌طور موقت ردپای اکولوژیکی را کاهش می‌دهد.

در نتایج دیگر این پژوهش، کاهش ۰/۳۰۹ درصدی ردپای اکولوژیکی به ازای ۱ درصد افزایش در شوک‌های منفی رشد اقتصادی (مانند رکود اقتصادی، کاهش تولید، یا افت سرمایه‌گذاری) نشان‌دهنده یک اثر کاهشی قابل‌توجه است. زیرا کاهش فعالیت‌های اقتصادی (شوک‌های منفی) معمولاً با کاهش مصرف منابع، تولید صنعتی، و انتشار آلاینده‌ها همراه است، که همگی به کاهش ردپای اکولوژیکی منجر می‌شوند. کاهش ردپای اکولوژیکی در اثر شوک‌های منفی رشد اقتصادی نشان می‌دهد که کاهش فعالیت‌های اقتصادی می‌تواند فشار بر منابع طبیعی و اکوسیستم‌ها را کم کند. با این حال، این کاهش ممکن است هزینه‌های اجتماعی و اقتصادی (مثل بیکاری یا کاهش رفاه) به همراه داشته باشد. این نتیجه می‌تواند به سیاست‌گذاران هشدار دهد که در شرایط رکود اقتصادی، اثرات زیست‌محیطی مثبت (کاهش ردپای اکولوژیکی) ممکن است رخ دهد، اما باید با سیاست‌های جبرانی (مثل حمایت از اشتغال سبز) همراه شود تا هزینه‌های اجتماعی به حداقل برسد.

شوک‌های مثبت ارزش افزوده بخش توسعه صنعتی اثر منفی در ردپای اکولوژیکی دارد. به‌طوری که با افزایش یک درصدی شوک‌های مثبت ارزش افزوده بخش توسعه صنعتی، ردپای اکولوژیکی به میزان ۰/۰۰۰۳ درصد کاهش می‌یابد و این ضریب به لحاظ آماری معنادار نبوده است. افزایش ۰/۰۰۱ درصدی ردپای اکولوژیکی به ازای ۱ درصد افزایش در شوک‌های منفی ارزش افزوده بخش توسعه صنعتی (مانند کاهش ناگهانی تولید صنعتی یا افت سرمایه‌گذاری در بخش صنعت) بسیار ناچیز است. این نتیجه غیرمنتظره است، زیرا انتظار می‌رود، کاهش فعالیت‌های صنعتی (شوک‌های منفی) به دلیل کاهش مصرف منابع یا انتشار آلاینده‌ها، ردپای اکولوژیکی را کاهش دهد. اثر ناچیز و غیرمعنادار (افزایش ۰/۰۰۱ درصد) نشان می‌دهد که شوک‌های منفی ارزش افزوده صنعتی در ایران تأثیر قابل‌توجهی بر ردپای اکولوژیکی ندارند. این ممکن است به این معنا باشد که کاهش فعالیت‌های صنعتی به‌تنهایی تأثیر معناداری بر پایداری زیست‌محیطی ندارد، یا اینکه اثرات مثبت و منفی یکدیگر را خنثی می‌کنند. برای مثال، کاهش تولید صنعتی ممکن است مصرف انرژی را کاهش دهد (اثر مثبت بر محیط‌زیست)، اما جایگزینی با منابع آلاینده‌تر یا اثرات غیرمستقیم (مثل افزایش فعالیت‌های غیرصنعتی) ممکن است ردپای اکولوژیکی را اندکی افزایش دهد.

به منظور اطمینان از امکان وجود رابطه بلند مدت و وجود تصریح مناسب بین متغیرها، آزمون کرانه‌ها انجام می‌شود که نتایج آن در جدول (۵) گزارش می‌شود. بر این اساس مقدار آماره آزمون ۴/۶۳۲۱۰۱ که از همه کرانه‌های فهرست شده در سطح یک و دو بزرگ‌تر بوده و از این رو فرض عدم وجود رابطه بلند مدت میان متغیرها در سطح خطای یک درصد رد می‌شود.

جدول ۵. آزمون کرانه‌ها در برآورد نامتقارن

Table 5. Bounds Test for the Asymmetric Estimation

آماره آزمون Test Statistic	کرانه بالا Upper Bound	کرانه پایین Lower Bound	سطح خطا Significance Level
4.632101	4.571	3.293	1%
	3.598	2.456	5%
	3.153	2.114	10%

پس از اطمینان از وجود رابطه بلند مدت به برآورد بلند مدت این رابطه به صورت غیرمتقارن پرداخته می‌شود.

جدول ٦. ضرایب بلندمدت در برآورد نامتقارن
Table 6. Long-Run Coefficients for the Asymmetric Estimation

متغیر مستقل Independent Variable	ضریب Coefficient	مقدار احتمال Prob
ΔEGY^{+}	0.012355	0.9452
ΔEGY^{-}	0.272541-	0.5254
$\Delta GDP^{+}(-1)$	1.225632	0.1420
ΔGDP^{-}	3.562541-	0.2500
ΔI^{+}	0.002354-	0.7812
ΔI^{-}	0.023511	0.1256
ΔEDU^{+}	0.035241-	0.008
ΔEDI^{-}	0.015244-	0.028
C	17.38308	0.010

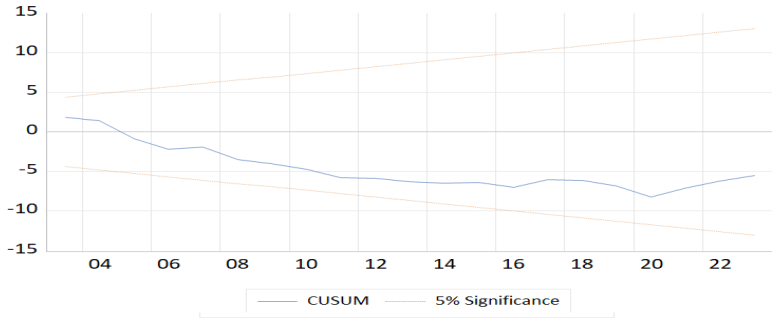
بر اساس نتایج جدول (۴)، افزایش ۰/۰۱۲ درصدی ردپای اکولوژیکی به ازای ۱ درصد افزایش در شوک‌های مثبت مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در بلندمدت غیرمنتظره است، زیرا انتظار می‌رود انرژی‌های تجدیدپذیر به کاهش ردپای اکولوژیکی کمک کنند. اثر افزایشی شوک‌های مثبت انرژی تجدیدپذیر در بلندمدت نشان‌دهنده یک چالش بالقوه است: افزایش ناگهانی مصرف انرژی تجدیدپذیر ممکن است به دلیل هزینه‌های زیست‌محیطی تولید یا اثرات غیرمستقیم (مثل افزایش تقاضای انرژی) در بلندمدت ردپای اکولوژیکی را افزایش دهد. این نتیجه بر اهمیت مدیریت دقیق شوک‌های انرژی تجدیدپذیر تأکید دارد، مانند استفاده از فناوری‌های کم‌ردپا یا بهبود زنجیره تأمین. با مطالعات اصفهانی و همکاران (۱۴۰۱)، ایدرس و همکاران (۲۰۲۴) ناهمسوست.

همچنین، نتایج پژوهش حاکی از آن است، کاهش ۰/۲۷۲ درصدی ردپای اکولوژیکی به ازای ۱ درصد افزایش در شوک‌های منفی (کاهش ناگهانی مصرف انرژی تجدیدپذیر) غیرمنتظره است، زیرا انتظار می‌رود کاهش مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر با افزایش وابستگی به منابع آلاینده (مثل سوخت‌های فسیلی) ردپای اکولوژیکی را افزایش دهد؛ چرا که شوک‌های منفی (مثل قطعی تولید انرژی خورشیدی یا بادی) ممکن است با کاهش کلی فعالیت‌های اقتصادی یا مصرف انرژی همراه باشد، که در بلندمدت ردپای اکولوژیکی را کاهش می‌دهد. این نتیجه بر اهمیت تحلیل اثرات غیرمستقیم تأکید دارد، زیرا کاهش مصرف انرژی تجدیدپذیر ممکن است با کاهش تولید صنعتی یا تقاضای انرژی همراه باشد، که در بلندمدت فشار بر محیطزیست را کاهش می‌دهد.

وقفه اول شوک‌های مثبت رشد اقتصادی اثر مثبت در ردپای اکولوژیکی دارد؛ به طوری که با افزایش یک درصدی وقفه اول شوک‌های مثبت رشد اقتصادی، ردپای اکولوژیکی به میزان ۱/۲۲۵ درصد افزایش می‌یابد. این نتیجه بیانگر این است که شوک‌های مثبت رشد اقتصادی (مانند افزایش ناگهانی تولید، سرمایه‌گذاری، یا فعالیت‌های اقتصادی) در دوره بعدی (وقفه اول) تأثیر منفی بر پایداری زیست‌محیطی دارند. این نتیجه بر نیاز به سیاست‌های زیست‌محیطی همزمان با شوک‌های اقتصادی (مثل مالیات کربن یا یارانه برای فناوری‌های سبز) تأکید دارد تا اثرات منفی کاهش یابد.

افزون بر آن، شوک‌های مثبت ارزش افزوده بخش توسعه صنعتی اثر منفی در ردپای اکولوژیکی دارد، به طوری که با افزایش یک درصدی شوک‌های مثبت ارزش افزوده بخش توسعه صنعتی، ردپای اکولوژیکی به میزان ۰/۰۰۲ درصد کاهش می‌یابد. در حالی که، شوک‌های منفی ارزش افزوده بخش توسعه صنعتی اثر مثبت در ردپای اکولوژیکی دارد و با افزایش یک درصدی شوک‌های مثبت ارزش افزوده بخش توسعه صنعتی، ردپای اکولوژیکی به میزان ۰/۰۲۳ درصد افزایش می‌یابد.

علاوه بر این، شوک‌های مثبت آموزش اثر کاهنده و شوک‌های منفی آموزش اثر افزاینده بر ردپای اکولوژیکی دارند. این نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری پایدار در آموزش زیست‌محیطی می‌تواند در بلندمدت تأثیرگذار باشد، بر کاهش فشار اکولوژیکی تأثیر بگذارد. بنابراین، تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که نقش آموزش زیست‌محیطی در ارتقای رفتار مصرفی و کاهش اثرات منفی انرژی‌های آلاینده اهمیت ویژه‌ای دارد.



نمودار ۱. نتایج آزمون ثبات ساختاری با روش محاسبه آماره پسماند تجمعی (CUSUM)

Diagram 1. Results of the Structural Stability Test Using the Cumulative Sum of Recursive Residuals (CUSUM)

آزمون ثبات ساختاری که بر اساس جمع تجمعی جملات پسماند بازگشتی انجام شده‌است، آزمونی است جهت ثبات پایداری پارامترهای مدل و بر روی پسماندها صورت می‌پذیرد. نمودار این آزمون جمع تجمعی جملات پسماند بازگشتی را در مقابل زمان با توجه به خطوط بحرانی مربوطه به هر نقطه را نشان می‌دهد. در این آزمون پسماندهای تجمعی که از خطوط بحرانی خارج شده باشند، بیانگر عدم ثبات در پارامترهای مدل است. همان‌طور که در نمودار (۱) نشان داده شده است، پسماندهای تجمعی از خطوط بحرانی خارج نشده، بنابراین ثبات ضرائب این مدل در حالت غیر خطی را نتیجه می‌دهد. همچنین آزمون مجذور پسماندهای تجمعی نیز از خطوط بحرانی خارج نشده و ثبات ضرائب این مدل را نشان می‌دهد. بنابراین ضرایب در حالت غیر خطی دارای ثبات هستند.

بحث و نتیجه‌گیری

ردپای اکولوژیکی شاخصی برای مقایسه بین نرخ مصرف منابع و تولید ضایعات توسط انسان با نرخ بازتولید منابع و دفع ضایعات توسط طبیعت می‌باشد و نشان‌دهنده مقدار فضای بیولوژیکی لازم برای تأمین منابع و مدیریت ضایعات تولیدشده توسط افراد، سازمان‌ها و فعالیت‌ها، با توجه به سیستم مدیریتی و فناوری موجود تعیین می‌شود. از این‌رو مطالعه حاضر به بررسی عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی ایران با تأکید بر سیاست انرژی پایدار طی سال‌های ۱۹۶۱– ۲۰۲۳ با استفاده از روش غیرخطی خودرگرسیونی با وقفه‌های توزیعی پرداخته است. نتایج نشان‌دهنده الگوهای پیچیده‌ای در تعامل بین رشد اقتصادی، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر، و توسعه صنعتی با پایداری زیست‌محیطی است. یافته‌ها حاکی از آن است که رشد اقتصادی پایدار با کاهش ۰/۳۳۱ درصدی ردپای اکولوژیکی اثر مثبتی بر محیط‌زیست دارد، که می‌تواند نشان‌دهنده حرکت به سمت مرحله کاهشی منحنی کوزنتس زیست‌محیطی (EKC) در اقتصادهای توسعه‌یافته یا اقتصادهایی با سیاست‌های سبز قوی باشد. با این حال، شوک‌های مثبت رشد اقتصادی با وقفه اول (افزایش ۱/۲۵۶ درصد) و شوک‌های منفی رشد اقتصادی (کاهش ۳/۲۲۴ درصد) نشان می‌دهند که نوسانات ناگهانی در رشد اقتصادی می‌توانند اثرات متضادی بر ردپای اکولوژیکی داشته باشند؛ شوک‌های مثبت با افزایش فعالیت‌های آلاینده و شوک‌های منفی با کاهش فعالیت‌های اقتصادی و مصرف منابع همراه هستند.

در مورد انرژی‌های تجدیدپذیر، مصرف پایدار آن‌ها با کاهش ناچیز ۰/۰۰۹ درصدی ردپای اکولوژیکی اثر مثبت محدودی دارد. با این حال، شوک‌های مثبت مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر (افزایش ۰/۰۱۴) به دلیل هزینه‌های زیست‌محیطی تولید تجهیزات یا اثرات غیرمستقیم، ردپای اکولوژیکی را افزایش می‌دهند، در حالی که شوک‌های منفی (کاهش ۰/۲۹۳) با کاهش فعالیت‌های اقتصادی مرتبط، ردپای اکولوژیکی را کاهش می‌دهند. این نتایج بر اهمیت مدیریت دقیق انتقال به انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش اثرات غیرمستقیم آن‌ها تأکید می‌کند. همچنین، در بخش توسعه صنعتی، ارزش افزوده صنعتی اثر افزایشی ناچیز (۰/۰۰۰۵ درصد) دارد، اما شوک‌های مثبت آن (کاهش۰/۰۰۳ درصد) با بهبود فناوری یا بهره‌وری، اثر کاهشی محدودی بر ردپای اکولوژیکی دارند، در حالی که شوک‌های منفی (افزایش ۰/۰۰۱ درصد) ممکن است با جایگزینی منابع آلاینده‌تر همراه باشند.

مقایسه نتایج با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اثرات کاهشی رشد اقتصادی پایدار و شوک‌های مثبت صنعتی با اقتصادهای توسعه‌یافته (مرحله کاهشی EKC در نه آگو،

۲۰۲۲) همسوست، اما با اثرات افزایشی رشد اقتصادی در اقتصادهای در حال توسعه (مانند صیادی و همکاران، ۱۴۰۲؛ ترازکار و همکاران، ۱۳۹۹؛ ایدرس و همکاران، ۲۰۲۴) ناهمسوست. اثرات انرژی‌های تجدیدپذیر نیز با مطالعات اصفهانی و همکاران (۱۴۰۱) و ایدرس و همکاران (۲۰۲۴) در مصرف پایدار همسو، اما در شوک‌های مثبت ناهمسوست. این تفاوت‌ها به زمینه اقتصادی، نوع شوک‌ها، و سیاست‌های زیست‌محیطی بستگی دارد. با توجه به مصرف بیش از اندازه انرژی‌های تجدید ناپذیر و اثرات مضر این نوع انرژی‌های بر شاخص ردپای بوم شناختی؛ که علت این امر می تواند استفاده بیش از حد ایران از سوخت های فسیلی با آلودکی بالا (به دلیل دارا بودن این منابع) در فرآیند تولید از یک طرف و پایین بودن بهره وری مصرف انرژی از سوی دیگر دانست. بنابراین، لازم است در این زمینه مدیران مصرف انرژی‌های پاک را جایگزین منابع انرژی‌های آلوده‌کننده کرده و افزایش بهره‌وری مصرف انرژی‌های را با هدف کاهش فشار بر محیطزیست مد نظر قرار دهند.

همچنین، آموزش زیست‌محیطی در کوتاه‌مدت و بلندمدت اثر منفی و معناداری بر پایه اکولوژیکی دارد و یافته‌های تحقیق نشان داد که سرمایه‌گذاری در آموزش می‌تواند آثار منفی ناشی از رشد اقتصادی و صنعتی را کاهش دهد.

با توجه به نتایج برآورد مدل که نشان‌دهنده تأثیر مثبت مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر بر ردپای اکولوژیکی و تأثیر منفی مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر بر آن است، پیشنهاد می‌شود که کشورها برای توسعه و بهره‌گیری از انرژی‌های پاک تلاش کنند. افزایش آگاهی، آموزش صحیح، و تبادل اطلاعات با سایر کشورها به منظور استفاده از دانش و محصولات سازگار با محیطزیست، اعمال مالیات بر تولیدکنندگانی که از انرژی‌های آلاینده استفاده می‌کنند، و ارائه معافیت‌های مالیاتی متنوع و تسهیلات بانکی کم‌بهره و بلندمدت به بنگاه‌های تولید و خدماتی که از انرژی‌های پاک بهره می‌گیرند، به کاهش اثرات مخرب ردپای اکولوژیکی و زیست‌محیطی کمک خواهد کرد. همچنین، در کنار سیاست‌های ساختاری، ترویج آموزش زیست‌محیطی و ارتقای آگاهی عمومی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش ردپای اکولوژیکی و دستیابی به توسعه پایدار داشته باشد.

References

Akadiri, S. S., Adebayo, T. S., Asuzu, O. C., Onuogu, I. C., & Oji-Okoro, I. (2022). “Testing the role of economic complexity on the ecological footprint in China: a nonparametric causality- in-quantiles approach”. *Energy & Environment*, 34(7), 2290-2316. https://doi.org/10.1177/0958305X221094573

Azadnia, M., Zahedi, Sh., Majd al-Din, A.R., &Pourabadi, M.R. (2017). “The Impact Model of the Local Search Engine Plan on Sustainable Development Based on Sustainability Indicators”. *Journal of Technology Growth,* 13(52): 15-23. [In Persian] https://doi.org/10.7508/jstpi.2017.04.003

Benhacene, H. L. M., & Hussien, A. M. (2025). “The Impact ofAdopting Renewable Energy Resources on Sustainable Development in Saudi Arabia: A Qualitative View”. *Sustainability*, 17(2), 768-772. https://doi.org/10.3390/su17020768

Biyase, M., Eita, H., Udimal, T. B., & Zwane, T. (2024). “Does military spending affect inequality in South Africa? A revisit”. *Cogent Economics & Finance*, 12(1), 2421698. https://doi.org/10.1080/23322039.2024.2421698

Candra, O., Chammam, A., Alvarez, J. R. N., Muda, I., & Aybar, H. Ş. (2023). “The Impact of Renewable Energy Sources on the Sustainable Development of the Economy and Greenhouse Gas Emissions”. *Sustainability*, 15(3), 2104. https://doi.org/10.3390/su15032104

Cho, J. S., Greenwood-Nimmo, M., & Shin, Y. (2023). “Recent developments of the autoregressive distributed lag modelling framework”. *Journal of Economic Surveys*, 37(1), 7-32. https://doi.org/10.1111/joes.12450

Damrah, S., Satrovic, E., Atyeh, M., & Shawtari, F. A. (2023). “Employing the Panel Quantile Regression Approach to Examine the Role of Natural Resources in Achieving Environmental Sustainability: Does Globalization Create Some Difference?”. *Mathematics*, 10(24), 4795. https://doi.org/10.3390/math10244795

Daneshvar, M. R. M.; Ebrahimi, M., & Nejadsoleymani, H. (2019). "An overview of climate change in Iran: Facts and statistics". *Environmental Systems Research,* 8(1): 1-10. https://doi.org/10.1186/s40068-019-0135-3

Dvulit, Z., Maznyk, L., Horbal, N., Brych, L., Skrzypek-Ahmed, S., Szymoniuk, B., & Dluhopolska, T. (2024). "Modeling the Integrated Influence of Social, Ecological, and Economic Components on Achieving Sustainable Development Goals: A Cross-Country Analysis". *Sustainability*, 16(22), 9946. https://doi.org/10.3390/su16229946

Esfahani, A., Ghobadi, S., & Azarbayejani, K. (2022). "An Analysis of the Relationship between Economic Growth, Energy Consumption, and Ecological Footprint in Some Selected Developed and Developing Countries". *The Economic Reseach,* 22(4), 203-232. [In Persian] https://doi.org/20.1001.1.17356768.1401.22.4.8.9

Farhang, A. A. (2022). "The effects of fossil fuels consumption, CO_2 emissions and crude oil prices on economic growth". *Economic Growth and Development Research*, 12(48), 97–110. [In Persian] https://doi.org/10.30473/egdr.2022.61155.6334

Farhang, A., Kianpoor, S., & Shamsollahi, R. (2025). "The effect of globalization on economic growth and environmental quality in Iran". *Journal of Economics and Modelling*, 15(2), 149–182. [In Persian] https://doi.org/10.48308/jem.2025.236876.1940

Farhang, A., Younessi, A., Mansouri, N., & Jalilvand Nekari, A. (2025). "Effects of economic openness, innovation and new technologies on the environment: A study of developing and developed countries". *Journal of Environmental Education and Sustainable Development*, 13(3), 157–170. [In Persian] https://doi.org/10.30473/ee.2024.70297.2705

Folke, C., Jansson, Å., Larsson, J., & Costanza, R. (1997). "Ecosystem appropriation by cities". *Ambio*, 26(3). 167-172.

Godawska, J., & Wyrobek, J. (2021). "The Impact of Environmental Policy Stringency on Renewable Energy Production in the Visegrad Group Countries". *Energies*, 14(19), 6225. https://doi.org/10.3390/en14196225

Granger, C. W. J., & Yoon, G. (2002). "Hidden cointegration". Department of Economics Discussion Paper 2002-02, University of California, San Diego.scirp.org

Huseynova, N. (2024). "Transition to sustainable development and green economy". *Scientific Collection «InterConf+»*, (47(209), 47–54. https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.07.2024.004

Ibekwe, K. I., Umoh, A. A., Nwokediegwu, Z. Q. S., Etukudoh, E. A., Ilojianya, V. I., & Adefemi, A. (2024). "Energy efficiency in industrial sectors: A review of technologies and policy measures". *Engineering Science & Technology Journal*, 5(1), 169-184. https://doi.org/10.51594/estj.v5i1.742

Idroes, G. M., Hardi, I., Rahman, M. H., Afjal, M., Noviandy, T. R., & Idroes, R. (2024). "The dynamic impact of non-renewable and renewable energy on carbon dioxide emissions and ecological footprint in Indonesia". *Carbon Research*, 3(1), 35. https://link.springer.com/article/10.1007/s44246-024-00117-0

Izuchukwu Precious, O., & Zino, I. O. (2025). "Global Education Policies and Their Influence on Environmental Sustainability". *Journal of Integrity Ecosystems and Environment*, 3(2), 1-24. https://doi.org/10.5281/zenodo.14850089

Ji, X., & Luo, Z. (2020). "Opening the black box of economic processes: Ecological Economics from its biophysical foundation to a sustainable economic institution". *The Anthropocene Review*, 7(3), 231-247. https://doi.org/10.1177/2053019620940753

Jie, H., Khan, I., Zafar, M. W., Saeed, A. (2023). "Sustainable energy policy, socio-economic development, and ecological footprint: The economic significance of natural resources, population growth, and industrial development". *Utilities Policy,* 81: (2): 1- 8.

https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101490

Julia, T., Rahman, M. P., & Kassim, S. (2016). "Shariah compliance of green banking policy in Bangladesh". *Humanomics*. 32(4): 390-404, https://doi.org/10.1108/H-02-2016-0015

Karimi Takanlou, Z., Farhang, A. A., & Mohammadpour, A. (2023). "Uncertain effects of economic policy, institutional quality, and renewable energies on green growth: A case study of Iran". *Quarterly Journal of Applied Theories of Economics*, 10(4), 65–102. [In Persian] https://doi.org/10.22034/ecoj.2024.58065.3225

Kongbuamai, N., Zafar, M. W., Zaidi, S. A. H., & Liu, Y. (2020). "Determinants of the ecological footprint in Thailand: the influences of tourism, trade openness, and population density". *Environmental science and pollution research international*, 27(32), 40171–40186. https://doi.org/10.1007/s11356-020-09977-6

Kraft, J., & Kraft, A. (1978). "On the Relationship Between Energy and GNP". *The Journal of Energy and Development*, 3(2), 401–403. http://www.jstor.org/stable/24806805

Loiseau, E.; Saikku, L.; Antikainen, R.; Droste, N.; Hansjürgens, B.; Pitkänen, K.; Leskinen, P.; Kuikman, P., & Thomsen, M. (2016). "Green economy and related concepts: An overview". *Journal of Cleaner Production*, 139: 361-371. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.024

Mehmet Metin Dam, Samuel Asumadu Sarkodie. (2023). "Renewable energy consumption, real income, trade openness, and inverted load capacity factor nexus in Turkiye: Revisiting the EKC hypothesis with environmental sustainability". *Sustainable Horizons*, 8(12): 1- 15. https://doi.org/10.1016/j.horiz.2023.100063

Mikava, A., & Kbiladze, D. (2024). "The role of renewable energy in the green economy". *Scientific Journal Spectri*, 9(1). 1-8. https://doi.org/10.52340/spectri.2024.09.01.19

Neagu, O. (2020). "Economic Complexity and Ecological Footprint: Evidence from the Most Complex Economies in the World". *Sustainability*, 12(21), 9031, 1-18. https://doi.org/10.3390/earth2040063

Neagu, O., Neagu, M (2022). "The Environmental Kuznets Curve revisited: economic complexity and ecological footprint in the most complex economies of the world". Studia UniversitatisVasile Goldis. *Economics Series*, 32 (1) :78- 99. https://doi.org/10.2478/sues-2022-0005

Oliver Huidobro, J., Antonioni, A., Lipari, F., & Tamarit, I. (2022). "Social capital as a network measure provides new insights on economic growth". *PloS one*, 17(8), e0273066. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273066

Özbaş, E. E., Hunce, S. Y., Özcan, H. K., & Öngen, A. (2018). Ecological Footprint Calculation. In Recycling and Reuse Approaches for Better Sustainability, (pp. 179-186). Cham: Springer International Publishing.

Parsashrif, H., Amirnejad, H., & Taslimi, M. (2021). "Investigating the Factors Affecting the Ecological Footprint of Selected Countries in Asia and Europe". *Journal of Agricultural Economics Research*, 13(2): 172-155. [In Persian] https://doi.org/10.22034/pbr.2022.327509.1199

Pata, U. K. (2021). "Renewable and Non-Renewable Energy Consumption. Economic Complexity, CO2 Emissions, and Ecological Footprint in The USA: Testing the EKC Hypothesis with a Structural Break". *Environmental Science and Pollution Research*, 28(1), 846-861.

Rees, W. E. (1992). "Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out". *Environment and Urbanization*, 4(2), 121–130. https://doi.org/10.1177/095624789200400212

Rosen, M.A. (1996). "Energy efficiency and sustainable development". *In IEEE Technology and Society Magazine*, 15(4), 21-26. https://doi.org/10.1109/44.546454

Sahoo, M., & Sethi, N. (2021). "The intermittent effects of renewable energy on

ecological footprint: evidence from developing countries". *Environmental science and pollution research international*, 28(40), 56401–56417. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14600-3

Sasana, H., & Aminata, J. (2019). "Energy subsidy, energy consumption, economic growth, and carbon dioxide emission: Indonesian case studies". *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(2), 117-122. https://doi.org/10.32479/ijeep.7479

Sayadi, M., Mamipour, S., Galavi, M., & Ghaed, E. (2023). "Evaluating the Impact of Economic- Institutional- Energy Variables on the Ecological Footprint: The Application of the Panel Quantile Regression Model in Selected Countries of the MENA Region". *The Journal of Planning and Budgeting,* 28(161), 115-154. [In Persian] https://doi.org/10.61186/jpbud.28.2.115

Shayanmehr, S., Radmehr, R., Ali, E. B., Ofori, E. K., Adebayo, T. S., & Gyamfi, B. A. (2023). "How do environmental tax and renewable energy contribute to ecological sustainability? New evidence from top renewable energy countries". *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 30(6), 650–670. https://doi.org/10.1080/13504509.2023.2186961

Shin, Y., Yu, B., & Greenwood-Nimmo, M. (2011). "Modelling asymmetric cointegration and dynamic multipliers in a nonlinear ARDL framework". In W. C. Horrace & R. C. Sickles (Eds.), Festschrift in honor of Peter Schmidt: Econometric methods and applications (pp. 281–314). Springer.

Stanescu, M. D. (2022). "Goals for a sustainable development and the environmental protection". *Romanian Journal of Ecology & Environmental Chemistry*, 4(2), 49-59. https://doi.org/10.21698/rjeec.2022.205

Tarazkar, M., Kargar Deh Bedi, N., Side Sponge, R., & Victims, A. (2020). "The Effect of Economic Growth on Environmental Degradation in the Middle East: Application of Ecological Footprint". *Natural Environment, Natural Resources of Iran,* 37, 1: 90-77 [In Persian].

Wackernagel, M. (2007). "Current Methods for Calculating National Ecological Footprint Accounts". *Science for Environment and Sustainable Society*, 4, 103-224.

Wackernagel, M., & Rees, W. E. (1996). "Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth". New Society Publishers.

Wackernagel, M., Lin, D., Hanscom, L., Galli, A., & Iha, K. (2019). "Ecological Footprint". *Encyclopedia of Ecology (Second Edition),* 4, 270-282. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09567-1

Yaghobzadeh, N. (2014). "Ecological footprints in urban areas of developing countries". *International Conference on Architecture and Urban Engineering and Sustainable Urban Development*, Islamic Azad University, Tabriz, Iran. [In Persian] https://civilica.com/doc/274066/

Zhang, S., Anser, M. K., Yao-Ping Peng, M., & Chen, C. (2023). "Visualizing the sustainable development goals and natural resource utilization for green economic recovery after COVID-19 pandemic". *Resources policy*, 80, 103182. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103182

Zhang, S., Li, F., Zhou, Y., Hu, Z., Zhang, R., Xiang, X., & Zhang, Y. (2022). "Using Net Primary Productivity to Characterize the Spatio-Temporal Dynamics of Ecological Footprint for a Resource-Based City, Panzhihua in China". *Sustainability*, 14(5), 3067. https://doi.org/10.3390/su14053067

Zhao, X., Wence, Y., & Haiyuan, Z. (2025). "Sustainability in action: policy, innovation, and Globalization's influence on ecological footprint sub-components in G20 nation". *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1520629. https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1520629