

Original Article



Investigating the Impact of Socioeconomic Factors' Uncertainty on the Ecological Footprint in Selected BRICS Member Countries, with an Emphasis on the KOF Globalization Index

Received: 2025.02.06

Accepted: 2025.09.28

Masoud Cheshmaghil, Javad Shahraki*, Reza Ashraf Ganjoei

Department of Economics,
Faculty of Economics and
Administrative Science,
University of Sistan and
Baluchestan, Zahedan, Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: The ecological footprint is a composite indicator that measures the balance between environmental supply and demand, representing the area of globally average productive land required to support human activities. This index plays a significant role in managerial decision-making and sustainability planning. This study investigates the impact of uncertainties in key socioeconomic factors on the ecological footprint of BRICS countries from 1992 to 2022. The research analyzes how human activities exert pressure on natural resources and offers managerial strategies to mitigate this pressure.

Material and methods: To analyze the data and evaluate the influence of five key variables on the ecological footprint (ECFP), we employed a fuzzy regression model with symmetric coefficients. These variables are urbanization (URB), hydropower energy consumption (HPW), globalization index (GLIN), trade (TRD), and per capita income (GDP). The use of fuzzy regression enhances the accuracy of our analysis, particularly for the nonlinear relationships between these variables. We used MATLAB software for the computational estimation of the model. This approach helps to precisely identify the degree of influence of each variable on the ecological footprint, providing a solid foundation for environmental management and decision-making.

Results and discussion: The results indicate that urbanization has varying impacts on the ecological footprint across the countries studied. Brazil showed the highest impact with a value of 4.865, while China recorded the lowest impact at 0.180. Regarding hydropower energy consumption, South Africa had the highest impact at 3.969, while Iran showed the lowest impact at 6.389×10^{-16} . The findings for the globalization index show that Iran had the highest impact with a value of 4.991, while South Africa had the lowest at 1.172×10^{-14} . In terms of trade, Egypt had the highest impact at 0.563, and Iran had the lowest at 6.170×10^{-16} . Finally, results concerning per capita income indicate that China had the highest impact at 2.104, while Brazil had the lowest at 8.1975×10^{-14} . These values highlight significant differences among the countries, accurately reflecting the unique status of each nation regarding each index. The data demonstrates the diverse performance of countries across various economic and environmental domains and can be used as a tool for targeted planning and decision-making. These differences also show that each country faces unique challenges and requires specific solutions for improvement. A detailed analysis of the data reveals that various factors uniquely affect each country, with lifestyle, industrialization levels, and natural resource management policies playing important roles in shaping these outcomes. Therefore, further investigation into the specifics of each variable can lead to a deeper understanding of the complex interactions between human activity and the environment.

Conclusion: The analysis demonstrates that factors such as urbanization, hydropower energy, globalization, trade, and per capita income have a differential impact on the ecological footprint of BRICS member countries. Urbanization significantly affects Egypt and South Africa but shows varied effects in Iran due to high uncertainty. Hydropower energy consumption is less important in most countries except China. Globalization and trade have weak impacts, while per capita income is significant in China and Russia but has decreased in Iran due to sanctions.

Keywords: Ecological footprint, Globalization index, Urbanization, Uncertainty, BRICS countries

How to cite this article:
Cheshmaghil, M., Shahraki, J., and Ashraf Ganjoei, R. 2026. Investigating the Impact of Socioeconomic Factors' Uncertainty on the Ecological Footprint in Selected BRICS Member Countries, with an Emphasis on the KOF Globalization Index. Adv. Environ. Sci. 24 (2): 337-360.

* Corresponding Author Email Address: j.shahraki@eco.usb.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2025.238674.1486



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

بررسی تأثیر عدم قطعیت عوامل اقتصادی - اجتماعی بر ردپای اکولوژیکی در کشورهای منتخب عضو بریکس، با تأکید بر شاخص جهانی شدن (KOF)

مسعود چشم‌اغیل، جواد شهرکی*، رضا اشرف گنجویی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶

گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و علوم

اداری، دانشگاه سیستان و

بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: ردپای اکولوژیکی به عنوان یک معیار ترکیبی، تعادل بین عرضه و تقاضای محیط زیستی را اندازه گیری می کند و نمایانگر هکتر زمین با بهره وری متوسط جهانی است. این شاخص نقش مهمی در تصمیم گیری های مدیریتی و برنامه ریزی پایداری دارد. در پژوهش حاضر، تأثیر عدم قطعیت عوامل اقتصادی - اجتماعی بر ردپای اکولوژیکی کشورهای گروه بریکس (BRICS)، طی سال های ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۱ مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعه، نقش فعالیت های انسانی در فشار بر منابع طبیعی را تحلیل می کند و راهکارهای مدیریتی را برای کاهش این فشار ارائه می دهد.

مواد و روش ها: در این مطالعه، برای تحلیل داده ها و ارزیابی تأثیر پنج متغیر کلیدی بر ردپای اکولوژیکی (ECFP)، از مدل رگرسیون فازی با ضرایب متقارن استفاده شد. این متغیرها شامل شهرنشینی (URB)، مصرف انرژی برق آبی (HPW)، شاخص جهانی شدن (GLIN)، تجارت (TRD) و درآمد سرانه (GDP) هستند. استفاده از مدل رگرسیون فازی به دقت تحلیل روابط غیر خطی بین متغیرها کمک می کند. نرم افزار MATLAB به عنوان ابزار محاسباتی برای برآورد مدل انتخاب شد. این رویکرد به شناسایی میزان تأثیر هر یک از متغیرها بر ردپای اکولوژیکی کمک می کند و می تواند پایه ای برای تصمیم گیری های مدیریتی در حوزه محیط زیست فراهم آورد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که شهرنشینی بر ردپای اکولوژیکی در کشورهای مورد بررسی تأثیرات مختلفی دارد. برزیل با عدد ۴/۸۶۵ بیشترین تأثیر را داشته است، در حالی که چین با عدد ۰/۱۸۰ کمترین تأثیر را ثبت کرده است. در مورد مصرف انرژی برق آبی، آفریقای جنوبی با عدد ۳/۹۶۹ بیشترین میزان تأثیر را به خود اختصاص داده است در حالی که ایران، با عدد $۶/۳۸۹ \times 10^{-۱۶}$ کمترین میزان اثرگذاری را نشان داده است. نتایج در خصوص شاخص جهانی شدن نیز نشان می دهد که ایران با عدد ۴/۹۹۱ بیشترین تأثیر را دارد، در حالی که آفریقای جنوبی با عدد $۱/۷۲۲ \times 10^{-۱۴}$ کمترین تأثیر را ثبت کرده است. در حوزه تجارت، مصر با عدد ۰/۵۶۳ بیشترین اثرگذاری را داشته است، در حالی که ایران در این زمینه، با عدد $۶/۱۷۰ \times 10^{-۱۶}$ کمترین اثرگذاری را به خود اختصاص داده است. نتایج در رابطه با درآمد سرانه نیز نشان می دهد که چین با عدد ۲/۱۰۴ بیشترین تأثیر را دارد، در حالی که برزیل با عدد $۸/۱۹۷ \times 10^{-۱۴}$ کمترین تأثیر را ثبت کرده است. مقادیر ارائه شده نشان می دهند که تفاوت های قابل توجهی در بین کشورها وجود دارد. این اعداد دقیقاً وضعیت هر کشور در هر شاخص را نشان می دهند. علاوه بر این، این داده ها نشان دهنده تنوع پذیرفته شده در عملکرد کشورها در حوزه های مختلف اقتصادی و محیط زیستی هستند و می توانند به عنوان ابزاری برای برنامه ریزی و تصمیم گیری استفاده شوند. همچنین، این تفاوت ها نشان می دهند که هر کشور به طور منحصربه فردی با چالش های خاص خود روبرو است و نیازمند راهکارهای مشخصی برای بهبود شرایط است. در این راستا، تحلیل دقیق داده ها نشان می دهد که عوامل مختلف به صورت منحصربه فردی در هر کشور تأثیر می گذارند و سبک زندگی، سطح صنعتی شدن و سیاست های مدیریت منابع طبیعی نقش مهمی در شکل گیری این تفاوت ها ایفا می کنند. لذا، بررسی جزئیات هر متغیر در قالب مطالعات بیشتر، می تواند منجر به درک عمیق تری از تعاملات پیچیده بین انسان و محیط زیست شود.

نتیجه گیری: نتایج تحلیل نشان می دهد که عوامل مختلفی همانند شهرنشینی، انرژی برق آبی، جهانی شدن، تجارت و درآمد سرانه تأثیرات متفاوتی بر ردپای اکولوژیکی کشورهای عضو بریکس دارند. شهرنشینی در مصر و آفریقای جنوبی تأثیر قابل توجهی دارد، اما در ایران به دلیل عدم قطعیت بالا، تأثیر متفاوتی نشان می دهد. مصرف انرژی برق آبی در اغلب کشورها اهمیت کمی دارد، به جز چین. جهانی شدن و تجارت تأثیر ضعیفی گذاشته اند، در حالی که درآمد سرانه در چین و روسیه معنادار است، اما در ایران به علت تحریم ها، کاهش یافته است.

واژه های کلیدی: ردپای اکولوژیکی، شاخص جهانی شدن، شهرنشینی، عدم قطعیت، کشورهای بریکس

استناد به این مقاله: چشم‌اغیل،

م.، شهرکی، ج.، ر.، اشرف گنجویی.

۱۴۰۵. بررسی تأثیر عدم قطعیت

عوامل اقتصادی - اجتماعی بر ردپای

اکولوژیکی در کشورهای منتخب

عضو بریکس، با تأکید بر شاخص

جهانی شدن (KOF). فصلنامه علوم

محیطی نوین. ۲۴ (۲): ۳۳۷-۳۶۰.

* Corresponding Author Email Address: j.shahraki@eco.usb.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2025.238674.1486



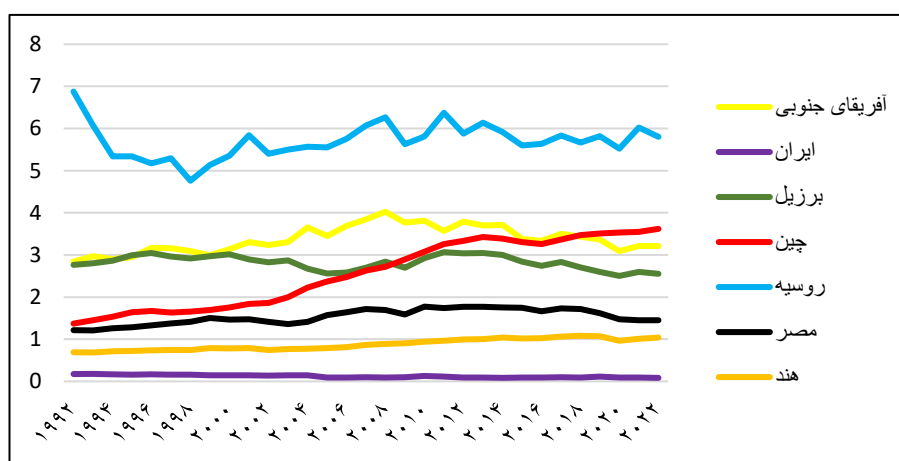
مقدمه

ردپای اکولوژیکی به عنوان یک معیار ترکیبی برای سنجش تعادل بین عرضه و تقاضای محیط زیست تعریف می شود (Wackernagel & Rees, 1996). این مفهوم که نخستین بار توسط ریس و واکرناگل (۱۹۹۶) ارائه شد، بر این اصل استوار است که فعالیت های انسانی به دلیل بهره برداری از منابع و خدمات طبیعت، تأثیر اجتناب ناپذیری بر محیط زیست می گذارند. این شاخص، مقدار منابع طبیعی مورد نیاز برای پشتیبانی از سبک زندگی هر فرد را اندازه گیری می کند و واحد آن «هکتار جهانی» (gha) است که معادل یک هکتار زمین با بهره وری متوسط جهانی در نظر گرفته می شود. ردپای اکولوژیکی کلیه فعالیت های تأثیرگذار از جمله تخریب جنگل ها و مراتع، آلودگی هوا و آسیب به حیات وحش را در بر می گیرد و استفاده از آن برای تصمیم گیری های زیست محیطی ضروری است. بررسی عوامل مؤثر بر این شاخص همواره موضوعی جذاب در حوزه اقتصاد محیط زیست بوده است. در میان این عوامل، گسترش بی رویه شهرنشینی به ویژه در کشورهای کمتر توسعه یافته، نقش بسزایی در افزایش آلودگی و انتشار گازهای گلخانه ای داشته است (Nathaniel & Khan, 2020). این رشد سریع که عمدتاً ناشی از نرخ بالای زاد و ولد، مهاجرت گسترده روستایی و تبدیل مناطق روستایی به شهری است، مشکلات زیست محیطی فراوانی ایجاد کرده و کیفیت زندگی و سلامت محیط زیست را به خطر انداخته است. در کنار شهرنشینی، مصرف انرژی به طور کلی و انرژی برق آبی به طور خاص با افزایش فعالیت های اقتصادی، نقش پررنگی در این زمینه ایفا می کند. اگرچه انرژی برق آبی به عنوان منبعی تجدیدپذیر در کاهش آلودگی هوا مؤثر است، اما خود می تواند پیامدهای زیست محیطی قابل توجهی از جمله تخریب اکوسیستم های طبیعی، نابودی جنگل ها و تالاب ها، جابه جایی جوامع محلی و افزایش انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از تجزیه مواد آلی در مخازن سدها را به

دنبال داشته باشد (Fearnside, 2015). علاوه بر این، در دنیای امروز، پدیده جهانی شدن با تأثیر بر ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی، به افزایش وابستگی متقابل کشورها منجر شده است (Gygli et al., 2019). این پدیده اگرچه از طریق تسهیل تجارت، جذب سرمایه گذاری خارجی و انتقال فناوری می تواند به رشد اقتصادی بینجامد، اما از طریق تشویق به مصرف منابع انرژی سنتی و تسریع روند صنعتی شدن، می تواند آلودگی هوا، آب و خاک را تشدید و کیفیت محیط زیست را کاهش دهد (Nathaniel & Khan, 2020). بنابراین، جهانی شدن، تأثیری چندوجهی و چشمگیر بر ردپای اکولوژیک در کشورهای بریکس دارد. ابعاد جهانی شدن اقتصادی و سیاسی همواره تأثیری مثبت و قابل توجه بر تخریب محیط زیست دارند. این امر نشان می دهد که همبستگی اقتصادی و سیاسی بیشتر، فشارهای زیست محیطی را تشدید می کند (Mohammad et al., 2023; Salehin et al., 2021). در مقابل، جهانی شدن اجتماعی رابطه ای پیچیده تر دارد و اغلب با ترویج الگوهای مصرفی، ردپای اکولوژیک را وخیم تر می کند (Hussain et al., 2023; Ahmad et al., 2022). نقش کیفیت نهادی و حکمرانی بسیار حیاتی است، زیرا چارچوب های قوی تر می توانند این اثرات نامطلوب را کاهش دهند (Mohammad et al., 2023). علاوه بر این، عواملی مانند پیچیدگی اقتصادی، مدیریت بهتر منابع طبیعی و استفاده از راه حل های انرژی تجدیدپذیر به عنوان راهبردهایی کلیدی برای جدا کردن رشد از تأثیرات زیست محیطی شناخته شده اند. این یافته ها، فرضیه منحنی زیست محیطی کوزنتس (EKC) را برای این اقتصادها تأیید می کنند (Reza et al., 2024; Aziz et al., 2024; Syed et al., 2023). به طور کلی، ادبیات بر نیاز به سیاست هایی تأکید دارد که به عدم قطعیت های اجتماعی - اقتصادی می پردازند و مسیرهای توسعه پایدار را برای مقابله با فشارهای زیست محیطی

کلان، تصمیم‌گیری بهینه تحت چنین شرایطی همواره موضوعی مهم در تحقیقات بوده است، چرا که این تصمیمات علاوه بر تأثیرات اقتصادی، ابعاد فرهنگی، اجتماعی و سیاسی را نیز تحت‌الشعاع قرار می‌دهند. عدم قطعیت با ایجاد بی‌ثباتی و کاهش سرمایه‌گذاری، می‌تواند رشد اقتصادی را محدود و رفاه را کاهش دهد (Baker *et al.*, 2016).

مرتبط با جهانی‌شدن ترویج می‌کنند (Syed *et al.*, 2023). بنابراین، این مقاله به بررسی تأثیر عدم قطعیت عوامل اقتصادی - اجتماعی بر ردپای اکولوژیکی در کشورهای منتخب عضو گروه بریکس می‌پردازد. عدم قطعیت به شرایطی اطلاق می‌شود که تصمیم‌گیری توسط کنشگران اقتصادی (خانوارها، بنگاه‌ها و دولت) در فضایی فاقد اطمینان کامل انجام می‌گیرد (Bloom, 2014). در سطح



شکل ۱- روند ردپای اکولوژیکی سرانه در کشورهای منتخب عضو بریکس

Fig. 1 - Trend of the Ecological Footprint per Person in Selected BRICS Countries

(2005). آفریقای جنوبی و مصر روندی نسبتاً پایدار داشته‌اند که می‌تواند نشان‌دهنده مدیریت منابع یا رشد کنترل‌شده اقتصادی باشد (Soliman, 2013). روسیه، با وجود برخورداری از منابع طبیعی عظیم، تغییرات محسوسی را نشان نمی‌دهد که احتمالاً به دلیل وسعت قلمرو، تراکم پایین جمعیت و وابستگی به منابع طبیعی است (Oldfield, 2016). در میان این کشورها، ایران کمترین میزان ردپای اکولوژیک را دارد و ثبات نسبی در روند آن مشاهده می‌شود که می‌تواند متأثر از سیاست‌های مدیریت منابع، چالش‌های اقتصادی و یا ساختار صنعتی خاص آن باشد (Sadeghi & Rahimi, 2015). این تفاوت‌ها در روندها به‌وضوح نشان‌دهنده تأثیر متغیرهایی مانند الگوی توسعه اقتصادی، سیاست‌های محیط زیستی، جمعیت و مدیریت منابع است. همکاری این کشورها در حوزه انرژی که بر پایه اصول برابری، احترام به حاکمیت ملی و منافع متقابل استوار است،

کشورهای عضو بریکس به دلیل رشد سریع اقتصادی و صنعتی شدن شتابان، با چالش‌های جدی در زمینه ردپای اکولوژیکی مواجه هستند. بررسی روند تغییرات این شاخص طی دوره ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ که در شکل ۱ نمایش داده شده است، تصویری گویا از وضعیت این کشورها ارائه می‌دهد. چین با روندی صعودی و بسیار پرشتاب، افزایش چشمگیر را در ردپای اکولوژیک خود نشان می‌دهد که عمدتاً ناشی از صنعتی‌سازی گسترده، رشد اقتصادی سریع و مصرف بالای انرژی است (Song & Zhang, 2010). هند نیز با روندی صعودی اما ملایم‌تر، افزایش تدریجی فشار بر محیط‌زیست خود را نشان می‌دهد که بازتابی از رشد جمعیت و توسعه اقتصادی آن است (Alam *et al.*, 2007). برزیل، اگرچه دارای ذخایر طبیعی غنی است، اما روندی نسبتاً باثبات با نوساناتی را تجربه کرده که اثرات فعالیت‌های کشاورزی و جنگل‌زدایی در آن مشهود است (Fearnside, 2005).

با هدف دستیابی به امنیت انرژی پایدار، رشد اقتصادی مشترک و توسعه فناوری‌های نوین انرژی شکل گرفته است (BRICS, 2020). با این حال، همان‌طور که روند نمودار نیز نشان می‌دهد، هر یک از این کشورها مسیر متفاوتی را در تعامل با محیط‌زیست خود پیمووده‌اند. بر این اساس، پژوهش حاضر با استفاده از شاخص جهانی‌شدن KOF^۱ (Gygli *et al.*, 2019) و به‌کارگیری روش رگرسیون فازی (Hesamian & Akbari, 2017; Zadeh, 1965) به بررسی تأثیر متغیرهای کلیدی از جمله جهانی‌شدن، نرخ شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، حجم تجارت و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در کشورهای منتخب عضو بریکس (شامل ایران، آفریقای جنوبی، برزیل، چین، روسیه، مصر و هند) می‌پردازد. هدف اصلی این مطالعه، محاسبه میزان تأثیر عدم قطعیت موجود در این عوامل بر شاخص ردپای اکولوژیکی با تحلیل پهنای راست و چپ متغیرها در چارچوب روش فازی است. این روش به درک دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تری از دامنه تأثیرگذاری هر عامل کمک می‌کند. به‌طور خاص، این تحقیق در پی پاسخ به این پرسش است که عدم قطعیت در نرخ شهرنشینی و مصرف انرژی برق‌آبی چه تأثیری بر ردپای اکولوژیکی در کشورهای مورد مطالعه دارد.

مواد و روش‌ها

مدل‌های رگرسیون فازی نخستین بار توسط Tanaka *et al.* (1982) معرفی شدند. این مدل‌ها از طریق کمینه کردن میزان فازی بودن، بهترین معادله رگرسیون را به دست می‌دهند. این فرآیند از طریق کمینه‌سازی مجموع پهنای توابع عضویت ضرایب فازی معادله انجام می‌شود. مدل‌های رگرسیون فازی نسبت به مدل‌های رگرسیون کلاسیک ویژگی‌های خاص خود را دارند. رگرسیون کلاسیک برای معتبر بودن نتایج خود به مجموعه‌ای از فرضیات آماری قوی نیاز دارد. از جمله این فرضیات می‌توان به نرمال بودن خطاها، عدم وجود خودهمبستگی

و ثابت بودن واریانس خطاها اشاره کرد. نقض هر یک از این فرضیات می‌تواند اعتبار تحلیل‌های مبتنی بر رگرسیون کلاسیک را به شدت کاهش دهد. در بسیاری از موارد، توجیه این فرضیات دشوار است یا ممکن است شرایط لازم برای اعمال آن‌ها به‌درستی فراهم نباشد. به عنوان نمونه، ممکن است در مشاهدات یا تعاریف یک سیستم، اطلاعات ناکافی یا قضاوت‌های انسانی نادقیق تأثیرگذار باشد. اگرچه رگرسیون کلاسیک کاربردهای گسترده‌ای دارد، اما در شرایط زیر ممکن است نتایج گمراه‌کننده ارائه دهد: ۱- کمبود داده‌های مشاهده‌ای؛ ۲- عدم تبعیت خطاها از توزیع نرمال؛ ۳- ابهام در رابطه میان متغیرهای مستقل و وابسته؛ ۴- وجود عدم قطعیت در ارتباط با یک رویداد و ۵- نادرستی فرضیات خطی‌سازی. در شرایطی که استفاده از روش‌شناسی رگرسیون کلاسیک و توجیه فرضیات آن دشوار است، رگرسیون فازی می‌تواند ابزار مؤثرتری باشد. این روش با استفاده از توابع عضویت و توزیع‌های امکانی، امکان مدل‌سازی شرایط نادقیق یا مبهم را فراهم می‌کند و به درک بهتر سیستم‌ها و ارائه نتایج دقیق‌تر کمک می‌نماید. در رگرسیون کلاسیک، برای هر مجموعه از متغیرهای ورودی، یک مقدار مشخص به‌عنوان خروجی محاسبه می‌شود؛ اما در رگرسیون فازی، بازه‌ای از مقادیر ممکن برای خروجی تخمین زده می‌شود که توزیع آن به‌صورت تابع عضویت تعریف می‌گردد.

به‌طورکلی، سه دسته اصلی از مدل‌های رگرسیون فازی وجود دارد:

- ۱- مدل‌های رگرسیون فازی امکانی
 - ۲- مدل‌های رگرسیون کمترین مربعات
 - ۳- مدل‌های رگرسیون مبتنی بر تحلیل بازه‌ای
- در این مطالعه از مدل رگرسیون امکانی فازی استفاده شده است. برای رسیدن به یک برازش مطلوب، باید یک مدل بهینه برآورد شود. با توجه به اینکه توابع عضویتی که برای نمایش اعداد فازی استفاده می‌شود، به‌صورت مثلثی است، می‌توان رگرسیون فازی را در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی

مثلی نامتقارن به صورت 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 می باشد.

$$f^c(\underline{x}) = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_n$$

$$f_s^L(\underline{x}) = s_0^L + s_1^Lx_1 + \dots + s_n^Lx_n \quad (4)$$

$$f_s^R(\underline{x}) = s_0^R + s_1^Rx_1 + \dots + s_n^Rx_n$$

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

$$\tilde{Y}(y) = \begin{cases} 1 - \frac{f^c(\underline{x}) - y}{f_s^L(\underline{x})}, & f^c(\underline{x}) - f_s^L(\underline{x}) \leq y \leq f^c(\underline{x}) \\ 1 - \frac{y - f^c(\underline{x})}{f_s^R(\underline{x})}, & f^c(\underline{x}) < y \leq f^c(\underline{x}) + f^R(\underline{x}) \end{cases} \quad (5)$$

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

$$\tilde{Y}_j(\tilde{y}_j) \geq h, \quad 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

ثانیاً ضرایب فازی $\tilde{A}_i, i = 0, 1, 2, \dots, n$ به گونه ای باشند که ابهام خروجی فازی مینیمم گردد. در حالتی که $\tilde{A}_i, i = 0, 1, \dots, n$ متقارن هستند مجموع پهنای خروجی فازی $\tilde{Y}$ برای همه داده ها کمیت زیر است که آن را تابع هدف می نامیم تابع هدف برای حالت متقارن به صورت زیر است.

$$Z = 2ms_0 + 2 \sum_{i=1}^n (s_i \sum_{j=1}^m x_{ji}) \quad (7)$$

در رابطه اخیر منظور از x_{ji} مشاهده زام متغیر i ام است. در حالتی که $\tilde{A}_i, i = 0, 1, \dots, n$ نامتقارن باشند Z به این صورت زیر تغییر می یابد.

$$Z = m(s_0^L + s_0^R) + \sum_{i=1}^n [(s_0^L + s_0^R) \sum_{j=1}^m x_{ji}] \quad (8)$$

در حالتی که $\tilde{A}_i, i = 0, 1, 2, \dots, n$ ها را متقارن در نظر

خطی فرموله کرد. صورت کلی مدل رگرسیونی با ضرایب فازی به صورت رابطه (۱) است.

$$\tilde{Y} = f(x, A) = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1x_1 + \tilde{A}_2x_2 + \dots + \tilde{A}_nx_n \quad (1)$$

که در آن $\tilde{Y}$ متغیر وابسته یا اصطلاحاً خروجی فازی است، $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ بردار متغیرهای مستقل یا اصطلاحاً بردار ورودی و $\tilde{A} = \{\tilde{A}_0, \tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n\}$ یک مجموعه از اعداد فازی است. مدل رگرسیون خطی با پارامترهای فازی، ورودی های غیر فازی و خروجی فازی را به صورت مسئله برنامه ریزی خطی فرموله می شود 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 به صورت اعداد فازی مثلی به شکل زیر تعریف می شود.

$$\tilde{A}(x) = \begin{cases} 1 - \frac{a - x}{s^L} & a - s^L \leq x \leq a \\ 1 - \frac{x - a}{s^R} & a < x \leq a + s^R \end{cases} \quad (2)$$

که در آن a مقدار نما s^L و s^R به ترتیب پهنای چپ و پهنای راست $\tilde{A}$ هستند. اگر $s^R \neq s^L$ آن گاه عدد فازی مثلی $\tilde{A}$ را نامتقارن گوییم. در این حالت می توان تابع عضویت $\tilde{A}$ را با توجه به سه مشخصه a, s^L, s^R به شکل دیگری نیز نمایش داد، یعنی پهنای راست را برحسب 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 می شود. بنابراین عدد فازی $\tilde{A}$ می توان با سه تایی $\tilde{A} = (a, s^L, k)_T$ نیز توصیف کرد در این حالت تابع عضویت $\tilde{A}$ به صورت زیر در می آید.

$$\tilde{A}(x) = \begin{cases} 1 - \frac{a - x}{s^L} & a - s^L \leq x \leq a \\ 1 - \frac{x - a}{ks^R} & a < x \leq a + ks^R \end{cases} \quad (3)$$

آنگاه بنا به رابطه (۳) خروجی فازی نیز یک عدد فازی

سیستم‌های تحت مطالعه، وجود قضاوت‌های انسانی ذهنی و تغییرپذیری ذاتی پدیده‌ها. در چنین شرایطی، مدل‌های کلاسیک رگرسیون که بر پایه فرضیات قطعی و سخت‌گیرانه آماری بنا شده‌اند، اغلب قادر به نمایش و پردازش این ابهامات ذاتی نیستند و ممکن است به برآوردهای نادقیق یا گمراه‌کننده منجر شوند. مدل رگرسیون فازی امکانی که در این مطالعه به کار گرفته شده است، به‌طور خاص برای مدل‌سازی و تحلیل چنین شرایطی طراحی شده است. هسته اصلی این روش، جایگزینی مفهوم «احتمال» با «امکان» است. درحالی‌که تئوری احتمال، رویدادهای تصادفی را کمی‌سازی می‌کند، تئوری امکان برای کمی‌سازی عدم قطعیت ناشی از ابهام در مشاهدات یا تعاریف به کار می‌رود. در این پارادایم، ضرایب مدل رگرسیون به‌صورت اعداد فازی (در این مطالعه اعداد فازی مثلثی نامتقارن) تعریف می‌شوند. هر عدد فازی نه تنها یک مقدار مرکزی، بلکه یک دامنه از مقادیر ممکن را به همراه درجه‌ای از عضویت ارائه می‌دهد. پهنای این عدد فازی (s^L و s^R) به‌طور مستقیم بازتاب‌دهنده میزان عدم قطعیت مرتبط با آن پارامتر است. فرآیند کمینه‌سازی مجموع پهنای توابع عضویت ضرایب که هدف اصلی مدل حاضر است، درواقع معادل یافتن مدلی است که درعین حال که کل داده‌های مشاهده‌شده را در سطح قطعیت h پوشش می‌دهد (مطابق محدودیت‌های رابطه ۶)، دارای کمترین میزان جمعی عدم قطعیت (کمینه‌ترین ابهام کلی) باشد. بنابراین، خروجی این مدل دیگر یک عدد قطعی منفرد نیست، بلکه یک تابع عضویت فازی (رابطه ۵) است که یک بازه از مقادیر ممکن برای متغیر وابسته را در هر نقطه از فضای ورودی نشان می‌دهد. این بازه به‌طور شفاف و کمی، میزان عدم قطعیت ذاتی در پیش‌بینی‌های مدل را در اختیار محقق قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، این روش‌شناسی نه تنها یک رابطه ریاضی بین متغیرها برقرار می‌کند، بلکه هم‌زمان چارچوبی برای اندازه‌گیری و گزارش‌دهی دقیق‌تر از محدودیت‌های دانش و قطعیت موجود در مدل ارائه می‌نماید.

بگیریم. از قرار دادن رابطه (۴) در (۱۰) و (۵)، محدودیت‌ها به‌صورت رابطه (۹) و (۱۰) حاصل می‌شود.

$$(1-h)s_0 + (1-h) \sum_{i=1}^n (s_0 x_{ji}) - a_0 - \sum_{i=1}^n (s_0 x_{ji}) \geq -y_i, j=1,2,\dots,m \quad (9)$$

$$(1-h)s_0 + (1-h) \sum_{i=1}^n (s_0 x_{ji}) + a_0 + \sum_{i=1}^n (s_0 x_{ji}) \geq y_i, j=1,2,\dots,m \quad (10)$$

در رابطه اخیر منظور از x_{ji} مشاهده زام متغیر i ام است. با توجه به توضیحات فوق پهنای راست و چپ برای درجه عضویت 0.9 محاسبه می‌شود.

با توجه به مباحث مطرح‌شده در این بخش برای بررسی تأثیر عدم قطعیت نرخ رشد شهرنشینی (URB)، مصرف انرژی برق‌آبی (HPW)، شاخص جهانی‌شدن (GLIN)، تجارت (TRD) و درآمد سرانه (GDP) بر ردپای اکولوژیکی (ECFP)، مدل پژوهش حاضر به صورت رابطه (۱۱) تصریح می‌شود.

$$ECFP = \bar{A}_0 + \bar{A}_1 URB + \bar{A}_2 HPW + \bar{A}_3 GLIN + \bar{A}_4 TRD + \bar{A}_5 GDP \quad (11)$$

اکنون می‌توان رابطه (۱۱) را به شکل دقیق‌تر تصریح کرد و رابطه (۱۲) را به صورت زیر تصریح کرد:

$$ECFP = (a_0.s_0) + (a_1.s_1^L.s_1^R)URB + (a_2.s_2^L.s_2^R)HPW + (a_3.s_3^L.s_3^R)GLIN + (a_4.s_4^L.s_4^R)TRD + (a_5.s_5^L.s_5^R)GDP \quad (12)$$

عدم قطعیت که در این پژوهش بر آن تمرکز شده است، به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن دانش یا اطلاعات موجود ناکامل، نادقیق، یا مبهم هستند. این عدم قطعیت می‌تواند ریشه در عوامل مختلفی داشته باشد، از جمله خطاهای اندازه‌گیری، کمبود داده‌های تاریخی، پیچیدگی ذاتی

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، داده‌های موردنیاز جهت بررسی تأثیر عدم قطعیت عوامل اقتصادی - اجتماعی بر ردپای اکولوژیکی در کشورهای منتخب عضو بریکس شامل آفریقای جنوبی، ایران، برزیل، چین، روسیه، مصر و هند به صورت سالانه طی دوره زمانی ۱۳۷۱-۱۴۰۱ بوده است. لازم به ذکر است که کشورهای اتیوپی و امارات متحده عربی با توجه به نقص اطلاعات، از فهرست کشورهای عضو بریکس جهت تحلیل کنار گذاشته شده‌اند. برای برآورد مدل رگرسیون فازی از نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. با توجه به مطالعه (Nathaniel et al. (2020)، مدل مورد استفاده در پژوهش حاضر به صورت رابطه (۱۲) تصریح می‌شود:

$$ECFP = F(URB, HPW, GLIN, TRD, GDP) \quad (12)$$

در این بخش، رگرسیون فازی با ضرایب متقارن در خصوص بررسی تأثیر عدم قطعیت نرخ رشد شهرنشینی (URB)، مصرف انرژی برق‌آبی (HPW)، شاخص جهانی شدن (GLIN)، تجارت (TRD) و درآمد سرانه (GDP) بر ردپای اکولوژیکی (ECFP) در کشورهای منتخب عضو بریکس برآورد خواهد شد. باتوجه به دوره زمانی ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۱ تعداد مشاهدات ۳۱ سال است که برای بررسی نااطمینانی

ردپای اکولوژیکی، تابع هدف با توجه به قیدها که در مجموع ۶۲ قید است، مینیمم می‌شود. لازم به ذکر است که تمام محاسبات در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. پس از تشکیل قیدها برای حل مسئله بهینه با ضریب فازی متقارن با توجه به درجه‌های عضویت ۰/۹ مقادیر مرکز فازی، پهنای راست و چپ فازی محاسبه شده است. نتایج در جداول شماره (۱) تا (۷) ارائه شده است. در تحلیل‌های مربوط به بررسی آثار عدم قطعیت نرخ رشد شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، شاخص جهانی شدن، تجارت و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی از مفهوم درجه عضویت، پهنای چپ، متوسط و راست فازی استفاده شده است. درجه عضویت ۰/۹ به حاکی تأثیر زیاد 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 با توجه به وجود عدم قطعیت (بر اساس درجه عضویت ۰/۹) در عوامل مذکور، ردپای اکولوژیکی به چه میزان افزایش می‌یابد. پهنای چپ نیز حاکی از آن است که با توجه به وجود عدم قطعیت (بر اساس درجه عضویت ۰/۹) در این عوامل، ردپای اکولوژیکی چه میزان کاهش می‌یابد. با توجه به انعطاف‌پذیری مدل رگرسیون فازی تأثیر عدم قطعیت هر یک از عوامل مذکور بر ردپای اکولوژیکی در سه سطح محاسبه شده است.

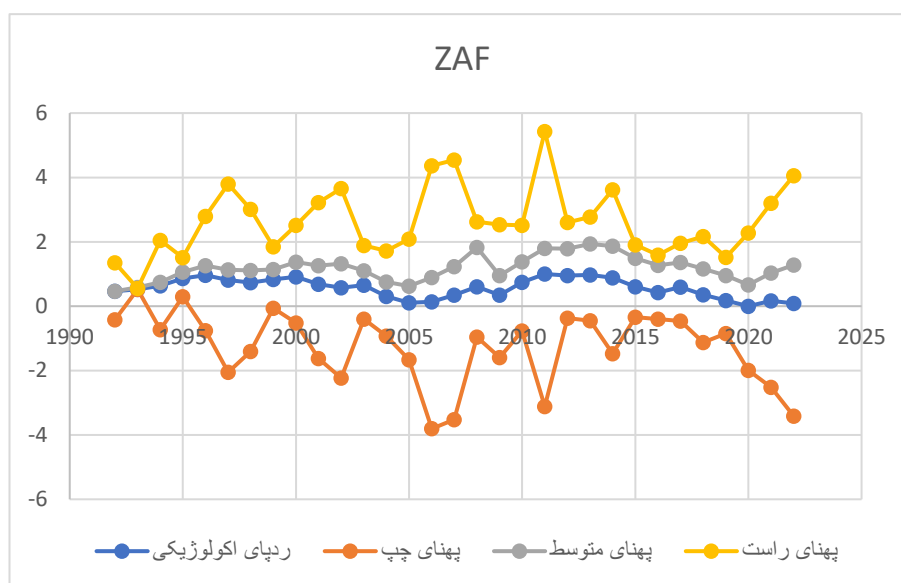
جدول ۱- برآورد پهنای فازی اثر نرخ رشد شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، شاخص جهانی شدن، تجارت و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در آفریقای جنوبی

Table 1 - Estimation of the Fuzzy Width of the Effect of Urbanization Growth Rate, Hydropower Consumption, Globalization Index, Trade, and Per Capita Income on the Ecological Footprint in South Africa

نام متغیر Variable Name	پهنای چپ Left Width	پهنای متوسط Average Width	پهنای راست Right Width
URB	-0.438	0.038	0.516
HPW	-3.969	6.7724E-16	3.969
GLIN	-6.8667E-15	2.4278E-15	1.1722E-14
TRD	0.200	0.200	0.200
GDP	0.004	0.004	0.004

مذکور را تأیید می‌کند. در خصوص شاخص جهانی شدن مقادیر کوچک پهنای چپ و راست نشان می‌دهد که جهانی شدن تأثیر قابل توجهی ندارد و پهنای متوسط نیز این موضوع را تأیید می‌کند. در مورد متغیر تجارت می‌توان گفت که مقدار ثابت ۰/۲۰۰ نشان‌دهنده تأثیر مشخص و با قطعیت بالای تجارت بر ردپای اکولوژیکی است که بیانگر این موضوع است که عدم قطعیت در این مورد وجود ندارد. پهنای ثابت ۰/۰۰۴ نیز تأثیر قطعی و مشخص درآمد سرانه را در آفریقای جنوبی نشان می‌دهد.

باتوجه به جدول (۱) که نتایج حاصل از تخمین مدل به روش رگرسیون فازی برای آفریقای جنوبی را نشان می‌دهد، پهنای راست متغیر شهرنشینی (URB) برابر با ۰/۵۱۶ و پهنای چپ متغیر مذکور برابر با ۰/۴۳۹ است که به ترتیب، نشان‌دهنده بیشترین میزان و کمترین میزان تأثیر شهرنشینی بر متغیر وابسته است. در رابطه با متغیر مصرف انرژی برق آبی (HPW) پهنای راست و چپ برابر و متقارن (به میزان $\pm ۳/۹۶۹$) است که نشان‌دهنده وجود عدم قطعیت مشابه در دو طرف است. پهنای متوسط نیز نزدیک به صفر است که تأثیر ناچیز متغیر



شکل ۲- روند ردپای اکولوژیکی سرانه در آفریقای جنوبی (بر اساس درجه عضویت ۰/۹)

Fig. 2- Trend of the Ecological Footprint Per Person in South Africa (Based on a Membership Degree of 0.9)

تغییرات سیاست‌گذاری، یا رویدادهای زیست‌محیطی باشد. کاهش شدید این پهنای چپ از سال ۲۰۱۵ به بعد نشان می‌دهد که مرز پایینی احتمالاً به دلیل کاهش شرایط اکولوژیکی ضعیف یا محدود شدن استفاده از منابع طبیعی در این بازه، کاهش یافته است، خط زرد رنگ نیز پهنای راست ردپای اکولوژیکی را نشان می‌دهد. این خط در مقایسه با پهنای چپ نوسانات بیشتری دارد که حاکی از تغییرات زیاد در ظرفیت بهره‌برداری مثبت اکوسیستم است. افزایش قابل توجه پهنای راست در سال‌های اخیر (از سال ۲۰۱۵ به بعد) ممکن است نشان‌دهنده بهره‌برداری بیشتر از منابع طبیعی یا اثرات افزایش جمعیت و رشد اقتصادی باشد. خط

شکل (۲) نشان‌دهنده روند تغییرات ردپای اکولوژیکی (خط آبی)، پهنای چپ (خط نارنجی)، پهنای متوسط (خط خاکستری) و پهنای راست (خط زرد) در آفریقای جنوبی بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ است. در این شکل خط آبی رنگ روند ردپای اکولوژیکی را نشان می‌دهد که طی دوره مورد نظر تغییرات زیادی نداشته و به سمت ثبات میل کرده است. تغییرات نسبتاً محدود این خط نشان‌دهنده پایداری نسبی اکوسیستم در طول این دوره است. خط نارنجی رنگ معرف پهنای چپ در این شکل است. این خط از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۵ نوسانات زیادی داشته که ممکن است ناشی از عوامل بیرونی نظیر فشارهای اقتصادی،

خاکستری رنگ نیز پهنای متوسط را نشان می‌دهد که به عنوان میانگین بین پهنای چپ و راست، نشان‌دهنده میانگین کلی پویایی سیستم است. این خط نشان می‌دهد که روند اکوسیستم در بیشتر موارد پایدار بوده اما به طور پیوسته از حدود سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ افزایش یافته است که نشان‌دهنده روند افزایشی بهره‌برداری از اکوسیستم است. به‌طور کلی شکل (۲) روند تغییرات پویایی

سیستم‌های اکولوژیکی آفریقای جنوبی را در دوره زمانی مورد نظر نشان می‌دهد. کاهش پهنای چپ و افزایش پهنای راست می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات گسترده در مدیریت منابع طبیعی، تغییرات سیاست‌های محیط زیستی، یا اثرات رشد اقتصادی باشد. تفسیر این داده‌ها در چارچوب سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی و برنامه‌ریزی پایدار می‌تواند برای حفظ تعادل اکولوژیکی بسیار مفید باشد.

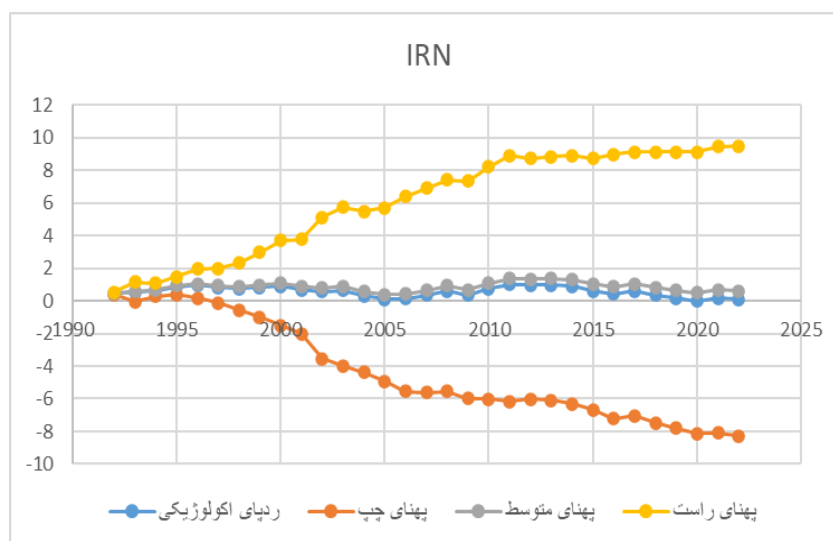
جدول ۲- برآورد پهنای فازی اثر نرخ رشد شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، شاخص جهانی شدن، تجارت و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در ایران

Table 2 - Estimation of the Fuzzy Width of the Effect of Urbanization Growth Rate, Hydropower Consumption, Globalization Index, Trade, and Per Capita Income on the Ecological Footprint in Iran

نام متغیر Variable Name	پهنای چپ Left Width	پهنای متوسط Average Width	پهنای راست Right Width
URB	-2.308	0.525	3.358
HPW	-6.3886E-16	2.6325E-17	6.915E-16
GLIN	-4.991	1.8305E-16	4.9906
TRD	-6.1703E-16	2.265E-17	6.6232E-16
GDP	-1.124	3.0753E-16	1.124

نتایج جدول (۲) برای درجه عضویت ۰/۹ در ایران حاکی از آن است که پهنای راست، متوسط و چپ برای متغیر نرخ رشد شهرنشینی به ترتیب برابر با ۳/۳۵۸، ۰/۵۲۵ و ۲/۳۰۸- است. در این خصوص می‌توان گفت که مقدار مثبت پهنای راست و منفی پهنای چپ نشان‌دهنده دامنه عدم قطعیت بالاست. در اینجا نیز پهنای راست بیشترین میزان و پهنای چپ کمترین میزان تأثیر متغیر شهرنشینی بر ردپای اکولوژیکی را نشان می‌دهد. در رابطه با متغیر مصرف انرژی برق‌آبی نیز مقادیر پهنای راست، متوسط و چپ به ترتیب برابر با مقادیر $6/915 \times 10^{-16}$ ، $2/6325 \times 10^{-17}$ و $6/3886 \times 10^{-16}$ - است که حاکی از تأثیر ناچیز مصرف انرژی برق‌آبی بر ردپای اکولوژیکی در ایران است. مقادیر کوچک در پهنای نشان‌دهنده عدم قطعیت پایین است و پهنای متوسط نزدیک به صفر تأثیر ناچیز متغیر مذکور را تأیید می‌کند. پهنای راست، متوسط و چپ برای شاخص جهانی شدن نیز به ترتیب برابر با ۴/۹۹۱، $3/0753 \times 10^{-16}$ و $1/124$ - است.

۴/۹۹۱- هستند. تأثیر متقارن مثبت و منفی (به میزان 4 ± 991) با پهنای متوسط تقریباً صفر، حاکی از عدم تأثیر قابل‌ملاحظه این متغیر همراه با عدم قطعیت مشابه در دو پهنای راست و چپ است. بیشترین و کمترین میزان تأثیر تجارت نیز بر ردپای اکولوژیکی در ایران به ترتیب برابر است با $6/6232 \times 10^{-16}$ و $6/1703 \times 10^{-16}$ - است. با توجه به متقارن بودن پهنای چپ و راست، توزیع فازی کاملاً متقارن است که حاکی از عدم قطعیت در این مورد است. این بیانگر آن است که تأثیرات احتمالی، چه در جهت منفی و چه در جهت مثبت، با یک سطح از عدم قطعیت در نظر گرفته می‌شوند و مدل توزیع فازی رفتار همگنی در دو سمت نشان می‌دهد. برای متغیر درآمد سرانه پهنای راست برابر با $1/124$ است، درحالی‌که پهنای چپ به مقدار $1/124$ - تأثیر مشابهی دارد. در این مورد پهنای متوسط بسیار کوچک است که حاکی از تأثیر ناچیز این متغیر بر ردپای اکولوژیکی در ایران است.



شکل ۳- روند ردپای اکولوژیکی سرانه در ایران (بر اساس درجه عضویت ۰/۹)
Fig. 3- Trend of the Ecological Footprint Per Person in Iran (Based on a Membership Degree of 0.9)

اکولوژیکی در حالت بهینه، با فرض اجرای سیاست‌های قوی محیط‌زیستی یا کاهش مصرف منابع باشد. فاصله بین خطوط زرد و نارنجی (پهنای راست و چپ) نشان‌دهنده عدم قطعیت در مدل رگرسیون فازی است. بر اساس شکل (۳) می‌توان چنین تحلیل کرد که روند افزایشی ردپای اکولوژیکی ایران تا ۲۰۰۵ می‌تواند ناشی از رشد اقتصادی، صنعتی شدن و افزایش مصرف منابع طبیعی طی این دوره باشد. پس از آن ثبات نسبی از ۲۰۰۵ حدود سال به بعد می‌تواند به دلیل اتخاذ سیاست‌های محیط‌زیستی، کاهش رشد جمعیت، یا بهبود بهره‌وری در استفاده از منابع باشد. برای کاهش ردپای اکولوژیکی می‌توان سیاست‌های محیط‌زیستی شدیدتری اجرا کرد. یکی از راهکارهای کلیدی در این مسیر، اعمال مالیات‌های زیست‌محیطی است. این مالیات‌ها می‌توانند نقش مهمی در پیشبرد پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی در کشورهایی که با چالش ردپای اکولوژیکی روبه‌رو هستند، ایفا کنند. تخصیص درآمدهای حاصل از این مالیات‌ها به حمایت از صنایع دوستدار محیط‌زیست از طریق مشوق‌ها و اعتبارات مالی می‌تواند تحولات مثبتی در ساختار صنعتی کشور ایجاد کند. در همین راستا، فرآیند صنعتی‌سازی نیز می‌تواند با هدایت مالیات‌های زیست‌محیطی به سمت فناوری‌های پاک‌تر و

شکل (۳) تغییرات ردپای اکولوژیکی (خط آبی) و پیش‌بینی‌های رگرسیون فازی (خطوط نارنجی، خاکستری و زرد) برای ایران را بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. در روش رگرسیون فازی، سه سناریوی مختلف، یعنی پهنای چپ (کمترین تأثیر)، پهنای متوسط (تعادلی) و پهنای راست (بیشترین تأثیر) ارائه می‌شود. در این شکل محور افقی بازه زمانی از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ و محور عمودی مقدار ردپای اکولوژیکی (برحسب هکتار جهانی) را نمایش می‌دهند. در شکل فوق ردپای اکولوژیکی واقعی (خط آبی) حاکی از آن است که مقدار واقعی ردپای اکولوژیکی ایران از سال ۱۹۹۲ تا سال ۲۰۲۲ یک مسیر باثبات را طی کرده است. در این شکل پهنای راست (خط زرد) نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۱۰، این خط روند افزایشی ثابتی داشته و از آن به بعد مسیر همواری را طی کرده است. پهنای متوسط (خط خاکستری) نیز میانگین پیش‌بینی مدل است و بازتاب‌دهنده تعادل بین پهنای راست و چپ است. این پهنای نیز همسو با مقدار واقعی ردپای اکولوژیکی در ایران تقریباً یک مسیر ثابت را پشت سر گذاشته است. از سوی دیگر پهنای چپ (خط نارنجی) از سال ۱۹۹۲ تا حدود ۲۰۰۵، به شدت کاهش یافته و پس از آن تقریباً ثابت مانده است، چنین روندی می‌تواند نشان‌دهنده کاهش فشارهای

سبتر هدایت شود. همچنین تجميع منابع مالی مناسب، ابزارهای موردنیاز برای کاهش انتشار گازهای آلاینده و اجرای گزینه‌های کاهش آلودگی را فراهم می‌کند. در کنار اقدامات صنعتی، مهاجرت از شهر به روستا می‌تواند یکی دیگر از رویکردهای مؤثر در کاهش ردپای اکولوژیکی باشد. اگر سیاست‌گذاران بتوانند این تغییر را به طور مؤثر مدیریت کنند، در بلندمدت می‌توان به پهنای متوسط و راست دست یافت. این انتقال نه تنها به تغییر شیوه زندگی منجر می‌شود، بلکه مصرف منابع و تولید آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد. در حالی که 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. باین‌حال، 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. به این ترتیب، 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.

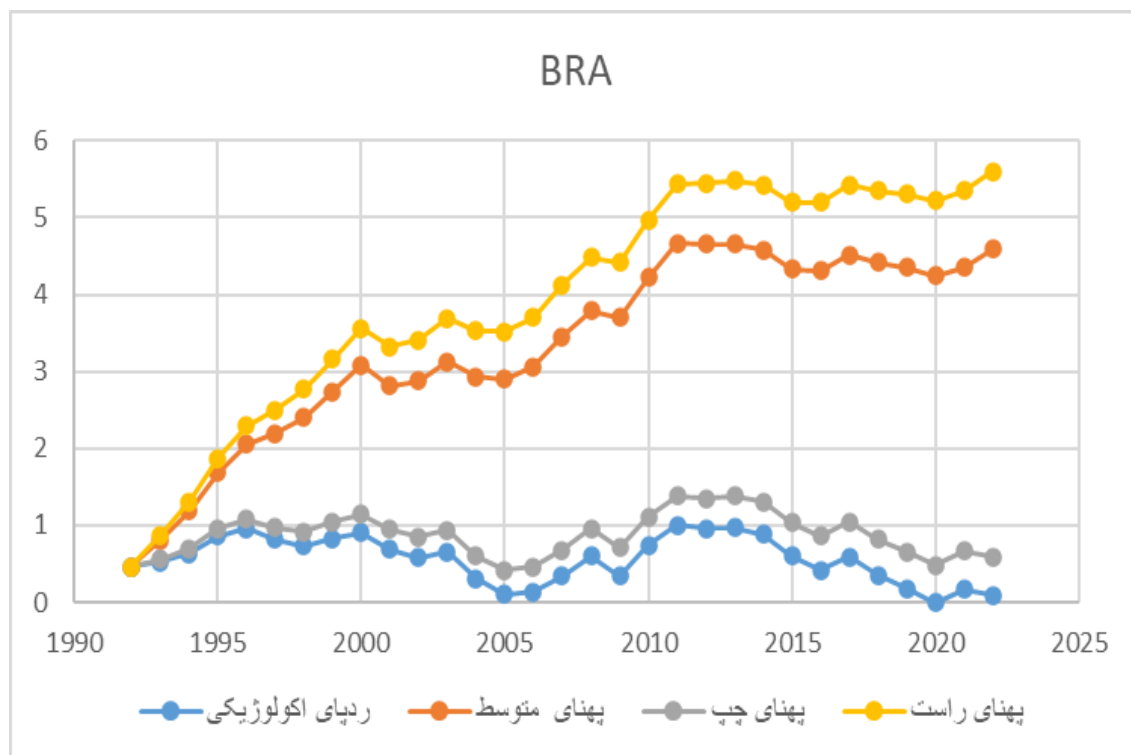
جدول ۳- برآورد پهنای فازی اثر نرخ رشد شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، شاخص جهانی شدن، تجارت و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در برزیل

Table 3 - Estimation of the Fuzzy Width of the Effect of Urbanization Growth Rate, Hydropower Consumption, Globalization Index, Trade, and Per Capita Income on the Ecological Footprint in Brazil

نام متغیر Variable Name	پهنای چپ Left Width	پهنای متوسط Average Width	پهنای راست Right Width
URB	-3.851	0.507	4.866
HPW	-0.747	7.7083E-16	0.747
GLIN	-1.2492E-13	1.2895E-15	1.275E-13
TRD	-7.3834E-14	8.5216E-16	7.5538E-14
GDP	-8.1975E-14	7.5675E-16	8.3488E-14

جدول (۳) نیز یافته‌های حاصل از برآورد مدل به روش رگرسیون فازی را برای کشور برزیل ارائه می‌کند. نتایج این جدول نشان می‌دهد که بیشترین میزان تأثیر نرخ شهرنشینی بر ردپای اکولوژیکی در برزیل برابر با $4/866$ و کمترین میزان تأثیر برابر با $3/108$ است. در مورد متغیر مصرف انرژی برق آبی می‌توان گفت که نتایج برای درجه عضویت $0/9$ حاکی از آن است که پهنای راست، متوسط و چپ برای متغیر مذکور به ترتیب برابر با $0/747$ ، $7/708 \times 10^{-16}$ و $0/747$ است. این اعداد گویای آن است که متغیر مصرف انرژی برق آبی (با توجه به مقدار پهنای متوسط) اثر ناچیزی بر ردپای اکولوژیکی دارد و تأثیر آن نزدیک به صفر است. پهنای راست و چپ متقارن این متغیر بازگوکننده عدم قطعیت

یکسان در دو طرف است. در مورد شاخص جهانی شدن مقدار پهنای متوسط نزدیک به صفر است و پهنای چپ و راست تقریباً متقارن و کوچک هستند. این نشان می‌دهد که تأثیر شاخص جهانی شدن بر مدل ضعیف است و عدم قطعیت بسیار بالایی وجود دارد. نتایج در خصوص تأثیر تجارت بر ردپای اکولوژیکی نیز حاکی از آن است که پهنای متوسط نزدیک به صفر است، اما پهنای راست کمی بیشتر از پهنای چپ است و این نشان‌دهنده تأثیر خنثی و تقریباً متقارن تجارت در مدل است، البته با کمی ناپایداری در جهت مثبت. به طور مشابه مقدار پهنای متوسط برای درآمد سرانه نزدیک به صفر است و پهنای چپ و راست تقریباً متقارن هستند، این نیز بیانگر تأثیر ضعیف درآمد سرانه بر مدل است.



شکل ۴- روند ردپای اکولوژیکی سرانه در برزیل (بر اساس درجه عضویت ۰/۹)

Fig. 4- Trend of the Ecological Footprint Per Person in Brazil (Based on a Membership Degree of 0.9)

آخر است. پهنای چپ (خط خاکستری) نشان‌دهنده حد پایین عدم قطعیت است. این مقدار تا سال ۲۰۰۵ کاهش داشته و سپس افزایش یافته است و از سال ۲۰۱۳ به بعد مجدداً سیر نزولی پیدا کرده است. پهنای راست (خط زرد) نیز که حد بالای عدم قطعیت را نشان می‌دهد، از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ به شدت افزایش داشته و سپس به یک سطح ثابت‌تر رسیده است. این روند ممکن است ناشی از گسترش سیستم‌های اندازه‌گیری بهتر و کاهش اختلافات در داده‌های ورودی باشد. در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۵، شاهد کاهش قابل توجه در ردپای اکولوژیکی و همچنین افزایش عدم قطعیت‌ها (پهنای چپ و راست) هستیم. این افزایش می‌تواند به دلیل رشد اقتصادی، صنعتی شدن و استفاده بیشتر از منابع طبیعی باشد. پس از ۲۰۱۳، روند کاهش ردپای اکولوژیکی و بهبود در پهنای (نشان‌دهنده کاهش عدم قطعیت) مشهود است. این احتمالاً به دلیل اتخاذ سیاست‌های پایدارتر و اقدامات زیست‌محیطی در برزیل است.

شکل (۴) روند تغییرات ردپای اکولوژیکی در برزیل را همراه با تفاسیر فازی (شامل پهنای چپ، پهنای راست و پهنای متوسط) در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. در روش رگرسیون فازی، این متغیرها معمولاً برای تحلیل عدم قطعیت و نوسانات داده‌ها به کار می‌روند. خط آبی گویای آن است که ردپای اکولوژیکی در برزیل از سال ۱۹۹۲ تا حدود سال ۲۰۰۵ روند کاهشی داشته است. پس از سال ۲۰۰۵، مقدار این شاخص افزایش یافته و از سال ۲۰۱۳ به بعد روند کاهشی خود را آغاز کرده است. این کاهش می‌تواند ناشی از سیاست‌های زیست‌محیطی، افزایش آگاهی عمومی و تغییر در الگوهای مصرف باشد. پهنای متوسط (خط نارنجی‌رنگ) نشان‌دهنده تغییرات کلی در روند داده‌ها است و به عنوان میانگین تقریبی عدم قطعیت‌های چپ و راست عمل می‌کند. این شاخص از سال ۱۹۹۲ تا حدود سال ۲۰۱۰ به شدت افزایش یافته و سپس به تدریج روندی نسبتاً ثابت را در پیش گرفته است که این امر نشان‌دهنده کاهش نسبی نوسانات در بازه‌های زمانی

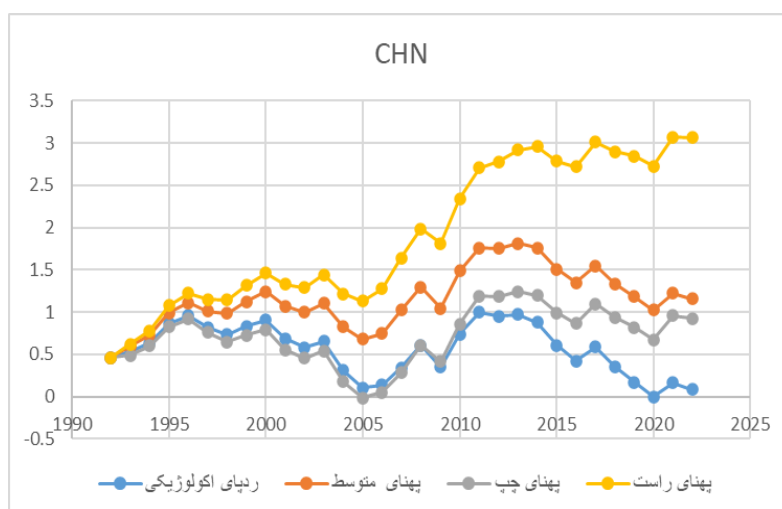
جدول ۴- برآورد پهنای فازی اثر نرخ رشد شهرنشینی، مصرف انرژی برق آبی، شاخص جهانی شدن، تجارت و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در چین

Table 4 - Estimation of the Fuzzy Width of the Effect of Urbanization Growth Rate, Hydropower Consumption, Globalization Index, Trade, and Per Capita Income on the Ecological Footprint in China

نام متغیر Variable Name	پهنای چپ Left Width	پهنای متوسط Average Width	پهنای راست Right Width
URB	-0.180	4.984E-14	0.180
HPW	0.138	0.138	0.138
GLIN	0.555	0.555	0.555
TRD	-4.2907E-13	3.1365E-13	1.0564E-12
GDP	-1.348	0.378	2.104

پهنای راست، متوسط و چپ برای شاخص جهانی شدن نیز همگی برابر با ۰/۵۵۵ است. این ثبات در مقدار پهنای بیانگر تأثیر مشخص 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. یافته‌های جدول فوق همچنین گویای آن است که پهنای راست و چپ متغیر تجارت به ترتیب برابر با $1/0.56 \times 10^{-12}$ و $-4/290.7 \times 10^{-13}$ است که تقریباً نزدیک به صفر است و این بیانگر تأثیر ناچیز این متغیر بر ردپای اکولوژیکی است. در نهایت یافته‌های جدول ۴ نشان می‌دهد پهنای راست، متوسط و چپ برای متغیر درآمد سرانه به ترتیب برابر با ۰/۳۷۸، ۲/۱۰۴ و ۱/۳۴۸- است و بازگوکننده این است که متغیر مذکور اثر قابل ملاحظه‌ای بر ردپای اکولوژیکی در کشور چین دارد.

یافته‌های موجود در جدول (۴) در خصوص پهنای راست و چپ متغیر نرخ شهرنشینی در کشور چین حاکی از تأثیر مثبت و منفی متقارن (به میزان ± 0.180) است که این اعداد درواقع وجود عدم قطعیت مشابه در دو طرف را نشان می‌دهد. با توجه به یافته‌های فوق در درجه عضویت ۰/۹ پهنای راست، متوسط و چپ برای متغیر نرخ رشد شهرنشینی به ترتیب برابر با 0.180 ، 4.984×10^{-14} و -0.180 است و بیانگر این است که متغیر نرخ شهرنشینی (با توجه به مقدار پهنای متوسط) اثر ناچیزی بر ردپای اکولوژیکی در کشور چین دارد و تأثیر آن نزدیک به صفر است. برای متغیر مصرف انرژی برق آبی پهنای راست، چپ و متوسط همگی برابر با مقدار ثابت ۰/۱۳۸ است که این یافته‌ها تأثیر مشخص و یکنواخت متغیر مذکور را بر شاخص ردپای اکولوژیکی تأیید می‌کند و عدم قطعیت در اینجا وجود ندارد. به نحو مشابه



شکل ۵- روند ردپای اکولوژیکی سرانه در چین (بر اساس درجه عضویت ۰/۹)
Fig. 5- Trend of the Ecological Footprint Per Person in China (Based on a Membership Degree of 0.9)

شکل (۵) روند ردپای اکولوژیکی در چین (CHN) را با استفاده از روش رگرسیون فازی نشان می‌دهد. این شکل شامل شاخص ردپای اکولوژیکی (خط آبی) و پهنای چپ، راست و متوسط (خط‌های خاکستری، زرد و نارنجی) است که برای تحلیل عدم قطعیت و تغییرات داده‌ها به کار می‌روند. ردپای اکولوژیکی (خط آبی) از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۵ روند کاهشی ملایمی دارد، اما از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۱ افزایش محسوسی در ردپای اکولوژیکی مشاهده می‌شود. سپس از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۲ این روند به‌طور کلی نزولی بوده است که ممکن است به دلیل پیشرفت در فناوری‌ها، افزایش بهره‌وری و کاهش اتلاف منابع باشد. پهنای متوسط (خط نارنجی)

نیز به عنوان میانگینی از عدم قطعیت‌ها به کار می‌رود. این خط از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۵ روند افزایشی دارد و از حدود ۲۰۱۰ به بعد، این شاخص به‌طور نسبی ثابت یا کاهشی شده است که نشان‌دهنده کاهش عدم قطعیت در داده‌ها است. پهنای چپ (خط خاکستری) نیز تا سال ۲۰۰۵ روند کاهشی دارد و سپس افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود، پهنای راست (خط زرد) روند افزایشی قابل‌توجهی تا سال ۲۰۱۰ داشته و سپس به‌تدریج تثبیت شده است. روند کاهش ردپای اکولوژیکی و تثبیت عدم قطعیت‌ها از سال ۲۰۱۰ به بعد بیانگر تأثیرات مثبت سیاست‌های پایدار و فناوری‌های پیشرفته است.

جدول ۵- برآورد پهنای فازی اثر نرخ رشد شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، شاخص جهانی شدن، تجارت و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در روسیه

Table 5 - Estimation of the Fuzzy Width of the Effect of Urbanization Growth Rate, Hydropower Consumption, Globalization Index, Trade, and Per Capita Income on the Ecological Footprint in Russia

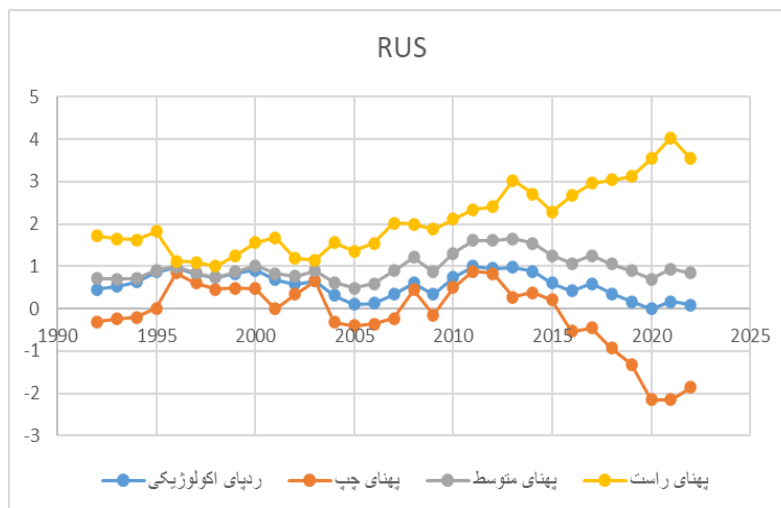
نام متغیر Variable Name	پهنای چپ Left Width	پهنای متوسط Average Width	پهنای راست Right Width
URB	-1.456	0.024	1.503
HPW	-1.291	5.7306E-11	1.291
GLIN	-7.4687E-10	9.5353E-11	9.3758E-10
TRD	-0.114	7.1124E-11	0.114
GDP	0.290	0.756	1.221

بر اساس یافته‌های موجود در جدول (۵) که نتایج تحقیق به روش فازی در کشور روسیه را نشان می‌دهد، در خصوص متغیر نرخ رشد شهرنشینی همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقادیر پهنای راست و چپ به ترتیب برابر با $1/503$ و $1/456$ است که این درواقع بیانگر بیشترین و کمترین میزان تأثیر متغیر مذکور بر ردپای اکولوژیکی در کشور مذکور است. در رابطه با متغیر مصرف انرژی برق‌آبی نیز پهنای راست، متوسط و چپ به ترتیب برابر با $1/291$ ، $1/291$ و $5/730 \times 10^{-11}$ است که این یافته‌ها حاکی از آن است که مصرف انرژی برق‌آبی تأثیر ناچیزی بر ردپای

اکولوژیکی دارد. یافته‌های جدول ۵ همچنین این موضوع را بیان می‌کند که پهنای راست و چپ شاخص جهانی شدن به ترتیب برابر با $9/376 \times 10^{-10}$ و $7/467 \times 10^{-10}$ است که تقریباً نزدیک به صفر است و این نیز بیانگر تأثیر ناچیز این متغیر بر ردپای اکولوژیکی در روسیه است. همچنین یافته‌ها برای درجه عضویت $0/9$ حاکی از آن است که پهنای راست، متوسط و چپ برای متغیر تجارت به ترتیب برابر با $0/114$ ، $7/113 \times 10^{-11}$ و $-0/114$ است که بیانگر است که متغیر تجارت (با توجه به مقدار پهنای متوسط) اثر ناچیزی بر ردپای اکولوژیکی در روسیه دارد و تأثیر آن نزدیک به

تأثیر درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در روسیه برابر با ۱/۲۲۱ و کمترین میزان متغیر مذکور برابر با ۰/۲۹۰ است. مقدار پهنای متوسط نیز حاکی از تأثیر قابل ملاحظه این متغیر بر ردپای اکولوژیکی در روسیه است.

صفر است. در اینجا نیز متقارن بودن پهنای راست و چپ این متغیر نشان دهنده مشابه بودن وجود عدم قطعیت در جهت مثبت و منفی است. و بالاخره با توجه به مقادیر پهنای در ردیف آخر جدول ۵ ملاحظه می شود که بیشترین میزان



شکل ۶- روند ردپای اکولوژیکی سرانه در روسیه (بر اساس درجه عضویت ۰/۹)

Fig. 6- Trend of the Ecological Footprint Per Person in Russia (Based on a Membership Degree of 0.9)

۲۰۰۰ پهنای متوسط روندی ثابت دارد که این ثبات ممکن است به دلیل گذار اقتصادی در این بازه زمانی باشد. سپس از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۲ پهنای متوسط به تدریج افزایش می یابد و سپس به ثبات نسبی می رسد. پهنای چپ (خط نارنجی) نیز از سال ۲۰۰۴ به بعد، به شدت کاهش پیدا می کند و حتی به مقادیر منفی می رسد. پهنای راست (خط زرد) که حد بالای عدم قطعیت را نشان می دهد، در کل دوره روندی افزایشی داشته است. این افزایش به ویژه بعد از سال ۲۰۰۵ به بعد چشمگیرتر است که نشان دهنده وجود بازه گسترده ای از عدم قطعیت ها در برآوردهای اکولوژیکی است. به طور کلی با مشاهده شکل (۶) می توان گفت که بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۰ نشان دهنده ثبات نسبی ردپای اکولوژیکی با نوسانات محدود است که احتمالاً ناشی از کاهش فعالیت های اقتصادی و صنعتی پس از فروپاشی شوروی است. پس از این دوره از سال ۲۰۱۰ به بعد روند نزولی ردپای اکولوژیکی حاکی از تلاش های روسیه برای کاهش اثرات زیست محیطی است.

شکل (۶) روند تغییرات ردپای اکولوژیکی در روسیه (RUS) را همراه با تفاسیر فازی (شامل پهنای چپ، پهنای راست و پهنای متوسط) در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ نشان می دهد. در این شکل با توجه به خط آب رنگ، ردپای اکولوژیکی از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۰، روندی نسبتاً ثابت را طی کرده است که نشان دهنده یک دوره ثبات در مصرف منابع طبیعی یا اثرات زیست محیطی است. این دوره ممکن است به دلیل تغییرات اقتصادی و کاهش فعالیت های صنعتی پس از فروپاشی شوروی باشد. پس از آن از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ روند افزایشی ملایمی در ردپای اکولوژیکی وجود دارد که می تواند ناشی از رشد اقتصادی و افزایش فعالیت های صنعتی باشد. سپس از حدود سال ۲۰۱۰، ردپای اکولوژیکی روندی نزولی به خود گرفته است که این کاهش ممکن است به دلیل سیاست های زیست محیطی، استفاده بهینه تر از منابع و کاهش فعالیت های آلاینده باشد. در این شکل پهنای متوسط (خط خاکستری) روند عمومی تغییرات را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می کنیم، از سال ۱۹۹۲ تا

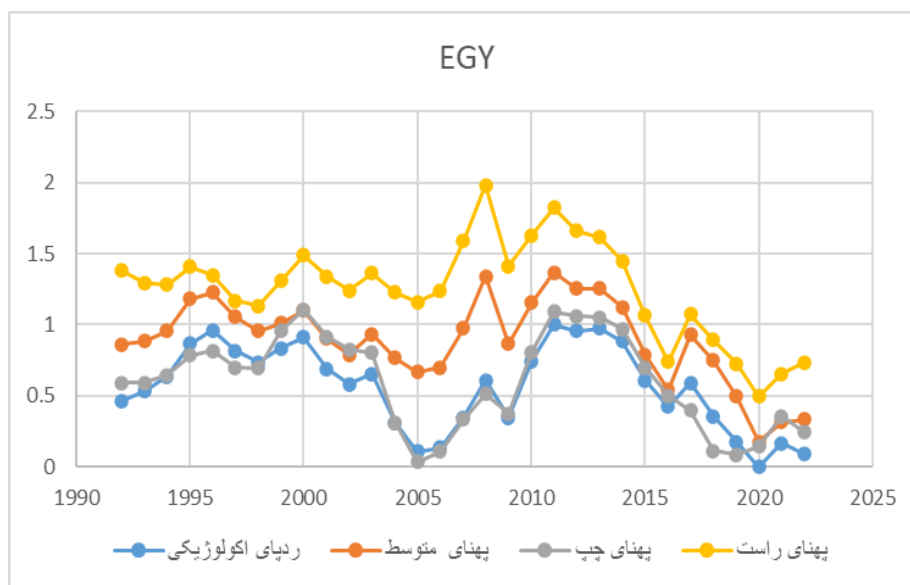
جدول ۶- برآورد پهنای فازی اثر نرخ رشد شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، شاخص جهانی شدن، تجارت و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در مصر

Table 6 - Estimation of the Fuzzy Width of the Effect of Urbanization Growth Rate, Hydropower Consumption, Globalization Index, Trade, and Per Capita Income on the Ecological Footprint in Egypt

نام متغیر Variable Name	پهنای چپ Left Width	پهنای متوسط Average Width	پهنای راست Right Width
URB	-0.519	3.941E-14	0.519
HPW	-0.267	4.4145E-14	0.267
GLIN	0.174	0.174	0.174
TRD	0.563	0.563	0.563
GDP	-3.8944E-13	5.5465E-14	5.0037E-13

(به میزان $\pm 0/267$) نشان‌دهنده تأثیر متقارن متغیر مصرف انرژی برق‌آبی بر ردپای اکولوژیکی در مصر است و پهنای متوسط نزدیک به صفر تأثیر کم را تأیید می‌کند. پهنای ثابت متغیرهای شاخص جهانی شدن و تجارت نیز تأثیر مشخص و با قطعیت بالا را نشان می‌دهد. در این جدول مقادیر کوچک پهنای برای متغیر درآمد سرانه نشان‌دهنده تأثیر ناچیز است و مقدار پهنای متوسط این موضوع را تأیید می‌کند.

بر اساس یافته‌های جدول (۶) که مربوط به کشور مصر است، همان‌طور که ملاحظه می‌کنیم، مقادیر پهنای راست و چپ برای متغیر نرخ شهرنشینی بیانگر تأثیر متقارن (به میزان $\pm 0/519$) است که به عنوان بیشترین و کمترین میزان اثرگذاری متغیر مذکور بر ردپای اکولوژیکی تفسیر می‌شود. پهنای متوسط کوچک به همراه تقارن پهنای راست و چپ نشان‌دهنده تأثیر ناچیز متغیر مذکور بر ردپای اکولوژیکی است. به نحو مشابه پهنای راست و چپ متقارن



شکل ۷- روند ردپای اکولوژیکی سرانه در مصر (بر اساس درجه عضویت ۰/۹)
Fig. 7- Trend of the Ecological Footprint Per Person in Egypt (Based on a Membership Degree of 0.9)

و متوسط (خط‌های خاکستری، زرد و نارنجی) است که در روش رگرسیون فازی برای تحلیل عدم قطعیت و تغییرات داده‌ها استفاده می‌شوند. با توجه به شکل فوق،

شکل (۷) تغییرات ردپای اکولوژیکی مصر (EGY) را در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. این شکل شامل روند ردپای اکولوژیکی (خط آبی) و پهنای چپ، راست

ردپای اکولوژیکی (خط آبی) طی دوره ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۰ روند افزایشی ملایمی داشته است. این افزایش می‌تواند ناشی از رشد جمعیت، گسترش فعالیت‌های اقتصادی و افزایش مصرف منابع طبیعی باشد. سپس از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ شاهد کاهش شدید ردپای اکولوژیک در مصر بوده‌ایم. پس از آن از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۱، ردپای اکولوژیکی به اوج خود می‌رسد و سپس از ۲۰۱۱ به بعد کاهش پیدا می‌کند و تا سال ۲۰۲۲ این روند کاهشی ادامه دارد و حتی به زیر سطح اولیه در سال ۱۹۹۲ می‌رسد. این کاهش ممکن است نشان‌دهنده تلاش‌های مصر برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و استفاده بهینه‌تر از منابع باشد. پهنای متوسط (خط نارنجی) نیز از سال

۱۹۹۲ تا ۲۰۰۵ روند نسبتاً ثابتی دارد اما با نوسانات کوچک همراه است. سپس از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۱ پهنای متوسط به طور محسوسی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش عدم قطعیت‌ها و نوسانات در داده‌ها است و سرانجام از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ کاهش پیدا می‌کند و به سطح پایدار می‌رسد. این امر می‌تواند نشان‌دهنده بهبود کیفیت داده‌های زیست‌محیطی و کاهش نوسانات باشد. پهنای چپ (خط خاکستری) نیز تقریباً منطبق بر ردپای اکولوژیکی (خط آبی) در مصر است. با توجه به شکل (۷) به نحو محسوسی مشاهده می‌شود که پهنای راست (خط زرد) طی دوره زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ کاهش یافته و به ثبات رسیده است.

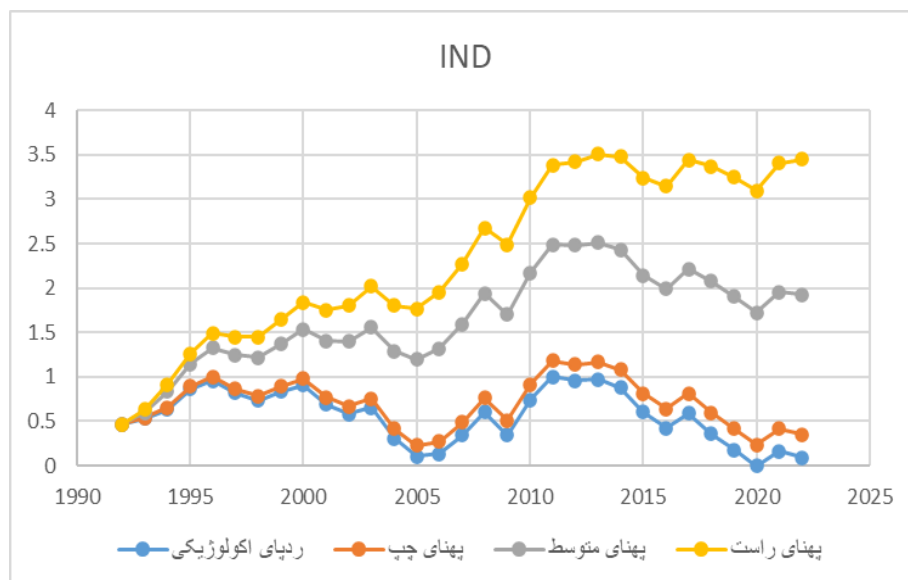
جدول ۷- برآورد پهنای فازی اثر نرخ رشد شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، شاخص جهانی شدن، تجارت و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در هند

Table 7 - Estimation of the Fuzzy Width of the Effect of Urbanization Growth Rate, Hydropower Consumption, Globalization Index, Trade, and Per Capita Income on the Ecological Footprint in India

نام متغیر Variable Name	پهنای چپ Left Width	پهنای متوسط Average Width	پهنای راست Right Width
URB	-0.419	0.036	1.491
HPW	-3.0298E-13	2.3708E-14	3.5039E-13
GLIN	-1.125	0.099	1.324
TRD	-0.075	0.006	0.088
GDP	-0.234	0.124	0.481

باتوجه به نتایج جدول (۷) که یافته‌های تحقیق برای کشور هند را ارائه می‌کند، در رابطه با متغیر نرخ شهرنشینی پهنای راست (به میزان ۱/۴۹۱) بیشترین میزان تأثیر و پهنای چپ (به میزان ۰/۴۱۹-) کمترین میزان تأثیر متغیر مذکور را بر ردپای اکولوژیک در هند نشان می‌دهد. پهنای متوسط (برابر با ۰/۰۳۶) نیز تأثیر کلی را نشان می‌دهد. همچنین یافته‌ها حاکی از تأثیر ناچیز و نزدیک به صفر متغیر مصرف انرژی برق‌آبی بر ردپای اکولوژیکی در هند است. در رابطه با متغیر جهانی شدن نیز پهنای راست (به میزان ۱/۳۲۴) بیشترین اثرگذاری و پهنای چپ (به میزان ۰/۱۲۵-) کمترین اثرگذاری را بر ردپای اکولوژیکی نشان می‌دهد. در این مورد مقدار پهنای متوسط

(به میزان ۰/۰۹۹) تأثیر کلی متغیر را بازگو می‌کند. با توجه به جدول پیش رو بیشترین و کمترین میزان اثرگذاری تجارت بر ردپای اکولوژیکی نیز به ترتیب برابر با ۰/۰۸۸ و ۰/۰۷۵- است. پهنای متوسط (به میزان ۰/۰۰۶) نیز در این مورد تأثیر ناچیز کلی را تأیید می‌کند. و درنهایت با توجه مقادیر پهنای راست و چپ برای متغیر درآمد سرانه در هند می‌توان گفت که یافته‌ها حاکی از آن است که بیشترین میزان تأثیر و کمترین میزان اثرگذاری متغیر مذکور بر ردپای اکولوژیکی در هند به ترتیب برابر با ۰/۴۸۱ و ۰/۲۳۴- است و مقدار پهنای متوسط نیز تأثیر قابل‌ملاحظه و با قطعیت بالای درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در هند را تأیید می‌کند.



شکل ۸- روند ردپای اکولوژیکی سرانه در هند (بر اساس درجه عضویت ۰/۹)
Fig. 8- Trend of the Ecological Footprint Per Person in India (Based on a Membership Degree of 0.9)

محافظة کارانه‌تر یا کم‌اثرتر متغیرها را نشان می‌دهد. روند این خط مشابه خط ردپای اکولوژیکی واقعی است و از حدود سال ۲۰۱۰ به بعد به‌شدت کاهش یافته است.

باتوجه‌به نتایجی که در جداول (۱) تا (۷) ارائه شده است می‌توان گفت بیشترین میزان تأثیر متغیر شهرنشینی بر شاخص ردپای اکولوژیکی در بین کشورهای عضو بریکس، مربوط به کشور برزیل به مقدار ۴/۸۶۶ و کمترین میزان تأثیر متغیر مذکور مربوط به کشور چین به میزان ۰/۱۸۰- است. در رابطه با متغیر مصرف انرژی برق‌آبی نیز همان‌طور که ملاحظه کردیم بیشترین و کمترین میزان تأثیرگذاری متغیر مذکور بر شاخص ردپای اکولوژیکی به ترتیب مربوط به کشورهای آفریقای جنوبی (به میزان ۳/۹۶۹) و ایران (به میزان ۱۶-۶/۳۸۸۶e-) است. جالب آنکه کشورهای ایران (به مقدار ۴/۹۹۱) و آفریقای جنوبی (به مقدار ۱۴-۱/۱۷۲۲e) به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار اثرگذاری را در رابطه با تأثیر شاخص جهانی شدن بر ردپای اکولوژیکی نیز به خود اختصاص داده‌اند. علاوه بر این مصر (با پهنای راست ۰/۵۶۳) و ایران (با پهنای چپ ۱۶-۶/۱۷۰۳e-) به ترتیب بیشترین و کمترین اثرگذاری را در خصوص تأثیر تجارت بر ردپای اکولوژیکی دارند. و بالاخره بیشترین میزان

شکل (۸) نشان‌دهنده روند تغییرات ردپای اکولوژیکی (خط آبی) به همراه نتایج حاصل از پیش‌بینی با رگرسیون فازی (خطوط نارنجی، خاکستری و زرد) برای هند بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ است. با توجه به شکل فوق ردپای اکولوژیکی (خط آبی) که نشان‌دهنده مقادیر واقعی ردپای اکولوژیکی هند در طول زمان است، از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۰، روند افزایشی ملایمی داشته است. سپس از حدود سال ۲۰۱۰ به بعد، کاهش و تثبیت نسبی در ردپای اکولوژیکی دیده می‌شود. در نمودار پیش رو پهنای راست (خط زرد) نمایانگر مرز بالایی پیش‌بینی مدل رگرسیون فازی است. این پهنای معمولاً پیش‌بینی خوش‌بینانه‌تر یا حالتی با اثرگذاری قوی‌تر متغیرها را نشان می‌دهد. در این شکل، پیش‌بینی پهنای راست از سال ۱۹۹۲ تقریباً به‌طور مداوم افزایش یافته و به بیشترین مقدار خود در سال‌های اخیر رسیده است. پهنای متوسط (خط خاکستری) نیز نمایانگر مقدار میانگین پیش‌بینی مدل است و تعادلی بین پهنای چپ و راست ارائه می‌دهد. این خط در طول زمان، همواره بین پهنای چپ و راست قرار دارد و روند آن از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۰ افزایشی است، اما پس از آن کاهش ملایمی تا سال ۲۰۲۲ مشاهده می‌شود. پهنای چپ (خط نارنجی) نیز معمولاً شرایط

اثرگذاری درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی متعلق به چین (به مقدار ۲/۱۰۴) و کمترین اثر مربوط به کشور برزیل (به میزان ۱۴-۸/۱۹۵۷e-) می‌باشد.

تحقیقات داخلی و خارجی متعددی در رابطه با تأثیر شهرنشینی، مصرف انرژی برق‌آبی، شاخص‌های جهانی‌سازی، رشد اقتصادی و سایر عوامل بر ردپای اکولوژیکی انجام شده است و اهمیت و ارتباط اثرات متغیرهای مستقل بر شاخص ردپای اکولوژیکی با استفاده از روش‌های اقتصادسنجی از جمله تحلیل رگرسیون کلاسیک موردبررسی قرار گرفته است. از جمله (Zarouki et al. (2023 در مطالعه‌ای ارتباط بین جهانی‌شدن (در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و سیاسی) و انتشار دی‌اکسید کربن در ایران طی سال‌های ۱۳۵۸ تا ۱۳۹۶ را با استفاده از مدل خودرگرسیون با وقفه‌های توزیعی بررسی کرده‌اند. همچنین، (Esfahani et al. (2023 در کار خود به بررسی رابطه بین رشد اقتصادی، مصرف انرژی و ردپای اکولوژیکی در ۷۲ کشور توسعه‌یافته و درحال‌توسعه پرداخته‌اند و در این پژوهش از روش گشتاورهای تعمیم‌یافته سیستمی (Sys-GMM) بهره گرفته‌اند. Mehnetfar et al. (2023). نیز در پژوهش خود به بررسی اثر پیچیدگی اقتصادی و آزادسازی تجاری بر ردپای اکولوژیکی، به‌عنوان معیاری برای ارزیابی تخریب محیط‌زیست، پرداخته‌اند. این مطالعه با استفاده از داده‌های مربوط به ۱۸ کشور آسیایی درحال‌توسعه طی دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱ و با بهره‌گیری از روش پانل کوانتایل انجام شده است. در پژوهشی جدید (Moeinoddini et al. (2024 به بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر کیفیت محیط‌زیست با تمرکز ویژه بر نقش درآمدهای حاصل از منابع طبیعی در کشورهای منتخب خاورمیانه و شمال آفریقا پرداخته‌اند. این مطالعه که داده‌های مربوط به دوره زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۸ را پوشش می‌دهد، با استفاده از روش داده‌های پانلی انجام شده است. هدف اصلی پژوهش، تحلیل این موضوع است که چگونه درآمدهای حاصل از منابع طبیعی می‌توانند بر شاخص‌های زیست‌محیطی و کیفیت محیط‌زیست تأثیر بگذارند و آیا این

تأثیر مثبت یا منفی است. از سوی دیگر، (Salman et al. (2022 در تحقیق خود به بررسی اثر غیرخطی شهرنشینی بر ردپای اکولوژیکی پرداخته‌اند و نقش نوآوری‌های بومی و خارجی را طی بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۷ تحلیل کرده‌اند. این پژوهش با استفاده از آزمون خودرگرسیون با توزیع تأخیری انجام شده و نشان می‌دهد که رابطه بین شهرنشینی و ردپای اکولوژیکی در کشورهای آسه‌آن-۴ (شامل مالزی، تایلند، اندونزی و فیلیپین) در کوتاه‌مدت و بلندمدت از الگوی منحنی U معکوس پیروی نمی‌کند. Aldegeishem (2024) در پژوهشی جامع، به تحلیل تأثیر مجموعه‌ای از عوامل کلیدی شامل شهرنشینی، مصرف انرژی، منابع طبیعی، رشد اقتصادی و نوآوری فناوری بر ردپای اکولوژیکی در عربستان سعودی پرداخته است. در این مطالعه، از مدل خودرگرسیون با وقفه‌های توزیع‌شده (ARDL) برای بررسی دقیق ارتباط میان این متغیرها استفاده شده است. پژوهش تلاش می‌کند تا نشان دهد چگونه شهرنشینی و مصرف انرژی، به‌عنوان دو عامل اساسی در توسعه اقتصادی، بر تخریب محیط‌زیست و افزایش ردپای اکولوژیکی تأثیر می‌گذارند. (ul Ain et al. (2024 نیز در مقاله‌ای به بررسی رابطه بین تخریب محیط‌زیست، شهرنشینی و رشد اقتصادی طی دوره زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۲ با استفاده از روش رگرسیون دومرحله‌ای پانلی (2SLS) پرداخته‌اند. همان‌طور که می‌بینیم در بیشتر مطالعات برای بررسی عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی از روش‌های اقتصادسنجی استفاده شده است؛ اما در این مطالعه از رگرسیون فازی که قابلیت انعطاف بیشتری در مدل‌سازی و تحلیل دارد، استفاده شده است. به‌طوری‌که 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 یک مقدار مشخص برای متغیر مستقل محاسبه می‌شود. مدل‌های اقتصادسنجی به دلایل ساختاری برای بیان اطلاعات قطعی و کامل نیازمندند، درحالی‌که عوامل مؤثر بر ردپای اکولوژیکی

این ارتباط را تأیید می‌کنند. این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که افزایش درآمد سرانه می‌تواند اثرات متفاوتی بر ردپای اکولوژیکی داشته باشد، به گونه‌ای که در مراحل اولیه رشد اقتصادی، معمولاً فشار بیشتری بر محیط‌زیست وارد می‌شود، اما با گذر زمان و توسعه فناوری‌ها و سیاست‌های پایدار، این اثرات ممکن است کاهش یابد. این همسویی نتایج، نشان‌دهنده اهمیت درآمد سرانه به عنوان یک عامل کلیدی در تحلیل پویایی‌های زیست‌محیطی است.

نتیجه‌گیری

بر اساس یافته‌های ارائه‌شده در جداول (۱) تا (۷)، تأثیر عوامل کلیدی مانند نرخ شهرنشینی، مصرف انرژی برقی، شاخص جهانی‌شدن، تجارت و درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در کشورهای منتخب عضو بریکس تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که شدت و دامنه تأثیر این متغیرها با توجه به شرایط اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی هر کشور متفاوت بوده و در برخی موارد عدم قطعیت بالایی وجود دارد. با بررسی یافته‌ها می‌توان دریافت نرخ شهرنشینی در هریک از کشورها تأثیر متفاوتی بر ردپای اکولوژیکی داشته است، به طوری که در ایران، مقادیر پهنای راست و چپ نشان‌دهنده عدم قطعیت بالا و تأثیر قابل‌ملاحظه این متغیر بر ردپای اکولوژیکی است. در سایر کشورهای عضو بریکس به استثنای چین و مصر، نرخ شهرنشینی تأثیرات مشابه و قابل‌توجهی بر ردپای اکولوژیکی دارد. براین اساس پیشنهاد می‌شود که با ایجاد زیرساخت‌های پایدار در شهرها به کاهش فشار ناشی از شهرنشینی بر منابع زیست‌محیطی کمک کرد. همچنین با برنامه‌ریزی شهری هوشمند برای کاهش مصرف منابع و انرژی و تقویت حمل‌ونقل عمومی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در مناطق شهری می‌توان پیامدهای منفی شهرنشینی را بر محیط‌زیست کنترل کرد. مصرف انرژی برقی نیز در اغلب کشورهای عضو بریکس از جمله ایران تأثیر ناچیزی بر ردپای اکولوژیکی داشته است. پهنای

غالباً نوسانی هستند؛ بنابراین، باتوجه به این نوسانات و عدم قطعیت، نیاز به مدل‌سازی دقیق‌تری احساس می‌شود. مدل رگرسیون فازی به واسطه انعطاف‌پذیری بالا نسبت به رگرسیون کلاسیک، با برآورد پهنای راست، چپ و نمای ردپای اکولوژیکی، قدرت توزیع‌شده فوق‌العاده‌ای دارد. از سوی دیگر در تحلیل مربوط به ردپای اکولوژیکی به کمک رگرسیون فازی از مفهوم درجه عضویت استفاده می‌شود. با استفاده از مفهوم درجه عضویت (h) می‌توان عدم قطعیت در متغیرهای اقتصادی را لحاظ کرد. باتوجه به مفهوم h که بیان‌کننده میزان ابهام در مدل است. هرچه به درجه عضویت 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 به این ویژگی‌ها مدل رگرسیون فازی با ضرایب متقارن و نامتقارن انعطاف‌پذیری زیادی در مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل دارد. همان‌طور که از جداول (۱) تا (۷) در بخش یافته‌های پژوهش ملاحظه می‌شود، مصرف انرژی برقی بر ردپای اکولوژیکی مؤثر است که این نتایج همسو با مطالعات (Ansari و Scherer and Pfister (2016) و *et al.* (2020) است. اثر نرخ شهرنشینی بر شاخص ردپای اکولوژیکی نیز در راستای نتایج پژوهش‌ها (Luo *et al.* (2016)، Wang (2019)، *et al.* (2020)، Nathaniel *et al.* (2020)، Ahmed *et al.* (2020) و Sahoo and Sethi (2021) است. نتایج این پژوهش در ارتباط با اثر جهانی‌شدن بر ردپای اکولوژیکی نیز منطبق بر یافته‌های تحقیقات Rudolph *et al.* (2017)، Figge *et al.* (2017) و Sabir, S. *et al.* (2019) است. نتایج Rahman *et al.* (2021) و Langnel *et al.* (2020) این مطالعه، همچنین یافته‌های پژوهش ناتانیل (۲۰۲۰) که نشان می‌دهد تجارت نقشی تأثیرگذار بر ردپای اکولوژیکی دار را تأیید می‌کند. نتایج این مطالعه در زمینه تأثیر درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی، با یافته‌های پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد. به طور خاص، مطالعات Charfeddine (2017)، Gorus and Karagol (2023) و Neagu (2020) نیز

متوسط کوچک در جداول مختلف، تأثیر اندک یا خنثای این متغیر را تأیید می‌کند. به عنوان مثال، در برزیل و هند تأثیر این متغیر تقریباً نزدیک به صفر است. در برخی موارد خاص، مانند مورد کشور چین، تأثیر مثبت یکنواخت مصرف انرژی برق‌آبی مشاهده شده است. در این زمینه نیز توسعه فناوری‌های بهینه‌سازی تولید برق‌آبی با کمترین تأثیر زیست‌محیطی، سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر مکمل مانند خورشیدی و بادی برای کاهش وابستگی به انرژی برق‌آبی و اجرای پروژه‌های مدیریت منابع آبی برای کاهش اثرات جانبی سدسازی به سیاست‌گذاران پیشنهاد می‌شود. همچنین یافته‌ها نشان می‌دهد که جهانی‌شدن در بسیاری از کشورها تأثیر ناچیزی بر ردپای اکولوژیکی داشته است. مقادیر نزدیک به صفر پهنای متوسط و تقارن نسبی پهنای راست و چپ، گواهی بر تأثیر ضعیف این متغیر است. در مواردی مانند مورد کشور مصر، ثبات پهنای تأثیر مشخص و یکنواخت و قطعی جهانی‌شدن را تأیید می‌کند. بنابراین با ترویج تجارت و سرمایه‌گذاری پایدار از طریق وضع قوانین زیست‌محیطی جهانی، گسترش برنامه‌های انتقال فناوری سبز به کشورهای در حال توسعه و تدوین استانداردهای زیست‌محیطی برای زنجیره‌های تأمین بین‌المللی می‌توان سیاست‌گذاران را در رسیدن به اهداف مطلوب یاری داد. تجارت نیز در اغلب موارد تأثیر ناچیزی بر ردپای اکولوژیکی داشته است. همچنین با توجه به یافته‌ها با پهنای راست و چپ کوچک و نزدیک به صفر، تأثیر خنثی یا ناچیز تجارت قابل تأیید است. با این حال، در برخی موارد مانند مصر و آفریقای جنوبی تأثیر قابل ملاحظه و با قطعیت بالای تجارت مشاهده شده است. در این مورد نیز افزایش تعاملات تجاری با تمرکز بر کالاها و خدمات کم‌کربن، تشویق صادرات محصولات پایدار و کاهش واردات کالاهای با ردپای اکولوژیکی بالا و تقویت قوانین زیست‌محیطی برای واردات و صادرات توصیه می‌شود. درآمد سرانه نیز در برخی از کشورهای عضو بریکس از جمله چین، روسیه و هند تأثیر معنادار و قابل توجهی بر ردپای

اکولوژیکی داشته است. این در حالی است که در کشورهایی نظیر ایران، برزیل و مصر درآمد سرانه اثر ناچیزی بر ردپای اکولوژیکی دارد. در این رابطه نیز ترویج الگوهای مصرف پایدار از طریق آموزش و سیاست‌های تشویقی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های زیست‌محیطی و فناوری‌های سبز برای کاهش تأثیرات درآمدهای بالاتر بر منابع طبیعی و وضع مالیات‌های زیست‌محیطی بر کالاها و خدمات با ردپای اکولوژیکی بالا توصیه می‌شود. تأثیر ناچیز درآمد سرانه بر ردپای اکولوژیکی در کشورهایی مانند ایران می‌تواند تا حدی ناشی از تحریم‌ها باشد. تحریم‌ها با محدود کردن دسترسی به فناوری‌های پیشرفته و کاهش سرمایه‌گذاری در بخش‌های مختلف اقتصادی، ممکن است مانع از افزایش مصرف منابع طبیعی حتی با رشد درآمد سرانه شوند. در ایران، تحریم‌ها باعث کاهش رشد اقتصادی، محدودیت در واردات کالاهای با فناوری بالا و کاهش دسترسی به منابع مالی بین‌المللی شده‌اند. این عوامل می‌توانند باعث شوند که افزایش درآمد سرانه تأثیر چندانی بر ردپای اکولوژیکی نداشته باشد، زیرا اقتصاد تحت فشار تحریم‌ها قادر به افزایش مصرف منابع به شکل چشمگیر نیست.

سپاسگزاری

به این وسیله مراتب سپاس خود را از تلاش و زحمات ارزشمند و صادقانه جناب آقای دکتر رضا اشرف گنجویی در زمینه پیشبرد اهداف پژوهش و استخراج مقاله پژوهشی از رساله دانشجوی مقطع دکتری پرتلاش و ساعی خودم آقای مسعود چشم اغیل تحت عنوان: تأثیر میزان شهرنشینی و مصرف انرژی برق‌آبی بر ردپای اکولوژیکی در ایران تحت شرایط عدم قطعیت ابراز می‌دارم.

پی‌نوشت

^۱ مخفف کلمه آلمانی «Konjunkturforschungsstelle» به معنای «مؤسسه تحقیقاتی چرخه کسب‌وکار»

References

- Ahmad, M., Jiang, P., Murshed, M., Shehzad, K., Akram, R., Cui, L., & Khan, Z. 2022. Modelling the dynamic linkages between eco-innovation, urbanization, economic growth and ecological footprints for G7 countries: Does financial globalization matter? *Sustainable Cities and Society*, 70, 102881.
- Alam, M., Fatima, A., & Butt, M. S. 2007. Sustainable development in South Asia: Role of urbanization and industrialization. *Energy Policy Journal*, 35 (3), 312-325.
- Aldegheishem, A. 2024. Factors affecting ecological footprint in Saudi Arabia: A panel data analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1384451.
- Alnour, M., Ali, M., Abdalla, A., Abdelrahman, R., & Khalil, H. 2022. How do urban population growth, hydropower consumption and natural resources rent shape environmental quality in Sudan? *World Development Sustainability*, 1, 100029.
- Ansari, M., Haider, S., & Masood, T. 2020. Do renewable energy and globalization enhance ecological footprint: an analysis of top renewable energy countries? *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 6719-6732.
- Aziz, N., Sharif, A., Raza, A., & Jermisittiparsert, K. 2024. The role of renewable energy, alternative and nuclear energy in mitigating carbon emissions in the BRICS countries: Evidence from Fourier ARDL approach. *Renewable Energy*, 202, 1262-1273.
- Baker, S. R., Bloom, N., & Davis, S. J. 2016. Measuring Economic Policy Uncertainty. *The Quarterly Journal of Economics*, 131(4), 1593–1636.
- Bloom, N. 2014. Fluctuations in Uncertainty. *Journal of Economic Perspectives*, 28(2), 153–176.
- Charfeddine, L. 2017. The impact of energy consumption and economic development on ecological footprint and CO2 emissions: Evidence from a Markov Switching Equilibrium Correction Model. *Energy Economics*, 65, 355-374.
- Esfahani, Ghabadi, & Azarbajani. 2022. Analyzing the relationship between economic growth, energy consumption, and ecological footprint in selected developed and developing countries. *Economic Research (Sustainable Growth and Development)*, 22(86), 203-232. [In Persian]
- Fearnside, P. M. 2005. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, rates, and consequences. *Conservation Biology*, 19(3), 680-688.
- Fearnside, P. M. 2015. Emissions from tropical hydropower and the IPCC. *Environmental Science & Policy*, 50, 225-239.
- Figge, L., & Martens, P. 2014. Globalisation continues: The Maastricht globalisation index revisited and updated. *Globalizations*, 11(6), 875–893.
- Gorus, M., & Karagol, E. 2023. Factors affecting per capita ecological footprint in OECD countries: Evidence from machine learning techniques. *Energy & Environment*, 34, 2601–2618.
- Gygli, S., Haelg, F., Potrafke, N., & Sturm, J. E. 2019. The KOF Globalisation Index – revisited. *The Review of International Organizations*, 14, 543–574.
- Hesamian, G., & Akbari, M. G. 2017. Fuzzy regression analysis using shape preserving operations. *Soft Computing*, 21(18), 5305-5313. [In Persian]
- Hussain, M., Arshad, Z., & Bashir, M. F. 2023. Globalization, energy consumption, and environmental degradation: Evidence from BRICS countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 44421-44439.
- Langnel, Z., Amegavi, G. B., Donkor, P., & Mensah, J. K. 2020. Globalization, electricity consumption and ecological footprint: An autoregressive distributive lag (ARDL) approach. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102482.
- Luo, Y., Long, X., Wu, C., & Zhang, J. 2016. Investigating the environmental Kuznets curve for carbon emissions in China: The role of energy consumption structure and regional energy efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 112, 1368-1374.
- Mehnet Far, Y., Osmani, F., Cheshmi, M., & Argha, L. 2023. Does technological development and trade expansion reduce the ecological footprint? A case study: Evidence from developing countries. *Economic Growth and Development Research*, 13(53), 97-110. [In Persian]
- Moeinoddini, Zare Mehrjerdi, A., Amirtimori, & Mehrabi Basharabadi. 2024. The impact of natural resource rent on environmental quality (Case study: Selected MENA countries). *Environmental Science Journal*, 50(1), 97-110. [In Persian]
- Mohammed, K. S., Tiwari, S., & Ferraz, D. 2023. Economic uncertainty, institutional quality and ecological footprint: Evidence from BRICS nations. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135248.
- 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*, 12(21), 9030.
- Oldfield, J. D. 2016. Russia's natural resources and environmental challenges. *Routledge Studies in Environmental Policy*.
- Rahman, M. M., Alam, K., & Velayutham, E. 2021. Reduction of CO2 emissions: The role of renewable energy, technological innovation and export quality. *Energy Reports*, 7, 1893-1904.
- Rees, W. E., & Wackernagel, M. 1996. Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable—and why they are a key to sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 16(4-6), 223-248.
- Reza, A., Ahmad, M., & Khan, I. 2024. Economic complexity, natural resources management and ecological footprint: Evidence from BRICS countries. *Resources Policy*, 88, 104456.
- Rudolph, A., & Figge, L. 2017. Determinants of ecological footprints: What is the role of globalization? *Ecological Indicators*, 81, 348-359.
- Sabir, S., & Gorus, M. S. 2019. The impact of globalization on ecological footprint: Empirical evidence from the South Asian countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (32), 33389-33398.
- Sadeghi, H., & Rahimi, H. 2015. Environmental policy in Iran: Challenges and strategies. *Environmental Policy and Law*, 45(4), 250-262. [In Persian]
- Salehin, M. M., Ahmadi, A., & Khanzadi, A. 2021. The impact of economic and political dimensions of globalization on the ecological footprint in BRICS countries: Evidence from panel data analysis. *Journal of Environmental Studies*, 47(3), 455-470.
- Salman, M., Zha, D., & Wang, G. 2022. Interplay between urbanization and ecological footprints: Differential roles of indigenous and foreign innovations in ASEAN-4. *Environmental Science & Policy*, 127, 161-180.
- Scherer, L., & Pfister, S. 2016. Global water footprint assessment of hydropower. *Renewable Energy*, 99, 711-720.
- 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*, 24(5), 6782-6811.
- Soliman, I. K. 2013. Environmental challenges in Egypt: Urbanization and water scarcity. *Sustainable Development Journal*, 8(2), 45-59.
- Song, Y., & Zhang, M. 2010. Urbanization and environmental challenges in China. *Environmental Management Journal*, 46(5), 735-751.
- Syed, A. A., Kamal, M. A., & Rahman, M. M. 2023. Revisiting the environmental Kuznets curve hypothesis in BRICS economies: The role of renewable energy and trade openness. *Sustainable Development*, 31(4), 2437-2452.
- Tanaka, H., Uejima, S., & Asai, K. 1982. Linear regression analysis with fuzzy model. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 12 (6), 903-907.
- ul Ain, Q., Awan, A., & Bashir, F. 2024. Analyzing the intricate nexus of ecological footprint, urbanization & economic growth in South Asia: A panel 2SLS analysis. *iRASD Journal of Economics*, 6(2), 598-619.
- Wang, Z. 2019. Investigation of the ecological footprint's driving factors: What we learn from the experience of emerging economies. *Sustainable Cities and Society*, 47, 101476.
- Zadeh, L. A. 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
- Zarouki, S., Yousefi Barforoushi, A., & Fathollahzadeh, A. 2023. A comprehensive analysis of the impact of globalization on environmental pollution in Iran with emphasis on three dimensions and dual components. *Quantitative Economics Quarterly Journal*, 19(4), 1-41. [In Persian]

