Journal of Environmental and Natural Resource Economics
Volume 4, Number 10, Winter 2024, pp. 91-122
Jiee.atu.ac.ir
DOI: http://dx.doi.org/10.22054/EENR.2025.83526.198

ATU PRESS

Original
Received: 22/December/2024
Accepted: 19/May/2025
ISSN: 2538-4791
eISSN: 2538-483X

Investigating the Impact of Urbanization Rate Uncertainty and Hydroelectric Energy Consumption on Ecological Footprint in Iran; Fuzzy Regression Approach

Masoud Cheshmaghil — PhD Candidate in Public Sector Economics, Faculty of Economics and Administrative Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Javad Shahraki * — Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Economics and Administrative Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Reza Ashraf Ganjoei — Assistant Professor, Department of Economics, Faculty of Economics and Administrative Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Abstract

Introduction

The ecological footprint serves as a valuable indicator for assessing anthropogenic pressures on ecosystems and the environment. Given its significance, this study investigates the impact of uncertainty in urbanization rates and hydropower energy consumption on Iran's ecological footprint, while also examining the effects of natural resource rents, per capita income, and industrial production. A fuzzy regression model is employed to analyze these relationships over the period 1970-2022. By leveraging the capabilities of fuzzy regression modeling, the intensity of each determinant's influence is quantified in terms of the center, left spread, and right spread of fuzzy sets. Under conditions of high uncertainty represented by a membership degree of 0.9 the right spread results indicate that urbanization growth is the primary driver of ecological footprint expansion, highlighting the need for green urban technologies. Natural resource rents exert a significant impact, necessitating optimal management strategies. The effect of per capita income varies depending on prevailing consumption patterns, while industrial production increases the ecological footprint primarily through energy-intensive processes, underscoring the importance of adopting clean technologies. Hydropower consumption ranks third in terms of ecological impact, suggesting that even renewable energy sources may entail environmental trade-offs when deployed at scale. In this context, renewable energies valued for their environmental compatibility, non-polluting nature, renewability, and global availability are particularly attractive, especially for developing countries pursuing sustainable development pathways.

* Corresponding Author: j.shahraki@eco.usb.ac.ir
How to Cite: Cheshmaghil, M., Shahraki, J., Ashraf Ganjoei, R. (2024). Investigating the Impact of Urbanization Rate Uncertainty and Hydroelectric Energy Consumption on Ecological Footprint in Iran; Fuzzy Regression Approach. Journal of Environmental and Natural Resource Economics, 10(4), pp. 91-122.

Introduction

Urbanization, one of the most defining phenomena of the modern era, has attracted considerable attention from policymakers and researchers in recent decades due to its profound economic and social implications. This process involves the migration of populations and labor from rural areas and agricultural sectors to urban centers, driven by the search for employment in industrial and urban-based occupations. Concurrently, environmental degradation resulting from human activities has emerged as a critical global challenge, with significant impacts not only on ecosystems and natural resources but also on economic outcomes. In response, clean energy has become a cornerstone of sustainable development strategies, valued for its environmental compatibility and now deeply integrated into national energy planning and policy frameworks.

At the macroeconomic level, decision-making under uncertainty has been widely studied, as unpredictable conditions complicate long-term planning and shape economic behavior. Key sources of such uncertainty include shifts in government policies and fluctuations in macroeconomic indicators. The interplay between rapid urbanization and hydropower energy consumption presents a dual challenge for sustainable development: while expanding cities require a reliable and scalable energy supply, maintaining ecological balance remains imperative. Against this backdrop, this paper investigates the impacts of urbanization rates and hydropower energy consumption on the ecological footprint and proposes policy-oriented strategies to optimize sustainability trajectories.

Methods and Materials

Annual data required to assess the impact of uncertainty in urbanization rates and hydropower energy consumption on Iran's ecological footprint were collected for the period 1970-2022. A fuzzy regression approach was employed, with model estimation performed using MATLAB software. This method derives the optimal regression equation by minimizing the overall level of fuzziness specifically, by reducing the total width of the fuzzy membership functions associated with the regression coefficients.

Fuzzy regression models differ fundamentally from classical regression techniques. Traditional regression relies on strict statistical assumptions, including normality of errors, absence of autocorrelation, and homoscedasticity (constant error variance). In contexts where these assumptions are difficult to satisfy particularly when data are imprecise, ambiguous, or subject to uncertainty fuzzy regression provides a robust and insightful alternative. It represents uncertainty through possibility distributions and membership functions, thereby accommodating vagueness in both data and relationships without requiring probabilistic error structures

Results and Discussion

The analysis of the effects of uncertainty in hydropower energy consumption, urbanization rates, natural resource rents, per capita income, and industrial production on Iran's ecological footprint was conducted using fuzzy regression concepts specifically, membership degree and the left spread, center, and right spread of fuzzy sets. Membership degrees of 0.1 and 0.9 represent conditions of reduced and increased influence, respectively, of the aforementioned factors on the ecological footprint. Under high-uncertainty conditions (membership degree = 0.9), the right fuzzy spread estimates yield coefficients of 1.244, 2.851, 1.898, 0.657, and -3.6447×10^{-16} for hydropower consumption, urbanization, natural resource rents, per capita income, and industrial

production, respectively indicating their substantial and mostly positive contributions to ecological footprint expansion. Conversely, the left fuzzy spread results are −1.244, −2.851, −0.715, −0.657, and -3.6447×10^{-16}, reflecting the lower bounds of these impacts under reduced uncertainty (membership degree = 0.1).

Existing domestic and international studies reviewed in the literature have typically examined the determinants of the ecological footprint (e.g., urbanization, hydropower use, carbon emissions, and economic growth) using classical econometric methods such as ordinary least squares (OLS) or panel regression. These approaches estimate single-point coefficients and rely on precise, deterministic data. However, such models require complete and unambiguous information due to structural assumptions, including error normality, homoscedasticity, and the absence of measurement error conditions often violated in sustainability-related analyses.

In contrast, this study employs fuzzy regression, which offers greater flexibility in modeling uncertain and imprecise systems. Rather than producing a single estimated value for each parameter, fuzzy regression generates a fuzzy output characterized by the center, left spread, and right spread, thereby capturing the full range of possible impacts under varying degrees of uncertainty. Moreover, by incorporating the concept of membership degree, this approach explicitly accounts for ambiguity in both data and relationships. Consequently, fuzzy regression demonstrates superior distributive power and robustness in ecological footprint analysis, particularly when dealing with volatile, incomplete, or inherently uncertain socioeconomic and environmental variables.

Conclusion

This study specifically investigates the impact of uncertainty in urbanization rates and hydropower energy consumption on Iran's ecological footprint, while also accounting for the effects of natural resource rents, per capita income, and industrial production. To address the inherent imprecision in these variables, a fuzzy regression model with symmetric coefficients known for its high modeling flexibility was employed. The analysis draws on standard fuzzy regression concepts, namely the fuzzy center, right spread, and left spread, to characterize the behavior and influence of each explanatory variable.

This modeling approach provides valuable insights for national policymaking, offering a robust framework to inform sustainable development strategies and guide planners in managing environmental pressures. The results indicate that the fuzzy center, right spread, and left spread represent, respectively, the average, maximum, and minimum effects of the selected determinants on Iran's ecological footprint. Specifically, under conditions of high uncertainty (membership degree = 0.9), the right fuzzy spread yields coefficients of 1.244 (hydropower consumption), 2.851 (urbanization), 1.898 (natural resource rents), 0.657 (per capita income), and -3.6447×10^{-16} (industrial production). Conversely, the left fuzzy spread reflecting lower-bound impacts produces values of −1.244, −2.851, −0.715, −0.657, and -3.6447×10^{-16} for the same variables, respectively. These findings highlight the asymmetric and uncertain nature of the relationships between key socioeconomic drivers and environmental pressure in Iran.

Keywords: Ecological footprint, urbanization rate, hydropower energy consumption, uncertainty

JEL Classification: D81 , Q56 , Q41 , R14

فصلنامه محیط زیست و منابع طبیعی
سال ٤، شماره ١٠، زمستان ١٤٠٣، صفحات ٩١-١٢٢
Jiee.atu.ac.ir
DOI: http://dx.doi.org/10.22054/EENR.2025.83526.198

مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹
ISSN: ۴۷۹۱-۲۵۳۸
eISSN: ۴۸۳-۲۵۳۸X

بررسی تأثیر عدم قطعیت نرخ شهرنشینی و مصرف انرژی برق آبی بر ردپای زیست‌محیطی در ایران؛ رویکرد رگرسیون فازی[1]

مسعود چشم‌اغیل دانشجوی دکتری رشته اقتصاد بخش عمومی، دانشکده اقتصاد و علوم اداری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

جواد شهرکی * دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و علوم اداری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

رضا اشرف گنجویی استادیار گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و علوم اداری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

ردپای زیست‌محیطی ابزاری کارآمد است که می‌توان با استفاده از آن فشارهای واردشده به زیست‌بوم و محیط زیست را ارزیابی کرد. با توجه به اهمیت موضوع در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر عدم قطعیت نرخ شهرنشینی و مصرف انرژی برق آبی بر ردپای زیست‌محیطی در ایران پرداخته شده است. همچنین تأثیر رانت منابع طبیعی، درآمد سرانه و تولیدات صنعتی بر ردپای زیست‌محیطی نیز بررسی شده است. بدین‌منظور از الگوی رگرسیون فازی برای شناسایی این تأثیرات طی دوره ۱۴۰۱-۱۳۴۹ استفاده شده است. با توجه به قابلیت‌های الگوی رگرسیون فازی شدت تأثیرگذاری برای هریک از عوامل مؤثر بر ردپای زیست‌بوم، تحت عنوان مراکز، پهنای راست و چپ فازی محاسبه شده است. نتایج پهنای راست فازی حاکی از آن است در درجه عضویت ۰/۹ (شرایط عدم قطعیت) رشد شهرنشینی، عامل اصلی افزایش ردپای زیست‌محیطی است و نیازمند استفاده از فناوری‌های سبز است. رانت منابع طبیعی نیز تأثیر قابل توجهی دارد و باید با مدیریت بهینه منابع کنترل شود. افزایش درآمد سرانه بسته به الگوهای مصرف، تأثیر متفاوت دارد. تولیدات صنعتی نیز، با مصرف انرژی بالا، ردپای زیست‌محیطی را افزایش می‌دهند و نیازمند فناوری‌های پاک هستند. مصرف انرژی برقی‌آبی نیز بعد از دو عامل مذکور بیشترین اثر را بر رد پای زیست‌محیطی دارد. به‌طورکلی انرژی‌های تجدیدپذیر با ویژگی‌هایی همچون سازگاری با طبیعت، عدم آلودگی محیط‌زیست، تجدیدپذیری، پراکندگی و گستردگی منابع آن‌ها در تمام جهان باعث شده است تا این انرژی‌ها؛ به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه از جاذبه بیشتری برخوردار شوند.

کلیدواژه‌ها: ردپای زیست‌محیطی، نرخ شهرنشینی، انرژی برق آبی، عدم قطعیت

طبقه‌بندی JEL: R14 , Q41 , Q56 , D81

---

۱. مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری رشته اقتصاد بخش عمومی دانشگاه سیستان و بلوچستان است.

* نویسنده مسئول: j.shahraki@eco.usb.ac.ir

۱. مقدمه

ردپای زیست‌محیطی یک معیار جامع برای سنجش تخریب محیط زیست است که مساحت زمین‌ها و آب‌های مولد زیست‌محیطی مورد استفاده افراد و جمعیت را اندازه‌گیری می‌کند. این معیار به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی پایداری مورد استفاده قرار می‌گیرد و می‌تواند برای مدیریت بهره‌برداری از منابع در سطح ملی به کار رود. این شاخص به کشورها کمک می‌کند تا سبک زندگی، کالاها، خدمات، صنایع، شهرها و مناطق خود را از نظر پایداری ارزیابی کنند (شبکه ردپای جهانی، ۲۰۱۸). امروزه مردم به دلایلی مانند فرصت‌های شغلی بهتر، دسترسی به خدمات بهداشتی و آموزشی به مناطق شهری مهاجرت می‌کنند. شهرنشینی بر پایه مدرنیزاسیون اقتصادی و اجتماعی شکل گرفته و با مهاجرت روستاییان به شهرها و تبدیل مناطق روستایی به شهری همراه است (پومانیونگ و کانکو[1]،۲۰۱۹). امروزه بیش از نیمی از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کنند و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، این رقم به ۶۶ درصد برسد که معادل افزوده شدن ۲/۵ میلیارد نفر به جمعیت شهرنشین است (پیش‌بینی‌های شهرنشینی جهانی، ۲۰۱۹). رشد شهرنشینی، تقاضا برای انرژی، غذا، حمل‌ونقل، آب، مسکن، ساختمان‌های تجاری، لوازم الکترونیکی و خدمات عمومی را افزایش می‌دهد که پیامدهایی مانند تغییرات اقلیمی، آلودگی، استخراج بی‌رویه منابع و تخریب محیط زیست را در پی دارد (احمد، وانگ و علی[2]، ۲۰۱۹؛ وانگ و همکاران[3]، ۲۰۱۹).

به موازات افزایش نرخ شهرنشینی، مسائل و مشکلات جدیدی در سطح جهان به وجود آمده است که یکی از مهم‌ترین این مسائل، مشکلات زیست‌محیطی است. کشور ایران در سال‌های اخیر، رشد شتابان شهرنشینی و افزایش قابل ملاحظهٔ جمعیت شهرنشین را تجربه کرده است. مطابق آمارها جمعیت شهرنشین در ایران در نخستین سرشماری که در سال ۱۳۳۵ در کشور انجام شد، حدود ۳۲ درصد بوده که این رقم در سال ۱۴۰۰ به ۷۴ درصد کل جمعیت کشور افزایش یافته است. افزایش میزان شهرنشینی از حدود ۵۷ درصد در سال ۷۰ به رقم ۷۴ درصد در سال ۱۴۰۰ بیانگر آن است که میزان جمعیت شهرنشین کشور ظرف مدت تقریباً ۳۰ سال به بیش از دو برابر افزایش خواهد یافت. علاوه بر این کشور ایران به

1. Poumanyvong & Kaneko
2. Ahmed, Wang, & Ali
3. Wang et al.

دلیل داشتن سطح فراوانی از منابع انرژی، رشد فزایندهٔ مصرف انرژی را تجربه کرده است که این دو عامل در کنار سطح پایین فناوری‌های دوستدار طبیعت، کشور را با مسائل زیست‌محیطی مواجه کرده است.

عدم قطعیت که جنبه مهم این مقاله به حساب می‌آید به وضعیتی اشاره دارد که تصمیم‌گیری توسط فعالان اقتصادی ازجمله خانوارها، بنگاه‌ها و بخش دولتی، در شرایطی همراه با نبود اطمینان صورت می‌گیرد (پژوهشکده پولی و بانکی، ۱۳۸۷). به‌طور خاص، در سطح کلان اقتصادی، نحوه اتخاذ تصمیمات بهینه توسط سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در مواجهه با شرایط عدم اطمینان، موضوع بسیاری از تحقیقات و مطالعات بوده است. این اهمیت به‌ویژه زمانی افزایش می‌یابد که آثار این تصمیمات علاوه بر جنبه‌های اقتصادی، بر جنبه‌های فرهنگی، سیاسی و اجتماعی نیز تأثیرگذار باشد. چنین شرایطی تصمیم‌گیری برای آینده را پیچیده و دشوار کرده و تأثیراتی بر تصمیمات اقتصادی به همراه دارد.

به‌طورکلی می‌توان گفت شهرنشینی، به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی توسعه اقتصادی و اجتماعی، تأثیرات گسترده‌ای بر محیط زیست دارد. افزایش نرخ شهرنشینی، به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه، با رشد تقاضا برای انرژی، زیرساخت‌های جدید و منابع طبیعی همراه است که می‌تواند منجر به افزایش رد پای زیست‌محیطی شود. در این میان، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند برق آبی به‌عنوان راهکاری برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مطرح شده است؛ با این حال، بهره‌برداری از انرژی برق آبی نیز پیامدهای زیست‌محیطی خاص خود را دارد؛ ازاین‌رو این مقاله به بررسی اثرات نرخ شهرنشینی و مصرف انرژی برق آبی بر ردپای زیست‌محیطی و راهکارهای بهینه‌سازی این روند می‌پردازد. با توجه به آنچه بیان شد در این مطالعه با استفاده از الگوی رگرسیون فازی تأثیر عدم قطعیت عوامل مؤثر بر ردپای زیست‌محیطی از طریق پهنای راست و چپ محاسبه می‌شود. با استفاده از پهناهای مذکور می‌توان به‌طور دقیق مشخص کرد که عدم قطعیت در هر یک از متغیرهای مذکور به چه میزان ردپای زیست‌محیطی را افزایش می‌دهد؛ به‌عبارت‌دیگر با محاسبه پهنای راست و چپ برای هریک از متغیرهای مذکور می‌توان بررسی کرد که به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیرگذاری بر ردپای زیست‌محیطی به چه میزان خواهد بود. با توجه به مطالبی که بیان شد، تحقیق حاضر به دنبال پاسخ به این سؤال است که عدم قطعیت در نرخ شهرنشینی و مصرف انرژی برق آبی

به چه میزان بر ردپای زیست‌محیطی مؤثر است؟ این مقاله در پنج قسمت تنظیم شده است؛ پس از مقدمه و در بخش دوم، مبانی نظری تحقیق، در بخش سوم پیشینه تحقیق، در بخش چهارم الگوی تحقیق و روش‌شناسی تجربی تبیین شد. در بخش پنجم داده‌ها و نتایج تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت در بخش ششم نیز جمع‌بندی و پیشنهادهایی ارائه می‌شود.

۲. مبانی نظری پژوهش

الف) شهرنشینی و آثار زیست‌محیطی

یکی از عوامل کلیدی که در دهه‌های اخیر بر افزایش آلودگی زیست‌محیطی و انتشار گاز CO_2 تأثیر چشمگیری داشته، روند پرشتاب شهرنشینی است. این پدیده، به‌ویژه در پنجاه سال گذشته، سرعتی بیش از گذشته به خود گرفته و به‌طور قابل توجهی ابعاد زندگی اجتماعی و اقتصادی جوامع را متحول کرده است. ازاین‌رو، تحلیل و واکاوی دلایل گسترش جمعیت شهری، جایگاهی ویژه در مطالعات توسعه‌ای دارد. افزایش سریع شهرنشینی در کشورهای کمتر توسعه‌یافته ناشی از سه عامل اصلی است: رشد بالای جمعیت، مهاجرت گسترده از مناطق روستایی به شهری و تبدیل مناطق روستایی به شهرها. نخستین دیدگاه نظری دربارهٔ مهاجرت روستا به شهر را «راون اشتاین»، اقتصاددان انگلیسی، در سال ۱۸۵۵ ارائه داد. از سوی دیگر، «دورکیم» رشد جمعیت را عامل کلیدی این مهاجرت‌ها می‌داند و بر این باور است که مهاجرت از قرن هفدهم به‌طور رسمی آغاز شد؛ زمانی که با افزایش جمعیت، ضرورت تقسیم کار علمی در جوامع به وجود آمد (طاهرخانی، ۱۳۸۱). افزایش مهاجرت روستاییان به مناطق شهری اغلب به دلیل تخصیص منابع و بودجه‌های عمده برای توسعه شهرها رخ می‌دهد. این تغییر در سیاست‌های توسعه‌ای موجب دگرگونی ساختار جمعیتی شهرهای بزرگ شده و پیامدهایی همچون کمبودهای اقتصادی و بروز معضلات اجتماعی را به دنبال دارد. از سوی دیگر، سرمایه‌گذاری‌های کلان در حوزه تولیدات صنعتی و ایجاد فرصت‌های شغلی نیز انگیزه‌ای دیگر برای این مهاجرت‌ها محسوب می‌شود و به‌تدریج ساختار تولیدی کشور را از کشاورزی به صنعت تغییر می‌دهد. گسترش بی‌رویه و غیر مدیریت‌شدهٔ شهرها همچنین چالش‌های زیست‌محیطی گسترده‌ای ایجاد کرده که هم محیط زیست و هم کیفیت زندگی افراد را تهدید می‌کند. در حوزه اقتصاد محیط زیست، جمعیت

به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی تخریب محیط زیست محسوب می‌شود. افزایش جمعیت با بالا رفتن تقاضا برای زمین‌های کشاورزی، منابع انرژی، آب و حمل‌ونقل همراه است که پیامد آن تخریب جنگل‌ها، کاهش باروری خاک‌های کشاورزی و افزایش آلودگی زیست‌محیطی است. براساس تحقیقات بیردسال (۱۹۹۹)، رشد جمعیت در کشورهای درحال‌توسعه از طریق دو مکانیسم اصلی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای اثرگذار است. نخست، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی به دلیل تقاضای بیشتر برای انرژی در بخش‌های برق، صنعت و حمل‌ونقل. دوم، تأثیر رشد جمعیت بر انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق جنگل‌زدایی که خود عاملی برای کاهش ظرفیت جذب کربن محسوب می‌شود (صادقی و همکاران، ۱۳۹۵).

ب) نظریه نوسازی زیست‌محیطی

این نظریه در دهه ۱۹۸۰ میلادی در چند کشور اروپای غربی مانند آلمان، هلند و انگلستان شکل گرفت، توسط دانشمندان علوم اجتماعی نظیر مارتین ژانیک، آرتور پی.جی. مول و جوزف مورفی توسعه یافت. این نظریه بر آن است که جوامع صنعتی چگونه می‌توانند با بحران‌های زیست‌محیطی مقابله کنند. برخلاف نظریات سنتی، این رویکرد نه‌تنها بر بهبود اقتصادی، بلکه بر تغییرات اجتماعی و نهادی نیز تأکید دارد. در چارچوب این نظریه، شهرنشینی به‌عنوان یک فرآیند تحول اجتماعی در نظر گرفته می‌شود. پژوهشگران بر این باورند که مشکلات زیست‌محیطی اغلب در مراحل اولیه و میانی توسعه شدت می‌گیرند، اما با پیشرفت در فرآیند نوسازی، این مسائل کاهش می‌یابند. برای مثال، جوامعی که مفهوم پایداری محیط زیست را در اولویت قرار می‌دهند، از طریق استفاده از فناوری‌های نوین، افزایش تراکم شهری و تمرکز بر صنایع خدماتی، می‌توانند مخرب زیست‌محیطی رشد اقتصادی را کاهش دهند (کرنشاو و جنکینز[1]، ۱۹۹۱؛ گولدسون و مورفی[2]، ۱۹۹۷؛ مول و اسپارگارن[3]، ۲۰۰۰). این نظریه نشان می‌دهد که نوسازی نه‌تنها می‌تواند موجب کاهش مشکلات زیست‌محیطی شود، بلکه مسیری برای تلفیق توسعه اقتصادی و حفظ محیط زیست فراهم می‌کند.

1. Crenshaw & Jenkins
2. Gouldson & Murphy
3. Mol & Spaargaren

ج) نظریه تغییر محیط زیست به فضای شهری

این نظریه ابزاری مؤثر برای پاسخ به این سؤال است که «شهرها با چه نوع چالش‌های زیست‌محیطی روبه‌رو هستند؟» و به‌طور ویژه به تحلیل و بررسی مسائل زیست‌محیطی شهری و سیر تکامل آن‌ها می‌پردازد. مککگرانان و همکاران (۲۰۰۱) و مککگرانان و سونگسور (۱۹۹۴) بر این باورند که فشارهای زیست‌محیطی شهری موجب پراکندگی و تأخیر در مدیریت منابع می‌شوند. به همین دلیل، نوع و شدت مسائل زیست‌محیطی شهری در مراحل مختلف توسعه اقتصادی، متغیر است. در مراحل ابتدایی توسعه، مشکلات زیست‌محیطی عمدتاً ناشی از فقر، مانند کمبود آب آشامیدنی سالم و ضعف بهداشت است؛ اما با افزایش درآمدها، این مشکلات کاهش یافته و جای خود را به معضلات جدیدی نظیر آلودگی‌های صنعتی (مانند آلودگی هوا و آب) می‌دهند که ناشی از افزایش فعالیت‌های تولیدی هستند. در شهرهای ثروتمندتر، با اجرای قوانین زیست‌محیطی دقیق‌تر، پیشرفت فناوری و تغییرات ساختاری در اقتصاد، این مشکلات صنعتی کاهش یافته و تمرکز بر مسائل زیست‌محیطی مربوط به مصرف منابع افزایش می‌یابد. الگوهای مصرف و سبک زندگی در شهرهای ثروتمند، معمولاً منابع بیشتری را به کار می‌گیرند؛ بنابراین این شهرها با چالش‌های ناشی از مصرف منابع، حمل‌ونقل و زیرساخت‌های شهری مواجه می‌شوند؛ به‌بیان‌دیگر، افزایش ثروت در شهرها با رشد تقاضا برای زیرساخت‌های شهری و استفاده از منابع شخصی همراه است (بای و ایمورا[1]، ۲۰۰۰). این نظریه که فراتر از تحلیل منحنی زیست‌محیطی کوزنتس (EKC) عمل می‌کند، رابطه‌ای عمیق‌تر بین وفور منابع یک کشور و عملکرد زیست‌محیطی در مناطق شهری شناسایی می‌کند و نشان می‌دهد که چالش‌های زیست‌محیطی تنها با افزایش درآمد حل نمی‌شوند، بلکه به مدیریت منابع و تغییرات ساختاری در شهرها نیز وابسته‌اند.

د) نظریه تراکم شهری

این نظریه به بررسی مزایای زیست‌محیطی ناشی از تجمع جمعیت در مناطق شهری می‌پردازد و این‌گونه استدلال می‌کند که تراکم بالای جمعیتی می‌تواند به بهره‌برداری بهینه از صرفه‌های مقیاس در زیرساخت‌های عمومی مانند حمل‌ونقل عمومی، مدارس و تأمین آب منجر شود. این فرآیند همچنین وابستگی به خودروهای شخصی را کاهش داده، مسیرهای

1. Bai & Imura

حمل‌ونقل طولانی را کوتاه‌تر می‌کند و از اتلاف انرژی در توزیع برق می‌کاهد. درنهایت، این عوامل به کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منتهی می‌شوند (برتون[1]، ۲۰۰۰؛ کاپلو و کامانی[2]، ۲۰۰۰؛ جنکس و همکاران[3]، ۱۹۹۶؛ نیومن و کنورثی[4]، ۱۹۸۹). باوجوداین، عده‌ای از منتقدان بر این باورند که چالش‌های مرتبط با تراکم شهری، مانند ترافیک شدید، شلوغی بیش از حد و آلودگی هوا، می‌تواند بر مزایای آن غلبه کند (برهنی[5]، ۲۰۰۱؛ رادلین و فالک[6]، ۱۹۹۹)؛ علاوه بر این، در صورت عدم پشتیبانی مناسب از زیرساخت‌های شهری، افزایش تراکم جمعیت می‌تواند به افزایش مصرف انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای منجر شود. ازاین‌رو، نبود زیرساخت‌های کافی ممکن است تراکم شهری را به عاملی برای ایجاد مشکلات جدی زیست‌محیطی تبدیل کند (بورگس[7]، ۲۰۰۰).

در رابطه با اثرات رشد پدیده شهرنشینی بر آلودگی زیست‌محیطی، دو دیدگاه متفاوت وجود دارد. دیدگاه اول بیان می‌کند که رشد شهرنشینی به‌طور مستقیم و مثبت به افزایش آلودگی زیست‌محیطی منجر می‌شود، زیرا با افزایش جمعیت شهری، نیاز به زیرساخت‌ها، حمل‌ونقل و مصرف انرژی افزایش می‌یابد که در نهایت باعث انتشار آلاینده‌ها خواهد شد. علاوه بر این، انتقال فعالیت‌ها از بخش کشاورزی به بخش صنعتی نیز بر شدت آلودگی افزوده و پدیده شهرنشینی به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در ایجاد آلودگی و تغییرات اقلیمی در ادبیات اقتصادی مطرح است (فلاحی و حکمتی‌فرد، ۱۳۹۲). دیدگاه دوم؛ اما نظرات متفاوتی دارد و می‌گوید که با رشد شهرنشینی، امکان بهره‌برداری از صرفه‌های مقیاس در استفاده از منابع فراهم می‌شود که به‌نوبه خود موجب مصرف بهینه انرژی در مناطق شهری نسبت به مناطق روستایی خواهد شد. به‌علاوه، در این دیدگاه، اگر شهرها به‌طور مؤثر مدیریت شوند و جمعیت شهری دسترسی به فناوری‌های پاک و دوستدار محیط زیست داشته باشد، می‌توان انتظار داشت که رشد شهرنشینی منجر به کاهش میزان آلودگی سرانه گردد؛

1. Burton
2. Capello & Camagni
3. Jenks et al.
4. Newman & Kenworth
5. Breheny
6. Rudlin & Falk
7. Burgess

بنابراین، تأثیر رشد شهرنشینی بر آلودگی زیست‌محیطی می‌تواند هم مثبت و هم منفی باشد (جونز[1]، ۱۹۹۱؛ آلم و همکاران[2]، ۲۰۰۷).

ه) مصرف انرژی برق آبی و آثار زیست‌محیطی

انرژی برق آبی به‌عنوان یک منبع تجدیدپذیر و کم‌کربن، نقش مهمی در کاهش آلودگی هوا ایفا می‌کند و در مقایسه با انرژی‌های تجدیدناپذیر، تأثیر کمتری بر ردپای زیست‌محیطی دارد. بااین‌حال، توسعه این انرژی با چالش‌های زیست‌محیطی قابل توجهی همراه است، ازجمله تخریب زیست‌بوم‌ها ناشی از ساخت سدها و مخازن که منجر به نابودی جنگل‌ها، تالاب‌ها و زیستگاه‌های طبیعی می‌شود. همچنین، اختلال در جریان طبیعی رودخانه‌ها و مهاجرت ماهی‌ها، تنوع زیستی را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، تجزیه مواد آلی در مخازن، به‌ویژه در مناطق گرمسیری، باعث انتشار متان (یک گاز گلخانه‌ای قوی) می‌شود. علاوه بر این، تجمع رسوبات و مواد آلی در مخازن، کیفیت آب را کاهش داده و کارایی سدها را تحت تأثیر قرار می‌دهد که نیاز به نگهداری بیشتر را افزایش می‌دهد. اگرچه انرژی برق آبی گزینه‌ای مطلوب برای پایداری محیط زیست محسوب می‌شود، تغییرات اقلیمی مانند خشکسالی و پیامدهای زیست‌محیطی، توسعه آن را با محدودیت‌هایی مواجه کرده است (ناتانیل و خان، ۲۰۲۰).

۳. پیشینه پژوهش

یکی از مواردی که در چند دهۀ اخیر، بر آلودگی محیط زیست و انتشار گاز کربن دی‌اکسید مؤثر بوده، رشد بی‌رویه شهرنشینی بوده است. رشد بی‌رویۀ شهرها در کشورهای کمتر توسعه‌یافته، محصول سه عامل اصلی، نرخ بالای زادوولد، مهاجرت شتابان جمعیت روستایی و تبدیل مناطق روستایی به شهر است. افزایش بی‌رویه و بدون برنامه شهرها، مشکلات زیست‌محیطی متعددی را برای جامعه ایجاد می‌کند که هم محیط زیست و هم کیفیت زندگی شهروندان را مورد تهدید قرار می‌دهد. از سوی دیگر، مصرف انرژی برق آبی به‌طور خاص و برق به‌طور کلی، با افزایش فعالیت‌های اقتصادی به‌طور چشمگیری در حال افزایش است (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۲). براساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، سهم برق

1. Jones
2. Alam et al.

آبی در تولید جهانی برق در سال ۲۰۲۱ به حدود ۱۶٪ رسیده است. این منبع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند نقشی مؤثر در کاهش آلودگی هوا ایفا کند؛ به‌طوری‌که طبق مطالعات، هر کیلووات ساعت برق تولیدی از منابع تجدیدپذیر نسبت به سوخت‌های فسیلی بین ۰/۵ تا ۱ کیلوگرم CO_2 کمتر منتشر می‌کند (آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر[1]، ۲۰۲۱). با رشد تولید و مصرف برق که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۴۰ حدود ۶۰٪ افزایش یابد (آژانس بین‌المللی انرژی[2]، ۲۰۲۱)، اهمیت این منبع انرژی بیشتر شده و احتمالاً تأثیر قابل توجهی در کاهش سطح آلودگی هوا خواهد داشت. مطالعات نشان می‌دهد که توسعه نیروگاه‌های برق آبی می‌تواند تا ۳۰٪ از انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش انرژی بکاهد (بانک جهانی[3]، ۲۰۲۰). در عین حال، استفاده گسترده‌تر از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، ردپای زیست‌محیطی را افزایش می‌دهد. برآوردها حاکی از آن است که ساخت سدهای بزرگ می‌تواند تا ۴۰٪ از تنوع زیستی رودخانه‌ها را کاهش دهد (سازمان جهانی حفاظت از طبیعت[4]، ۲۰۲۱). با این وجود، در مقایسه با انرژی‌های تجدیدناپذیر، اثرات مصرف انرژی تجدیدپذیر بر ردپای زیست‌محیطی به مراتب کمتر است (ناتانیل و خان[5]، ۲۰۲۰). مطالعات نشان می‌دهد که ردپای کربنی انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور میانگین ۸۵٪ کمتر از نیروگاه‌های زغال‌سنگی است (هیئت بین‌الدولی تغییرات آب‌وهوایی[6]، ۲۰۲۱).

مصرف انرژی برق آبی، با وجود مزایایی چون تجدیدپذیری و تولید کم‌کربن، تأثیرات قابل توجهی بر محیط زیست دارد. ایجاد مخازن بزرگ برای ذخیره آب، به تخریب زیست‌بوم‌های طبیعی، نابودی جنگل‌ها و تالاب‌ها و جابه‌جایی جوامع انسانی منجر می‌شود. این مخازن، زیستگاه‌های طبیعی را غیرقابل استفاده برای گونه‌های گیاهی و جانوری می‌کنند و جریان طبیعی رودخانه‌ها را مختل می‌سازند که به‌ویژه بر گونه‌های مهاجر ماهی تأثیر منفی دارد. تغییر در رسوبات و سطح اکسیژن آب، کیفیت زیستگاه‌های آبی را کاهش داده و بقای گونه‌ها را تهدید می‌کند.

در ادامه به مروری بر پیشینهٔ پژوهش در داخل و خارج از کشور پرداخته می‌شود.

---

1. International Renewable Energy Agency (IRENA)
2. International Energy Agency (IEA)
3. World Bank
4. World Wildlife Fund (WFF)
5. Nathaniel & Khan
6. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

الف) مطالعات خارجی

سُلارین و همکاران[1] (۲۰۱۷)، در کار خود رابطهٔ بین انتشار گاز کربن دی‌اکسید، مصرف انرژی برق آبی، شهرنشینی و تولید ناخالص داخلی واقعی در چین و هند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد رابطهٔ هم‌جمعی بلندمدت بین تمام متغیرها برقرار است. مضاف بر این تولید ناخالص داخلی سرانه و میزان شهرنشینی در بلندمدت تأثیر مثبت و معناداری بر انتشار گاز کربن دی‌اکسید می‌گذارد.

وانگ[2] (۲۰۱۹)، در مطالعه‌ای رابطهٔ بین مصرف انرژی زیست‌توده و آلودگی زیست‌محیطی در کشورهای بریکس[3] را بررسی کرده است. نتایج نشان داد که مصرف انرژی زیست‌توده[4] به‌عنوان یک منبع انرژی پاک در کاهش آلودگی محیط زیست عمل می‌کند.

رادمهر و همکاران (۲۰۲۲)، در مطالعه‌ای به بررسی ارتباطات سه‌گانه بین ردپای زیست‌محیطی، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و درآمد در کشورهای گروه هفت پرداخته است. یافته‌ها وجود ارتباط دوطرفه بین ردپای زیست‌محیطی و همچنین بین ردپای زیست‌محیطی و انرژی‌های تجدیدپذیر را تأیید می‌کنند.

یوسف‌خان و همکاران[5] (۲۰۲۳)، در مطالعه‌ای به بررسی روابط پویا بین شهرنشینی، مصرف انرژی و آلودگی محیط زیست در هند پرداخته‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد که شهرنشینی در هند در بلندمدت برای محیط زیست مفید بوده، در حالی که مصرف انرژی برای محیط زیست مضر است.

الدقیشم[6] (۲۰۲۴)، در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر شهرنشینی، مصرف انرژی، منابع طبیعی، رشد اقتصادی و نوآوری فناوری بر ردپای زیست‌محیطی در عربستان سعودی پرداخته است. یافته‌های تجربی نشان می‌دهند که شهرنشینی، منابع طبیعی و نوآوری فناوری، ردپای

---

1. Solarin, et al
2. Wang
3. BRICS

٤. زیست‌توده (Biomass): یک منبع تجدیدپذیر انرژی است که از مواد زیستی به دست می‌آید. به‌طورکلی، زباله‌هایی که منشأ زیستی داشته باشند و از تکثیر سلولی پدید آمده باشند را زیست‌توده نامند.

5. Yousuf Khan, et al
6. Aldegheishem

زیست‌محیطی را کاهش می‌دهند؛ در حالی که مصرف انرژی و رشد اقتصادی، ردپای زیست‌محیطی را افزایش می‌دهند.

سرور و همکاران[1] (۲۰۲۴)، در مقاله‌ای تأثیر شهرنشینی و توسعه انسانی بر ردپای زیست‌محیطی بررسی می‌کنند و بر کشورهای عضو سازمان همکاری و توسعه اقتصادی[2] و غیر عضو تمرکز دارند. مطابق نتایج در کشورهای عضو سازمان همکاری و توسعه اقتصادی، ردپای زیست‌محیطی با شهرنشینی و رشد اقتصادی افزایش می‌یابد و تأثیر منفی شاخص توسعه انسانی و صنعتی‌شدن بر ردپای زیست‌محیطی مشاهده می‌شود. برعکس، در کشورهای غیر عضو، تأثیر مثبت تولید ناخالص داخلی و شاخص توسعه انسانی بر ردپای زیست‌محیطی وجود دارد، در حالی که صنعتی شدن و شهرنشینی تأثیر منفی بر آن دارند.

ب) مطالعات داخلی

فطرس و همکاران (۱۳۹۰)، در پژوهشی به بررسی تأثیر شدت انرژی و گسترش شهرنشینی بر تخریب محیط زیست در ایران پرداختند. نتایج تحقیق مبین اثر مثبت و معنادار متغیرهای شدت انرژی، رشد شهرنشینی و جمعیت بر انتشار گاز کربن دی‌اکسید است.

شاد استانجین و صفرزاده (۱۴۰۱)، در مقاله‌ای رابطهٔ مصرف انرژی برق آبی با شاخص‌های تخریب محیط زیست در اقتصاد ایران مورد تحلیل قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که بین مصرف انرژی برق آبی و انتشار گاز دی‌اکسیدکربن و ردپای کربن ارتباط منفی و معناداری وجود دارد. همچنین، انرژی برق آبی در کوتاه‌مدت تأثیر مثبتی بر کاهش ردپای زیست‌محیطی دارد.

اصفهانی و همکاران (۱۴۰۱) ارتباط میان رشد اقتصادی، مصرف انرژی و ردپای زیست‌محیطی را در ۷۲ کشور توسعه‌یافته و در حال توسعه بررسی کرده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهند که در هر دو گروه کشورها، رشد اقتصادی با مصرف انرژی و ردپای زیست‌محیطی رابطه متقابل دارد. مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر، نرخ شهرنشینی، باروری و مرگ‌ومیر، اثر مثبت بر افزایش ردپای زیست‌محیطی دارند. در مقابل، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر، پیشرفت فناوری و سرمایه انسانی، ردپای زیست‌محیطی را کاهش می‌دهند.

1. Sarwar, et al
2. OECD

صیادی و همکاران (۱۴۰۲)، در پژوهشی به بررسی تأثیر شاخص‌های اقتصادی، کیفیت نهادی و بهره‌وری انرژی بر ردپای زیست‌محیطی پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که تولید ناخالص داخلی سرانه، نسبت سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی، درجه شهرنشینی و بی‌ثباتی سیاسی تأثیر مثبت و معنادار و در مقابل، شاخص باز بودن تجاری، کنترل فساد، شاخص دموکراسی و بهره‌وری انرژی تأثیر منفی و معناداری بر ردپای زیست‌محیطی می‌گذارند.

در این بخش مطالعات داخلی و خارجی متعددی بررسی شد. همان‌طورکه ملاحظه شد هریک از مطالعات با توجه به موضوع مورد بررسی از ابعاد مختلف به بحث تخریب محیط زیست و ردپای زیست‌محیطی پرداخته‌اند؛ اما در مطالعه حاضر هدف آن است که الگوی رگرسیون فازی معرفی و قابلیت آن در بررسی تأثیر عدم قطعیت عوامل مؤثر بر ردپای زیست‌محیطی مورد توجه قرار گیرد. از مزایای این مطالعه استفاده از الگوی رگرسیون فازی، اولویت‌بندی و بررسی تأثیر عدم قطعیت نرخ رشد شهرنشینی و مصرف انرژی برق آبی بر ردپای زیست‌محیطی است. در تحلیل‌های الگوی رگرسیون فازی از مفهوم درجه عضویت، مرکز و پهنای فازی استفاده شده است. با استفاده از درجه عضویت ۰/۱ تا ۰/۹ که نشان‌دهنده افزایش عدم قطعیت در عوامل مؤثر بر ردپای زیست‌محیطی است به محاسبه پهنای راست و چپ ردپای زیست‌محیطی پرداخته شد. پهنای راست حاکی از بیشترین تأثیرگذاری و همچنین مرکز و پهنای چپ فازی نیز به ترتیب حاکی از متوسط و کمترین تأثیرگذاری عوامل مؤثر بر ردپای زیست‌محیطی است که از نوآوری‌های مطالعه حاضر است و در سایر مطالعات مرتبط انجام نشده است.

٤. روش‌شناسی[1]

الگوی رگرسیون فازی

الگوهای رگرسیون فازی نخستین‌بار توسط تاناکا و همکاران[2] در سال (۱۹۸۲) معرفی شدند. این الگوها از طریق کمینه‌کردن میزان فازی بودن، بهترین معادله رگرسیون را به دست می‌دهند. این فرایند از طریق کمینه‌سازی مجموع پهنای توابع عضویت ضرایب فازی معادله انجام می‌شود. الگوهای رگرسیون فازی نسبت به الگوهای رگرسیون کلاسیک ویژگی‌های خاص خود را دارند. رگرسیون کلاسیک برای معتبر بودن نتایج خود به مجموعه‌ای از

1. Methodology
2. Tanaka, et al

فرضیات آماری قوی نیاز دارد. ازجمله این فرضیات می‌توان به نرمال بودن خطاها، عدم وجود خودهمبستگی و ثابت بودن واریانس خطاها اشاره کرد. نقض هریک 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. به‌عنوان 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 الگوسازی شرایط نادقیق یا مبهم را فراهم می‌کند و به درک بهتر سامانه‌ها 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 (اشرف گنجویی و همکاران، ۱۴۰۱).

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

الگوهای رگرسیون فازی امکانی؛

الگوهای رگرسیون کمترین مربعات؛

الگوهای رگرسیون مبتنی بر تحلیل بازه‌ای.

در این مطالعه از الگوی رگرسیون امکانی فازی استفاده شده است. برای رسیدن به یک برازش مطلوب، باید یک الگوی بهینه برآورد شود. با توجه به اینکه توابع عضویتی که برای نمایش اعداد فازی استفاده می‌شود، به صورت مثلثی است، می‌توان رگرسیون فازی را در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی خطی فرموله کرد. یکی از الگوهای رگرسیون فازی امکانی الگویی است که در آن ضرایب فازی هستند و ورودی و خروجی مشاهده‌ای غیرفازی است. صورت کلی الگوی رگرسیونی با ضرایب فازی به صورت رابطه (۱) است.

$$\tilde{Y} = \mathrm{f}(x, A) = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 x_1 + \tilde{A}_2 x_2 + \cdots + \tilde{A}_n x_n \quad (۱)$$

که در این رابطه $\tilde{Y}$ نشان‌دهنده متغیر وابسته یا اصطلاحاً خروجی فازی است، همچنین $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ معرف بردار متغیرهای مستقل یا اصطلاحاً بردار ورودی است و $A = \{\tilde{A}_0, \tilde{A}_1, \ldots, \tilde{A}_n\}$ یک مجموعه از اعداد فازی است. الگوی رگرسیون خطی با پارامترهای فازی، ورودی‌های غیر فازی و خروجی فازی را به‌صورت مسئله برنامه‌ریزی خطی فرموله می‌شود که هدف مینیمم کردن ابهام الگوی رگرسیون خطی فازی است به‌طوری‌که دامنه مقادیر تخمین زده‌شده، دامنه مقادیر مشاهده‌شده را در یک سطح معین بپوشاند. در این مطالعه نیز ضرایب رگرسیون به صورت اعداد فازی مثلثی به شکل زیر تعریف می‌شود (همان، ۱۴۰۱).

$$\tilde{A}(\mathrm{x}) = \begin{cases} 1 - \frac{a-x}{s^L} & a - s^L \le x \le a \\ 1 - \frac{x-a}{s^R} & a < x \le a + s^R \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن a مقدار نما، s^L و s^R به ترتیب پهنای چپ و پهنای راست $\tilde{A}$ هستند. در این رابطه اگر $s^L \neq s^R$ آنگاه عدد فازی مثلثی $\tilde{A}$ را نامتقارن گوییم. در این حالت تابع عضویت $\tilde{A}$ را با توجه به سه مشخصه a, s^L, s^R به‌گونه‌ای دیگری نیز این تابع عضویت را نمایش داد؛ یعنی پهنای راست را برحسب پهنای چپ بیان کرد. به این صورت که در تابع عضویت بالا قرار دهیم $s^R = \mathrm{k}\, s^L$ که در آن k که عددی حقیقی و مثبت است. ضریب کشیدگی نامیده می‌شود؛ بنابراین عدد فازی، مثلثی نامتقارن $\tilde{A}$ را می‌توان با سه تایی $\tilde{A} = (a, s^L, k)_{\mathrm{T}}$ نیز توصیف کرد در این حالت تابع عضویت $\tilde{A}$ به‌صورت زیر در می‌آید (همان، ۱۴۰۱).

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

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

$$\begin{aligned} f^c(\underline{\mathrm{x}}) &= a_0 + a_1 x_1 + \cdots + a_n x_n \\ f_s^L(\underline{\mathrm{x}}) &= s_0^L + s_1^L x_1 + \cdots + s_n^L x_n \\ f_s^R(\underline{\mathrm{x}}) &= s_0^R + s_1^R x_1 + \cdots + s_n^R x_n \end{aligned} \quad (۴)$$

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

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

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 دست‌کم به بزرگی h باشد. یعنی:

$$\tilde{Y}_j(\tilde{y}_j) \ge h \ , \ 1, 2 \dots., m \quad (۶)$$

ثانیاً ضرایب فازی، $\tilde{A}_i \ , i = 0 \ , 1 \ , 2 \dots, n$ به گونه‌ای 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 همهٔ دادها کمیت زیر است که آن را تابع هدف می‌نامیم تابع هدف برای حالت متقارن به صورت زیر است.

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

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

$$\mathrm{Z} = \mathrm{m}\left(\mathrm{s}_0^{\mathrm{L}} + \mathrm{s}_0^{\mathrm{R}}\right) + \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}}[\left(\mathrm{s}_0^{\mathrm{L}} + \mathrm{s}_0^{\mathrm{R}}\right) \sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{m}} \mathrm{x}_{\mathrm{ji}})] \quad (۸)$$

در حالتی که $\tilde{A}_i \ , i = 0 \ , 1 \ , 2 \ , \dots, n$ ها را متقارن در نظر بگیریم. از قرار دادن رابطه (۴) در (۱۰) و (۵)، محدودیت‌ها به صورت رابطه (۱ رابطه (۱۴) حاصل می‌شود (همان، ۱۴۰۱).

$$(1 - \mathrm{h})\mathrm{s}_0 + (1 - \mathrm{h}) \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}}(\mathrm{s}_0 \mathrm{x}_{\mathrm{ji}}) - \mathrm{a}_0 - \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}}(\mathrm{s}_0 \mathrm{x}_{\mathrm{ji}}) \ge -\mathrm{y}_{\mathrm{i}} \quad (۹)$$
$$\mathrm{j}\ 1, 2, \dots, \mathrm{m}$$

$$(1 - h)s_0 + (1 - h) \sum_{i=1}^{n}(s_0 x_{ji}) + a_0 + \sum_{i=1}^{n}(s_0 x_{ji}) \ge + y_i \quad (۱۰)$$
$$j\ 1, 2, \dots, m$$

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

در این پژوهش از روش رگرسیون فازی با ضرایب متقارن برای تحلیل تأثیر متغیرهای مختلف بر ردپای زیست‌محیطی استفاده شده است. این روش به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در الگوسازی عدم قطعیت‌ها و داده‌های نامشخص، امکان بررسی هم‌زمان اثرات مرکزی (میانگین) و حدود تغییرپذیری (پهنای راست و چپ فازی) متغیرها را فراهم می‌کند. برخلاف رگرسیون کلاسیک که تنها یک ضریب قطعی ارائه می‌دهد، رگرسیون فازی با تعیین مقادیر فازی (فاصله‌ای) برای ضرایب، سناریوهای مختلف تأثیرگذاری متغیرها را تحت شرایط نامطمئن شبیه‌سازی می‌کند. این رویکرد، به‌ویژه در مسائل زیست‌محیطی که با نوسانات داده‌ها و ابهام در روابط علّی مواجه هستند (مانند تأثیر شهرنشینی یا مصرف انرژی)، ابزاری کارآمد برای سیاست‌گذاری محسوب می‌شود. مطالعاتی مانند پیشدار و همکاران[1] (۲۰۲۰) و هشامیان و اکبری[2] (۲۰۱۷) نیز از این روش برای تحلیل‌های اقتصادی ـ زیست‌محیطی با نتایج قابل اتکا استفاده کرده‌اند.

۵. یافته‌ها

تشریح نتایج به دست آمده از الگوی رگرسیون فازی با ضرایب متقارن

در مطالعهٔ حاضر، داده‌های مورد نیاز برای بررسی تأثیر عدم قطعیت نرخ شهرنشینی و مصرف انرژی برق آبی بر ردپای زیست‌محیطی در ایران به صورت سالانه طی دوره زمانی ۱۳۴۹ تا ۱۴۰۱ بوده است. برای برآورد الگوی رگرسیون فازی از نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. با توجه به مطالعه النور و همکاران (۲۰۲۲) که به صورت رابطه (۱۱) تصریح می‌شود:

$$EP = F (HP , UR , NR , PI , IP) \qquad (۱۱)$$

در این بخش رگرسیون فازی با ضرایب متقارن درخصوص بررسی تأثیر عدم قطعیت مصرف انرژی برق آبی (HP)، نرخ رشد شهرنشینی (UR)، رانت منابع طبیعی (NR)، درآمد سرانه (PI) و تولیدات صنعتی (IP) بر ردپای زیست‌محیطی (EP) در ایران برآورد خواهد شد. در جدول زیر به معرفی متغیرهای مورد بررسی در این پژوهش پرداخته شده است:

1. Pishdar et al.
2. Hesamian, G., & Akbari, M. G.

جدول ۱. معرفی متغیرهای پژوهش

نام متغیر	نماد	تعریف	منبع
ردپای زیست‌محیطی	EP	تأثیرات و تغییراتی است که فعالیت‌های انسانی بر روی محیط زیست و جوامع زیستی آن می‌گذارد.	شبکه ردپای جهانی (GFN)
مصرف انرژی برق آبی	HP	یک قدرت، انرژی یا نیرویی است که از حرکت آبی به دست می‌آید که ممکن است برای اهداف مفید مهار شود.	وزارت نیرو
نرخ رشد شهرنشینی	UR	نرخ رشد شهرنشینی = (جمعیت شهرنشینی در سال جاری − جمعیت شهرنشینی در سال قبل) / جمعیت شهرنشینی در سال قبل ×۱۰۰	بانک جهانی (WDI)
رانت منابع طبیعی	NR	رانت در اقتصاد عبارت از هرگونه پرداخت به مالک یا تولیدکننده است که مازاد بر هزینه موردنیاز به‌اضافهٔ سود مربوط برای آوردن آن به چرخه تولید باشد.	بانک جهانی (WDI)
درآمد سرانه	PI	این شاخص با تقسیم درآمد کل (مانند تولید ناخالص داخلی یا درآمد ملی) بر تعداد جمعیت محاسبه می‌شود.	بانک جهانی (WDI)
تولیدات صنعتی	IP	تولید صنعتی از ابزار و داده‌های اقتصادی است که میزان خروجی بخش‌های صنعتی (شامل ساخت، معدن و آب‌وبرق) از اقتصاد را اندازه‌گیری می‌نماید.	بانک جهانی (WDI)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

در این پژوهش داده‌های بررسی شده برای تمام متغیرهای معرفی‌شده در جدول فوق، طی دوره ۱۳۴۹ تا ۱۴۰۱ جمع‌آوری شده است. با توجه به دوره زمانی ۱۳۴۹ تا ۱۴۰۱ تعداد مشاهدات ۵۳ سال است که برای بررسی نااطمینانی ردپای زیست‌محیطی، تابع هدف با توجه به قیدها که درمجموع ۱۰۶ 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 ۰/۱ تا ۰/۹ مقادیر مرکز فازی، پهنای راست و چپ فازی محاسبه شده است. نتایج در جداول شماره (۲) و (۳) ارائه شده است. در تحلیل‌های مربوط به بررسی آثار عدم قطعیت مصرف انرژی برق آبی، نرخ رشد شهرنشینی، رانت منابع طبیعی، درآمد سرانه و تولیدات صنعتی بر ردپای زیست‌محیطی از مفهوم درجه عضویت، پهنای چپ، متوسط و راست فازی استفاده شده است. درجه عضویت ۰/۱ و ۰/۹ به ترتیب حاکی از کاهش و افزایش تأثیر عدم قطعیت مصرف انرژی برق آبی، نرخ رشد شهرنشینی، رانت منابع طبیعی، درآمد سرانه و تولیدات صنعتی بر ردپای زیست‌محیطی است. پهنای راست بیانگر آن است که در صورت کاهش و یا افزایش عدم قطعیت (به ترتیب با توجه به درجه عضویت ۰/۱ و ۰/۹) در عوامل مذکور، ردپای زیست‌محیطی به چه میزان

افزایش می‌یابد. پهنای چپ نیز حاکی از آن است که در صورت کاهش و یا افزایش عدم قطعیت (به ترتیب با توجه به درجه عضویت ۰/۱ و ۰/۹) در این عوامل، ردپای زیست‌محیطی چه میزان کاهش می‌یابد. با توجه به انعطاف‌پذیری الگوی رگرسیون فازی تأثیر عدم قطعیت هر یک از عوامل مذکور بر ردپای زیست‌محیطی در سه سطح اثرگذاری محاسبه شده است. نتایج پهنای راست برای درجه عضویت ۰/۱ نشان می‌دهد که مصرف انرژی برق آبی، نرخ رشد شهرنشینی، رانت منابع طبیعی، مقدار درآمد سرانه و میزان تولیدات صنعتی به ترتیب با ضرایب ۰/۱۳۸، ۰/۳۱۷، ۱/۰۸۶، ۰/۰۷۳ و ۹/۷۴۶e-۱۳ بیشترین تأثیر را بر افزایش ردپای زیست‌محیطی دارند و نتایج پهنای چپ نیز برای عوامل مذکور به ترتیب برابر با ضرایب ۰/۱۳۸-، ۰/۳۱۷-، ۰/۸۸۳، ۰/۰۷۳- و ۱/۷۴۶۳e-۱۴ است. نتایج پهنای راست برای درجه عضویت ۰/۲ نیز حاکی از آن است که مصرف انرژی برق آبی، نرخ رشد شهرنشینی، رانت منابع طبیعی، درآمد سرانه و تولیدات صنعتی به ترتیب با ضرایب ۰/۱۵۵، ۰/۳۵۶، ۱/۰۹۹، ۰/۰۸۲ و ۱/۱۳۷۲e-۱۱ بیشترین تأثیر را بر افزایش ردپای زیست‌محیطی دارند و نتایج پهنای چپ نیز برای عوامل مذکور به ترتیب برابر با ضرایب ۰/۱۵۵-، ۰/۳۵۶-، ۰/۸۷۰، ۰/۰۸۲- و ۲/۷۷۱e-۱۳- است. در رابطه با درجه عضویت ۰/۳ ملاحظه می‌کنیم که ضرایب پهنای راست مصرف انرژی برق آبی، نرخ رشد شهرنشینی، رانت منابع طبیعی، مقدار درآمد سرانه و میزان تولیدات صنعتی به ترتیب با ۰/۱۷۸، ۰/۴۰۷، ۱/۱۱۵، ۰/۰۹۴ و ۲/۹۵۹۶e-۱۰ است و نتایج پهنای چپ نیز برای عوامل مذکور به ترتیب برابر با ضرایب ۰/۱۷۸-، ۰/۴۰۷-، ۰/۸۵۴، ۰/۰۹۴- و ۴/۸۷۲۹e-۱۱ است. به همین صورت برای درجه عضویت ۰/۴ ملاحظه می‌کنیم که ضرایب پهنای راست متغیرهای مورد بررسی به ترتیب با ۰/۲۰۷، ۰/۴۷۵، ۱/۱۳۷، ۰/۱۰۹ و ۵/۱۰۷۹e-۱۲ است و نتایج پهنای چپ نیز به ترتیب برابر با ضرایب ۰/۲۰۷-، ۰/۴۷۵-، ۰/۸۳۲، ۰/۱۰۹- و ۱/۴۲۹۹e-۱۲- است. برای درجه عضویت ۰/۵ نیز بیشترین میزان تأثیر متغیرهای مصرف انرژی برق آبی، نرخ رشد شهرنشینی، رانت منابع طبیعی، درآمد سرانه و تولیدات صنعتی با توجه به ضرایب پهنای راست به ترتیب برابر با ۰/۲۴۹، ۰/۵۷۰، ۱/۱۶۸، ۰/۱۳۱ و ۶/۹۰۸۴e-۱۰ است و کمترین میزان تأثیر متغیرهای مذکور بر اساس نتایج پهنای چپ نیز به ترتیب برابر با ضرایب ۰/۲۴۹-، ۰/۵۷۰-، ۰/۸۰۲، ۰/۱۳۱- و ۲/۴۶۵۴e-۱۰- است.

جدول ۲. برآورد پهنای فازی مصرف انرژی برق آبی، نرخ رشد شهرنشینی، رانت منابع طبیعی، درآمد سرانه و تولیدات صنعتی بر ردپای اکولوژیک

درجه عضویت	متغیرها	پهنای راست	پهنای متوسط	پهنای چپ
h = ۰/۱	مصرف انرژی برق آبی	۰/۱۳۸۲۱	٦/٥٩١٩e -۱۳	-۰/۱۳۸۲۱
	نرخ رشد شهرنشینی	۰/۳۱٦۸۳	٤/٦۳۳۷e-۱۳	-۰/۳۱٦۸۳
	رانت منابع طبیعی	۱/۰۸٦٤	۰/٤ e۹۸٤۹	۰/۸۸۳٤٥
	درآمد سرانه	۰/۰۷۳۰۱	٥/٤۳۲۱e-۱۳	-۰/۰۷۳۰۱
	تولیدات صنعتی	۹/٦٤۷e-۱۳	٤/۸۹۱۷e-۱۳	۱/۳٦٤۷e-۱٤
h = ۰/۲	مصرف انرژی برق آبی	۰/۱٥٥٤۹	۷/٤۸۳۱e-۱۲	-۰/۱٥٥٤۹
	نرخ رشد شهرنشینی	۰/۳٥٦٤٤	٥/۲۸۲۱e-۱۲	-۰/۳٥٦٤٤
	رانت منابع طبیعی	۱/۰۹۹۱	۰/۹۸٤۹٤	۰/۸۷۰۷٦
	درآمد سرانه	۰/۰۸۲۱۳٦	۷/۹۸۳۷e-۱۲	-۰/۰۸۲۱۳٦
	تولیدات صنعتی	۱/۱۳۷۲e-۱۱	٥/٥٤۷٦e-۱۲	-۲/۷۷۱e-۱۳
h = ۰/۳	مصرف انرژی برق آبی	۰/۱۷۷۷	۱/۷٥۲۳e-۱۰	-۰/۱۷۷۷
	نرخ رشد شهرنشینی	۰/٤۰۷۳٦	۱/۱۷٤۲e-۱۰	-۰/٤۰۷۳٦
	رانت منابع طبیعی	۱/۱۱٥٤	۰/۹۸٤۹٤	۰/۸٥٤٤٥
	درآمد سرانه	۰/۰۹۳۸۷	۱/٤٦٦٤e-۱۰	-۰/۰۹۳۸۷
	تولیدات صنعتی	۲/۹٥۹٦e-۱۰	۱/۲۳٦۲e-۱۰	-٤/۸۷۲۹e-۱۱
h = ۰/٤	مصرف انرژی برق آبی	۰/۲۰۷۳۲	۳/۰۱۷۷e-۱۲	-۰/۲۰۷۳۲
	نرخ رشد شهرنشینی	۰/٤۷٥۲٥	۱/۷۱۳۹e-۱۲	-۰/٤۷٥۲٥
	رانت منابع طبیعی	۱/۱۳۷۲	۰/۹۸٤۹٤	۰/۸۳۲۷
	درآمد سرانه	۰/۱۰۹٥۲	۱/٤۲۲۹e-۱۲	-۰/۱۰۹٥۲
	تولیدات صنعتی	٥/۱۰۷۹e-۱۲	۱/۸۳٤e-۱۲	-۱/٤۳۹۹e-۱۰
h = ۰/٥	مصرف انرژی برق آبی	۰/۲٤۸۷۸	۳/۳۲٥۸e-۱۰	-۰/۲٤۸۷۸
	نرخ رشد شهرنشینی	۰/٥۷۰۳	۲/۰۸۰۸e-۱۰	-۰/٥۷۰۳
	رانت منابع طبیعی	۱/۱٦۷٦	۰/۹۸٤۹٤	۰/۸۰۲۲٥
	درآمد سرانه	۰/۱۳۱٤۲	۱/۷۳۸۲e-۱۰	-۰/۱۳۱٤۲
	تولیدات صنعتی	٦/۹۰۸٤e-۱۰	۲/۲۲۱٥e-۱۰	-۲/٤٦٥٤e-۱۰

مأخذ: یافته‌های پژوهش

بیشترین میزان تأثیر متغیرهای مصرف انرژی برق آبی، نرخ رشد شهرنشینی، رانت منابع طبیعی، درآمد سرانه و تولیدات صنعتی برای درجه عضویت ۰/۶ نیز به ترتیب با ۰/۳۱۱، ۰/۷۱۳، ۱/۲۱۳، ۰/۱۶۴ و ۱/۵۷۰۷e-۱۲ است و کمترین میزان تأثیر نیز برای عوامل مذکور به ترتیب برابر با ضریب ۰/۳۱۱-، ۰/۷۱۳-، ۰/۷۵۶، ۰/۱۶۴- و ۶/۴۰۱۱e-۱۳- است. برای درجه عضویت ۰/۷ نیز بیشترین میزان تأثیر متغیرهای نامبرده به ترتیب با ۰/۴۱۵، ۰/۹۵۰،

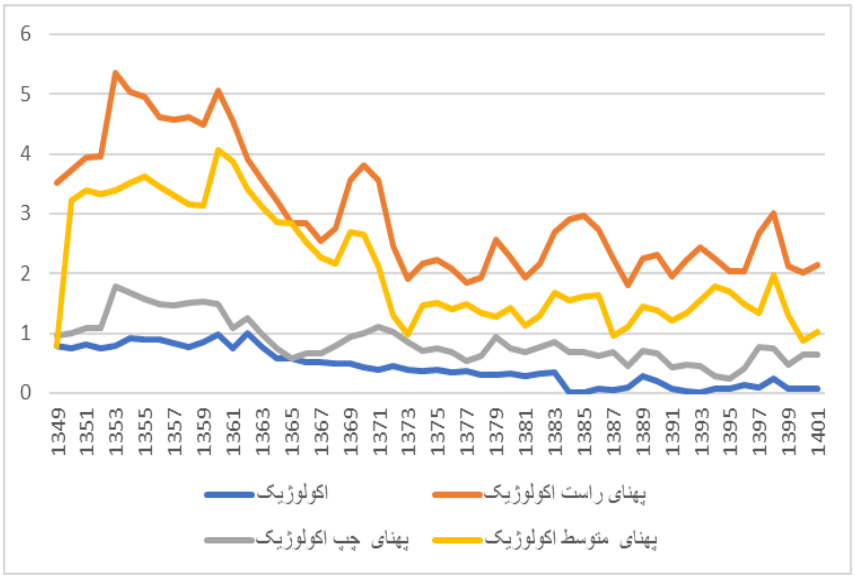
۱/۲۸۹، ۰/۲۱۹ و ۵/۷۳۲e-۱۶ است و کمترین میزان تأثیر نیز به ترتیب برابر با ضریب ۰/۴۱۵-، ۰/۹۵۰-، ۰/۶۸۰، ۰/۲۱۹- و ۳/۶۴۴۷e-۱۶- است. به همین صورت برای درجه عضویت ۰/۸ ضرایب پهنای راست متغیرهای موردبررسی به ترتیب با ۰/۶۲۲، ۱/۴۲۶، ۱/۴۴۲، ۰/۳۲۸ و ۱۱- ۳/۱۹۷۴e است و نتایج پهنای چپ نیز به ترتیب برابر با ضرایب ۰/۶۲۲-، ۱/۴۲۶-، ۰/۵۲۸، ۰/۳۲۸- و ۲/۲۳۷۱e-۱۱- است. نتایج پهنای راست برای درجه عضویت ۰/۹ نیز حاکی از آن است که مصرف انرژی برق آبی، نرخ رشد شهرنشینی، رانت منابع طبیعی، درآمد سرانه و تولیدات صنعتی به ترتیب با ضریب ۱/۲۴۴، ۲/۸۵۱، ۱/۸۹۸، ۰/۶۵۷ و ۳/۶۴۴۷e-۱۶- بیشترین تأثیر را بر افزایش ردپای زیست‌محیطی داشته و نتایج پهنای چپ نیز برای عوامل مذکور به ترتیب برابر با ضریب ۱/۲۴۴-، ۲/۸۵۱-، ۰/۷۱۵، ۰/۶۵۷- و ۳/۶۴۴۷e- است.

جدول ۳. برآورد پهنای فازی مصرف انرژی برق آبی، نرخ رشد شهرنشینی، رانت منابع طبیعی، درآمد سرانه و تولیدات صنعتی بر ردپای اکولوژیک

درجه عضویت	متغیرها	پهنای راست	پهنای متوسط	پهنای چپ
h = ۰/۶	مصرف انرژی برق آبی	۰/۳۱۰۹۸	۱/۷۸۶۷e-۱۲	-۰/۳۱۰۹۸
	نرخ رشد شهرنشینی	۰/۷۱۲۸۸	٤/٥٧٩١e-۱۳	-۰/۷۱۲۲۸
	رانت منابع طبیعی	۱/۲۱۳۳	۰/۹۸٤۹٤	۰/۷٥٦٥۸
	درآمد سرانه	۰/۱٦٤۲۷	٦/٤۷٤٦e-۱۳	-۰/۱٦٤۲۷
	تولیدات صنعتی	۱/٥۷۰۷e-۱۲	٤/٦٥۲۹e-۱۳	-٦/٤۰۱۱e-۱۳
h = ۰/۷	مصرف انرژی برق آبی	۰/٤۱٤٦٤	٤/۹۰۷۹e-۱۷	-۰/٤۱٤٦٤
	نرخ رشد شهرنشینی	۰/۹٥۰٥	۹/٦۷٦۱e-۱۷	-۰/۹٥۰٥
	رانت منابع طبیعی	۱/۲۸۹٤	۰/۹۸٤۹٤	۰/٦۸۰٤٦
	درآمد سرانه	۰/۲۱۹۰۳	٦/۸٤۲٤e-۱۷	-۰/۲۱۹۰۳
	تولیدات صنعتی	٥/۷۳۲e-۱٦	۱/۰٤۳٦e-۱٦	-۳/٦٤٤۷e-۱٦
h = ۰/۸	مصرف انرژی برق آبی	۰/٦۲۱۹٦	۷/۸۳۰۹e-۱۲	-۰/٦۲۱۹٦
	نرخ رشد شهرنشینی	۱/٤۲٥۸	٤/٥۳e-۱۲	-۱/٤۲٥۸
	رانت منابع طبیعی	۱/٤٤۱۷	۰/۹۸٤۹٤	۰/٥۲۸۲۲
	درآمد سرانه	۰/۳۲۸٥٥	٤/۱۷٥۱e-۱۲	-۰/۳۲۸٥٥
	تولیدات صنعتی	۳/۱۹۷٤e-۱۱	٤/۸۰۱٦e-۱۲	-۲/۲۳۷۱e-۱۱
h = ۰/۹	مصرف انرژی برق آبی	۱/۲٤۳۹	٤/۱۰۹٤e-۱۱	-۱/۲٤۳۹
	نرخ رشد شهرنشینی	۲/۸٥۱٥	۱/٤٥۲۱e-۱۱	-۲/۸٥۱٥
	رانت منابع طبیعی	۱/۸۹۸٤	۰/۹۸٤۹٤	۰/۰۷۱٤۹
	درآمد سرانه	۰/٦٥۷۰۹	۱/٥٥٥۳e-۱۱	-۰/٦٥۷۰۹
	تولیدات صنعتی	۱/٤۱۲۳e-۱۰	۱/٦۱٤۳e-۱۱	-۱/۰۸۹٤e-۱۱

مأخذ: یافته‌های پژوهش

ردپای اکولوژیک ابزاری مناسب برای مدیریت منابع و محیط زیست است. با توجه به نمودار (۱) روند ردپای زیست‌محیطی واقعی در کشور (نمودار آبی‌رنگ) تقریباً منطبق بر پهنای چپ (نمودار خاکستری‌رنگ) است و فاصله زیادی با پهنای متوسط و راست دارد. در این راستا برای رسیدن به پهنای متوسط و راست، مدیریت منابع طبیعی باید به‌طور مستقل از کاهش سطح آلودگی برای پرداختن به مسائل زیست‌محیطی در نظر گرفته شود. به همین منظور مالیات‌های زیست‌محیطی می‌توانند در دستیابی به پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی در کشورهایی که با مشکلات ردپای بوم‌شناختی دست‌وپنجه نرم می‌کنند، کمک‌کننده باشند.



نمودار ۱: روند ردپای زیست‌محیطی (براساس درجه عضویت ۰/۹)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

همچنین اعمال مالیات زیست‌محیطی بر صنایع آلاینده و تخصیص این مالیات‌ها به صنایع دوستدار محیط زیست از طریق اعتبار و مشوق‌ها می‌تواند تغییرات مثبتی در ساختار صنعتی ایجاد کند. فرآیند صنعتی‌سازی نیز می‌تواند با استفاده از مالیات به یک فرآیند پاک و سبز تبدیل شود. تجمع منابع اقتصادی و سرمایه مناسب برای کاهش انتشار گازها از طریق گزینه‌های کاهش آلودگی ضروری است. مالیات می‌تواند منابع مالی لازم برای عملی کردن فرآیند انطباق با محیط زیست را فراهم کند. از طرفی مهاجرت از شهر به روستا می‌تواند

ابزاری مؤثر برای کاهش ردپای زیست‌محیطی باشد و چنانچه سیاست‌گذاران و مجریان سیاست‌ها بتوانند این سیاست را به نحو مطلوب اجرا کنند، می‌توان در بلندمدت به سطح مربوط به پهنای متوسط و راست رسید؛ زیرا این انتقال با تغییر در شیوه زندگی همراه است که اغلب مصرف منابع و انتشار آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد. تراکم جمعیت در شهرها و وابستگی به زیرساخت‌های انرژی‌بر، مانند حمل‌ونقل عمومی و ساختمان‌های مرتفع، ردپای زیست‌محیطی بالایی ایجاد می‌کند. در مقابل، زندگی در روستا با سبک زندگی ساده‌تر و استفاده از منابع محلی مانند کشاورزی پایدار و انرژی‌های تجدیدپذیر همراه است. درنتیجه، مهاجرت به روستا اگر با برنامه‌ریزی دقیق و سیاست‌های پایدار همراه باشد، می‌تواند به کاهش تخریب محیط زیست و ایجاد تعادل بین رشد جمعیت و حفظ منابع طبیعی منجر شود.

٦. بحث

مطالعات متعددی در داخل و خارج از کشور (که در ادبیات موضوع به آن‌ها اشاره شده است) تأثیر میزان شهرنشینی، مصرف انرژی برق آبی، انتشار کربن، رشد اقتصادی و دیگر عوامل را بر شاخص ردپای زیست‌محیطی مورد بررسی قرار داده‌اند. این مطالعات با استفاده از روش‌های اقتصادسنجی مانند رگرسیون کلاسیک، ارتباط و تأثیر متغیرهای مستقل بر شاخص ردپای زیست‌محیطی را تحلیل کرده‌اند. همان‌طورکه ملاحظه شد، در بیشتر مطالعات برای بررسی عوامل مؤثر بر ردپای زیست‌محیطی از روش‌های اقتصادسنجی بهره گرفته‌شده؛ اما در این مطالعه از رگرسیون فازی استفاده شده است که نسبت به الگوهای سنتی انعطاف‌پذیری بیشتری در الگوسازی و تجزیه‌وتحلیل دارد. به‌طوری‌که مقادیری برای هر پارامتر و متغیر خروجی که نشان‌دهنده ردپای زیست‌محیطی است، برآورد شده‌اند. درنتیجه، رگرسیون فازی عملکرد کاراتری نسبت به رگرسیون کلاسیک دارد، زیرا در رگرسیون کلاسیک تنها یک مقدار مشخص برای متغیر مستقل محاسبه می‌شود. الگوهای اقتصادسنجی به دلیل ویژگی‌های ساختاری خود نیازمند اطلاعات کامل و قطعی هستند، در حالی که عوامل مؤثر بر ردپای زیست‌محیطی معمولاً نوسانی هستند؛ بنابراین با توجه به این نوسانات و عدم قطعیت نیازمند یک الگوسازی دقیق هستیم. الگوی رگرسیون فازی با توجه به انعطاف‌پذیری بسیار زیاد نسبت به رگرسیون کلاسیک، با برآورد پهنای راست، چپ و نمای ردپای زیست‌محیطی قدرت توزیع‌دهندگی فوق‌العاده‌ای دارد. از سوی دیگر در تحلیل مربوط به ردپای زیست‌محیطی 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. با توجه به مفهوم h که بیان‌کننده میزان ابهام در الگو است. هرچه به درجه عضویت ۰/۹ نزدیک‌تر می‌شویم عدم قطعیت (میزان فازی بودن متغیرها) افزایش می‌یابد. از سوی دیگر مراکز فازی بیانگر تأثیرگذاری مقدار ثابت و پهنای فازی نشان‌دهنده نوسان هریک از متغیرها است. با توجه با این ویژگی‌ها، الگوی رگرسیون فازی با ضرایب متقارن و نامتقارن انعطاف‌پذیری زیادی در الگوسازی و تجزیه‌وتحلیل دارد. همان‌طورکه از جداول (۱) و (۲) در بخش یافته‌های پژوهش ملاحظه می‌شود، مصرف انرژی برق آبی بر ردپای زیست‌محیطی مؤثر است که این نتایج همسو با مطالعات انصاری و همکاران[1] (۲۰۲۰) و چرر و پفیستر[2] (۲۰۱۶) است. اثر نرخ شهرنشینی بر شاخص ردپای زیست‌محیطی نیز در راستای نتایج پژوهش‌های ساهو و ستی[3] (۲۰۲۱)، وانگ[4] (۲۰۱۹) و احمد و همکاران[5] (۲۰۲۰) است. در رابطه با تأثیر رانت منابع طبیعی بر ردپای زیست‌محیطی نیز نتایج پژوهش حاضر منطبق بر کار زامبرانو و اورمنو[6] (۲۰۲۳) و احمد و همکاران[7] (۲۰۲۰) است. همسویی نتایج مطالعه حاضر در زمینهٔ اثر درآمد سرانه بر ردپای زیست‌محیطی نیز توسط چارفدین[8] (۲۰۱۷)، گروس و کاراگل[9] (۲۰۲۳) و نیاگو[10] (۲۰۲۰) قابل تأیید است.

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای سیاستی

هدف پژوهش حاضر بررسی تأثیر عدم قطعیت نرخ شهرنشینی و مصرف انرژی برق آبی بر ردپای زیست‌محیطی در ایران است. در کنار بررسی تأثیر عوامل مذکور، اثر متغیرهای رانت منابع طبیعی، درآمد سرانه و تولیدات صنعتی بر شاخص ردپای زیست‌محیطی نیز در نظر گرفته شده است. برای این منظور از روش تجزیه‌وتحلیل الگوی رگرسیون فازی با ضرایب متقارن که انعطاف‌پذیری بسیار زیادی در الگوسازی دارد، بهره گرفته شده است و از مفاهیم مرکز، پهنای راست و چپ فازی که در ادبیات رگرسیون فازی مرسوم است برای بررسی

1. Ansari, et al
2. Scherer, L., & Pfister, S.
3. Sahoo, M., & Sethi, N.
4. Wang, Z.
5. Ahmed, Z.,et al
6. Zambrano-Monserrate, M., & Ormeño-Candelario, V.
7. Ahmed, Z., et al
8. Charfeddine, L
9. Gorus, M., & Karagol, E.
10. Neagu, O.

رفتار متغیرها استفاده شد. این روش الگوسازی می‌تواند از منظر سیاست‌گذاری برای کشور مفید باشد و سیاست‌های برنامه‌ریزان را جهت‌دهی کند. نتایج پهنای راست برای درجه عضویت ۰/۹ نشان داد که نرخ شهرنشینی، رانت منابع طبیعی، مصرف انرژی برق آبی، درآمد سرانه بر ردپای زیست‌محیطی در ایران با توجه به درجه عضویت ۰/۹ به ترتیب با ضریب ۱/۲،۸۹۸/۸۵۱، ۱/۲۴۴ و ۰/۶۵۷ بیشترین تأثیر را بر افزایش ردپای زیست‌محیطی داشته است. به‌طورکلی، نتایج تأکید می‌کند که رشد شهرنشینی و رانت منابع طبیعی نیازمند مدیریت جدی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی است، در حالی که مصرف انرژی برق آبی و درآمد سرانه می‌توانند با سیاست‌های پایدار، اثرات مخرب کمتری داشته باشند. نرخ رشد شهرنشینی نیز با ضریب ۲/۸۵۱، بیشترین تأثیر را بر افزایش ردپای زیست‌محیطی نشان می‌دهد. رشد شهرنشینی بدون برنامه‌ریزی می‌تواند منجر به تخریب زیستگاه‌های طبیعی، آلودگی محیط زیست و افزایش انتشار کربن شود. بر این اساس پیشنهاد می‌شود که سیاست‌هایی برای توسعه شهرها با رعایت اصول زیست‌محیطی، مانند استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و طراحی فضاهای سبز تدوین شود. از طرفی لازم است برای جلوگیری از تراکم بی‌رویه و توزیع مناسب جمعیت در مناطق شهری و روستایی برنامه‌ریزی مناسب صورت گیرد. طبق نتایج به دست آمده از این پژوهش، ضریب ۱/۸۹۸ تأثیر رانت منابع طبیعی بر ردپای زیست‌محیطی را نشان می‌دهد. رانت منابع طبیعی، به دلیل اتکای اقتصادی بر استخراج و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع، اغلب منجر به تخریب زیست‌محیطی و افزایش ردپای زیست‌محیطی می‌شود؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود که در برای کاهش وابستگی به رانت منابع طبیعی از طریق توسعه صنایع پایدار و فناوری‌های نوین، برنامه‌ریزی‌های صحیح صورت گیرد.

میزان تأثیر مصرف انرژی برق آبی بر شاخص ردپای زیست‌محیطی نیز قابل‌توجه است. مطابق نتایج تحقیقات فیرنساید[1] (۲۰۱۶) و انصاری و همکاران[2] (۲۰۲۳) و با توجه به نتایجی که در مطالعه حاضر به دست آمد، می‌توان نتیجه گرفت که مصرف برق آبی به‌عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر، تأثیرات متفاوتی بر ردپای زیست‌محیطی دارد. از یک‌سو، برق آبی به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند و وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد؛ اما از سوی دیگر، ساخت سدها و مخازن می‌تواند به تخریب زیستگاه‌های طبیعی،

1. Fearnside
2. Ansari et al.

تغییر جریان‌های آبی و کاهش تنوع زیستی منجر شود. به منظور کنترل تأثیرات ناشی از مصرف انرژی برق آبی بر ردپای زیست‌محیطی پیشنهاد می‌شود قبل از احداث نیروگاه‌های برق آبی، ارزیابی جامع اثرات زیست‌محیطی انجام شود و مکان‌یابی مناسبی انتخاب شود. نتایج پهنای راست در ارتباط با تأثیر درآمد سرانه بر ردپای زیست‌محیطی نیز نشان می‌دهد که افزایش درآمد سرانه معمولاً به مصرف بیشتر منابع طبیعی و انرژی منجر می‌شود که می‌تواند ردپای زیست‌محیطی را به میزان ۰/۶۵۷ افزایش دهد و باعث تخریب بیشتر محیط زیست شود؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود که سیاست‌گذاران جامعه را به مصرف کالاها و خدمات سازگار با محیط زیست از طریق سیاست‌های تشویقی و آموزش تشویق نمایند. با توجه به نتایجی که از این پژوهش به دست آمد، تولیدات صنعتی نیز، به دلیل مصرف بالای انرژی و مواد اولیه، از عوامل مهم افزایش ردپای زیست‌محیطی هستند؛ بنابراین لازم است سیاست‌هایی در جهت تشویق صنایع به استفاده از فناوری‌های کم‌مصرف و انرژی‌های تجدیدپذیر تدوین شود.

۸. تعارض منافع

مقاله تعارض منافع ندارد.

ORCID

Masoud Cheshmaghil https://orcid.org/0009-0002-5985-1937
Javad Shahraki https://orcid.org/0000-0001-8089-7601
Reza Ashraf Ganjoei https://orcid.org/0000-0003-3854-8445

۹. منابع

اصفهانی، قبادی و آذربایجانی. (۱۴۰۱). تحلیل رابطه بین رشد اقتصادی، مصرف انرژی و ردپای زیست‌محیطی در منتخبی از کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه. پژوهش‌های اقتصادی (رشد و توسعه پایدار)، ۸۶(۲۲)، ۲۳۲-۲۰۳.

پژوهشکده پولی و بانکی جمهوری اسلامی ایران. (۱۳۸۷). «بررسی تأثیر عدم قطعیت تورم بر رشد اقتصادی».

جعفری صمیمی، احمد و اعظمی، کوروش. (۱۳۹۱). «عدم قطعیت اقتصاد کلان و اندازه دولت: شواهد کشورهای منتخب در حال توسعه»، فصلنامه راهبردی اقتصادی، سال اول، شماره سوم، صفحات ۱۶۸-۱۴۹.

حسینی، مهدی؛ برقچی، معصومه؛ باقرزاده، فهیمه و صیامی، قدیر. (۱۳۹۴). ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی گسترش بی‌رویه شهرها (مطالعه موردی: پروژه مسکن مهر ـــ شهر طرقبه)، فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، ۵ (۱۸): ۵۸-۴۳.

خورشیددوست، علی‌محمد. (۱۳۸۶). زمینه‌های بهبود جایگاه محیط زیست در رویکردهای اقتصادی و توسعه‌ای، مجلهٔ اطلاعات سیاسی اقتصادی، شماره ۲۳۶-۲۳۵، صفحات ۱۵۹-۱۴۸.

رجبی، مصطفی و تاج‌الدین، نسیبه. (۱۳۹۵). تحلیل تأثیر نااطمینانی اقتصاد کلان بر سرمایه‌گذاری و رشد اقتصادی در ایران طی سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۵۹. فصلنامه اقتصاد کاربردی، سال ۶، ۲۲-۱۵.

سایه‌میری، علی و نظری، رقیه. (۱۳۹۹). تأثیر شهرنشینی بر تخریب محیط زیست در کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته. مجله مطالعات علوم محیط‌زیست، دوره پنجم، شماره اول، فصل بهار، سال ۱۳۹۹، صفحه ۲۲۵۰-۲۲۴۴.

صادقی، سیدکمال؛ سجودی، سکینه؛ احمدزاده دلجوان، فهیمه. (۱۳۹۵). بررسی تأثیر متغیرهای جمعیتی بر کیفیت محیط زیست بر مبنای الگوی STIRPAT. مجله علوم و فناوری محیط زیست، ۱۸ (ویژه‌نامه شماره ۳)، ۲۷۵-۲۵۷.

فطرس، محمدحسن و قربان سرشت، مرتضی. (۱۳۹۱). اثر رشد شهرنشینی بر مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن: مقایسه سه نظریه. مطالعات اقتصاد انرژی، ۹(۳۵): ۱۶۸-۱۴۷.

فلاحی، فیروزه و حکمتی‌فرد، صمد. (۱۳۹۲). بررسی عوامل مؤثر بر مقدار انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در استان‌های کشور (رهیافت داده‌های تابلویی)، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۲(۶): ۱۵۰-۱۲۹.

معین‌الدینی، سمانه؛ زارع مهرجردی، محمدرضا؛ امیرتیموری، سمیه و مهرابی بشرآبادی، حسین. (۱۴۰۳). تأثیر رانت منابع طبیعی بر کیفیت محیط زیست (مطالعه موردی: منتخبی از کشورهای منا). محیط‌شناسی. ۵۰(۱)، ۱۱۰-۹۷.

References

Aldegheishem, A. (2024). Factors affecting ecological footprint in Saudi Arabia: a panel data analysis. Frontiers in Environmental Science. https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1384451.

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. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10786-0.

Anser, M., Syed, Q., Lean, H., Alola, A., & Ahmad, M. (2021). Do Economic Policy Uncertainty and Geopolitical Risk Lead to Environmental

Degradation? Evidence from Emerging Economies. Sustainability, 13, 5866. https://doi.org/10.3390/SU13115866.

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. https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2017.05.009.

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

Glezman، L.، & Fedoseeva، S. (2023). Impact of Industrial Production on the Regions' Ecological Profile. Science Outpost. https://doi.org/ 10.36683/2076-5347-2023-1-63-4-10.

Gorus، M.، & Karagol، E. (2023). Factors affecting per capita ecological footprint in OECD countries: Evidence from machine learning techniques. Energy & Environment, 34, 2601-2618. https://doi.org/10. 1177/0958305X221112913.

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

Grădinaru, G., Oprea, A., Petrașcu, G., & Timiș, D. (2023). Exploring the Spatial Patterns of Ecological Footprints from the Perspective of Renewable and Non-Renewable Energy Use. Economic Insights-Trends and Challenges. https://doi.org/10.51865/eitc.2023.03.06.

Jeperson, J., 2009, "Post-Keynesian Economics: Uncertainty, Effective Demand and (un) Sustainable Development", Paper Presented at the Dijon-Conference, Dijon, pp: 10-12.

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

Khan, Y., Khan, M., & Zafar, S. (2023). Dynamic linkages among energy consumption, urbanization, and ecological footprint: empirical evidence from NARDL approach. Management of Environmental Quality: An International Journal. https://doi.org/10.1108/meq-10-2022-0278.

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

Nathaniel, S., & Khan, S. (2020). The nexus between urbanization, renewable energy, trade, and ecological footprint in ASEAN countries. Journal of Cleaner Production, 272, 122709. https://doi.org/10.1016/ j.jclepro.2020.122709.

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

Pollution Research، 26، 27168-27179. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05924-2.

Nathaniel, S., Nwodo, O., Sharma, G., & Shah, M. (2020). Renewable energy, urbanization, and ecological footprint linkage in CIVETS. Environmental Science and Pollution Research, 27, 19616-19629. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08466-0.

Neagu, O. (2020). Economic Complexity and Ecological Footprint: Evidence from the Most Complex Economies in the World. Sustainability. https://doi.org/10.3390/su12219031.

Newman, P. W. G., & Kenworthy, J. R. (1989). Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook. Gower Technical, Aldershot.

Radmehr, R., Shayanmehr, S., Ali, E. B., Ofori, E. K., Jasińska, E., & Jasiński, M. (2022). Exploring the nexus of renewable energy, ecological footprint, and economic growth through globalization and human capital in G7 economies. Sustainability, 14(19), 12227.

Rudlin, D., & Falk, N. (1999). Building the 21st Century Home: The Sustainable Urban Neighborhood. Architectural Press, Oxford.

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. https://doi.org/10.1007/ s10668-021-01614-7.

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.

Sarwar, N., Junaid, A., & Alvi, S. (2024). Impact of urbanization and human development on ecological footprints in OECD and non-OECD countries. Heliyon, 10.

Scherer, L., & Pfister, S. (2016). Global water footprint assessment of hydropower. Renewable Energy, 99, 711-720. https://doi.org/10.1016/ J.RENENE.2016.07.021.

Solarin, S. A., Al-Mulali, U., & Ozturk, I. (2017). Validating the environmental Kuznets curve hypothesis in India and China: The role of hydroelectricity consumption. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80, 1578-1587.

Wang, P., Vu, W., Zhu, B., & Wei, Y. (2013). Examining the impacts factors of energy-related CO2 emission using the STRIPAT model in Guangdong Province, China. Applied Energy, 106(4), 65-71.

Wang, Z. (2019). Investigation of the ecological footprint’s driving factors: What we learn from the experience of emerging economies. Sustainable Cities and Society. https://doi.org/10.1016/J.SCS.201

Zambrano-Monserrate, M., & Ormeño-Candelario, V. (2023). How Do Natural Resource Rents Affect the Ecological Footprint? A Study for 24 Nations. Journal of Environmental Assessment Policy and Management. https://doi.org/10.1142/s1464333223500229.

استناد به این مقاله: چشم‌اغیل، مسعود؛ شهرکی، جواد؛ اشرف گنجوی، رضا. (۱۴۰۳). بررسی تأثیر عدم قطعیت نرخ شهرنشینی و مصرف انرژی برق آبی بر ردپای زیست‌محیطی در ایران؛ رویکرد رگرسیون فازی، فصلنامه اقتصاد محیط زیست و منابع طبیعی، ۱۰(۴)، صفحات ۹۱-۱۲۲.

Journal of Environmental and Natural Resource Economics licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.