Research Paper

Investigating The Impact of Uncertainty in Hydropower Energy Consumption and Urbanization Rate on The Ecological Footprint in Iran

Masoud Cheshmaghil[1], Javad Shahraki [2*], Reza Ashraf Ganjoei[3]

[1] PhD Candidate, Department of Economics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran (Email: masoudcheshmaghil@gmail.com)
[2*] Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran (Email: j.shahraki@eco.usb.ac.ir)
[3] Assistant Professor, Department of Economics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran (Email: reza_ash@eco.usb.ac.ir)

10.22125/iwe.2025.505024.1858

Received: July 6, 2025
Accepted: **July 14, 2025**
Available online: **August 4, 2025**

Keywords:
Ecological footprint, Urbanization, Hydropower energy consumption, Uncertainty

Abstract

This study examines the effect of uncertainty in influential factors on ecological footprint. The primary objective of the research is to assess the impact of uncertainty in globalization, urbanization rate, hydroelectric energy consumption, trade, and per capita income on Iran's ecological footprint from 1979 to 2023. The data for these variables were extracted from the Economic Research Institute, the World Bank, and the Global Footprint Network. Fuzzy regression analysis and MATLAB software were employed for data analysis. The results at a 0.9 membership degree (uncertainty conditions) indicate that the urbanization growth rate has a negligible effect on the ecological footprint; the average bandwidth for this variable is minimal, but the right and left bandwidths show significant uncertainty. Regarding hydroelectric energy consumption, the average bandwidth suggests a considerable positive impact on the ecological footprint, yet the difference between the right and left bandwidths reflects uncertainty in this effect. For the globalization index, the stability of bandwidth values indicates a consistently positive and highly certain influence. In contrast, trade has an almost negligible effect on the ecological footprint, with small bandwidth values confirming its minimal role. Additionally, per capita income exhibits a positive and highly certain impact, as the stability of bandwidth values indicates strong model confidence in this variable. Based on the findings, the globalization index and per capita income have the most significant positive impact with high certainty. Hydroelectric energy consumption has a positive but uncertain effect, while urbanization growth rate and trade show negligible influence.

* **Corresponding Author:** Javad Shahraki

Address: Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
Email: j.shahraki@eco.usb.ac.ir
Tel: 09153414281

1) Introduction

Ecological footprint is a useful tool through which the pressure exerted on ecosystems and the environment can be identified and communicated to the public. Urbanization is one of the most important factors influencing the ecological footprint. The urbanization process itself is influenced by various political, economic, technological, geographical, and cultural factors, with the impact of each factor varying across different times and locations. On the other hand, clean energy is recognized as one of the key factors in achieving sustainable development goals and ensuring environmental sustainability. Uncertainty, specifically introduced in this study, refers to a situation where decision-making by economic actors, including households, businesses, and the public sector, occurs under conditions of uncertainty. Globalization, through the production and investment in goods and services, capital transfer, financial convergence, technological changes, and knowledge sharing, increases the interdependence of countries. The main objective of the present analysis is to determine the impacts of globalization, urbanization rate, hydropower energy consumption, trade, and per capita income on the ecological footprint in Iran under conditions of uncertainty.

2) Materials and Methods

In this study, the required data for examining the impact of uncertainty on the factors influencing the ecological footprint in Iran were collected annually over the period from 1979 to 2023. For estimating the fuzzy regression model, MATLAB software was used. These models aim to find the best regression equation by minimizing fuzziness. This process is achieved by reducing the total width of the membership functions of the fuzzy coefficients in the regression equation. Fuzzy regression models have specific features compared to classical regression models.

3) Results

The results for the membership degree of 0.9 indicate that the right, average, and left widths for the urbanization growth rate variable are 1.379, 1.1e-14, and -1.379, respectively. These values suggest a negligible or nearly zero impact of urbanization growth rate on the ecological footprint, along with high uncertainty in this effect. For the hydroelectric energy consumption variable, the right, average, and left widths are 3.679, 0.503, and -2.674, respectively, indicating a significant positive effect of hydroelectric energy consumption on the ecological footprint, though this impact is accompanied by uncertainty. These results suggest that hydroelectric energy consumption may have either positive or negative impacts on the ecological footprint. For the globalization index, the right, average, and left widths are all 0.114, indicating a uniform positive effect with high certainty of this index on the ecological footprint. For the trade variable, the right, average, and left widths are 1.6384e-13, 1.8071e-14, and -2.7696e-14, respectively, with small values indicating that the effect of trade on the ecological footprint is almost zero and negligible. Finally, for the per capita production variable, the right, average, and left widths are all 0.109, indicating a positive effect with high certainty on the ecological footprint. Therefore, it can be concluded that the globalization index and per capita production have the most significant positive effect with high certainty, while urbanization growth rate and trade have negligible or almost zero impacts on the ecological footprint.

4) Discussion and Conclusion

Based on the above analysis, it can be argued that the globalization index and per capita production have the greatest positive impact with high certainty on the ecological footprint. Hydropower energy consumption has a positive effect on the ecological footprint, but this impact comes with uncertainty. Finally, the urbanization growth rate and trade have negligible or near-zero effects. This analysis suggests that in the fuzzy regression model, the focus should be on variables with a high positive impact and high certainty.

5) Six important references

1) Alnour, Mohammed, Maysam Ali, Abdelaziz Abdalla, Roua Abdelrahman, and Hosna Khalil. How do urban population growth, hydropower consumption and natural resources rent shape environmental quality in Sudan? World Development Sustainability 1 (2022): 100029.

2) Aldegheishem, A. (2024). Factors affecting ecological footprint in Saudi Arabia: a panel data analysis. Frontiers in Environmental Science.

3) Destek, M. A., & Sarkodie, S. A., (2019). Investigation of environmental Kuznets curve for ecological footprint: the role of energy and financial development. Science of the Total Environment, Vol 650, Pp 2483-2489.

4) Jones, W. D. (1991). How Urbanization Affects Energy Use in Developing Countries. Energy Policy, 19: 621–630.

Neagu, O. (2020). Economic Complexity and Ecological Footprint: Evidence from the Most Complex Economies in the World. Sustainability.

5) Nathaniel, S., & Khan, S. (2020). The nexus between urbanization, renewable energy, trade, and ecological footprint in ASEAN countries. Journal of Cleaner Production, 272, 122709.

6) Wang, Z. (2019). Investigation of the ecological footprint's driving factors: What we learn from the experience of emerging economies. Sustainable Cities and Society.

بررسی تأثیر عدم قطعیت مصرف انرژی برق‌آبی و نرخ شهرنشینی بر ردپای اکولوژیکی در ایران

مسعود چشم‌اغیل[۱]، جواد شهرکی*[۲]، رضا اشرف گنجویی[۳]

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳

مقاله پژوهشی

چکیده

در این مطالعه، به بررسی اثر عدم قطعیت عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی پرداخته شده است. هدف اصلی پژوهش، ارزیابی تأثیر عدم قطعیت متغیرهای جهانی‌شدن، نرخ شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، تجارت و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی ایران در بازه زمانی ۱۳۵۸ تا ۱۴۰۲ است. به همین منظور داده‌های مربوط به متغیرهای مذکور از مؤسسه تحقیقات اقتصادی، بانک جهانی و شبکه ردپای جهانی استخراج شده است. برای تحلیل داده‌ها از مدل رگرسیون فازی و نرم‌افزار متلب استفاده شده است. نتایج در درجه عضویت ۰/۹ (شرایط عدم قطعیت) حاکی از آن است که نرخ رشد شهرنشینی تأثیر ناچیزی بر ردپای اکولوژیکی دارد؛ پهنای متوسط برای این متغیر ناچیز است اما مقادیر پهنای راست و چپ عدم قطعیت بالایی را نشان می‌دهند. در مورد مصرف انرژی برق‌آبی، پهنای متوسط بیانگر تأثیر مثبت قابل ملاحظه‌ای بر ردپای اکولوژیکی است، اما تفاوت پهناهای راست و چپ حاکی از عدم قطعیت در این تأثیر است. برای شاخص جهانی‌شدن، ثبات مقادیر پهناها نشان‌دهنده تأثیر مثبت یکنواخت و با قطعیت بالای این متغیر است. در مقابل، تجارت تأثیری نزدیک به صفر بر ردپای اکولوژیکی دارد؛ مقادیر کوچک پهناها نشان‌دهنده نقش ناچیز این متغیر است. همچنین، تولید سرانه تأثیری مثبت و با قطعیت بالا دارد؛ ثبات مقادیر پهناها گویای اعتماد بالای مدل به این متغیر است. بر اساس یافته‌ها، شاخص جهانی‌شدن و تولید سرانه بیشترین تأثیر مثبت و با قطعیت بالا را دارند. مصرف انرژی برق‌آبی تأثیری مثبت اما همراه با عدم قطعیت دارد و متغیرهای نرخ رشد شهرنشینی و تجارت تأثیر ناچیزی دارند.

واژه‌های کلیدی: ردپای اکولوژیکی، شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، عدم قطعیت

[۱] masoudcheshmaghil@gmail.comدانشجوی دکترای گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و علوم اداری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
[۲] j.shahraki@eco.usb.ac.ir(نویسنده مسئول) دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و علوم اداری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
[۳] reza_ash@eco.usb.ac.irاستادیار گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و علوم اداری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

مقدمه

ردپای اکولوژیکی یکی از ابزارهای سودمندی است که می‌توان از طریق اندازه‌گیری آن، فشار واردشده بر اکوسیستم و محیط‌زیست را شناسایی و به اطلاع عموم مردم رساند. این شاخص برای نخستین‌بار در سال ۱۹۹۴ توسط واکرناگل[1] و در سال ۱۹۹۶ توسط ریز[2] معرفی شد و بیانگر محدودیت‌های زیست‌محیطی و میزان فراتر رفتن انسان‌ها از این محدودیت‌ها است. ردپای اکولوژیکی، مجموع تأثیرات انسانی بر زمین‌های زراعی، چراگاه‌ها، مناطق ماهیگیری، جنگل‌ها، انتشار دی‌اکسیدکربن و زیرساخت‌ها را نشان می‌دهد این شاخص در واقع، نرخ مصرف منابع و تولید ضایعات انسانی را با توانایی زیست‌کره در بازتولید منابع و دفع ضایعات مقایسه می‌کند. و بر اساس میزان زمینی که برای حفظ تعادل این چرخه موردنیاز است، تعریف می‌شود. به‌عبارت دیگر، ردپای اکولوژیکی میزان فضای بیولوژیکی لازم برای تولید منابع و مدیریت ضایعات ناشی از یک جمعیت، سازمان یا فعالیت را با توجه به شرایط مدیریتی و فناوری موجود مشخص می‌کند (Monfreda et al.,2004). هدف اصلی این مقاله بررسی تأثیر عدم قطعیت عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی است.

شهرنشینی یکی از مهم‌ترین عواملی است که بر ردپای اکولوژیکی اثرگذار است. فرآیند شهرنشینی خود تحت‌تأثیر عوامل گوناگون سیاسی، اقتصادی، فناوری، جغرافیایی و فرهنگی است که میزان تأثیر هر یک از این عوامل در زمان‌ها و مکان‌های مختلف متفاوت می‌باشد. این پدیده نتیجه طبیعی تغییرات اقتصادی است که در جریان توسعه یک کشور رخ می‌دهد و از سوی دیگر، خود نیز می‌تواند محرک تغییرات و رشد اقتصادی باشد. به بیان دیگر، برخی فعالیت‌های اقتصادی در مناطق پرجمعیت بهتر انجام می‌شوند، زیرا ویژگی اصلی مناطق شهری، تراکم بالای جمعیت و فعالیت‌های اقتصادی است. این فعالیت‌ها می‌توانند جایگزینی منابعی مانند سرمایه به‌جای زمین را ممکن سازند. شهرها به‌عنوان برترین و پیچیده‌ترین جلوه‌های شکل‌گیری و تکامل سکونتگاه‌های انسانی، در طی چند قرن اخیر دستخوش تغییرات بسیاری شده‌اند (Yu et al.,2019). بااین‌حال، این سکونتگاه‌ها به دلیل بهره‌برداری گسترده از منابع، به‌عنوان عامل اصلی ناپایداری جهانی شناخته می‌شوند. از آغاز پیدایش، انسان نقشی نسبتاً محدود در عملکرد اکوسیستم طبیعی ایفا کرده است؛ اما فعالیت‌های او به‌تدریج منجر به تبدیل‌شدن به بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع طبیعی و تولیدکننده اصلی آلودگی و پسماندها در این اکوسیستم شده است (Danish et al., 2020) به‌موازات افزایش نرخ شهرنشینی، مسائل و مشکلات جدیدی در سطح جهان به وجود آمده است که یکی از مهم‌ترین این مسائل، مشکلات زیست‌محیطی است. این مسئله اساساً یکی از مهم‌ترین معضلات شهرهای امروزی و نتیجه تعارض و تقابل آن‌ها با طبیعت است؛ چراکه توسعه شهرها ناگزیر با تسلط ساختمان‌ها، صنایع، حمل‌ونقل و فعالیت‌های اقتصادی بر فضاهای طبیعی همراه است و این چیرگی به‌تدریج به‌صورت تسلط شهر بر محیط طبیعی نمود پیدا کرده و زمینه آلودگی‌های گسترده شهری را فراهم نموده است. نتیجه چنین روندی عدم تعادل و ناسازگاری بین بشر و محیط طبیعی و برهم‌خوردن روابط اکوسیستم خواهد بود (سایه میری و نظری، ۱۳۹۹). افزایش سریع جمعیت و گسترش شهرها، همراه با سرعت بیشتر شهرنشینی نسبت به مدیریت و توسعه خدمات شهری، منجر به بهره‌برداری فزاینده از منابع طبیعی و انرژی شده است (Li et al., 2021). در این راستا، اصول مدیریت و برنامه‌ریزی شهری که امروزه به کار گرفته می‌شود، عمدتاً بر تأمین نیازهای متنوع شهرها، به‌ویژه کلان‌شهرها و ساکنان آن‌ها متمرکز است. بااین‌حال، جنبه‌ای که در این سیستم برنامه‌ریزی کمتر موردتوجه قرار گرفته، آستانه‌ها، ظرفیت و توان زیست‌محیطی برای پاسخگویی به این نیازهاست (Lin et al., 2018). ردپای اکولوژیکی از طریق شاخص‌ها و اصول خود شهر را برای پیشبرد اهداف توسعهٔ پایدار حمایت می‌کند (Destek et al., 2019). از سوی دیگر انرژی پاک به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در دستیابی به اهداف توسعه پایدار و تضمین پایداری زیست‌محیطی شناخته می‌شود. امروزه، این موضوع به بخشی جدایی‌ناپذیر از فرآیند برنامه‌ریزی و

[1] Wackernagel,M.

[2] Rees,W.E.

سیاست‌گذاری انرژی تبدیل شده است. یکی از مسائل مهم در این حوزه، بررسی تأثیر انرژی پاک بر کاهش آلودگی است. بر اساس نظریات موجود، انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند با کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی سنتی یا جایگزینی آن‌ها، به طور قابل‌توجهی آلودگی را کاهش دهند. اگرچه چارچوب‌های بین‌المللی مانند توافق‌نامه پاریس اهداف مشخصی برای کاهش گرمایش جهانی و مقابله با تغییرات اقلیمی تعیین کرده‌اند، اما تحقق این اهداف به‌دلیل نبود مسیرهای مشخص و وجود عدم قطعیت‌های زیاد با چالش‌هایی مواجه است. این وضعیت باعث شده تا بسیاری از کشورها استراتژی‌های اختصاصی خود را برای دستیابی به خنثی‌سازی کربن تعیین کنند؛ برای مثال، چین تا سال ۲۰۶۰، اتحادیه اروپا و کانادا تا سال ۲۰۵۰، ایسلند و اتریش تا سال ۲۰۴۰، نروژ و اروگوئه تا سال ۲۰۳۰، و اتیوپی تا سال ۲۰۲۵ (Alnour et al., 2022). در این میان، انرژی برق‌آبی به‌عنوان یکی از منابع اصلی تولید برق تجدیدپذیر، نقش چشمگیری در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کند. بااین‌حال، بهره‌برداری از این نوع انرژی ممکن است تأثیرات منفی قابل‌توجهی بر محیط‌زیست و ردپای اکولوژیکی داشته باشد. ساخت سدها و نیروگاه‌های برق‌آبی معمولاً با تغییرات عمده در زیست‌بوم‌های طبیعی همراه است که می‌تواند به تغییر اکوسیستم‌های آبی و خشکی، جابه‌جایی جوامع محلی، و کاهش تنوع زیستی منجر شود. باوجود این چالش‌ها، برق‌آبی در مقایسه با منابع انرژی غیر تجدیدپذیر دارای مزایای زیست‌محیطی بسیاری است، از جمله کاهش آلودگی هوا و تولید پایدار انرژی که آن را به گزینه‌ای ارزشمند در مسیر توسعه پایدار تبدیل می‌کند.

عدم قطعیت که به طور خاصی در این مطالعه وارد شده است به وضعیتی اشاره دارد که تصمیم‌گیری توسط فعالان اقتصادی از جمله خانوارها، بنگاه‌ها و بخش دولتی، در شرایطی همراه با نبود اطمینان صورت می‌گیرد (پژوهشکده پولی و بانکی، ۱۳۸۷). علی‌الخصوص، در سطح کلان اقتصادی، نحوه اتخاذ تصمیمات بهینه توسط سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در مواجهه با شرایط عدم اطمینان، موضوع بسیاری از تحقیقات و مطالعات بوده است. این اهمیت به‌ویژه زمانی افزایش می‌یابد که آثار این تصمیمات علاوه بر جنبه‌های اقتصادی، بر جنبه‌های فرهنگی، سیاسی و اجتماعی نیز تأثیرگذار باشد. در این راستا، می‌توان دو جنبه از عدم قطعیت را مطرح کرد: نخست، بینش واقع‌گرایانه و دوم، قابلیت پیش‌بینی. این دو جنبه در واکنش به سناریوهای مختلف عدم قطعیت برجسته می‌شوند. از منظر مفهومی، عدم قطعیت به شرایطی اشاره دارد که در آن پیش‌بینی رویدادهای آینده یا احتمال وقوع آن‌ها ممکن نیست. در دنیای واقعی، اقتصاد با عدم قطعیت‌های بسیاری روبروست که رفتار عوامل اقتصادی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. سیاست‌گذاران در چنین شرایطی، با یک تابع هدف و حداقل یک قید مواجه می‌شوند؛ هدف آن‌ها حداکثرسازی منافع اقتصادی است، درحالی‌که این هدف با محدودیت‌های مربوط به توزیع منابع و فرآیند تصمیم‌گیری روبروست (Giordani et al., 2017؛ رجبی و تاج‌الدین، ۱۳۹۵). عدم قطعیت در دو حالت پدیدار می‌شود: یا رویدادهای آینده مشخص نیستند، یا باوجود مشخص‌بودن این رویدادها، احتمال وقوع آن‌ها قابل‌پیش‌بینی نمی‌باشد. به عبارتی، عدم قطعیت ناشی از نبود دانش کافی برای پیش‌بینی است (Jeperson, 2017) چنین شرایطی تصمیم‌گیری برای آینده را پیچیده و دشوار کرده و تأثیراتی بر تصمیمات اقتصادی به همراه دارد. از عوامل اصلی بروز و تشدید عدم قطعیت اقتصادی می‌توان به سیاست‌های دولت و شاخص‌های کلان اقتصادی اشاره کرد. این سیاست‌ها با افق زمانی محدود طراحی شده و منجر به بی‌ثباتی اقتصادی و هزینه‌های مرتبط با آن می‌شوند. عدم قطعیت اقتصادی مانند ابری بر تصمیم‌گیری‌های عاملان اقتصادی سایه می‌افکند و موجب کاهش رفاه آن‌ها می‌شود؛ چرا که در نبود عدم قطعیت، امکان اتخاذ تصمیمات بهتر و کارآمدتر وجود دارد. آثار عدم قطعیت اقتصادی به این شکل نمایان می‌شود که این شرایط موجب برداشت نادرست از وضعیت اقتصادی شده و در نتیجه، برنامه‌های سرمایه‌گذاری را ناکارآمد و سطح سرمایه‌گذاری را کاهش می‌دهد. کاهش سرمایه‌گذاری به کاهش انباشت سرمایه منجر می‌شود که این امر پیامدهای بلندمدت و پایداری بر اقتصاد دارد و در نهایت منجر به

کاهش رشد اقتصادی می‌گردد (جعفری صمیمی و اعظمی، ۱۳۹۱) .

جهانی‌شدن بسیاری از کشورها را به سمت پیشرفت اقتصادی سوق داده است که تأثیر زیادی بر جنبه‌های اجتماعی - اقتصادی، زیست‌محیطی و سیاسی حیات انسان‌ها داشته است. جهانی‌شدن از طریق تولید و سرمایه‌گذاری در کالاها و خدمات، انتقال سرمایه، همگرایی مالی، تغییرات فناوری و اشتراک‌گذاری دانش، وابستگی متقابل کشورها به همدیگر را افزایش می‌دهد. امروزه به دلیل گستردگی آزادسازی تجارت، توسعه مالی، پیشرفت‌های فنی و رشد اقتصادی، نگرانی‌های زیادی در مورد کیفیت محیط‌زیست جهانی به وجود آمده است. اگرچه هر کشور آرزوی رشد قوی تولید ناخالص داخلی (GDP) را دارد، تجارت، انتقال فناوری، سرمایه‌گذاری خارجی، شهرنشینی و صنعتی‌شدن همگی به آلودگی هوا، آب و زمین کمک می‌کنند. در دنیای کنونی به دلیل استفاده روزافزون از منابع انرژی سنتی در فعالیت‌های اقتصادی اصلی، وضعیت محیط‌زیست بدتر شده است. مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که کشورها باید استراتژی‌های خاصی را برای کاهش این تخریب‌ها به‌منظور بهبود پایداری محیط‌زیست توسعه دهند، زیرا کیفیت محیط‌زیست به طور مداوم در حال کاهش است. جهانی‌شدن اقتصادی ممکن است تأثیر مثبت یا منفی بر سطح انتشار گازها در بحث‌های محیط‌زیستی داشته باشد. از یک سو، افزایش تجارت و جهانی‌شدن منجر به کاهش تعرفه‌های واردات و افزایش سرمایه‌گذاری اقتصادی می‌شود. سطوح رشد اقتصادی و توسعه نیز افزایش می‌یابد. سپس، ازآنجاکه سوخت به‌عنوان ورودی در فرآیند تولید استفاده می‌شود، انتشار گازها افزایش می‌یابد. اثر فوری این روند جهانی‌شدن تجارت است. از سوی دیگر، تجارت آزاد بیشتر به بهبود ساختار کمک می‌کند. از یک محیط پیش‌صنعتی وابسته به انرژی و اقتصاد مستقر، اقتصاد ممکن است به صنعتی سبز و اقتصاد خدماتی تبدیل شود. سطح انتشار گازها به دلیل تغییرات در ساختار اقتصادی به علت جهانی‌شدن تجارت کاهش می‌یابد. گرمایش جهانی اکنون جدی‌ترین مشکل محیط‌زیستی است که بشریت با آن روبرو است. بدون نظارت مناسب، چنین روندی پیامدهای فاجعه‌باری برای محیط‌زیست، اقتصاد و زندگی انسان خواهد داشت. تغییرات اقلیمی بر رفتار و شیوه‌های انسانی تأثیر می‌گذارد و سوختن دی‌اکسیدکربن عامل اصلی گرمایش جهانی است. افزایش آگاهی جهانی نسبت به مشکلات محیط‌زیستی، به ابتکارات بین‌دولتی مانند پروتکل کیوتو و توافق‌نامه پاریس کمک کرده است. دو شاخص علمی معتبر برای جهانی‌شدن، شاخص جهانی‌شدن ماستریخت (Figge and Martens 2014; Martens and Raza 2009) (MGI) و شاخص جهانی‌شدن KOF (مخفف کلمه آلمانی «Konjunkturforschungsstelle» به معنای "مؤسسه تحقیقاتی چرخه کسب‌وکار") هستند (شاخص KOF توسط مؤسسه تحقیقات اقتصادی KOF سوئیس توسعه داده شده است) که در این پژوهش از شاخص KOF استفاده شده است. هدف اصلی تحلیل حاضر تعیین تأثیرات جهانی‌شدن، نرخ شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، تجارت و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در ایران تحت شرایط عدم قطعیت است. ازاین‌رو این مقاله به بررسی اثرات متغیرهای مذکور بر ردپای اکولوژیکی و راهکارهای بهینه‌سازی این روند می‌پردازد. باتوجه‌به آنچه که بیان شد در این مطالعه با استفاده از مدل رگرسیون فازی تأثیر عدم قطعیت عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی از طریق پهنای راست و چپ محاسبه می‌شود. با استفاده از پهناهای مذکور می‌توان به طور دقیق مشخص کرد که عدم قطعیت در هر یک از متغیرهای مذکور به چه میزان ردپای اکولوژیکی را افزایش می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر با محاسبه پهنای راست و چپ برای هر یک از متغیرهای مذکور می‌توان بررسی کرد که به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیرگذاری بر ردپای اکولوژیکی به چه میزان خواهد بود. باتوجه‌به مطالبی که بیان شد، تحقیق حاضر به دنبال پاسخ به این سؤال است که عدم قطعیت در نرخ شهرنشینی و مصرف انرژی برق‌آبی به چه میزان بر ردپای اکولوژیکی مؤثر است؟

مواد و روش‌ها

- **مدل رگرسیون فازی**

مدل‌های رگرسیون فازی برای نخستین‌بار توسط تاناکا و همکاران [1] در سال ۱۹۸۲ معرفی شدند. این مدل‌ها باهدف یافتن بهترین معادله رگرسیون، میزان فازی بودن را به حداقل می‌رسانند. این فرآیند از طریق کاهش مجموع پهنای توابع عضویت ضرایب فازی معادله رگرسیون صورت می‌گیرد. مدل‌های رگرسیون فازی نسبت به مدل‌های رگرسیون کلاسیک ویژگی‌های خاص خود را دارند. رگرسیون کلاسیک برای برقراری خصوصیات آماری مدل‌های رگرسیونی فروض محکمی در نظر می‌گیرد که از جمله آن‌ها می‌توان به نرمال بودن داده‌ها، عدم وجود خودهمبستگی و ثابت‌بودن واریانس خطاها اشاره کرد. نقض هر یک از این فرض‌ها می‌تواند نتایج تحلیل رگرسیون کلاسیک را بی‌اعتبار کند. در بسیاری از مواقع، توجیه این فرض‌ها دشوار است یا در برخی شرایط نمی‌توان به‌درستی از آن‌ها استفاده کرد. به‌عنوان‌مثال، برآوردها و قضاوت‌های انسانی نادقیق یا اطلاعات ناکافی در استفاده از متغیرها می‌تواند تأثیرگذار باشد. به‌طورکلی، هرچند رگرسیون کلاسیک کاربردهای زیادی دارد، اما در شرایطی مانند: ۱- ناکافی بودن تعداد داده‌های مشاهداتی، ۲- عدم پیروی خطاها از توزیع نرمال، ۳- مبهم بودن رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته، ۴- وجود ابهام در ارتباط با یک پیشامد، و ۵- نادرست بودن فرضیات خطی‌سازی، می‌تواند گمراه‌کننده باشد. در چنین شرایطی که استفاده از روش‌شناسی رگرسیون کلاسیک و توجیه فرض‌های آن دشوار است، به‌کارگیری رگرسیون فازی که از توابع عضویت با توزیع احتمالی برای مدل‌سازی نادقیقی یا ابهام استفاده می‌کند، می‌تواند درک بهتری از سیستم ارائه دهد و نتایج دقیق‌تری به دست آورد. از طرف دیگر، در رگرسیون خطی کلاسیک، به‌ازای هر مجموعه از متغیرهای ورودی، یک مقدار خاص برای متغیر خروجی محاسبه می‌شود، درحالی‌که در رگرسیون فازی، بازه‌ای از مقادیر ممکن برای متغیر خروجی پیش‌بینی می‌شود. توزیع این مقادیر از طریق تابع عضویت تعیین می‌گردد. به‌طورکلی، برای برازش یک معادله رگرسیون خطی فازی، سه دسته مدل مختلف وجود دارد.

الف) مدل‌های رگرسیون فازی امکانی

ب) مدل‌های رگرسیون کمترین مربعات

ج) مدل‌های رگرسیون مبتنی بر تحلیل بازه‌ای

در این مطالعه از مدل رگرسیون امکانی فازی بهره گرفته شده است. برای دستیابی به یک برازش بهینه، نیاز است که یک مدل بهینه‌سازی برآورد گردد. ازآنجایی‌که توابع عضویتی که برای نمایش اعداد فازی استفاده می‌شوند، به‌صورت مثلثی هستند، می‌توان رگرسیون فازی را به‌عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی خطی مدل‌سازی کرد. یکی از مدل‌های رگرسیون فازی امکانی مدلی است که در آن ضرایب فازی بوده و ورودی و خروجی مشاهداتی غیرفازی هستند. صورت کلی مدل رگرسیونی با ضرایب فازی به‌صورت رابطه (۱) است.

$$\widetilde{\boldsymbol{Y}} = \mathbf{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{A}) = \widetilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{0}} + \widetilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{1}} + \widetilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{2}}\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{2}} + \cdots + \widetilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{n}}\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{n}} \quad (۱)$$

که در آن $\widetilde{\boldsymbol{Y}}$ متغیر وابسته یا اصطلاحا خروجی فازی است، $\boldsymbol{x} = (\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{1}}, \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{2}}, \ldots \boldsymbol{x}_{\boldsymbol{n}})$ بردار متغییرهای مستقل یا اصطلاحا بردار ورودی و $\boldsymbol{A} = \{\widetilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{0}}, \widetilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{1}}, \ldots . \widetilde{\boldsymbol{A}}_{\boldsymbol{n}}\}$ یک مجموعه از اعداد فازی است. مدل رگرسیون خطی با پارامترهای فازی، ورودی‌های غیر فازی و خروجی فازی را به‌صورت مسئله برنامه‌ریزی خطی فرموله می‌کند که هدف مینیمم کردن ابهام مدل رگرسیون خطی فازی است؛ به طوری که دامنه مقادیر تخمین زده شده، دامنه مقادیر مشاهده شده را در یک سطح معین بپوشاند. در این مطالعه نیز ضرایب رگرسیون به‌صورت اعداد فازی مثلثی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\widetilde{\boldsymbol{A}}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \mathbf{1} - \dfrac{\boldsymbol{a} - \boldsymbol{x}}{\boldsymbol{s}^{\boldsymbol{L}}} & \boldsymbol{a} - \boldsymbol{s}^{\boldsymbol{L}} \le \boldsymbol{x} \le \boldsymbol{a} \\ \mathbf{1} - \dfrac{\boldsymbol{x} - \boldsymbol{a}}{\boldsymbol{s}^{\boldsymbol{R}}} & \boldsymbol{a} < \boldsymbol{x} \le \boldsymbol{a} + \boldsymbol{s}^{\boldsymbol{R}} \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن $\boldsymbol{a}$ مقدار نما و $\boldsymbol{s}^{\boldsymbol{R}}$, $\boldsymbol{s}^{\boldsymbol{L}}$ به ترتیب پهنای چپ وپهنای راست $\widetilde{\boldsymbol{A}}$ هستند. اگر $\boldsymbol{s}^{\boldsymbol{R}} \neq \boldsymbol{s}^{\boldsymbol{L}}$ آن گاه عدد فازی مثلثی $\widetilde{\boldsymbol{A}}$را نامتقارن گوییم. در این حالت تابع عضویت $\widetilde{\boldsymbol{A}}$ را با توجه به سه مشخصه $\boldsymbol{a}, \boldsymbol{s}^{\boldsymbol{L}}, \boldsymbol{s}^{\boldsymbol{R}}$ به گونه ای دیگری نیز این تابع عضویت را نمایش داد. یعنی پهنای راست را بر

[1] Tanaka et al.

حسب پهنای چپ بیان کرد. به این صورت که در تابع عضویت بالا قرار دهیم s^R= k s^L که در آن k که عددی حقیقی و مثبت است. ضریب کشیدگی نامیده می‌شود. بنابراین عدد فازی مثلثی نامتقارن $\widetilde{A}$ را میتوان با سه تایی $\widetilde{A} = (a, s^L, k)_T$ نیز توصیف کرد در این حالت تابع عضویت $\widetilde{A}$ به‌صورت زیر در می اید.

$$\widetilde{A}(x) = \begin{cases} 1 - \dfrac{a-x}{s^L} & a - s^L \le x \le a \\ 1 - \dfrac{x-a}{ks^R} & a < x \le a + ks^R \end{cases} \quad (۳)$$

آنگاه بنا به رابطه (۳) خروجی فازی نیز یک عدد فازی مثلثی نامتقارن به‌صورت زیر است که در آن $f^c(\underline{x})$ نما و $f_s^L(\underline{x})$ پهنای چپ و $f_s^R(\underline{x})$ پهنای راست $\widetilde{Y}$ می‌باشد.

$$\begin{aligned} f^c(\underline{x}) &= a_0 + a_1x_1 + \cdots + a_nx_n \\ f_s^L(\underline{x}) &= s_0^L + s_1^Lx_1 + \cdots + s_n^Lx_n \\ f_s^R(\underline{x}) &= s_0^R + s_1^Rx_1 + \cdots + s_n^Rx_n \end{aligned} \quad (۴)$$

به بیان دیگر تابع عضویت $\widetilde{Y}$ عبارت است از:

$$\widetilde{Y}(y) = \begin{cases} 1 - \dfrac{f^c(\underline{x}) - y}{f_s^L(\underline{x})}, & f^c(\underline{x}) - f_s^L(\underline{x}) \le y \le f^c(\underline{x}) \\ 1 - \dfrac{y - f^c(\underline{x})}{f_s^R(\underline{x})}, & f^c(\underline{x}) < y \le f^c(\underline{x}) + f_s^R(\underline{x}) \end{cases} \quad (۵)$$

در رگرسیون فازی هدف آن است که اولاً خروجی فازی برای تمامی مقادیر $\widetilde{Y}j, j = 0, 1, 2 \ldots, m$ دارای درجه عضویتی دست کم به بزرگی h باشد. یعنی:

$$\widetilde{Y}_j(\widetilde{y}_j) \ge h \ , \quad i = 1, 2 \ldots, m \quad (۶)$$

ثانیاً ضرایب فازی، $\widetilde{A}_i \ \ i = 0, 1, 2 \ldots, n$ به گونه‌ای باشند که ابهام خروجی فازی مینیمم گردد. در حالتی که $\widetilde{A}_i, i = 0, 1, .., n$ متقارن هستند مجموع پهنای خروجی فازی $\widetilde{Y}$ برای همه داده‌ها کمیت زیر است که آن را تابع هدف می نامیم. تابع هدف برای حالت متقارن به‌صورت زیر است.

$$Z = 2ms_0 + 2\sum_{i=1}^{n}(s_i \sum_{j=1}^{m} x_{ji}) \quad (۷)$$

در رابطه اخیر منظور از x_{ji} مشاهده jام متغیر iام است. در حالتی که $\widetilde{A}_i, i = 0, 1, .., n$ نامتقارن باشند Z به این صورت زیر تغییر می‌یابد.

$$\begin{aligned} Z = m(s_0^L + s_0^R) \\ + \sum_{i=1}^{n}[(s_0^L \\ + s_0^R)\sum_{j=1}^{m} x_{ji})] \end{aligned} \quad (۸)$$

در حالتی که $i = 0, 1, 2, \ldots, n$ $\widetilde{A}_i$ ها را متقارن در نظر بگیریم. از قرار دادن رابطه (۴) در (۱۰) و (۵)، محدودیت‌ها به‌صورت رابطه(۹) و (۱۰) حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} (1-h)s_0 + (1-h)\sum_{i=1}^{n}(s_0x_{ji}) - a_0 \\ - \sum_{i=1}^{n}(s_0x_{ji}) \ge \\ - y_i \ \ , j\ 1, 2, \ldots, m \end{aligned} \quad (۹)$$

$$\begin{aligned} (1-h)s_0 + (1-h)\sum_{i=1}^{n}(s_0x_{ji}) \\ + a_0 + \sum_{i=1}^{n}(s_0x_{ji}) \ge \\ + y_i \ \ , j\ 1, 2, \ldots, m \end{aligned} \quad (۱۰)$$

در رابطه اخیر منظور از x_{ji} مشاهده jام متغیر iام است. با توجه به توضیحات فوق پهنای راست و چپ برای درجه عضویت۰/۱ تا ۰/۹ محاسبه می‌شود.

بحث و نتایج

در مطالعهٔ حاضر، داده‌های موردنیاز برای بررسی تأثیر عدم قطعیت عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی در ایران به‌صورت سالانه طی دوره زمانی ۱۴۰۲_۱۳۵۸ جمع آوری شده است. برای برآورد مدل رگرسیون فازی از نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. با توجه به مطالعه النور و همکاران[1] (۲۰۲۲)، رحمان و همکاران[2] (۲۰۲۱) و ناتانیل و همکاران[3] (۲۰۲۰) که به صورت رابطه (۱۱) تصریح می شود:

$$ECFP = F(URB, HPW, GLIN, TRD, GDP) \quad (۱۱)$$

1 Alnour et al.
2 Rehman et al
3 Nathaniel et al.

در این بخش رگرسیون فازی با ضرایب متقارن در خصوص بررسی تأثیر عدم قطعیت نرخ رشد شهرنشینی (URB)، مصرف انرژی برق‌آبی (HPW)، شاخص جهانی‌شدن(GLIN) ، تجارت(TRD) و تولید سرانه (GDP) بر ردپای اکولوژیکی(ECFP) در ایران برآورد خواهد شد. باتوجه‌به دوره زمانی ۱۳۵۸ تا ۱۴۰۲ تعداد مشاهدات ۴۵ سال است که برای بررسی نااطمینانی ردپای اکولوژیکی، تابع هدف با توجه به قیدها که در مجموع ۹۰ قید است، مینیمم می‌شود. لازم به ذکر است که تمام محاسبات در نرم افزار MATLAB انجام شده است. پس از تشکیل قیدها برای حل مسئله بهینه با ضریب فازی متقارن با توجه به درجه های عضویت ۰/۱ تا ۰/۹ مقادیر مرکز فازی، پهنای راست و چپ فازی محاسبه شده است. نتایج در جداول شماره (۱) و (۲) ارائه شده است. در تحلیل های مربوط به بررسی آثار عدم قطعیت نرخ رشد شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، شاخص جهانی شدن، تجارت و تولید سرانه بر ردپای اکولوژیکی از مفهوم درجه عضویت، پهنای چپ، متوسط و راست فازی استفاده شده است. درجه عضویت ۰/۱ و ۰/۹ به ترتیب حاکی از کاهش و افزایش تأثیر عدم قطعیت نرخ رشد شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، شاخص جهانی شدن، تجارت و تولید سرانه بر ردپای اکولوژیکی است. پهنای راست بیانگر آن است که در صورت کاهش و یا افزایش عدم قطعیت (به ترتیب با توجه به درجه عضویت ۰/۱ و ۰/۹) در عوامل مذکور، ردپای اکولوژیکی به چه میزان افزایش می یابد. پهنای چپ نیز حاکی از آن است که در صورت کاهش و یا افزایش عدم قطعیت (به ترتیب با توجه به درجه عضویت ۰/۱ و ۰/۹) در این عوامل، ردپای اکولوژیکی چه میزان کاهش می یابد. با توجه به انعطاف‌پذیری مدل رگرسیون فازی تاثیر عدم قطعیت هر یک از عوامل مذکور بر ردپای اکولوژیکی در سه سطح اثر گذاری محاسبه شده است. نتایج جدول (۱) برای درجه عضویت ۰/۱ نشان می‌دهد که پهنای راست ، متوسط و چپ برای متغیر نرخ رشد شهرنشینی به ترتیب برابر با ۰/۱۵۳، ۷/۲۷e-۱۷ و ۰/۱۵۳- است. این اعداد نشان می‌دهند که این متغیر (با توجه به مقدار پهنای متوسط) تأثیر اندکی بر ردپای اکولوژیکی دارد و تأثیر آن نزدیک به صفر است. پهنای راست و چپ این متغیر بیانگر نااطمینانی بالا یا تأثیر ناچیز نرخ رشد شهرنشینی بر متغیر ردپای اکولوژیکی است. در مورد مصرف انرژی برق‌آبی نیز پهنای راست، متوسط، و چپ به ترتیب برابر با ۰/۸۵۶، ۰/۵۰۳ و ۰/۱۵۰ است. این مقادیر حاکی از تأثیر مثبت و نسبتاً قابل‌توجه مصرف انرژی برق‌آبی بر ردپای اکولوژیکی است. مقدار پهنای متوسط (۰/۵۰۶) نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت این متغیر است، اما مقادیر متفاوت پهنای راست و چپ نشان می‌دهد که این تأثیر با عدم قطعیت همراه است. درخصوص شاخص جهانی شدن پهنای راست، متوسط و چپ همگی برابر با ۰/۱۱۴ هستند. این ثبات در مقدار پهناها نشان‌دهنده تأثیر مثبت یکنواخت و با قطعیت بالای شاخص جهانی شدن بر ردپای اکولوژیکی است. نبود تغییرات بین مقادیر راست، متوسط و چپ بیانگر قطعیت بالای مدل در ارتباط این متغیر با ردپای اکولوژیکی است. در خصوص متغیر تجارت پهنای راست، متوسط، و چپ به ترتیب ۵/۹۶e-۱۶، ۵/۲۷e-۱۶ و ۴/۵۹e-۱۶ هستند. این مقادیر کوچک نشان می‌دهد که تأثیر تجارت بر ردپای اکولوژیکی عملاً نزدیک به صفر است. اعداد نمایی کوچک دلالت بر این دارند که این متغیر نقش قابل توجهی بر روی ردپای اکولوژیکی ندارد و تقریباً بی‌اثر است. درنهایت پهنای راست، متوسط، و چپ برای متغیر تولید سرانه همگی برابر با ۰/۱۰۹ هستند. این ثبات مشابه شاخص جهانی شدن نشان‌دهنده تأثیر مثبت یکنواخت و با قطعیت بالای تولید سرانه بر ردپای اکولوژیکی است. نبود تغییرات بین مقادیر راست، متوسط و چپ بیانگر اعتماد بالای مدل به این متغیر است. با توجه به آنچه ذکر شد می‌توان نتیجه گرفت که متغیرهای شاخص جهانی شدن و تولید سرانه بیشترین تأثیر مثبت و با قطعیت بالا را بر ردپای اکولوژیکی دارند. متغیر مصرف انرژی برق‌آبی تأثیر مثبت بر ردپای اکولوژیکی دارد، اما این تأثیر با عدم قطعیت همراه است. و در نهایت متغیرهای نرخ رشد شهرنشینی و تجارت تأثیر ناچیز یا تقریباً صفر دارند.

جدول(۱):: برآورد پهنای فازی نرخ رشد شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، شاخص جهانی شدن، تجارت و درآمدسرانه بر ردپای اکولوژیک

درجه عضویت	متغیرها	پهنای چپ	پهنای متوسط	پهنای راست
h=۰/۱	نرخ شهرنشینی (URB)	-۰/۱۵۳	۷/۲۷e-۱۷	-۰/۱۵۳
	مصرف انرژی برق‌آبی (HPW)	۰/۱۵۰	۰/۵۰۳	۰/۸۵۶
	شاخص جهانی‌شدن (GLIN)	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴
	تجارت (TRD)	۴/۵۹e-۱۶	۵/۲۷e-۱۶	۵/۹۶e-۱۶
	درآمد سرانه (GDP)	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹
h=۰/۲	نرخ شهرنشینی (URB)	-۰/۱۷۲	۵/۶۷e-۱۷	۰/۱۷۲
	مصرف انرژی برق‌آبی (HPW)	۰/۱۰۶	۰/۵۰۳	۰/۹۰۰
	شاخص جهانی‌شدن (GLIN)	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴
	تجارت (TRD)	۲/۶۱e-۱۶	۳/۲۱e-۱۶	۳/۸۰e-۱۶
	درآمد سرانه (GDP)	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹
h=۰/۳	نرخ شهرنشینی (URB)	-۰/۱۹۷	۲/۶۴e-۱۶	-۰/۱۹۷
	مصرف انرژی برق‌آبی (HPW)	۰/۰۴۹	۰/۵۰۳	۰/۰۴۹
	شاخص جهانی‌شدن (GLIN)	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴
	تجارت (TRD)	۲/۱۳e-۱۵	۲/۴۸e-۱۵	۲/۱۳e-۱۵
	درآمد سرانه (GDP)	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹
h=۰/۴	نرخ شهرنشینی (URB)	-۰/۲۳۰	۲/۲۱e-۱۰	-۰/۲۳۰
	مصرف انرژی برق‌آبی (HPW)	-۰/۰۲۶	۰/۵۰۳	-۰/۰۲۶
	شاخص جهانی‌شدن (GLIN)	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴
	تجارت (TRD)	۷/۸۷e-۱۰	۱/۰۶e-۰۹	۷/۸۷e-۱۰
	درآمد سرانه (GDP)	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹

h=۰/۵	نرخ شهرنشینی (URB)	-۰/۲۷۶	۳/۷۵e-۱۳	۰/۲۷۶
	مصرف انرژی برق‌آبی (HPW)	-۰/۱۳۲	۰/۵۰۳	۱/۱۳۸
	شاخص جهانی‌شدن (GLIN)	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴
	تجارت (TRD)	۲/۱۹e-۱۲	۲/۷۶e-۱۲	۳/۳۳e-۱۲
	درآمد سرانه (GDP)	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹

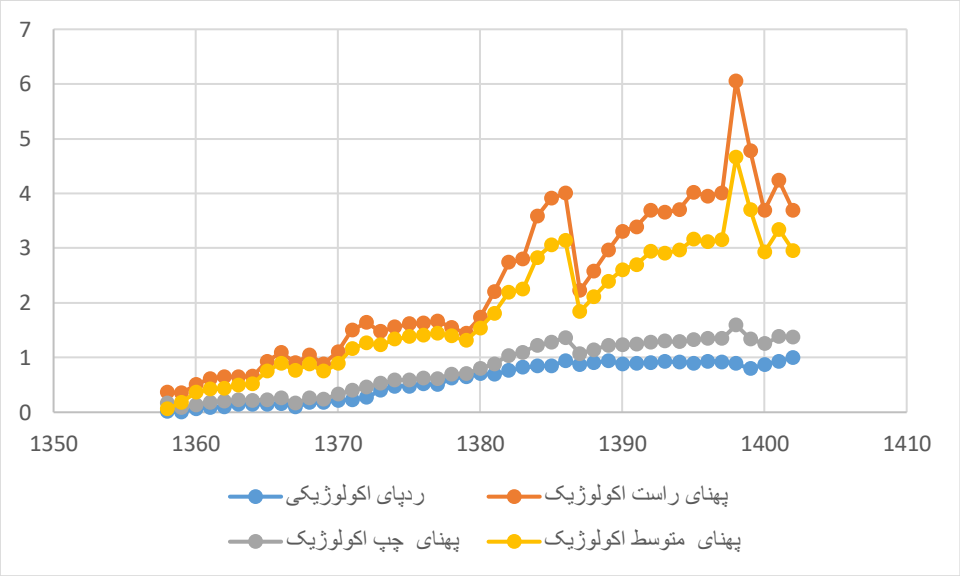
نتایج جدول (۲) نیز برای درجه عضویت ۰/۹ حاکی از آن است که پهنای راست ، متوسط و چپ برای متغیر نرخ رشد شهرنشینی به ترتیب برابر با ۱/۳۷۹ ، ۱/۰۰e-۱۴ و ۱/۳۷۹- است. این اعداد گویای آن است که متغیر نرخ شهرنشینی (با توجه به مقدار پهنای متوسط) اثر ناچیزی بر ردپای اکولوژیکی دارد و تأثیر آن نزدیک به صفر است. پهنای راست و چپ این متغیر بازگوکننده‌ی عدم قطعیت بالا یا تأثیر ناچیز نرخ رشد شهرنشینی بر ردپای اکولوژیکی است. در رابطه با متغیر مصرف انرژی برق‌آبی نیز مقادیر پهنای راست، متوسط، و چپ به ترتیب برابر با ۳/۶۷۹ ،۰/۵۰۳ و ۲/۶۷۴- است که حاکی از تأثیر مثبت و قابل ملاحظه‌ی مصرف انرژی برق‌آبی بر ردپای اکولوژیکی است. می توان گفت که مقدار پهنای متوسط نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت این متغیر است، اما مقادیر متفاوت پهنای راست و چپ بیان می‌کند که این تأثیر با عدم قطعیت همراه است. این نتایج نشان می‌دهد که مصرف انرژی برق‌آبی می‌تواند تأثیرات مثبت یا منفی چشمگیری بر ردپای اکولوژیکی داشته باشد و این تأثیر با عدم قطعیت همراه است که نیاز به بررسی بیشتر دارد. پهنای راست، متوسط، و چپ برای شاخص جهانی شدن همگی برابر با ۰/۱۱۴ هستند. این ثبات در مقدار پهناها بیانگر تأثیر مثبت یکنواخت و با قطعیت بالای این شاخص بر ردپای اکولوژیکی است. به عبارت دیگر نبود تغییرات بین مقادیر راست، متوسط و چپ بیانگر قطعیت بالای مدل در ارتباط این متغیر با ردپای اکولوژیکی است. برای متغیر تجارت پهنای راست، متوسط، و چپ به ترتیب ۱/۶۴e-۱۳، ۶/۸۱e-۱۴ و ۲/۷۷e-۱۴- هستند. این مقادیر کوچک بیانگر این است که تأثیر تجارت بر ردپای اکولوژیکی عملاً نزدیک به صفر است. اعداد نمایی کوچک دلالت بر این دارند که این متغیر نقش قابل توجهی بر روی ردپای اکولوژیکی ندارد و تقریباً بی‌اثر است. سرانجام پهنای راست، متوسط، و چپ برای متغیر تولید سرانه همگی برابر با ۰/۱۰۹ هستند. این ثبات مشابه شاخص جهانی شدن بیانگر تأثیر مثبت یکنواخت و با قطعیت بالای تولید سرانه بر ردپای اکولوژیکی است. نبود تغییرات بین مقادیر راست، متوسط و چپ بیانگر اعتماد بالای مدل به این متغیر است. با توجه به تحلیل فوق می‌توان چنین استدلال کرد که متغیرهای شاخص جهانی شدن و تولید سرانه بیشترین اثر مثبت و با قطعیت بالا را بر ردپای اکولوژیکی دارند. متغیر مصرف انرژی برق‌آبی اثر مثبت بر ردپای اکولوژیکی دارد، اما این تأثیر با عدم قطعیت همراه است. و سرانجام متغیرهای نرخ رشد شهرنشینی و تجارت تأثیر ناچیز یا تقریباً صفر دارند. این تحلیل نشان می‌دهد که در مدل رگرسیون فازی، تمرکز اصلی باید بر متغیرهایی باشد که تأثیر مثبت و با قطعیت بالا دارند.

جدول (۲): برآورد پهنای فازی نرخ رشد شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، شاخص جهانی شدن، تجارت و درآمدسرانه بر ردپای اکولوژیک

درجه عضویت	متغیرها	پهنای چپ	پهنای متوسط	پهنای راست
	نرخ شهرنشینی (URB)	-۰/۳۴۵	۹/۹۸e-۱۳	۰/۳۴۵
	مصرف انرژی برق‌آبی (HPW)	-۰/۲۹۱	۰/۵۰۳	۱/۲۹۷
h=۰/۶	شاخص جهانی‌شدن (GLIN)	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴
	تجارت (TRD)	۲/۴۸e-۱۲	۴/۴۹e-۱۲	۲/۵۰e-۱۲
	درآمد سرانه (GDP)	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹
	نرخ شهرنشینی (URB)	-۰/۴۶۰	۶/۶۵e-۱۳	۰/۴۶۰
	مصرف انرژی برق‌آبی (HPW)	-۰/۵۵۶	۰/۵۰۳	۱/۵۶۲
h=۰/۷	شاخص جهانی‌شدن (GLIN)	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴
	تجارت (TRD)	۱/۴۷e-۱۲	۲/۸۱e-۱۲	۴/۱۵e-۱۲
	درآمد سرانه (GDP)	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹
	نرخ شهرنشینی (URB)	-۰/۶۸۹	۱/۱۶e-۱۱	۰/۶۸۹
	مصرف انرژی برق‌آبی (HPW)	-۱/۰۸۵	۰/۵۰۳	۲/۰۹۱
h=۰/۸	شاخص جهانی‌شدن (GLIN)	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴
	تجارت (TRD)	۷/۸۱e-۱۱	۱/۱۶e-۱۰	۱/۵۳e-۱۰
	درآمد سرانه (GDP)	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹
	نرخ شهرنشینی (URB)	-۱/۳۷۹	۱/۰۰e-۱۴	۱/۳۷۹
	مصرف انرژی برق‌آبی (HPW)	-۲/۶۷۴	۰/۵۰۳	۳/۶۷۹
h=۰/۹	شاخص جهانی‌شدن (GLIN)	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴	۰/۱۱۴
	تجارت (TRD)	-۲/۷۷e-۱۴	۶/۸۱e-۱۴	۱/۶۴e-۱۳

(GDP) درآمد سرانه	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹	۰/۱۰۹

نمودار (۱) نشان می‌دهد که روند ردپای واقعی اکولوژیک کشور (نمودار آبی‌رنگ) با پهنای چپ (نمودار خاکستری‌رنگ) تطابق دارد، اما فاصله چشمگیری با پهنای متوسط و راست دارد. برای دستیابی به سطوح مطلوب‌تر، ضروری است که مدیریت منابع طبیعی به‌طور مستقل از کاهش آلایندگی‌ها، به مسائل زیست‌محیطی بپردازد.



نمودار(۱):: روند ردپای اکولوژیک (بر اساس درجه عضویت ۰/۹)

باتوجه‌به یافته‌های مطالعه که نشان داد تولید سرانه (GDP) و شاخص جهانی‌شدن (GLIN) بیشترین تأثیر مثبت و قطعی را بر ردپای اکولوژیکی دارند، یکی از راهکارهای کلیدی، اعمال مالیات‌های زیست‌محیطی است. این مالیات‌ها می‌توانند با هدایت درآمدهای حاصل به سمت توسعه فناوری‌های پاک و صنایع سبز، همزمان با رشد اقتصادی و ادغام در اقتصاد جهانی، اثرات منفی زیست‌محیطی را خنثی کنند. به‌ویژه، تخصیص این منابع به مشوق‌های مالی برای صنایع دوستدار محیط‌زیست، می‌تواند سازگاری بین شاخص‌های جهانی‌شدن، تولید ناخالص داخلی و پایداری اکولوژیکی را افزایش دهد.

اگرچه نتایج نشان داد نرخ رشد شهرنشینی (URB) تأثیر مستقیم و معناداری بر ردپای اکولوژیکی ندارد (با پهنای متوسط نزدیک به صفر)، اما سیاست‌های مدیریت توزیع جمعیت - مانند مهاجرت معکوس برنامه‌ریزی‌شده از شهر به روستا - می‌توانند از طریق مکانیسم‌های غیرمستقیم به کاهش ردپای اکولوژیکی کمک کنند. این مکانیسم‌ها شامل کاهش فشار بر زیرساخت‌های شهری، بهبود کارایی مصرف انرژی در مناطق روستایی و توسعه پایدار کشاورزی هستند که در مدل حاضر اندازه‌گیری نشده‌اند. چنین سیاست‌هایی باید به‌عنوان مکملی برای اقدامات صنعتی و با درنظرگرفتن بسترهای اجتماعی - اقتصادی اجرا شوند. مهاجرت معکوس نه‌تنها به تغییر شیوه زندگی منجر می‌شود، بلکه مصرف منابع و تولید آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد. درحالی‌که شهرها با تراکم جمعیت بالا و وابستگی شدید به زیرساخت‌های انرژی‌بر، موجب افزایش ردپای اکولوژیک می‌شوند، زندگی روستایی سبک زندگی ساده‌تری را به همراه دارد که بر منابع محلی، کشاورزی پایدار و انرژی‌های تجدیدپذیر تکیه دارد. بااین‌حال، مهاجرت به مناطق روستایی بدون چالش نخواهد بود.

افزایش جمعیت در این مناطق می‌تواند فشار مضاعفی بر منابع محلی وارد کند و حتی به تخریب اکوسیستم‌ها منجر شود. برای جلوگیری از این مسائل، سیاست‌هایی باید به کار گرفته شوند که ضمن توسعه زیرساخت‌های زیست‌محیطی و حمایت از کشاورزی پایدار، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را نیز تقویت کنند. به‌این‌ترتیب، مهاجرت به روستا، اگر با برنامه‌ریزی دقیق و سیاست‌های پایدار همراه باشد، می‌تواند به کاهش تخریب محیط‌زیست و ایجاد توازن بین رشد جمعیت و حفظ منابع طبیعی منجر شود.

مطالعات داخلی و خارجی متعددی در زمینه بررسی تأثیر میزان شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، شاخص جهانی‌شدن، رشد اقتصادی و... بر ردپای اکولوژیکی صورت گرفته است که با استفاده از روش‌های اقتصادسنجی از جمله رگرسیون کلاسیک، ارتباط و میزان تأثیرگذاری متغیرهای مستقل بر شاخص ردپای اکولوژیک را بررسی کرده اند. از جمله فطرس و همکاران (۱۳۹۰)، با استفاده از روش‌های اقتصادسنجی، از جمله رویکرد یوهانسن-جوسیلیوس، تأثیر متغیرهای تولید ناخالص داخلی، شهرنشینی، جمعیت و شدت انرژی برروی آلودگی هوا طی دورهٔ ۱۳۴۶-۱۳۸۵ در ایران را بررسی کرده‌اند. کارگر و اسماعیلی (۱۳۹۵)، با بهره‌گیری از تحلیل‌های هم‌جمعی در داده‌های پنلی، رابطه بلندمدت و کوتاه‌مدت میان انتشار دی‌اکسیدکربن، درآمد سرانه، مصرف انرژی، شاخص آزادسازی تجاری و شهرنشینی در کشورهای منطقه منا طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۰ را مورد بررسی قرار داده‌اند. زروکی و همکاران (۱۴۰۱)، در کار خود فرضیه ارتباط جهانی‌شدن (اقتصادی، اجتماعی و سیاسی) با انتشار دی‌اکسید کربن در ایران را طی دوره زمانی ۱۳۵۸ تا ۱۳۹۶، بر مبنای رهیافت خودرگرسیونی با وقفه‌های توزیعی مورد آزمون قرار داده‌اند. اصفهانی و همکاران (۱۴۰۱)، به تحلیل ارتباط بین رشد اقتصادی، مصرف انرژی و ردپای اکولوژیکی در ۷۲ کشور توسعه‌یافته و در حال توسعه پرداخته‌اند. آنان در این تحلیل از روش گشتاورهای تعمیم‌یافته سیستمی (Sys-GMM) استفاده کرده‌اند.

محنت‌فر و همکاران (۱۴۰۲) در تحقیق خود، تأثیر پیچیدگی اقتصادی و باز بودن تجارت بر ردپای اکولوژیکی (به‌عنوان شاخصی برای تخریب محیط زیست) را بررسی کرده‌اند. این مطالعه با استفاده از داده‌های ۱۸ کشور در حال توسعه آسیایی در دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱ و با رویکرد پانل کوانتایل انجام شده است. در پژوهش دیگری که توسط کوتلار و همکاران[1] (۲۰۲۲) صورت گرفته است، ارتباط میان مصرف انرژی، درآمد سرانه و ردپای اکولوژیکی به‌عنوان شاخصی از تخریب اکولوژیکی در کشورهای گروه MINT (مکزیک، اندونزی، نیجریه، ترکیه) در دوره ۱۹۷۶ تا ۲۰۱۶ بررسی شده است. در این مطالعه، همبستگی بلندمدت میان متغیرها با استفاده از مدل تصحیح خطای برداری و از طریق تحلیل بردار خودرگرسیون پانلی برآورد شده است. در نهایت، هم‌انباشتگی بین متغیرها از طریق تحلیل پانلی حداقل مربعات معمولی دینامیک و اصلاح‌شده به‌طور کامل برآورد شده است تا ارتباط بلندمدت میان آن‌ها به‌طور دقیق‌تری بررسی گردد. الدقیشم[2] (۲۰۲۴)، همچنین تأثیر شهرنشینی، مصرف انرژی، منابع طبیعی، رشد اقتصادی و نوآوری فناوری بر ردپای اکولوژیکی در عربستان سعودی را با استفاده از مدل خودرگرسیون با وقفه‌های توزیع‌شده (ARDL) مورد بررسی قرار داده‌اند. ذوالفقار و همکاران[3] (۲۰۲۴)، نیز در مطالعه‌ای رابطه بین جهانی‌سازی، پایداری محیط‌زیستی و شهرنشینی در کشورهای منتخب در حال توسعه را با استفاده از تکنیک ساده رگرسیون پانل و داده‌های مربوط به ۴۰ کشور در حال توسعه از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۸، مورد بررسی قرار داده‌اند. در بیشتر مطالعات برای بررسی عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی از روش های اقتصادسنجی استفاده شده است؛ در این مطالعه از رگرسیون فازی که قابلیت انعطاف بیشتری در مدل‌سازی و تحلیل دارد، استفاده شده است. به‌طوری که مقادیر مختلفی برای هر پارامتر و متغیر خروجی، که نشان‌دهنده ردپای اکولوژیکی است، برآورد شده‌اند. به همین دلیل، رگرسیون فازی عملکرد بهتری نسبت به رگرسیون کلاسیک دارد، زیرا در رگرسیون معمولی تنها

[1] Kutlar, A.
[2] Aldegheishem, A.
[3] Zulfiqar, K.

یک مقدار مشخص برای متغیر مستقل محاسبه می‌شود. مدل‌های اقتصادسنجی به دلایل ساختاری برای بیان اطلاعات قطعی و کامل نیازمندند، در حالی که عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی غالباً نوسانی هستند. بنابراین، با توجه به این نوسانات و عدم قطعیت، نیاز به مدل‌سازی دقیق‌تری احساس می‌شود. مدل رگرسیون فازی به‌واسطه انعطاف‌پذیری بالا نسبت به رگرسیون کلاسیک، با برآورد پهنای راست، چپ و متوسط ردپای اکولوژیکی، قدرت توزیع‌دهی فوق‌العاده‌ای دارند. از سوی دیگر در تحلیل مربوط به ردپای اکولوژیکی به کمک رگرسیون فازی از مفهوم درجه عضویت استفاده می شود. با استفاده از مفهوم درجه عضویت (h) می‌توان عدم قطعیت در متغیرهای اقتصادی را لحاظ کرد. با توجه به مفهوم h که بیان کننده میزان ابهام در مدل است. هرچه به درجه عضویت ۰/۹ نزدیک‌تر می‌شویم عدم قطعیت (میزان فازی بودن متغیرها) افزایش می‌یابد. از سوی دیگر مراکز فازی بیانگر تأثیرگذاری مقدار ثابت و پهنای فازی نشان‌دهنده نوسان هر یک از متغیرها است. با توجه با این ویژگی‌ها مدل رگرسیون فازی با ضرایب متقارن و نامتقارن انعطاف پذیری زیادی در مدلسازی و تجزیه و تحلیل دارد. همانطور که از جداول (۱) و (۲) در بخش یافته‌های پژوهش ملاحظه می‌شود، مصرف انرژی برق‌آبی بر ردپای اکولوژیکی مؤثر است که این نتایج همسو با مطالعات انصاری و همکاران (۲۰۲۰) و چرر و پفیستر[1] (۲۰۱۶) می‌باشد. اثر نرخ شهرنشینی بر شاخص ردپای اکولوژیکی نیز در راستای نتایج پژوهش‌های ساهو و ستی[2] (۲۰۲۱)، وانگ[3] (۲۰۱۹) و احمد و همکاران[4] (۲۰۲۰) می‌باشد. نتایج پژوهش در ارتباط با اثر جهانی‌شدن بر ردپای اکولوژیکی نیز منطبق بر یافته‌های پژوهش رحمان و همکاران[5] (۲۰۲۱) است. مقایسه یافته‌های مطالعه حاضر با پژوهش‌های صورت گرفته توسط ناتانیل[6] (۲۰۲۰)، نیز نشان می‌دهد که تجارت بر ردپای اکولوژیکی تأثیرگذار است. همسویی نتایج مطالعه حاضر در زمینه‌ی اثر درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی نیز توسط چارفدین[7] (۲۰۱۷)، گروس و کاراگل[8] (۲۰۲۳) و نیاگو[9] (۲۰۲۰) قابل تأیید است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تأثیر عدم قطعیت عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی پرداخته و شش متغیر اصلی شامل نرخ رشد شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، شاخص جهانی‌شدن، تجارت و تولید سرانه را مورد تحلیل قرار داده است. برای این منظور از روش تجزیه‌وتحلیل مدل رگرسیون فازی با ضرایب متقارن که انعطاف‌پذیری بسیار زیادی در مدلسازی دارد، بهره گرفته شده است و از مفاهیم مرکز، پهنای راست و چپ فازی که در ادبیات رگرسیون فازی مرسوم است برای بررسی رفتار متغیرها استفاده شد. این روش مدلسازی می‌تواند از منظر سیاست‌گذاری برای کشور مفید باشد و سیاست‌های برنامه‌ریزان را جهت‌دهی کند. همان‌طور که بیان شد در این مطالعه مرکز، پهنای راست و چپ فازی که به ترتیب بیانگر متوسط، بیشترین و کمترین تأثیر نرخ شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، رانت منابع طبیعی، درآمد سرانه و تولیدات صنعتی بر ردپای اکولوژیک در ایران است محاسبه شده است. نتایج به‌دست‌آمده از مدل رگرسیون فازی نشان می‌دهد که هرکدام از این متغیرها تأثیرات مختلفی بر محیط‌زیست و به‌ویژه ردپای اکولوژیکی دارند. باتوجه‌به یافته‌های به‌دست‌آمده از این پژوهش نرخ رشد شهرنشینی تأثیر قابل‌توجهی بر ردپای اکولوژیکی ندارد. مقادیر پهنای راست و چپ این متغیر به‌وضوح نشان می‌دهند که تأثیر این متغیر نزدیک به صفر است. این به معنای آن است که افزایش یا کاهش نرخ رشد جمعیت شهری به‌تنهایی نمی‌تواند اثر مستقیمی بر کاهش یا افزایش ردپای اکولوژیکی داشته باشد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود که در زمینه سیاست‌گذاری شهری، تمرکز سیاست‌گذاران باید بر کیفیت و نوع رشد شهرنشینی باشد نه فقط میزان آن. سیاست‌های توسعه شهری باید شامل برنامه‌های بهبود حمل‌ونقل عمومی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، بهینه‌سازی مصرف منابع طبیعی در شهرها و ایجاد فضای

[1] Scherer, L., & Pfister, S.
[2] Sahoo, M., & Sethi, N.
[3] Wang, Z.
[4] Ahmed, Z.,et al.
[5] Rahman et al.
[6] Nathaniel, S.
[7] Charfeddine, L
[8] Gorus, M., & Karagol, E.
[9] Neagu, O

سبز بیشتر باشد. همچنین، بهینه‌سازی زیرساخت‌های شهری و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها می‌تواند به طور غیرمستقیم به کاهش ردپای اکولوژیکی کمک کند. این در حالی است که مصرف انرژی برق‌آبی تأثیر مثبت و قابل‌توجهی بر ردپای اکولوژیکی دارد، اما مقادیر مختلف پهنای راست و چپ این متغیر بیانگر وجود عدم قطعیت در تأثیر آن است. این عدم قطعیت ممکن است ناشی از شرایط مختلف جغرافیایی، میزان بهره‌برداری از منابع آبی و تکنولوژی‌های به‌کاررفته در تولید برق باشد؛ بنابراین برای بهره‌برداری بهینه از منابع برق‌آبی، نیاز به سرمایه‌گذاری بیشتر در فناوری‌های نوین و بهینه‌سازی فرآیند تولید برق‌آبی است. همچنین، باید سیاست‌های مدیریت منابع آب به‌گونه‌ای طراحی شوند که از تخریب اکوسیستم‌های آبی جلوگیری کرده و درعین‌حال از ظرفیت‌های تولید انرژی برق‌آبی بهره‌برداری شود. توجه به مسائل زیست‌محیطی و بوم‌شناسی در پروژه‌های برق‌آبی ضروری است تا از آسیب به محیط‌زیست جلوگیری شود. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهند که شاخص جهانی‌شدن تأثیر مثبت و یکنواختی بر ردپای اکولوژیکی دارد. باتوجه‌به تأثیر مثبت و یکنواخت شاخص جهانی‌شدن بر ردپای اکولوژیکی، پیشنهاد می‌شود که سیاست‌گذاران به تقویت همکاری‌های بین‌المللی و گسترش تبادل دانش و فناوری‌های سبز توجه کنند. این امر می‌تواند شامل افزایش تبادلات تجاری در زمینه کالاها و خدمات دوستدار محیط‌زیست، ترویج پروژه‌های مشترک در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر و تکنولوژی‌های پاک، و حمایت از مشارکت کشورها در توافقات بین‌المللی نظیر توافق‌نامه پاریس برای کاهش تغییرات اقلیمی باشد. علاوه بر این، توسعه و ترویج استانداردهای زیست‌محیطی جهانی و تقویت هم‌افزایی میان بخش‌های دولتی و خصوصی می‌تواند به تسریع فرآیند جهانی‌شدن پایدار و کاهش ردپای اکولوژیکی در سطح جهانی کمک کند. باتوجه‌به یافته‌های این مقاله تولید سرانه نیز تأثیر مثبت و با قطعیت بالایی بر ردپای اکولوژیکی دارد. باتوجه‌به تأثیر مثبت و قطعی تولید سرانه بر افزایش ردپای اکولوژیکی، پیشنهاد می‌شود که سیاست‌گذاران به سمت ترویج تولید پایدار حرکت کنند. این می‌تواند شامل حمایت از فناوری‌های کم‌کربن، استفاده بهینه از منابع طبیعی و انرژی‌های تجدیدپذیر، و تشویق به استفاده از مواد بازیافتی در فرآیندهای تولید باشد. همچنین، اعمال مالیات بر آلایندگی و تشویق به مصرف مسئولانه می‌تواند به کاهش اثرات منفی تولید سرانه بر محیط‌زیست کمک کند در نهایت نتایج نشان می‌دهند که تجارت تأثیر ناچیزی بر ردپای اکولوژیکی دارد و تقریباً بی‌اثر است. این به این معناست که تجارت کالاها و خدمات در شرایط فعلی نقش چندانی در افزایش یا کاهش ردپای اکولوژیکی ندارد. به‌عبارت‌دیگر، تأثیر تجارت بیشتر در زمینه‌های اقتصادی و اجتماعی قابل‌مشاهده است و اثرات آن بر محیط‌زیست به‌طور مستقیم کم است. با توجه به اینکه تأثیر تجارت بر ردپای اکولوژیکی کم است، سیاست‌ها باید بر توسعه و تقویت تجارت کالاها و خدمات سبز تمرکز داشته باشند. از جمله این کالاها می‌توان به فناوری‌های پاک، محصولات انرژی تجدیدپذیر و خدمات مربوط به بهینه‌سازی مصرف منابع اشاره کرد. همچنین، کشورهای باید توافق‌نامه‌هایی برای گسترش تجارت سبز و محصولات دوستدار محیط زیست ایجاد کنند.

باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده، به طور خلاصه می‌توان گفت متغیرهای شاخص جهانی‌شدن و تولید سرانه تأثیرات مثبت و با قطعیت بالایی بر ردپای اکولوژیکی دارند و سیاست‌گذاری‌ها باید بر تقویت این دو حوزه متمرکز شود. از طرف دیگر، مصرف انرژی برق‌آبی تأثیر مثبت قابل‌توجهی دارد؛ اما این تأثیر نیاز به مدیریت دقیق و بهینه‌سازی بیشتر دارد. نرخ رشد شهرنشینی و تجارت تأثیر ناچیزی دارند و سیاست‌ها باید بر بهبود کیفیت رشد شهرنشینی و تقویت بخش‌های سبز تجاری متمرکز شوند. در نهایت، سیاست‌گذاری‌ها باید بر افزایش همکاری‌های بین‌المللی، بهره‌برداری بهینه از منابع، توسعه پایدار و استفاده از فناوری‌های پاک متمرکز شوند تا ردپای اکولوژیکی کاهش یابد.

منابع

پژوهشکده پولی و بانکی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۸۷. بررسی تاثیر عدم قطعیت تورم بر رشد اقتصادی.

جعفری صمیمی، ا. و ک. اعظمی. ۱۳۹۱. عدم قطعیت اقتصاد کلان و اندازه دولت: شواهد کشورهای منتخب درحال توسعه، فصلنامه راهبردی اقتصادی، سال اول، شماره سوم، ص۱۶۸-۱۴۹.

رجبی، م. و ن. تاج‌الدین. ۱۳۹۵. تحلیل تأثیر نااطمینانی اقتصاد کلان بر سرمایه‌گذاری و رشد اقتصادی در ایران طی سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۵۹. فصلنامه اقتصاد کاربردی، سال ۶، ص۱۵-۲۲.

زروکی، ش.، آ.یوسفی بارفروشی و ا. فتح‌الله‌زاده. ۱۴۰۳. تحلیلی جامع از اثر جهانی‌شدن بر آلایندگی محیط‌زیست در ایران با تأکید بر ابعاد سه‌گانه و اجزای دوگانه. فصلنامه علمی پژوهشی اقتصاد مقداری، ۱۹(۴)، ص۱-۴۱.

سایه میری، ع. و س. نظری. ۱۳۹۹. تاثیر شهرنشینی بر تخریب محیط زیست در کشورهای درحال‌توسعه و توسعه یافته. مجله مطالعات علوم محیط زیست، دوره پنجم ، شماره اول، فصل بهار ، سال ۱۳۹۹ ، ص۲۲۴۴_۲۲۵۰.

صادقی، س.، س. سجودی و ف. احمدزاده دلجوان. ۱۳۹۵. بررسی تأثیر متغیرهای جمعیتی بر کیفیت محیط زیست بر مبنای مدل STIRPAT . مجله علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۱۸(ویژه‌نامه شماره ۳)، ص۲۵۷_۲۷۵.

محنت فر، ی.، ف. عثمانی، م. چشمی و ل.آرغا. ۱۴۰۲. آیا توسعه فناوری و گسترش تجارت سبب کاهش ردپای اکولوژیکی می‌شود؟ مطالعه موردی: شواهدی از کشورهای درحال‌توسعه. پژوهش‌های رشد و توسعه اقتصادی، ۱۳(۵۳)، ص۱۱۰-۹۷.

Alnour, Mohammed, Maysam Ali, Abdelaziz Abdalla, Roua Abdelrahman, and Hosna Khalil. How do urban population growth, hydropower consumption and natural resources rent shape environmental quality in Sudan? World Development Sustainability 1 (2022): 100029.

Aldegheishem, A. (2024). Factors affecting ecological footprint in Saudi Arabia: a panel data analysis. Frontiers in Environmental Science.

Burton, E. (2000). The Compact City: Just or Just Compact? A Preliminary Analysis. Urban Studies, 37(11): 1969–2001.

Cutcu, I., Beyaz, A., Gerlikhan, S. G., & Kilic, Y. (2023). Is ecological footprint related to foreign trade? Evidence from the top ten fastest developing countries in the global economy. Journal of Cleaner Production, 413, 137517.

Danish, R., & Khan, S. U. D., (2020). Determinants of the ecological footprint: role of renewable energy, natural resources, and urbanization. Sustainable Cities and Society, Vol 54, No 101996.

Destek, M. A., & Sarkodie, S. A., (2019). Investigation of environmental Kuznets curve for ecological footprint: the role of energy and financial development. Science of the Total Environment, Vol 650, Pp 2483-2489.

Esmaeili, A. (2017). The effects of economic growth, energy consumption, trade openness and urbanization on environmental pollution in the MENA region during the period 1995-2012.

Figge, L., & Martens, P. (2014). Globalisation continues: The Maastricht globalisation index revisited and updated. Globalizations, 11(6), 875–893. doi:10.1080/14747731.2014.887389.

Giordani, Paolo E., Schlag, Karl, Zwart, Sanne, 2010, "Decision Makers Facing Uncertainty: Theory Versus Evidence", Journal of Economic Psychology, Vol.31.

Gouldson, A. P., & Murphy, J. (1997). Ecological Modernization: Economic Restructuring and the Environment. The Political Quarterly, 68(5): 74–86.

Gorus, M., & Karagol, E. (2023). Factors affecting per capita ecological footprint in OECD countries: Evidence from machine learning techniques. Energy & Environment, 34, 2601–2618.

Grossman, G. & A. Krueger (1991), "Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement", NBER Working Paper, No. 3914.

Jones, W. D. (1991). How Urbanization Affects Energy Use in Developing Countries. Energy Policy, 19: 621–630.

Kirikkaleli, D., Adebayo, T. S., Khan, Z., & Ali, S. (2021). Does globalization matter for ecological footprint in Turkey? Evidence from dual adjustment approach. Environmental Science and Pollution Research, 28(11), 14009-14017.

Kutlar, A., Gulmez, A., Kabasakal, A., & Kutlar, S. (2022). Ecological footprint, energy usage, and economic progress relationship: the MINT countries. Economic research-Ekonomska istraživanja, 35(1), 4457-4480.

Martens, P., & Raza, M. (2010). Is globalisation sustainable? Sustainability, 2(1), 280–293.

Nathaniel, S., Nwodo, O., Adediran, A., Sharma, G., Shah, M., & Adeleye, N. (2019). Ecological footprint, urbanization, and energy consumption in South Africa: including the excluded. Environmental Science and Pollution Research, 26, 27168-27179.

Nathaniel, S., & Khan, S. (2020). The nexus between urbanization, renewable energy, trade, and ecological footprint in ASEAN countries. Journal of Cleaner Production, 272, 122709.

Neagu, O. (2020). Economic Complexity and Ecological Footprint: Evidence from the Most Complex Economies in the World. Sustainability.

Sahoo, M., & Sethi, N. (2021). The dynamic impact of urbanization, structural transformation, and technological innovation on ecological footprint and PM2.5: evidence from newly industrialized countries. Environment, Development and Sustainability.

Ullah, A., Tekbaş, M., & Doğan, M. (2023). The impact of economic growth, natural resources, urbanization and biocapacity on the ecological footprint: The case of Turkey. Sustainability, 15(17), 12855.

Wang, Y., Arshed, N., Ghulam Shabeer, M., Munir, M., Rehman, H. U., & Khan, Y. A. (2023). Does globalization and ecological footprint in OECD lead to national happiness. Plos one, 18(10), e0288630.

Wang, Z. (2019). Investigation of the ecological footprint's driving factors: What we learn from the experience of emerging economies. Sustainable Cities and Society.

Zulfiqar, K., Sabir, A. A., Nawaz, A. R., & Farasat, F. (2024). Urbanization in a Globalized World: Reviewing Environmental Sustainability in Developing Countries. Population and Economics, 8(3), 70-85.