

Research Paper

**Investigating the Impact of Ecological Footprint and Ecological Deficit on Environmental Quality in Iran**

*A. Keshavarz*<sup>1</sup>, *M. R. Sepehri*<sup>2</sup>, *Z. Farajzadeh*<sup>3</sup>

Received: 28 August, 2024

Accepted: 28 December, 2024

**Introduction:** The relationship between sustained economic growth and environmental sustainability has posed significant challenges for several decades. This ongoing discourse has led to the formulation of the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis, which posits an inverse U-shaped correlation between economic development and environmental quality. Specifically, it suggests that at lower levels of per capita income, environmental conditions tend to deteriorate, whereas beyond a certain income threshold, improvements in environmental quality are observed. A significant challenge lies in the identification and incorporation of suitable variables for assessing environmental quality. Numerous studies have utilized atmosphere quality indicators, such as air pollution levels and carbon footprints, to explore the relationship between economic growth and environmental quality. Thus, this study employed, in addition to carbon dioxide, the ecological footprint and the ecological deficit as key indicators of environmental quality in Iran. This study aimed at investigating the relationship between specific environmental variables and various influencing factors, including income, in order to assess the validity of the EKC hypothesis.

**Materials and Methods:** The literature indicates that various factors contribute to environmental quality. To achieve the most parsimonious specification, the study employed Group Method of Data Handling (GMDH) approach. The

- 
1. Ph.D. student of Agricultural Economics, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
  2. M.Sc. student of Agricultural Economics, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
  3. Corresponding Author and Associate Professor of Agricultural Economics, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran (zakariafarajzadeh@gmail.com).

DOI: 10.30490/aead.2025.366861.1623

analysis of the literature indicated that output composition, urbanization, energy consumption, agricultural value added, GDP, and trade openness might serve as potential factors influencing environmental quality. In addition, concerning the stationarity of the variables' data, the Auto-Regressive Distributed Lags (ARDL) model was utilized, as it was determined that some of the variables' data exhibited stationarity at their first differenced values.

**Results and Discussion:** The results obtained from GMDH approach identified energy consumption, agricultural value added, GDP, and trade openness as significant determinants of environmental quality. The study results showed that the GMDH had the ability to accurately forecast environmental quality variables, particularly ecological deficit, with a high degree of precision; in addition, the EKC hypothesis was not validated for any of the specifications in the short term while it was confirmed for all specifications in the long run. Based on the results, it is anticipated that as GDP increases, the ecological footprint will improve; however, regarding carbon dioxide emissions and ecological deficits, the Iranian economy is currently in an ascending phase, which is likely to lead to a deterioration in environmental quality. An increase of one percent in trade openness is associated with a reduction in the ecological footprint ranging from 0.11 to 0.24 percent. Similarly, a one percent rise in energy consumption leads to an increase in carbon dioxide emissions, ecological footprint, and ecological deficit by 0.28, 0.75, and 0.72 percent, respectively. In contrast, a one percent increase in agricultural value-added correlates with increases of 0.13, 0.15, and 0.46 percent in the concerned environmental indicators, respectively.

**Conclusion and Suggestions:** The variables utilized to assess the environmental quality reveal a contrasting scenario with respect to the state of the environment. While the ecological footprint suggests a positive trend, CO<sub>2</sub> emissions exhibit an increasing trajectory. Therefore, a more in-depth analysis of the environmental quality is suggested. It appears that the components of the ecological footprint, aside from carbon dioxide, are indicating more favorable trends. It is recommended that the policy measures focus on reducing energy consumption, promoting the use of renewable energy sources, and enhancing the Iranian economy's integration into international trade.

**Keywords:** *Iranian Economy, CO<sub>2</sub>, Ecological Footprint, GMDH Approach.*

**JEL Classification:** Q53, Q57, C52, C53

## اقتصاد کشاورزی و توسعه

سال ۳۲، شماره ۱۲۸، زمستان ۱۴۰۳

### مقاله پژوهشی

## بررسی اثر ردپای بوم‌شناختی و کسری بوم‌شناختی بر کیفیت محیط زیست در ایران

علی‌رضا کشاورز<sup>۱</sup>، محمدرضا سپهری<sup>۲</sup>، زکریا فرج‌زاده<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸

### چکیده

در تحلیل رابطه میان رشد اقتصادی و کیفیت محیط زیست، بسیاری از مطالعات از متغیرهای مرتبط با کیفیت هوا مانند میزان انتشار آلودگی یا ردپای کربن استفاده کرده‌اند. در مطالعه حاضر، علاوه بر انتشار دی‌اکسیدکربن، از روش ارزیابی ردپای بوم‌شناختی و کسری بوم‌شناختی نیز به‌عنوان متغیرهای نشان‌دهنده کیفیت محیط زیست استفاده شده که در سال‌های اخیر، ردپای بوم‌شناختی به‌عنوان شاخصی برای تعیین کیفیت محیط زیست پذیرفته شده است، زیرا این روش ابعاد جامع‌تر محیط زیست شامل زمین‌های زراعی، چراگاه‌ها، مناطق ماهی‌گیری، جنگل‌ها و ردپای کربن را در نظر می‌گیرد. در پژوهش حاضر، با استفاده از روش گروهی پردازش داده‌ها (GMDH)، مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بر کیفیت محیط زیست انتخاب شدند. از آنجا که در مطالعات مرتبط با رابطه میان کیفیت محیط زیست و رشد اقتصادی، چندین متغیر دیده شده است، می‌توان از روش گروهی پردازش داده‌ها در انتخاب متغیرهای کلیدی تحلیل زیست‌محیطی سود جست. نتایج مطالعه نشان داد که متغیرهای مصرف انرژی، ارزش‌افزوده بخش کشاورزی، تولید ناخالص داخلی و آزادی تجارت عوامل

۱- دانشجوی دکتری بخش اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد بخش اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- نویسنده مسئول و دانشیار بخش اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

(zakariafarajzadeh@gmail.com)

DOI: 10.30490/aead.2025.366861.1623

تعیین‌کننده کیفیت محیط زیست به‌شمار می‌روند. بر اساس این نتایج، فرضیه منحنی زیست‌محیطی کوزنتس برای هر سه مدل در بلندمدت تأیید می‌شود؛ همچنین، بر حسب ردپای بوم‌شناختی، با افزایش تولید ناخالص داخلی، شرایط بوم‌شناختی بهبود می‌یابد، در حالی که با در نظر گرفتن انتشار آلودگی و کسری بوم‌شناختی، تولید ناخالص داخلی در مرحله اول منحنی زیست‌محیطی کوزنتس قرار دارد. ضریب متغیر آزادی تجارت نیز نشان داد که یک درصد افزایش در میزان تجارت منجر به ۰/۱۱ تا ۰/۲۴ درصد بهبود در شاخص‌های منتخب کیفیت محیط زیست می‌شود. در خصوص انرژی نیز ضرایب به‌دست‌آمده نشان داد که با یک درصد افزایش مصرف انرژی، انتشار دی‌اکسیدکربن ۰/۲۸، ردپای بوم‌شناختی ۰/۷۵ و کسری بوم‌شناختی ۰/۷۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، مشخص شد که با افزایش سهم ارزش افزوده بخش کشاورزی از تولید ناخالص داخلی به میزان یک درصد، انتشار دی‌اکسیدکربن، ردپای بوم‌شناختی و کسری بوم‌شناختی، به‌ترتیب، ۰/۱۳، ۰/۱۵ و ۰/۴۶ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به اثر مطلوب تجارت بر کیفیت محیط زیست، آزادسازی تجاری یمی از پیشنهادهای پژوهش حاضر و پیشنهاد دیگر آن نیز کاهش مصرف انرژی به‌ویژه از طریق کاهش یارانه حامل‌های انرژی است.

**کلیدواژه‌ها:** اقتصاد ایران، دی‌اکسیدکربن، ردپای بوم‌شناختی، روش گروهی پردازش داده‌ها (GMDH).

**طبقه‌بندی JEL:** Q53, Q57, C52, C53

#### مقدمه

در دنیای امروز، سرعت بالای استخراج منابع طبیعی و افزایش آلودگی‌ها در سراسر جهان نگرانی‌هایی را در مورد رابطه موجود میان رشد اقتصادی و تخریب محیط زیست برانگیخته است. در پی آن، پژوهشگران با گسترش مدل‌های رشد به‌دنبال بررسی تأثیر آلودگی‌ها و نقش منابع در رشد اقتصادی بودند (Panayotou, 1993). در همین راستا، سؤالات بسیاری وجود دارد که همچنان ذهن بشر را به خود مشغول ساخته است، اینکه آیا حفاظت از محیط زیست با رشد اقتصادی سازگاری دارد؟ و آیا دستیابی به رشد پایدار بدون انباشت آلودگی ممکن است؟ و یا اینکه نگرانی‌های زیست‌محیطی و سیاست‌ها چه تأثیری بر رشد اقتصادی دارند؟ (Xepapadeas, 2005). گراسمن و کروگر (Grossman & Krueger, 1995)، با بررسی ارتباط بین کیفیت هوا و رشد اقتصادی در ۴۲ کشور، نشان دادند که بین رشد اقتصادی و کیفیت هوا رابطه‌ای به شکل U معکوس وجود دارد. به دیگر سخن، طبق این منحنی، فرض بر این است که ابتدا رشد اقتصادی با تخریب محیط زیست رابطه‌ای مستقیم دارد، و با بهتر شدن وضعیت متغیرهای اقتصادی، محیط زیست بیشتر تخریب می‌شود؛ اما در مراحل بعدی رشد، کیفیت محیط زیست همراه با رشد اقتصادی افزایش می‌یابد. با ارائه فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس، مطالعات متعدد به بررسی این فرضیه پرداختند. منحنی زیست‌محیطی

کوزنتس<sup>۱</sup> از مهم‌ترین یافته‌های محققان در میان طیف وسیعی از مطالعات است که به بررسی ارتباط این دو مؤلفه پرداخته‌اند (Dinda, 2005). اما یکی از چالش‌های موجود در زمینه آزمون فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس انتخاب معیار مناسب برای شاخص کیفیت محیط زیست است (Tarazkar et al., 2018; Acevedo-Ramos et al., 2023). بسیاری از مطالعات، با تأکید بر کیفیت هوا، از متغیرهای مرتبط با کیفیت هوا مانند میزان انتشار آلودگی یا ردپای کربن استفاده کرده‌اند (Jiang et al., 2019; Ridzuan et al., 2020; Mahdavian et al., 2022b; Kargar Dehbidi & Bakhshoodeh, 2019; Molaei et al., 2010). در سال‌های اخیر، ردپای بوم‌شناختی<sup>۲</sup> ارائه شده توسط واکرناگل و ریس (Wackernagel & Rees, 1997) به‌عنوان شاخصی مناسب برای تعیین کیفیت محیط زیست پذیرفته شده است، زیرا این روش ابعاد جامع‌تر محیط زیست شامل زمین‌های زراعی، چراگاه‌ها، مناطق ماهی‌گیری، جنگل‌ها و ردپای کربن را در نظر می‌گیرد (Molaei & Basharat, 2015).

ردپای بوم‌شناختی شاخصی است که میزان تقاضای بشر از منابع زیستی<sup>۳</sup> را نشان می‌دهد. این شاخص برای مقایسه سطح فعلی مصرف و آستانه پایداری<sup>۴</sup> منابع زیستی طراحی شده است که برای تولید غذا و انرژی مصرف می‌شوند و فضایی برای زیرساخت‌ها فراهم می‌کنند و همچنین، آلودگی‌های ناشی از فعالیت انسان را به خود جذب می‌کنند. این شاخص که می‌تواند برای یک شخص، گروه، کشور یا یک فعالیت خاص اندازه‌گیری شود، این توانایی را دارد تا تأثیرات گوناگون فعالیت‌های بشر بر منابع مختلف زیستی را تنها در قالب یک عدد نشان دهد (Wiedmann & Barrett, 2010; Kitzes & Wackernagel, 2009; Keshavarz et al., 2021).

مطالعه رابطه میان دو متغیر ردپا و رشد اقتصادی در ایران اهمیت ویژه دارد؛ نخست، بدین دلیل که بنا به گزارش بانک جهانی و پایگاه داده ردپای بوم‌شناختی، شرایط ایران از منظر کیفیت محیط زیست نامطلوب بوده و متوسط ردپای بوم‌شناختی ایران برابر با ۳/۲ هکتار جهانی<sup>۵</sup> است، در حالی که این رقم برای جهان، به‌طور متوسط، برابر با ۲/۵۸ هکتار جهانی (gha) است. افزون بر این، ظرفیت

---

1. Environmental Kuznets Curve (EKC)

2. Ecological Footprint (EF)

3. biological resources

4. sustainability threshold

۵- global hectare (gha)؛ واحد هکتار جهانی بیانگر ردپای بوم‌شناختی و ظرفیت زیستی و کسری بوم‌شناختی است و متوسط مصرف زمین در راستای جبران تقاضای بشر بر اساس اجزای ردپا را نشان می‌دهد.

زیستی<sup>۱</sup> در ایران تنها برابر با ۰/۸ gha است و از این رو، در حال حاضر، ایران با کسری بوم‌شناختی معادل ۲/۴ gha مواجه است (GFN, 2024). این در حالی است که در میان مطالعات داخلی، استفاده از معیار ردپای بوم‌شناختی و کسری بوم‌شناختی در آزمون فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس نادیده گرفته شده است. بنابراین، مطالعه حاضر بر آزمون فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس در ایران و مقایسه معیارهای میزان انتشار آلودگی، ردپای بوم‌شناختی و کسری بوم‌شناختی به‌عنوان معیارهای نماینده کیفیت محیط زیست تمرکز دارد؛ نکته دیگر آنکه میانگین رشد اقتصادی در ایران طی دوره ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۲ تنها ۲/۳ درصد بوده است که در مقایسه با متوسط جهانی (۳/۱ درصد) در سطح پایین قرار دارد (World Bank, 2024). در خصوص ترکیب اجزای ردپای بوم‌شناختی نیز کشاورزی یک بخش مهم محسوب می‌شود، در حالی که همواره، در مطالعات مرتبط با فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس، نادیده گرفته شده است. شایان یادآوری است که هرچند، بخش کشاورزی در میزان انتشار دی‌اکسیدکربن سهم کم‌تری نسبت به بخش صنعت دارد (World Bank, 2024)، اما با نگاهی جامع‌تر به کیفیت محیط زیست، لازم است که نقش بخش کشاورزی بار دیگر ارزیابی شود. از این رو، اهداف مطالعه حاضر، ضمن ارزیابی و مقایسه معیارهای انتشار دی‌اکسیدکربن و ردپای بوم‌شناختی به‌عنوان معیارهای نماینده کیفیت محیط زیست در آزمون فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس، ارزیابی نقش بخش کشاورزی در کیفیت محیط زیست است. ادبیات تحلیل کیفیت محیط زیست، به‌طور مشخص، از طریق مفهوم فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس شناخته شده، حال آنکه متغیرهای توضیح‌دهنده شاخص زیست‌محیطی کمتر مورد تأکید و کنکاش بوده است. در اینجا، هدف از مرور ادبیات گذشته ارائه تصویری در این خصوص و تبیین مساعدت مطالعه حاضر به ادبیات موجود است. در راستای تبیین یادشده، در ایران، مولایی و همکاران (Molaei et al., 2010)، حیدری و همکاران (Heydari et al., 2019)، فتحی و اشک‌تراب (Fathi & Ashktorab, 2023) و باقری (Bagheri, 2023) وجود رابطه U معکوس بین تولید ناخالص داخلی و انتشار دی‌اکسیدکربن را تأیید کرده‌اند. اما مطالعات در این زمینه به استفاده از متغیرهای میزان انتشار آلودگی و تولید ناخالص داخلی محدود نمی‌شود و به متغیرهای دیگری نظیر آزادی تجارت، میزان مصرف انرژی و ارزش افزوده بخش‌های اقتصاد نیز توجه شده است. دوانگ و همکاران (Duong et al., 2022) و دوگان و ترککول (Dogan & Turkekul, 2016)، در بررسی فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس برای کشورهای منطقه آسیا و اقیانوسیه<sup>۲</sup>، علاوه بر تولید ناخالص داخلی، از متغیرهای آزادی تجارت، تعرفه و

---

1. biological capacity  
2. Asia-Pacific

مصرف انرژی نیز استفاده کردند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که افزایش تعرفه و مصرف انرژی منجر به افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن خواهد شد، در حالی که افزایش آزادی تجارت با کاهش انتشار آلودگی همراه است. اما اجاقلو و همکاران (Ojaghlo et al., 2023) نشان دادند که مصرف انرژی و آزادی تجارت اثر معنی‌دار بر میزان انتشار آلودگی در ترکیه ندارد. در مطالعه‌ای دیگر، پابلو رومرو و همکاران (Pablo-Romero et al., 2021)، با استفاده از میزان مصرف انرژی به‌عنوان متغیر وابسته، فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس را ارزیابی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که ضرایب تولید ناخالص داخلی و مجذور تولید ناخالص داخلی مثبت و معنی‌دار است. آگبولا و بکون (Agboola & Bekun, 2019) نیز فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس را برای کشور نیجریه ارزیابی کردند. در این مطالعه، علاوه بر متغیرهای تولید ناخالص داخلی و مجذور آن و همچنین، آزادی تجارت و مصرف انرژی، از متغیر ارزش افزوده بخش کشاورزی استفاده شده و نتایج به‌دست‌آمده تأییدکننده فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس بوده است. افزون بر این، نتایج مطالعه نشان داد که آزادی تجارت، مصرف انرژی و ارزش افزوده بخش کشاورزی موجب افزایش انتشار آلودگی در نیجریه خواهد شد. نتایج مطالعه طرازکار و همکاران (Tarazkar et al., 2018) و گل‌خندان و صحرايي (Golkhandan & Sahraei, 2021) نیز در خصوص آزادسازی تجاری، نشان می‌دهد که در کوتاه‌مدت، آزادسازی تجاری بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای اثر مثبت دارد. مهدویان و همکاران (Mahdavian et al., 2022a) نیز ضمن تأیید منحنی زیست‌محیطی کوزنتس در کشورهای عضو سازمان همکاری اسلامی، اثر مصرف انرژی بر انتشار آلودگی را مثبت و معنی‌دار ارزیابی کردند.

معدودی از مطالعات به بررسی فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس با استفاده از ردپای بوم‌شناختی پرداخته‌اند که از آن میان، پاره‌ای از پژوهش‌ها در پی یادآوری می‌شود. آلتینتاش و کاسوری (Altıntaş & Kassouri, 2020)، ضمن مقایسه ردپای بوم‌شناختی و انتشار دی‌اکسیدکربن، شاخص ردپای بوم‌شناختی را به‌عنوان یک معیار کامل‌تر تخریب محیط زیست معرفی کردند. دستک و همکاران (Destek et al., 2018) از متغیر ردپای بوم‌شناختی به‌عنوان شاخص تخریب محیط زیست استفاده کردند. ضرایب به‌دست‌آمده در این مطالعه برای تولید ناخالص داخلی منفی و معنی‌دار و برای مجذور تولید ناخالص داخلی مثبت و معنی‌دار ارزیابی شدند. نتایج مطالعه انصاری و همکاران (Ansari et al., 2020) نیز ضمن تأیید فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس، ضرایب به‌دست‌آمده برای مصرف انرژی را در تصریح‌های مختلف بین ۰/۴۵ تا ۰/۷۸ برآورد کردند. نتایج مطالعه باگلیانی و همکاران (Bagliani et al., 2008) نیز وجود فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس را برای ۱۴۱ کشور تأیید می‌کند. اما در مطالعه دوگان و همکاران

(Dogan et al., 2020) در کشورهای عضو بریکس، درستی فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس مورد تردید قرار گرفت. در ایران نیز مولائی و همکاران (Molaei et al., 2020)، با استفاده از ردپای بوم‌شناختی، به بررسی منحنی کوزنتس در کشورمان پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که رابطه بین درآمد و ردپای بوم‌شناختی به شکل N است. پارساشریف و همکاران (Parsasharif et al., 2020)، با استفاده از ردپای بوم‌شناختی به‌عنوان شاخص تخریب محیط زیست، منحنی زیست‌محیطی کوزنتس را در گروهی از کشورهای آسیا و اروپا مورد آزمون قرار دادند. نتایج حاکی از تأیید فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس بود؛ همچنین، مشخص شد که با افزایش آزادی تجارت و مصرف انرژی، ردپای بوم‌شناختی افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج پژوهش طرازکار و همکاران (Tarazkar et al., 2018)، ضمن تأیید فرم منحنی زیست‌محیطی کوزنتس برای ایران، یک درصد افزایش در متغیر آزادسازی تجاری در بلندمدت ۰/۱۵ درصد افزایش ردپای بوم‌شناختی را به‌دنبال دارد و همچنین، این رقم برای مصرف انرژی ۰/۴۶ درصد برآورد شد.

در گذشته، مطالعات بر بررسی کلی فعالیت‌های اقتصادی، مانند تولید ناخالص داخلی یا نرخ رشد اقتصادی تمرکز داشتند. اما تحقیقات جدید نشان می‌دهند که ترکیب تولید یا سهم بخش‌های مختلف اقتصاد نیز می‌تواند به‌طور متفاوت، در میزان انتشار دی‌اکسید کربن و تخریب محیط زیست نقش داشته باشد (Al Mamun et al., 2014). بنابراین، بررسی بخش‌های مختلف اقتصاد در هر کشور به مطالعه دقیق‌تر رابطه بین فعالیت‌های اقتصادی و کیفیت محیط زیست کمک می‌کند (Moutinho et al., 2020). در همین راستا، آسه‌ودو راموس و همکاران (Acevedo-Ramos et al., 2023)، با استفاده از متغیرهای انتشار دی‌اکسید کربن و ردپای بوم‌شناختی برای کلمبیا، اثر ارزش افزوده بخش صنعت را در برخی تصریح‌ها مثبت و در برخی دیگر منفی ارزیابی کردند. بر اساس نتایج مطالعه نراقی و همکاران (Naraghi et al., 2022)، ضمن تأیید فرم منحنی کوزنتس برای کشورهای نفتی و غیرنفتی، انتشار گازهای آلاینده در فرآیند رشد بخش کشاورزی کاهش می‌یابد.

از چالش‌های مهم دیگر در ادبیات این مقوله عبارت‌اند از متغیرهای کنترلی که برای آزمون فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس مورد استفاده قرار گرفته است و همچنین، شکل تابعی مورد استفاده در تخمین تابع رگرسیون. به‌منظور رعایت اختصار و ارائه یک جمع‌بندی در خصوص این متغیرها، خلاصه‌ای از مطالعات مرتبط در جدول ۱ ارائه شده است.

همان‌گونه که در جدول ۱ مشخص است، علاوه بر آزادی تجارت و مصرف انرژی، دامنه‌ای گسترده از متغیرها در کانون توجه و مورد استفاده محققان بوده که از آن میان، ارزش افزوده بخش کشاورزی و

صنعت و جمعیت بیشتر مورد تأکید واقع شده است. افزون بر این، در مطالعات مرتبط، به هر دو شکل U معکوس و N توجه شده است؛ هرچند، فراوانی مطالعات به سمت تأیید رابطه شکل U معکوس تمایل دارد. بنابراین، در مطالعه حاضر، برای پالایش متغیرهای اثرگذار، از روش موسوم به روش گروهی پردازش داده‌ها<sup>۱</sup> استفاده شده که یک رویکرد خودسازمان‌دهی است و به تدریج، مدل‌هایی پیچیده‌تر در حین ارزیابی عملکرد مدل‌ها ایجاد می‌کند (Ivakhnenko & Ivakhnenko, 1995). رهیافت یا روش گروهی پردازش داده‌ها (GMDH) یکی از انواع شبکه‌های عصبی است که قابلیت استفاده برای کشف روابط بین متغیرها، پیش‌بینی، مدل‌سازی و شناخت الگوهای خطی و غیرخطی را دارد. یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های این روش، شناسایی و غربال‌گری ورودی‌های کم‌اثر در دوره آموزش و حذف آنها از فرآیند شبیه‌سازی است (Abrishami et al., 2014). مطالعاتی با استفاده از این روش به مدل‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای اقتصادی مانند رشد تولید ناخالص داخلی، تورم و قیمت سهام (Abrishami et al., 2014; Helmi et al., 2019; Golkar et al., 2012) و پیش‌بینی متغیرهای زیست‌محیطی (Shaverdi et al., 2012; al., 2019; Ahmadi et al., 2015) پرداخته‌اند. در میان مطالعات انجام‌شده در این حوزه، حسن و همکاران (Hassan et al., 2011) و رضایی و همکاران (Rezaei et al., 2018) به مدل‌سازی انتشار آلودگی پرداختند که بر اساس نتایج مطالعه دوم برای کشورهای نوردیک<sup>۲</sup> نشان می‌دهد که علاوه بر تولید ناخالص داخلی، مصرف انواع انرژی نیز بر انتشار آلودگی اثرگذار است. حسن و همکاران (Hassan et al., 2011) نیز نشان دادند که تورم، تولید ناخالص داخلی، مصرف انرژی، جمعیت و سرمایه‌گذاری خارجی متغیرهای اثرگذار بر انتشار آلودگی به‌شمار می‌روند.

---

## 1. Group Method of Data Handling (GMDH)

۲- NORDIC ؛ کشورهای اروپای شمالی و اقیانوس اطلس شمالی.

## جدول ۱- مطالعات ارزیابی فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس

منطقه مورد مطالعه	فرضیه کوزنتس	متغیرهای مستقل علاوه بر تولید ناخالص داخلی و مجذور آن			متغیر وابسته	مطالعه
		سایر متغیرها	مصرف انرژی	آزادی تجارت		
کشورهای منطقه آسیا و اقیانوسیه	تأیید شکل U معکوس	شهرنشینی	مثبت	منفی		دوگان و تورککول ( Dogan & Turkekul, 2016)
ترکیه	تأیید فرم N	شهرنشینی و سرمایه-گذاری خارجی	عدم معنی‌داری	عدم معنی‌داری		اجاقلو و همکاران ( Ojaghlou et al., 2023)
نیجریه	تأیید شکل U معکوس	ارزش افزوده کشاورزی	مثبت	مثبت		آگیولا و بکون ( Agboola & Bekun, 2019)
ایران	تأیید فرم U معکوس					مولائی و همکاران ( Molaei et al., 2020)
ایران	تأیید شکل N		مثبت	مثبت		امیرنژاد و اسدپور کردی ( Amirnejad & Asadpour Kordi, 2014)
گروهی از کشورهای در حال توسعه به همراه ایران	تأیید شکل U معکوس	سرمایه فیزیکی		مثبت		طاهری و همکاران ( Taheri et al., 2013)
ایران	تأیید شکل N معکوس	شهرنشینی	مثبت	منفی		کارگر ده‌بیدی و اسماعیلی ( Kargar Dehbidi & Esmaili, 2018)
۷۷ کشور مختلف	تأیید شکل U معکوس	نسبت سرمایه به نیروی کار		منفی (کشورهای با درآمد بالا) مثبت (کشورهای با درآمد پایین)		محمدی و حیدرزاده ( Mohammadi & Heydarzadeh, 2015)
ایران	تأیید شکل U معکوس	شهرنشینی	مثبت	مثبت		طرازکار و همکاران ( Tarazkar et al., 2018)
کشورهای عضو سازمان همکاری اسلامی	تأیید شکل U معکوس	آزادی اقتصادی - آزادی سیاسی - شهرنشینی - ارزش افزوده صنعت	مثبت			مهدویان و همکاران ( Mahdavian et al., 2022a)
ایران	تأیید شکل U معکوس		مثبت	مثبت		لطفعلی‌پور و همکاران ( Lotfalipoor et al., 2018)

انتشار می‌آکسید کربن

بررسی اثر ردپای بوم‌شناختی و.....

مطالعه	متغیر وابسته	متغیرهای مستقل علاوه بر تولید ناخالص داخلی و مجذور آن			منطقه مورد مطالعه
		آزادی تجارت	مصرف انرژی	سایر متغیرها	
تهامی‌پور زرنندی و همکاران ( Tahamipour ) Zarandi et al., (2021)	رَدپای بوم‌شناختی			ارزش افزوده صنعت	ایران
کارگر ده‌بیدی و بخشوده ( Kargar Dehbidi ) & Bakhshoodeh, (2019)	رَدپای بوم‌شناختی		منفی (انرژی فسیلی) مثبت (انرژی تجدیدپذیر)		کشورهای عضو اوپک و کشورهای آسیایی فاقد ذخایر نفتی
دستک و همکاران ( Destek et al., ) (2018)	رَدپای بوم‌شناختی	منفی	مثبت		کشورهای اروپایی
انصاری و همکاران ( Ansari et al., ) (2020)	رَدپای بوم‌شناختی		مثبت	شهرنشینی	کشورهای آسیایی
دوگان و همکاران ( Dogan et al., ) (2020)	رَدپای بوم‌شناختی		مثبت	جمعیت	کشورهای عضو بریکس
مولائی و همکاران ( Molaei et al., ) (2020)	رَدپای بوم‌شناختی	مثبت		شهرنشینی توسعه مالی توسعه انسانی	ایران
پارساشریف و همکاران ( Parsasharif et al., ) (2020)	رَدپای بوم‌شناختی	منفی	مثبت	توسعه مالی	گروهی از کشورهای آسیا و اروپا
طرازکار و همکاران ( Tarazkar et al., ) (2018)	رَدپای بوم‌شناختی	مثبت	مثبت	تراکم جمعیت	ایران
آسه‌ودو راموس و همکاران ( Acevedo-Ramos ) (et al., 2023)	رَدپای بوم‌شناختی انتشار		منفی (انرژی فسیلی) مثبت (انرژی تجدیدپذیر)	ارزش افزوده بخش صنعت - ارزش افزوده کشاورزی - سرمایه گذاری خارجی - شهرنشینی	کلمبیا
پابلو رومرو و همکاران ( Pablo-Romero et ) (al., 2021)	مصرف انرژی			تراکم جمعیت - دما	اسپانیا

مأخذ: یافته‌های پژوهش

با توجه به نکات یادشده، هدف مطالعه حاضر شناسایی و معرفی متغیرهای اثرگذار بر ردپای بوم‌شناختی در ایران و آزمون فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس بوده و متغیرهای اثرگذار با استفاده از روش تحلیل موسوم به رهیافت گروهی پردازش داده‌ها (GMDH) شناسایی شده است.

### مبانی نظری و روش پژوهش

در این بخش، ابتدا بر اساس مطالعات مرور شده، شکل کلی الگوی تحلیل رابطه میان رشد اقتصادی و متغیر زیست‌محیطی و سپس، مبانی روش GMDH برای استخراج متغیرهای اثرگذار ارائه شده است. در ادامه، با توجه به متغیرهای مستقل استخراج شده، به مبانی نظری و روش تحقیق پرداخته شده است. معادله اصلی مورد استفاده برای بررسی رابطه رشد اقتصادی و کیفیت محیط زیست به صورت رابطه (۱) است (Agboola & Bekun, 2019; Gokmenoglu & Taspinar, 2018)، بدین معنی که در مطالعات پیشین، عمدتاً انتشار دی‌اکسید کربن به عنوان متغیر بیانگر کیفیت محیط زیست معرفی شده است:

$$CO_2 = f(GDP, GDP^2, Z) \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $CO_2$  سرانه انتشار دی‌اکسید کربن، GDP سرانه تولید ناخالص داخلی و Z سایر متغیرها را نشان می‌دهد. با توجه به ادبیات موجود و برای نمونه، بر اساس پژوهش آلتینتاش و کاسوری (Altıntaş & Kassouri, 2020)، متغیرهای مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و فسیلی نیز بر انتشار دی‌اکسید کربن اثرگذار است. در مطالعه حاضر، متغیر مصرف کل انرژی در نظر گرفته شده است. آزادی تجارت (نسبت تجارت به تولید ناخالص داخلی) نیز از جمله متغیرهایی است که اهمیت آن در مطالعات اخیر افزایش یافته است (Agboola & Bekun, 2019; Akadiri et al., 2019). تولید بخش‌های اقتصاد یا اثر ترکیب تولید از دیگر متغیرهای حائز اهمیت است که طی سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. اثر بخش‌های مهم اقتصادی از جمله بخش‌های کشاورزی و صنعت به صورت ارزش افزوده این بخش‌ها یا سهم ارزش افزوده از کل تولید ناخالص داخلی در نظر گرفته شده است (Agboola & Bekun, 2019; Ullah et al., 2018; Acevedo-Ramos, 2023). همچنین، در مطالعات مختلف، به اثر جمعیت در قالب سهم جمعیت شهری پرداخته شده است (Dogan et al., 2020; Tarazkar et al., 2018). با توجه به متغیرهای یادشده، می‌توان رابطه (۱) را به صورت رابطه (۲) بازنویسی کرد:

$$CO_2 = f(GDP, GDP^2, EC, TO, AVA) \quad (2)$$

که در آن، EC مصرف انرژی، TO آزادی تجارت و AVA سهم ارزش افزوده بخش کشاورزی از تولید ناخالص داخلی است. همان‌گونه که گفته شد، در اغلب مطالعات، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن به‌صورت سرانه به‌عنوان مهم‌ترین متغیر بیانگر کیفیت محیط زیست مورد استفاده قرار گرفته است، اما اخیراً به‌منظور لحاظ کردن ویژگی‌های بیشتری از کیفیت محیط زیست، دو متغیر ردپای بوم‌شناختی و کسری بوم‌شناختی نیز به‌عنوان دیگر شاخص‌های کیفیت محیط زیست در نظر گرفته شده است. بنابراین، رابطه (۲) به شکل روابط (۳) و (۴) نیز قابل بیان است (Parsasharif et al., 2020; Destek et al., 2018):

$$EF = f(GDP, GDP^2, EC, TO, AVA) \quad (۳)$$

$$ED = f(GDP, GDP^2, EC, TO, AVA) \quad (۴)$$

که در رابطه (۳)، EF و ED، به‌ترتیب، سرانه ردپای بوم‌شناختی و کسری بوم‌شناختی را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر، از لگاریتم متغیرها استفاده شده است. بر اساس نتایج مرور ادبیات موضوع، به‌جز متغیرهای یادشده که در اغلب مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است، متغیرهای دیگری نیز حائز اهمیت ارزیابی شده‌اند که از آن میان، می‌توان متغیرهای ارزش افزوده بخش‌های صنعت و خدمات، سرمایه فیزیکی، جمعیت، شهرنشینی و سرمایه‌گذاری خارجی را یادآور شد. برای گزینش از میان متغیرهای متعدد، لازم است که از یک راهبرد مناسب استفاده شود. در مطالعه حاضر، از رهیافت موسوم به روش گروهی پردازش داده‌ها (GMDH) استفاده شده که در ادامه، مبانی نظری این روش ارائه شده است.

در میان روش‌های شبکه عصبی، روش GMDH به‌عنوان یک روش اکتشافی<sup>۱</sup> که ضعف‌های آماری شبکه‌های عصبی را به‌خوبی پوشش می‌دهد، مورد توجه قرار گرفته است. این روش یک رویکرد خودسازمان‌دهی است که به‌تدریج، مدل‌هایی پیچیده‌تر را در حین ارزیابی عملکرد مدل‌ها ایجاد می‌کند (Ivakhnenko & Ivakhnenko, 1995). روش GMDH یک مدل را به مجموعه‌ای از توابع پایه به نام نورون‌ها تقسیم می‌کند و در هر لایه، جفت‌هایی متنوع از نورون‌ها از طریق یک چندجمله‌ای درجه دو به هم متصل می‌شوند که در لایه بعدی، نورون‌هایی جدید را تولید می‌کند. چنین ساختاری در مدل برای کشف رابطه ورودی‌ها نسبت به خروجی اعمال می‌شود. در این مرحله، هدف یافتن تابعی با تقریب بسیار

---

۱- heuristic: این الگوریتم عبارت است از معیاری به‌منظور انتخاب بهترین و اثربخش‌ترین گزینه برای رسیدن به هدف مورد نظر.

نزدیک به مقدار واقعی خروجی است. بنابراین، برای  $m$  مشاهده از تعداد  $n$  ورودی و خروجی منفرد، تابع به صورت زیر خواهد بود (Iqbal, 2016; Ahmadi et al., 2015; Rezaei et al., 2018):

$$Y_i = f(X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{in}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (5)$$

شبکه عصبی GMDH برای محاسبه متغیر هدف و  $\hat{Y}$  برای هر کدام از بردارهای ورودی،  $X = (X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{in})$  به صورت زیر عمل می‌کند (Iqbal, 2016; Ahmadi et al., 2015; Rezaei et al., 2018):

$$\hat{Y}_i = \hat{f}(X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{in}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (6)$$

در گام بعدی، مجذور اختلاف مقدار واقعی با مقدار برآورد شده حداقل می‌شود (Iqbal, 2016; Ahmadi et al., 2015; Rezaei et al., 2018):

$$\sum_{i=1}^m [\hat{f}(X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{in}) - \hat{Y}_i]^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

برای مشخصات مدل ناشناخته چندمتغیره شامل  $m$  رگرسیون، یک رابطه چندمتغیره کلی بین  $n$  ورودی و یک متغیر خروجی را می‌توان با یک نوع گسسته پیچیده از سری Volterra به شرح زیر تقریب زد (Iqbal, 2016; Ahmadi et al., 2015; Rezaei et al., 2018):

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \alpha_{ijk} X_i X_j X_k + \dots \quad (8)$$

در روش GMDH، برای داده‌کاوی، مدل‌سازی، بهینه‌سازی، تشخیص الگو و پیش‌بینی، از چندجمله‌ای کولموگوروف-گابور که در رابطه (۸) آمده است، به عنوان مناسب‌ترین تابع پایه استفاده می‌شود. ساختار کامل این رابطه ریاضی را می‌توان با نظامی از تنها دو متغیر (نورون) چندجمله‌ای درجه دوم جزئی به شکل رابطه (۹) توصیف کرد (Iqbal, 2016; Ahmadi et al., 2015; Rezaei et al., 2018):

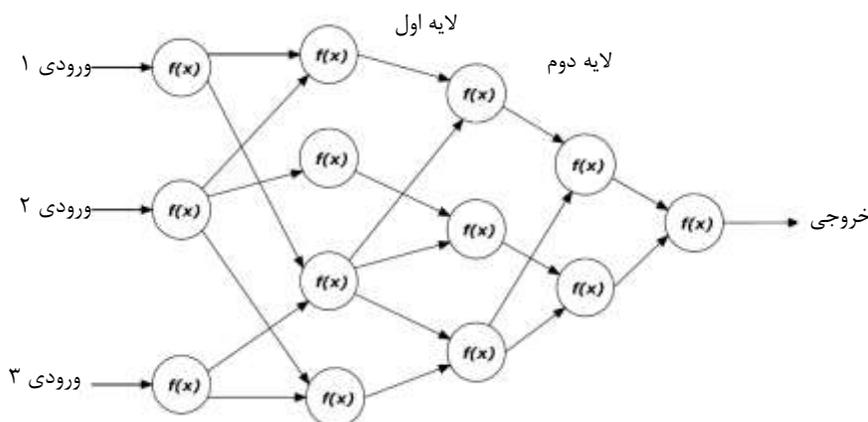
$$\hat{Y} = G(X_1, X_2) = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_1 X_2 + \alpha_4 X_1^2 + \alpha_5 X_2^2 \quad (9)$$

ضرایب رابطه (۹) با استفاده از روش حداقل مربعات برآورد می‌شود. همان‌گونه که در رابطه (۷) اشاره شد، باید مجذور اختلاف خروجی واقعی و پیش‌بینی حداقل شود. بدین منظور، سلسله‌مراتبی از چندجمله‌ای‌ها با استفاده از شکل درجه دو ارائه شده در رابطه (۹) ساخته می‌شود تا ضرایب هر تابع درجه دو به دست آید  $(G(X_i, X_j))$ . برای تناسب بهینه خروجی در کل مجموعه بردار ورودی-خروجی مشاهده شده، از رابطه زیر استفاده می‌شود (Iqbal, 2016; Ahmadi et al., 2015; Rezaei et al., 2018):

$$E = \sum_i^m \frac{(y_i - G_i)^2}{m} \rightarrow \min \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{E} \rightarrow \min$$

بنابراین، تعداد  $\binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2}$  نورون در اولین لایه پنهان شبکه عصبی از داده‌های مشاهده شده ساخته می‌شود. به دیگر سخن، نظام پیچیده با  $n$  متغیر ورودی را می‌توان به  $\binom{n}{2}$  نظام جزئی ساده با دو ورودی و یک خروجی تجزیه کرد. برای تشکیل لایه بعدی، تنها لازم است خروجی به دست آمده از دو مدل لایه اول مجدداً مدل‌سازی شود. هدف اصلی که در روند ترکیب مدل‌ها مد نظر است، دستیابی به مدلی است که خروجی خطای آن نسبت به سایر مدل‌های قبل از آن کمتر باشد. همان‌گونه که مشخص است، لایه مرحله قبل، مولد نورون‌های لایه فعلی است. بنابراین، برای جلوگیری از واگرایی شبکه، باید تعدادی از نورون‌ها حذف شود. در این مرحله، از الگوریتم ژنتیک در طراحی شبکه استفاده می‌شود (Mehrrara et al., 2010). به‌طور خلاصه، شبکه عصبی GMDH در لایه اول با ترکیبی از رگرسیون‌هایی به شکل رابطه (۹)، خروجی‌های جدید می‌سازد و در ادامه با ترکیب خروجی‌های مرحله قبل، رگرسیون‌های جدید و متنوع ایجاد می‌کند. شکل (۱) این فرآیند را برای دو لایه نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، برخی از نورون‌های لایه‌های اول و دوم به دلیل فاصله گرفتن از مقدار بهینه حذف شده‌اند. هدف مطالعه حاضر از استفاده از این روش در رتبه‌بندی متغیرهای اثرگذار بر کیفیت محیط زیست است.



شکل ۱- ساختار شبکه عصبی GMDH با سه ورودی و دو لایه

یکی از نقاط ضعف شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی‌ها عدم استفاده از الگوهای اقتصادسنجی است. به دیگر سخن، نتایج را نمی‌توان با استفاده از ادبیات اقتصادسنجی اثبات کرد. روش GMDH به کشف رابطه میان متغیرها کمک می‌کند. پس از پیش‌بینی متغیر خروجی توسط شبکه GMDH، می‌توان متغیرهای ورودی را بر اساس تأثیر آنها در پیش‌بینی متغیر خروجی رتبه‌بندی کرد. از دیگر مزایای استفاده از این روش می‌توان به حساس نبودن آن نسبت به ایستایی متغیرها، کشف روابط خطی و غیرخطی پیچیده، حساسیت کم به شکست‌های ساختاری و امکان طبقه‌بندی متغیرها بر اساس میزان تأثیر بر متغیر خروجی اشاره کرد (Abrishami et al., 2010). پس از انتخاب متغیرها بر اساس روش GMDH، از آنجا که داده‌های این متغیرها سری زمانی هستند، ابتدا آزمون ایستایی صورت گرفت و نتایج نشان داد که برخی از آنها در «سطح» رفتار ایستا نشان نمی‌دهند. از این‌رو، برای پرهیز از وقوع رگرسیون کاذب در صورت نایستا بودن متغیرها و تعیین رابطه بلندمدت بین متغیرها، از روش خودتوضیحی با وقفه‌های گسترده<sup>۱</sup> استفاده شده است. مزیت روش خودتوضیحی با وقفه‌های گسترده (ARDL) نسبت به سایر روش‌های هم‌جمعی عدم نیاز به یکسان بودن درجه هم‌جمعی متغیرها، کارایی نسبتاً بالا در نمونه‌های کوچک و برآورد هم‌زمان الگوهای کوتاه‌مدت و بلندمدت است. تخمین‌های روش خودتوضیحی با وقفه‌های گسترده، ناریب و کارآ است، زیرا عاری از مشکلات خودهم‌بستگی و درون‌زایی است (Siddiki, 2000). رابطه (۱۱) مدل ARDL تعمیم‌یافته<sup>۲</sup> را نشان می‌دهد (Pesaran & Shin, 1998):

1. Auto-Regressive Distributed Lags (ARDL)
2. Augmented ARDL

$$\alpha(LP)y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i (Lq_i)x_{it} + \lambda w_t + u_t, i = 1, 2, \dots, k \quad (11)$$

در رابطه بالا،  $y_t$  متغیر وابسته (ردپای بوم‌شناختی، کسری بوم‌شناختی و انتشار دی‌اکسید کربن)،  $\alpha_0$  عرض از مبدأ،  $w_t$  برداری از متغیرهای قطعی نظیر روندهای زمانی یا متغیرهای برون‌زا با وقفه ثابت و  $L$  عامل وقفه است ( $Ly_t = y_{t-1}$ )، که به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \alpha(LP) &= 1 - \alpha_1 L - \dots - \alpha_p L^p \\ \beta_i(Lq_i) &= \beta_{i0} + \beta_{i1} L + \beta_{i2} L^2 + \dots + \\ &(\beta_{iq_i} L^{q_i}) \end{aligned} \quad (12)$$

بر این اساس، مدل پویای ARDL به صورت رابطه (۱۳) است:

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i Y_{2t-i} + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i W_{t-i} + \sum_{i=1}^f \mu_i X_{t-i} + \varepsilon_0 Y_t + \gamma_0 W_t + \mu_0 X_t + u \quad (13)$$

که در آن  $m$ ،  $n$  و  $f$  بیانگر تعداد وقفه‌های بهینه است. رهیافت ARDL برای تخمین رابطه بلندمدت دارای روش دومرحله‌ای است. مرحله اول، وجود رابطه بلندمدت بین متغیرهای مدل را بررسی می‌کند؛ و مرحله دوم، به برآورد ضرایب بلندمدت و کوتاه‌مدت معادله می‌پردازد. مرحله دوم پس از تأیید وجود رابطه بلندمدت میان متغیرها انجام می‌شود. برای تشخیص وجود رابطه بلندمدت، پسران و شین (Pesaran & shin, 1998) آماره  $f$  را پیشنهاد می‌کنند. در صورتی که مقدار این آماره از مقدار بحرانی بالایی ( $I(1)$ ) تجاوز کند، وجود یک رابطه همبستگی بلندمدت تأیید می‌شود؛ و اگر آماره  $f$  بین حدود بحرانی بالا و پایین ( $I(0)$  و  $I(1)$ ) قرار گیرد، آزمون هم‌انباشتگی بی‌نتیجه است. در آخر آزمون‌های تجمعی (CUSUM) و مجذورات تجمعی (CUSUMSQ) برای ارزیابی پایداری ضریب در کوتاه‌مدت و بلندمدت استفاده می‌شود. اگر نمودارهای آزمون تجمعی و مجذورات تجمعی در بازه سطح معنی‌داری پنج درصد قرار گیرند، فرض صفر (پایداری کل ضرایب در مدل) را نمی‌توان رد کرد (Pesaran & shin, 1998). دوره مطالعه از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۲ است. فهرست متغیرهای مورد استفاده در جدول ۲ آمده است.

## جدول ۲- فهرست متغیرهای پژوهش

منابع	متغیر
مرکز پایش داده <sup>۱</sup>	سرانه انتشار دی‌اکسیدکربن
پایگاه داده ردپای بوم‌شناختی <sup>۲</sup>	سرانه ردپای بوم‌شناختی
پایگاه داده ردپای بوم‌شناختی	سرانه کسری بوم‌شناختی
بانک جهانی	سرانه تولید ناخالص داخلی
بانک جهانی	آزادی تجارت
بانک جهانی	مصرف انرژی
بانک جهانی	سهام ارزش افزوده بخش کشاورزی از تولید ناخالص داخلی
بانک جهانی	سهام ارزش افزوده بخش صنعت از تولید ناخالص داخلی
بانک جهانی	سهام ارزش افزوده بخش خدمات از تولید ناخالص داخلی
بانک جهانی	موجودی سرمایه ثابت
بانک جهانی	سهام جمعیت شهری از کل جمعیت
بانک جهانی	تراکم جمعیت

مأخذ: یافته‌های پژوهش

لازم به ذکر است که دو متغیر سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی و مصرف انرژی تجدیدپذیر از متغیرهای مورد بررسی کنار گذاشته شده‌اند، چراکه مقدار سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی و مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران طی سال‌های متعدد صفر و یا نزدیک به صفر بوده است (World Bank, 2024).

## نتایج و بحث

در گام نخست، نتایج مربوط به مدل GMDH ارائه شده است. در این مرحله، از بین تخمین‌های ارائه‌شده، تصریح با کمترین خطای پیش‌بینی و نیز متغیرهای لحاظ‌شده در این تصریح به‌عنوان متغیرهای اصلی مدل انتخاب شدند. در مدل اول و دوم که متغیر وابسته، به‌ترتیب، انتشار دی‌اکسیدکربن و ردپای بوم‌شناختی در نظر گرفته شده است، به‌طور کلی، از ۱۱۹ ترکیب مختلف استفاده شده و بهترین تصریح در لایه چهارم با میانگین مجذور مربعات خطای ۰/۶۹ برای مدل اول و ۱/۰۵ برای مدل دوم انتخاب شده است. متغیرهای مصرف انرژی، ارزش افزوده بخش کشاورزی، تولید ناخالص داخلی و آزادی تجارت، به‌ترتیب، اثرگذارترین متغیرهای مدل اول و ارزش افزوده بخش کشاورزی، تولید ناخالص داخلی، آزادی تجارت و مصرف انرژی نیز به‌ترتیب، اثرگذارترین متغیرهای مدل دوم برآورد شده‌اند.

1. ourworldindata
2. Footprint Network

بررسی اثر ردپای بوم‌شناختی و.....

(جدول ۳ و ۴). در مدل سوم که از متغیر کسری بوم‌شناختی به‌عنوان نماینده کیفیت محیط زیست استفاده شده، مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار، به‌ترتیب، توان دوم تولید ناخالص داخلی، تولید ناخالص داخلی و آزادی تجارت است. در این مدل، به‌طور کلی، ۱۶۲ ترکیب ارزیابی شده که در نهایت، میانگین مجذور مربعات خطای بهترین تصریح مدل ۰/۹۷ است. در این مدل، برخلاف دو مدل قبل، متغیرهای ارزش افزوده بخش کشاورزی و مصرف انرژی اثرگذار ارزیابی نشده‌اند (جدول ۵).

### جدول ۳- نتایج مدل بر اساس متغیر وابسته انتشار دی‌اکسیدکربن

لایه	تعداد ترکیبات	میانگین مربعات خطا
لایه ۱	۷	۵/۲۶
لایه ۲	۲۱	۱/۹۰
لایه ۳	۳۵	۰/۷۷
لایه ۴	۳۵	۰/۶۹
لایه ۵	۲۱	۰/۸۲

تصریح بهترین مدل  $CO_2 = -0.21AVA - 0.03TO + 0.19GDP + 0.24EC - 1.2$   
 مأخذ: یافته‌های پژوهش

### جدول ۴- نتایج مدل بر اساس متغیر وابسته ردپای بوم‌شناختی

لایه	تعداد ترکیبات	میانگین مربعات خطا
لایه ۱	۷	۹/۴
لایه ۲	۲۱	۹
لایه ۳	۳۵	۱/۴۵
لایه ۴	۳۵	۱/۰۵
لایه ۵	۲۱	۱/۰۵

تصریح بهترین مدل  $EF = 0.61AVA + 0.44TO - 0.53GDP + 0.28EC + 6.25$   
 مأخذ: یافته‌های پژوهش

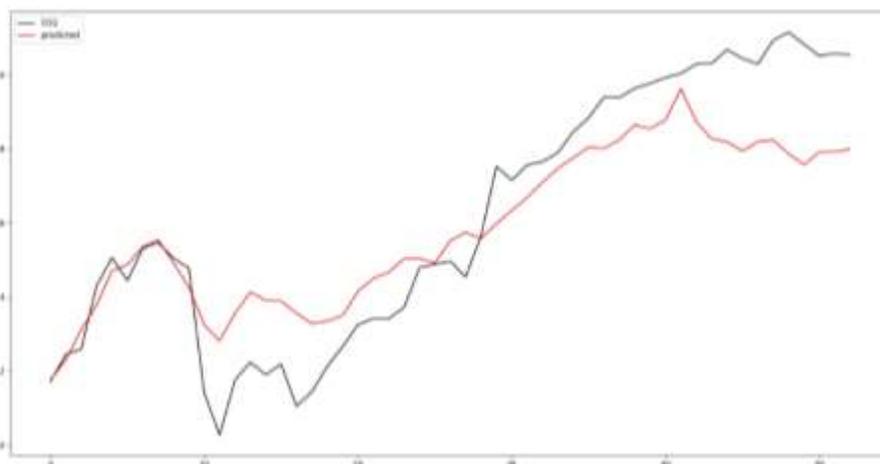
### جدول ۵- نتایج مدل بر اساس متغیر وابسته کسری بوم‌شناختی

لایه	تعداد ترکیبات	میانگین مربعات خطا
لایه ۱	۸	۲/۹۸
لایه ۲	۲۸	۱/۶۰
لایه ۳	۵۶	۰/۹۷
لایه ۴	۷۰	۲/۹۴

تصریح بهترین مدل  $ED = -0.02TO - 0.25GDP + 0.78GDP^2 - 2.63$   
 مأخذ: یافته‌های پژوهش

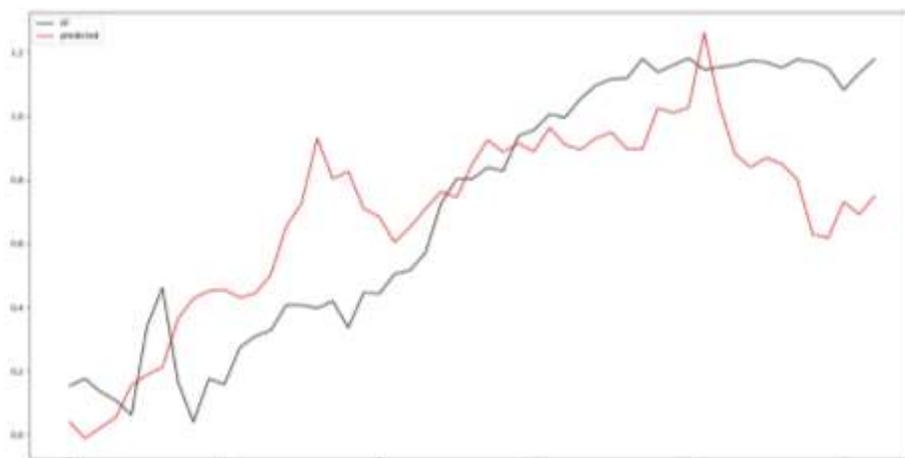
فعالیت‌های کشاورزی همچون سوزاندن بقایای محصولات، کاشت زمین و عملیات زراعی، استفاده از کودهای شیمیایی و برداشت آب از منابع سطحی و زیرسطحی از جمله منابع مهم انتشار آلاینده‌های گازی شناخته شده‌اند (Lelieveld et al., 2015). بخش کشاورزی ایران در انتشار دو آلاینده متان و اکسیددی‌نیتروژن نقش زیادی دارد. بیش از ۸۴ درصد از مجموع متان منتشرشده در ایران به فرآیند تولید تعلق دارد که سهم بخش کشاورزی حدود بیست درصد از این رقم است و به‌طور عمده، توسط زیربخش‌های دام و طیور و زارعت تولید می‌شود. این ارقام برای آلاینده اکسیددی‌نیتروژن، به‌ترتیب، بیش از ۵۸ و ۵۷ درصد است. البته، نباید از نظر دور داشت که صنعت بخش مهمی از انتشار دی‌اکسیدکربن را برعهده دارد، اما همبستگی بالای تولید صنعتی با متغیر GDP می‌تواند مانع حضور آن در تصریح حاوی کمترین خطای پیش‌بینی شده باشد.

در نمودارهای ۱، ۲ و ۳، به‌ترتیب، مقادیر حقیقی و پیش‌بینی‌شده لگاریتم انتشار سرانه دی‌اکسیدکربن، لگاریتم ردپای بوم‌شناختی و لگاریتم کسری بوم‌شناختی ترسیم شده است. در مجموع، می‌توان گفت که الگوی منتخب سطوح پایین‌تر انتشار CO<sub>2</sub> و ردپای بوم‌شناختی را بالاتر از مقادیر حقیقی برآورد کرده است و در سطوح بالاتر انتشار و ردپای بوم‌شناختی به مقادیر پایین‌تر تمایل دارد. اما با توجه به میزان خطای پیش‌بینی، نتایج مطلوب است. در خصوص مقادیر پیش‌بینی‌شده کسری بوم‌شناختی، می‌توان گفت که در تمام دوره، این مقدار اندکی بالاتر از مقدار حقیقی است.

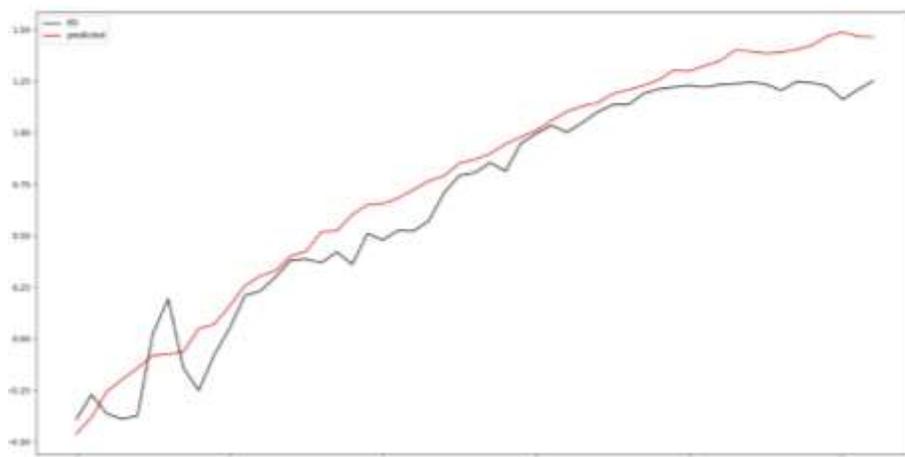


نمودار ۱- مقادیر حقیقی و پیش‌بینی‌شده انتشار CO<sub>2</sub> بر اساس متغیرهای توضیح‌دهنده منتخب

بررسی اثر ردپای بوم‌شناختی و.....



نمودار ۲- مقادیر حقیقی و پیش‌بینی‌شده ردپای بوم‌شناختی بر اساس متغیرهای توضیح‌دهنده منتخب



نمودار ۳- مقادیر حقیقی و پیش‌بینی‌شده کسری بوم‌شناختی بر اساس متغیرهای توضیح‌دهنده منتخب

در ادامه، تحلیل نتایج تصریح رگرسیونی دربرگیرنده متغیرهای مستقل منتخب برآمده از روش GMDH ارائه شده است. لازم به اشاره است که در تحلیل رگرسیونی، برای امکان‌پذیری مقایسه سه تصریح با یکدیگر، از تمام متغیرهای پیشنهادشده در روش GMDH (جدول ۳ تا ۵) استفاده شده است. از آنجا که داده‌های متغیرهای منتخب از نوع سری زمانی است، ابتدا ایستایی متغیرهای مورد نظر بررسی شده، که نتایج آن در جدول ۶ آمده است.

## جدول ۶- نتایج آزمون ایستایی متغیرها

متغیر	نتایج آزمون ADF (سطح)	نتایج آزمون ADF (تفاضل مرتبه اول)
تولید ناخالص داخلی	-۱/۹۱	-۴/۷۳***
آزادی تجارت	-۳/۰۲	-۵/۰۲***
مصرف انرژی	-۴/۵۴***	-۴/۹۶***
سهم ارزش افزوده کشاورزی	-۱/۸۲	-۷/۹۶***
انتشار دی‌اکسیدکربن	-۱/۷۰	-۵/۳۴***
ردپای بوم‌شناختی	-۲/۱۲	-۶/۹۶***
کسری بوم‌شناختی	-۱/۷۰	-۶/۵۸***
متغیر	نتایج آزمون KPSS	
تولید ناخالص داخلی	۰/۱۶ (سطح)	
آزادی تجارت	۰/۱۱* (تفاضل مرتبه اول)	
مصرف انرژی	۰/۲۱***	
سهم ارزش افزوده کشاورزی	۰/۸۵***	
انتشار دی‌اکسیدکربن	۰/۱۵**	
ردپای بوم‌شناختی	۰/۸۱***	
کسری بوم‌شناختی	۰/۹۴***	

\*، \*\*، \*\*\* به ترتیب، معنی‌داری در سطوح ده، پنج و یک درصد

مأخذ: یافته‌های پژوهش

بر اساس نتایج جدول ۶ و آزمون ADF، همه متغیرها به جز مصرف انرژی در سطح ایستا قرار دارند و داده‌های این متغیر نیز با یک‌بار تفاضل‌گیری ایستا خواهد بود. نتایج آزمون KPSS اما نشان‌دهنده ایستایی تمام متغیرها به جز تولید ناخالص داخلی است. که این متغیر نیز با یک‌بار تفاضل‌گیری ایستا خواهد بود. نکته حائز اهمیت آن است که بر اساس نتایج هر دو روش آزمون ایستایی، برخی از متغیرها در سطح ایستا قرار دارند، در حالی که برخی دیگر ایستا نیستند. از همین رو، از روش ARDL برای برآورد مدل استفاده شده که با این کار، صرف‌نظر از مرتبه ایستایی (ایستا در سطح یا پس از یک‌بار تفاضل‌گیری)، متغیرهای توضیحی قابل استفاده است و اهمیت تفاوت در نتایج آزمون ایستایی متغیرهای توضیحی از بین می‌رود. در خصوص توان تشخیص دو آزمون، لازم به اشاره است که یافته‌های مطالعه شین و اشمیت (Shin & Schmidt, 1992) حاکی از قدرت بالاتر آزمون دیکی-فولر در مقایسه با آزمون KPSS است. جدول ۷ تصریح‌های ارائه‌شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

بررسی اثر ردپای بوم‌شناختی و.....

در تصریح‌های اول و دوم، علاوه بر تولید ناخالص داخلی و مجذور آن، از متغیرهای مصرف انرژی، آزادی تجارت و ارزش افزوده کشاورزی نیز استفاده شده است. در تصریح اول، متغیر وابسته انتشار دی‌اکسیدکربن و در تصریح دوم، متغیر وابسته ردپای بوم‌شناختی است. تعداد وقفه بهینه نیز بر اساس آماره آکائیک برای تصریح‌ها تعیین شده است (جدول ۷).

#### جدول (۷): فرم تابع تصریح‌ها

$\ln CO_2 = f(\ln GDP, \ln GDP^2, \ln EC, \ln TO, \ln AVA)$	ARDL (2,3,3,4,4,0)	تصریح اول
$\ln EF = f(\ln GDP, \ln GDP^2, \ln EC, \ln TO, \ln AVA)$	ARDL(2,0,3,0,4,1)	تصریح دوم
$\ln ED = f(\ln GDP, \ln GDP^2, \ln EC, \ln TO, \ln AVA)$	ARDL(3,4,3,2,3,4)	تصریح سوم

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج مربوط به آزمون باند برای بررسی وجود رابطه بلندمدت نشان می‌دهد که مقدار آماره آزمون در همه تصریح‌ها بزرگ‌تر از سطح  $I(1)$  است؛ از این‌رو، وجود رابطه بلندمدت تأیید می‌شود (جدول ۸).

#### جدول ۸- نتایج آزمون باند (در سطح یک درصد)

تصریح سوم	تصریح دوم	تصریح اول	
۳/۹۳	۳/۵۰	۳/۰۶	I(0)
۵/۲۳	۴/۶۳	۴/۱۵	I(1)
۱۰/۹۸	۸/۳۷	۸/۴۷	مقدار

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج الگوی کوتاه‌مدت برای سه تصریح در جدول ۹ آمده است. ضریب متغیر  $\text{Coint Eq}(-1)$  در الگوی کوتاه‌مدت نشان می‌دهد که کمتر از یک دوره زمان لازم است تا انحرافات به مسیر تعادلی بلندمدت بازگردند. در جدول ۹، اندیس  $D$  تعداد تفاضل‌های متغیر مورد نظر در تخمین الگوی کوتاه‌مدت را نشان می‌دهد. در کوتاه‌مدت، الگوی فرضیه کوزنتس برای هیچ‌کدام از تصریح‌ها تأیید نشده و روند افزایش با نرخ تصاعدی بسیار اندک قابل مشاهده است. البته، مقادیر ضرایب به‌ویژه در مورد دی-اکسیدکربن و ردپای بوم‌شناختی ناظر بر کاهش شدت تخریب زیست‌محیطی است. افزایش سطح تجارت موجب مساعدت مطلوب به ردپا و کسری بوم‌شناختی می‌شود، اما بر انتشار دی‌اکسیدکربن اثر مثبت دارد. این یافته بدین معنی خواهد بود که افزایش سطح تجارت از طریق تغییر ترکیب مصرف

انرژی بر انتشار دی‌اکسیدکربن اثر مثبت خواهد داشت. با توجه به توزیع یارانه‌ای انرژی چنین یافته‌ای مورد انتظار است. این موضوع در مطالعه فرج‌زاده و نعمت‌اللهی (Farajzadeh & Nematollahi, 2023) نیز مورد تأکید قرار گرفته است. اثر منفی مصرف انرژی بر انتشار دی‌اکسیدکربن و ردپای بوم‌شناختی در کوتاه‌مدت می‌تواند در اثر بهبود و افزایش کارایی استفاده از انرژی حاصل شود. در این خصوص، لازم به اشاره است که برخی مطالعات مربوط به حذف یارانه انرژی مانند مطالعه راعی و همکاران (Raei et al., 2024) افزایش قیمت انرژی را با افزایش کارایی استفاده از آن در نظر می‌گیرند. مشارکت ارزش افزوده کشاورزی نیز هرچند، در راستای کاهش تخریب محیط زیست است، اما این اثر تنها در مورد کسری بوم‌شناختی حائز اهمیت آماری است؛ با توجه به اثر ناچیز آن بر ردپای بوم‌شناختی، اثر منفی و معنی‌دار بر متغیر کسری بوم‌شناختی می‌تواند به معنی مشارکت بخش کشاورزی در ارائه خدمات زیست‌محیطی باشد.

جدول ۹- نتایج الگوی کوتاه‌مدت

متغیر	تصریح اول	تصریح دوم	تصریح سوم
Coint Eq(-1)	-۱/۰۴***	-۱/۱۴***	-۲/۴۹***
مجموع تفاضل تولید ناخالص داخلی	-۰/۱۴ D=۳**	۰/۲۶	۰/۸۳ D=۴**
مجموع تفاضل مجذور تولید ناخالص داخلی	۰/۰۱ D=۳*	۰/۰۳ D=۳**	۰/۰۴ D=۳**
مجموع تفاضل آزادی تجارت	۰/۳۰ D=۴***	-۰/۱۳*	-۰/۱۱ D=۳***
مجموع تفاضل مصرف انرژی	-۰/۸۵ D=۴**	-۰/۲۴ D=۴*	۲/۷۷ D=۳**
مجموع تفاضل سهم ارزش افزوده کشاورزی	-۰/۰۸	-۰/۲۸	-۰/۱۵ D=۴***
کی‌دو تعدیل‌شده	۰/۷۸	۰/۵۶	۰/۸۸
آماره دوربین-واتسون	۱/۸۹	۲/۲۰	۲/۶۸

\*\*\*، \*\*، \* به ترتیب، معنی‌داری در سطوح ده، پنج و یک درصد

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج الگوی بلندمدت برای هر سه تصریح، وجود منحنی زیست‌محیطی کوزنتس را تأیید می‌کند (جدول ۱۰). ضرایب مربوط به تولید ناخالص داخلی و مجذور آن در هر سه تصریح از اهمیت آماری لازم برخوردارند. مقدار فعلی لگاریتم سرانه تولید ناخالص داخلی ایران نزدیک به عدد ۸/۹ است. نقطه عطف در تصریح اول ۳۸ و بالاتر از مقدار فعلی سرانه تولید ناخالص داخلی است، اما در تصریح دوم که از متغیر ردپای بوم‌شناختی استفاده شده، نقطه عطف چهار است که پایین‌تر از مقدار فعلی تولید ناخالص داخلی قرار دارد. در تصریح سوم نیز همانند تصریح اول، نقطه عطف بالاتر از مقدار فعلی تولید ناخالص

داخلی قرار دارد، اما به نقطه عطف نزدیک است. بدین ترتیب، می‌توان گفت که بر اساس تصریح‌های ارائه‌شده، در بلندمدت، ردپای بوم‌شناختی رو به کاهش و اما سرانه انتشار دی‌اکسیدکربن افزایشی خواهد بود. این یافته می‌تواند به معنی کاهش اجزای دیگر ردپای بوم‌شناختی به‌جز انتشار دی‌اکسیدکربن باشد. البته، کاهش ردپای بوم‌شناختی می‌تواند از محدودیت‌های ظرفیت بوم‌شناختی نیز ناشی شود. ضریب متغیر آزادی تجارت در تصریح‌ها منفی و معنی‌دار است و نشان می‌دهد که یک درصد افزایش سهم واردات و صادرات منجر به کاهش ۰/۱۱ تا ۰/۲۴ درصد در متغیرهای محیط زیست می‌شود. برخلاف الگوی کوتاه‌مدت، در رابطه بلندمدت برای هر سه تصریح، اثرگذاری تجارت مطلوب است. به‌نظر می‌رسد که تجارت می‌تواند از طریق تغییر ترکیب تولید و از این‌رو، تغییر ترکیب انرژی مصرفی چنین فرصتی را برای اقتصاد ایران فراهم سازد. یافته‌های مطالعه طاهری و همکاران (Taheri et al., 2013) نیز کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در نتیجه آزادسازی تجارت را نشان می‌دهد. همچنین، در خصوص افزایش مصرف انرژی، ضرایب به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با یک درصد افزایش مصرف انرژی، انتشار دی‌اکسیدکربن ۰/۲۸ درصد افزایش می‌یابد، که مطابق انتظار است. این روند درخصوص ردپای بوم‌شناختی و کسری بوم‌شناختی شدیدتر است. یک درصد افزایش مصرف انرژی ۰/۷۵ درصد ردپای بوم‌شناختی و ۰/۷۲ درصد کسری بوم‌شناختی را افزایش می‌دهد. از این‌رو، این یافته حاکی از آن است که افزایش مصرف انرژی موجب تغییر در ترکیب تولید به‌گونه‌ای خواهد شد که موجب فشار بیشتر بر منابع زیست‌محیطی و از این‌رو، افزایش ردپای بوم‌شناختی و تشدید کسری بوم‌شناختی خواهد شد. برخلاف رابطه کوتاه‌مدت، افزایش سهم ارزش افزوده بخش کشاورزی با افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن، ردپای بوم‌شناختی و کسری بوم‌شناختی همراه است. البته، بخش کشاورزی در مصرف انرژی چندان سهمی ندارد و به‌نظر می‌رسد که افزایش تولید در صنایع وابسته به کشاورزی می‌تواند در ایفای چنین نقشی حائز اهمیت باشد. یک درصد افزایش در سهم ارزش افزوده بخش کشاورزی ۰/۱۳ درصد انتشار دی‌اکسیدکربن، ۰/۱۵ درصد ردپای بوم‌شناختی و ۰/۴۶ درصد کسری بوم‌شناختی را افزایش می‌دهد. البته، شایان یادآوری است که در فرآیند توسعه، سهم بخش کشاورزی عمدتاً به نفع بخش خدمات کاهش خواهد یافت و در حال حاضر، سهم بخش کشاورزی از تولید ناخالص داخلی اقتصاد ایران کمتر از ده درصد است.

جدول ۱۰- نتایج الگوی بلندمدت

متغیر	تصریح اول	تصریح دوم	تصریح سوم
تولید ناخالص داخلی	۰/۷۶***	۰/۰۸**	۰/۱۶***
مجذور تولید ناخالص داخلی	-۰/۰۱***	-۰/۰۱***	-۰/۰۰۸***
آزادی تجارت	-۰/۱۶***	-۰/۱۱***	-۰/۲۴***
مصرف انرژی	۰/۲۸***	۰/۷۵***	۰/۷۲***
سهم ارزش افزوده کشاورزی	۰/۱۳**	۰/۱۵**	۰/۴۶***
عرض از مبدأ	-۸/۳۸***		
روند		-۰/۰۱***	
نقطه عطف تولید ناخالص داخلی	۳۸	۴	۱۰

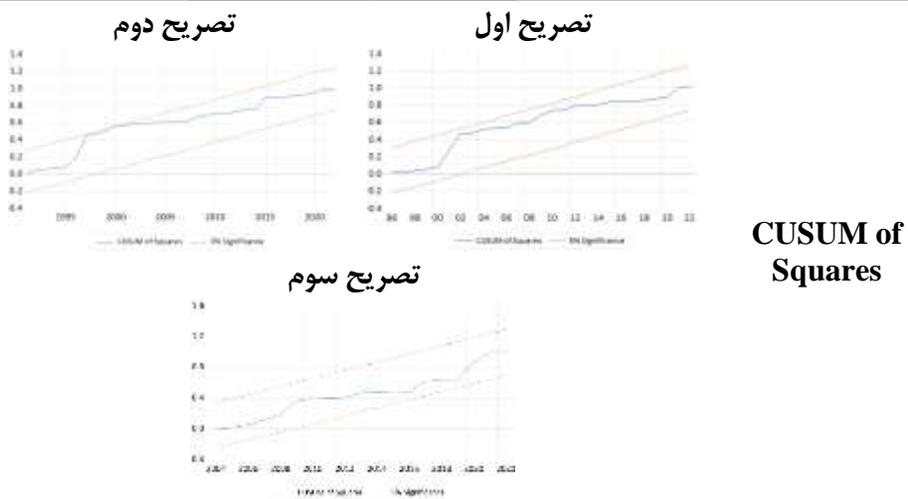
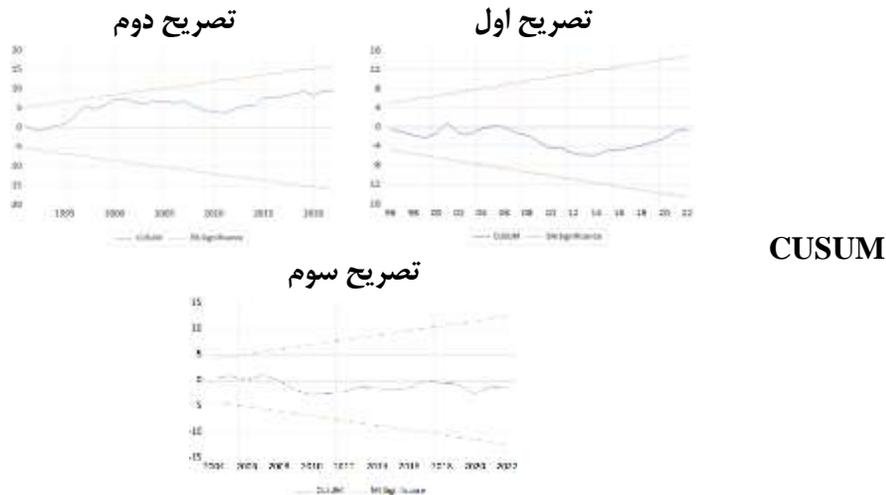
\*، \*\*، \*\*\* به ترتیب، معنی داری در سطوح ده، پنج و یک درصد

مأخذ: یافته‌های پژوهش

به منظور ارزیابی پایداری ضرایب به دست آمده از آماره‌های CUSUM و (CUSUMSQ) به CUSUM of Squares بهره گرفته شد. همان گونه که در نمودار ۴ آمده، نتایج عمدتاً حاکی از پایداری ضرایب برآوردی است. تنها در تصریح دوم و برای آماره CUSUMSQ در سال ۲۰۰۰، نمودار مرز را لمس کرده و در دوره بعد، به داخل بازه سطح معنی داری پنج درصد بازگشته است. هرچند، این میزان انحراف به ویژه بر اساس مطالعات آماری<sup>۱</sup> چندان قابل توجه نیست، اما رعایت احتیاط توصیه می‌شود.

۱- یافته‌های مطالعه تانیزاکی (Tanizaki, 1995) نشان داد که آماره آزمون CUSUMSQ، در مقایسه با آزمون CUSUM، در سطوح پایین تر معنی داری، با خطای بالاتر در ترسیم و تعیین فاصله اطمینان مواجه است، بدین معنی که در سطوح معنی داری بالاتر، ازدقت بیش تری برخوردار خواهد بود. بر این اساس، اگر سطح معنی داری به سطوح بالاتر تا ده درصد (مطابق مطالعه یادشده) افزایش یابد تا دقت نسبی آزمون CUSUMSQ افزایش یابد، انحراف یادشده قطعاً قابل اغماض خواهد بود و یا اینکه اگر برای سطح معنی داری پنج درصد، اتکای بیشتری به آزمون CUSUM صورت گیرد، مطابق نمودار ترسیم شده، پایداری ضرایب با اطمینان بالا قابل پذیرش خواهد بود. در نتیجه، افزون بر اینکه لمس نمودار در سطح بسیار محدود صورت گرفته، قضاوت بر اساس ماهیت و توانایی دو آزمون نیز دال بر قابل قبول بودن سطح پایداری ضرایب به دست آمده است.

بررسی اثر ردپای بوم‌شناختی و.....



#### نمودار ۴- آماره‌های CUSUM و CUSUM of Squares

#### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در چند دهه اخیر، ارتباط بین رشد اقتصادی و کیفیت محیط زیست در کانون توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. گراسمن و کروگر (Grossman & Krueger, 1995)، با بررسی ارتباط بین کیفیت هوا و رشد اقتصادی، نشان دادند که بین رشد اقتصادی و کیفیت هوا رابطه‌ای به شکل U

معکوس وجود دارد، که به منحنی زیست‌محیطی کوزنتس شهرت یافته است. متغیرهای اصلی این مدل شامل تولید ناخالص داخلی و توان دوم تولید ناخالص داخلی به‌عنوان متغیر مستقل و میزان انتشار دی‌اکسید کربن به‌عنوان متغیر وابسته است. در سال‌های اخیر، با توسعه این مدل، متغیرهای دیگری از جمله میزان مصرف انرژی و آزادی تجاری و ارزش افزوده بخش‌های اقتصاد مورد توجه قرار گرفته است. اما یکی از چالش‌های موجود در زمینه آزمون فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس انتخاب معیار مناسب برای شاخص کیفیت محیط زیست است. بسیاری از مطالعات با تأکید بر کیفیت هوا از متغیرهای مرتبط با کیفیت هوا مانند میزان انتشار آلودگی یا ردپای کربن استفاده کرده‌اند. در سال‌های اخیر، ردپای بوم‌شناختی به‌عنوان شاخص مناسب برای تعیین کیفیت محیط زیست پذیرفته شده است، زیرا این متغیر ابعاد جامع‌تر محیط زیست شامل زمین‌های زراعی، چراگاه‌ها، مناطق ماهی‌گیری، جنگل‌ها و ردپای کربن را در نظر می‌گیرد.

مطالعه حاضر بر آزمون فرضیه زیست‌محیطی کوزنتس در ایران و مقایسه سه معیار میزان انتشار آلودگی، ردپای بوم‌شناختی و کسری بوم‌شناختی به‌عنوان معیارهای نماینده کیفیت محیط زیست تمرکز داشته و علاوه بر آزادی تجارت و میزان مصرف انرژی، از سهم ارزش افزوده بخش کشاورزی نیز به‌عنوان معیاری از ترکیب تولید اقتصاد از منظر بوم‌شناختی استفاده شده است. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که در هر سه تصریح، منحنی زیست‌محیطی کوزنتس در بلندمدت در ایران تأیید می‌شود. نقطه عطف در تصریح‌های اول و سوم بالاتر از مقدار فعلی سرانه تولید ناخالص داخلی است. اما در تصریح دوم که از متغیر ردپای بوم‌شناختی استفاده شده، نقطه عطف پایین‌تر از مقدار فعلی تولید ناخالص داخلی است. نتایج به‌دست‌آمده منطبق بر برخی از مطالعات اخیر در این زمینه (Tarazkar et al., 2018; Fathi & Ashktorab, 2023; Heydari et al., 2019) بوده و در اینجا، نکته حائز اهمیت اختلاف زیاد نقاط عطف است، به‌گونه‌ای که اگر ردپای بوم‌شناختی به‌عنوان شاخص نماینده کیفیت محیط زیست در نظر گرفته شود، تولید ناخالص داخلی در مرحله نزولی منحنی قرار دارد، در حالی که اگر انتشار آلودگی بدین منظور در نظر گرفته شود، اقتصاد ایران در مرحله اول منحنی است. به‌دیگر سخن، اگرچه با افزایش تولید ناخالص داخلی، انتشار آلودگی نیز افزایش می‌یابد، اما وضعیت سایر ابعاد کیفیت محیط زیست که در ردپای بوم‌شناختی دیده شده است، مطلوب‌تر خواهد بود. به‌طور مشخص، سایر ابعاد می‌تواند اجزایی به‌جز انتشار دی‌اکسید کربن در محاسبه ردپای بوم‌شناختی را شامل شود، که عبارت‌اند از بهره‌برداری از مراتع و زمین‌های کشاورزی، بهره‌برداری از آبزیان و استفاده از جنگل‌ها. این یافته به معنی کاهش فشار بر منابع زیست‌محیطی بخش کشاورزی و از این‌رو، کاهش سهم بخش کشاورزی

در اقتصاد است، که منطبق بر فرآیند توسعه اقتصادی است. در مطالعاتی هم که به پیش‌بینی نقش بخش کشاورزی در اقتصاد ایران پرداخته‌اند، کاهش سهم این بخش طی سال‌های آتی تأیید شده است (Keshavarz & Farajzadeh, 2024). برخلاف نتایج مطالعه حاضر، طراز کار و همکاران (Tarazkar et al., 2018) نشان دادند که اگر ردپای بوم‌شناختی به‌عنوان شاخص کیفیت محیط زیست در نظر گرفته شود، با افزایش تولید ناخالص داخلی، ردپای بوم‌شناختی نیز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که دوره بررسی در مطالعه یادشده ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۳ بوده است. متغیر آزادی تجارت نشان داد که آزادی تجارت در ایران منجر به بهبود کیفیت محیط زیست از منظر انتشار آلودگی و ردپای بوم‌شناختی می‌شود. البته، باید توجه داشت که این بهبود کیفیت در شاخص ردپای بوم‌شناختی کمتر است. نتایج سایر مطالعات در این زمینه متفاوت است. برخی مطالعات مانند طاهری و همکاران (Taheri et al., 2013) و فرج‌زاده و همکاران (Farajzadeh et al., 2017) برای ایران، دوانگ و همکاران (Duong et al., 2022) و تورککول (Dogan & Turkekul, 2016) برای کشورهای منطقه آسیا و اقیانوسیه و همچنین، پارساشریف و همکاران (Parsasharif et al., 2020) برای کشورهای آسیایی و اروپایی نشان دادند که افزایش آزادی تجارت با کاهش انتشار آلودگی همراه است؛ اما از سوی دیگر، آگبولا و بکون (Agboola & Bekun, 2019) ضریب آزادی تجارت را برای کشور نیجریه مثبت گزارش کردند. در ایران، ضریب این متغیر در مطالعه طراز کار و همکاران (Tarazkar et al., 2018) ۰/۱۵ و در برخی دیگر از مطالعات (Tarazkar, 2017; Golkhandan & Sahraei, 2021) نیز مثبت ارزیابی شده و همچنین، مصرف انرژی در راستای تخریب بیشتر محیط زیست ارزیابی شده است. نتایج این بخش نشان می‌دهد که میزان مصرف انرژی، بیش از آنکه منجر به افزایش آلودگی شود، بر سایر ابعاد کیفیت محیط زیست تأثیر می‌گذارد. در اغلب مطالعات نیز اثر منفی افزایش مصرف انرژی بر کیفیت محیط زیست تأیید شده است (Parsasharif et al., 2020; Ansari et al., 2020; Mahdavian et al., 2022a; Tarazkar et al., 2018). برای نمونه، در مطالعه آگبولا و بکون (Agboola & Bekun, 2019)، مشخص شد که افزایش سهم بخش کشاورزی در تولید اقتصاد ایران با فشار بر منابع زیست-محیطی و تخریب محیط زیست همراه خواهد بود. این یافته می‌تواند به معنی تغییر محسوس ترکیب تولید به‌ویژه به نفع صنایع وابسته به کشاورزی و تغییر ترکیب انرژی باشد، به‌گونه‌ای که ترکیب مصرف انرژی به آلاینده‌گی بیشتر خواهد انجامید.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مبنی بر اثر مطلوب تجارت بر متغیرهای زیست‌محیطی منتخب، افزایش آزادسازی تجاری توصیه و همچنین، پیشنهاد می‌شود که برای کنترل میزان مصرف انرژی،

سیاست‌هایی مانند کاهش یارانه‌های انرژی، توسعه فناوری ارتقادهنده بهره‌وری انرژی و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر که آسیب‌های بوم‌شناختی بسیار کمتری را تحمیل می‌کنند، در دستور کار باشد، چراکه سهم زیادی از افزایش ردپای بوم‌شناختی ناشی از میزان مصرف انرژی است. لازم به ذکر است که بیش از ۹۵ درصد از مصرف انرژی در ایران از انرژی‌های فسیلی است (World Bank, 2024). بخش مهمی از منابع خدمات بوم‌شناختی در بخش کشاورزی قرار دارد و سرمایه زیست‌محیطی و طبیعی نهاده مهمی در تولید کشاورزی محسوب می‌شود. از این‌رو، بهبود بهره‌وری این سرمایه در بخش کشاورزی می‌تواند منجر به کاهش آسیب‌های بوم‌شناختی شود. بدین منظور، لازم است که سهم عوامل تولید طبیعی به نفع عوامل سرمایه‌ای فیزیکی کاهش یابد.

هرچند، جهت اثرگذاری متغیرهای توضیحی بر هر سه متغیر وابسته به کار گرفته شده مشابه بود، اما تفاوت مهمی در مقادیر نقاط عطف مشاهده شد. این یافته حاکی از ابعاد گسترده محیط زیست است، به‌گونه‌ای که هر کدام از متغیرها برخی از این ابعاد را شامل می‌شوند و از این‌رو، استفاده از دیگر متغیرهای متعدد نمایانگر کیفیت محیط زیست پیشنهاد می‌شود. از مساعدت‌های مهم مطالعه حاضر به ادبیات موجود، استفاده از رهیافت یا روش گروهی پردازش داده‌ها (GMDH) بود. این روش به‌ویژه در مورد عوامل مؤثر بر کیفیت محیط زیست که برای آنها، دامنه‌ای گسترده از متغیرها مطرح است، می‌تواند مطلوب باشد، زیرا وجود تعداد متغیرهای متعدد و در برخی مواقع، رقیب می‌تواند چالش‌هایی برای دستیابی به تخمین‌های کارآ ایجاد کند.

## منابع

1. Abrishami, H., Bourbour, F., & Aghajani, M. A. (2014). Prediction of natural gas price using GMDH type neural network: a case study of USA market. *The International Journal of Humanities*, 21(3), 1-16. DOR: 20.1001.1.25382640.2014.21.3.2.0.
2. Abrishami, H., Mehrara, M., Ahrari, M., & Nouri, M. (2010). An investigation of nonlinear GMDH causality between inflation and productivity growth in Iran. *Journal of Economics and Modelling*, 1(2), 131-160.
3. Acevedo-Ramos, J. A., Valencia, C. F., & Valencia, C. D. (2023). The environmental Kuznets curve hypothesis for Colombia: impact of economic development on greenhouse gas emissions and ecological footprint. *Sustainability*, 15(4), 3738. DOI: 10.3390/su15043738.

4. Agboola, M. O., & Bekun, F. V. (2019). Does agricultural value added induce environmental degradation? Empirical evidence from an agrarian country. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(27), 27660-27676. DOI: 10.1007/s11356-019-05943-z.
5. Ahmadi, M. H., Ahmadi, M. A., Mehrpooya, M., & Rosen, M. A. (2015). Using GMDH neural networks to model the power and torque of a stirling engine. *Sustainability*, 7(2), 2243-2255. DOI: 10.3390/su7022243.
6. Akadiri, S., Alkawfi, M. M., Uğural, S., & Akadiri, A. C. (2019). Towards achieving environmental sustainability target in Italy: the role of energy, real income and globalization. *Science of the Total Environment*, 671, 1293-1301. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.448.
7. Al Mamun, M., Sohag, K., Mia, M. A. H., Uddin, G. S., & Ozturk, I. (2014). Regional differences in the dynamic linkage between CO<sub>2</sub> emissions, sectoral output and economic growth. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 1-11. DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.091.
8. Altıntaş, H., & Kassouri, Y. (2020). Is the environmental Kuznets curve in Europe related to the per-capita ecological footprint or CO<sub>2</sub> emissions? *Ecological Indicators*, 113, 106187. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106187.
9. Amirnejad, H., & Asadpour Kordi, M. (2014). The group examined the relationship between air pollution, GDP, energy intensity and openness in Iran (Applications of Environmental Kuznets hypothesis). *Agricultural Economics*, 8(3), 117-132. [In Persian]
10. Ansari, M. A., Haider, S., & Khan, N. A. (2020). Environmental Kuznets curve revisited: an analysis using ecological and material footprint. *Ecological Indicators*, 115, 106416. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106416.
11. Bagheri, S. (2023). Investigating a non-cyclical diagram between energy consumption, carbon dioxide emissions and economic growth: a case study of Iran. *Environment and Interdisciplinary Development*, 8(81), 19-29. DOI: 10.22034/envj.2023.338377.1199. [In Persian]

12. Bagliani, M., Bravo, G., & Dalmazone, S. (2008). A consumption-based approach to environmental Kuznets curves using the ecological footprint indicator. *Ecological Economics*, 65(3), 650-661. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.01.010.
13. Destek, M. A., Ulucak, R., & Dogan, E. (2018). Analyzing the environmental Kuznets curve for the EU countries: the role of ecological footprint. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(29), 29387-29396. DOI: 10.1007/s11356-018-2911-4.
14. Dinda, S. (2005). A theoretical basis for the environmental Kuznets curve. *Ecological Economics*, 53(3), 403-413. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2004.10.007.
15. Dogan, E., & Turkekul, B. (2016). CO<sub>2</sub> emissions, real output, energy consumption, trade, urbanization and financial development: testing the EKC hypothesis for the USA. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 1203-1213. DOI: 10.1007/s11356-015-5323-8.
16. Dogan, E., Ulucak, R., Kocak, E., & Isik, C. (2020). The use of ecological footprint in estimating the environmental Kuznets curve hypothesis for BRICST by considering cross-section dependence and heterogeneity. *Science of the Total Environment*, 723, 138063. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138063.
17. Duong, N. B., Mayers, E. E., Nguyen, D. N., Dau, T. H., & Duong, H. T. T. (2022). Extended environmental Kuznets curve in Asia-Pacific countries: an empirical analysis. *Journal of International Economics and Management*, 22(3), 46-61. DOI: 10.38203/jiem.022.3.0053.
18. Farajzadeh, Z., Zhu, X., & Bakhshoodeh, M. (2017). Trade reform in Iran for accession to the World Trade Organization: analysis of welfare and environmental impacts. *Economic Modelling*, 63, 75-85. DOI: 10.1016/j.econmod.2017.02.006.
19. Farajzadeh, Z., & Nematollahi, M. A. (2023). Components and predictability of pollutants emission intensity. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 9(2), 241-260. DOI: 10.22034/gjesm.2023.02.05.

20. Fathi, F., & Ashktorab, N. (2023). The effect of Coronavirus outbreaks on the future of economic growth and carbon dioxide emissions in low- and middle-income countries. *Agricultural Economics Research*, 15, 107-117. DOI: 10.30495/JAE.2023.28470.2272. [In Persian]
21. GFN (2024). Country trends. Footprint Data Foundation, Global Footprint Network (GFN). Available at <https://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?type=BCpc,EFCpc&cn=5001>.
22. Gokmenoglu, K. K., & Taspinar, N. (2018). Testing the agriculture-induced EKC hypothesis: the case of Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 22829-22841.
23. Golkar, E., Ahmadi, M. M., Qaderi, K., & Rahimpour, M. (2019). Prediction of peak velocity of pollutant transport in rivers using Group Method of Data Handling (GMDH) and intelligent hybrid method of GMDH-HS. *Journal of Water and Wastewater*, 30(1), 64-76. DOI: 10.22093/wwj.2018.83092.2389. [In Persian]
24. Golkhandan, A., & Sahraei, S. (2021). Assessing the impact of internet influence on energy consumption and air pollution in Iran. *Environment and Interdisciplinary Development*, 5(70), 17-30. DOI: 10.22034/envj.2021.181316. [In Persian]
25. Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377. DOI: 10.2307/2118443.
26. Hassan, M. N., Sulaiman, M. N., & Ibrahim, N. A. (2010). Group Method of Data Handling (GMDH) for economic evaluation of air pollution. DOI: 10.2139/ssrn.1557193.
27. Helmi, H. , Bakhtiari, B., & Qaderi, K. (2019). Drought forecasting using Group Method of Data Handling (GMDH) and Adaptive Neural-Fuzzy Inference System (ANFIS) in different climates. *Journal of Climate Research*, 35, 1-18. [In Persian]

28. Heydari, M., Khadem Alizadeh, A., & Khorsandi, M. (2019). Investigating the effect of economic growth on the consumption of water resources in the framework of the environmental Kuznets curve. *Agricultural Economics Research*, 45(1), 163-180. [In Persian]
29. Iqbal, S. (2016). Projections of inflation dynamics for Pakistan: GMDH approach. *Journal of Economics and Political Economy*, 3(3), 536-559. DOI: 10.1453/jepe.v3i3.904.
30. Ivakhnenko, A. G., & Ivakhnenko, G. A. (1995). The review of problems solvable by algorithms of the Group Method of Data Handling (GMDH). *Pattern Recognition and Image Analysis c/c of Raspoznvaniye Obrazov i Analiz Izobrazhenii*, 5, 527-535.
31. Jiang, L., He, S., Zhong, Z., Zhou, H., & He, L. (2019). Revisiting environmental Kuznets curve for carbon dioxide emissions: the role of trade. *Structural Change and Economic Dynamics*, 50, 245-257. DOI: 10.1016/j.strueco.2019.07.004.
32. Kargar Dehbidi, N., & Bakhshoodeh, M. (2019). Comparison of the fossil and renewable energies impacts on carbon dioxide emissions in OPEC and Asian countries without oil reserves. *Environmental Researches*, 10(19), 313-326. [In Persian]
33. Kargar Dehbidi, N., & Esmaili, A. (2018). Assessing the effects of economic factors on environmental pollution in Iran. *Agricultural Economics Research*, 9(36), 85-108. [In Persian]
34. Keshavarz, A., & Farajzadeh, Z. (2024). Climate change and agricultural trade in Iran: a dynamic input-output analysis. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 37(4), 451-468. DOI: 10.22067/jead.2024.85467.1227. [In Persian]
35. Keshavarz, A., Farajzadeh, Z., & Tarazkar, M. H. (2021). Indicators for natural capital: changes and forecasts. *Agricultural Economics Research*, 13(1), 235-260. [In Persian]

36. Kitzes, J., & Wackernagel, M. (2009). Answers to common questions in ecological footprint accounting. *Ecological Indicators*, 9(4), 812-817. DOI: 10.1016/j.ecolind.2008.09.014.
37. Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., & Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569), 367-371.
38. Lotfalipoor, M. R., Hooshmand, M., Elami, E., & Bostan, Y. (2018). Effects of the industrial sector economic growth on the quality of the environment in Iran (application of ARDL model). *Environmental Researches*, 8(16), 103-114. DOR: 20.1001.1.20089597.1396.8.16.14.2. [In Persian]
39. Mahdavian, S. M., Mohammadi, H., Dehbashi, V., & Dehdashti, M. (2022a). Assessing the effects of political and economic freedom on environmental pollution in OIC member countries. *Agricultural Economics Research*, 14(2), 14-33. DOI: 10.30495/jae.2022.22312.2059. [In Persian]
40. Mahdavian, S. M., Ziaee, S., & Keikha, A. (2022b). Investigating factors affecting environmental pollution in Iran. *Agricultural Economics Research*, 13(4), 17-40. DOI: 10.30495/jae.2021.20349.1970. [In Persian]
41. Mehrara, M., Baharadmehr, N., Ahrari, M., & Mohaghegh, M. (2010). Prediction of oil price volatility using GMDH neural network. *Energy Economy Studies*, 7(25), 89-112. [In Persian]
42. Mohammadi, H., & Heydarzadeh, S. (2015). The impact of factors affecting environmental pollution with emphasis on trade openness in different countries (case study: CO2 emission). *Journal of Agricultural Economics and Development*, 28(3), 113-123. [In Persian]
43. Molaei, M., & Basharat, E. (2015). Investigating Relationship between Gross Domestic Product and Ecological Footprint as an Environmental Degradation Index. *Journal of Economic Research (Tahghighat- E- Eghtesadi)*, 50(4), 1017-1033. DOI: 10.22059/jte.2015.56156. [In Persian]
44. Molaei, M., Besharat, E., & Mohammadi, M. (2020). Factors affecting the consumption of ecological resources in Iran using economic approach.

- Journal of Environmental Science and Technology*, 22(8), 377-388. [In Persian]
45. Molaei, M., Kavooosi Kalashami, M., & Rafiee, H. (2010). Investigation of cointegration relationship between per capita GDP and per capita CO<sub>2</sub> emission and existence of environmental Kuznets curve for CO<sub>2</sub> in Iran. *Environmental Sciences*, 8(1), 205-216. [In Persian]
  46. Moutinho, V., Madaleno, M., & Elheddad, M. (2020). Determinants of the Environmental Kuznets Curve considering economic activity sector diversification in the OPEC countries. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122642. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122642.
  47. Naraghi, N., Moghaddasi, R., & Mohamadinejad, A. (2022). Study of the relationship between environmental pollution and agricultural growth in selected oil and non-oil countries. *Journal of Agricultural Economics Research*, 14(2), 85-100. DOI: 10.30495/jae.2022.19742.1943. [In Persian]
  48. Ojaghlou, M., Ugurlu, E., Kadhubek, M., & Thalassinos, E. (2023). Economic activities and management issues for the environment: an Environmental Kuznets Curve (EKC) and STIRPAT analysis in Turkey. *Resources*, 12(5), 57. DOI: 10.3390/resources12050057.
  49. Pablo-Romero, M. D. P., Pozo-Barajas, R., & Molleda-Jimena, G. (2021). Residential energy environmental Kuznets curve extended with non-linear temperature effects: a quantile regression for Andalusian (Spain) municipalities. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(35), 48984-48999. DOI: 10.1007/s11356-021-13608-z.
  50. Panayotou, T. (1993). Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development. ILO Working Papers 992927783402676, International Labour Organization (ILO).
  51. Parsasharif, H., Amirnejad, H., & Taslimi, M. (2020). Investigating factors affecting the ecological footprint of selected Asian and European countries. *Agricultural Economics Research*, 13(2), 155-172. DOR: 20.1001.1.20086407.1400.13.2.8.9. [In Persian]

52. Pesaran, H. H., & Shin, Y. (1998). Generalized impulse response analysis in linear multivariate models. *Economics Letters*, 58(1), 17-29. DOI: 10.1016/S0165-1765(97)00214-0.
53. Raei, H., Maleki, A., & Farajzadeh, Z. (2024). Analysis of energy policy reform in Iran: energy and emission intensity changes. *Economic Analysis and Policy*, 81, 1535-1557. DOI: 10.1016/j.eap.2024.02.023.
54. Rezaei, M. H., Sadeghzadeh, M., Alhuyi Nazari, M., Ahmadi, M. H., & Astaraei, F. R. (2018). Applying GMDH artificial neural network in modeling CO<sub>2</sub> emissions in four Nordic countries. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 13(3), 266-271. DOI: 10.1093/ijlct/cty026.
55. Ridzuan, N. H. A. M., Marwan, N. F., Khalid, N., Ali, M. H., & Tseng, M. L. (2020). Effects of agriculture, renewable energy, and economic growth on carbon dioxide emissions: evidence of the environmental Kuznets curve. *Resources, Conservation and Recycling*, 160, 104879. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104879.
56. Shaverdi, M., Fallahi, S., & Bashiri, V. (2012). Prediction of stock price of Iranian petrochemical industry using GMDH-type neural network and genetic algorithm. *Applied Mathematical Sciences*, 6(7), 319-332.
57. Shin, Y., & Schmidt, P. (1992). The KPSS stationarity test as a unit root test. *Economics Letters*, 38(4), 387-392. DOI: 10.1016/0165-1765(92)90023-R.
58. Siddiki, J. U. (2000). Black market exchange rates in India: an empirical analysis. *Empirical Economics*, 25, 297-313.
59. Tahamipour Zarandi, M., Abedi, S., Safahan, A., & Fathollahi, S. (2021). Investigating the effect of value added of the industrial sector on the CO<sub>2</sub> discharge in Iran: Kuznets Curve approach. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 6(1), 85-100. DOI: 10.22047/srjasnr.2021.128796 [In Persian]
60. Taheri, F., Mousavi, S. N., & Farajzadeh, Z. (2013). Analysis of the effect of trade on the spread of pollution among a group of developing countries. *Agricultural Economics Research*, 14(2), 47-67. [In Persian]

61. Tanizaki, H. (1995). Asymptotically exact confidence intervals of CUSUM and CUSUMSQ tests: a numerical derivation using simulation technique. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 24(4), 1019-1036. DOI: 10.1080/03610919508813291.
62. Tarazkar, M. H., Ghorbanian, E., & Bakhshoodeh, M. (2018). The effect of economic growth on environmental sustainability in Iran: application of ecological footprint. *Journal of Environmental and Natural Resource Economics*, 2(3), 51-70. DOI: 10.22054/enr.2017.9067.
63. Tarazkar, M. H., Kargar Dehbidi, N., & Bakhshoodeh, M. (2017). The effect of economic development and urbanization on the spread of pollution in Iran. *Agricultural Economics Research*, 38(2), 155-174. [In Persian]
64. Ullah, A., Khan, D., Khan, I., & Zheng, S. (2018). Does agricultural ecosystem cause environmental pollution in Pakistan? Promise and menace. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 13938-13955. DOI: 10.1007/s11356-018-1530-4.
65. Wackernagel, M., & Rees, W. E. (1997). Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: economics from an ecological footprint perspective. *Ecological Economics*, 20(1), 3-24. DOI: 10.1016/S0921-8009(96)00077-8.
66. Wiedmann, T., & Barrett, J. (2010). A review of the ecological footprint indicator: perceptions and methods. *Sustainability*, 2(6), 1645-1693. DOI: 10.3390/su2061645.
67. World Bank (2024). Overview: Iran, Islamic Rep. Available at <https://data.worldbank.org/country/IR>.
68. Xepapadeas, A. (2005). Economic growth and the environment (Chapter 23). In: *Handbook of environmental economics*, 3, 1219-1271. DOI: 10.1016/S1574-0099(05)03023-8.